

베イズ주의에서의 실험의 역할*

이 영 의 (고려대)

주제분류 과학철학

주요어 베イズ주의, 고전통계학, 정지규칙, 가능도 원리, 입증, 스틸, 헬만, 새비지

요약문

이 글의 목표는 베イズ주의 입장에서 정지규칙과 가능도 원리를 분석하여 베イズ주의에서의 실험의 역할을 분석하는 것이다. 나는 이 글에서 구체적으로 베イズ주의자들이 정지규칙을 거부하는 이유를 검토하고, 이어서 그들이 정지규칙과 관련된 경험적 요소를 베イズ주의에 반영할 수 있는 방식을 모색할 것이다. 우리는 이러한 작업을 통하여 실험이 제공하는 경험적 증거가 베イズ주의에 적절히 반영될 수 있는 방식을 이해할 수 있다. 논의 순서는 다음과 같다. 먼저 정지규칙이 제시되고 그것에 대한 베イズ적 비판이 분석된다. 이어서 정지규칙에 대한 베イズ주의자들의 비판에서 주요한 논거에 해당하는 가능도 원리가 검토된다. 마지막으로 베イズ주의가 실험적 측면을 보다 더 잘 반영할 수 있는 가능성을 모색하기 위해서 정지규칙을 수용하는 수정된 베イズ주의와 표준적 베イズ주의를 확장하는 입장이 차례로 검토된다.

* 이 논문은 2003년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.
(KRF-2003-074-AS0017)

과학적 추리에 관한 통계적 이론으로서의 베이즈주의(Bayesianism)에 대한 강력한 비판은 피셔(Fisher), 네이먼(Neyman), 피어슨(Pearson) 등의 고전통계학(classical statistics)에 근거를 두고 있다. 예를 들어 최근 메이요(Mayo)는 고전통계학의 전통에 따라서 가설 평가는 연구자가 가설에 부여하는 사전확률(prior probability)이 아니라 실험적 증거에 의해 가설을 잘못 평가할 오류확률(error probability)에 의해 분석되어야 한다고 주장한다. 물론 베이즈주의에 대한 메이요의 비판은 새로운 것은 아니다. 베이즈 통계학과 고전통계학은 20세기 초반부터 통계적 추리에 관한 이론으로서 경쟁해왔고 그 과정에서 두 입장의 지지자들은 많은 주제들을 놓고 논쟁해왔기 때문이다. 특히 두 이론 체계는 과학적 추리와 관련된 실험적 요소를 적절히 설명하는 방식에 있어서 크게 대립해왔고, 그 대립은 언제 실험이 중지되어야 하는가를 규정하는 정지규칙(stopping rule)에 대한 논쟁에서 분명하게 드러난다. 고전통계학의 지지자들은 정지규칙이 과학적 추리를 분석하는데 필수적이라고 주장하는 반면에 베이즈주의자들은 그 규칙이 불필요하거나 필수적 요소가 아니라고 주장해왔다.

이 글의 목표는 베이즈주의 입장에서 정지규칙과 그와 관련된 가능도 원리(likelihood principle)를 분석하여 베이즈주의에서의 실험의 역할을 분석하는 것이다. 보다 구체적으로 말하자면 나는 이 글에서 베이즈주의자들이 정지규칙을 거부하는 이유를 검토하고 이어서 그들이 정지규칙과 관련된 경험적 요소를 베이즈주의에 반영할 수 있는 방식을 모색할 것이다. 우리는 이러한 작업을 통하여 실험이 제공하는 경험적 증거가 베이즈주의에서 적절히 반영될 수 있는 방식을 이해할 수 있다. 논의 순서는 다음과 같다. 먼저 정지규칙이 제시되고 그 규칙에 대한 베이즈적 비판이 분석된다. 이어서 정지규칙에 대한 베이즈주의자들의 비판에서 주요한 논거에 해당하는 가능도 원리가 검토된다. 마지막으로 베이즈주의가 실험적 측면을 잘 반영할 수 있는 가능성을 모색하기 위해서 정지규칙을 수용하는 수정된 베이즈주의(Steel의 이론)와 표준적 베이즈주의를 확장하는 입장(Hellman의 이론)이 차례로 검토된다.

1. 고전 통계학과 정지규칙

통계적 분야에는 크게 두 가지의 이론, 즉 베이즈 통계학과 고전통계학이 경쟁해왔다.¹⁾ 베이즈 통계학의 경우 통계적 추리는 개략적으로 다음과 같이 분석된다. 먼저 설명의 대상인 모집단의 모평균 θ 에 대한 통계적 가설들 H_i 의 집합이 주어져 있다고 가정된다. 이어서 관련된 증거 E 가 수집된다. 연구자는 E 를 이용하여 특정 가설을 평가하기 위하여 모평균 θ 에 사후확률분포 $P(\theta)$ 를 결정하고, 이어서 베이즈 정리(Bayes' theorem)를 이용하여 사후확률분포 $P(\theta|E)$ 를 계산한다. 최종적으로 $P(\theta|E)$ 와 $P(\theta)$ 를 비교하여 해당 가설이 평가된다. 만약 $P(\theta|E) > P(\theta)$ 이면, E 는 θ 를 주장하는 가설 H 를 경험적으로 지지한다고 판정된다. 이와 반면에 고전통계학의 핵심은 가설 검정에 있다. 고전통계학에서 통계적 가설은 개략적으로 다음과 같이 평가된다. 우선 관찰된 증거를 설명하기 위해서 통계적 가설이 제안되고, 이어서 그렇게 제안된 가설이 검정에 회부된다. 해당 가설이 특정한 유의 수준에서 검정을 통과하면 그것은 수용되고, 그렇지 못하면 기각된다.²⁾

위에서 요약된 두 종류의 통계학은 통계적 추리를 분석하는데 있어서 근본적인 차이점을 갖는다. 사후확률과 오류확률은 그러한 차이점을 뒷받침하는 근본적인 이론적 요소이고 정지규칙은 근본적인 방법론적 요소에 해당한다. 고전통계학에서 정지규칙은 가설 검정에 필요한 증거를 확보하기 위해 수행되는 실험이 언제 정지되어야 하는가를 규정하기 때문에 그것은 고전통계학에서 필수불가결한 요소이다. 정지규칙이 고전통계학에서 어떻게 작동하는가를 보기 위해 다음의 예를 살펴보자. 우리가 특정한

1) 고전통계학은 그 명칭이 시사하는 것과는 달리 (베이즈 통계학과 비교하여) 비교적 늦게 1900년대에 피어슨(K. Pearson)으로부터 시작되었고, 피셔, 피어슨(E. S. Pearson), 네이먼에 의해 계승 발전되었다.

2) 이러한 특징에 주목하여 메이요는 고전통계학의 검정 방법은 포퍼가 제안한 추측과 반박의 방법에 해당한다고 주장한다. D. Mayo(1996) 1절 참조

질병의 치료제로서 개발된 신약이 효과적이라고 주장하는 가설을 평가하기 위해서 모집단으로부터 추출한 n 명으로 구성된 표본 집합에 대해 임의실험을 한다고 가정하자. 귀무가설(null hypothesis) H_0 는 신약이 해당 질병의 치료제로서 효능이 없다, 즉 $\theta=0.5$ 라고 주장한다고 가정하자.

- H_0 : 신약은 해당 질병을 치료하는데 효능이 없다 ($\theta=0.5$).

가설 검정은 일반적으로 표본의 크기가 고정된 유의성 검정과 그렇지 않은 순차적 검정으로 구분된다. 표본의 크기가 고정된 유의성 검정의 경우 먼저 n 명의 피험자들로 구성된 표본 집합에서 신약의 효능에 대한 표본평균 \bar{X} 가 기록된다. 그 다음 표본평균 \bar{X} 와 H_0 에서 가정된 θ 의 값의 차이($\bar{X}-\theta$)가 계산되고, 마지막으로 그 차이에 대한 유의수준이 계산된다. 예를 들어 \bar{X} 가 θ 로부터 2 표준편차의 차이(2SD)를 보인다면 유의수준은 0.05이다. 이 경우 정지규칙은 다음과 같다.

- 정지규칙 1: $|\theta| \geq 2/\sqrt{n}$ 이면 유의수준 0.05에서 H_0 를 기각하라.

그러므로 위의 유의성 검정에서 귀무가설 H_0 가 참임에도 불구하고 그것이 기각될 확률은 0.05이다. 즉 유의성 검정이 유형 I의 오류(type I error)를 범할 확률은 0.05이다.

그러나 순차적 검정(sequential test)의 경우 표본의 크기 n 은 실험 전에 고정되지 않는다. 순차적 검정은 예를 들어 H_0 가 0.05 유의수준에서 기각될 때까지 실험이 계속된다. 이 경우 이용되는 정지규칙은 다음과 같다.

- 정지규칙 2: $|\theta| \geq 2/\sqrt{n}$ 일 때까지 실험을 계속하라.

순차적 검정의 경우 유의성 검정과 대조적으로 특정한 차이($\bar{X}-\theta$)가 발생하지 않으면 실험자는 추가적 시행을 실시해야 한다. 예를 들어 20회의 시행에서 2SD 차이가 나타나지 않으면 20회의 시행이 추가될 것이다. 여기서 나타나듯이 고전통계학에서 정지규칙은 통계적 추리를 분석하는데 필수적이다. 실험 전에 표본의 크기가 고정된 유의성 검정의 경우 정지규칙은 기각과 수용을 결정하는 유의 수준의 적용 방법으로서 작용한다. 다른 한편 순차적 검정의 경우 정지규칙이 없다면 연구자는 특정한 유의 수준이 주어지더라도 실험을 정지할 시점을 결정할 수 없기 때문에 원칙상 의도된 검정을 할 수 없게 될 것이다.

정지규칙에 대한 베이즈주의자들의 비판은 주로 순차적 검정에 대해 초점을 두고 있는데, 그들의 비판은 다음의 두 가지로 요약될 수 있다. 첫 번째 비판은 정지규칙이 귀납논리적으로 잘못된 결과를 초래할 수 있다는 점을 강조한다. 예를 들어, 정지규칙은 경우에 따라서 상호 모순되는 검정 결과를 낳는다. 논의를 간단히 하기 위해 정상적인 동전을 던지는 임의실험에서 나타나는 독립시행의 예를 생각해보자.³⁾ 귀무가설 H_0 은 “그 동전은 정상이다”이고, 이 실험에서 다음의 두 가지 정지규칙이 적용된다고 가정하자.

- 정지규칙 1*: 20회 시행에서 실험을 종료하라.
- 정지규칙 2*: 앞면이 6회 나타난 이후에 실험을 종료하라.

정지규칙 1*이 적용되는 경우 20회 시행의 결과 2^{20} 의 계열로 구성된 표본 공간이 성립한다. 그러나 정지규칙 2*가 적용되는 경우 결과 공간은 첫 번째의 경우와 다르다. 앞면(H)과 뒷면(T)이 나타난 순서를 무시하고 그것들이 나타난 횟수만을 표기하면, 정지규칙 1*의 경우 결과 공간은 $\{(20, 0), (19, 1), (19, 2), \dots, (0, 20)\}$ 이고, 정지규칙 2*의 경우 결과 공간은 $\{(6, 0), (6, 1), (6, 2), (6, 3), \dots\}$ 이 된다. 즉 전자의 경우 표본 공

3) C. Howson and P. Urbach(1993), pp. 210-212.

간의 크기가 고정되지만 두 번째의 경우는 순차적 검정에 해당한다. 두 가지의 결과 공간의 확률분포가 [표 1]과 [표 2]에 제시되었다.

결과(H, T)	확률
0, 20	9×10^{-7}
1, 19	1.9×10^{-5}
2, 18	2×10^{-4}
3, 17	0.0011
4, 16	0.0046
5, 15	0.0148
6, 14	0.0370
7, 13	0.0739
8, 12	0.1201
9, 11	0.1602
10, 10	0.1762
11, 9	0.1602
12, 8	0.1201
13, 7	0.0739
14, 6	0.0370
15, 5	0.0048
16, 4	0.0046
17, 3	0.0011
18, 2	2×10^{-4}
19, 1	1.9×10^{-5}
20, 0	9×10^{-7}

[표 1]

결과(H, T)	확률
6, 0	0.0156
6, 1	0.0469
6, 2	0.0820
6, 3	0.1094
6, 4	0.1230
6, 5	0.1230
6, 6	0.1128
6, 7	0.0967
6, 8	0.0786
6, 9	0.0611
6, 10	0.0458
6, 11	0.0333
6, 12	0.0236
6, 13	0.0163
6, 14	0.0111
6, 15	0.0074
6, 16	0.0048
6, 17	0.0031
.	.
.	.
.	.

[표 2]

이제 정지규칙 2*가 적용된 실험에서 결과 (6, 14)가 발생했다고 가정해보자. 그 결과는 [표 2]에서 볼 수 있듯이 (6, 15), (6, 16)... 와 마찬가지로 발생할 확률이 매우 낮다. 그것들의 확률의 합은 0.0319에 불과하다.⁴⁾ 0.0139는 유의수준(=0.05)보다 작기 때문에 그 결과는 유의하다고

4) (6, 0)으로부터 (6, 13)까지의 확률의 합은 0.9681이므로 그것들의 합은

판단된다. 따라서 귀무가설 H_0 (“그 동전은 정상이다”)은 기각된다. 그러나 동일한 결과 (6, 14)가 정지규칙 1*가 적용된 실험에서 발생한 경우, 그것이 발생할 확률은 상대적으로 높다. 더구나 (6, 14), (6, 15), ...(14, 6), (15, 5)의 확률의 합은 0.9590에 달하기 때문에 그 결과는 유의하지 않다고 판단된다. 그러므로 H_0 는 수용된다. 우리는 여기서 동일한 귀무가설에 대해 임의실험이 어떤 방식으로 수행되었는가에 따라서 상호 모순되는 검정 결과가 나타난다는 점을 알 수 있다.

동일한 증거를 이용한 검정이 상호 모순되는 결과를 낳는다는 비판에 대해 고전통계학의 지지자들은 두 가지의 실험이 구분되어야 하기 때문에 위에서 지적된 모순은 실제로 발생하지 않는다고 대답할 것이다. 그러나 이러한 대답이 적절하지 못하다는 것은 다음의 경우를 살펴보면 분명히 드러난다. 정지규칙 2*가 적용된 실험에서 연구자는 10회의 시행에서 자신이 원하는 결과 (6, 14)가 나타나지 않았기 때문에 추가로 10회의 시행을 실시했다고 가정하자. 이제 그 연구자가 원하는 결과가 추가 실험에서 나타났기 때문에 실험이 20회로 종료되었다고 하자. 그런데 연구자는 처음의 검정 결과, 즉 기각이 자신이 의도했던 것이 아니었으므로 그는 실험이 처음부터 10회가 아니라 20회로 기획되었다고 보고할 수 있다. 이러한 가능성은 정지규칙이 검정 결과의 객관성에 부정적 영향을 미칠 수 있는 또 다른 방식을 보여준다. 이러한 예를 통하여 나타나듯이 정지규칙에 대한 베이지주의자들의 두 번째 비판은 정지규칙을 가설 검정에 적용하면 연구자의 의도가 검정 결과에 영향을 미칠 수 있다는 점을 강조한다. 이러한 유형의 비판은 흔히 의도에 의한 논증(arguments from intention)이라고 불리는데, 새비지(Savage)가 처음으로 분명한 형태로 제시하였다. 다음에 제시된 정지규칙에 대한 새비지의 비판은 의도에 의한 논증을 비판하고 있다.

1-0.9681=0.0319이다.

순차적 실험의 설계는 최종 분석에서 실험자가 실제로 무엇을 하기를 원하는가를 고려한다. 실험자의 의도는 그의 머릿속에 숨겨져 있다. (L. Savage, 1962, p. 76.)

위의 인용문에서 새비지가 강조하는 것은 언제 표집 과정을 정지할 것인가에 대한 연구자의 결정, 즉 언제 실험을 중지할 것인가에 대한 연구자의 의도는 연구자 자신만이 알 수 있다는 점이다. 새비지의 비판에 따르면 고전통계학은 가설 검정에서 심각한 ‘주관적’ 요소를 갖고 있다.⁵⁾ 고전통계학의 지지자들은 베이즈주의가 갖고 있는 주관적 요소를 집중적으로 공격해왔다. 특히 그들은 베이즈주의자들이 가설에 대해 부여하는 사전 확률이 연구자의 믿음에 의존하게 되므로 주관적 성격을 갖게 될 수밖에 없다고 지적해왔다. 그러나 새비지의 비판이 옳다면, 그리고 사실상 그러한 비판이 부분적으로 옳기 때문에, 여기서 지적되고 있는 주관성은 가설 평가에 관한 한 베이즈주의의 사전확률의 주관적 특징에 못지 않은 심각한 문제를 야기할 것이다.

그렇다면 베이즈주의 관점에서 볼 때 정지규칙은 어떠한 유용성도 갖지 못하는가? 하우슨과 어박(Howson and Urbach)은 정지규칙이 특별한 경우에 적합한 정보를 포함할 수 있다고 인정한다,

그러므로 정지규칙이 반드시 비(非) 정보적인 것은 아니지만 ... 보통의 경우는 그렇다. 이러한 허용은 오해되지 말아야한다. 그것은 특정 시점에서 시행을 정지할 실험자의 의도가 어떠한 귀납적 중요성을 갖는다는 것을 의미하지 않는다. 그러므로 우리의 입장은 고전통계학의 입장과 매우 차이가 난다. 우리가 주장하는 것은 사람들이 모평균을 추정하는데 있어서 보통은 적절한 표본의 구성으로부터 모든 정보를 추출하지만 때에는 표집과정에 관계되는 사건들도 증거로서의 중요성을 갖는다는 것이다. (C. Howson and P. Urbach, 1996, p. 366. 강조는 저자에 의함.)

5) W. Edwards, H. Lindman, L. Savage, 1963, p. 239 참조 새비지의 논변은 다른 한편으로는 자신에게 유리한 정지규칙을 적용하는 경우에 나타나는 연구자의 윤리성 문제를 제기한다.

위의 인용문에 따르면 통계적 추리의 경우 일반적으로 정지규칙을 적용하여 획득된 경험적 증거는 가설을 평가하는데 적합한 정보를 제공하지 못한다. 하우스과 어박과 같은 현대의 주관적 베이즈주의자들뿐만 아니라 새비지 역시 연구자가 통계적 가설을 평가하는데 있어서 반드시 정지규칙을 불필요한 요소로 간주해야 한다고 주장하지는 않았다. 그렇다면 우리는 앞에서 검토된 정지규칙에 대한 베이즈주의자들의 비판이 베이즈주의에 전적으로 유리하게 작용하는 것만은 아니라고 보아야 할 것이다. 그 비판은 정지규칙이 때로는 모순된 검정 결과를 낳기도 하고 경우에 따라서는 연구자의 의도에 따라서 부적합한 증거를 산출하기도 하지만, 그러나 항상 그렇지는 않다는 단서를 남김으로써 베이즈주의가 (고전통계학의 지지자들은 핵심적이라고 주장하는) 그러한 예외적인 상황을 어떻게 분석할 수 있는가라는 문제를 베이즈주의자들에게 제기한다.⁶⁾

6) 정지규칙에 대한 베이즈주의자들의 비판에 대해 메이요가 제시한 답변의 요지는 다음과 같다. (1) 실험을 상세히 기술하는데 있어서 고려되는 모든 측면들, 예를 들어 표본 크기, 가설 공간, 검정 예측 등은 연구자의 의도를 반영한다고 말할 수 있지만, 실험의 상세 기술에 대한 관심이 실험자의 의도에 대한 관심에 해당한다고 말할 수 없다. D. Mayo(1996), p. 347. (2) 검정 절차의 차이는 가능한 실험 결과들의 집합에 차이를 드러낸다. 고정된 표본 크기에서 가능한 어떤 결과들은 순차적 검정에서는 더 이상 불가능하다. 이 경우 표본 크기가 다르지만 가능성들은 비례적이다. 만약 정지규칙이 정지 시점을 지시하지 않는다면 가능한 결과들은 귀무가설을 승인할 어떤 내용도 포함하지 못할 것이다. Ibid., p. 349. (3) 고정된 표본의 크기에서 이용되는 유의수준과 순차적 유의성 검정에서 이용되는 유의수준이 구분될 필요가 있다. 전자를 명목상 수준(nominal SL)이라고 하고 후자를 실제적 유의수준(actual SL)이라고 하면 순차적 검정에서 유형 1의 오류를 범할 확률은 검정이 정지하기 전에 시행된 검정의 수효에 따라서 변하기 때문에 유의수준을 구분할 필요가 있다. 하우스과 어박이 지적하는 동일한 검정 결과들은 실제적 유의수준의 차이가 있다. 실제적 유의수준은 어떤 정지 시점이 나 또는 요구되는 차이가 실제로 발견된 시점에 이르기까지 귀무가설로부터 0.05의 명목상 통계적으로 유의한 차이를 발견할 확률이다. 실제적 유의 수준은 누적적이다. 예를 들어 명목상 유의수준이 0.05인 경우 실제적 유의수준은 0.53이다. D. Mayo and M. Kruse(2001), p. 390. (4) 순차적 검정이 유한한 시행에서 정지할 확률은 1이므로(proper stopping rule), 진정한 문제는 언제 정지하는 것이 가장 좋은가를 지시하는 최적 정지규칙(optimal stopping rule)을 제시하는 것이다. Ibid., p. 389.

2. 베이즈주의와 가능도 원리

고전통계학에서의 정지규칙에 대응하는 것은 베이즈주의에서의 가능도 원리이다. 가능도 원리는 베이즈주의자들이 정지규칙을 비판하는 논거로서 작용할 뿐만 아니라 그것을 대체하는 수단으로서도 작용한다. 가능도는 다음과 같이 정의될 수 있다.

- 가능도: E가 주어졌을 때 H의 가능도 $L(H,E)$ 은 H가 주어졌을 때 E를 얻을 확률 $P(E|H)$ 에 비례한다. 즉 $L(H,E) = kP(E|H)$. (여기서 k 는 임의의 양의 실수이다.)⁷⁾

위의 정의를 이용하여 우리는 두 가지 가설의 가능도 비율(ratio of likelihood)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

- 가능도 비율: E가 주어졌을 때 가설 H_1 과 H_2 의 가능도의 비율 $L(H_1,E) / L(H_2,E)$ 이다.

에드워즈(Edwards), 로얄(Royall), 쏘버(Sober)를 비롯한 가능도주의(likelihoodism)의 지지자들은 가능도 비율이 경험적 증거가 가설에 대해 제공하는 경험적 지지도를 가장 적절히 표현한다고 주장한다. 그러나 베이즈주의자들이 관심을 갖는 것은 가능도 개념이나 가능도 비율이 아니라 다음의 가능도 원리¹이다.

- 가능도 원리 1: 특정 가설에 대해 서로 다른 두 증거가 제공하는 가능도가 상수적으로 비례하면 그 증거들은 해당 가설을 경험적으로 동등하게 지지한다. 즉 $L(H,E) = kL(H,E^*)$ 이면 E와 E^* 은 H를 동등하게 경

7) A. Edwards(1992), p. 9.

험적으로 지지한다.⁸⁾

위에서 제시된 가능성도 원리 1에 따르면 서로 다른 실험으로부터 유래한 증거가 특정 가설을 동등하게 경험적으로 지지하는 경우에 각각의 증거가 주어졌을 때 해당 가설의 가능성도는 실수배의 관계에 있다.

한편 우리는 동일한 증거에 의존하는 서로 다른 가설들에 대한 가능성을 생각할 수 있는데, 그것은 다음의 가능성도 원리 2로 정의된다.

- 가능성도 원리 2: 두 가설 H_1 과 H_2 에 대해 증거 E 가 제공하는 가능성이 상수적으로 비례하면 그 자료는 해당 가설들을 동등하게 경험적으로 지지한다. 즉 $L(H_1, E) = kL(H_2, E)$ 이면 E 는 H_1 과 H_2 를 동등하게 경험적으로 지지한다.⁹⁾

두 가지 가능성도 원리 중에서 일반적으로 논의되는 것은 가능성도 원리 1이다. 가능성도 원리 1은 피셔(Fisher)와 같은 베이즈주의 비판가들에 의해 개발되었지만 그 개념은 이제 가능성도주의자들뿐만 아니라 베이즈주의의 중요한 개념이 되었다. 한편 메이요를 비롯한 대다수의 고전통계학의 지지자들은 가능성도 원리1을 인정하지 않는다. 여기에는 중요한 개념상의 혼란이 개입되어 있다. 즉 일부 베이즈주의 비판가들은 베이즈 정리가 가능성도 원리 1을 함축한다고 주장한다.¹⁰⁾ 그러나 그들의 주장과는 달리

8) 가능성도 원리 1의 증명. $P(E|H_i) = kP(E^*|H_i)$ 라고 가정하면, $P(H|E) = P(H)P(E|H) / \sum P(H_i)P(E|H_i) = P(H)kP(E^*|H) / \sum P(H_i)kP(E^*|H_i) = kP(H)P(E^*|H) / k\sum P(H_i)P(E^*|H_i) = P(H)P(E^*|H) / \sum P(H_i)P(E^*|H_i)$. $P(H|E^*)P(H|E) = P(H|E^*)$ 이면, E 와 E^* 은 H 를 동등하게 경험적으로 지지한다고 정의하자. 이 경우 $P(E|H_i) = kP(E^*|H_i)$ 이면, E 와 E^* 은 H 를 동일하게 경험적으로 지지한다.

9) 가능성도 원리 2의 증명. 베이즈 정리로부터 $P(H_1|E) = P(H_1)P(E|H_1) / P(E)$, $P(H_2|E) = P(H_2)P(E|H_2) / P(E)$. $P(E|H_1) = kP(E|H_2)$ 라고 가정하면, $P(H_1|E) = P(H_1)kP(E|H_2) / P(E)P(H_2|E) = P(H_2)P(E|H_2) / P(E)$. 위의 두 식에서 $P(H_1)P(H_2)$ 이면 $P(H_1|E) = P(H_2|E)$. 즉 사전확률 $P(H_1)$ 와 $P(H_2)$ 의 차이는 H_1 과 H_2 에 대한 E 의 경험적 지지도에 차이를 낳지 않는다. 그러므로 $P(E|H_1) = kP(E|H_2)$ 이면, E 는 H_1 과 H_2 를 동등하게 경험적으로 지지한다.

가능도 원리는 증거에 관한 원리이지만 베이즈 정리는 증거에 대해 어떤 주장도 하지 않는 중립적인 확률계산법이다. 더구나 각주에서 제시된 증명에서 나타나듯이 베이즈 정리로부터 가능도 원리를 도출하기 위해서는 추가적 가정들이 필요하기 때문에 그러한 주장은 성립하지 않는다.

가능도 원리 1의 중요한 한 가지 따름 정리는 1절에서 논의되었듯이 실험의 특정 측면에 대한 정보는 증거에 대한 통계적 분석에 부적합하다는 것이다. 증거의 수집, 즉 표집 과정의 정지를 규정하는 정지규칙은 통계적 추리를 분석하는데 부적합하다. 우리는 이로부터 다음의 따름 정리를 유도할 수 있다.¹¹⁾

- 따름 정리: 정지규칙은 통계적 추리를 분석하는데 부적합하다.

이러한 따름 정리는, 앞에서 지적되었듯이 고전통계학의 유의성 분석은 정지규칙에 의해서 영향을 받는 유의수준을 통하여 증거를 판정하기 때문에, 베이즈 통계학이 고전통계학보다 더 우월하다는 주장의 근거로 인용되기도 한다.¹²⁾

3. 수정 베이즈주의

지금까지의 논의를 통하여 우리는 베이즈주의자들이 정지규칙을 거부하는 중요한 논거를 검토했다. 이러한 논의로부터 우리는 베이즈주의가 고전통계학에 비하여 통계적 추리에 대한 보다 더 적절한 이론이라는 결

10) D. Mayo(1996), p. 345, A. Backe(1999), R. Royall(2001).

11) (따름 정리의 비형식적 증명). 본문에서 나타나듯이 시행을 20회로 고정하는 정지규칙과 순차적으로 검정의 경우에 정지규칙은 20회의 시행으로 실험이 종료한 경우에 가능도는 동일하다. 한편 가능도 원리에 따르면 가능도가 동일한 경우 경험적 지지도는 동일하다. 그러므로 두 정지규칙은 경험적 지지도가 동일하므로 통계적 추리를 분석하는데 부적합하다.

12) W. Edwards, H. Lindman, L. Savage(1963), p. 193.

론을 내일 수 있을까? 아직은 그렇다고 말할 수 없다. 베이즈주의자들이 그 질문에 긍정적으로 대답할 수 있기 위해서는 정지규칙의 적합성에 대한 비판이외에 별도의 독립적인 논변이 필요하다. 베이즈주의자들은 정지규칙을 부정함으로써 그 규칙이 갖는다고 주장되는 장점들, 예를 들어 표본 크기, 실험 절차와 관련된 요소들을 고려할 필요가 없게 되었다. 이로부터 베이즈주의의 이론적 단순성이 강화될 수는 있겠지만 베이즈주의가 그러한 요소들을 전혀 고려할 필요가 없다는 주장은 성립하지 않는다. 베이즈주의 관점에서 정지규칙이 부적합하다면, 고전통계학에서 그것이 수행하는 역할, 즉 실험으로부터 유래하는 증거를 가설에 연관시키는 역할을 담당하는 어떤 다른 규칙이나 방법이 있어야 하지 않겠는가? 이러한 우리의 의구심이 근거가 있다면 베이즈주의자들은 그들의 이론이 실험적 증거를 적절히 분석할 수 있는 방식으로 수정하거나 확장할 필요가 있다.

2절에서 우리는 베이즈주의자들이 정지규칙을 거부하는 것은 가능도 원리를 수용하는 것과 밀접히 관련되어 있다는 점을 보았다. 대부분의 고전통계학의 지지자들은 가능도의 원리를 채택하지 않는다. 우리는 이로부터 베이즈주의와 고전통계학을 구분하는 중요한 기준은 정지규칙과 가능도 원리의 수용 여부라고 말할 수 있다. 그 결과 우리는 [표 3]에 제시된 것처럼 그러한 기준을 이용하여 두 이론의 차이를 정리할 수 있다.

입장	정지규칙	가능도 원리
베이즈주의	거부	수용
고전통계학	수용	거부

[표 3] 베이즈주의와 고전통계학의 차이점

이제 우리의 관심은 베이즈주의가 가설을 평가하는데 있어서 실험과 관련된 경험적 요소를 충분히 적절히 반영할 수 있는 방식으

로 수정될 수 있는 방식이다. 확장된 베이즈주의는 표준적 베이즈주의의 이론 체계를 유지하면서 위에서 지적된 방식에 필요한 새로운 요소를 도입하는 입장이라고 정의하자. 증거 E와 가설 H의 관계를 설명하는데 있어서 표준적 베이즈주의의 핵심 요소는 다음과 같다.

- 베이즈 정리: $P(H|E) = P(H)P(E|H) / \sum P(H_i)P(E|H_i)$
- 엄격한 조건화 규칙: $P_{\text{new}}(H) = P_{\text{old}}(H|E)$ ¹³⁾
- 표준적 입증 측도: $C(H,E) = P(H|E) - P(H|E)$ ¹⁴⁾

반면에 수정된 베이즈주의는 위의 요소 중 적어도 한 가지를 중요한 방식으로, 어떤 경우에는 베이즈적이 아닌 방식으로, 수정하는 입장이라고 하자. 여기서 검토되는 방식으로 베이즈주의를 확장하거나 수정하는 방식으로서 가장 먼저 예상되는 것은 베이즈주의의 핵심 요소를 유지하면서 새로운 요소를 도입하여 경험적 측면을 보다 더 적절하게 설명할 수 있도록 베이즈주의 이론 체계를 확장하는 것이다. 두 번째 방식은 매우 과격한 수정을 통하여 원래의 입장과 정반대로 정지규칙을 수용하면서 가능성도 원리를 거부하는 것이다. 세 번째 방식은 정지규칙과 가능성도 원리를 모두 수용하는 것이고, 네 번째 방식은 양자를 모두 거부하는 것이다. 그 결과 다음의 [표 4]에서 나타나듯이 네 가지의 가능한 방식이 성립한다.

13) 베이즈주의에는 불확실한 상황에서의 조건화를 다루는 제프리 조건화 규칙도 있다.

14) $C(H,E) > 0$ 이면 E를 H를 입증한다. $C(H,E) < 0$ 이면 E를 H를 반입증한다. $C(H,E) = 0$ 이면 E는 H에 대해 중립적이다.

방식	정지규칙	가능도 원리
확장	거부	수용
수정	수용	거부
수정	수용	수용
수정	거부	거부

[표 4] 가능한 베이즈주의 형태

물론 위의 방식들이 이론적으로 모두 가능하지는 않을 것이다. 특히 위에서 제시된 방식들 중 세 번째 와 네 번째 방식은 거의 불가능할 것 같다. 만약 정지규칙과 가능도 원리를 동시에 수용하는 이론이 등장한다면 우리는 그것을 더 이상 베이즈주의라고 보기 어렵기 때문이다. 마찬가지로 그 두 가지를 모두 거부하는 방식은 베이즈주의자들이 경험적 요소를 분석할 수 있는 거의 유일한 요소(가능도 원리 1과 2)를 폐기하는 것에 해당하므로 채택될 가능성의 희박하다. (그러나 네 번째 방식은 세 번째 방식보다는 실현 가능성이 더 높을 것이다.) 따라서 실현 가능성이 높은 첫 번째 확장 방식과 두 번째 수정 방식에 우리의 논의의 초점을 맞추기로 한다.¹⁵⁾

먼저 스틸(Steel)이 제안한 수정된 베이즈주의를 검토해보자.¹⁶⁾ 스틸은 우선 실험에서 유래한 증거 E가 가설 H를 경험적으로 지지하는 정도를 표준적인 베이즈적 입증 측도 $C(H,E)$ 로 표현한 다음, 그러한 베이즈적 입증 측도를 이용하여 다음과 같이 베이즈적 가능도 원리를 정의한다.¹⁷⁾

- 가능도 원리 1*: $P(E|H_i) = kP(E^*|H_i)$ 이면, $C(H_i,E) = C(H_i,E^*)$ 이다.

15) 고전통계학의 경우도 본문에서 검토된 것에 대응하는 방식의 수정 또는 확장이 가능할 것이다. 예를 들어 베이오의 입장은 확장된 고전통계학에 해당한다. 두 번째 수정 방식은 (내가 아는 한) 제안된 적이 없다.

16) D. Steel(2003, 2005).

17) Ibid., p. 4, p.5.

- 가능도 원리 2*: $P(E|H_1) = kP(E|H_2)$ 이면, $C(H_1, E) = C(H_2, E)$ 이다.

스틸이 제시한 두 가지 가능도 원리는 원래의 가능도 원리에서 나타난 가능도 개념 $L(H, E)$ 를 $P(E|H)$ 로 대체하고 “동등하게 경험적으로 지지한다”는 부분을 베이즈적 입증 측도 $C(H, E)$ 로 표현한다는 점에서 베이즈적 버전이다.

2절에서 지적되었듯이 우리는 두 가지 가능도 원리를 베이즈 정리로부터 직접 유도할 수는 없다. 이와 관련하여 스틸은 베이즈주의의 핵심 요소를 수용하는 것이 가능도 원리에 대한 특정한 입장을 취할 것을 요구하지 않는다고 지적하면서,¹⁸⁾ 표준적인 베이즈적 입증 측도 이외에 또 다른 베이즈적 입증 측도들이 가능하다고 지적한다. 그에 따르면, 현재까지 제안된 표준적인 베이즈적 입증 측도는 다음과 같다.¹⁹⁾

- 차이 측도 $d(H, E) = P(H|E) - P(H)$
- 로그 측도 $r(H, E) = \log[P(H|E) / P(H)]$
- 로그 가능도 측도 $l(H, E) = \log[P(E|H) - P(E|H^*)]$

한편 스틸은 표준적이 아닌 베이즈적 입증 측도의 예로서 다음의 세 가지를 제시한다.²⁰⁾

- $\rho(H, E) = P(H \& E) - P(H)P(E)$
- $n(H, E) = P(E|H) - P(E|H^*)$
- $m(H, E) = P(E|H) - P(E)$

18) D. Steel(2003), p. 217.

19) 차이 측도는 E. Eells(1982)와 R. Jeffrey(1992), 로그 측도는 P. Horwich(1982)와 P. Milne(1996), 로그 가능도 측도는 B. Fitelson(1999) 참조

20) D. Steel(2003), p. 218. ρ 측도의 한 버전은 R. Carnap(1962, 360), n 측도는 R. Nozick(1981, 252), m 측도는 H. Mortimer(1999, 11절) 참조

스틸이 예시한 ρ , n , m 측도들은 모두 베이즈적 입증 측도이다. 예를 들어, ρ 측도의 경우를 살펴보자.

$P(H|E) > P(H)$ 이면 $P(H\&E) > P(H)P(E)$ 이다.

$P(H|E) < P(H)$ 이면 $P(H\&E) < P(H)P(E)$ 이다.

$P(H|E) = P(H)$ 이면, $P(H\&E) = P(H)P(E)$ 이다.

그러므로 ρ 측도는 베이즈적 입증 측도이다. (다른 경우도 마찬가지로 증명된다.) 그러나 위의 측도들은 가능도가 같더라도 동등한 경험적 지지의 결과를 낳지 않는다. 스틸은 이러한 특징, 즉 베이즈적 측도이지만 가능도의 원리 1*를 따르지 않는 특징을 갖는 측도를 k 측도라고 부른다. 그는 k 측도를 다음과 같이 정의한다.²¹⁾

• μ 는 k 측도이라는 것은 (a) μ 가 베이즈적 입증 측도이고, (b) $P(E|H) = kP(E^*|H)$ 이면, $\mu(H,E) = k\mu(H,E^*)$ 라는 것을 의미한다.²²⁾

우리의 논의에서 중요한 것은 k 측도들은 가능도 원리 1*를 위반한다는 것이다. 그러므로 표준적인 d , r , l 측도가 아니라 표준적이 아닌 ρ , n , m 측도를 지지하는 베이즈주의자들은 베이즈주의의 기본 요소를 유지하면서도 가능도 원리를 거부할 수 있다. 그러므로 그들은 정지규칙은 실험적 결과가 제공하는 증거력에 부적합하다고 주장할 수 없다.

한편 스틸은 베이즈주의자들은 가능도 원리 1*를 수용할 수 있지만 가능도 원리 2*는 두 가설이 상호 배타적일 경우에만 수용할 수 있다고 주

21) D. Steel(2003), P. 219.

22) (b의 증명). $P(E|H_i) = kP(E^*|H_i)$ 라고 가정하면, $P(E) = \sum P(H_i)P(E|H_i) = \sum P(H_i)kP(E^*|H_i) = k\sum P(H_i)P(E^*|H_i) = kP(E^*)$. H 를 임의의 가설이라고 하면, $\rho(H, E) = P(H \& E) - P(H)P(E) = P(H)P(E|H) - P(H)P(E) = P(H)kP(E^*|H) - P(H)kP(E^*) = k[P(H)P(E^*|H) - P(H)P(E^*)] = k[P(H\&E^*) - P(H)P(E^*)] = k\rho(H, E^*)$. 그러므로 만약 $P(E|H) = kP(E^*|H)$, $\rho(H, E) = k\rho(H, E^*)$.

장한다.²³⁾ 스틸이 이처럼 가능도 원리 2*에 제한을 두는 이유는 가설들이 상호 배타적일 경우에 가능도 원리 2*에 대해 제기되는 강력한 비판들을 사전에 방어할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 연합문제(tacking problem)를 살펴보자.²⁴⁾ 연합문제는 다음과 같은 상황에서 발생한다. $H_1 \rightarrow E$, $H_2 = H_1 \& S$ (S 는 H_1 에 전적으로 무관한 명제이다)라고 하면 $P(E|H_1) = P(E|H_2)$ 이 성립한다. 그러나 우리는 가능도 원리 2*와 달리 E 는 H_2 보다 H_1 을 더 입증한다고 생각한다. 즉 $C(H_1, E) > C(H_2, E)$. 여기서 스틸은 H_1 과 H_2 가 상호 배타적이면 연합문제는 발생하지 않는다고 주장한다. 그러므로 베이즈주의자들은 $C(H_1, E) > C(H_2, E)$ 를 수용하면서도 가능도 원리 2*를 수용할 수 있다. 그러나 스틸의 주장은 문제가 있다. 다음의 경우를 생각해보자. 항아리에 붉은 공 둘(R_1, R_2), 흰 공(W) 하나가 들어 있다고 가정하자. 우리는 공을 무작위로 추출한다. E : 꺼낸 공이 붉은 공이다. H_1 : 꺼낸 공이 R_1 이다. H_2 : 꺼낸 공이 R_2 이다. $P(E|R_1) = P(E|R_2)$ 이므로 가능도 원리 2*에 따르면 $C(R_1, E) = C(R_2, E)$ 이다. $C(R_1, E) = C(R_2, E)$ 이므로 $C(R_2, E) > C(R_2 \& S, E)$ 이다. 그런데 $P(E|R_1) = P(E|R_2) = 1$ 이므로 가능도 원리 2*에 따르면 $C(R_2, E) > C(R_2 \& S, E)$ 이다. 여기서 R_2 와 $R_2 \& S$ 는 상호 배타적이다. 그러므로 가설들이 상호배타적일 경우에만 가능도 원리 2*는 성립한다는 스틸의 주장은 잘못이다. 이상의 논의로부터 스틸은 베이즈주의들이 가능도 원리 1*를 부정하고 정지규칙을 수용할 수 있는 가능성을 제시하는데 성공했지만 가능도 원리 2*의 경우 성공하지 못했다는 점이 드러난다.

스틸이 제안하는 수정 베이즈주의의 핵심은 비표준적인 입증 측도를 채택함으로써 베이즈주의자들이 정지규칙을 수용할 수 있는 가능성을 제시한데 있다. 스틸의 수정안을 제대로 평가하기 위해서는 여기서 검토된 것보다 더 많은 논의가 필요하다. 특히 우리는 그가 제안한 k 측도가 과연 다른 베이즈적 입증 측도보다 입증 관계를 더 적절하게 표현하는가

23) D. Steel(2005), p. 18.

24) B. Fitelson(1999) 참조.

를 검토될 필요가 있다. 이러한 검토는 이 글의 주제를 벗어나지만 베이즈적 입증 측도에 관한 현재까지의 논의로부터 드러난 한 가지 분명한 점은 그동안 제안된 입증 측도들은 경험적 지지의 정도로서의 입증에 대해 약간씩 다른 초점을 두고 있다는 점이다. 우리는 표준적인 측도들과 k 측도들을 입증 개념에 대한 각기 다른 해명으로 보아야 한다. 스틸이 k 측도를 이용하여 가능도 원리 1*를 부정하는데 성공했지만 k 측도가 베이즈적으로 본질적인 측도가 아니라면 그가 제안한 수정 방식은 큰 의미가 없을 것이다.

4. 확장 베이즈주의

지금까지 우리는 정지규칙이 베이즈주의에 수용될 수 있는 방식을 스틸의 입장을 중심으로 검토해 보았다. 그러한 논의를 통하여 스틸의 수정된 베이즈주의는 가능도 원리 1*의 경우 이론적으로 성립될 수 있지만 가능도 원리 2*의 경우는 성공하지 못했다는 점이 드러났다.

이제 가능도 원리 1*를 중심으로 베이즈주의가 앞에서 제시된 개념에 따라 확장될 수 있는 방식을 검토해보자. 베이즈주의 비판자들은 전통적으로 베이즈적 입증 관계는 상대적 개념이 아니라고 지적해왔다. 즉 베이즈적 입증 개념은 가능도 원리 1*를 따르지 않는다는 것이다. 헬만(Hellman)은 가능도 원리 1*와 부합하는 상대적 입증 개념을 제안한다. 헬만은 우선 시험의 엄격성(severity of test)을 가능도를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

- H에 대해 E가 E*보다 상대적으로 더 엄격하다는 것은 $P(E|H \& K) < P(E^*|H \& K)$ 라는 것이다. (K는 배경지식이다.)²⁵⁾

25) G. Hellman(1997), p. 198.

위의 정의에 따르면, H가 거짓일 경우 H는 E*에 의한 시험에서 보다 E에 의한 시험을 통과할 확률이 더 낮다. 즉 가설이 거짓이면 시험을 통과할 확률이 적을수록 증거는 가설에 대해 보다 더 엄격하다.

베이즈적 관점에서 가설을 평가하는데 이용되는 핵심 요소는 입증이기 때문에 가설 평가는 엄격성 개념만으로는 설명될 수 없다. 따라서 헬만은 다음과 같이 위에서 제시된 엄격성 개념을 입증 개념에 연결시킨다.

- H에 조건적으로 E와 E*의 가능도가 비교 가능한 경우에 E가 E*보다 H를 더 입증한다는 것은 E가 E*보다 H에 대해 더 엄격하다는 것이다.²⁶⁾

베이즈주의에서 E가 H를 입증하는 경우는 $P(H|E\&K) > P(H|K)$ 이므로 우리는 위의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

- H에 조건적으로 E와 E*의 가능도가 비교 가능한 경우에, $P(H_1|E\&K) > P(H_1|E^*\&K)$ 는 $P(E|H_2\&K) < P(E^*|H_2\&K)$ 이다.²⁷⁾

헬만이 제안한 엄격성 개념은 두 가지 증거, E와 E*을 이용하여 베이즈적 입증 관계를 설명한다. 반면에 메이요가 제안한 엄격성 개념의 경우 시험 T가 H를 통과시키는 것은 H의 확률과 무관하다. 메이요의 경우 오류 확률은 가설 또는 증거에 대한 신념도가 아니라 그것들을 평가하는데 관련된 시험 장치 또는 절차가 갖는 물리적 성질, 즉 오류가 측정될 수 있는 성질이므로 T가 H를 통과시키는가를 판단하기 위해서는 T가 오류를 탐지하는 확률이 고려되어야 한다. 메이요는 다음과 같이 엄격성 기준을 제시한다.

26) Ibid., p. 198.

27) 논의의 편의상 우리는 여기서 H₁에 대한 경쟁 가설은 오직 하나뿐이라고 가정한다. 즉 H₂ = ¬H₁.

- H가 거짓인 경우 T가 H를 통과시키지 않을 매우 높은 확률이 있으면, T는 엄격하다.²⁸⁾

우리는 여기서 헬만의 경우 엄격성은 두 가지 증거에 의해 정의되기 때문에 상대적 개념이지만 메이요의 경우 엄격성이 오직 한 가지 증거에 대하여만 정의하기 때문에 그렇지 못하다는 점을 알 수 있다. 이러한 사실은 가설 평가에 대한 베이즈적 분석이 고전통계학의 분석을 능가할 수 있는 한 가지 장점에 해당한다. 우리는 다음과 같이 메이요의 엄격성 개념을 베이즈적 방식으로 재구성할 수 있다.

- E가 H_1 에 대해 엄격하다는 것은 $P(E|H_2) < k$ 라는 것이다. (여기서 k 는 0.5이하의 임의의 상수이다.)²⁹⁾

이러한 메이요의 정의를 위에서 주어진 헬만의 정의와 비교해보면 그 차이가 분명히 드러난다.

헬만이 제안한 확장 베이즈주의는 베이즈주의의 기본틀을 유지하면서 전통적으로 베이즈주의의 단점으로 간주되어 왔던 입증 개념의 비상대성을 극복할 수 있다. 그러나 헬만의 입장은 아직까지는 가능성도 원리 2*를 반영하지 못하고 있다. 이 점을 보완하기 위해서 우리는 다음과 같이 헬만의 입장을 확장할 수 있다.

- $P(H_1|E \& K) > P(H_1|E^* \& K)$ 라는 것은 $P(E|H_2 \& K) < P(E^*|H_2 \& K)$ 라는 것이다.

28) D. Mayo(1996). p. 181.

29) 메이요의 지지자들은 아마도 메이요의 엄격성 개념이 베이즈적으로 표현할 수 없다고 지적할 것이다. 메이요와 헬만의 이론 체계가 다르기 때문에, 특히 오류 확률과 사전확률의 차이 때문에 메이요의 엄격성 개념을 위와 같이 표현할 수 없다는 지적은 옳다. 위의 표현의 목적은 메이요의 엄격성 개념이 갖는 비상대적 특징을 베이즈적으로 나타내는데 있다.

위의 식에서 두 가지의 증거에 의한 두 가지 가설에 대한 입증 관계가 시험의 엄격성과 관련되므로 가능성도 원리 2*를 반영한다.³⁰⁾

많은 베이즈주의자들은 이 글에서 검토된 수정 또는 확장을 통한 베이즈주의를 수용하지 않을 것이다. 예를 들어 주관적 베이즈주의를 대표하는 하우슨의 경우가 여기에 속한다. 그러나 모든 베이즈주의자들이 주관적 베이즈주의를 따를 필요는 없을 것이다. 베이즈주의가 과학적 추리에 관한 이론 또는 과학 방법론으로서 효율적으로 작용하기 위해서는 베이즈주의자들은 베이즈주의의 기본틀을 유지하면서도 개인의 주관적 신념 체계와 경험적 증거를 연결할 수 있는 방법론적 요소를 도입해야 한다. 베이즈주의자들이 위의 교훈을 따르는 방식은 다양하게 나타날 수 있다. 예를 들어 그들은 사전확률의 부여에 대한 경험적 증거를 마련함으로써 베이즈주의를 자연화하거나(자연화된 베이즈주의), 실험 절차나 방법에 대한 방법론적 요소를 개발하여 베이즈주의를 보완하거나(실험적 베이즈주의)³¹⁾, 과학적 사례에 대한 단순한 논리적 재구성이 아니라 과학적 발견의 논리와 같은 경험적 요소를 개발하는 방식으로(경험적 베이즈주의) 베이즈주의를 수정하거나 확장할 수 있다. 이러한 새로운 유형의 베이즈주의들은 이론상 가능한 중요한 유형의 베이즈주의를 대표하지는 않지만 적어도 우리는 그것들을 통하여 베이즈주의자들이 실험이 차지하는 역할을 파악할 수 있는 방식을 이해할 수 있다. 여기서 또 한 가지 강조되어야 할 점은 베이즈주의자들이 그들의 이론을 수정하거나 확장한다고 해서 반드시 베이즈주의가 갖는 주관적 성격을 포기해야 할 필요는 없다는 점이다. 우리는 스틸과 헬만의 입장을 검토함으로써 그 점을 보았다. 수정

30) 위의 식이 베이즈주의의 다른 이론적 요소들과 갖는 관계에 대한 정밀한 분석이 필요하다. 예를 들어 위의 식은 그 요소들과 충돌할 수도 있다. 그러한 위험성에도 불구하고 본문에서 그 식이 검토된 이유는 베이즈주의가 가능성도 2*를 포함하는 방식으로 확장될 수 있는 방식에 대한 모색 때문이었다.

31) 실험적 베이즈주의는 이미 최근의 실험철학(philosophy of experiment), 특히 프랭크린(Franklin)에 의해 연구되고 있다. A. Franklin(1986, 1990),

과 확장 방식에 따라 나타나는 베이즈주의가 갖는 주관적 특징은 정도의 차이를 보일 것이다.

5. 결 론

우리의 논의는 베이즈주의자들이 정지규칙을 비판하는 이유로부터 시작했다. 논의의 전반부에서는 베이즈주의자들이 정지규칙을 거부하는 중요한 두 가지 논거가 검토되었다. 논의의 후반부에서는 베이즈주의가 실험과 관련된 경험적 측면을 현재보다 더 잘 분석할 수 있는 방식으로 수정(스틸의 이론)되거나 확장(헬만의 이론)될 수 있는 가능성이 모색되었다. 스틸이 제안한 수정 베이즈주의는 가능도 원리 1*를 부정하고 정지규칙을 도입하는데 성공했다. 반면에 헬만의 확장 베이즈주의는 두 가지의 가능도 원리를 수용할 수 있는 가능성을 갖고 있다. 이러한 확장은 메이요가 제시한 고전통계학의 엄격성 개념이 비상대적이라는 점을 감안하면 상당한 상대적 장점을 갖는다. 우리는 스틸과 헬만의 입장을 검토하면서 표준적인 베이즈주의는 가능도 원리 1*뿐만 아니라 가능도 원리 2*를 수용할 수 있는 방식으로 수정되거나 확장될 수 있다는 점을 보았다.

참고문헌

- Backe, A. (1999) "The likelihood principle and the reliability of experiments", *Philosophy of Science* 66: S354-S361.
- Carnap, R. (1962) *Logical foundations of probability*. Chicago: Chicago University Press.
- Edwards, A. (1992) *Likelihood*. expanded edition. Baltimore: John Hopkins University Press.
- Edwards, W., Lindman, H., and Savage, L. (1963) "Bayesian statistical inference for psychological research", *Psychological Review* 70: 193-242.
- Fitelson, B. (1999) "The plurality of Bayesian measures of confirmation and the problem of measure sensitivity", *Philosophy of Science* 66: s362-s378.
- Franklin, A. (1986) *The neglect of experiment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- _____. (1990) *Experiment, right or wrong?* Cambridge: Cambridge University Press.
- Hellman, G.(1997), "Bayes and beyond", *Philosophy of Science* 64: 191-221.
- Howson, C. and Urbach, P. (1993) *Scientific reasoning: The Bayesian approach*, 2nd edition. La Salle, IL: Open Court.
- Jeffrey, P. (1992) *Probability and the art of judgment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Milne, P.(1996) " $\log[p(h/eb)/p(h/b)]$ is the one true measure of confirmation", *Philosophy of Science* 63: 21-26.
- Mayo, D. (1996) *Error and the growth of experimental knowledge*. Chicago: University of Chicago Press.
- _____. (2000), "Experimental practice and an error statistical account

of evidence", *Philosophy of Science* 67: s193-207.

Mayo, D. and Kluse, M. (2001) "Principles of inference and their consequences", in D. Corfield and J. Williamson eds., 381-403.

Mortimer, H. (1981) *The logic of induction*. Prentice Hall: Paramus.

Nozick, R. (1981) *Philosophical explanation*. Cambridge: Harvard University Press.

Royall, R. (1997) *Statistical evidence: A likelihood paradigm*. London: Chapman & Hall.

Savage, L. (1962) *The foundation of statistical inference*, London: Methuen.

Steel, D. (2003) "A Bayesian way to make stopping rules matter", *Erkenntnis* 58: pp. 213-227.

_____. (2005) "Must a Bayesian accept the likelihood principle?" FEW 2005 homepage <http://http://socrates.berkeley.edu/~%7Efitelson/few/schedule.html>

The role of experiment in Bayesianism

Young-eui, Rhee

The aim of the paper is to analyze the stopping rule and the likelihood principle from a point of Bayesianism in order to explicate the role of experiment in Bayesianism. More specifically, I shall examine the reason for Bayesians to reject the rule, and then search for some way to incorporate empirical factors connected to the rule into Bayesianism. In this search we can understand a new method that Bayesians accommodate empirical evidence originated from experiments. First, I shall make a brief about the stopping rule, and then review Bayesian criticisms of it. Second, I shall examine the likelihood principle as Bayesians' principal reason for rejecting the stopping rule. Third, in order to search for the possibility that Bayesianism can well deal with experimental aspects I shall suggest two kinds of Bayesianism, the modified version of Bayesianism and the expanded version of Bayesianism; the former accepts the stopping rule by making some radical theoretical change, and the latter expands the standard Bayesianism by adding some new elements to its theoretical framework.

Key words: Bayesianism, classical statistics, stopping rule, likelihood principle, confirmation, Steel, Hellman, Savage

이영의 e-mail: rheeye@korea.ac.kr