

# 교통류 연구에서의 Kinetic theory

이승준

## 1. Kinetic Theory의 정의

Kinetic theory(혹은 kinetic theory of gases: 기체분자운동론)는 압력, 온도, 부피 등 기체의 거시적 성질을 기체분자의 구성과 운동으로 이해하려는 시도이다. 기체 압력을 분자간의 밀침으로 이해하는 뉴턴 가설과의 본질적 차이는 압력을 서로 다른 속도를 띠는 분자간의 충돌로 이해하는 데에 있다. 다른 이름으로 동적분자이론 혹은 충돌이론으로 불리기도 한다.

[원문: Kinetic theory (or kinetic theory of gases) attempts to explain macroscopic properties of gases, such as pressure, temperature, or volume, by considering their molecular composition and motion. Essentially, the theory posits that pressure is due not to static repulsion between molecules, as was Isaac Newton's conjecture, but due to collisions between molecules moving at different velocities. Kinetic theory is also known as the kinetic-molecular theory or the collision theory.]

※ 출처 : Kinetic theory in wikipedia.com

## 2. 교통류 연구로의 도입

일반적으로 말하면, Kinetic theory는 관찰 계의 거시 현상과 그 계를 구성하는 미시 입자의 동력학적 성질과의 관련을 밝히려는 시도이다. 이러한 점에서 환원론을 주요 방법론으로 하는 서양과학의 전형이라 할 수 있

다. 미시 입자의 동력학적 성질에 대한 모델링, 그러한 동적과정 중 양산되는 여러 자료의 통계적 처리를 통한 측정된 현상의 이해와 아직 측정되지 않은 다른 현상의 예측을 그 주요 절차와 내용으로 한다. 이러한 관점은 교통류의 이해에 자연스럽게 도입이 되는데, 개별 차량의 동적성질을 기반으로 교통류의 특성을 이해하려는 것이 매우 자연스러운 시도이기 때문이다. 이러한 점에서 Kinetic theory는 교통류이해의 엄밀한 절차로서 수학적/물리적 수단을 제공한다.

### 3. 교통류에서 Kinetic Theory의 수학적 표현

개별차량의 가속도와 위치, 속도 등의 관계가 미시 동력학 모형을 구성하고 이것에 대한 적절한 수학/물리적 처리가 현상의 이해에 해당한다. 아래 식에서 양방향 화살표 양측이 그것에 대한 간단한 수학적 표현이다. 좌측이 미시 모형에 대한 부분으로, 개별 차량의 가속도 $[a_n]$ 는 (여기서, 첨자  $n$ 은 개별 차량을 지칭하는 인덱스를 의미함) 여러 $\{ \dots \}$  차량의 위치 $[x_n]$ 와 속도 $[v_n]$  등으로 주어진다 $[g(\dots)]$ 는 의미이다. 이로부터 시공간적 한 점에서 $[(x,t)]$ 에서 어떤 관측량 $[f_i]$ 의 시공간적 상관관계를 밝히는 $[\partial f_i / \partial t = c(\dots)]$  것이 화살표 우측에 나타나 있다. 여기서 첨자  $i$ 는 관측량의 종류를 의미한다(차량 첨자가 아님).

$$a_n = g(\{x_n, v_n\}) \leftrightarrow \frac{\partial}{\partial t} f_i(x, t) = c(\{f_i(x, t)\}; \frac{\partial}{\partial x})$$

위의 식에서 화살표의 좌측 방향은 개별 차량운동의 모델링과정이라 할 수 있으며, 우측 방향은 그에 대한 수학적/물리적 처리를 통한 현상의 이해를 뜻한다. 이것이 교통류의 이해에서 Kinetic theory의 방법과 내용이다.

### 4. 교통류 연구에서 Kinetic Theory의 적용 사례

#### 1) Prigogine and Herman

기체의 거시적 흐름을 개별 기체 분자의 운동으로부터 끌어내고자 한

kinetic theory의 관점을 적용하여, 교통류의 거시적 해석을 위해 개별 차량의 운동과 관련한 미시적 관점의 formulation을 시도하였다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) &= \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{relaxation} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{interaction} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{adjustment} \\ &= \frac{-(f - f_0)}{T} + (1 - P)k(\bar{v} - v)f + \lambda(1 - P)k[\delta(v - \bar{v}) - f] \end{aligned}$$

$f(x, v, t)$ : number of vehicles per unit length of the highway at  $(x, t)$  in the speed range  $(v, v + dv)$

$f_0$ : desired speed distribution

$k$ : density

$(1 - P)$ : probability that a potential interaction between a fast moving car and a slow moving car

$\delta$ : Dirac-delta function

※ 출처 : Prigogine, I. and Herman, R.(1971), Kinetic Theory of Vehicular Traffic, New York: American Elsevier.

□ Relaxation term : tendency to "relax" to a "desired" speed distribution

- 희망속도 분포로 완화되는 경향(또는 강도)을 표현하는 항

□ Interaction term : number of vehicles affected by a given car traveling at a particular speed and location in a small time interval

- 해당 시간간격(일반적으로 시뮬레이션에서 사용되는 관측시간으로 30초, 15초, 5초, 1초 등이 사용 됨) 동안 주어진 (빠른 혹은 느린, 가속 또는 감속, 차로변경 등의 행위를 하는) 차량에 의해 영향 받는 (주변의) 차량 대수를 표현한 항

□ Adjustment term : collective local effect

- 속도 등 통행에 영향을 주는 요인으로 오르막구간, 터널구간, 교량구간, 평면곡선부(곡선반경), 차로폭, 길어깨폭 등 주변 지역의 영향을 집합적으로 표현한 항

위의 식에서, 좌변은 시점(t)에서 주어진 차량(관측대상 차량이라 해두자)

주변의 차량집단(반드시 그룹 또는 서행차량에 의해 형성된 bunch(platoon)을 의미하지는 않음)의 변화(교통량, 속도 등)를 의미하며, 이는 우변의 해당시점(t)에 발생하는 속도변화 강도(relaxation term), 차량 상호작용(interaction term) 그리고 주변 도로여건(adjustment term)에 의해 설명될 수 있다.

참고할 사항은, 위의 formulation에서 첫 줄의 편미방은 전통적 kinetic theory를 표현한 관념적 식이며, 두 번째 줄의 modeling 식이 kinetic theory를 교통류에 적용하고자 한 저자들의 주관적 관점을 표현한 식이다. (즉, 수식으로 유도하여 증명되는 식이 아니라는 의미 임)

따라서, 교통류에서 kinetic theory의 적용은 서양의 전통적 이론체계와 통계물리분야에서 다루어지는 그 근본 취지와 동일한 방식으로 이루어지게 되는데, 즉 교통류의 최소 단위인 개별차량을 다루는 microscopic simulation을 통해 거시적 교통류의 해석에 적용한다는 것이다.

## 2) 후속 연구

### (1) Hoogendoorn 등

Multiclass Phase-Space-Density 개념을 도입하여 multi-class gas kinetic model을 개발 하였다. 이는 쉽게 말해, 거시 기체흐름에 수소, 산소, 질소와 같이 질량과 속도가 다른 종류가 섞여 있듯이 교통류에도 승용차, 버스, 트럭 등 다른 종류의 차량들이 섞여 있음에 착안하여 Prigogine and Herman의 식에 변형을 가해 개발한 모형이다.

### (2) Helbing

Physics에서 다루는 Traffic 분야(실제 교통에서는 양방향 통행이 가능하나, 물리학에서 다루는 traffic은 단방향만을 다룸)의 연구를 수행한 통계물리학자로 Prigogine and Herman의 식에 velocity diffusion(속도 발산) term, lane changing term, multiple entry and exit term과 같은 항을 추가하여 모델을 개발하였다.

### (3) Nelson

Cellular Automata에 적용하였다. Kinematic Theory건 Kinetic Theory건 함수형태로 formulation된 연속방정식을 풀 경우 상당히 많은

computing 시간이 들게 되며, 이 때문에 거시모형에서는 Numerical Approximation을 통해 접근하며, 미시모형에서는 연속방적식을 푸는 접근과 cellular automata적 접근의 두 가지 방식을 취한다. cellular automata적 접근은 computing 속도가 대단히 빨라 대단위 네트워크와 방대한 교통량에 대한 실시간적 microscopic simulation이 가능하다. 이 때문에 개별차량을 다루는 kinetic theory와 cellular automata simulation model은 최근 부각되고 있는 ITS Application과 상호 도움을 주고받는 관계로 발전할 가능성이 엿보이고 있다.

#### (4) Jayakrishnan

Microscopic traffic simulation model을 활용하여 교통류의 미시적 특성이 kinetic theory와 부합함을 보이고, 이를 통해 교통운영의 효율성 추구를 위한 속도제한기법에 적용하였다. 연구 결론은 QDF(Queue Discharge Flow, 정체구간인 병목구간을 막 통과하여 free flow(자유류) 상태로 전이하는 교통류)가 통과하는 구간의 제한속도를 상향시킬 경우 운영의 효율성이 더 있다는 것이다.

전체 연구의 과정 중 개별차량의 데이터를 통계적으로 집계하여 거시적 특성과 비교하는 것이 필요한데(이 때문에 kinetic theory가 통계물리의 주요한 분야가 되었다.), 이를 위해 개별차량의 자료를 30초, 15초, 5초, 1초 등 simulation interval별로 집계하여 분석에 적용하였다.

## 5. 교통류 연구에서 Kinetic Theory의 장점

미시적 동력학 모형에 의거하지 않고 현상적으로 제안된 거시 교통모형의 검토(정당화 혹은 부결)에 그 방법을 제공 한다. 모든 거시 교통모형이 연속방정식(continuity equation)에 근거하고 있는데, 이는 개별 차량의 생성과 소멸이 없다는 미시적 사실을 Kinetic theory에 적용해서 어렵지 않게 증명 가능하다. 그 밖에 여러 거시 모형에 있는 adaptation term, anticipation term, diffusion term의 정당화가 가능하며 그 각각의 크기를 미시모형으로부터 유도한다. 역으로 주어진 미시 교통모형이 거시적으로 어떤 교통 현상을 야기할 것인가에 대한 연구에도 Kinetic theory가 적용되기도 한다.

## 6. 교통류 연구에서 Kinetic Theory의 단점

Kinetic theory는 미시 정보에 대한 통계적 절차를 거치는데 이는 통계 처리의 결과를 유의미 하게 하는 충분한 규모의 미시자료를 전제로 한다. 그러나 교통현상에서는, 시공간적으로 한정된 공간에 통계처리의 결과를 신뢰할 만하게 하는 충분한 양의 개별 차량의 자료가 원칙적으로 발생할 수 없다. 이러한 사실은 Kinetic theory가 그 원래의 취지에 맞게 교통현상의 이해에 적용되기에는 원칙적인 난점이 있음을 의미한다. 측정 기술이 발달하여 개별 차량 자료를 일상적으로 얻을 수 있을 경우에 그 대안을 생각해 볼 수 있는데 이는 아래의 전망에서 언급하도록 한다.

## 7. 향후 전망

Kinetic theory는 미시적 관점과 거시적 현상을 연관지우는 전형적인 방법론으로, 위에서 논의된 현실적인 장단점을 떠나서, 교통류의 관측결과와 개별 차량의 운전형태와의 상관관계 연구에 수학적/물리적 언어를 제공한다. 특별히 컴퓨터계산의 발달로 기존 이론의 비 해석적 부분을 수치적으로 필요한 만큼 대체할 수 있게 되어, 실용적 입장에서 볼 때, 교통류의 이해에 안정적인 방법론으로 계속 쓰일 것으로 보인다. 특별히 관측 장비의 첨단화로 개별차량의 정보가 시공간적 한계를 초월하여 방대히 축적되어가고 있는 추세여서, 교통류 연구에서 Kinetic theory의 단점인 통계처리의 난점을 극복할 수 있는 여건이 조성되고 있는데, 이는 미시모형을 기반으로 거시현상을 이해하려고 하는 시도가 실질적으로 가능하게 되어가고 있음을 의미한다. 이러한 연구는 실용적인 성과뿐만 아니라 교통류 이론의 체계적 발전에도 기여할 것으로 기대된다.



이승준