인과적 마코프 조건과 비결정론적 세계

이영의(고려대)

【요약문】 베이즈망은 탐구 공간을 구성하는 변수들 사이에 성립하는 확률적 관계를 이용하여 그 변수들 사이에 성립된다고 가정되는 인과관계를 추론하는데 이용된다. 베이즈망에 관한 철학적 논쟁의 대상은 특정한 변수들의 확률적 독립성을 가정하는 인과적 마코프 조건이다. 베이즈망 이론에 대한 강력한 비판자인 카트라이트는 인과적 마코프 조건이 비결정적 세계에서는 성립될 수 없기 때문에 인과적 추리에 대한 타당한 원리가 될 수 없다고 주장한다. 이글의 목적은 인과적 마코프 조건이 인과적 추리에 대한 타당한 원리가 될 수 없다는 카트라이트의 비판이 타당한가를 검토하는 것이다. 나는 인과적 사건들의 연쇄를 허용하는 연속모델은 카트라이트의 비판을 벗어날 수 있다고 주장한다.

【주요어】 베이즈망, 인과적 마코프 조건, 공통원인의 원리, 연속모델, 비결정론적 세계

1. 서론

인과에 대한 확률적 접근에서 최근 활발하게 논의되는 것은 베이즈망(Bayesian network)이다. 베이즈망은 탐구 공간을 구성하는 변수들 사이에 성립하는 확률적 관계를 이용하여 변수들 사이에 성립된다고 가정되는 인과 관계를 추론하는데 이용된다. 베이즈망은 주로 인공지능과 인지심리학, 과학철학과 같은 분야에서 인과적 추리를 모의하거나 인과 구조를 파악하는데 성공적으로 활용되고 있는데, 그러한 성공과는 별도로 이론적 기초에 관한 찬반 논의는 계속

되고 있다. 베이즈망에 관한 철학적 논쟁의 대상은 특정한 변수들의 확률적 독립성을 가정하는 인과적 마코프 조건(causal Markov condition, 이하 CMC)이다. 베이즈망 이론에 대한 비판의 요지는 CMC는 타당하지 않은 가정이라는 것이다. 특히 카트라이트(Cartwright)는 CMC의 문제와 한계를 집중적으로 지적하고 있는데, 그녀의 비판의 요지는 CMC는 비결정적 세계에서는 성립될 수 없기 때문에 인과적 추리에 대한 타당한 원리가 될 수 없다는 것이다.

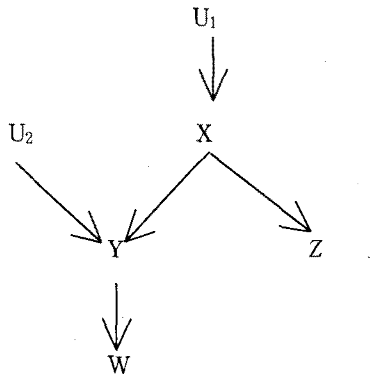
이글의 목적은 카트라이트의 결론, 즉 CMC가 인과적 추리에 대한 타당한 원리가 될 수 없는가를 검토하는 것이다. 논의 순서는 먼저 베이즈망을 구성하는 기본 요소를 살펴보고, 이어서 CMC를 검토한다. 2절에서는 카트라이트가 제시한 예를 통하여 그녀의 주장이 비판적으로 검토된다. 3절에서는 카트라이트의 비판을 벗어날 수 있는 가능성이 사건들의 연쇄를 도입하는 연속모델을 이용하여 검토된다. 이러한 논의를 통하여 CMC는 비결정론적 체계에도 적용될 수 있다는 점이 주장된다.

2. 베이즈망 이론

2.1 이론적 요소

인과적 추리를 구현하는 베이즈망을 구성하는 이론적 요소는 관련된 변수들의 집합 V로부터 출발한다. 집합 V의 구조는 다음과 같이 두 가지 방식으로 표현된다. 첫 번째 구조는 V에 대해 성립하는 방향 그래프이다. 방향 그래프는 변수를 나타내는 노드들과 그것들을 연결하는 화살표들의 집합이다. 변수 X로부터 변수 Y로 향하는 화살표가 있는 경우에 X는 Y의 부모변수(Parent)라고 한다. X로부터 중간 변수들을 거쳐서 Y로 가는 경로가 있는 경우에 X를 Y의 조상변수(Ancestor), 또는 Y는 X의 후손변수(Descent)라고 한다. 예를 들어 [그림 1]에서 X는 Y와 Z의 부모변수이다. 즉, X =

Parent(Y) = Parent(Z)이다. 또한 X는 W의 조상변수이고, W는 X의 후손변수이다. 즉 X = Ancestor(W)이고 W = Descent(X)이다. 방향 그래프에서 화살표들의 순환이 없을 때, 즉 어떠한 변수도 그 자신의 조상변수가 될 수 없을 때 그것은 비순환적(acyclic)이라고 불린다. 이러한 의미에서 [그림 1]에서 나타난 그래프는 비순환적 방향 그래프(directed acyclic graph)이다.



[그림 1]

두 번째 구조는 V에 대한 확률분포 Pr이다. 인과관계는 그래프 G 이외에 함수모델(functional model)에 의해서 표현될 수도 있다. [그림 1]에서 표현된 인과 관계는 함수모델에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$W=f(Y)$, $Y=f(X, U_2)$, $Z=f(X)$, $X=f(U_1)$ 1)

이러한 방식으로 그래프 G와 확률분포 Pr이 정의되면 베이즈망 이론가들이 해결해야 할 일차적 문제는 적절한 방식으로 확률을 인

---

1) U_1과 U_2는 부모변수를 갖지 않은 외생변수(exogenous variable)를 나타낸다.

과와 연결하는 것이다. 다시 말하면 그 문제는 V에 대해 정의된 G를 Pr과 적절하게 연결시키는 것이다. 이러한 작업을 위해서 베이즈망 이론가들은 인과와 확률의 관계를 일관적으로 규정할 수 있는 조건들을 제시하고 있는데, 그 중에서 가장 중요한 것은 인과적 마코프 조건(CMC)이다. CMC의 요지는 다음과 같다.

V에 속한 변수들 X와 Y에 대해서, X가 Y의 부모변수가 아니면 Pr(X | Y and Parents(X)) = Pr(X | Parents(X))이다.

위의 등식은 변수 X가 Parents(X)에 조건적으로 변수 Y에 확률적으로 독립적이라는 것을 표현한다. CMC가 의미하는 것은 X가 Y의 부모변수가 아닌 경우에 X는 자신의 모든 부모변수들에 조건적으로 Y와 확률적으로 독립적이다. 예를 들어, [그림 1]에서 Pr(Y | X and Z) = Pr(Y | X)이고 Pr(Y | X and W) ≠ Pr(Y | X)이면, X, Y, Z, W는 CMC를 충족한다. 이제 CMC는 다음과 같이 보다 더 구체적으로 표현된다.

X는 그 관계가 G에서 표현된 변수들의 집합 V의 임의의 원소이고, P는 X의 부모변수(Parents(X))에 해당하는 모든 변수들의 집합이다. 또한 Y는 V의 임의의 부분집합이며 Y의 원소인 어떠한 변수도 X의 직접적 또는 간접적 자손이 아니다. 이러한 경우에 X는 P에 조건적으로 Y에 독립적이다.[2)]

CMC에 따르면, 변수 X는 그것의 부모변수들의 집합에 조건적으로 그것의 후손변수들을 제외한 모든 다른 변수들로부터 독립적이다.

인과와 확률을 연결하는데 이용되는 두 번째 조건은 최소성 조건(minimality condition)이다. 최소성 조건에 따르면, G의 어떠한 하

2) C. Glymour(2001), p. 26; J. Pearl(2000), p. 30; D. Hausman and J. Woodward(1999), p. 522.

부 그래프도 Pr과 관련하여 CMC를 충족하지 않는다. 최소성 조건은 G의 변수들 사이에 보다 더 자세한 화살표들을 추가하더라도 확률적 독립성이나 조건부 독립성이 나타나지 않을 것을 규제한다. 마지막으로 충실성 조건(faithfulness condition)에 따르면 V에 속한 변수들 사이에서 성립하는 모든 종류의 확률적 독립성은 CMC에 의해서 함축된다. 일반적으로 Pr이 G에 적용된 CMC를 충족하더라도 그것은 CMC에 의해서 함축된 독립성 이외의 다른 종류의 독립성을 나타낼 수도 있다. 충실성조건은 그러한 가능성을 부정한다.[3] 베이즈망 이론가들은 이러한 세 가지 조건들이 충족되면 G에서 나타난 변수들에서 성립하는 확률 관계는 인과관계를 표현한다고 주장한다. 즉 세 가지 조건들이 충족되면 X가 Y의 부모변수라는 것은 X는 Y의 원인이라고 해석된다, 예를 들어 [그림 1]에서 X는 Y와 Z의 공통원인이고, Y는 W의 원인이다.

2.2 CMC와 공통원인의 원리

베이즈망에 대한 논쟁의 초점은 CMC이다.[4] 베이즈망 이론은 인과에 대한 확률적 접근에 속한다. CMC의 윤곽은 이미 확률적 인과 이론에서 등장했다. 인과에 대한 확률적 접근에서 나타나는 기본 아이디어는 "원인은 그 결과들이 발생할 확률을 증가시킨다"는 것이다. 이러한 확률적 인과 개념에 따르면, A가 B의 원인이라는 것은 $Pr(B \mid A) > Pr(B \mid \text{not-}A)$를 의미한다. $0< Pr(A) <1$인 경우에 위의 부등식으로부터 $Pr(B \mid A) > Pr(A)$와 $Pr(A \text{ and } B) > Pr(A) \times Pr(B)$가 유도된다. $Pr(A \text{ and } B) = Pr(A) \times Pr(B)$인 경우에 A와 B는 확률적으로 독립적이라고 정의되므로 인과적 확률 개념에 따르면 A가 B의 원인이라는 것은 A와 B는 확률적으로 독립적이라는 것을 의미한다. 그러나 원인이 결과들의 확률을 증가시킨다는

3) 최소성 조건과 충실성 조건에 대한 보다 자세한 설명은 P. Spirtes, C. Glymour, and R. Scheines(1993, pp. 29-31) 참조.

4) CMC의 타당성에 대한 논쟁은 N. Cartwright(1991a, 199b, 2002, 2003); C. Glymour(1999), D. Hausman and J. Woodward(1999) 참조.

생각에는 중요한 문제점이 있다. 허위 상관(spurious correlation)의 경우에 A와 B가 상관되어 있지만(또는 확률적으로 비독립적이지만), 그것들이 다른 변수 C에 의해서 야기되었다면, A가 B를 야기하지 않았는데도 불구하고 Pr(B | A) > Pr(B | not-A)가 성립될 수 있다. 예를 들어, 기압계의 눈금이 떨어지는 것(A)과 폭풍이 부는 것(B) 사이에는 상관관계가 성립되지만 A는 B의 원인이 될 수 없다. 이 경우에 진정한 원인은 기압이 급격히 하락하는 것(C)이다.

라이헨바하(Reichenbach)가 제시한 공통원인의 원리(Principle of common cause)는 허위 상관의 문제를 해결할 수 있다. 라이헨바하에 따르면, 사건 A가 사건 B의 상호 연관되었을 경우에 A가 B의 원인이든가, B가 A의 원인이든가, 아니면 A와 B는 공통원인 C를 갖는다. 라이헨바하가 제시한 공통원인의 원리는 다음과 같이 요약될 수 있다.

① 동시적 사건 A와 B에 대해서 Pr(A and B) > Pr(A)×Pr(B)인 경우에 A와 B의 공통원인 C가 존재한다. ② 동시적 사건 A와 B는 공통원인 C에 조건적으로 독립적이다. 그러므로 공통원인 C는 A와 B의 상호 연관을 차단한다(screen off). 즉 Pr(B | A and C) = Pr(B | C)이면, C는 A를 B로부터 차단한다.[5)]

Pr(A and C) > 0인 경우에 위의 등식으로부터 Pr(A and B | C) = Pr(A | C)×Pr(B | C)가 유도된다. 그러므로 공통원인 C에 조건적으로 A는 확률적으로 B로부터 독립적이게 된다. 위의 예에서 기압이 급격히 하락했다는 것에 조건적으로 기압계의 눈금이 떨어진다는 것은 폭풍이 분다는 것에 확률적으로 독립적이므로 전자는 후자의 원인이 될 수 없다.

CMC는 공통원인의 원리와 마찬가지로 공통원인 C에 조건적으로 A는 B에 확률적으로 독립적이라는 점을 함축한다. CMC에 따르면 공통원인 C는 A와 B사이의 상관을 차단한다. 그러나 공통원인이

---

5) H. Reichenbach(1956), pp. 158-159, p. 189.

나타나지 않은 경우에 CMC와 공통원인의 원리는 내용상 차이가 난다. [그림 1]에서 CMC는 다양한 상관을 차단한다. 예를 들어, Y는 X로부터 W를 차단하고 또한 Z로부터 W를 차단한다. 그러나 Y는 X와 W, Z와 W의 공통원인이 아니다. 이로부터 공통원인이 차단에 대한 필요조건이 될 수 없다는 점이 드러난다. 다른 한편으로 CMC에 따르면 W와 Z의 공통원인 X는 그것들의 부모변수가 아니므로 Z로부터 W를 차단하지 않는다. 그러므로 공통원인이 차단에 대한 충분조건이 될 수 없다. 종합하면 공통원인이 차단에 대한 필요충분조건이 될 수 없다. 이처럼 CMC는 공통원인의 원리의 부적합한 차단을 금지한다는 점에서 그것의 일반화에 해당한다.

앞에서 지적되었듯이 CMC가 도입된 기본 동기는 변수들 사이에 성립되는 인과 관계를 표현하는 G가 변수들의 가능한 값들을 결합적으로 할당하는 확률 공간에 대해 정의된 확률분포 Pr와 결합되는 방식을 제한하는데 있다. 그러나 CMC가 도입되는 필요성과 그것을 정당화하는 것은 별도의 문제이다. 이러한 문제와 관련하여 스퍼티스, 글리모어, 샤인니스(Spirtes, Glymour, and Scheines)는 CMC가 인과적 설명이 필요한 거시적인 자연체계와 사회체계에 적용될 수 있는 두 가지의 이유를 제시했다.[6]

① CMC는 구조적으로 사이비-비결정론적 체계들(pseudo-indeterministic systems)에[7] 대해서 필연적으로 참이다.

② CMC는 반복적 과정이 가능한 체계들과 근본적 성향들이 시험될 수 있는 체계들에 대해서 우리들이 경험한 모든 경우에 의해서 지지된다.

위에서 볼 수 있듯이 CMC를 도입하는 것이 정당화될 수 있는 이유는 CMC가 인과적 추리가 행해지는 모든 곳에서 항상 사용된다는 점이다. 자연과학자들이나 사회과학자들은 실험하거나 연구하

6) P. Spirtes, C. Glymour, and R. Scheines(2000), p. 38.

7) 사이비-비결정론적 체계는 외견상 비결정론적으로 보이지만 그 체계의 외생변수들이 모두 독립적으로 분포되어 있는 체계이다.

는 중에 항상 바람직하지 못하거나 예측하지 못한 통계적 의존성(또는 통계적 상관)에 직면한다. 스피티스 등이 우려하는 것은 인과적 설명의 맥락에서 과학자들이 CMC를 포기하면 변수들 사이에서 발생하는 통계적 의존성이 인과적으로 설명되지 못하고 그 결과 실험적 설계의 중요성이 무시되는 최악의 상황이다.

다른 한편으로 스피티스 등은 CMC가 결정론적 체계나 사이비-비결정론적 체계에서 잘 성립한다고 주장하고 있다. 그들은 CMC가 완전히 비결정론적 체계에 대해서 성립하는지의 여부에 대해서는 분명히 밝히지 않고 있다. 여기서 CMC의 적용 영역에 대한 문제가 제기된다. CMC가 비결정론적 체계에 적용될 수 있는가? CMC가 지금까지 결정론적 체계와 사이비-비결정론적 체계에 잘 적용되고 있기 때문에 비결정론적 체계에도 적용될 수 있다고 믿어야 하는가? 만약 CMC가 결정론적인 체계에 국한되어 성립한다면 그 중요성은 상당히 낮아지게 될 것이다.

3. 카트라이트의 비판

CMC에 대한 카트라이트의 비판은 세계에 보편적으로 적용될 수 있는 어떠한 원리도 없다는 믿음에 기반을 두고 있다. 카트라이트는 CMC가 두 가지의 조건을 포함한다고 분석한다. 첫 번째 조건은 시간을 넘어서 원인들이 결과들에 영향을 미치는 것을 방지하는 조건이고 또 다른 조건은 차단 조건(screening-off condition)이다. 카트라이트의 비판은 차단 조건을 중점적으로 겨냥하고 있는데, 그 요지는 CMC가 많은 종류의 결정론적 체계에 대해 적용될 수 있지만 일반적으로는 확률적으로 작용하는 원인들에 의해서는 충족될 수 없다는 것이다.

CMC에 대한 카트라이트의 비판을 구체적으로 검토하기 위해서 그녀가 제시한 예를 살펴보자. 어느 한 도시에 위치하고 있는 두 회사(A와 B)가 하수처리 공장에서 즉시 소비되는 화학물질 X를 생

산하기 위해서 경쟁하고 있다. 하수처리 공장은 어떤 날은 A회사의 제품을 사용하고 또 어떤 날은 B회사의 제품을 사용한다. B회사가 X를 생산하는 비용은 A회사에 비하여 매우 낮다. 또한 B회사는 X를 생산하기 위해서 확률적 과정을 사용한다. B회사가 특정한 날에 X를 얻을 확률은 80%이다. 그러므로 그 도시가 X를 B회사로부터 구입하는 경우 그날의 하수의 20% 정도가 처리되지 못한다. 더구나 그 도시가 B회사로부터 X를 구입하기를 꺼려하는 또 다른 이유가 있는데 그것은 B회사가 X를 생산될 때마다 부산물로서 오염물질 Y를 배출한다는 점이다. 이러한 상황에서 B회사는 그 도시가 A회사로부터 X를 구입하기로 결정한 점에 대해서 항의한다. B회사의 주장에 따르면 오염물질 Y가 산출되는 것은 하수처리 공장이 화학물질 X를 사용하기 때문이지 B회사 때문은 아니다.[8)]

카트라이트는 이러한 예에서 B회사의 주장은 차단 조건에 의존하고 있다고 주장한다. 만약 B회사가 X와 Y의 공통원인이라면, 차단 조건에 따라서 B회사가 선택되었다는 사실에 조건적으로 X는 Y로부터 독립적이게 된다. 그 결과 다음의 등식이 성립한다.

$$\Pr(X \text{ and } Y \mid B) = \Pr(X \mid B) \times \Pr(Y \mid B)$$

그런데 B회사는 X의 원인은 될 수 있지만 Y의 원인은 될 수 없다. 왜냐하면 다음이 성립하기 때문이다.

$$\Pr(X \text{ and } Y \mid B) = 0.8 \neq 0.8 \times 0.8 = \Pr(X \mid B) \times \Pr(Y \mid B)$$

따라서 B는 X와 Y의 공통원인이 될 수 없으며, X와 Y는 상호 연관되어 있다. 이로부터 B회사는 Y에 대한 무죄를 주장한다. 카트라이트가 이 예를 통하여 주장하는 것은 차단 조건이 요구하는 조건부 독립성이 성립되지 않지만 분명히 B회사는 Y의 원인이라는 점이다. 카트라이트는 CMC의 차단 조건이 실패한 이유를 B회

---

8) N. Cartwright(1999a), pp. 108-109.

사의 생산 과정이 확률적이라는 점에서 찾는다. 우리는 확률적인 과정에서 원인이 이미 발생했다는 점을 알더라도 그 결과가 나타났는가의 여부를 알 수 없다. 위의 예에서 부산물 Y의 존재에 대한 정보는 그것이 우리에게 부분적으로 주어진 경우에 원인이 실제로 촉발되었는가의 여부를 말해주기 때문에 적절하다. 카트라이트는 이로부터 원인들이 확률적으로 작용하는 경우에 CMC의 차단 조건은 타당하지 못하며, 그 결과 CMC와 같이 차단 조건에 의존하는 인과적 추리에 대한 방법들은 보편적으로 적용될 없는 한계를 갖게 된다고 주장한다.

카트라이트의 비판에 따르면, CMC는 인과적 추리에서 특수한 사례들에 적용될 수는 있지만 일반적 원리는 될 수 없다. 카트라이트는 CMC가 일반적 원리가 될 수 없는 또 다른 이유를 제시한다.[9)] 두 가자 값(+, -)을 갖는 결과 X, Y를 낳는 공통원인 C를 고려해보자. 이 경우에 다음과 같이 네 가지의 사건들로 구성되는 사건공간이 성립한다.

+X+Y, -X+Y, +X-Y, -X-Y

만약 인과가 완전히 확률적으로 작용한다면, C가 발생하면 위의 사건공간에 대해 다음의 결합 확률(joint probability)이 성립할 것이다.

Pr(+X+Y), Pr(-X+Y), Pr(+X-Y), Pr(-X-Y)

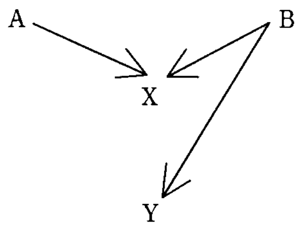
그러나 카트라이트는 인과성 또는 확률적 인과와 관련된 어떤 개념도 확률공간이 어떠한 방식으로 분할될 것인가를 제한하지 않는다고 지적한다. 그녀에 따르면 CMC의 차단 조건은 오직 다음의 특수한 사례에만 충족된다.

$$Pr(+X+Y) \times Pr(-X-Y) = Pr(+X-Y) \times Pr(-X-Y)$$

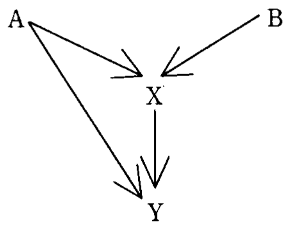
9) Ibid., p. 109.

즉 차단 조건은 $Pr(X \text{ and } Y) = Pr(X) \times Pr(Y)$인 경우에만 성립한다. 위의 등식은 CMC가 규제하는 독립성을 표현한다. 따라서 CMC는 X와 Y의 독립성이 충족되지 않은 수많은 경우들에는 적용될 수 없다. 카트라이트는 위의 등식이 성립되지 않은 것은 인과가 확률적으로 작동하기 때문이라고 생각한다. 인과가 확률적으로 작동하는 대표적 체계는 양자역학의 세계이다. 카트라이트는 결과적으로 CMC는 양자 상태에서는 충족될 수 없다고 지적한다.

카트라이트는 이러한 비판을 제기한 후에 위에서 제시된 하수처리공장의 예에 대한 올바른 인과적 구조는 다음에 제시된 [그림 2-1]과와 방정식 (1)-(3)에 의해서 표현될 수 있다고 주장한다.[10]



[그림 2-1]



[그림 2-2]

(1) $Y = f(B, U_1)$
(2) $X = f(A, B, U_2)$
(3) $U_1 = f(U_2)$

이러한 비판에 대해서 글리모어는 다음과 같이 대답한다.[11] ① 카트라이트의 예는 일관성을 잃고 있다. B회사가 주장하듯이 오염

10) N. Cartwright(1999b), pp. 23-25. 나는 여기서 카트라이트의 표기법을 따르지 않고 표준적인 함수모델의 표기법을 이용했다. 위의 예에 대한 확률분포는 다음과 같다. $Pr(U1 = -1 \mid B)=0.2$; $Pr(U1 = -1 \mid \sim B)=0$; $Pr(A \mid B) = 0$; $Pr(U2 = -1 \mid B)=0.2$; $Pr(U2 = -1 \mid \sim B)=0$; A, B, Y = (1, 0); (U1,U2) =(-1, 0); X=(0, 1, 2); $\sim B \equiv D = 0$.

11) C. Glymour(1999), pp. 71-73.

물질 Y가 산출되는 것이 하수처리공장이 화학물질 X를 사용한 것이라면 그 회사의 설명에서 가정되고 있는 CMC에 의하여 Y는 어떤 회사가 X를 생산하는가에 독립적이어야 하지만 그러한 독립성은 카트라이트의 예에서 처음부터 무시되고 있다. ② 카트라이트는 현실적으로 불가능한 인위적인 예를 통하여 CMC를 비판하고 있다. 그러한 주장을 하는 회사는 이 세계에 존재하지 않는다. 카트라이트가 제시하는 예는 상상에서만 존재할 뿐이다. 만약 그러한 전략이 허용되면 우리는 어떤 이론이라도 반박할 수 있다. ③ 인과나 확률적 인과에 등장하는 어떤 개념도 자연의 진행 방식을 제한하지 못한다는 카트라이트의 비판은 부적절하다. 그러한 논증이 성립한다면 광속, 정지질량, 속도, 가속도와 같은 개념을 사용하는 이론, 예를 들어 특별상태성이론은 타당하지 않다는 불합리한 결론이 뒤따른다. ④ 카트라이트는 인과 개념에 무엇이 있고 무엇이 없는가를 알고 있는 것처럼 주장한다. 글리모어는 그것은 철학적 문제가 아니라 경험적 문제라고 생각한다. 그는 어린이들이 CMC를 필요로 하는 인과성에 대한 암묵적 이해를 갖고 태어난다고 주장한다.[12)]

글리모어가 제시한 답변은 대체로 일반적이지만 첫 번째 답변은 우리의 관심을 끌 수 있는 구체적인 요소를 포함하고 있다. 글리모어가 주장하는 것은 카트라이트는 CMC에 의한 독립성을 무시하면서 그것의 타당성을 부정한다는 것이다. 위의 예에서 CMC는 Y가 B로부터 독립적일 것을 제한한다. 물론 이러한 독립성은 반직관적이지만(그렇기 때문에 상상에서만 존재한다), 만약 B회사의 주장처럼 B가 Y의 원인이 아니라면 어떤 인과적 구조가 가능한가? 카트라이트는 B회사의 주장에서 가정되는 인과적 구조는 [그림 2-2]에서 표현된 구조라고 주장한다.[13)] [그림 2-2]에서 B는 X의 직접적 원인(부모변수)이지만 Y의 간접적 원인(조상변수)이다. 그러나 B회사는 어떤 의미로 해석하든 A회사가 Y의 직접적 원인이라고 주장하지는 않았다. B회사는 Y의 원인은 B가 아니라 "하수처리공장에

12) 이러한 주장에 대한 발달심리학에서 유래한 증거들은 C. Glymour(2001), pp. 7-17 참조.

13) N. Cartwright(199b), p. 24.

서 X를 사용하는 것"이라고 주장했다. 다시 말하면 Y의 원인은 그 도시가 X의 구입처를 A회사 또는 B회사로 결정한 것이다. 만약 A 회사가 선택되면 Y는 확실히 산출되지 않을 것이고, B 회사가 선택되면 Y는 4/5 이하의 비율로 Y를 산출할 것이다. 즉 $Pr(Y \mid A)=0$, $Pr(Y \mid B) \leq 0.8$. 그러므로 B회사의 주장을 반영하는 인과 구조는 "그 도시가 A 회사를 선택했다", "그 도시가 B 회사를 선택했다"에 해당하는 숨겨진 변수들을 포함할 것이다. 더구나 B회사가 선택되더라도 4/5의 비율로 X가 산출되므로 B와 X, B와 Y를 연결하는 화살표는 [그림 2-2]와 같지 않을 것이다.

카트라이트의 비판에서 나타나는 또 다른 문제점은 X와 Y의 공통원인이 충분히 상세하게 규정되지 않았다는 점이다.[14] 그녀의 설명에 따르면 X와 Y의 유일한 공통원인은 B이지만 앞에서 논의되었듯이 B 이외에 또 다른 공통원인이 존재할 수 있다. 이 경우에 또 다른 공통원인은 부모변수이거나 조상변수일 것이다. 이러한 변수들이 생략되었거나 숨겨진 변수이고 그것들이 발견되어 추가되면, B회사가 주장하듯이 CMC에 의하여 B와 Y는 그러한 변수에 조건적으로 독립적일 수 있다. 이상의 논의로부터 우리는 카트라이트가 제기한 비판이 갖는 의의는 CMC에 대한 하나의 구체적인 예를 제시했다는데 있는 것이 아니라 비록 구체적이지는 않지만 그것을 통하여 CMC의 적용 영역에 제한을 부여했다는 점에 있음을 알 수 있다. 이상으로부터 카트라이트는 CMC가 확률적 인과가 작용하는 비결정론적 세계에서는 성립되지 않는다고 비판한다. 따라서 베이즈망 이론가들은 카트라이트의 도전에 적절히 대응하는 한 가지 방식은 어떻게 CMC가 비결정론적 체계에 적용될 수 있는가를 제시하는 것이다. 글리모어는 이와 관련하여 CMC는 결정론적 체계나 사이비-비결정론적 체계에 적용되고 성공적이라고 주장하였을 뿐 비결정론적 체계에 대해서는 언급하지 않았다는 점에서 카트라이트의 비판에 대해서 적절히 대응하지 못했다.

14) 이러한 문제점은 D. Hausman and J. Woodward(1999), pp. 560-564; C. Glymour(1999), pp. 72-73에서 지적되었다.

4. 연속모델

베이즈망 이론가들이 카트라이트의 비판에 대응하는 적절한 방식은 무엇인가? 앞 절에서 지적되었듯이 카트라이트의 비판의 요점을 고려했을 때 그들은 CMC가 비결정론적 인과 구조를 갖는 체계에서 성립한다는 점을 보여주어야 한다. 그들은 카트라이트의 주장과는 달리 CMC가 양자의 세계와 같이 확률적 인과가 작용하는 세계에서 성립한다는 것을 보여주어야 한다. 이러한 전략은 CMC가 적용되는 영역을 결정론적 체계와 사이비-비결정론적 체계로부터 비결정론적 체계로 확장한다는 점에서 그것의 적용 범위를 확대한다.[15]

CMC가 확률적인 인과구조를 갖는 체계에 적용될 수 있는가를 검토하기 위해서 3절에서 검토된 카트라이트의 예와 동일한 인과구조를 갖는 양자 체계를 고려해 보자. t_0에서 라듐(radium) 원자는 붕괴하여 t_1에서 라돈(radon) 원자로 변환되고 알파(α) 입자를 방출한다.[16] C, X, Y를 각각 시간 t_0에서의 라듐 원자의 존재, 시간 t_1에서의 라돈 원자의 존재, t_1에서의 알파 입자의 존재라고 하자. (라듐 원자의 붕괴에 다른 원인이 없고, 그 과정은 전적으로 비결정적이라고 가정하자.) 라듐 원자의 붕괴 과정은 [그림 3]에 표현되어 있다.

$$\begin{tikzcd}
 & C(t_0) \arrow[dl] \arrow[dr] & \\
X(t_1) & & Y(t_1)
\end{tikzcd}$$

[그림 3]

15) CMC의 적용 범위를 확대하는 전략은 D. Hausman and J. Woodward(1999), I. Martel(2002) 등이 채택하고 있다.

16) 이 예는 D. Hausman and J. Woodward (1999, p. 551)가 제시하였다.

위의 예에서 라듐 원자가 붕괴할 확률이 0.5라고 가정하자. 즉 Pr(X | C) = Pr(Y | C) = 0.5. 라듐 원자가 붕괴했다는 사실(C)이 주어지면 라돈 원자의 존재(X)는 알파 입자의 존재(Y)의 원인이 될 수 없고, 그 역도 마찬가지이다. 그러므로 CMC에 의하여 Pr(X and Y | C)=Pr(X | C) × Pr(Y | C) = 0.25. 그러나 t_1에서 알파 입자가 존재한다는 것이 발견되면 라듐 원자는 반드시 붕괴했었을 것이고 t_1에서 라돈 원자가 확실히 존재할 것이다. 따라서 Pr(X and Y | C) = 1 ≠ 0.25 = Pr(X | C) × Pr(Y | C). Pr(X and Y | C) > Pr(X | C) × Pr(Y | C)이므로 X와 Y는 C에 조건적으로 독립적이지 않고 상호 연관되어 있다. X와 Y의 공통원인 C는 그것들의 상호 연관을 차단하지 못했다. 이러한 결과는 CMC에 위배되며, 3절에서 검토된 카트라이트의 예에서 나오는 결론과 동일하다.

카트라이트가 제시한 하수처리공장의 예와 라듐 붕괴의 예에서 공통원인은 그것의 결과들 사이의 상호 연관을 차단하지 못했다. 이러한 실패에 대해서 CMC의 지지자들은 가정된 공통원인은 진정한 공통원인이 아니라고 지적한다. 그렇다면 공통원인의 결과들의 상호 연관을 차단하는 가정된 공통원인이 아닌 또 다른 원인이 존재할 것이다. 이러한 생각을 일반화하면 공통원인 C와 그것의 결과 X와 Y를 연결하는 연속적인 인과 과정이 있다는 결론에 이르게 된다. C로부터 X와 Y에 이르는 두 가지의 인과 과정에 속하는 개별 변수들을 각각 P_X와 P_Y라고 하자. 이제 라듐 원지의 붕괴에 대한 적절한 인과 구조는 [그림 3]이 아니라 [그림 4]가 될 것이다. 새롭게 구성된 G에 따르면 X와 Y의 원인은 공통원인 C가 아니라 P_X와 P_Y이다. CMC에 따르면 C는 X를 Y로부터 차단하지 않지만 P_X는 X를 Y로부터 차단한다. 마찬가지로 P_Y는 Y로부터 X를 차단한다. 즉 Pr(X | Y and P_X) = Pr(X | P_X), Pr(Y | X and P_Y) = Pr(Y | P_Y). 그 결과 C가 X와 Y의 연관을 차단하지 못한다는 사실은 CMC에 대한 비판이 될 수 없다.

$$
\begin{tikzcd}
& C(t_0) \arrow[dl] \arrow[dr] & \\
P_X(t_{1/2}) \arrow[d] & & P_Y(t_{1/2}) \arrow[d] \\
X(t_1) & & Y(t_1)
\end{tikzcd}
$$

[그림 4]

이러한 설명에 따르면, 라듐 원자가 붕괴되었다는 사건이 발생하면, 라돈 원자가 라듐 원자의 붕괴에 의해서 생겨났다는 사실은 더 이상 t_1에서 라돈 원자를 발견할 확률에 적합하지 않다. 이러한 상황에서 적합한 것은 t_0과 t_1사이에서 라돈 원자가 붕괴할 확률이다. 동일한 이유로, t_1에서 알파 입자의 존재는 더 이상 t_1에서 라돈 원자를 발견할 확률에 적합하지 않다.

앞에서 제시된 설명은 연속모델(continuous model)에 의한 것이다.[17] 연속모델에 따르면 V에 속하는 변수 X_1과 X_2를 연결하는 무한한 변수들의 연쇄가 있다. 그 결과 변수들의 연쇄에서 나타나는 모든 변수들의 쌍 $\langle X_1, X_2\rangle$에 대해서 $\langle X_1\ X_i, X_2\rangle$가 성립한다($2 < i$). 연속모델에서는 하나의 사건에 선행하는 특정한 사건을 규정할 수 없기 때문에 부모변수라는 개념이 성립되지 않고 그 결과 개개의 사건은 무한한 조상변수들의 연쇄만을 갖게 된다. 이 때문에 2절에서 제시된 표준적인 CMC는 다른 형태로 수정되어야 한다. 마르텔(Martel)이 제안한 수정된 CMC은 다음과 같다.

비순환적이고 비결정론적 인과 체계에 대해서 다음을 만족하는 변수들의 집합 V가 존재한다. V에 속하는 모든 변수 X와 Y에 대

17) 연속모델에 대한 구체적인 논의는 R. Neaplitan(2004) 참조.

해서, 만약 X가 Y의 원인이 아니면 Ancestors(X)∈Cause(X)이고 Pr(X | Y and Ancestors(X)) = Pr(X | Ancestors(X))인 변수들의 집합 Ancestors(X)가 존재한다.[18]

원래의 CMC는 부모변수에 조건적으로 변수들의 상관을 차단하지만 수정된 CMC는 조상변수에 조건적으로 상관을 차단한다.

카트라이트는 연속모델을 예견하고 다음과 같은 비판을 제시한다.[19] ① 이러한 모델이 채택되면 V가 CMC를 충족하지 않은 경우에 항상 그것에 대해서 CMC가 충족되는 또 다른 보다 정교한 그래프에 원래의 G를 삽입할 수 있다. CMC가 충족되지 않은 반례가 발생하면 항상 새로운 사건을 삽입함으로써 그 반례를 벗어날 수 있으며, 그러한 "반례 피하기"는 원리상 무한히 반복될 수 있다. ② 연속모델은 특정한 시간과 공간에서 발생하는 개별 사건들에 대한 주장과 사건들의 유형들 사이에 성립하는 인과 관계에 대한 일반적 주장을 혼동하고 있다. 개별 사건들을 연결하는 연속적 과정이 있다는 주장과 CMC에서 표현되는 것처럼 원인 유형과 결과 유형 사이의 관계를 표현하는 인과 법칙은 구별되어야 한다. 그러므로 모든 개별 사건들을 그것과 인접한 사건에 연결하는 과정이 있다는 것으로부터 G에서 표현되는 원인과 결과들 사이에 항상 화살표를 추가할 수 있다는 것을 주장할 수 없다. 인과에 대한 카트라이트는 기본 입장은 "확률은 원인에 대한 안내자가 될 수 있지만, ... 그것은 질병에 대한 징후와 같다. 징후로부터 병에 이르는 일반적 형식은 없다"[20]. 이러한 입장에 따르면 연속모델에서 가정되는 무한한 인과적 연결이 발견되지 않을 것이므로 그것을 형식화할 수 없고 연속모델은 불가능하다는 결론이 뒤따르게 된다. 인과 사건들을 연결하는 규칙성이 없다는 주장은 인과의 본질에 대한 특정한 형이상

18) I. Martel(2002), p. 11.

19) N. Cartwright(1999), pp. 115 -116, (2001), pp. 256-257.

20) N. Cartwright(2001), p. 243.

학적 입장을 표현한다. 연속모델의 지지자들은 그러한 형이상학적 입장을 거부함으로써 카트라이트의 비판에 쉽게 대처할 수 있다. 그러나 그 입장을 수용하더라도 연속모델의 지지자들이 발견하고자 하는 대상이 카트라이트가 말하는 바로 그 대상과 정확히 일치한다는 보장은 없다.21)

카트라이트의 비판에 대한 형이상학적 대응책은 이 글의 관심사는 아니므로 구체적인 측면에서 그녀의 비판을 검토해보자. 우선 "G에서 표현되는 원인과 결과들 사이에 항상 화살표를 추가할 수 있다"는 구절은 직접적으로 최소성 조건을 부정한다. 최소성 조건에 따르면, G의 변수들 사이에 보다 더 자세한 화살표들을 추가하더라도 확률적 독립성이나 조건부 독립성이 나타나지 않는다. 여기서 중요한 점은 G에 새로운 화살표를 추가하는 것이 가능한가에 있는 것이 아니라 새로운 화살표를 추가하더라도 원래의 G에서 구현되고 있는 독립성이 유지되어야 한다는데 있다. 이점을 고려하면 카트라이트의 비판은 "G에서 구현된 독립성을 유지하면서 새로운 화살표를 추가하는 것이 불가능하다"는 것으로 재표현될 수 있다. 이러한 표현이 옳다면 그것은 과학적 탐구, 특히 과학적 실험을 통한 새로운 사실의 발견을 부정한다. 과학자들은 잘 통제된 실험을 통하여 G에서 구현된 독립성을 유지하면서 변수들 사이의 새로운 인과 관계를 발견할 수 있다. 우리는 이 지점에서 연속모델의 지지자들이 실험의 역할을 강조하는 이유를 이해할 수 있다. 예를 들어 워즈워드(Woodward, 2003)는 실험을 통한 개입을 통하여 P_X와 P_Y와 같은 새로운 변수들을 발견할 수 있다고 주장한다. 카트라이트는 과학적 지식의 성장의 가능성과 새로운 발견의 가능성을 혼동하고 있는 것 같다. 예를 들어, 과학자들이 라듐 붕괴에 대한 적절한 인과 구조로서 [그림 3]으로부터 [그림 4]로 이행했다고 가정하자. 연속모델과 CMC를 비롯한 조건들은 그러한 가능성을 부정하지 않

21) 카트라이트는 인과에 대한 법칙들을 근본법칙, 인과법칙, 확률법칙으로 구분한다. 본문에서 "규칙성"은 근본법칙의 수준에서 부정된다. N. Cartwright(1989).

는다. 그러한 이행에서 전자에서 유지된 독립성은 후자에서 유지되지 않는다. 부정되는 것은 두 가지의 그림이 모두 동일한 주제에 대한 인과구조를 표현한다는 것이다. 즉 두 그림은 동시에 라듐 원자의 붕괴에 대한 참인 인과 구조를 표현하지 않는다. 카트라이트는 아마도 [그림 3]과 [그림 4]는 쿤(Kuhn)이 말한 과학혁명기에서의 경쟁 가설로서 간주할 수도 있다. 그러나 연속모델이 과학혁명기에 적용되어야 한다고 주장하는 것은 분명히 지나친 요구에 해당한다.

5. 결론

우리는 지금까지 CMC가 인과 구조에 대한 올바른 가정이 될 수 없다는 카트라이트의 비판을 중심으로 CMC의 타당성을 검토했다. 카트라이트는 CMC가 비결정론적으로 인과가 작용하는 경우에 성립될 수 없다고 주장했다. 그러나 CMC는 연속모델을 통하여 양자세계와 같은 비결정론적 세계에 적용될 수 있다는 점이 드러났다. CMC의 본질은 인과관계에 있지 않은 변수들을 확률적 독립성을 이용하여 파악하는데 있다. 연속모델이 베이즈망 이론을 대표하는 것은 아니지만 앞에서 논의되었듯이 CMC가 인과적 추리를 위한 타당한 원리인가를 결정하는데 있어서 인과 구조가 결정론적인가 아니면 비결정론적인가라는 기준은 직접적으로 관련되지 않는다.

참고문헌

Cartwright, N. (1989) *Nature's Capacities and their Measurements.* Oxford: Clarendon Press.

______. (1999a) *The dappled world.* Cambridge: Cambridge University Press.

______. (1999b) "Causal diversity and the Markov condition", *Synthese* 121: 3-27
______. (2001) "What is wrong with Bayes Nets?" *The Monist* 84: 242-264.
______. (2002) "Against modularity, the causal markov condition, and the any link between the two: Comments on Hausman and Woodward", *British Journal for the Philosophy of Science* 53: 411-413.
Corfield, D. and Williamson, J. eds. (2001) *Foundations of Bayesianism*. Dordrecht: Kluwer.
Gillies, D. A. (1996) *Artificial intelligence and scientific method.* Oxford: Oxford University Press.
______. (1998) "Debates on Bayesianism and the theory of Bayesian networks", *Theoria* 64: 1-22.
Glymour, C. (1999) "Rabbit hunting", Synthese 121: 55-78.
______. (2001) *Minds arrow: Bayes net and graphical causal models in psychology*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
Glymour, C., R. Scheines, P. Spirtes and K. Kelly (1987) *Discovering causal structure: Artificial Intelligence, philosophy of science, and statistical modelling*, New York: Academic Press.
Hausman, D. and Woodward, J. (1999) "Independence, invariance and the causal Markov condition", *British Journal for the Philosophy of Science* 50: 521-583.
Martel, I. (2002) "The principle of the common cause, the causal Markov condition, and quantum mechanics: Comments on Cartwright", in *Nancy Cartwright's Philosophy of Science: An International Workshop*. University of Konstanz. Unpublished.

Neapolitan, R. E. (2004) *Learning Bayesian networks.* Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall

Pearl, J, (2000) *Causality: Models, reasoning, and inference.* Cambridge: Cambridge University Press.

Reichenbach, H. (1956) *The direction of time.* Berkeley: University of California Press.

Spirtes, P. Glymour, C., and Scheines, R. (2000) *Causation, prediction, and search.* 2nd edition. Cambridge, MA: MIT Press.

Woodward, J. (2003) *Making things happen: A theory of causal explanation.* Oxford: Oxford University Press.

[Abstract] Bayesian networks have been used in studying and simulating causal inferences by using the probability function distributed over the variables consisting of inquiry space. The focus of the debates concerning Bayesian networks is the causal Markov condition that constrains the probabilistic independence between all the variables which are not in the causal relations. Cartwright, a strong critic about the Bayesian network theory, argues that the causal Markov condition cannot hold in indeterministic systems, so it cannot be a valid principle for causal inferences. The purpose of the paper is to explore whether her argument on the causal Markov condition is valid. Mainly, I shall argue that it is possible for upholders of the causal Markov condition to respond properly the criticism of Cartwright through the continuous causal model that permits the infinite sequence of causal events.

[Key words] Bayesian network, causal Markov condition, Principle of common cause, continuous causal model, indeterministic system.