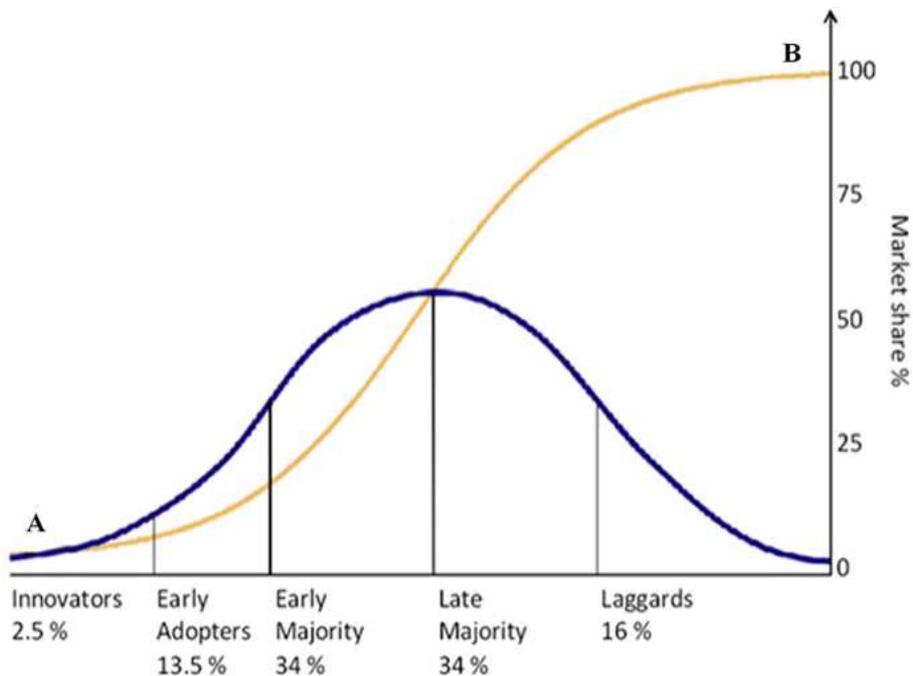


## 1. 기술추세 분석

기술추세 분석에서는 사업계획서가 제시한 분야와 사업기간을 기준으로, 연구개발사업의 착수와 기술개발 및 결과물의 활용 시점이 적절한지에 대한 조사를 수행한다. 여기에는 조사 대상 기술의 발전단계가 대형 연구개발사업으로 추진되기에 적절한 시점인지, 시설물 구축이나 체계 개발 시 사업계획서가 제시한 기술적 목표 달성을 위한 제반 여건이 확보되어 있는지, 사회적 여건을 감안할 때 결과물의 활용이 예상되며 따라서 대규모 공공부문 자원 투입에 대한 사회적 설득력을 확보할 수 있는지 등에 대한 분석이 포함된다.

기술추세 분석에서는 판단을 위한 절대적인 기준이 존재한다고 보기 어려우므로 모범사례를 참고하여 체계화하는 것이 일반적이다. 기존의 예비타당성조사에서는 기술확산모형<sup>1)</sup>의 S-곡선에서 해당 사업의 위상을 추정하는 방법이 종종 이용되었다. 이는 이를테면, [그림 2-2]에서 S-곡선상의 위치가 (A로 표시된 S-곡선의 태동기 초엽이나, B로 표시된 S-곡선의 후기단계와 같이) 대규모 연구개발투자를 정당화하기 어려운 경우, 대규모 신규 연구개발투자에 대하여 유보적인 입장을 제시하는 식이다.



[그림 2-1] 기술확산모형

1) Rogers(2003).

이러한 판단의 근거는 다음과 같다.

- 중앙행정기관은 기존에 수행되어 온 국가연구개발사업을 통해 예비타당성조사의 대상인 대형 사업이 아닌 소규모의 시범적인 신규 투자를 추진할 수 있음
- 과도한 초기단계나 후기단계의 투자는 (새로운) 발전기가 도래하기 전까지 어느 정도의 시간을 필요로 하며, 이 기간 동안 투입된 재원은 효율적이지 못한 요소를 포함할 수 있음

기술추세 분석에서는 조사과정에서 수집된 데이터로부터 의사결정에 활용할 수 있는 정보를 추출하기 위해 다양한 방법을 활용하며, 데이터마이닝(data mining)과 전문가 평가(expert judgement)가 대표적이다. 또한, 개발의 대상이 구체적인 경우 기술준비도<sup>2)</sup> 등 다양한 합리적인 의사결정 지원 기법이 활용될 수 있다<sup>3)</sup>.

## 가. 데이터마이닝

데이터마이닝은 기존 데이터 내에 존재하는 경향, 유사점, 패턴을 확인하고 분석하는 것으로, 주로 분류(classification), 클러스터링(clustering), 연관성(associations), 순차적 패턴(sequential patterns)의 네 가지 방법을 이용한다.

분류는 미리 정해진 규칙에 기반을 두고 데이터를 분석하여 해당 데이터를 범주별로 구분하는 것을 의미한다.

클러스터링은 데이터를 논리적 연관성에 따라 그룹화하는 것이다. 서로 다른 개념의 범주로 데이터를 나누는 점에서는 분류와 유사하지만 사전에 정해진 범주가 없다는 점에서 차별화되는 기법이다. 클러스터링 기법은 대량의 복잡한 데이터를 몇 개의 그룹으로 나누어 살펴볼 수 있게 해주므로, 주어진 데이터를 대략적으로 또는 전체적으로 파악할 수 있다는 장점을 지닌다.

연관성 모형에서 연관규칙(association rule)은 “A라면 B이다”<sup>4)</sup>( $A \rightarrow B$ )와 같은 형식으로 표현된다. 연관규칙은 분류나 클러스터링과 같은 그룹화가 아니라, 논리적인 선후관계나 동

---

2) TRL(technology readiness level)에 대해서는 후술함.

3) 본 세부지침의 추세분석은 주요 사례를 중심으로 정리된 권고사항을 예시한 것으로 방법별 적용의 우선순위는 없음.

4) If A, then B

시성 등에 중점을 두므로 접근 관점이 다르다고 할 수 있다.

순차적 패턴 모형에서는 데이터로부터 행위 패턴을 추출하여 경향을 예측하는 데에 주안점을 둔다. 미래의 경향을 예측할 수 있는 규칙들을 추출한다는 점, 그리고 “A라면 B이다”<sup>5)</sup>(A→B)와 같은 형식을 따른다는 점에서 연관성 모형과 유사성이 존재한다고도 할 수 있다. 그러나 연관성 모형은 연관관계에 중점을 두는 반면, 순차적 패턴모형은 순서에 중점을 둔다는 점에서 두 모형은 차별화된다고 할 수 있다.

본 세부지침은 기술추세 분석을 위한 데이터마이닝 방법의 적용 예로서 연구자-연구문헌 포트폴리오 분석, 주제어 네트워크 성숙도 분석 등을 제시하였다.

### (1) 연구자-연구문헌 포트폴리오 분석 : 기술발전단계의 추정

기술혁신의 확산모형에 따르면, 과학기술과 관련된 신규 개념(주제)이 도입되는 태동기에는 극소수의 혁신자(innovator)에 의하여 극소수의 연구개발 결과만이 발표되며, 이어서 초기 채택자(early adopters)나 초기 대다수(early majority)가 이 개념을 수용하기 시작하는 성장기에 들어서면서 관련된 연구개발의 빈도가 대폭 증가하게 된다. 이후에는 후기 대다수(late majority)에게 개념 및 주제가 확산되면서, 연구개발의 건수는 증가하나 속도는 둔화되기 시작한다. 종국적으로는, 일부 지체자(laggards)가 개념을 수용하기 시작하나, 대다수에게는 해당 개념이 진부화되는 성숙기 및 쇠퇴기로 이행하게 된다.



[그림 2-2] 연구자-연구결과 포트폴리오 분석

5) If A, then B. 즉 연관성 모형에서 연관규칙과 기본적으로 동일한 표현이다.

논문이나 특허에 대한 연구자-연구결과 포트폴리오 분석은 기술의 성장을 연구자 수와 연구결과물의 수를 이용하여 시계열적으로 분석하는 방법이다. 연구자-연구결과 포트폴리오 분석은 두 가지의 가정을 내포한다. 첫 번째는 연구자가 연구개발의 생산자이자 새로운 연구개발 결과물의 수용자라는 가정이며, 두 번째는 연구결과는 산출물인 동시에 새로운 기술의 수용을 나타내는 지표라는 것이다. 통상 대다수의 연구개발 활동은 이러한 가정이 성립<sup>6)</sup>되는 경우라고 간주된다. 이때, 연구개발 문헌 수와 연구자 수의 시계열적 관계를 활용하면, 기술발전단계를 태동기, 성장기, 성숙기, 쇠퇴기, 부활기로 구분하는 것이 가능해진다.

다만 연구자-연구결과 포트폴리오 분석은 기술수명주기상의 성숙기나 쇠퇴기에 해당되는지의 여부를 판단하기는 유리하나, 태동기와 성장기의 구분이 어려운 문제점이 존재한다. 특히, 태동기의 경우, 판정 자체가 명확하기 어려운 특성이 있을 뿐 아니라, 조사 대상 기술이 태동기로 판정된다고 하더라도, 대규모 투자시점으로 적절한 시점인지에 대한 판단은 태동기 여부에 대한 판정과 별개의 사안으로 까다로운 쟁점이 될 수 있어 주의를 요한다.

## (2) 주제어 네트워크 성숙도 분석 : 기술의 초기단계 분석

전술한 바와 같이 연구자-연구문헌 포트폴리오 분석은 기술 발전 이후 정체 시점의 파악에 적합한 방법이나, 기술의 초기 발전단계의 구분은 어려우며 따라서 정부의 대규모 투자 적절 시점의 판단에는 제한적인 정보만을 제공하는 데에 머문다는 한계가 존재한다. 그러나 이는 비단 연구자-연구문헌 포트폴리오 분석만의 문제는 아니다. 사실 기술발전의 초기 단계에서 대형투자가 필요한 시점을 정확하게 포착할 수 있는 방법은 본 지침의 작성 시점에서 알려진 바 없기 때문이다.

주제어 네트워크 성숙도 분석은 기술발전 초기단계에서 참여하는 연구자 숫자와 논의되는 주제의 범위가 제한된 수준이라는 점에 착안한 분석방법이다.<sup>7)</sup> 이 방법은 기술발전 초기에 투자과잉이 우려되는 경우에도 이를 점검하기 위해 활용될 수 있으며, 아래와 같은 상황에서 이 방법의 적용 여부를 결정할 수 있다.

- 특정 기술분야를 지원하기 위한 목적으로 총사업비 500억 원 이상의 대규모 연구개발 투자가 이루어질 예정이나, 투자 예산 과잉이 우려되는 경우

---

6) 연구개발사업의 주요 성과지표를 논문이나 특허로 구성하는 경우가 이러한 상황에 해당함.

7) 예를 들어, Yoon and Park (2004); 안상진 등(2013)을 참조.

- 해당 연구개발투자가 특정 분야에 집중되어 다양한 주제에 대한 기초연구의 활성화 저해 우려가 존재하는 경우
- 구체적인 개발대상이 존재하지 않는 특정 분야의 기초 또는 응용연구의 경우

과학기술 발전사를 살펴보면, 기술이 본격적으로 성장하기에 앞서 오랜 기간 동안 도입기가 유지되는 사례가 다수 발견되는데, 상온 핵융합기술<sup>8)</sup>이나 기상조절기술<sup>9)</sup>을 대표적인 사례로 꼽을 수 있다. 예컨대 20년 이상 도입기가 지속되는 기술분야에 대한 대규모 투자가 이루어진다면 국가적 관점에서 보았을 때 다른 중요한 투자기회의 상실을 의미할 수 있다. 따라서 연구개발부문 예비타당성조사에서는 이렇듯 도입기에 머물러 있어 지속적으로 시간과 재원이 소요됨에도 가시적인 성과의 도출을 단기적으로 기대하기 어려운 연구개발 분야에 대해서는 대형 투자를 지양하는 것이 바람직하다고 본다. 이는 해당 연구개발 투자를 지양해야 한다는 의미가 아니며, 해당 연구주제가 다양해지고 충분히 성숙될 때까지 대규모 투자를 유보해야 한다는 의미<sup>10)</sup>임에 유의할 필요가 있다.

주제어 네트워크 성숙도 분석은 계량화된 과학기술문헌정보와 현대 네트워크 과학의 이론을 결합한 것이다. 현대 네트워크 과학의 발전과 결합되어 계량과학기술문헌정보학에서도 다양한 관점의 연구가 진행되어 왔다. 현대 네트워크 과학에서는 네트워크를 세 가지로 구분하여 해석하는데, 절점(node)의 수는 고정된 상태로 연결선 수(link)가 무작위로 증가<sup>11)</sup>하는 경우, 절점의 수와 연결선 수가 고정된 상태에서 연결선 수의 재연결 확률이 변화<sup>12)</sup>하는 경우, 절점의 수와 연결선 수가 모두 증가하는 경우<sup>13)</sup>가 있다. 이 세 가지 네트워크 중에서 절점의 수와 연결선 수가 모두 증가하며 점점 성숙되는 네트워크는 연결선 수의 분포가 균등하지 않고 일부 절점이 연결선 수를 독식하는 형태로 나타난다. 이런 네트워크의 연결선 수를 히스토그램으로 나타내면 멱함수 형태로 표현되며 오른쪽으로 꼬리가 길게 늘어난 형태(fat-tail inhomogeneous) 연결구조<sup>14)</sup>로 나타난다. 이런 형태의 네트워크 구조는 다른 네트워크에 비하여 견고하고 안정하여, 외부환경 변화에 대한 적응성이 높은 네트워

8) 1989년 처음 개념이 도입된 이후, 최근까지 뚜렷한 발전양상이 인지되지 않고 있음.

9) 1946년 처음 개념이 제안되었으며, 과학기술적 개연성이 존재하지만 현재 개념을 정립해 가는 단계로 그 실효성이나 진위여부에 대한 논란이 존재함.

10) 즉, 이러한 논리는 세부사업 하위의 세부과제 등 세부활동 단위에는 적용되지 않음.

11) 정적 무작위 네트워크라고 부르며 대표적인 모형으로 Erdős-Rényi 모형(Bollobás, 2001)이 있음.

12) 좁은 세계 네트워크(small-world network)라고 부르며 대표적인 모형으로 Watts-Strogatz 모형이 있음.

13) 성장 네트워크로 부르며, Barabasi-Albert(2002) 모형으로 설명되는 척도 없는 네트워크(scale-free network)가 대표적인 모형.

14) Albert & Barabasi(2002).

크 구조로 알려져 있다<sup>15)</sup>.

현대에서 나타나는 대부분의 네트워크는 절점의 수와 연결선 수가 모두 증가하는 네트워크로서 대부분 척도 없는 네트워크(scale-free network)에 포함되어 있다. 특정기술에 대한 네트워크가 척도 없는 네트워크라는 것은 해당 분야의 연구를 주도하는 그룹(네트워크 상에서 허브로 표현)이 존재한다는 의미이므로 척도 없는 네트워크로 진입하는 시점을 분석한다면 기술이 태동기에서 성장기로 넘어가는 시기에 대한 정보를 얻을 수 있다.

계량과학기술문헌정보학을 활용한 현대 네트워크 연구에서는 절점을 연구자<sup>16)</sup>, 연구문헌<sup>17)</sup>, 주제어<sup>18)</sup>로, 연결선은 각각 공동연구 여부, 인용관계 발생, 동일 키워드 등장(동시발생)으로 규정한다. 이와 관련된 연구는 다음을 기본 가정으로 한다.

- 기초연구에 의한 지식의 증가는 논문이나 특허 등의 문헌정보에 의하여 측정될 수 있음
- 주제어와 그 관계는 새로 창출되는 지식을 표현함
- 연구자와 그 관계는 연구주체의 사회적, 행태적 속성을 표현함
- 연구문헌 간의 인용관계는 지식확산(knowledge spillover)을 표현함
- 계량과학기술문헌정보는 현대 네트워크 과학에 의하여 해석될 수 있음

예비타당성조사는 향후 발생할 사건에 대하여 사전에 추정된 정보를 포함해야 하므로, 미래예측을 위해서 최근 동향에 대한 정보를 최대한 반영해야 한다. 주제어 동시발생 네트워크<sup>19)</sup>는 연구문헌의 인용관계에 비하여 통계적인 모수인 절점의 수가 많고, 인용으로 인한 시간지연이 발생하지 않아 상대적으로 최근 경향을 반영하기 적합하다. 따라서 연구주체의 성숙도를 가늠하기 위해서는 연구문헌의 주제어를 절점으로 동일 키워드 등장을 링크로 하는 네트워크를 분석하는 것이 바람직하다. 주제어의 동시발생 네트워크를 분석하기 위한 절차는 [그림 2-4]로 요약할 수 있다.

---

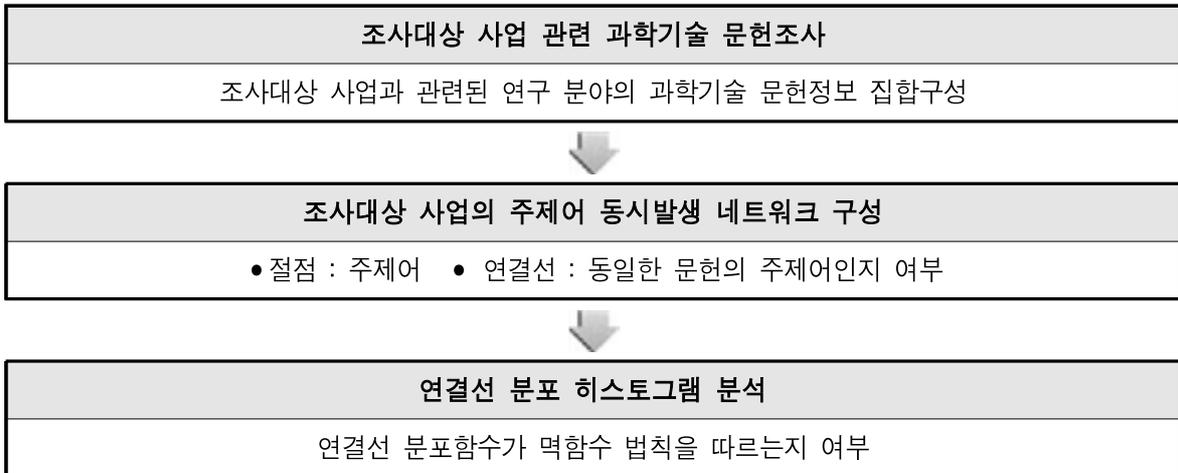
15) Albert et al.(2000).

16) Newman(2001).

17) Lehmann et al.(2003).

18) 한국과학기술기획평가원(2010c).

19) 연구문헌의 인용관계는 연구 주제어의 동시발생에 비하여 그 수가 적어 통계적인 의미를 갖는 충분한 자료규모가 축적되기 위한 시간이 필요하여 최근 경향을 반영하는 데에 한계가 존재함.



[그림 2-3] 주제어 동시발생 네트워크 분석절차

## 나. 전문가 평가

전문가 평가(expert judgement)는 과학기술분야에서 선호되는 평가방법<sup>20)</sup>으로, 실제 타당성 검토의 방법으로 비교적 현실적이면서도 상대적으로 적용이 용이한 방법 중 하나이다. 다만 최근 과학기술정책의 의사결정과정에서는 보다 세밀한 분석에 대한 수요가 증가하고 있으며, 다양한 방법론이 전문가 평가를 보완하기 위한 목적으로 사용되는 추세<sup>21)</sup>이다. 이는 전문가 평가의 정성적인 특성과 더불어, 선정된 전문가, 평가질문 및 기준, 이해충돌 등에 의해 결과가 왜곡될 수 있는 방법적 한계 때문이다. 그러므로 예비타당성조사에서 전문가 평가를 활용할 때에는 반드시 이러한 한계점에 대한 통제가 수반되어야 한다.

전문가 평가의 대상은 크게 과학기술적 이론 및 원리에 대한 진위 여부와, 해당 분야에 대한 견해 또는 의견으로 구분될 수 있다. 연구개발부문 예비타당성조사의 기술추세 분석에서는 이중 과학기술적 이론 및 원리의 진위 여부에 대한 평가를 대상으로 함을 원칙으로 할 것을 권고한다. 이는 전문가 평가가 갖는 한계점을 극복하고 예비타당성조사의 객관성 및 신뢰성을 확보하기 위한 최소한의 장치이다.

즉, 예비타당성조사에서의 전문가 평가의 대상은, 명제의 참과 거짓을 구분하거나, 명제의 형태로 진술되거나, 객관적으로 표준화된 척도에 의하여 측정되는 것과 같이 사실을 진술하는 것이어야 한다. 대상사업의 기술적 활동이 과학법칙을 위배하는지의 여부라든지, 대상사업이 추진되기 위하여 선결되어야 하는 과학기술적 이슈의 존재 여부 등에 대한 평가

20) Committee on Science, Engineering, and Public Policy, The National Academies(1999).

21) Office of Science and Technology Policy(2008).

가 이러한 예에 해당된다. 전문가 평가는 가급적 입수 가능한 자료를 통하여 실증되는 것이 바람직하나, 자료입수가 용이하지 않은 경우 전문가에 의한 논증으로 갈음될 수 있다.

전문가 평가에 가치판단이 개입되는 경우, 전문가의 선정, 전문가 개인의 성향, 이해관계 등에 의한 결과 왜곡을 통제하기 어려우므로 평가의 객관성이나 신뢰성을 담보하기 어렵다. 부득이하게 전문가의 가치판단이나 견해를 인용할 때에는, 예비타당성조사를 위하여 수행된 전문가 평가의 한계점을 반드시 명시해야 한다. 예를 들어 평가에 참여한 전문가 중 사업의 잠재적 수혜자 비율과 이해관계에 있는 평가자의 비율은 전문가 선정에 따른 결과 왜곡의 가능성을 시사할 수 있다. 유사한 맥락에서, 조사대상 사업과 관련된 국내전문가 대비 전문가 평가에 참여한 국내전문가의 비율은 전문가 평가결과에서 이해관계의 개입여부에 대한 정보를 간접적으로 제시한다고 볼 수 있다.

#### 다. 기술준비도 분석

기술준비도(TRL: technology readiness level)는 특정 기술의 성숙도를 평가하거나, 서로 다른 유형의 기술 성숙도를 일관되게 비교할 수 있도록 도와주는 체계적인 측정수단으로 정의<sup>22)</sup>된다. 기술준비도는 1989년 미 항공우주국(NASA)에서 최초로 정의한 후, 현실적인 사항(시험평가, 인증 및 양산 등)을 반영하여 현재에는 9단계로 분화되어 사용되고 있다. 특히 1999년 미국 회계감사원(GAO)<sup>23)</sup>은 국방부 사업에서 성숙되지 못한 기술을 적용하는 경우 총괄적 위험수준이 증가하므로 기술 이전하기 앞서 성숙도를 평가하고 이를 위한 수단으로 미항공우주국의 기술준비도를 사용하라고 권고<sup>24)</sup>한 바 있다. 이후 기술준비도는 체계개발과 같이 산출물이 구체적으로 제시되는 사업의 관리를 위한 모범사례로 활용되고 있다.

기술준비도는 기술개발 착수와 종료 시점에서의 기술적 목표 달성정도를 효과적으로 표현하고 평가하기 위한 도구이다. 현재까지 알려진 기술준비도를 사용하는 대표사례로는 미항공우주국<sup>25)</sup>, 미국 국방부<sup>26)</sup>, 산업자원부의 부품소재기술개발 사업<sup>27)</sup> 등이 있다. 본 세부 지침에서는 기술준비도의 적용을 검토할 필요가 있는 경우, 선행연구사례 및 주의할 사항을 소개함으로써 기술준비도를 활용한 효과적인 예비타당성조사의 수행을 지원한다.

---

22) Makins(1995).

23) Government accountability office.

24) GAO(1999).

25) NASA(2010).

26) DoD(2009).

27) 한국산업기술평가원(2007).

연구개발사업에서 기술준비도가 적용되기 위해서는 아래의 전제사항이 만족되어야 한다.

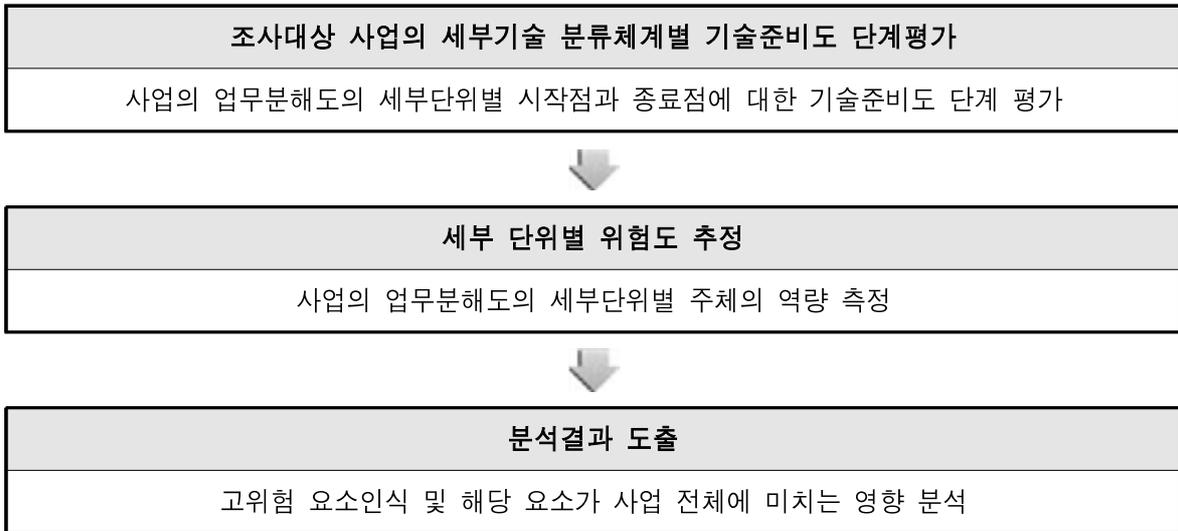
- 사업에는 개발단계의 활동이 포함됨
- 사업의 최종 산출물에 대한 특징이 가능
- 사업 착수를 위한 준비와 목표 달성에 대한 현실성이 주요 쟁점사항<sup>28)</sup>이 됨
- 제조, 제작, 조립이 아닌 지식 창출과 관련된 연구개발활동이 포함됨

이러한 전제사항이 만족되지 않을 경우, 기술준비도 분석결과가 예비타당성조사의 의사결정 시 활용되기 어려울 수 있다. 또한 실제 분석을 위해서는 기술준비도의 판단기준인 시간(when), 판단주체(who), 평가환경(when), 평가대상(what)과 평가방법(how)인 4W1H에 대한 사항이 실무적으로 적용될 수 있어야 한다. 예비타당성조사에서 적용할 수 있는 기술준비도를 정리하여 <표 2-1>에 요약하였다.

<표 2-1> 기술준비도 분석의 4W1H

기술준비 정도 분석의 4W1H	설명
시간적 판단기준(when)	예산의 최초 투입시점, 단계별 평가시점, 종료시점
판단주체(who)	해당분야 전문가
평가환경(when)	문헌조사(기초·응용·개발 단계), 실험실평가(개발 단계), 현장평가(개발 단계)
평가대상(what)	상세 사업계획서에서 제시되고 있는 목표대비 해당 분야의 현재 과학기술 수준/역량
평가방법(how)	계획된 시간 대비 과학기술 수준이 고려된 실제 수행시간의 차이에 따른 가부(可否) 판단

28) 실제 기술준비도는 과학기술 개발계획의 적절성에서 활용될 수도 있으나, 본 지침에서는 과학기술 개발 성공가능성 분석의 특수한 방법으로 소개함.



[그림 2-4] 기술준비도 분석절차

기술준비도 분석은 조사대상 사업의 세부기술 분류체계별 시작점과 종료점의 단계를 확정하고, 세부단위별 연구주체의 역량을 측정하여 해당 기술단계 개발의 준비 상태를 검토한다. 이러한 결과로부터 조사대상 사업의 취약점을 진단하고, 그로 인해 예상되는 영향을 종합하는 순서로 진행된다.

### (1) 대상사업의 기술준비도 단계 평가

기존에 보고된 모든 선행연구는 기술준비도를 9단계로 구분하였으며, 체계개발과 부품소재 간 기술준비도 정의의 상호관계는 한국산업기술평가원(2007)의 선행연구가 보고한 바 있다. 본 세부지침에서는 선행연구와 동일하게 체계개발과 부품소재의 유형구분을 추종하여 기술준비도를 제시하였다. 기술준비도 단계에 따르면 순수기초연구는 기술의 근본적 특성과 관련된 논문연구에 해당하므로 기술준비도 1단계 이전 단계에 해당된다. 이외에 목적기초 및 응용연구는 1단계에서 4단계까지, 개발연구는 3단계에서 6단계까지에 해당된다. 그러므로 실질적인 연구개발활동은 7단계 이전에 종료되며, 개발활동이 포함된 사업화단계를 제품화단계<sup>29)</sup>로 구분하였다. 예비타당성조사에서 기술준비도를 활용하는 경우, 제시된 표를 참고로 하여 단계적인 평가를 수행할 수 있다.

<sup>29)</sup> 연구개발활동은 제품화 단계에서 종료되며, 제품화 단계만이 독립된 경우 연구개발활동으로 간주하지 않음.

<표 2-2> 체계개발과 부품소재개발의 기술준비도 정의 비교

의미	TRL	체계개발	부품소재
응용단계	1	관찰되거나 보고된 기초원리	기초 이론 및 실험
	2	개념기술이나 공인된 응용기술	실용 목적의 아이디어, 특허 등 개념정립
실험단계	3	이론/실험에 의한 핵심기능이나 개념기술의 특성증명	연구실 규모의 기본 성능 검증
	4	실험실 환경에서 구성요소를 조립하여 유효성 확인	연구실 규모의 부품/시스템 성능평가
시작품단계 (개발연구)	5	유사한 환경에서 구성요소를 조립하여 유효성 확인	확정된 부품/시스템의 시작품 제작
	6	유사한 환경에서 시스템 모형이나 서브시스템 시작품 검증	시작품 성능평가
제품화단계	7	실제 환경에서 시스템 시작품 검증	시작품 신뢰성 평가
	8	실제 시스템 완료 및 인증	시제품의 인증 및 표준화
사업화단계	9	성공적인 작동, 양산 및 적용	사업화

<표 2-3> 하드웨어 관련 체계개발의 기술준비도

TRL	정의	세부 내용
1	관찰된 또는 보고된 기초원리	과학적 연구가 응용기술개발로 발전되기 시작함. 과학기술의 근본적 특성에 대한 논문연구.
2	개념기술 또는 공인된 응용기술	개발시작, 기본 원리 탐색 후 실용적 응용·개발 가능. 추론이므로 증명 또는 가정을 뒷받침하는 상세한 해석이 없을 수 있음.
3	이론/실험에 의한 핵심기능이나 개념기술의 특성증명	기술개발 착수. 해석적인 연구 또는 실험이 개별 기술의 이론적 가정에 대한 유효성을 제시함. 통합적이거나 대표적인 사례 없음.
4	실험실 환경에서 구성요소를 조립하여 유효성 확인	개별 기술의 통합. 최종 목표와 비교할 때 다소 떨어지는 성능의 기술. 실험실 환경에서의 시작품 개발 완료.
5	유사한 환경에서 구성요소를 조립하여 유효성 확인	시작품 기술성능의 향상. 기술구성 항목을 합리적, 현실적으로 뒷받침하는 요소기술의 통합으로서, 모사 환경에서 시험완료.
6	유사한 환경에서 시스템모형이나 서브시스템 시작품 검증	주요 성능 평가에 적절한 환경에서의 시작품. 성능 검증의 진일보. 고정밀 실험실 환경 또는 유사 환경에서의 시작품 시험완료.
7	실제 환경에서 시스템 시작품 검증	실제 환경 또는 이와 근접한 환경에서의 시작품, 항공기, 자동차 또는 우주환경과 같은 실제 환경에서 시작품의 성능검증을 함으로써 TRL 6에서 진일보.
8	실제 시스템 완료 및 인증	최종 시제품으로서 기술 검증 완료. 대부분 조건에서 실제 시스템 개발의 완료.
9	성공적인 작동, 양산 및 적용	최종 제품으로써 실제 적용 및 임무수행. 시운전 및 평가.

<표 2-4> 제조기술 관련 체계개발의 기술준비도

TRL	정의	세부 내용
1	관찰된 또는 보고된 기초원리	해당사항 없음
2	개념기술 또는 공인된 응용기술	해당사항 없음
3	이론/실험에 의한 핵심기능이나 개념기술의 특성증명	해당사항 없음
4	실험실 환경에서 구성요소를 조립하여 유효성 확인	신기술이 개발 목표와 유사한 소재, 단순화한 설계사양의 부품을 이용하여, 실험실 수준에서 검증
5	유사한 환경에서 구성요소를 조립하여 유효성 확인	신기술이 개발 목표와 동일한 소재, 동일한 설계사양의 부품을 사용하여 실험실 수준에서 검증
6	유사한 환경에서 시스템모형이나 서브시스템 시작품 검증	신기술이 개발 목표와 동일한 소재, 동일한 설계사양의 부품을 사용하여 유사 제조 환경에서 검증. 적절한 품질수준을 확보
7	실제 환경에서 시스템 시작품 검증	신기술이 개발 목표와 동일한 소재, 양산 설계 수준의 부품을 사용하여 생산에 적합한 환경에서 검증됨. 적절한 품질 수준 및 생산가능성을 확보
8	시스템 완료 및 인증	신기술이 개발 목표와 동일한 소재, 동일한 설계사양의 부품을 사용하여 파일럿 생산 환경에서 검증, 적절한 품질 수준 및 생산 가능성을 확보, 공정 검증 및 저속 시운전 준비
9	성공적인 작동, 양산 및 적용	신기술이 개발 목표와 동일한 소재, 동일한 설계사양의 부품을 사용하여 시운전 환경에서 검증됨. 적절한 품질 수준 및 생산성을 확보함. 공정 검증 및 양산

<표 2-5> 소프트웨어 관련 체계개발의 기술준비도

TRL	정의	세부 내용
1	관찰된 또는 보고된 기초원리	기초연구 집단에서 새로운 소프트웨어의 영역이 조사됨. 기초 사용법의 개발, 소프트웨어 구조의 기본특성, 수학적 공식화, 일반적 알고리즘까지 확장됨.
2	개념기술 또는 공인된 응용기술	개발시작, 기본 원리 탐색 후 실용적 응용·개발 가능. 추론이므로 증명 또는 가정을 뒷받침하는 상세한 해석이 없을 수 있음.
3	이론/실험에 의한 핵심기능이나 개념기술의 특성증명	기술개발의 착수. 과학적 타당성이 분석적이고 실험실 수준 연구로 증명됨. 소프트웨어가 집적되지 않은 상태로 제한된 작동환경에서 부분적인 자료로 중요 특성이나 분석적인 예측이 확인됨.
4	실험실 환경에서 구성요소를 조립하여 유효성 확인	기초 소프트웨어 구성품이 집적됨. 최종 시스템에 비해 효율성/내구성 측면에서 초기단계임. 시스템 구성이 상호호환성, 연장/확장성, 정비성, 보안성과 관련된 이슈에 초점이 맞추어짐.
5	유사한 환경에서 구성요소를 조립하여 유효성 확인	기존 시스템에 적용될 준비가 된 단계. 유사한 구동환경에서 시작품의 성능을 확인함. 현실적으로 발생 가능한 문제점에 대한 실험을 함.
6	유사한 환경에서 시스템 모형이나 서브시스템 시작품 검증	공학적 타당성을 증명하는 단계. 시작품을 기존 시스템에 부분적으로 적용하여 발생하는 문제점을 총괄적으로 파악함.

TRL	정의	세부 내용
7	실제 환경에서 시스템 시작품 검증	프로그램 타당성을 증명하는 단계. 실제 운영환경에서 개발기술의 기능이 문제없이 충실하게 작동되는 것을 증명함.
8	실제 시스템 완료 및 인증	기존 운영체계에 적용되는 단계. 모든 기능이 다양한 작동조건에서 시험되었음.
9	성공적인 작동, 양산 및 적용	반복적으로 사용되는 단계. 운영체제에 완전히 적용됨. 성공적인 운영경험이 있고, 현장에서 기술지원을 유지함.

<표 2-6> 부품소재기술개발의 분야별 기술준비도

TRL	정의	세부내용			
		금속/세라믹/섬유/화학	기계/전기/전자	식품/의약품/화장품	의료기기
1	기초 이론/실험	근본 특성에 대한 논문연구, 초기시장 조사			
2	실용목적의 아이디어, 특허 등 개념 정립	선행연구 검토, 가설의 설정, 실용적 응용·개발연구			
3	연구실 규모 기본성능 검증	다양한 소재 합성 및 배합	모델링/설계 기술 확보	후보군 개념의 초기검증	개념설계/검증
4	연구실 규모의 부품/시스템 성능평가	최적의 소재합성 및 배합비 구성	실용화를 위한 핵심기술요소 확보	핵심기능 소재선별	핵심 요소기술 확보
5	확정된 부품/시스템 시작품 제작	공정 최적화 조건	제작기술, 시스템 통합기술 확보	분리 및 수율 향상	제조기술 확보
6	시작품 성능 평가	시작품 성능평가	시작품 성능평가	전임상시험, 독성/안전성 평가	
7	시작품의 신뢰성 평가	신뢰성 평가	시작품의 신뢰성 평가	임상시험	
8	시작품의 인증/표준화	KS, ISO인증	한국선급인증, KS, ISO인증	식약처 허가	
9	사업화	-	-	-	-

기술준비도 평가는 기술준비도평가(technology readiness assessment, TRA)로도 지칭되며, 체계개발에 적용되는 핵심기술요소의 성숙도를 정량적으로 평가하는 프로세스이다. 기술준비도평가의 절차는 크게 ① 핵심기술요소 식별, ② 핵심기술요소의 기술준비도 판단의 2단계로 볼 수 있다.

핵심기술요소(critical technology element, CTE)는 체계연구개발 사업에서 사업의 완수에 기술적으로 중요한 요소를 의미한다. 사업의 목표(성능, 비용, 일정)를 달성하는데 결정적인 영향을 주거나, 기존 기술에 비해 개발 내용, 개발방식, 시연 환경, 설계 조건 등이 새롭게 적용되는 기술을 핵심기술요소로 볼 수 있다.

핵심기술요소의 식별은 채택하려는 기술이 어느 정도 가치를 지니고 있는지 판단하는 과정이다. 기본적으로 해당 기술은 운용 요구사항 만족, 비용 절감, 일정 축소 등에 중대한 영향을 미쳐야 한다. 이밖에도 ① 해당 기술 시연 시 실패의 위험성이 있거나 해당 기술이 대상사업에서 핵심적인 개발내용에 해당하는 경우, ② 새롭거나 독창적인 기술인 경우, ③ 기존에 성공적으로 적용되었던 기술이 변경되어 적용되는 내역이 존재하는 경우, ④ 기술이 새로운 유사환경에서 적용되는 경우, ⑤ 기술이 초기 설계 목표나 시연 성능을 초과할 가능성이 있는 경우 핵심기술요소로 간주될 수 있다<sup>30)</sup>.

이와 관련하여 기술준비도 수준별 체크리스트 항목도 존재하는데, 이에 대한 종합 평가 후 기술준비도 4단계 이상인 경우는 선행연구단계에서 탐색개발단계로, 기술준비도 6단계 이상인 경우는 탐색개발단계에서 체계개발단계로, 기술준비도 7단계 이상인 경우는 체계개발단계에서 양산단계로 진입할 수 있는 것으로 판정될 수 있다. 최종 기술은 다수의 핵심기술요소로 구성되며, 각 핵심기술요소의 기술준비도는 서로 상이할 수 있는데, 최종 기술의 기술준비도는 각 핵심기술요소를 평가한 결과 중 가장 낮은 값을 사용한다.

<표 2-7> 기술준비도 수준별 체크리스트

TRL 수준	체크리스트 항목
TRL 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최종 사용자(소요군)의 시스템 요구 사항이 식별되었다.</li> <li>• 실험실 환경을 구축하였다.</li> <li>• 실험실 환경에서 구성품 또는 조립품에 대한 기본성능을 입증하였다.</li> <li>• 기능적 업무분해도를 작성하였다.</li> <li>• 실험실 또는 외주업체에서 구성품에 대한 시험을 수행하였다.</li> <li>• 구성품 또는 조립품을 제작하기 위해 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다.</li> <li>• 실험실 환경에서 구성품에 대한 연동성을 확인하였다.</li> <li>• 기능 요소에 대한 분석을 통해 요구사항을 도출하였다.</li> <li>• 알고리즘이 의사 코드(pseudo-code)<sup>31)</sup> 형태로 구현되었다.</li> <li>• 데이터 요구사항 및 포맷에 대한 분석이 완료되었다.</li> <li>• 재사용성을 고려하여 소프트웨어 모듈이 구현되었다.</li> <li>• 실험실 환경에서 개별적인 기능 또는 모듈이 시연되었다.</li> </ul>
TRL 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 타 기술 및 기능과의 상호 영향을 주는 요소가 식별되고, 그 범위가 분석되었다.</li> <li>• 대상 무기체계의 운용환경이 결정되었다.</li> <li>• 유사운용환경이 구축되었다.</li> <li>• 유사운용환경에서 M&amp;S, VR 등을 통해 서브시스템 또는 체계모델 성능에 대한 모의시험(시뮬레이션)을 수행하였다.</li> </ul>

30) 방위사업청(2013).

TRL 수준	체크리스트 항목
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유사운영환경에서 서브시스템 또는 시스템 모델에 대한 시험을 수행하였다.</li> <li>• 유사운영환경에서 실제운영체제와 동일한 서브시스템 체제 또는 시스템 모델을 개발하였다.</li> <li>• 서브시스템 또는 시스템 모델 수준에서 기술의 공학적 타당성이 시연되었다.</li> <li>• 외부 인터페이스에 대한 명세서가 작성되었다.</li> <li>• 시간 제약조건에 대한 분석이 완료되었다.</li> <li>• 데이터베이스(구조 및 인터페이스)에 대한 분석이 완료되었다.</li> <li>• 하드웨어 및 소프트웨어가 서브시스템 수준에서 통합되었다.</li> <li>• 개별 소프트웨어 모듈이 상호 연동됨을 확인하였다.</li> <li>• 제한적인 소프트웨어 산출물 제공이 가능하다.</li> </ul>
TRL 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시스템과 소프트웨어의 인터페이스에 대해 스트레스 테스트가 완료되었다</li> <li>• 운용 환경이 구축되었다. (예. 시험기 - 최종 운용 체계는 아님)</li> <li>• 모사된 운용 환경에서 대부분의 기능을 시연할 수 있다.</li> <li>• 실험실에서 구축된 시스템을 대표적인 환경에서 운용 시험을 실시하였다.</li> <li>• 완전히 통합된 시제품을 실제 또는 모의 운용 환경에서 시연하였다.</li> <li>• 야전 환경에서 시스템 프로토타입의 테스트가 성공적으로 수행되었다.</li> <li>• 가용하지 않은 시스템 요소들에 대해서는 모델링 및 시뮬레이션을 이용하여 모의 분석하였다.</li> <li>• 구성품은 생산이 가능한 단위로 개발되었다.</li> <li>• 운용 환경 조건에서 알고리즘이 수행되었다.</li> </ul>

## (2) 위험도 추정 및 분석결과 도출

위험도는 사업의 세부구성요소를 기술준비도 단계로 구분한 다음, 사업의 시작점과 종료점(목표점)을 기준으로 개발주체의 역량을 분석하여 추정한다. 주체의 역량분석 결과 ① 계획에 따라 연구개발을 착수(시작)하기에 준비가 미흡한 경우, ② 시작시점과 종료시점(목표점)을 고려할 때, 자원·시간·인력·기술 등의 여유가 불충분한 경우 위험도가 존재한다고 할 수 있다. 주로 역량 부족이나 무리한 계획이 인지되었으며, 이로 인한 영향이 사업 전반에 대해 부정적으로 미칠 수 있는지를 중심으로 분석한다.

위험 정도에 대한 세부적인 판단기준은 연구개발사업의 특성을 고려해야 하며, 획일화는 현실적이지 않다. 위험도 분석에 참고할 수 있도록, 기존에 조사가 수행되었던 체계개발사업의 수행기간과 부품소재기술개발사업의 평균적인 수행기간을 <표 2-10>에 정리하였다. 아울러 미국회계감사원(GAO)에서 보고한 기술적 준비정도에 따른 비용위험요인을 <표 2-11>과 <표 2-12>에 예시함으로써 판단의 참고자료로 활용할 수 있도록 하였다.

31) 프로그래밍 언어가 아닌 일반언어 형태로 기술된 코드.

<표 2-8> 국내 대표적인 연구개발사업의 소요기간(예시)

구 분		시작단계 기술준비도	종료단계 기술준비도	소요기간	특징
소형위성발사체개발사업(KSLV-I)		3	8	7년	체계개발
부품소재기술개발사업(과제)		3	7	3년	부품·소재개발
부품 소재 기술	금속분야	3.14	6.29	2.57년	부품·소재개발
	자동차/조선분야	2.57	7.71	3.43년	부품·소재개발
	기계/항공/로봇분야	2.57	7.43	3.86년	부품·소재개발
	반도체/디스플레이	2.43	8.00	2.29년	부품·소재개발
	디지털 융합	2.86	7.57	2.86년	부품·소재개발
	바이오/나노	2.86	6.86	3.43년	부품·소재개발
	섬유화학	2.25	6.88	3.00년	부품·소재개발

<표 2-9> 하드웨어 위험점수표(예시)

위험 범주	위험점수 : 낮음 = 0, 중간 = 5, 높음 = 10				
	0	1-2	3-5	6-8	9-10
연구개발 필요성	연구개발 필요성 낮음		만족		불만족
기술적 진보	완료	최저수준 필요	중간수준 필요	의미 있는 수준	전례 없는 수준
공학적 개발	완료, 시험 완료	프로토타입 존재	하드웨어 및 소프트웨어 개발	상세설계 필요	개념정의 필요
신뢰성	동일사례 존재	유사사례 존재	낮은 수준 문제	심각한 문제	알려지지 않음
생산성	동일사례 존재	유사사례 존재	타당한 생산량·수율	타당한 생산량 수율에 문제	생산경험 없음
대체품	존재	중요한 부분 대체 가능	잠재 대체물 개발 중	잠재 대체물 설계 중	대안 없음
일정	쉽게 달성	달성 가능	다소 도전적	도전적	매우 도전적

출처 : SCEA(2003), GAO(2009)에서 재인용

<표 2-10> 소프트웨어 위험점수표(예시)

위험 범주	위험점수 : 낮음 = 0, 중간 = 5, 높음 = 10				
	0	1-2	3-5	6-8	9-10
연구개발 필요성	연구개발 필요성 낮음		만족		불만족
기술적 진보	통상적이며 증명된 방법	통상적이나 未 증명 방법	새로운 적용법	非 통상적 개념개발	非 통상적, 개념 未 증명
설계 공학	설계 완성·검증	설계구조 정의·검증	설계구조 정의	요구조건 정의	요구조건 부분정의
코딩	완전 집적화·검증	완전 집적화	모듈단위 집적화	모듈 존재 未 집적화	모듈 없음 신규 설계
SW 집적도	수천 개 명령어	수만 개 명령어	수십만 개 명령어	수백만 개 명령어	수천만 개 명령어
검사	전체 시스템 검사	시뮬레이션	체계화된 시범검사	모듈검사	검사 없음
대안	존재	중요한 부분 대체 가능	잠재 대체품 개발 중	잠재 대체품 고려 중	대안 없음
일정·운영	늘어진 일정 연속적/순차적 활동 빈번한 리뷰 빠른 초기 검토시점	적절한 일정, 동시수행 적음, 합리적인 리뷰주기	적절한 일정 동시수행 많음 간헐적 리뷰 지연된 초기 검토시점	빠른 일정, 동시수행 많음	빠른 일정 마일스톤 누락 구현 시 리뷰 정기 점검 없음

출처 : USAF(2003), GAO(2009)에서 재인용

## 라. 기타 분석사항

### (1) 주요국의 연구개발 투자동향

국가연구개발투자의 참고자료로서 주요국의 연구개발 투자동향을 고려할 수 있다. 기술 선진국에서 특정 기술분야에 대한 투자를 확대하거나 축소·철회하려는 경향은 국내 연구개발투자전략 수립의 기초자료로 활용될 수 있다. 비록 국가 간 과학기술 수준이나 연구개발 투자환경 차이로 인해 주요국의 연구개발 투자동향이 해당 기술분야에 대한 국내 투자의 긍정적 또는 제약적 환경으로 작용한다고 단정하기는 어려울 수 있으나, 적어도 다른 근거 자료와 함께 판단결과의 신뢰성을 제고해 주는 보조 자료로서의 활용은 가능하다.

## (2) 활동도 지수

기술특화 현황분석법은 특정한 연구주체가 어떤 기술분야에 집중적으로 투자를 하고 있는지 평가할 수 있는 방법이다. 기술특화 현황분석에 가장 많이 이용되는 지표 중의 하나로 현시기술우위지수(revealed technological advantage, RTA)가 있다<sup>32)</sup>. 현시기술우위지수는 국제무역의 국가별 특화 현황을 분석하기 위해 제안된 현시비교우위지수(revealed comparative advantage, RCA)<sup>33)</sup>로부터 발전된 개념으로 특정주체가 다른 주체와 비교하여 어떤 기술분야에 상대적으로 활동을 집중하고 있는가에 대한 정보를 제공한다. 단순 점유율이나 연구문헌 건수만으로는 특화분야를 파악하는 것이 곤란한 반면, 현시기술우위 지수는 상대적 특화 현황에 대한 정보를 제공한다. 현시기술우위지수가 0이상 1미만인 경우에는 제약적인 환경으로 추정할 수 있으나, 절대적인 기준으로는 보기 어려우며 분석결과의 신뢰성을 보완하는 참고자료로 활용된다.

$$RTA = \frac{(P_{ij} / \sum_i P_{ij})}{(\sum_j P_{ij} / \sum_i \sum_j P_{ij})}$$

$P_{ij}$  :  $i$  분야에 대한  $j$ 의 연구문헌(논문, 특허) 수

<표 2-11> 현시기술우위지수 결과값의 의미

결과	분석적 의미
RTA < 1	• 연구개발주체가 해당 기술분야에 상대적으로 덜 집중함
RTA = 1	• 연구개발주체가 해당 기술분야에 집중하는 정도가 평균 수준
RTA > 1	• 연구개발주체가 해당 기술분야에 특화된 정도가 높음

32) OECD(1994).

33) Balassa and Noland (1989).