

■ 論 文 ■

# 베이지안 게임이론에 근거한 전략적 VMS 제공에 관한 연구

Variable Message Sign Operating Strategies Based on Bayesian Games

**권 혁**  
(서울시립대학교 교통공학과 석사과정)

**이 승 재**  
(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

**신 성 휘**  
(서울시립대학교 경제학과 부교수)

## 목 차

- I. 서론
- II. 기존 이론 및 연구 고찰
  - 1. SO와 UE
  - 2. 게임이론
- III. 모형의 개발
  - 1. 모형의 틀
- 2. 전략적 VMS 제공 게임의 전개
- 3. 전략적 VMS 제공 모형 개발
- 4. 모형의 검증 및 적용
- IV. 결론 및 향후 과제
- 참고문헌

Key Words : VMS, 전략적 정보 제공, 게임이론, 교통 정보, 통행 배정

## 요 약

본 연구의 목적은 통행 배정의 교통 메크로 이론을 게임이론에 적용하여 교통 운영자 입장에서 총 사회적 비용이 최소가 되는 최적의 VMS 제공 전략을 찾아 교통 운영 관리의 효율성을 증진시키는 것이다.

연구의 방법은 게임 이론 중 신호게임과 베이지안 게임을 사용하였다. 게임이론에서는 모형의 구성을 기본적으로 "경기자"로 구분한다. 본 연구의 경기자는 운전자와 운영자로 설정하였다. 운전자는 각자의 통행시간이 최소가 되는 UE 상태로 움직이는 것을 보수로 설정하였고, 운영자는 전체 시스템의 통행시간이 최소가 되는 SO 상태로 운영하는 것을 보수로 설정하였다. 운전자는 각 각의 기대통행 시간이 최소가 되는 경로선택을 한다. 이와 같이 모형으로 설정한 게임에 의해서 운영자는 운전자의 예측을 미리 계산할 수 있으며, 통행비용이 최소가 되는 최적의 네쉬 균형을 찾을 수 있다. 최적의 네쉬 균형이 바로 최적의 VMS제공 전략이 될 수 있다. 이와 같이 설정된 게임을 통해 최적 VMS 전략 모형을 개발하고 개발된 모형을 모의 네트워크에 적용하여 실제 비용감소의 효과를 분석하였다.

## I. 서론

최근에 와서 "지능형 교통체계(ITS)"라 하여 운영 및 유지관리체계의 첨단화 시설의 이용을 제공하고 관리의 효율성을 극대화함으로써 소통의 원활화를 꾀하는 일련의 정책들이 비중 있게 다루어지고 있다. 그 중 VMS는 가장 비중있는 수단으로 사용되고 있다. 그러나 VMS 정보 제공은 몇 가지 위험부담을 가지고 있다. 그 위험 부담은 크게 과도반응과 통행집중이라 할 수 있다. 다시 말해 대안 경로간에 이루어져야 할 통행 배분을 정확히 유도할 수 있는 VMS 메시지 제공은 대단히 어려운 일이다. 또한 기존 연구에서는 도로 이용자의 행태가 무시되어 왔으며, 운영자의 정보제공에 대해 운전자가 판단하는 기준에 대해서도 모호하게 연구되어 왔다. 그래서 관리의 효율성을 더욱 극대화시키기 위해 전략적인 VMS 제공 방법에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

전략적 VMS 제공에 System Optimization (SO) 과 User Equilibrium(UE)의 개념을 도입할 수 있는데 SO는 시스템의 통행비용을 최소화하는 운영자의 전략으로 사용하고, UE는 운전자 각각의 통행비용을 최소화하는 운전자의 전략으로 사용하여 시스템을 최적화하는 연구를 진행할 수 있다. 본 연구에서는 게임이론을 사용한 시스템의 최적화를 연구해 보고자한다.

본 연구의 목적은 게임이론을 사용하여 운영자의 입장에서 총 사회 비용(TSC)이 최소화되는 최적 VMS 정보 제공 전략을 찾는 것이다. 본 논문에서 사용한 게임이론은 베이지안 게임을 이용한 신호게임 이론이다. 또한 최적 VMS 정보 제공 전략은 확률로 나타내며, 운영자가 사회 비용을 낮추기 위해서 전략적 거짓 정보를 사용할 수 있는 확률이라고 할 수 있다.

## II. 기존 이론 및 연구 고찰

### 1. SO와 UE

User Equilibrium(UE)은 모든 운전자가 자신의 통행시간이 최소화 되도록 노력한다. 그리고 UE 조건은 통행자가 임의로 경로를 변경하여 자신의 통행시간을 개선시킬 수 없을 때 평형이 된다는 Wardrop의 통행자 통행경로 선택이론에 근거한 통행배정 방법이다.

이 방법의 전제는 운전자들이 완전한 정보를 알고 있으며, 운전자들은 경로선택에 있어서 합리적인 결정만 한다는 것이다. 따라서 User Equilibrium 문제는 ITS 환경이 충분히 도래된 시점에서 사용할 수 있는 단서를 제공할 수 있다.

System Optimization상태는 자신의 통행시간보다 총 시스템 통행시간을 최소화시키도록 행동하자는 모든 운전자의 합의에 의해서 달성될 수 있다. 그러므로 SO 교통량 패턴은 안정적이지 못하고, 실제적인 형태 또는 평형의 모델로 사용되지 않는다. 그러나 전체 시스템에서 통행비용이 최소화되는 모형임으로 교통망 성능의 일반적인 척도로 사용할 수 있다.

## 2. 게임이론

### 1) Bayesian 게임

베이지안 게임은 불완비 정보가 존재하는 상황을 다루기 위해 하사니에 의해 고안된 분석의 틀이다. 한 경기자가 사적 정보를 갖고 있는 게임을 일반적으로 베이지안 게임이라고 한다. 정보를  $t_i$ 로 나타낸다면 베이지안 접근에 따를 경우 각 경기자는 자신이 갖고 있는 정보  $t_i$ 에 기초하여 다른 경기자들의 타입의 유형에 주관적 확률은  $P_i = P_i(t_i, \dots, t_{i-1}, t_{i+1}, \dots, t_n | t_i)$ 로 나타낼 수 있다. 하사니는 각 경기자  $i$ 의 주관적 확률 분포가 어떤 공통의 확률분포로부터 정보가 주어진 조건 하의 조건부 확률분포라고 보았다. 공통 사전 예상의 가정은 주관적 확률 분포와 공통 사전 확률 분포는 동일하며, 모든 경기자들이 주관적 확률분포  $R$ 을 사전에 갖는다는 것이다.

### 2) signaling 게임

신호 게임은 3단계로 이루어진 전개형 게임이다. 1단계는 송신자라고 불리는 경제 주체가 타입이라고 부르는 자신만이 아는 사적 정보를 얻는다. 송신자가 임의의 타입이 될 확률은 사전적 확률이라고 부를 수 있다. 2단계는 수신자라고 불리는 다른 경제 주체에게 신호를 보내는 경우이다. 송신자가 보낼 수 있는 신호는 신호의 종류는 일반적으로 송신자의 타입에 의존된다. 3단계는 수신자가 어떤 신호를 받은 후 반응을 선택하면 게임은 끝난다. 수신자가 선택할 수 있는 반응 또한 일반적으로 어떤 신호를 받았는가에 의존한다.

### III. 모형 개발

#### 1. 모형의 틀

사회 비용을 최소화시키는 모형을 만들기 위해서 게임이론을 사용하였으며, 게임이론을 적용하기 위해서 게임의 설계가 필요하다. 게임의 설계를 위해서 게임의 설정과 게임의 규칙을 설정하였다.

##### [본 게임의 기본 설정]

- ① 경기자는 한 명의 운영자와 n명의 운전자이다.
- ② 운영자의 이익은 사회 비용을 최소화시키는 것이다.
- ③ 운전자의 이익은 각 개인 통행 시간을 최소화시키는 것이다.

##### [본 게임의 규칙]

- ① 운영자는 각 도로의 도로 상황에 대한 모든 정보를 가지고 있다.
- ② 운전자는 각 도로에 사고가 발생했던 확률과 도로 일반 사항에 대해서는 알고 있으나, 현재 도로의 사고 유무는 알고 있지 않다.
- ③ VMS 정보 제공 방법은 각 경로에 대해서 '사고(유고상황)가 발생하였다.', '도로가 정상적으로 운영되고 있다.'의 두 가지 방법으로 제한하였다.
- ④ 운전자는 운영자의 VMS 제공 전략 패턴을 알고 있으며, 운영자의 VMS 제공 전략과 운전자의 도로 상황에 대한 예상은 균형을 이루고 있다.
- ⑤ 운전자의 도로 상황에 대한 예상은 운영자가 제공한 사고에 대한 정보와 각 도로의 사고가 발생했던 확률에 대해서만 판단한다.
- ⑥ 사고가 발생하였을 때 통행 요소 중에 도로의 용량만 감소한다.
- ⑦ 본 게임에서 제시하는 'STATE'는 각 도로의 사고 유무의 조합으로 결정된 인위적인 상황이며, 'STATE'가 발생할 확률은 각 도로의 사고가 발생했던 확률의 조합으로 결정된다.
- ⑧ 총 사회 비용(TSC)은 각 STATE 별 통행비용(교통량·통행시간)에 STATE가 발생할 확률을 가중한 비용이다.

##### [본 모형의 Notation]

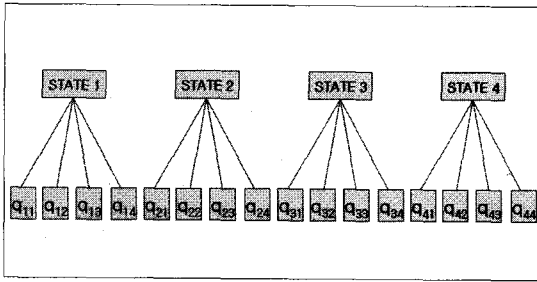
모형을 개발하기 위해서 본 논문에서 사용된 기호는

아래와 같다.

- State  $i$  : 도로의 여건에 따른 상황
- $p_i$  : State  $i$  가 될 확률
- $q_{ij}$  :  $i$ 라는 실제 상황에서  $j$ 라는 메시지를 제공할 확률 (도로 운영자의 전략)
- $r_{jk}$  :  $j$ 라는 메시지를 받고  $k$ 라고 행동할 확률 (도로 운전자의 전략)
- $\bar{V}_{li}$  :  $i$ 라는 실제상황하에서 어느 도로 ' $l$ '의 교통량
- $V_{lj}$  :  $j$ 라는 메시지를 받았을 때 어느 도로 ' $l$ '의 교통량
- $V$  : 총 교통량
- $t_{IN}()$  : 사고가 나지 않은 상태에서의 어느 도로 ' $l$ '의 통행시간 함수
- $t_{IA}()$  : 사고가 발생한 상태에서의 어느 도로 ' $l$ '의 통행시간 함수
- $t_{IN}$  : 'STATE  $i$ ' 상황에서 사고가 발생하지 않은 어떤 도로 ' $l$ '의 통행시간
- $t_{IA}$  : 'STATE  $i$ ' 상황에서 사고가 발생한 어떤 도로 ' $l$ '의 통행시간
- $\delta_A$  : 사고가 발생하면 1, 사고가 발생하지 않았을 경우는 0의 값을 갖는 indicator 변수
- $\delta_B$  : 사고가 발생하면 0, 사고가 발생하지 않았을 경우는 1의 값을 갖는 indicator 변수
- $t_{of}$  : 어떠한 도로 ' $l$ '의 free flow 통행시간
- $C_l$  : 어떠한 도로 ' $l$ '의 용량
- $\lambda_l$  : 어떤 도로 ' $l$ '의 사고 후 가용용량의 비율

#### 2. 전략적 VMS 제공 게임의 전개

[1단계] 실제 상황을 알고 있는 운영자가 전략적 거짓 정보를 제공하는 단계이다. 이 단계에서 신호 게임의 송신자를 운영자로, 수신자를 운전자로 설정한다. 운영자는 운전자들이 모르는 교통정보를 갖고 있으며, 이를 운영자의 사적 정보 (private information)이라 한다. 이러한 운영자의 사적 정보는 운영자의 전략으로 사용될 수 있다. 운영자의 전략은 상황별 행동계획이며, 운영자의 행동은 어떤 상황이 발생했는지를 알려주는 것이다. 운영자는 확률적으로 행동을 선택하는 혼합전략을 선택한다. 운영자의 혼합전략은 확률 행렬  $q_{ij}$ 로 표시할 수



(그림 1) 운영자의 전략

있다. 여기서  $q_{ij}$ 는 실제 상황인 'STATE i' 상황 하에서 운영자의 전략에 의해서 선택한 상황인 'STATE j' 상황이라고 운전자에게 전달 할 확률이다.

(그림 1)은 상황이 4개이고 전략이 'STATE'별로 4가지 유형이므로 운영자는 16개의 전략을 동시에 사용할 수 있다. 여기에서 정직한 정보는  $q_{11}$ ,  $q_{22}$ ,  $q_{33}$ ,  $q_{44}$ 이고 나머지는 전략적 거짓정보에 해당한다.

**[2단계]** 정보를 받은 운전자는 그 정보를 평가하여 상황('STATE')을 예측하는 단계이다. 운전자는 교통사고와 같은 돌발상황이 발생할 수 있다는 것은 알지만 실제로 일어났는지에 대해서는 모른다. 다만 확률적으로 짐작만 할 수 있을 뿐이다. 이러한 비대칭정보의 상황은 베이저안 게임(Bayesian game)으로 모형화할 수 있다. 본 논문에서 운전자의 도로 상황에 대한 판단은 운영자가 제공한 정보와 도로의 사고 자료에 해서만 판단한다는 가정을 하였고, 운전자는 운영자의 메시지를 받고 실제 상황이 어떤 상황인지를 판단한다. 운전자에게 주어진 정보인 사고가 발생했던 확률과 운영자가 제공해주는 정보를 조건부 확률로 다음과 같은 수식을 만들 수 있다.

$$r_{jk} = \frac{q_{ki} P_k}{\sum_{i=1}^n q_{ij} P_i} \quad \forall i, j, k \quad (1)$$

$r_{jk}$ 는 운영자에게 'STATE j'라는 메시지를 받고 'STATE k'라고 생각할 확률을 나타낸다.

**[3단계]** 운영자가 제공한 정보를 평가한 운전자는 그들 스스로의 통행비용이 최소화되는 경로를 선택한다. 이 단계는 '모든 이용된 경로의 통행시간이 같아지도록 운행한다'는 혼합 전략적 게임의 UE의 개념과 같다. 그러나 UE에서는 통행시간을 통행비용으로 사용하지만

본 논문에서 운전자가 상황을 평가하여 예상한 기대통행 시간이라는 개념으로 접근하였다. 즉 운전자는  $r_{jk}$ 라는 확률을 이용하여 기대통행시간이 같이 지도록 운행한다. 이와 관련하여 개발한 수식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n r_{jk} (\delta_{At AA}(V_{Ai}) + \delta_{Nt NA}(V_{Ai})) \\ &= \sum_{k=1}^n r_{jk} (\delta_{At AB}(V_{Bi}) + \delta_{Nt NB}(V_{Bi})) \\ &= \sum_{k=1}^n r_{jk} (\delta_{At AC}(V_{Ci}) + \delta_{Nt NC}(V_{Ci})) \dots \quad (2) \\ & \quad \forall i', j, k \end{aligned}$$

본 논문에서 설정한 게임은 위와 같이 3단계로 진행되며, 본 게임에 의해 TSC가 최소가 되는  $q_{ij}$ 를 찾아서 전략으로 사용하면 그것이 최적 전략이 된다. 위에서 설정한 게임의 단계를 활용하여 계산된  $q_{ij}$ 를 찾는 모형을 개발하였다.

### 3. 전략적 VMS 제공 모형 개발

위의 게임 전개 상황에 의해서 다음과 같은 수식이 도출된다.

$$r_{jk} = \frac{q_{ki} P_k}{\sum_{i=1}^n q_{ij} P_i} \quad \forall i, j, k \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^n r_{jk} = 1 \quad \forall k \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n r_{jk} (\delta_{At AA}(V_{Ai}) + \delta_{Nt NA}(V_{Ai})) \\ &= \sum_{k=1}^n r_{jk} (\delta_{At AB}(V_{Bi}) + \delta_{Nt NB}(V_{Bi})) \\ &= \sum_{k=1}^n r_{jk} (\delta_{At AC}(V_{Ci}) + \delta_{Nt NC}(V_{Ci})) \dots \\ & \quad \forall i', j, k \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\sum_{i=A}^n V_{ij} = V \quad \forall i \quad (5b)$$

식(3)과 식(4)는 본 게임의 2단계에 의해서 도출되었으며, 식(5)는 본 게임의 3단계에 의해서 도출되었다. 위 식들을 이용해서  $q_{ij}$ 를 미지수로 놓고, 운전자가 'STATE j'라는 메시지를 받은 상황에서  $V_{ij}$ 를  $q_{ij}$ 의 함수로 만들 수 있다.

그러나 우리는 실제 'STATE i' 일 때 TSC가 최소가 되는 VMS제공 전략을 알아야 한다. 그러므로 'STATE j'라는 메시지를 받은 상황을 실제 상황 (STATE i)으로 변환시켜야 한다. 이와 같은 변환에는 다시 운영자의 전략  $q_{ij}$ 를 사용할 수 있다. 이와 관련한 수식은 아래와 같다.

$$\bar{V}_{ii} = \sum_{j=1}^n q_{ij} V_{ij} \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$t_{NI} = \sum_{j=1}^n q_{ij} \delta_{NI} t_{NI}(V_{ij}) \quad \forall i, j \quad (7a)$$

$$t_{AI} = \sum_{j=1}^n q_{ij} \delta_{AI} t_{AI}(V_{ij}) \quad \forall i, j \quad (7b)$$

교통량과 통행시간은 위 식들에 의해서 STATE i 일 때의  $q_{ij}$ 에 대한 함수로 만들 수 있다. 최종적으로 게임이론을 사용하여 운영자의 입장에서 총 사회 비용이 최소화되는 최적 VMS 정보 제공 전략을 찾는 목적 함수를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$z(V) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} (\bar{V}_{ii} t_{AI} + \bar{V}_{ii} t_{NI}) \quad (8a)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^n \bar{V}_{ii} = V \quad \forall i, j \quad (8b)$$

$$\bar{V}_{ii} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (8c)$$

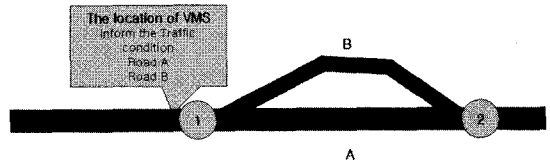
$$\sum_{j=1}^n q_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (8d)$$

여기에서  $P_{ij}$ 는 상수이며,  $\bar{V}_{ii}$ ,  $t_{NI}$ ,  $t_{AI}$ 는  $q_{ij}$ 에 대한 함수임으로 위 목적함수에 의해서 최적 전략인  $q_{ij}$ 를 산출 할 수 있다.

#### 4. 모형의 검증 및 적용

위에서 개발한 모형을 적용하기 위해서 모의 네트워크에 모형을 설정하였다. 모의 네트워크는 <그림 2>와 같다.

또한 운전자는 교통정보를 보고 나서 두 도로 중 하나를 선택한다. <표 1>과 같이 도로가 2개이고 각 도로에 대해 사고 유무에 대해서만 VMS가 제공됨으로 'STATE' 4개로 구성된다.



<그림 2> 모의 네트워크

<표 1> 모의 네트워크의 상황(STATE)

구분	STATE 1	STATE 2	STATE 3	STATE 4
A도로	정상	사고	정상	사고
B도로	사고	사고	정상	정상
확률	P1	P2	P3	P4

또한 각 도로의 링크 함수는 아래와 같다.

A 도로의 링크함수

$$t_{NA}(V_A) = t_{0A} [1 + 0.15 \{ \frac{V_A}{C_A} \}^2] \quad (9a)$$

$$t_{AA}(V_A) = t_{0A} [1 + 0.15 \{ \frac{V_A}{(C_A * \lambda_A)} \}^2] \quad (9b)$$

B 도로의 링크함수

$$t_{NB}(V_B) = t_{0B} [1 + 0.15 \{ \frac{V_B}{C_B} \}^2] \quad (10a)$$

$$t_{BB}(V_B) = t_{0B} [1 + 0.15 \{ \frac{V_B}{(C_B * \lambda_B)} \}^2] \quad (10b)$$

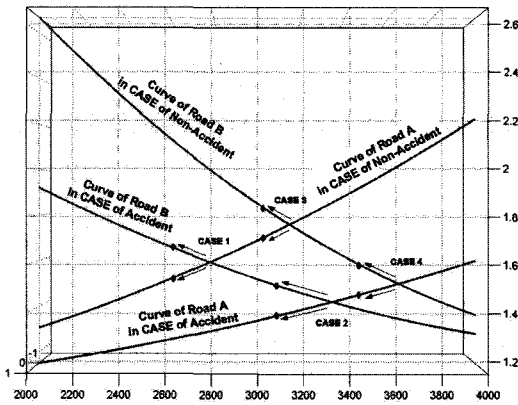
이 네트워크에서의 변수는  $V=5000$ vph,  $C_A=2000$ vph,  $C_B=1500$ vph,  $t_{0A}=1$ 분,  $t_{0B}=1.7$ 분,  $\lambda_A=0.7$ ,  $\lambda_B=0.7$ 로 설정하였다. 또한 A 도로에 사고가 발생했던 확률은 0.3 B도로에 사고가 발생했던 확률은 0.4로 설정하였으므로  $P_1=0.18$ ,  $P_2=0.12$ ,  $P_3=0.42$ ,  $P_4=0.28$ 이다.

또한 UE와 관련한 식이 식(11)과 같고 SO와 관련한 식이 식(12)와 같다면 <그림 3>과 같은 그림을 그릴 수 있다.

$$\min z(V) = \sum_a \int_0^{V_a} t_a(\omega) d\omega \quad (11a)$$

Subject to

$$\sum_r f_{rs}^{kr} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad f_{rs}^{kr} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (11b)$$



〈그림 3〉 교통량과 통행시간 그래프

$$\min z(V) = \sum_a V_a t_a(V_a) \quad (12a)$$

Subject to

$$\sum_k f_s^{kr} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad f_s^{kr} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (12b)$$

그림 (3)은 각 'STATE'에 대해서 A도로와 B도로의 교통량과 통행시간에 대해서 교차시킨 그래프이다. 위 그래프의 교차점은 UE의 상태를 나타내며, 다른 점은 SO일 때의 상태를 나타낸다. 통행비용이 가장 최소가 되는 것은 UE일 때 위치한 점을 SO일 때의 점으로 이동시키는 것이라 할 수 있다. 그러나 운영자의 전략에 의해서 SO 상태로 교통 운영이 되는 것은 각각의 상황이 서로 독립적이지 못하고, 운전자의 인지 요소 등의 다른 여러 가지 변수에 의해서 대단히 어려운 일이다. 그러므로 본 모형을 위 모의 네트워크에 적용하여 UE와 SO를 기준으로 분석해 보겠다.

위 상황에서 분석 대상은 UE에 기반을 둔 TSC, SO에 기반을 둔 TSC, 전략적 VMS 제공에 기반을 둔 TSC으로 설정하였다. SO 접근 방법에 의한 통행비용의 계산은 기존의SO formulation을 이용하였으며 UE 접근 방법은 Wordrop의 원리에 의해서 계산하였다. 전략적 VMS 제공은 위에서 개발한 모형을 적용하여 통행비용을 산정 하였다. 통행비용의 산정 결과는 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 통행비용 분석

구분	TSC(vehicle · minute)
UE	9198.27
전략적 VMS	9166.62
SO	8702.36

〈표 2〉에서 보는 것과 같이 최적의 전략적 VMS 제공은 UE와 SO 사이에 값이 존재한다. 전략적 게임에 의해 산출된 통행에 따른 비용은 SO 보다는 크거나 같으며, UE 보다는 작아야 효과가 있다고 할 수 있다.

또한 위 모의 네트워크에 대해서 VMS를 제공하지 않은 경우, 정직하게 제공한 경우, 전략적으로 제공한 경우로 나누어서 총 사회적 비용을 산정하여 비교할 수 있다.

VMS를 제공하지 않은 경우는 운영자에 의한 사고의 정보가 없음으로 운전자는 이미 알고 있는 각각의 도로에 사고 발생했던 확률에 의해서 경로를 선택한다고 가정하였다. 이러한 가정 하에서 통행 비용을 산정하였다. 여기서 운영자의 전략  $q_{ij}$ 는 〈표 3〉과 같다.

VMS를 정직하게 제공한 경우는 운영자가 사고의 유무를 정직하게 운전자에게 제공하고 운전자는 그 정보를 100%로 신뢰하는 상황에서 총 사회적 비용을 산정하였다. 이 경우는 UE와 같은 상황이다. 여기서 운영자의 전략  $q_{ij}$ 는 〈표 4〉와 같다.

최적 전략으로 VMS를 제공한 경우는 본 연구의 모형을 사용하여 총 사회적 비용을 산정하였다. 여기서 운영자의 전략  $q_{ij}$ 는 〈표 5〉와 같다.

본 모의 상황에서 계산된 전략적  $q_{ij}$ 의 의미는 실제 'STATE 2' 상황에서 'STATE 3'이라고 46%로 전략적 거짓 정보를 제공하고, 실제 'STATE 3'상황에서 54%로 거짓 정보를 제공하는 것이 최적 전략이라는 의미이다.

〈표 3〉 VMS를 제공하지 않은 경우의 전략

q <sub>11</sub>	q <sub>12</sub>	q <sub>13</sub>	q <sub>14</sub>	q <sub>21</sub>	q <sub>22</sub>	q <sub>23</sub>	q <sub>24</sub>
0.18	0.12	0.42	0.28	0.18	0.12	0.42	0.28
q <sub>31</sub>	q <sub>32</sub>	q <sub>33</sub>	q <sub>34</sub>	q <sub>41</sub>	q <sub>42</sub>	q <sub>43</sub>	q <sub>44</sub>
0.18	0.12	0.42	0.28	0.18	0.12	0.42	0.28

〈표 4〉 VMS를 정직하게 제공 경우의 전략

q <sub>11</sub>	q <sub>12</sub>	q <sub>13</sub>	q <sub>14</sub>	q <sub>21</sub>	q <sub>22</sub>	q <sub>23</sub>	q <sub>24</sub>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
q <sub>31</sub>	q <sub>32</sub>	q <sub>33</sub>	q <sub>34</sub>	q <sub>41</sub>	q <sub>42</sub>	q <sub>43</sub>	q <sub>44</sub>
0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

〈표 5〉 전략적 VMS를 제공한 경우의 전략

q <sub>11</sub>	q <sub>12</sub>	q <sub>13</sub>	q <sub>14</sub>	q <sub>21</sub>	q <sub>22</sub>	q <sub>23</sub>	q <sub>24</sub>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.46	0.00
q <sub>31</sub>	q <sub>32</sub>	q <sub>33</sub>	q <sub>34</sub>	q <sub>41</sub>	q <sub>42</sub>	q <sub>43</sub>	q <sub>44</sub>
0.00	0.54	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

〈표 6〉 전략적 VMS를 제공한 경우의 운전자 판단

r <sub>11</sub>	r <sub>12</sub>	r <sub>13</sub>	r <sub>14</sub>	r <sub>21</sub>	r <sub>22</sub>	r <sub>23</sub>	r <sub>24</sub>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.78	0.00
r <sub>31</sub>	r <sub>32</sub>	r <sub>33</sub>	r <sub>34</sub>	r <sub>41</sub>	r <sub>42</sub>	r <sub>43</sub>	r <sub>44</sub>
0.00	0.22	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

〈표 7〉 전략적 VMS 제공 효과 분석

구분	TSC(vehicle · minute)
VMS를 제공하지 않은 경우	9245.82
정직하게 VMS를 제공한 경우	9198.27
전략적으로 VMS를 제공한 경우	9166.62

이같이 계산된 운영자의 전략에 의한 운전자의 반응은 다음과 같다.

운전자는 운영자에게 'STATE 2'라는 메시지를 받은 경우 'STATE 2'라고 판단하는 경우가 22%, 'STATE 3'이라고 판단하는 경우가 78%로 주관적 확률 분포를 나타내며, 운영자에게 'STATE 3'이라는 메시지를 받으면 'STATE 2'라고 판단하는 경우가 22%, 'STATE 3'이라고 판단하는 경우는 78%의 주관적 확률 분포를 형성한다.

위와 같이 상황에 대해서 통행비용을 비교한 결과 〈표 6〉과 같은 결과를 얻을 수 있다.

〈표 6〉은 STATE 2와 STATE 3에서 전략적 거짓 정보를 제공함으로써 사회적 비용을 감소시키는 전략을 나타낸 것이며, 이 경우에서는 VMS를 정직하게 제공했을 때가 VMS를 제공하지 않았을 때 보다 47.55 (vehicle minute) 적었으며, 전략적으로 VMS를 제공한 경우가 정직하게 VMS를 제공한 경우보다 31.65 (vehicle minute) 감소하였다.

#### IV. 결론 및 향후 과제

본 논문은 전략적 VMS제공을 통해 사회비용이 최소화되는 모형을 통행 배정 모형과 베이지안 게임 이론을 사용하여 개발하였다. 또한 적용 예를 통해서 최적 VMS 전략을 사용한 통행비용이 UE와 SO의 중간 사이에 위치한다는 것을 보였다. 이 논문을 통해서 VMS를 통한 정보 제공의 목적이 무엇이며, 그 목적에 더 가까이 가기 위해서 운영자가 전략적으로 정보를 제공할 수도 있다는 것을 제시하였다. 그 결과 VMS 정보 제공에서 경제성 향상의 새로운 방법론을 제시하였다.

본 논문의 향후 과제는 다음과 같다.

- ① 본 모형은 시간에 정적이지만 시간에 동적인 모

형으로 개선할 필요성이 있다.

- ② VMS 제공형태를 사고 유무에 따라 2가지로 설정하였으나 보다 많은 메시지의 형태에서의 최적 전략을 찾아야 한다.
- ③ 운전자의 행태를 사고 발생확률과 운영자의 정보만을 고려하여 베이지안 게임에 적용하였으나, 보다 많은 인지 요소를 적용할 필요성이 있다.
- ④ 본 논문에서 개발한 모형과 Stochastic User Equilibrium 이론을 결합하여 운전자의 반응을 고려한 Traffic Assignment 모형 개발의 필요성이 있다.

#### 참고문헌

1. Christian Momtet and Daniel Serra (2003) *Game theory & Economics*, Palgrave macmillan.
2. Parsons, Simon (2002) *Game theory and decision theory in agent-based systems*, Kluwer Academic Publishers.
3. Shin, S.H. (2003) *Guide of Game theory*, Parkyoungsa.
4. Kreps, D.M. (1992) *Game theory and economic modeling*, Clarendon Press, Oxford.
5. Ben-Akiva, M., Palma, A.D., and Kaysi, I. (1991). *Dynamic network models and driver information systems*, Transportation Research A. 25(5), pp.251~266.
6. Michael G.H. Bell(2000) *A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks*, Transportation Research B. 34, pp.533~545.
7. Michael G.H. Bell and Chris Cassir(2002) *Risk-averse user equilibrium traffic assignment: an application of game theory* Transportation Research B. 36, pp.671~681.
8. Fisk, C. S. (1984). *Game theory and transportation systems modeling*, Transportation Research B, 18, pp.310~313.
9. Papageorgiou, M. (1995), *An Integrated Control Approach for Traffic Corridors*, Transportation Research C, Vol. 3, No. 1, pp.19~30.
10. Didier, M. V., Chiu, Y. C., and Mahmassani,

- H.S. (2000). *Optimal time-dependent variable message sign diversion strategy*, 79th Annual meeting of the TRB.
11. Mammari, S. et al. (1996). *Automatic control of variable message signs in Aalborg*, Transportation Research C, 4(3), pp.131~150.
  12. Chatterjee, K., Hounsell, N.B., Firman, P.E., and Bonsall, P.W. (2002) *Driver Response to VMS Information in London*, Transportation Research C, 10 (2002), pp.149~169.
  13. Messmer, A., and Papageorgiou, M. (1994). *Automatic control methods applied to freeway network traffic*, Automatica, 30(4), pp.691~702.
  14. Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks*, Prentice-Hill.
  15. Wardman, M., Bonsall, P.W., and Shires, J. D. (1997). *Driver response to variable message signs: a stated preference investigation*, Transportation Research C, 5(6), pp.389~405.
  16. William, H.K., and Chan, K.S. (2001). *A model for assessing the effects of dynamic travel time information via VMS*, Transportation, 28, pp.79~99.

✉ 주 작성자 : 권 혁

✉ 논문투고일 : 2004. 10. 13

논문심사일 : 2004. 10. 29 (1차)

심사판정일 : 2004. 10. 29

✉ 반론접수기한 : 2005. 4. 30