

제15호 Aug 2016

KISTEP InI

Inside and Insight



InI View

국민 건강 보호를 위한 대기오염 노출 저감 정책

- 이기영 서울대학교 환경보건학과 교수

법과 제도의 개선을 통한 생활화학물질의 위해성 감독 강화

- 홍윤철 서울대학교 의학과 교수

InI People

이상천 - 국가과학기술연구회 이사장

R&D InI

정밀의료의 성공 전략

생활화학제품의 안전관리방안

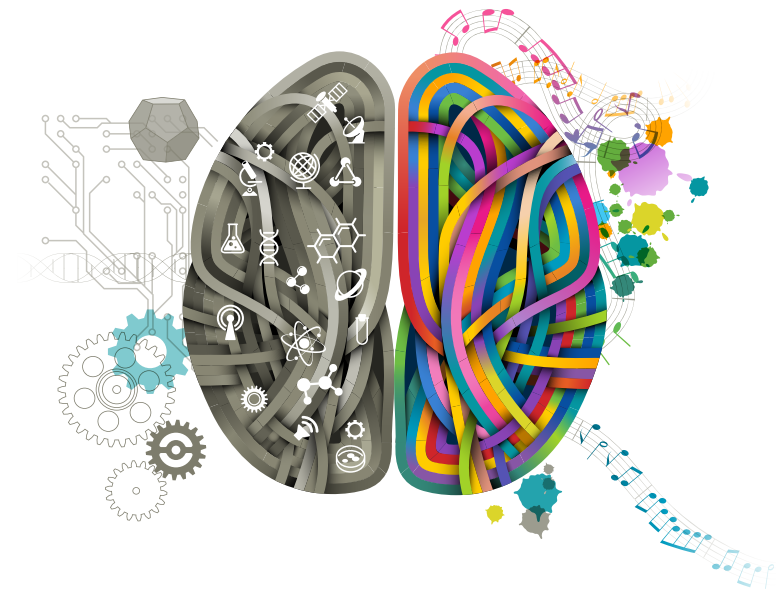
제4차 산업혁명 시대, 미래사회 변화에 대한 전략적 대응 방안 모색

환경 R&D와 환경산업 육성을 위한 제언

Contents

KISTEP InI

제15호 Aug 2016



Message from the President

건강하고, 안전하며, 풍요로운 미래 대한민국, 과학기술이 만든다_ **02**

InI View

국민 건강 보호를 위한 대기오염 노출 저감 정책_ **04**

- 이기영 서울대학교 환경보건학과 교수

법과 제도의 개선을 통한 생활화학물질의 위해성 감독 강화_ **06**

- 홍윤철 서울대학교 의학과 교수

InI People

“성실한 도전과 실패를 용인하는 힘,
우리 과학기술과 출연연 혁신 원동력 될 것”_ **08**

- 이상천 국가과학기술연구회 이사장

R&D InI

정밀의료의 성공 전략_ **14**

생활화학제품의 안전관리방안_ **33**

제4차 산업혁명 시대, 미래사회 변화에 대한
전략적 대응 방안 모색_ **45**

환경 R&D와 환경산업 육성을 위한 제언_ **59**

KISTEP News

前 경제부총리 초청, 제28회 KISTEP 아카데미 개최_ **71**

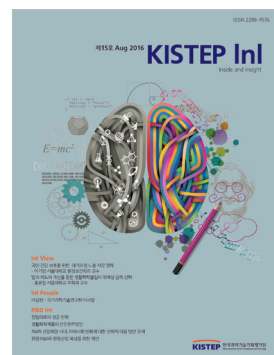
미래 신성장 지원체계 구축을 위한 업무협약 체결_ **72**

'3D 프린팅과 산업혁명 4.0'... 제48회 KISTEP 수요포럼 개최_ **73**

박영아 원장, 과총 창립 50주년 기념 심포지엄 주제발표_ **74**

R&D Infographic

유럽 국가의 혁신성과 분석_ **75**



KISTEP InI(Inside and Insight) 제15호 2016년 8월

발행년월일 : 2016년 8월 29일

등록년월일 : 2014년 3월 25일

발행처 : 한국과학기술기획평가원 (KISTEP)

발행인 : 박영아

편집인 : 한국과학기술기획평가원 홍보기획팀

주소 : 서울 서초구 마방로 68(양재동) 동원산업빌딩 9~12층

서울 서초구 마방로 68(양재동) 트러스트타워 4~6층

전화 : (대표) 02-589-2929 (팩스) 02-589-2260

<http://www.kistep.re.kr/>

©한국과학기술기획평가원, 2014

※한국과학기술기획평가원에서 발행하는 **KISTEP InI**는 무단 전재와 복제를 금합니다.

건강하고, 안전하며, 풍요로운 미래 대한민국, 과학기술이 만든다

저성장, 저출산·고령화 등 뉴노멀 시대에 직면한 우리 현실과 제4차 산업혁명 시대를 앞두고, 대한민국 미래의 장기 비전과 전략을 제시해야 한다는 목소리가 높습니다. 특히, 단기적인 현안 이슈만이 아니라 장기적인 안목의 진단과 전망이 필요하고, 이제는 과학기술을 기반으로 ‘경제성장과 삶의 질 향상’ 이 두 가지 가치가 조화를 이루는 ‘새로운 국가 발전 전략’이 필요한 때입니다.

최근 우리 사회는 미세먼지, 가습기 살균제, 음식물이나 생필품에 함유된 유해물질, 학교 운동장 트랙과 정수기 내 중금속 검출 등 일상생활 속에서 국민 건강과 안전, 환경을 위협하는 문제가 끊이지 않고 있습니다. 얼마 전 OECD의 ‘2016년 더 나은 삶의 지수(Better Life Index, BLI)’에서 한국 국민의 삶의 질이 조사 대상 38개국 중 28위로, 꼴찌에 가까운 수준이었습니다. 가장 큰 요인으로는 최악의 대기 오염(38위)이었습니다. 국민의 답답함과 불안감, 그리고 그것이 국가경쟁력으로도 직결될 수 있다는 것을 보여줍니다. 뿐만 아니라 가습기 살균제 사건의 충격으로 ‘노케미족’이 등장하고, ‘화학물질 포비아’가 확산되는 등 일반 국민의 안전에 대한 불안·불신이 커지고 있습니다.

이제는 미래 성장동력 발굴뿐 아니라 국민의 삶의 질을 높이기 위해 다양한 위험으로부터 국민 건강과 행복, 사회 안전망을 만들어가는 것이 중요합니다. 과학기술계도 과거 급속한 압축성장 과정에서 소홀했었던 ‘과학기술의 사회적 책임’을 다시 한 번 돌아보고, 준비해야 합니다.

무엇보다도 국민의 삶의 질을 제고하고, 다양한 사회문제를 해결하기 위한 공공 R&D 역할이 중요해졌습니다. 이러한 맥락에서 KISTEP Ini 제15호 인터뷰에서는 이상천 국가과학기술연구회 이사장님을 만나, 미래 사회 변화와 과학기술의 공공성, 정부 출연(연)의 존재 이유와 새로운 미션, 국가적·사회적 현안해결을 위한 진정한 융합연구의 패러다임

전환 등에 대해 깊은 조언을 나누었습니다.

또한, 최근 OECD 발표에 따르면, 대기오염으로 인한 조기 사망자가 2010년 300만 명에서 2060년 600만~900만 명으로 급증할 전망입니다. 이 가운데 한국은 100만 명당 조기 사망자가 359명에서 1109명으로 3배 이상 증가하고, OECD 국가 중 조기사망자가 1000명을 넘는 유일한 국가라고 합니다. 눈에 보이지 않을 정도로 가늘고 작은 미세먼지의 위험성 연구가 지속적으로 발표되며, 세계보건기구(WHO)가 발암물질로 지정할 정도로 인체에 치명적인 이 부분에 대해 정부가 근본적인 원인 규명과 보다 실효성이 있는 대책을 마련해야 합니다.

다행히 지난 8월 10일 박근혜 대통령 주재로 열린 제2회 과학기술전략회의에서도 9대 국가전략프로젝트 중 미세먼지해결, 정밀의료 등이 삶의 질과 관련된 분야로 확정되었습니다. 아울러 국민을 불안하게 했던 초미세먼지 문제를 해결하기 위해 2019년까지 발생 원인을 규명하고, 2023년까지 미세먼지 배출량을 현재의 절반으로 줄이는 획기적인 저감 방안도 내놓기로 했습니다.

이러한 맥락에서 KISTEP Ini 제15호에서는 국민의 건강을 보호하기 위한 대기오염 노출 저감 방안, 환경 R&D와 환경 산업 육성을 위한 다양한 정책적 제언을 담아보았습니다. 또한, 개인별 맞춤 치료를 가능하게 할 새로운 의료적 접근법인 ‘정밀의료’의 성공 전략을 담았습니다. 또, 최근 건강·안전 이슈와 관련하여 생활화학제품에 관한 국내외 정책 현황을 고찰하고, 국내 현실에 적합한 안전 관리 방안을 제시했습니다. 이외에도, 미래의 핵심 키워드인 ‘4차 산업혁명과 미래사회 변화’의 주요 특징과 교육시스템 혁신 등 범부처 차원의 전략적 대응방안에 대한 다양한 제언을 담았습니다.

과거 그 어느 때보다도 과학기술에 대한 이해와 전문성이 요구되는 시기입니다. 다양하고 복잡한 사회 현안뿐 아니라 미래 ‘더욱 풍요롭고 건강하고 안전한 사회’를 위해서도 명확한 원인 규명과 기술개발을 포함한 다차원적인 정책 디자인 역량, 그 바탕에 과학적 지식과 소양이 중요해졌습니다.

국민의 건강과 안전, 삶의 질 향상을 담보하는 과학기술의 역할과 사회적 책임을 돌아보고, 정부·기업·대학·출연(연)이 장기적인 안목으로 통찰력을 발휘해서 다양한 문제해결의 실마리를 함께 고민해야 합니다. 우리 과학기술 정책과 정부 전략에서 이를 위한 과감한 혁신과 실행을 기대해 봅니다.

감사합니다.

한국과학기술기획평가원장

박명아

국민 건강 보호를 위한 대기오염 노출 저감 정책

이기영_서울대학교 환경보건학과 교수



호흡을 해야 하는 인간에게 공기는 생존을 위한 필수조건이다. 그렇기에 국민들이 황사, 미세먼지, 초미세먼지 등 다양한 대기오염 관련 용어에 익숙해지는 현실은 바람직하지 않다. 최근

대기오염을 줄이기 위해 여러 정책들이 쏟아지고 있지만 주로 기술에 의존하는 정책이 주를 이루고 있어 정책의 목적에 대한 고찰이 필요해 보인다.

대기오염 저감 정책의 목적에서 사람의 건강에 미치는 영향을 줄이는 것이 가장 중요할 것이다. 건강에 미치는 영향은 노출되는 오염물질, 노출되는 수준, 노출되는 시간 등 몇 가지 중요한 요소에 의해 결정된다. 오염물질은 물질에 따라 다른 성질을 보이며 독성도 다르다. 대기 중에 존재하는 오염물질들은 오염원에서 직접 배출되는 물질과 환경에서 생성되는 이차오염물질 등이 있다.

사람은 환경에 따라 다양한 오염물질의 영향을 받을 수 있기 때문에 하나의 오염물질만을 중심으로 한 정책은 실효성이 떨어질 뿐 아니라 경우에 따라 한 가지 물질은 저감하지만 다른 물질을 배출하는 문제를 발생시킬 수 있다. 그러므로 대기오염 저감 정

책은 우선 '초미세먼지 저감 정책'과 같이 한 가지 오염물질에 대한 정책보다는 다양한 오염물질을 포함한 종합적인 대기오염 저감 정책 마련으로 접근해야 한다.

특정 대기오염물질이 건강에 미치는 영향은 노출되는 수준이나 시간에 의해 결정된다. 예를 들면 초미세먼지 노출 수준은 사람들이 거주하는 각 환경의 초미세먼지(PM2.5)의 농도와 각 환경에 거주하는 시간에 의해 영향을 받는다. 사람마다 각 환경에 거주하는 시간이 다르며, 집단을 제외하고는 사람들의 환경별 거주 시간을 조절하기 어렵기 때문에 초미세먼지 노출 수준을 줄이기 위해서는 환경내에 존재하는 초미세먼지 농도를 감소시켜야 한다.

2011년 서울 시민들이 다양한 장소에서 초미세먼지에 얼마나 노출되는지 연구했다. 연구 당시 서울 시민의 개인별 노출 수준은 $19.8 \pm 15.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었고 일부 집단의 개인별 노출은 전체 평균의 2배 이상인 $43.1 \pm 28.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정됐다. 이는 같은 지역에 살더라도 사람의 활동패턴에 따라 초미세먼지 노출 정도가 2배 이상 차이날 수 있다는 결과를 보여줬다.

또한, 장소별 노출 정도를 살펴보면, 서울 시민이 가정에서(실내) 초미세먼지에 노출된 정도는 36.2%로 가장 많은 비중을 차지했고(미국과 비교해서는 낮은 수준), 식당에서의 노출 정도는 29%로 매우 높았다. 이 연구 결과에 따르면 식당에서의 미세먼지의 농도 증가는 흡연과 직화구이에 의한 것이었다. 2015년 1월 1일

부터 식당에서 흡연이 금지되어 최근 식당에서의 노출이 차지하는 비중이 조금 낮아졌겠지만 여전히 직화구이는 오염물질 노출에 중요한 역할을 할 것으로 생각한다.

사람이 같은 행동 패턴을 갖고 있어도 오염물질에 따라 다른 양상을 보일 수 있다. 2014년 사무실 근로자의 개인별 황사와 초미세먼지 노출 정도를 측정했는데, 이 때 초미세먼지 개인별 노출은 각각 $22.5 \pm 11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $49.9 \pm 30.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 큰 차이가 있었다. 황사정보가 있었던 날은 미세먼지(PM10)의 대기 농도가 $114.9 \pm 38.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높았으나 개인별 노출은 $30.9 \pm 17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮았다. 미세먼지 농도가 높은 날에는 실내에 머무르면 미세먼지의 실내 침투가 적어서 노출 수준을 낮출 수 있지만 초미세먼지는 실내에 비교적 침투가 잘되기 때문에 사람이 실내에 머무른다고 해도 노출이 감소되는 것은 아니다. 이 연구를 통해 초미세먼지는 실내 대피를 위한 예·경보 시스템 구축보다 근본적인 저감이 필요하다는 것을 알 수 있다.

오염물질의 발생은 크게 각 오염원의 대기오염물질 방출율과 각 오염원의 사용 수준에 영향을 받는다. 즉, 오염원의 방출율이 저감된다고 해도 오염원에서 방출되는 시간이나 정도가 줄지 않으면 궁극적인 대기오염 저감은 불가능하다는 것이다. 예를 들어, 대기오염의 주요 원인으로 경유차가 종종 언급되곤 하지만, 경유차 배출률을 줄이는 유로배출기준이 적용된다고 해도 국민이 경유차 사용을 늘리면 저감 효과가 없다. 이런 경우, 경유차의 대기



오염물질 배출률을 규제하면서 동시에 경유차와 휘발유 같은 화석연료를 이용한 자동차의 사용을 줄이도록 유도하는 정책이 필요하다. 즉 국민의 참여가 필요한 것이다. 화력발전소도 마찬가지다. 전기 사용 억제를 유도하는 정책이 없이는 저감 효과가 없을 수 있다.

결론적으로 대기오염 저감 정책은 국민의 건강 보호를 위한 정책이므로 한 국가의 대기오염 종합대책이라면 적어도 모든 대기오염물질들에 대한 정책이어야 한다. 특히, 국민의 대기오염물질 노출이 주로 실내에서 발생하므로, 실내 환경에 대한 관리도 필수적으로 포함되어야 한다. 마지막으로 국민의 적극적인 참여가 필요하다. 국민의 참여가 결여된 기술적 접근에 의한 정책은 그 효과가 크지 않을 것이다. 국민에게 문제를 알리고 참여를 유도하여 국민의 건강을 위한 그리고 국민에 의한 정책이 되도록 해야 한다.

법과 제도의 개선을 통한 생활화학물질의 위해성 감독 강화

홍윤철 서울대학교 의학과 교수



가습기 살균제 사건의 파장이 에어컨 필터, 방향제, 탈취제 등 생활화학제품 전반으로 퍼져나가고 있다. 가습기 살균제 사건이 발생한 사유는 살충제, 소독제, 향

균제와 같은 살생물제(biocide)에 대한 안전성을 판매자가 입증하지 않아도 제품의 판매가 가능하였기 때문이다. 사실 가습기살균제 외에도 소비자 시장에서는 많은 종류의 생활화학제품들이 시판되어 사용되고 있다. 특히 이러한 생활화학제품들은 산모나 어린이 등 건강영향에 민감한 집단들까지 사용하기 때문에 보다 철저하고 책임있는 제도가 뒤따르지 않는다면 또 다른 가습기 살균제 사태가 일어나지 않으리라고 보장할 수 없다.

유럽연합의 경우, 살생물제의 성분에 대한 등록 및 평가제도 뿐 아니라 살생물제품에 대해서도 안전성평가를 하여야만 허가를 받을 수 있게 되어 있다. 미국의 경우도 성분뿐 아니라 최종 판매되어 소비자가 사용하는 제품에 대해서도 승인을 받도록 되어 있다. 우리나라에서도 지난 5월 환경부가 제2의 가습기 살균제 사건을 막기 위하여 향균, 살균 기능 제품의 인체 위해성 여부를 조사하는 내용의 '살생물제 관리 개선 대책'을 발표한 바

있다. 그 내용을 보면 앞으로 2년 동안 살생물 화학물질과 제품에 대해 전수 조사한 다음에 안전성이 확인된 물질만 제품 제조에 사용하도록 하고 유해물질이 들어 있는 제품은 시장에서 퇴출시키는 '살생물제품 허가제'를 도입한다는 계획이다. 사실 이러한 계획이 잘 수행되고 지켜진다면 소비자의 입장에서는 크게 걱정할 일은 아닐 수 있다. 그런데 실제로 어떻게 계획이 수행되는지는 지켜보아야 한다. 안전성을 확인하는 규정이 있다고 실제로 안전하다고 할 수는 없기 때문이다. 예를 들어 대표적인 환경호르몬으로 알려져 있는 프탈레이트의 경우 제품함량의 1%까지는 안전하다고 보고 그 이하로 검출되는 제품은 사용을 허가하고 있다. 그런데 제품함량의 1%까지는 안전하다는 과학적 근거는 어디에도 찾아볼 수가 없다. 실은 1%라도 그 제품을 많이 사용하게 되면 그만큼 많이 노출될 수 있는 것이다. 살생물제품의 경우도 어떠한 원칙이 적용되어 안전하다고 판단이 되는지 보다 구체적인 기준은 좀 더 지켜보아야 하지만 국민의 건강을 지켜야 한다는 입장에서 위해성평가의 기준을 강화시켜 적용하여야 할 필요가 있다.

한편 환경부는 화학물질의 관리감독을 위하여 '화학물질평가와 등록에 관한 법'을 제정한 바 있고 2015년 4월부터 시행하고 있다. 이 법에 따라 위해우려제품 안전표시기준이 적용되는 생활화학제품을 고시하고 있는데 세정제, 방향제, 소독제 등 일상 생활에서 흔히 사용되는 제품들을 포함하고 있다. 예를 들어 방

유럽연합(EU)과 한국의 살(殺)생물제(biocide) 관리 비교

구분	한국	EU(유럽연합)
제품종류	방충제·소독제·방부제·탈취제 등 생활화학제품 총15종	23종
사용금지 화학물질	PHMG 등 26종(문신용 염료 제외)	500여 종

※ 살생물제는 가습기 살균제 등 사람과 동물을 제외한 유해 세균을 죽이거나 활동을 방해·저해하는 제품임.

유럽연합(EU)과 한국의 살(殺)생물제(biocide) 관리 비교

구분	한국	EU(유럽연합)
2-메틸-4-이소티아졸린-3-온	탈취제, 방향제	유독물질, 흡입할 경우 치명적, 보호장갑·보안경·보호의 착용 후 취급.
클로록실레놀	탈취제, 방향제	흡입시 폐렴, 심폐정지, 급성 호흡곤란 증후군 유발 가능성
시트릭에시드(구연산)	탈취제, 방향제, 소독제	눈·피부·호흡기에 자극성, 호흡을 통한 염증 유발
나프탈렌	방충제	발암물질, 신장·간 등에 독성
p-디클로로벤젠	방충제	발암가능물질, 폐육종증, 호흡곤란 유발

※ 출처: 조선일보 박은호 기자(2016.05.03)

향제는 일반가정, 사무실, 차량 등 일정한 생활공간내에서, 혹은 의료, 섬유, 신발 등생활용품에서 좋은 냄새를 발산시켜 사용자의 기분을 상쾌하게 하는 목적으로 사용되는 제품이다. 이 법은 이와 같이 우리들의 일상생활에서 쉽게 노출되는 물질과 제품에 대한 법적인 관리 근거를 마련함으로써 생활화학물질로 인한 위해를 줄이고 안전을 강화시켰다고 할 수 있다. 그런데 문제는 위해우려제품으로 지정되고 또 제품에 위해우려 제품이라고 표기되었다 하더라도 시장에서 상품으로 팔리는 데 제한이 있는 것은 아니므로 이를 확인하고 사용할 때 주의해야 할 책임은 소비자에게 있다는 것이다. 즉 소비자가 주의해서 제품에 표기된 내용을 읽어보고 알아서 잘 사용해야 하는 것이다. 사실 이러한 책임을 소비자에게 전가하는 것은 바람직하지 않다. 예를 들어 탈취제에 들어있는 물질은 폼알데하이드, 메탄올, 산화에틸렌, 나프탈렌, 벤젠, 글리옥살, 트리클로로에틸렌 등 상당히 많다. 이러한 물질들이 탈취제의 성분으로 들어갈 수 있고 그 내용이 표기되어 있다고 하여도 소비자가 쉽게 알기 어려운 경우가 대부분이기 때문에 소비자에게 이러한 제품을 사용하여 생기는 문제에 책임을 지게 하는 것은 좋은 정책이 아닌 것이다. 한편으로는 생활환경에서 사용되는 생활화학제품에 대한 국민의 알 권리를 보다 강화할 필요가 있다. 예를 들어 페브리즈와 같은 흔히 사용되는 제품에도 어떠한 성분이 들어있는지 표기가 제대로 되어 있지 않아서 미국제품과 한국제품의 성분이 다

르다는 등 혼란과 우려를 불러일으키고 있다. 따라서 생활화학 제품에 사용된 모든 성분을 표기하도록 하고 이를 위반했을 때는 등록을 취소하거나 제품의 판매를 금지하는 등의 조치를 취할 필요가 있다.

이와 같은 여러가지 법적인 조치에도 불구하고 생활화학제품의 사용으로 인한 건강문제의 발생을 모두 막을 수는 없을 것이다. 따라서 건강문제가 발생했을 때 손해배상제도를 통하여 피해자의 피해를 보상하는 제도를 실시하는 것이 바람직하다. 또한 법적인 의무조항을 모두 준수하였다면 생활화학제품을 만든 제조사에게 제재나 불이익처분을 하기는 어렵기 때문에 환경오염피해보상보험 등의 제도를 통하여 피해자가 구제될 수 있도록 제도를 만들어야 한다. 사실 환경부에서는 '환경오염피해 배상책임 및 구제에 관한 법률'을 입법화하여 이를 제도화해나가는 과정에 있다. 이와 같은 제도는 피해자의 구제뿐 아니라 기업의 부담을 덜어준다는 측면에서도 조기에 정착시켜나갈 필요가 있다. 그런데 이러한 제도를 시행하는 데 있어서 중요한 문제 중의 하나는 생활화학제품의 사용과 피해자의 건강문제의 인과관계를 증명하는 일이다. 현실적으로 피해자들이 이러한 인과관계를 증명하여 적절한 보상을 받는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 인과관계를 평가할 수 있는 전문가들의 평가체계를 만드는 일도 시급히 해야 할 일중의 하나이다.



“성실한 도전과 실패를 용인하는 힘, 우리 과학기술과 출연연 혁신 원동력 될 것”

이상천 국가과학기술연구회 이사장

시대가 빠르게 변하고 있다. 이 흐름에 발맞춰 과학기술계 패러다임 또한 변해야 한다는 목소리가 크다.

박영아 한국과학기술기획평가원 원장은 이 같은 문제의식을 공유하고 함께 고민하고자 이상천 국가과학기술연구회 이사장을 만났다. 이날 인터뷰에서 이 이사장은 “놀라운 속도로 발전한 자랑스러운 우리나라가 압축성장의 과정에서 가치관의 혼란으로 잠시 어려움을 겪고 있지만, 혁신적 시도로 이를 타개할 수 있을 것”이라면서 “연구자들이 도전을 두려워하지 않고, 실패도 그 가치를 인정받는 환경에서 신명나게 연구할 수 있도록 R&D 생태계를 만드는 것이 국가과학기술연구회의 임무이자, 나의 목표”라고 강조했다.

이상천 국가과학기술연구회 이사장은 서울대학교 기계공학과를 졸업하고 KAIST 대학원에서 기계공학 석사, 미국 노스웨스턴대 대학원에서 기계공학 박사 학위를 받았다. 영남대학교에서 교수, 총장을 거쳐 한국기계연구원 원장을 역임했고, 한국산업단지공단 창원혁신클러스터추진단 단장을 맡아 산학연을 두루 거친 인물로 알려져 있다. 이후 2014년 6월 초대 국가과학기술연구회 이사장에 취임해 출연연 융합연구 생태계 정비에 앞장서고 있다. KISTEP Inl 15호 발간을 앞두고 박영아 KISTEP 원장은 이상천 이사장을 만나 출연연 혁신 방향에 대한 고민을 나눴다.

과거 기초기술연구회와 산업기술연구회로 분리돼 있었던 정부출연연구기관(이하 출연연) 행정조직이 이번 정부 들어 국가과학기술연구회(NST, 이하 연구회)로 통합됐다. 출범과 함께 부임하셔서, 여러 가지 목표나 비전도 남다르셨을 것 같다. 2년이 지난 현재 자평해보신다면.

한국기계연구원 원장으로 재직할 때는 기초기술연구회와 산업기술연구회로 나뉘져 있던 때였고, 기계연이 산업기술연구회 소속이었기 때문에 기초기술연구회와는 거의 교류가 적었다. 출연연에 대해 나름의 이해가 있었지만, 쉽지 않았다. 그래도 많은 부분 여건이 좋아졌고, 발전했다고 느끼는 부분이 있다. 연구회 통합의 가장 큰 배경이 됐던 것이 ‘출연연 간 벽 허물기’다. 여러 사업을 통해 연구자들이 연구에만 몰입할 수 있는 여건을 만들기 위해 노력하고 있다.

예를 들자면.

크게 세 가지다. 첫째는 연구회에서 연 1천억 원 정도 예산으로 진행되는 융합연구 사업이다. 서로 다른 전공의 연구자들이 하나의 목표를 설정하고, 그 목표를 위한 별도의 연구 집단을 구성해 한 곳에 모여 연구한다. 결실이 올해부터 나타나기 시작했다. 두 번째는 행정 효율화다. 지금까지 출연연 행정 절차는 기관장과 기관 편의 중심이었다.

이것을 연구자 중심으로 바꿔보려 한다. 마지막으로 공동 장비 활용이다. 자신의 연구실에 있는 연구 장비를 다른 연구자와 공유하는 것은 단순히 자원 낭비를 막는 것뿐만 아니라 연구자 사이의 벽을 낮추는 데도 효과가 있다. 이런 노력들은 결국 연구자들을 둘러싼 문화의 문제다. 문화가 바탕이 돼야 좋은 성과가 나타난다. 출연연의 성과가 국민 생활뿐 아니라 경제·사회적 발전에 영향을 주는데 그 바탕이 될 수 있도록 꾸준히 힘쓰려고 한다.

연구회에서 진행하는 융합연구 사업에 기대와 관심이 크다. 특히 민간에서 수행하기 어렵거나 시장의 역할에만 맡길 수 없는 우주항공, 원자력, 핵융합 등 거대기술 연구를 통해 최근 사회적 이슈인 지구 온난화와 고령화, 재난 등에 대응할 수 있지 않을까 싶어서다. 그러기 위해서는 과제 선정 과정이 상당히 중요할 것 같다.

사실 처음 융합연구 사업을 시작할 때는 애로사항이 많았다. 일단 연구회가 대형과제의 기획, 선정, 관리, 성과평가 등 전 과정에 경험이 충분치 않아서, 출연연에서 파견 나온 분들의 도움을 받았다. 다만 확실하게 주문한 것이 있다. 선정은 융합연구위원회에서 독립적으로 하지만, 단순히 점수 순위대로 과제를 선정하지 말라는 것이었다. 가능성과 창의적인 결과를



“앨빈 토플러가 저서 『부의 미래』에서 변화의 속도에 관해 언급한 유명한 구절이 기억난다. ‘기업은 시속 100마일로 변화하는데 정부관료 조직과 규제기관은 25마일, 정치는 3마일, 법·제도는 1마일로 변한다’는 이야기였는데, 과학기술계도 지난 20년간 여러 가지 제도나 문화의 패러다임 변화를 논의하고 있지만 충분하지 않다.”

선도형으로 선정된 화학공정융합연구단(Convergent Chemical Process)은 촉매 연속 생산기술을 개발 중인데, 성공하면 글로벌 시장 조기진출 가능성도 높다.

융합연구 사업 선정의 핵심이 ‘창의성’이라는 말씀을 들으니, 박근혜정부에서 강조하는 ‘창조경제’, ‘성실 실패 용인’ 문화 정착과 일맥상통하는 것 같다. 어찌 보면 연구회의 많은 활동이 그동안 쉽지 않았던 ‘융합연구’ 뿐만 아니라 ‘성실도전연구과제’의 모범적인 테스트베드가 아닌가.

그렇다. 사실 ‘성실 실패 용인’ 제도가 이번 정부 들어 과학기술계에 생긴 커다란 변화 중 하나다. 우리나라 R&D 예산이 국민의 정부(김대중 정부)에서 이명박정부에 이르기까지 연 평균 9% 증가했다. 그 결과 경제 성장도 가능했고 과학기술 수준도 향상되었지만 아직 추격형 R&D 전략을 선도형으로 전환하지 못한 것이 문제다. 추격형 R&D가 경제 성장을 이룬 지금 상황엔 맞지 않는 것이다. 그 상태로 15년 이상 유지돼 왔다. ‘성실 실패 용인 제도’를 도입해 창의적이고 도전적인 연구를 장려하는 게 고무적인 이유다. 미국의 경우, 정부 R&D 과제 성공률이 15% 정도에 불과하다. 성공하지 못한 연구에서도 초기 목표는 달성하지 못했지만, 가치 있는 성과가 나올 수 있지 않나. 이에 착안해 연구회에서도 성실도전 R&D 적용체계 드림팀을 구성해 ‘성실도전제도’를 구현했다. 선정부터 체계화하고, 목표 달성은 못했지만 의미 있는 성과를 낸만한 연구에 대한 판단 기준을 만들고 있다. 우수한 연구자를 중심

“연구회 차원에서는 연구자에게 자율성을 부여하는 세계 각국의 연구개발시스템 사례를 찾고 벤치마킹하려고 노력 중이다. 인상적인 것 중 하나는 독일 연구회의 ‘연구 수행과 관련한 모든 권한을 연구자가 갖게 한다’는 하르나크 원칙이다. 우리 과학기술계도 연구자에게 자율성은 보장하되, 그에 따르는 책임을 강화하는 방향으로 변해야 한다.”

으로 연구단을 합리적으로 구성하는 것도 중요한 부분이다. 또 창의적·도전적 과제 성공을 위해 전문가들의 평가와 컨설팅이 이뤄질 수 있도록 ‘책임평가위원회’를 도입했다. 큰 틀에서 R&D 시스템의 체질 개선이다.

‘연구자가 연구에 몰두하게 하는 환경’에 대해서도 말씀하셨다. 어쩌면 연구의 자율성을 보장하는 문화에 관한 이야기가 아닐까 싶다. 앨빈 토플러가 저서 『부의 미래』에서 변화의 속도에 관해 언급한 유명한 구절이 기억난다. “기업은 시속 100마일로 변화하는데 정부관료 조직과 규제기관은 25마일, 정치는 3마일, 법·제도는 1마일로 변한다”는 이야기였는데, 과학기술계도 지난 20년간 여러 가지 제도나 문화의 패러다임 변화를 논의하고 있지만 충분하지 않다. 이사장님의 고민이 궁금하다.

그동안 R&D 투자 확대에도 불구하고 눈에 띄는 성과가 나오지 못한 이유는 정책의 문제일 수 있다. 하지만 이견 정책 담당자만의 책임이 아니다. 또한, 박 원장이 말씀하신 대로 제도나 사람들의 인식과 문화, 관행이 변하기 위해서는 많은 시간이 걸린다. 그러니 정책이 시대적 흐름을 따라가지 못한다는 말이 나오는 것이다. 연구회의 역할은 연구자가 판단하는 ‘가치 있는 것’에 대해 많은 사람들이 공감하게 하고, 어렵지만 혁신적으로 도전하도록 격려하는 것이라 생각한다. 특히 연구자의 자율성이 핵심이기 때문에 현재 연구회 차원에서는 연구자에게 자율성을 부여하는 세계 각국의 연구개발시스템 사례를 찾고 벤치마킹하



려고 노력 중이다. 인상적인 것 중 하나는 독일 연구회의 ‘연구 수행과 관련한 모든 권한을 연구자가 갖게 한다’는 하르나크 원칙이다. 우리 과학기술계도 연구자에게 자율성은 보장하되, 그에 따르는 책임을 강화하는 방향으로 변해야 한다. 그 과정에서 문제되는 규제가 있으면 개선하고, 수정·보완하여 자율성과 책임성을 기반으로 우수한 연구 집단을 구성하고 지원하려고 노력해야 한다.

연구회에서 ‘출연연과의 혁신간담회’ 등을 통해 출연연 혁신을 고민하신다고도 들었다. 지금까지 말씀해 주신 내용이 출연연을 둘러싼 환경, 제도적 고민이라면 이런 간담회는 실무자들과 직접 내부적 고민을 나누시는 건가. 실제로 과학기술계 안팎에서는 출연연 스스로의 혁신 노력에 대한 주문도 많다.

사실 출연연이 혁신의 대상으로 논의되는 자체가 여러 가지 시각 차이 때문이라고 본다. 이해관계자들은 연구자들에게 성과 창출을 요구하고, 연구자들은 자율성을 얘기한다. 팽팽한 양쪽의 입장을 잘 이해시켜 자율성을 보장하되, 연구자 중심의 R&D, 바텀 업(Bottom up) 방식의 선도적인 연구를 가능하도록 하는 게 우리의 역할이다. ‘출

연연혁신간담회'도 그런 과정의 하나다. 일선에서의 애로 사항을 듣고, 연구몰입 환경 조성을 위해 다양한 개선사항과 현장 의견을 수렴하는 창구다. 여기서 모인 고민들은 사안별로 구분해서 적극적으로 해결 방안을 모색한다. 현재까지 다수의 애로사항을 발굴했고 '출연연 애로사항 개선 TF'를 통해 해결해 나가고 있다. 이 같은 노력이 혁신적이고 도전적인 연구를 가능하게 하는 생태계를 만드는 데 일조할 것으로 기대한다.

출연연 역할에 대한 논의도 같은 맥락인 것 같다. 최근 외국의 과학기술 전문가가 “한국이 인공지능 분야에서 선두가 되려면 기초과학 연구를 튼튼히 해야 한다”고 조언했다. 기초과학의 중요성이야 국민들 모두가 공감하는데, 사실 지금까지는 마음이 급해 기초과학에 충분히 집중하기 어려웠다고 본다. 경제 발전을 뒷받침해야 하니 당장 기업이 활용할 수 있는 응용·개발 기술에 치중해왔기 때문이다. 그런데 2010년 오바마 정부가 新우주정책을 발표하면서 민간과 정부의 역할을 명확히 나눴고, 정부가 우주 스페이스 셔를 사업을 중단하는 대신 더 큰 도전이 필요한 소행성 탐사 연구를 하는 쪽으로 방향을 바꿨다. 그러니 일각에서는 우리나라 출연연도 국가가 해야 하는 거대과학에 뛰어들어야 한다고 하고, 기초 연구를 강조하다가도 급한 마음에 기술이전이 필요하다고 하고, 일각에서는 중소기업 지원연구나 실용화 연구도 해야 한다고 말한다. 출연연은 어떻게 중심을 잡아야 할까.

좋은 지적이다. 현재까지 정체성의 혼란을 겪을 정도로 출연연에 대한 주문도 많고, 각 요구에 대해 연구자들도 반응도 다양하다. 개인적으로는 과거 국가산업 기반 마련을 위해 추격형 혁신에 주력했던 출연연이 앞으로는 민간 기업이 도전하기 어려운 미지의 영역에, 대학이 할 수 없는 목적성 연구에 뛰어들어야 한다고 생각한다. 출연연 역할은 여러 가지가 있겠지만 가장 중요한 것이 기초원천연구다. 이런 연구를 지원하고자 연구회에서는 출연연 R&D가 10년 이상의 장기적 안목에서 국가 미래를 준비할 수 있도록 하는 'BIG 사업'을 내년부터 추진할 계획이다.

‘BIG 사업’에 대해 자세히 설명해 주신다면.

쉽게 말해 국가적으로 중요한 과제에 대해 연구목표를 달성할 때까지 안정적 연구 환경을 보장하려는 시도다. BIG(Big Issue Group) 사업은 특히 출연연 주요사업 중 국가적 현안을 해결하고, 미래 성장의 원천기술을 창출하고자 안정적으로 수행해야 할 과제를 장기과제(5년~10년)로 재기획하는 데 의의가 있다. 이 과제의 성공 확률이 15~20% 밖에 되지 않지만 그 과정에서 나오는 성과를 적극 활용할 수 있도록 산업화, 실용화를 도울 계획이다. 덧붙이자면 박 원장께서 말씀하신 내용 중 중소기업 지원 연구도 있는데, 이 또한 매우 중요한 일이다. 연구회에서도 연구 성과가 중소기업을 향할 수 있도록 지원하기 위한 전담팀을 구상 중이다. 주로 연구원에 계신 경력자 분들이 중소기업 지원에 많은 관심을 보인다. 이분들의 풍부한 경험을 바탕으로 기술개발과 적용 과정에서 생길 수 있는 잠재적 문제들을 잘 파악해 효과적으로 중소기업을 지원할 수 있을 것으로 본다.

이런 사업들이 결국 우리나라 미래를 위한 과학기술계, 연구회의 노력이 아닐까 한다. 그런데 알 수 없는 미래를 대비하기 위해서는 합리적인 예측도 필요하지 않나. 앞서 이사장께서 ‘시대적 흐름을 따라가지 못하는 정책’을 말씀하셨는데, 최근 대두된 저출산·고령화 이슈도 미래 이슈에 대한 마인드 세팅이 선제적이었다면 대비할 수 있었을 것 같아서 아쉽다. 과학기술계에서는 이런 일이 없어야 할 텐데, 정책 연구까지는 아니어도 혹시 연구회에서 미래 예측과 관련한 연구 방향을 가지고 계신지 궁금하다.

사실 과학 기술이 미래 먹거리를 창출하고, 미래를 이끌어 간다는 점에는 모두 동의한다. 그러나 변화의 방향성을 예측하고, 변화에 수반될 기술 이야기를 할 때는 과학기술자들만 모여서는 한계가 있다. 다수의 미래학자들이 폭넓게 다양한 학문을 섭렵하고, 다른 분야 사람들과 충분한 논의 과정을 거쳐 미래 통찰력을 갖게 되고 꾸준히 성장한다. 이처럼 과학기술계도 인문·사회·문화·경제 등 다양한 분야 전문가와 교류하면서 영감을 얻고, 생각을 조율하면서 새로운 길을 모색해야 한다. 이러한 맥락에서 연구회는

경제인문사회연구회와 교류하고 있다. 그동안 여러 차례 만났는데, 이 분들 또한 과학기술에 대한 이해가 깊어졌다며 의미있다고 하신다. 이런 교류를 통해 자연스럽게 융합하고, 그 과정에서 미래에 대한 방향성을 찾을 수 있을 것 같아 연구회 차원에서 많은 교류를 구상하고 있다.

결국 그러한 융합과정이 있어야 앞으로 과학기술이 사회에 기여하는 내용도 풍부해질 것이라 본다. 경제 성장을 넘어서 국민의 삶의 질을 높이고, 삶을 보다 윤택하게 만들 수 있을 거라는 기대다. 때문에 과학기술계가 성과 창출을 넘어 사회의 리더 역할도 해야 한다고 본다. 저 개인적으로도 어떤 역할을 해야 할지, 과학기술을 통해 어떻게 패러다임 변화를 이끌지 생각이 많다. 이사장님도 고민이 많으셨을 것 같다.

그렇다. 기후변화, 고령화, 식량 문제처럼 풀어야 하는 숙제가 많아지니 특정 분야 지식과 경험만으로는 해결이 어렵다. 이런 상황을 모두가 공감하고, 함께 풀어가야 할 것이다. 과학기술만의 이슈를 넘어서서 이제 사회 안전, 국민행복, 삶의 질 향상과 연결해 고민해야 한다는 데 동의한다. 연구회의 융합연구단에서 진행하는 농업 관련 연구도 이런 맥락이다. 이런 시도들이 과학기술이 사회에 기여하는 큰 방향이라고 본다.

말씀하신 다양한 시도와 고민들이 결국 큰 맥락에서 ‘창의성과 자율성의 추구’라는 연구회의 비전이라고도 생각한다. 아무래도 이사장께서 연구회 부임 전, 과학기술계에서 30~40년 간 해 오신 일들이 밀거름이 된 것이 아닐까 한다. 한국기계연구원 원장, 영남대학교 총장, 창원클러스터추진단장 등 산·학·연을 망라하는 동안 특별한 철학이나 소신이 있으셨다면.

제 좌우명이 ‘콩 심은데 콩 나고, 팥 심은 데 팥 난다’ 즉, 결국 모든 일은 바른 길로 나아간다는 의미의 ‘사필귀정(事必歸正)’이다. 사사로운 이익 때문에 잘못된 결정을 내리면 일시적으론 통용될 수 있겠지만, 궁극적으론 오래가지 못 한다고 믿는다. 사익보다는 공익, 개인보다는 내가 속한 조직과 사회, 국가를 위한 의사결정으로 항상 먼 곳을 바라보고자 했다. 우리나라가 급속하게 성장해 오면서

사회정의·공익 등 여러 가지 갈등과 혼란이 보일 때도 있지만, 리더십만큼은 공익의 관점에서 발휘돼야 한다고 생각했고, 그동안 저의 모든 의사결정 기준으로 삼아왔다.

좋은 말씀 해주셨다. 저도 공직에서 느낀 것이 우리나라에서 공적 가치가 상당히 평가절하되는 느낌이다. 아마도 성장 일변도의 기조 속에서 빠르게 성장했던 점, IMF부터 최근 세계 경제 침체까지 겪으면서 여러 가지 가치관의 혼란을 겪는 것도 큰 요인인 것 같다. 개인의 이익이 중요해지고, 불확실한 상황에 위험 부담(Risk taking)을 피하려는 경향이 있다. 때문에 연구자들은 물론 젊은 세대의 도전 정신이 위축되는 것도 그런 불확실성에서 시작되는 게 아닐까 한다. 이런 상황을 타개할 미래 비전과 도전 자세에 대해 조언해주신다면.

저는 늘 우리나라가 자랑스럽고, 대단하다고 생각한다. 우리나라가 이뤄낸 지난 50년의 성장은 어느 국가도 해내지 못한 것 아닌가. 많은 국가에서 우리나라를 개발도상국의 경제 발전 모델로 삼고자 관심 갖는 이유다. 물론 우리 세대가 사회에 진출했을 때와 지금 상황은 너무 다르다. 과거 우리 세대는 어느 곳도 발전된 분야가 없어서, 자신만 목표를 가지고 노력하면 많은 성공 사례를 만들 수 있었지만, 지금은 경제·사회적으로 일정 궤도에 올라 개인이 오롯이 자신의 노력만으로 성공하기가 쉽지 않다. 하지만 새롭게 혁신적으로 도전하면 더 큰 성공을 거둘 기회도 분명 있다. 1965년과 2015년, 우리나라 100대 기업 리스트를 보면 현재까지 남아있는 기업은 고작 12곳이다. 지금부터 50년 후엔 새로운 얼굴이 더 많이 등장할 것이다. 누가 무엇으로 이룰지 모르겠지만, 새 시대에 걸맞은 혁신적인 도전이 분명 성과를 낼 수 있다. 그런 꿈을 가진 후배들이 활동할 무대와 교류의 장을 열어주는 게 우리 세대, 선배들의 몫이다. 누구에게나 가능성은 있다. 미래를 내다보는 통찰력과 꿈을 가지고, 이에 상응하는 역량을 갖춘다면 분명 자신만의 길을 열어가갈 수 있을 것이다.

정리.한국과학기술기획평가원 홍보기획팀 이승아 연구원

정밀의료의 성공 전략

문세영_KISTEP 부연구위원¹
장기정_KISTEP 연구원
김한해_KISTEP 부연구위원



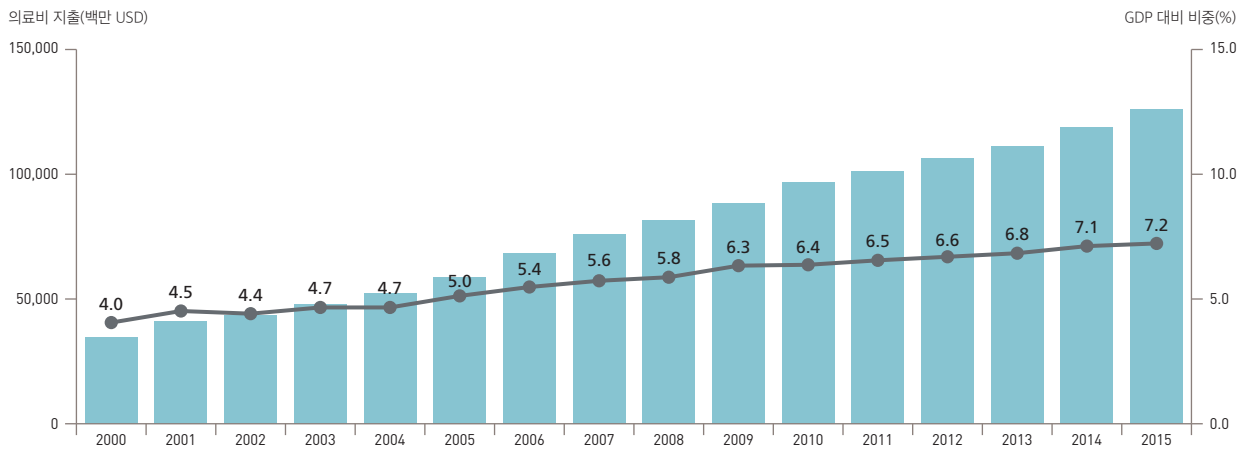
1. 서론

2015년 우리나라의 국민의료비 지출은 총 1,259억 달러로 GDP의 7.2%에 달할 것으로 예상된다.^[1] 의료비 지출은 2000년 340억 달러에서 연평균 9.1%씩 빠르게 증가해왔고, 2000년에서 2014년 사이 GDP 연평균 증가율이 6.4%임을 감안할 때 의료비 지출의 증가는 국가차원에서 장기적인 전략 마련이 필요한 사안이다. 또한, 질환별 대표 약물이 일부 환자에게만 효과를 보이기 때문에^{2[2]} 보다 효율적인 방식의 헬스케어에 대한 필요성이 꾸준히 제기됐다. 선진국들은 일찌감치 치솟는 의료비 문제에 대응하고, 보다 효과적인 치료를 제공하기 위해 새로운 헬스케어 패러다임의 청사진을 준비해왔고, 오늘날 많은 전문가들과 이해당사자들이 필요한 기술의 확보와 플랫폼 구축에 매진하고 있다.

버락 오바마 미 대통령은 인간 유전체 프로젝트(Human Genome Project, HGP)³ 완성 후인 2006년 당시 상원의원 자격으로 Genomics and Personalized Medicine Act를 발의했다. 비록 제정에는 실패했지만 이 법안이 표명한 유전체 연구의 확대와 가속, 질병 진단의 정확도 향상, 의약품의 안전성 제고, 새로운 치료법

¹ smoon@kistep.re.kr
² 표준적인 약물치료는 질병에 따라 25%~80%의 환자에만 효과를 보인다.
³ 1990년부터 2003년까지 NIH(美 국립보건연구소)와 DOE(美 에너지부)의 주도 하에 약 30억 달러를 투자해 인간 유전체의 염기서열을 규명하기 위해 진행된 프로젝트

<그림 1> 한국의 GDP 대비 의료비 지출 증가 추이

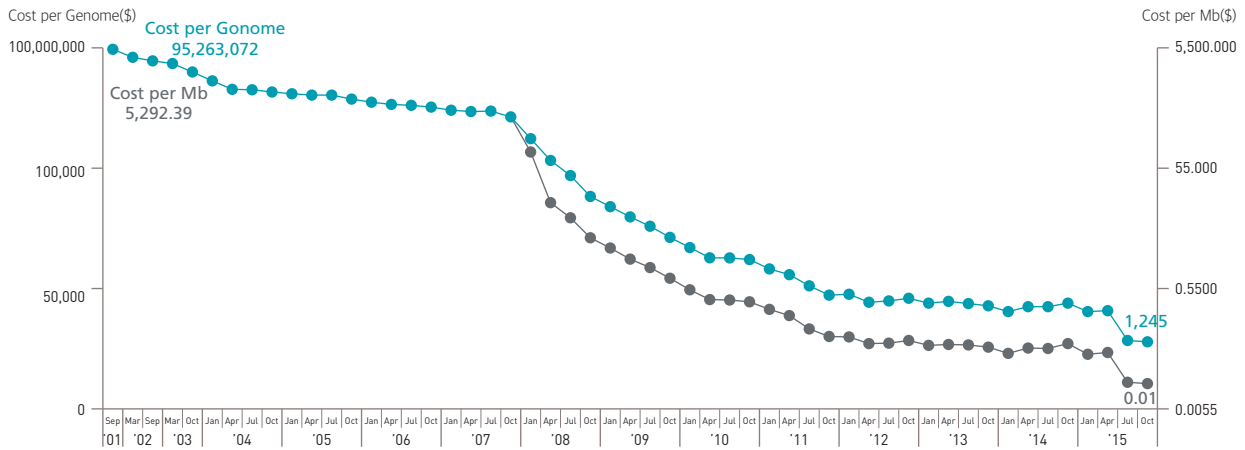


※ 자료: OECD

발견 등은 2015년 연두교서(State of the Union Address)에서 발표한 Precision Medicine Initiative(PM)를 통해 현실화 됐다. 이듬해인 2016년 연두교서에서는 Cancer Moonshot Initiative를 잇따라 발표함으로써 새로운 헬스케어 패러다임으로의 전환에 박차를 가하고 있다. 축적된 유전체 연구의 성과, 날로 발전하는 정보처리 기술, 그리고 인공지능의 진화가 어우러진 지금이 개인화된 질병 및 건강관리 플랫폼 구현의 적기라고 판단한 결과다.

이 새로운 헬스케어 패러다임을 가장 현실적으로 정의하는 것이 정밀의료다. 정밀의료는 유전정보, 생활습관 등 개인 건강정보를 토대로 최적화된 진단 및 치료를 적용하는 헬스케어 패러다임이다. HGP의 완성으로 인류는 스스로를 규명하는 생물학적 근간인 유전자 염기서열 정보를 확보했고, 이를 기반으로 다양한 생명현상을 이해하고 혁신적인 치료 방안을 고안하는 데 활용하고 있다.

<그림 2> 유전체 해독 비용



※ 자료: NHGRI

정밀의료의 실현 가능성을 높이는 데 여러 요인들이 작용했지만, 핵심 요인은 유전체 염기서열 해독(sequencing)⁴비용의 하락이다. 유전체 해독비용은 HGP가 완료될 무렵인 2000년대 초반만 해도 1억 달러에 달했다. 그러나 불과 10년 만에 약 1/20,000인 5,000 달러로 낮아졌고,⁵ 2015년 10월 기준으로 1,245 달러까지 낮아졌다. 염기서열 백만 개를 해독하는 데 필요한 비용은 고작 0.014 달러다.

빅데이터를 분석할 수 있는 기술도 한 몫을 했다. 인간의 유전체는 생식세포를 기준으로 약 30억 개 염기서열로 이루어져 있고, 이를 분석하기 위해서는 다량의 데이터를 처리하는 기술이 반드시 뒷받침되어야 한다. 개인 염기서열 간의 차이, 유전 정보가 발현되는 정도, 특정 단백질의 생성과 역할, 염기서열의 물리적 형태 등 각종 오믹스 연구결과로부터 유용한 의미를 도출하기 위해서 빅데이터의 활용은 필수가 되었다. 생물학적 실험만큼이나 컴퓨터를 활용한 접근도 생명현상의 이해에 한 축을 담당하게 된 것이다.

정밀의료를 가능하게 한 유전체 연구는 대규모 재원이 필요한 분야로 정부의 정책적 지원이 필요하다. HGP 당시 유전체 연구는 값비싼 염기서열 해독비용으로 인해 대규모 재원이 필요했고, 이미 해독비용이 낮아진 지금은 보다 많은 사람들을 대상으로 연구 범위가 확장됐기 때문에 여전히 대규모 재원이 필요한 연구 분야다. 미국, 영국 등 주요 선진국들은 HGP를 위해 국가 차원에서 의지를 가지고 지원했고, 국가 간 협력도 이끌어 냈다. 최근까지도 선진국을 중심으로 다양한 목적의 유전체 정보 생산 및 분석을 위해 컨소시엄 형태의 협력연구가 활발히 진행 중이다.⁶

우리는 앞으로 우리의 생활에 큰 변화를 가져올 정밀의료의 실현 가능성을 제고하고, 그간 축적된 역량을 십분 활용하여 새로운 헬스케어 패러다임을 선도할 수 있는 방안을 모색하고자 한다. 2장에서는 유전체 연구의 역사 속에서 우리나라가 걸어온 길을 돌아보고, 3장에서는 이제 막 시작된 정밀의료의 의의를 논할 것이다. 4장에서는 정밀의료와 밀접한 관계가 있는 기술의 최신 동향을 소개하고, 5장에서는 정밀의료의 성공을 위한 조건들을 살펴보고, 정책적 측면에서 종합적인 결론을 제시하도록 하겠다.

2. 유전체 연구의 역사

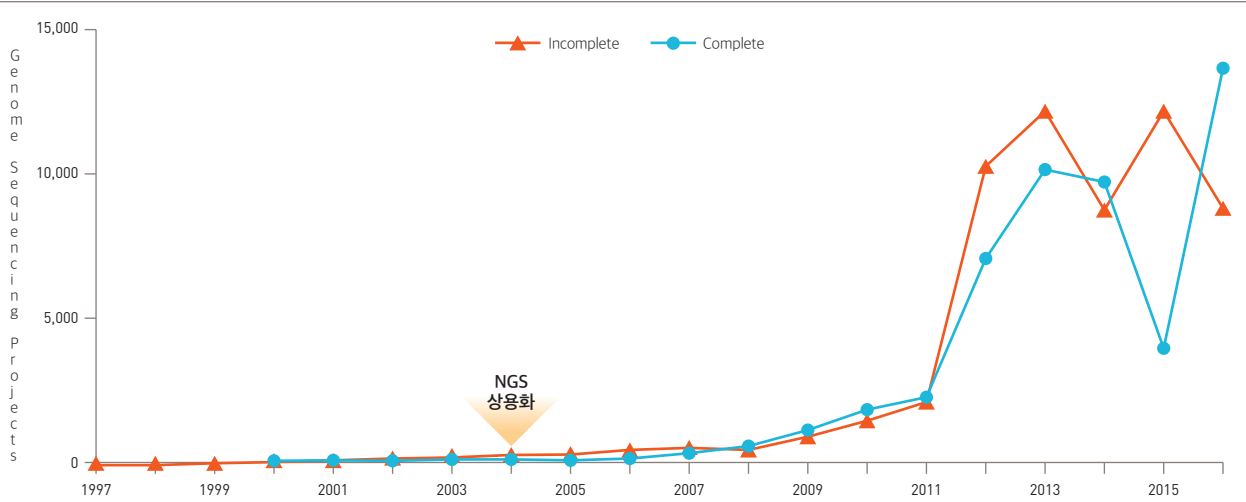
(1) 유전체 연구의 역사(유전학의 태동에서 유전자 편집까지)

1865년 유전학의 아버지라 불리는 멘델은 완두콩 교배를 통해 세대 간 형질이 유전되는 법칙을 발견했다.⁷ 멘델의 발견은 발표 당시에는 주목받지 못했으나 점차 중요성을 인정받게 되었고, 1905년 윌리엄 베이트슨에 의해 재확인되며 유전학⁸의 시작을 알렸다.

유전형질의 핵심요소가 DNA(Deoxyribonucleic acid, 디옥시리보핵산)라는 사실은 시간이 조금 지난 후에 밝혀졌다. 1869년 스위스의 생화학자 프리드리히 미셔가 최초로 DNA를 동정하였으나 당시에는 DNA가 유전물질이라는 것을 알지 못했고, 1952년 앨프리드 허시와 마사 체이스의 박테리오파지 실험을 통해서 이 동정된 물질이 형질의 유전에 관여하는 핵심적인 요소라는 것이 밝혀졌다.^[3]

1953년 제임스 왓슨과 프란시스 크릭은 4가지 염기(Adenine, Thymine, Guanine, Cytosine)가 상보적 결합을 통해 이중나선구조로 형성되어 있는 DNA 구조를 해독하여 생명의 실체에 접근할 수 있는 근간을 마련했다.^[4] 이후 분자생물학적 접근을 통해 유전물질의 복제, 전사, 번역 등 생명 현상의 작동 원리가 밝혀졌고, 2003년에는 인간 유전체 염기서열을 해독하는 HGP가 완료되면서 포스트 게놈(post-genome)

<그림 3> Genomes OnLine Database에 등록된 유전체 해독 프로젝트 수



시대가 열렸다.

유전체 연구는 생명체가 가진 유전물질 전체의 구조와 기능, 전체 유전자 정보를 분석하는 기술과 이론을 다루며,^[5] 유전체 연구의 발전은 질병에 대한 이해 수준을 높여왔다. 과거에는 단일 유전자 변이와 질환과의 상관관계를 파악하는 유전학적 접근이 주가 되었으나, 차세대 염기서열해독기술(Next Generation Sequencing, NGS)의 등장으로 유전체 정보 생산의 시간과 비용이 혁신적으로 절감된 현재는 심혈관질환, 당뇨병 등 다수 유전자 변이와 환경적 요소에 의해 발병하는 복잡한 질환연구가 활발히 수행되고 있다.

유전체 수준에서 유의미한 개인 간 유전자 변이를 비교분석하기 위해서는 방대한 양의 유전체 정보 수집이 필수다. HGP 당시에는 인간 유전체 지도 작성을 위해 10년이 넘는 연구기간 동안 약 27억 달러의 연구비가 투입 되어 대규모 유전체 해독은 엄두도 못 냈다. 그러나 차세대 염기서열 분석기술의 등장으로 개인 유전체 분석 시간은 1-2일 정도로 단축되었고 비용 또한 약 1,000달러 수준으로 하락하면서 대규모 유전체 연구가 가능해졌다. Genomes Online Database를 살펴보면 NGS 등장 이후 유전체 해독 프로젝트 수가 빠르게 증가한 것을 알 수 있다.

유전체 연구의 발달은 유전체 빅데이터를 활용한 개인별 맞춤의료, 나아가 정밀의료와 같은 미래기술의 가능성에 대한 논의를 활성화 시켰다. 인류는 대규모 유전체 정보의 해독으로 생명현상의 원리에 근접해가고 있으며, 최근에는 크리스퍼(CRISPR)⁹로 잘 알려진 유전자 편집기술이 더해져 보다 능동적인 유전정보의 활용이 가능해졌다. 크리스퍼 기술은 그동안 유전학 및 유전체학을 통해 축적된 구조적/기능적 정보¹⁰를 이용하여 기능 보정이 필요한 유전자를 편집하는 기술로 유전질환 치료와 유전정보의 이해에 있어 획기적인 도약을 가져다줄 것이라는 기대를 받고 있다.

(2) 정부 정책 및 R&D 프로그램 변화

우리나라 생명과학 연구의 정착과 발전은 유전공학에 대한 인식의 확산으로부터 시작되었다고 봐도 무방하다. 1970년대 후반부터 1980년에 이르기까지 유전공학기술이 국내에 소개되고, 과학계, 언론, 정부관료 사이에서 기술의 발전 가능성과 유용성에 대한 공감대가 형성되었다.^[6] 정부¹¹는 각계의

⁴ 보통 유전체 분야에서 sequencing을 유전체 분석이라고 칭하지만 본 글에서는 유전체를 구성하는 염기의 서열을 밝히는 과정으로 제한하여 해독이라는 용어를 사용했다.

⁵ HGP는 2003년 4월 종료되었고, NHGRI(美 국립인간유전체연구소)의 조사에 따르면 2013년 기준 유전체 해독 비용은 5,096달러다.

⁶ 국내 연구진들은 암을 연구하는 ICGC(International Cancer Genome Consortium)와 장내미생물을 연구하는 IHMC(the International Human Microbiome Consortium)에 참여하고 있다.

⁷ 우열의 법칙(law of dominance), 분리의 법칙(law of segregation), 독립의 법칙(law of independence)으로 구성

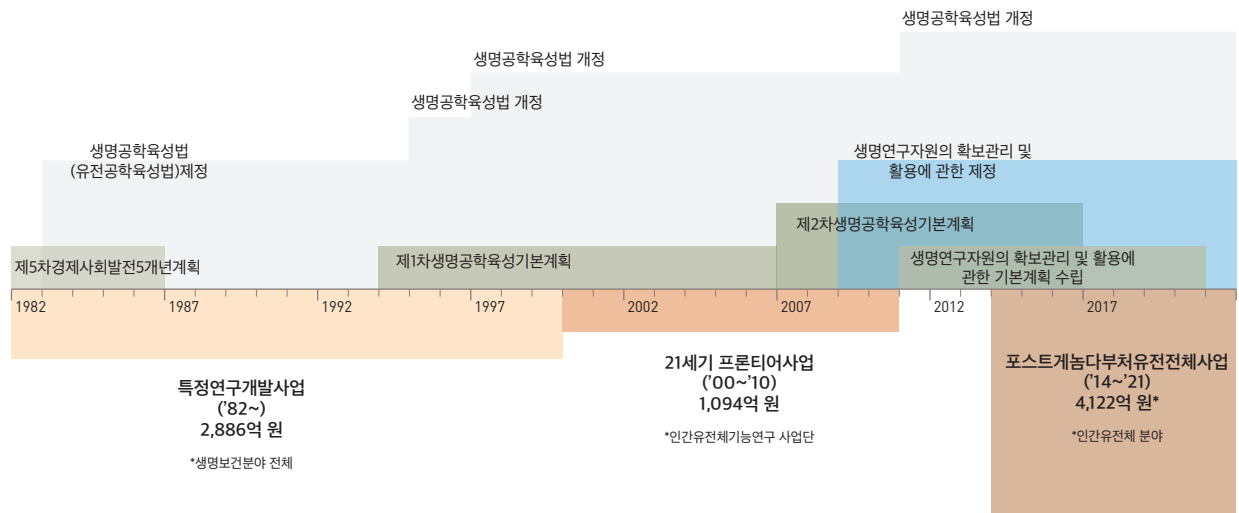
⁸ 유전현상의 이해를 위해 유전자와 그 의 기능에 관해 연구하는 학문(NHGRI)

⁹ Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats, 박테리아의 면역에 관여하는 유전체 군집

¹⁰ 물리적 지도(physical map)와 유전적 지도(genetic map)

¹¹ 과학기술처(1967.3-1998.2)

<그림 4> 유전체 관련 년도별 법/계획/사업



수요를 반영하여 1982년 제5차 경제사회발전 5개년 계획에 유전공학 분야를 포함하고 적극적인 지원을 시작했다.^[7] 이후 1983년 ‘유전공학육성법’ 제정을 통해 유전공학 기술의 연구를 지원할 법적 근거를 마련했다.^[12] 한편, 정부는 생명공학 분야의 효율적인 연구개발을 촉진하기 위하여 ‘유전공학육성법’에 명시한 종합계획인 ‘제1차 생명공학육성기본계획(Biotech 2000, 1994-2007)’을 수립함으로써 연구개발 투자를 지속적으로 확대하는 기초를 밝혔다. 이후 2006년 ‘제2차 생명공학육성 기본계획(BioVision 2016, 2007-2016)’으로 이어지면서 그동안 확보한 연구기반을 바탕으로 바이오산업 생태계를 형성하려는 움직임을 보이고 있다.

다른 국가연구개발사업과 마찬가지로 국내 생명공학에 대한 R&D 지원은 특정연구개발사업에서부터 시작됐다.^[8] 1982년에 시작된 특정연구개발사업은 생명공학 분야 중 유전자재조합, 세포융합 및 핵치환기술 확보 등을 중점과제로 지원했다.^[9] 오늘날 우리에게 더 친숙해진 유전체 해독과 기능의 탐구로 볼 수 있는 유전체 분야의 집중적인 지원의 예는 21세기 프론티어사업의 인간유전체기능연구 사업단이다. 사업단은 인간 유전자원의 확보, 신규 질병 유전자의 정밀 분석 등 염기서열 자료구축을 목표로 10년간 약 1,000억 원을 지원받았다.^[10] 이후 추진된 포스트게놈다부처유전체사업에서는 이전까지의 사업을 통해 구축한 서열 자료를 토대로 본격적인 유전체 분석 및 활용 연구를 수행하고 있다.

2016년 현재 보건복지부, 미래창조과학부 등 주요 부처는 정밀의료의 기반을 갖추기 위한 R&D를 기획 중에 있다. 보건복지부는 2016년 3월 정밀의료 연구개발 추진위원회를 구성하고 개인의 유전체 및 진료정보를 고려한 맞춤형료(유전체 의학)와 건강, 생활환경, 습관(lifelog) 정보에 기반을 둔 사전적 건강관리(모바일 헬스케어)가 통합된 맞춤형 예측 의료(예방·진단·치료) 서비스를 포함한 정밀의료 분야 연구에 대한 구상에 착수했다. 과학기술전략회의는 9대 국가과학기술전략 프로젝트 중 하나로 정밀医료를 선정하여 개인의 진료·유전·생활습관 정보 등을 빅데이터로 통합 분석해 효과를 높이는 맞춤형 정밀의료시스템을 구축하겠다고 밝혔다. 미래창조과학부는 정밀의료의 적용과 활용에 필요한 차세대 의료정보시스템 생태계 구축을 위한 신규사업 추진을 준비하고 있다.

¹² ‘유전공학육성법’은 이후 1995년 ‘생명공학육성법’으로 명칭을 변경하면서 ‘유전공학’에서 ‘생명공학’으로 법의 대상 범위를 확대했고, 이후 1997년에는 유전체, 2003년에는 기초의과학, 2011년에는 뇌연구 분야까지 그 범위를 확장해왔다.

¹³ NRC 산하 Committee on a Framework for Development a New Taxonomy of Disease

¹⁴ 코호트(cohort)란 어떤 특성을 공유하고 있어 연구에 필요한 데이터를 제공하는 집단을 의미하는 것으로 건강보험공단 이 보유 중인 2002~2013년 표본 코호트(100만명), 건강검진 코호트(51만명), 노인 코호트(55만명) 등이 있다. 이와 같은 코호트를 활용하면 특성별 추적 연구 및 통계적 결과 도출이 가능하다.

¹⁵ 의회는 이 중 2.02억 달러(NIH 1.3억, NCI 0.7억, FDA 0.2억)를 승인했다.

3. 정밀의료 시대의 개막

(1) 정밀의료의 정의

정밀의료(precision medicine)의 개념은 우리에게 더 친숙한 ‘맞춤의료(personalized medicine)’라는 용어로 비교적 오랫동안 존재해 왔다. NRC(National Research Council, 美 국립연구회의)는 맞춤医료를 환자의 특성에 맞게 의학적 치료 방식을 재단하는 것으로 정의했다.^[11] NRC는 ¹³ 맞춤의료가 자칫 개별적인 치료제나 기구 등을 만들어내는 듯한 인식을 주는 것을 경계하여 ‘정밀의료’라는 용어를 보고서의 제목으로 채택하고 사용을 권장했다.^[11]

정밀의료와 맞춤의료의 유사성은 백악관의 Precision Medicine Initiative(PMI)에서도 드러난다. 백악관이 제시한 정밀의료의 목적에서 개별화된 관리(individualized care)라는 용어의 사용은 정밀의료의 추구하는 바가 그간 헬스케어 분야에 널리 통용되어온 맞춤의료의 지향점과 맞닿아 있음을 보여준다.

“To enable a new era of medicine through research, technology, and policies that empower patients, researchers, and providers to work together toward development of individualized care.”
- The White House Precision Medicine Initiative

정밀의료는 개인의 유전정보, 질병정보, 생활정보 등을 토대로 보다 정밀하게 개인을 분류하고(stratify), 이를 활용하여 효과적인 치료방법(표적항암제 등)을 선택한다는 점에서 맞춤의료의 개념을 구체화 했다고 볼 수 있다. 또한, 정밀의료는 대규모 유전체 정보 분석을 통한 보다 선제적인 헬스케어 서비스 제공까지도 포함하는 개념으로 발전하고 있다. 우리는 앞으로의 논의에서 정밀医료를 구체화된 맞춤의료, 즉 개인을 유전정보, 생활습관 등 개인화된 정보에 따라 특정 질병의 발현 가능성, 특정 치료방식의 수용성 등 의학적 카테고리로 분류하고, 각 개인에 최적화된 진단 및 치료를 적용하는 헬스케어 도구로 간주하겠다.

(2) 미국의 Precision Medicine Initiative

① 규모와 범주

오바마 대통령의 PMI가 발표된 후 예산과 추진체계 등 실질적인 운영방식에 이목이 집중됐다. 미국 보건복지부(Department of Health and Human Services)는 2016년에 PMI 관련 총 2.15억 달러의 예산을 신청했고, 그 중 대부분인 2억 달러를 NIH(National Institutes of Health, 美 국립보건연구원)와 NIH 소속 NCI(National Cancer Institute, 美 국립암연구소)에 할당했다.^[12] 가장 많은 예산을 배정받은 NIH의 임무는 연구 수행의 기반을 마련하기 위해 국가 전역에 자발적인 코호트¹⁴를 구축하는 것이다. NCI는 기존에 추진해온 종양유전체학(cancer genomics) 연구를 선도하여 종양 관련 정밀의료 연구의 추진에 앞장서게 된다. FDA(Food and Drug Administration, 美 식품의약품)는 정밀의료 실현 관련 규제체계 지원을 위한 전문성 함양과 과 정제된 데이터베이스를 구축을 담당하고, ONC(Office of National Coordinator for Health Information Technology)는 협력 연구를 위한 상호운용 표준, 개인정보 보호 및 정보보안 등으로 연구를 지원하게 된다.¹⁵

결국 PMI의 일차적인 목표는 대규모 코호트 구축과 이를 기반으로 유전정보와 질병, 특히 종양과의 상관관계를 파악하는 것이다. NIH는 종양유전체학을 확장하여 보다 나은 예방과 치료 방법을 찾아내는 것을 단기 목표로 제시하고 있다. 장기적으로는 종양 이외의 모든 질병으로 정밀医료를 확장하겠다는 목표를 가지고, 이를 위해 백만 명 이상의 코호트 구축 계획을 밝히고 있다. NIH는 코호트 참여자의

<표 1> 2016년 PMI 예산 요구현황		
기관	2016 예산(백만 USD)	목적
NIH	130	건강과 질병에 대한 이해도 증가와 새로운 연구 기반 마련을 위한 자발적 국가 연구 코호트 구축
NCI	70	암유전체 연구의 확장과 보다 효과적인 암 치료법 개발
FDA	10	정밀의료의 혁신을 앞당기는 데 필요한 규제 체계를 지지할 추가적인 전문성 획득과 고 품질, 큐레이션 데이터 베이스 개발 촉진
ONC	5	상호운용성 표준, 개인정보를 다루는 조건의 개발 지원과 시스템 간 안전한 데이터 교환 방식 지원

※ 출처: The Precision Medicine Initiative Cohort Program - Building a Research Foundation for 21st Century Medicine, PMI Working Group, NIH(2015)

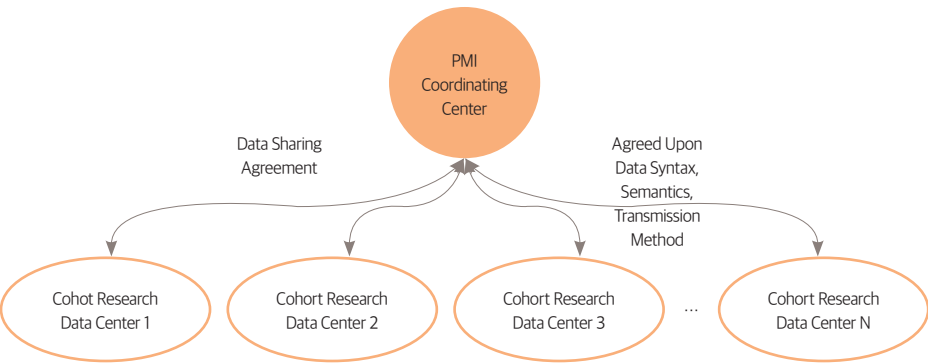
유전정보, 생체시료, 생활정보 등이 질병의 예측, 이해와 진단, 치료의 개선에 기여할 것으로 기대하고 있다.^[13]

② NIH의 역할

NIH는 대규모 코호트 정보를 효율적으로 축적하고 관리하기 위해서 PMI Coordinating Center 구축을 제안했다.^[12] 이는 NIH가 다수 센터가 참여하는 컨소시엄 형태의 연구를 추진할 때 활용해온 방식이다. <그림 5>에서와 같이 Coordinating Center는 각 데이터 센터들에서 수집한 임상정보 등을 집적하여 관리하면서 데이터 허브의 역할을 수행한다. 이 때 공통된 데이터 모델을 수립하여 통일성 있는 데이터베이스를 구축하고, 조회(query) 방식의 데이터 전송과 분석이 가능하도록 설계하는 것이 중요하다. 이러한 대규모 코호트의 구축은 넓은 범위의 질병에 대한 체계적인 연구를 가능하게 하고, 특히 개인의 유전 정보를 질병과 연계함으로써 질병의 유전적 근원, 환경과의 상관관계를 밝히는 데 매우 유용하다. 유전자 관련 질병의 발병에는 일차적으로 연관된 생물학적 경로(biological pathway) 내에 존재하는 유전자 변이가 주된 요인으로 작용한다. 그러나 유전자 변이가 아니더라도 후성적인 요인에 의해 유전자의 발현이 제어되기도 한다.

NIH는 PMI가 궁극적으로 추구하는 백만명 이상의 코호트를 체계적으로 관리하고, 생산된 데이터를 통일된 형식으로 축적, 분석, 가공하는 역할을 수행할 것으로 예상된다. 실제로 NCI는 Genomic Data Commons(harmonized cancer datasets)를 통해 2016년 6월 14,531 건의 종양과 관련된 유전체 정보를

<그림 5> PMI Coordinating Center 모식도



가공하여 공개했고, 데이터 정제와 분석이 진행됨에 따라 그 수는 계속 증가할 것이다.^[14] 현재 공개된 데이터는 TCGA¹⁶와 TARGET¹⁷ 프로그램 하에 수행된 39개 프로젝트에서 수집된 정보로 질환, 성별, 연령, 인종, 생존여부 등의 기본정보가 연계되어 통계적인 분석이 가능한 수준이다. PMI의 추진이 본격화되고 방대한 임상정보와 유전체 데이터가 연동되어 공개되면 이를 활용하여 유전정보와 질환의 상관관계를 밝히고, 나아가 유형화된 검사, 진단, 처방이 가속화될 것으로 전망된다.

③ 정보 공유 전략

질환과 관련된 유전적 특이사항을 의미 있는 진단 및 치료방법의 적용에 활용하기 위해서는 방대한 양의 유전정보와 임상정보가 필요하다. 단일 주체가 생산할 수 있는 데이터의 양은 제한적이기 때문에 PMI가 성공하기 위해서는 데이터의 공유가 필수적이다. NIH가 제안한 PMI Coordinating Center는 분산돼 있는 코호트 그룹의 데이터를 공유할 수 있는 플랫폼으로 작용할 것으로 예상된다.

그러나 데이터 공유가 단순한 문제는 아니다. 예를 들어 Cancer Moonshot Initiative의 일환으로 Foundation Medicine이 NCI에 제공하게 될 18,000명의 종양유전체 정보에는 환자의 치료경과 등의 임상정보가 포함되지 않았다.^[15] 이러한 정보의 공백은 당초 정보를 생산할 때 누락되거나, 법제도에 따라 공유 가능한 정보 범위의 제한 등의 이유로 발생할 수 있다. 따라서 데이터 공유를 통한 성공적인 데이터베이스 구축을 위해서는 정부기관 등 책임과 권한을 가진 주체가 현재 데이터를 생산하고 가공하는 주체들과 지체 없이 데이터 표준에 대한 동의를 이끌어 내고, 정보보안 기준을 마련하고 개인정보 보호 전략을 수립하는 등 데이터 공유 프레임을 만들어야 한다. 백악관은 PMI 정보보안 정책 보고서(Precision Medicine Initiative: Data Security Policy Principles and Framework)에서 이와 같은 기준들을 제시하고 있다.

(3) 주요국의 정밀의료 추진현황

생명과학 연구의 국제적인 경쟁 속에서 미국 뿐 아니라 다른 나라들도 대규모 코호트를 구축하여 유전체 정보와 임상 정보를 연계할 계획을 마련했거나 이미 시행하고 있다. 영국은 100,000 Genome Project를 통해 75,000명의¹⁸ 유전체를 분석하여 암과 희귀질환 발생에 관여하는 유전체 정보를 밝히는 중이다.^[16-17] 영국은 이에 앞서 UK10K 프로그램을 통해 질병과 유전체간 상관관계를 밝히려는 시도를 한 바 있다. 중국 역시 정밀의료 분야에 15년간 600억 위안(약 10.7조 원)을 투자할 계획을 발표하면서 정밀의료 경쟁에 뛰어들었다.^[18] 중국은 현재 세계 최고 수준의 유전체 해독 기술을 보유한 것으로 평가받고 있으며,¹⁹ 대규모 코호트를 대상으로 빠른 유전체 해독이 완료될 경우 기술 경쟁에서 우위를 차지할 것으로 전망된다. 프랑스는 Genomic Medicine France 2025를 발표하고 2020년까지 전국을 커버하는 12개 유전체 해독 서비스 네트워크를 구축할 계획을 밝혔다.^[19] 초기 5년간 민간 예산을 포함한 6.7억 유로가 투입될 예정이다. 프랑스는 2006년부터 28개 지역 거점 기관을 지정하고, 폐암, 대장암 환자를 대상으로 표적 항암제 적합성 판단을 위한 유전자 검사를 무료로 제공한 바 있다. 일부 환자에게만 약효가 있는 표적항암제의 불필요한 처방을 억제함으로써 진단 비용을 상회하는 비용 절감이 가능하다는 판단에서 시작된 프로그램이다. 일본은 의료분야 연구개발추진계획의 9개 집중 연구지원 분야에 맞춤 및 게놈의료를 포함하고, ‘게놈의료실현추진협의회(2015.7)’를 구성함으로써 게놈의료 실용화를 결정했다. 이를 위해 기존 3개의 바이오뱅크에 축적되어 있는 유전자 정보를 취합하여 연구에 활용하고 2016년 1월부터 기존 치료방법의 효과가 미미한 암환자를 대상으로 게놈진료를 본격적으로 추진하기로 하였다.²⁰^[20]

¹⁶ The Cancer Genome Atlas, NCI와 NHGRI가 공동으로 33종 암의 핵심 유전체 변이 지도를 구축하는 프로젝트

¹⁷ Therapeutically Applicable Research To Generate Effective Treatments, 유년기 암 발병의 분자유전학적 원인 규명을 위한 NCI 프로그램

¹⁸ 암 환자 25,000명으로부터 50,000개 유전체(암세포 + 정상세포), 희귀질환자 15,000명과 친족 35,000명으로부터 50,000개 유전체로 총 100,000개 유전체 정보를 분석

¹⁹ 중국 선전시에 위치한 BGI(Beijing Genomics Institute)는 세계 최대 규모의 염기서열 해독 시스템을 갖추고 있다.

²⁰ 게놈의료란 질병의 원인 유전체를 밝혀 치료법을 개발하고 약물의 효과와 부작용 발현 등을 유전체로부터 파악하여 환자에 적합한 약물을 선택하여 치료하는 활동이며, 게놈진료란 환자의 유전체 검사를 통해 부작용이 적고 효과가 좋은 약을 처방 또는 치료방법으로 진료하는 방안을 가리킨다.

<표 2> 주요국의 정밀의료 지원계획 요약

	미국	영국	중국	프랑스	일본
코호트 규모	>100만	7.5만	>100만	- ²¹	약 10만 ²²
지원 기간	2015~	2012~2017	2016~2030	2016~2025	2015~
중점 질환	암	암, 희귀질환	암(간암, 위암 등 특정)	암, 비만, 희귀질환	암, 치매, 희귀·난치질환
연간 예산	약 2,500억 원	약 1,100억 원 ²³	약 7,000억 원	약 1,700억 원 ²⁴	약 960억 원 ²⁵

4. 관련 분야 기술동향 및 국내 역량

(1) 관련 분야 기술동향

정밀의료와 관련된 다양한 기술 중 핵심적인 기술들은 유전체 정보 생산을 위한 유전체 염기서열 분석기술, 유전체 기능의 이해와 능동적인 활용을 위한 유전자 편집 기술, 다량의 유전 정보와 건강 및 생활정보를 분석하고 의미를 발견하기 위한 빅데이터 기술, 건강 및 생활정보 수집을 위한 웨어러블 디바이스, 유효한 생물학적 타겟을 토대로 처방할 표적항암치료제 등이다.

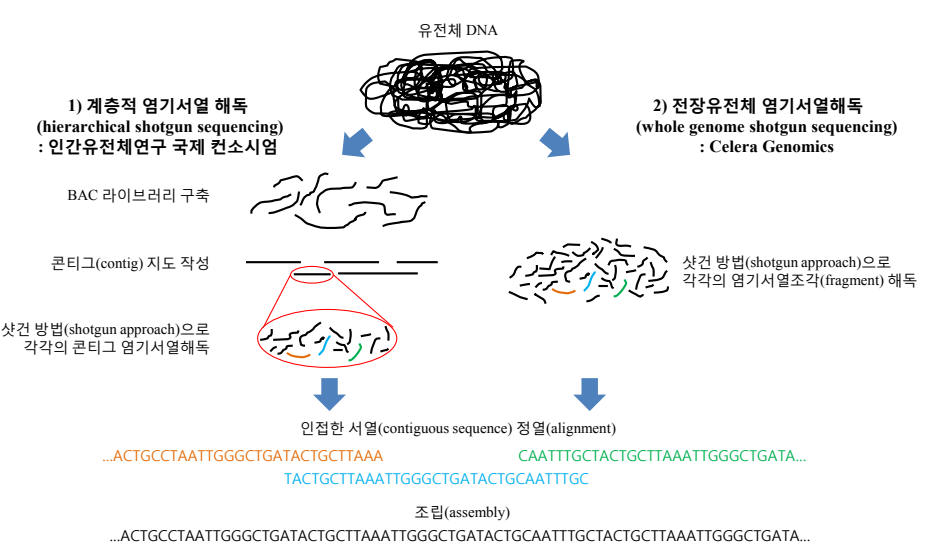
① 유전체 염기서열 해독기술

1970년초 미국 코넬대학의 레이 우 교수는 DNA 상에서 특정 위치의 프라이머²⁶를 확장하는 전략을 사용하여 DNA 염기서열을 해독하는 방법을 최초로 개발했다.^[21] 1977년 영국 MRC(Medical Research Council, 의학연구위원회) 분자생물학 연구소 소속 과학자 프레더릭 생어는 레이 우 교수가 개발한 방법을 활용하여 생어 염기서열 해독(Sanger sequencing)²⁷이라는 획기적인 DNA 염기서열 분석방법을 고안하고 1980년 생애 두 번째 노벨상을 받게 된다. 1986년에는 로이 후드에 의해 생어 염기서열 분석방법을 개선한 자동화된 DNA 염기서열 해독기술이 등장했다.^[22] 로이 후드는 생어 염기서열 해독에서 표지(labeling) 및 감지를 위해 사용하던 방사성물질을 형광물질로 대체하고, 데이터 분석도 수작업에서 컴퓨터 기반 데이터 분석으로 대체하였다. 미국 Applied Biosystems는 이 방식의 해독기기를 상용화하여 다수의 모델 생명체 유전체 분석에 기여했다. 그러나 이 방법 역시 샘플을 옮기는 과정 등 일부 수작업으로 인해 오류가 발생할 수 있고 긴 시간이 소요되는 단점이 있었다.

이후 병렬 구조의 모세관을 이용하는 모세관 전기영동(capillary electrophoresis) 기반 DNA 염기서열 해독 시스템이 등장했다.^[23] 이 방법은 기존 자동화된 DNA 염기서열 해독방법의 단점을 극복하여 보다 용이하고 빠른 해독을 가능하게 하였다. 생어 염기서열 해독방법을 기반으로 발전된 고효율의 자동 염기서열 해독 시스템은 1988년 시작된 HGP의 주된 DNA 염기서열 해독기술로 활용되었고, 프로젝트 기간 단축에 일조했다. HGP에는 인간유전체연구 국제컨소시엄(International Human Genome Consortitum)과 민간업체인 Celera Genomics가 참여했는데, 계층화된 염기서열해독(heirarchical shotgun sequencing)과 전장유전체 염기서열해독(whole genome shotgun sequencing)이라는 각기 다른 전략으로 유전체지도 작성에 공헌하였다.^[24]

HGP를 통해 인간 유전체지도의 완성이 공표된 직후 차세대염기서열해독기술(Next Generation

<그림 6> HGP에서 사용된 염기서열 해독 전략



Sequencing, NGS)이라고 불리는 2세대 염기서열 해독법이 등장했다. 스위스 제약기업 Roche는 2004년 최초로 이 혁신적인 DNA 염기서열 해독기술 상용화에 성공했고,^[25] 그 결과 HGP를 시작할 당시에 비하여 염기서열 해독에 소요되는 시간과 비용이 놀라울 만큼 절감되었다. 이후 Illumina, Thermo Fisher, Pacific Biosciences(PacBio) 등 다양한 NGS 회사에서 각기 장단점을 지닌 NGS 플랫폼을 발표했는데, 이들 중 현재까지는 Illumina 사의 DNA 염기서열 분석기기가 연구자들에게 상당한 신뢰를 얻으며 압도적인 점유율을 보여주고 있다. NIH GenBank[®]에 등록된 유전체 DNA 분석 데이터의 90% 가량이 Illumina 사 플랫폼으로 분석되어 있으며,^[26] 2013년 기준 NGS 시장의 71%를 점유하고 있다.^[27] 결과적으로 타 NGS 기술들은 Illumina 사의 시장지배력과 분석 신뢰도를 뛰어넘어야 하는 과제를 안게 됐다.

최근에는 단일분자 염기서열 해독법(single-molecule sequencing)이라는 3세대 염기서열 해독 기술이 주목받고 있다.^[28] 이 3세대 염기서열 분석기술은 유전체를 증폭하지 않고 단일 가닥 DNA 염기서열을 해독함으로써 증폭과정에서 발생할 수 있는 각종 오류²⁸를 방지한다. 3세대 해독기술 분야에서는 PacBio사가 선도적인 위치를 차지하고 있는 가운데,^[29] Roche는 2013년 자사의 NGS 기술인 454 플랫폼의 개발 중지를 발표하고^[30] 2014년 3세대 해독기술 스타트업 Genia를 인수하는 등 업계 간 경쟁도 가속화되고 있다.

앞으로도 새로운 해독기술의 등장과 치열한 기술경쟁은 더욱 심화될 것이다. 유전체 해독기술 발전은 유전체 해독 효율 향상과 비용 절감으로 이어지고, 유전체 활용연구는 더욱 확대될 것으로 예상된다.

② 유전자 편집 기술

2012년 캘리포니아 버클리대학의 제니퍼 다우드나 교수와 스웨덴 우메오대학의 엠마뉴엘 샤펜티어 교수 연구팀이 박테리아의 면역체계 연구 도중 크리스퍼-카스9(CRISPR/Cas9) 시스템²⁹을 발견한 것은 유전자 편집에 획기적인 변화를 가져왔다.^[31] 3세대 유전자 가위로 불리는 크리스퍼 기술은 박테리아의 자연적인 면역체계를 활용하여 살아있는 세포 안에서 정확하고 의도된 유전자 편집을 가능하게 하는 기술이다. 1세대

²¹ 프랑스는 유전체 해독 및 분석에 초점을 두고 연간 약 22만 명에 해당하는 해독 능력을 확보할 계획을 밝히고 있다.
²² 일본은 Japan Multi-Institutional Collaborative Cohort를 통해 2005년부터 2014년까지 100,600명 코호트를 구축했고, 2025년까지 추적연구 계획을 밝혔다.
²³ 당초 3억 파운드 규모의 계획에서 3.75억 파운드 규모로 확대했다.
²⁴ 초기 5년간 연간 소요 예산, 민간 자본 35% 포함
²⁵ 2016년 예산
²⁶ DNA 합성의 기시점이 되는 짧은 유전자 서열
²⁷ DNA 염기서열 해독 과정에서 DNA 가닥이 합성될 때 디디옥시뉴클레오타이드 3인산(ddNTP)이 참여하는 과정마다 합성이 연쇄 종결(chain termination)되어 해당 염기서열을 확인할 수 있다.

²⁸ 증폭이 편향(systematic amplification bias)되거나 돌연변이 생성 등의 오류가 발생할 수 있다.
²⁹ CRISPR는 Clustered Regularly-Interspaced Short Palindromic Repeats의 약자로 박테리아의 면역에 관여하는 유전체 군집(일정한 간격으로 나타나는 짧은 회문구조의 반복된 염기서열)을 의미하며, Cas9은 크리스퍼 연관 단백질 9(CRISPR associated protein 9)로 제한 효소(restriction enzyme)다.

징크핑거뉴클리아제(zinc-finger nucleases, ZFNs) 유전자 가위는 FokI 제한효소를 사용하고 단백질이 타겟 DNA 염기서열을 인식하는 구조로 제작비용이 높고 절단 성공률은 낮았으며, 같은 방식으로 작동하는 2세대 탈렌(transcription activator-like effector nucleases, TALENs) 기술은 정확성은 향상되었으나 1세대에 비해 크기가 커 세포전달이 어려운 등의 단점이 있었다.^[32] 3세대 크리스퍼 기술은 가이드 RNA(Ribonucleic Acid)가 DNA를 인식하고 제한효소 단백질인 Cas9이 절단하는 방식으로, 1,2 세대 기술과 비교하여 정확성과 효율이 높으면서도 제작이 용이하다.^[32] 비용 또한 1세대 징크핑거뉴클리아제기술이 건 당 5,000달러 이상이었던 것과 비교하면 30달러 수준으로 매우 저렴하다.^[33]

최근에는 크리스퍼 기술을 인간에 적용하기 위한 실용화연구 움직임이 확대되는 추세다. 중국과 영국은 인간 배아 유전자를 편집하는 유전체 교정 연구 승인했고,^[34-35] 미국 NIH는 크리스퍼 기술을 적용한 암 치료 임상연구 지원을 결정했다.^[36] 이와 관련하여 생명윤리 및 기술의 안전성에 대한 우려도 있어 연구 추진과 동시에 사회적 합의를 도출해야 할 것으로 보인다.

우리나라는 유전자가위를 활용한 유전체 교정 연구분야에서 높은 기술수준을 가지고 있다. 크리스퍼 기술을 이용한 슈퍼돼지 개발,^[37] 혈우병 치료 가능성 제시,^[38] 외부 DNA를 사용하지 않은 농작물 교정^[39] 등의 연구성과가 발표된 바 있다. 또한, 최근 클래스 2 크리스퍼-카스(Calss II CRISPR/Cas) 시스템인 크리스퍼-Cpf1(CRISPR/Cpf1) 시스템이 발견됐는데,^[40] 국내 연구진이 세계최초로 크리스퍼-카스9 시스템보다 편집의 정확도가 높다는 것을 입증했다.^[41]

HGP가 종료되고 인간 유전체의 염기서열이 공개된 지도 10년이 지났으나 30억개에 이르는 유전체 염기서열은 생각보다 많은 비밀을 간직하고 있다. ENCODE 프로젝트(Encyclopedia Of DNA Elements Project)³⁰ 연구진은 인간 유전체의 80% 정도가 대략적으로 기능이 밝혀졌음에도 구체적인 특성을 파악하기 위해서는 보다 많은 시간이 필요할 것으로 판단하고 있다.^[42] 단일 유전자로부터 생산 가능한 단백질이 다양하고, 그 기능에도 차이가 있다는 점을 감안하면 아직 보다 많은 기초연구와 근거가 축적되어야 한다.^[43] 전문가들은 혁신적인 기술로 주목받고 있는 유전자 가위 기술이 이러한 유전 정보의 기능과 역할을 규명하는데 최선의 방법으로 활용될 수 있을 것으로 내다보고 있다.^[44-45]

③ 빅데이터 기술

빅데이터 기술은 기존의 데이터관리 패러다임을 벗어난 규모의 데이터와 이를 분석하는 기술을 총칭한다.^[46] 그러나 이는 단순히 대량의 데이터만을 의미하는 것이 아니라 더그 래니가 제안한 3V(Volume, Velocity and Variety) 차원에서 높은 값을 갖는 데이터와 그 처리과정을 포함한다.^[47-48] 말 그대로 Volume은 데이터의 양을, Velocity는 데이터 생산 및 처리 속도를, Variety는 다양성을 의미한다.

정밀의료의 핵심이라고 할 수 있는 개인의 유전체 정보와 생활 및 임상 정보는 빅데이터의 조건을 모두 갖추었다. 한 사람의 총 염기서열을 데이터로 환산하면 200기가(2×10¹¹)바이트에 달한다.³¹ 유의미한 변이를 찾아내기 위해 십만 명의 염기서열을 비교분석할 경우 염기서열을 기록하는 데만 20페타(2×10¹⁶)바이트가 필요하다. 단위 유전체 당 분석 비용이 지속적으로 하락하고 있고 자동화된 장비의 진보로 인해 유전체 정보의 생산 속도 역시 빠르게 증가하고 있다. 또한 개인마다 건강상태, 생활습관, 임상적인 특성이 상이하기 때문에 아주 다양한 종류의 데이터들이 만들어질 수 있다.

대용량 데이터를 빠르게 분석하기 위해서는 분석 도구인 컴퓨터의 연산속도가 뒷받침 되어야 한다. CPU(Central Processing Unit) 성능의 발전과 다중 코어(multi-core) 기술이 반도체 기반 정보처리 기술을

³² Nvidia는 GPU(Graphics Processing Unit)를 활용한 딥러닝 솔루션을 제공한다.

비약적으로 향상시켜왔다. Intel사가 1971년 11월 발표한 CPU의 데이터 처리 속도(clock speed)는 108 KHz였다. 2016년 현재 약 10 GHz의 CPU 속도를 구현할 수 있으므로 단순 속도의 차이로는 약 10만 배에 달하는 성능의 향상이 이루어졌다. 최근에는 그래픽 데이터 처리의 효율성을 높이기 위해 시작된 다중 코어 처리장치가 딥러닝 등 방대한 양의 정보를 동시에 처리할 필요가 있는 분야에서 각광받고 있다.³² 빅데이터 분석은 컴퓨터의 자연어 처리, 데이터 색인 및 정보검색, 인간의 학습 기능을 모방한 딥러닝, 대규모 텍스트로부터 의미를 추출하는 텍스트마이닝 등이 발전함에 따라 다양한 분야에 활용되고 있다. 헬스케어 분야에 있어서 빅데이터의 적용은 올바른 생활습관의 선택, 근거-기반의 안전하고 효과적인 치료, 임상 효과를 높여줄 의료제공자의 선택, 의료비용의 절감, R&D 생산성 강화 등을 가져올 것으로 전망된다.^[49] 우리나라도 건강보험심사평가원이 2014년 보건의료빅데이터센터를 개소하고 통계분석 서비스를 제공하는 등 헬스케어 분야의 빅데이터 활용에 관심을 보이고 있다.

④ 생활기록과 웨어러블 디바이스

정밀의료가 보다 확장되기 위해서는 유전체 정보뿐 아니라 생활기록(life-log) 정보의 수집과 분석을 연계해야 한다. 과거에는 환자의 증상을 토대로 의료진의 직관 및 경험에 따라 의료 서비스가 제공되었으나 현재는 환자의 의무기록을 기반으로 패턴을 분석하여 의료 서비스가 이루어지고 있다.^[50] 향후에는 병원의 의무기록뿐만 아니라 유전 정보, 생활기록(개인의 식습관, 환경 등)이 통합된 빅데이터를 기반으로 개인에 맞춤형된 의학적 처방을 제공하는 방향으로 발전이 예상된다.^[50]

이러한 생활기록 정보를 수집하고 분석하기 위해서는 주로 웨어러블 디바이스(wearable device)를 이용하기 때문에 이 두 개념은 주로 같이 언급된다.^[51] 웨어러블 디바이스는 사용자 신체의 가장 가까운 위치에서

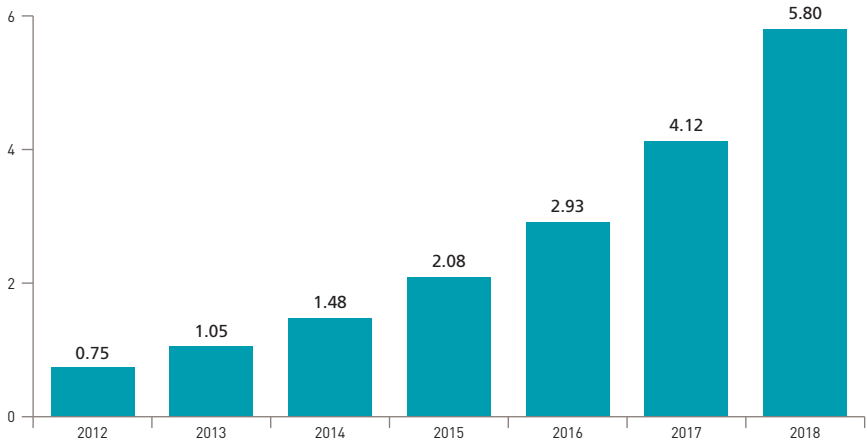
<표 3> 주요 기업의 웨어러블 디바이스 및 플랫폼				
	애플	삼성	구글	MS
하드웨어	Apple watch	Simband 등	Google glass 외 다양한 디바이스	MS밴드
형태	시계형	손목밴드	안경형	손목밴드
기능	•활동량 측정 •다양한 헬스케어 및 의료 센서 포함 •외부사업자가 개발한 다양한 헬스케어 관련 앱 활용 •구동 가능 헬스케어 앱 264개	•심박수, 심박변이도, 산소 포화도 등을 계속하기 위한 광센서 •온도/전기 피부 반응 등을 계속하기 위한 센서 •활동량 측정을 위한 가속도계, 심전도 측정을 위한 센서 등 포함	•실시간 사진 촬영, 길 찾기, 동영상 재생, 메시지전송, 인터넷접속	•심박수, 수면의 질, 체온, 걸음수, 보행거리, 칼로리 소모량, 스트레스, 자외선 노출 정도 등
소프트웨어	HealthKit, ResearchKit	SAMI	Google Fit	헬스볼트(MS Health)
기능	•Healthkit에 900여개에 달하는 앱과 다양한 디바이스가 연동되어 70여 가지의 헬스케어 및 의료 관련 데이터를 측정, 보관, 통합 가능 •병원 전자의료기록 솔루션 업체 등과 협업	•사미를 통하여 다양한 개인 생체 정보를 수집하고 분석함 •건강 진단 기능을 강화한 스마트 워치 개발과 20여 개 의료기기업체, 연구기관, 건강관리업체 등과 제휴	•자사 웨어러블을 포함한 다양한 단말기로 이용자 헬스정보를 수집, 가공 •구글글라스와 전자의료기록을 결합시키기 위해서 ‘구글 글라스’ 앱 개발업체인 오그메딕스, EHR 솔루션업체 더치로노와 제휴함	•일반 의료 솔루션을 모바일과 클라우드로 확산함(취약계층 대상) •미국 가상이동통신사업자 트랙폰, 비영리 지역보건센터 HCN 등과 전략적 파트너십을 체결
특징	•ResearchKit: 의학 연구자를 위한 플랫폼으로서 시간적, 물리적 제약없이 전 세계 아이폰 사용자를 임상 연구자 풀로 활용 가능	•SAMI를 통해 수집 및 분석되는 개인 정보는 각 개인이 관리함으로써, 데이터 보안 유지를 철저히 하고자 함	•사용자의 허가가 있을 경우 통합된 건강 데이터를 마음껏 활용하도록 해 다양한 업체들이 파트너로 참여할 수 있도록 함	•검색 엔진 Health Vault Search도 발표했는데, 이를 이용하면 사용자가 온라인으로 관련 건강정보 콘텐츠를 보다 빨리 정확하게 찾을 수 있음

³⁰ NHGRI에서 인간 유전체 염기서열의 모든 기능적 요소를 발견하기 위해 착수한 프로젝트이다.

³¹ 인간염기서열 수(약 30억 바이트) × 커버리지(30x) × DNA 가닥 수(2) = 약 1800억 바이트. 커버리지는 염기서열해독의 정확성을 높이기 위해 반복해서 읽게 되는 횟수를 말한다

<그림 7> 웨어러블 디바이스 시장 전망

(단위: 십억달러)



사용자와 소통할 수 있는 전자기기로서 주변 환경과 개인의 신체 변화에 대한 정보를 지속적으로 수집한다. 웨어러블 디바이스는 1960~70년대에는 전자기기를 단순히 부착하는 형태로 시작하였으나 1980~90년대 들어서는 착용하여 간단한 입출력 기능이 가능한 형태로까지 발전되었다. 이후 1990년대~2000년대 들어서는 속도가 빨라지고 경량화가 진행되어 군사/산업분야에서 실제로 적용 가능해졌으며 2000년 이후 스마트 디바이스와 결합함으로써 상용화가 시작되었다.^[52-53] 현재 IoT(Internet of Thing)와 더불어 웨어러블 디바이스의 발전 역시 빠르게 진행되고 있다. 이 분야에 선제적으로 움직인 곳은 삼성과 애플, 구글, MS 등 ICT 기업들로 현재 웨어러블 디바이스 및 이를 통해 수집해 구축한 플랫폼 시장을 선점하기 위하여 치열한 경쟁을 펼치고 있다.^[54-55] 기기의 형태도 기술의 발전에 따라 변화하고 있다. 기존의 시계와 같은 '악세사리형'에서 전자회로를 활용한 '직물/의류일체형' 기기가 등장하고 있으며, 향후에는 생체 친화적 소재를 사용하여 신체에 직접 부착하거나 이식하는 형태로까지 발전할 것으로 전망된다.^[53] 글로벌 통계업체인 Statista에 따르면 미국 소비자들 가장 관심을 가지는 웨어러블 디바이스는 데이터 전송가능 의료기기(38%)이고 뒤이어 손목 착용 제품(33%), 헤드셋/스마트 안경(21%), 직물/의류형(8%) 순으로 나타났으며 시장규모는 빠르게 증가하여 2018년까지 58억 달러에 달할 것으로 예상된다.³³

⑤ 표적항암치료제

암은 지난 한 세기 동안 인류가 가장 치열하게 싸워온 질병이고, 전문가들 사이에서 정밀의료를 가장 빠르게 적용할 수 있는 질병이 암이라는 데는 이견이 없다. 또한, 정밀의료가 가장 절실한 질병이 암이기도 하다. 표준약물치료를 처방했을 때 치료효과를 보이는 환자가 25%에 불과하기 때문이다.^[2] 우리나라는 1996년 제1기 암정복 10개년 계획을 시작으로 암환자의 완치율을 높이기 위해 지속적으로 노력해왔다. 제2기 암정복 10개년 계획이 종료된 현재, 최근 암환자의 5년 상대생존율('09~'13)은 69.4%로, 시행전('93~'95)의 생존율(41.2%)과 비교하여 28.2%p 증가되었다. 5년 상대생존율³⁴의 높은 증가에는 조기 진단, 의학의 발달 등 다양한 요인이 작용했겠으나, 항암제의 발달이 큰 기여를 했다고 볼 수 있다.

33_ Statista(2016) Forecasted value of the global wearable devices market 2012-2018

34_ 해당기간 중 발생한 암환자가 5년 이상 생존할 확률을 추정한 것으로 암 이외의 원인으로 사망했을 경우의 효과를 보정하기 위하여 관찰생존율을 일반인구의 기대생존율로 나누어 구한 값(국가암정보센터)

<표 4> 주요 암종 5년 상대생존율 추이

(단위: %)

발생순위	암종	발생기간					증감*
		'93-'95	'96-'00	'01-'05	'06-'10	'09-'13	
-	모든 암	41.2	44.0	53.8	65.1	69.4	28.2
1	갑상선	94.2	94.9	98.3	99.9	100.2	6.0
2	위	42.8	46.6	57.7	68.1	73.1	30.3
3	대장	54.8	58.0	66.6	73.5	75.6	20.8
4	폐	11.3	12.7	16.2	20.0	23.5	12.2
5	유방	77.9	83.2	88.5	91.1	91.5	13.6
6	간	10.7	13.2	20.2	27.8	31.4	20.7
7	전립선	55.9	65.72	80.2	91.0	92.5	36.6
8	췌장	9.4	7.6	8.2	8.3	9.4	0.0
9	담낭 및 기타담도	17.3	19.7	22.8	27.1	29.0	11.7
10	비호지킨 림프종	46.6	50.8	60.0	65.5	68.4	21.8

* 증감: '93~'95년 대비 '09~'13년 암발생자의 생존율 차이

※ 출처: 국가암정보센터

1세대 항암제인 화학항암제는 1950년대 처음으로 등장하여 1960년대부터 본격적인 연구개발이 진행되었다.^[56] 1세대 화학항암제는 현재까지도 암을 치료하는데 주요하게 활용되고 있다. 그러나 빠르게 증식하는 세포에 비특이적으로 반응하는 약의 작용 원리 탓에 정상세포까지 공격함으로써 입안이 헐거나, 머리가 빠지는 등의 부작용이 발생한다.^[57]

2000년 초반 만성 골수성 백혈병 치료제인 노바티스사의 글리벡의 등장으로 표적항암제의 시대가 열렸다. 2세대 항암제인 표적항암제는 암 발생의 원인이 되는 특정 유전자 변이를 표적하여 암세포만을 직접 공격함으로써 1세대 화학항암제보다 부작용을 낮추고 치료 효과를 높였다. 예를 들어, 글리벡은 만성 골수성 백혈병 환자에게 공통적으로 나타나는 Bcr-Abl 융합유전자에 특이적으로 작용하여 암의 증식을 저해한다.^[58] 그러나 암세포가 해당 약물에 내성을 지니면 그 효과가 급격히 떨어지는 단점도 존재한다.

최근에는 3세대 항암제로 체내 면역 시스템을 자극하여 암을 치료하는 면역항암제가 주목받고 있다. 면역항암제는 2세대 표적항암제와 마찬가지로 암세포에 특이적이며, 작용하는 기작에 따라 크게 2가지 방법으로 구분된다.^[59] PD-L1³⁵의 단일항체 약물인 키트루다(Keytruda)와 같이 항체 등으로 종양에 대한 면역을 자극하는 방법과 면역세포치료제인 카이메릭 항원 수용체 (Chimeric Antigen Receptor, CAR) T 세포치료법처럼 환자 개인의 면역 세포를 조작하여 암세포를 공격하는 방법이 있다.^[59]

현재까지는 면역항암제와 표적항암제 치료 시 적용할 수 있는 항암제 수가 제한적이고, 처방이 가능하더라도 화학항암제에 비해 건강보험급여가 지급되지 않는 경우가 많아 환자의 경제적 부담이 증가되는 경향이 있다.^[60] 그러나 향후 면역항암제와 표적항암제의 수요와 공급은 지속적으로 늘어날 것이며 이와 같은 문제점은 장기적으로 해소될 것으로 예상된다.³⁶

면역항암제와 표적항암제의 활용은 정밀의료가 지향하는 맞춤형 치료의 효과를 극대화시킬 수 있다. 정밀의료를 통해 환자에게 적합한 특정항암제 처방을 위한 효과적인 동반진단 및 치료 방법이 개발될 경우, 항암제 선택의 혼선이 줄어들고 치료 효과가 향상되어 암의 완치율이 증가될 것으로 예상된다. 또한, 국가적

35_ 암세포 표면에 있는 리간드 단백질로 T세포의 PD-1 수용체과 결합하여 면역기능 회피에 작용한다.

36_ 글리벡은 출시초기 한달 약값이 300만원에 달하였으나, 현재는 건강보험급여 적용, 특허 만료에 따른 제네릭 출시 등의 요인으로 환자의 경제적 부담이 크게 경감되었다.

차원에서는 불필요한 항암제 사용의 최소화 등으로 의료비 지출이 경감되는 효과도 함께 기대할 수 있을 것이다.

(2) 국내 정밀의료 관련 역량

우리나라 의료 서비스의 질은 매우 높은 수준이다. 2015년 기준 서울은 도시 단위의 임상시험 사이트 수에서 1위 휴스턴과 1개 차이밖에 나지 않는다.³⁷ 상위 병원들의 장비, 인프라는 최첨단을 다두고, 우수한 임상인력의 수준에 더해 최근에는 병원 기반의 R&D를 집중 추진하는 등 헬스케어 혁신의 장이 마련되고 있다고 볼 수 있다.

최근 의료 서비스의 질을 한층 높은 정밀의료에 대한 연구나 서비스 플랫폼을 구축하는 주체들이 다수 나타나고 있다. 국립암센터는 정밀의료 연구를 전담할 조직을 설립하고 관련 연구를 수행중이며, 2016년 6월 관련 연구자 등이 참여하는 국제심포지엄(Precision Medicine: Bridging Genetics to Cancer Continuum)을 개최하기도 했다. 이에 앞서 마크로젠과 암환자 대상 유전체 정보 기반 정밀의료 공동연구를 위한 MOU를 체결하는 등 혁신을 위한 기반 마련에 집중하고 있다. 암센터는 환자 유전자 분석을 통한 개별 맞춤 치료 프로토콜 개발 및 정밀의료 시행, 치료 내성 및 암 재발 기전 발굴을 통한 새로운 치료법 개발과 새로운 치료 예측인자 발굴을 통한 정밀의료 적용 확대를 핵심 목표로 삼고 있다. 삼성유전체연구소는 암 환자의 유전체 분석으로 80여 가지 암에 관여하는 유전자 변이를 검사하는 CancerSCAN™을 서비스 중이다. CancerSCAN™은 유용한 유전체 정보를 선별적으로 심층 분석하는 방식으로 비용을 낮추고 속도와 정확성을 높이는 전략을 선택하고 있다. 삼성의료원은 이 서비스를 환자에 적용하여 효과적인 표적항암치료제를 선정하는 데 활용하고 있다.

유전체 분석 분야의 민간 기업 역량 역시 높아지고 있다. 마크로젠은 1997년 설립 이래 한국인 유전체 지도 초안 완성, 한국인 전장 유전체 분석 등에 참여하면서 서열분석 역량을 제고해왔고, 2016년 2월부터는 3년간 아시아인 10만 명의 유전체를 분석하는 Genome Asia 100K 프로젝트에 참여하고 있다. 또한 분당 서울대병원, 고대 안암병원, 국립 암 센터에 정밀의학센터를 개설하고 질병 유전체 연구에 협력할 계획을 밝혔다.³⁸ 디엔에이링크는 2001년 설립 후 기초연구 역량을 축적해왔고, 2016년 질병 예방, 피부건강, 헬스 및 뷰티 부문의 개인 유전자 분석 서비스를 출시했다. 랩지노믹스는 분자진단 서비스 분야의 강점을 기반으로 비침습 산전검사 부문에서 두각을 나타내고 있다. 최근 삼성서울병원과 협력하여 암유전체 진단을 고도화할 계획을 가지고 있으며, NGS 기반 개인 유전체 서비스 부문까지 사업 영역을 확장하고 있다.

최근에는 일반소비자들이 병원을 통하지 않고 직접 유전자검사 서비스를 이용할 수 있는 길이 열렸다. 2016년 6월 30일 생명윤리 및 안전에 관한 법률의 일부 개정으로 비타민C 농도, 모발 굵기, 탈모, 색소침착, 피부노화, 피부탄력, 체질량지수, 중성지방농도, 콜레스테롤, 혈당, 혈압, 카페인대사 등 미용과 건강에 관련된 42개 유전자에 대한 DTC(Direct to Customer) 검사를 허용했다. 정부가 그간 유전자검사의 허용에 있어 보수적인 입장을 지켜왔던 점을 감안하면 상당히 전향적인 움직임을 보인 셈이다. 그러나 임상적 유효성을 입증해야 하고, 검사의 신뢰도 등 품질과 절차 관리가 까다로운 질병 관련 유전자 검사의 허용은 보류하고 있다.³⁹

이와 같이 기관별로 정밀의료의 개념을 적용한 플랫폼이 다양하게 등장하는 것은 현장에서 새로운 패러다임의 필요성을 인식한 결과로 볼 수 있다. 또한, 국내 병원과 기업들이 상당한 기술수준을 확보했고,

추가적인 기술개발과 플랫폼 구축에 의지를 보인다는 면에서 매우 긍정적이다. 그러나 국가 차원의 어젠다로 이끌어 가기 위해서는 이런 다양한 주체들의 이해관계를 조율하고, 협력을 유도해야 하는 과제가 남아 있다.

5. 정밀의료의 성공 전략과 정책적 시사점

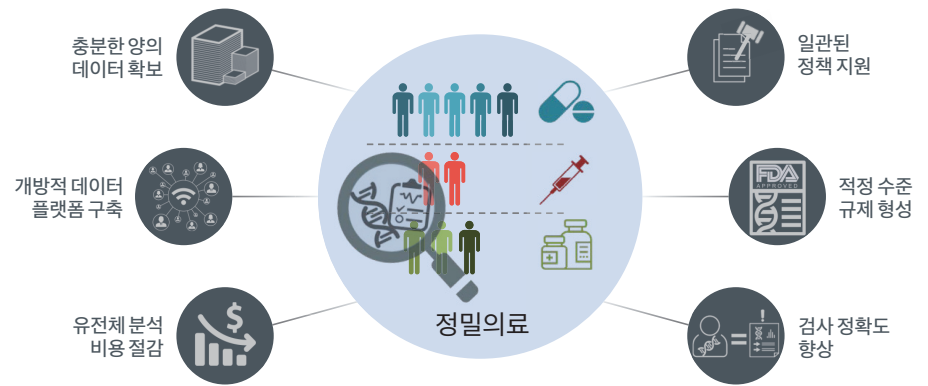
(1) 정밀의료의 성공 전략

앞선 장에서는 유전체 연구의 흐름과 정밀의료의 출현, 그리고 이를 가능하게 한 기술의 발전 양상을 살펴보았다. 각국의 정밀의료 추진현황과 관련 기술여건 등을 종합할 때 우리는 정밀의료라는 헬스케어 패러다임으로의 성공적인 전환을 위해 다음의 조건들을 충족해야 한다.

첫째, 무엇보다도 충분한 양의 데이터 확보가 핵심이다. 정밀의료는 개인을 유전 정보와 생활 및 임상 정보를 토대로 분류하는 것으로부터 시작한다. 건강 상태, 연령, 환경 등 다양한 변수들을 고려한 인구를 장기간 관찰하고, 이들의 유전체 정보를 분석할 수 있는 코호트 구축이 필요하다. 코호트가 제공해야 하는 정보는 개인의 유전체 정보뿐 아니라 질병상태, 건강기록, 식습관, 거주환경, 생활습관에 이르기까지 방대하다.⁴⁰ 따라서 필요한 코호트 구축을 위한 제도적인 유인책과 이익 공유 전략을 마련해야 한다.

둘째, 다수의 연구 주체가 공동으로 기여하고 활용할 수 있는 개방적인 데이터 플랫폼 구축이 선행되어야 한다. 대규모 코호트 구축 시 물리적으로 분산될 수밖에 없다는 현실을 감안할 때 다수의 연구 주체가 동일한 기준으로 데이터를 생산하고 관리해야 데이터 호환을 위한 불필요한 노력을 아낄 수 있다. 따라서 개인별 유전체 정보와 생활 및 임상정보를 체계적으로 수집, 관리하기 위해 데이터를 표준화하고, 다수의 주체가 생산하는 데이터의 품질을 관리할 수 있는 방안도 마련해야 한다. 정보보안에 대한 원칙도 사전에 수립할 필요가 있다. 취급해야 하는 정보들이 개인적으로 민감하고, 다수의 주체가 서로 다른 목적을 가지고 정보에 접근하고자 할 개연성이 크기 때문에 정보의 접근과 사용 권한 부여에 있어서 상업적인 목적을 일차적으로 배제하는 방법도 필요하다. 나아가 이러한 사항들이 포함된 데이터 플랫폼을 주도할 수 있는 지위와 역량을 갖춘 조직이 필요하다.

<그림 8> 정밀의료의 성공 전략



⁴⁰ 백악관의 PMI 정보보안 정책 보고서(Precision Medicine Initiative: Data security policy principles and framework)에서 임상 및 보형 청구 자료, 설문조사 및 인구학적 데이터, 유전체 및 다른 검체에서 생성된 데이터, 모바일, 이식 형태, 또는 기타 장비들로부터 생성되는 데이터 등을 포함한다고(“could include, but are not limited to”) 명시하고 있다.

³⁷ 휴스턴 601개, 서울 600개(한국임상시험산업본부)
³⁸ 2016 Korea Bio Plus 발표내용
³⁹ 일각에서는 소비자가 해외기업(국내기업의 해외법인 포함)에 검사를 의뢰하는 경우 해당 서비스를 직접 이용할 수 있어 국내 유전자 검사서비스 업체에 역차별 우려가 있다는 주장이 있다.

셋째, 유전체 해독과 분석 비용의 절감이 지속적으로 이루어져야 한다. 개인의 유전체 염기서열을 확보하는 것이 어떤 이익을 줄 수 있는지가 불명확한 상태에서 일반 시민들에게는 부담스러운 비용으로 받아들여질 수 있다. 다행히도 2000년대 초반부터 지금까지 무어의 법칙을 뛰어넘는 속도로 유전체 염기서열해독 비용의 하락이 이루어졌고, 앞으로도 하락세가 지속될 것이라는 전망은 긍정적이다.

넷째, 소비자들에게 신뢰도 높은 서비스를 제공하기 위해 검사의 정확도가 뒷받침되어야 한다. 유전체 분석을 기반으로 한 건강 정보의 예측은 이미 알려진 실증 사례를 토대로 이루어진다. 질병을 예측할 수 있는 마커가 유일하고 통계적 유의성이 높을 경우에는 문제가 없지만, 다수의 마커가 관여하고 통계적 유의성이 충분히 확보되지 않은 경우에는 마커의 선택에 따라 예측 결과가 상이하게 나타나기도 한다. 따라서 마커에 대한 기초연구와 임상적 유효성을 밝혀줄 중개연구를 꾸준히 수행할 필요가 있다.

다섯째, 유전체 분석과 임상적인 활용을 둘러싼 적정 수준의 규제가 형성되어야 한다. 정밀의료가 유전체 정보를 이용하여 추구하는 바는 개인에 특화된 처방을 제공함으로써 의료비용을 절감하고 삶의 질을 향상시키는 것이다. 의료적 처방 제공의 단서가 될 경우 분석 주체의 선정과 제공할 자료의 신빙성, 자료를 제공받을 주체와 자료를 토대로 의료적 의사결정을 내리는 과정이 적확하게 계획되어야 한다. 이러한 일련의 과정에서 행위 주체의 적합성, 도구의 신뢰성, 개인 정보의 보호절차 등에 대한 합리적인 규제를 만들어야 한다.

끝으로 지속적이고 일관된 정책 지원이 필요하다. 주요국들의 경우 국가 차원의 장기적인 계획을 가지고 추진하고 있다. 미국의 경우 코호트 구축에만 3~4년이 소요될 것으로 전망하고 있다. 중국 역시 15년이라는 긴 시간에 걸친 투자 계획을 밝혔다. 프랑스도 2006년부터 암 환자를 대상으로 지속적인 유전자 검사를 제공해왔고, 최근 2020년까지 지속되는 암 정복 계획을 수립했다. 우리도 국가 차원에서 정밀의료 청사진을 제시하고 오랜 기간 동안 계획에 맞춰 추진할 의지를 가져야 한다.

(2) 정책적 시사점

정밀의료에서 가장 중요한 데이터의 확보는 코호트 구축으로부터 시작된다. 국내 정밀의료에 투입될 잠정적 예산, 사업의 규모 등을 고려했을 때 미국, 중국과 같은 대규모 코호트 구축은 어려울 것으로 보인다. 그렇기 때문에 초기부터 코호트의 규모와 범주, 목적을 명확히 하고, 작은 규모에서도 충분히 유의미한 결과를 이끌어낼 수 있는 주력 분야를 선정해야 한다. 처음부터 모든 질병과 모든 건강정보 서비스를 목적으로 하게 될 경우 밀 빠진 독에 물 붓는 격이 될 우려가 있다. 흔히 말하는 개념검증(proof of concept)이 선행돼야 새로운 헬스케어 패러다임으로의 전환이 탄력을 받을 수 있다.

또한, 개인의 자발적 참여를 유도하고 코호트 구축과정 중 문제 발생을 최소화 하도록 참여자의 인식을 개선하기 위한 노력이 필요하다. 코호트 구축을 완료하기까지 참여자에게 상당한 시간과 노력이 요구되는 만큼, 자발적 참여를 유도하기 위해서는 인센티브 제공과 이익 공유 방안도 마련해야 한다. 코호트 구축 시 참여자 개인의 유전체정보, 임상정보, 식습관, 생활기록 등 프라이버시를 침해할 수 있는 민감한 개인정보가 다수 포함되기 때문에 정밀의료 프로젝트의 중요성, 데이터 수집 및 공유 필요성 등을 참여자에게 충분히 설명하고 과정과 결과를 투명하게 공개함으로써 코호트 구축과정 중 이탈을 방지하고 구축 후 정보 활용에 문제가 없도록 해야 할 것이다.

기존에 축적된 데이터를 활용하고 새로 생성하게 될 데이터와 연계할 수 있다면 비용을 절감하고 보다 많은 성과를 달성할 수 있다. 건강보험공단과 건강보험심사평가원에 수십 년간 축적된 국민건강검진기록과

보건의료빅데이터는 다른 나라에서는 유례를 찾기 힘든 데이터로 우리가 가진 경쟁력이다. 또한, 포스트게놈다부처유전체사업 등 유전체 사업에서 추진 중인 맞춤형료과제의 성과 공유 방안을 검토하면 정밀의료 사업에 투입될 노력 절감 및 신속한 기술개발을 기대할 수 있을 것이다.⁴¹

인력양성에도 관심을 가져야한다. 정밀의료의 성공을 위해서는 현장에서 요구되는 적정수준의 유전체 전문인력, 특히 바이오인포매틱스 분야 인력 양성이 필수적으로 수반되어야 한다. 정부가 바이오헬스 미래 新산업 육성 전략을 통해 2017년까지 바이오인포매틱스 등 새로운 일자리에 대한 취업확대를 제시한 만큼, 유전체 분야의 실질적인 교육훈련과 일자리 수요를 창출하여 전문인력의 수준을 강화하고 규모를 확대해나가야 한다. 그러나 지나친 쏠림 현상으로 인한 역효과가 발생하지 않도록 주의를 기울여야 한다.

장기적으로는 병원의 표준화된 전자의무기록 시스템 구축도 필요하다. 정보는 정밀의료의 시작이자 끝이라고 해도 무방할 정도로 중요한 요인이고, 내원자에 대한 방대한 양의 정보를 체계적이고 효율적으로 관리하기 위해 전자의무기록의 활용과 공유가 필요하다. 우리나라는 주요 선진국들보다 병원의 전자의무기록 구축률이 높다는 점에서 유리하다고 볼 수 있으나, 동시에 시스템이 표준화 돼있지 않다는 점에서 불리하기도 하다. 국내 대다수 병원들이 도입한 전자의무기록이 건강보험 청구의 편의성에서 가장 큰 동기를 찾았다는 점은 병원들이 표준화된 전자의무기록 시스템을 구축할 유인 정책의 필요성과 해법을 동시에 주고 있다. 전자의무기록의 비표준이 초래한 빈번한 병원 수출의 실패와 감염자의 타 병원 진료기록의 확인이 되지 않아 통제에 어려움을 겪었던 2015년 메르스(Middle East Respiratory Syndrome, MERS) 사태를 거울삼아 의견을 모아야 한다.

(3) 맺음말

우리는 인류의 역사상 가장 혁신적인 의료 시스템의 출현을 눈앞에 두고 있다. 아직 해결해야 할 문제들이 남아 있지만 과학적 근거가 축적되고, 우리들 자신에 대한 정보가 쌓이면서 변화의 방향성은 더욱 공고해질 것이다. 미국 정부는 야심차게 암과의 전쟁을 다시 선포했으며, 1971년 처음 무모한 전쟁을 시작했을 때와는 상황이 많이 달라졌다. 그 동안 상대를 더 잘 알게 됐고, 우리 자신에 대해서도 더 잘 알게 됐으며, 적절한 무기와 전략도 손에 넣었다. 미국 등 선진국들이 이슈를 선점했지만 우리나라도 빠르게 추격하려는 의지를 보이고 있다.

우리가 경험하게 될 변화는 많은 사람들이 열정을 가지고 얘기하는 것보다 더딘 속도로 진행될 것이다. 임상현장에서 정밀医료를 적용하는 데 있어서 필요한 생물학적 근거를 축적하는 것에도 많은 시간이 소요된다. 그러나 달리 바라보면 철저하게 준비할 수 있는 충분한 시간이 주어졌다고 볼 수 있다. 오랜 시간의 투자와 노력이 필요한 일이기 때문에 단순히 경제성의 논리로만 접근해서는 성공하기 어렵다. 정부의 정책 역시 미래에 다가올 국민들의 보다 나은 건강을 위해 충분히 긴 기간을 염두에 두어야 한다. 긴 호흡을 갖고 국내외 헬스케어 전문가들의 역량을 결집하여 작게는 대한민국 보건의료 및 생명과학의 수준을 향상시키고, 나아가 인류의 보다 건강한 삶에 기여할 수 있게 되기를 기대한다.

⁴¹ 포괄적 동의를 받은 대상에 한해서는 유전체 정보의 공동 활용이 가능할 것으로 사료된다.

● 참고문헌

[1] OECD Health Statistics 2016
[2] Brian B. Spear et al.(2001), Clinical application of pharmacogenetics, TRENDS in Molecular Medicine, 7(5), pp. 201-204
[3] Alfred D. Hershey and Martha Chase(1952), Independent functions of viral protein and nucleic acid in growth of bacteriophage, The Journal of General Physiology 36(1), pp. 39-56
[4] James D. Watson and Francis H. Crick(1953), A structure for Deoxyribose Nucleic Acid, Nature 171, pp.737-738
[5] 한국생명공학연구원(2011), BT기술동향보고서 - 인간유전체 분석연구 및 활용기술
[6] 신항숙(2013), 1980년대 초 한국에서 언론과 과학계의 유전공학 담론, 한국과학사 학회지 35(1), pp.43-67
[7] 김훈기(2010), 한국 생명공학정책의 형성과 과학자집단의 정책 활동: 유전공학육성 법 제정에서 '바이오텍 2000' 수립까지, 한국과학사학회지 32(2), pp. 187-221
[8] 이상엽 외(2006), 국가연구개발사업 백서, 한국과학기술기획평가원, pp. 1
[9] 과학기술처(1987), 특정연구개발사업 시행5년, pp.11
[10] 미래창조과학부(2013), 21C 프론티어연구개발사업 총괄백서, pp. 22
[11] National Research Council(2011), Toward precision medicine: building a knowledge network for biomedical research and a new taxonomy of disease, The National Academies Press, Washington. D.C.
[12] PMI Working Group(2015), The Precision Medicine Initiative cohort program - building a research foundation for 21st century medicine, NIH
[13] U.S. National Library of Medicine (Htts://ghr.nlm.nih.gov/primer/precisionmedicine/initiative, 최종 조회 시기 2016.8.4.)
[14] NCI GDC Data protal (https://gdc-portal.nci.nih.gov/search/s, 최종 조회 시기 2016.8.4.)
[15] Mike Orcutt(2016), The rocket fuel for Biden's "Cancer Moonshot"? Big Data, MIT Technology Review, 2016.6.29
[16] Tania Rabesandratana(2014), U.K.'s 100,000 Genomes Project gets £300 million to finish the job by 2017, Science
[17] Nick P. Taylor(2015), U.K. commits a further \$375M to 100,000 Genomes Project, Fierce Biotech
[18] 생명공학정책연구센터(2016), 중국의 정밀의학 육성 계획, BioNwatch 16-36
[19] Aveisan(2016), Genomic Medicine France 2025
[20] 홍성혜(2016), 일본 정부의 게놈의료 추진현황, BioNwatch, 생명공학정책연구센터
[21] Lisa A. Onaga(2014), Ray Wu as fifth business: deconstructing collective memory in the history of DNA sequencing, Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences 46, pp. 1-14
[22] Elaine R. Mardis(2013), Next-generation sequencing platforms, Annual reviews of analytical chemistry 6, pp. 287-303
[23] Norman J. Dovichi and Jianzhong Zahng(2000), How capillary electrophoresis sequenced the human genome, Angewandte Chemie International Edition 39(24), pp. 4463-4468
[24] International Human Genome Sequencing Consortium(2001), Initial sequencing and analysis of the human genome, Nature 409, pp.860-921
[25] Marcel Margulies et al.(2005), Genome sequencing in microfabricated high-density picolitre reactors, Nature 437, pp. 376-380
[26] 이수민(2014), 최근 차세대염기서열분석(NGS) 기술 발전과 향후 연구 방향, BRIC View 2014-T05
[27] Mizuho Securities USA and Sequencing Survey, 2013
[28] Eric E. Schadt et al.(2010), A window into thrird-generation sequencing, Human Molecular Genetics 19(R2), pp. R227-R240
[29] Erwin L. van Dijk et al.(2014), Ten years of next-generation sequencing technology, Trends in Genetics 30(9), pp. 418-426
[30] Genomeweb(https://www.genomeweb.com/sequencing/roche-shutting-down-454-sequencing-business, 최종조회시기 2016.8.4.)
[31] Martin Jinek et al.(2012), A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity, Science 337(6096) pp.816-821
[32] 한국바이오안전성정보센터(2015), 유전자가위기술소개 및 활용, Biosafety 16(2)
[33] Heidi Ledford(2015), CRISPR, the disruptor, Nature 522, pp. 18
[34] David Cyranoski, Sara Reardon(2015), Chinese scientists genetically modify

human embryos, Nature
[35] Ewen Callaway(2016), UK scientists gain licence to edit genes in human embryos, Nature 530(7588)
[36] Sara Reardon(2016), First CRISPR clinical trial gets green light from US panel, Nature
[37] David Cyranoski(2015), Super-muscly pigs created by small genetic tweak, Nature 523(7558), pp.13-14
[38] Chul-Yong Park et al.(2014), Targeted inversion and reversion of the blood coagulation factor 8 gene in human iPS cells using TALENs, Proc Natl Acad Sci USA 111(25), pp. 9253-9258
[39] Je Wook Woo et al.(2015), DNA-free genome editing in plants with preassembled CRISPR-Cas9 ribonucleoproteins, Nature Biotechnology 33, pp. 1162-1164
[40] Bernd Zetsche et al.(2015), Cpf1 is a single RNA-guided endonuclease of a class 2 CRISPR-Cas system, Cell 163(3), pp. 759-771
[41] Daesik Kim et al.(2016), Genome-wide analysis reveals specificities of Cpf1 endonucleases in human cells, Nature Biotechnology
[42] Brendan Maher(2012), ENCODE: The human encyclopaedia, Nature 489(7414), pp. 46-48
[43] Xinping Yang et al.(2016), Cell 164(4), Widespread expansion of protein interaction capabilities by alternative splicing, pp. 805-817
[44] John Travis(2015), Making the cut, Science 350(6267), pp. 1456-1457
[45] 위갑인, 김진수(2013), 유전체 교정을 위한 유전자가위(engineered nuclease)의 개발과 활용, 분자세포생물학뉴스레터, 웹진
[46] James Manyika et al.(2011), Big data: the next frontier for innovation, competition, and productivity, McKinsey Global Institute
[47] Douglas Laney(2001), 3D data management controlling data volume, velocity and variety, Application Delivery Strategies, META Group Inc.
[48] Christy Petty and Laurence Goasduff(2011), Gartner says solving 'big data' challenge involves more than just managing volumes of data, Gartner
[49] Peter Groves et al.(2013), The 'big data' revolution in healthcare, McKinsey&Company
[50] 백몽민(2016), ICT와 디지털 헬스케어 융합 통한 정밀의료 실현 가속화, 보건산업 동향 49, pp.2-5
[51] 김주한(2015), 빅데이터 기반 개인 맞춤형료 서비스, BioNpro
[52] KT(2013), Wearable 컴퓨터를 활용한 생태계의 확장-post 스마트폰 시대의 도래, KT 스마트블로그
[53] 연구성과실용화진흥원(2015), 웨어러블 디바이스 기술 및 시장 동향, S&T Market Report vol. 26
[54] 김승환(2015), 개인중심 건강관리 플랫폼 동향분석, 전자통신동향분석 제30권 제 5호, 한국전자통신연구원
[55] 이민화(2016), 디지털 헬스케어-디지털 헬스케어의 미래, 보건산업동향, 2016-1 vol.49, pp. 6-11
[56] 육종인(2016), 항암 표적 연구개발 동향, (재단)범부처신약개발사업단 기고문
[57] 한지연(2013), 암 알면 이긴다! 암치료부터 이차암 예방까지, 국립암센터 뉴스레터
[58] 김혁(2012), 만성골수성백혈병에서 Tyrosine kinase 억제제의 발전, Hanyang Medical Reviews 32(2), pp103-111
[59] 지현배(2015), 항암 면역 치료제의 분야와 개발 동향 보고서, BRIC View 2015-T01
[60] 한국경제(2016), 약값만 年 1억...면역항암제 건보 적용하나, 2016.7.21.

생활화학제품의 안전관리방안

김진용_한국환경산업기술원 보건학박사



<표 1> 화평법에 따른 환경부 관리 생활화학제품

품공법 이관 품목 (고시 제정·시행, '15.4.)	신규 관리 품목 (고시 개정으로 추가, '15.6.	
일반 생활화학제품(8종)	일반 생활화학제품(4종)	살생물제품(3종)
세정제, 합성세제, 표백제, 섬유유연제, 코팅제, 접착제, 방향제, 탈취제	방청제, 김서림방지제, 물체 탈 염색제, 문신용 염료	소독제, 방충제, 방부제

이러한 현실적 문제점을 해결하고자 산업통상자원부의 품공법에 의해 관리되고 있던 세정제 등 8개 품목이 포함된 생활화학제품 및 살생물제품 등 생활 속 화학제품에 대한 안전관리가 「위해우려제품의 지정 및 안전·표시 기준」을 통해 환경부로 일원화되었고, 이에 따라 현재 방향제, 탈취제 등 15종 위해우려제품에 대하여 위해성평가 결과를 반영한 안전·표시기준이 제정되어 관리되고 있다.

이와 같이 현재 일부 생활화학제품은 소비자의 안전을 보호하기 위해 위해우려제품으로 지정하여 안전·표시 기준 등에 따라 관리하고 있으나, 위해 우려제형 및 제품의 노출 특성에 따라 건강 영향이 달라질 수 있음을 고려할 때, 보다 제품 특성 및 노출 형태에 특화된 안전관리방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

또한 소비자 노출 및 위해 우려가 높은 체형으로 분류되는 스프레이 등의 형태의 제품에 대한 분류체계 확립 및 상세 위해성평가가 필요한 현실이며, 위해우려제품 지정 확대를 통한 제품의 안전관리 사각지대가 해소되어야 할 것이다.

이를 위해서는 미규제 위해우려제품의 유통 현황 및 위해성을 고려한 분류체계 확립과 함께 우선적으로 관리가 필요한 대상 제품의 선정 등을 통해 효과적인 관리 체계 방안이 구축되어야 한다.

또한 타 법령에 관리되지 않거나 시장 유통제품 중 소비자 이슈 제품 중 위해성이 높은 제품부터 단계적으로 안전관리제도에 포함하여 관리해 나가는 등의 잠재적인 위해우려제품에 대한 지속적인 지정 확대 계획을 수립하고 이에 따라 관리방안을 마련함으로써 사전 예방적 관리 제도를 통한 위해우려제품의 안전성을 강화해 나가야 할 것이다.

이와 같이 생활속 화학제품의 안전 관리 방안을 도출하기 위하여 본 논고에서는 생활화학제품에 대한 국내외 관리 현황을 고찰하고 이를 토대로 우리나라 실정에 적합한 제품안전관리를 위한 정책적 방안을 제시하고자 한다.

2. 본론

(1) 국외 현황

① 미국

미국의 화학물질 및 화학제품에 대한 사전·사후 안전 관리는 관련 법규에 따라 환경보호청(EPA) 와 소비자보호원(CPSC)에서 관련 업무를 수행하고 있다. 미국의 경우 소비자 제품의 유해성을 대상 품목, 사용자의 특성에 따라 다양한 법규로 규제하고 있으나, 국내의 위해우려제품 관리와 같이 개별 제품에 따라 화학물질을 규제하는 방식이 아닌 물질을 기반으로 제품을 규제하는 형태를 취하고 있다.

<표 2> 미국 제품안전 관련법

법규명	주요내용	규제대상	담당부처
살균·살충·살서제법 (FIFRA, Federal Insecticide Fungicide and Rodenticide Act)	• 살균·살충·살서제 및 농약류·관리법령이며, 활성성분 과 최종 제품에 대한 환경청의 승인 후 유통	• 살균·살충·살서제품 및 농약류(미생물과 식물, 화학 적 살균제품, 소독 제품, 산업용 살생물 제품 포함)	환경 보호청 (EPA)
연방유해물질법 (FHSA, Federal Hazardous Substances Act)	• 가정용 소비제품의 안전한 보관과 사용을 위한 사전 예방적 표지 부착 제도	• 생활화학용으로 사용 되는 물질 및 제품 등 광범위한 규제대상 목록 지정	소비자 보호원 (CPSC)
소비자용 제품 안전법 (CPSA, Consumer Product Safety Act)	• 소비자 제품의 안전 규정, 시험 및 라벨링 규정외 제 품안전위원회에 관한 사항	• 유아용 목욕용품 등 생활용품 및 접착제, 납 함유 페 인트 등의 화학 제품 등 소비자 사용 제품	
소비자용 제품 안전 개선법 (CPSIA, Consumer Product Safety Improvement Act)	• 소비자 제품 안전정보 의무 신고 제도 소비자 제품 안 전 법보다 강화된 규제	• 방염성과 납, 가소제 등의 규제, 12세 이하의 아동 및 3세 이하의 유아용품 등 규제	
중독방지포장법 (PPPA, Poison Prevention Packaging Act)	• 어린이 보호 포장에 관한 규제	• 생활화학 가정용품 및 의약품, 화장품, 화학 물질, 특정 물질 함유 제품 등	

○ 살균·살충·살서제법

또한 살균·항균·방부 등의 기능을 하는 살생물질 및 살생물 제품의 관리는 살균·살충·살서제법 (Federal Insecticide Fungicide and Rodenticide Act, 이하 FIFRA)을 통해 이루어지고 있다.

FIFRA에서 정의하는 살충제란 병해를 예방, 파괴, 퇴치 또는 완화할 의도로 사용되는 물질이나 그 합성물을 의미하며, ‘antimicrobial pesticide’ 라는 용어로 정의되며 화학적 살균제품, 기타 소독제품, 산업용 살생제품이 포함된다.

또한 FIFRA는 농약의 제조, 수입, 판매, 농약성분을 생산하는 미생물과 식물의 안전성 심사에 적용되며, 식품의약품안전청(FDA) 소관 법령인 식품의약품 연방규제법(FDCA)에 따라 관리되고 있는 제품은 제외되고 있다.

시장에서 판매되는 살생물제는 판매 전에 농약관리국에 안전성 등의 자료를 제출하며, 이들 제품의 유효성분과 최종제품 모두 EPA의 승인을 거치도록 규정하고 있다.

이때 생산, 제조 및 수입업체가 제출해야 하는 자료는 제품의 화학성분 자료, 독성자료, 안전을 위해 필요한 성분을 나타내는 표시 등이 포함되며, 제품을 등록한 자는 위해성평가를 통하여 발견된 부정적 영향에 대하여 즉시 보고하여야 하며, 제품의 부작용에 대한 정보가 발견될 경우 EPA는 위해성평가 결과를 검토하여 이에 따라 등록을 취소하거나 변경할 수 있도록 되어있다.

○ 연방유해물질법

연방유해물질법(Federal Hazardous Substances Act, 이하 FHSA)은 가정용 소비제품의 안전한 보관과 사용을 위하여 시장 출시 전 안전표지 부착을 요구하고 있다.

이는 FHSA 에 의하여 유해물질로 분류된 물질이 소비자제품에 포함되는 경우 경고 표시와 경고 문장을 표시하도록 권고하고 있는 것이다.

FHSA의 주요 적용대상은 생활용품으로써 제품이 야기할 수 있는 잠재적 유해성에 대해서도 경고 표시를 하여야 하며, 특히 독성, 부식성, 가연성 혹은 인화성, 자극성, 강한 과민성, 열이나 분해를 통하여 압력을 생성하는 제품에 우선적으로 적용되고 있다.

특히 어린이 용품 중 어린이에게 상해나 중대한 건강영향을 초래할 수 있는 제품도 적용대상에 포함되고

있다. 또한, FHSA는 해당 제품의 경고표시 식별이 명확하고 경고표시 상의 정보가 또렷하게 전달되도록 요구하고 있으며, 이에 대한 가이드라인은 16 CFR 1500.121 (Labelling Requirements; Prominence, Placement, and Conspicuousness)을 통하여 제공되고 있다.

○ 소비자제품안전법

미국은 화학물질의 함유제품 사용으로 인한 위해를 사전에 예방하기 위해 소비자보호원(Consumer Product Safety Commission, 이하 CPSC)을 소관으로 소비자제품안전법(Consumer Product Safety Act, 이하 CPSA)을 1972년에 제정하였다.

CPSA는 위해제품에서 발생하는 불합리한 상해위험으로부터 소비자를 보호하도록 규정하고 있다. 소비자제품 안전성과 관련해 대상제품 제조자, 수입자 및 유통업자에 대한 폭넓은 규제권한을 가지고 있는 CPSC는 관련 데이터 수집 및 분석, 사고 및 소비자 불만 조사, 안전기준 및 규칙 제정, 제품 리콜 등 다양한 수단을 통해 소비자안전보호 업무를 수행하고 있다.

CPSC의 소비자제품 규제체계는 제조자, 수입자 및 유통업자에 대한 잠재적 유해제품의 자발적인 보고 시스템을 기본으로 하고 있으며 정확한 보고를 제때 이행하지 않은 기업에 대해서는 수백만 달러 규모의 벌금이 부과되기도 한다. 이러한 CPSC의 규제권한은 집, 학교, 여가활동을 포함해 소비자가 일상생활에서 사용할 가능성이 있는 거의 모든 제품에 대해 적용되며 자동차, 항공기, 보트, 식품, 충기류, 담배, 의약품, 의료기기 및 화장품과 같이 다른 연방기관에서 규제되고 있는 제품은 제외되고 있다.

○ 소비자제품안전개선법

소비자제품안전개선법(Consumer Product Safety Improvement Act, 이하 CPSIA)은 기존의 CPSA 를 대체하는 더 강력하고 광범위한 규제법으로 2008년 11월 12일 시행되었다.

CPSIA 의 목적은 소비자제품안전법의 내용과 소비자제품의 안전성 관련 정보를 의무적으로 신고하도록 하고, 12세 이하 어린이용 제품 분야를 확대하기 위함이라 할 수 있다.

그 적용범위는 소비자제품안전법의 적용범위와 12세 이하의 어린이용 소비자 제품 및 12세 또는 그 이하의 어린이 놀이용으로 사용하도록 의도된 제품, 그리고 3세 이하 어린이의 잠을 재우거나 수유·식사를 돕도록 의도된 제품 등 이다.

또한 CPSIA 에 따라 12세 이하 어린이가 사용하는 모든 제품의 제조업체는 제품의 사용기간 동안 떼어지거나 지워지지 않도록 제조사명 및 수입업체 정보, 제조 일자와 장소, 제조번호 등 생산자 정보를 제품과 포장에 동시에 부착해야 하며 어린이 용품에 납 성분 규제와 프탈레이트 관리가 되고 있다.

○ 중독방지포장법

중독방지포장법 (Poison Prevention Packaging Act, 이하 PPPA)는 어린이(5세 이하) 보호 포장에 관한 내용을 규정하고 있으며, CPSC 가 결정하는 가정용 제품(5세 이하 어린이가 제품을 마시거나, 섭취하거나 취급하였을 때 심각한 상해나 질병을 초래할 위험을 가진 제품)에 대하여 어린이 보호 포장(Child-Resistant Packaging, CRP)을 준수하도록 규정하고 있다.

이때 어린이 보호 포장의 포장시험은 건강한 50명의 어린이들로 구성된 시험 집단에서 85% 이상이 포장을 개봉할 수 없어야 하며, 성인의 경우 100명의 노령인구집단으로 이루어진 시험 집단 중 90%가 5분 이내에

제품을 개봉하고 닫을 수 있어야 한다.

어린이 보호 포장은 CPSIA하의 제3자 검증을 요구하지는 않지만 의약품 혹은 가정용 제품에 대하여 CPSC가 어린이 보호 포장을 요구하는 경우 수입업자나 제품을 포장하는 관련업자는 PPPA에 따른 준수 증서를 발급 받아야 한다.

② 유럽

유럽은 Regulations (EC) No 648/2004 on detergents, Biocidal Products Regulation 등에 따라 세정제, 살생물제 안전성을 관리하고 있으며 REACH/CLP에서 방향제 및 탈취제 내 유해물질에 대한 함량 기준을 제시하고 있다.

유럽도 우리나라 위해우려제품과 같이 제품에 따른 함유된 물질을 관리하는 규제방식이 아닌 물질을 바탕으로 제품을 규제하는 형태를 취하고 있으며 REACH 를 기반으로 수입, 유통되는 화학물질의 안전관리 정책을 강화하고 있다.

○ Regulations (EC) No 648/2004 on detergents

유럽연합의 세제 규정은 계면활성제로 인한 수생태계 오염 방지 및 인체건강보호를 목적으로 제정되었으며 부속서 III 에서 규정한 호기성 최종 생분해 기준을 만족하는 계면활성제 및 해당 계면활성제 함유 세제제품은 생분해성과 관련하여 더 이상의 규제 없이 시장유통이 가능하다.

제조업자 및 수입업자에 대하여 제품 구성성분, 원료 및 완제품의 특성, 인체안전성 시험결과 등 관련 정보를 해당 주무기관에 제공할 의무가 부여된다.

부속서 VII에 포함된 물질의 농도가 0.2%를 초과하는 경우 제품 포장에 함량 표기 및 알레르기 유발 합성향료 및 방부제 포함 여부를 명기해야 한다.

대상 품목은 세척 및 세정을 목적으로 사용되는 비누 또는 그 외 계면활성제를 함유하고 있는 세제, 모든 성상 및 형태, 가정용·산업용 제품을 모두 포함하며, 기타 세제로 분류되는 섬유유연제, 표백제 등까지 포함된다.

법령에서는 세제와 관련하여 세제에 함유되어 있는 계면활성제의 생분해성, 생분해성을 근거로 한 계면활성제의 제한 또는 금지, 방향제(합성향료)의 알러젠을 비롯하여 세제의 부가적인 경고표시, 폐기에 대한 정보에 대해 규정하고 있다. 또한 본 법령은 2006년에 일부 개정된 이후, 2012년에는 소비자용 세탁 세제와 자동 식기세척제 세제에 인산염과 기타 인산염 화합물의 사용을 규제하기 위하여 다시 개정된 바 있다.

○ BPR(Biocidal Products Regulation)

유럽에서는 살생물제를 안전하게 관리할 수 있는 관리법으로서 1998년 살생물제관리지침(Biocidal Products Directive, 이하 BPD)를 도입한 후, 이를 강화한 살생물제관리법(이하 BPR)을 2013년에 발효한 바 있다.

살생물제는 하나 이상의 활성물질로 구성된 혼합물의 형태로 화학 또는 생물학적 측면에서 유해한 유기생물을 규제하기 위하여 사용자에게 공급되는 제품을 의미한다. BPR은 고유해성 물질의 사용을 금지하며, 살생물제를 사용한 제품에 대해서도 판매를 금지하거나 표시, 포장 규정을 명시하는 등 관련정보

제공을 의무화하고 있다.

살생물제에 사용할 수 없는 물질은 EU CLP 규정에 따른 발암성, 생식세포변이원성 및 생식독성 1A 또는 1B 물질, 내분비계 장애물질(endocrine disrupters), PBT 물질(잔류성, 생물농축성 및 독성물질), vPvB 물질(고잔류성, 고생물농축성물질)로 규정하고 있으며, BPR의 살생물제 유형 중 살균제는 세척액, 파우더 및 유사제품을 포함하여 살균 효과를 나타내지 않는 세척제를 제외하고, 방부제는 일반적으로 미생물 및 조류의 성장을 방지하는 제품만 포함하고 있다.

○ REACH/CLP

유럽연합의 신화학물질관리제도(이하 REACH)와 분류, 표지 및 포장에 관한 법률(이하 CLP)은 화학물질의 위해성에 근거한 법률로써 유럽 시장에 직접 또는 간접적으로 제품을 수출하는 기업들은 원료물질부터 완제품에 이르기까지 성분의 독성과 위험성, 분류 및 표지 체계 근거를 위한 새로운 SDS(safety data sheet)를 작성하여야 한다.

EU의 REACH 제도는 전세계 화학물질관리제도에 있어 매우 중요한 전환을 이루었으며, 특히 물질의 등록, 교역과 통관, 직업적 안전보건, 소비자 안전보건, 형사적 처벌 등 전반적인 영역의 제반 문제가 통합 법령에 의하여 관리된다는 점에 큰 의미를 둘 수 있다.

반면 CLP는 기존의 Directive 67/548/EEC와 1999/45/EC(유해물질, 혼합물에 관한 분류 및 표지에 관한 법령)을 대신하는 규정으로서 GHS에 근거한 화학물질의 유해성 정보전달이 이루어질 수 있도록 규정하고 있다.

③ 일본

일본은 소비자안전법, 가정용품규제법을 중심으로 국내와 유사하게 개별 제품에 대한 함유물질의 안전관리 정책을 추진하고 있으며 전반적으로 우리나라와 유사한 법률 체계를 가지고 있는 특징이 있다.

○ 소비자안전법

소비자안전법은 소비생활 전반에 걸쳐 소비자의 안전을 확보하기 위하여 제정된 법으로 소비자 안전을 확보하기 위하여 기본방침의 수립, 지방자치단체의 소비생활센터의 설치를 통한 소비생활 상담 및 소비자사고에 관한 정보의 수집·분석을 통해 결과를 공표하도록 하고 있다.

또한 지방자치단체에 소비생활상담에 관한 사무의 처리 및 소비생활센터의 설치, 소비자사고에 관한 정보의 수집 등 소비자피해의 발생 또는 확대의 방지를 위하여 필요한 조치 등을 강구하도록 규정하고 있다.

특히, 소비자 사고 발생에 관한 정보의 통지(동법 제12조)및 정보의 수집과 분석(제13조) 규정에 따라 행정기관장, 광역자치단체장, 기초자치단체장은 사고 발생 시 중대사고의 개요 등 기타 내각부령이 정하는 사항을 통지하고 리콜을 명령할 수 있다.

○ 가정용품규제법

일본의 가정용품 규제법은 소비생활용 제품의 안전성을 확보하고 소비자의 생명 또는 신체에 대한 위해 방지를 도모하기 위하여 해당 제품의 제조와 판매에 대한 사항을 규제하고 있다.

법률에서 규정하는 가정용품은 주로 일반 소비자의 일상생활에서 사용되는 제품으로 속옷 등의 섬유제품,

의료품, 가정용 세제 등을 포함하며 화장품, 식품 등은 타 법률로 규제하고 있다.

본 법률에 의거하여 지정된 20종의 유해물질에 대해 그 검출기준을 초과하는 제품에 대해서는 판매 및 증여가 금지되며 안전기준이 정해지지 않은 가정용품에 대해서도 해당제품이 건강상 피해를 발생시킬 것으로 예상되면 후생노동성장관 및 해당 지자체의 장은 “유해물질 함유제품의 회수”를 명령할 수 있다.

④ 기타 국가

○ 뉴질랜드 HSNO Act(Hazardous Substances and New Organism)

HSNO Act 는 1996년 뉴질랜드 국회에서 통과된 화학물질관리 법률로 Environmental Risk Management Authority(이하 ERMA)가 본 법의 실행에 대한 책임을 가진다.

ERMA가 지향하는 목적은 유해물질 및 신규 유기물질의 수입과 제조, 도입과 사용과 관련한 환경, 공중보건과 안전상의 위험성을 효율적으로 보호하고 관리하는 것으로써, HSNO Act 를 통해 승인되지 않은 유해물질(잔류성물질 등)의 수입·제조는 금지하고 있다.

HSNO Act 에 따른 화학물질의 분류근거, 참고문헌 등은 CCID(Chemical Classification and Information Database)를 통해 확인이 가능하다.

○ 캐나다 Hazardous Products Act

Hazardous Products Act 는 완구, 아동용품에 대한 안전기준과 공기청정제, 섬유탈취제에 함유된 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, 이하 VOCs) 등을 규제하고 있다.

본 법의 적용대상은 HPR(Hazardous Products Regulations)에 제시된 완구, 아동용품 등을 모두 포함하며 타 법령에서 규제하고 있는 품목(농약, 폭발물, 화장품, 식품 등)은 제외되고 있다.

또한 공기청정제 및 섬유탈취제에 함유된 VOCs를 규제하고 있으며, 공기청정제의 경우 형태에 따라 VOCs 함량을 ≤3%(w/w) ~ ≤60%(w/w)로 제한하고 있고, 섬유탈취제는 에어로졸형태의 경우 ≤15% wgt, 그렇지 않은 경우 ≤6% wgt로 VOCs 함량을 제한하고 있다.

(2) 국내 생활화학제품 안전관리 현황

국내의 생활화학제품에 대한 안전관리는 지난 2015년 1월 화평법이 시행되기 이전에는 앞서 서술한 바와 같이 산업통상자원부의 품공법에 의해 관리되고 있었고, 현재는 환경부의 화평법에 의해 생활환경속 화학제품이 관리되고 있다.

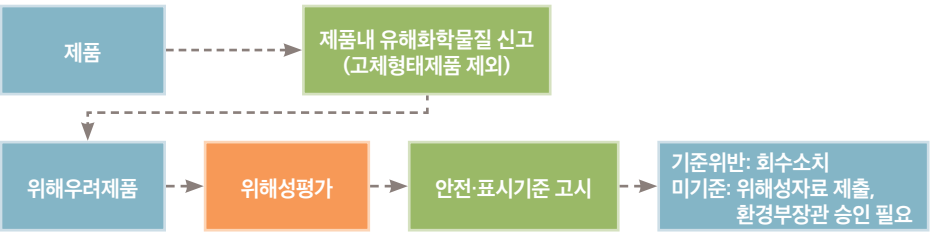
① 화학물질 등록 및 평가 등에 관한 법률 (화평법)

화평법상에서 화학제품관리는 위해우려제품과 유해화학물질 함유제품 관리로 구성되어 있으며, 유독물 및 허가·제한·금지물질 등 유해화학물질이 함유된 생활화학제품의 경우 제품 내 함유물질별 총량 1톤 이상, 함유량 0.1% 이상인 경우 해당 제품 제조자와 수입업자는 환경부에 신고를 하게끔 규제하고 있으나, 이는 제품 내 물질정보를 확보하기 위한 것으로, 위해우려제품 관리와는 별개로 이루어지고 있다.

이와 함께 위해우려제품은 생활용 제품과 살생물제(Biocide)의 화학제품에 대해 국민의 건강이나 환경에 위해 가능성이 있는 제품을 선정하여 고시한 것으로써 다음과 같은 절차에 따라 관리되고 있다.

이러한 위해우려제품은 지난 2015년 4월 시행되어진 「위해우려제품 지정 및 안전·표시기준」 고시(환경부)를

<그림 1> 위해우려제품 관리 절차

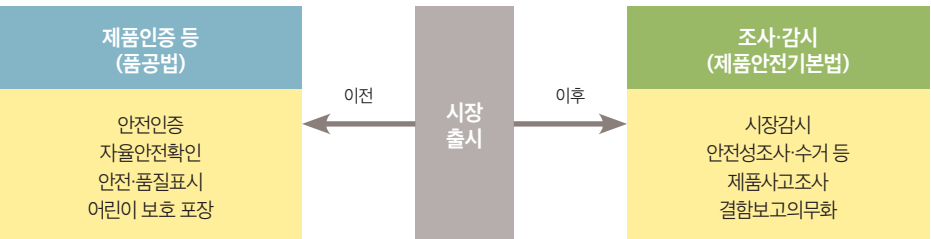


통해 안전기준, 표시기준 및 용기강도 기준 등이 제시되어 있으며, 본 고시에 따라 위해우려제품의 생산·수입자는 3년 마다 지정된 시험분석기관에 의뢰하여 안전기준 적합 여부에 대한 자가검사를 수행하도록 규정하고 있다.

② 품질경영 및 공산품안전관리법(품공법)

기존 품공법에 의해 관리되어 오던 안전관리대상공산품의 경우에는 시장 출시 전에는 품공법에 의해 “제품인증”을 받아야 하며, 시장출시 후에는 제품안전기본법에 따라 “조사 및 감시” 체계에 의거하여 관리되고 있었다.

<그림 2> 공산품의 제품안전관리체계

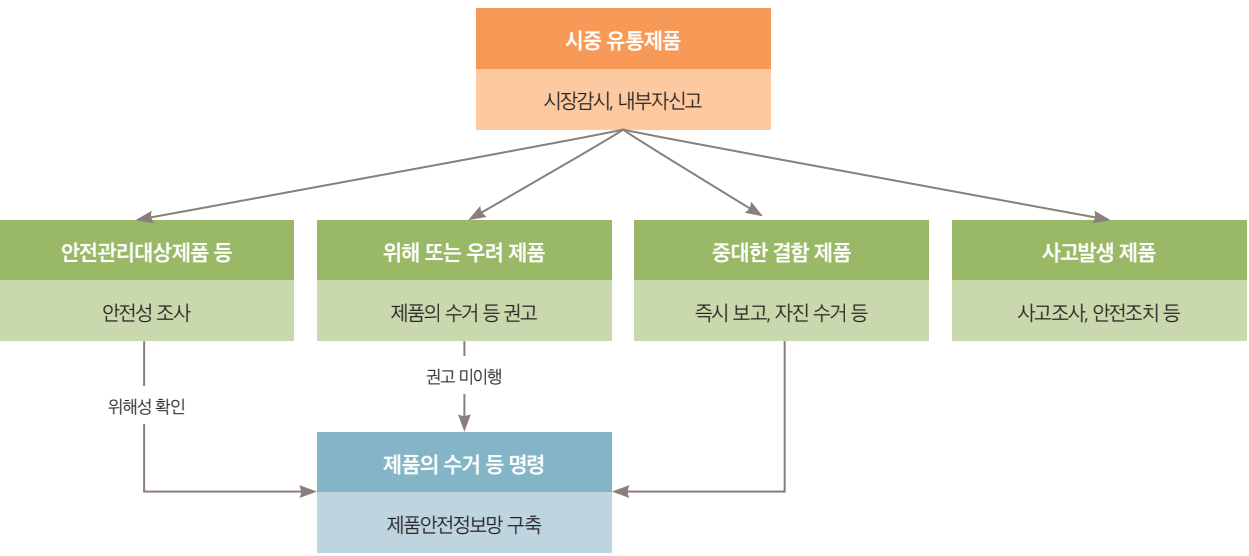


제조·수입업자는 품공법에 따라 모델별로 시장 출시 전 시험·검사기관의 안전기준 적합성 확인 후 안전 인증기관에 신고하여야 한다. 안전관리대상공산품은 안전인증, 자율안전확인, 안전·품질표시 등으로 구분하여 관리되는데, 이중 세정제, 방향제, 탈취제 등 화평법으로 이관된 공산품은 자율안전확인 방식으로 관리되어오던 제품이다.

신고제품의 경우 자율안전확인표시(KC)를 하여야 하며, 제조·수입·판매업자는 해당 표시가 없는 제품의 판매는 물론 수입·진열·보관까지 금지된다.

또한 시장에 출시된 제품에 대한 조사감시 체계는 시장감시, 안전성조사, 수거 권고 등으로 구성되어 관리되고 있다.

<그림 3> 조사·감시 체계 및 절차도



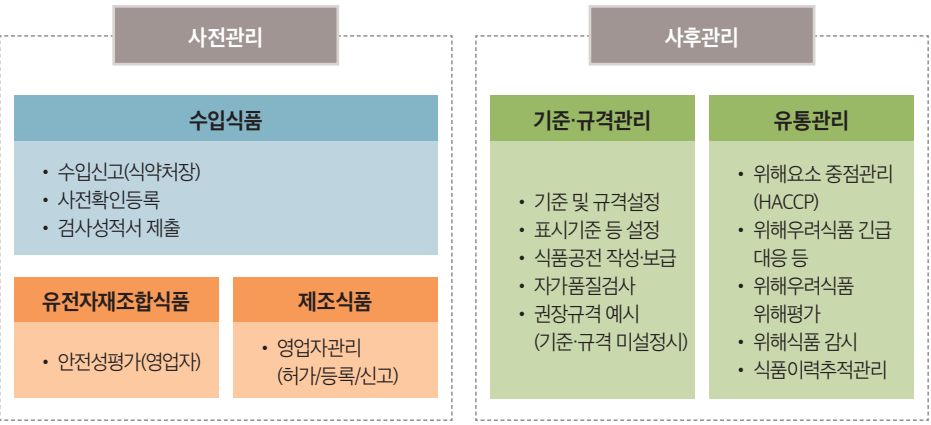
③ 식품위생법

시장출시 이전 일부 식품에 대해 안전성평가, 수입신고로 관리, 출시 이후 자가 품질검사, 위해우려식품의 감시 등으로 관리되고 있다.

특히, 제조 및 가공업자는 식품 종류별로 1~6개월 단위로 기준과 규격에 적합 여부를 검사(위탁 가능)하여, 위해 발생 우려시 식약처장에 반드시 보고하도록 규정하고 있다.

또한 위해우려식품 감시를 위해 식품위생감시원을 두고, 소비자 식품위생 감시원 및 시민 식품 감시인을 위촉하여 하여 관리하고 있다.

<그림 4> 식품 및 식품첨가물 등의 관리 체계도



④ 기타 관련 규정

화장품법의 경우 시장 출시 이전, 원료에 대해서는 위해성평가, 안정성심사, 전성분표시제, 출시 이후에는 시장모니터링, 유통제품 수거·검사로 관리하고 있다.

또한 약사법의 경우 시장 출시 이전에 원료 의약품을 등록하고, 품목별 품목허가 또는 신고, 출시 이후에는 부작용 모니터링, 의약품 재심사 등을 통해 관리되고 있다.

(3) 국내 생활화학제품의 효율적 관리를 위한 제언

① 제품 위해성평가 체계 및 기반 구축

생활화학제품의 효율적이고 효과적인 관리를 위한 기반기술인 위해성평가를 위해서는 화평법상에서 제시하고 있는 “위해성평가 전문기관”을 장·단기적 계획에 따라 지정·육성을 추진해야 할 것이다.

즉, 단계적으로 우선 노출평가기관을 전문기관으로 지정하고, 장기적으로 해당 전문기관에서 함량분석, 실태조사 등을 할 수 있도록 기반을 구축해야 한다.

이와 함께 제품 위해성평가에 필요한 노출계수 및 평가모델 등 평가 시스템이 개발·보급되어야 하며, 이를 위해 제품 사용공간, 환기율, 노출면적 등의 일반사항 및 제품 사용시간, 사용 빈도 등 제품별 노출계수의 지속적으로 업데이트가 필요하고, 특히 한국형 노출계수가 반영된 제품별 특성에 따른 노출평가 모델이 개발되어야 할 것이다.

또한 위해성평가지 제품 내 함유 화학물질의 유해성 확인에 활용하기 위해서 대상물질별 유해성 정보에 대한 데이터베이스도 구축되어야 할 것이다.

② 사전 예방적 관리체계 구축

선진 외국의 경우 제품 관리체계는 대부분 시장 출시 이전에 제품의 안전성 등을 검토하도록 되어있으나, 화평법상에는 사전 관리에 대한 명시적인 규정이 부재하고 위해우려제품으로 지정되지 않은 미관리 제품의 사용으로 인한 위해 정도를 사전에 검증할 수 있는 위해성평가체계가 없어 현실적인 유해성 관리가 어려운 실정이다. 따라서 출시 이전 위해우려제품 관리 강화를 위해 현재 적용중인 “자가검사제”와 함께 사전승인제 및 사전 유해성 스크리닝 제도 도입이 필요할 것이다.

특히 유해성 사전 평가제도(사전 위해 스크리닝 제도)는 가습기 살균제 사고와 같이 생활화학제품 내 미량으로 함유된 유해물질로 인한 위해를 방지하기 위한 사전 유해성 스크린 평가로써 사전에 위해우려제품 내 물질의 유해성을 기업 스스로 확인하도록 하는 방법을 의미한다.

이를 위하여 약식의 스크리닝 위해성평가 툴(소프트웨어)의 개발·보급이 필요한데, 이는 현재 국립환경과학원을 중심으로 개발중에 있으며 조속한 시일내에 개발이 완료되면 이를 통하여 기업 비용으로 스스로 또는 제3의 기관에서 ‘위해 스크리닝 tool’을 활용하여 약식 유해성 평가를 수행하도록 해야 할 것이다. 이러한 평가를 통해 기업은 분석 결과를 환경부장관에게 보고한 이후 시장에 출시하고, 이는 제품의 위해 판단 또는 상세 유해성 평가 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

③ 모니터링 강화 등 사후관리체계 구축

화평법 시행 이후 관리되고 있는 위해우려제품에 대한 안전·표시기준 준수 여부 등 위반사항을 조사·확인하여 위해 요소를 사전에 예방하는 것이 무엇보다 중요하다.

이를 위해서 현재 시장 유통 중인 위해우려제품에 대한 감시단, 사업자 보고의무 등 사후모니터링 체계를 구축하고, 시험·분석기관을 점차적으로 확대하고 있다.

하지만 보다 안전한 제품의 시장 유통을 위하여 보고의무의 부과 등 기업의 자발적 책임을 보다 강화해야 하며, 안전기준 미준수 등 법규를 위반하거나 위해우려제품으로 인한 사고발생시 해당 제품의 제조자에게 보고의무를 부과하여 이에 대한 신속한 관리가 이루어질 수 있도록 하여야 할 것이다.

또한 위해우려제품의 위해정보 및 안전사항 등을 표시기준에 반영하고, 향후 양도인이 소비자 또는 양수인에게 관련 정보를 제공하도록 의무를 부과하는 방안 등이 필요할 것으로 판단된다.

④ 정보시스템 구축 및 위해우려제품 확대방안 마련

유해화학물질 및 함유 제품의 통합관리를 위하여 유통 중인 생활화학제품의 분류체계 확립 및 단계별 위해우려제품의 지정 확대 등의 현실적인 관리정책이 필요하며 이와 함께 화학제품으로 인한 위해 발생을 방지하고 안전한 제품 사용을 위한 생활화학제품의 통합정보시스템을 구축하여 적절한 대국민 정보 제공이 필요하다.

이와 같은 통합정보시스템에는 국외의 사례에서 보듯이 제품 함유 화학물질의 정보, 사용가능 또는 사용제한 용도, 사용방법과 조건, 노출시 대처방법, 피해사례 등 안전한 제품 사용정보 제공되어야 할 것이다.

또한 위해우려제품을 위해서는 제품의 용도와 노출 경로 등에 따라 유해성이 달라질 수 있음을 고려하여 우선 시장에 유통 중인 생활화학제품의 용도별 분류 체계를 확립하고 현재 미관리 생활화학제품에 대한 위해우려제품 후보군을 선정해야 한다. 이를 위해서 정기적인 생활화학제품의 국내 유통현황을 조사하고 이를 바탕으로 국내 유통량 및 판매량, 유해물질 함량 등 유·위해성정보, 노출 빈도 등을 고려한 위해우려제품 지정 후보군을 선정하여 제품에 대한 관리를 확대해 나가야 할 것이다.

3. 결 론

앞서 살펴본 바와 같이 미국, 유럽, 일본 등 선진 외국의 경우 소비자 제품의 안전관리를 위해 해당 법률에 따라 제품내 함유 화학물질을 규제하고 있으며, 이를 위해 화학제품의 모니터링, 제품내 함유 물질에 대한 유해성 평가 및 안전성 정보 공개, 유해성 저감 및 예방 정책 지원 등을 수행하고 있다.

특히 국가별로 소비자제품 안전성과 관련해 대상제품 제조자, 수입자 및 유통업자에 대한 폭넓은 규제 권한을 가지고 있는 정부기관 및 공공기관을 중심으로 관련 데이터 수집 및 분석, 사고 및 소비자 불만 조사, 안전기준 및 규칙 제정, 제품 리콜 등 다양한 수단을 통해 소비자안전보호 업무를 수행하고 있다.

또한 소비자 제품에 대한 위해정보를 수집하여 제공하는 시스템을 운영중에 있으며, 미국의 경우 CPSC에서 NEISS(National Electronic Injury Surveillance System)를 통해 위해정보를 수집·제공하고 있고, 유럽연합의 건강소비자보호국(EU DG SANCO), 일본 제품평가기술기반기구(NITE) 등에서도 관련 법령에 따라 제품사고 조사 및 정보 제공 업무를 수행하고 있다.

반면 국내의 경우 아직까지는 소비자 화학제품에 대한 전문적인 안전관리 기관에 대한 법적 근거가 다소 미흡한 현실이다.

〈표 3〉 국외 위해정보제공 현황

구분	미국	유럽	일본
운영주체	소비자제품안전위원회 (CPSC)	유럽연합 건강소비자보호국 (EU DG SANCO)	제품평가기 술기반기구(NITE)
정보 시스템	NEISS	EU-IDB, RAPEX	사고정보 데이터뱅크 시스템
법적근거	CPSA (Consumer Product Safety Act)	EU Regulation 45/2001, The Directive on General Product Safety 2001/95/EC	소비자제품안전법
정보 수집채널	6명이상 24시간 응급실운영 전국 97개(표본)	유럽 EU가입국가 및 EEA국가(30개국), EU 국가별 선정된 병원 응급실	지자체, 소방서, 경찰서, 언론사, 사업자, 소비자
정보수집 영역	응급환자들의 위해 정보	각국 위해제품 시장감시 결과, 응급환자 위해정보	제품사고 정보, 위해 정보, 위해가능성, 결함정보
활용	사업자감독 및 시정, 안전기준 제정, 잠재적 위해 심층 조사	회원국 안전조치 촉구, 표준화된 안전정책 유도	사업자감독 및 시정, 안전기준 제정 및 기준 보완

특히 생활화학제품의 위해성평가 체계 및 기반을 마련함과 동시에 사전승인제 및 사전 위해성 스크리닝 제도 등의 사전 예방적 관리체계를 구축하는데 있어 필수적 요소인 제품 위해성평가 수행 등의 전문 인력이 확보된 전담 기관에 대해 화평법상의 명시가 명확하지 못한 점은 개선되어야 할 요소 중의 하나라고 지적되고 있다⁴.

이와 함께 위해우려제품에 대한 안전·표시기준 준수 여부 등 위반사항을 조사·확인하여 위해 요소를 사전에 예방하고 이에 대한 결과와 함께 생활화학제품내 함유 화학물질의 정보, 사용가능 또는 사용제한 용도, 사용방법과 조건, 노출시 대처방법, 피해사례 등 안전한 제품 사용정보 등을 제공할 수 있는 통합정보시스템의 개발이 하루빨리 이루어져야 할 것으로 판단된다.

이를 위해서는 화학제품 위해성 평가, 안전표시기준 모니터링, 제품사고 조사, 정보시스템 운영, 교육·홍보 등 제품 안전관리 전과정에서의 전문성 확보를 위한 권한과 인력, 장비 등의 확충이 필요할 것으로 판단된다.

또한 “생활화학제품안전센터”의 효과적이고 효율적인 운영을 통해 화학제품에 대한 전문성을 확보함으로써 제품에 함유된 미량물질, 제품 제조시 생성되는 중간물질 등 유해화학물질에 대한 사각지대를 줄이고 화학물질로 인한 피해를 저감 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

● 참고문헌

- CPSA (Consumer Product Safety Act) & CPSIA (Consumer Product Safety Improvement Act)
- NITE. Guidance on a Consumer Product Risk Assessment for GHS Labelling, 2008.
- New Zealand, Hazardous Substances and New Organisms Act, 1996
- Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council (EU REACH) Proposed Regulations to Limit Volatile Organic Compound(VOC) Content in Consumer Products.
- 국정감사 정책자료집 : 국민건강이 위태롭다 (생활화학용품 안전 관리대책 평가를 중심으로), 2012.
- 환경부. 생활화학제품 위해성평가 및 안전·표시기준(안) 마련 최종보고서, 2015.
- 환경부. 생활화학제품 안전성조사 및 관리 확대방안 마련 연구 최종보고서, 2016.
- 환경부. 고시 제2015-231호 위해우려제품 지정 및 안전·표시 기준, 2015.

제4차 산업혁명 시대, 미래사회 변화에 대한 전략적 대응 방안 모색

김진하_KISTEP 부연구위원



1. 제4차 산업혁명의 도래

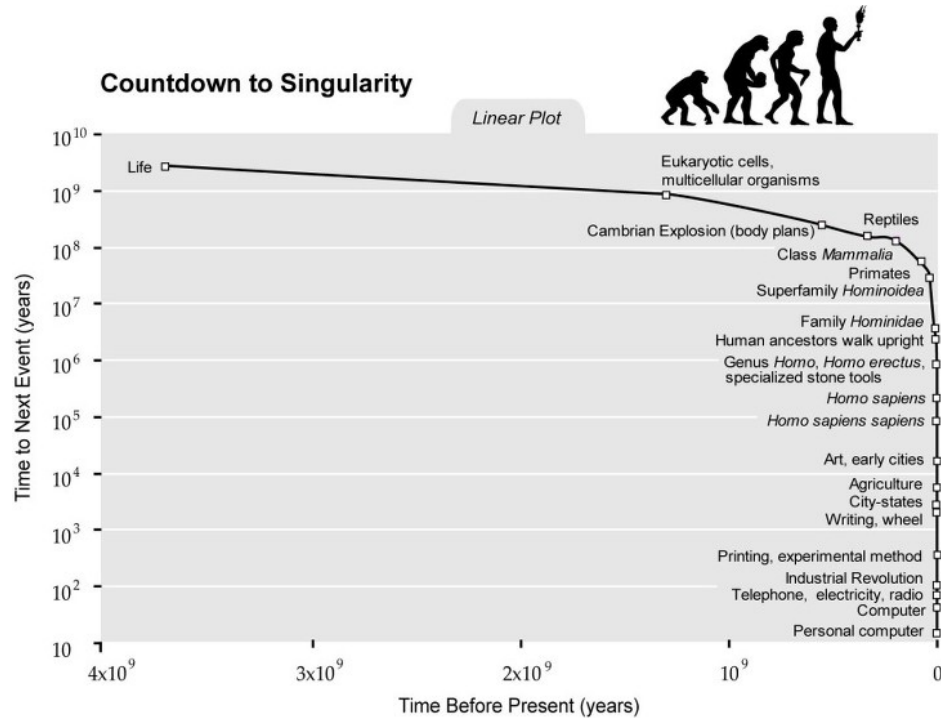
기원전 3500년 전 고대 사람들이 무거운 물건을 쉽게 옮기기 위해 나무 조각 3개를 엮은 '바퀴'¹가 만들지 않았다면, 지금의 자동차는 존재하지 않았을지도 모른다. 벨(Alexander Graham Bell)이 최초의 실용적인 전화기를 발명하지 않았다면 오늘날의 스마트폰은 존재하지 않고 여전히 파발마나 횃불을 통해 장거리 의사소통을 했을지도 모른다. 이렇게 인류 역사 변화의 중심에는 새로운 기술의 등장과 기술적 혁신이 자리하고 있었고, 새로운 기술의 등장은 단순히 기술적 변화에 그치지 않고 전 세계의 사회 및 경제구조에 큰 변화를 일으켰다. 기술적 혁신과 이로 인해 일어난 사회-경제적 큰 변화가 나타난 시기를 우리는 '산업혁명'²이라고 부르고 있다.

인류 역사적 관점에서 보자면 현재 사회의 산업혁명과 같은 과학기술적 사건(Events)은 매우 최근에 발생하였다. 최초의 인류인 ‘호모 사피엔스’가 등장한 시기가 20만 년 전에서 7, 8만 년 전이고, 농경 중심의 사회에서 현대 사회로의 첫 번째 전환점이라고 할 수 있는 제1차 산업혁명이 약 200여 년 전에

1. 통나무를 원판모양으로 잘라 만든 것이 최초의 바퀴라고 할 수 있으나, 메소포타미아 문명의 수메르인들은 기원전 3500년경에 나무판자 세 조각을 구리 못으로 연결하여 만든 바퀴가 현재 바퀴 형태의 시초(잭 첼로너, 2010).

2. '산업혁명' 단어는 '아널드 토인비'가
「Lectures on the Industrial Revolution of
the Eighteenth Century in England」에서
처음 사용하였고, 그는 기술적 혁신은 한
순간에 나타난 격변적인 현상이 아니라
그 이전부터 진행되어온 점진적이고 연
속적인 기술혁신의 과정으로 보고 있다.

<그림 1> 특이점으로의 카운트다운(인류의 기술 발전 속도)



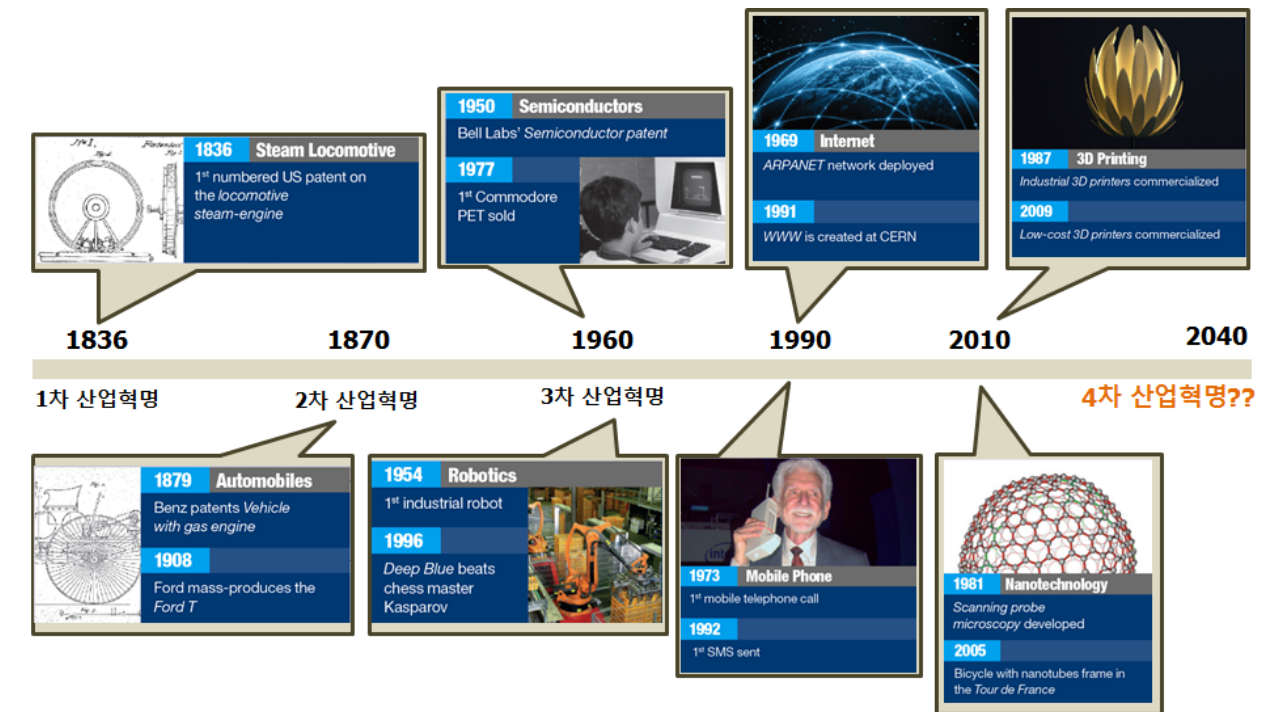
※ 출처 : 『The Singularity Is Near』, Ray Kurzweil, 2006

발생했다는 점은 우리 사회가 매우 짧은 시간동안 발전하고 변화하였다는 것을 보여준다. 또한 현대사회로 진입할수록 새로운 기술과 기술적 혁신이 나타나는 주기가 극단적으로 빨라졌으며, 기술의 파급속도도 급격하게 빨라지고 있다. 1876년 벨(Bell)이 발명한 유선 전화기의 보급률이 10%에서 90%로 도달하는데 걸린 기간이 73년이었으나, 1990년대에 상용화된 인터넷이 확산되는데 걸린 시간은 20년에 불과했고, 휴대전화의 대중화되는 기간이 14년이라는 점은 기술발전의 속도와 더불어 기술의 파급력이 급진적으로 빠르다는 점을 보여주고 있다. 즉 새로운 기술이 등장하고 기술적 혁신이 나타나는 주기가 점차 짧아지며, 그 영향력은 더욱 커지고 있다는 것이다. 이는 현재 우리가 스마트폰이 없는 일상생활을 상상하면 쉽게 이해할 수 있을 것이다.

우리 사회는 지금까지 2차례의 산업혁명으로 인한 변화를 경험하였고, 우리는 현재 제3차 산업혁명³ 시대를 살고 있다고 한다. 1차 산업혁명은 '기계 혁명'이라고도 불리며 18세기 중반 증기기관의 등장으로 가내수공업 중심의 생산체제가 공장생산체제로 변화된 시기를 말한다. 제2차 산업혁명에서는 전기동력의 등장으로 '에너지 혁명'이라고도 불리며 대량생산체제가 가능해졌다. 그리고 우리는 컴퓨터 및 정보통신기술(ICT)의 발전으로 인한 '디지털 혁명'이라는 제3차 산업혁명의 시대를 지내고 있으며, 이로 인해 정보화·자동화 체제가 구축되었다. 이들 산업혁명은 역사적 관점에서 보자면 아주 짧은 기간동안 발생하였으나, 그 영향력은 개인 일상생활에서부터 전 세계의 기술, 산업, 경제 및 사회 구조를 뒤바꾸어 놓을 만큼 거대하였다. 그리고 새로운 기술의 등장과 기술적 혁신은 계속 진행 중에 있으며 또 다른 산업혁명을 야기하고 있다.

³ 제3차 산업혁명은 널리 정착된 용어는 아니나, 2012년 미국 경제학자이자 문명비평가인 Jeremy Rifkin이 『The Third Industrial Revolution』(Economist, 2012)에서 제시한 미래사회의 모습

<그림 2> 기술적 혁신과 산업혁명의 시계열



※ 출처 : 200 Years of Innovation and Growth, WIPO Report, 2015 재구성

지난 2016년 1월 다보스 포럼(WEF; World Economic Forum)에서는 제4차 산업혁명⁴이라는 화두가 세상에 던져졌다. WEF는 『The Future of Jobs』 보고서를 통해 제4차 산업혁명이 근 미래에 도래할 것이고, 이로 인해 일자리 지형 변화라는 사회 구조적 변화가 나타날 것이라고 전망하고 있다. 또한 제4차 산업혁명을 '디지털 혁명(제3차 산업혁명)에 기반하여 물리적 공간, 디지털적 공간 및 생물학적 공간의 경계가 희석되는 기술융합의 시대'라고 정의하면서, 사이버물리 시스템(CPS; Cyber-Physical System)⁵에 기반한 제4차 산업혁명은 전 세계의 산업구조 및 시장경제 모델에 커다란 영향을 미칠 것으로 전망하고 있다.

우리가 인지하고 있지 못하는 사이에 제3차 산업혁명 시대를 살고 있는 것과 같이, 제4차 산업혁명 또한 알지 못하는 사이에 우리를 둘러쌀 것이다. 10여 년 전 지하철에서 쉽게 볼 수 있었던 '신문 접어서 보기'라는 에티켓은 '휴대전화를 진동모드로 하고 조용히 통화하기'로 바뀔 만큼 제3차 산업혁명의 주요기술인 컴퓨터와 정보통신기술(ICT)은 이미 우리 일상생활 속에 녹아들어있다. 지금까지 새로운 기술의 등장과 기술적 혁신에 따른 사회적 변화는 생활 편의성, 생산성 향상 및 새로운 일자리 창출 등의 긍정적인 변화가 주를 이루었다. 그러나 제4차 산업혁명에서는 생산성 향상이라는 긍정적인 측면과 더불어 일자리 감소라는 부정적 변화가 급격하게 나타날 것으로 전망되고 있다.

이에 WEF의 보고서를 기점으로 수많은 미래학자와 연구기관들은 제4차 산업혁명과 미래사회 변화에 대한 전망들을 논의하기 시작했고, 독일, 미국, 일본 등의 주요 국가들은 미래변화에 선제적으로 대응하고 미래사회를 주도하기 위해 정부차원에서 다양한 전략과 정책을 수립하여 추진하고 있다. 따라서 우리나라도 다양한 논의를 기반으로 제4차 산업혁명의 도래에 따른 미래사회 변화에 대응하기 위한 전략을

⁴ 제4차 산업혁명이라는 용어는 본래 2010년 발표된 독일의 『High-tech Strategy 2020』의 10대 프로젝트 중 하나인 『Industry 4.0』에서 제조업과 정보통신이 융합되는 단계를 의미하였으나, WEF에서 제4차 산업혁명을 언급하며 전 세계적으로 주요 화두로 등장하게 되었다.

⁵ 사이버물리시스템(CPS) : 통신기능과 연결성이 증대된 메카트로닉 장비에서 진화하여 컴퓨터 기반의 알고리즘에 의해 서로 소통하고 자동적, 지능적으로 제어되고 모니터링 되는 다양한 물리적 개체(센서, 제조장비 등)들로 구성된 시스템 (www.wikipedia.com)

마련해야 할 시점이다. 이를 위해서는 제4차 산업혁명과 미래사회 변화 그리고 주요국의 대응 방안 등에 대해 면밀하게 분석할 필요가 있고, 이를 기반으로 우리나라 환경에 적합한 대응 방안 및 전략을 모색할 필요가 있다.

이에 본론에서는 제4차 산업혁명에 대한 특성을 분석하고, 제4차 산업혁명에 따른 미래사회 변화 현황을 살펴보고자 한다. 결론 부문에서는 제4차 산업혁명의 특성, 미래변화 및 주요국의 대응 동향을 바탕으로 제4차 산업혁명에 대한 전략적 대응 방안을 모색하고자 한다.

2. 제4차 산업혁명, 그리고 미래사회 변화

(1) 제4차 산업혁명의 주요 변화동인(Drivers of changes)

우선 제4차 산업혁명의 특성을 찾기 위해 제4차 산업혁명을 일으키는 원인을 살펴보고자 한다. 많은 미래 전망 보고서들은 제4차 산업혁명과 미래사회 변화가 기술적 측면의 변화동인과 사회-경제적 측면의 변화동인으로 인해 야기될 것으로 전망하고 있다. 특히 「The Future of Jobs(WEF, 2016)」는 ‘업무환경 및 방식의 변화’, ‘신흥시장에서의 중산층 등장’ 및 ‘기후변화’ 등이 사회-경제적 측면에서의 주요 변화동인이고, 과학기술적 측면에서는 ‘모바일 인터넷’, ‘클라우드 기술’, ‘빅데이터’, ‘사물인터넷(IoT)’ 및 ‘인공지능(A.I.)’ 등의 기술이 주요 변화동인이 될 것으로 보고 있다.

보스턴 컨설팅(Boston Consulting Group), 옥스퍼드 대학(Oxford Univ.) 및 CEDA(Canadian Engineering Development Association) 등 주요 컨설팅 기업, 대학 및 연구기관들도 미래사회의 변화동인과 미래사회 변화에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 제시하고 있다. Boston Consulting은 「인더스트리 4.0(Industry 4.0)」에 기반하여 독일 제조업 분야에서 나타나는 노동시장의 변화를 연구하였는데, 기술적 측면의 변화동인들이 일자리 지형에 직접적인 영향을 미쳐 기술발전을 적용(adoption)함으로써 제조업 생산성이 크게 향상될 것으로 전망하고 있다. 그리고 이러한 변화의 중심에는 빅데이터, 로봇 및 자동화

등의 기술이 자리할 것으로 예측하고 있다(Boston Consulting, 2015).

옥스퍼드 대학(Oxford Univ.)의 Martin School은 유럽에서의 미래 일자리 지형 변화를 연구하였는데, 유럽 노동시장이 ‘글로벌화’와 ‘기술적 혁신’으로 인해 변화될 것으로 전망하고 있다(Oxford Univ., 2015). 또한 과학기술의 발전이 단순 업무에서부터 복잡한 업무까지 자동화시켜 일자리뿐만 아니라 업무영역에서도 커다란 변화가 나타날 것으로 전망하고 있다. 특히 S/W 및 빅데이터 등 정보통신기술(ICT)의 발달로 업무영역이 자동화되고, 자율주행기술 및 3D 프린팅 기술 등의 등장으로 일자리 지형이 크게 변화할 것으로 예측하고 있다(Oxford Univ., 2015).

CEDA는 호주 노동시장의 미래 변화에 대한 연구를 수행하였는데, 과학기술적 측면과 과학기술 외적 측면에서의 변화동인을 제시하고 있다. 과학기술 외적으로는 글로벌화, 인구통계학적 변화, 사회변화 및 에너지 부족 등이 변화동인으로 제시되었고, 과학기술적 측면에서는 클라우드 서비스, 사물인터넷(IoT), 빅데이터, 인공지능 및 로봇기술 등이 변화동인으로 제시되고 있다(CEDA, 2015). 또한 세계적 민간기업인 제너럴일렉트릭(GE, General Electronics Corp.)는 미래 공급체인의 발전과 고객 니즈 충족과 관련된 기술을 연구하였는데 다양한 과학기술의 보고서는 다양한 과학기술의 발달이 기업의 공급체인을 더욱 발전시키고 고객의 다양한 요구를 충족시켜 경제규모를 더욱 크게 만들 것으로 전망하고 있다. 특히 클라우드, 자동화 기술, 예측 분석 및 선행제어를 위한 스마트 시스템 등의 기술이 미래에 생산성을 높일 기술로 제시되고, 기계 센서와 커뮤니케이션 기술, 3D 프린팅 기술 등은 고객의 니즈를 충족시킬 수 있는 기술이 될 것으로 예측하고 있다(GE, 2016)

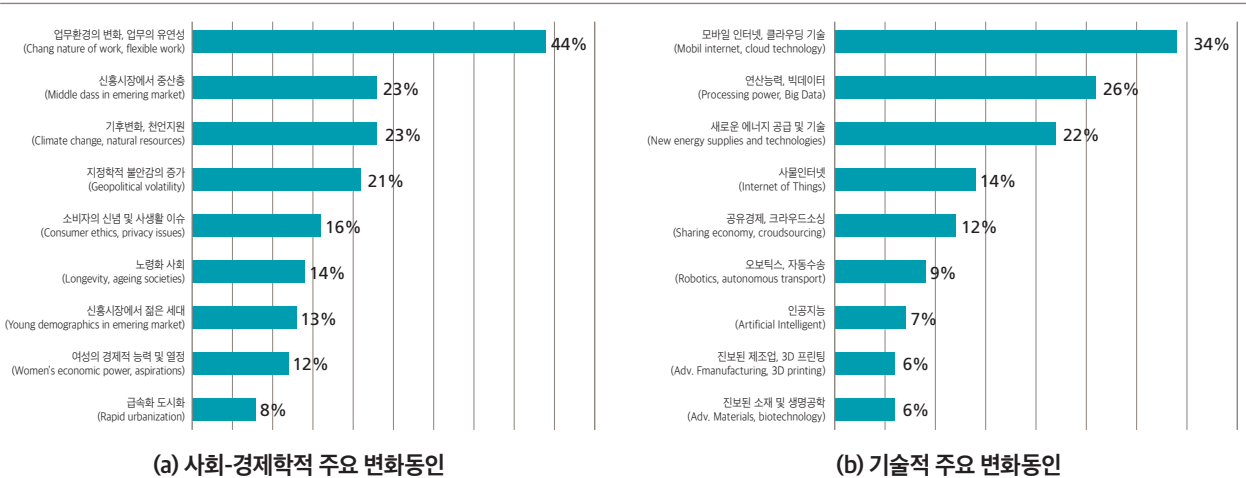
이러한 다양한 미래 전망자료를 종합·분석해보면, 과학기술 측면에서 제4차 산업혁명과 미래사회 변화를 야기하는 주요 변화동인이 ICBM⁶ 등 정보통신기술(ICT) 기반의 기술임을 알 수가 있다. 이를 바탕으로 우리는 제4차 산업혁명이 가지고 있는 특성을 이해할 수 있을 것이다.

(2) 제4차 산업혁명의 특징

제4차 산업혁명은 ‘초연결성(Hyper-Connected)’, ‘초지능화(Hyper-Intelligent)’의 특성을 가지고 있고, 이를 통해 “모든 것이 상호 연결되고 보다 지능화된 사회로 변화”시킬 것이다.

우리 사회는 이미 초연결 사회로 진입하고 있다. 사물인터넷(IoT), 클라우드 등 정보통신기술(ICT)의 급진적 발전과 확산은 인간과 인간, 인간과 사물, 사물과 사물 간의 연결성을 기하급수적으로 확대시키고 있고, 이를 통해 ‘초연결성’이 강화되고 있다. 2020년까지 인터넷 플랫폼 가입자가 30억 명에 이를 것이고 500억 개의 스마트 디바이스로 인해 상호 간 네워크킹이 강화될 것이라는 전망은 초연결사회로의 진입을

<그림 3> 「The Future of Jobs」가 전망한 제4차 산업혁명의 주요 변화동인



※ 출처 : The Future of Jobs(WEF, 2016) 재구성

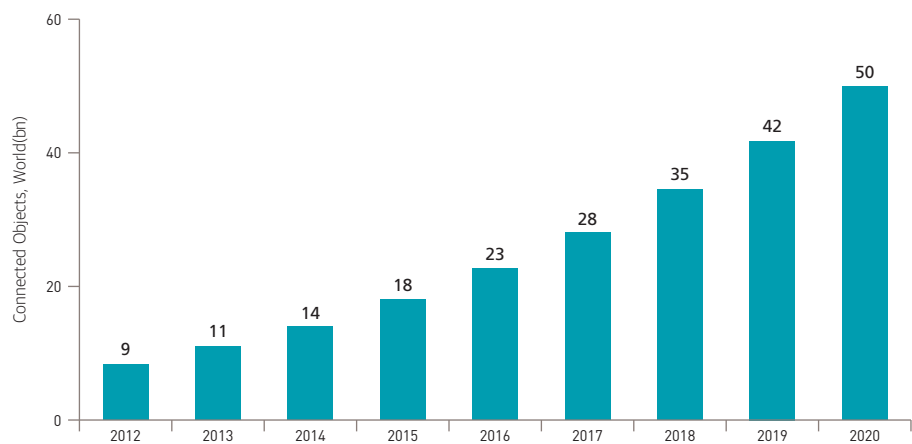
<표 1> 국가별 미래사회 변화의 주요 변화 동인

구분	주요 변화 동인
독일	빅데이터, 로봇, 자율주행 물류자동차, 스마트 공급망, 자가조직화 기술 등
영국	바이오 및 나노 테크놀로지, 차세대 컴퓨터, 가상현실, 홀로그램, 3D 프린팅 등
미국	클라우드, 자동화기술, 센서 및 커뮤니케이션 기술, 3D프린팅, 소프트웨어, 사물인터넷, 자율주행자동차 등
호주	클라우드, 사물인터넷, 빅데이터, 인공지능, 로봇 등

※ 출처 : Technology, Globalisation and the Future of Work in Europe(Oxford Univ., 2015); The Shape of Jobs to Come(Fast Future Research, 2010) 등 재구성

⁶ ICBM : IoT, Cloud, Big Data, Mobile

<그림 4> 인터넷과 연결된 사물(Connected objects)의 수 증가



※ 출처 : The Internet of Everything in Motion(Cisco 2013)

암시하고 있다(삼성증권, 2016). 또한 인터넷과 연결된 사물(Internet-connected objects)의 수가 2015년 182억 개에서 2020년 501억 개로 증가하고, M2M(Machine to Machine, 사물-사물) 시장 규모도 2015년 5조2000억 원에서 2020년 16조5000억 원 규모로 성장할 것으로 전망되고 있다. 이러한 시장 전망은 ‘초연결성’이 제4차 산업혁명이 도래하는 미래사회에서 가장 중요한 특성임을 보여주고 있다.

또한 제4차 산업혁명은 ‘초지능화’라는 특성이 존재한다. 즉 제4차 산업혁명의 주요 변화동인인 인공지능(A.I.)과 빅데이터의 연계 및 융합으로 인해 기술 및 산업구조가 ‘초지능화’ 된다는 것이다. 2016년 3월 이미 우리는 ‘초지능화’ 사회로 진입하고 있음을 경험하였다. 인간 ‘이세돌’과 인공지능 컴퓨터 ‘알파고(AlphaGo)’와의 바둑 대결이 그것이다. 바둑판 위의 수많은 경우의 수⁷와 인간의 직관 등을 고려할

<그림 5> IBM Watson과 인간과의 퀴즈대결



※ 출처 : IBM(재인용 <http://www.techrepublic.com>)

⁷ 19×19의 바둑판 위의 10171의 경우의 수가 존재하고, 바둑을 두어가는 과정에서 나타나는 경우의 수 까지 고려한다면 무한대의 경우의 수가 가능(<http://tromp.github.io/go/legal19.html>)

때 인간이 우세할 것이라는 전망과 달리 ‘알파고’의 승리는 사람들에게 충격으로 다가왔다. 이 대결은 ‘초지능화’ 사회의 시작을 알리는 단초가 되었고, 많은 사람들이 인공지능과 미래사회 변화에 대해 관심을 갖기 시작했다. 사실 2011년에도 이미 인공지능과 인간과의 대결이 있었다. 미국 ABC 방송국의 인기 퀴즈쇼인 ‘제퍼디!(Jeopardy!)’에서 인간과 IBM의 인공지능 컴퓨터 왓슨(Watson)과의 퀴즈대결이 있었는데, 최종 라운드에서 왓슨은 인간을 압도적인 차이로 따돌리며 우승하였다. 이 대결은 인공지능 컴퓨터가 계산도구에서 벗어나 인간의 언어로 된 질문을 이해하고 해답을 도출하는 수준까지 도달했음을 보여주는 사례로 회자되고 있다.

산업시장에서도 딥 러닝(Deep Learning) 등 기계학습과 빅데이터에 기반한 인공지능과 관련된 시장이 급성장할 것으로 전망되고 있다. 트렉티카 보고서에 따르면 인공지능 시스템 시장은 2015년 2억 달러 수준에서 2024년 111억 달러 수준으로 급성장할 것으로 예측되고 있고(Tractica, 2015), 인공지능이 탑재된 스마트 머신의 시장 규모가 2024년 412억 달러 규모가 될 것으로 보고 있다(BCC Research, 2014). 이러한 기술발전 속도와 시장성장 규모는 ‘초지능화’가 제4차 산업혁명 시대의 또 하나의 특성이라는 점을 말해주고 있다.

지금까지 우리는 제4차 산업혁명의 주요 변화 동인을 살펴보고, ‘초연결성’과 ‘초지능화’라는 제4차 산업혁명의 특성을 이해하였다. 이제는 이러한 특성을 통해 미래사회가 어떻게 변화할 것인지에 대해 살펴볼 필요가 있다. 미래사회 변화의 방향에 대한 분석함으로써 우리는 보다 합리적이고 우리나라 현실에 맞는 대응 방안을 모색할 수 있을 것이다.

(3) 제4차 산업혁명에 따른 미래사회 변화

많은 미래학자들과 전망 보고서들은 제4차 산업혁명에 따른 미래사회 변화가 크게 기술·산업구조, 고용구조 그리고 직무역량 등 세 가지 측면에서 나타날 것으로 예측하고 있다. 앞서 언급하였듯이 미래사회 변화는 기술의 발전에 따른 생산성 향상 등 긍정적인 변화도 존재하는 반면, 일자리 감소 등과 같은 부정적인 변화도 존재한다. 따라서 미래사회의 다양한 변화를 면밀하게 살펴봄으로써 우리는 보다 현실적이고 타당한 대응 방안을 모색할 수 있을 것이다.

우선 기술·산업적 측면에서 제4차 산업혁명은 기술 및 산업 간 융합을 통해 “산업구조를 변화”시키고 “새로운 스마트 비즈니스 모델을 창출”시킬 것으로 판단된다. 제4차 산업혁명의 특성인 ‘초연결성’과 ‘초지능화’는 사이버물리시스템(CSP)기반의 스마트 팩토리(Smart Factory) 등과 같은 새로운 구조의 산업생태계를 만들고 있다. 예를 들어 사이버물리시스템은 생산과정의 주체를 바꾸게 되는데, 기존에는 부품·제품을 만드는 기계설비가 생산과정의 주체였다면 이제는 부품·제품이 주체가 되어 기계설비의 서비스를 받아가며 스스로 생산과정을 거치는 형태의 산업구조⁸로 변화한다는 것이다. 이로 인해 이미 제조업 분야에서 인간의 노동력 필요성이 점차 낮아지고 있어 “리쇼어링(Reshoring)” 현상⁹이 나타나는 등 산업생태계가 변화하기 시작했다. 이러한 변화가 반영하듯 보스턴컨설팅그룹(BCG)은 2013년 보고서에서 미국이 다시 생산기지로 적합해지고 있다고 진단하였다. 이미 제너럴일렉트릭(GE, General Electric Corp.)은 세탁기와 냉장고, 난방기 제조공장을 중국에서 쉐먼시 주(州)로 이전하였고, 구글(Google)도 미디어 플레이어인 넥스트Q를 캘리포니아 주(州) 세너제이에 만들고 있다. 그리고 독일은 2011년 제조업의 혁신과 부흥을 위해 정보통신기술(CT)과 제조업을 융합하여 사이버물리시스템 기반의 ‘인더스트리 4.0(Industry 4.0)’ 전략을 선제적으로 추진하고 있다.

⁸ 사이버물리시스템은 생산과정 상에서 주체(기존 기계설비)와 객체(기존 부품 및 제품)가 바뀌도록 유도하고 있고, 더 나아가 생산과정의 모든 요소들이 주체가 되는 분권화(Decentralization)이 실현되어 중앙통제가 아닌 부품과 기계설비들이 서로 의사소통을 하며 작업이 이루어짐으로써 인간의 노동력이 필요하지 않게 됨

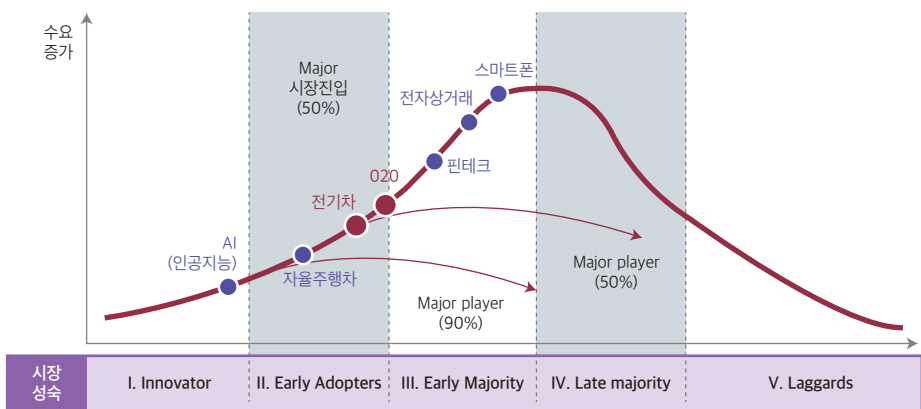
⁹ 리쇼어링(Reshoring)은 해외에 나가 있는 자국기업들을 각종 세제혜택이나 규제완화 등을 통해 자국으로 불러들이는 정책으로, 기존 싼 인건비나 판매시장을 찾아 해외로 생산공장을 설치하는 ‘오프쇼어링(Offshoring)’의 반대 개념

¹⁰ O2O(Online to Offline)는 온라인과 오프라인을 연결하여 고객에게 편리하고 가치 있는 서비스를 제공하는 온/오프라인 연계 비즈니스를 총칭

¹¹ 공유경제는 하버드 대학의 교수인 로렌스 레식(Lawrence Lesig)이 ‘Remix(2008)’이라는 책에서 처음 사용한 단어로서 ‘한번 생산된 제품을 여러이 공유해서 쓰는 협력소비를 기준으로 한 경제방식’으로 정의

¹² 온디맨드경제는 ‘유무선 인터넷에서 온라인 플랫폼 업체의 중계를 통해 개인-개인, 개인-기업이 거래를 통해 제품과 서비스를 소유없이 이용할 수 있는 경제 활동을 의미

<그림 6> 글로벌 스마트 산업의 제품 사이클



※ 출처 : Global Market Strategy(삼성증권, 2016)

또한 사물인터넷(IoT) 및 클라우드 등 ‘초연결성’에 기반을 둔 플랫폼 기술의 발전으로 O2O(Online to Offline)¹⁰ 등 새로운 ‘스마트 비즈니스 모델’이 등장할 것이다. 공유경제(Sharing Economy)¹¹ 및 온디맨드경제(On Demand Economy)¹²의 부상은 소비자 경험 및 데이터 중심의 서비스 및 새로운 형태의 산업간 협업 등으로 이어지고, 정보통신기술(CT)과 ‘초연결성’에 기반한 새로운 스마트 비즈니스 모델이 등장시킬 것으로 전망되고 있다. 또한 제4차 산업혁명의 주요 변화 동인이자 기술 분야인 빅데이터, 사물인터넷, 인공지능 및 자율주행자동차 등의 기술개발 수준 및 주기를 고려할 때 향후 본격적 상용화로 인해 새로운 시장이 나타날 것으로 예상하고 있다.

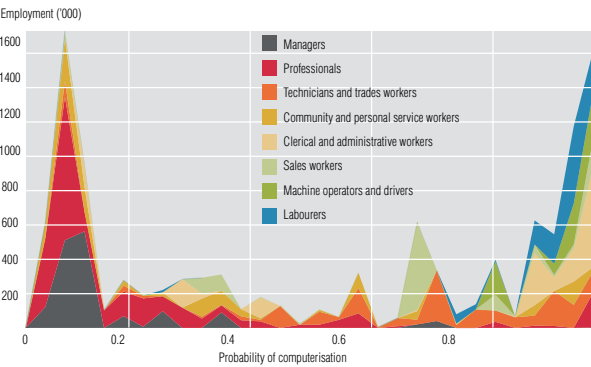
두 번째로 제4차 산업혁명으로 인해 “고용구조의 변화”가 나타날 것이다. 즉, 제4차 산업혁명을 야기하는 과학기술적 주요 변화동인이 미래사회의 고용구조인 일자리 지형을 변화시킬 것으로 전망되고 있는 것이다. 특히 자동화 기술 및 컴퓨터 연산기술의 향상 등은 단순·반복적인 사무행정직이나 저숙련(Low-

<그림 7> 직업별 컴퓨터화(Computerisation) 가능성

Computerisable				
Risk	Probability	Label	SOC code	Occupation
687	0.98	1	43-4151	Order
688	0.98		43-4011	Brokerage Clerks
689	0.98		43-9041	Insurance Claims and Policy Processing Clerks
690	0.98		51-2093	Timing Device Assemblers and Adjusters
691	0.99		43-9021	Data Entry Keyers
692	0.99		25-4031	Library Technicians
693	0.99		43-4141	New Accounts Clerks
694	0.99		51-9151	Photographic Process Workers and Processing Machine Operators
695	0.99		13-2082	Tax Prepaerers
696	0.99		43-5001	Cargo and Freight Agents
697	0.99	1	49-9064	Watch Repairers
698	0.99		13-2053	Insurance Underwriters
699	0.99		15-2091	Mathematical Technicians
700	0.99		51-6051	Sewers, Hand
701	0.99		23-2093	Title Examiners, Abstrctors, and Searchers
702	0.99		41-9041	Telemarketers

(a) 직업별 20년 내 컴퓨터화 될 가능성

DISTRIBUTION OF JOB CATEGORIES AGAINST PROBABILITY OF COMPUTERISATION

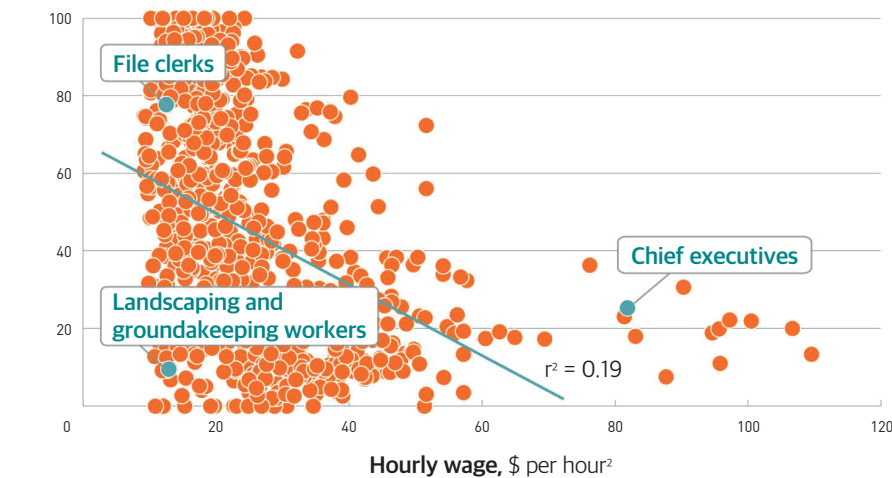


(b) 컴퓨터화 가능성 관련 직업 분포

※ 출처 : The Future of Employment(Oxford Univ., 2013); Australia's Future Workforce?(CEDA, 2015)

<그림 8> 미국내 직업별 임금에 따른 자동화 가능성 분포

Ability to automate, % of time spent on activities¹ that can be automated by adapting currently demonstrated technology



※ 출처 : Four fundamental of workplace automation(Mckinsey, 2016)

skills) 업무와 관련된 일자리에 직접적으로 영향을 미쳐 고용률을 감소시킬 것으로 예측되고 있다. 옥스퍼드 대학(Oxford Univ.)의 Martin School은 컴퓨터화 및 자동화로 인해 미래에 사라질 가능성이 높은 직업에 대한 연구를 수행하였는데, 현재 직업의 47%가 20년 이내에 사라질 가능성이 높은 것으로 도출되었다. 특히 텔레마케터, 도서관 사서, 회계사 및 택시기사 등의 단순·반복적인 업무와 관련된 직업들이 자동화 기술로 인해 사라질 것으로 전망하고 있다(Oxford Univ. 2013). 후주는 노동시장의 39.6%(약 5만 명의 노동인력)가 수십 년 내 컴퓨터에 의해 대체 될 것으로 예상하고 있고, 그 중 18.4%는 업무에서의 역할이 완전히 사라질 가능성이 높을 것으로 보고 있다(CEDA, 2015).

독일 제조업 분야에서는 기계가 인간의 업무를 대체함에 따라 생산부문 120,000개(부문 내 4%), 품질관리부문 20,000개(부문 내 8%) 및 유지부문 10,000개(부문 내 7%)의 일자리가 감소하고 생산계획부문의 반복형 인지업무(Routine cognitive work)도 20,000개 이상의 일자리가 사라질 것으로 예측되고 있고, 이러한 현상은 2025년 이후 더욱 가속화 될 것으로 전망되고 있다(Boston Consulting Group, 2015). 미국의 경우에도 인공지능, 첨단로봇 등 물리적/지적 업무의 자동화로 인해 대부분 업무의 특정 부분이 자동화 될 것으로 보고 있다. 구체적으로는 저숙련 및 저임금 노동인력이 수행하는 단순 업무와 더불어 재무관리자, 의사, 고위간부 등 고숙련 고임금 직업의 상당수도 자동화되어, 인간이 하는 업무의 45%가 자동화될 것으로 전망되고 있다(Mckinsey, 2016).

그러나 일자리 지형 변화와 관련하여 부정적인 전망만 있는 것은 아니다. 제4차 산업혁명과 관련된 기술 직군 및 산업분야에서 새로운 일자리가 등장하고, 고숙련(High-skilled) 노동자에 대한 수요가 증가할 것이라는 예측도 존재한다. 특히 산업계에서는 인공지능, 3D 프린팅, 빅데이터 및 산업로봇 등 제4차 산업혁명의 주요 변화 동인과 관련성이 높은 기술 분야에서 200만개의 새로운 일자리가 창출되고, 그 중 65%는 신생직업이 될 것이라는 전망도 있다(GE, 2016). 또한 독일 제조업 분야 내 노동력의 수요는 대부분 IT와 S/W 개발 분야에서 경쟁력을 가진 노동자를 대상으로 나타날 것이고, 특히 IT 및 데이터 통합 분야의

<표 2> 산업분야별 요구 직무역량 변화 전망(2015-2020)

구분(%)	기초/인프라		소비자		에너지		금융서비스		보건		정보통신기술		미디어		이동수단		전문서비스		평균	
	현재	2020	현재	2020	현재	2020	현재	2020	현재	2020	현재	2020	현재	2020	현재	2020	현재	2020	현재	2020
복합문제해결 능력	42	33	28	31	49	38	35	39	35	36	36	46	-	-	32	24	35	38	36	36
사회적 능력	17	17	26	27	27	28	32	23	30	28	20	19	27	32	22	20	26	24	20	19
공정 능력	10	19	21	22	24	29	36	34	25	36	26	25	27	31	18	22	37	29	18	18
체계적 능력	22	26	28	25	24	18	23	22	-	-	26	24	-	-	16	23	16	16	16	17
자원관리 능력	21	15	38	35	29	24	20	20	-	-	16	19	28	32	26	28	24	29	14	13
기술적 능력	25	20	20	18	29	22	5	16	-	-	22	20	-	-	26	21	19	18	14	12
인지 역량	10	19	13	25	-	-	15	23	35	36	20	23	-	-	11	27	19	22	11	15
콘텐츠 능력	6	13	-	-	-	-	22	24	-	-	19	18	-	-	22	28	11	15	10	10
신체적 역량	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	4

※ 출처 : The Future of Jobs(WEF, 2016)

일자리 수는 110,000개(약 96%)가 증가하고, 인공지능과 로봇 배치의 일반화로 인해 로봇 코디네이터 등 관련 분야 일자리가 40,000개 증가 할 것으로 전망되고 있다(Boston Consulting Group, 2015). 마지막으로 제4차 산업혁명에 따른 기술·산업 측면의 변화와 일자리 지형의 변화는 여기에서 멈추지 않고 고용 인력의 “직무역량(Skills & Abilities) 변화”에 영향을 미치고 있다. WEF 보고서에 따르면 제4차 산업혁명은 고용 인력이 직무역량 안정성(Skills Stability)¹³에도 영향을 미치고, 산업분야가 요구하는 주요 능력 및 역량에도 변화가 생겨 ‘복합문제 해결능력(Complex Problem Solving Skills)’ 및 ‘인지능력’ 등에 대한 요구가 높아질 것으로 전망되고 있다(WEF, 2016).

다수의 전망 보고서에서도 ‘컴퓨터/IT’ 및 ‘STEM(Science, Technology, Engineering, Mathematics)’분야의 지식이 효율적인 업무수행을 위해 필요함을 강조하고 있다(Oxford Univ., 2016). 특히 미국 제조업계에서는 2018년까지 전체 일자리의 63%가 STEM 분야의 교육 이수를 요구하고, 첨단제조분야의 15% 이상이 STEM 관련 고급학위(석사 이상)를 필요로 할 것으로 전망하고 있다(GE, 2016). 또한 미래사회의 고용 인력은 새로운 역할과 환경에 적응할 수 있는 유연성과 더불어 지속적인 학제간 학습(Interdisciplinary Learning)이 필요하고, 다양한 하드스킬(Hard Skills)¹⁴을 활용할 수 있어야 한다고 말하고 있다. 로봇이나 기계를 다루는 전문적인 직업 노하우를 정보통신기술(ICT)과 접목할 수 있는 역량과 더불어 다양한 지식의 활용을 기반으로 소프트스킬(Soft Skills)¹⁵이 미래사회에서 더욱 중요한 역량이 될 것으로 보고 있다(Boston Consulting Group, 2015).

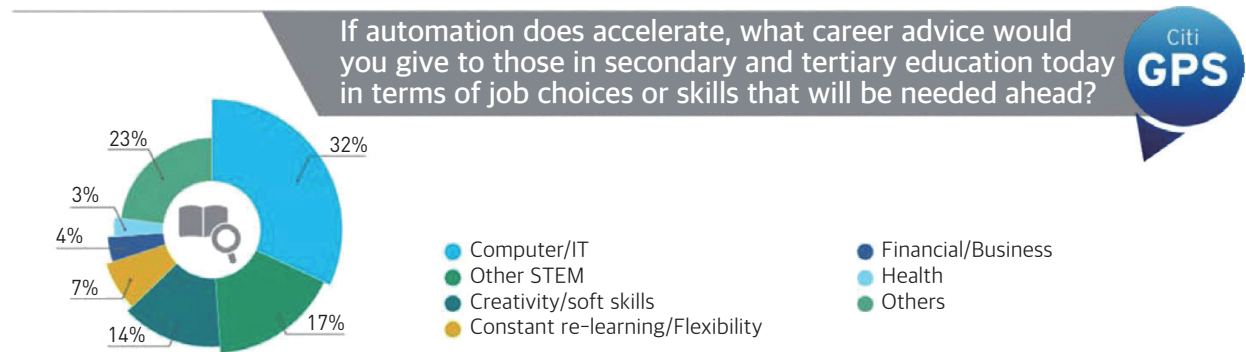
직무역량과 더불어 자동화 또는 인공지능 등 기술 및 기계의 발전으로 노동력이 대체되더라도 창의성 및 혁신성 등과 같은 인간만의 주요 능력 및 영역은 자동화되지 않을 것으로 전망되고 있다. Mckinsey는 미국 내 800개 직업을 대상으로 업무활동의 자동화 가능성을 분석한 결과, 800개 중 5% 만이 자동화 기술로 대체되고 2,000개 업무 활동 중 45%만이 자동화 될 것으로 분석하고 있다. 그리고 인간이 수행하는 업무 중 창의력을 요구하는 업무(전체 업무의 4%)와 감정을 인지하는 업무(전체업무의 29%)는 자동화되기 어려울 것으로 보고 있다(Mckinsey, 2015)

13_ 직무역량 안정성(Skills Stability)은 기술발전 및 산업변화에 따른 고용 인력에 게 요구되는 역량의 변화 정도 또는 이미 확보하고 있는 역량의 유통기한의 변화 정도를 의미

14_ 하드스킬(Hard Skills)는 기술적 능력 및 실력 또는 전문지식을 의미

15_ 소프트스킬(Soft Skills)은 변화에 대한 유연성 및 다양한 기술의 활용능력 또는 조직 내 커뮤니케이션, 협상, 팀워크, 리더쉽 등을 활성화 할 수 있는 능력을 의미

<그림 9> 미래 산업분야에서 요구하는 직무역량



※ 출처 : Technology at Work v2.0(Oxford Univ., 2016)

다양한 미래 전망보고서들이 제시하고 있는 제4차 산업혁명에 따른 미래사회 변화를 종합·분석해보면, 제4차 산업혁명은 ‘기술·산업구조’ 및 ‘고용구조’와 같이 사회 외적인 측면에만 영향을 미치는 것뿐만 아니라 ‘역량’이라는 사회 내적인 측면이자 인간 개개인의 특성에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 미래사회 변화에 대비하기 위해서 사회 외적인 측면에서의 대응과 사회 내적인 측면에서의 대응이 병행되어야 함을 의미한다. 이에 마지막 장에서는 제4차 산업혁명의 주요 변화 동인 및 특성, 미래사회 변화에 대한 분석을 기반으로 외적인 측면과 내적인 측면의 변화에 대응하기 위해 우리가 취해야 할 전략 방안을 모색해보고자 한다.

3. 제4차 산업혁명에 대비한 전략적 대응 방안(안)

제4차 산업혁명과 미래사회 변화는 이미 우리의 가시권 안에 들어와 있다. 많은 미래 전망보고서들이 이야기하고 있듯이 정보통신기술(ICT)에 기반한 주요 변화동인으로 인해 기술·산업구조가 변화하고, 일자리 지형이 변화하며, 미래사회에서 요구되는 직무역량도 변화할 것으로 전망하고 있다. 그리고 이러한 변화는 우리 후손뿐만 아니라 수년 내 우리가 직접적으로 직면하게 될 현실이다. 따라서 중·단기적으로는 미래사회 변화에 대응하기 위한 방안을 마련할 필요가 있고, 보다 장기적 관점에서 미래사회 변화를 주도하기 위한 전략을 수립할 필요가 있다.

(1) 제4차 산업혁명에 대비한 범정부차원의 전략 수립

독일, 일본 등 해외 주요국은 제4차 산업혁명에 직접적으로 대응하기 위해 다양한 정책과 전략을 수립하여 추진하고 있는 중이다. 상기 언급된 것처럼 독일은 정보통신기술(ICT)과 제조분야의 융합을 통해 「인더스트리 4.0(Industry 4.0, 2011.9)」이라는 제조업 혁신전략을 이미 추진하고 있다. 이를 통해 ‘대기업-중소/중견기업 간 협업 생태계 구축’, ‘IoT/CPS 기반의 제조업 혁신’ 및 ‘제품개발 및 생산공정관리의 최적화와 플랫폼 표준화’ 등을 추구하고 있어 단순 생산기술 고도화에만 초점을 맞추고 있지 않다는

16_ 제4차 산업혁명에 대한 이해와 준비를 위한 범정부차원의 논의 및 차세대 기술과 산업비전에 대한 중간 검토 결과로서 「신산업구조비전(경제산업성)」을 발표

<표 3> 「신산업구조비전」 7대 전략의 분야	
분야	7대 전략
기술	데이터 활용 촉진을 위한 환경정비, 이노베이션 신기술 개발 가속화
산업 및 고용	산업구조 및 취업구조 전환 원활화
인력양성	인재육성 등 고용시스템 유연성 향상
사회 및 경제	금융기능 강화, 지역경제 활성화, 제4차 산업혁명을 위한 경제사회 시스템 고도화

※ 출처 : 과학기술&ICT 정책 기술동향(2016.6) 재구성

점을 알 수 있다. 일본의 경우에는 제4차 산업혁명을 주도하기 위해 「신산업구조비전(2016.4)」¹⁶을 수립하고 범정부차원의 7대 국가전략을 선정하여 제4차 산업혁명을 성장의 기회로 활용하고 있다. 특히 「신산업구조비전」은 ‘기술’(데이터 관련 환경정비 등), ‘산업 및 고용’(산업구조/취업구조 전환 원활화) 및 ‘인력양성’(인재육성 등 고용시스템 향상) 등 전 분야에 걸친 범정부차원의 제4차 산업혁명 대응 전략을 수립하였다.

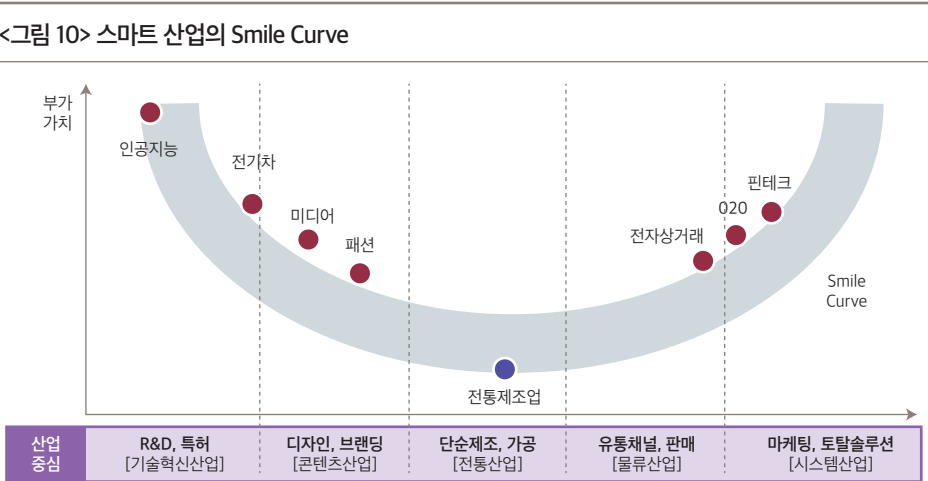
이에 우리나라도 제4차 산업혁명에 대비하여 “범정부 차원에서의 국가 혁신전략을 수립”할 필요가 있다. 현재 우리나라도 「차세대 정보 컴퓨팅기술개발사업(미래부)」 및 「제조업 혁신 3.0전략(산업부)」 등 미래기술과 관련된 사업 및 전략을 추진하고 있으나, 제4차 산업혁명에 따른 미래사회 변화에 대한 국가차원의 거시적이고 체계적인 대응에 한계가 존재한다. 이에 일본 등 해외사례를 참고하여 부처별, 분야별 단편적 전략 또는 단순 생산시스템 고도화에서 벗어나, 국가 기술·산업·경제·사회 전반 측면에서 제4차 산업혁명에 대응할 수 있는 범정부차원의 혁신전략을 수립할 필요가 있다.

(2) ICT 기반의 신성장동력 발굴을 통한 과학기술 경쟁력 강화

미국은 제4차 산업혁명에 대비하는 측면에서 대통령 과학기술자문회의가 8대 ICT 연구개발 분야를 선정·제시(2015.8)하였다. NITRD(The Newtwork and Information Technology R&D) 평가보고서를 기반으로 2017년 회계연도 기간 중 중점적으로 채택해야할 분야로 ‘사이버 보안’, ‘IT와 헬스’, ‘빅데이터 및 데이터 집약형 컴퓨팅’, ‘IT와 물리시스템’, ‘사이버 휴먼 시스템’ 및 ‘고성능컴퓨팅’ 등 8개 분야를 선정하였고, 이를 집중적으로 추진하고 있는 중이다. 또한 미국 대통령실은 미래사회 변화에 대응하기 위해 ‘스마트 아메리카 프로젝트(Smart America Project)’를 추진하여 IoT를 활용한 스마트 시티 구축을 위한 연구를 추진 중이다. 이러한 미국의 선제적 대응은 자국 내 정보통신기술(ICT) 기반의 과학기술 경쟁력을 강화함으로써 기술·산업적 측면에서 제4차 산업혁명 시대의 주도권을 선점하기 위한 전략으로 볼 수 있다.

따라서 우리나라도 정보통신기술(ICT) 기반의 “신성장동력 발굴을 통한 과학기술 경쟁력을 강화”를 위한 방안 마련이 필요하다. 여기에서 우리는 전 세계적으로 빠른 기술진화 속도와 맞물려 자율주행자동차(스마트 카) 및 인공지능 등 부가가치가 높은 기술 분야의 상용화가 가시화되고 있고는 것과, O2O 기반의 산업생태계가 조성되고 있다는 기술·산업적 측면의 변화에 주목할 필요가 있다. 따라서 미래 기술 및 산업구조가 ‘초연결성’과 ‘초지능성’을 중심으로 개편된다는 점을 고려하여 ICT와 제조업의 융합 및 ICT와 서비스산업의 융합 등을 통한 국가차원의 신성장동력을 발굴하고 육성할 필요가 있다. 제4차 산업혁명을 대비하고 미래사회 변화를 선도하기 위해 국가차원에서 전략분야를 선정¹⁷하고, 해당 기술 및 산업 분야로의 투자확대 등을 통해 과학기술 경쟁력 강화를 도모할 필요가 있다.

¹⁷ 이러한 측면에서 우리나라는 제2차 「과학기술전략회의」를 통해 ‘인공지능’, ‘가상증강현실’, ‘자율주행자동차’ 및 ‘스마트 시티 구축’등을 성장동력 확보 분야로 선정하여 국가 전략 프로젝트를 통한 새로운 성장동력을 만들기 위한 노력을 진행 중



※ 출처 : Global Market Strategy(삼성증권, 2016)

(3) 창의적·혁신적 과학기술인력 양성 체계 구축

상기 제시된 범정부차원의 정책 수립 및 신성장동력 발굴에 따른 과학기술 경쟁력 강화라는 2개의 전략이 중·단기적 관점에서의 전략이라면, 장기적 관점에서 제4차 산업혁명에 대응하기 위한 전략으로 과학기술 인력양성 체계를 구축할 필요가 있다. 제4차 산업혁명의 주체는 인간이라는 점에서 미래사회 변화를 주도하고 주체적으로 대응하기 위해서는 미래사회가 요구하는 역량을 갖춘 인력의 양성이 필요하다.

첫 번째 미래기술에 대한 대응 및 활용 역량을 강화하기 위해 정보통신기술(ICT)에 기반한 “S/W에 대한 교육을 확대·강화”하고 “스마트 교육환경을 구축”할 필요가 있다. 이미 영국은 2014년을 ‘코드의 해(The Year of Code)’로 지정하여 5세 ~ 16세를 대상으로 S/W 교육을 의무화하여 S/W 교육을 진행하고 있고, 미국은 K-12 교육과정에서 ‘컴퓨터 과학’과 관련된 커리큘럼을 개발하여 운영 중에 있다. 또한 미국은 교육혁신계획인 ‘ConnetED(2013)’를 추진하여 학생들이 초고속 인터넷 및 최첨단 학습도구를 활용하도록 지원하고 있고, 세계수준의 IT 교육 인프라 제공을 목표로 ‘Education Cloud Program’을 추진하고 있는 중이다. 유럽의 경우에도 ‘Opening up Education(2014)’를 추진하여 초·중등과정에서 정보통신기술(ICT)에 대한 학생들의 흥미 유도 및 창의성 증진을 위해 디지털 교육자료를 확대하는 등 IT 기반의 교육환경을 구축하고 있는 추세이다. 따라서 우리나라도 2018년 초·중등 S/W 교육 의무화를 대비하여 S/W에 대한 접근성 증진 및 역량 강화를 위해 수준별 프로그래밍 및 코딩 중심의 S/W 교육 체계를 구축할 필요가 있다. 이와 더불어 S/W 기반의 교육 및 콘텐츠 활용을 위해 ICT 기반의 교육 환경 구축이 필요하다.

두 번째 제4차 산업혁명은 미래사회 인력이 갖추어야할 역량이 변화할 것을 요구하고 있다는 점에서 기존 교육시스템에서 벗어나 창의적이고 융합적인 역량을 갖춘 인재의 양성을 위해 “역량 키우기” 중심의 “교육시스템 전환”이 필요하다. 이미 미국 등 주요국을 중심으로 미래사회의 인재를 양성하기 위한 교육시스템 전환이 시작되고 있는 중이다. 특히 미국에서는 ‘미네르바 스쿨(Minerva School)¹⁸’과 같은 새로운 유형의 대학이 설립·운영되고 있고, 하버드 대학교(Harvard Univ.) 및 매사추세츠 공과대학(M.I.T.) 등과 같은 세계 명문대학을 중심으로 ‘MOOC(Massive Open Online Course)’와 같은 새로운 교육 방식이 도입되고 있다. 기존의 지식 습득에 초점이 맞춰진 교육시스템에서 벗어나, ‘창의성’, ‘융합성’ 및 ‘문제해결능력’ 등과 같은 “역량”에 초점을 맞춰진 교육시스템을 운영하고 있는 것이다. 또한 스탠포드

¹⁸ 미네르바 스쿨(Minerva School)은 온라인 수업을 기반으로 토론 및 세미나 등을 통해 지적 개발에 중점을 두는 ‘거꾸로 수업(Flipped Learning)’ 방식을 활용하여 창의성 및 융합성 등을 키우는 새로운 고등교육 시스템

대학교(Stanford Univ.)는 과학기술분야의 지식과 디자인적 사고를 융합한 ‘D-School at Stanford’를 운영하여 학생들의 창의성과 혁신성 등의 역량을 키우는데 집중하고 있다. 이에 우리나라도 무학제/무학과 무학년 개념의 온/오프라인 학제 등 새로운 교육 시스템을 도입하고, 이공학적 소양과 디자인적 사고를 갖춘 창의적·융합적 과학기술인재의 육성을 위해 지식 중심이 아닌 “역량 키우기” 중심의 교육시스템으로 전환할 필요가 있다.

환경 R&D와 환경산업 육성을 위한 제언

최승일_고려대학교 환경시스템공학과 교수



1. 서론

전통적인 환경업무라면 환경보전과 개선을 위한 업무가 되겠지만 최근에는 환경산업 육성도 환경 업무의 중요한 부분이 되고 있다. 예전에는 환경 업무는 오염방지를 위한 규제를 의미했고, 산업체가 오염방지를 위한 비용을 부담하게 함으로써 국제적 가격 경쟁력을 저하시키는 역할을 하는 것으로 간주되던 때가 있었다. 그러나 전 세계에서 산업생산으로 인한 오염의 피해가 충격적인 결과로 나타나자 오염방지를 위한 산업체의 비용부담은 당연한 지출로 인식되게 되었다. 오히려 최근에는 환경오염 방지를 위한 시설을 설치하고 철저히 운영하는 것이 기업의 사회적 책임으로 부각되었고, 일부 국가들은 환경오염을 유발시키는 기업의 제품은 수입을 금하는 추세까지 나타나게 되었다. 이에 따라 생산과정에서 발생하는 오염물질을 처리하거나 회수하는 설비를 비롯하여 오염방제 산업 등 환경 보전에 관련되는 산업이 산업계의 중요한 부분으로 나타나고 있다. 자연스럽게 환경정책에는 환경보전뿐 만 아니라 환경산업의 육성도 중요한 위치를 차지하게 되었다. 본 고에서는 정부의 환경 기술개발 연구 및 산업 육성정책의 현황을 소개하고, 환경 연구 및 환경산업 육성의 효율성을 증진시킬 몇 가지 안을 제언해 보고자 한다.

2. 환경산업의 시장 규모

EBI(Environmental Business International)의 2013년 보고서에 의하면 세계 환경시장은 2013년에는 약 9,240억 달러(US)에 달하였고, 2020년에는 1조 1,610억 달러(US)까지 증대될 것으로 예상하였다(환경백서,

● 참고문헌

- The Future of Jobs, WEF, 2016
- The Future of Employment : How susceptible are jobs to computerisation?, Oxford Martin School, 2013
- The World at Work: Jobs, pay and skills for 3.5 billion people, Mckinsey&Company, 2012
- Australia's Future Workforce, CEDA, 2015
- Are robots taking our jobs, or making them, The Information Technology and Innovation Foundation, 2013
- The Shape of Jobs to Come, Fast Future Research, 2010
- The Workforce of The Future, General Electronics, 2016
- Four Fundamentals of Workplace Automation, Mckinesy&Company, 2015
- From Sectoral Systems of Innovation to Socio-technical Systems Insights about Dynamics and change from Sociology and
- Institutional theory, Geels, F., Research Policy, Vol 33, No.6-7, 2004
- Man and Machine in Industry 4.0, Boston Consulting Group, 2015
- Technology, Globalisation and The Future of Work in Europe, IPPR, 2015
- The Technology at Work v2.0, Oxford Martin School & Citi Research, 2016
- The Future of Work: Jobs and Skills in 2030, UKCES, 2014
- The Human Capital Report, WEF, 2015
- The Singularity Is Near : When Hmans Transcend Biology, Ray Kurzweil, 2006
- BCC research, 2014(<http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/digitalization-and-software/artificial-intelligence-facts-and-forecasts.html>)
- The Internet of Everything in Motion, Cisco, 2013
- '창의인재', 미래사회의 새로운 패러다임, The Science Times, 2016
- 과학기술 & ICT 정책기술 동향 - 일본, 국가산업미래전략망보고서, KISTEP, 2016
- 죽기 전에 꼭 알아야할 세상을 바꾼 발명품 1001, 잭 첼로너, 2010

환경부, 2016). 미국 일본, 유럽 등 선진 환경시장은 연간 2.7%의 성장을 보이는데 비하여 아시아, 아프리카, 중남미와 중국을 중심으로 한 신흥 환경시장은 약 7% 내외의 급성장세를 보이고 있으며 특히 폐자원 에너지 분야는 최근 3년간 12% 내외의 높은 성장률을 보여주고 있다. 2013년 세계 반도체 시장의 규모가 3,178억 달러(US) 인 것을 감안하면 세계의 환경시장은 반도체시장의 약 3배에 달하는 규모인 것으로 평가된다(제3차 환경기술 및 환경산업 육성계획(안), 2015 시행계획). 이에 비하여 2013년 기준 국내의 환경시장은 <표 1>과 같이 총 매출액 89조8천억 원, 2014년 98조825억 원으로 최근 5년간 평균 17.8%의 성장률을 보이고 있으며 GDP에서 차지하는 비중은 6.9%에 달하는 것으로 조사되고 있다.

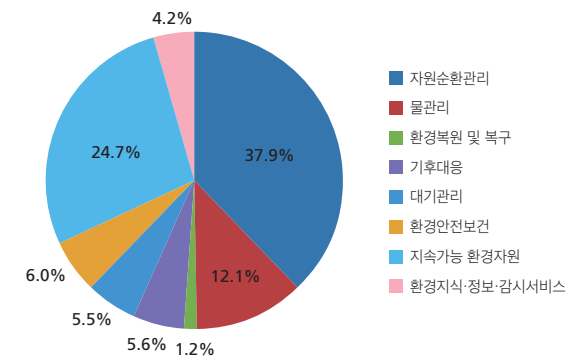
세계의 환경시장 구성은 물 산업 36%, 폐기물 관리 31%, 폐자원 에너지 23%, 대기 관리 6%로 4개 분야가 전체시장의 96%를 차지하고 있으며 국내의 환경산업은 자원순환 분야가 34.2%, 물 분야 25%, 지속가능 환경자원이 13.9%로 전체의 73.1%를 차지하고 있었다. 환경산업 수출액은 지난 5년간 연평균 약 30%의 급성장 추세를 보이고 있으며, 2013년 기준 7.9조원으로 우리나라 전체 상품수출액 5,596억 달러(US)의 약 12.6%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

2014년 말 기준 환경산업통계 작성범위 내의 환경관련 사업체 수는 2010년 33,835개소에서 2014년 57,108개소로서 매년 지속적으로 증가하고 있으며, 총 종사자 수는 1,030,810명이며 이 가운데서 환경부문 종사자 수는 454,749명으로 44.1%를 차지하고 있는 것으로 조사되었다(2014년 기준 환경산업통계조사보고서, 환경부, 환경공단, 2015).

<표 1> 환경산업 활동 별 환경부분 매출액

	계	자원순환 관리	물 관리	환경 복원·복구	기후 대응	대기 관리	환경 안전·보건	지속 가능 환경 자원	환경지식· 정보·감시 서비스
2013년	898,044	307,471	224,819	15,932	26,428	60,681	74,243	124,454	64,016
%	100.0	34.2	25.0	1.8	2.9	6.8	8.3	13.9	7.1
2014년	980,825	305,998	268,884	8,601	40,053	61,811	76,322	173,567	45,589
%	100.0	31.2	27.4	0.9	4.1	6.3	7.8	17.7	4.6

<그림 1> 2014 환경산업 활동별 사업체 비율



3. 환경 기술개발 및 환경산업육성을 위한 투자

우리나라의 환경기술과 환경산업 육성을 위한 투자계획은 최근 ‘제3차 환경기술 및 환경산업 육성계획(2013~2017)’에 잘 나타나 있다. 핵심전략 및 중점추진계획 및 2014년도 투자실적과 2015년 투자계획을 아래 <표 2>에 나타내었다(2015년은 이미 투자 실적이 있겠으나 현재 실적자료를 구하지 못하여 계획안으로 대체하였음). 투자 목적은 국민의 환경복지를 강화하고 환경산업의 경쟁력을 강화하기 위하여 기술개발을 확대하며, 신규 환경시장 창출 및 환경전문기업의 성장단계별 육성과 해외 진출 지원강화를 통하여 글로벌 환경시장에서 경쟁력을 확보하기 위함이다.

<표 2> 중점추진과제별 투자실적 및 계획

(단위: 백만 원)

핵심 전략	중점추진과제	2014 실적			2015 계획		
		계	정부	민간	계	정부	민간
총 합계		1,137,199	839,568	297,631	1,285,170	939,341	345,829
5대 목표별 16대 중점기술 개발	소계	906,247	668,601	237,646	940,861	704,884	235,977
	1. 5대 목표별 16대 중점기술 개발	888,209	655,690	232,519	918,551	688,687	229,864
	2. 국내외 환경 R&D 협력강화	1,764	1,510	254	1,282	960	322
	3. 환경 R&D 성과제고 및 책임성 확보	16,274	11,401	4,873	21,028	15,237	5,791
	소계	153,014	93,179	59,835	233,792	123,940	109,852
3대 강점 및 4대 미래 유망 환경산업 육성	4. 환경산업 글로벌 시장 확대	11,644	11,644	-	10,960	10,960	-
	5. 환경전문기업 육성 및 경쟁력 제고	141,370	81,535	59,835	222,832	112,980	109,852
	6. 환경산업 동반성장 협력강화	-	-	-	-	-	-
	소계	77,938	77,788	150	110,517	110,517	-
환경 기술 및 산업 연계 발전 전략	7. 실증화를 통한 개발기술의 사업화 촉진	24,231	24,231	-	42,700	42,700	-
	8. 인·검증 제도를 활용한 개발기술의 사업화 촉진	632	482	150	944	994	-
	9. 환경기술 산업 정보제공 및 통계관리 선진화	53,075	53,075	-	66,823	66,823	-
	소계	77,938	77,788	150	110,517	110,517	-

※ 출처: 제3차 환경기술 및 환경산업 육성계획(안), 2015 시행계획

4. 9개 중점추진과제별 개요

(1) 5대 목표별 16대 중점기술 개발

5대 목표 16대 중점기술은 10개 부처(미래창조과학부, 농림축산식품부, 산업통상자원부, 보건복지부, 환경부, 국토교통부, 해양수산부, 농촌진흥청, 산림청, 중소기업청)에서 부처별 역할에 적합하게 나누어 개발하고 있다. 2014년도에는 정부와 민간을 합하여 총 8,882억 원이 투자되었는데 재생에너지 분야에 39.4%인 3,500억 원, 대기질 개선에 15.8%인 1,400억 원, CO₂ 및 Non-CO₂ 처리에 9.1%인 811억 원이 집중되었다. 5대 목표와 16대 중점기술 및 관련 부처는 <표 3>에 수록하였다.

<표 3> 환경기술 개발 5대 목표와 16대 중점기술

5대 목표	16개 중점기술	참여부처	2014년 연구비 (억 원)
자원순환형 사회를 위한 재활용 및 에너지화 기술개발	1. 유용자원 회수 및 폐기물 재활용 기술	산자부, 농림부, 환경부, 국토부, 농진청	637
	2. 수자원 재이용 기술	환경부	155
	3. 재생에너지 기술	산자부, 미래부, 농림부, 환경부, 산림청, 농진청	3,500
온실가스 감축 및 기후변화 대응 적응 능력 강화기술	4. 온실가스 저감기술	환경부, 국토부	97
	5. CO ₂ 및 Non CO ₂ 회수·저장·처리 및 평가 모니터링 기술	미래부, 산자부, 환경부, 해수부	811
	6. 기후변화 평가 및 적응관리 기술	농림부, 환경부, 국토부, 해수부, 산림청, 농진청	274
환경질 개선 및 생태계 건강성 회복 기술	7. 청정 대기환경 조성을 위한 대기질 개선 기술	산자부, 환경부	1,400
	8. 수생태계 건강성 회복을 위한 수처리 기술	환경부, 해수부	143
	9. 폐기물 관리 및 감량기술	환경부	65
	10. 토양 및 생태계 복원·관리 기술	환경부, 국토부, 해수부	350
국민 건강과 행복을 위한 생활환경 조성기술	11. 깨끗하고 안전한 물 공급 관리 기술	환경부, 국토부	441
	12. 생활환경에서 노출되는 유해인자 관리기술	환경부	186
	13. 환경성 질환에 대한 효율적인 대응·관리 기술	환경부, 복지부	58
	14. 친환경 라이프 스타일 구축에 필요한 기술	산자부, 농림부, 환경부, 해수부	261
환경 재난·재해 대응 및 생물 자원 탐색·보존·관리·활용기술	15. 환경분야 재난·재해 예방 및 수습 등 위기대응 기술	환경부	0
	16. 생물자원 탐색·보존·이용 기술	미래부, 농림부, 환경부, 산림청	503

(2) 국내·외 환경 R&D 협력강화

16개 중점기술 등 환경 관련된 사업과 연구에 10개 부처가 관련되어 있으나 연구와 사업이 각 부처별로 독립적으로 시행되면서 상호 중복성이나 연계 미흡의 문제가 대두되었다. 관계부처 공동으로 환경 분야 3대 사회문제 해결 R&D 사업 추진 및 상호 연계성 강화 등을 위해 환경 R&D 협의체를 구성하였다. 또한 국외 협력사업으로 중국, 베트남, 콜롬비아 등에 설치된 한국환경산업기술원의 5개 해외 환경협력센터를 활용하고 기술사업화 멘토링 등을 통해 해외진출 기회 확대하고자 하였다.

<표 4> 환경 분야 3대 사회문제 해결 R&D 사업 협력

R&D 사업명	사업규모 (기간)	관련부처
환경호르몬 통합 위해관리 및 대체소재 개발	총 150억 원 (‘15~’19)	환경부, 미래부, 식품의약품안전처
음식물 쓰레기 수거처리 개선	총 125억 원 (‘15~’19)	환경부, 국토부, 미래부, 농진청
녹조로 부터 안전한 상수공급	총 180억 원 (‘14~’17)	환경부, 미래부, 국토부

<표 5> 환경 R&D 협의체

환경 R&D 협의체	관련 기관
녹조 연구 협의체	환경부, KIST, 생명공학연구원, K-Water 등 7개 기관
화학사고 대응 협의체	환경부, 소방청, 산자부 등

(3) 환경 R&D 성과제고 및 책임성 확보

연구과제의 성공률이 우리나라는 거의 100%이다. 그럼에도 연구결과가 상용화되는 비율은 매우 낮다. 이를 극복하기 위하여 연구기획 초기부터 연구성과 도출 및 사업화를 고려한다. 종료과제 중 우수과제 및 사업화 성공사례를 발굴하여 'Best Practice'로 선정하고 시장 진입에 실패한 'Worst Practice'를 조사하여 R&D 사업화 컨설팅에 활용하도록 하였다. 연구비용이 부담스럽고 사업화 역량이 취약한 중소·중견기업을 지원하기 위하여 수요기업의 개발제한 기술 혹은 구매조건부 기술에 대한 R&D를 확대하기로 하였다.

(4) 환경산업 글로벌 시장 확대

우리나라의 환경시장은 규모가 작아서 기업들이 지속적으로 성장하려면 해외시장에 진출하여야한다. 정부는 아래 <표 6>과 같이 전략적 해외 환경사업 발굴 및 수주 지원행사, 다자기금을 활용한 개도국 협력사업 추진, 해외 협력 네트워크 구축 및 해외진출 지원조직 강화 등으로 환경기업의 해외진출을 지원하고 있다.

정부의 해외시장 확대 사업은 환경외교를 통한 북 아프리카, 중남미, 동유럽 등 유망 신흥 환경시장 진출 뿐 아니라 환경시장의 76% 내외를 점유하고 있는 미국, 일본, 서유럽 등 선진국 시장 진출도 전략적으로 지원하고 있다. 신흥 환경시장에는 ODA사업으로 개발계획 수립을 지원하고 해외환경협력센터, KOICA,

<표 6> 환경산업 글로벌 시장확대 사업내용

분야	사업명
전략적 해외환경 프로젝트 발굴 및 수주 지원 강화	개도국 환경개선 마스터플랜 수립지원
	해외 환경프로젝트 타당성 조사 지원사업
	해외 실증화 및 국제공동연구를 통한 환경기술 수출
	환경기업 수출 컨설팅 기능 강화
다자기금을 활용한 개도국 협력사업 확대추진	녹색 ODA 확산을 통한 환경시장 창출
	국제개발은행을 활용한 환경산업 진출 영역 확대
해외협력 네트워크 및 해외진출 지원조직 강화	글로벌 환경협력 네트워크 강화 및 협력사업 발굴
	해외 환경인력 초청 연구
	환경산업 해외시장 개척단 파견
	해외환경산업협력센터를 통한 지역거점 확보
	환경산업 정책 통합 운영체계 구축
	해외 환경정보 통합 지식정보망 구축
	사이버 공간을 활용한 환경산업 홍보방식 다양화

KOTRA, 수출입은행 등 유·무상 협력기관과 함께 후속 사업을 수행하도록 지원한다. KOTRA와 공동으로 해외바이어 초청행사를 통하여 수주기회를 제공하거나 우수 환경기술 보유기업들로 시장개척단을 구성하여 아시아, 아프리카, 중남미, 유럽 등 권역별로 파견하는 행사를 지원한다. 이외에도 많은 해외진출 지원프로그램을 개발하여 환경산업의 해외시장 개척을 지원한다.

(5) 환경전문기업 육성 및 경쟁력 제고

환경전문기업들은 대부분 중소·중견 기업들이므로 정부의 육성지원이 절실하다. 정부는 우수환경산업체를 2014년 15개사에서 2015년 20개사로 확대 지정하여 재무·경영·사업 등 맞춤형 지원을 하고, 유망 중소환경기업을 대상으로 우수 환경기업 해외수출 기업화 지원사업(Green Export 100)으로 수출중견기업을 육성할 계획이다. 더하여 중소기업청 창업지원센터와 연계하여 창업지원을 강화하고, 환경벤처센터 입주기업들의 사업역량 증대를 위한 각종 지원프로그램을 운영하고 있다. 벤처기업 및 중소기업의 가장 어려운 난제인 자금지원을 위하여 민간기금을 활용하여 환경산업 육성자금 및 환경개선자금 융자규모를 점진적으로 확대하고자 한다. 더불어 환경컨설팅 산업육성을 위하여 특성화대학원 3개소를 지정하여 석·박사급 전문인력을 양성하고 있다.

(6) 환경산업 동반성장 협력 강화

환경 대·중소기업 간의 교류를 활성화하기 위하여 환경산업 상생포럼을 운영하여 기업 간의 이해를 돕고, 서로간의 장점을 취하여 동반성장을 하도록 유도하는 정책을 수행하고 있다. 동반성장 성공사례 발굴 전파 등을 통해 기업 간 관심정보 교류 및 네트워크 구축을 지원하였고, 환경기술 및 상품정보 데이터베이스 전용 홈페이지를 구축하였다.

(7) 실증화를 통한 개발기술의 사업화 촉진

정부는 기업이 개발기술의 적용실적을 확보하는 것을 지원하기 위하여 환경산업 실증화 단지를 조성하고, 지자체의 환경 현안 문제 해결에 적용하도록 환경 R&D 실증화 사업을 추진한다. 또한 중국시장을 대비하여 한·중 공동 환경기술 실증화 지원센터를 설치하여 2014년 4월부터 운영하고 있다. 더하여 정부는 기술거래사 및 사업화 전문회사를 활용하여 R&D 성과물의 해외 기술이전 촉진과 사업화를 위한 전문 컨설팅 사업도 수행하고 있다. 정부가 시행하는 다양한 사업내용이 <표 7>에 수록되어 있다.

<표 7> 실증화 지원사업의 내용

분야	사업내용
환경 기술·산업 연계육성을 위한 실증화 단지 조성	환경산업 실증화 단지 조성 및 지원센터 설립·운영
	우수 환경 R&D 성과 실증화 사업비 지원 확대
개발기술에 대한 사업화 지원 및 성과 홍보 강화	미활용 환경기술 활용도 제고
	IP 사업벨트 구축을 통한 통합솔루션 제공
	기술거래사 및 사업화 전문회사를 통한 환경기술 이전 활성화
	환경 R&D 성과 확산을 위한 홍보강화

(8) 인·검증 제도를 활용한 개발기술의 사업화 촉진

정부는 개발 기술의 해외진출을 촉진하기 위한 방안으로 기업이 개발한 제품의 해외 인·검증표지의 획득을 지원하고 있다. 각 국가의 인·검증 제도와 기준이 상이하여 해외진출을 시도하는 기업들은 많은 비용과 시간이 걸리는 인·검증 과정을 매우 어려워하고 있으므로 '국가간 환경기술 검증(ETV, Environmental Technology Verification) 상호인정 제도'를 도입하여 해외진출을 지원하고 있다. 아래 <표 8>에 정부의 각종 인·검증 지원 사업이 수록되어있다. 조달청에서는 6.2조 달러 규모의 해외 정부조달시장을 전략적으로 공략하기 위해 해외 조달 시장 진출 가능성이 높은 중소기업 중 기술력과 신뢰성을 검증하여 G-Pass 인증마크를 수여하는 제도를 시행하고 있다. 조달청은 G-Pass 기업에 대하여 조달청의 해외 네트워크를 활용한 해외 정부조달 진출 지원 사업을 집중 지원하고 있다. 주요 지원 대상 국가는 '16년 14개 지역으로 중국, 베트남, 인도네시아, 러시아, UAE, 미국, 터키, UN, 인도, ODA, 호주, 사우디, 미얀마, 우즈베크으로 이루어져 있으며, '16년 현재 275개사가 G-Pass 기업으로 선정 되어 있다.

<표 8> 인·검증 제도 지원사업의 내용

분야	사업내용
개발기술의 인·검증 획득 지원	환경 중소기업 인증 획득 지원 R&D 확대
	국제 환경기술 공동 검증 지원
환경기술 검증·인증제도 개선	기술검증 의무화 방안 포럼
	환경표지 등급제 부여
	환경표지 부여가능성 대상 제품군 속성 다변화
	환경섹터별 녹색표지 도입

(9) 환경 기술·산업 정보 제공 및 통계관리 선진화

연구개발 방향 설정 및 산업육성 전략 마련 등 각종 정책수립의 기초자료로 활용하기 위하여 환경기술·산업실태를 조사하고, 환경기술 특허 현황, 해외 환경시장 및 정책동향, 우수 환경기술 제품, 국내 환경시설 발주 정보 등을 제공하는 '국가 환경기술·산업 정보시스템'을 사용자 맞춤형 종합정보포털로 개발하여 제공한다. 이는 다양한 정보의 수집과 유통을 통하여 기업들의 활동을 지원하는 것이 목적이다.

5. 환경산업 육성 지원방안에 대한 제언

(1) 입찰제도의 개선

환경관련 기업들은 아직 중견기업 또는 중소기업이어서 환경관련 기업들이 느끼는 구조적인 큰 어려움 중의 하나가 입찰제도이다. 현재의 입찰제도는 대기업이 원청업체가 되고 중소기업들은 하청 또는 재하청의 형태로 수주를 하는 것이 일반적이다. 발주처는 원청업체인 대기업만 관리하면 되고, 공사에 소요되는 수많은 단종공사와 설비공사를 원청업체가 관리하므로 효율적이고 편리한 형태이겠지만, 하청형태의 중소기업이나 특히 재하청 형태로 설비공사를 하게 되는 중소제조업체들은 더욱 어려움에

직면한다. 우선적으로 원청업체들의 저가낙찰과 하청, 재하청의 단계로 내려오는 과정에서 간접비의 부담이 커서 하청이나 재하청 업체들은 적절한 이윤을 남기기 지극히 어려운 상태가 된다. 손실로 인하여 회사를 망하게 하지 않으려면 결국은 인건비를 줄일 수 밖에 없다. 직원들에게 적절한 인건비를 지급할 수 없으니 우수한 직원들이 급여가 높고 근무환경이 좋은 대기업을 찾아서 이직하는 경향이 높고, 애초에 사원모집을 할 때 우수한 인력을 모집하기 지극히 어렵다. 결과적으로 새로운 기술의 개발이나 새로운 시장의 확대, 특히 해외시장 진출은 엄두를 내지 못하게 된다. 더욱 어려운 상황은 재하청으로 공사에 참여했다가 하청업체가 부도라도 나면 아예 공사대금이나 설비대금을 받지 못하는 경우도 발생한다.

환경산업의 육성을 위하여 정부가 이미 시행하고 있는 여러 가지 정책이나 지원책은 물론 필요하지만 가장 근본적으로는 입찰제도를 보완하여야 한다. 입찰제도에 관련하여 여러 가지 피치 못할 사정들이 있어서 현행 제도를 수정하는 것이 쉽지는 않겠지만 기본적으로 공사 발주 시에 전문업체와 대기업이 대등한 위치로 공동 수주하는 것을 권장하는 제도가 되어야 한다. 또한 최저낙찰제와 같이 저가수주를 유도하는 낙찰제도는 궁극적으로 국가와 기업에 모두 손실을 초래할 가능성이 높으므로 기술과 적절한 대금을 병행하는 제도로 보완되어야 할 것이다. 특히 하청이나 재하청의 형태로 참여하는 전문기업들에게 공사대금을 직불하는 제도가 있어야 한다. 서울특별시의 e-바로 시스템과 같이 전문업체에 공사대금을 직불하는 제도가 모든 발주처에서 보편화되어야 할 것이다.

다행히 정부는 최근에 최저낙찰제의 심각한 부작용을 피하기 위하여 300억 원 이상의 공사는 종합심사 낙찰제, 300억원 미만의 공사는 적격심사제를 적용하고 있다. 새로운 낙찰제도는 최저낙찰제의 지나친 저가수주의 부작용을 피할 수 있으며, 공동수주의 가능성을 높였지만 여전히 공사실적을 평가하므로 대기업에 비하여 실적이 적은 중소기업의 불리함을 해소하지 못하는 경향이 있다. 또한 조달청은 중소기업의 인증부담이 줄어들도록 인증평가체제를 개선하고 품질관리 평가를 강화하여 기술품질 경쟁력 강화를 유도하는 다수공급자계약(Multiple Award Schedule, MAS) 제도를 도입하였으나 물가상승률에 대한 고려 등 제도의 시행에 따른 세부적 사항들을 보완할 필요성이 대두되고 있다.

(2) 민·관 종합상사의 육성

중소기업이나 중소 제조기업은 해외경험이 일천하고, 해외진출을 담당할 인력도 부족하여 자체적으로 해외시장 개척 역량이 미흡하므로 지원기관이 필요하다. 물론 정부에서는 환경기업들의 해외진출을 지원하기 위하여 수많은 프로그램들을 준비하여 시행하고 있다. 그러나 현재 정부의 지원책들은 환경기업들의 수준을 너무 높게 보고 있다. 대부분의 환경관련 기업들은 현재 정부의 다양한 부처에서 시행되고 있는 많은 지원책을 잘 엮어가면서 스스로 성장하고 해외진출을 할 만큼의 능력과 인력이 없다. 정부는 많은 지원을 해 주고 있지만 막상 지원을 받는 중소기업들은 정부 각 부처에 흩어져 있는 프로그램들을 모두 숙지하지도 못할 뿐 아니라 지원내용이나 조건들이 미흡하다고 이야기 한다. 그러므로 지금 필요한 것은 해외시장의 요구와 정부의 지원책과 환경기업들의 상황을 모두 숙지하고 잘 엮어서 해외진출을 성공시킬 연계기능이다.

우리나라가 1970년대 수출입국을 통하여 경제개발을 성공시키는데 지대한 공헌을 한 것이 종합상사이다. 종합상사의 우수한 인력들이 전 세계를 돌아다니면서 각 지역의 정보를 수집하고, 국내에서 물품을 조달할 기업을 찾거나 생산하고, 통관절차와 해당지역의 다양한 규제를 돌파하여 수출을 성사시켰다. 결과적으로 국내기업도 성장하고 종합상사도 급성장하였다. 환경기업의 육성과 해외진출도 경제개발 시대의 종합

상사와 같은 기능을 하는 민·관 공동기업이 필요하다. 종합상사와는 다르게 민·관 공동기업이 되어야 하는 이유는 어느 나라나 환경산업의 특성상 사업의 주체는 대부분 지자체나 공공기관이므로 민간기업 종합상사라면 상대국의 공공기관과 교류와 협력이 어렵기 때문이다. 그러므로 공기업이 참여하여 상대국과 교류하되, 민간자본 51% 이상으로 구성하여 수익의 주체가 되는 민간기업이 주도하는 것이 바람직하다. 다만 공기업도 해외진출의 성과로서 수익을 얻을 수 있도록 하여야 공기업이 적극적이고 자발적으로 참여할 동력이 될 것이다. 민·관종합상사는 최소한 다음과 같은 기능을 수행할 수 있어야 한다.

- 국내 수처리기술과 제품에 대한 정확한 정보 수집
- 해외 진출대상국의 수처리 수요 및 전반적 경제현황 조사
- 해외진출 대상국의 규제와 관습 파악
- 해외진출 대상국의 인적 network 구축
- 해외진출 대상국의 조달기관에 우리나라 제품의 vendor 등록
- 해외 진출 대상국의 현황과 문제에 대한 total solution을 제공할 수 있는 전문인력과 컨설팅 능력
- Total solution을 이행하기 위한 자금의 조달과 사업개발
- 해외 중요 수요처에 대한 순회 기술설명회 개최

(3) 해외지원사업의 완결성 보완

이미 언급한 바와 같이 정부는 환경산업 육성을 위하여 많은 해외진출 지원 프로그램을 시행하고 있다. 특히 '환경산업 글로벌시장 확대' 프로그램에서는 ODA(공적개발원조)사업을 활용하여 개도국의 환경시설 마스터플랜을 수립하기도 한다. 정부의 유사한 지원으로 기획재정부의 KSP (Knowledge Sharing Program), EDCF 지원도 있다. 그런데 이러한 프로그램에 의한 개도국 지원이 일관성이나 완결성이 없다는 것이 지원사업의 효과를 반감시키고 있다. KSP에 의하여 타당성 조사(Fesibility Study)가 완료되면 이에 따라 ODA 사업으로 마스터플랜을 작성하고, 이후에는 EDCF 자금이나 수출입은행을 통하여 자금을 조달하여 마스터플랜에 따른 시설을 설치하도록 하여야 한다. 더하여 시설의 운영을 맡거나 현지의 운영인력 교육까지 하여야 한다. 이러한 완결성이 있어야 지원을 받는 국가에서도 시설이 완성되고 운영되어 환경개선의 효과를 얻을 수 있고, 우리나라는 환경기업이 진출하여 해외진출의 성과를 거둘 수 있다. 서로 Win-Win 하는 제도이다. 그런데 우리나라의 지원프로그램은 서로 연결되지 않는다. 일단 예산의 주관부처가 다르고 이에따라 사업철학이 상이하며, 각기 조건과 절차가 복잡하게 엉겨있어서 타당성조사에서 시설설치까지 일관되게 연결되지 않는다. 지원받는 나라에서는 한국이 와서 타당성 조사한다고 혹은 마스터플랜을 작성하여 준다고 일을 하는 척 하더니 아무런 후속조치가 없으니 결국은 아무 것도 실제로 얻는 것은 없다. 우리나라는 예산을 써서 타당성조사를 하거나 마스터플랜을 작성하거나 하지만 후속되는 사업을 실제로 하지 않으니 환경기업들이 진출할 기회는 막아버리고, 예산은 큰 효용가치 없이 사용된 결과가 된다.

해외 지원 사업은 타당성 조사로부터 환경시설의 설치와 운영까지 total service가 되도록 하여야 한다. 이러한 일관체계를 위하여 기획재정부의 Knowledge Sharing Program, 외교통상부의 ODA, 기획재정부의 EDCF 혹은 세계은행이나 아시아개발은행 등 국제기구의 자금이나 한-아프리카 경제협력협약체 신탁기금 등의 자본을 단계적으로 활용하는 다부처 협력체계를 구축하는 것이 바람직하다. 일본은 이러한 일관지원

체계를 JICA와 수출입은행이 합쳐진 조직이 담당하고 있다.

더하여 각종 해외 시장진출 지원프로그램의 지원기간이 현실적으로 지원이 필요한 기간에 미치지 못하는 경우가 있으므로 현재보다 지원기간을 연장하되 실제 지원기간은 지원 사업 별로 심의하여 정하도록 규정을 보완하는 것이 바람직하다.

6. 환경 기술개발 연구와 환경산업 육성을 위한 정책방향 제언

환경기술 연구와 환경산업 육성은 정부의 환경정책과 서로 엮여 있다고 할 수 있다. 정부의 정책은 산업의 활동과 기술개발에 대응하고, 산업은 정책과 개발 기술의 우수성에 의존하며, 기술개발은 산업의 수요와 정책의 방향에 의존한다. 그럼에도 환경연구와 환경산업은 정부의 환경정책에 의하여 근본적으로 의존하게 되므로 정부의 환경정책 방향과 원칙은 매우 중요하다. 환경정책의 특성과 바람직한 방향을 살펴봄으로써 개념적으로나마 기술개발과 산업육성에 효율적인 환경정책의 윤곽을 그려낼 수 있다.

(1) 합리적인 규제 설정과 운용

지난 10여 년 이상 우리나라 정책의 주요화두의 하나는 규제개혁, 규제혁파가 차지하고 있다. 정부에는 대통령 직속으로 규제개혁위원회도 설치하여 정기적으로 기업의 활동을 저해하는 규제를 철폐하였다. 물론 큰 효용도 없으면서 기업의 활동을 저해하는 많은 규제들은 철폐하는 것이 마땅하다. 규제개혁정보포털의 자료에 의하면 환경부는 2016년 8월 22일 기준으로 규제신문고의 건의에 대한 수용률이 38.2%로 정부부처의 평균 수용률 37.9%를 조금 상회하고 있다. 하지만 규제라고 해서 반드시 불필요한 것들이 아니고, 규제철폐의 건수를 규제개혁의 성과로 판단할 일은 아니다. 특히 환경 분야는 자연 및 생활 환경의 보전과 개선을 위하여 각종 산업 활동 및 오염행위에 대한 규제가 근본적으로 필요한 분야이다. 규제는 자연환경의 보전과 생활환경의 개선을 위해서도 필요하지만 환경산업의 육성을 위해서도 필요하다. 규제가 강하면 더 깨끗한 환경을 보전하게 되고, 규제의 목표값을 달성하기 위한 고성능의 시설과 장비가 필요하게 되고, 이것이 환경산업의 육성으로 이어지게 된다. 그러므로 정부의 여러 부처 중에서도 환경 분야는 특히 규제의 철폐가 아니라 합리적인 규제와 규제의 효과적인 운용이 더욱 필요한 분야이며, 환경정책은 합리적인 규제의 설정과 효과적인 운용이 근간을 이루어야 할 것이다.

(2) 합리적인 규제를 위한 노력

환경의 특성상 환경정책은 합리적인 규제와 규제의 효과적인 운용이 필요하지만 규제는 산업이나 인간 활동에 제한을 가하는 것이므로 과학적인 인과성이 명확하지 않으면 규제대상으로부터 반발이 발생된다. 그러므로 규제를 필요로 하는 환경정책 일수록 과학적으로 정확한 사실과 공학적으로 합리적인 근거가 필요하다. 과학적이고 합리적인 환경정책이란 정책의 수행에 따른 성과에 대한 정확한 예측을 필요로 한다. 만약 정책에 따른 성과의 예측에 의혹이 생기면 정책 수행의 추진력이 약해진다. 정책 수립과 수행에 따른 성과 예측을 위해서는 모델이 필요한 경우가 많다. 모델은 수학적 모델, 물리적 모델, 경험적 모델, 수치모델 등 각기 서로 다른 성격의 모델들이 있지만 복잡한 자연현상을 축소 또는 단순화하여 미래를 예측하는 것이므로 어떤 모델을 사용하더라도 오차가 발생한다. 모델의 예측결과를 논의할 때 흔히 GARBAGE

IN GARBAGE OUT 이라는 용어를 사용한다. 모델에 입력하는 기초자료가 정확하지 않거나 합당하지 않으면 당연히 틀린 결과가 도출된다는 의미이다. 또한 모델은 복잡한 자연현상에 영향을 미치는 모든 영향인자들을 다 고려하지 못하므로 가장 큰 영향을 미치는 몇 가지 인자들만으로 미래 결과를 예측하므로 비록 최대, 최선의 자료를 입력한다 하더라도 모델 자체의 불완전성으로 인하여 예측결과에 오차가 발생한다. 그러므로 모델을 통한 예측결과를 현재의 상황과 합치하도록 보정하는 과정(Calibration)이 필요하고, 보정작업을 거친 모델로 범용성을 검증하는 작업(Verification)을 다시 거쳐야 한다.

그러므로 환경정책으로 인한 규제가 합리적이고, 규제의 시행에 의하여 기대하던 성과를 달성하려면 예측 모델에 입력하는 기초자료가 충분하고 신뢰성 있어야 하며, 모델 자체도 지속적으로 보완되고 검증되어야 한다. 물론 국립환경과학원, 각 지방 환경청과 유역환경청, 기상청 및 산하기관 등에서 꾸준히 기초자료들을 수집하고 모델들을 보정하는 일들을 하고 있다고는 하지만 우리나라에서는 아직도 기초자료의 수집과 모델의 개발과 관리를 위한 예산의 배정이 미흡하다는 학계의 중론이다. 우리나라의 경제가 수출에 의존하는 바가 크므로, 차세대 먹거리와 국가발전 동력을 위한 기술의 개발이 당연히 중요하지만 이제는 기초자료의 수집과 예측모델의 개선도 중요하게 생각하여야 할 때이다. 환경정책의 수행 결과가 예측한 바에 어긋났을 때 환경오염의 피해는 그 후로 수 십 년간 국민들에게 고통을 주고, 많은 예산과 노력을 요구하기 때문이다. 더불어 환경정책의 미래예측이 타당하고 이에 따른 합리적인 규제가 시행될 때, 개발되는 기술의 효용성도 높아지고, 환경산업의 시장개척이 추진력을 얻게 된다.

(3) 정책의 일관성 및 지속성

환경정책은 지속적이고 일관성이 있어야 한다. 예를 들어보자. 호수에 조금씩 녹조가 비치더니 어느 해에 보니 녹조가 번성했다고 하자. 조사해보니 호수에 하수, 폐수, 오수 등이 흘러들어서 부지불식간에 호수에서 인의 농도가 0.05mg/L가 되었다. 인은 녹조의 먹거리가 되므로 강이나 호수에서 인의 농도가 0.02mg/L를 초과하면 녹조의 발생조건이 된다. 녹조를 방제하기 위하여 영양염류인 인의 농도를 낮추기로 했다고 하자. 우선 호수 주변의 하수처리장에 인 제거 장치를 설치하여야 한다. 다음으로 식당이나 숙박시설이 인제거가 가능한 하수처리장치를 설치하도록 하여야 하고, 관련부서는 수시로 점검하여 만약 이를 어길 시에는 과태료 혹은 영업정지 처분을 해야 한다. 또 농토나 휴양객들이 버린 쓰레기로부터 유입되는 유기물과 인 성분을 감축시키기 위해 특단의 조치를 강구하여야 한다. 이러한 규제를 하였다고 해도 호수가 클수록 수질은 단기간에 좋아지지 않는다. 한 10년쯤 주민들의 불편을 설득하고, 많은 예산을 투자했음에도 여전히 녹조가 번성한다면 당연히 왜 많은 규제와 예산과 시간을 투자했는데 나아지는 것이 없느냐는 질문이 나온다. 정책이 잘못되어 엉뚱한 불편과 예산, 시간을 낭비한 것이라는 질책을 하는 목소리도 나온다. 그러나 이런 현상은 당연하다고 할 수 있다. 조치의 강도와 상황에 따라 다르겠지만 한 10년 규제하고 예산을 투입하고 보니 증가하던 호수의 인 농도가 더 이상 높아지지 않았고, 시간이 갈수록 점차 낮아져서 0.025mg/L 가 되었다. 분명히 인의 농도는 증가추세에서 감소추세로 전환되어 예전의 농도의 반이 되었다. 그러나 여전히 인의 농도가 녹조를 번성하게 하는 농도인 0.02mg/L를 초과하기 때문에 녹조 번성현상은 여전히 나타나게 되는 것이다. 녹조 감소 혹은 녹조 박멸이라는 가시적인 성과를 얻으려면 좀 더 지속적으로 일관되게 정책을 수행하여 인 농도가 0.02mg/L 이하가 되도록 하여야 한다. 만약 10년씩 정책을 수행했는데도 차도가 없다고 하여 포기하면 그동안의 노력은 모두 허사가 된다. 정말 허망한 일이다. 녹조를 예로 들었지만 많은 경우가 이와 유사하다. 그러므로 환경정책은 정기적인 점검과 보완을 할지 일정 효과를

언을 때까지 지속적이고도 일관되게 수행되어야 한다. 환경정책의 일관성과 지속성이 없으면 산업육성과 기술개발도 결코 성과를 얻을 수 없다.

(4) 미발생 미래상황에 대한 대비

자연은 포용력이 크다. 당연히 오염물질이 조금 흘러든다고 해서 별다른 변화를 보이지 않는다. 그러나 오랜 기간 동안 부지불식 간에 계속되는 오염물질의 축적에는 결국은 이상 현상을 나타내게 된다. 문제를 인식하고 나서도 사람들이 문제해결을 위한 행동에 나서기까지는 많은 시간이 걸린다. 지금까지 하던 편한 습관과 행동을 바꾸고 멈추어야 할 뿐 아니라 방제와 개선을 위한 노력을 해야 하는데 여기에는 규제를 위한 법령의 제정, 행정조치 및 개선을 위한 예산이 투입되어야 한다. 법령의 제정이나 행정조치를 수립하려면 인과성과 성과를 검증하여야 하기 때문에 많은 시간이 걸린다. 당연히 법령의 제정과 행정조치로 인하여 불편을 겪거나 경제적으로 손해를 보는 사람들이 나타나기 때문에 더욱 쉽지 않다. 가까스로 법적으로, 행정적으로 준비가 된다고 해도 이를 수행하기 위한 예산과 필요한 기술의 자원이 적절하지 않으면 성과를 내기 어렵다. 특히 환경에 대한 투자는 우리 삶의 질을 향상시키기 위한 것이며, 생존을 위하여 반드시 필요한 것이지만 인공지능이나 가상현실 등과 같이 화려하고 가시적인 성과를 곧 만들어내는 것이 아니어서 예산 배정과 기술개발의 필요성은 장기간의 논란과 설득을 요구한다. 이래저래 정말 재앙과 같은 사건이 벌어지기 전까지는 우선순위에 밀려서 시간만 보내는 경우가 대부분이다. 자연은 포용력이 큰 만큼 이상 현상이 나타나서 인간이 문제를 인식할 지경이 되면 이미 엄청난 양의 오염이 축적된 것이어서 오염된 자연을 원상태로 되돌릴 가망은 거의 없게 된다.

좋은 환경정책은 발생하지 않았으나 장래 발생할 것으로 우려되는 상황에 대한 대비, 즉 사전예방적 정책이 수행되어야 한다. 그러므로 환경연구를 통하여 미래 예측을 가능한 기술과 발생되지 않았지만 발생할 것으로 예상되는 문제를 해결하기 위한 기술을 개발하는 것도 환경정책의 일부이어야 한다.

7. 결론

환경기술 개발과 환경산업육성을 위한 범정부적 정책의 현황을 살펴보고, 환경산업 육성을 위하여 필요하다고 생각되지만 정부 정책에 언급되지 않은 사항들을 제안하여 보았다. 또한 환경정책은 환경기술 개발과 환경산업 육성에 절대적인 영향을 미치므로 환경정책이 향해야 할 기본적인 원칙 몇 가지를 제안하였다. 환경은 우리가 살아가는 터전으로서, 이를 보전하고 개선하기 위한 환경기술 개발과 환경산업의 육성은 기후변화의 시대를 맞아 우리 인류에게 더 없이 중요한 과제이다. 정부의 적합한 인식과 지속적인 노력이 있어야 할 것이다.

● 참고문헌

- 환경백서, 환경부, 2016
- 제3차 환경기술 및 환경산업 육성계획(안), 2015 시행계획, 환경부, 2015
- 2014년 기준 환경산업통계조사보고서, 환경부, 환경공단, 2015
- www.pps.go.kr 조달청 홈페이지
- www.better.go.kr 규제개혁 정보포털

현오석
前 경제부총리 초청,
제28회 KISTEP
아카데미 개최

한국과학기술기획평가원(KISTEP)은 7월 21일(목) 양재동 KISTEP 강당에서 현오석 前 경제부총리 (現 국립외교원 석좌교수)를 초청하여 제28회 KISTEP 아카데미를 개최했다.



‘글로벌 경제 환경 변화와 우리 경제의 대응’을 주제로 진행된 강연에서 현오석 前 경제부총리는 국내외 경제 환경의 변화와 대외 불확실성이 우리 경제에 미치는 영향을 설명하고 이러한 세계경제 흐름 속에서 우리 경제의 향후 과제와 대응 전략에 대해서 발표했다.

현 前 부총리는 “세계 경제가 최근 4년간 3%대의 저성장을 겪고 있는 것은 성장 모멘텀 약화로 인한 구조적인 현상이며, 특히 중국 등 신흥국의 경기부진과 선진국의 성장세 약화가 세계경제 회복을 제약하는 주요 요인이다”고 지적했다.

또한 “한국경제는 올해 4C(China: 중국의 경기둔화, Currency: 환율갈등, Conflicts: 지정학적 위험, Contraction: 통화정책) 위험에 직면하고 있으며, 경제회복을 위해서는 ▲4대 부문 개혁을 통한 성장 장애요인 제거 ▲민간 부문의 경제활력 제고 ▲서비스 산업 발전 ▲창조경제 구현을 통한 성장동력 축진이 중요하다”고 강조했다.

현오석 前 부총리는 서울대학교 경영학과를 졸업하고, 펜실베이니아대학교에서 경제학 박사 학위를 취득했다. 대통령 비서실 경제비서관, 재정경제부 국장, 한국 무역협회 국제무역연구원 원장 등 경제계 요직을 역임했으며, 한국개발연구원 제13대 원장을 거쳐 2013년 3월부터 2014년 7월까지 기획재정부 장관 겸 경제부총리로 재직했다.

미래 신성장 지원체계 구축을 위한 업무협약 체결

한국과학기술기획평가원(KISTEP)은 46개의 정부 산하 연구기관 및 민간 협회·단체, 9개 정책금융기관 등이 참여하는 '미래 신성장 지원체계 구축을 위한 업무협약'을 6월 27일(월), 여의도 중소기업중앙회에서 체결했다.



이번 업무협약을 통해 과거 제조업 중심이었던 정책금융이 비제조·서비스업, ICT·융합산업 등에도 공급될 수 있도록 기관 간의 협업체계를 구축할 수 있게 됐다.

이를 위해 향후 55개 기관은 ▲미래신성장 분야 지원대상 선정을 위한 '신성장 공동기준' 공유 ▲미래신성장 분야의 산업, 품목, 기술 등 발굴 및 추천 ▲미래신성장 분야의 R&D, 사업화 등에 대한 연계 지원 ▲미래신성장 분야에 대한 정보 상호교류 등을 협력할 예정이다.

특히 9개 정책기관이 참여한 '신성장 정책금융센터'에서 마련 중인 '신성장 지원을 위한 공동기준'을 기관 간 상호 공유하여 신성장 육성을 위한 정책금융이 적재적소에 지원되는 효율적인 협업체계가 구축될 것으로 기대된다.

박영아 원장은 “최근 세계경제 침체에 따른 주력 산업의 경쟁력 약화에도 불구하고 이를 대체할 신산업의 발굴과 성장이 지체되고 있다”며 “이번 업무협약이 관계기관 간에 유기적인 협업체계를 마련하고, 신성장산업 지원체계를 공고히 함으로써 국가 경제의 재도약을 이끄는 원동력이 되길 기대한다”고 밝혔다.

참여기관

- 정부: 금융위, 미래부, 산업부, 복지부, 문화부, 국토부, 중기청, 특허청, 농림부, 총리실, 환경부(11개 부처 46개 기관)
- 정책금융기관: 산업은행, 기업은행, 수출입은행, 신용보증기금, 기술보증기금, 신용정보원, 중소기업진흥공단, 무역보험공사, 농림수산업자신용보증기금(9개 금융기관)

'3D 프린팅과 산업혁명 4.0'... 제48회 KISTEP 수요포럼 개최

한국과학기술기획평가원(KISTEP)은 7월 13일(수), 양재동 KISTEP 국제회의실에서 '3D 프린팅과 산업혁명 4.0'을 주제로 제48회 KISTEP 수요포럼을 개최했다.



이번 포럼은 다가올 제4차 산업혁명 시대를 대비해 생산과 제조, 소비 전반에 큰 변화를 불러일으킬 핵심 기술인 3D 프린팅 기술에 대한 이해와 향후 동향을 공유하고자 진행됐다.

최성권 교수는 “산업혁명 4.0은 다양한 기술과 융합에 의해 전개될 것”이라며 “특히 무금형 시대에 3D 프린팅 산업의 보급은 커스터마이제이션, 즉 맞춤형 상품과 함께 다른 소비, 다른 시장을 낳을 것”이라고 전망했다. 따라서 “3D 프린팅 산업은 기존 것을 더 잘 만들기 위한 기술의 방향이 아니라, 만들기 어려운 것을 만드는 장점을 살려야 신직업군 창출이나 플랫폼 비즈니스에 효과적으로 기능할 수 있다”고 밝혔다.

지정 토론에서 이인환 충북대 교수는 “현재 상용화된 3D 프린팅 기술은 재료의 물성과 종류 등이 한정적이기 때문에 제품 제작에 바로 적용하기는 제약이 많다”며 “미국이나 유럽의 기존 기술을 모방하거나 일부 개선시키는 현재 수준의 3D 프린팅 기술을 넘어서, 획기적 기술개발과 발전전략 도입이 필요하다”고 했다.

조인행 LG CNS 상무는 “3D 프린팅이 사실 20여 년 전부터 Rapid Prototyping이라는 이름으로 존재했던 것”이라며 “늘 재료 문제만 해결되면 된다는 단서를 달고 있지만 재료공학은 발전이 더딘 영역이기 때문에 현재 금형을 대체하는 건 수십 년 안에 불가능하다고 본다”고 말했다. 이어, 조 상무는 “막연한 환상을 갖기 보다는 필요한 곳을 찾아 적용하고, 정부의 지원도 사업성 있는 영역을 판단해 이뤄져야 한다”고 덧붙였다.

마지막으로 이낙규 한국생산기술연구원 단장은 “선진국 대비 후발주자로서 3D 프린팅을 우리 강점인 ICT와 접목해 신시장을 창출하는 게 좋다”고 설명하며 “국내 3D 프린팅 산업이 발전하기 위해서는 장비와 소재의 국산화, 정부의 적극적인 투자, 산업적용이 필수적”이라고 말했다.

박영아 원장, 과총 창립 50주년 기념 심포지엄에서 발표 ‘혁신의 파도를 넘어 미래로’

한국과학기술기획평가원(KISTEP) 박영아 원장이 지난 7월 13일(수) 코엑스에서 열린 한국과학기술단체 총연합회 창립 50주년 기념 정책심포지엄에 참석해, ‘혁신의 파도를 넘어 미래로’를 주제로 정책발표를 했다.



이번 발표에서 박영아 원장은 시대별 과학기술의 성과를 언급하며 지난 50년의 과학기술 발전을 되짚어보고, 현재 직면하고 있는 대내외적인 경제·사회적 어려움 극복을 위한 3가지 혁신시스템의 방향성을 제시했다.

박영아 원장은 발표에서 먼저 미래 혁신을 선도하기 위해 탈관료적인 거버넌스 구축, 기존 국가연구개발사업과 제도에 대한 관리·감시·통제 중심의 수직적 거버넌스 최소화, 업무별 전문기관 이양을 통한 보다 수평적인 개방형 조직으로의 변화 필요성을 설명했다.

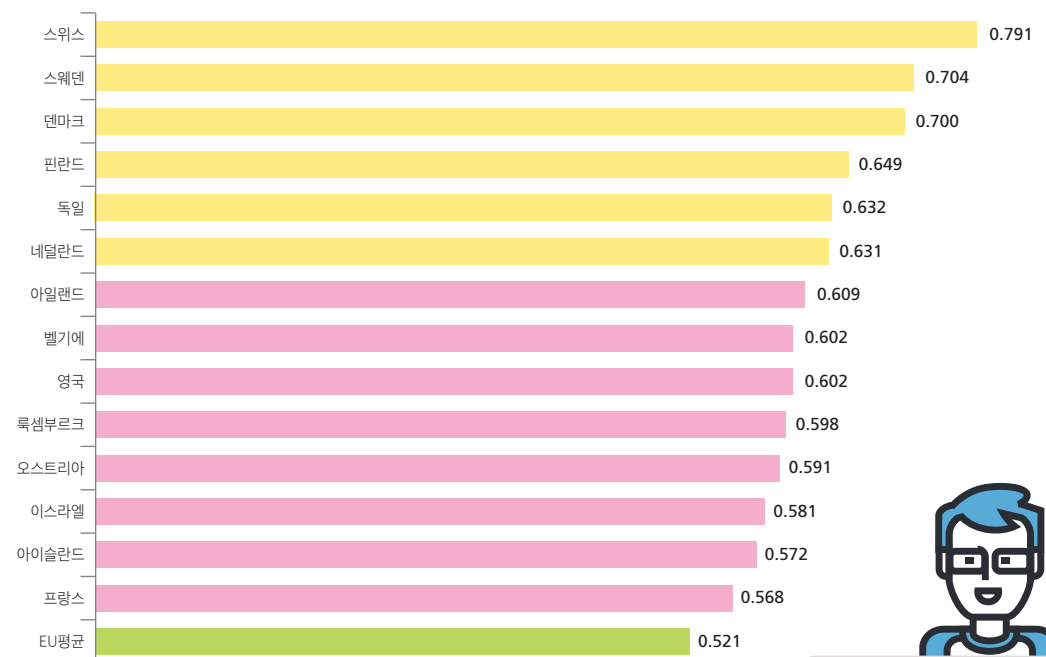
또한 미래교육, 창의적 인재양성에 대한 관심과 중요성이 고조되고 있는 현상을 언급하며 12학년 통합형 학교, 무학년제 등 개인의 창의성과 지능에 맞춰 교육할 수 있는 미래형 학제 개편, 수학과 논리 기반의 코딩 교육 등을 논의할 수 있는 대통령 직속 국가교육혁신위원회(가칭) 설치를 제안했다.

마지막으로 박 원장은 제3의 자본이라 일컫는 신뢰, 즉 사회적 자본 확충을 강조했다. 이를 위해서 "공동체의 이해와 공유를 바탕으로 목표를 결정하고, 관리 중심의 제도가 아닌 합목적성을 위한 제도가 시행되어야 한다"고 밝혔다.

유럽 국가의 혁신성과 분석

▶ 유럽연합 집행위원회 기업산업총국에서 매년 발표하는 『European Innovation Scoreboard(EIS)』의 주요 내용을 분석한 KISTEP 통계 그래프(08호)에서 발췌

종합혁신지수(Summary Innovation Index) 분석



※ 막대 그래프 색상: 국가 4대 그룹 분류



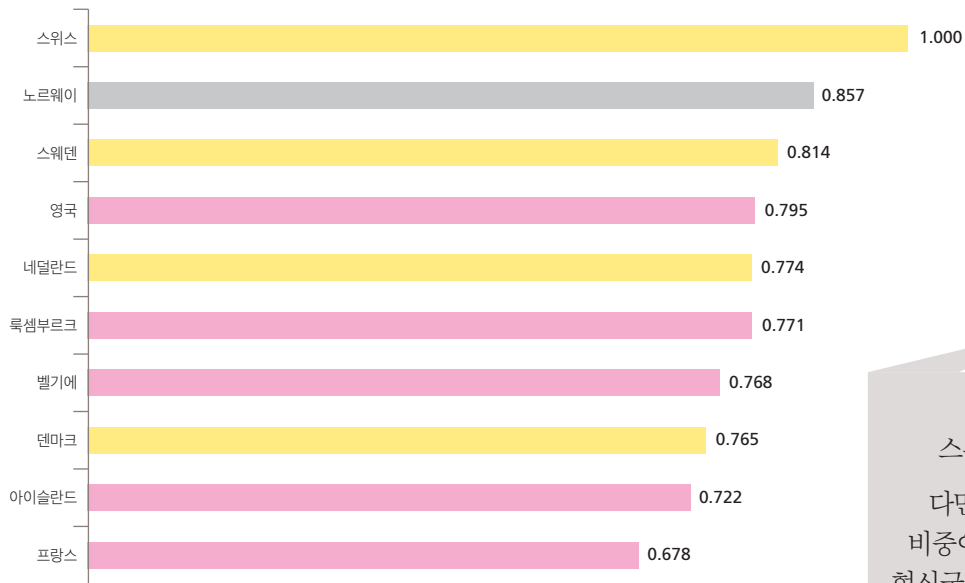
스위스(1위), 스웨덴(2위), 덴마크(3)는 최근 5년간 변동 없어요!

국가 4대 그룹 분류

• 각 국가의 종합혁신지수와 EU 회원국 평균값의 상대적 비교를 통해 4개 그룹으로 분류

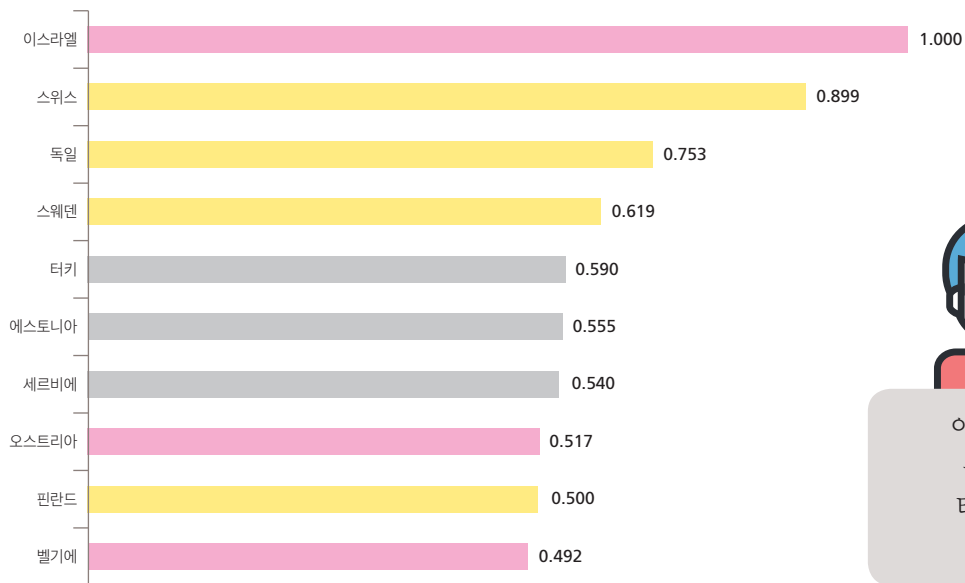
선진 혁신국 (Innovation leaders)	혁신지수가 EU 평균의 120% 이상인 국가	일반 혁신국 (Moderate Innovations)	혁신지수가 EU 평균의 50% 이상 90% 미만인 국가
추가 혁신국 (Strong Innovations*)	혁신지수가 EU 평균의 90% 이상 120% 미만인 국가 *전년대비 영문명칭 변경, 원문의 정의는 전년도와 동일하여 국문명 유지	후발 혁신국 (Modest Innovations)	혁신지수가 EU 평균의 50% 미만인 국가

부문별 혁신성과 분석 - 연구시스템 개방성, 우수성, 탁월성



이 부분에서는 역시
스위스, 노르웨이, 스웨덴이 Top!
다만, 독일은 비EU 박사 과정 학생
비중이 EU 평균의 42% 수준으로 선도
혁신국임에도 이 부분의 혁신지수가 저조

부문별 혁신성과 분석 - 기업투자 부문



이스라엘, 스위스가 가장 높고,
독일, 스웨덴은 상위권 유지,
터키는 일반 혁신 국가이지만
상위권에 있어요!