

■ 論 文 ■

# 한정된 교통환경하에서 운전자의 합리적 신념형성에 관한 연구

Drivers' Rational Belief Formation under Bounded Traffic Environments

## 도 명 식

(한밭대학교 도시공학과 교수)

### 목 차

- I. 서론
- II. 국내외 연구동향
- III. 연구방법
  - 1. 운전자의 경로선택 행동과 학습과정
  - 2. 한정 합리성
  - 3. 확률적 사용자균형개념과의 차이
- IV. 시뮬레이션
  - 1. 시뮬레이션 방법
  - 2. 시뮬레이션 결과 분석
- V. 결론 및 향후연구
- 참고문헌

Key Words : 경로선택, 신념형성, 이질성, 한정합리성, 학습과정  
 Route choice, Belief formation, Heterogeneity, Bounded rationality, Learning process

### 요 약

본 연구에서는 기존의 한정합리적인 모델에서 자주 언급된 운전자의 인지의 한계와 정보처리능력의 한계에 초점을 두어 운전자의 경로선택 행동에 대한 모델링과 정보제공에 따른 운전자의 교통환경에 대한 신념(belief) 형성과정을 살펴보기로 한다. 나아가 기존의 운전자의 기대형성 및 경로선택 행동에서 자주 인용된 모델들이 가지는 문제점과 현실에서 도입을 위한 한계점을 지적하고 실제의 도로 네트워크를 가정한 시뮬레이션을 통하여 운전자의 이질성에 따른 경로선택 행동과 운전자의 도로 환경에 대한 신념 형성의 과정을 모델링 하였다.

본 연구를 통해 도로의 특성 및 운전자 그룹의 특성에 따라 운전자의 학습 과정과 정보의 가치가 달라짐을 확인할 수 있었다. 먼저, 교통량의 증가에 민감하게 도로의 혼잡이 심해지는 환경에서 정보의 효용이 커지는 것을 알 수 있었으며, 운전하는 횟수의 차이에 따라 정보의 가치가 차이가 남을 확인할 수 있었다. 나아가 한정된 교통환경하에서 매일 주행하는 운전자의 비율 차이가 운전자가 형성하게 되는 경로의 특성에 대한 신념의 차이로 이어짐도 확인할 수 있었다.

This paper proposes drivers' rational belief formation under a bounded traffic environment. This is to escape the criticism that excessive rationality (e.g., a driver's calculating ability and memory capacity) is required of drivers. Under bounded traffic environments, drivers do not have structural knowledge of traffic conditions and others' decisions. Simulations are carried out using a program coded in C.

Consequently, the author found the learning process of drivers and the value of information can be differentiated by route conditions and the characteristics of driver groups. Also, it was found that rational drivers form different beliefs about traffic conditions even though they have the same traffic environment in a bounded traffic environment.

## I. 서론

21세기 정보화사회를 맞이하여 교통분야에서는 세계 각국에서 경쟁적으로 첨단도로교통시스템(Intelligent Transport System: ITS) 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서도 고속도로와 수도권 및 지방의 거점 도시를 중심으로 교통혼잡의 완화와 안전을 목적으로 도입되고 있다. 그러나 현재 우리나라의 경우 ITS 사업의 역사가 짧아 교통 여건 및 운전자의 행동에 대한 기초적인 연구가 선행되기도 전에 하드웨어적인 시스템의 구축이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 효율적인 ITS 시스템의 구축과 아키텍처 수립 및 시스템의 최적 운영을 위해서는 운전자에게 어떠한 정보를 어떠한 형태로 어떠한 시점에서 누구에게 제공해야 할 것인가 등의 연구와 함께 제공된 정보가 운전자의 경로선택 행동과 기대형성(expectations formation)에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구가 선행되어야 한다.

기존의 운전자의 선택행동 및 기대형성에 관한 연구 가운데, 베이지언 학습모델은 개인이 완전한 기억능력과 정보처리능력을 가지는 경우에는 최적인 학습모델이지만, 개인이 왜 기대효용최대화 규칙(individual's maximizing utility)을 채용하는가에 대한 설명이 없으며, '합리적인 의사결정주체라면 합리적인 의사결정 규칙을 채용할 것이다'라는 것을 암묵적으로 가정하고 있다. 그러나 많은 연구에서 지적되는 바와 같이 불완전한 교통환경하에서 인간의 기억능력과 정보 처리능력에 한계가 있는 경우, 개인이 기대효용최대화 규칙을 수용하기란 현실적으로 불가능하다.

따라서 개인의 인지능력과 정보처리 능력에 한계가 있는 한정된 교통환경(bounded traffic environment) 하에서 어떠한 의사결정 규칙을 채용할 것인가에 대한 문제(메타 의사결정 문제)를 모델화 할 필요가 있다.

이와 같이 한정합리적인 모델의 역할을 살펴보면, 다음과 같은 과제가 남겨져 있다.

- 1) 한정합리적 모델에서는 무수히 다양한 종류의 합리화 절차를 이용할 수 있다. 이러한 절차간에 어떠한 관계가 존재하는가를 설명할 필요가 있다. 다시 말하면, 절차에 관한 일반이론을 개발할 필요가 있다.
- 2) 한정합리적인 모델의 최종적인 목적은 합리적인 모델과의 모순을 나타내는 것에 있는 것은 아니다. 합리적인 모델에 의해 얻은 결론은 한정합리

성의 존재에 대해 어느 정도 의미가 있을까하는 것을 분석할 필요가 있다.

- 3) 어떤 한정합리적인 절차가 사회에서 지배적이며 그것이 합리적 모델에서 설명할 수 없는 현상을 표현하고 있다면, 한정합리적인 절차를 이용해 자생적인 순서나 제도의 존재 가능성 여부를 검토할 필요가 있을 것이다.
- 4) 한정합리적인 행동원리와 거시적인 불확실성간의 상호작용에 대한 시뮬레이션 실험을 통해, 한정합리적인 규칙을 가지는 개인의 상호작용을 통해 현실의 교통네트워크에서 나타나는 확률변동 특성의 표현 가능성에 대해서 지식을 축적해갈 필요가 있다.

이러한 인간의 기억능력과 인지능력에 한계가 있는 한정된 교통환경하에서의 학습모델에 관해서는 경제학 및 심리학 분야에서 이론적인 분석을 하였으나, 교통 분야에서는 초보적인 연구 수준에 머물고 있다(Kurz, 1994; 도명식, 2005).

본 연구에서는 기존의 한정합리적인 모델에서 자주 언급된 운전자의 인지의 한계와 정보 처리능력의 한계에 초점을 두어 운전자의 경로선택 행동에 대한 모델링과 정보제공의 방법에 대한 연구를 소개하고자 한다. 나아가, 기존의 운전자의 기대형성 및 경로선택 행동에서 자주 인용된 모델들이 가지는 문제점과 현실에서 도입을 위한 한계점을 지적하고 실제의 도로 네트워크를 가정한 환경 하에서 운전자의 이질성을 고려한 경로선택 행동과 운전자의 도로 환경에 대한 기대 형성의 과정을 모델링하고자 한다.

또한 미시적인 운전자 행동의 상호작용에 의해 발생하는 도로 네트워크상에서의 교통류의 동적인 거동을 분석하는 것이 본 연구의 목적이다.

## II. 국내외 연구 동향

경제 주체의 학습과정이나 메커니즘에 관한 연구는 경제학 분야를 중심으로 개인이 경험정보를 축적하면서 합리적인 기대를 형성하는 과정을 베이지언 추론과정을 이용해 모델화하였다(Kirman and Salmon, 1995; Sargent, 1993).

초기의 베이지언 모델에서는 개인이 현상을 지배하는 실제의 확률모델을 알고 싶어한다고 가정하여 연구 성과를 축적하였으나, Kurz(1994)는 그의 연구에서 개인의 인지능력에 관한 과도한 합리성을 요구하고 있다고 주장

하였으며, 그 후 베이지언 학습모델에서의 개인의 인지능력에 관한 가정을 완화하는 방향으로 연구가 이루어졌다.

한편, Selten(1990)은 한정합리적 학습모델을 내장한 주관적 의사결정 모델에 관한 연구를 통해 단기에서의 개인의 선택문제는 자기가 직면한 문제를 단순화하여 주관적 모델로서 정식화하였다. 한편, 장기적으로는 개인은 경험정보에 근거해 주관적 모델의 개량·갱신을 시도하며, 이 갱신의 절차는 시행착오의 반복으로 해법을 찾아가는 것으로 제안하였다.

한정합리적인 개념에 근거한 초기의 학습모델에 관한 연구는 개인의 학습행동을 어떤 기계적인 규칙의 반복과정으로 모델화하는 것에 주안점을 두었지만, 최근에는 개인 신념의 이질성, 엄지손가락 규칙에의 수렴성 등 개인의 인지능력과 계산능력의 한계를 고려한 어프로치가 시도되고 있다(도명식, 2005; Barucci, 1999; Slonim, 1999).

Case-based 선택모델은 각 전략을 선택한 당시의 평가치가 과거에 경험한 여러 가지 상황에서의 같은 행동을 취한 경우에 획득한 편익의 가중 평균합으로 정의하고 있다.

한편, 진화론적 게임에서는 먼저 특정의 전략을 사용하도록 프로그램화된 개인이 게임상대를 계속 바뀌가면서 게임을 반복하여 많은 페이오프를 획득하는 전략을 제시하고 있다(Weibull, 1995). 결과적으로 보다 많은 페이오프를 가지는 전략만이 남게 되며 집단전체의 균형상태가 달성되어진다.

Maynard(1982)는 진화론적 안정성의 개념을 도입하여 집단내의 소수의 멤버가 돌연변이적으로 균형에서 이탈하는 행동을 취한다 하여도 원래의 균형상태로 회귀하는 진화론적으로 안정된 전략 개념을 도입하였다.

그러나 진화론적 게임에서는 플레이어의 행동과 학습 과정이 먼저 프로그램화되어져 있기 때문에 동적인 환경에서의 개인의 학습행동을 명확히 정식화 할 수는 없다. 여기에는 개인은 어떤 특정의 규칙에 따라 행동하는 오토메톤으로서 모델화되어져 있어, 한정적 최적화모델과 같은 형태의 한계점을 가진다. 따라서 최근 개인행동의 심리적 행동 양식을 도입한 행동론적 게임이론이 발전되어져 왔다(Rabin, 1998). 즉, 개인은 자기 자신의 페이오프뿐만 아니라 타인의 페이오프도 고려하여 개인의 정식화, 간략화, 합리화 행동을 명시적으로 모델화한 새로운 게임이론이 발전되어져 왔다.

그러나 이와 같이 대부분의 한정합리적 모델에서는

모델의 최종 결과가 모델에서의 학습률을 특정화시키는 방법에 결정적으로 의존하고 있는 경우가 많아, 아직까지 일반적인 결론을 도출할 수 있는 한정합리적 모델은 제안되어있지 않는 실정이다.

나아가, 기존의 학습모델은 주체의 의사결정 프로세스에 과도한 기억 및 연산능력을 가정한 연구가 주로 이루어졌으며, 어떤 특정한 개인이 한정된 인지능력과 정보처리능력 하에서 학습을 통해 의사결정의 합리화가 어떻게 이루어지는가를 모델화한 것이 대부분을 차지하고 있다.

그러나 운전자의 경로선택문제에서는 각 개인의 경로선택의 결과가 각 경로의 퍼포먼스를 결정하고 결과적으로 개인의 학습행동에도 영향을 미친다. 개인행동이 상호 영향을 미치는 사회시스템에서는 개인의 학습행동만을 모델화해서는 안 되며, 사회 전체적인 규모에서 학습행동을 하는 메커니즘을 분석해야 한다.

본 연구에서는 기존의 한정합리적인 모델에서 자주 언급된 운전자의 인지의 한계와 정보의 처리능력의 한계에 초점을 두어 한정합리적인 환경 하에서의 운전자의 경로선택 행동과 학습 메커니즘에 대해 살펴보기로 한다.

### III. 연구방법

#### 1. 운전자의 경로선택 행동과 학습과정

개인 의사결정 단계에서 관련 정보와 자료를 모두 수집하여 완벽하게 분석한다는 것은 의사결정자의 제한된 인식능력(limited cognitive capacity)으로 인해 불가능하다. 즉, 의사결정자는 완벽한 합리성(perfect rationality)에 근거한 결정을 할 수는 없으므로 제한된 합리성 영역의 어딘가에서 머무를 수밖에 없다(Simon, 1957).

Simon(1976)은 모델에 근거한 문제해결방법을 만족적 접근(satisficing approach) 또는 적당한 수준의 해결안(good enough solution)이란 말로 표현한다. 이는 의사결정자의 행동영역이 제한적 합리성(bounded rationality)의 범위 내에 있음을 의미하는 것이다(김문한 외, 2003).

운전자의 경로선택문제를 예로 들어보면, 운전자는 각 경로의 주행상황에 관한 정보를 경로선택을 하기 전에 완전히 파악할 수 없다. 예를 들어 요일과 기후 등과 같은 경로의 상태와 관련 있는 정보와 과거의 경험을 이

용해 각 경로의 상태를 예상하게 된다.

이러한 예상과 추론을 이용한 정보는 개인에 따라 다양하며, 예상과 추론의 방법이 다르면 선택된 결과도 달라진다. 경로선택을 한 사후의 시점에 있어서 당초 예상하지 못했던 새로운 상태를 만날 수도 있다. 이 경우 새롭게 얻은 정보를 이용해 각 경로의 상황을 새롭게 추론하고 선택한 경로를 도중에 변경하는 경우도 있을 것이다. 따라서, 개인은 인지능력과 정보처리능력에 한계가 있기 때문에 모든 요인을 고려하지 않고 미리 정한 룰에 의해 선택한 요인만 고려하게 된다(Tversky and Kahneman, 1986). 예를 들어, 운전자는 경로선택에 있어서 이용가능한 모든 경로를 인지할 수 없기 때문에 과거의 경험과 선택적인 정보 등에 근거해 미리 고려의 대상이 되는 경로집합을 한정하는 경우가 많다(도명식, 2005; Do et al., 2006).

선택대안을 한정하는 룰이 개인에 따라 다르면 선택되어지는 경로도 당연히 달라진다. 이러한 선택대안집합의 인지능력의 한계를 고려한 이산선택모델에 관한 연구가 많이 이루어졌다. 복수의 선택대안을 비교하기 위해서는 많은 양의 정보처리가 필요하다. 개인이 다수의 선택대안 가운데 하나를 선택하는 경우, 모든 평가요인을 동시에 고려하여 선택하지는 않는다. 예를 들어 어떤 특정의 평가요인을 고려해 선택대안집합 가운데 소수의 선택대안으로 줄이게 된다. 개인은 선택문제에 대해 어떤 순서에 따라 문제를 간략화하게 된다. 이러한 문제의 간략화의 순서를 고려한 행동모델에 대해서는 고전적인 Tversky(1972)의 Elimination model을 비롯하여 이산적 선택모델이 있다.

한편, Selten(1990)은 현실의 경제주체가 이윤(효용)의 최대화와는 다른 다양한 동기를 가지고 있기 때문에 한정합리성은 동기를 고려한 한계로 간주해야 한다고 지적하였다. 한정합리적인 개인은 어떠한 규칙과 순서에 따라 자기의 행동을 합리화하게 된다. 그러한 규칙과 순서가 최적이지 않더라도 그 결과에 대해 만족한다면 그러한 규칙과 순서를 변경하고자 하지 않는다. 이러한 시행착오의 결과 최종적으로 선택된 행동이 한정합리적 행동이라 할 수 있다. 그러나 '시종일관 통일된 순서에 따르는 행동'과 '단순히 무질서한 행동'과는 다르며, '개인'은 어떤 순서에 따라 행동한다'라고 말할지라도 여러 형식의 순차적 행동(procedural behavior)을 한정합리성이라고 보기는 어렵다. 한정합리성과 비합리성을 구별하는 경계선을 설정할 필요가 있다.

## 2. 한정 합리성

개인이 의사결정환경을 완전히 인식할 수 없는 경우, 대상이 되는 문제를 자기 자신의 방식대로 프레임화하게 된다(Tversky and Kahneman, 1986). 의사결정환경을 인식하고 대상이 되는 문제를 정식화하는 행위를 프레임화라 부른다. 프레임화가 다르면 선택의 결과도 달라진다. 위에서 언급한 바와 같이, 합리적 행동에서는 선택대안 집합과 바람직함의 정의가 독립적으로 주어진다. 그러나 개인은 자기 자신이 선택대안의 집합을 정의하고 선택문제를 정식화해야만 하는 상황을 고려해보자. 이때, 선택대안의 특징을 기술하는 방법이 선택대안의 선택(바람직함의 정의)에 영향을 미칠 수 있다.

예를 들어, 경로선택 문제를 살펴보면, 운전자가 선택할 수 있는 각 경로의 평균주행시간을 인지하였다고 하자. 이 경우 운전자는 경로선택문제에서 평균주행시간이 가장 짧은 경로를 선택할 것이다. 그러나 평균주행시간을 계산하기 위해서는 과거의 주행시간을 기억하여, 그 평균값을 계산하는 정보처리능력이 필요하다. 한편, 운전자가 평균주행시간을 인지할 수 없이 대충 '과거 몇 번의 주행경험'이나 '가장 시간이 많이 걸린 경우의 기억' 정도의 정보만 가지고 있는 경우를 생각해보자. 이 경우 평균주행시간을 평가적으로 이용할 수 없다. 운전자는 경로선택문제를 '가장 시간이 많이 걸린 경우의 주행시간이 최소가 되는' 것과 같은 경로를 선택하는 문제로서 정식화할 수 있다.

그러나 경로의 선택은 이러한 규칙뿐만 아니라 '기억 가운데 가장 짧은 시간으로 목적지에 갈 수 있는 경로를 선택한다'라고 하는 룰(rule)로 경로를 선택할 수도 있다. 이 경우 여러 가지 룰을 사용한 후에 최종적으로 경로선택 룰을 결정할 수도 있다. 이러한 개인의 인지능력과 정보처리능력에 한계가 있는 경우, 자신이 직면한 문제를 자신의 능력에 맞추어 프레임화하게 된다. 문제를 프레임화하는 방법이 다르면 선택하는 결과도 달라진다.

## 3. 확률적 사용자균형개념과의 차이

기존의 확률적 사용자 균형(SUE) 개념에서는 확률적 오차항을 추가하여 결정적 통행배정 모형에서 고려할 수 없었던 사용자간의 인지비용의 차이를 고려하였지만, 교통정보의 제공과 이에 따른 경로선택 행동에 있어 모든

가능한 대안 경로의 특성을 파악할 수 있는 능력과 과거 주행경험에 대한 기억능력이 있다는 비현실적인 가정에서 출발하기는 마찬가지이다.

따라서 시뮬레이션 실험에 의해 개인의 의사결정원리와 개인간의 거시적인 불확실성의 상호작용에 의해 생기는 확률변동특성에 관한 연구가 필요하다. 예를 들어 개인이 min-max 규칙으로 대표되는 한정합리적인 확정규칙에 의해 경로선택을 반복한다고 할 때, 각 시점에서 네트워크 균형(등시간 균형)이 성립할 가능성은 거의 없다.

그러나 각 개인이 경로선택을 행하는 타이밍이 충분히 랜덤화 되어진다면 「각 기마다 소요시간의 실현치를 시간적으로 집계화한 평균적인 퍼포먼스가 등시간 배분에 근접한 결과를 가지게 될지」, 혹은 「각 개인의 한정합리적인 학습행동의 전체가 비정상적인(nonstationary) 거시적 거동을 유발할지」가 중요한 검토과제가 될 것이다. 이러한 확률적인 집계화의 결과와 그 확률적인 특성은 개인의 의사결정 규칙과 거시적 확률변동과의 상호작용에 의존하고 있다.

도로 네트워크의 조건에 대해 불완전한 정보를 가지는 운전자에게 교통정보가 제공될 경우, 이는 운전자의 교통환경에 대한 신념의 형성에 영향을 미치며, 결과적으로 경로의 선택행동에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 운전자는 획득가능한 정보 원(information sources)을 이용하려 하는데, 공공기관으로부터 제공되는 공공정보(교통방송), CNS, VMS, 개인의 과거 경험 등이 여기에 해당한다.

개인이 베이저언 학습모델을 이용할 경우, 과거에 획득한 데이터를 이용해 주행시간에 관한 주관적기대를 형성해 자신의 주관적인 경로선택문제를 정식화하고 있다. 나아가 새로운 주행경험을 통해 주관적인 경로선택문제를 축차 갱신하게 된다.

무한히 계속되는 이산적 시점에서 어떤 동일한 OD간의 트립을 반복하는 개인이 있다고 하자. 이 OD간에는 I 개의 경로가 선택가능하며, 선택 가능한 경로의 집합을  $S = \{i : i = 1, \dots, I\}$ 로 표현할 수 있으며, 이 경우 개인은 이용 가능한 선택대안 집합을 인지하고 있다고 가정하자. 개인에게 있어 선택대안집합이 달라도 상관없다. 선택한 경로주행시간은 타인의 행동과 환경제약에 의해 불확실하게 변동한다. 개인은 선택한 경로의 주행시간을 관측할 수는 있지만, 선택하지 않은 경로의 주행시간은 알 수 없다.

여기서, 시점 t에서의 경로 i의 소요시간  $\tau_i(t)$ 에 관한 주관적기대를  $\pi_i(t)$ 로 나타내자. 시점 t에서의 개인의 경로 i에 대한 기대효용함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i(t) = -\pi_i(t) + \omega_i \tag{1}$$

$\omega_i$ 는 사적정보를 나타내는 확률변수(random variable)이며 시행착오나 실험적 행위를 나타내는 오차항이다. 한편, 개인은 기대효용을 최대화 하는 경로를 선택하게 된다.

개인은 주행경험을 축척함으로써 경로의 주행시간의 주관적기대  $\pi_i(t)$ 를 형성한다. 여기서 t 기에서 경로  $i^*$ 를 선택했다고 하자. 그 결과 경로  $i^*$ 의 주행경험을  $n_i^{(t)}$ 번 반복했다고 하자. 개인의 학습규칙은 t 기의 새로운 경험정보  $\tilde{\tau}_i(t)$ 를 이용해 주관적기대  $\pi_i(t)$ 를 갱신하는 규칙으로 나타낼 수 있다. 객관적인 주행시간분포가 1차원 정규분포로 근사시킬 수 있을 때, 개인은 베이저언 추정에 의해 주행시간의 평균치에 관한 주관적기대를 갱신하는 메커니즘을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\pi_i(t+1) = \pi_i(t) + \frac{1}{\nu_0 + n_i^{(t)}} (\tilde{\tau}_i(t) - \pi_i(t)) \tag{2}$$

여기서,  $\nu_0$ 는 개인별로 서로 다른 파라미터이다. 즉, (t+1)기에 있어서 주행시간의 주관적기대 값은 t기에 있어서의 주관적기대  $\pi_i(t)$ 와 t기에서의 주관적기대의 오차(주행시간의 실측치와 주관적기대의 차)를 이용해 갱신하게 된다. 주관적기대의 오차에 관한 가중치 계수  $1/(\nu_0 + n_i^{(t)})$ 는 개인에 의해 서로 다르며, 이 계수는 정수가 아니고,  $n_i^{(t)}$ 가 커지면 0에 가까워져 주관적기대  $\pi_i(t)$ 의 보정량은 점점 감소하여 0으로 수렴하게 된다.

개인은 학습행동을 통해 자기의 주관적기대를 축차수정하고 자기의 주관적기대는 어떤 값에 수렴하게 된다. 또, t기에서 선택하지 않았던 경로  $j(j \in S) \neq i^*$ 의 주관적기대는 그 경로가 이용될 때까지 갱신되지 않는다. 위 식에서  $n_i^{(t)}$ 가 충분히 클 경우 즉, 개인이 경로선택을 충분히 많이 반복하면, 그의 평균시간에 관한 주관적기대는 객관적으로 실현하는 표본평균에 근사해지게 된다. 개인이 서로 다른 초기기대를 가지고 있다하더라도 학습행동을 통해 최종적으로는 합리적기대를 형성하게 된다.

개인이 이용 가능한 모든 경로에 대한 주관적기대의 갱신여부는 주관적기대에 포함되어진 오차항  $\omega_i$ 의 분산에 의존한다. Kobayashi(1994)는 학습메커니즘이 약한 합리성 조건을 만족하는 경우, 주관적기대는 합리적기대에 수렴함을 보였다. 베이저언 학습뿐만 아니라 넓

은 범위의 학습메커니즘이 합리성조건을 만족한다.

한편, 운전자가 주관적 경로선택문제를 고려할 경우 필요한 데이터는 각 경로의 주행회수, 바로 전의 주관적 기대, 선택한 경로의 관측데이터 및 개인 고유의 파라메타이다. 그러나 개인의 기억능력의 관점에서 보면 과거의 주행회수를 정확히 기억한다는 가정은 현실적으로 어려운 것이다. 나아가 가중평균(평균값)을 구하는 계산은 주행중인 개인의 계산능력을 뛰어넘는 것이다. 개인은 이러한 인지능력, 정보처리능력에 한계가 있는 경우, 베이저언 모델을 이용할 수 없게 된다(Do et al., 2006).

따라서 본 연구에서는 운전자의 인지능력, 정보처리능력의 한계를 고려한 학습모델을 제안하고자 한다. 당연히 제한하고자 하는 한정합리적 학습모델은 베이저언 선택모델이 가정하는 합리성의 조건보다 약한 인지능력 과 정보처리능력을 전제로 한 모델이다.

나아가, 기존의 연구(도명식, 2005)에서 가정한 도로의 교통조건을 보다 현실적으로 고려하여 운전자의 한정 합리성하에서의 경로선택과 학습메커니즘에 대해 살펴보기로 한다.

#### 4. 운전자 학습행동의 모델링 및 검증

한정합리성을 다루는 가장 직접적인 방법은, 개인의 정보처리능력에 한계가 있음을 표현하는 제약조건을 정의하고 개인행동을 제약조건 하에서의 최적화문제로 정식화하는 방법이다(Fershtman, 1993; Dow, 1991).

그러나 정보처리능력의 한계를 고려한 제약조건 하에서의 최적화문제에 의한 어프로치의 최대 문제점은 제약이 없는 경우와 비교해 문제해결을 위한 계산량이 어떻게 변화하는가에 대해 어떠한 고려도 하지 않고 있다는 것이다.

일반적으로 최적화문제에 제약이 부가되면 그만큼 해를 풀기 위해 필요한 정보처리는 복잡해진다. 따라서 정보처리능력의 한계를 고려한 제약조건 하에서 최적화문제에 의한 어프로치는 그것을 풀기위해 보다 많은 정보능력이 필요하게 되는 모순이 발생한다.

한정된 정보환경하에서 운전자는 도로 네트워크에서 실현되는 소요시간과 같은 교통조건에 대한 예측을 하게 되며, 이러한 예측은 그들의 과거 기억과 개인적인 속성, 선호 특성 및 획득가능한 정보를 기반으로 이루어진다.

본 연구에서는 이러한 예측의 결과를 신념(belief)이라 부르기로 하며, 과거의 경험에 비추어 위반되지 않아

자신의 신념을 변경시킬 의사가 없는 상태의 예측 룰(estimation rules)을 합리적 신념(rational beliefs)이라 부르기로 한다.

따라서, 본 연구에서는 운전자들이 도로 네트워크에 대한 구조적인 지식을 알지 못하며, 그들의 계산 능력에 한계가 존재하는 한정적 정보환경하에서의 합리적 신념의 형성 메커니즘을 제안하기로 한다.

앞에서 설명한 한정적 정보환경하에서 운전자가 경로 선택을 반복함으로써 얻어지는 정보의 종류는 다음과 같이 3가지가 존재한다. (1) t기에 운전자가 선택한 경로,  $a_k^t$ , (2) t기에 선택한 경로 a의 소요시간,  $\tau_a^t$ , (3) 공공기관으로 부터의 정보와 개인 정보로 구성되는 정보 집합,  $\mu_k^t = (m^t, e_k^t)$ . 여기서,  $m_t$ 는 모든 운전자가 공유하는 공적 정보인 반면, 각 개인의 의사결정 룰인  $e_k^t$ 는 서로 다른 정보 원을 가지면 서로 다른 값을 가지게 된다.

따라서, 장기간의 경로 선택행동과 과거의 경험정보(historical information)  $\Omega_k^t$ 과 초기에 형성한 신념  $\pi_k^0$ 에 기초하여 운전자가 형성하게 되는 합리적 신념은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\pi_k^t(\mu_k^t) = I_k^t(\tau_k^t; \Omega_k^t, \pi_k^0) \tag{3}$$

$$\text{where, } \pi_k^0 = \pi_{ak}^0(\tau_a^0 | \mu_k^0)_{a \in \delta}$$

$$\Omega_k^t = I_{z=1}^{t-1} \sigma_k^z \tag{4}$$

$$\text{where, } \sigma_k^t = (a_k^t, \tau_a^t, \mu_k^t)$$

따라서 운전자는 과거의 경로선택에 의해 얻게 되는 주행경험을 통해 자신의 주관적 신념을 갱신하게 되며, 식(3)의  $I_k^t$ 를 '신념 형성 메커니즘'이라 부르기로 한다.

또한 기존의 연구에서 가정한 한정합리적인 교통환경을 그대로 도입하여 운전자는 자신의 과거 주행경험의 평균적인 값만 기억한다고 가정하였다(Do et al., 2006; Fourgeaud et al., 1984).

즉, t기에 경로 a에 대한 평균 소요시간에 대한 운전자의 주관적 신념  $\hat{T}_{ak}^t$ 는 과거의 경험과 정보 집합의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\hat{T}_{ak}^t(\mu_k^t, \Omega_k^t) = AVE[T_{ak}^t(\mu_k^t) | \Omega_k^t] \tag{5}$$

여기서,  $T_{ak}^t(\mu_k^t)$ 는 정보 집합  $\mu_k^t$  하에서 t기에서의 경로 a에 대한 소요시간의 실현값을 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 한정 합리적인 교통환경하에서, 각 경로 소요시간의 평균값에 대한 운전자의 합리적 신념의 형성과정과 교통정보의 효율성에 대해 고찰하기로 한다.

### IV. 시뮬레이션

#### 1. 시뮬레이션 방법

운전자가 경로의 구조적인 지식을 가지지 못할뿐더러 계산능력에도 한계가 존재한다는 현실적인 상황을 도입하여, 서로 다른 경험과 서로 상이한 의사결정 물에 근거하여 경로를 선택하는 한정된 교통환경하에서의 교통조건 변화에 따른 운전자의 경로선택행동의 변화를 알아보기 위해 간단한 1OD-2route의 네트워크를 대상으로 시뮬레이션을 수행하기로 한다.

또한, 매일 대상 경로를 선택하여 주행하는 운전자 그룹과 가끔 대상 경로를 주행하는 운전자 그룹(Case 3과 4)으로 분리하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이는 운전자의 주행경험이 다를 경우, 운전자의 경로에 대한 주관적 신념이 어떻게 달라지는 가를 살펴보기 위함이다.

우선, 시뮬레이션의 조건에 대해 간단히 언급하면 다음과 같다. 어떤 일정한 수의 운전자(200명)를 대상으로 시뮬레이션을 하는 가상공간을 구현하였으며, 두 경로로 유입되는 정상성을 띄는 유입교통량에도 차이(Case 1과 2)를 두어 영향을 살펴보았다.

운전자의 기억능력에 대한 영향을 살펴보기 위해서 주행경험에 대한 무한기억능력과 유한기억능력(20일)으로 구분하였다.

또한 운전자에게는 공공주체(public agency)로부터 모든 운전자가 공유하는 공공정보가 제공된다. 제공되는

들은 각 경로로 유입되는 유입교통량을 관측하여 대소 비교를 통해 제공되며, 이 때 운전자는 자신의 과거의 경험과 공공기관으로부터 제공되는 정보와 자신이 획득가능한 정보 원에 근거하여 소요시간이 최소가 될 것으로 예상되는 경로  $i_t^*$ 를 선택하게 된다.

$$i_t^* = \operatorname{argmin} \begin{cases} T_{1,k}^t(m^t, e_k^t) + \eta_{1,t} \\ T_{2,k}^t(m^t, e_k^t) + \eta_{2,t} \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $\eta_{i,t}$ 는 운전자의 기분, 속성 등을 표현하는 사적 정보로 랜덤변수이다. 각 경로의 총 교통량( $y_{i,t}$ )은 경로를 선택한 운전자의 수( $x_{i,t}$ )와 유입되는 교통량( $w_{i,t}$ )의 합의 형태로 구할 수 있으며, 경로의 주행시간함수는 선형 주행시간 함수식과 비선형 주행시간 함수식을 모두 고려하였다.

$$T_{i,t} = a_i + \beta_{i,y_{i,t}} \quad (7.1)$$

$$T_{i,t} = a_i + \beta_{i,y_{i,t}^2} \quad (7.2)$$

#### 2. 시뮬레이션 결과 분석

먼저, 경로의 특성이 네트워크에 미치는 영향과 운전자의 경로선택행동에 어떤 영향을 미치는 가를 알아보기 위해 가정한 네트워크를 대상으로 각 경로의 소요시간이 교통량 증가에 따라 선형식을 따를 경우와 비선형식을 따를 경우를 시뮬레이션을 통해 살펴보기로 한다.

또한 경로에 유입되는 교통량의 크기가 네트워크에 미치는 영향도 유입교통량의 분산을 조정하여 살펴보기로 한다.

##### 1) 주행시간함수에 따른 변화

<그림 1>과 <그림 2>에서 d-driver는 매일 주행하는(daily) 운전자, nd-driver는 격일로 주행하는(non-daily) 운전자를 나타내며, e는 공공정보로서 경로1과 경로2의 교통량을 비교하여 제공되며 m, n은 사적정보로 각각 경로1과 경로2의 교통량에 의존하여 정보를 제공한다. 또한 r은 운전자가 선택하여 실제로 주행한 경로를 의미한다.

<그림 1>, <그림 2>에서 보는 바와 같이, 주행시간함수가 선형일 때와 비선형일 때 모두 매일 운행하는 운전

<표 1> 경로의 특성 파라메타

		경로1	경로2
연장(km)		40	50
선형BPR함수 계수		$a_i = 40, \beta_i = 0.2$	$a_i = 50, \beta_i = 0.15$
비선형BPR함수 계수		$a_i = 20, \beta_i = 0.002$	$a_i = 40, \beta_i = 0.0015$
유입교통량 분포	Case 1	N(100, 15)	N(100, 10)
	Case 2	N(100, 8)	N(100, 5)
운전자 그룹	Case 3	매일운행 : 100, 격일운행 : 100	
	Case 4	매일운행 : 150, 격일운행 : 50	

자그룹의 주행시간이 격일로 운행하는 운전자 그룹의 주행시간보다 작게 나타나며 정보를 따르는 운전자들이 정보를 따르지 않는 운전자들에 비해 낮은 주행시간을 경험하고 있음을 확인할 수 있다. 한편 <그림 1, 2>와 <그림 3, 4>를 비교해 보면 학습 경험이 누적됨에 따라 기억능력이 유한한 경우와는 달리 무한한 기억능력을 가정한 경우에는 주행시간에 대한 신념이 수렴하는 모습을 나타내고 있다.

<그림 3>과 <그림 4>에서 보는 바와 같이, 주행시간 함수가 비선형식일 경우 격일로 주행하는 운전자들을 살펴보면 선형식일 경우에 비해 정보를 따르는 운전자가 정보를 따르지 않는 운전자에 비해 더 높은 주행시간을 보이기도 하는데 이것은 격일로 주행하는 운전자의 경우가 매일 주행하는 운전자에 비해 정보의 효율성이 떨어지는 것을 나타낸다.

또한 주행시간 함수가 비선형일 경우가 선형일 경우에 비해 통행시간의 분산이 크게 나타나고 정보를 따르는 운전자가 정보를 배반한 운전자에 비해 통행시간이 현저히 줄어들음을 보이고 있다. 이는 용량이 적은 도로 내

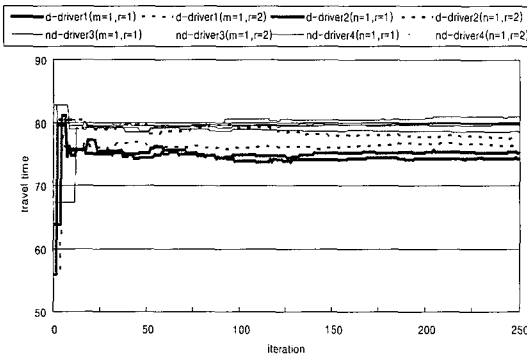
지는 주행에 대한 장애요인이 큰 도로에서 교통정보의 효용이 커지는 것을 보여준다.

2) 유입교통량 분산 변화에 따른 변화

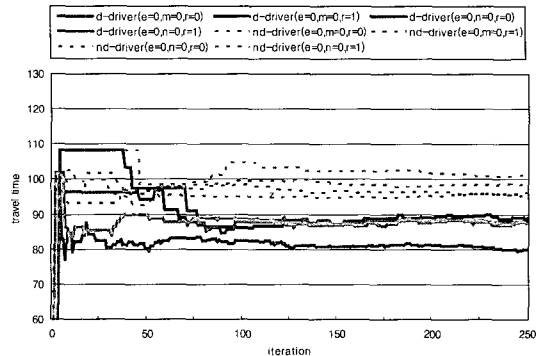
유입교통량의 분산이 상대적으로 적은 Case 2(<그림 5>의 경우 Case 1(<그림 4>에 비해 통행시간의 변화가 상대적으로 적게 나타나고 특히 격일로 운전하는 운전자들의 경우 Case 1에 비해 일정한 수준을 유지하는 것을 알 수 있다.

그리고 매일 주행하는 운전자의 경우, 정보를 따르는 운전자가 정보를 따르지 않는 운전자의 주행시간의 변화보다 좀 더 유동적인 것으로 나타났으며, 정보를 따르지 않는 운전자의 경우 높은 주행시간을 경험하는 것으로 나타났다.

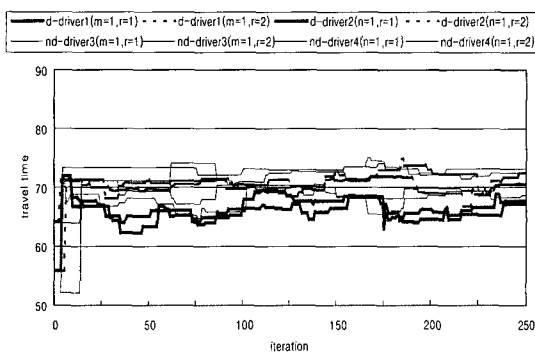
이것은 유입되는 교통량의 변화가 적은 경우 격일로 주행하는 운전자의 경우 그 변화를 감지하지 못하여 주행시간에 큰 영향을 미치지 못하며, 정보의 효과가 적어 지지만 매일 주행하는 운전자의 경우는 오히려 주행시간



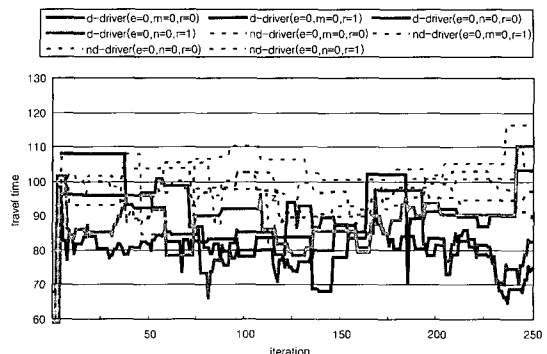
<그림 1> 선형 무한기억능력 정보상황



<그림 2> 비선형 무한기억능력 정보상황

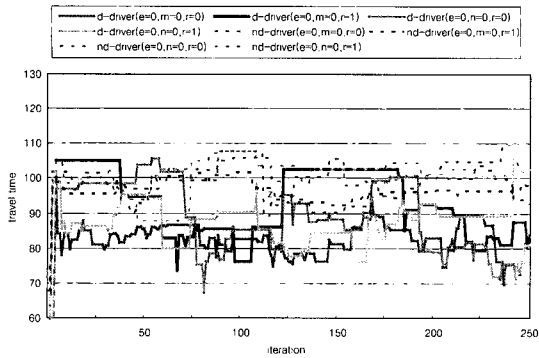


<그림 3> 선형 유한기억능력 정보상황



<그림 4> 비선형 유한기억능력 정보(Case 1)





〈그림 5〉 비선형 유한기억능력(Case 2)

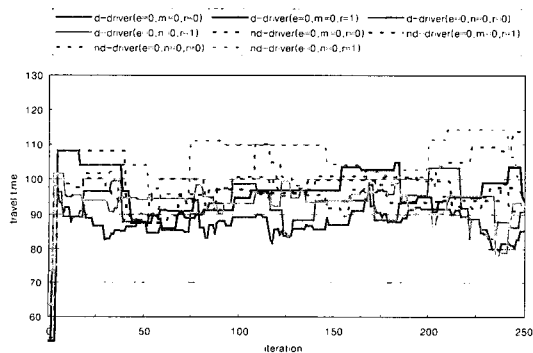
의 변화에 민감하게 반응하여 정보의 효과가 증대되는 모습을 보여준다.

3) 주행이력에 따른 변화

운전자의 비율을 Case 4와 같이 조정하여 매일 운행하는 운전자의 비율을 높인 경우에는 격일로 주행하는 운전자들의 평균통행시간 변화는 거의 없지만 매일 운행하는 운전자의 통행시간은 운전자(차량)의 수가 증가(100명에서 150명)함에 따른 영향으로 비교적 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

또한 정보를 따르는 운전자의 경우 운전자의 비율을 같게 했을 때(그림 4)에 비해 주행시간의 변화의 폭이 적고 정보를 따르지 않는 운전자에 비해 비교적 적은 주행시간을 유지한다.

이것은 유입되는 교통량의 변화가 적은 경우 격일로 주행하는 운전자의 경우 그 변화를 감지하지 못하여 주행시간에 영향을 미치지 못하고 정보의 효과가 적어지지만 매일 주행하는 운전자의 경우는 오히려 주행시간의 변화에 민감하게 반응하여 정보의 효과가 증대되는 모습



〈그림 6〉 비선형 유한기억능력(Case 4)

을 보여준다.

4) 통계적 검정

본 연구에서는 정보의 제공에 따른 영향을 살펴보기 위해 각 케이스별 운전자의 평균주행시간의 차이를 통계적인 검정을 통해 살펴보기로 한다. 귀무가설과 대립가설은 다음과 같다.

$H_0$  : 두 모집단의 주행시간은 차이가 없다.

$H_1$  : 두 모집단의 주행시간은 차이가 있다.

〈표 2〉 검정 상황 분류

구분		평균	표준 편차	
CASE 1	유한기억능력하에서 매일주행하는 운전자 비교	정보를 따름	80.54	5.63
		정보를 따르지 않음	89.76	11.47
CASE 2	유한기억능력하에서 격일로 주행하는 운전자 비교	정보를 따름	94.71	5.99
		정보를 따르지 않음	96.21	4.94
CASE 3	제공된 정보를 따르는 매일주행하는 운전자 비교	무한 기억능력	80.54	5.63
		유한 기억능력	81.49	3.33
CASE 4	유한기억능력하에서 정보에 따라 매일주행하는 운전자 비교	유입교통량 분산 조정전	80.54	5.63
		유입교통량 분산 조정후	82.65	5.29
CASE 5	유한기억능력하에서 정보에 따라 주행하는 운전자 비교	매일주행:100, 격일주행:100	80.54	5.63
		매일주행:150, 격일주행:50	87.85	4.62

〈표 3〉 검정결과

Welch-Aspin의 검정 결과							
구분	평균들의 동일성에 대한 Welch-Aspin 검정						
	t	w1	w2	w	자유도	기각역 (양방)	
CASE 1	-11.53	7.93	1.91	9.83	364	2.02	
CASE 2	-3.05	6.80	10.29	17.29	482	2.02	
CASE 3	-2.30	7.93	22.60	30.53	406	2.02	
CASE 5	-15.92	7.93	11.75	19.68	482	2.02	
독립 t 검정 결과							
구분	t	자유도	유의 확률 (양쪽)	평균 차	차이의 표준 오차	차이의 95% 신뢰구간	
						하한	상한
CASE 4	-4.34	498	.000	-2.11	.49	-3.07	-1.16

두 독립표본의 평균값을 비교하여 두 모집단의 평균이 동일한지를 검정하고자 할 경우 독립표본 검정을 위한 기본 가정인 모집단의 등분산성을 만족하지 못하는 경우 독립표본 t검정을 사용할 수 없게 된다. 이러한 경우 본 연구에서는 Welch(1947)와 Aspin(1948)이 고안한 Welch-Aspin 검정법을 사용할 수 있다.

운전자들이 각 상황에 따라 경험하는 주행시간의 평균과 표준편차를 정리하면 다음과 같다.

여기서 분산 조정 전후에 유한기억능력하에서 정보를 따르는 매일 주행하는 운전자(CASE 4)의 유의확률이 0.927로 0.05보다 크기 때문에 두 그룹의 분산이 같다는 가설은 기각되지 않아 결국 등분산 가정이 성립하지만, 나머지 경우에는 5%의 유의수준에서 두 집단의 평균이 같다고 볼 수 없음을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 CASE 4에 대하여는 독립표본 t검정, 나머지 경우에 대하여는 Welch-Aspin 검정을 사용하여 두 모집단간의 유사성을 검정하였으며 그 결과는 <표 3>과 같다.

검정결과 일단 유한기억능력하에서 매일 주행하는 정보를 따르는 운전자와 정보를 따르지 않는 운전자(CASE 1)는 평균 통행시간이 크게 상이한 것으로 나타났으며, 같은 상황에서 격일로 주행하는 경우(CASE 2)에도 평균 통행시간이 상이하지만 t값이 떨어지는 것으로 나타났다.

기억능력에 따른 변화를 살펴보면 매일 주행하면서 정보를 따르는 운전자들의 경우 기억능력의 설정에 따라 상이한 것으로 나타나 운전자의 기억능력에 따라 주행시간의 차이가 있음을 확인하였다.

또한 유입교통량의 분산 조정 전후의 변화를 살펴보면 유한기억능력하에서 교통정보에 따라 매일 주행하는 운전자의 주행시간은 동일하지 않은 것으로 나타났으며, 유한기억능력하에서 정보에 따라 주행하는 매일주행하는 운전자와 격일로 주행하는 운전자의 비율을 변화시킨 경우를 살펴보면 Welch-Aspin의 검정을 시행한 결과 마찬가지로 운전자의 주행시간이 동일하지 않은 것으로 나타났다.

## V. 결론 및 향후 연구

이상에서 살펴본 결과 도로의 특성 및 운전자 그룹의 특성에 따라 운전자의 학습 과정과 정보의 가치가 달라짐을 확인 할 수 있었다.

첫째로 주행시간함수가 선형식일 때에 비해 도로의

장에 요인에 따른 변화가 큰 도로라 할 수 있는 비선형을 가정할 경우 정보의 효용이 커지는 것을 알 수 있었다.

둘째로 경로에 유입되는 교통량의 변화가 적은 경우에는 격일로 운전하는 운전자에 비해 매일 운전하는 운전자의 정보에 대한 가치가 커지는 것을 확인하였다.

셋째로 매일 운행경험을 가지는 운전자의 비율이 증가하면 자신들의 유입증가로 인해 소요시간이 증가하게 되며 이는 운전자의 경로선택은 상호영향을 주고받는 관계임을 간접적으로 확인할 수 있었다.

본 연구 성과를 통해 기대되는 효과와 도로 교통분야에 활용할 수 있는 내용을 요약하면 다음과 같다.

교통네트워크 전체의 효율적인 운영을 도모해야 하는 공공 기관(public agency)이 네트워크 상에서 파악할 수 있는 것은 정량적인 데이터 및 상황이며, 운전자의 경로선택행동에 대한 판단이나 제공되는 정보에 따른 운전자의 학습메커니즘은 알 수 없다. 한편, 교통정보의 제공은 운전자의 경로선택행동에 대한 단기적 혹은 장기적으로 영향을 미치게 된다.

즉, 운전자의 경로선택 행동에는 개개인의 사적인 선호와 습관, 특성 등 사적인 정보(private information)를 포함하고 있으므로 직접적으로 파악할 수는 없지만, 링크의 교통량과 첨단장비를 통해 통계적으로 예측할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 완전정보를 가지지 못하는 교통환경에서의 운전자의 경로선택행동을 통해 간접적으로 그들의 선택 행동을 파악할 수 있을 것이다.

또한 공공 기관이 운전자의 경로선택행동을 간접적으로 파악할 수 있게 되면 교통정보 제공에 따른 전체 도로네트워크의 변화량 혹은 소요시간 등을 예측할 수 있게 되며, 네트워크 전체를 고려한 교통류의 조절 및 유도가 가능하게 되어 결과적으로 시스템 최적(System optimum)에 가까운 교통운용을 기대할 수 있을 것이다.

향후에는 운전자 그룹을 더욱 세분하고 시간대별 특성을 고려한 운전자 그룹의 구분을 통한 분석과 이러한 상황에서 정보 수신율의 변화에 대한 연구 등이 필요할 것이다.

## 참고문헌

1. 김문한 외(2003), 건설경영공학, 기문당.
2. 도명식(2005), 한정합리성하에서의 운전자의 경로선택과 학습행동, 대한토목학회논문집, Vol.25, 2D, pp.257~263.

