

II. 과학의 본성

송성수(부산대 물리교육과 교수, 과학기술학)

과학의 본성(nature of science, NOS)에 관한 물음은 “과학이란 무엇인가”, “우리는 무엇을 과학으로 간주하는가”, “과학과 비(非)과학을 구획하는 기준은 무엇인가” 등으로 표현될 수 있다. 본성에 관한 모든 물음이 그렇듯이, 과학의 본성에 대해서도 어떤 관점에서 과학에 접근하느냐에 따라 매우 다양한 견해가 제시될 수 있다. 과학의 본성은 과학의 가치와 목적을 통해 접근할 수도 있고, 과학지식이나 과학적 방법과 같은 과학의 구성요소 혹은 측면을 통해 논의할 수도 있다. 또한 과학의 본성은 그것을 주요한 주제로 삼아온 과학철학에 대한 논의를 매개로 고찰할 수도 있다. 최근에는 과학의 본성으로 과학의 인식적 특성을 넘어 과학의 사회적·윤리적 특성이 강조되는 경향을 보이고 있다.

1. 과학의 본성에 관한 물음

가. 과학의 가치와 목적

1) 과학의 가치

우리가 과학에 대해 논의하는 것은 과학이 그만큼 가치가 있기 때문이다. 과학의 가치는 과학자들이 과학 활동을 수행하는 철학적 토대가 되며, 과학교육의 필요성이나 당위성을 정당화하는 근거가 된다. 이와 함께 과학의 가치에 대한 진술은 과학의 본성에 접근하는 중요한 매개물이 된다. 그렇다면 과학은 어떤 가치를 가지고 있는가? 그 동안 많은 학자들이 과학의 가치에 대해 진술해 왔는데, 몇 가지 중요한 견해를 살펴보면 다음과 같다(조희형·박승재, 2001).

카린(Carin, 1997)은 미국과학진흥협회(American Association for the Advancement of Science, AAAS)가 과학의 가치로 제안한 내용을 다음과 같이 정리하고 있다. 첫째, 자연세계를 알고 이해하려는 호기심에서 과학을 학습하거나 연구하게 한다. 둘째, 증거를 중시하고 그것을 바탕으로 결론을 내리게 한다. 셋째, 자신이 내린 결론과 주장에 대해서도 의심하는 마음을 갖게 한다. 넷째, 어떤 증거도 결정적인 검증의 바탕이 될 수 없다는 점을 보여준다. 다섯째, 다른 사람들과 협력하여 학습하고 연구해야 효과적이라는 점을 알려준다. 여섯째, 실패가 과학적 탐구의 자연스러운 결과임을 보여준다.

마틴 등(Martin et al., 1997)은 미국의 전국교육협회(National Education

Association, NEA)가 제안한 과학의 가치를 다음과 같이 소개하고 있다. 첫째, 알고 이해하고자 하는 열망을 갖는다. 둘째, 모든 것을 질문한다. 셋째, 자료와 그 의미를 추구한다. 넷째, 경험적 증거를 요구한다. 다섯째, 논리를 존중한다. 여섯째, 전제와 결과를 재고(再考)한다. 여기서 과학이 확실히 검증가능하거나 순수하게 논리적인 것은 아니지만, 과학이 경험과 논리를 중시한다는 것은 과학의 기본적 특성이라고 볼 수 있다.

아브루스카토(Abruscato, 2000)는 과학의 가치 중에서 특히 과학교육과 관련성이 큰 것으로 진리(truth), 자유(liberty), 의심(doubt), 독창성(originality), 질서(order), 의사소통(communication) 등 6가지를 제시하고 있다. 첫째, 과학자들은 자연에서 일어나는 현상을 서술하고 설명하며 궁극적으로는 그 현상에 대한 진리를 추구하는데 전념한다. 둘째, 자유롭고 자율적인 사고가 보장되는 분위기나 상황 속에서 과학이 융성하고 발달할 수 있다. 셋째, 과학의 산물은 자연세계에 대한 의심이나 의문을 풀기 위한 탐구 활동의 결과이다. 넷째, 과학자들의 독창적인 사고와 노력이 없이는 과학이 결코 진보할 수 없다. 다섯째, 과학자들은 자연의 질서를 가정하고 그에 따라 정보를 수집하고 조직하여 과학지식을 구성한다. 여섯째, 과학은 다른 과학자들이 이룬 업적과 그에 대한 이해가 없이는 그 발달이 제한될 수밖에 없다.

2) 과학의 목적

과학의 궁극적 목적에 대해서는 다양한 견해가 제시될 수 있다. 그러나 과학의 일차적 목적이 자연현상에 대한 기술(description), 설명(explanation), 이해(understanding), 예상(prediction), 통제(control)에 있다는 점에 대해서는 대부분의 학자들이 동의하고 있다(Kitchener, 1999). 물론 이와 같은 과학의 목적이 과학의 모든 분야에서 보편적으로 적용되지는 않으며, 분야에 따라서는 몇 가지 목적만을 추구하기도 한다.

기술(記述)은 다양한 방법으로 수집한 자료를 바탕으로 자연현상을 사실대로 기록하는 행위에 해당하며, 과학지식이 형성되는 일차적인 원천으로 작용한다. 자연현상의 기술에 필요한 자료는 소극적인 관찰이나 측정을 통해 수집되기도 하고, 의도적인 조사와 실험을 통해 수집되기도 한다. 자료의 수집에는 종종 도구가 사용되는데, 도구를 이용해 수집한 자료는 대부분 정량적 자료로 수학적 분석이나 통계적 처리가 용이한 특징을 가지고 있다.

설명(解釋)은 매우 다양한 의미를 가지고 있다. 예를 들어 단어나 문구의 뜻을 기술하는 것, 신념이나 행동을 정당화하는 것, 어떤 진술로부터 다른 진술을 도출하는 것, 어떤 대상의 기능을 해석하는 것 등이 모두 설명의 범주에 포함될 수 있다. 그러나

설명은 일반적으로 현상이나 사건에 대한 원인을 제시하는 경우를 지칭한다. 기술이 무엇이, 어디서, 언제, 어떻게 이루어지는지에 대한 질문에 답을 준다면, 설명은 '왜'에 대한 답을 주는 것이다. 설명은 사례기술적(idiographic) 설명과 법칙정립적(nomothetic) 설명으로 구분되기도 한다. 사례기술적 설명은 개별적인 사례에 대한 완전한 설명을 추구하고, 법칙정립적 설명은 하나의 사례보다는 일련의 현상에 대한 포괄적인 설명을 목적으로 한다. 험펠(Hempel, 1966)은 과학적 설명에 대한 모형으로 연역법칙적 모형(deductive-nomological model)과 귀납통계적 모형(inductive-statistical model)을 제안하고 있다. 연역법칙적 모형에서 피설명항은 일반 법칙과 초기 조건으로부터 연역적인 필연성을 가지고 추론되며, 귀납통계적 모형에서는 설명항이 피설명항을 일정한 확률 값을 가지고 귀납적으로 지지한다.

이해는 주어진 자료와 정보의 의미를 파악하거나 다른 의미와 관련짓는 과정에 해당한다. 이해의 초보적인 유형으로는 제시된 자료나 정보의 의미를 바꾸지 않고 다른 형태로 표현하는 것을 들 수 있는데, 표의 의미를 그림으로 나타내는 자료변환이 그 대표적인 예이다. 또한 내삽이나 외삽을 통해 더욱 새롭고 포괄적인 의미를 추리해내는 것이나 새로운 정보를 기존의 지식과 통합하여 체계화하는 것 등도 이해의 한 형태라 볼 수 있다. 이해는 인과적 설명보다는 상관관계를 파악하는 데 주된 관심을 가진 경우에 널리 사용되고 있다. 이러한 맥락에서 자연과학의 목적은 설명인 반면 인문학의 목적은 이해라고 구분되기도 한다. 이와 달리 이해를 매우 포괄적으로 해석하는 경우에는 어떤 현상에 대한 설명을 그 현상에 대한 이해의 특수한 경우에 불과한 것으로 간주하기도 한다.

과학은 몇몇 원인을 근거로 관찰이나 측정이 가능한 자연현상을 예상할 목적으로 수행되기도 한다. 예상은 독립변인을 바탕으로 종속변인의 값을 도출하는 행위로 규정할 수 있다. 설명과 예상은 그 결론에 시간적 차이가 있을 뿐 비슷한 방식으로 이루어진다고 볼 수 있다. 설명은 결론이 이미 나타난 사건을 진술하는 반면에, 예상은 미래에 발생할 가능성이 있는 현상이나 사건을 대상으로 한다. 이와 함께 이미 일어났지만 아직 알려져 있지 않은 현상이나 사건을 설명하는 것도 예상의 일종이라 볼 수 있다.

통제는 어떤 현상이나 사건이 일어나게 하거나 일어나지 않게 하는 등 특정한 목적에 맞게 조절하는 행위를 말한다. 어떤 사건을 통제한다는 것은 그 사건에 대한 예상을 바탕으로 수행된다. 그러나 예상이 가능하다고 해서 반드시 통제가 가능한 것은 아니다. 예를 들어 태풍이나 지진과 같은 자연현상은 예상할 수는 있지만 충분히 통제하지는 못한다. 통제는 기초과학보다는 응용과학이나 기술 분야에서 더욱 중요시되는 특징을 보이고 있다.

나. 과학의 본성에 관한 입장

앞 단락에서 살펴본 과학의 가치와 목적에 대해서는 어렵지 않게 수긍할 수 있지만, 정작 과학의 본성에 대한 세부적인 입장에는 상당한 차이가 있을 수 있다. 과학은 상대적인가 절대적인가? 과학지식은 귀납과 연역 중에 어떤 것을 통해 형성되는가? 과학은 사회문화적 맥락에 의존하는가 아니면 이에 무관한가? 과학을 과정 중심으로 가르쳐야 하는가 아니면 내용 중심으로 가르쳐야 하는가? 과학이론은 실재하는가 아니면 도구에 불과한가? ... 이러한 점을 고려하여 노트와 웰링턴은 과학의 본성을 점검할 수 있는 정교한 검사 도구를 개발한 바 있다(Nott & Wellington, 1993).

먼저, 아래에 제시된 설문지를 활용하여 응답자의 반응을 구한다. 응답자는 각 진술문에 대해서 +5부터 -5 사이의 한 점수를 부여한다. 정말 그렇다고 생각하면 +5, 중립적이면 0, 절대 아니라고 생각하면 -5를 표시하는 것이다.

1. 학생들이 실험을 통해 얻은 결과는 다른 사람들의 결과들만큼 가치가 있다. ()
2. 과학은 본질적으로 남자들이 하는 분야이다. ()
3. 과학적 사실이란 과학자들이 그렇다고 동의한 것이다. ()
4. 과학 활동의 목적은 실재를 밝히는 데 있다. ()
5. 과학자들은 실험이 끝나기 전에 그 결과를 미리 예상하지 않는다. ()
6. 과학에 대한 연구는 경제적으로 혹은 정치적으로 결정된다. ()
7. 과학교육은 과학적 사실보다는 과학의 과정을 배우는 것이어야 한다. ()
8. 과학의 과정은 도덕적 혹은 윤리적 문제와 거리가 멀다. ()
9. 과학교육의 가장 가치로운 부분은 사실들이 잊혀진 후에도 계속 남는다. ()
10. 과학이론은 그것이 성공적으로 기능한다면 타당한 것이 된다. ()
11. 과학은 가용한 자료로부터 일반화된 결론을 도출함으로써 전진한다. ()
12. 참된 과학이론이란 존재하지 않는다. ()
13. 인간의 감성은 과학지식을 창조하는 데 아무런 기능을 하지 않는다. ()
14. 과학이론은 인간의 지각과는 독립적인 외부의 실제 세계를 묘사한다. ()
15. 과학지식에 대한 튼튼한 기초가 있어야만 학생들이 스스로 발견할 수 있다. ()
16. 과학이론은 단지 실험기법이 향상되었기 때문에 변화하였다. ()
17. 과학적 방법은 다양한 과학적 탐구에 적용할 수 있다. ()
18. 경쟁하는 이론들 간의 선택은 철저히 실험결과에 기초하여 이루어진다. ()
19. 과학이론은 실험결과에서 추론한 것임과 동시에 상상력과 직관력의 산물이기도 하다. ()
20. 과학적 지식은 다른 종류의 지식에 비해 우월한 지적 지위를 갖는다. ()
21. 우주에는 과학적으로는 결코 설명될 수 없는 물리적 현상들이 존재한다. ()

22. 과학지식은 도덕적으로 중립적이다. 다만, 그것의 응용이 윤리적 문제일 뿐이다. ()
23. 모든 과학의 실험과 관찰은 현존하는 이론들에 의해 결정된다. ()
24. 과학은 본질적으로 그것의 방법과 과정에 의해 특징지어 진다. ()

설문지에 응답한 후에는 각 문항에 대해 응답한 점수를 더해 그 결과를 정리한다.
아래에서 *로 표시된 문항은 응답한 점수에 (-)를 붙여 계산한다.

RP 차원: 1*+3*+21*+12+14+16+18+20=()

ID 차원: 5*+11*+19+23=()

CD 차원: 2*+3*+6*+8*+13+16+18+22=()

PC 차원: 7*+9*+17*+24*+15=()

IR 차원: 10*+21*+4+12+14=()

여기서 노트와 웰링턴은 과학의 본성에 대한 차원으로 RP, ID, CD, PC, IR을 들고 있는데, RP 차원에서 R은 상대주의(relativism), P는 실증주의(positivism), ID 차원에서 I는 귀납주의(inductivism), D는 연역주의(deductivism), CD 차원에서 C는 맥락주의(contextualism),¹⁾ D는 탈(脫)맥락주의(decontextualism), PC 차원에서 P는 과정(process) 중심, C는 내용(content) 중심, IR 차원에서 I는 도구주의(instrumentalism), R은 실재론(realism)을 의미한다. RP 차원은 -40점부터 +40점까지 걸쳐 있고, (-)는 상대주의, (+)는 실증주의에 해당한다. ID 차원은 -20점부터 +20점까지 걸쳐 있으며, (-)는 귀납주의, (+)는 연역주의에 해당한다. CD 차원은 -40점부터 +40점까지 걸쳐 있고, (-)는 맥락주의, (+)는 탈맥락주의에 해당한다. PC 차원은 -25점부터 +25점까지 걸쳐 있으며, (-)는 과정 중심에, (+)는 내용 중심에 해당한다. IR 차원은 -25점부터 +25점까지 걸쳐 있고, (-)는 도구주의, (+)는 실재론에 해당한다.

과학의 본성에 관한 각 입장에 대한 설명은 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 과학의 본성에 관한 입장과 그 특징

1) 맥락(context)이나 상황(situation)은 매우 복합적인 개념이고 서로 혼용되기도 하지만, 이 책에서는 용어의 원래 의미를 살려 contextualism을 '맥락주의'로 번역하기로 한다. 맥락주의가 과학이 역사적, 사회적, 문화적 맥락에 의존한다는 점을 강조하고 있다면, 상황주의(situationalism)는 과학에 대한 다양한 상황을 경험하거나 만들어내는 것에 주목하고 있다.

| 입장 | 주요 특징 |
|----------------------------|--|
| 상대주의 (relativism) | 이론의 진위는 시험에 사용된 실험적 기법뿐만 아니라 관련 사회집단의 규범과 합리성에 의존한다. 과학이론의 진위에 대한 판단은 개인과 문화에 따라 달라진다. |
| 실증주의 (positivism) | 과학지식은 다른 형태의 지식에 비해 더욱 타당성이 높다. 실험을 통해 생성된 법칙과 이론은 외부에 실재하는 객관적 세계에서 우리가 보는 패턴을 기술한 것이다. |
| 귀납주의 (inductivism) | 많은 수의 특정한 사례들을 관찰하고 이러한 사례들로부터 일반적인 것을 추론하여 법칙과 이론을 규정할 수 있다. |
| 연역주의 (deductivism) | 과학은 과학자들이 최근 이론이나 대담한 상상력의 논리적 결과로 도출된 아이디어를 시험함으로써 발전한다. |
| 맥락주의 (contextualism) | 과학적 지식과 과정의 참됨은 과학자가 생활하거나 과학 활동이 이루어지는 문화와 상호의존적인 관계에 있다. |
| 탈맥락주의 (decontextualism) | 과학지식은 그것의 문화적 위치나 사회적 구조에 무관하다. |
| 과정 중심 (process) | 과학을 일련의 방법과 과정의 집합으로 보는 관점이다. 과학의 방법이나 과정을 학습하는 것이 과학교육의 핵심적인 부분이 된다. |
| 내용 중심 (content) | 과학이 일련의 사실과 아이디어로 이루어진다는 관점이다. 과학교육의 핵심적인 부분은 이러한 지식 체계를 습득하고 숙달하는 데 있다. |
| 도구주의 (instrumentalism) | 과학적 이론이나 아이디어는 우리가 사용하는 도구일 뿐이며, 그것의 독립적인 실재나 그 자체의 참됨에 대해서는 아무 것도 말하지 않는다. |
| 실재론 (realism) | 과학이론은 과학자의 인식과 독립적으로 시공간상에 존재하는 세계에 대해 진술한 것이다. |

이와 같은 검사 도구를 통해 우리는 과학의 본성에 대해 매우 다양한 입장이 존재한다는 점을 알 수 있다. 또한 과학의 본성에 대한 자신의 입장을 확인하고 자신의 입장이 다른 사람들과 얼마나 다른지도 살펴볼 수 있다. 특히 이러한 검사 도구를 매개로 집단적인 토론을 실시함으로써 과학의 본성을 더욱 세부적으로 논의할 수 있으며 과학의 본성에 대해 합의된 의견을 도출할 수도 있다. 이와 관련하여 래트클리프와 그레이스(Ratcliffe & Grace, 2003)는 많은 문헌들에서 공통적으로 제시되고 있는 과학의 본성에 관한 견해를 다음의 14가지로 정리하고 있다.

- 과학지식은 비교적 오래 지속되지만, 잠정적 특성을 지닌다.
- 과학지식은 관찰, 실험적 증거, 합리적 논증 등에 절대적이지는 않지만 크게 의존한다.
- 과학에 보편적으로 적용되는 유일한 방법은 없다.

- 과학은 자연현상을 설명하기 위한 추구이다.
- 과학적 이론이 새로운 증거에 의해 법칙으로 변하는 것은 아니다.
- 인간이면 누구나 과학에 공헌한다.
- 새로운 과학지식은 명확하고 개방적으로 발표되어야 한다.
- 과학자는 자료를 정확하게 기록하고, 동료평가와 반복실험을 개방적으로 받아들인다.
- 관찰은 이론에 의존한다.
- 과학자는 창의적이다.
- 과학의 역사는 과학지식이 진화적 혹은 혁명적으로 변하는 과정을 보여준다.
- 과학은 사회적·문화적 전통의 일부이다.
- 과학과 기술은 서로 영향을 주고받는다.
- 과학적 관념은 당시의 사회적·역사적 분위기에 의한 영향을 받는다.

2. 과학지식과 과학적 방법

가. 과학지식의 체계

과학지식은 자연을 탐구하면서 얻게 되는 산물에 해당하며, 그것의 구체적인 형태는 과학의 분야에 따라 상당한 차이를 보인다. 세부적인 과학지식은 물리학, 화학, 생물학, 지구과학에 따라 다르고, 지구과학의 경우에도 천문학, 지질학, 기상학, 해양학 등에 따라 달라진다. 그러나 이러한 분야와는 무관하게 대부분의 과학지식이 공통적으로 가지고 있는 요소도 존재한다. 여기에는 사실(fact), 개념(concept), 법칙(law), 이론(theory), 가설(hypothesis) 등이 포함된다. 이러한 요소들이 결합되어 과학지식은 일종의 구조적 전체를 이루고 있는 것이다.

1) 사실

사실은 사전적으로 “실제로 존재하거나 실제로 있었던 일”로 정의되고 있다. 사실은 맹목적(brute) 사실과 제도적(institutional) 사실로 구분할 수 있다. “책상 위에 책이 한 권 있다.”는 있는 그대로를 진술한 맹목적 사실이다. 제도적 사실은 사회적 가치나 제도적 규범에 따라 진술되는 것으로 “흡연은 건강에 해롭다.”가 그 예가 될 수 있다(Chiappetta & Koballa, 2006).

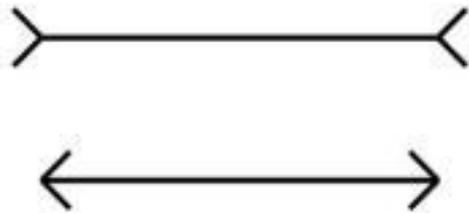
과학적 사실은 관찰이나 실험을 통해 수집한 구체적인 산물에 해당하며, 개념, 법칙, 이론 등의 바탕이 된다. 과학적 사실에는 설명 기능이나 예상 기능이 없으며, 다만 있는 그대로를 기술한 것에 해당한다. 또한 과학적 사실은 구체적인 대상을 나타내기 때문에 반복적인 관찰이나 실험을 통해 그 속성을 확인할 수 있는 특성을 가지고 있다. 이러한 확인을 통해 현재에 사실로 받아들여지고 있는 것이 미래에는

수정되거나 폐기될 수 있다.

과학적 사실의 성격은 전통적 관점과 현대적 관점에 따라 다른 의미로 해석되고 있다. 전통적 관점에서는 사실을 자연에 존재하는 실체나 자연에서 일어나고 있는 현상으로 본다. 즉, 전통적 관점에서 사실은 인간의 관찰과 무관하게 객관적으로 존재하는 것이 된다. 이에 반해 현대적 관점에서는 사실을 인간에 의해 관찰된 것에 대한 진술 혹은 언명(statement)으로 본다. 사실은 실체나 현상 자체가 아니라 그것들에 대한 진술에 해당하며, 관찰 행위가 매개되지 않은 사실은 존재하지 않는다는 것이다.

현대적 관점에 따르면 관찰은 감각기관과 인지구조가 결부된 일련의 과정이다. 인간은 감각기관을 이용하여 외부의 정보를 감지하는데, 이러한 과정에서 정보는 있는 그대로가 아니라 일종의 변형을 거쳐 등록된다. 또한 감각기관에 등록된 정보가 뇌에 전달되는 과정에서도 인간의 인지구조에 의해 재해석된다. 이처럼 관찰된 정보가 사실로 되는 과정을 살펴보면 관찰이 인간의 감각기관과 인지구조에 의존한다는 점을 알 수 있다(권재술 외, 1998).

이와 관련하여 <그림 2-1>의 뮐러-라이어 착시(Müller-Lyer illusion)는 관찰의 감각기관 의존성을 잘 보여주는 사례로 자주 거론되고 있다. 두 선분의 길이가 같다는 사실을 알고 난 뒤에도 우리 눈에는 화살표가 안쪽으로 향하는 것이 바깥쪽으로 향하는 것보다 더 길어 보이는 것이다.



<그림 2-1> 뮐러-라이어 착시 현상

2) 개념

개념은 사물, 현상, 사건 등에 관하여 여러 사람이 공통적으로 가지고 있는 관념이나 생각을 뜻한다. 관찰을 통해 수집된 과학적 사실들 사이에는 일련의 관계와 양상(patterns)이 나타나며, 그러한 관계와 양상은 개념을 통해 진술될 수 있다. 개념은 이름, 정의, 준거속성(criterial attribute), 사례 등으로 표현된다. 예를 들어, 포유동물이 이름이라면, 새끼를 낳아 젖으로 키우는 동물이 정의에 해당하고, 준거속성으로는 네 발을 가지고 있다, 털이 있다, 체온이 일정하게 유지된다 등이 있으며,

사례에는 토끼, 말, 호랑이 등이 있는 것이다(조희형 외, 2011).

개념은 과학적 연구와 학습에서 다양한 기능을 수행한다(Kaplan, 1964). 첫째, 개념을 통해 사물을 체계적으로 분류할 수 있다. 둘째, 개념은 어휘를 제공하여 다른 사람과 의사소통을 가능하게 한다. 셋째, 개념은 학습자가 가지고 있는 관념을 바람직한 방향으로 변화시킬 수 있다. 넷째, 개념은 과학적 법칙이나 이론의 형성에 필요한 재료로 기능한다.

개념에는 다양한 유형이 있다. 호워드(Howard, 1987)는 개념이 형성되는 원천과 지시하는 대상에 따라 구체적 혹은 경험적 개념과 추상적 혹은 형이상학적 개념으로 구분하고 있다. 구체적 개념은 직접 경험한 것 중에서 공통된 내용을 일반화한 관념에 해당하며, 그 기능에 따라 공간 개념, 존재 개념, 구조 개념으로 세분화할 수 있다. 공간 개념은 상하, 좌우, 전후 등과 같이 사물과 현상의 시공간적 관계를 나타내고, 존재 개념은 물질, 생물, 인간 등과 같이 일련의 실체에 대한 경험을 바탕으로 기술되는 개념이며, 구조 개념은 먹는 것, 운동하는 것 등과 같이 여러 형태의 경험과 활동을 조직한 것이다. 추상적 개념은 여러 구체적 개념을 바탕으로 순수한 사유과정을 통해 만들어진 것이다. 에너지, 진화 등과 같은 과학적 개념이 추상적 개념의 대표적인 예이다.

카플란(Kaplan, 1964)은 개념을 관찰 개념, 구성 개념, 이론적 개념의 세 가지 유형으로 분류하였다. 관찰 개념은 관찰을 통해 확인할 수 있는 개념을 뜻하며, 직접 관찰 개념과 간접 관찰 개념으로 나눌 수 있다. 전자는 돌이나 책과 같이 인간의 감각기관으로 직접 관찰이 가능한 개념이고, 후자는 원자나 분자와 같이 각종 도구나 장치를 통해 간접적으로 관찰할 수 있는 개념이다. 구성 개념은 관찰 가능한 개념은 아니지만 관찰 가능한 대상에 바탕을 두고 구성된 개념이다. 과학적 이론의 기초가 되는 개념은 대부분 구성 개념으로 질량, 힘, 가속도 등이 여기에 해당한다. 이론적 개념은 관찰 불가능한 것을 효과적으로 설명하기 위해 가공적으로 만들어진 개념을 말한다. 예를 들어 정신이 뇌에서 비롯된다고 해서 뇌를 현미경으로 들여다보아도 정신을 찾을 수는 없다. 앞서 언급한 호워드의 분류와 결부시켜 보면, 직접 관찰 개념과 간접 관찰 개념은 구체적 개념에, 구성 개념과 이론적 개념은 추상적 개념에 해당한다.

또한 개념은 객관 개념(concept)과 주관 개념(conception)으로 구분되기도 한다. 객관 개념은 과학자사회(scientific community)에서 공인된 개념으로 학습의 대상이 되며 사람에 따라 달라지지 않는다. 이에 반해 주관 개념은 개인이 스스로 만들어낸 개념으로 사람에 따라 그 의미가 다르다. 일상생활과 달리 과학교육에서는 객관 개념과 주관 개념을 구분하는 것이 매우 중요하다. 과학교육은 학생 개개인이 가지

고 있는 주관 개념을 과학자사회에서 공인된 객관 개념으로 변화시키는 역할을 담당하는 것이다(권재술 외, 1998). 과학교육에서 자주 거론되는 학생들의 선(先)개념(preconception)이나 오(誤)개념(misconception)도 주관 개념의 일종에 해당한다.

3) 법칙과 원리

법칙은 특정한 조건 하에서 자연현상의 규칙성(regularities)이나 양상이 어떻게 나타나는지를 일반화하여 진술한 것에 해당한다. 과학적 법칙은 과학적 개념과 사실로 이루어져 있으며, 개념이나 사실보다 더욱 포괄적이고 그것을 초월하는 특성을 지닌다. 보일의 법칙을 예로 들어 보자. 보일의 법칙은 “일정 온도에서 기체의 압력과 그 부피는 서로 반비례한다.”는 진술이다. 보일의 법칙은 일정 온도라는 특정한 조건에서 성립하며, 압력이나 부피와 같은 개념과 관찰이나 실험을 통해 수집한 사실을 서로 연결시켜 진술하고 있다.

과학적 법칙은 다음과 같은 특성을 가지고 있다. 첫째, 과학적 법칙은 특정한 조건에서 원인과 결과 사이에 일정한 관계가 있다는 인과율에 근거를 두고 있다. 둘째, 과학적 법칙은 시간과 공간에 관계없이 적용된다는 보편성을 지향한다. 셋째, 과학적 법칙에 사용되는 개념은 반드시 조작적 정의가 가능해야 한다. 예를 들어, 뉴턴(I. Newton)의 운동법칙에 사용되는 힘, 질량, 가속도는 조작적으로 정의할 수 있는 반면, “성실한 사람은 성공한다.”와 같은 언명에서 성실과 성공은 조작적 정의가 곤란하다(권재술 외, 1998).

과학적 법칙도 몇 가지 유형으로 구분할 수 있다. 법칙은 규칙성의 정도에 따라 보편법칙과 통계법칙으로 나뉜다. 보편법칙이 시공간적으로 예외가 없는 규칙성을 의미한다면, 통계법칙은 규칙성이 나타나는 확률에 주목한다. “자석이 같은 극끼리는 밀어내고 다른 극끼리는 잡아당긴다.”는 것은 보편법칙에 해당하고, “이 음식을 먹은 사람의 5% 정도는 구토 증상을 나타낸다.”는 것은 통계법칙에 해당한다.

법칙은 직접적 관찰의 가능성에 따라 경험법칙과 이론법칙으로 구분할 수 있다(Carnap, 1966). 경험법칙은 관찰할 수 있는 현상들 사이의 불변적 관계를 나타내는 것으로 관찰한 사실을 설명하거나 미래의 관찰 가능한 사건을 예측하는 기능을 한다. 이론법칙은 직접적 관찰이 불가능하며 그와 관련된 경험법칙을 통해 간접적으로 확인할 수 있다. 즉, 어떤 이론법칙에서 경험법칙을 가설의 형태로 예측하고 그 가설을 관찰이나 실험을 통해 확인하는 절차를 거치는 것이다.

법칙과 유사한 개념으로는 원리(principle)를 들 수 있다. 법칙과 원리는 모두 관찰된 현상을 지배하는 규칙으로 혼용되기도 한다. 그러나 기본적으로 법칙은 관찰 자료를 일반화한 진술인 반면, 원리는 관찰 자료와 직접적으로 관련될 필요가 없으

며 논리적 관계를 중시한다. 또한 원리는 법칙보다 더욱 포괄적이고 근본적인 성격을 띠고 있다. 이에 따라 원리는 법칙이나 이론을 도출하는 전제로 활용되기도 한다. 예를 들어, 아인슈타인(A. Einstein)의 특수 상대성 이론은 상대성 원리와 광속도 불변의 원리를 바탕으로 제안되었다.

4) 이론, 모형, 비유

과학적 이론은 사실, 개념, 법칙, 가설 등이 통합되어 하나의 설명체계를 이룬 것으로 적용 범위가 넓고 추상성이 높은 특성을 가지고 있다. 네이글(Nagel, 1966)에 따르면, 이상적인 과학적 이론은 다음과 같은 세 가지 조건을 만족시켜야 한다. 첫째, 설명체계의 기본적 개념을 정의할 수 있는 추상적 골격(abstract skeleton)을 가지고 있어야 한다. 둘째, 관찰과 실험의 구체적 자료에 추상적 골격을 연결함으로써 추상적 골격에 경험적 내용을 더해주는 일련의 규칙이 필요하다. 셋째, 보다 친숙한 개념적 자료나 시각적 자료를 활용하여 추상적 골격을 보강해 줄 수 있어야 한다.

이론은 자연현상을 기술하거나 분류하는 데 그치지 않으며, 과거의 일을 설명하고 미래의 일을 예측하는 기능을 가지고 있다. 더 나아가 이론은 자연현상에 대한 실질적인 이해감(sense of understanding)을 제공하며, 어떤 현상이나 사건을 통제할 수 있는 기초로 작용한다(Reynolds, 1971). 이론은 법칙을 설명하는 것으로도 볼 수 있다. 예를 들어, “해가 동쪽에서 뜬다.”는 것은 자연법칙에 해당하는데, 그것을 설명하기 위해서는 지구중심설(천동설)이나 태양중심설(지동설)과 같은 이론이 필요한 것이다.

과학적 이론의 유형은 법칙집합형(set of laws form) 이론, 공리형(axiomatic form) 이론, 인과과정형(causal process form) 이론 등으로 구분할 수 있다(권재술 외, 1998). 법칙집합형 이론은 가장 구조화되지 않은 형태의 이론으로 서로 독립적인 여러 법칙들로 이루어져 있다. 예를 들어, 판구조론은 대륙이동설, 맨틀대류설, 해저확장설 등을 바탕으로 조합된 이론에 해당한다고 볼 수 있다. 공리형 이론은 서로 연관된 정의들과 언명들로 구성되어 있으며, 논리적 체계가 중요하기 때문에 모든 언명이 자연현상과 일치하지 않아도 된다. 가장 전형적인 공리형 이론은 기하학이며, 특수 상대성 이론도 공리형 이론에 속한다. 인과과정형 이론은 공리형 이론과 달리 언명들의 관계가 위계적이지 않고 비교적 대등하며 경험적 증거를 중시하는 특성을 가지고 있다. 또한 법칙집합형 이론이 법칙을 조합한 것에 불과한 반면, 인과과정형 이론은 법칙들의 관계를 인과적으로 설명할 수 있다. 인과과정형 이론의 예로는 관성의 법칙, 가속도의 법칙, 작용 반작용의 법칙을 바탕으로 뉴턴이 정립한 고전역학을 들 수 있다. 발달된 과학적 이론의 대부분은 공리형과 인과과정형

이 복합된 공리적 인과과정형(axiomatic-causal process form) 이론이라 할 수 있다. 예를 들어, 고전역학은 처음에 인과과정형 이론으로 출발했지만, 18세기에 라그랑주(J. Lagrange)와 해밀턴(W. Hamilton)에 의해 뉴턴의 운동법칙을 공리로 삼은 공리형 이론으로 발전했던 것이다.

쿤(Kuhn, 1977)은 이론을 선택하는 기준으로 정확성(accuracy), 일관성(consistency), 범위(scope), 단순성(simplicity), 다산성(fruitfulness) 등의 5가지를 제안한 바 있다. 첫째, 이론은 정확해야 한다. 즉 이론으로부터 연역되는 결과가 현존하는 실험결과나 관찰결과와 일치해야 한다. 둘째, 이론은 일관되어야 한다. 즉 이론 내적으로도 그렇고 그 이론과 관련성이 있으면서 일반적으로 받아들여지고 있는 다른 이론들과도 일관성을 가져야 한다. 셋째, 이론은 그 적용범위가 광범위해야 하는 바, 특히 이론의 결과는 애초에 설명하고자 했던 특정 관찰결과나 법칙, 하위이론들을 뛰어넘어서 확장되어야 한다. 넷째, 이론은 단순해야 한다. 그래서 그 이론이 발견되지 않았다면 개별적으로 고립되거나 혼란스러웠을 현상들을 질서정연하게 정리할 수 있어야 한다. 다섯째, 이론은 새로운 연구결과를 생산할 수 있어야 하는 바, 새로운 현상을 발견하거나 이미 알려진 현상들 간의 미처 알려지지 않은 관계들을 발견해야 한다.

뉴턴스미스(Newton-Smith, 1981)는 과학적 이론을 훌륭하게 만드는 특징으로 다음의 8가지를 거론하고 있다. 첫째, 좋은 이론은 선행 이론이 관찰에서 거둔 성공을 보존해야 한다. 둘째, 좋은 이론은 후속 탐구를 위한 아이디어를 생산하는 데 기여해야 한다. 셋째, 좋은 이론은 우수한 성과를 산출한 발자취(track record)를 가지고 있어야 한다. 넷째, 좋은 이론은 현존하는 다른 이론들과 맞물리거나 그것들을 지지해야 한다. 다섯째, 좋은 이론은 변칙 사례(anomaly)에 용이하게 적응할 수 있도록 매끄러워야(smooth) 한다. 여섯째, 좋은 이론은 내적 일관성을 가지고 있어야 한다. 일곱째, 좋은 이론은 잘 정초된 형이상학적 신념과 양립할 수 있어야 한다. 여덟째, 애매한 기준이긴 하지만, 이론은 단순할수록 유익하다.

앞서 언급했듯이, 이론은 추상적 속성을 가지고 있기 때문에 가시적인 현상이나 용어로 나타내는 데에는 한계가 많다. 이론을 설명하기 위해 모형이나 비유를 종종 사용하는 이유도 이러한 맥락에서 이해할 수 있다. 모형은 우리가 알고 있는 인지적 표상들로 빗대어 표현한 것을 뜻한다. 모형을 사용하면 복잡한 현상이나 새로운 이론을 단순하고 명쾌하게 설명할 수 있다. 모형은 척도(scale) 모형, 상사(analog) 모형, 이론 모형으로 구분된다(조희형 외, 2011). 척도 모형은 모양과 구조는 같지만 크기가 다른 형태를 띤다. 비행기나 자동차에 대한 모형이 그 예에 해당한다. 상사 모형은 비슷한 모양을 만들어 내는 것으로 원자 모형이나 DNA 모형 등을 그 예로

들 수 있다. 이론 모형은 과학자의 머릿속에 구성된 추상적 모형으로 효소 반응을 설명하기 위해 사용되었던 열쇠-자물쇠 모형을 그 예로 들 수 있다.

비유는 모형과 비슷한 역할을 하지만, 보다 기술적인(technical) 측면을 강조한 것이라고 볼 수 있다. 비유에는 은유(metaphor), 직유(simile), 유비 혹은 유추(analogy) 등이 있다. 은유의 대표적인 예로는 원소기호, 분자식, 구조식 등이 있으며, 이온상태를 (+)와 (-) 부호로 표시하는 것도 일종의 은유적 표현으로 볼 수 있다. 전선을 따라 흐르는 전기를 수도관을 통해 흐르는 물에 비유하는 것이나 심장의 기능을 펌프의 기능으로 비유하는 것 등은 직유에 해당한다. 유비는 같은 종류의 것 또는 비슷한 것에 기초하여 다른 것을 미루어 추측하는 일이다. 유비의 대표적인 예로는 신약의 효능을 알아보기 위해 수행하는 동물실험을 들 수 있고, “화성에 물이 있는 것으로 보아 생물체가 있을지도 모른다.”는 진술도 유비에 해당한다. 비유를 복잡한 과학적 개념이나 이론을 쉽게 설명하기 위한 ‘설명적 비유’와 새로운 과학적 발견을 정교화하는 데 사용되는 ‘발견적 비유’로 구분하고, 발견적 비유를 유비로 정의하는 경우도 있다(김영민, 2012).

5) 가설

가설은 어떤 현상에 대한 잠정적인 설명 혹은 시험적인 진술에 해당한다. 가설은 추론을 이끌어내며 그 추론에 대한 시험을 통해 강화되거나 폐기된다. 과학적 탐구에서 가설은 어떤 현상이나 문제에 대한 의문에서 과학적 설명으로 진입할 수 있는 관문의 역할을 하기 때문에 중간적 지식의 성격을 띤다고 볼 수 있다. 가설은 법칙이나 이론과 마찬가지로 복수의 사실들과 개념들 사이의 관계에 관한 진술이지만, 아직 충분히 지지되지 않은 임시적인 성격을 띠고 있다. 세상에 완벽한 이론은 존재하지 않기 때문에 모든 이론이 가설의 지위를 가진다는 주장도 있다.

가설은 추론의 성격에 따라 귀납적 가설과 연역적 가설로 구분할 수 있다(Carin, 1997). 귀납적 가설은 관찰, 측정, 실험을 통해 수집한 자료를 바탕으로 형성되며, 여러 번의 시험을 거쳐 지지되면 법칙이나 이론이 된다. 이 때 법칙이 되는 가설은 일반화 가설, 이론이 되는 가설은 설명 가설로 불리기도 한다. 이와 달리 연역적 가설은 어떤 법칙이나 이론으로부터 도출되며, 시험결과에 따라 해당 법칙이나 이론이 지지되거나 기각된다. 이러한 점에서 가설은 법칙이나 이론이 형성되는 바탕이자 법칙이나 이론을 시험하는 수단으로 기능한다고 볼 수 있다.

또한 가설은 배경지식(background knowledge)과의 관계에 따라 대담한(bold) 가설과 조심스러운 혹은 세심한(cautious) 가설로 구분할 수 있다(Popper, 1959). 조심스러운 가설은 당시의 배경지식에 비추어 그럴듯한 주장을 담고 있는 가설로 프톨

레마이오스(Ptolemaios)가 지구중심설로 행성의 복잡한 운동을 설명하기 위해 주전원(epicycle)을 도입한 것이 그 예가 될 수 있다. 이에 반해 대담한 가설은 배경지식에 나타나 있지 않거나 배경지식과 충돌하는 성격을 띠고 있다. 예를 들어, 코페르니쿠스(N. Copernicus)의 태양중심설은 “지구가 우주의 중심이다.”는 기존의 배경지식과 모순되는 것이었고, 아인슈타인의 일반 상대성 이론은 “빛이 직선으로 운동한다.”는 당시의 배경지식에 포함된 가정에 위배되는 것이었다.

그밖에 가설의 유형으로 거론되는 것으로는 보조(auxiliary)가설과 임시방편적(ad hoc) 가설을 들 수 있다. 보조가설은 이론, 법칙, 다른 가설에 필요한 부가적 가정이나 관찰, 측정, 실험의 전제조건을 말한다. 예를 들어, 갈릴레오가 금성의 삭망 현상을 설명하는 데에는 “금성이 지구와 태양 사이에 있다.” 혹은 “금성을 관찰한 망원경은 믿을 만하다.”는 보조가설이 필요했다. 임시방편적 가설은 어떤 이론이 반박에 부딪혔을 때 그 이론을 옹호하기 위해 임시변통으로 제시하는 무리한 보조가설을 지칭한다. 예를 들어, 갈릴레오가 망원경을 통해 달의 표면이 매끄럽지 않고 울퉁불퉁하다는 점을 발견했을 때 아리스토텔레스(Aristoteles)를 신봉하는 학자들은 눈에 보이지 않는 에테르가 달을 둘러싸고 있다는 임시방편적 가설로 대응한 바 있다.

나. 과학지식의 특성

과학지식은 매우 다양한 특성을 가지고 있다. 과학지식은 자연현상을 대상으로 한다, 과학지식은 경험적 사실에 바탕을 둔다, 과학지식은 논리적 체계를 가지고 있다, 과학지식은 일반화를 지향한다, 과학지식은 명료한 표현을 지향한다, 과학지식은 다른 지식에 비해 신뢰성이 높다 등등 과학지식의 특성에 대한 진술은 끝없이 이어질 수 있다. 여기서는 과학지식의 특성 중에서 가장 논의가 집중된 주제인 관찰의 이론의존성(theory ladenness)²⁾과 과학지식의 가변성에 대해 살펴보기로 한다.

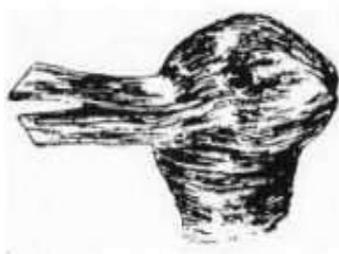
1) 관찰의 이론의존성

관찰은 감각기관과 인지구조에도 의존하지만 이론에도 의존하는 특성을 가지고 있다(권재술 외, 1998). 관찰의 감각기관 의존성이나 인지구조 의존성은 대부분의 사람에게 공통된 것이지만, 관찰의 이론의존성은 어떤 사람이 가지고 있는 이론에 따라 관찰결과에 대한 해석이 달라진다는 주장이라 할 수 있다. 관찰의 이론의존성은 동일한 현상이나 사물을 보더라도 각자의 배경지식이나 이론에 따라 그 결과를

2) 한국과학철학회는 ‘이론적재성’이라는 번역어를 제안하고 있지만, 이 책에서는 아직까지 널리 사용되고 있는 ‘이론의존성’을 채택하기로 한다.

다르게 진술하는 것으로 정의할 수 있다.

헨슨(Norwood R. Hanson)은 형태주의 심리학(gestalt psychology)의 연구성과를 받아들여 그것을 과학적 관찰의 경우로 확장시켰다(Hanson, 1958). 형태주의 심리학에서는 동일한 그림이 복수의 대상 혹은 사건으로 보일 수 있다는 점을 강조한다. <그림 2-2>에서 보듯이, 동일한 하나의 그림이라도 관찰자에 따라 다르게 해석될 수 있다. 왼편의 그림에서는 토끼와 오리를, 오른편의 그림에서는 노파와 처녀를 발견할 수 있는 것이다.



<그림 2-2> 관찰의 이론의존성을 보여주는 그림

헨슨이 제안한 사례 중에는 지구중심설을 옹호했던 티코 브라헤(Tycho Brache)와 태양중심설을 주장했던 케플러(J. Kepler)의 가상 대화가 유명하다. 두 사람이 아침 산책을 나와 푸른 들판의 지평선에서 무엇인가 환하게 떠오르는 모습을 보고 있었는데, 그 때 티코가 “태양이 떠오르고 있군.”이라고 말하자 케플러는 “지구가 회전하고 있는 것이죠.”라고 대꾸했다는 것이다. 헨슨은 이러한 예를 통해 과학적 관찰의 경우에도 관찰자의 진술은 그가 어떤 이론을 받아들이고 있는냐에 따라 결정된다고 주장했다.

관찰의 이론의존성은 관찰의 객관성에 대한 반론의 성격을 지니며, 과학적 훈련에 서로 상당한 의미를 갖는다. 가령 의학지식이 없는 일반인은 X선 사진을 들여다보아도 어디에 이상이 있는지 알기 어렵지만, 의사나 방사선 전문가는 X선 사진을 보고 신경 쓰지 않아도 되는 부분과 수상한 부분을 적절히 가려낸다. 이와 마찬가지로 거품상자로 측정된 여러 소립자의 궤적이 무엇을 의미하는지 알기 위해서는 상당한 과학적 훈련을 받아야 한다. 이처럼 관찰의 이론의존성은 ‘그냥 보는 것’과 ‘과학적으로 보는 것’ 사이에 중요한 차이가 있다는 점을 시사하고 있다.

그러나 모든 관찰이 이론의존성을 가진다는 주장에는 동의하기 어렵다. 예를 들어, 1800년에 윌리엄 허셜(William Herschel)이 적외선을 발견한 사례를 살펴보자.

그는 천문 관측을 위해 각기 다른 색의 필터를 사용했는데, 어느 날 우연히 서로 다른 필터 아래 손을 놓았을 때 자신의 손이 느끼는 열의 정도에 차이가 있다는 점을 알아차렸다. 이로 인해 허셜은 다른 색깔의 광선이 전달하는 열의 투과와 흡수에 대해 탐구하게 되었으며, 그것은 눈에 보이지 않은 광선인 적외선을 발견하는 성과로 이어졌다. 이처럼 허셜이 적외선을 발견하는 과정에서는 별다른 이론이 필요하지 않았다. 허셜의 적외선 발견은 관찰이 반드시 이론에 의존적인 것이 아니라 관찰이 이론으로부터 독립해 있다는 점을 지지하는 사례로 간주되고 있다(Hacking, 1983).

2) 과학지식의 가변성

과학지식은 절대불변의 진리가 아니라 시대에 따라 변해 왔으며 앞으로도 변화할 가능성을 가진다. 옛날에는 지구가 우주의 중심이라고 믿어졌지만, 근대에 들어서는 지구가 태양 주위를 공전하는 여러 행성 중 하나일 뿐이라는 점이 밝혀졌다. 더 나아가 오늘날에는 태양계가 속해 있는 우리 은하가 1,000억 개가 넘는 은하 중 하나에 불과하다는 사실도 인정되고 있다.

사실상 과학의 역사는 과학지식의 가변성으로 가득 차 있다(김영식·임경순, 2007). 예를 들어, 17세기에는 하비(W. Harvey)에 의해 혈액순환설이 발견되면서 생리학 체계가 변화하였고, 18세기에는 플로지스톤(phlogiston) 이론을 대신해 라부아지에(A. L. Lavoisier)에 의해 새로운 연소이론이 정립되었으며, 19세기에는 열의 본성에 대한 설명이 칼로릭(caloric) 이론에서 기체분자운동론으로 변화하였다. 20세기에 들어서는 고전역학이 양자역학으로 전환되는 가운데 원자모형도 지속적인 변화를 경험하였다. 한번 폐기되었던 이론이 다시 부활하는 경우도 있다. 빛의 본성에 대한 이론은 입자설이 지배적이었다가 파동설로 변화된 후 오늘날에는 빛이 입자와 파동의 이중성을 가지는 것으로 해석되고 있는 것이다.

이처럼 과학지식은 원칙적으로 항상 수정이 가능한 상태에 있다. 우리가 접하는 많은 과학지식은 현재까지 알려진 다양한 현상 중에 많은 것을 잘 설명하며 새로운 문제를 해결하는 데 효과적이기 때문에 받아들여지고 있는 것이다. 그러나 새로운 문제의 해결에 실패하고 그러한 현상이 누적되는 가운데 더 나은 설명을 제시하는 이론이 나타난다면 기존의 과학지식은 얼마든지 대체될 가능성을 가지고 있다. 과학지식은 절대적인 진리가 아니기에 끊임없이 변화되고 수정되는 것이다.

이와 같은 과학지식의 가변성에는 어렵지 않게 수긍할 수 있지만 과학지식이 어떤 식으로 변화하는가에 대한 견해에는 상당한 차이가 있다. 과학지식의 변화에 대한 모형으로는 누적적(cumulative) 모형, 진화적(evolutionary) 모형, 혁명적 혹은 격

변적(revolutionary) 모형 등을 들 수 있다(Kourany, 1987; 조희형 외, 2011). 이상의 모형들은 이후에 살펴볼 과학철학과도 연관되어 있는데, 누적적 모형은 논리실증주의, 진화적 모형은 포퍼(Karl R. Popper)와 라카토슈(Imre Lakatos), 혁명적 모형은 쿤(Thomas S. Kuhn)과 파이어아벤트(Paul Feyerabend)의 입장을 보여준다고 할 수 있다.

누적적 모형은 이미 형성된 지식체계 속에 새로운 사실, 개념, 법칙, 이론 등이 계속 축적되면서 과학지식이 발전한다고 보는 관점이다. 이처럼 누적적 모형은 과학지식이 발전하는 과정에서 기존 지식이 계속 보존된다는 가정을 깔고 있기 때문에 보존적(conservative) 모형으로 불리기도 한다. 누적적 모형은 많은 과학교과서들이 암묵적으로 채택하고 있는 입장으로도 볼 수 있다.

진화적 모형은 과학의 역사에는 언제나 다양한 경쟁 이론들이 존재하는데, 그 중에서 다양한 시험을 이겨내고 과학자사회에 잘 적응한 이론만이 선택되어 새로운 과학지식을 이룬다는 관점이다. 과학지식에 대한 진화적 모형은 다윈(C. Darwin)의 진화론과 유사한 설명방식을 가지고 있다. 진화된 생물이 조상의 특성을 많이 포함하고 있지만 다른 종으로 분류될 만큼 서로 다르듯이, 새로 진화한 과학지식도 이전의 지식을 상당 부분 계승하고 있지만 이전과 다른 내용이나 문제도 가지고 있는 것이다.

혁명적 모형은 기존 과학지식의 점진적인 변화나 개량으로 새로운 과학지식이 출현하는 것이 아니라 새로운 과학지식이 기존의 과학지식을 불연속적으로 대체한다는 점에 주목하고 있다. 과학의 본질적인 변화는 어떤 이론이 포기되고 새로운 이론이 그 자리를 메움으로써 이루어진다는 것이다. 이와 함께 혁명적 모형은 과학이 혁명의 국면을 맞이하는 동안 개념, 이론, 방법 등이 개별적으로 변화하는 것이 아니라 동시에 교체된다는 점을 강조하고 있다.

다. 과학적 방법

과학적 방법은 과학적 문제를 해결하기 위한 원리나 절차와 관련되어 있으며, 과학지식을 형성하거나 그것의 타당성을 시험하는 준거가 된다. 과학적 방법의 유형에는 연역법(deductive method), 귀납법(inductive method), 가설연역법(hypothetical deductive method), 귀추법(abductive method) 등이 있으며, 이와 같은 논리적 추론 이외에 사회적 합의(social consensus)가 강조되기도 한다. 과학적 방법에는 왕도가 없으며 모든 과학적 방법에는 장단점이 있기 때문에 과학적 문제의 성격에 따라 적절한 방법을 사용하는 것이 필요하다.

1) 연역법

이미 증명된 하나 또는 둘 이상의 명제를 전제로 하여 새로운 명제를 결론으로 이끌어내는 것을 연역(演繹, deduction)이라 하며, 이러한 연역의 방법과 절차를 논리적으로 체계화한 것을 연역법이라 한다.

연역법의 전형적인 형식은 아리스토텔레스가 처음으로 개발했다고 알려져 있는 삼단논법(syllogism)이다. 다음 예가 보여주는 바와 같이, 삼단논법은 대전제, 소전제, 결론으로 이루어져 있다. 이 때 결론의 주어 개념을 소개념, 결론의 술어 개념을 대개념, 대전제와 소전제에 공통으로 포함되어 두 전제를 연결하는 개념을 매개념이라 한다.

사람은 누구나 죽는다 대전제
소크라테스는 사람이다 소전제

소크라테스는 죽는다 결론

과학에서 주로 활용되는 연역법의 예를 들면 다음과 같다. 여기서 대전제는 법칙이나 이론에 해당하고, 소전제는 초기 조건에 해당하며, 결론은 설명이나 예측의 형태로 나타난다.

모든 물체는 공중에서 놓으면 떨어진다 법칙과 이론
이것은 물체이다 초기 조건

이 물체도 떨어질 것이다 설명과 예측

연역법에서 전제들과 결론은 필연적인 관계를 맺고 있으며, 전제들이 참이고 논증의 과정이 타당하면 반드시 참의 결론이 도출된다. 반면에, 그 전제가 참일지라도 추론의 과정이 타당하지 않으면 허위의 결론이 도출되며, 전제와 결론이 허위일지라도 그 논증과정이 타당한 경우도 있다. 연역법은 전제에 없었던 새로운 사실을 생산하지는 못하며, 이미 전제 속에 포함되어 있는 정보를 명확하고 새롭게 도출해 낼 뿐이다. 이처럼 연역법은 결론의 내용이 이미 전제 속에 포함되어 있다는 점에서 진리보존적 추론(truth-preserving inference)의 성격을 지닌다.

연역법은 논리적 일관성과 체계성을 가지고 있는 장점이 있다. 연역법이 가장 널리 사용되는 학문 분야는 수학이다. 수학에서는 당연히 옳다고 간주되는 몇 가지 공리나 정의에서 중요한 정리를 유도한다. 예를 들어, 평행선의 공리로부터 삼각형

의 내각이 180도라는 정리를 얻을 수 있다.³⁾ 또한 데카르트(R. Descartes)가 “나는 생각한다. 그러므로 나는 존재한다(cogito, ergo sum).”라는 원리를 바탕으로 자연현상에 대한 지식체계를 세운 것이나 아인슈타인이 상대성 원리와 광속도 불변의 원리를 바탕으로 특수 상대성 이론을 도출한 것도 연역법에 해당한다고 볼 수 있다. 어떤 행위에 대한 윤리적 판단도 대부분 연역법에 입각하고 있다. 개별 행위의 유형을 포괄하는 보편적 규범에 기초해 옳고 그름을 판단하는 것이다.

연역의 출발점이 되는 최초의 명제는 결코 연역에 의해 도출될 수 없다. 그것은 결국 인간의 다양한 경험을 일반화하는 과정을 통해서 형성될 수밖에 없는 성격을 띠고 있다. 따라서 실제의 과학적 탐구가 순수하게 연역적 형태로 이루어지기는 매우 어렵다. 오늘날에는 전제로 삼은 가설을 시험하기 위해 그 가설에서 몇 개의 명제를 연역한 후 관찰이나 실험을 수행하는 가설연역법이 널리 사용되고 있다.

2) 귀납법

개별적인 특수한 사실이나 원리로부터 그러한 사례들이 포함되는 좀 더 확장된 일반적 명제를 이끌어내는 것을 귀납(歸納, induction)이라 하며, 이러한 귀납의 방법과 절차를 논리적으로 체계화한 것을 귀납법이라 한다.

특수한 사례로부터 일반적 명제를 도출하는 것은 일찍이 아리스토텔레스에게서 출발하지만, 귀납적 방법을 본격적으로 제창한 사람은 17세기 영국의 철학자인 베이컨(F. Bacon)이라 할 수 있다. 아리스토텔레스와 달리 베이컨은 사실을 수집하는 원천으로 일상적인 경험 이외에 인위적인 실험도 포함시켰으며, 몇 가지 사실에서 성급한 일반화에 이르는 대신 많은 사실을 수집하고 존재표(存在票), 부재표(不在票), 정도표(程度票)를 통해 체계적으로 분류한 후 자연현상의 규칙성을 찾아야 한다는 점을 강조했다(송성수, 2012).

귀납적 추론에는 여러 가지 유형이 있다. 여론조사와 같이 표본적인 관찰이나 실험에 근거해 일반적인 결론을 이끌어내는 통계적인 추론도 있고, 사물이나 사건의 유사성에 근거하여 어떤 결론을 끌어내는 유비적인 추론도 있다. 과거에 나타났던 일에 근거해 미래에 어떤 일이 발생할지를 예측하기도 하고, 현재의 사실에 근거하여 과거의 사실에 대한 결론을 이끌어내기도 한다. 이처럼 귀납은 주어진 사실이나 현상에 근거해 새로운 정보와 지식을 얻을 수 있으므로 일상생활에서도 흔히 나타

3) 수학은 기본적으로 명제(proposition)를 다루는데, 명제에는 공리(axiom), 정의(definition), 정리(theorem) 등이 있다. 공리는 “두 점을 지나는 직선은 하나뿐이다.”와 같이 증명 없이 참으로 받아들여지는 명제이다. 정의는 “a라는 성질을 갖는 것을 A라고 부르겠다.”는 식으로 약속을 한 것으로 언제나 참이다. 정리는 증명에 의해 참과 거짓을 구분할 필요가 있는 명제로 우리가 수학을 공부하면서 증명을 하는 것은 모두 정리에 해당한다.

나는 사고방식이다.

다음의 예는 귀납법의 전형적인 형식을 보여주고 있다.

- 서울에 있는 까마귀는 검다 전제1
 - 부산에 있는 까마귀도 검다 전제2
 - 뉴욕에 있는 까마귀도 검다 전제3
 - 런던에 있는 까마귀도 검다 전제4
-
- 모든 까마귀는 검다 결론

귀납법은 기본적으로 관찰과 실험에서 얻은 부분적이고 특수한 사례를 근거로 전체에 적용시키는 이른바 ‘귀납적 비약(inductive leap)’을 통해 이루어진다. 귀납법에서는 전제들이 결론을 이끌어내는 데 기여하지만, 전제가 결론의 필연성을 논리적으로 확립해 주지는 못한다. 위의 예에서 서울, 부산, 뉴욕, 런던에 있는 까마귀가 검다고 해서 반드시 모든 까마귀가 검으라는 법은 없는 것이다. 대신에 결론이 이미 전제 속에 포함되어 있는 연역법과 달리 귀납법의 결론에는 전제에 없는 새로운 사실이 추가된다. 이처럼 귀납법은 사실적 지식을 확장해 주는 내용확장적 추론(ampliative inference)의 성격을 띤다.

위의 예는 귀납법의 형식을 지극히 단순화시킨 것이고, 실제로 귀납법이 적용되기 위해서는 다음의 세 가지 조건을 충족시켜야 한다. 첫째, 일반화의 기초가 되는 관찰의 수가 많아야 한다. 둘째, 관찰은 다양한 조건 하에서 반복될 수 있어야 한다. 셋째, 관찰언명이 보편법칙과 모순되지 않아야 한다. 이를 종합하면 다음과 같은 귀납의 원리(principle of induction)를 도출할 수 있다. “많은 수의 A가 다양한 조건의 변화 아래서 관찰되었고, 관찰된 A가 모두 예외 없이 B라는 성질을 가지고 있다면, 모든 A는 B라는 성질을 가지고 있다”(Chalmers, 1999). 이러한 귀납의 원리에도 상당한 문제점이 있는데 이에 대해서는 논리실증주의를 논의할 때 살펴보도록 하겠다.

귀납법은 비록 전제와 결론 사이가 개연적이긴 하지만 과학에서 새로운 사실을 수집하는 데 매우 효과적인 방법이다. 과학은 기본적으로 새로운 사실이 확장되는 가운데 발전해 왔으며, 특히 과학 분야의 초기 단계에서는 귀납법이 매우 효과적인 방법으로 활용되어 왔다. 예를 들어, 빛, 열, 전기, 자기 등의 분야는 16-17세기에 광범위한 사실 수집을 바탕으로 출현한 후 19세기에 수학적 방법이 활용됨으로써 체계적인 이론으로 구성될 수 있었다(Kuhn, 1977). 또한 지질학이나 생물학의 경우에도 18세기까지는 주로 분류학 위주로 발전된 후 19세기 이후에 귀납적 방법을 바탕으로 여러 이론들이 제안되었고 볼 수 있다. 이와 함께 20세기에 들어와 정보

처리를 더욱 용이하게 해 주는 기술이 발달하면서 귀납법의 영향력이 더욱 높아지고 있다는 점에도 주목할 필요가 있다.

3) 가설연역법

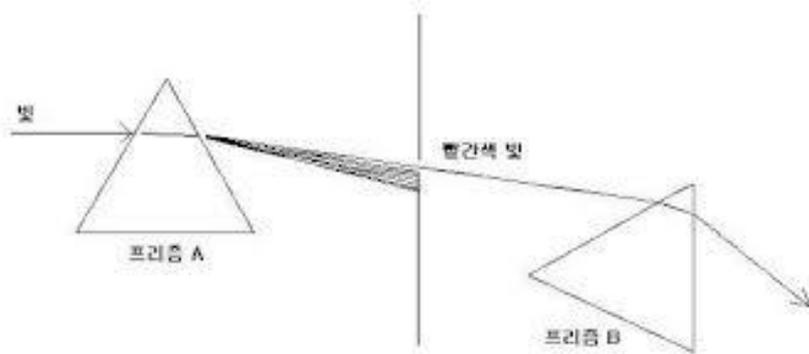
가설연역법은 어떤 문제를 해결하기 위해 특정한 사실이나 이론을 바탕으로 가설을 설정한 후 그 가설로부터 관찰이나 실험 결과를 연역적으로 도출한 다음 그 진위를 확인하는 방법에 해당한다. 이 때 가설이 경험적 증거에 의해 지지되면 그 가설은 이론이나 법칙의 지위로 승격될 수 있으며, 그렇지 않은 경우에는 그 가설이 폐기된다. 가설이 폐기되면 그것을 수정하거나 새로운 가설을 제안하여 다시 시험하는 과정을 밟을 수 있다.

가설연역법은 연역법이나 귀납법과 구별되는 과학적 방법이다. 연역법이 전제를 참으로 가정하는 것과 달리 가설연역법은 전제의 진위에 관심을 둔다. 또한 가설연역법에서는 경험적 가설이 귀납 추론에 의해 형성되지 않고 다양한 방법을 통해 창안되는 성격을 띠고 있다.

가설연역법은 뉴턴이 프리즘 실험을 통해 색깔 이론을 정립하는 과정에서 비롯된 것으로 평가받고 있다(Losee, 1993). 그는 과학적 절차가 귀납의 단계와 연역의 단계를 모두 포함해야 한다고 주장하면서 가설연역법에 해당하는 ‘분석과 종합의 방법’을 제창하였다. 뉴턴은 프리즘을 통과한 태양광의 스펙트럼을 암실의 벽면에 투사해 보았다. 그 실험을 바탕으로 그는 분석의 방법을 활용하여 태양광이 서로 다른 색깔의 광선들로 이루어져 있으며 프리즘에 의해 고유한 각도로 굴절한다는 가설을 도출하였다.⁴⁾ 이어 뉴턴은 종합의 방법을 활용하여 프리즘을 통해 특정한 색깔의 광선이 그 색깔에 고유한 굴절각으로 휘게 되고 다른 색깔로 변할 수 없다고 추론하였다. 그는 특정한 색깔의 광선을 두 번째 프리즘에 통과시킴으로써 자신의 가설을 입증하였다.⁵⁾

4) 여기서 뉴턴은 ‘가설’ 대신에 ‘원리’라는 용어를 사용하였다. 그는 “나는 가설을 만들지 않는다(hypotheses non fingo).”는 말을 남기기도 했는데, 그것은 자신이 데카르트와 달리 눈에 보이지 않는 미시적 메커니즘을 설명하지 않겠다는 의미로 풀이된다. 그러나 오늘날의 관점에서 보면 뉴턴은 많은 가설을 바탕으로 자신의 과학체계를 만들었다고 평가할 수 있다.

5) 과학이나 과학철학에서 사용하는 용어는 일상생활에서 접하는 용어와 그 의미가 다른 경우가 적지 않다. 증명(proof), 검증(verification), 입증(confirmation)은 그 대표적인 예이다. 증명은 수학이나 논리학과 같은 형식과학에서 주로 사용되는 용어이다. 검증과 입증은 논리적 형식보다는 경험적 사실을 중시하는데, 검증은 경험적 증거에 의해 완전히 지지되는 경우를, 입증은 경험적 증거에 의해 확률적으로 지지되는 경우를 의미한다. 이처럼 검증은 매우 강한 의미를 담고 있기 때문에 물리학, 화학, 생물학, 심리학 등과 같은 경험과학에서는 입증이란 표현을 자주 사용한다. confirmation을 확증으로 번역하는 경우도 있으나, 확증은 확실한 증명 혹은 확실한 증거라는 어감을 주므로 과학이나 과학철학에서는 적절한 번역어로 보기 어렵다.



<그림 2-3> 뉴턴의 이중 프리즘 실험에 대한 개념도

← 이 그림을 출판사에서 다시 그려주세요.

가설연역법은 과학의 역사에서 새로운 이론이 등장하는 데 중요한 역할을 담당해 왔다. 하비의 혈액순환설과 아인슈타인의 일반 상대성 이론이 그 예가 될 수 있다. 하비는 맥박이 뛰는 횟수와 방출되는 피의 양을 고려하여 피가 소모되는 것이 아니라 순환한다는 가설을 설정하였고, 결찰사(ligature)로 팔을 동여매는 실험을 통해 그 가설을 입증하였다. 아인슈타인은 1916년에 일반 상대성 이론을 발표하면서 자신의 이론을 확인할 수 있는 사례로 시공간이 휘 수 있다는 점을 제시하였고, 그것은 1919년의 개기일식 때 태양 주변에서 빛이 휘는 현상이 관측됨으로써 입증되었다. 왓슨(J. Watson)과 크릭(F. Crick)이 1953년에 DNA 이중나선 구조를 규명한 것도 가설연역법의 일종이라 볼 수 있다. 당시에는 DNA가 유전 물질이라는 점이 알려져 있었지만 그 메커니즘은 밝혀지지 않고 있었다. 왓슨과 크릭은 유전의 메커니즘을 규명하기 위하여 X선 결정학의 증거를 바탕으로 DNA가 이중나선 구조를 가진다는 가설을 설정했다. 그것은 염기의 배열, 사슬의 수, 결합의 형태 등을 모두 포괄적으로 설명할 수 있었고, 이후에 등장한 경험적 증거들에 의해 지지될 수 있었다.

가설연역법은 사실의 확장이 일어나는 귀납법의 장점과 논리적 엄밀성을 강조하는 연역법의 장점을 두루 갖추고 있다. 이에 따라 많은 학자들이 우수한 과학적 방법으로 가설연역법에 주목해 왔다. 예를 들어, 논리실증주의자들은 과학적 사실의 확장을 설명하기 위해 귀납법과 함께 가설연역법에 주목하였고, 포퍼의 반증주의도 기본적으로 가설연역법에 기반을 두고 있다. 이와 함께 가설연역법은 과학적 방법의 여러 면모를 잘 보여주기 때문에 과학교육에서 과학적 탐구의 방법으로도 널리 활용되고 있다.

4) 귀추법

귀추(歸推, abduction)는 주어진 사실에서 시작해 가장 그럴듯한 혹은 최선의 설명을 추론하는 것에 해당한다. 귀추법은 19세기 실용주의 철학자인 피스(Charles S. Peirce)에 의해 귀납법이나 연역법과 구별되는 추론의 방법으로 제안되었다. 20세기에 들어서서는 과학철학자인 헨슨과 과학교육학자인 로슨(Anton E. Lawson)에 의해 귀추법에 대한 보다 세련된 설명이 시도되었다.

피스는 다음의 예를 통하여 연역, 귀납, 귀추가 각각 어떻게 삼단논법으로 형식화될 수 있는지, 그리고 그 차이는 무엇인지를 설명하였다. 피스에 따르면, 연역은 어떤 것이 반드시 그렇다는 것을 증명하고, 귀납은 어떤 것이 그럴 확률이 많다는 것을 보여주는 반면, 귀추는 어떤 것이 무엇일지도 모른다는 것을 제안한다.

[연역]

규칙 - 이 자루로부터 나온 콩들은 모두 흰색이다.
사례 - 이 콩들은 이 자루로부터 나온 것이다.
결과 - 이 콩들은 흰색이다.

[귀납]

사례 - 이 콩들은 이 자루로부터 나온 것이다.
결과 - 이 콩들은 흰색이다.
규칙 - 이 자루로부터 나온 콩들은 모두 흰색이다.

[귀추]

규칙 - 이 자루로부터 나온 콩들은 모두 흰색이다.
결과 - 이 콩들은 흰색이다.
사례 - 이 콩들은 이 자루로부터 나온 것이다.

헨슨(Hanson, 1958)은 귀추법의 형식을 다음과 같이 정형화하였다.

- ① 어떤 놀라운 현상 P가 관찰된다.
- ② 만약 가설 H가 참이라면 P는 당연한 것으로 설명될 수 있다.
- ③ 따라서 가설 H가 참이라고 생각할 만한 좋은 이유가 있다.

헨슨에 따르면, 귀추법은 과학자들이 놀라운 현상을 발견하는 것에서 시작된다. 현상이 놀랍다는 것은 과학자가 해결해야 할 문제로 인식하는 것이며, 과학자는 새로운 가설이나 규칙을 제안함으로써 문제의 해결을 시도하게 된다. 만약 가설이 현상에 대한 설명력을 가진다면 그 가설을 이론이나 법칙으로 승인할 만한 좋은 이유가

된다.

로슨(Lawson, 1995)에 따르면, 귀추는 이미 알고 있는 경험 상황과 미지의 현 상황의 유사성을 바탕으로 경험 상황의 설명자를 차용하여 현 상황을 설명하는 추론의 한 유형이다. 그는 다음의 예를 통해 귀추의 과정을 ① 관찰의 단계, ② 인과적 의문 생성의 단계, ③ 원인 혹은 가설의 생성 단계로 구분하고 있다.

- ① 잘 타고 있던 바비큐 불이 꺼졌다.
- ② 왜, 바비큐 불이 꺼졌을까?
- ③ 바비큐 불은 바람이 불어서 꺼진 것이다.

위에서 바비큐 불이 꺼진 원인으로 바람을 생각할 수 있었던 것은 바비큐 불과 유사한 종류의 불꽃이 바람에 의해 꺼진 이전의 경험을 빌려와서 적용했기 때문이다. 즉, 가설은 현재 상황을 관찰해서 곧바로 만들어지는 것이 아니라 현재 상황과 비슷한 과거의 경험에서 비롯된다는 것이다.

귀추법에 대한 과학사의 사례로는 케플러가 자주 거론되고 있다. 케플러는 화성의 궤도가 타원이라는 가설에서 시작하여 관측을 통해 확인할 수 있는 사실들을 연역해 내지 않았다. 오히려 케플러는 티코 브라헤가 남긴 관측 자료로부터 그것을 잘 설명할 수 있는 가설로 타원 궤도를 제안했던 것이다. 또한 케플러의 타원 궤도에 대한 가설이 관측 자료를 단순히 통계적으로 종합한 귀납법에 입각하고 있다는 평가도 부당하다. 케플러는 관측 자료를 설명하기 위해 원을 포기한 후 행성의 궤도가 달걀형이라는 가정에서 출발했지만 그것이 여의치 않자 다시 타원형을 도입했던 것이다.

과학의 역사에서 귀추법의 사례는 자주 발견할 수 있다. 다윈이 종의 기원에 대한 최선의 설명으로 자연선택설을 제안한 것이나 케쿨레(F. A. Kekule)가 뱀들이 꼬리를 물고 있다는 꿈을 바탕으로 벤젠의 분자구조를 설명한 것 등이 귀추법의 예가 될 수 있다. 또한 귀추법은 일상생활에서도 자주 접할 수 있는 추론에 해당한다. 의사가 몇 군데의 진찰을 통해 질병의 가능성을 진단하는 것이나 경찰이 범죄 현장에서 증거를 토대로 범인을 추측하는 것도 귀추법에 속한다고 볼 수 있다(김영민, 2012).

5) 사회적 합의

최근에는 과학이 특정한 방법으로 정당화될 수 있는 것이 아니라 사회적 합의의 산물이라는 견해도 설득력을 높여가고 있다. 오늘날 실제적인 과학 활동은 같은 분

야에 종사하는 사람에 의해 연구논문이 심사되는 동료심사(peer review)에 크게 의존하고 있다. 동료심사를 통해 해당 논문이 적절한 과학적 방법을 사용하고 있는지, 의미 있는 과학지식을 산출하고 있는지 등이 평가되는 것이다. 또한 기후변화에 관한 과학적 사실은 1988년에 유엔 산하의 기구로 조직된 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)을 통해 과학자들의 합의를 도출함으로써 구성되고 있다. 더 나아가 당시의 사회적 환경이나 지배적인 학설에 잘 부합하는 과학이 살아남거나 사회적 문제의 해결에 기여할 수 있는 과학이 높이 평가되는 현상도 목격할 수 있다.

명왕성의 사례는 이러한 점을 잘 보여준다. 명왕성은 1930년에 발견된 이후 태양계의 9번째 행성으로 인정받아 왔지만, 2006년에 국제천문연맹으로부터 행성의 지위를 박탈당하여 왜소행성(dwarf planet)으로 분류되었던 것이다. 또한 17세기에는 하위헌스(C. Huygens)가, 19세기 초에는 영(T. Young)이 빛의 파동설을 제안했지만, 당시에는 빛의 입자설을 주장한 뉴턴의 권위를 배경으로 빛의 파동설이 과학자 사회에서 거의 수용되지 못했다(송성수, 2012). 1997년에 프루지너(Stanley Prusiner)가 노벨 생리의학상을 받은 것도 사회적 합의의 산물로 볼 수 있다. 그는 광우병을 유발하는 병원체로 프리온(prion)을 발견했다는 공로로 노벨상을 받았지만, 현재까지도 광우병에 관한 연구논문은 ‘불완전한’ 혹은 ‘논쟁 중인’ 등의 수식어를 사용하는 양상을 보이고 있다. 프루지너의 노벨상 수상은 사회적 문제의 해결에 기여할 것이라는 기대에 의존한 바가 크다고 볼 수 있는 것이다(김기홍, 2009).

사회적 합의는 과학적 방법의 일종으로도 볼 수 있지만 사실상 과학적 방법의 차원을 넘어선다. 왜냐하면 어떤 과학적 방법을 수용할 것인지의 여부 자체가 사회적 합의에 의해 이루어지는 성격을 띠고 있기 때문이다. 고대에는 자연은 신성하며 인간이 개입할 영역이 아니라는 관념이 지배적이었지만, 근대에 들어서는 실험적 방법이 자연의 비밀을 풀 수 있는 열쇠라는 관념이 과학자사회에서 승인될 수 있었다. 이전과 달리 과학교육학에서 과학적 방법의 예로 귀추법이 주목받고 있는 것도 이에 대한 사회적 합의가 이루어진 결과라고 볼 수 있을 것이다.

3. 과학철학의 이해

과학철학의 역사는 아리스토텔레스를 비롯한 고대 학자들로 거슬러 올라갈 수 있다. 근대에 들어서는 영국의 경험론(empiricism)과 대륙의 합리론(rationalism)을 매개로 과학의 성격에 대한 논의가 철학의 중요한 주제로 부상했으며, 갈릴레오나 뉴턴과 같은 과학자들도 과학에 대한 자신의 철학적 견해를 지속적으로 표방해 왔다.

그러나 과학을 대상으로 철학을 하는 과학철학이란 분야가 학문적으로 형성되고 발전된 것은 20세기 초반에 논리실증주의(logical positivism)가 등장한 이후에 있었던 일이라고 볼 수 있다(Losee, 1993; Chalmers, 1999; 장대익, 2008; 박영태 외, 2011). 이 절에서는 논리실증주의와 함께 현대 과학철학의 형성과 발전에 크게 기여한 포퍼, 쿤, 라카토슈, 파이어아벤트, 라우든(Larry Laudan), 갤리슨(Peter Galison) 등의 과학철학을 개관하고자 한다.

가. 논리실증주의

논리실증주의는 과학을 최상의 지식으로 보는 실증주의의 전통을 따르고 있으며, 과학의 본성으로 논리와 경험을 중시하기 때문에 논리경험주의(logical empiricism)로도 불린다. 논리실증주의는 한 사람의 이론이 아니라 여러 사람들의 사상이나 운동에 해당한다. 논리실증주의는 슈리크(Moritz Schlick), 노이라트(Otto Neurath), 카르납(Rudolf Carnap), 괴델(Kurt Gödel), 파이글(Herbert Feigl) 등이 참여한 빈 학단(Wiener Kreis; Vienna circle)을 주축으로 라이헨바흐(Hans Reichenbach), 험펠(Carl G. Hempel) 등으로 대표되는 베를린 학파가 가세한 철학적 사조이다.

1) 논리실증주의의 철학적 토대

빈 학단은 1929년에 ‘과학적 세계관’이란 제목이 붙은 선언문을 발표했는데, 그것은 논리실증주의의 공식적 출범을 알린 사건으로 평가되고 있다(Jørgensen, 1951; 장대익, 2008).

선언문에서 그들은 철학자들의 애매한 글쓰기가 철학을 망쳐놓았다고 진단하면서 논리적 분석(logical analysis)만이 철학적 문제들을 해결하는 방법이라고 강조했다. 예를 들어, 라이헨바흐는 헤겔(Georg Hegel)의 ‘이성’ 개념이 허튼 소리에 불과하다고 일축했고, 카르납은 하이데거(Martin Heidegger)의 ‘무(無)’ 개념이 논리적 이치에 맞지 않는다고 비꼬았다. 논리실증주의자들이 신봉한 철학자는 비트겐슈타인(Ludwig Wittgenstein)이었는데, 비트겐슈타인은 1921년에 발간된 『논리철학논고(Logisch-philosophische Abhandlung)』에서 “말해질 수 있는 것은 명료하게 말해야 하고, 말할 수 없는 것에 대해서는 침묵해야 한다.”고 주장한 바 있다.

이어 논리실증주의자들은 명제의 의미가 참과 거짓을 가리는 방식에 의해서 결정된다고 주장했다. 그들은 의미 있는 명제를 분석 명제(analytic statement)와 종합 명제(synthetic statement)로 나누었다. 분석 명제는 명제의 참과 거짓이 그 명제의 의미 분석을 통해서 결정되는 경우에 해당한다. 가령 “모든 총각은 결혼하지 않은

남성이다.”라는 명제는 언제나 참인데, ‘총각’이라는 단어의 의미 속에 ‘결혼하지 않은 남성’이라는 뜻이 담겨져 있기 때문이다. 종합 명제는 의미 분석만으로 참과 거짓을 가릴 수 없고 경험을 통해 진위가 확인되는 명제이다. 가령 “모든 까마귀는 검다.”와 같은 명제는 까마귀가 검은지 아닌지를 직접 관찰해 보아야 그 진위를 알 수 있다. 논리실증주의자들에 따르면, 형이상학이나 신학에서 나오는 명제는 분석 명제도 아니고 종합 명제도 아니기 때문에 아무런 의미가 없는 명제에 불과했다.

논리실증주의자들은 다양한 분야의 연구 성과들이 서로 연결되어 궁극적으로는 ‘통일 과학(unified science)’으로 나아가야 한다고 생각했다. 특히 그들은 화학, 생물학, 심리학, 경제학 등에서 나타나는 복잡한 현상들이 궁극적으로 물리학의 법칙들로 환원될 수 있다고 믿었다. 논리실증주의자들이 기획한 통일 과학에 대한 시리즈의 집필진으로 포퍼와 쿤이 포함되었다는 점은 흥미로운 사실이다. 20세기 초 예술계의 바우하우스(Bauhaus) 운동이 논리실증주의와 밀접히 연관되어 있었다는 점도 주목할 만하다. 모든 장식을 혐오하고 가장 기초적인 색상과 형태로 건축물을 설계한다는 발상은 형이상학을 거부하고 기본적인 경험 자료를 통해 과학이론을 구축한다는 논리실증주의와 유사했던 것이다.

2) 귀납주의

논리실증주의자들은 과학과 비(非)과학을 구별하는 과학만의 본성이 있다고 생각하면서 과학의 본성을 과학의 특별한 방법에서 찾았다. 그들은 ‘검증가능성의 원리(verifiability principle)’를 제안하면서 명제의 의미를 안다는 것은 그 명제를 검증할 수 있는 방법이 무엇인지를 아는 것이라고 주장했다. 논리실증주의자들이 처음에 명제를 검증하는 방법으로 주목한 것은 귀납법이었다. 그들은 베이컨의 귀납법을 정교화하는 과정에서 자신들의 과학관을 확립했는데, 그것은 ‘귀납주의(inductivism)’로 불린다.

귀납주의는 다음과 같은 세 단계로 구성되어 있다. ① 자료수집 단계: 관찰과 실험으로부터 사실들을 편견 없이 수집한다. ② 일반화 단계: 수집된 사실들을 귀납 추론을 통해 일반화하여 가설을 얻는다. ③ 가설 정당화 단계: 이 가설로부터 새로운 관찰과 실험 결과들을 연역적으로 이끌어낸 다음 이를 실제 경험 자료와 비교하여 시험해본다. 여기서 ①과 ②는 과학적 탐구에서 가설이 생성 혹은 발견되는 맥락이고, ③은 생성된 가설을 경험에 비추어 그 정당성을 결정하는 맥락에 해당한다.

이러한 방법론은 매우 그럴 듯해 보이지만 심각한 문제점들을 안고 있다(Chalmers, 1999; 장대익, 2008). 귀납주의의 첫 번째 단계와 관련하여 편견 없이 자료를 수집하는 것은 거의 불가능하다. 앞서 ‘관찰의 이론의존성’을 논의하면서 살펴

보았듯이, 과학자들이 아무런 배경지식 없이 자료를 모으는 경우는 거의 없다. 과학자들은 대부분 자신이 지지하는 이론이나 잠정적인 가설을 바탕으로 그것의 인도를 받아 사실들을 수집하는 것이다.

귀납주의의 두 번째 단계인 일반화 단계는 더욱 심각한 문제로 이른바 ‘귀납의 문제’로 알려져 있다. 귀납의 문제는 18세기 영국의 철학자 흄(David Hume)에 의해 본격적으로 제기되었다. 흄에 따르면, 관찰된 몇몇 사례로부터 경험적 일반화로 나아가는 것은 그 수가 아무리 많다 해도 논리적 오류이다. 앞서 귀납법을 논의하면서 언급했던 귀납의 원리를 자세히 살펴보면, ‘많은’ 사례로부터 ‘모든’ 것으로 비약하는 논리적 결함을 가지고 있는 것이다.

이와 관련하여 20세기 영국의 철학자 러셀(Bertrand Russell)은 귀납의 문제를 다음과 같은 ‘칠면조 역설’로 희화화하여 표현했다. 어떤 사람이 칠면조를 기르고 있었다. 그는 하루도 거르지 않고 매일 아침 칠면조에게 먹이를 주었다. 이에 칠면조는 ‘주인은 아침마다 내게 먹이를 주는구나.’라고 생각했다. 100일째 되는 날 아침, 그날도 여전히 칠면조는 음식을 가져다 줄 주인을 기다리고 있었다. 그런데 갑자기 주인은 그날 아침에 먹이를 주는 대신 칼로 칠면조의 목을 잘랐다. 그날이 바로 추수감사절이었기 때문이었다.

이러한 문제점을 피하기 위해 어떤 과학적 주장이 참으로 증명되어야 한다는 요구를 약화시키고 경험적 증거에 비추어 확률적인 참임을 보여주는 것에 만족해야 한다는 제안이 제기되었다. 이 제안을 받아들인다면, 앞서 언급한 귀납의 원리는 “많은 수의 A가 다양한 조건의 변화 아래서 관찰되었고, 관찰된 A가 모두 예외 없이 B라는 성질을 가지고 있다면, 아마도 모든 A는 B라는 성질을 가지고 있다.”로 수정될 수 있다(Chalmers, 1999). 여기서 달라진 것은 ‘모든’이란 단어 앞에 ‘아마도’라는 수식어가 추가된 것뿐이다. 이처럼 수정된 귀납의 원리는 A가 B의 성질을 반드시 갖는다는 것이 아니라 관찰 사례가 많을수록 그럴 개연성이 더 높아진다는 것을 강조하고 있다. 귀납주의가 확률론으로 후퇴한 셈이다.

이와 함께 귀납주의를 실용적 차원에서 정당화하려는 시도도 있었다. 귀납 추론을 통해 우리가 별 문제 없이 살아왔기 때문에 그 추론이 정당화될 수 있다는 것이다. 그러나 이런 정당화는 귀납 추론을 귀납 추론으로 정당화하는 순환의 문제를 안고 있다.

3) 가설연역주의

이러한 배경에서 귀납 추론이 개입되지 않은 과학적 방법론을 개발해야 할 필요성이 대두되었는데, 논리실증주의 내부에서 일차적인 대안으로 제시된 것이 바로

‘가설연역주의(hypothetical-deductivism)’이다(장대익, 2008). 가설연역주의는 다음과 같이 정식화할 수 있다. ① 주어진 문제를 해결하기 위해 추측을 비롯한 온갖 방법을 동원하여 가설을 제시한다. ② 이 가설로부터 새로운 관찰과 실험 결과들을 연역적으로 이끌어낸 다음 이를 경험에 비추어 시험해본다.

이와 함께 논리실증주의자들은 귀납주의에서 한발 물러나면서 검증(verification) 대신에 ‘입증(confirmation)’이라는 개념을 도입하였다. 경험적 증거가 가설을 검증하느냐 아니냐를 더 이상 묻지 말고 대신에 가설을 얼마나 지지하는가를 묻자는 것이었다. 이와 관련하여 카르납은 증명이 완벽하고 명확한 진리를 설정하는 것이라면 보편언명이 결코 증명될 수 없다고 지적한 후, 증명의 개념을 ‘점차적으로 입증이 증가하는 것’으로 대체시키면 보편언명이 연속적인 경험적 증거의 축적에 의해 진리로 입증될 수 있다고 주장하였다(Carnap, 1966).

여기서 주목할 것은 가설연역주의의 첫 번째 단계는 귀납주의와 상당한 차이를 가지고 있지만 가설연역주의의 두 번째 단계는 귀납주의의 세 번째 단계와 마찬가지로 경험에 비준 시험을 강조하고 있다는 점이다. 이와 관련하여 라이헨바흐는 ‘발견의 맥락(context of discovery)’과 ‘정당화의 맥락(context of justification)’을 엄격히 구분하면서 과학철학이 다룰 대상은 정당화의 맥락뿐이라고 주장했다. 그는 발견의 맥락은 철학이 아닌 심리학이나 사회학의 대상이라고 간주했는데, 왜냐하면 정당화의 맥락에는 논리가 있지만 발견의 맥락에는 논리가 없기 때문이다.

그러나 정당화의 맥락에도 상당한 문제점이 남아 있는데, 그것은 ‘검증의 문제’ 혹은 ‘입증의 문제’로 불린다. 표준적인 확률론에 따르면, 관찰 증거가 무엇이든 관계 없이 모든 보편언명의 확률이 0(zero)이라는 결론을 피할 수 없다. 모든 관찰은 수적으로 제한된 사례로 구성되어 있는 반면, 보편언명은 무한히 가능한 경우에 대한 주장을 담고 있다. 관찰 증거에 비추어 볼 때 보편언명의 확률은 유한한 수를 무한한 수로 나눈 값으로 표시된다. 따라서 증거를 구성하는 관찰 사례가 아무리 증가한다 하더라도 그 값은 0이 되는 것이다. 사실상 이 문제는 개별 사례로부터 보편언명으로 나아갈 때 발생하기 때문에 앞서 언급한 귀납의 문제와 동일한 성격을 갖는다.

이처럼 논리실증주의는 과학의 본성을 과학적 방법에서 찾고 귀납주의와 가설연역주의라는 두 척의 배를 띄웠지만, 귀납의 문제를 비롯한 다양한 암초에 부딪혀 점차 가라앉고 말았다. 그러나 논리실증주의자들은 과학의 본성을 본격적으로 탐구하는 것을 자신들의 임무로 삼았으며, 과학철학을 하나의 학문 분야로 정립하는 데 크게 기여하였다. 논리실증주의자들은 세계의 주요 대학에 자리를 잡으면서 많은 후학들을 양성했으며, 몇몇 영향력 있는 저술을 통해 과학철학을 전파하는 데도 주

의를 기울였다(Carnap, 1966; Hempel, 1966). 또한 논리실증주의의 과학에 대한 관점은 표준적 관점(standard viewpoint) 혹은 수용된 견해(received view)로 불리기도 한다(Suppe, 1977). 즉, 아직도 많은 사람들은 과학에 대하여 “과학자들이 관찰이나 실험을 통해 가설이나 이론을 세우고 그것이 참이라는 것을 알아내기 위해 노력한다.”는 관점을 받아들이고 있는 것이다.

나. 포퍼의 반증주의

포퍼는 논리실증주의의 문제점을 극복하기 위하여 반증주의(falsificationism)를 제창하였다. 그는 아인슈타인이 일반 상대성 이론과 함께 그것을 지지하는 사례를 제시하고 그 사례가 반박될 경우에 자신의 이론을 버리겠다고 공언한 것에 큰 감명을 받았다. 포퍼의 과학철학에 대한 대표작으로는 『과학적 발견의 논리(The Logic of Scientific Discovery, 1959)』를 들 수 있는데, 그 책은 1934년에 독일어로 발간된 『탐구의 논리(Logik der Forschung)』를 영어로 옮긴 것이다. 그는 과학철학은 물론 사회철학에도 일가견을 가지고 있어 『열린 사회와 그 적들(The Open Society and Its Enemies, 1945)』을 통해 합리적인 토론과 비판이 가능한 열린 사회를 주장하기도 했다. 포퍼의 철학적 견해는 『추측과 논박(Conjecture and Refutations, 1963)』에 집대성되어 있다.

1) 반증가능성

포퍼는 어떤 과학적 이론이 옳다는 것은 완벽하게 증명할 수 없지만, 그것이 옳지 않다는 것은 확실히 알 수 있다고 주장한다. 예를 들어, “모든 까마귀가 검다.”는 가설은 완전히 증명될 수 없다. 왜냐하면 아무리 많은 까마귀가 검다고 하더라도 앞으로 다른 색깔의 까마귀가 나타나지 않는다는 확실한 보장은 없기 때문이다. 그런데 어느 날 흰 까마귀가 나타난다면 “모든 까마귀가 검다.”는 가설은 옳지 않은 것이 되고 만다. 이처럼 특정한 가설이 경험적 증거에 의해 기각되는 것을 ‘반증(falsification)’이라고 한다.

포퍼의 반증주의가 가진 핵심적인 주장을 요약하면 다음과 같다(장대익, 2008). 우선, 주어진 문제들을 잘 설명하는 것으로 보이는 가설을 제시한다. 그 후 가설을 반박하는 경험적 사례가 발견되면, 그 가설을 곧바로 폐기한다. 그렇지 않은 경우에는 그 가설을 그대로 유지한다. 이 때 가설이 입증되었다고 주장해서는 안 되며, 그저 몇 차례의 혹독한 경험적 시험에 잘 견뎌왔다고 말할 수 있을 뿐이다. 여기서 포퍼는 혹독한 시험에 잘 견뎌왔다는 점을 표현하기 위해 입증 대신에 확인 혹은 방증

(corroboration)이라는 용어를 만들어냈다.

그런데 포퍼는 모든 진술이 반증의 시도에 놓이는 것은 아니라고 지적한다. 아무리 반증을 해보려 해도 반증할 수 있는 사례가 존재하지 않기 때문에 반증 자체가 아예 불가능한 진술이 존재한다는 것이다. 그는 반증이 가능한 진술과 불가능한 진술을 구분한 후 경험적으로 반박될 수 있는 가능성, 즉 반증가능성(falsifiability)을 가진 진술만이 과학적 진술(scientific statement)이라고 규정한다. 포퍼는 과학과 비(非)과학에 대한 구획 기준(demarcation criteria)을 매우 중시했으며, 그 기준으로 반증가능성을 제시했던 것이다.

예를 들어, 다음의 6가지 진술을 보자(Chalmers, 1999).

- ① 수요일에는 비가 오지 않는다.
- ② 모든 물체는 열을 받으면 팽창한다.
- ③ 벽돌을 공중에서 놓을 때, 외부의 힘을 받지 않으면, 벽돌은 아래로 떨어진다.
- ④ 오늘은 비가 오거나 오지 않는다.
- ⑤ 유클리드 기하학에서 원주상의 모든 점은 중심에서 같은 거리에 있다.
- ⑥ 모험적인 투기에서 행운이 온다.

위의 진술 중에서 ①, ②, ③은 반증가능한 진술이고, ④, ⑤, ⑥은 그렇지 않은 진술이다. ①은 어떤 수요일에 비가 내리는 것을 관찰함으로써 반증할 수 있고, ②는 어떤 물체가 열을 받았는데도 팽창하지 않는 경우를 관찰함으로써 반증할 수 있다. ③도 반증가능하다. “벽돌을 놓으면 위로 떨어진다.”는 주장은 비록 관찰에 의해 지지될 수는 없지만 논리적으로 모순은 아니다. ④의 경우에는 반박할 수 있는 관찰이 존재할 수 없고, ⑤는 유클리드 기하학의 정의에 따라 참이다. ⑥은 점쟁이의 책략에 해당하는 것으로 점쟁이가 어떤 사람과 내기를 건다면 항상 이길 수 있다.

이러한 맥락에서 포퍼는 많은 사람들이 과학이라 믿어 왔던 프로이트(Sigmund Freud)의 정신분석 이론과 마르크스(Karl Marx)의 사회주의 이론을 사이비라고 비판했다(Popper, 1963). 예를 들어, 어린이를 익사시키려고 물속에 집어던지는 사람이 있고, 반대로 어린이의 생명을 구하기 위해 물속에 뛰어드는 사람이 있다고 하자. 프로이트는 첫 번째 사람의 행동에 대해서는 억압 본능으로 인한 고통에 그 원인이 있다고 설명할 것이고, 두 번째 사람의 행동에 대해서는 억압 본능이 승화된 것으로 설명할 것이다. 마르크스의 사회주의 이론도 마찬가지로 성격을 띠고 있다. “자본주의가 충분히 발전하면 사회주의화된다.”는 주장은 반증할 수 없는데, 왜냐하면 자본주의가 충분히 발전한 상태가 분명하지 않기 때문이다. 또한 자본주의 국가가 노동자의 복지를 위한 정책을 도입하는 것에 대해서도 자본가들이 곧 일어날 프롤

레타리아 혁명을 저지하거나 지연시키기 위한 방책에 불과하다고 해석할 수 있다.

반증가능성에도 수준이나 정도가 있다. 예를 들어, 다음과 같은 두 개의 법칙이 있다고 하자. ① 화성은 타원형 궤도로 태양 주위를 돈다. ② 모든 행성은 타원형 궤도로 태양 주위를 돈다. 여기서 ②는 ①보다 주장하는 바가 많기 때문에 반증가능성이 높다. 포퍼는 반증가능성의 수준이나 정도를 나타내기 위해 ‘잠재적 반증가능자(potential falsifier)’라는 개념을 도입하면서 잠재적 반증가능자가 많을수록 더욱 포괄적인 주장을 담고 있으며 더욱 좋은 이론이라고 주장한다. 또한 반증가능성은 진술이 명확할수록 더욱 높아진다. 예를 들어, 빛의 초속이 $300 \times 10^6 \text{m}$ 라는 진술보다 $299.8 \times 10^6 \text{m}$ 라는 진술이 더욱 높은 반증가능성을 가지고 있다(Chalmers, 1999). 포퍼에 따르면, 훌륭한 과학자는 반증가능성이 높은 이론을 제시하고 그것을 비판적으로 검토하는 사람이며, 사이비 과학자는 비판에 정면으로 대응하지 않고 계속 변명을 하는 사람이다. 포퍼의 사상을 ‘비판적 합리주의(critical rationalism)’라고 하는 까닭도 여기서 찾을 수 있다.

2) 과학의 진보

포퍼가 생각하는 과학의 진보(progress)는 다음과 같이 요약될 수 있다. 과학은 문제에서 출발하며, 과학자들은 이 문제를 해결하기 위해 반증가능한 과학적 가설을 제시한다. 이러한 가설은 비판을 통해 반증되어 폐기되기도 하고, 어떤 가설은 성공적인 것으로 살아남을 것이다. 그러나 성공적인 가설도 이후에 반증을 받게 되며, 그 경우에는 이미 해결된 문제가 아닌 새로운 문제가 나타난다. 이 문제를 해결하기 위해 또 다른 새로운 가설이 제시되며 그 가설은 다시 새로운 비판과 시험을 받는다. 이러한 과정은 무한히 반복된다. 아무리 엄격한 시험을 거쳤어도 결코 그 이론이 참은 아니다. 하지만 그 이론은 이전의 이론을 반증한 시험을 통과했기 때문에 이전의 이론보다 우수하다고 말할 수 있다. 과학이 이와 같은 오류의 발견이나 시행착오의 과정을 통해 점진적으로 진보한다는 것이다.

특히, 포퍼는 당시의 배경지식과 모순되는 대담한(bold) 추측이 지지되거나 배경지식에 순응하는 조심스러운(cautious) 추측이 반증될 때 과학이 의미 있는 진보를 이룬다는 점을 강조하였다(Popper, 1959). 이에 관한 예로는 코페르니쿠스의 태양중심설과 마이켈슨(A. Michelson)의 광속 측정에 대한 실험을 들 수 있다. 16세기에 코페르니쿠스는 천체의 운동을 체계적으로 설명하기 위하여 태양중심설이라는 대담한 가설을 제안했고, 그것이 다양한 이론적 설명과 경험적 증거에 의해 지지됨으로써 천문학에서 의미 있는 진보가 일어났다. 또한 19세기 말에 있었던 마이켈슨의 실험은 당초의 기대와 달리 빛의 속도가 관측자나 광원의 운동 상태와 관계없이 항

상 일정하다는 점을 보여줌으로써 기존의 에테르 이론이 반증되는 계기로 작용했다. 이와 달리 대담한 추측이 반증되거나 조심스러운 추측이 입증되는 경우에는 과학의 진보에 별다른 기여를 하지 못한다는 것이 포퍼의 생각이었다.

이와 함께 포퍼는 과학의 진보를 위해서는 이론의 임시방편적(ad hoc) 수정이 금지되어야 한다고 지적했다. 예를 들어, “빵에는 영양분이 있다.”라는 이론이 있다고 하자. 만약 프랑스의 한 마을에서 빵을 먹은 사람들이 영양실조에 걸렸다면 그 이론은 반증된다. 이러한 반증을 피하기 위해 “문제시된 프랑스의 마을에서 생산된 특별한 빵을 제외한 모든 빵에는 영양분이 있다.”라는 수정된 이론을 제안할 수 있다. 그러나 이러한 이론은 원래 이론을 시험한 방법으로밖에 시험할 수 없기 때문에 임시방편적으로 수정된 이론에 해당한다. 이에 반해 “특별한 균류를 포함하지 않은 밀로 만든 모든 빵에는 영양분이 있다.”라는 수정은 새로운 시험을 허용하기 때문에 임시방편적 수정이 아니다(Chalmers, 1999).

3) 반증주의의 문제점

반증주의는 논리실증주의와 달리 이론을 지지하는 사례들의 축적에 의해 과학이 발전하는 것이 아니라 반증 사례를 매개로 과학이 진보한다는 입장을 취하고 있다. 그러나 반증주의는 논리실증주의와 마찬가지로 관찰한 사실이 믿을 만하다는 점에 대해서는 의견을 같이 하고 있다. 이에 따라 논리실증주의에 대한 비판 중에 관찰의 이론의존성에 대한 논의는 반증주의에도 동일하게 적용될 수 있다. 관찰이 이론의존적인 특성을 가지고 있다면 사실을 통해 가설이나 이론을 반증한다는 의미가 축소될 수밖에 없다.

반증주의에 대한 비판으로 가장 많이 거론된 것으로는 증거에 의한 이론의 과소결정(underdetermination)을 들 수 있는데, 프랑스의 물리학자 뒤엠(Pierre Duhem)과 미국의 분석철학자 콰인(Willard V. O. Quine)이 제기했기 때문에 ‘뒤엠-콰인 논제(Duhem-Quine thesis)’로 불리기도 한다. 특히 콰인은 “경험의 범정에 서는 것은 하나의 이론이 아니라 이론적 전체다.”는 말로 자신의 경험적 전체론(empirical holism)을 규정했다(Quine, 1951). 뒤엠-콰인 논제에 따르면, 이론이라는 것은 일련의 보조가설과 초기조건을 포함한 매우 복잡한 층위로 구성되어 있기 때문에 관찰이나 실험을 통해 산출된 증거가 이론의 어떤 부분을 반증하는지 알 수 없으며 따라서 증거가 이론을 완전히 결정하지 못한다. 이를 다른 각도에서 보면, 어떤 이론과 일치하지 않는 경험적 증거가 등장할 경우에도 이론의 일부를 적절히 조정한다면 전체 이론을 구제할 가능성이 얼마든지 존재하게 된다. 이러한 논지는 반증주의는 물론 논리실증주의에도 동일하게 적용될 수 있다.

반증주의가 실제적인 과학의 역사와 부합되지 않는다는 비판도 만만치 않다. 별의 시차(parallax)에 대한 문제는 이러한 점을 잘 보여주고 있다. 코페르니쿠스가 제안한 태양중심설에 따르면, 지구가 태양을 공전하기 때문에 지구에서 별을 관측할 때 시차가 나타나야 했다. 그러나 당시의 관측 기술로는 시차가 발견되지 못했고, 그것은 1838년에 독일의 과학자인 베셀(F. W. Bessel)에 의해 처음으로 관측되었다. 이처럼 별의 시차는 태양중심설에 대한 중요한 반증 사례였지만, 이로 인해 17-18세기의 과학자들이 태양중심설을 버리지 않는 않았다. 사실상 반증 사례가 등장할 때마다 과학 이론이 변경된다면 과학자들은 많은 경우에 매우 불안정한 활동으로 근심해야 할 것이다.

다. 쿤의 패러다임 이론

쿤은 물리학에서 출발하여 과학사를 거쳐 과학철학으로 학문적 지평을 넓혀간 사람이다. 그의 대표작은 『과학혁명의 구조(The Structure of Scientific Revolutions)』이다. 그 책은 1962년에 초판이 출간된 후 1970년의 2판에서는 쿤이 1969년에 작성한 ‘후기(Postscript)’가 추가되었으며 1996년에 3판이 발간된 바 있다. 과학혁명은 과학사에서 사용되는 개념이지만 그 의미가 다르다. 과학사에서는 과학혁명(The Scientific Revolution)을 16-17세기의 유럽에서 근대과학이 출현한 현상을 지칭하는 개념으로 사용한다(김영식, 2001; 김영식·임경순, 2007). 이와 달리 쿤은 『과학혁명의 구조』를 통해 코페르니쿠스의 태양중심설, 뉴턴의 고전역학, 라부아지에의 연소이론, 다윈의 진화론, 아인슈타인의 상대성이론 등과 같은 다양한 과학혁명‘들’에 주목하면서 그것들에 공통된 구조가 있다는 점을 밝히고자 했다. 『과학혁명의 구조』에 대해서는 수많은 옹호와 비판이 잇따랐는데, 1965년에는 쿤의 과학철학을 주제로 삼은 국제적인 세미나가 개최되기도 했다(Lakatos & Musgrave, 1970; 조인래, 1997).

1) 패러다임

쿤의 과학철학에서 중심을 이루는 개념은 ‘패러다임(paradigm)’이다. 먼저, 쿤이 이 개념을 사용하게 된 동기부터 살펴보자. 쿤은 1948년에 코넛트(J. Conant) 총장의 요청으로 하버드 대학에서 물리학의 역사를 가르치면서 ‘아리스토텔레스 경험’으로 불리는 색다른 경험을 하게 된다. 물체의 운동 속도가 물체의 무게에 비례하고 매질의 밀도에 반비례한다는 아리스토텔레스의 운동이론은 갈릴레오와 뉴턴에 의해 정립된 고전역학을 배운 사람들에게는 이해하기 힘든 것이었다. 심지어 아리스토텔레

스는 물체를 처음 던질 때에는 사람의 손이 운동의 원인으로 작용하지만 손을 떠난 후에는 움직이는 물체가 통과하는 매체가 운동의 원인으로 작용한다고 설명하기도 했다. 또한 쿤은 1958년에 스탠포드 대학의 행동과학 고등연구센터에 있으면서 자연과학자들과 사회과학자들의 차이를 실감할 수 있었다. 자연과학자들과 달리 사회과학자들 사이에는 정당한 과학적 문제와 방법의 성격에 대해서 공공연한 의견 대립이 있었던 것이다(Kuhn, 1970).

쿤은 자연과학자들이 힘, 질량, 화합물 등의 정의를 배우지 않고서도 그 용어를 일치된 개념으로 사용하고 있는 것은 그 용어가 나오는 문제를 푸는 표준적인 방법을 배우기 때문이라는 점에 주목했다. 이러한 점은 언어를 배우는 학생이 amo, amas, amat를 익혀 그 표준형을 그 밖의 라틴어 제1변화 동사들에 적용하는 절차에 비유될 수 있다. 언어교육에서 표준적인 활용을 보여주는 예를 패러다임이라고 하듯이 쿤은 과학교육에서 사용되는 표준적인 예제, 즉 범례(exemplar)를 패러다임이라고 불렀다. 패러다임의 범위는 이후에 점차 확장되었다. 처음에 범례에 국한되었던 패러다임이 범례가 실린 고전을 뜻하게 되고, 나중에는 특정한 과학자사회가 가진 신념의 집합을 의미하게 된 것이다(Kuhn, 1977).

그렇다면 패러다임에는 무엇이 포함되는가? 우선 어떤 과학 분야에 기본이 되는 이론과 법칙, 그리고 그것에 사용된 개념이 패러다임에 포함된다. 또 과학자들이 과학적 지식을 획득하는 수단인 범례도 패러다임의 중요한 부분이다. 더 나아가 어떤 유형의 문제를 푸는 데 사용하는 방법에도 한 과학자사회에는 공통된 생각이 있으며, 이것도 패러다임에 포함된다. 그뿐이 아니다. 과학이론을 평가하는 데 사용되는 가치척도에 대해서도 한 과학자사회는 어느 정도 공통된 의견이 있고, 이것도 패러다임에 포함된다. 이 외에도 어떤 이론이나 분야가 취급 가능하다고 생각하는 문제의 범위, 더 크게 보아서 자연현상을 인간이 얼마만큼 설명할 수 있느냐에 대해서도 과학자사회는 대개 공통된 관념이 있고, 이것도 패러다임의 일부가 된다. 다시 말해서, 패러다임은 어떤 과학자사회의 구성원이 공유하는 것이고, 거꾸로 과학자사회는 패러다임을 공유하는 사람으로 이루어진다. 이것은 명백한 순환적 정의인데, 쿤은 1969년에 작성한 후기에서 과학자사회가 패러다임에 의존하지 않고도 형성할 수 있다고 지적함으로써 과학자사회의 우선성을 인정한 바 있다(Kuhn, 1970).

패러다임은 과학과 비(非)과학을 구획하는 기준이 되며, 특정한 과학자사회의 활동에 일종의 정합성을 부여한다. 패러다임은 그것을 지속적으로 지지하는 집단을 얻을 만큼 강력하면서도 과학자들에게 문제의 해결을 맡길 만큼 개방적인 특징을 가지고 있다. 또한 패러다임은 고전역학처럼 포괄적인 것이 되기도 하고, 빛의 입자

설과 같이 제한된 분야를 지배하는 것일 수도 있다. 패러다임은 융통성 있는 개념이기도 하지만 모호한 개념이기도 해서 쿤의 비판자들 사이에 많은 논란을 불러 일으켰다. 이와 관련하여 영국의 언어학자인 매스터만(Margaret Masterman)은 쿤이 패러다임을 적어도 21가지의 뜻으로 사용한다고 분석하기도 했다(Lakatos & Musgrave, 1970).

이러한 비판에 직면하여 쿤은 1969년에 작성한 후기에서 패러다임의 개념을 보다 분명히 하였다. 그는 패러다임을 넓은 의미의 전문분야 행렬(disciplinary matrix)과 좁은 의미의 범례(exemplar)로 나누었다. 여기서 전문분야 행렬은 기호적 일반화(symbolic generalization), 형이상학적 모형(metaphysical model), 가치(values), 범례 등으로 구성된다. 기호적 일반화는 특정한 과학자사회가 의문 없이 받아들이는 보편언명의 형태를 지니는 것으로 $F=ma$, $I=V/R$, $E=mc^2$ 등이 여기에 해당한다. 이러한 표현은 과학적 법칙이라 할 수 있는데, 법칙은 개념간의 관계를 나타내면서 특정한 이론을 구성한다. 형이상학적 모형은 “기체 분자는 미소한 탄성의 당구공이 무작위 운동을 하는 것처럼 간주된다.”와 같은 존재론적 가정을 의미한다. 가치는 정확성, 일관성, 단순성 등과 같이 과학이 가져야 할 바람직한 특성에 해당하는 것으로 특정한 과학자사회의 구성원이 문제점을 확인하거나 이론을 평가할 때 더욱 부각되는 경향을 보인다.

범례는 쿤이 “보다 심오”하며 “가장 새롭고 가장 이해가 안 되는 부분”이라고 지적한 것으로 교과서나 논문에서 제시된 인상적인 문제 풀이의 예를 의미한다(Kuhn, 1970). 여기서 주의할 것은 범례가 단순한 예제(example)가 아니라는 점이다. 범례는 과학자사회가 중요하다고 생각하는 이론을 매우 성공적으로 적용한 사례에 해당한다. 범례의 기능을 쉽게 설명하기 위해 쿤은 동물원에 간 아이의 예를 든다. 아이는 동물원에서 궁금한 것을 계속 묻고 부모의 대답을 들으면서 무엇이 백조이고 무엇이 오리인지, 그리고 왜 저것이 거위가 아닌지를 익힌다. 이러한 측면에서 범례를 통해 배우는 것은 자연세계의 유사성 관계에 관한 지식이라고 할 수 있다(Kuhn, 1977).

2) 정상과학

이와 같은 패러다임에 입각한 과학 활동을 ‘정상과학(normal science)’이라 한다. 정상과학의 시기에 패러다임은 매우 안정된 위치에 있다. 즉 과학자사회의 구성원 전체가 패러다임을 공유하며 이에 대한 의심을 가지지 않는 것이다. 특히 패러다임을 구성하는 기본이론은 완전히 받아들여지므로 그것의 성립 여부에 대한 비판적 질문은 전혀 제기되지 않는다. 정상과학 시기에 과학자가 어떤 문제를 푸는 경우

진짜로 시험되는 것은, 주어진 현상이 기본이론과 부합되는가 하는 것이 아니라 과학자가 기본이론을 사용해서 그 현상을 설명할 수 있는 능력을 가지고 있는지의 여부에 있다. 포퍼의 반증 개념과 비교해 보면 쿤에게 있어서 반증을 당하는 것은 이론이 아니라 사람인 셈이다.

쿤은 정상과학 시기의 과학 활동을 퍼즐 풀이(puzzle-solving)에 비유하고 있다. 어떤 퍼즐이든 공통적인 두 가지 특징이 있다. 하나는 정답이 있다는 것이고, 다른 하나는 그 답에 이르는 규칙이 있다는 것이다. 퍼즐을 즐기는 사람이 그 문제에 답이 있고 언젠가는 그것이 해결될 것이라는 사실 때문에 더 재미를 느끼듯이, 정상과학을 수행하는 과학자들의 경험도 이와 크게 다르지 않다. 정상과학 시기에 과학자가 수행하는 구체적인 활동으로는 의미 있는 사실의 결정, 사실과 이론의 일치, 이론의 정교화 등을 들 수 있다(Kuhn, 1970). 즉, 패러다임은 어떤 주제가 연구하기에 흥미롭고 만족스러운지 결정해 주고, 새롭게 밝혀진 사실을 이론과 일치시키는 기준이 되며, 보편상수와 같은 측정치를 정교화하거나 이론상의 모호함을 제거하는데 기여한다는 것이다.

3) 과학혁명

정상과학의 위력은 막강하지만 난공불락의 성은 아니다. 패러다임이 확고한 기반을 가지고 있을 때에는 그것에 도전하는 것이 어렵지만 기반이 약해진다면 어느 정도 도전이 가능해진다. 과학연구가 진행되는 과정에는 기존 이론으로는 설명할 수 없는 사례가 발생하기 마련이다. 쿤은 이러한 사례를 ‘변칙 사례(anomaly)’라고 불렀다. 그것은 반증 사례와는 차이가 나는 개념이다. 포퍼와 달리 쿤은 패러다임에 반하는 사례가 쌓이더라도 그 패러다임이 곧바로 폐기되지는 않는다고 보았다. 즉 과학자들은 변칙 사례가 나타날 경우에 조정이나 보완을 통해 패러다임을 구제하려고 하는 것이다. 사실상 변칙 사례가 등장할 때마다 자신의 연구기반이 되는 패러다임을 던져 버린다는 것은 효율적이지 않다고 볼 수 있다.

과학의 역사에는 오랫동안 변칙 사례로 남아있던 문제가 기존의 패러다임을 바탕으로 해결된 사례가 많이 있다. 해왕성의 발견은 그 대표적인 예이다. 19세기에 들어 천왕성의 관측된 궤도가 뉴턴 역학의 예측과 어긋나는 것이 알려지자 뉴턴 역학을 포기해야 한다는 주장이 제기되기도 했다. 그러나 뉴턴 역학의 궁극적인 성공을 굳게 믿었던 프랑스의 르브리에(U. Le Verrier)와 영국의 애덤스(J. Adams)는 또 다른 새로운 별이 천왕성 바깥의 적당한 위치에 적당한 질량을 가지고 존재한다면 천왕성의 궤도가 설명될 수 있다는 과감한 제안을 내놓았다. 행성 하나를 더 만들어냄으로써 예측과 관측치의 차이를 해결하려 했던 것이다. 이러한 시도는 1846년

에 독일의 갈러(J. Galle)에 의해 해왕성이 존재한다는 것이 발견됨으로써 결국 성공으로 끝났다.

그러나 변칙 사례를 해결하려는 과학자사회의 노력이 계속해서 수포로 돌아가거나 그것을 해결하기 택한 조정이나 보완이 임의적이어서 과학자사회가 합의하지 못했을 때에는 기존의 패러다임이 ‘위기(crisis)’를 맞게 된다. 여기서 쿤은 위기의 정체가 이론이 위기를 맞는 것이 아니라 과학자사회의 구성원들이 심리적인 위기감을 느낀다는 데 있다고 보았다. 위기 상황에서는 다양한 가설이 등장하게 된다. 정상과학의 시기에는 조심스럽고 비공개적으로 논의되던 것도 위기의 국면에서는 과감하고 공개적인 논쟁이 이루어지기 시작한다.

위기의 조성만으로 ‘과학혁명’이 일어나는 것은 아니다. 또 다른 중요한 조건이 충족되어야 한다. 그것은 바로 대안의 등장이다. 쿤에 따르면, 새로운 대안은 중심부 과학자에게서 비교적 멀리 떨어진 신진 세력에 의해 제기되는 경향을 보인다. 변방의 신진 세력은 기존의 패러다임에 덜 길들여져 있어서 좀 더 자유롭고 참신한 생각을 할 수 있는 것이다. 새로운 이론이 옛 패러다임의 변칙 사례를 더욱 잘 해결하고 나면 과학자들은 그 이론을 중심으로 모여들기 시작한다. 이와 같은 쏠림 현상을 매개로 패러다임의 교체, 즉 과학혁명이 시작되는데, 쿤은 과학혁명을 형태 전환(gestalt switch), 종교적 개종, 정치적 혁명 등에 비유하고 있다. 과학혁명이 시작된다고 해서 모든 과학자들이 개종을 하는 것은 아니다. 옛 패러다임의 주역들은 대체로 자신의 신념을 끝까지 고수하는 경향을 보인다. 쿤은 이와 같은 개종의 어려움을 강조하면서 과학혁명의 완성은 과학자사회 내부의 세대교체를 동반한다는 점에 주목하고 있다.

이처럼 쿤은 정상과학과 과학혁명이 교체되는 과정을 통해 과학이 변화한다는 견해를 피력하고 있다. 여기서 정상과학은 누적적 성격을 띠는 반면, 과학혁명은 비누적적 성격을 보인다. 이와 관련하여 쿤은 과학혁명을 “옛 패러다임이 그것과 양립 불가능한 새 패러다임에 의해 전체적으로 혹은 부분적으로 대체되는 비누적적인 에피소드들”로 규정하고 있다(Kuhn, 1970). 과학의 역사는 벽돌을 차곡차곡 쌓아 커다란 건물 하나를 짓는 과정이라기보다는 그러한 건물을 어느 날 포크레인으로 밀어버리고 그 옆에 새로운 건물을 짓는 과정에 해당하는 셈이다. 이러한 과정에서는 과거의 지식기반 중 일부가 손실되는 현상이 발생하는데 그것은 쿤의 손실(Kuhn's loss)로 불린다(Fuller, 1988).

4) 공약불가능성

쿤은 과학혁명의 성격을 설명하기 위해 ‘공약불가능성(incommensurability)’이라는

개념을 제안하였다. 공약불가능성은 원래 수학에서 무리수를 a/b 와 같은 유리수의 비율로 표현할 경우에 a 와 b 의 관계를 나타내는 말이다. 쿤은 공약불가능성을 두 패러다임을 동일한 기준으로 비교 혹은 평가할 수 없다는 의미로 사용하였다. 어떤 이론을 수용한다는 것은 해당 이론의 법칙, 개념, 가정을 하나하나 따로 받아들이는 것이 아니라 전체로서의 이론체계와 그것을 포함하는 패러다임을 받아들이는 것이다. 따라서 개념이나 가정, 법칙을 하나하나 떼어서 비교하거나 새로운 패러다임에 입각한 개념이나 법칙을 가지고 이전의 개념이나 법칙을 평가하는 것은 별다른 의미를 가지지 못한다. 이처럼 옛 패러다임에 속한 과학자와 새로운 패러다임을 받아들이는 과학자는 그들 사이에 공정한 비교를 가능하게 하는 공통된 근거가 없으므로, 각각 자신의 견해가 옳다고 믿으면서도 이를 논리적인 토론에 의해 상대방에게 증명할 수는 없다. 다시 말해서 논리의 규칙과 사용되는 자료 자체가 변하는 것이며, 이런 의미에서 각각의 패러다임을 믿는 두 과학자는 전혀 다른 세계에 사는 셈이다.

공약불가능성은 상당한 논쟁을 불러일으킨 개념이다. 예를 들어 라카토슈는 패러다임을 선택하는 문제가 “다수결이나 이론 지지자들의 신앙심과 설득에 의존할 수 밖에 없다면, 과학이론의 변화는 군중심리(mob psychology)의 문제”가 된다고 비판한 바 있다(Lakatos & Musgrave, 1970). 이른바 합리주의 대 상대주의의 논쟁이 발생한 것이다. 이 논쟁은 매우 복잡한 것으로 합리주의 혹은 합리성을 어떻게 정의하느냐에 따라 달라질 수 있다. 합리주의를 “경쟁하는 이론들을 평가할 수 있는 보편적 기준이 있다.”는 것으로 정의한다면, 논리실증주의자들과 포퍼는 합리주의자이지만 쿤은 상대주의자가 된다. 그러나 여기서 ‘보편적’이란 문구를 빼고 “경쟁 이론들에 대한 평가 기준이 있다.”는 것으로 합리주의에 대한 정의를 완화한다면 쿤을 합리주의자로 구제할 수도 있다.

공약불가능성은 비교불가능성(incomparability)과는 다른 개념이다. $\sqrt{2}$ 는 1이나 2와 공통된 척도가 없다는 의미에서 공약불가능하지만 비교불가능하지는 않다. $\sqrt{2}$ 는 1보다는 크고 2보다는 작은 것이다. 앞서 언급했듯이, 실제로 쿤은 우수한 이론을 선택하는 기준으로 정확성, 일관성, 범위, 단순성, 다산성 등의 5가지를 제안한 바 있다. 쿤에 따르면, 이러한 가치들은 과학자사회가 공통적으로 받아들이고 있지만 다양한 가치들이 복합된 단일한 척도와 그 측정방법은 없다. 이에 따라 특정한 이론이나 패러다임을 수용 혹은 거부할 때 어떤 가치가 가장 우세한지는 경우에 따라 달라진다. 코페르니쿠스 혁명은 이러한 점을 잘 보여주는 사례이다. 정량적 계산을 위한 정확성의 측면에서는 코페르니쿠스 우주구조와 프톨레마이오스 우주구조 중에서 어느 한 쪽을 선택할 만한 커다란 차이가 없었다. 그런데도 코페르니쿠스가

변혁을 일으키고 그것이 수용될 수 있었던 것은 태양을 숭배하고 수학적 단순성을 높게 평가했던 신(新)플라톤주의(neo-Platonism)가 큰 영향을 미쳤다는 것이 쿤의 견해이다(Kuhn, 1957). 이러한 점에서 쿤의 패러다임 이론은 ‘논리적 합리성(logical rationality)’이 아니라 ‘역사적 합리성(historical rationality)’을 지향한다고 볼 수 있다.

라. 쿤 이후의 과학철학

쿤과 그 이후의 과학철학자들은 과학이나 과학이론을 구조적 전체로 보는 관점을 견지하면서 과학철학을 논의함에 있어 과학사의 사례를 적극적으로 활용하는 경향을 보이고 있다. 쿤 이후에 과학철학에 크게 기여한 개념이나 이론으로는 라카토슈의 연구프로그램(research program), 파이어아벤트의 무정부주의(anarchism), 라우든의 연구전통(research tradition), 갤리슨의 교역지대(trading zone) 등을 들 수 있다. 라카토슈는 포퍼와 쿤을 절충하는 과정에서, 파이어아벤트는 쿤의 논지를 극단화하면서, 라우든은 과학의 진보를 합리적으로 설명하기 위해, 갤리슨은 과학의 소통을 고민하는 과정에서 자신들의 과학철학을 전개했다고 볼 수 있다.

1) 라카토슈의 연구프로그램

라카토슈는 “과학사가 결여된 과학철학은 내용이 없고, 과학철학이 없는 과학사는 맹목이다.”는 명언을 남긴 사람이다. 그는 반증주의를 소박한(naive) 반증주의와 세련된(sophisticated) 반증주의로 구분하면서 자신의 과학철학을 시작했다. 소박한 반증주의가 단일 이론의 장점을 평가하는 데 그친다면, 세련된 반증주의는 복수 이론의 상대적인 장점으로 초점을 옮기고 있다. 한 이론에 대하여 “그 이론이 반증가능한가?”, “어떻게 반증될 수 있는가?”, “그 이론이 반증되었는가?” 등을 묻는 대신에 “새롭게 제안된 이론이 기존 이론보다 더 생존력이 있는 이론인가?”를 묻는 것이다(Chalmers, 1999). 소박한 반증주의에서는 경험적으로 반증가능한 이론이 과학적 이론이 되지만, 세련된 반증주의에서는 한 이론이 기존 이론보다 경험적 내용을 더 많이 가질 때만 과학적 이론이 되는 셈이다. 또한 소박한 반증주의가 반증된 가설을 새로운 가설로 대체하는 것을 강조하고 있다면, 세련된 반증주의는 어떤 가설이라도 보다 나은 가설로 대체되어야 한다는 점에 주목한다(Lakatos & Musgrave, 1970).

이와 함께 라카토슈는 단 한 번의 반증으로 이론이 폐기된다는 포퍼의 주장과 변칙 사례에도 불구하고 기존의 이론을 고수한다는 쿤의 주장에 의문을 품으면서 그

대안으로 ‘연구프로그램’이란 개념을 제시하였다. 연구프로그램은 일련의 이론들의 집합으로 ‘견고한 핵(hard core)’과 ‘보호대(protective belt)’로 구성되어 있다. 견고한 핵은 기본적 원리 혹은 핵심 이론에 해당하는 것이고, 보호대는 견고한 핵을 보호하기 위해 고안된 다양한 보조가설들을 의미한다. 예를 들면, 코페르니쿠스의 태양중심설에서 “모든 행성들이 태양 주위를 공전한다.”는 것은 견고한 핵에 해당하고, 코페르니쿠스가 행성의 실제적인 운동을 설명하기 위해 주전원을 도입한 것은 보호대에 해당한다.

라카토슈의 연구프로그램은 과학자들이 준수해야 할 연구지침 혹은 발견법(heuristic)도 제안하고 있다. 그것은 과학자가 하지 말아야 될 것을 지정하는 부정적 발견법 혹은 소극적 연구지침(negative heuristic)과 과학자가 해야 할 것을 지시하는 긍정적 발견법 혹은 적극적 연구지침(positive heuristic)이다. 전자는 “연구프로그램의 견고한 핵을 수정하지 말고 원래의 상태를 유지해야 한다.”는 지침이고, 후자는 “새로운 자연현상을 설명하거나 예측하기 위해 보호대를 계속 수정 혹은 보완해야 한다.”는 지침이다. 어떤 법칙에 위배되는 현상이 관찰되었을 때 과학자들은 법칙 자체를 수정하는 것이 아니라 새로운 보조가설을 제안하는 방식으로 연구를 진행한다는 것이다. “물체의 가속도는 가해지는 힘에 비례하고 그 물체의 질량에 반비례한다.”는 뉴턴의 제2법칙을 예로 들면, 가속도가 정확히 힘에 비례하는 현상이 관찰되지 않을 때 과학자들은 마찰력이라는 개념을 보호대에 도입함으로써 뉴턴의 제2법칙을 보완하게 된다. 여기서 부정적 발견법과 긍정적 발견법은 독립된 별개의 것이 아니라 동전의 양면과 같은 성격을 띠고 있다는 점에도 유의할 필요가 있다.

라카토슈의 연구프로그램은 시간 축을 가지며 진화하는 특징을 가지고 있는데, 그 유형은 다음의 네 가지로 구분할 수 있다(Lakatos, 1978; 장대익, 2008). 첫째는 보조가설을 조정하는 것에도 실패하는 경우이고, 둘째는 보조가설의 조정에만 겨우 성공하는 경우이다. 셋째는 보조가설의 조정에 성공함과 동시에 새로운 예측까지 내놓는 경우이다. 마지막 넷째는 보조가설의 조정에도 성공하고, 새로운 예측을 내놓으며, 그 예측이 경험적으로도 입증되는 경우이다. 여기서 첫째와 둘째는 퇴행적(regressive) 연구프로그램에, 셋째와 넷째는 진보적(progressive) 연구프로그램에 해당하는데, 셋째는 이론적 진보가 있는 경우이고, 넷째는 이론적 진보와 함께 경험적 진보도 있는 경우이다.

라카토슈는 연구프로그램이 발전하는 과정에서 중요한 것은 반증이 아니라 입증으로 보았다. 한 연구프로그램의 가치는 얼마나 참신한 예측을 하고 그것이 입증되는가에 달려 있다(Chalmers, 1999). 앞서 언급했던 해왕성 발견의 사례가 여기에 해

당하며, 라카토슈의 주장은 다윈의 진화론에도 적용될 수 있다(장대익, 2008). 다윈의 진화론을 괴롭혔던 문제 중의 하나는 중간 단계의 화석이 부족하다는 점이었다. 이후의 과학자들은 실제로 중간 단계의 화석을 발견하거나 화석이 생길 틈도 없이 매우 빨리 일어나는 중분화 메커니즘을 제시하는 방향으로 연구를 진행시켰다. 특히, 20세기 미국의 고생물학자인 골드(Stephen J. Gould)는 단속평형론(punctuated equilibrium theory)을 제안함으로써 중간 단계 화석의 문제를 해결했을 뿐만 아니라 종의 사멸과 분화에 대한 새로운 사실들을 예측할 수 있었다.

2) 파이어아벤트의 무정부주의

파이어아벤트는 과학철학에서 무정부주의자로 평가되고 있다. 그의 과학에 대한 무정부주의에는 방법론적 무정부주의(methodological anarchism)와 인식론적 무정부주의(epistemological anarchism)가 중첩되어 있다. 전자는 과학을 하는 데 특별한 방법이 없다는 점을 의미하고, 후자는 과학이 다른 지식과 본질적인 차이를 가지지 않는다는 점을 뜻한다.

파이어아벤트는 위대한 과학자들이 특정한 하나의 방법을 사용한 적이 없었다고 진단한다(Feyerabend, 1975). 그는 갈릴레오가 태양중심설을 옹호하기 위해 사용한 논증에 주목한다. 당시의 대다수 사람들이 지구중심설을 믿었던 중요한 이유 중의 하나는 탑 꼭대기에서 떨어진 물체가 수직으로 낙하하기 때문이었다. 태양중심설에 따르면, 그 물체가 낙하하는 동안 지구가 움직이기 때문에 물체가 떨어지는 지점이 달라져야 했던 것이다. 이에 대하여 갈릴레오는 탑에서 물체가 수직으로 떨어지는 이유는 물체가 낙하 운동을 하는 동안 지구를 따라 원운동도 하고 있기 때문이라고 해석했다. 결국 이러한 갈릴레오의 해석이 자연스러운 해석(natural interpretation)으로 받아들여지면서 태양중심설은 한 걸음 더 나아갈 수 있었다.

이러한 사례를 통해 파이어아벤트는 경쟁하는 이론의 우월성을 결정할 수 있는 객관적 기준이나 방법이 없다고 주장했다. 그는 포퍼, 쿤, 라카토슈 등이 제시한 과학적 방법론에 도전하면서 과학자들이 사용한 방법은 경우에 따라 달라진다는 점에 주목했다. 파이어아벤트에 따르면, 기존의 과학철학자들이 제시하는 규범은 과학의 실상에 맞지 않을 뿐만 아니라 과학의 가장 중요한 특성인 창조성과 상상력을 방해하는 궤방꾼에 불과한 것이었다. 파이어아벤트는 만약 과학적 방법에 원리가 존재한다면 그것은 “어떤 것이든 좋다(Anything goes).”는 원리라고 고백하기도 했다(Feyerabend, 1975).

파이어아벤트는 많은 과학철학자들이 주목해 왔던 일관성 규칙(consistency rule)이 논리적으로도 모순이라고 일축했다. 어떤 과학자가 기존 이론과 모순되지만 동

등한 설명력을 지닌 참신한 이론을 개발했다고 하자. 일관성 규칙에 따르면, 새 이론은 기존 이론에 대해 일관성을 가지지 않기 때문에 거부되어야 하지만, 새 이론을 만든 과학자의 입장에서는 그것만큼 불합리한 것이 없게 된다. 사실상 일관성 규칙을 일관되게 적용해 보면 과학의 역사는 선착순과 비슷한 것이 되며, 첫 단추가 잘못 꿰어지면 이후의 과학도 줄줄이 잘못 꿰어질 가능성이 높다(장대익, 2008).

파이어아벤트는 과학자가 염두에 두어야 할 새로운 규칙으로 ‘반(反)규칙(counter rules)’을 제안했다(Feyerabend, 1975). 여기에는 “사실들과 잘 어울리지 않을 것 같은 이론들을 개발하고 수용하라.”는 규칙과 “잘 확립된 가설들과 모순되는 가설들을 개발하라.”는 규칙이 포함된다. 이러한 반규칙을 통해 세상에 나온 이론은 어떤 방법론적 제약도 받지 않고 자연스럽게 증식할 수 있도록 내버려 두어야 하는데, 파이어아벤트는 이를 ‘증식 원리(principle of proliferation)’로 불렀다. 이런 식으로 그는 규칙 아닌 규칙 혹은 원리 아닌 원리를 제안했던 셈이다.

더 나아가 파이어아벤트는 과학이 너무나 다양한 지적 자원들을 활용함으로써 변화되어 왔기 때문에 과학이라는 지적 활동에만 특권을 부여하는 것은 불합리한 처사라고 주장했다. 그가 보기에 과학은 세계에 접근하는 다양한 방법 중의 하나에 지나지 않으며, 종교, 점성술, 민간요법 등과 같은 다른 지적 활동과 동등한 지위를 갖는다. 이런 점에서 파이어아벤트는 포스트모던 과학철학의 뿌리로 간주되기도 한다. 이와 달리 쿤은 패러다임이라는 과학의 특이성을 강조했다기 때문에 쿤을 포스트모던 과학철학자로 분류하는 것은 적절하지 않다.

파이어아벤트는 과학이 권력과 손을 잡고 인간의 전반적인 생활을 규제하고 있는 현대 사회에 대해서도 비판을 가하고 있다. 그는 다양성이 허용되고 개인의 자유로운 선택이 존중받는 사회를 원했으며, 자유를 증대하고 풍요로운 삶을 살려고 하는 노력을 옹호하면서 전인적 인간을 길러내고 또 길러낼 수 있는 개성의 함양을 지지했다. 이와 함께 그는 조상들이 종교의 속박에서 우리를 해방시켰듯이, 우리가 이데올로기적으로 경직된 과학의 속박에서 이 사회를 해방시켜야 한다고 주장했다. 포퍼가 합리적 비판이 가능한 ‘열린 사회’를 지향했다면, 파이어아벤트는 모든 속박에서 벗어난 ‘자유 사회(free society)’를 갈망했던 것이다(Feyerabend, 1978).

3) 라우든의 연구전통

실용주의자인 라우든은 과학이 본질적으로 문제풀이(problem-solving) 활동의 성격을 띤다고 주장했다(Laudan, 1977; Losee, 1993). 과학의 목적이 우주에 대한 진리를 탐구하는 것이 아니라 인식된 문제의 해결에 있다고 보았던 것이다. 그는 과학적 문제를 경험적 문제와 개념적 문제로 구분하였다. 경험적 문제는 사실과 이론

의 관계에서 발생하는 문제이며, 개념적 문제는 이론 그 자체 혹은 다른 이론과의 관계에서 발생하는 문제이다. 경험적 문제는 그것을 설명해 줄 수 있는 이론을 제시하거나 변칙 사례를 제거함으로써 해결될 수 있고, 개념적 문제는 이론의 내적 일관성을 제고하거나 서로 충돌하는 이론들을 조화시킴으로써 해결될 수 있다.

라우든은 과학에서 진보의 단위를 해결된 문제(solved problems)로 보았다. 즉 문제해결 능력이 높은 과학은 진보적이며 그렇지 않은 과학은 퇴행적이다. 과학은 설명할 수 있는 경험적 문제를 최대화하고 그 과정에서 발생하는 변칙 사례와 개념적 문제를 최소화함으로써 진보한다. 이와 함께 라우든은 문제해결 능력이 높은 과학을 선택하는 것이 합리적이라고 보았다. 과학이 합리적이기 때문에 진보하는 것이 아니라 진보하는 과학이 합리적이라는 것이다. 이런 식으로 라우든은 합리성을 진보에 종속시킴으로써 과학의 진리성 혹은 진리근접성을 가정하지 않고도 합리성에 대한 이론을 가질 수 있다고 주장했다.

라우든은 과학을 평가하는 주요 단위가 개별 이론이 아니라 연구전통이라는 입장을 보이면서 연구전통의 특징으로 다음의 세 가지를 들고 있다(Laudan, 1977). 첫째, 모든 연구전통은 그것을 구체화하고 부분적으로 구성하는 여러 개별 이론을 가지고 있으며, 이 가운데는 새로 나온 이론도 있고 과거의 것을 계승한 이론도 있다. 둘째, 모든 연구전통은 형이상학적이면서도 방법론적 측면을 보유하고 있는데, 이것들은 하나의 전체로서 연구전통에 고유성을 부여하면서 다른 연구전통과 구분시켜 준다. 셋째, 각각의 모든 연구전통은 개별 이론과 달리 다양하고 세부적인 정식화를 거치며, 일반적으로 상당히 오랜 역사를 갖는다.

라우든은 연구전통의 기능을 다음과 같이 정리하고 있다(Laudan, 1977). 첫째, 어떤 연구전통에 따라 연구하는 모든 과학자들에게 어떤 가정들이 논쟁의 여지가 없는 배경지식으로 간주될 수 있는지를 나타낸다. 둘째, 이론의 어떤 부분이 문제가 있어 수정 혹은 보완되어야 하는지를 보여준다. 셋째, 자료를 수집하거나 이론을 시험하는 규칙을 확립한다. 넷째, 연구전통의 존재론적·방법론적 규범을 여기는 이론들에게 개념적 문제를 부과한다.

라우든의 연구전통에 대한 논의는 과학적 합리성에 관한 그물망 모형(reticulated model)을 제안하는 것으로 이어졌다(Laudan, 1984; Losee, 1993). 이 모형에 따르면, 연구전통은 이론, 방법론적 규칙(methodological rules), 인식적 목적(cognitive aims)으로 구성되어 있다. 여기서 이론은 방법론적 규칙을 제약하고 방법론적 규칙은 이론을 정당화한다. 방법론적 규칙은 인식적 목적의 실현가능성을 제시하며 인식적 목적은 방법론적 규칙을 정당화한다. 이론과 인식적 목적은 서로 조화를 이룰 수 있어야 한다. 이처럼 라우든의 연구전통은 이론, 방법, 목적이 서로를 제약하고

정당화하는 구조를 가지고 있다.

라카토슈의 연구프로그램은 이론에 초점을 두면서 견고한 핵과 보호대의 관계를 위계적인 것으로 설정하고 있는 반면, 라우든의 연구전통은 이론뿐만 아니라 방법과 목적으로 구성되어 있고 이러한 요소들은 일종의 수평적 구조를 이루고 있다. 또한 쿤에게는 이론, 방법, 목적이 하나의 패러다임을 이루어 한꺼번에 변경되는 반면, 라우든은 이론, 방법, 목적 등의 각 요소들이 개별적으로 교체되는 것을 허용하고 있다. 이러한 점에서 쿤의 패러다임 이론이 과학에 대한 혁명적 모형에 입각하고 있다면, 라우든의 연구전통은 과학에 대한 점진적 모형(gradual model)을 제안하는 것으로 평가되기도 한다(Kourany, 1987).

4) 갤리슨의 교역지대

1980년대 이후의 과학철학에서는 이론보다는 실험에 초점을 두는 경향이 나타났으며, 이러한 과학철학은 새로운 실험주의(new experimentalism) 혹은 실험철학(philosophy of experimentation)으로 불린다(Chalmers, 1999; 이상원, 2004). 실험철학의 창시자로 평가되는 해킹(Ian Hacking)은 실험이 거시적 이론과 독립적이며 ‘고유한 삶(life its own)’을 가질 수 있다고 주장했다(Hacking, 1983). 앞서 언급했듯이, 1800년에 있었던 허셜의 적외선 발견은 특정한 이론에 의존하지 않은 실험을 바탕으로 이루어졌다. 19세기 말에 있었던 마이컬슨의 실험도 실험의 고유한 삶을 잘 보여주는 사례이다. 에테르 이론의 신봉자였던 마이컬슨은 두 차례의 실험을 통해 에테르의 존재를 증명하고자 했다. 그러나 실험 데이터는 자신이 원하는 대로 나와 주지 않았고, 결국 마이컬슨의 실험은 에테르가 존재하지 않는다는 점을 보여주는 증거로 활용되었던 것이다.

물리학과 과학사를 전공한 갤리슨은 여기서 한발 더 나아간다. 그는 실험뿐만 아니라 기구(instrument)에도 고유한 삶이 있다고 생각했다(Galison, 1987). 어떤 기구들은 전혀 예상하지 못한 방향으로 진화하며, 처음의 의도와는 다른 용도로 사용되기도 한다. 예를 들어, 유도코일은 처음에 불꽃을 일으키려는 용도로 발명되었지만, 나중에는 X선을 비롯한 전자기파를 방출하기 위해 사용되었다. 특히, 오늘날에는 시뮬레이션과 컴퓨터를 사용한 데이터 분석이 널리 사용되는 것과 같이 과학 활동에서 기구의 중요성이 더욱 부각되고 있다.

갤리슨에 따르면, 과학자의 실천은 이론, 실험, 기구의 다양한 전통이 만들어내는 제한 요소들에 의해 둘러싸여 있다. 여기서 이론, 실험, 기구는 다른 요소들로부터 상대적으로 독립된 고유한 삶을 가지는 과학의 하위문화(sub-cultures)에 해당하며, 이러한 세 하위문화가 사이사이에 끼워진 구조를 이루고 있기 때문에 과학자들 사

이에 국소적 조응(local coordination)을 통한 대화는 항상 가능하다. 이러한 진단을 바탕으로 갈리슨은 쿤이 과학을 지적 활동으로만 보았기 때문에 공약불가능성과 같은 성급한 결론에 도달했다고 비판한다. 과학을 이론, 실험, 기구가 겹겹이 중첩되면서 이루어진 이질적인 활동의 총체로 보면, 개념적인 단절이 있을지라도 실험이나 기구에서의 연속성이 존재하기에 의사소통이 전혀 불가능하지는 않다는 것이다 (홍성욱, 2004).

사실상 과학의 소통은 갈리슨이 오랫동안 고민했던 문제였다. 그는 서로 다른 언어와 문화를 가진 두 부락이 만나 교역을 하는 경우에 그것을 가능하게 하는 언어적, 실천적, 지리적 공간인 ‘교역지대’가 만들어진다는 인류학적인 연구에 주목했다. 갈리슨은 과학사의 사례를 통해 과학의 교역지대에서 ‘피진(pidgin)’이나 ‘크리올(creole)’과 같은 잡종 언어(hybrid language)가 만들어져 과학자들이 소통하는 과정을 분석하였다. 교역지대에서는 피진과 같은 간단한 잡종 언어가 만들어져 서로의 의사소통을 매개하며, 이후에는 문법과 복잡한 어휘를 구비한 체계적 언어인 크리올이 만들어져 새로운 학제간 분야가 형성된다는 것이었다. 제2차 세계대전 중에 레이더를 발명하기 위해 물리학자와 엔지니어가 함께 일했던 MIT의 래드랩(Radiation Laboratory)이나 이론물리학자와 실험물리학자의 소통을 매개했던 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)은 모두 이러한 교역지대의 사례들이었다(Galison, 1997).

갈리슨은 과학에 균일하고 통일된 방법론이나 원리가 없다고 생각하지만, 그것이 과학을 허약하게 만들지 않는다고 지적한다. 그는 베니어합판의 비유를 사용하는데, 결이 다른 얇은 판을 겹겹이 엮갈리게 만든 베니어합판이 통판보다 더 튼튼하듯이, 과학의 다양성과 잡종성이 오히려 과학을 튼튼하게 만든다는 것이다. 더 나아가 갈리슨은 과학과 예술이나 과학과 인문학이 만나는 접점이 다양한 방식으로 형성될 수 있으며, 이러한 점에 주목함으로써 우리가 사는 세상을 더욱 깊이 이해할 수 있다고 주장하고 있다.

4. 과학의 사회적·윤리적 성격

과학의 사회적·윤리적 성격에 대한 논의에서는 과학과 기술을 분리하기보다는 ‘과학기술’로 통칭하는 경우가 많다. 과학기술과 사회의 상호작용을 탐구하는 학문은 ‘과학기술학(science and technology studies)’으로 불리며, 과학, 기술, 사회를 연계시킨 교육은 ‘STS 교육’으로 불린다. 이와 함께 과학의 긍정적 측면과 함께 부정적 측면이 가시화되면서 과학과 관련된 윤리적 논의도 증가하고 있다. 연구윤리를 통

해 과학연구의 과정에서 준수해야 할 규범이 모색되고 있으며, 첨단과학의 윤리적 쟁점이 정보윤리, 생명윤리, 환경윤리 등을 매개로 제기되고 있는 것이다.

가. 과학, 기술, 사회의 연계

1) 과학과 기술의 관계

과학, 기술, 사회의 상호작용은 과학과 기술의 상호작용, 과학과 사회의 상호작용, 기술과 사회의 상호작용 등으로 구분할 수 있는데, 그것을 간략히 서술하면 다음과 같다. 과학의 내용과 방법은 새로운 기술을 개발하는 데 중요한 원천으로 작용해 왔으며, 기술이 제기하는 문제와 기술이 활용하는 방법이나 도구도 과학의 발전에 크게 기여해 왔다. 과학은 사회에서 권위 있는 지식으로 활용되며, 사회는 과학 활동에 필요한 각종 지원을 제공해 준다. 사회의 구조와 인간의 일상생활은 기술에 의해 큰 영향을 받으며, 기술은 사회적 요구를 반영하는 과정에서 지속적으로 변화한다. 과학, 기술, 사회의 상호작용이 실제로 일어나는 방식은 위에서 서술한 것보다 훨씬 복잡하며, 그 중에서 과학교육학에서 논의가 집중된 것은 과학과 기술의 관계라 할 수 있다.

과학과 기술은 어느 정도 연관되어 있는가? 과학과 기술이 전혀 다른 존재라는 주장도 있고 과학과 기술이 밀접하게 관련되어 있다는 주장도 있다. 과학과 기술이 본질적으로 같은지 다른지, 과학과 기술이 어느 정도 같고 어느 정도 다른지를 명료하게 판단하기는 쉽지 않다. 사실상 과학과 기술의 관계는 과학과 기술을 어떻게 정의하느냐에 따라, 그리고 과학과 기술의 어떤 측면에 집중하느냐에 따라 끝이 없이 논의될 수 있다. 과학과 기술의 관계를 논의할 때에는 과학과 기술이 고정된 형태와 기능을 가지고 있는 존재가 아니라 역사적·사회적 맥락에 따라 지속적으로 변화하는 존재라고 인식하는 것이 중요하다. 과거에 과학과 기술이 수행했던 역할이 현재에 반드시 유효하지는 않으며, 현재의 과학과 기술이 미래에도 계속된다고 볼 수도 없기 때문이다(최경희·송성수, 2011).

과학과 기술은 오랜 세월 동안 별개로 존재해 왔다. 한 사회의 상층부에 속한 사람들이 학문탐구의 일환으로 과학에 관심을 기울여 왔던 반면, 기술은 실제 생산활동에 종사하는 낮은 계층의 사람들이 담당해 왔다. 게다가 고대와 중세에는 철학적 차원에서도 자연적인 것과 인공적인 것이 엄격히 구분되었기 때문에 인공적인 것을 담당하는 기술은 자연의 질서를 거역하는 것으로 간주되었다. 물론 아르키메데스(Archimedes)와 같이 과학과 기술을 함께 한 사람도 있었지만, 그것은 매우 예외적인 경우에 해당하였다. 심지어 아르키메데스조차도 자신이 기술자로 비취지는 것을

매우 싫어하였다.

이러한 상황은 근대 사회에 접어들면서 점차적으로 변화되었다(김영식, 2001). 16-17세기의 과학혁명을 통하여 적지 않은 과학자들이 기술을 높게 평가하기 시작하였고 기술의 지식과 방법이 과학의 추구에서도 의미를 지니는 것으로 생각하였다. 당시의 과학자들은 더 이상 자연세계만을 탐구의 대상으로 삼지 않았으며, 기술도 과학의 새로운 출처로 간주하게 되었다. 예를 들어, 갈릴레오는 당시의 기술자들과 자주 교류하였고, 그가 다룬 역학의 주제들이 기술적인 문제에 자극을 받아 촉진되기도 하였다. 더 나아가 과학이 기술의 방법을 배워야 한다는 생각이 널리 퍼졌으며, 과학이 기술로 응용되어야 한다는 믿음도 생겨났다. 베이컨은 귀납적 방법을 주창하면서 실제적·기술적 지식을 옹호하였고, “아는 것은 힘이다.”고 하여 과학이 기술에 기여해야 한다는 강한 믿음을 보였다.

과학과 기술의 관계는 18세기 중엽부터 19세기 중엽까지 전개된 영국의 산업혁명을 통해 더욱 발전하였다. 산업혁명기에는 과학자와 기술자가 빈번하게 교류하게 되면서 두 집단이 지식을 습득하는 경로도 비슷해졌으며, 한 사람이 두 가지 분야에서 활동하는 경우도 많아졌다. 과학자들은 산업이나 기술과 관련된 지식을 분류, 정리, 설명했으며, 기술자들은 기술혁신의 과정에서 과학의 태도와 방법을 적극적으로 활용하였다. 예를 들어, 와트(J. Watt)가 증기기관을 개량하는 데에는 기존의 기술이 가진 문제점을 정량적으로 분석하고 이를 일반화하여 모델을 만든 후 실험을 실시하는 과학적 방법이 큰 역할을 담당하였다. 특히, 산업혁명기의 영국에서는 루나협회(Lunar Society)를 비롯한 과학단체를 매개로 과학에 대한 관심이 저변문화를 형성할 정도로 광범위하게 확산되어 있었고, 과학적 지식을 기술혁신에 활용하려는 노력이 다각도로 이루어졌다. 그러나 산업혁명기에도 과학의 내용이 기술혁신에 구체적으로 적용된 예는 거의 없었으며, 대부분의 기술혁신은 과학의 응용이라기보다는 경험을 세련화한 성격을 띠고 있었다.

과학의 내용이 기술혁신에 본격적으로 활용되기 시작한 것은 19세기 후반부터 발생한 일이라고 볼 수 있다. 그것은 영국이 아닌 독일과 미국에서, 그리고 기존의 분야가 아닌 새로운 분야에서 시작되었다. 독일의 화학산업은 유기화학을, 미국의 전기산업은 전자기학을 바탕으로 탄생했던 것이다. 특히, 이러한 분야들에서는 기업체가 연구소를 설립하여 산업적 연구(industrial research)를 수행함으로써 과학과 기술이 상호작용할 수 있는 제도적 공간이 마련되었다. 바이에르(Bayer) 연구소와 제너럴 일렉트릭(General Electric) 연구소는 그 대표적인 예이다. 20세기에는 수많은 기업연구소들이 설립되어 과학자들에게 새로운 직업을 제공했으며, 과학연구에 입각한 기술개발이 점차적으로 보편화되었다(김영식·임경순, 2007). 이와 함께 20세

기를 전후해서는 기술에 대한 학문인 공학(engineering)이 출현하여 과학과 기술의 상호작용이 학문적 차원에서도 강화되기 시작하였다.

19세기 후반부터 본격화된 과학과 기술의 상호작용은 20세기 중반 이후에 더욱 심화되었다. 과학이 기술로 현실화되는 시간격차(time lag)가 점차적으로 짧아졌으며, 과학을 바탕으로 새로운 산업이 출현하는 경우도 빈번해졌다. 핵물리학이 원자력에, 고체물리학이 컴퓨터에, 분자생물학이 바이오산업에 활용된 것은 그 대표적인 예이다. 특히, 20세기 중반 이후에는 정부나 기업의 지원을 바탕으로 특정한 목표를 달성하기 위한 대규모 프로젝트가 추진되는 일이 빈번해졌고, 이를 매개로 과학자와 기술자가 동시에 활용되는 경우가 많아지면서 과학과 기술을 실제로 구분하는 것이 쉽지 않게 되었다. 오늘날의 많은 과학자들은 일반적인 이론보다는 데이터 분석이나 기법의 개발에 더욱 관심을 가지고 있으며, 기술시스템이 점점 거대화되고 정교해짐에 따라 과학에 대한 체계적인 이해가 유의미한 기술 활동을 수행하기 위한 필수적인 조건으로 간주되고 있다. 이와 같은 과정을 통해 과학과 기술은 서로 접촉할 수 있는 기회를 점차 확장함으로써 오늘날에는 ‘과학기술’ 혹은 ‘테크노사이언스(technoscience)’이란 용어가 사용될 정도로 밀접한 관계를 형성하고 있다 (Latour, 1987).

이와 같은 과학과 기술의 상호작용은 남녀의 관계에 비유될 수 있다. 이전에는 아무런 의미도 없었던 두 남녀가 처음으로 만나고 관계가 발전하면서 약혼을 하고 결혼에 이르듯이, 과학과 기술도 이러한 과정을 거쳐 왔다고 볼 수 있다. 오랜 기간 동안 별개로 존재해 왔던 과학과 기술은 과학혁명기를 통해 처음 만난 후 산업혁명기를 통해 더욱 적극적인 의미를 확인하게 되었고, 19세기 후반에 약혼의 상태에 접어든 후 20세기 중반 이후에 ‘과학기술’이라는 결혼의 상태에 이른 것이다. 결혼이라는 비유는 두 가지 측면에서 유용하다고 볼 수 있다. 한 가지는 결혼한 부부라도 독립적인 인격체이고 갈등의 소지를 가질 수 있듯이, 과학과 기술을 완전한 하나로 보기는 어렵다는 점이다. 다른 한 가지는 결혼한 부부가 자식을 낳아 기르듯이, 과학과 기술이 새로운 매개물을 창출하면서 그 관계를 지속적으로 발전시킬 수 있다는 점이다.

2) 과학기술학의 전개

과학기술과 사회의 상호작용을 탐구하는 학문 분야는 과학기술학으로 불리며, 과학학(science studies)으로 줄여 쓰기도 한다(Webster, 1991; Hess, 1997; 홍성욱, 2004; 김환석, 2006; 송성수, 2011). 과학이 자연을 탐구하는 학문이라면 과학학은 과학을 대상으로 하는 학문으로 일종의 메타과학(meta science)에 해당한다. 과학기

술학은 과학기술에 대한 인문·사회과학적 접근을 통칭하는 분야라고 할 수 있다. 과학기술학의 범위를 엄밀하게 규정하기는 어렵지만 통상적으로는 과학기술사, 과학기술철학, 과학기술사회학, 과학기술정책 등을 포함한다. 그 중에서 과학사와 과학철학이 먼저 자리를 잡은 후 과학사회학, 과학기술정책, 기술사, 기술사회학, 기술철학 등이 형성되었고, 1970-1980년대에는 이러한 분야들이 과학기술학이란 우산속으로 모이기 시작하였다.

과학기술학은 제1세대, 제2세대, 제3세대를 거쳐 변화해 왔다고 볼 수 있다. 제1세대 과학기술학은 과학사, 과학철학, 과학사회학, 과학기술정책 등의 형태로 과학과 기술에 대한 인문·사회과학적 접근이 시도되었다. 당시의 과학사에서는 과학의 내용에 중점을 두는 내적 접근법(internal approach)이, 과학철학에서는 과학의 본성으로 논리와 경험을 중시하는 논리실증주의가, 과학사회학에서는 과학제도를 구조기능주의의 시각으로 분석하는 것이, 과학기술정책에서는 기초연구→응용연구→기술개발→상업화로 이어지는 선형 모형(linear model)이 지배적이었다. 제1세대 과학기술학의 여러 분야들은 공통적인 개념이나 방법을 공유하지는 않았지만, 과학이 보편적이고 합리적이며 사회로부터 자율적이라는 점에 대해서는 공감하고 있었다. 이와 함께 제1세대의 경우에는 과학기술학이란 용어가 등장하지 않았으며, ‘과학기술과 사회에 관한 연구(the study of science, technology and society, SSTS)’라는 용어가 사용되기도 했다(Spiegel-Rösing & Price, 1977).

제1세대 과학기술학의 경향을 잘 보여주는 예로는 과학사회학의 창시자로 불리는 머튼(Robert K. Merton)의 과학규범에 대한 논의를 들 수 있다(Merton, 1973). 그는 1942년에 발표한 “과학의 규범구조(The Normative Structure of Science)”라는 논문에서 과학을 합리적인 규범이 지배하는 과학자사회의 산물로 파악한 후 흔히 ‘CUDOS 규범’으로 불리는 보편주의(universalism), 공동주의(communism), 불편부당성(disinterestedness), 조직화된 회의주의(organized skepticism)를 과학에 대한 규범으로 제시했다. 과학은 인종, 국적, 종교, 성, 연령, 사회적 지위 등에 관계없이 보편적으로 적용되며, 과학의 소유권은 과학자사회 혹은 인류 전체에 귀속되고, 과학자들은 개인적·정치적 이해관계에 얽매이지 말고 과학 그 자체를 위하여 활동해야 하며, 과학을 당연한 것으로 받아들이지 말고 비판적 태도를 취해야 한다는 것이었다. 이러한 과학규범은 과학을 효율적으로 발전시키기 위한 기술적 처방이자 과학자들에게 내면화되어 양심을 형성하는 도덕적 처방으로 작용한다는 것이 머튼의 진단이었다.

과학기술학은 제2세대를 통해 본격적으로 그 모습을 드러내기 시작했는데, 특히 과학지식사회학(sociology of scientific knowledge, SSK)은 과학기술학이 형성될 수

있는 비옥한 토양이 되었다. 과학지식사회학은 쿤의 패러다임 이론과 같은 새로운 과학철학, 과학사에서 사회적 요인에 주목하는 외적 접근법(external approach), 지식의 존재구속성을 강조한 지식사회학 등을 배경으로 등장했으며, 기존의 과학사회학과 달리 과학제도보다는 과학지식에 초점을 맞추었다. 과학지식사회학은 과학지식이 사회와 무관하게 발전하는 것이 아니라 과학지식이 사회적으로 구성된다고 주장했다. 흔히 과학에 대한 ‘사회구성주의(social constructivism)’로 불린다.

과학지식사회학은 강한 프로그램(strong programme), 경험적 상대주의 프로그램(empirical programme of relativism, EPOR), 실험실 연구(laboratory studies) 등의 형태로 발전해 왔다. 강한 프로그램은 성공한 과학과 실패한 과학을 공평하지 않게 다루거나 전자는 합리적인 요인으로, 후자는 사회적인 요인으로 설명하는 비대칭성을 거부하면서 과학지식이 구성되는 과정에도 다른 지식과 마찬가지로 사회적 이해관계가 반영된다고 주장하고 있다(Bloor, 1976). 경험적 상대주의 프로그램은 핵심 집단(core set)을 중심으로 수많은 논쟁을 거쳐 특정한 과학지식이 생산되는 과정을 탐구하면서 그 과정을 과학에 대한 해석적 유연성(interpretative flexibility)이 존재하는 단계, 합의가 형성되어 논쟁이 종결되는 단계, 과학논쟁과 거시 사회와의 관계를 규명하는 단계로 구분하고 있다(Collins, 1985). 실험실 연구는 과학지식이 구성되는 현장인 실험실에서 벌어지는 활동이나 담론을 참여관찰의 방식으로 분석함으로써 문제의 설정에서 해결에 이르는 모든 단계의 과학 활동이 과학자들 사이의 부단한 협상을 통해 만들어진다는 점을 강조하고 있다(Latour & Woolgar, 1979).

사회구성주의는 과학적 사실은 물론 기술적 인공물에도 적용되기 시작했는데, 기술의 사회적 구성론(social construction of technology, SCOT)은 그 대표적인 예이다(송성수, 1999). 그 이론에 따르면, 특정한 기술과 관련된 사회집단(relevant social groups)은 해석적 유연성을 가지고 있어 자신의 이해관계에 따라 해당 기술에 대한 문제점과 해결책을 다르게 파악한다. 이러한 갈등은 일종의 사회적 협상을 거쳐 어느 정도 합의에 도달하게 되는데, 논쟁이 종결되는 단계에 이르게 되면 관련된 사회집단들은 기존의 문제점이 해결되었다고 인식하게 되며 새로운 차원의 문제를 제기한다. 과학과 기술을 동시에 다루는 입장으로는 행위자-연결망 이론(actor-network theory, ANT)을 들 수 있다(홍성욱, 2010). 행위자-연결망 이론은 매우 이질적인 행위자들이 연결망을 구축하는 과정을 통해 특정한 과학기술의 일생을 탐구함으로써 과학기술과 사회가 동시에 구성된다는 점을 강조한다. 이 때 행위자에는 인간행위자(human actors)뿐만 아니라 비인간행위자(non-human actors)도 포함되며, 주요 행위자가 다른 행위자들의 이해관계나 의도를 번역(translation)하는 것이 연결망을 구축하는 데 관건으로 작용한다.

사회구성주의자들은 다양한 사례연구를 통해 자신들의 주장을 전개해 왔는데, 여기서는 분류학과 자전거에 대한 사례를 검토하기로 하자. 분류학의 아버지로 불리는 린네(C. Linne)는 고래, 말, 원숭이, 인간 등의 동물이 새끼를 낳아 젖을 먹여 기르는 특징을 공통적으로 가졌다고 해서 ‘포유류’라는 이름을 지었다. 포유류가 새끼를 젖으로 기르는 것은 분명히 사실이지만, 엄밀하게 말하자면 수유(授乳)는 포유류에 속하는 동물 중에서 암컷만의 기능이고 그것도 암컷의 일생 중에서 극히 짧은 기간에만 가지는 특징이라 할 수 있다. 더구나 포유류는 수유 이외에도 심장 구조가 2심방 2심실이라든지, 온 몸에 털이 있다든지, 네 발을 가지고 있다든지 등과 같은 다른 공통점도 가지고 있다. 그런데 린네는 왜 포유류라는 분류를 채택했을까? 이 질문에 대한 대답은 린네가 살았던 사회의 분위기와 밀접한 관련이 있다. 18세기 유럽 사회에서는 상류층 여성들이 아이를 유모에게 맡기고 사회활동에 전념하거나 일부 급진적인 여성들은 아예 아이를 낳지 않으려는 경향이 강했다. 당시의 지배 집단은 적정한 수의 아이들이 있어야 미래의 노동력과 군사력을 보장받을 수 있다고 믿었으며, 출산과 육아의 중요성을 강조하면서 여성의 활동을 가정으로 제한하려고 했다. 린네도 이러한 취지에 적극적으로 동조하였고, 실제로 린네의 부인은 7명의 자녀를 낳고 모두를 젖으로 먹여 길렀다. 이러한 사회적 분위기와 사고방식으로 인하여 린네는 분류학 체계를 만들면서 포유류라는 개념을 도입했다는 것이다 (Schibinger, 1993).

다음은 자전거의 변천과정에 대한 사례이다(Pinch & Bijker, 1987). 자전거와 관련된 사회집단에는 기술자뿐만 아니라 남성 이용자, 여성 이용자, 심지어 자전거 반대론자까지 포함되는데, 각 집단은 자전거의 의미를 자신의 이해관계나 선호도에 따라 다르게 해석했다. 앞바퀴가 높은 자전거(19세기에는 이런 자전거를 ‘ordinary bicycle’로 불렀다)에 대하여 스포츠를 즐겼던 젊은 남성들은 남성적이고 속도가 빠른 인공물로 해석했지만, 여성이나 노인에게는 그것이 안전성을 결여한 인공물에 지나지 않았다. 공기타이어가 처음 등장했을 때 여성이나 노인은 진동을 줄이는 수단으로 간주했지만, 스포츠를 즐겼던 사람들에게는 쿠션을 제공하는 공기타이어가 오히려 불필요한 것이었다. 자전거 반대론자들은 공기타이어를 풀볼건인 악세사리로 치부하였고, 일부 엔지니어들은 공기타이어 때문에 진흙길에서 미끄러지기 쉬워 안전성이 더욱 떨어진다고 생각하였다. 자전거와 관련된 사회집단들은 자전거의 문제점들에 대해 다양한 해결책을 내놓았다. 진동 문제의 해결책으로는 공기 타이어, 스프링 차체 등이 거론되었고, 안전성 문제를 해결하는 대안으로는 오늘날과 같은 안전자전거(safety bicycle) 이외에도 낮은 바퀴 자전거, 세발자전거 등이 제안되었다. 여성의 의상 문제에 대한 해결책으로 <그림 2-4>에서 보는 것과 같은 특수한

형태의 높은 앞바퀴 자전거가 설계되기도 했다. 19세기 말에 앞바퀴가 높은 자전거 대신에 안전자전거가 정착하는 데에는 자전거 경주가 중요한 역할을 담당하였다. 사람들의 일반적인 예상을 깨고 공기타이어를 장착한 안전자전거가 다른 자전거보다 빠르다는 것이 자전거 경주를 통해 입증되었던 것이다. 이를 통해 공기타이어의 의미는 진동을 억제하는 장치에서 속도 문제에 대한 해결책으로 다시 정의되었다.



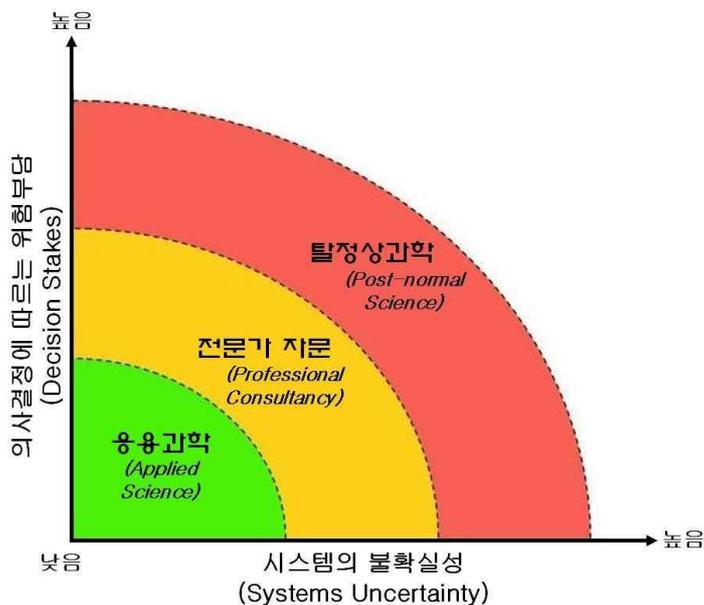
<그림 2-4> 19세기 중엽에 치마를 입은 여성들을 위해 만들어진 자전거.

이상의 사례에서 보듯이, 사회구성주의자들은 이미 만들어진 과학(ready-made science)이 아니라 만들어지고 있는 과학(science-in-the-making)에 주목하고 있으며, 과학과 기술의 변화에는 관련된 행위자나 집단의 갈등과 협상이 수반되는 복잡한 과정이 매개된다는 점을 잘 보여주고 있다. 사회구성주의는 제2세대 과학기술학의 이론적 기반으로 작용해 왔으며, 과학적 사실과 기술적 인공물의 사회적 구성은 물론 과학기술과 대중, 과학기술과 여성, 과학기술과 공공정책 등으로 연구의 범위를 확장해 왔다. 즉, 대중은 어떤 맥락에서 과학기술을 이해하는가, 기존의 과학기술은 남성중심적이지 않은가, 과학기술정책은 어떤 식으로 만들어지는가 등을 사회구성주의의 시각에서 탐구해 왔던 것이다(Jasanoff et al., 1997).

제2세대 과학기술학의 키워드가 ‘구성(construction)’이었다면, 제3세대는 ‘관여(engagement)’를 표방하고 있다(Hackett et al., 2007). 제2세대 과학기술학이 주로 과학기술과 사회의 상호작용에 관한 이론적 시각을 마련하는 것에 초점을 두었다면, 제3세대 과학기술학은 과학기술과 사회에 관한 이론과 실천을 통합하려는 방향

으로 나아가고 있는 것이다. 제3세대 과학기술학은 관련 이론을 정교화하는 것은 물론 과학기술정책과 민주주의, 과학기술의 제도적·경제적 상황, 첨단 과학기술의 사회적·윤리적 문제 등에도 주의를 기울이고 있다.

제3세대 과학기술학의 경향을 잘 보여주는 예로는 탈(脫)정상과학(post-normal science)에 관한 논의를 들 수 있다(Funtowicz & Ravetz, 1992). 펀토위츠(Silvio O. Funtowicz)와 라베츠(Jerome R. Ravetz)는 시스템의 불확실성과 의사결정에 따르는 위험부담을 기준으로 다음과 같은 세 가지 유형의 문제해결방식을 구분하고 있다. 시스템의 불확실성도 낮고 의사결정에 따르는 위험부담도 낮은 영역에 해당하는 응용과학(applied science), 중간 정도의 영역에 해당하는 전문가 자문(professional consultancy), 불확실성도 높고 위험부담도 큰 탈정상과학이 그것이다. 탈정상과학의 영역에서는 퍼즐을 풀이하는 식으로 과학을 응용하거나 다양한 전문가들에게 자문을 구해서 해결책을 마련하는 방식이 더 이상 효력을 발휘할 수 없다. 탈정상과학의 가장 중요한 특징은 과학의 주체가 과학자사회에서 시민과 이해집단을 포함하는 확장된 동료 공동체(extended peer community)로 바뀐다는 데 있으며, 과학적 사실도 실험 결과뿐 아니라 관련 당사자의 경험, 지식, 역사 등을 포함하는 확장된 사실(extended facts)로 바뀐다. 이러한 변화는 과학기술을 실험실 밖으로 끌어내어 다양한 행위자나 집단이 참여하는 가운데 과학기술의 사회적, 문화적, 정치적 측면에 대해 논의하는 공공 논쟁의 필요성을 부각시키고 있다.



<그림 2-5> 위험에 관한 세 가지 문제해결방식

3) STS 교육

STS에는 ‘학문으로서의 STS’와 ‘교육으로서의 STS’라는 두 가지 차원이 존재한다고 볼 수 있다. 전자는 과학기술학을 지칭하며, 후자는 STS 교육에 해당한다. STS 교육에서 STS는 과학-기술-사회(Science-Technology-Society)를 줄인 것으로 영국의 물리학자인 자이먼(John Ziman)이 『과학과 사회에 대해 가르치고 배우기(Teaching and Learning about Science and Society, 1980)』에서 처음 사용했다고 알려져 있다. 여기서 그는 과학교육이 과학자가 되기 위한 준비에 국한되어서는 곤란하다고 지적한 후 과학, 기술, 사회의 상호작용을 다루는 폭넓은 과학교육의 필요성을 강조하면서 자신의 개인적 경험을 바탕으로 STS 교육의 방법과 의미에 대해 자세히 검토하였다(Ziman, 1980).

STS 교육은 자이먼을 비롯한 영국의 진보적 과학자들이 대학의 교양과학을 개혁하기 위해 1971년에 SISCON(Science In Social CONtext)이라는 모임을 결성하면서 시작되었다고 볼 수 있다(송진웅, 2000). 1978-1983년에는 솔로몬(Joan Solomon)을 비롯한 현직 과학교사들을 중심으로 SISCON-in-Schools가 추진되어 본격적인 STS 교육프로그램이 개발되었다. 1980년대 이후에 STS 교육은 세계 각국으로 확산되어 영국의 SATIS(Science and Technology in Society)와 솔터즈 사이언스(Salters' Science), 미국의 ICP(Iowa Chautauqua Program), 네덜란드의 PLON(Physics Curriculum Development Project)을 비롯한 다양한 STS 교육프로그램이 개발되었다(Yager, 1996).

1970년대에 들어와 STS 교육이 강조된 배경으로는 환경문제를 비롯한 과학기술과 관련된 사회적 문제들이 가시화되기 시작했다는 점, 과학기술에 대한 비판의 목소리가 높아져 갔다는 점, 세계 각국에서 과학기술정책에 대한 관심이 증가했다는 점 등을 들 수 있다. 당시에 스노(Charles Snow)의 『두 문화와 과학혁명(The Two Cultures and the Scientific Revolution, 1959)』, 쿤의 『과학혁명의 구조(1962)』, 카슨(Rachel Carson)의 『침묵의 봄(Silent Spring, 1962)』 등과 같이 과학의 성격이나 가치를 사회적·문화적 맥락에서 재조명하는 저작들이 출판되어 널리 읽혀졌다는 점도 주목할 만하다. 이와 함께 과학교육의 측면에서는 학문중심의 과학교육에 대한 반발작용이 있었고, 학생들이 과학에서 이탈하는 현상이 본격화되었으며, 과학기술의 부정적 측면에 대한 대처가 미흡하다는 비판이 있었다(최경희, 1996).

이와 관련하여 1977년에 미국 국립과학재단(National Science Foundation, NSF)의 지원을 받아 수행된 Project Synthesis의 보고서는 과학교육에 포함되어야 할 4가지 목적군(goal cluster)으로 ① 개인의 요구(personal needs), ② 사회적 쟁점

(social issues), ③ 진로교육 및 인식(career education/awareness), ④ 학문의 준비(academic preparation)를 제시하면서 기존의 과학교육이 ④에 치중했던 반면 STS 교육은 모든 목적의 달성에 적합하다고 지적하였다(Harms & Yager, 1981).

① 개인의 요구: 과학교육은 학생 개개인들이 그들 자신의 생활을 개선하고 점차 기술화되어 가는 세계에 대처할 수 있게 해 주어야 한다.

② 사회적 쟁점: 과학교육은 과학과 관련된 사회적 쟁점을 책임 있게 다룰 수 있는 교양을 갖춘 시민을 양성해야 한다.

③ 진로교육 및 인식: 과학교육은 서로 다른 적성과 관심을 가진 학생들에게 다양한 과학과 기술에 관련이 있는 직업의 성격과 그 범위에 대한 인식을 심어주어야 한다.

④ 학문의 준비: 과학교육은 학문적으로나 전문적으로 과학을 추구하려는 학생들이 그들의 필요에 적절한 지식을 획득할 수 있도록 해 주어야 한다.

과학교육과 관련된 많은 학자들은 STS 교육의 취지에는 공감하면서도 어떤 측면에 초점을 둘 것인가에 대해서는 의견을 달리했다(조희형, 1994; 최경희, 1996). 예를 들어, 과학, 기술, 사회 중에 어떤 것을 강조하는지에 따라 STS 교육은 서로 다르게 정의되었다. “STS는 과학의 기술적·사회적 환경 하에서 과학내용을 가르치는 것을 의미한다.”는 입장도 있었고, “과학, 기술, 사회의 가장 직접적인 상호작용은 기술과 사회 사이에 존재한다.”는 견해도 있었으며, STS를 “과학의 사회, 정치, 경제 및 윤리적 측면에 관한 학습으로의 통합적 접근”으로 정의하는 경우도 있었다. 또한 STS 교육이 무엇을 지향하는가에 대해서도 다양한 의견이 제시되었다. STS 교육에서 “인간의 경험적 맥락에서 과학을 가르치고 학습하는 것”이 강조되기도 했고, “STS는 기술사회에 있어서 책임 있는 시민정신을 고취시키기 위한 교육 개혁이다.”는 정의나 “STS는 1%의 엘리트 학생을 과학자로 만드는 것이 아니라 99%의 대다수 학생들이 과학과 기술에 대한 소양을 갖추도록 교육하는 것”이라는 정의도 있었다.

이와 같은 다양한 견해를 종합하여 최경희(1996)는 STS 교육의 특성을 다음과 같이 정리하고 있다. 첫째, STS 교육은 과학, 기술, 사회의 상호 관련성을 다룬다. 둘째, STS 교육은 인간의 경험적 맥락에서 이루어진다. 셋째, STS 교육은 과학적 소양(scientific literacy)의 함양을 추구한다. 넷째, STS 교육은 각종 의사결정과 문제해결력을 증시한다. 다섯째, STS 교육은 만인을 위한 과학(science for all)을 추구한다.

이 중에서 STS 교육의 목적으로 가장 많은 주목을 받았던 것은 ‘과학적 소양’이라 할 수 있다. 과학적 소양에 대해서도 수많은 정의가 존재하는데, 미국의 전국과

학교사협회(National Science Teachers Association, NSTA)의 정의를 소개하면 다음과 같다(NSTA, 1982). “과학적 소양을 갖춘 사람은 과학, 기술, 사회가 서로 어떻게 영향을 끼치는가를 이해하고 일상생활의 의사결정에서 과학지식을 사용할 수 있다. 과학적 사실, 개념, 개념의 관계, 탐구과정에 대한 확고한 지식을 소유하고 있어 논리적으로 사고하고 학습할 수 있다. 또한 과학과 기술의 가치와 한계점까지도 인식할 수 있다.”

STS 교육의 주제나 내용은 수업목표, 교수법, 타 교과와의 연계성 등을 고려하여 다양하게 선정되고 조직될 수 있다. 자이먼(Ziman, 1980)은 과학과 기술이 다양한 사회적 측면을 지니고 있기 때문에 어떠한 측면을 강조할 것인가에 따라 다양한 방법으로 STS 교육을 실시할 수 있다고 지적하였다. 그는 STS 교육에 접근할 수 있는 방법으로 과학과 사회의 관련성, 직업적 접근, 학제성(interdisciplinarity), 역사적 접근, 철학적 접근, 사회학적 접근, 사회적 문제를 통한 접근 등을 제안하였다. 예거(Yager, 1989)는 이와 함께 지역사회와의 관련성, 의사결정 능력의 함양, 현실문제에 대한 협동작업, 정보의 선택 및 활용 등을 고려하여 과학과 교육과정에 포함시켜야 할 STS 관련 요소를 다음의 8가지로 제시하였다.

① 지역사회와의 관련성: 과학 학습은 지역에서 볼 수 있고, 중요하게 고려되고, 연구되어야 하는 사건이나 사물에 대하여 관심을 가져야 한다.

② 과학의 응용성: 과학의 응용으로서 기술은 많은 연관성을 가지고 과학이론을 더욱 쉽게 보이고 이해할 수 있게 한다.

③ 사회적 문제: 과학은 그것을 활용하고 창조하기도 하는 사회와 분리될 수 없다. 학문의 구조나 과학적 과정 대신에 인간, 인간의 잠재적 능력, 인간의 진보와 적응은 교육과정의 조직자로서 좋은 역할을 담당할 수 있다.

④ 의사결정 능력의 함양을 위한 연습: 모든 사람들은 미래사회나 일상생활과 관련된 의사결정을 할 때 어떤 근거를 바탕으로 한다. 과학은 학문적 문제를 풀기 위해 기능을 개발하는 것보다 사회적 상황과 관련된 의사결정을 할 때 더욱 중요해진다.

⑤ 과학과 관련된 직업의 인식: 우리는 현재 과학기술의 시대에 살고 있기 때문에 과학과 기술에 관련된 직업들은 사회의 한 부분이 된다. 여기서 직업이 반드시 과학자나 기술자를 의미하는 것은 아니다.

⑥ 현실문제에 대한 협동작업: 교과서 속의 문제들은 학생들이 미래의 사회적 문제를 해결할 수 있는 책임감 있는 시민으로 성장하는 데 큰 도움을 주지 못한다. 어떤 문제나 논제를 다룰 때는 전통적인 과학수업과 달리 윤리적·도덕적·가치적 차원까지 고려되어야 한다.

⑦ 과학의 다차원성에 대한 인식: 과학의 정치적, 사회적, 심리학적, 철학적 차원은 과학의 내용 혹은 학문적 차원보다 학생들에게 더 중요할 것이다.

⑧ 정보의 선택 및 활용에 관한 평가: 정보를 선택하여 활용하는 것은 단지 용어나 개념의 정의를 평가하는 것보다 과학교육에서 더욱 가치 있게 다루어지고 훈련되어야 한다.

나. 과학의 윤리적 측면

1) 과학연구의 윤리

연구윤리(research ethics)는 연구의 계획, 수행, 보고 등과 같은 연구의 전 과정에서 책임 있는 태도로 바람직한 연구를 추진하기 위해 지켜야 할 윤리적 원칙이라고 할 수 있다. 연구윤리의 키워드는 ‘진실성(integrity)’이며, 진실성을 확보하기 위한 논의와 실천이 연구윤리에 해당한다고 할 수 있다. 진실성은 바람직한 연구가 무엇인지를 압축해서 표현한 단어로서 절차적 투명성과 내용적 객관성을 포괄하는 개념에 해당한다. 이와 유사한 의미를 가진 용어로는 책임 있는 연구수행(responsible conduct of research, RCR)과 바람직한 연구실천(good research practice, GRP)이 있다. 전자는 미국에서, 후자는 유럽에서 널리 사용되고 있는데, 전자는 무책임한 연구수행을 방지하는 것에 초점을 두고 있는 반면 후자는 훌륭한 연구윤리의 관행을 진작시키는 것을 강조하고 있다.

연구윤리가 포괄하는 범주는 ① 연구수행의 과정, ② 연구결과의 출판, ③ 연구실 생활, ④ 생명체 연구의 윤리, ⑤ 연구자의 사회적 책임 등과 같은 다섯 가지로 종합할 수 있다(Resnik, 1998; 이상욱·조은희 외, 2011; 송성수, 2011). 여기서 ①, ②, ③은 주로 연구계 내부의 윤리적 쟁점에 해당하며 모든 분야에 해당하는 통상적인 의미의 연구윤리라 할 수 있다. ④는 동물이나 사람을 대상으로 하는 생물학, 의학, 심리학 등의 특정한 분야에 적용되는 문제에 해당한다. ⑤는 연구자 혹은 연구계가 외부 사회에 대하여 적절한 역할과 책임을 수행하고 있는가에 대한 쟁점에 해당한다. 물론 연구윤리가 포괄하는 범주는 논자에 따라 차이를 가질 수 있지만, 이와 같은 다섯 가지의 범주는 서로 밀접히 연관되어 있다. 그것은 연구부정행위(research misconduct)가 발생한 원인을 진단하거나 이를 예방하기 위한 대책을 마련하는 과정에서 더욱 뚜렷하게 드러난다.

연구수행의 과정에 대한 윤리는 정직하게 충분한 주의를 기울여 충실한 연구를 수행했는지, 아니면 의도적인 속임수, 부주의, 자기기만(self-deception) 등으로 인해 부적절한 연구결과를 산출했는지에 대한 문제에 해당한다. 특히, 연구수행의 과정에서 데이터 혹은 이론을 위조, 변조, 표절(fabrication, falsification and plagiarism, FFP)한 것이 가장 큰 문제가 되고 있다. 여기서 위조는 존재하지 않는 데이터나 연구결과를 인위적으로 만들어내서 그것을 기록하거나 보고하는 행위에 해당한다. 변

조는 연구와 관련된 재료, 장비, 공정 등을 허위로 조작하는 것, 또는 데이터나 연구결과를 바꾸거나 삭제하는 것을 통해 연구의 내용이 정확하게 발표되지 않도록 하는 행위이다. 표절은 다른 사람의 아이디어, 연구과정, 결과, 말 등을 적절한 인용 없이 도용하는 행위에 해당한다. 이와 함께 연구수행의 과정에서는 데이터의 관리가 중요한 쟁점이 되는데, 데이터를 분석할 때 통계기법을 오용하지 않는 것과 실험에서 도출된 원 데이터(raw data)를 일정 기간 이상 충실히 보관해 두는 것이 요구되고 있다.

학술지에 연구결과를 발표하는 것은 모든 분야의 연구에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 논문의 출판이 연구자로서 인정을 받고 성장하는 데 필수적인 잣대로 작용하기 때문이다. 학술지에 논문을 발표하는 경우에는 일정한 자격을 갖춘 사람에게만 저자 표시(authorship)를 허용하고 실질적으로 기여한 정도에 따라 저자의 순서를 정함으로써 공로(credit)를 합당하게 배분해야 한다. 무엇보다도 연구에 실질적으로 기여하지 않은 사람을 논문의 저자로 이름을 올리는 행위, 즉 ‘명예저자 표시(honorary authorship)’가 근절되어야 한다. 또한 대학원생이나 박사후 연구원과 같은 소장 연구자들에 대해 정당한 공로를 인정해야 하며, 동일한 내용의 연구결과를 중복해서 발표하여 연구업적을 부풀리는 중복게재(duplicate publication)를 피해야 한다. 이와 함께 과학자가 동료심사(peer review)를 거치지 않은 연구 성과를 기자회견 등을 통해 발표해 대중적 명성이나 금전적 이익을 추구하는 것도 중요한 문제로 대두되고 있다.

오늘날의 연구 활동은 대부분 연구실이나 실험실에서 이루어지고 있다. 연구실에서는 많은 사람들이 오랜 시간 함께 생활하게 되며, 그러한 관계 속에서 다양한 차원의 윤리적 문제들이 발생하게 된다. 그 중에는 특정한 국가의 사회적 관행이 연구계에 투영된 것도 있고, 연구계에서 특별히 부각되는 것도 있다. 연구실에서는 멘토(mentor)와 멘티(mentee)의 관계가 가장 중요한 문제가 된다. 지도교수나 연구책임자와 같은 멘토는 멘티에 해당하는 대학원생이나 연구원을 활용 가능한 노동력으로만 보지 말고 적절한 지도를 해 주어야 한다. 또한, 여성을 비롯한 사회적 소수자 집단(social minorities)에 대한 차별이나 괴롭힘이 없어야 한다. 연구원의 채용과 인정에 있어서 충분한 기회를 제공하고, 연구비 및 실험재료 등과 같은 자원을 공평하게 배분하고 적절히 활용하는 것도 필수적이다. 실험실의 안전을 보장할 수 있는 조치를 강구하는 것과 부정행위에 대한 내부고발자 혹은 제보자(whistleblower)를 보호하는 것도 중요한 쟁점에 해당한다.

과학이 발전하면서 동물이나 인간과 같은 생명체도 연구의 대상이 되고 있고 이로 인해 다양한 윤리적 쟁점들이 제기되고 있다. 특히, 어떤 연구와 실험이 윤리적

으로 용인될 수 있는지에 대한 사회적 합의를 도출하는 것이 중요한 과제로 부상하고 있다. 이와 관련하여 1990-2001년에 추진된 인간유전체계획(Human Genome Project)은 연구비의 3% 내외를 윤리적·법적·사회적 함의(Ethical, Legal, and Social Implications, ELSI)에 관한 연구에 투자한 바 있다. 이와 함께 생명체를 다루는 분야의 윤리에서는 피실험자와 ‘정보에 입각한 동의(informed consent)’가 적절히 이루어졌는지, 실험동물에 대한 주의와 배려가 충분히 기울여졌는지가 중요한 쟁점이 되고 있다. 정보에 입각한 동의는 피실험자에게 충분한 정보를 제공하고 피실험자로부터 실험에 대한 자발적인 동의를 얻는 것을 의미하는데, 이러한 과정에서는 적절한 절차와 자료를 확보하는 것이 필수적이다.

연구자의 사회적 책임은 주로 전문직 윤리(professional ethics)에서 논의되고 있지만, 전문직 윤리의 내용 중에는 연구윤리와 겹치는 부분도 많다. 연구자의 사회적 책임에서는 무엇보다도 공공자금을 이용한 연구 활동의 목적과 과정이 공공성을 담보하고 있는지가 중요한 쟁점이 된다. 지나치게 상업적이거나 군사적 목적을 담고 있는 연구를 지양하고, 연구비를 적절한 방식으로 관리하고 집행하며, 연구의 데이터와 결과를 적절히 공유하는 것이 여기에 해당한다. 연구자의 사회적 책임과 관련된 윤리적 쟁점은 이해충돌(conflicts of interest)과 전문가 증언(expert witness) 등으로 확장될 수 있다. 이해충돌이란 진리 탐구를 통해 인류 복지에 기여한다는 연구의 일차적인 목적이 경제적 이익을 비롯한 부수적인 목적에 영향을 받는 상황을 뜻한다. 이해충돌의 경우에는 해당 연구자가 스스로 공표하여 의견을 구하는 것이 바람직한 방법으로 간주되고 있다. 전문가 증언은 연구자가 자신의 연구나 사회가 직면한 중요한 문제에 관해 책임 있게 발언하고 독립적인 조언을 제공하는 것을 의미한다. 전문가 증언의 경우에는 관련 연구의 동향과 한계에 대하여 정직하면서도 현실적으로 발언하는 것이 중요시되고 있다.

2) 첨단 과학기술의 윤리

오늘날 과학기술은 한편으로는 권위 있는 지식체계로서 다른 한편으로는 새로운 제품을 개발하는 원천으로서 인간의 삶과 사회의 변화에 막강한 영향력을 행사하고 있다. 이와 함께 오늘날 과학기술은 환경 문제, 안전 문제, 윤리 문제 등과 결부되어 끊임없이 인간의 삶을 위협하거나 가치관을 혼란시키는 것처럼 보인다. 이처럼 과학기술의 긍정적 측면과 함께 부정적 측면이 가시화됨으로써 과학기술을 어떻게 통제 혹은 관리할 것인가에 대한 고민도 커지고 있다.

사실상 오늘날 첨단 과학기술로 간주되는 정보통신기술, 생명공학기술, 환경에너지기술 등에는 수많은 윤리적 문제가 결부되어 있다(최경희·송성수, 2011; 이상현,

2012). 정보통신기술의 윤리적 쟁점으로는 프라이버시, 인터넷 중독, 해킹, 지적재산권 등을 들 수 있고, 생명공학기술의 윤리적 쟁점에는 생명복제, 유전자변형생물체 (genetically modified organisms, GMO), 유전자 차별, 안락사 등이 있으며, 환경 및 에너지의 경우에는 기후변화, 원자력발전, 신재생에너지, 환경호르몬 등이 중요한 쟁점으로 부각되어 왔다. 여기서는 생명복제기술을 사례로 하여 어떤 윤리적 문제가 발생하고 있는지 살펴보고자 한다.

생명복제기술은 인공적으로 생명체를 복제하는 기술을 의미한다. 생명복제기술은 어떤 생명체를 대상으로 하는가에 따라 동물복제와 인간복제로 구분되며, 해당 생명체를 어떤 수준에서 복제하는가에 따라 배아복제(embryo cloning)와 개체복제(individual cloning)로 구분된다. 배아복제는 수정 후 14일까지의 배아를 복제하는 것을 의미하며, 개체복제는 복제된 배아를 자궁에 착상시켜 세상에 태어나게 하는 것을 말한다. 생명복제기술과 관련된 논쟁은 주로 인간배아복제를 대상으로 전개되어 왔으며, 난치병 치료의 가능성, 배아의 지위, 연구의 허용 범위, 난자의 조달 등이 중요한 논점으로 작용하고 있다.

생명복제기술을 옹호하는 가장 중요한 근거로 제시되는 것은 난치병 치료에 크게 기여하여 인류를 질병에서 구원할 수 있다는 점이다. 특히, 다른 사람의 세포는 면역상의 거부반응을 일으킬 가능성이 높은 반면, 환자 자신의 체세포를 이용해 배아복제를 하여 얻어진 줄기세포를 이식하면 거부반응이 없는 훌륭한 치료가 가능하다는 점이 거론된다. 이에 반해 비판론자들은 생명복제기술이 가진 잠재적 위험성에 주목한다. 생명복제기술을 바탕으로 치료용 의약품으로 개발하여 상업화하는 과정에는 수많은 불확실성이 내재되어 있다는 것이다. 그것은 생명복제기술의 성공률이 그다지 높지 않으며 줄기세포(stem cell)가 암세포로 전이될 위험성이 있다는 점에서 더욱 심각한 문제가 된다.

생명복제에 관한 연구는 수많은 배아를 조작하고 폐기할 수밖에 없는 성격을 띠고 있기 때문에 배아의 도덕적 지위가 중요한 쟁점이 된다. 이에 대하여 육성론자들은 배아가 아직 생명체가 아니며 하나의 세포 덩어리에 불과하다는 입장을 견지하고 있다. 그것은 인간의 개체성이 수정 후 14일에 해당하는 시점에서 시작된다는 주장에 근거를 두고 있다. 수정 후 14일 정도가 지나면 착상이 완료되면서 향후 척추가 될 원시선(原始線, primitive streak)이 생긴다는 것이다. 반면 비판론자들은 배아가 엄연한 생명체이기 때문에 이를 조작하고 실험하고 죽이는 것이 비도덕적 행위에 해당한다고 주장한다. 이와 함께 인간의 생명은 수정 후부터 시작되는 연속적인 성격을 지니고 있으며 14일을 경계로 생명체 여부를 판단하는 것은 다분히 자의적이라는 비판도 있다.

배아의 도덕적 지위에 관한 논쟁은 생명복제기술의 연구대상에 관한 쟁점으로 이어진다. 생명복제기술은 주로 줄기세포를 얻기 위해 연구되며, 줄기세포는 인체의 모든 조직으로 성장할 수 있는 가능성을 가진 세포이다. 줄기세포는 배아에서도 얻을 수 있고 제대혈이나 골수와 같은 성체에서도 얻을 수 있다. 육성론자들에 따르면, 배아는 생명체가 아니기 때문에 배아를 의도적으로 만들어 줄기세포를 연구하는 것이 허용될 수 있다. 특히, 그들은 배아줄기세포가 성체줄기세포에 비해 연구의 효과가 크다고 주장한다. 이에 반해 비판론자들은 배아가 생명체이기 때문에 배아 줄기세포에 대한 연구는 금지되어야 한다고 반박한다. 대신에 성체줄기세포를 이용한 연구는 허용될 수 있다.

비판론 중에는 엄격한 입장 이외에 유연한 입장도 있다. 유연한 입장은 기본적으로 인간배아복제에는 반대하지만 특정한 배아연구에 대해서는 예외적으로 허용하는 자세를 보인다. 이러한 입장에 따르면, 연구의 목적으로 새로운 배아를 의도적으로 창출하는 것은 수용될 수 없지만, 불임시술을 목적으로 이미 만들어져 냉동되어 있는 잔여배아(residual embryo)를 활용하는 것은 가능하다. 그것은 배아연구를 통해 난치병 치료에 기여한다는 편익과 배아연구가 내포하는 윤리적 문제 사이에서 절충점을 찾은 것이라고 할 수 있다. 이러한 입장은 배아의 지위도 새롭게 인식하고 있다. 배아는 아직 인간과 동일하지 않지만 점차적으로 성장하면서 도덕적 지위를 획득하게 되는 잠재적 인간 존재(a potential human being)라는 것이다.

생명복제기술의 또 다른 문제는 난자의 조달에서 찾을 수 있다. 연구에 쓰이는 수많은 난자는 어떻게 조달할 것인가? 기증 의사를 밝힌 여성의 동의를 받으면 난자를 얻는 것이 어렵지 않다고 생각하는 사람도 있지만, 실상은 그렇게 간단하지 않다. 난자 추출이 여성의 건강에 심각한 해를 끼칠 수 있다는 경고가 속속 제기되고 있는 것이다. 난자를 인공적으로 채취하는 과정은 2-3주 정도가 걸리는데, 그 동안 여성은 매일 호르몬 주사를 맞아야 하고 약간의 출혈과 통증을 감수하는 것은 물론 난자를 몸 밖으로 추출할 때의 불쾌감도 견뎌내야 한다. 최근에는 난소 과자극 증후군(ovarian hyperstimulation syndrome, OHSS)이 상당한 주목을 받고 있다. 과배란 유도 부작용으로 인해 난소 비대, 복통, 복부팽창, 복수 등의 증상이 나타나는 것이다. 더 나아가 여러 차례 호르몬을 투여 받은 여성이 나이가 들면 난소암에 걸릴 위험도 있다고 한다.

생명복제기술에 관한 철학적 기반에서도 육성론자와 비판론자 사이에는 상당한 차이가 존재한다. 육성론자들은 생명복제기술을 포함한 모든 과학기술에 관한 연구가 가능한 한 자유롭게 보장되어야 한다는 점을 강조하고 있는 반면, 비판론자들은 생명복제기술이 기존의 과학기술과 다른 차원의 것이기 때문에 연구절차는 물론 연

구내용에 대해서도 엄격히 규제해야 한다고 주장한다. 대부분의 경우에는 생명복제 기술에 대한 규제가 필요하다는 점에는 동감하고 있지만, 육성론자와 비판론자가 출발하고 있는 철학적 기반이 다르기 때문에 규제의 범위와 정도에 대해서는 의견을 달리하고 있는 것이다.

이와 같은 과학기술의 윤리적 쟁점은 과학교육에서 SSI(socioscientific issues)란 이름으로 고려되기 시작하고 있다(Zeidler, 2003; Zeidler et al, 2005). SSI를 직역하면 ‘사회-과학적 쟁점’이 되지만, 그 의미를 살린다면 ‘과학의 사회윤리적 쟁점’으로 번역하는 것이 적합하다고 볼 수 있다. SSI는 넓은 의미에서 STS 교육의 일환으로 간주할 수도 있지만, 현재진행형의 사회윤리적 쟁점에 주목하고 있다는 점에서 STS 교육과 차별화되기도 한다. SSI는 대중이 관심을 가지는 과학에 대한 사회윤리적 쟁점으로 개인과 사회의 의사결정을 요구하는 특징을 가지고 있다. SSI 교육에서는 해당 쟁점에 대한 정보나 지식을 수집하고 조직하는 능력, 과학적 증거에 입각한 추론을 사용하는 능력, 개인이나 사회의 가치관을 고려한 판단 능력, 다양한 입장의 의견을 존중하고 수렴하는 태도 등을 강조한다. 이와 함께 SSI는 과학 교과뿐만 아니라 사회나 윤리 교과에서도 종종 다루어지고 있으며, 다양한 학문 영역과의 융합을 통해 더 큰 효과를 발휘할 수도 있다.

<참고문헌>

- 권재술 외 (1998). *과학교육론*, 교육과학사.
- 김기홍 (2009). *광우병 논쟁*, 해나무.
- 김영민 (2012). *과학교육에서 비유와 은유 그리고 창의성*, 북스힐.
- 김영식 (2001). *과학혁명: 전통적 관점과 새로운 관점*, 아르케.
- 김영식, 임경순 (2007). *과학사신론, 제2판*, 다산출판사.
- 김환석 (2006). *과학사회학의 쟁점들*, 문학과 지성사.
- 박영태 외 (2011). *과학철학: 흐름과 쟁점, 그리고 확장, 창비*.
- 송성수 엮음 (1999). *과학기술은 사회적으로 어떻게 구성되는가*, 새물결.
- 송성수 (2011). *과학기술과 사회의 접점을 찾아서: 과학기술학 탐구*, 한울.
- 송성수 (2012). *한 권으로 보는 인물과학사: 코페르니쿠스에서 왓슨까지*, 북스힐.
- 송진웅 (2000). *영국에서의 과학-기술-사회 교육의 태동과 발전 과정(II): 20세기 후반을 중심으로*. *한국과학교육학회지*, 20(1), 52-76.
- 이상욱, 조은희 외 (2011). *과학 윤리 특강: 과학자를 위한 윤리 가이드*, 사이언스북스.
- 이상원 (2004). *실험하기의 철학적 이해*, 서광사.
- 이상현 (2012). *융합시대의 기술윤리, 생각의 나무*.
- 장대익 (2008). *쿤 & 포퍼: 과학에는 뭔가 특별한 것이 있다*, 김영사.
- 조인래 편역 (1997). *쿤의 주제들: 비판과 대응*, 이화여자대학교 출판부.
- 조희형 (1994). *과학-기술-사회와 과학교육*, 교육과학사.
- 조희형 외 (2011). *과학교육의 이론과 실제, 제4판*, 교육과학사.
- 조희형, 박승재 (2001). *과학론과 과학교육, 제2판*, 교육과학사.
- 최경희 (1996). *STS 교육의 이해와 적용*, 교학사.
- 최경희, 송성수 (2011). *과학기술로 세상 바로 읽기*, 북스힐.
- 한국과학교육학회 엮음 (2005). *과학교육학 용어 해설*, 교육과학사.
- 홍성욱 (2004). *과학은 얼마나*, 서울대학교 출판부.
- 홍성욱 엮음 (2010). *인간·사물·동맹: 행위자네트워크 이론과 테크노사이언스*, 이음.
- Abruscato, J. (2000). *Teaching Children Science: A Discovery Approach*, 5th ed., Boston: Allyn and Bacon.
- Bloor, D. (1976). *Knowledge and Social Imagery*, London: Routledge. 김경만 역 (2000). *지식과 사회의 상*, 한길사.
- Carin, A. A. (1997). *Teaching Science through Discovery*, Upper Saddle River,

- NJ: Merrill.
- Carnap, R. (1966). *An Introduction to the Philosophy of Science*, New York: Basic Books. 윤용택 역 (1993). 과학철학입문, 서광사.
- Chalmers, A. (1999). *What Is This Thing Called Science?*, 3rd ed., Queensland: University of Queensland Press. 신중섭, 이상원 역 (2003). 과학이란 무엇인가, 서광사.
- Chiappetta, E. L. & Koballa, T. R. (2006). *Science Instruction in the Middle and Secondary Schools*, 6th ed., Upper Saddle River, NJ: Merrill.
- Collins, H. M. (1985). *Changing Order: Replications and Inductions in Scientific Practice*, London and Beverly Hills: Sage.
- Feyerabend, P. (1975). *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*, London: Verso. 정병훈 역 (1987). 방법에의 도전, 흔겨레.
- Feyerabend, P. (1978). *Science in a Free Society*, London: New Left Books.
- Fuller, S. (1988). *Social Epistemology*, Bloomington: University of Indiana Press.
- Funtowicz, S. O. & Ravetz, J. R. (1992). Three types of risk assessment and the emergence of post-normal science. In S. Krimsky & D. Golding (eds.) *Social Theories of Risk*, London: Praeger, 251-273.
- Galison, P. (1987). *How Experiments End*, Chicago: Chicago University Press.
- Galison, P. (1997). *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*, Chicago: University of Chicago Press.
- Hackett, E. J., Amsterdamska, O., Lynch, M., & Wajcman, J. (eds.) (2007). *The Handbook of Science and Technology Studies*, 3rd ed., Cambridge, MA: MIT Press.
- Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge: Cambridge University Press. 이상원 역 (2005). 표상하기와 개입하기: 자연과학철학의 입문적 주제들, 한울.
- Hanson, N. R. (1958). *Patterns of Discovery: An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*, Cambridge: Cambridge University Press. 송진웅, 조숙경 역 (2007). 과학적 발견의 패턴, 사이언스북스.
- Harms, N. C. & Yager, R. E. (1981). *What Research Says to the Science Teacher*, vol. 3, Washington, DC: National Science Teachers Association.
- Hempel, C. G. (1966). *Philosophy of Natural Science*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 광강제 역 (2010). 자연 과학 철학, 서광사.

- Hess, D. J. (1997). *Science Studies: An Advanced Introduction*, New York: New York University Press. 김환석 외 역 (2004). 과학학의 이해, 당대.
- Howard, R. W. (1987). *Concepts and Schemata: An Introduction*, London: Cassell Education.
- Jasanoff, S., Markle, G. E., Petersen J. C., & Pinch, T. J. (eds.) (1995). *Handbook of Science and Technology Studies*, London: Sage Publications.
- Jørgensen, J (1951). *The Development of Logical Empiricism*, Chicago: University of Chicago Press. 한상기 역 (1994). 논리경험주의: 그 시작과 발전 과정, 서광사.
- Kaplan, A. (1964). *The Conduct of Inquiry: Methodology for Behavioral Science*, San Francisco, CA: Chandler.
- Kitchener, R. F. (1999). *The Conduct of Inquiry: An Introduction of Logic and Scientific Method*, New York: University Press of America.
- Kourany, J. A. (1987). *Scientific Knowledge: Basic Issues in the Philosophy of Science*, Belmont, CA: Wadsworth Publishing Co.
- Kuhn, T. S. (1957). *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Kuhn, T. S. (1970). *The Structure of Scientific Revolutions*, 2nd ed., Chicago: University of Chicago Press. 김명자 역 (1992). 과학혁명의 구조, 동아출판사.
- Kuhn, T. S. (1977). *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago: University of Chicago Press.
- Lawson, A. E. (1995). *Science Teaching and the Development of Thinking*, Belmont, CA: Wadsworth Publishing Co.
- Lakatos, I. (1978). *The Methodology of Scientific Research Programmes, Philosophical Papers*, vol. 1, edited by J. Worrall & G. Currie, Cambridge: Cambridge University Press. 신중섭 역 (2002). 과학적 연구 프로그램의 방법론, 아카넷.
- Lakatos, I. & Musgrave, A. (eds.) (1970). *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge: Cambridge University Press. 조승욱, 김동식 역 (2002). 현대과학철학 논쟁: 쿤의 패러다임 이론에 대한 옹호와 비판, 아르케.
- Latour, B. (1987). *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Latour, B. & Woolgar, S. (1979). *Laboratory Life: The Social Construction of*

- Scientific Facts*, London and Beverly Hills: Sage.
- Laudan, L. (1977). *Progress and Its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*, Berkeley, CA: University of California Press.
- Laudan, L. (1984). *Science and Values: The Aims of Science and Their Role in Scientific Debate*, Berkeley, CA: University of California Press. 이유선 역 (1994). 과학과 가치, 민음사.
- Losee, J. (1993). *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*, 3rd ed., Oxford: Oxford University Press. 정병훈, 최종덕 역 (1999). 과학철학의 역사, 동연.
- Martin, R., Sexton, C., Wagner, K., & Gerlovich, J. (1997). *Teaching Science for All Children*, 2nd ed., Boston: Allyn and Bacon.
- Merton, R. K. (1973). *The Sociology of Science: Theoretical and Empirical Investigations*, Chicago: University of Chicago Press. 석연호, 양종희, 정창수 역 (1998). 과학사회학, 총2권, 민음사.
- Nagel, E. (1966). *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*, London and New York, Harcourt. 전영삼 역 (2001). 과학의 구조, 아카넷.
- Newton-Smith, W. H. (1981). *The Rationality of Science*, Boston: Routledge & Kegan Paul. 양형진 외 역 (1998). 과학의 합리성, 민음사.
- Nott, M. & Wellington, J. (1993). Science teachers, the nature of science, and the National Science Curriculum. In J. Wellington (ed.) *Secondary Science: Contemporary Issues and Practical Approaches*, London: Routledge, 32-43.
- NSTA (1982). *Science-Technology-Society: Science Education for the 1980s*, Washington, DC: National Science Teachers Association.
- Pinch, T. J. & Bijker, W. E. (1987). The social construction of facts and artefacts. In W. E. Bijker, T. P. Hughes, & T. J. Pinch (eds.) *The Social Construction of Technological Systems*, Cambridge, MA: MIT Press, 17-50. 자전거의 변천과정에 대한 사회구성주의적 해석. 송성수 엮음 (1999), 39-80.
- Popper, K. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*, London: Hutchinson. 박우석 역 (1994). 과학적 발견의 논리, 고려원.
- Popper, K. (1963). *Conjecture and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, London: Routledge. 이한구 역 (2001). 추측과 논박, 민음사.
- Quine, W. V. (1951). Two dogmas of empiricism. *The Philosophical Review* 60,

- 20-43. Reprinted in W. V. Quine (1953). *From a Logical Point of View*, Harvard: Harvard University Press.
- Ratcliffe, M. & Grace, M. (2003). *Science Education for Citizenship: Teaching Socio-scientific Issues*, Maidenhead, UK: Open University Press.
- Resnik, D. B. (1998). *The Ethics of Science: An Introduction*, London: Routledge.
- Reynolds, P. D. (1971). *A Primer in Theory Construction*, Indianapolis: Bobbs-Merrill Co.
- Schibinger, L. (1993). Why mammals are called mammals: gender politics in eighteenth-century natural history. *The American Historical Review*, 98(2), 382-411.
- Spiegel-Rösing, I. & Price D. S. (eds.) (1977). *Science, Technology and Society: A Cross-Disciplinary Perspective*, London: Sage.
- Suppe, F. (ed.) (1977). *The Structure of Scientific Theories*, Urbana, IL: University of Illinois Press.
- Webster, A. (1991). *Science, Technology and Society: New Directions*, London: Macmillan Education Ltd. 김환석, 송성수 역 (1998). 과학기술과 사회: 새로운 방향, 한울.
- Yager, R. E. (1989). A rationale for using personal relevance as a science curriculum focus in schools. *School Science and Mathematics*, 89(2), 144-156.
- Yager, R. E. (ed.) (1996). *Science/Technology/Society as Reform in Science Education*, New York: State University of New York Press. 조희형, 최경희 역 (1997). STS 무엇인가, 사이언스북스.
- Zeidler, D. L. (ed.) (2003). *The Role of Moral Reasoning on Socioscientific Issues and Discourse in Science Education*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Simmons, M. L., & Howes, E. V. (2005). Beyond STS: A research-based framework for socioscientific issues education. *Science Education*, 89(3), 357-377.
- Ziman, J. (1980). *Teaching and Learning about Science and Society*, Cambridge: Cambridge University Press 오진곤, 박충웅 역 (1994). 과학과 사회를 잇는 교육, 전파과학사.