형식적 학습이론, 귀납과 발견의 논리

정 인 교 (한양대)

들어가는 말

논리학과 인지과학, 특히 인공지능과의 여러 관계들 중 다음과 같은 관계가 두드러진다. 우선, 논리학의 방법과 기술및 결과들은 인공지능의 연구에 매우 중요한 수단들이 된다. 어떤 이들은 논리학은 인공지능의 연구에 필요불가결한 토대와 방법을 제공한다고 거리낌없이 주장한다.[1] 또한, 괴델의 정리와 재귀이론의 결과들을 비롯한 논리학의 성과들은 인공지능의 한계와 목표설정에 중요한 함축을 지니는 것으로 보인다. 뿐만아니라, 인공지능의 연구들 또한 논리학의 발전에 적지않은 영향을 미치는 것으로 보인다.

형식적 학습이론 (formal learning theory) 혹은 계산적 학습이론 (computational learning theory) 은 논리학과 인공지능의 이런 관계들을 잘 드러내 보이는 사례이다.[2] 지금 한창 발전 중인 이 이론은, 귀납적 탐구의 모형들에 관한 수학적 이론으로서, 희망적으로 좀 거창하게 말한다면, 귀납적 방법들의 성격과 영역및 한계들에 관한 형식적 규명을 시도한다. 인식론과 과학철학을 비롯한 철학적 문제들과의 명백한 관련으로 인해, 이러한 이론발전의 동기부여는 카르납, 라이헨바하, 퍼어스, 나아가서 플라톤에게 까지도 추적될 수 있지만, 수학적 이론으로서의 형식적 학습이론의 본격적인 토대는 철학자 퍼트남(H. Putnam)과

1) Genesereth and Nilsson [1987] 참조.

2) '형식적 학습이론'이란 이름에서 '학습이론'이란 아마 적절치 못한 표현일지 모른다. 특히, 이 표현이 심리학의 학습이론을 연상시키기 때문에 더욱 그럴 것이다. 곧 지적될 바와 같이, 그 모형들의 중요성이 많은 경우 경험적 결과들에 의존함에도 불구하고, 형식적 학습이론에서는 경험적 탐구를 하는 것이 아니라 경험적 탐구에 관한 선험적 탐구를 한다고 해야 할 것이다.

특히 전산학자 골드(E. M. Gold)에 의해 독립적으로 마련되었다. 골드는 그의 1967년 논문(Gold [1967])에서 언어습득에 관한 형식적 모형을 제시하고, 습득 가능한 언어들과 그렇지 못한 언어들에 대한 몇가지 결과들을 이끌어 냈다. 그 이후의 발전이 보여주듯이, 그의 모형 - 골드 패러다임 - 은 언어습득 뿐아니라 과학적 가설 형성을 비롯한 여러 귀납적 절차들에 포괄적으로 적용되어, 귀납적 방법들의 성격에 관한 연구에 매우 유용한 틀을 제공하고 있다. 다수의 전산학자들과 수학자들 및 소수의 철학자들에 의해 발전되고 있는 이 이론은 과학적 탐구의 영역과 한계에 관한 시사를 포함하여 과학철학과 인공지능의 문제들에 새롭고도 유용한 시각을 제시하는 것으로 보인다.[3] 이 발표문의 목적은, 이 자라나는 이론의 (발표자가 보기에) 중요한 구성요소들에 관한 설명을 통해, 형식적 학습이론을 직관적인 수준에서 소개하려는 것이다. 이런 이론적 틀의 적용영역과 전망및 함축에 대해 간간히 언급이 되겠지만, 이 글의 목적은 이런 문제들에 관한 개관이나 이 이론의 기획에 대한 엄밀한 평가, 더구나 이 이론 자체의 발전에 관한 독창적 기여를 하려는 것은 아니다. 이 글은 나무도 보기 전에 떡잎을 자르려는 편견을 지니지 않은 사람들을 위한 것이다.

탐구의 모형

경험적 탐구나 학습의 한 전형적인 상황은 다음과 같이 기술될 수 있다:

> "탐구 대상에 관한 단편적이고 경험적인 정보들이 탐구자에게 끊임없이 입력되고 있다. 탐구자는 그에게 이미 제시된 자료에 토대해서, 이들을 잘 설명하고 앞으로 경험하게될 것들을 예측하는 규칙 또는 가설을 추정한다. 탐구자의 추측 작업은 일회적인 것이 아니라, 그에게 새로운 정보가 입력될 때마다 반복된다. 즉, 새로운 정보가 입력됨에 따라, 탐구자는 과거의 추측을 반복하거나 새로운 추측을 제시하거나 아예 추측을 자제한다. 탐구 대상에 관한 정보들이 끊임없이 입력됨에 따라, 탐구자는 시행착오를 거듭하며 끊임없는 추

3) 이 이론의 발전에는 와인슈타인(S. Weinstein), 글리무어(C. Glymour)와 켈리(K. Kelly) 같은 철학자들이 큰 기여를 하고있다. 이 이론에 대한 간략한 개관을 위해서는 Osherson and Weinstein [1984], Angluin and Smith [1983] 등을 참조 할 것. Osherson, Stob and Weinstein [1986]은 이 분야의 고전적 지위를 확보해 가고 있다.

측 작업을 반복한다."

인류의 과학적 탐구 작업의 전체 과정이 다분히 이런 기술에 부합될 여지가 클 것이나, 시야를 보다 좁혀서 경험적 탐구와 과학적 발견, 혹은 이른바 '귀납적 추론'의 많은 사례들이 약간의 추상화와 이상화를 통해 이런 유형의 탐구 형식에 맞춰질 수 있을 것이다. 행성들의 운동에 관한 경험적 자료들로부터 행성들의 운동에 관한 규칙을 발견한 것으로 믿어지는 케플러의 탐구를 비롯하여, 유한한 경험적 자료들에 보간법이나 보외법을 적용하여 경험에 주어진 내용을 초월하는 규칙성을 추론하는 통계적 탐구, 전체 언어의 극히 제약적인 부분에의 노출을 통해 무한히 많은 문장들을 포함하는 언어를 습득하는 어린 아이들의 모국어 학습 등, 흔히 '학습'이라 불리는 일상적 탐구로부터 과학적 발견에 이르는 이론적 탐구에 이르기까지, 우리에게 주어진 정보를 초월하는 가설을 추측하는 많은 탐구 상황들이 이런 유형에 속한다.

이런 유형의 탐구들에 대해서 우리는 그 틀을 형성하는 몇가지 중요한 요소들을 규명함으로써 탐구들의 성격과 한계를 연구할 수 있다. 우선, 이런 탐구들은 어떤 경우에 성공적인가 ? 탐구자(과학자나 학습자)들은 어떤 탐구절차(전략)들을 동원할 수 있는 가 ? 경험적 자료들은 어떤 형식으로 주어지는가 ? 탐구 대상은 어떤 종류의 것들이며, 탐구자가 제시할 수 있는 가설에는 어떤 제약이 있는가 ? 형식적 학습이론에서는 이런 질문들에 대한 다양한 대답들이 성공적 탐구의 영역과 한계에 대해 지니는 함축들이 연구된다.

이런 유형의 탐구는 어떤 경우에 성공적이라고 할 것인가 ? 새로운 정보가 입력될 때마다 늘 탐구자의 추측이 번복되거나 새로운 추측이 제시된다면, 탐구대상에 관한 정보들이 끊임없이 제시됨에따라 탐구자의 추측도 끊임없이 변화할 것이므로, 그의 탐구는 안정된 가설에 도달할 수 없다. 이런 식의 탐구작업은, 말하자면, 시행착오를 무한히 거듭하는 것과 같다. 성공의 기준을 아무리 약화시킨다 할지라도, 하나의 안정된 가설에 원칙적으로 도달할 수 없는 탐구를 성공적 탐구라고 할 수는 없을 것이다. 성공적인 탐구가 되려면, 우선 옳든 그르든 안정된 추측에 도달할 수 있어야 할 것이다. 탐구대상에 관한 정보들이 끊임없이 입력됨에 따라, 탐구자의 추측작업은 시행착오를 거듭하겠지만, 그의 탐구가 성공적이려면 그의 탐구절차는 최소한 궁극적으로는 새로 입력되는 정보에의해 수정될 필요가 없는 어떤 안정된 추측을 낳아야 할 것이다. 그러기 위해서는, 유한번의 시행착오는

허용될 수 있으나, 시행착오가 무한히 계속되어서는 안된다. 다시 말하자면, 성공적인 탐구가 되기 위해서는, 탐구대상에 관한 정보들이 하나하나 입력됨에 따라 탐구자가 제시하는 가설들의 나열들이 궁극적으로 어떤 한 가설에 수렴해야 할 것이다. 더 나아가, 성공적 탐구가 되려면 수렴된 가설이 탐구대상에 관한 올바른 가설이어야 할 것이다. 여기서 '올바른 가설'의 의미는 물론 실재론자들과 경험론자들을 비롯한 많은 철학자들의 논쟁거리이나, 이 모형에서의 성공적 탐구의 기준을 위해서는 어떤 특정한 철학적 입장을 전제할 필요가 없다. 이 기준을 요약하자면, 시행착오가 허용되는 귀납적 탐구상황에 있어서, 어떤 탐구절차에 의해 산출된 추측의 계열이 궁극적으로 올바른 가설에 수렴해야만, 그 탐구는 성공적이다.

인식론의 이른바 '내재주의(internalism)'을 표방하는 이론가들은 성공적 탐구에 관한 이러한 기준은 너무 약하다고 할 것이다. 왜냐하면, 어떤 탐구가 윗 기준에서 성공적이라 할 지라도, 탐구자는 추측된 가설이 궁극적인 것인지, 즉, 새로운 정보에 의해 더이상 번복되지 않을 것인지 안다는 보장이 없다. 즉, 어떤 탐구절차에 의해 출력된 가설들이 궁극적으로 올바른 가설에 수렴했다 할 지라도, 탐구자 자신은 지금 산출된 가설이 궁극적으로 수렴된 가설인지 아니면 또다시 번복되어야 할 가설인지 그 탐구절차에 의해 알 수 있다는 보장이 없다. 내재주의의 한 유형에 의하면, 어떤 사실을 알기 위해서는 그 사실을 안다는 사실을 알아야 한다. 따라서, 이런 내재주의자들은 위에 언급된 의미에서의 성공적 탐구에 의해 도달된 것은 지식은 아니라고 할 것이다. 성공적 탐구의 결과로 내재주의자들이 요구하는 의미의 지식을 획득하려면, 앞서 제시된 성공의 기준에 진리의 표식이 부가되어야 할 것이다. 예를 들어, 어떤 탐구절차에 의해 출력된 가설들의 나열들이 올바른 가설에 수렴할 때, 그 탐구절차에 의거해 탐구자는 이 가설이 최종적인 것임을, 즉 더 이상 번복되지 않을 것임을 선언할 수 있어야 한다.[4] 위에 제시된 기준은 성공적 탐구의 필요조건으로 제시되었다. 성공적 탐구의 결과 얻어진 것이 지식이라고 하기 위해서는, 윗 조건이 충분조건이라고 하기에는 너무 약할 것이다. 그러나, 너무 약한 이유가 내재주의자들의 비판이 정당하기 때문이라고 하는 것은 무리일 것 같다. 많은 탐구 상황에서 내재주의자들의 요구는 지나친 것 같기 때문이다. 많은 사람들은 과학적 탐구에 종착역이 없다고 믿고 있다. 그것은, 지금 우리가 알고 있는 가설이 만에 하나 옳다고 하더라도, 이 사실은 우리에게 입력된 유한한 경험적

4) "Self-Monitering learning functions" (Osherson, Stob and Weinstein [1986], 23쪽 참조) 는 이런 예들의 형식적 대응자들이다.

정보를 초월하는 것으로, 앞으로 새로운 정보가 입력됨에 따라 이 가설이 수정되지 않으리라는 보장을 받을 수 없기 때문이다.

형식적 학습이론에서 성공적 탐구의 결과 얻어낸 것이 지식이라고 할 수 있다면, 그것은 이 이론에서 일반적으로 성공적 탐구의 조건으로 추측들의 수렴에 덧붙여, 탐구절차의 신빙성(reliability)을 요구하기 때문이다. 이 이론의 많은 모형들에서 성공적 탐구를 위해서는, 탐구절차가 운좋게 우연히 한 탐구대상을 확인하는 것으로 충분치 않고, 탐구대상이 실제와 다른 모습을 지녔고 경험적 정보들이 실제와 다른 순서로 입력되었더라도 탐구대상을 확인할 수 있는 절차이어야 한다는 조건이 부가되기 때문이다. 형식적 학습이론은 일반적으로 외재주의적 의미의 지식을 성공적 탐구의 결과 얻는 것으로 간주하고, '올바른 가설'의 의미에 관한 실재론적 해석 (특히, 퍼어스나 포퍼의 수렴적 실재론 (convergent realism)) 과 자연스럽게 부합되지만, 이런 인식론적 혹은 형이상학적 전제들이 이 이론의 구성에 필수적인 요소들은 아니다. 오히려, 이 이론은 성공적 탐구의 기준으로 내재주의적 의미의 지식획득을 요구하면, 성공할 수 있는 탐구의 문제들이, 따라서 우리가 획득할 수 있는 지식들이 얼마나 제약적인가 하는 것을 선험적으로 보여준다.[5)]

지금까지 경험적 탐구의 한 전형적인 유형에 관한 고려로부터 성공적 탐구의 기준이 논의 되었다. 인공지능의 암묵적 가정을 따라, 탐구자를 튜링기계와 같은 것으로, 따라서 탐구절차를 효율적으로 계산가능한 (effectively computable) 절차로 간주하면, 앞서 고려된 성공적 탐구의 기준은 다음과 같이 보다 확장된 의미의 계산가능성(computability)과 결정가능성(decidability)을 낳는다.

> 어떤 함수 $f: N^k \to N$ 가 극한적으로 재귀적(limiting recursive) 이라 함은 임의의 자연수 $x_1, x_2, \ldots, x_k, n$ 에 대해, 다음과 같은 조건을 만족하는 재귀함수(total recursive function) g 가 있음을 의미한다:
>
> $\lim_{n\to inf.} g(x_1, x_2, \ldots, x_k, n) = f(x_1, x_2, \ldots, x_k)$.
>
> (여기서 N 은 자연수들의 집합, $\lim_{n\to inf.} g(x_1, x_2, \ldots, x_k, n) = j$ 는 $(Em)(y)(y>m \to g(x_1, x_2, \ldots, x_k, y) = j)$ 를 의미한다.)

5) 글리무어와 켈리 (Glymour and Kelly [1992]) 는 형식적 학습 이론의 맥락에서, 내재주의적 지식획득을 요구하면 메논의 회의주의가 정당하다는 논증을 제시한다.

결정가능한(decidable) 집합에 대응하는 재귀적(recursive) 집합 혹은 재귀적 술어는 경험적으로 결정가능한(empirically decidable) 집합에 대응하는 극한적으로 재귀적인 (limiting recursive) 집합 혹은 시행착오 술어 (trial and error predicate)로 확장된다.[6]

> 어떤 집합이 (혹은 술어가) 극한적으로 재귀적 (혹은 시행착오 술어)이라 함은 그 집합(술어의 외연)의 특성함수(characteristic function)가 극한적으로 재귀적임을 의미한다.

시행착오가 유한번 허용된 '효율적' 절차와 시행착오가 허용되지 않는 효율적 절차의 계산력의 차이는 퍼트남과 골드의 결과들에 의해 분명히 들어난다. 퍼트남(Putnam[1965])과 골드(Gold[1965])는 어떤 집합(술어) P가 극한적으로 재귀적인 집합(시행착오 술어)이기 위한 필요충분 조건이 $P \in \Sigma_2 \cap \Pi_2$ 임을 보이고 있다.[7] 즉, 경험적으로 결정가능한 집합 (유한번의 시행착오를 허용하는 효율적 절차에 의해 결정가능한 집합)은, 결정가능한 집합 (시행착오를 허용치 않는 효율적 절차에 의해 결정가능한 집합) 으로부터 유한번의 보편양화와 유한번의 존재양화를 적용하여 얻을 수 있는 동시에, 유한번의 존재양화와 유한번의 보편양화를 적용해서 얻을 수도 있다. 클리니(S.C. Kleene)의 산술적 계층(arithmetical hierarchy)과 해석학적 계층(analytical hierarchy)이 연역문제들의 계산적 난이도를 표현하듯이, 퍼트남과 골드의 결과들은 귀납문제들의 계산적 난이도를 표현하는 계층을 발전시키는 전기를 마련하고 있다. 탐구자를 튜링기계와 같은 것으로 간주할 수 있는가 하는 문제는 물론 큰 논란거리이다. 그러나, 형식적 학습이론은 이런 문제와는 독립적이다. 이 이론의 틀을 이용하여 우리는, 탐구자를 튜링기계와 같은 것으로 간주하면, 해결될 수 있는 귀납문제들이 얼마나 더 제약적인가하는 것을 보여줄 수 있다.

우리가 고려하고 있는 탐구의 구조를 보다 분명히 들어내기 위해, 언급된 탐구 상황을 이상화한 단순한 예들을 살펴보자:

---

6) 'empirical decidability'와 'trial and error predicate'는 퍼트남 (Putnam [1965]) 에 의해서, 'limiting recursiveness' 는 골드 (Gold [1965]) 에 의해서 도입되었다.

7) 클리니의 산술적 계층에서, Σ_2 는 재귀적 술어에 보편양화사를 유한번 적용한 뒤 존재양화사를 유한번 적용해 얻을 수 있는 술어들이며, Π_2는 재귀적 술어에 존재양화사를 유한번 적용한 뒤 보편양화사를 유한번 적용해서 얻을 수 있는 술어들이다.

> "우리 앞에 장막이 놓여있고, 우리는 장막 뒤에 숨어있는 기계, 사람, 혹은 신과 게임을 한다고 하자. 장막 뒤의 존재는 어떤 특정한 수열(자연수로부터 자연수에로의 함수)을 염두에 두고있고, 우리의 과제는 그 존재가 염두에 두고있는 수열을 알아 맞추는 일이다. 장막 뒤의 존재는 그 수열의 요소들을 순서대로 하나하나 장막에 표시하며, 우리는 한 수가 표시될 때마다 그 다음 수를 (혹은 수열의 판별식을) 추측하며, 이 추측의 옳고 그름 (혹은 검증과 반증) 은 장막 뒤의 존재가 다음에 표시하는 수에 의해 밝혀진다."

예를 들어, 가능한 한 게임은 다음과 같이 진행될 것이다. 장막에는 '2'가 나타나고, 우리는 4가 다음에 표시될 수라고 추측한다. 실망스럽게도 장막에는 '2,3'이 나타나고, 우리는 5가 다음에 표시될 수라고 추측한다. 장막에는 '2,3,5'가 나타나고, 우리는 7이 다음에 표시될 수라고 추측한다. 장막에는 '2,3,5,7'이 나타나고, 우리는 9가 다음에 표시될 수라고 추측한다. 놀랍게도 장막에는 '2,3,5,7,11'이 나타나고, 우리는 13이 다음의 수라고 추측한다 ....

앞서 제시된 성공적 탐구의 기준은 자연스럽게 이런 게임에서 우리가 이기기 위한 기준이 된다. 즉, 우리의 추측들이 유한번 틀릴뿐 어느 싯점 이후의 우리의 추측들은 모두 옳다면, 혹은, 수열의 규칙(판별식)을 추측하는 경우, 우리가 유한번의 시행착오를 거쳐 장막 뒤의 존재가 염두에 두고있는 규칙을 궁극적으로 확인한다면, 우리가 이게임에서 이긴다. 반면에, 우리의 추측들이 끝없이 틀리거나 끊임없는 시행착오를 반복하면 우리는 이 게임에서 진다.

이런 게임에서 우리의 승산은 우리의 능력 뿐아니라, 우리의 상대자인 장막 뒤의 존재의 능력에 의존함이 분명하다. 게임에 참여한 존재와 장막 뒤의 존재의 사고방식이나 지능이 거의 같은 경우, 이런 게임은 이기기 쉬울 것이다. 중등학교의 시험문제에 흔히 나오는 수열의 판별식을 추측하는 문제는 주로 이런 경우이다. 이런 경우와 같이, 장막 뒤의 존재가 염두에 둘 수 있는 규칙들의 범위에 관한 정보가 있으면, 게임에서의 승산은 보다 정확히 계산될 수 있다. 예를 들어, 장막 뒤의 존재가 기계라면, 아마 그것이 염두에 둘 수 있는 규칙들의 집합은 효율적으로 나열가능할 (effectively enumerable) 것이다. 그럴 경우, 우리는 이 게임에서 이길 수 있다. 그러기 위해서 우리는 단순히 다음과 같은 추측전략을 세우면 된다: "우선, 장막 뒤의 존재가 염두에 둘 수 있는 규칙들을 효율적으로 나열하라. 장막에 새로운 수가 표시될 때마다, 이 수를 포함해 이미표시된 수들과 양립가능한 첫

번 째의 규칙을 추측하라." 어떤 자연수 n 에 대해, 장막 뒤의 존재가 염두에 두고 있는 규칙은 우리가 효율적으로 열거하는 규칙들 중에 n 번째로 나타나게 마련이므로, 우리는 n-1 번의 시행착오 끝에 궁극적으로 장막 뒤의 존재가 염두에 둔 수열을 확인할 수 있다.[8] 물론, 앞서 지적한대로, 우리가 그 규칙을 궁극적으로 확인했다 할 지라도, 우리가 그 규칙을 확인했다는 사실은 영원히 모를 수 있다. 그러나, 장막 뒤의 존재가 염두에 둘 수 있는 규칙들이 우리가 표현할 수 있는 규칙들 혹은 우리가 동원할 수 있는 전략들에 의해 확인될 수 있는 규칙들을 초월한다면, 예를 들어, 장막 뒤의 존재가 "이 수열의 첫번째 요소는 2 이고 n+1 (n > 1) 번째 요소는 당신의 n 번째 추측 보다 하나 더 큰 수이다" 와 같은 규칙을 염두에 둘 수 있다면, 우리는 이 게임에서 이길 수가 없을 것이다.

과학적 탐구의 게임에서 과학자들은 그들이 상대하고 있는 장막 뒤의 존재가 어떤 것인지 모른다. 형식적 학습이론에서는 성공적 탐구의 가능성과 탐구문제의 난이도를 과학자들이 동원 할 수 있는 전략(탐구절차)들과 장막 뒤의 존재에 관한 가정들로부터 이끌어 낸다. 여기서 평가의 대상이 되는 것은 귀납적 추론전략의 극한적 행태이다. 즉, 어떤 귀납적 추론절차가 궁극적으로 적절한 역할을 수행하느냐는 것이 논의의 촛점이지, 귀납적 추론절차의 단기적 결과는 평가의 대상이 아니다. 따라서, 굿만의 수수께끼나 까마귀의 역설은 형식적 학습이론이 다루는 귀납적 탐구상황에 직접적으로 문제가 되지 않는다. 왜냐하면, 이런 문제들은 모두 관찰진술과 가설과의 검증관계 혹은 관찰진술에 적용된 귀납적 절차의 단기적인 행태에 관한 문제들을 제기하는 반면, 형식적 학습이론에서는 귀납적 절차의 장기적 적합성에 관한 평가를 시도하기 때문이다.[9]

이런 게임들 중에, 정상적인 사람은 이기게 마련인 게임들 중의 하나가 모국어 학습이라고 하겠다. 콰인은 여러 귀납적 과제들 중 어린아이의 모국어 학습은 성공이 보장된 귀납문제임을 지적한 바 있다.[10] 이에 대한 그의 진단은, 사람이라는 종의 생물학적 유사성에 토대한 사람들 간의 인식적 틀의 유사성에 근거한 것이었다. 다시 말하자면, 이런 식의 게임은 게임에 참여한 존재와 장막 뒤의 존재가 문

8) Angluin and Smith [1983] 은 이런 탐구전략의 한 특수한 예를 구체적으로 제시하고 있다.
9) Kelly [1991] 는 이런 논의 및 형식적 학습이론에서의 성공적 탐구의 기준과 라이헨바하의 귀납의 정당화에 관한 비교를 포함하고 있다.
10) Quine [1969].

제되는 능력에서 매우 유사해서, 마치 미리 짜맞춰진 틀들을 끼어 맞추는 식이라는 것이다. 콰인은 주로 언어표현들의 의미의 학습을 염두에 두고 있었지만, 문법의 학습도 마찬가지로 성공이 보장된 귀납문제라고 할 것이다. 주지하다시피, 촘스키(N. Chomsky)는 이런 조건 - 문법의 학습가능성 - 을 어떤 언어가 자연언어이기 위한 필요조건으로 간주했다. 형식적 학습이론에서는, 자연언어에 관한 이런 필요조건을 전제할 때, 어린아이의 능력과 어린아이가 노출된 언어환경 등에 관한 가정들이 - 이런 가정의 적절성은 경험적으로 탐구되어야 할 것들이다 - 탐구대상, 즉, 가능한 자연언어들에 어떤 제약을 가하는가를 경험과 독립적으로 보일 수 있다. 실제로 이 이론은 초기단계에 언어습득의 모형에 관한 분석에서 발전된 이론이므로, 앞서 언급된 탐구모형의 다른 요소들은 이런 모형들의 근간을 이루는 골드의 모형을 통해 보다 구체적으로 규명될 것이다.

골드 패러다임

어린아이의 모국어 습득 모형은, 앞서 언급된 탐구모형에서, 탐구대상은 언어로, 탐구자(학습자)는 어린아이로, 경험적 정보들은 어린아이가 노출될 수 있는 언어환경으로 간주된다. 이런 탐구모형의 요소들에 대해 앞서 제기된 질문들에 대한 답변들로, 다음과 같은 것들이 고려될 수 있을 것이다.[11]

언어: 문법학습의 모형 구성을 위해, 언어는 문장들의 집합으로, 문장들은 그 언어의 형성규칙(문법)에 맞게 구성된 유한한 알파벳들의 나열들로 간주될 수 있다. 자연언어의 문법은 분명히 효율적인 규칙이 되어야 할 것이고, 언어의 요소들, 즉, 문장들은 이 규칙에 의해 효율적으로 나열가능하여야 할 것이다. 따라서, 괴델수부여와 같은 표준적인 암호법에 의해, 문장은 자연수로, 언어들은 자연수들의 부분집합들 중 재귀적으로 나열할 수 있는 집합(RE)들로 간주된다.

가설: 어린아이들이 발견하려는 언어의 문법들은 효율적인 규칙들로서, 효율적인 계산절차들, 예를 들어, 튜링기계들로 간주될 수 있다. 따라서, 어린아이들이 그들에 제시되는 문장들에 토대해서 확인하려는 특정한 효율적 생성규칙, 즉, 문법은 그 문장들을 열거하는 튜링기계들로 간주된다. 튜링기계들의 집합은 효율적으로 나열가능하고, 이런 나열은 튜링기계들이 계산하는 부분재귀함수들(partial

11) 여기서 Gold Paradigm 의 구성요소들에 관한 소개는 주로 Osherson,Stob and Weinstein [1986] 을 따랐다.

recursive functions)의 나열로 간주될 수 있다. $f_1, f_2, \ldots f_n, \ldots$을 그런 나열이라고 하면, 이 함수들의 변역들의 나열 $W_1, W_2, \ldots W_n, \ldots$은 재귀적으로 나열가능한 집합(RE)들의 나열이 된다. 이 나열들에서 밑첨자들, 즉, 자연수들은 문법들, 혹은 그것들에 의해 결정된 언어들의 이름들이므로, 어린아이들이 제시할 수 있는 가설들은 자연수들로 간주된다.

환경: 가설수립의 자료가되는 경험적 정보들과 이들이 탐구자에게 입력되는 양식또한 성공적 탐구의 변수이다. 모국어를 습득하려는 아이가 노출되는 환경은 그 언어의 문장들의 나열이라는 것은 경험과학자들 사이에 비교적 잘 합의된 사항이다. 따라서, 언어습득 모형의 환경(가능한 텍스트)은 그 언어의 문장들의 임의의 나열들로 간주된다.

텍스트 (text)는 자연수들의 무한수열 (즉, N -> N 의 함수) 이다.
$L \in RE$ 이 한 언어일 때, L 의 한 텍스트(a text for L)는 그 치역이 L 과 같은 수열이다.

언어 L 의 텍스트는 L 의 요소들의 나열이므로, L 의 문장들만을 포함한다. 그러나, 실제로 아이들은 비문법적인 표현들에도 노출될 것이므로, 아이들의 언어환경을 모국어의 텍스트들로 간주하면 실제의 상황과는 일치하지 않는 것으로 여겨질 것이다. 그러나, 언어학자들에 의하면, 이런 비문법적인 표현들은 아이들에게 체계적으로 제시되지 않아서, 아이들의 언어습득에 별로 영향을 미치지 못한다. 또한, 그들에 의하면, 아이들에게 문장들이 제시되는 순서또한 아이들의 언어 습득에 별로 영향을 미치지 못한다.[12] 아이들의 언어 환경을 모국어의 텍스트들로 간주하는 것은 이런 경험적 결과들을 언어습득의 모형구성에 반영시킨 것이다. 구성된 모형들의 유용성은 이런 경험적 결과들에 민감하지만, 형식적 학습이론의 결과들은 경험과 독립적으로 얻어진다. 이 이론에서는 이런 경험적 이론 (언어습득에 관한 경험적 모형) 이 갖는 귀결들 - 예컨데 습득가능한 언어들에 관해 갖는 제약들 - 이 연구되는 것이다. 나아가서, L 의 문장들 뿐아니라 비문법적인 표현들까지 포함된 텍스트(noisy text)를 고려하거나, 재귀적 텍스트와 같이 아이들에게 문장들이 제시되는 양식에 제약을 가하면, 습득가능한 언어들에 어떤 영향을 미치는 가하는 것들이 연구되고 있다.

학습자: 탐구자는 그에게 입력된 유한한 자료들을 초월하는 가설들을 끊임없이

12) Osherson, Stob and Weinstein [1986] 14쪽 참조.

추측한다. 언어습득의 상황에서 아이들은 그들에게 제시되는 모국어 문장들의 유한한 사례들로부터, 그 언어의 무한히 많은 문장들을 규제하는 규칙을 추측하려 한다. 따라서, 이 모형에서 학습자는, 텍스트의 유한한 앞부분들로부터 문법 또는 언어들의 이름들인 자연수들로의 함수로 간주된다. 텍스트의 유한한 앞부분또한 자연수로 암호화 할 수 있으므로, 학습함수는 자연수로부터 자연수로의 함수로 간주된다. 사람의 지적 능력이 기계의 계산능력과 다르지않다는 인공지능에 만연된 가정을 따른다면, 학습함수는 부분재귀함수들로 국한시켜야 할 것이다. 이에 대한 반론들 또한 만만치 않게 강력하다. 형식적 학습이론은 물론 어떤 특정한 입장을 전제하지 않는다. 곧 지적될 바와 같이, 효율적으로 계산가능한 학습함수들 뿐아니라, 그렇지 않은 함수들까지 고려함으로서, 성공적 탐구의 영역, 습득가능한 언어들의 영역에 관한 더많은 정보를 얻을 수 있다.

성공의 기준: 앞서 길게 살펴본 신빙성있는 탐구절차에 의거한 옳은 가설에로의 수렴으로서의 성공적 탐구 기준을 언어학습에 적용하면 다음과 같은 것이 될 것이다. 여기서, f 가 어떤 학습자(학습함수)이고, t 를 텍스트, t_n 을 t 의 n 번째 까지의 요소들을 암호화한 자연수, L 을 언어, $\mathscr{L}$ 을 어떤 언어들의 집합이라 하자. 또한, 'f 가 t 에 토대해 i 에 수렴한다 (f converges on t to i)'는 것은 f 의 변역이 $\{t_n\ ;\ n \in N\}$을 포함하고, 유한개의 $n \in N$ 을 제외하고는 $f(t_n) = i$ 임을 의미한다.

(1) f 의 치역이 W_i(f_i 의 변역, 즉, i 번째의 재귀적으로 나열가능한 집합) 이고 f 가 t 에 토대해 i 에 수렴할 때, f 는 t 를 확인한다 (f identifies t) 라고 한다.

(2) f 가 L 의 모든 텍스트를 확인할 때, f 는 L 을 확인한다고 한다.

(3) f 가 $\mathscr{L}$ 에 속한 모든 언어들을 확인할 때, f 는 $\mathscr{L}$ 을 확인한다고 하고, $\mathscr{L}$ 을 확인하는 학습함수 f 가 있을 때, $\mathscr{L}$ 은 확인가능하다고 한다.

이 정의에서 (1)은 수렴조건을, (2), 특히 (3)은 학습절차의 신빙성 조건을 도입한다고 여겨질 수 있다. $\mathscr{L}$ 의 요소가 유일하다면, 가령 L (= W_i) 만이 $\mathscr{L}$ 의 요소라면, $\mathscr{L}$ 은 경험과 무관하게 확인가능하다: 모든 변수 x 에 대해서 $f(x) = i$ 인 학습함수 f 는 $\mathscr{L}$ 을 확인한다. 이런 학습자는 경험과 무관하게 i 만을 고집스럽게 추측함으로써, 우연한 행운에 의해서든 어떤 선천적 필연에 의해서든, $\{L\}$을 확인한다. 그러나, 이런 학습자는 L 의 문법이 달랐더라면, $\{L\}$을 확인하지 못했을 것이다. $\mathscr{L}$ 이 최소한 둘 이상의 언어들을 포함하면, 이런 고집스런 학습자들은 $\mathscr{L}$ 을 확인하지 못한

다. 촘스키가 요구한 자연언어들의 조건은 그것들이 모두 아이들에 의해 습득가능, 즉, 확인가능해야한다는 것이다. 아이들은 어떤 자연언어이든 그언어를 모국어로 습득할 수 있는 학습능력을 지닌 것으로 보인다. 아이들의 학습절차, 즉, 아이들의 학습함수는 자연언어들의 집합에 대한 신빙성있는(reliable) 학습절차인 것이다. 언어습득이 아닌 탐구상황에서도, 탐구자가 위의 고집스런 학습함수와 같이, 경험적 정보와 독립적으로 우연히 어떤 특정한 탐구대상에 관한 올바른 가설을 추측해 냈을 때, 많은 인식론자들은 그 탐구자가 지식을 획득했다고 하지 않을 것이다. 이런 탐구가 지식을 낳기위해 흔히 고려되는 한 조건은 탐구절차가 신빙성이 있어야 한다는 것이다. 즉, 어떤 탐구절차가 어떤 영역의 탐구대상들에 대한 지식을 낳으려면, 이 탐구절차가 이 영역에 속한 임의의 탐구대상에 적용되어 올바른 결과를 낳아야 한다는 것이다. 형식적 학습이론의 성공적 탐구의 기준에는 궁극적으로 진리에 도달해야한다는 극한에서의 수렴이라는 핵심적 조건이외에, 수렴에 이르는 절차가 신빙성있는 절차이어야 한다는 조건이 일반적으로 포함되어있다. 형식적 학습이론이 탐구와 학습, 나아가, 지식의 획득에 관한 모형이라고 여겨질 수 있는 한 중요한 근거가 탐구절차의 신빙성조건에 있다고 할 것이다.

어떤 언어가 자연언어이기 위한 필요조건은 그것이 정상적인 아이들에 의해 습득가능해야한다는 것이라는 촘스키의 주장에 의심을 갖는 사람은 별로 없을 것이다. 이런 습득가능성을 전제로 할 때, 언어습득 모형으로서의 학습이론을 통해 우리는, 학습자를 비롯한 그 모형의 여러 요소들에 대한 가정들이, 학습가능케 하는 언어들의 집합, 따라서, 가능한 자연언어들의 집합에 대해 어떤 함축을 지니는지 연구할 수 있다. 실제로, 이런 성과들 중 최초의 것들 중의 하나인 골드(Gold[1967])의 결과에 의하면, 그 구성요소가 유한한 문장들인 언어들의 집합(RE_{fin})에 무한히 많은 문장들로 구성된 언어 (예를 들어, N) 를 최소한 하나 포함시키면, 그 결과는 확인불가능한, 즉, 습득불가능한 언어들의 집합이다. 골드의 이 정리는 학습자에 관한 아무런 제약이 없이 얻어지는 결과이다. 즉, 학습함수를 튜링기계나 재귀함수로 간주하지 않고 임의의 함수로 간주해도 얻어지는 결과이다. 그 주된 이유는, 학습자에게 제시되는 유한한 정보들 (텍스트의 앞부분, t_n ($n \in N$)) 만으로는 그 텍스트가 유한히 많은 문장들을 포함하는 언어의 것인지, 무한히 많은 문장들을 포함하는 언어의 것인지를 확인할 수 있는 절차 - 효율적이든, 비효율적이든 - 가 없기 때문이다. 골드의 이런 결과는 우리가 탐구자를 튜링기계와 같은 것으로 간주하지 않음으로서, 탐구에 관한 더 많은 결과들을 얻어낼

수 있음을 보이는 예이다. 특히, 골드의 결과는 비효율적인 학습자, 즉, 계산불가능한 학습함수를 고려함으로써, 확인불가능성의 원인이 학습자에 제시되는 정보의 부족에 기인하는 경우를 분명히 들어낸다. 이와 같은 정보의 부족에 의한 탐구대상들의 확인불가능성은, 경험적 자료에 의거한 이론들의 미결정성의 대표적인 경우일 것이다. 학습자들을 효율적인 학습자들로 국한시키면, 확인가능한 언어들의 집합들은 훨씬 축소된다. 예를 들어, $f_1, f_2, \ldots f_n, \ldots$이 부분재귀함수들의 나열일 때, $K = \{n \in N \,;\, f_n(n)$ 은 정의되었다$\}$라고 하고, $\mathcal{L}' = \{ K \cup \{n\} \,;\, n \in N \}$ 이라 하면, $\mathcal{L}'$ 부분재귀함수로 구성된 어떠한 학습자도 확인할 수 없는 언어들의 집합임이 판명된다.[13] 그러나, $\mathcal{L}'$ 은 (비효율적인 학습자에 의해) 확인가능하다.[14] 이런 종류의 확인불가능성은 학습자에 제시된 정보의 부족에 기인한 것이 아니라 (왜냐하면, 비효율적인 학습자에 의해 확인가능하므로), 학습자의 계산적 제약에 (효율적인 학습자에 의해 확인불가능하므로) 기인하는 것이다.

언어습득 모형으로서의 형식적 학습이론의 성과들은 특히, 문법들의 규정을 통해 생물학적으로 가능한 자연언어들의 집합을 규정하려는 촘스키의 비교문법(comparative grammar)의 기획에 깊이 관련된다. 한 예로서, 오셔슨과 스탑 및 와인슈타인 (Osherson, Stob and Weinstein [1984]) 은 습득가능성을 전제할 때, 아이들의 언어습득에 관한 그럴듯한 세가지 가정들로부터, 가능한 자연언어들의 집합이 유한하다는 촘스키의 논제를 이끌어내고 있다. 언어습득 모형으로서의 형식적 학습이론은, 이와같이 경험적 가정들이 습득가능성에 대해 가지는 함축을 제시함으로써, 언어습득에 관한 여러 경험적 이론들과 비교문법들의 평가에도 기여한다.

지금까지 살펴본 골드 패러다임은 귀납적 탐구모형, 특히, 언어습득의 기본적 모형이지만, 이 모형의 구성요소들의 여러가지 명백한 변형들을 고려해 볼 수 있다. 촘스키의 이론을 고려한다면, 언어를 문장들의 집합이 아니라, 심층구조를 이루는 문장들로부터 표층구조를 이루는 문장들로의 함수(single-valud language)로 간주할 수 있을 것이다. 경험적 자료가 제시되는 방식에 제약을 가해서 가능한 텍스트들을 재귀적 텍스트들로 국한할 수도 있을 것이며, 학습자의 계산능력과 기억능력 등을 고려해 학습함수들을 계산가능한 학습함수들의 어떤 진부분 집합으로 간주할 수도 있을 것이며, 학습자가 추측하는 가설들에 일관성이나 단순성 같은 제약을 부여할 수도 있을 것이다. 특히, 과학적 탐구의 모형이 고려될

13) Osherson, Stob and Weinstein [1986], 48쪽, 4.2.1 B.
14) 상게서, 4.2.1 C.

때, 일반적으로 고려되는 방법론적 원칙들, 즉, 가설의 단순성이나 보수성의 제약이 성공적 탐구의 영역에 어떤 함축을 지니는가는 과학철학자들에게 큰 흥미거리가 될 것이다. 과학적 발견이 흔히 집단에 의해 이루어지는 상황을 고려해 학습자가 하나의 학습함수가 아니라 학습함수들의 집합인 경우를 고려할 수 있을 것이며, 과학자들의 실험은 수동적으로 정보를 입력받는 것이 아니라 능동적으로 필요한 정보를 찾는 작업이라는 점을 고려해 텍스트를 적절하게 보완할 수도 있을 것이다.[15] 진리에의 수렴기준에도 시간적 제약, 즉 허용될 수 있는 시행착오들의 수에 제약을 가할 수도 있을 것이다. (이런 제약은 퍼트남(Putnam[1965])이 이미 고려한 바 있다.) 이런 여러가지 탐구모형들은 성공적 탐구의 기준, 즉, 진리에의 수렴과 탐구절차의 신빙성을 근간으로 하는 골드의 언어습득 모형의 여러 요소들을 약간씩 변형한 것들이다. 이런 여러가지 탐구모형들은 탐구의 종류에 따라 그 중요성이 달라진다고 할 것이며, 어떤 모형이 특정한 종류의 탐구들의 적절한 모형인가 하는 것은 많은 경우 경험적 문제라고 하겠다. 그러나, 특정한 모형이 성공적 탐구에 어떤 귀결을 가지는가 하는 문제는 경험적 문제들과는 독립적으로 다루어 질 수 있는 문제로, 이런 문제의 분석을 '탐구의 논리' 혹은 '발견의 논리'라고 부르는 것이 부적절하지는 않을 것이다

진리탐지 패러다임

앞서 살펴본 탐구모형들은 기본적으로 산술적 모형들이었고, 재귀이론의 모범을 따라 자연수들을 모형구성의 주요 수단으로 사용했다. 셔피로(E. Shapiro)와 글리무어(C. Glymour) 등은 이런 수이론적 접근방식에 얽매이지 않고, 탐구대상들이 일차이론(first-order theories)들의 모형들로 표상되는 탐구모형들을 발전시켰다.[16] 이런 탐구모형들은 여러 측면에서 형식적 학습이론을 과학철학의 문제들을 비롯한 여러 철학적 문제들에 깊숙히 관련시키고 있다. 켈리와 글리무어는 과학자들의 탐구작업을 보다 잘 반영하는 성공적 탐구의 기준들을 구분하고 있으며, 이런 이론-모형적 접근방식은 성공적 탐구및 탐구문제의 난이도가 경험적 자료와

15) Osherson, Stob and Weinstein [1986] 은 이런 여러가지 모형들과 그것들의 확인 가능성에 대한 함축을 다루고 있다.

16) Glymour[1985], Osherson and Weinstein [1986], Osherson and Weinstein [1989 a], Kelly and Glymour [1989] 등 참조.

가설이 서술되는 언어의 복잡성에 체계적으로 의존함을 보이는 데에 특히 유용하다는 사실이 들어나고 있다. 다음은 이런 접근방식의 한 기본적인 틀을 골드 패러다임과 비교적으로 소개한 것이다.[17]

탐구대상: 과학자들은 그들에게 제시되는 경험적 정보들에 의존해서 세계의 어떤 측면을 탐구한다. 이 탐구모형에서 세계의 어떤 측면은 일차이론적 구조(first-order structure)로 표상된다. 탐구대상들을 이런 구조들 중에서도 그 논의세계(domain)가 가부번수(countable)인 구조들로 국한 시키는 것이 여러가지 이유에서 편리하다.[18] R이 가부번수의 논의세계를 지니는 일차이론적 구조일 때, R 하에서 참인 문장들의 집합을 R 의 L-이론 (the L-theory for R) 이라 한다.

가설: 가설은 탐구목적에 따라, 일차이론의 문장이나, 어떤 일차이론 구조의 완전한 이론 (complete theory), 혹은 재귀적으로 공리화 할 수 있는 이론으로 간주된다. 환경: 관찰진술들은 전통적으로 기초진술들 (원자진술들과 이들의 부정들)로 간주되어왔다. 이런 전통을 따른다면, 과학자들에게 입력되는 텍스트는 기초문장들의 무한한 나열로 간주된다. 인식론적 기초주의나 소박한 실증주의적 입장에 얽매이지 않을 때, 과학자들의 가설구성의 증거로 간주되는 진술들은 기초진술들을 초월할 것이다. 이 탐구모형의 변형들은 기초진술이 아닌 진술들을 텍스트의 요소들로 허용한다.

과학자(학습자): 텍스트의 유한한 앞부분들로 부터 이론들(문장들의 집합들)로의 함수. (Kelly and Glymour [1989] 의 모형에서는 재귀적으로 공리화 할 수 있는 이론들로 국한된다.)

성공의 기준: 언어학습에 관한 성공의 기준을 이 모형에 적용하면, 과학자에 제시되는 텍스트가 구조 R 의 것일 때 (즉, 텍스트의 요소들이 모두 R 하에서 참일 때), 과학자의 추측들, 즉, 학습함수의 값들이 R 의 L-이론에 수렴할 경우, 과학자가 주어진 주어진 텍스트를 성공적으로 확인한다고 할 것이다. (이런 기준을 'EA 기준'이라 할 것이다.) 이런 기준은, 주어진 문제된 경험적 자료들을 모두 한꺼번에 설명하는 이론구성을 목표로 하는 과학적 탐구에 대해 고려될 수 있는 성공의 기준일 것이다. 그러나, 보다 흔한 과학적 탐구는, 문제되는 경험적 자료들을 모두 한꺼번에 설

17) 여기서의 소개는 주로 Kelly and Glymour [1989] 와 Osherson and Weinstein [1989] 를 따랐다.

18) 불가부번수(uncountable)의 논의세계를 지니는 구조들에 관한 탐구모형의 난점들에 대해서는 Osherson and Weinstein [1986], 77쪽을 참조할 것.

명하는 이론구성을 목표로 하는 것이 아니라, 문제되는 경험적 자료들에 토대하여, 어떤 이론에 속하는 특정한 가설의 진위여부에 대한 추측을 목표로 한다. 이런 탐구 작업은, 각각의 가설에 대하여, 과학자의 추측들이 올바른 판단에 수렴할 경우, 성공적이라고 할 것이다. (이런 기준을 'AE 기준'이라 할 것이다.) 언어학습의 모형에서 이 두번째 기준이 아무런 역할을 못했던 것은, 모든 언어들이 이 기준에 의해 (효율적으로) 확인 가능하기 때문이다: 이를 위해 학습자는 단순히 자기에게 제시된 문장들만을 포함하는 언어를 추측하면된다. 그러나, 이런 전략은 일반적인 탐구상황에서는 성공하지 못한다. 예를 들어, 검토되는 가설이 보편진술이고 텍스트는 기초진술들로 이루어져 있을 때, 텍스트의 어떤 유한한 앞부분도 보편진술을 결정하지 못하므로, 앞의 전략이 성공하지 못하는 것이다. 일반적인 탐구모형에서는 언어학습의 모형과는 달리, AE 기준이 공허하지 않고 과학자들의 탐구작업들을 보다 정확히 표상하고 과학자들의 과제들의 계산적 난이도들을 측정하는 데에 매우 유용한 역할을 한다. 이런 직관적 기준들을 켈리와 글리무어(Kelly and Glymour [1989])를 따라 보다 정확히 서술하면 다음과 같다. 여기서, f 는 과학자(학습함수), t 는 환경(텍스트), R 은 가부번수의 논의세계를 지닌 일차이론적 구조, K 는 그런 구조들의 집합, t_m 은 텍스트의 m 번째까지의 요소들의 나열, 'R 의 환경'은 R 하에서 참인 모든 기초진술들로 구성된 텍스트이다.

(1) 학습자 f 는 환경 t 에 토대해서 구조 R 의 L-이론에 EA 수렴한다 =df. (En)(m)(m>n -> (s)(s 가 L 의 문장이다 -> (f(t_m) 이 s 를 함축한다 <-> s 가 R 하에서 참이다)))

(2) 학습자 f 는 환경 t 에 토대해서 구조 R 의 L-이론에 AE 수렴한다 =df. (s)(s 가 L 의 문장이다 -> (En)(m)(m>n -> (f(t_m) 이 s 를 함축한다 <-> s 가 R 하에서 참이다)))

(3) f 는 R 의 L-이론을 EA(AE) 확인한다 =df. f 는 R 의 어떠한 환경에 토대해서도 R 의 L-이론에 EA(AE) 수렴한다.

(4) f 는 구조들의 집합 K 를 L 과 관련하여 EA(AE) 확인한다 =df. K 에 속한 임의의 구조 R 에 대해, f 는 R 을 EA(AE) 확인한다.

(5) 구조들의 집합 K 는 L 과 관련하여 EA(AE) 확인가능하다 =df. K 를 L 과 관련하여 EA(AE) 확인하는 학습자가 있다.

언어습득 기준과 마찬가지로, 극한적 확인과 더불어 (3), 특히 (4)와 (5)는 탐구절차의 신빙성을 성공적 탐구의 조건으로 도입한다. 즉, 성공적 탐구가 되기 위해서

는, 탐구전략이, 특정한 구조에 관한 우연적 확인을 낳는 것이 아니라, 여러 구조들을 (즉, 확인 대상이 실제의 구조와 달랐더라도) 확인할 수 있는 절차이어야 한다.

재귀이론으로부터 우리가 익숙히 아는 것은, 결정가능성(decidability)이 언어의 복잡성에 (예를 들어, 이항술어나 함수기호의 포함여부, 양화사들의 복잡성에) 의존한다는 사실이다. 켈리와 글리무어는 귀납문제의 해결가능성, 탐구의 성공가능성이 증거와 가설이 서술되는 언어의 복잡성에 의존함을 재귀이론의 기술을 빌어 체계적으로 보이고 있다. 예를 들어, [AE] ([EA]) 를 L 과 관련하여 AE (EA) 확인 가능한 구조들의 집합이라하고, [AEe] ([EAe]) 를 L 과 관련하여 효율적인 과학자(즉, 재귀적 학습함수)가 확인 할 수 있는 구조들의 집합이라 하자. 말하자면, [AEe] ([EAe]) 는 기계에 의해 AE (EA) 기준에서 성공적으로 해결될 수 있는 귀납문제들이고, [AE] ([EA]) 는 임의의 학습자에 의해 AE (EA) 기준에서 성공적으로 해결될 수 있는 귀납문제들이다. 켈리와 글리무어(Kelly and Glymour [1989])는 [AE] 가 [EA] 와 [AEe] 를 포함하고, [EA] 와 [AEe] 는 각각 [EAe] 를 포함한다는 것이 이 네가지 [illegible]문제들 성립하는 포함관계의 전부임을 보이고 있다.

우리가 언급한 탐구모형의 환경은 그 텍스트로 기초진술들만을 포함했었다. 다분히 실증주의와 연합할 가능성이 큰 이런 모형을 떠나, 과학자에 제시되는 자료들에 보편진술이나 존재진술들을 허용하면, 재귀이론에서의 산술적 계층 및 재귀이론적 계층과 유사하게, 귀납문제들의 난이도에 관한 계층을 체계적으로 연구할 수 있다.[19] 또한, 언어학습 모형들에서와 마찬가지로, 이 탐구모형의 여러가지 변형들이 고려되고 있으며, 이런 모형들에서 해결될 수 있는 귀납문제들과 그렇지않은 문제들의 난이도에 관한 체계적인 결과들이 얻어지고 있다.

맺는말: 발견의 논리

기존의 정통파 과학철학자들에 의하면, 과학적 발견과 관련된 상황은 심리적 문제이지 논리적 문제가 아니며, 논리적 분석이 적용되는 분야는 발견된 이론의 정당화와 관련된 상황 뿐이다. 라이헨바하(H. Reichenbach)와 포퍼(K. Popper) 등에 의해 대표되는 이런 정통파 과학철학자들의 주장에 이의를 제기한 이론가들

19) Kelly and Glymour [1990] 참조.

은 핸슨(N. R. Hanson)이나 사이몬(H. Simon)과 더불어 소수그룹에 속하지만 그간 종종 있어왔다.[20] 형식적 학습이론의 기획은 이런 소수그룹에 속한 사람들이 정통파 견해에 대해 제기했던 소극적 형식의 이의에 비교가 되지 않을 만큼 적극적 형식의 이의를 제기한다. 예를 들어, 재귀이론에서 효율적인 절차에 의해 해결가능한 연역의 문제들과 그렇지 않은 문제들의 난이도의 계층을 분류하듯이, 형식적 학습이론에서는 효율적인 탐구절차에 의해 해결가능한 발견의 문제들과 그렇지 않은 문제들의 난이도의 계층을 분류할 수 있다. '발견의 논리'란 용어는 여러가지 의미로 사용되어 왔다. 발견의 논리가 없음을 주장하는 많은 사람들은 주로, 과학적 발견에 이르는 효율적이고 기계적인 절차가 없음을 주장한다. 반면에, 사이몬같은 이는 '논리'란 말을 '목표지향적인 절차에 관한 규범적 분석'으로 이해하여, 어떤 국한된 영역에 관한 발견에 이르기 위해서 어떤 절차가 더욱 효과적인가를 평가하는 의미에서 발견의 논리가 충분히 가능함을 역설한다.[21] 발견의 논리를 부정하는 이들은 과학적 발견의 문제에 일차논리의 타당한 문장들을 효율적으로 열거해내는 증명절차와 같은 것이 [illegible]을 의미하는 듯하다. 그러나, 발견의 문제를 국한시키면, 국한된 영역에서의 [illegible] 목표로 하는 여러 전문가 체계들 (예를 들어, BACON, DENDRAL, META-DENDRAL, TETRAD 등)[22]이 보여주듯이, 효율적인 발견절차가 얼마든지 가능하며, 사이몬이 의미한 바의 발견의 논리도 가능할 것이다. 형식적 학습이론은 이런 국한된 영역에서의 발견문제의 해결을 위한 발견절차를 다루기도 하지만, 사이몬이 의미한 것보다 더 메타이론적인 의미에서의 발견의 논리를 제시할 수 있다고 하겠다. 연역논리학 의 메타이론에서 효율적으로 해결가능한 문제들과 그렇지 않은 문제들의 난이도를 분류하듯이, 형식적 학습이론에서는 (효율적으로) 해결가능한 발견문제들과 그렇지 않은 문제들의 난이도를 분류할 수 있다. 연역논리학에서 문제들에 대한 해결불가능성의 결과들이 그 문제들에 대한 효율적 증명절차가 있을 수 없음을 보이듯이, 형식적 학습이론에서 (효율적인 학습자에 의해) 확인불가능한 발견문제들은 그 문제들에 대한 (효율적인) 발견절차가 있을 수 없음을 보인다. 물론, 이런 해석은 형식적 학습이론의 기본적 탐구모형과 여러 변형들이 여러 형태의 귀납적 탐구들에 관한 적절한 모형들임을 전제한다.

---

20) 이 초 식 [1993] 참조.

21) Simon [1973] 참조.

22) 이런 전문가 체계들에 대한 간단한 설명을 위해서는 Glymour [1992] 를 참조할 것.

우리는 앞서 진리에의 극한적 수렴과 발견적 절차의 신빙성을 성공적 탐구의 중요한 기준으로 간주했으며, 특히, 발견적 절차의 신빙성 조건은 성공적 탐구의 산물로 얻어진 것이 지식이라는 주장에 대한 논거를 제공함을 보았다. 물론, 이런 조건을 만족한다고 해서 지식을 획득했다고 할 수 있느냐는 문제는 보다 깊은 철학적 검토를 필요로 한다.[23] 성공적 탐구의 극한에 있어서의 진리에의 수렴기준은 다분히 실재론적 입장을 전제하는 것이 아닌가 의심될 수 있을 것이다. 실제로, 켈리와 글리무어 (Kelly and Glymour [1989], [1990]) 는 형식적 학습이론을 퍼어스의 수렴적 실재론 (convergent realism) 과 같은 입장을 보다 정확히 제시하기 위한 목적을 위해 이용한다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이, 형식적 학습이론의 틀은 이런 형이상학적 입장들과는 독립적이라고 할 것이다. 궁극적으로 도달한 가설이 반드시 실재론적 의미의 진리개념을 만족해야 할 필요도 없고, 과학자들에게 제시되는 경험적 자료들(텍스트)이 인식론적 기초주의자들이 주장하듯 반드시 이론으로부터 독립적일 필요도 없다. 켈리와 글리무어 (Kelly and Glymour [1992]) 는 이런 상대주의적 입장들과 이론에 물든 자료들 (theory-laden data) 이 형식적 학습이론에서 잘 다루어지며, 이 이론이 상대주의적 입장들을 분명히 하는데 크게 기여할 수 있음을 보이고 있다.

재귀이론과 모형이론의 수단들을 동원하여 귀납적 탐구의 특성과 영역 및 한계에 관한 설득력있는 분석을 제시함으로써, 형식적 학습이론은 그간 그늘에 가려져 있던 탐구와 발견의 문제를 과학철학의 전면에 등장시키고 있다. 이런 이론적 틀은 귀납의 문제 뿐 아니라, 단순성과 보수성을 비롯한 방법론적 원칙들과 이론적 용어들의 역할등 과학철학의 여러 중요한 문제들에 새롭고 유용한 분석을 제시할 수 있을 것으로 보인다.[24] 이제 막 돋기 시작한 형식적 학습이론의 떡잎이 어떤 나무로 자랄지는 아직 더 두고보아야 할 일이나, 발표자는 최소한 다음과 같은 평가를 내릴 수 있다. 인공지능의 가능성에 관한 많은 철학자들의 비생산적인 찬반 논중에 식상한 학도들에게, 형식적 학습이론의 기획은 입맛 당기는 반찬임에 틀림이 없다.

---

23) 이 문제에 대한 긍정적인 대답을 향한 논증의 예는 Glymour and Kelly [1992] 에, 다소 부정적인 태도의 예는 Earman [1992] (218-222 쪽) 에 포함되어 있다.
24) Gaifman, Osherson and Weinstein [1990], Osherson amd Weinstein [1988],[1993] 참조.

참 고 문 헌

이 초 식, 『인공지능의 철학』, 고려대학교 출판부, 1993.

Angluin, D. and Smith, C. "Inductive Inference: Theory and Methods", *Computing Surveys*, Vol. 15, 1983.

Earman, J. *Bayes or Bust ?*, MIT Pr., 1992.

Genesereth, M. and Nilsson, N. *Logical Foundations of Artificial Intelligence*, 1987.

Gaifman, H., Osherson, D. and Weinstein, S. "A Reason for Theoretical Terms", *Erkenntnis*, 32, 1990.

Gold, E. M. "Limiting Recursion", *The Journal of Symbolic Logic*, Vol. 30, 1965.

________, "Language Identification in the Limit", *Information and Control* 10, 1967.

Glymour, C. "Inductive Inference in the Limit", *Erkenntnis* 22, 1985.

________, "Android Epistemology: Computation, Artificial Intelligence and the Philosophy of Science" in M. H. Salmon et. al. (eds.) *Introduction to the Philosophy of Science*, 1992.

Glymour, C. and Kelly, K. "Thoroughly Modern Meno", in Earman, J. (ed.) *Inference, Explanation, and other Frustrations*, 1992.

Kelly, K. "Reichenbach, Induction, and Discovery", *Erkenntnis* 35, 1991.

Kelly, K. and Glymour, C. "Convergence to the Truth and Nothing but the Truth", *Philosophy of Science* 56, 1989.

________, "Theory Discovery from Data with Mixed Quantifiers", *Journal of Philosophical Logic* 19, 1990.

________, "Inductive Inference from Theory Laden Data", *Journal of Philosophical Logic* 21, 1992.

Osherson, D., M. Stob and S. Weinstein, "Learning Theory and Natural Language", *Cognition* 17, 1984.

________, *Systems that Learn*, MIT Pr., 1986.

Osherson, D. and Weinstein, S. "Formal Learning Theory", in

Gazzaniga, M. (ed.) *Handbook of Cognitive Neuroscience*, 1984.

________, "Identification in the Limit of First Order Structures", *Journal of Philosophical Logic* 15, 1986.

________, "On Advancing Simple Hypotheses", *Philosophy of Science*, 57, 1990.

________, "Paradigms of Truth Detection", *Journal of Philosophical Logic* 18, 1989 (a).

________, "Identifiable Collections of Countable Structures", *Philosophy of Science*, 56, 1989 (b).

________, "Relevant Consequence and Empirical Enquiry", *Journal of Philosophical Logic*, 22, 1993.

Putnam, H. "Probability and Confirmation", *The Voice of America Forum*, 1963, reprinted in *Mathematics, Matter and Method*, 1975.

________, "Trial and Error Predicates and the Solution to a Problem of Mostowski" *The Journal of Symbolic Logic*, Vol. 30, 1965.

Quine, W. "Natural Kinds", in *Ontological Relativity and Other Essays*, 1969.

Simon, H. "Does Scientific Discovery Have a Logic ?", *Philosophy of Science* 40, 1973, reprinted in *Models of Discovery*, 1977.