

Substantialism and Relationism in the 4 Dimensional Interpretation of Newtonian Space-Time

뉴턴 시공간의 4차원 해석에서의 실체론과 관계론 간의 논쟁

YANG Kyoung-Eun 양경은

The ontological status of Newtonian space-time has been debated under the name of substantialism-relationism controversy. The debates between the two parties are concerned with the nature of existence of space-time. Substantialism maintains that the points of space-time have existence analogous to material substance. Relationism claims that space-time should be understood as the framework of possible spatio-temporal relations between bodies. Newtonian space is considered as a three dimensional entity in accordance with our geometric common sense. Yet given that the concept of motion is defined as the change of position throughout time, it is possible to interpret space-time as a 4 dimensional entity. In this essay, substantialist-relationist debate is considered within the context of non-relativistic 4 dimensional space-time theory. This essay attempts to clarify the dispute over the ontology of space-time by elucidating the relationship between the ontology of space-time, motion, and space-time symmetry.

Keywords: Time, Space, Space-Time, Substantialism, Relationism; 시간, 공간, 시공간, 실체론, 관계론

MSC: 01A5 ZDM: A30

1 서론

본 논문은 뉴턴 시공간(Newtonian space-time)의 4차원 해석에 대한 실체론(substantialism)과 관계론(relationism) 간의 논쟁을 고찰한다. 공간의 본질에 대한 논쟁은 존재론적 위상에 대한 것으로 실체론과 관계론의 두 축을 중심으로 진행된다 [7, 18]. 뉴턴과 뉴턴주의자들로 대표되는 실체론은 공간이 물체와 같이 그 자체적으로 존재하는 실

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (NRF-2013S1A5A8026239)

YANG Kyoung-Eun; Korea National Univ. of Edu. E-mail: newtleib@gmail.com

Received on Mar. 20, 2017, revised on Apr. 21, 2017, accepted on Apr. 26, 2017.

체(substance)임을 주장한다. 뉴턴은 공간을 연장(extension)이라는 명확한 개념으로서 이해하고 있다 [13, 17]. 즉 공간의 길이, 폭, 그리고 깊이라는 균일하고 무한한 연장성만으로 이 존재자의 성향과 특성을 추상화하고 있다. 그리고 공간은 부분들로 이루어지며, 이 세계에서 모든 물체가 제거된 것은 상상할 수 있지만 공간 자체가 제거된 것은 상상할 수 없다는 점에서 공간을 실체로 이해하고 있다. 요컨대 공간이라는 존재자는 이 세계를 구성하는 물체와는 구분되지만, 연장성을 가지고 있다는 점에서는 물체와 유사한 존재적 위상을 가진 실체로 이해되고 있다. 반면, 관계론자들의 주장의 핵심은 실체론의 부정이다. 라이프니츠(Leibniz)로 대표되는 관계론은 공간의 독립적인 실체성을 부정하고 공간은 물질들 사이의 관계로 환원될 수 있다고 주장한다 [1]. 관계론에 의하면 공간 또는 위치한 동일한 시간에 놓인 물체들 간의 관계이며 공간에 대해 그 이상의 다른 속성을 부여할 수 없다.

공간에 대한 실체론에서 공간은 실체에 대한 일상적인 기하학적 직관에 비추어 3차원적인 존재로 이해된다. 따라서 뉴턴의 고전역학은 3차원의 공간과 1차원의 시간 속에서 사건을 정의한다. 하지만 텔러(Teller)가 주장하듯이, 물체의 운동은 시간에 걸쳐 일어나는 물체의 공간 상의 위치변화이므로 시간과 공간 개념이 모두 요구되는 4차원적인 개념이다 [19]. 따라서 아인슈타인의 특수상대론을 고려하지 않은 고전역학의 문맥에서도 운동과 관계되는 시공간 개념을 4차원적으로 해석하는 것은 자연스러운 결과이다.

시간과 독립된 3차원 공간과 공간과 독립된 1차원 시간 해석은 시공간에 대한 4차원 해석에 비해 장점과 단점을 모두 가지고 있다. 공간에 대한 3차원 실체론 해석의 장점은 직관적 관점 및 역학이론의 관점에서 제시할 수 있다. 우리의 기하학적인 직관은 물체를 3차원적으로 인지하며 물체와의 유비(類比)를 통해 공간의 존재 역시 3차원적인 실체로 해석한다. 또한 뉴턴의 절대공간(absolute space)을 3차원 실체로 해석하는 것은 절대운동(absolute motion)을 설명하기 위해 필요한 존재론적인 상정이다 [7]. 형이상학적 측면에서 공간에 대한 3차원 실체 해석의 핵심은 시간의 흐름과는 독립적으로 공간의 부분이 동일성을 유지한다는 점이다 [13]. 뉴턴역학에서는 그 부분의 동일성(identity)을 유지하는 실체공간을 상정함으로써 관성운동이나 가속운동 같은 동역학(dynamics)적인 개념을 실체공간 또는 절대공간에 대한 위치와 속도 등 운동학(kinematics)적 개념으로 정의할 수 있다 [15]. 공간에 대한 뉴턴의 3차원 실체론적 해석은 그 형이상학적 측면에도 불구하고 궁극적으로는 그의 역학을 정당화하기 위한 것이다.

이러한 장점에도 불구하고 공간을 3차원 실체로 해석하는 것은 간과하기 힘든 문제점을 가지고 있다. 뉴턴의 공간에 대한 실체론적 해석에 대해 라이프니츠(Leibniz)의 비판이 지적하듯이 이 해석은 절대속도라는 고전역학에서의 여분의 개념을 받아들여야 한다는 문제가 있다. 라이프니츠에 의하면, 공간에 대한 실체해석을 받아들일 경우 공간 안의 물체들

간의 관계는 유지하면서 등속도로 운동하는 공간은 정지한 공간과는 경험적으로는 식별 불가능하다 [1]. 여기서 문제의 핵심은 실제공간에 근거한 절대위치와 절대속도의 개념은 뉴턴역학에서 이론적으로도 경험적으로도 어떠한 역할도 하지 못한다는 것이다. 뉴턴은 관성운동과 가속도운동 같은 동역학적 개념을 의미있게 하기 위해 3차원 실제공간을 바탕으로 한 운동학(kinematics)적 개념을 도입한다. 하지만 라이프니츠의 비판은 공간의 3차원 실제성이 뉴턴역학 운동학의 진정한 기초인지에 대해 의문을 제기한다.

위 문제점을 해결하기 위해 뉴턴역학의 기초로 4차원 시공간 모형을 도입하면 절대속도 없이 절대가속도를 정의할 수 있다 [7]. 하지만 뉴턴 시공간에 대한 4차원 해석은 3차원 공간에 대한 명확한 기하학적 직관에 반한다는 문제가 있다. 더 나아가 4차원 시공간에 대한 실체론과 관계론을 어떻게 정의하느냐의 문제도 대두된다. 본 논문에서는 뉴턴 시공간에 대한 4차원 해석에서도 실체론과 관계론의 해석이 정의될 수 있음을 보이고 이 경우 실체론과 관계론의 장단점을 논의한다.

2 고전역학 시공간의 분류

이어만(Earman)은 17세기 당시에는 발명되지 않았던 현대 미분기하학의 개념을 사용하여 여러가지 고전역학의 시공간을 분류한다 [7]. 물론 이러한 엄밀한 개념을 사용함으로써, 뉴턴과 라이프니츠의 논변들에서는 가능하지 않았던 개념의 정확함과 추론의 용이함을 추구할 수 있다. 하지만, 이어만은 현대 미분기하학의 새로운 용어를 사용함으로써 17세기 논쟁의 원래취지에서 벗어날 수 있는 위험성도 환기시킨다. 이러한 문제는 시공간에 대한 개념이 뉴턴과 라이프니츠와 같은 당시 최고의 자연철학자들에게도 얼마나 어려운 난제였는지를 반영한다. 본 절에서는 고전역학의 기하학적 기초를 이루는 4차원 시공간의 모형인 네오 뉴턴 시공간을 라이프니츠 시공간, 뉴턴 시공간과 그 구조를 대조함으로써 소개할 것이다.

고전적인 시공간 모형은 모두 4차원의 실수(R^4) 위상(topology)을 가진 시공간에서 정의된 점들의 집합으로 구성되는데, 이들 기하학적인 점들은 시공간에서 일어나는 물리적 사건을 나타낸다. 이 점들 간에 어떠한 추가적인 구조를 부여하느냐에 따라 고전적 시공간 모형을 분류할 수 있다 [7]. 고전적인 시공간 중에 가장 단순한 구조를 가진 것은 라이프니츠 시공간(Leibnizian space-time, LST)이다. LST 모형은 4차원의 실수 위상을 가진 시공간에서의 사건들 간에 절대적 동시성(absolute simultaneity) 구조를 부여한다. 이 구조는 LST에서 임의의 두 사건들의 쌍을 선택할 경우 이들이 동시에 일어나는 사건들의 집합을 표상하는 동시 공간면(hyperplane of simultaneity) 위에 위치해 있는지 아닌지를 결정할 수 있다. 그리고 LST안의 임의의 두 사건 사이에는 시간계량(temporal metric) 구조가 갖추어져 절대 시간함수를 정의할 수 있다. 이와 더불어 동일한 동시 공간면 위에

놓인 사건들끼리는 이들 사이의 거리를 측정하는 공간계량(spatial metric) 구조를 갖는다. 하지만 시간의 경과 후 사건들 사이의 동일성을 부여하는 구조가 없으므로 다른 동시공간면 위에 놓인 사건들 사이에는 공간적 거리를 정의할 수 없다. 따라서 LST에서는 절대위치, 절대속도, 절대가속도 모두 의미가 없다. 하지만 두 물체들 사이의 거리 그리고 상대속도가 시간이 경과함에 따라 얼마나 빠르게 변하는지를 정의하는 것은 가능하므로 LST는 관계론을 구현하는 시공간의 모형이라고 할 수 있다 [7].

사건들을 직선으로 연결하는 세계선(worldline)을 정의하는 특정한 아핀구조(affine structure) ${}^*\Gamma$ 를 LST에 추가적으로 부여하면 네오 뉴턴 시공간(Neo-Newtonian space-time, NNST)을 구성할 수 있다 [7, 18]. NNST에서 질량 m 인 물체에 대한 뉴턴의 제 2 법칙은 외력 F^i 에 대해 $m[d^2x_i/dt^2 + {}^*\Gamma_{jk}^i(dx_j/dt)(dx_k/dt)] = F^i$ 으로 기술된다. 여기서 외부에서 힘이 작용하지 않을 경우 즉, $F^i = 0$ 인 경우, 평평한 시공간을 기술하는 아핀구조 ${}^*\Gamma_{jk}^i = 0$ 인 광역적인 관성계를 정의할 수 있다. 즉, LST와는 차별적으로 NNST에서는 직선을 정의하는 아핀구조를 통해 직선인 세계선에서 벗어난 물체의 궤적이 가지는 곡률을 측정함으로써, 절대가속도를 정의할 수 있다. LST에서와 동일하게 NNST에서도 모든 사건들 사이의 시간 간격을 유일하게 결정할 수 있으며, 특정 좌표계를 기준으로 두 사건 사이의 상대속도도 결정할 수 있다. 그러나 NNST에서는 다른 동시면 위의 점들 간의 시간경과에 따른 동일성, 즉 ‘통시간적 동일성(transtemporal identity)’ 구조를 부여할 수 없으므로 특정 물체의 절대속도는 정의할 수 없다.

뉴턴 시공간(Newtonian space-time, NST)은 동시공간면 위에 있지 않은 사건들 사이의 통시간적 동일성 구조를 NNST에 추가적으로 부여함으로써 구성될 수 있다. 이와 같이 통시간적 동일성 구조를 부여함으로써 뉴턴 법칙이 만족하는 유일한 관성계, 즉 절대공간을 정의할 수 있다. 이 구조를 통해 NST에서는 동시공간면 위에 있지 않은 점들 사이의 거리가 정의 가능하며, 따라서 특정 물체의 절대속도와 절대가속도 모두 정의 가능하다 [12]. 특히 절대속도를 정의하는 것이 가능하게 된 것은 절대공간을 선택함으로써 NNST이 만족하는 갈릴레오 대칭성이 깨진 결과이다. 그리고 NST의 수학적 모델이 본 논문과 연관되어 흥미로운 점은 이 시공간 모델에 절대공간을 정의하기 위해서 (+, +, +, -) 기호를 가지는 비 퇴화적인 계량텐서(non-degenerate metric tensor) \hat{g}^{ij} 를 도입해야 한다는 점이다. 여기서 \hat{g}^{ij} 는 특수상대론의 민코프스키 메트릭의 선조가 된다는 점에서 4차원 시공간 메트릭을 기초로 한 뉴턴 시공간과 민코프스키 시공간 간의 연속성을 잘 보여준다 [7].

뉴턴 시공간의 절대공간에 특정한 한 점을 세계의 중심으로 선택함으로써 아리스토텔레스 시공간(Aristotelian space-time, AST)을 정의할 수 있다 [7]. AST에서는 세계에 존재하는 모든 입자와 세계의 중심 간의 거리를 정의할 수 있다. 이는 특정 동시공간면에서

물체의 세계선과 세계의 중심 간의 공간적 거리가 정의되어 있기 때문에 가능하다.

지금까지의 논의를 정리하자면, 시공간은 운동에 대한 정의를 가능하게 하는 기하학적 모형이다. LST는 관계론을 구현하는 시공간 모형으로써, 이 모형에서는 두 물체들 사이의 상대거리 그리고 상대속도가 시간이 경과함에 따라 얼마나 빠르게 변하는 지를 정의하는 것이 가능하다. 하지만 특정 물체의 절대속도와 절대가속도를 정의하는 것은 불가능하며 바로 이 점에서 뉴턴을 위시한 실체론자들의 비판 대상이 된다 [13].

뉴턴 시공간 이론의 발전과정은 경험과학으로서의 뉴턴역학의 개념적 기초가 정교해지는 과정으로 이해될 수 있다. 뉴턴이 『프린시피아』의 서론인 스킨리움(scholium)에서 운동을 ‘현상적 운동’과 ‘진정한 운동’으로 구분한다. 뉴턴에게 현상적 운동은 관찰자의 위치에 따라 다르게 보이는 관계적인 운동을 말하며, 진정한 운동은 절대공간에 대한 운동을 의미한다 [17]. 뉴턴의 의도는 현상적 운동과 구분된 진정한 운동을 기술하는 이론구조를 제공하는 것이다. 하지만 뉴턴의 절대공간은 경험적 하부구조(empirical substructure)의 지지를 받지 못하는 필요 이상의 이론구조들, 즉 ‘절대위치’와 ‘절대속도’를 포함하는 문제를 가지고 있다. 이러한 시공간구조와 동역학구조 간의 부조화는 이 두 구조를 특성화하는 대칭군(symmetry group)의 관점에서 이해할 수 있다. 시공간의 대칭성(space-time symmetry)은 특정 시공간의 좌표변환에 대해서 시공간의 기하학구조가 가지는 불변적인 구조인데 비해, 동역학적 대칭성(dynamical symmetry)은 특정 좌표변환에 대해서 동역학적 방정식의 형태가 가지는 불변적인 구조이다. 뉴턴역학의 경우 동역학적 대칭성은 갈릴레오 변환에 대해서 불변하는 군(group)의 구조를 가지고 있는데 비해, 시공간의 대칭성의 경우에는 갈릴레오군의 부분군에 해당하는 유클리드 회전군과 이동 변환군에 대해서 불변인 군의 구조를 가지고 있다. 이러한 시공간과 동역학 대칭성간의 차이점의 근원은 경험적으로 구분할 수 없는 절대위치와 절대속도라는 필요 이상의 구조를 시공간의 기하학적 구조에 부여함으로써 생기는 것이다.

이러한 개념적인 문제를 제거하기 위해 NNST는 관계론자들에게 여분의 존재로 비판 받아 왔던 절대속도 개념을 사용하지 않고 절대가속도를 정의할 수 있다. 따라서 NNST는 NST와는 경험적으로 동등(empirically equivalent)한 경험적 하부구조(empirical substructure)를 가지면서도 존재론적으로 필요없는 이론적 구조를 포함하지 않는다는 장점을 가지고 있다 [7, 21]. 시공간과 동역학의 대칭성 관점에서 본다면 NNST는 경험적 하부구조를 이루는 동역학적 구조에 대해 필요충분한 이론적 토대를 제공했다고 평가할 수 있다. NST와는 차별적인 NNST를 도입한 이유는 뉴턴이 갈릴레오 상대성 원리를 인지하고 있었으나, 18세기 당시 수학체계의 빈곤함이 갈릴레오 대칭성이 지정하는 필요 이상의 이론적 요소를 자신의 시공간 이론에서 제거시키는 것이 어려웠다는 점을 추측할 수 있다. 다음 절에서는 NNST를 중심으로 비상대론적인 시공간에 대한 4차원 해석의 문맥에서

관계론과 실체론을 구성해 보고자 한다.

3 비상대론적 4차원 역학에서의 관계론과 실체론의 정의

공간에 대한 3차원 실체론 해석은 물질과 공간 간의 유비를 통해서 이해할 수 있다. 3차원 공간을 구성하는 부분들은 3차원 물체와 동일하지는 않더라도 물체가 존재하듯이 존재하는 실체로 해석된다. 이에 비해 공간에 대한 3차원 관계론은 공간을 구성하는 부분이 가지는 동일성이라는 속성, 즉 통시간적 동일성을 부정함으로써 구성 가능하다. 여기에서 주의할 점은 관계론은 실체론과는 차별적으로 공간에 대해 어떤 속성도 부여하지 않으며 공간을 물체들 사이의 가능한 관계로 이해한다는 것이다 [4]. 공간에 대한 3차원 실체론 해석은 우리의 기하학적 직관과는 모순이 없는 자연스러운 해석이다. 하지만, 공간의 본질에 대한 논의는 형이상학적 그리고 기하학적 직관에 머무르지 않고 절대운동이란 물리현상을 설명해야 하는 역학이론과 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 공간 그리고 시간과 같은 이론적 개념들을 도입할 때는 이들이 관성운동과 가속운동이라는 절대운동에 대한 적절한 과학적 설명을 제공해야 한다. 뉴턴역학에서 가정된 3차원 절대공간과 1차원 절대시간은 관성운동과 가속운동 사이의 구분을 의미있게 할 수 있다는 점에서 그 설명력을 인정할 수 있다. 하지만, 절대공간과 절대시간을 도입하면 절대위치와 절대속도 또한 의미를 갖게 된다는 문제점을 가지고 있다(다음서 절에 논의). 역학이론의 관점에서 본다면, 운동은 시간에 걸쳐 일어나는 공간 상 물체의 위치변화이므로 시간 개념과 공간 개념 모두가 요구되는 4차원적인 개념이다. 따라서 아인슈타인의 상대론을 고려하지 않더라도 고전역학의 문맥에서 운동과 밀접한 연관관계를 가지는 1차원 시간과 3차원 공간을 통합하여 4차원 시공간이란 이론적 존재자로 해석하는 것이 가능하다 [19]. 이런 문맥에서 3차원 공간에 대한 실체론의 연장선에서 4차원 시공간이란 이론적 존재자에 대한 실체론적 해석을 시도할 수 있다. 관계론 또한 시공간에 대한 4차원 실체론을 부정함으로써 4차원 관계론을 주장할 수 있다.

하지만 이러한 접근방법은 4차원 실체와 관계를 우리의 기하학적인 직관으로 파악하기 힘들다는 문제가 있다. 공간에 대한 실체론의 정의는 물체와의 유비를 통해서 가능했었는데, 물체와 같은 실체적 존재는 3차원적인데 비해서 시공간은 4차원적인 존재이기 때문이다. 따라서 시공간의 존재론은 3차원 공간의 실체론과 관계론의 정의를 그대로 사용할 수 없다. 우리의 기하학적 직관에 위배되지 않으면서 4차원의 존재론을 3차원의 존재론과 일관되게 이해하기 위해서 실체론을 정의하기 위한 기준들을 고려해 보자.

프리드만(Friedman)과 필드(Field)는 시공간의 실체론은 시공간의 점 위에 물체들이 위치해 있는 지와는 상관없이 이 점을 양화(quantify)하는 것이 가능해야 한다고 주장한다 [10, 12]. 이들의 주장은 시공간이 존재한다는 주장을 시공간의 영역을 양화시킬 수 있다는

것과 동일시하고 있다. 이 기준은 다른 기준에 비해서 명확한 의미에서 존재론을 정의한다고 생각되지만, 추상적인 존재자에 대한 논쟁과 연관된 문제점을 가지고 있다.

어떤 영역을 양화할 수 있는냐는 형식언어(formal language)의 선택에 따라 완전히 상반된 결과를 낳는다. 그러나 과학의 용어는 그 언어의 내용과 관계없는 형식언어와는 차별적이며, 형식언어의 선택과는 독립적으로 그 존재를 언급할 수 있어야 한다. 필드는 '수(number)는 양화할 수 없지만 시공간의 점을 양화할 수 있는 형식언어'와 '시공간의 점은 양화할 수 없지만 수는 양화할 수 있는 형식언어' 사이의 양자택일을 할 수 있음을 보인다 [10]. 이와 같은 필드의 작업은 수의 존재에 대한 콰인(Quine)과 퍼트남(Putnam)의 플라톤주의에 대한 비판을 제공한다 [11]. 콰인과 퍼트남(QP)의 플라톤주의는 과학이론은 수학을 꼭 필요로 하기 때문에 그 이론에 사용된 추상적인 수학의 대상은 과학이론 안의 이론적 존재자와 동일한 존재론적 위상을 갖는다고 주장한다. 그러나 필드는 시공간의 점과 이를 표상하는 수학적 대상 둘 중 하나만을 양화시킬 수 있는 형식언어를 제시함으로써, 수에 대한 QP의 플라톤주의적 해석을 비판한다. 따라서 시공간 점에 대한 양화 가능성을 바탕으로 4차원 실체론과 관계론을 정의한다면, 추상적인 존재에 대한 논쟁에 빠지는 어려움에 직면한다.

이어만은 시공간의 실체론을 다음 같은 관계론의 부정으로 정의한다 [7]. 시공간의 관계론에 의하면 물체들 또는 사건들 사이의 관계는 직접적이라고 주장한다. 즉, 시공간에서의 관계는 사건이 일어나는 시공간 부분 간의 관계는 아니라는 것이다. 그리고 이런 입장에 대한 부정으로 실체론을 주장한다. 따라서 관계론은 실체론의 부정으로 정의하고 다시 실체론은 관계론의 부정으로 정의하는 이어만의 방법은 순환적인 듯이 보인다. 그러나 필자는 이어만의 정의가 악순환이라고 생각하지는 않는다. 왜냐하면 이어만은 3차원 공간의 문맥에서 정당하게 정의된 실체론에 대한 부정으로 관계론을 정의하고 이를 4차원의 문맥에 적용하여 다시 관계론의 부정으로 실체론을 정의하기 때문이다. 단 4차원 문맥에서 이어만의 방법이 성공하기 위해서는 4차원 시공간의 매질에 해당하는 실체를 이해해야 하는 작업이 완수되어야 한다. 이 작업은 3차원 실체의 본질은 유지하면서 4차원의 문맥으로 확장하는 것을 요구한다.

이어만의 위 직관을 구현하기 위하여 베로는 뉴턴역학의 기초를 이루는 4차원 시공간의 부분을 시간경과에 따라 그 동일성은 유지되지 않고 순식간에 변하는 존재로 상정한다 [4]. 실제적인 존재이지만 그 동일성은 유지되지 않는 시공간의 부분은 뉴턴역학과 특수상대론과의 비교를 통해서 이해할 수 있다. 4차원 시공간을 상정하는 특수상대론에서는 시공간에서의 거리를 측정하는 시공간 메트릭(spatio-temporal metric)은 관찰자의 운동상태와는 무관한 불변(invariant)하는 구조이지만, 시간적 거리(temporal distance)와 공간적 거리(spatial distance)는 관찰자의 운동상태에 따라 상대적으로 변한다 [16]. 이에 비해 뉴턴

시공간에서는 시간적 거리와 동시 공간면에서의 공간적 거리는 불변하지만, 시공간 메트릭, 즉 시공간 거리는 정의되어 있지 않다 [12]. 특정 공간의 메트릭이 다르면 그 공간에서의 거리, 각도 등 기하학적 속성은 달라진다. 따라서 뉴턴 시공간을 4차원 실제 시공간으로 해석하다면 실제 시공간을 구성하는 4차원 입방체는 3차원 공간에서 정의된 3차원 입방체와는 다른 기하학적 속성을 갖는다. 이 경우 3차원 공간과 1차원 시간에서 정의된 통시간적 동일성이란 형이상학적 속성이 다른 메트릭을 갖는 4차원 공간에 적용될 수 없다.

뉴턴 시공간을 구성하는 4차원 실체가 시간의 경과에 따라 그 동일성을 유지하지 못하며 순식간에 변하는 존재라는 해석은 3차원 입방체(cube)와 4차원 초입방체(hypercube)와의 비교를 통해서도 이해할 수 있다. 3차원 입방체는 여섯개의 정사각형 모양의 면을 가지고 있듯이 4차원 초입방체는 여덟개의 정육면체 모양의 초평면(hypersurface)을 가지고 있다 [5]. 4차원 초입방체는 플라톤 정다면체(Platonic solid)의 4차원 일반화인 볼록 정다포체(convex polytope) 중 하나로 4개의 기저벡터(basis vector)로 생성되는 구조이다. 3차원 입체와 4차원 초입체의 오일러 수(Euler number) 등 위상(topology)적 속성의 차이로 인해서 3차원 입방체가 정의된 공간의 기하학적 구조는 4차원 공간에 그대로 유지되지 않는다. 따라서 4차원적으로 구성된 구조는 3차원 공간과 1차원 시간에서 정의된 통시간적 동일성이란 형이상학적 속성을 계승하기 어렵다.

뉴턴 시공간과 특수 상대론적 시공간의 불변성과 3차원 입방체와 4차원 초입방체의 기하학적 특성을 고려하면, 베로가 4차원 시공간의 부분을 특성화할 때 실체성은 유지하면서 통시간적 동일성을 포기하는 직관은 정당한 듯하다. 이러한 문맥에서 4차원 시공간의 실체론은 4차원 시공간을 실제적인 속성을 가지는 4차원 점들 간의 관계로 해석할 수 있다. 이들 견해에 의하면 물질적 사건은 특정한 시공간의 점에서 일어난다. 시공간의 관계는 물질적 사건이 일어나는 시공간의 점 사이의 관계이다. 지금까지의 논의를 요약하자면, 3차원 실제공간에서 4차원 실제공간으로의 개념확장은 위와 같이 실제의 속성은 유지한 채 그에 수반되는 동일성이란 속성을 제거함으로써 가능하였다. 결국 시공간에 대한 4차원 실체론의 정의에서 실체성과 동일성에 기반한 절대성은 분리된다. 이러한 실체성과 절대성의 분리는 다음 절에서 보이겠지만 실체론의 관성력에 대한 설명력을 약화시킨다.

실체론의 4차원적 확장과 마찬가지로 관계론의 4차원적 확장 또한 순탄하지만은 않다. 관계론의 가장 중요한 지침은 시공간에서의 관계란 시공간이라는 실체를 매개체로 관계를 유지하는 것이 아니라 물체들이 직접적으로 관계를 유지한다는 점이다. 즉, 시공간의 관계가 시공간의 점에 존재하는 매질에 의존하지 않고 물체들 간의 관계에 의해 결정된다. 시공간에 대한 관계론자는 이러한 직관을 4차원에 적용시켜야 한다. 머틀린은 공간의 구조를 3차원 동시 공간면에서 물체들 간의 가능한 관계구조로 보는 것처럼 4차원 시공간의 구조를 사건(event)들 사이의 가능한 관계구조로 해석한다. 이렇게 정의함으로써 관계론은

3차원의 경우처럼 실제적 위치라는 존재론 없이 시공간의 4차원 관계론을 유지할 수 있다 [14]. 즉 그 사건에 물체가 위치하게 되면 그 관계를 시공간의 존재론적 기초로 이해한다는 것이다. 이 해석은 이어만이 제시한 관계론의 직관을 잘 구현하는 관계론에 대한 4차원 해석이다. 그렇다면 4차원 뉴턴 시공간에 대한 해석으로 관계론과 실체론의 해석 중 어느 것이 더욱 적합한 것일까?

4 비상대론적 4차원 역학에서의 관계론과 실체론의 논쟁

4.1 네오 뉴턴시공간에서 실체론의 관성력 설명

공간에 대한 3차원 해석의 경우 공간의 부분이 시간이 경과함에도 불구하고 그 동일성을 유지한다는 속성, 즉 통시간적 동일성을 통해서 관성력을 설명한다. 공간의 부분이 동일성을 유지한다는 존재론적인 상정은 물체가 다른 시간면 위에 놓이더라도 물체들 사이의 위치 관계를 결정할 수 있다. 그러므로 우주 안에 한 입자만이 존재한다고 하더라도 공간 부분의 실체성, 또는 공간의 절대성으로 인하여 입자가 정지하고 있는지 아니면 운동하고 있는지 결정할 수 있다. 이러한 존재론적인 상정을 통해서 다른 시간면 위에 놓인 동일한 입자들 사이의 아핀구조를 결정할 수 있고 이를 통해서 관성력을 설명할 수 있다. 즉, 입자가 정지하거나 등속도로 움직인다면 3차원 공간과 1차원 시간 안에서 입자의 경로는 직선을 이루고 이를 관성운동으로 정의할 수 있다. 이에 비해 입자가 3차원 공간과 1차원 시간 안에서 곡선의 궤적을 그리면서 운동하면 이를 가속운동으로 정의할 수 있다.

스클라(Sklar)의 관계론은 관성운동과 가속운동을 시간과 공간 개념을 근거로 설명할 수 있는 파생적인 개념(derivative concept)이 아니라 뉴턴역학 내에서 수용해야 하는 원시적인 개념(primitive concept)으로 이해한다 [18]. 스킨라의 관성운동에 대한 대안적인 이해는 표준적으로 받아들여지는 실체론의 역학적 해석에 대해 경종을 울린다. 하지만, 실체론자들은 스킨라의 설명이 역학적인 설명에 비해서 열등하다는 점에서 비판한다. 3차원 공간에 대한 실체론의 해석에서는 절대시간과 절대공간의 개념적 기초를 통해 관성운동을 자연스럽게 설명하지만, 관계론의 해석에서는 관성운동을 설명되지 않는 원시개념으로 상정하기 때문이다. 하지만 3차원 실제공간의 문제를 해결하려는 4차원 시공간의 실체론에서는 관성력에 대한 설명력의 관점에서 우월한 입지를 유지할 수 없다. 뉴턴역학에서 관성력을 설명할 수 있는 근거는 시간의 경과와는 무관한 3차원 공간의 절대성, 즉 통시간적 동일성에 기인한다. 그러나 시공간의 4차원 실체론 해석에 오면 앞에서 지적한 바와 같이 실체성과 절대성은 분리되기 때문에 공간에 대한 3차원 실체론 해석에서와 같은 설명력에서의 우위를 유지할 수 없다. 네오 뉴턴시공간(NNST)을 기초로 뉴턴역학을 구성하면 공간의 실체성과 절대성 간의 분리를 다음과 같이 확인할 수 있다.

NNST는 뉴턴의 절대 시공간과는 달리 시간의 경과에 따른 공간부분의 동일성이 유지되지 않는다. 이런 의미에서 NNST에서 시공간의 실제적인 해석은 절대적이지 않다. 따라서 NNST에서 관측자는 시간이 경과함에 따라서 객관적으로 같은 장소에 남아있는지를 결정할 수 없다 [7, 12]. 그리고 NNST에서 시간에 걸친 공간부분의 동일성이란 개념이 부재하여 절대속도의 개념도 정의할 수 없다. 하지만 절대속도의 개념은 없어지지만 절대가속도의 개념은 다음과 같이 정의할 수 있다. 민코프스키 시공간(Minkowski space-time)과 유사하게 NNST에서는 입자 근처에 근접해 있는 점들을 지정하고 이 점들을 연결하여 시공간에서 연속적인 경로와 궤적을 정의한다. 입자는 이 연속적인 궤적을 따라 운동하게 된다. NNST에서는 물체의 운동경로가 직선인 세계선(world line)에서 얼마나 벗어났느냐를 측정함으로써 절대가속도를 측정하는 것이 가능하다. 이와 같이 절대속도 개념을 상정하지 않고서도 절대가속도 개념을 정의할 수 있다 [7, 19].

그러나 위와 같은 시공간의 존재론에서는 뉴턴의 절대시간과 절대공간을 통해 관성운동과 가속운동을 설명할 수 있던 설명력의 장점을 잃게 된다 [19]. NST에서는 뉴턴의 시간과 공간의 절대성으로 인하여 입자가 움직이는 경로가 직선인지 곡선인지 객관적으로 결정할 수 있었다. 반면 NNST에서는 실체론자들이 시공간의 점 사이의 동일성을 보장받지 못하는데 어떻게 입자의 경로가 직선인지 결정할 수 있는가? 결국 실체론자들은 어느 경로가 직선인지를 결정해야 하는 과제를 역학이론 개념들 안에서 결정할 수 없는 문제에 다다르게 된다. 이는 어떤 입자의 운동이 관성궤적인지의 여부를 역학이론 개념들 내에서 정의하는 것이 아니라 원시개념으로 상정해야 하는 상황이다. 텔러는 실체론자들 또한 NNST에서는 입자들의 관성궤적을 관성운동에 의해 정의할 수밖에 없다고 주장한다 [19]. NNST에서는 결국 실체론자들도 역학이론의 개념들 안에서 스클라의 관계론 이상의 관성운동에 대한 설명을 제시하지 못한다.

NNST를 채택함으로써 뉴턴역학은 존재론적으로 경제적(절대속도가 없다는 점에서)이며 개념적(4차원 시공간에서 운동을 기술할 수 있다는 점에서)으로 한 단계 진일보하게 되지만 관성운동을 설명하는 설명력의 관점에서는 퇴보하게 된다. 그러나 여기서 필자가 강조하는 바는 4차원 실체론이 제시하는 관성력에 대한 설명력이 떨어졌다는 점이 아니다. 오히려 스클라의 관계론이 제시하는 관성운동에 대한 설명이 4차원 실체론과 동등한 설명력을 갖게 되었다는 점이다. 필자는 이러한 관계론의 관점을 바탕으로 NNST의 4차원 관계론 해석에 대한 머들린의 비판과 베로의 답변을 다음 절에서 논의할 것이다.

4.2 뉴턴 시공간에 대한 4차원 관계론에 대한 머들린의 비판

베로는 NNST에 대한 4차원 관계론에 대한 머들린의 비판에 대해 스클라의 관계론을 적용하여 대응한다 [4]. 머들린 비판의 핵심은 4차원 관계론 해석이 시공간 구조에 대한

충분한 정보를 제공하지 못한다는 점이다 [14]. 예를 들어 3차원의 경우 관계론이 공간에 대한 정당한 해석이 되기 위해서는 어느 시각에서 물체들 사이의 거리관계는 그 시각에서 이들 사건들의 공간적 상황에 대한 의미있는 정보를 모두 제공해야 한다. 이것을 기하학적으로 표현하면, 3차원 유클리드 공간에서 입자들 사이의 거리관계를 결정하면 유클리드 공간에 입자의 궤적을 등장사상(isometry)의 범위 내에서 임베딩(embedding)할 수 있다. 예를 들면 마하(Mach)의 관계론에 근거한 바버(Barbour)와 버토티(Bertotti)의 역학이론에서는 우주 전체에 분포되어 있는 물체와 시험 입자(test particle)의 공간관계를 결정함으로써 이들 이론의 시공간에 입자의 궤적을 임베딩할 수 있다 [2].

4차원 관계론자들도 같은 종류의 주장을 할 수 있어야 한다. 즉, 물질들 사이에 존재하는 시공간의 관계들은 사건들이 가지는 시공간의 상황에 대한 모든 정보를 포함해야 한다. 예를 들어 특수상대론의 경우 민코프스키 기하학은 물체들 사이의 가능한 시공간의 관계구조를 모두 제공한다. 즉 입자들의 세계선을 따라 운동하는 사건들 사이의 민코프스키 거리관계를 결정하면, 민코프스키 시공간에 입자의 세계선을 포앙카레 변환(Poincare transformation)의 범위 내에서 임베딩할 수 있다 [4]. 따라서 특수상대론의 경우 사건 사이의 시공간 관계는 물체들 사이의 시공간의 정보를 모두 제공한다.

하지만 비상대론적 시공간의 경우에는 위와 같은 주장을 할 수 없다. 사건들 사이의 공간적 그리고 시간적 간격을 결정했다 하더라도 아핀구조를 결정하지 않으면 네오 뉴턴 시공간에 사건의 궤적을 임베딩할 수 없다 [14]. 만약 두 입자가 항상 고정된 거리를 유지한다고 하더라도 이 사건은 네오 뉴턴시공간에 완전히 임베딩된 것은 아니다. 왜냐하면 이들 정보만으로는 두 입자들이 회전하는지에 대한 정보를 아직 결정하지 않았기 때문이다. 따라서 메트릭 정보에 아핀구조에 대한 정보를 첨가해야 한다.

머들린은 이러한 네오 뉴턴시공간에 대한 관계론 해석의 단점을 극복하기 위해 관계론에 근거한 아핀 구조의 예를 제시한다. 머들린의 삼항 술어 $col(x, y, z)$ 는 비동시적인 collinear한 모든 세 사건을 서술한다 [14]. 즉, x, y, z 사건 모두가 어떤 관성궤적(inertial trajectory)을 따라 운동할 때 그리고 오직 그때에만 $col(x, y, z)$ 라 정의한다. 시공간 안에서 관계론에 근거한 $col(x, y, z)$ 를 결정함으로써, 원리상 아핀구조를 완전히 결정할 수 있다는 것이다. 하지만 머들린은 삼항 술어 $col(x, y, z)$ 와 관성효과 간의 법칙적 관계가 성립하지 않음을 지적하여 4차원 관계론 해석을 비판한다. 예를 들어 일정한 시간동안 두 입자가 동일한 거리를 유지한다는 사실과 그들의 세계선에서 세 점이 collinear하지 않다는 사실을 알고 있다면 네오 뉴턴 시공간을 관계론적으로 해석하는 이들은 세 점이 언제 collinear할지 예측할 수 없다. 그리고 주어진 경험자료로부터 절대가속도를 추론할 수 없으므로 관성효과 또한 예측되거나 설명될 수 없다 [14]. 이와 같이 네오 뉴턴시공간에서는 $col(x, y, z)$ 같은 관계적 술어를 통해 절대가속도에 대한 정보를 파악할 수 없다.

하지만 머들린이 제시한 방법은 관계론 해석의 유일한 선택지는 아니다. 절대가속도를 $col(x, y, z)$ 같은 삼항 술어를 사용하지 않고 앞 절에서 논의한 스클라의 절대가속도 해석을 네오 뉴턴시공간에도 적용하여 관계론 해석을 시도할 수 있다 [4]. 즉, 관성궤적과 가속궤적을 미소한 세계선의 성분으로 구성된 사건들 간의 관계에 대한 원시개념으로 상정하는 것이다. 다음 절에서는 스클라의 관계론을 바탕으로 한 4차원 시공간 해석의 정당성을 평가해 본다.

5 스클라의 관계론적 해석에 대한 과학방법론과 과학변화 관점에서의 평가

본 절에서는 4차원 시공간에 대한 스클라의 관계론적 해석이 과학방법론을 고려한다면 적절한 대안임을 논의한다. 스클라의 대안적 관계론 해석은 뉴턴의 4차원 공간의 경우에는 실체론과 동일한 설명력을 갖고 있음을 앞 절에서 논의했다. 더욱이 뉴턴의 관성법칙이 유클리드 기하학의 공리에 해당하는 제 1원리(the first principle)임을 고려한다면, 관성 운동을 근거하는 보다 근본적인 개념적인 기초를 찾기보다는 이를 원시개념으로 상정하는 것이 뉴턴의 원래의 취지에 더 가까울 듯하다. 이러한 방법론적 입장은 특정 이론을 구성하는 원시개념의 유용성을 인정하는 것이다. 역학이론의 모범이 되는 유클리드 기하학 또한 무정의 용어와 같은 원시개념을 토대로 공리가 구성되어 있다. 같은 논리를 적용하여 역학이론을 구성하기 위해 원시개념에서 시작하는 것이 정당하지 못한 과학적 방법이라고 간주하기 어렵다. 뉴턴 또한 『프린시피아』의 스클리움에서 다소 신비로운 원거리 작용인 만유인력에 대한 근거에 어떤 인과적 과정이 있는지에 대한 비판자들의 질문에 대해 “나는 가설을 만들지 않는다(Hypotheses non fingo. – I do not feign hypotheses.)”고 답하고 있다 [17]. 따라서 4차원 시공간 해석에 실제 시공간 구조와 같은 역학적 기초를 추가적으로 구성해야 할 부담을 지우는 것은 과학방법론의 관점에서 적절하지 않다고 생각한다.

아인슈타인 또한 빛의 속도는 관찰자의 운동상태와는 무관하게 불변이라는 빛 입자의 운동에 대한 원시적 개념을 토대로 특수상대론을 구성한다 [8]. 따라서 아인슈타인 본인도 특수상대론이 빛 입자의 운동에 대한 거시적 일반화에 기반한 원리 이론(principle theory)임을 강조했다 [9]. 즉, 특수상대론의 민코프스키 시공간 또한 운동의 기반이 되는 실체적 기초가 아니라 빛의 속도의 불변성, 즉, 빛 입자 운동에 대한 원시적 개념을 기하학적으로 구성한 이론으로 이해할 수 있다 [14]. 이와 같이 과학이론을 원시적 개념에 근거해 구성하는 과학방법론은 가설연역적 방법이나 반증주의와 모순되지 않은 방법이며 따라서 스클라의 관계론 해석도 정당한 방법론적 근거를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

스크랄라의 관계론에 대해 후호적인 해석은 ‘시공간 중심견해’(space-time centered view)와 ‘시공간의 동역학적 견해’(dynamical perspective of space-time) 간의 논쟁과도 밀접하게 연관되어 있다. 시공간 중심견해는 시공간이란 이론적 존재자가 물체의 운동을

설명하는 것으로 시공간이론을 해석한다 [7]. 그러나 디사(DiSalle)에 의하면 이는 유클리드 공간이란 실체적 존재자가 왜 물리적 측정이 피타고라스 정리와 같은 기하학 정리를 만족하는지를 설명하고 있다고 주장하는 것만큼이나 앞뒤가 바뀐 주장임을 지적하고 있다 [6]. 물리적 측정이 기하학 법칙을 만족하는 까닭은 유클리드 기하학이 거리나 각과 같은 측정할 수 있는 기하학적 정보를 체계적으로 정리 또는 요약하고 있다는 사실에서 기인한 것이지, 후자가 전자를 인과적으로 설명한다고는 볼 수 없다는 것이다. 동일한 논리로 시공간구조가 물체의 운동을 인과적으로 설명하는 것으로 이해하기보다는 시공간의 기하학이 물체의 운동에 대한 정보를 체계적으로 정리 또는 요약하고 있다고 디사는 주장한다 [22].

시공간에 대한 동역학적 관점은 역학이론의 해석에 대한 기존 시공간 중심견해의 핵심적인 문제점을 명확하게 지적하고 있으며, 기존 견해에 대한 적절한 대안을 제공하고 있다 [22]. 시공간 중심견해는 그 인과적 효력이 어떻게 작동되는지 알 수 없는 시공간이란 다소 신비스러운 이론적 존재자를 뉴턴 그리고 아인슈타인 물리학의 중심에 위치시키고 있다. 또한 시공간이 가지는 기하학구조를 선형적으로 이해하고 있다는 점에서 시공간이라는 이론적 개념이 경험적 뉴턴역학과 아인슈타인 물리학의 체계 안에서 어떻게 이해될 수 있는지에 대한 명확한 답을 제공하지 못한다.

시공간 중심견해와는 달리 시공간의 동역학적 관점은 경험적 하부구조인 물체의 운동을 이론의 기초로 해석함으로써, 뉴턴 시공간이라는 이론구조가 어떻게 그런 특정한 기하학적 구조를 가지게 되었으며, 어떤 방식으로 운동법칙과 연관되어 있는지에 대해서 간단히 설명할 수 있다. 시공간의 동역학적 견해가 시공간 중심견해보다 우월한 점을 인정한다면 스클라의 관점에서 뉴턴 시공간을 관계론적으로 해석하는 시도가 방법론적으로 정당하다는 점을 지적할 수 있다.

더욱이 관성법칙을 유클리드 기하학의 공리에 해당하는 원시개념으로 이해하는 스클라의 관점은 뉴턴역학, 아인슈타인의 특수상대론, 더 나아가 일반상대론 간의 연속성을 명확히 한다. 뉴턴 시공간의 기하학구조가 관성운동하는 물체들의 궤적이 계속 유클리드 공리를 만족한다는 정보에 의해서 '정의' 된다 [6]. 이와 같이 아인슈타인 휘어진 시공간 또한 등가성 원리를 고려한 관성운동, 즉 자유낙하하는 물체들의 궤적은 비 유클리드 공리를 만족한다는 기하학적 정보에 의해서 '정의' 되고 있다. 더욱이 민코프스키 시공간의 기초가 되는 광속 불변의 원리 또한 특수상대론에서 빛의 관성운동을 지정하는 역할을 한다 [20]. 이렇게 뉴턴역학에서 아인슈타인 물리학으로의 이론변화의 중심은 관성운동을 어떻게 재정의하는가에 관한 것으로 이해할 수 있다. 따라서 관성운동을 원시개념으로 시공간의 구조와 동역학적 구조 간의 관계를 해석하는 시도는 실체론과 관계론 간의 논쟁을 뉴턴-아인슈타인 이론변화를 고려한 균형적인 관점이라고 할 수 있다.

References

1. H. G. ALEXANDER, *The Leibniz-Clark Correspondence*, Manchester University Press, 1959.
2. J. BARBOUR, Relational Concepts of Space and Time, *British Journal for the Philosophy of Science* 33(1982), 251–274.
3. J. BARBOUR & B. BERTOTTI, Mach's Principle and the Structure of Dynamical Theories, *Proceedings of the Royal Society of London Series A* 382(1982), 296–306.
4. G. BELOT, *Whatever is Never And Nowhere is Not: Space, Time, And Ontology in Classical and, Quantum Gravity*, Unpublished Ph. D. thesis, University of Pittsburgh, 1996.
5. H. S. M. COXETER, *Regular Polytopes*, 3rd eds. Dover, 1973.
6. R. DISALLE, Newton, Einstein, and the Empirical Foundations of Spacetime Geometry, *International Studies in Philosophy of Science* 6(1992), 181–189.
7. J. EARMAN, *World Enough and Space-Time*, MIT Press, 1989.
8. A. EINSTEIN, *On the Electrodynamics of Moving Bodies*, in *The Principle of Relativity*, Dover Books, 1905, 35–65.
9. A. EINSTEIN, *Philosopher-Scientist*, Open Court, 1949.
10. H. FIELD, Can We Dispense with Space-Time, *PSA* 1984(2)(1984), 33–90.
11. H. FIELD, *Science Without Numbers*, Princeton University Press, 1980.
12. M. FRIEDMAN, *Foundation of Space-Time Theories*, Princeton University Press, 1983.
13. A. R. HALL, M. B. HALL, *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*, Cambridge University Press, 1962.
14. T. MAUDLIN, Buckets of Water and Waves of Space: Why Space-time Probably is a Substance, *Philosophy of Science* 60(1993), 183–203.
15. J. E. MCGUIRE, Space, Infinity, and Indivisibility: Newton on the Creation of Matter, in *Contemporary Newtonian Research*, D. Reidel, 1982, 145–190.
16. H. MINKOWSKI, Raum und Zeit, *Physikalische Zeitschrift* 10(1909), 104–111.
17. I. NEWTON, *Mathematical Principle of Natural Philosophy*, University of California Press, 1729/1999.
18. L. SKLAR, *Space, Time, and Spacetime*, University of California Press, 1974.
19. P. TELLER, Substance, Relations, and Argument about the Nature of Space-Time, *The Philosophical Review* C(3)(1991), 363–397.
20. R. TORRETTI, *Relativity and Geometry*, Pergamon Press, 1983.
21. B. C. van FRAASSEN, *Scientific Image*, Oxford University Press, 1980.
22. K. E. YANG, The Controversy on the Conceptual Foundation of Space-Time Geometry, *Journal for History of Mathematics* 22(3)(2009), 273–292.