

진화 게임을 이용한 VMS 정보에 따른 운전자의 행태 연구

김주영^{1*} · 나성용² · 이승재² · 김영호³

¹ 서울시립대학교 융합도시연구센터, ² 서울시립대학교 교통공학과, ³ 한국교통연구원 교통안전도로본부

A Study of Driver's Response to Variable Message Sign Using Evolutionary Game Theory

KIM, Joo Young^{1*} · NA, Sung Yong² · LEE, Seungjae² · KIM, Youngho³

¹ Integrated Urban Research Center, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

² Department of Transportation Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

³ Department of Transport Safety and Highway, The Korea Transport Institute, Gyeonggi 411-701, Korea

Abstract

An objective of VMS(Variable Message Signs) is to make transportation system effective specifically for driver's path selection. The traffic solutions including a VMS problem can be modeled through Game Theory, however, the majority of the studies can not model various driver's response according to VMS information in game theory. So, this paper tries to analyze a driver's response according to VMS traffic informations through evolutionary game theory. We apply a behavior characteristics of driver to evolutionary game theory, then finds drivers are only accepting in case of the biggest pay-off, and if a traffic flow finds a balance over time, ratio of accepting information is converged as an evolutionary stable state gradually. Consequently, the strategy of the other drivers such as traffic problems can not be predicted accurately. In case, drivers repeat between groups and reasonable judgment by the experience, we expect that VMS can provide strategic information through evolutionary game theory.

VMS의 운영적 제공 목표는 운전자들의 경로선택을 통한 효율적인 시스템을 운영하는 것이다. VMS 정보 제공 문제를 포함한 교통문제들은 게임이론을 통해 모형화 될 수 있지만 대다수의 연구들은 게임이론을 통하여 동일한 정보를 제공받더라도 운전자의 반응이 다양하게 나타나는 점을 반영하지 못하였다. 본 연구는 VMS교통정보에 대한 운전자들의 정보에 대한 반응을 진화적 게임모형을 활용하여 분석하고자 하였다. 실제 소통정보 및 VMS 정보 제공 이력을 기초로 VMS정보에 따른 운전자들의 행동특성을 진화 게임이론에 적용해보았다. 분석결과 운전자들의 경로 선택 비율은 VMS정보를 통한 기대통행시간과 진입교통량에 따라 달라지는 보수에 의해 결정되었다. VMS 정보는 진화적 게임의 보수에 영향을 미친다. 운전자들이 최초 어떠한 비율로 경로를 선택하더라도, 주기가 지남에 따라 진화적으로 안정한 상태로 수렴될 수 있는 것을 확인하였다. 또한 VMS정보가 과도한 통행시간이나 과소 통행시간을 제공할 경우 진화적으로 안정화되지 못하여 혼란이 가중될 수 있는 것으로 분석되었다. 결론적으로 교통문제와 같이 다른 운전자의 전략을 정확히 예측할 수 없고, 운전자 집단 간의 반복, 경험에 의해 합리적인 정보판단을 수행하는 경우, 진화 게임이론을 통해 전략적인 VMS 정보를 제공할 수 있을 것이라 기대할 수 있을 것이다.

Keywords

ATIS, evolutionary game, game theory, VMS

여행자 정보시스템, 진화적 게임, 게임이론, 교통정보제공, 내쉬균형, 이용자 평형, 시스템 최적

* : Corresponding Author
trafficplan@naver.com, Phone: +82-2-6490-5661, Fax: +82-2-6490-2819

Received 24 July 2014, Accepted 23 October 2014

© Korean Society of Transportation
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

1. 연구의 배경 및 목적

교통망의 효율적인 운영과 혼잡완화를 위하여 다양한 여행자 정보시스템 (Advanced Traveler Information System, ATIS) 기법이 활용되고 있다. ATIS는 통행 출발시간을 변경하거나, 통행수단을 소통이 원활한 통행 수단을 선택할 수 있도록 유도하거나, 이미 통행중인 운전자의 경로 선택을 유도할 수 있는 교통정보 시스템이다. 그 중 도로전광표지(Variable Message Sign, VMS)는 운전자에게 전방의 소통상황, 이벤트 발생여부, 기타 안내 및 홍보를 위한 정보를 직접적으로 제공하는 시스템으로, 운전자의 반응이 즉각적으로 나타나는 적극적인 의미의 교통정보 제공시스템이다.

교통정보는 운전자의 경로선택에 영향을 미치는 다양한 정보를 포함한다. 소통정보 및 지·정체정보, 교통사고, 공사정보 및 행사, 날씨 정보 등 운전자의 경로선택에 영향을 미칠 수 있는 모든 정보를 의미한다. 도로전광표지를 활용한 교통정보 제공은 운전자가 보다 효율적인 경로를 선택할 수 있도록 도울 수 있다.

실시간 교통정보는 운전자들이 보다 나은 경로를 선택하여 도로를 효율적으로 사용할 수 있도록 하고, 네트워크 전체의 편익을 증가시킬 수 있다.(Kim, 2005) 운전자는 경험적 지식과 새로운 정보를 활용하여 경로를 선택한다. 그러나 운전자 개개인의 경험이 다르고, 새로운 정보를 활용하는 수준이 다르기 때문에 운영자 입장에서 운전자들의 통행 경로를 유도하는 것은 쉬운 일이 아니다. 실제 교통흐름 측면에서는 단순히 교통정보를 제공하는 것에 그치지 않고 어떤 정보를 제공하느냐에 따라 운전자는 다양한 반응을 보일 수 있기 때문에, VMS를 통한 정보제공은 몇 가지 위험부담을 가지고 있다. 그 위험부담은 크게 과도반응과 통행집중 현상이라고 할 수 있다(Kwon et al., 2004).

VMS 교통정보 제공은 운영적 측면에서 네트워크 전체의 운영적 효율성을 반영할 수 있는 요소이기 때문에 중요한 연구주제라고 할 수 있다. 특히, 교통류 전방에 정체가 발생하였을 경우 VMS정보를 통하여 운전자의 통행경로를 유도하여 네트워크의 혼잡비용을 최소화 시킬 수 있을 때 운영측면의 효율성을 달성 할 수 있을 것이다.

따라서, VMS교통정보는 이러한 운전자들의 행동특

성을 반영한 교통정보 제공전략을 제시할 필요가 있다. 이를 위해서는 VMS 교통정보가 운전자의 경로를 선택에 미치는 영향을 분석하는 연구가 필요하다.

기존의 VMS교통정보에 따른 경로 전환율을 분석한 연구결과를 살펴보면 실제 교통정보를 확인하고 경로를 선택하는 비율은 매우 다양한 것으로 분석되었다. Cummings(1994)의 연구결과는 4-7%의 운전자만 VMS 정보를 따라 경로를 변경하는 것으로 분석되었으며, Lindkvist(1995)의 연구보고서에서는 정보수준에 따라 5-25%의 경로를 전환한다는 결론을 확인할 수 있었다. Ramsy and Luk(1997)는 차선이 통제되는 상황에서도 30% 이상 전환율이 높아지지 않는다는 연구결과를 제시하였다. 그 외의 수많은 연구결과를 통하여 VMS정보가 경로전환에 미치는 영향은 분석방법이나 상황에 따라 다른 것으로 분석되었다. 왜냐하면, 기존의 연구들은 실제 소통정보 분석방법이 아닌 방법으로 Revealed Preference(RP)와 Stated Preference(SP) 조사법을 통해서 VMS 정보에 따른 이용자의 경로 전환율을 분석하여 적용하고 있기 때문이다. 특히 이러한 연구결과는 실제의 교통상황이 아닌 상태에서 과도 혹은 과소한 경로 전환율을 나타낼 수 있어 신중한 접근이 요구된다.

본 논문에서는 진화적 게임이론(Evolutionary game theory)을 통하여 VMS정보제공 전략문제를 모형화하고자 한다. 왜냐하면 교통문제에서 이용자 평형과 시스템 최적사이의 균형점을 쉽게 파악할 수 없고, 다른 운전자의 전략을 정확히 예측할 수 없기 때문이다. 진화적 게임이론은 집단 속에서 제한된 합리성을 가지는 경기자가 동일한 게임을 반복하면서 전략을 바꾸어 선택을 하는 과정을 통해 시간의 흐름에 따른 전략선택 변화를 모형화 하는 것이다. 정보제공 시 교통상황이 어떻게 전개되고 있는지에 따라 운전자는 다양한 반응을 모형화 할 수 있어 더욱 현실적이라 판단할 수 있다.

기존 문헌 고찰

게임이론은 경쟁주체가 상대방의 행동을 고려하여 자신의 이익을 효과적으로 달성하기 위한 최선전략(best strategy)을 어떻게 합리적으로 결정할 것인가를 수학적으로 분석하는 이론이다. 이를 교통문제를 해결하기 위해 접근한 연구는 다음과 같다.

Matjaz Perc(2007)는 교통류에 대한 진화된 게임

이론의 영향을 연구하였다. 운전자들이 항상 정해진 규칙을 준수하지는 않기 때문에 운전자의 행동 패턴을 정의하는 게임이론의 도입은 유효하다 할 수 있다. 개인이 일련의 시간 내에 자신의 전략을 변경할 수 있다는 사실과 진화적 죄수의 딜레마 게임은 각 운전자끼리 네트워크상에서 협력 또는 배신을 선택할 수 있도록 도와준다. 즉, 논문의 연구 결과는 교통체증의 조기발생은 "bending the law"의 결과로 나타나는 것이지 교통시스템의 문제는 아니라고 주장한다.

He et al.(2010)은 게임이론은 복잡한 교통 분석과 다수의 교통문제를 해결하기 위한 강력한 도구라고 말한다.

Fisk(1984)은 교통시스템 모델링에 대한 몇 가지 문제점과 두 개의 게임이론 모델(비협조적 내쉬모델, 스타크 켈버그 게임)사이의 연관성에 대해 논의하고 교통문제의 솔루션 알고리즘의 잠재적인 역할로 게임 이론을 소개한다.

Wang(2012)은 교통 네트워크의 취약점은 강력한 충격과 혼란을 견딜 수 있는 네트워크의 능력과의 상관관계로 설명한다. 이 논문은 이런 교통 네트워크의 취약점을 난-제로섬게임과 조합게임이론을 바탕으로 설명하고 있다.

Lee H. H.(1995)은 교통 무질서와 혼잡 및 이의 단속에 따른 운전자와 경찰의 문제 등의 복잡한 도시교통문제를 게임이론을 통해 분석하였다. 운전자는 목적지에 최소시간, 최소비용으로 가기를 원한다. 또한 자신의 교통행위가 다른 운전자의 교통행위에 의해 결정되기도 한다. 이 논문에서는 각 운전자의 효용은 다른 운전자의 선택에 영향을 받는 상호의존적 선택의 관계에 있기 때문에 게임이론적인 분석이 가능하다고 말하고 있다.

Kim et al.(2004)은 혼잡통행료 산정문제를 네트워크 설계문제로 보고 통행배정문제와 혼잡통행료 산정 최적화 문제가 결합된 바이레벨 문제(Bi-level Problem)를 해결하기 위한 모형을 개발하였다.

Choi Y. H.(2010)은 교통정보제공 및 가변요금 결정문제를 네트워크 설계문제로 보고 통행배정문제와 교통정보제공, 통행배정문제와 가변요금 최적화 문제가 결합된 이중 바이레벨 문제를 해결하기 위하여 Stackelberg 게임이론을 적용한 민감도 분석 모형을 적용하였다. 이 논문에서는 편향되는 교통량 집중을 해소시키기 위해 교통정보의 제공만으로는 부족하다고 보고 이러한 한계를 보완하기 위해 가변요금을 추가로 적용하는 방안을 검토하였다.

Jang J. A.(2002)는 ITS의 도입으로 VMS 시스템은 주행중 실시간 교통정보를 제공하는 중요한 정보제공매체가 되었다고 말한다. 본 연구는 동적 VMS 교통정보의 수준을 결정하기 위한 게임이론의 모형화를 다루고 있고 운전자의 경로선행태를 고려한 정보제공전략에 대한 모델을 구성하였다. 모델 적용 결과 최적운영의 해는 사용자최적의 해의 패턴을 따르고, 시스템 최적의 해보다는 통행시간이 작게 나타나는 해가 도출되었다. 이 결과는 운전자와 운영자의 의사결정과정에서 내쉬 균형이라는 타협안을 교통정보제공시스템의 운영목적으로 할 수 있다는 결론을 제시하는 것이다.

Lee et al.(2004)은 연구의 방법으로 신호게임과 베이시안 게임을 사용하였고, 운영자, 운전자의 통행비용이 최소가 되는 최적의 내쉬 균형을 찾고자 하였다. 논문의 목적은 통행 배정의 교통 매크로 이론을 게임이론에 적용하여 교통 운영자 입장에서 총 사회적 비용이 최소가 되는 최적의 VMS 제공 전략을 찾아 교통 운영 관리의 효율성을 증진시키는 것이다. 이와 같은 게임 이론을 통해 최적의 VMS 전략 모형을 개발하고 실제 통행비용 감소의 효과를 분석하였다.

VMS 정보 제공 문제를 포함한 교통문제들은 게임이론을 통해 모형화 될 수 있지만 거의 대다수의 연구들은 교통문제를 해결하기 위한 게임이론에서 동일한 정보를 제공받더라도 운전자의 반응이 다양하게 나타나는 점을 모형화하지 못하였다. 왜냐하면 교통정보라 함은 단순히 교통정보를 제공받는 것의 유무의 문제가 아니라 어떤 정보를 제공하느냐, 정보제공 시 교통상황이 어떻게 전개되고 있느냐에 따라 운전자의 다양한 반응을 볼 수 있기 때문이다. 게임이론에서는 경쟁적 상황에 놓여진 경기자(player), 상대의 행동 및 상태의 변화에 대해 경기자가 취하는 전략(strategies), 그리고 경기자의 전략에 따라 달라지는 게임의 결과로서 각 경기자의 이익을 나타내는 보수함수(payoff function)을 토대로 모형을 구축하게 된다. 전통적 게임이론을 교통문제에 그대로 적용하기에는 비현실적인 가정에 따른 문제점이 존재한다. 모든 경기자가 합리적인 가정을 한다는 가정에서의 논의가 전개될 수 있는데, 모든 경기자는 다른 경기자의 전략 선택에 대한 정확한 기대를 하여야 하고, 동시에 각 경기자의 전략선택은 자신의 기대에 대한 최적대응이어야 한다는 것이다. 여기에서 게임이 교통문제와 같이 상황적, 시간적 특수성을 띠고, 교통류 집단속에서 경로선택과 같은 개개인의 선택 문제를 다루는 경우 개인이 다른 경

기자의 전략에 대해서 정확히 예측한다는 합리적 기대와 가정은 어려운 한계점이 존재한다.

본 연구에서는 기존연구와 달리 서로 다른 두 전략을 사용하는 서로 다른 집단과 집단의 게임을 모형화 하고자 하였다.

이론적 검토

1. 게임 이론

게임이론이란 게임 상황에서 어떻게 합리적으로 전략적인 행동을 취해야 하는 것인가를 연구하는 합리적 행동이론이다. 게임 상황이란 자신의 행동뿐만 아니라 타인의 행동까지 고려해서 결정을 내려야하는 수많은 상황을 적용할 수 있다. 자신의 행동과 타인의 행동은 상호 영향을 주고받는 관계에 있을 때, 이를 게임 상황이라고 할 수 있다.

게임이론은 복잡한 전략적 상황을 고도로 단순화된 틀로 이해하려는 모형 중 하나로 개인들의 행동이 결합하여 어떤 결과를 도출하는 경우, 의사 결정자 그룹간의 상호관계를 모형화하는 틀을 제공한다(Park, 1991).

이러한 게임 상황을 분석하기 위한 도구인 게임이론의 구성요소로는 경기자(Player), 전략(Strategy), 효용(Utility) 또는 보수(Payoff) 세 가지가 있다.

경기자는 게임 상황에서 의사를 결정하는 주체이다. 전략은 게임 중에 의사결정을 내릴 수 있는 선택 상황을 의미하는 것이고, 보수는 각 경기자가 전략을 선택을 통하여 얻게 되는 효용의 크기를 의미한다.

게임이론에서의 해의 개념은 균형(Equilibrium)으로 부르고 있다. 게임에서의 균형은 경기자가 선택할 수 있는 전략 중 최대의 보수를 발생하는 전략을 선택하는 것으로 설명할 수 있다. 하지만, 게임이론은 경쟁자가 존재하는 상황에서 상대방의 결정과 자신의 의사결정이 상대방의 보수에 영향을 미치기 때문에, 상대방과 자신이 모두 만족할 수 있는 그런 상태의 전략들을 선택하는 것이기 때문에 게임이론에서는 해(Solution)이라는 표현이 아닌 균형(Equilibrium)이라는 표현이 해의 개념으로 적절한 것이다.

2. 진화적 게임

진화적 게임은 균형 전략을 찾아가는 과정을 다윈의

진화론을 응용한 것이다. 주어진 환경에서 보다 적합한 유전자를 가진 개체가 그렇지 않은 개체보다 더 많은 자손을 갖게 됨으로써, 시간이 지남에 따라 그 환경에 적합한 유전자를 가진 개체의 수가 점 점 늘어나게 되는 과정을 묘사한 게임이론이 진화게임이론(Evolutionary game theory)이다. 이 이론에서 분석되는 게임 모형은 경기자가 속한 집단의 구조와 함께 경기자 자신이 속한 집단으로부터 선발되고 결합되는 방식도 고려하는 집단 게임모형(population game model)이라는 점에서 보다 복잡한 구조를 갖는다. 진화게임이론은 게임이론을 이용해 각 개체들의 전략에 따라 다른 개체와 상호작용을 통해 개체수의 변화를 나타낸다. 이러한 상호작용 속에서 보다 우월한 전략을 보유한 개체의 묘사를 통해 시간이 지남에 따라 전략이 어떻게 서로 영향을 주는가에 초점을 두고 있다. 진화게임은 진화적 안정전략(Evolutionary Stable Strategy)과 부모의 전략선택을 자식은 유전적으로 그대로 물려받는다라는 원리에 기초한 가변복제량(Replicator Dynamic)으로 설명가능하다(Kim, 2013).

진화적 게임이론에서 가장 중요한 개념은 진화적 안정성이란 개념이다. 진화적으로 안정하다는 말은 집단 구성원들이 전략 A를 선택하고 있을 때, 전략 A와 다른 전략을 가진 개인이 이 집단에 침투하지 못한다는 것을 의미한다. 만일 다른 전략을 사용하는 개인(돌연변이)가 집단에 침투하여 A와 다른 전략이 확산된다면 전략 A는 진화적으로 안정하지 못한 것이다.

진화과정을 표현하는 두 가지 진화개념은 돌연변이와 자연선택이다. 돌연변이는 끊임없는 변화의 가능성을 의미하고 자연선택은 진화가 발생하는 방향을 결정하는 과정이다. 돌연변이는 시스템에 발생하는 사건, 다른 전략이며, 자연선택은 돌연변이 전략이 확산 또는 소멸하는 과정을 설명한다. 복제자 동학은 이러한 상태의 변화과정을 묘사하는 간단한 동태 방정식이다(Choi, 2010).

복제자 동학은 특정전략을 선택할 때의 보수가 시스템의 평균보수보다 높다면 그 전략은 유전적으로 확산될 것이며, 그 반대의 경우 소멸하게 될 것이라는 가정을 바탕으로 수식으로 표현한 것이다.

게임에 참여한 경기자가 선택한 안정된 전략을 A^* , 임의의 돌연변이 전략 B 에 대하여 돌연변이 비율을 p 라고 할 때, $f(A^*|B)$ 는 B 전략에 대응하여 A^* 전략을 선택한 보수함수로 정의한다면, 식(1)과 같은 식을 만족한다.

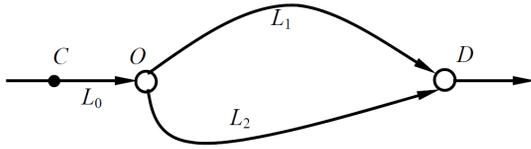


Figure 1. Sample network

	s_1	s_2
s_1	u_{11}	u_{12}
s_2	u_{21}	u_{22}

Figure 2. Payoff matrix

$$J(A^*(1-p)A^*+pB) > J(B(1-p)A^*+pB) \quad (1)$$

여기서, $(1-p)A^*+pB$ 는 돌연변이가 일어난 후의 전략 A 와 B 를 선택한 집단을 의미한다. 즉 안정적인 전략 A^* 는 어떤 전략 B 를 선택한 보수보다 항상 크기 때문에 진화적으로 안정적인 전략이라고 할 수 있다.

VMS 정보에 대한 운전자의 반응을 진화적 게임이론에 적용한 연구에서 전략에 따른 진화적 평형상태는 다음과 같이 보수행렬에 의해 4가지로 구분할 수 있다(Li Zhenlong, 2011).

위와 같이 O에서 D로 이동하는 교통류를 가정하고, 지점 C의 VMS 메시지를 확인하고 경로 L_1 과 L_2 를 선택한다고 할 때, 게임 참여자가 얻을 수 있는 보수행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

서로 다른 두 전략 s_1, s_2 는 각각 경로 L_1 을 선택하는 전략과 경로 L_2 를 선택하는 전략으로 구분할 수 있다. 전략 s_1 과 전략 s_1 이 마주할 때 전략 s_1 을 선택한 집단의 보수를 u_{11} 이라고 할 수 있으며, 전략 s_1 과 전략 s_2 가 마주할 때, 전략 s_1 을 선택한 집단의 보수가 u_{12} 이며, s_2 를 선택한 집단의 보수가 u_{21} 이다. 전략 s_2 와 s_2 가 마주할 때, 전략 s_2 를 선택한 집단의 보수가 u_{22} 이라고 설명할 수 있다.

진화는 의사결정 시간과 선택시간에 대하여 연속적임을 가정한다. 집단 내에서 전략 1을 선택하는 운전자의 비율은 $x(k)$ 이라고 한다면 $x(k)$ 의 복제자 동학은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dk} = x(U_{s_1} - \bar{U}) = x(1-x)(U_{s_1} - U_{s_2}) \quad (2)$$

전략 1과 2를 사용하는 경우에 얻게 되는 보수는 각각 식(3)과 식(4)으로 나타낼 수 있다.

$$U_{s_1} = xu_{11} + (1-x)u_{12} \quad (3)$$

$$U_{s_2} = xu_{21} + (1-x)u_{22} \quad (4)$$

이때, 집단 전체의 평균보수는

$$\bar{U} = xU_{s_1} + (1-x)U_{s_2} \quad (5)$$

로 표현 가능하다. 이때의 복제자동학방정식은

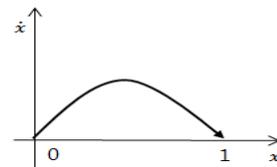
$$\begin{aligned} \dot{x} &= x(U_{s_1} - \bar{U}) = x(1-x)(U_{s_1} - U_{s_2}) \\ &= x(1-x)[x(u_{11} - u_{21}) + (1-x)(u_{12} - u_{22})] \quad (6) \end{aligned}$$

전략 1을 선택하는 운전자 비율의 변화량 $\frac{\Delta x}{\Delta k}$ 는

$$\begin{aligned} &= (1-2x)[(u_{12} - u_{22}) + x(u_{11} - u_{21} + u_{22} - u_{12})] \quad (7) \\ &+ x(1-x)(u_{11} - u_{21} + u_{22} - u_{12}) \end{aligned}$$

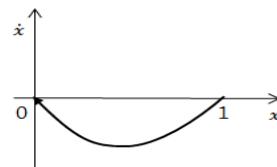
$\dot{x} = 0$, $\frac{\Delta x}{\Delta k} < 0$ 일 때, 진화적으로 안정한 상태라고 판단 할 수 있다. 시스템 전체의 진화적 안정은 다음과 같이 보수행렬에 따라 4가지 단계로 구분 할 수 있다.

- i) $(u_{11} > u_{12} \text{ and } u_{21} > u_{22})$ 일 때, 전략 s_1 은 다른 전략에 우월전략으로, 전략 s_1 만이 진화적으로 안정하다.



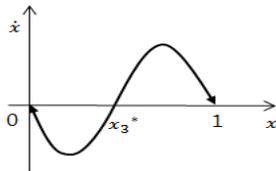
$$(u_{11} > u_{12} \text{ and } u_{21} > u_{22})$$

- ii) $(u_{11} < u_{12} \text{ and } u_{21} < u_{22})$ 일 때, 전략 s_2 는 다른 전략에 우월전략으로, 전략 s_2 만이 진화적으로 안정하다.



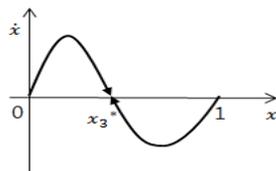
$$(u_{11} < u_{12} \text{ and } u_{21} < u_{22})$$

iii) ($u_{11} > u_{12}$ and $u_{21} < u_{22}$) 일 때, 최초 S_1 을 선택할 확률이 $x^* = \frac{u_{22} - u_{12}}{u_{11} - u_{12} - u_{21} + u_{22}}$ 보다 클 때, 세대가 지날수록 전략 S_1 만이 우월전략으로 생존하며, x^* 보다 작을 때, 전략 S_2 가 우월전략으로 선택된다.



$$(u_{11} > u_{12} \text{ and } u_{21} < u_{22})$$

iv) ($u_{11} < u_{12}$ and $u_{21} > u_{22}$) 일 때, 전략 S_1 과 S_2 가 $\left\{ \frac{u_{12} - u_{22}}{u_{12} - u_{11} + u_{21} - u_{22}}, \frac{u_{21} - u_{11}}{u_{12} - u_{11} + u_{21} - u_{22}} \right\}$ 의 비율의 혼합 전략을 유지할 때, 진화적으로 안정적이다.



$$(u_{11} < u_{12} \text{ and } u_{21} > u_{22})$$

Figure 3은 iv)의 경우 초기값에 관계없이 주기가 진행함에 따라 하나의 안정화된 비율을 탐색할 수 있음을 의미한다. i, ii, iii 은 각각 동일한 그래프를 추정해볼 때, 진화적 안정화된 비율이, 1로 수렴하거나, 0으로 수렴, iii)의 경우에는 초기선택확률이 높은 경우에는 1로,

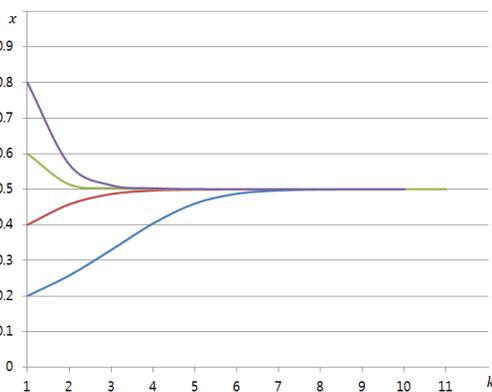


Figure 3. Evolutionary curve(iv)

낮은 경우에는 0으로 양방향으로 수렴하는 그래프로 표현 된다.

운전자는 VMS 교통정보를 수용하거나 거부하는 전략으로 자신의 경로를 선택한다. 진화적 게임이론에 따라 운전자는 자신의 보수가 큰 경우에만 정보를 받아들이고, 받아들이는 비율은 시간이 지남에 따라 진화적 안정 상태로 수렴하게 된다. 이러한 특성을 활용하여, 전략적인 VMS 교통정보를 제공할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

모형의 구성

1. 분석의 개요

진화적 게임이론을 이용한 VMS 정보에 따른 운전자 행태연구를 위하여 서울 도시고속도로 구간의 VMS 정보와 교통량 자료를 활용하여 분석을 수행하였다.

분석구간은 성산대교 남단에서 여의상류(한강대교남단)구간에 대하여 강남방향의 교통류를 분석대상으로 선정하였다. VMS는 성산대교와 양화대교 사이에 위치한다. 운전자는 양화대교 남단을 지나 여의도에서 노들로로 경로를 전환 할 수 있으며, 노들로 운전자는 여의2교 근처에서 올림픽대로로 합류가 가능하다.

분석기간은 2014.01-2014.04까지 관측된 지점 검지기 데이터의 5분 단위 관측 자료를 활용하였다.

분석구간에 사용된 VMS정보는 지체수준에 따라 구간과 통행시간 정보와 사고 및 공사, 단속정보를 제공하였다.

본 연구에서는 분석대상지역인 올림픽대로와 노들로의 VMS 교통정보와 소통자료를 활용하여 진화적 안정 상태를 확인할 수 있다. 진화적 게임을 적용하기 위해서 게임의 설계가 필요하다. 또한, 다음과 같은 게임의 규칙을 설정하였다.



Figure 4. Analysis site

Table 1. VMS message

Information	VMS Information		
	Line	Travel time and	Traffic conditions information
Time	Nodeul line	Nodeul line - Seongsan Han river About 6min.	
	Olympic line	Olympic Expressway - 63Bldg About 7min.	
Difficulty	Nodeul line	Nodeul line - Seongsan Han river About 7min.	Difficulty of Yeoui upstream Expansion Interrupt Disabled
	Olympic line	Olympic Expressway - 63Bldg About 9min.	
Delay Difficulty	Nodeul line	Delay of Nodeul line - 63Bldg in front of the National Assembly About 6min.	Nodeul line - Sungsan Han river About 10min.
	Olympic line	Difficulty of Yeoui upstream Expansion Interrupt Disabled	Olympic Expressway - 63Bldg About 13min.
Delay Congested	Nodeul line	Delay of Nodeul line - 63Bldg in front of the National Assembly About 9min.	Difficulty of Yeoui upstream Expansion Interrupt Disabled
	Olympic line	Congest of Olympic Expressway - Yanghwa Hanriver About 1min.	Olympic Expressway - 63Bldg About 14min.
Congested Congested	Nodeul line	Congest of Nodeul line - Seoungsanin front of the National Assembly About 12min.	Nodeul line - Seongsan Hanriver About 23min.
	Olympic line	Congest of Olympic Expressway - Gayang Hanriver About 25min..	
Delay Congested Difficulty	Nodeul line	Delay of Nodeul line - Seongsan 63Bldg About 13min.	Nodeul line - Seongsan Hanriver About 15min.
	Olympic line	Congest of Olympic Expressway - Gayang Hanriver About 28min.	Difficulty of Yeoui upstream Expansion Interrupt Disabled
Etc.		Bad loading, Uncovered truck on a constant alert Car accident - Blocking Thrid lane	Thick fog - Drive Slowly

[진화적 게임의 기본 설정]

- ① 경기자는 올림픽대로 이용자이며, 성산대교에서 양화대교 방향으로 통행하는 운전자들이다.
- ② 경기자는 자신의 보수를 최대하기 위한 전략을 선택한다.
- ③ 경기자는 올림픽대로에서 진입하여 VMS 정보를



Figure 5. Network

확인한 후, 올림픽대로 경로를 유지하는 전략(전략1)과 노들로로 경로를 변경하는 전략(전략2)를 선택할 수 있다.

[본 게임의 규칙]

- ① 경기자는 모두 VMS 정보만을 이용하며, 다른 정보는 알 수 없는 것으로 제한한다.
- ② VMS정보는 교통량 수준에 따른 소통시간 정보로 주어진다.
- ③ VMS 정보를 제공받은 올림픽대로의 운전자는 노들로로 경로를 전환할 수 있지만, 노들로 운전자 올림픽대로로의 진입이 불가능 하다. 노들로에서 올림픽대로 진입은 본 분석 구간 이후에 가능하므로 본 분석구간에서는 불가능하다.
- ④ VMS 정보는 단순 소통정보, 지체정보, 정체정보, 유고상황(사고 및 공사) 4가지로 구분하였다. 그 이외의 VMS 정보는 분석에서 제외하였다.

2. 모형의 해법

본 게임의 보수는 올림픽대로와 노들로의 통행시간을 기준으로 설정하였다. 올림픽대로와 노들로의 링크통행 시간을 산출하기 위하여 통행저항함수를 설정하였다. 통행저항 함수는 BPR와 코니칼 함수의 분석결과를 비교 하였으며, 최종적으로 BPR함수를 기준으로 통행시간을 산출할 수 있었다.

[통행비용 함수 설정]

게임의 보수를 산정하기 위하여 올림픽대로와 노들로의 통행비용함수(Volume delay function)을 설정하였다. 통행비용함수를 통하여 각 링크의 보수가 결정되기 때문에 통행비용 함수의 설정은 매우 중요한 과정이다.

VDF의 유형으로는 국내에 적용되고 있는 BPR 함수 (Bureau of public roads, 1964), 코니칼함수(Heinz, 1990)가 있으며, 이외에 다양한 함수들이 Irwin et al.

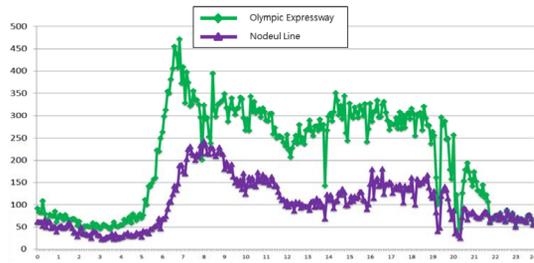


Figure 6. Volume

(1965), Smock(1962), Mosher(1963), Soltman (1965), Overgaard(1967), Dafermos(1967), Steenbrink(1974), Davidson(1966), Florian(1976) 등에 의해 제안된바 있다. 고속도로 및 준연속류의 통행비용 함수는 BPR 함수가 코니칼 함수보다 더욱 적합한 것으로 분석되었다(Kim et al., 2010).

본 분석에서는 2013년 1월부터 2014년 4월의 관측 교통량 자료를 활용하였으며, 최소자승법을 이용하여 BPR 함수의 파라메타 α 와 β 를 추정하였다.

교통량 분석 자료는 5분 단위 집계자료로 도로용량은 5분 용량을 적용하여, 5분 교통량 관측자료를 토대로 올림표대로 450(대/5분), 노들로 200(대/5분)으로 설정하였다.

파라메타의 검증은 평균제곱근측정(Root Mean Squared Error, RMSE)과 Theil의 부등계수(Theil's Inequality Coefficient)를 적용하였다. Theil의 부등계수 U 값이 0에 가까우면, 추정치가 관측치에 가까움을 나타내며, 1이나 그 이상이 되면, 추정치가 적합하지 않음을 의미한다.

i) RMSE

$$RMSE = \sqrt{\sum_i \left(\frac{e_i - o_i}{n} \right)^2}$$

e_i : 링크 i 의 추정교통량

o_i : 링크 i 의 관측교통량

n : 관측수

Table 2. BPR Function parameter

Parameter	Olympic Expressway			Nodeul line		
	value	RMSE	U	value	RMSE	U
t_0	42.4			43.8		
α	0.668	6.271	0.064	0.686	9.574	0.084
β	1.911			1.991		

ii) Theil's 부등계수

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}}$$

[보수행렬 설정]

보수는 각 전략과 전략이 동시에 발생했을 때 각 전략을 선택한 집단이 얻는 이득을 의미한다. 앞서 설명한바와 같이 전략 1과 전략 1 동시에 발생한 경우, 전략 1을 선택한 집단의 통행시간은 VMS 정보를 확인한 운전자들의 경로전환이 발생하지 않은 상황의 통행시간으로 추정할 수 있다. 또한 전략 2와 전략 2가 동시에 발생한 경우의 통행시간은 VMS정보를 확인한 운전자들이 둘다 노들로로 경로를 전환하는 상황으로 설명이 가능하다. u_{12} , u_{21} 의 보수는 전략 1과 전략 2가 발생할 때, 각 전략을 선택한 운전자들이 기대할 수 있는 통행시간으로 설명할 수 있다.

전략 1을 선택하는 운전자는 전략을 선택하는 운전자 비율에 따라 모든 운전자가 전략 1을 선택할 때의 최대 통행시간과 자유통행시간 사이의 통행시간을 예상할 수 있다. 또한, VMS정보를 제공받았을 때, 운전자는 VMS 상의 통행시간과 최대 통행시간사이의 통행시간을 기대한다. 예를 들어, 경로 1의 자유통행시간이 1분이고, 100대의 차량이 통과할 때, 10분이 걸린다고 할 때, 운전자는 경로 1을 선택하는 차량수에 따라 1분에서 10분 사이의 통행시간을 기대할 수 있을 것이다. 이때, 경로 1의 통행시간이 5분이라는 정보를 제공받는다면, 운전자는 경로 1을 선택할 때의 예상통과시간은 5분에서 10분 사이의 통행시간을 기대하게 된다. 이를 본 분석모형의 보수행렬로 표현하였다.

앞에서 설명한 식(3)과 식(4)를 적용할 때, 경로 1을 선택한 운전자가 기대할 수 있는 통행시간은 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$U_{S_1} = x \times 10 + (1-x) \times 5$$

3. 복제자 동학을 통한 진화적 안정성

올림픽대로를 이용하는 운전자 중에서 전략 1을 선택한 비중이 최소상태에서 출발하여 복제자 동학에 의해 지배되는 동학적 경로를 따라 움직이는 과정을 개인들이

Table 3. Evolutionary state test(1)

Entering Traffic	VMS Olympic (s)	VMS Nodeul line (s)	Pay				Evolutionary stability
			U_{11}	U_{12}	U_{21}	U_{22}	
200	43	48	-9.80	-1.76	-3.60	-11.00	0.598
200	44	47	-9.80	-3.96	-5.17	-11.00	0.603
200	45	46	-9.80	-4.40	-4.70	-11.00	0.564

Table 4. Evolutionary state test(2)

Entering Traffic	VMS Olympic (s)	VMS Nodeul line(s)	Pay				Evolutionary stability
			U_{11}	U_{12}	U_{21}	U_{22}	
250	49	45	-13.25	-9.80	-2.25	-15.25	0.331
275	49	46	-15.40	-9.80	-3.45	-17.88	0.403
300	49	47	-17.40	-9.80	-4.70	-20.70	0.462

혼합전략 내쉬 균형을 찾는 가는 과정으로 이해 할 수 있다. 임의의 교통량을 가정하여 각 교통량 수준에 따라 진화적으로 안정한 수준의 균형 전략을 찾아가는 과정을 추정해 보았다.

진입교통량이 200(대/5분)으로 동일한 상황에서 올림픽대로와 노들로의 소통정보를 각각 다르게 적용해보았다. 또한, 교통량이 증가함에 따라 노들로의 통행시간이 증가하는 상황을 적용해보았다. VMS 소통정보는 분석구간에 대한 통과시간을 적용하였으며, 단위는 초단위로 제시하였다. 실제 VMS정보는 소통상황에 따라 소통구간과 소통시간으로 정보를 제시하지만, 보수를 산정하기 위하여 동일구간에 대한 소통시간으로 환산하여 적용하였다.

우선, 진입교통량을 200(veh/5min)으로 고정하고, 올림픽대로와 노들로의 VMS 통행시간을 각각 다르게 적용해보았다. VMS 정보가 올림픽대로의 통행시간 43(초), 노들로 통행시간을 48(초)로 제공하였을 때, 주기가 지나도 하나의 값으로 수렴하지 못하고, 0.598을 중심으로 진동하는 결과를 나타내었다.

VMS정보를 44(초), 47(초)의 정보를 제공하고 있을 때, 0.603에서 진화적으로 안정한 것으로 분석되었으며, 43(초), 46(초)의 정보를 제공하고 있을 때, 0.564에서 진화적으로 안정한 것으로 분석되었다. 이는 올림픽대로의 동일한 진입교통량에 대해서 올림픽대로의 통행시간이 44초, 45초일 때, 올림픽대로를 선택하는 비율이 60.4%, 56.4%일 때, 진화적으로 안정적인 교통류를 나타낸다는 것을 의미한다. 올림픽대로의 통행시간이 43초일 때 진동하여 수렴하지 않는 결과는 전략사이의 우위가 불분명한 경우라고 판단할 수 있다.

올림픽대로의 혼잡을 가정하고 진입교통량이 계속 증가하는 상황을 가정하고, VMS정보는 노들로의 통행시

Table 5. Evolutionary Curve(1)

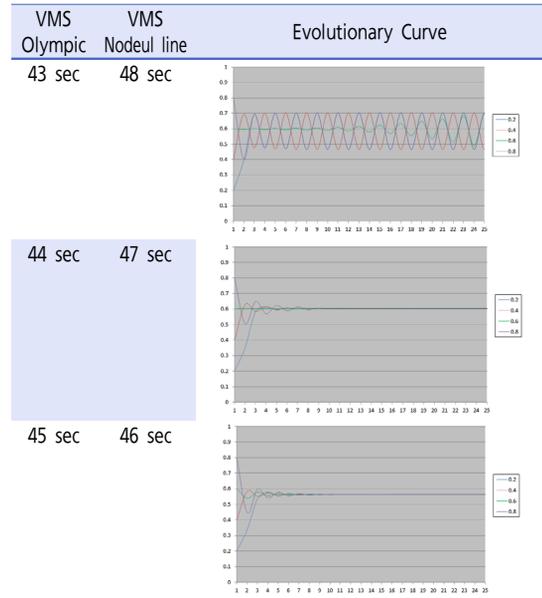
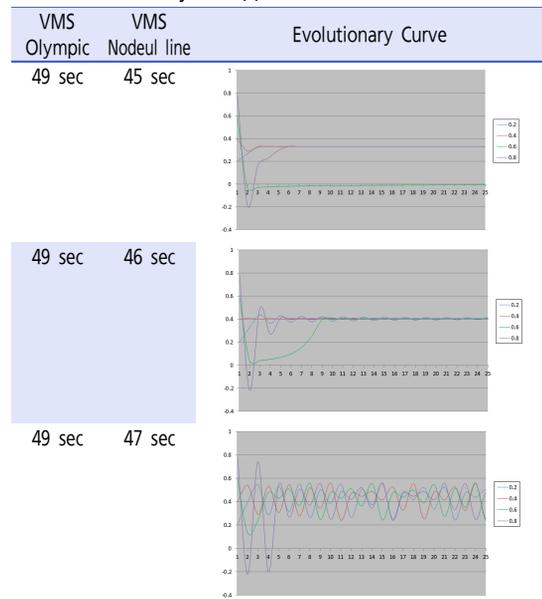


Table 6. Evolutionary Curve(2)

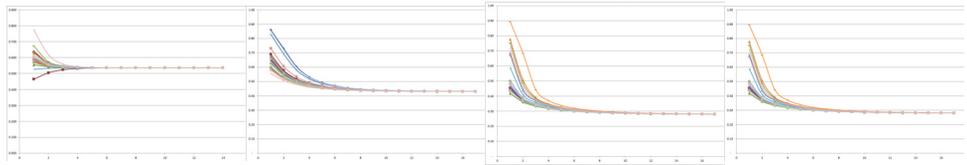


간을 다르게 적용해보았다. 그 결과 노들로의 통행시간이 증가하는 정보를 받을수록 올림픽대로를 선택할 확률이 높아지는 것으로 나타났다. 하지만 노들로의 일정수준 이상의 지체정보를 제공할 때, 운전자들은 전략을 선택함에 있어 진화적으로 안정되지 못한 상태로 안정해 주변을 공전하는 것으로 분석되었다.

두 전략의 선호도 구분이 명확할수록, 진화적으로 안

Table 7. Evolutionary state by VMS message

VMS Information Cycle	Information of Simple communication				Delay Information of Olympic Expressway				Congest Information of Olympic Expressway				Accident on Olympic Expressway(Close First lane)			
	0.200	0.400	0.600	0.800	0.200	0.400	0.600	0.800	0.200	0.400	0.600	0.800	0.200	0.400	0.600	0.800
Probability of the initial choice	0.252	0.463	0.555	0.635	0.222	0.409	0.529	0.529	0.213	0.387	0.505	0.505	0.684	0.684	0.673	0.531
1	0.318	0.504	0.542	0.564	0.245	0.416	0.491	0.491	0.226	0.378	0.453	0.453	0.442	0.442	0.438	0.397
2	0.391	0.523	0.538	0.545	0.270	0.420	0.470	0.470	0.239	0.372	0.422	0.422	0.371	0.371	0.369	0.352
3	0.457	0.531	0.536	0.539	0.296	0.424	0.457	0.457	0.252	0.367	0.403	0.403	0.339	0.339	0.338	0.329
4	0.500	0.534	0.536	0.537	0.320	0.426	0.449	0.449	0.264	0.363	0.389	0.389	0.321	0.321	0.320	0.315
5	0.522	0.535	0.536	0.536	0.343	0.428	0.443	0.443	0.276	0.360	0.380	0.380	0.310	0.310	0.309	0.305
6	0.531	0.535	0.536	0.536	0.363	0.429	0.440	0.440	0.287	0.358	0.373	0.373	0.302	0.302	0.301	0.299
7	0.534	0.536	0.536	0.536	0.380	0.430	0.437	0.437	0.297	0.357	0.368	0.368	0.296	0.296	0.296	0.294
8	0.535	0.536	0.536	0.536	0.394	0.431	0.435	0.435	0.306	0.355	0.364	0.364	0.292	0.292	0.292	0.291
9	0.535	0.536	0.536	0.536	0.404	0.431	0.434	0.434	0.313	0.354	0.361	0.361	0.289	0.289	0.289	0.288
10																



정된 균형전략으로 수렴하며, 두 전략의 보수가 일정 값 이하 또는 이상일 때, 게임의 해는 진화적으로 안정화 되지 못하는 것으로 분석 되었다.

4. 모형의 적용 결과

올림픽대로와 노들로의 소통정보 및 VMS 정보 제공 이력을 기초로 VMS정보에 따른 운전자들의 행동특성을 진화 게임이론을 활용하여 모형화 해보았다.

대상지역의 통행비용함수를 설정하고, 진입교통량 수준과 VMS 정보제공 전략은 달리 적용함으로써, 진화적 안정성을 평가하고자 하였다. 운전자는 VMS 정보를 확인하고, 자신의 경로를 선택하며, 진입교통량 수준 및 VMS 정보에 따라 각 경로를 선택하는 비율이 달라지는 것으로 분석되었으며, 이는 올림픽대로와 노들로를 이용하는 운전자를 대상으로 진화적 게임 모형을 적용할 수 있을 것으로 판단할 수 있음을 의미한다.

분석결과를 바탕으로 올림픽대로와 노들로의 실제 관측 자료를 활용하여 VMS 정보제공 상황에 따라 진화적으로 안정한 경로통행비율을 확인할 수 있었다. 대상지역의 VMS 정보 유형은 단순 소통정보, 지체정보, 정체정보, 사고 및 유고상황 발생으로 구분하였다. 단순소통정보는 진행방향의 교통류가 원활한 소통상황으로 올림픽대로와 노들로의 경로통행시간 정보를 제공해주는 수준이다.

지체의 정도에 따라 지체정보와 정체정보로 구분할 수 있다. 또한 사고발생 및 유고상황은 도로의 차로통제 상황으로 링크의 차로용량이 감소하는 상황으로 강력한 지체정보를 의미한다. 각 VMS정보에 따라 초기 선택비율은 0.2, 0.4, 0.6, 0.8로 가정하여 분석을 수행하였다. 각 VMS 소통정보를 기준으로 진화적 게임을 적용 해본결과 초기선택확률에 관계없이 일정주기가 지나면 하나의 값으로 수렴하는 것을 확인 할 수 있었다. VMS 정보제공 수준에 따른 안정화 비율은 다음과 같이 분석되었다.

단순소통정보를 제공할 때, 53.6%가 올림픽대로를 이용할 때, 진화적으로 안정적인 것으로 분석되었다. 이는 실제 관측통행량보다 다소 낮은 비율로 분석되었다. 올림픽대로에 대한 지체정보를 제공하였을 경우, 올림픽대로의 선택비율은 43.4% 수준으로 낮아졌으며, 정체정보에서는 36.1% 수준까지, 교통사고로 인한 1차로 폐쇄정보에 대해서는 28.8% 수준까지 올림픽대로를 이용할 때, 진화적으로 안정적이라는 결과를 얻을 수 있었다. 분석 자료를 토대로 실제교통량 비율 및 지정체가 발생할 경우의 교통량 비율과는 다소 상이한 결과가 도출되었다. 이는 본 분석에서 노들로의 기본교통량을 적절하게 반영하지 못한점과 교통정보와 관계없이 올림픽대로에서 노들로를 이용해야하는 운전자에 대한 분석이 부족하여 발생하는 차이로 판단할 수 있을 것이다.

결론

VMS는 실시간 교통정보를 운전자에게 직접적으로 제공함으로써, 운전자의 경로선택에 영향을 미칠 수 있는 적극적인 교통정보제공 시스템이다. 기존의 많은 연구를 통하여 게임이론을 활용한 VMS의 운영효율화 연구를 수행하였다. 하지만 기존연구의 게임이론은 게임의 참여자를 운전자와 운전자로 선택하여 둘 사이의 게임으로 분석을 수행하였다. 기존연구와 달리 본 연구에서는 실제 도로를 이용하는 운전자들 사이의 게임을 모형화하기 위하여 진화적 게임이론을 적용하였다.

진화적 게임이론은 다윈의 진화론에서 기원한 게임이론으로 집단의 돌연변이와 자연선택의 원리를 수학적으로 모형화 한 것으로 자연선택에 의해 두 전략중 하나의 전략만이 생존하거나, 혼합전략을 선택할 수 있다.

진화적 게임이론을 전개함에 적절한 보수를 설정하는 과정이 가장 중요하다고 할 수 있다. 보수는 게임 참여자가 게임의 결과로 얻을 수 있는 이득으로, 게임 참여자는 자신의 보수가 가장 큰 전략을 선택한다. 진화적 게임이론에서는 두 전략을 통해 얻을 수 있는 전체의 보수가 가장 클 때, 진화적으로 안정적인 전략의 선택비율을 추정할 수 있다.

진화적 게임이론은 매주기의 교통상황이 바로 다음 주기의 보수에 영향을 주고 전략을 선택하는 과정을 반복함으로써, 안정해를 도출 한다. 이러한 특성을 활용하여 VMS정보 제공에 따른 이용자의 행태를 분석 할 수 있을 것으로 판단되었다.

본 논문의 예제 적용결과는 VMS정보에 따라 전략 1을 선택할 확률이 달라지는 결과를 나타내었다. 이것은 VMS 정보를 제공하는 방식에 따라 두 경로의 교통량을 제어할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 진화적 안정해의 특징을 활용한다면 보다 적극적인 의미의 VMS정보 제공 전략을 수립 할 수 있을 것이다.

향후, VMS 정보 제공 수준에 따른 운전자의 경로 전환율에 대한 분석이 추가적으로 수행 할 수 있으며, 그에 따라 교통상황에 따라 전략적인 VMS 정보 제공 전략을 수립할 수 있을 것이다. 결론적으로 오늘날의 교통문제와 같이 다른 운전자의 전략을 정확히 예측할 수 없고, 운전자가 집단 간의 반복, 경험에 의해 합리적인 정보판단을 수행하는 경우, 진화 게임이론을 통해 전략적인 VMS 정보를 제공할 수 있을 것이라 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant (12 Transportation System - Intelligence 01) from the Implementation of More Efficient Transportation System program, funded by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of the Korean Government.

REFERENCES

- Bell M.G.H. (2000), A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks, *Transport. Res.*, B34, 533-545.
- Bureau of Public Roads (1964), *Traffic Assignment Manual*, U.S. Dept. of commerce, Urban Planning Division, Washington D.C., USA.
- Choi J. K. (2009), *Game theory and evolutionary dynamics*, Ium.
- Choi K. C., Jang J. A. (2004), A VMS Operation Model based on Game Theory, *J. Korean Soc. Civil*, 24(2D), Korean Society of Civil Engineers, 155-165.
- Choi, Y. H. (2010), *Development of an Integrated Congestion Management Model based on Traffic Information and Dynamic Toll*, Ph. D. thesis, Ajou University.
- Cummings M. (1994), *Electronic signs strategies and their benefits*, In *Proceedings of the Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*, London, UK, 141-144.
- Dafermos S. C. (1968), *Traffic Assignment and Resource A location in Transportation Networks*, PhD thesis, The John Hopkins University, Baltimore, MD.
- Davidson K. B. (196), *A flow travel time relationship for use in transportation planning*, *Proceedings of Australian Road Research Board*, Buletin, 3(part a), 183-194.
- Dimitriou L., Tsekeris T. (2009), *Evolutionary game-theoretic model for dynamic congestion pricing in multi-class traffic networks*, *Netnomics*, 10, 103-121.
- Erke A., Sagberg F., Hagman R. (2007), *Effects of*

- route guidance variable message signs (VMS) on driver behavior, *Transportation Research, Part F*, 447-457.
- Fisk C. S. (1984), Game theory and transportation systems modelling, *Transp. Res.*, B18B(4/5), 301-313.
- Florian M. and Nguyen S.(1976), An Application and Validation of Equilibrium Trip Assignment Methods, *Transportation Science* 10, 374-390.
- Galib S. M., Moser I. (2011), Road traffic optimization an evolutionary game, *GECO'11*, 519-526.
- He Z., Yuelong S., Lihui P., Danya Y. (2010), A review of game theory applications in transportation analysis, 2010 International Conference on Computer and Information Application, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 152-157.
- Hollander Y., Prashker J. N. (2006), The application of non-cooperative game theory in transport analysis, *Transport Res.*, Record 33, 481-496.
- Irwin N. A., Dod N., Von Cube H. G. (1961), Capacity restraint in assignment programs, *Highway Research Board Buletin*, 297, 109-127.
- Jang J. A. (2002), A Game Theoretic Approach to Determining the Level of Dynamic VMS Traffic Information. Master's Theses, Ajou University.
- Jo J. H., Kim S. H. (2003), Methodology of VMS Operation with Optimal Route Diversion Rate at Uninterrupted Traffic Flow, The 44th Conference of Korean Society of Transportation, Korean Society of Transportation, 179.
- Kim B. G., Beak N. C., Lee M. Y., Kang W. W. (2004), Strategy for providing with travel time information using VMS, The Third Korea Institute of ITS Conference, 2004(1), Korea Institute of ITS, 12-17.
- Kim J. Y., Choo S. H., Kang M. G., Hue H. (2010), Parameter estimation & validation of volume-delay function based on traffic survey data, *J. Korean Soc. Transp.*, 28(1), Korean Society of Transportation, 115-124.
- Kim S. H. (2005), A Dynamic VMS Message Set Optimization for Efficient Road Traffic Network, Ph. D. thesis, Ajou University.
- Kim S. W. (2013), Game theory and application, *Journal of Communications and Networks*, 30(12), Korean Institute of Communication and Information Science, 66-75.
- Kwon H., Lee S. J. (2004), Traffic control through a strategic use of the Variable Message Sign: A game theoretic approach, The Third Korea Institute of ITS Conference, 2004(1), Korea Institute of ITS, 1-6.
- Lam W. H. K., Chan K. S. (2001), A model for assessing the effects of dynamic travel time information via VMS, *Transportation*, 28, 79-99.
- Lee C. W., Jung J. H. (2006), A study on providing real-time route guidance information by variable message signs with Driver Behavior, *J. Korean Soc. Transp.*, 24(7), Korean Society of Transportation, 65-79.
- Lee H. H. (1993), A Game theoretic analysis on the application of new houses, *Korean Public Administration Review*, 27(3), Korean Association for Public Administration, 753-772.
- Lee K. Y., Lee Y. T., Baek S. G., Hwang B. Y. (2002), Estimation technique of link travel-time considering daily traffic distribution, The 42th Conference of Korean Society of Transportation, Korean Society of Transportation, 102.
- Lindkvist A. (1995), A basis for evaluation - capacity, time consumption, and delay, Deliverable 23 of the TOSCA II project, Swedish National Roads Administration, Gothenburg, Sweden.
- Overgard K. R. (1967), Urban transportation planning: Traffic estimation, *Traffic Quarterly*, 197-218.
- Perc M. (2007), Premature seizure of traffic flow due to the introduction of evolutionary games, *New Journal of Physics*, 9.
- Ramsy E., Luk J. (1997), Route choice under two Australian travel information systems, ARRB Research Report ARR 312.
- Ran B., Boyce D. (1996), Modeling dynamic transportation networks, Second Revised Edition, Springer.
- Smith J. M. (1979), Evolution and the Theory of Games, Cambridge University Press.

- Smock R. J. (1962), An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks, Highway Research Board Buletin, 347, 60-66.
- Soltman T. J. (1965), Effects of alternate loading sequences on results from Chicago trip distribution and assignment model, Highway Research Record, 14, 122-140.
- Stenbrink P. A. (1974), Optimization of Transport Network, John Wiley and Sons, New York, NY.
- Wang Q. (2012), Game Theory Approach to Transportation Network Vulnerability Measurement. Master's Theses, University of Connecticut.
- Zhenlong L., Chonglun W. (2011), Evolutionary game of driver response to variable message signs information, Beijing New-star Plan of Science and Technology, 2007A016, 1224-1229.

- ☞ 주 작 성 자 : 김주영
 ☞ 교 신 저 자 : 김주영
 ☞ 논문투고일 : 2014. 7. 24
 ☞ 논문심사일 : 2014. 9. 26 (1차)
 2014. 10. 23 (2차)
 ☞ 심사판정일 : 2014. 10. 23
 ☞ 반론접수기한 : 2015. 2. 28
 ☞ 3인 익명 심사필
 ☞ 1인 abstract 교정필