

■ 論 文 ■

다수단 다계층 통행정보제공에 따른 일별동적결합모형 개발 및 평가

Day-to-day dynamic combined model on the evaluation of
traveller's traffic information for multi-mode and multi-class

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 조교수)

손 의 영

(서울시립대학교 교통공학과 조교수)

김 인 경

(서초구청 교통전문위원)

목 차

- I. 서론
 - II. 연구의 흐름
 - 1. 모형의 정식화
 - 2. 통행정보제공 모의실험 및 효과분석
 - III. 모형의 개발
 - 1. 기본 가정
 - 2. 기본 구조
 - 3. 모형의 알고리즘
 - IV. 모형의 검증 및 결과 평가
 - 1. 모형의 검증
 - 2. 결과 분석
 - V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

요 약

본 연구의 목적은 수단선택과 통행배정의 결합모형을 통하여 정보이용률, 정보제공전략, 혼잡상태의 변화에 따른 자가용 운전자와 버스승객의 정보제공효과를 비교, 평가하는 데 있다. 평가모형은 수단간 효용차를 웨이블 분포로 가정한 수단선택과 정보이용자와 비이용자의 노선선택시 비용인지오류크기를 상이하게 적용하여 노선선택행위를 설명한 확률적 사용자 평형모형으로 구성된다. 정보제공전략에 있어 사용자 최적과 체계 최적외에 두 전략의 혼합전략을 구사했을 경우를 비교하였다. 모의실험은 Sioux Falls Network에서 이뤄졌다.

평가결과 정적모형에서는 혼잡이 심하고, 체계최적상태에서 정보이용률이 0.4~0.6일 때 총 통행시간의 절감 효과가 크게 나타났으며, 이 때 버스 분담율도 증가하였다. 특히 정보이용률에 따른 총 통행비용의 분포가 U자 형태를 나타냄으로써 Braess의 역설이 존재함을 알 수 있었다. 그러나 일별동적모형에서는 시간이 경과함에 따라 정보이용률에 비례하여 정보제공효과가 나타남으로써 다소 상이한 결과를 보여주었다.

I. 서론

정보통신기술의 하드웨어적, 소프트웨어적 진보가 눈에 떨 정도로 급속하게 이뤄짐으로써 그 활용범위를 교통통행환경에도 응용하는 사례가 늘고 있다. 흔히들 경로안내시스템(Route Guidance System)이라 불리는 통행정보체계가 그 예이다. 공공측면이나 개인적 측면에서 도로 혼잡감소 및 혼잡의 전이차단, 통행시간 단축, 연료소모의 감소 등의 긍정적 효과를 기대할 수 있다. 그러나 많은 실험결과는 차내 기기 장착율에 따른 정보제공의 범위 제한과 이용률 증대에 따른 정보제공효과 감소, 비용 문제, 시스템의 신뢰도 등에 따른 역효과의 존재를 증명하고 있다.

이와 관련하여 본 연구의 목적은 통행노선정보 제공시 정보이용률과 통행모형의 최적 전략에 따른 정보제공효과를 검토함으로써 정보제공전략 수립에 일조하는 데 있다. 특히 기존의 평가모형이 노선선택모형에 국한되었던 점을 감안하여, 정보제공의 차별적 전략에 따른 수단분담율의 변화패턴까지를 분석할 수 있도록 수단선택과 통행배정의 결합모형을 적용한다.

내용적 범위는 평가모형의 구성과 정보제공전략 평가라는 측면에서 크게 두 부분으로 구성된다.

첫째, 전술한 바와 같이 통행비용변화에 따른 경로 변경 뿐 아니라 수단전환행태를 반영할 수 있는 수단선택과 통행배정의 결합모형을 다룬다. 이 모형에서는 통행자에 대해 두 종류의 행태적 측면을 고려하게 된다. 수단선택과 노선선택이 그것이다. 전자의 경우 수단간 효용차를 이산적 확률분포인 웨이블 분포로 가정한다. 후자의 경우는 정보이용자와 비이용자간의 행태 특성을 인지비용의 오류크기로 반영하기 위해 확률적 사용자 평형 모형을 적용한다.

또한 시간적 경과에 따른 정보제공효과를 살펴보기 위해서 사전통행정보(Pretrip Information)효과를 분석할 수 있는 일별동적모형(Day-to-day Dynamic Model)을 다루었다.

둘째, 사전통행 노선정보를 제공했을 때 정보제공 전략에 따른 통행자의 반응과 정보제공효과를 분석한다. 여기서 언급된 정보제공전략은 사용자 최적, 체계 최적, 그리고 두 최적의 혼합전략이다. 또한 정보이용 비율 변화와 전체 OD수요 변화에 따라 정보제공효과는 어떻게 달라지는가를 살펴본다.

II장에서는 기존 연구의 흐름을 모형의 정식화 부

분과 정보제공평가의 측면에서 살펴보고, III장에서는 연구목적에 부합하는 기본 가정들을 설정하여 모형식을 구성하는 모형개발단계를 다룬다. IV장에서는 III장에서 개발된 모형 알고리즘을 Fortran으로 컴파일한 후 모형검증단계를 거쳐 가상 네트워크(Sioux Falls Network)를 통해 모의실험을 실시한다. 더불어 정보 제공환경 변화에 대한 각 시나리오별 분석 결과를 설명한다. 마지막으로 결론은 V장에서 다루었다.

II. 연구의 흐름

1. 모형의 정식화(Formulation)

수단선택의 결과는 도로혼잡이나 대중교통통행시간에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 전통적 수요 추정법에서는 수단선택과 통행배정과정을 순차적인 별개의 과정으로 다룸으로써 수단전환에 의한 통행수요 변동과 공로(公路)상에서의 자가용과 대중교통수단간의 상호작용을 반영하지 못했다.

Sheffi(1985)는 평형원리를 수단간에도 적용한 식(1)과 같은 모형식을 제시함으로써 수단선택과 통행배정 과정을 단일화할 수 있었다.

$$\begin{aligned} \min \quad & Z(x, \hat{x}, \hat{q}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw \\ & + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \left(\frac{1}{\theta} \log \frac{w}{q_{rs} - w} + \phi_{rs} \right) dw \quad (1) \\ & + \sum_b \int_0^{\hat{x}_b} \hat{t}_b(w) dw \end{aligned}$$

$$st \quad \sum_k f_k^{rs} = \bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (u_{rs})$$

$$\sum_k \hat{f}_k^{rs} = \hat{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (u_{rs})$$

$$f_k^{rs}, \hat{f}_l^{rs} \geq 0 \quad \forall k, l, r, s$$

x_a : 자가용링크 a의 교통량

t_a : 자가용링크 a의 통행시간

\hat{x}_b : 대중교통링크 b의 교통량

\hat{t}_b : 대중교통링크 b의 통행시간

\hat{f}_l^{rs} : 대중교통노선 l의 교통량

θ, ϕ_{rs} : 비음의 정산 파라미터

q_{rs}, U_{rs} : 출발지 r에서 목적지 s까지의 자가용

통행량 및 최단 경로 통행시간
 $\hat{q}_{rs}, \hat{U}_{rs}$: 출발지 r에서 목적지 s까지의 대중교통 통행량 및 최단 경로 통행시간
 \bar{q}_{rs} : r, s의 총 통행량
 (즉, $\bar{q}_{rs} = q_{rs} + \hat{q}_{rs}$)

측면의 고려와 일별/일중 동적 통행패턴의 반영, 불확실성을 설명하는 확률모형의 적용 등을 강조하고 있다.

기존의 연구성과를 통해 살펴본 실제 모의실험은 특정 제어시스템과 한정된 네트워크 상에서 제한적으로 이뤄지고 있다. 기존 연구내용 및 결과는 <표 1>과 같이 정리할 수 있다.

연구 결과 ①20%정도의 이용자가 정보를 추종하였을 때, ②다소 이견은 보였지만 혼잡이 심할수록, ③체계최적의 전략하에서 정보제공의 효과가 가장 '큰 것으로 나타났다.

그러나 정보이용 대상을 자가용 운전자 및 자가용 네트워크로 한정함으로써 대중교통이용자들의 정보이용효

2. 통행정보제공 모의 실험 및 효과분석

David Walting 외(1993)는 시뮬레이션 모형이 고려해야 할 사항들을 운영체계, 네트워크 모형, 운전자 행태 반영으로 정리하였다. 그 중에서 통행자의 행태적

<표 1> 기존 연구 내용 요약

연구자	연구 내용	연구 결과
Kobayashi (1979)	경로안내시스템 장착차량과 비장착차량을 도로길이, 차선수, 좌/우회전수 등으로 비교.	50~75%의 운전자가 정보를 따를 경우 약 6%에 이르는 통행시간 절감효과.
Tsuji (1985)	확률적 통행특성을 반영한 수리모형 개발, 장착차량의 비율을 비장착차량에게 영향을 미치지 않을 정도로 작게 가정.	장착차량의 경우 총통행시간의 11% 절감.
Smith, Russam (1989)	CONTRAM을 이용.	장착차량은 6~7% 절감효과를 누렸으며, 장착율이 증가할수록 감소. 비장착차량은 전체 네트워크 통행시간이 2.5~6%감소할 때 3%이상 절감효과.
Van Vuren (1991)	장착차량은 체계최적을 비장착차량은 사용자평형을 따른다고 가정, 해의 존재와 유일성 입증에 중점을 둠.	Convex Combination 문제임을 입증.
Koutsopoulos, Lotan (1989)	장착여부에 따라 통행자의 인지오류크기를 조절, 두 사용자 그룹에 대해 SUE모형 적용.	정보수준, 추종율, 반복정체의 정도에 따라 효과 상이. 혼잡이 심할수록 경로안내효과 감소.
Breheret 등 (1990)	CONTRAM이용하여 비장착통행자는 SUE모형을 적용하여 다경로/단일경로 제공효과 비교.	다경로 정보제공시 장착운전자는 15%, 비장착운전자 4%의 통행시간 절감 효과를 경험하며, 20% 장착시 최대 효과. 단일 경로 제공시 그 효과 미미.
Hani S. Mahmassani, R. Jayakrishnan (1991)	혼잡 통근축을 대상으로 평균무차별밴드(Mean indifference band)의 영향을 모형에 반영하였으며, 정적 통행배정과 동적 평형배정모형 이용.	정보이용률이 25%일 때 총통행시간이 증가하지만, 이때부터 정보비이용자의 편익도 함께 증가. 혼잡정도가 낮을 경우 전역적 개선효과를 기대할 수 있음.
T. Van Vuren, D. Walting (1991)	정보비이용자는 SUE, 정보이용자는 사용자 평형, 체계최적, SUE를 따른다는 4개의 시나리오 비교, SATURN을 통해 수요, 장착비율, 배정전략에 따른 영향 검토.	사용자 최적일 경우 장착비율이나 혼잡정도가 클수록 편익이 증가. 체계 최적일 경우 혼잡정도가 약할수록 통행시간 절감 효과가 크고, 비장착자의 편익이 상대적으로 큼.
James E. Hicks, David E.Boyce, Ashish Sen (1992)	정보비이용자는 SUE, 정보이용자는 완전인지를 가정하고 체계최적과 사용자 평형 대상에 따라 3가지 유형의 모형 설정.	용량이 제약된 경우 총통행시간과 교통처리효과는 체계 최적전략을 적용할 때 가장 큰 효과 발휘.
Richard H.M. Emmerick 등 (1995)	시뮬레이션 모형, 정보제공메카니즘, 의사결정과정에 대한 행태적 측면에 관해 분석. 정보제공유형을 자신의 경험, 사후통행정보, 실시간 사전통행정보, 실시간 운행중정보제공으로 구분.	Bound모형에 의해 노선을 보다 더 효율적으로 선택하며, 적절한 Bound는 0.2~0.3.사후 통행정보 제공시 장착율이 20%이상을 경우 비장착자의 편익이 증대(과잉반응), 운행중정보제공은 장착율이 20%일 때 가장 효율적.
Piyushimita Thakuriah 외 (1996)	Monte Carlo Simulation모형을 상습혼잡상황에서 교통량과 통행시간의 변동, 자료수집의 제한, 정보처리 및 제공능력을 평가.	혼잡이 심할수록 정보제공효과가 크고, 통행시간과 교통량에 대한 통계적 특성이 중요함.
임용택(1996)	신호제어와 가변정보제공을 동시에 고려한 동적 교통관리모형을 통해 혼합최적전략을 추가 평가.	체계최적의 비중이 클수록 운전자 추종이 클수록 총통행시간은 감소.

과, 수단 전환 등에 대한 영향 분석은 이뤄지지 않았다.

III. 모형의 개발

1. 기본 가정

첫째, 정보 제공방식은 사전통행정보 방식을 따르고, 최적 수단 및 최적 노선에 관한 정보를 제공한다.

둘째, 통행자의 통행행태에 관련된 사항으로 다음을 가정한다.

- ① 통행자는 통행전에 선택한 노선과 수단을 통행이 종결될 때까지 따른다.
- ② 이용가능수단은 버스와 자가용이며, 이들 수단간의 환승은 일어나지 않는다.
- ③ 모든 통행자들은 수단선택이 자유로우며(Choice Riders), 통행수단 및 노선선택은 통행비용에 의해서만 결정된다.

셋째, 수단선택과 노선선택에 있어 다음의 특징을 갖는다.

- ① 통행자들의 수단간 효용차는 확률분포를 따른다.
- ② 정보이용자가 정보 제공에 의해 갖는 효용은 정보 비이용자에 비해 더 정확한 정보를 이용할 수 있는 것이다. 즉, 정보이용자는 관측비용에 근사(近似)한 비용 경로를 따름으로써 실제 최소비용 경로를 따를 가능성이 정보비이용자에 비해 상대적으로 높다.
- ③ 통행자는 수단별로 통행비용에 대해서 인지오차가 다르게 나타날 수 있다.

마지막으로, 일별동적통행은 정보이용여부에 따라 정보이용자는 과거 관측통행시간과 현재통행시간에 의한 정확한 예측통행시간을, 정보비이용자는 인지오차의 부담을 안고 그 날의 통행경로를 결정한다는 가정을 추가한다.

2. 기본 구조

버스는 자가용과 같은 일반적인 교통수단과 도로를 공용하고 이들과 동일한 혼잡과 지체를 경험한다. 따라서 자가용과 버스 어느 한 수단의 지체는 다른 수

단에도 영향을 미치게 된다. 이를 반영하기 위해서 자가용과 버스의 비용함수는 비분리 비대칭함수로 구성한다.

동일한 물리적 가로를 통행하는 자가용과 버스의 링크는 a 와 \hat{a} 와 같이 구분하고, 이들의 방향교통량은 x_a , \hat{x}_a 로 표현한다. 자가용과 버스의 비용함수는 $t_a(x_a, \hat{x}_a)$, $\hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a)$ 와 같이 나타낼 수 있다.

1) 정보제공전략 반영 비용함수

사용자 최적 전략에 의해 정보를 제공할 경우 자가용과 버스의 통행비용함수는 각각 다음과 같다.

$$t_a(x_a, \hat{x}_a) \quad (2)$$

$$\hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a) \quad (3)$$

반면에 체계 최적 전략에 의해 정보를 제공할 경우에는 식(4), 식(5)와 같은 한계통행비용함수를 사용한다.

$$t_a(x_a, \hat{x}_a) + x_a \frac{\partial t_a(x_a, \hat{x}_a)}{\partial x_a} \quad (4)$$

$$\hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a) + \hat{x}_a \frac{\partial \hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a)}{\partial \hat{x}_a} \quad (5)$$

이들 식(2)에서 식(5)를 통해 최적 전략에 관한 비용함수들의 일관된 특성을 파악할 수 있다. 따라서 사용자 최적, 체계 최적 뿐 아니라 이들의 혼합 최적 전략을 구사할 경우에 자가용과 버스 네트워크의 링크 통행비용함수 t_a^A , \hat{t}_a^B 는 식(6), 식(7)과 같다.

$$t_a^A = t_a(x_a, \hat{x}_a) + \gamma x_a \frac{\partial t_a(x_a, \hat{x}_a)}{\partial x_a} \quad (6)$$

$$\hat{t}_a^B = \hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a) + \gamma \hat{x}_a \frac{\partial \hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a)}{\partial \hat{x}_a} \quad (7)$$

여기서 γ 은 0과 1 사이값으로써 사용자 최적, 체계 최적의 비중을 나타내는 파라메타이다. 이 값이 0이면 사용자 최적을, 1이면 체계최적에 따르는 정보를 제공하게 된다.

2) 정보이용률 반영 비용함수

정보이용정도에 따른 자가용과 버스이용자의 노선 선택행태를 인지오류로 설명하는 SUE모형을 적용한다. 정보를 이용할 경우는 그렇지 않은 경우보다 상대적으로 인지오류의 크기를 작게 하여 최소통행경로의 선택확률을 높이도록 한다. 그 때의 자가용과 버스의 통행비용함수는 식(8)과 식(9)와 같다.

① 정보를 이용하지 않을 경우 :

$$T_a^u \sim N(t_a, \theta_1 t_a), \hat{T}_a^u \sim N(\hat{t}_a, \theta_1 \hat{t}_a) \quad (8)$$

② 정보를 이용할 경우 :

$$T_a^g \sim N(t_a, \theta_2 t_a), \hat{T}_a^g \sim N(\hat{t}_a, \theta_2 \hat{t}_a) \quad (9)$$

여기서 T_a^u, \hat{T}_a^u 는 정보이용여부에 따른 자가용과 버스의 통행비용함수를 나타낸다. 또한 θ_1, θ_2 는 정보이용시와 비이용시의 인지오류를 나타내며, $\theta_1 \geq \theta_2$ 이다.

따라서 정보이용정도를 나타내는 δ 를 매개로 하여 자가용과 버스의 링크통행비용함수 T_a^A, \hat{T}_a^B 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_a^A = (1 - \delta) T_a^u(x_a, \hat{x}_a) + \delta T_a^g(x_a, \hat{x}_a) \quad (10)$$

$$\hat{T}_a^B = (1 - \delta) \hat{T}_a^u(x_a, \hat{x}_a) + \delta \hat{T}_a^g(x_a, \hat{x}_a) \quad (11)$$

단 $0 \leq \delta \leq 1$ 이다.

3) 일별동적통행 반영 비용함수

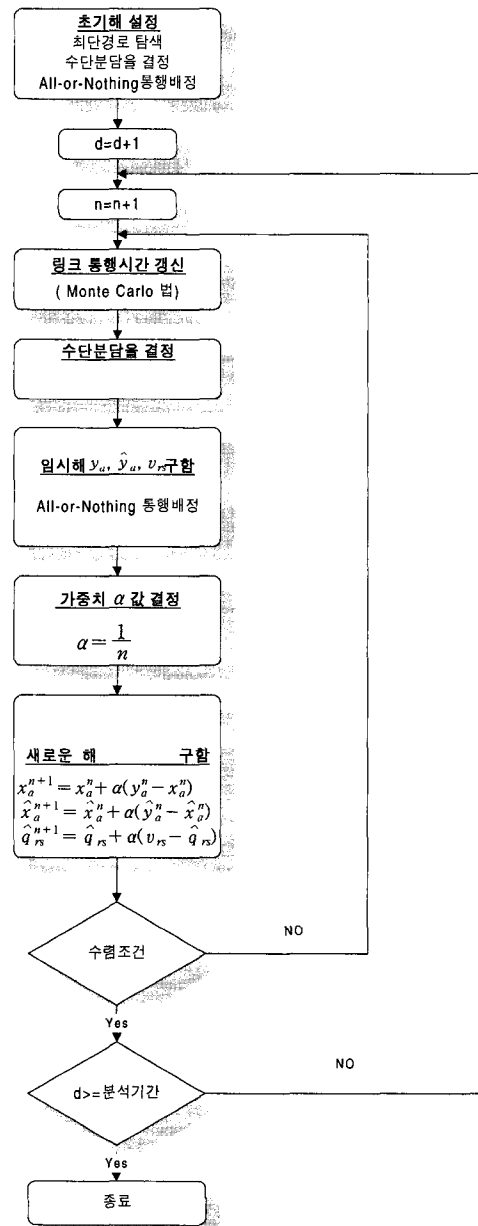
정보이용자의 통행비용함수는 예측통행시간(Expected Travel Time)에 의해 결정된다. 이들의 통행비용에 대한 인지오류 크기는 0에 가깝다고 할 수 있다. 반면에 정보이용자의 통행비용함수는 그보다는 더 큰 인지오류값을 갖게 된다. 예측통행시간은 단순히동평균법을 적용하였다.

$$\left[\alpha \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} t_a(d-1-n) \right] + (1-\alpha) T_{a,b}^u(x_a) \quad (12)$$

여기서 첫 번째 항은 이용률과 정보이용자의 통행비용함수를 두 번째 항은 정보이용률과 확률인지오류를 반영한 비용함수를 나타낸 것이다.

3. 모형의 알고리즘

기존 수단선택과 통행배정의 결합모형에서는 결정적 평형(Deterministic Equilibrium) 모형을 토대로 한 것과는 달리 본 연구에서는 정보이용여부에 따른 통행자의 인지비용 차이를 반영하기 위해 SUE모형을 적용하였다. 인지비용의 분포를 균등 혹은 정규분포로



<그림 1> 일별동적통행모형 알고리즘 흐름도

가정하고(Probit모형), 몬테카를로(Monte Carlo)법을 통해 반복 계산된 링크상에 교통량을 전량부하하는 Burrell방법을 따른다. 또한 SUE모형적용에 따른 링크통행량의 변화는 MSA방법을 사용한다. 버스와 자가용의 비대칭 비분리 비용함수는 Seffi(1985)가 제안한 간소화된 대각화 알고리즘(Stremlined Diagonal Algorithm)을 통해 해를 찾으려 한다. 목적함수의 수리적 모형 표현이 용이하지 않기 때문에 Gap 함수를 통해 동등조건을 검증한다.

〈그림 1〉은 이를 응용한 일별동적통행모형의 알고리즘을 나타낸 것이다.

IV. 모형의 검증 및 결과평가

1. 모형의 검증

모형의 신뢰성(Reliability) 검증을 위한 가상네트워크와 비용함수는 아래와 같다. 노드 1에서 2를 통행하는 총 O/D는 5이고, 경로 1, 2의 초기비용은 모두 1로 한다. 이용가능한 수단은 자가용과 버스로써 통행자의 인지오류크기 β 는 자가용과 버스 동일하게 0.3으로 한다.

$$t_a(x_a, \hat{x}_a) = 2 + 4x_a + \hat{x}_a \quad (13)$$

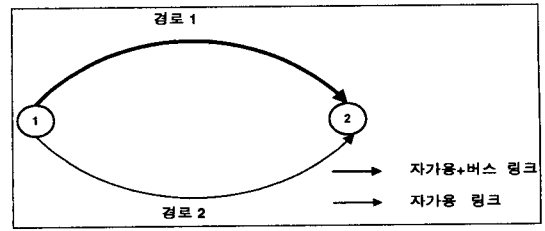
$$\hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a) = 4 + 3\hat{x}_a + 2x_a \quad (14)$$

$$T_a \sim N(t_a, \beta t_a) \quad (15)$$

$$\hat{T}_a \sim N(\hat{t}_a, \beta \hat{t}_a) \quad (16)$$

1) 평형원리의 검증

최적전략별로 워드롭의 평형조건을 만족하는지를 살펴보기 위해 전략별 통행비용을 〈표 2〉와 같이 정리하였다. 표에 의하면 자가용과 버스 네트워크

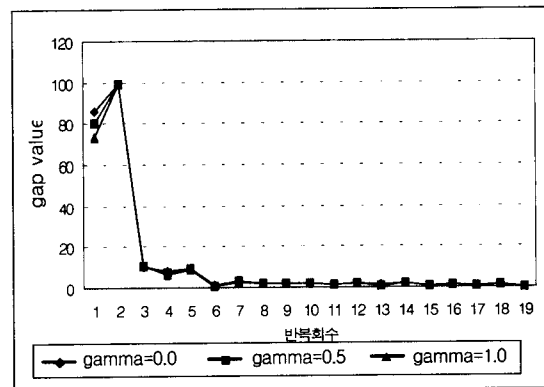


〈그림 2〉 가상 네트워크 1

크의 경우 평형조건의 성립여부를 살펴보기 위해 앞에서 언급한바 있는 동등조건¹⁾을 적용하였을 때 경로 1의 자가용과 버스의 통행비용 차이는 0.11이다. 이 값은 수렴해가 거의 일치하는 균형모형과는 달리 확률값을 적용하는 확률모형을 적용했다는 점을 감안한다면 수단간에도 균형이 성립되었다고 볼 수 있다.

2) Gap value의 변화

Gap value는 워드롭의 균형상태에 도달하게 되면 통행비용 벡터와 평형해 벡터가 직각을 이루게 되어 0이 된다. 아래 그림에서 알 수 있듯이 Gap value는 최적 전략의 영향을 받지 않고 8~9회 내에서 0에 접근하게 되어 균형해를 얻게 되었다. 따라서 본 연구에서 개발된 모형이 균형상태에 도달함을 알 수 있다.



〈그림 3〉 전략별 Gap value의 변화

1) 아래식은 자가용과 버스가 각각 평형상태를 이룰 때 두 수단간 최소통행시간은 서로 다를지라도 통행시간 이외의 요소까지 고려되는 통행비용은 서로 같다는 것을 나타낸다.

$$\frac{1}{\theta} \log \frac{\hat{q}^{rs}}{q^{rs} - \hat{q}^{rs}} + \hat{u}^{rs} = u_{rs} \quad \forall r, s$$

〈표 2〉 경로별 정보제공전략에 따른 통행비용

구 분		최적전략				
		사용자 최적←		혼합 최적	→체계 최적	
		0.0	0.2	0.5	0.8	1.0
자가용	경로1	10.38	10.32	10.23	10.11	10.08
	경로2	10.27	10.21	10.09	10.00	9.89
버 스	경로1	10.98	11.06	11.18	11.29	11.39
자가용 경로통행비용차*		0.11	0.11	0.14	0.11	0.19
자가용과 조정통행비용차**		0.11(10.49)	0.30(10.62)	0.59(10.82)	0.9(11.01)	1.08(11.16)

주) * : 자가용 네트워크의 평형원리 검증에 의해 | 경로 1의 자가용 통행비용-경로2의 자가용 통행비용 | 으로 나타냄.

** : 자가용과 버스 네트워크의 동등조건에 의해 재조정된 버스 통행비용과 경로 1의 자가용 통행비용과의 차이를 나타낸 것임. ()안의 숫자는 재조정된 버스 통행비용임.

2. 결과분석

1) 비용함수

두 개 이상의 수단에 대해서 통행저항을 고려해야 하는 결합모형에서는 비용함수가 다소 복잡하고, 변수의 개수도 단일수단에 비해서 많은 것이 일반적이다. 식(17)과 식(18)은 Leblanc(1979)이 버스 차량, 승용차 차량, 버스 승객등의 세 요소로 구성된 비분리 비대칭 비용함수를 그가 제시한 범위를 참고로 파라메타를 재조정된 것이다. 식(19)와 식(20)은 정보이용여부에 따른 통행태를 반영하기 위해 인지오류크기를 확률분포로 나타낸 것이다.

$$t_a(x_a, \hat{x}_a) = a_1 \left(1 + 0.15 \left(\frac{x_a + \eta d}{AC_a} \right)^4 \right) + \alpha C \left(\frac{\hat{x}_a}{Tca} \right)^4 \quad (17)$$

$$\hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a) = \gamma a_1 \left(1 + \beta \times 0.15 \left(\frac{\eta d}{BC_a} \right)^4 \right) + C \left(\frac{\hat{x}_a}{TC_a} \right)^4 \quad (18)$$

$$T_a \sim N(t_a, \theta t_a) \quad (19)$$

$$\hat{T}_a \sim N(\hat{t}_a, \theta \hat{t}_a) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.1 & \beta &= 0.5 & \gamma &= 1.1 \\ \eta &= 3 & C &= 0.041 & d &= 4\text{대} \\ \theta &= \text{인지오류크기} \end{aligned}$$

AC_a : 전용차선이외의 차선용량 (pcu/시)

BC_a : 버스전용차선의 용량 (pcu/시)

Tca : 버스승객용량 (인/시)

통행수단을 결정하기 위한 로짓함수식은 식(21)과 같다.

$$\hat{q}_{rs} = \bar{q}_{rs} \frac{1}{1 + \exp \theta (\hat{u}_{rs} - u_{rs} + \psi)} \quad (21)$$

$$\theta = 1, \quad \psi = 0$$

2) 가상네트워크 (Sioux Falls Network)

Sioux네트워크의 모든 링크는 동일한 차선으로 이루어져 있으며, 1-21, 2-10, 7-18, 12-20, 13-15 등 모두 5개의 버스노선이 운행된다.

3) 결과분석1

결과 분석은 비용인지오류 크기에 대한 가정을 달리하면서 정보이용률, 정보제공전략, 혼잡정도에 따른 총 통행비용과 수단선택경향을 비교, 분석하였다.

우선적으로 비용인지오류 크기를 수단별로 구분하지 않고 정보이용여부에 따라 달리한 경우와 수단별로 서로 상이하게 정보를 인지한다고 가정하여 버스의 인지오류가 더 큰 경우, 자가용의 인지오류가 더 큰 경우 등 4가지의 시나리오로 분류하였다. (〈표 3〉)

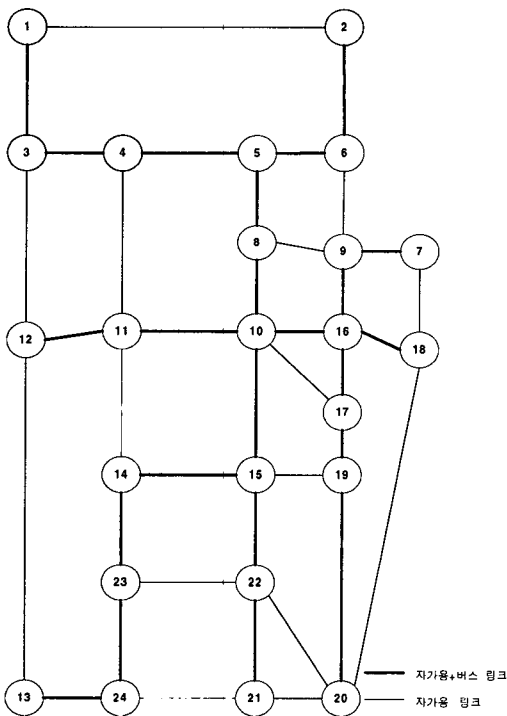
(1) 시나리오 I의 분석결과

이 실험은 정보이용자와 정보비이용자를 통행비용에 대한 인지오류크기로 구분하고 정보를 이용하지 않

〈표 3〉 결과분석 환경

구 분	비용인지요류(θ)크기 설정	정보이용률(delta)	정보제공전략(gamma)	혼잡정도(v/c)*
정적통행	시나리오 I 자가용, 버스 정보 이용자 : 0.1 자가용, 버스 정보비이용자 : 0.3	0.0/0.2/0.4 /0.6/0.8/1.0	이용자최적 : 0.0 혼합최적 : 0.5 체계최적 : 1.0	혼잡상태 : 1.0 비혼잡상태 : 0.7/0.3
	시나리오 II 자가용 정보 이용자 : 0.3 자가용 정보비이용자 : 0.5 버 스 정보 이용자 : 0.1 버 스 정보비이용자 : 0.3			
	시나리오 III 자가용 정보 이용자 : 0.1 자가용 정보비이용자 : 0.3 버 스 정보 이용자 : 0.3 버 스 정보비이용자 : 0.5			
	시나리오 IV 자가용, 버스 정보 이용자 : 0.3 자가용, 버스 정보비이용자 : 0.5		이용자최적 : 0.0	혼잡상태 : 1.0
일별동적통행 자가용, 버스 정보 이용자 : 0.1 자가용, 버스 정보비이용자 : 0.3	이용자최적 : 0.0 혼합최적 : 0.5 체계최적 : 1.0			

주) *: v/c는 o-d 수요와 대안경로 용량의 합을 비율로 산정한 것임.



〈그림 4〉 가삼네트워크(Sioux Falls Network)

을 경우 더 큰 비용인지요류를 경험한다고 가정하였다.

실험결과는 〈표 4〉와 같다. 총 통행비용은 정보이용률이 증가함에 따라 감소하다가 0.4 혹은 0.6을 기준으로 다시 증가하기 시작하였다. 혼잡정도에 따른 총 통행비용을 살펴보면 v/c가 1.0일 때 총 통행비용

의 감소율이 가장 크게 나타났으며 다음으로 0.7, 0.3 순서로 나타났다. 이는 혼잡정도가 심할수록 정보제공효과가 뛰어나다는 것을 나타낸다. 정보제공전략을 달리하였을 경우 동일한 이용률과 혼잡정도에서 이용자최적, 혼합최적, 체계최적의 크기 순서로 총 통행비용이 소요되었다.

동일한 조건에서의 자가용과 버스의 수단 부담률을 살펴보면 〈표 5〉와 같이 혼잡정도에 가장 민감하게 반응하며 그 정도가 심할수록 자가용 부담률이 감소하였다. 또한 체계최적 전략일 때 자가용 부담률이 0.36안팎으로 가장 크게 감소하여 버스(대중교통수단)의 이용이 증가할수록 총 통행비용을 더 큰 폭으로 감소했음을 알 수 있다.

(2) 시나리오 II의 분석결과

시나리오 II는 정보이용자의 비용인지요류의 크기가 정보 비이용자보다 크며, 이 때 자가용 이용자가 버스이용자보다 더 큰 값을 갖는다고 가정한다. 이는 수단별로 정보이용가치를 상이하게 적용하였을 때의 정보제공효과를 비교하기 위함이다.

분석결과 총 통행비용은 이용률이 증가함에 따라 감소하였으며, 0.4 혹은 0.6을 기준으로 다시 증가하기 시작하여 그림에서와 같이 완만한 U자형 형태를 나타냈다. 정보이용률이 증가하면 오히려 정보제공효과가 감소하여 정보의 역효과가 있음을 보여주고 있다. 이는 교통량에 의해 통행시간이 영향을 받는 네트워크에서

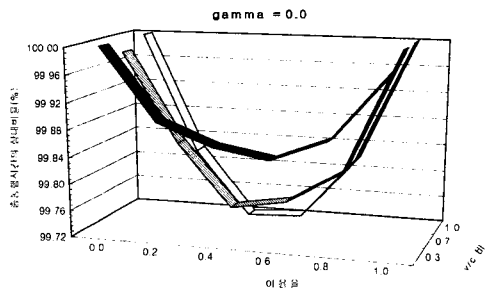
〈표 4〉 이용률, 정보제공전략, 혼잡정도에 따른 총 통행비용

구분			이용률 0% ← delta → 이용률 100%						
			0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
사 용 자 ↑ g a m m a ↓ 체 계	0	v/c	0.3	2878.47 (99.99)	2878.16 (99.98)	2877.67 (99.96)	2877.48 (99.95)	2878.21 (99.98)	2878.82 (100.00)
			0.7	4813.61 (100.00)	4809.78 (99.92)	4809.44 (99.91)	4808.61 (99.90)	4809.48 (99.91)	4810.93 (99.94)
			1.0	10495.53 (99.95)	10492.74 (99.93)	10487.81 (99.88)	10488.53 (99.89)	10491.16 (99.91)	10500.31 (100.00)
	0.5	v/c	0.3	2874.26 (100.00)	2874.04 (99.99)	2873.58 (99.98)	2873.08 (99.96)	2873.83 (99.98)	2874.28 (100.00)
			0.7	4798.35 (100.00)	4796.35 (99.96)	4797.31 (99.98)	4795.74 (99.95)	4795.95 (99.95)	4796.55 (99.96)
			1.0	10445.67 (99.95)	10444.05 (99.93)	10439.05 (99.88)	10439.14 (99.89)	10451.11 (99.96)	10446.54 (100.00)
	1	v/c	0.3	2870.89 (100.00)	2870.24 (99.98)	2870.03 (99.97)	2869.76 (99.96)	2870.38 (99.98)	2870.69 (99.99)
			0.7	4784.92 (100.00)	4783.83 (99.98)	4783.16 (99.96)	4783.09 (99.96)	4783.59 (99.97)	4784.74 (100.00)
			1.0	10405.67 (99.98)	10400.68 (99.93)	10399.39 (99.92)	10398.55 (99.91)	10399.65 (99.92)	10407.86 (100.00)

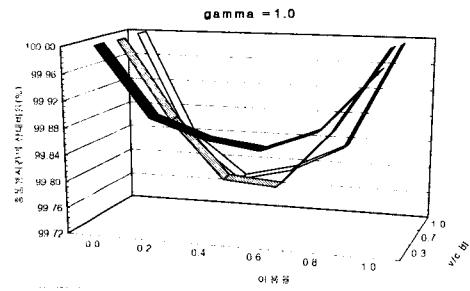
주) 괄호안 수치는 각각의 최적 조건별로 이용률0%, V/C 0.3일 때 총 통행비용을 기준으로 해당 셀의 비용을 나눈 백분율 값임.

교통개선이 오히려 체계 전반의 통행비용 증가를 야기할 수 있다는 브라스의 역설(Braess' Paradox)을 입증하는 것이기도 하다.〈그림 5〉~〈그림 7〉

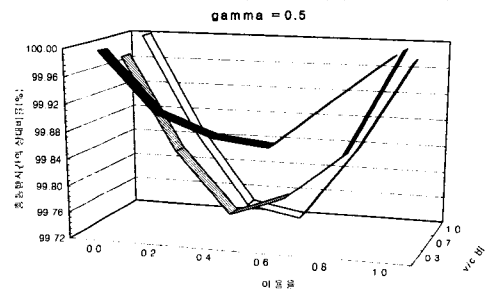
다음 〈그림 8〉에서 〈그림 10〉은 동일한 조건에서의 자가용과 버스의 수단 분담률을 나타낸 것으로 시나리오 I 과 유사한 패턴을 보였다.



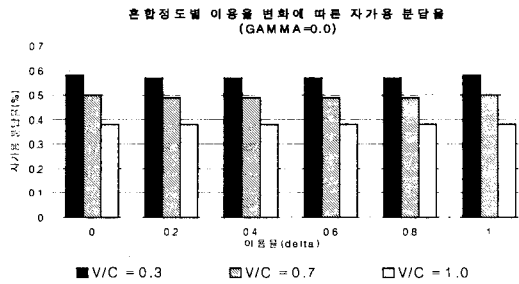
〈그림 5〉 사용자 최적전략에서의 총 통행비용 상대비율



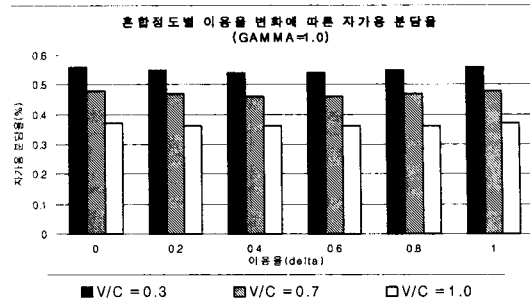
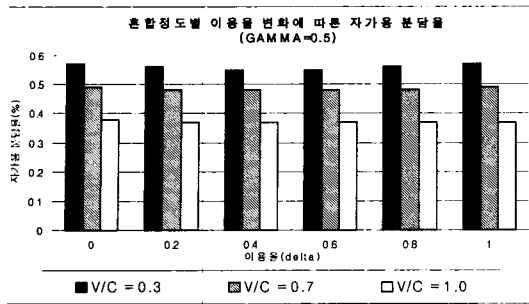
〈그림 7〉 체계 최적전략에서의 총 통행비용 상대비율



〈그림 6〉 혼합 최적전략에서의 총 통행비용 상대비율



〈그림 8〉 사용자 최적전략에서 혼잡정도에 따른 자가용 분담률



<그림 9> 혼잡 최적전략에서 혼잡정도에 따른 자가용 분담률

<그림 10> 체계 최적전략에서 혼잡정도에 따른 자가용 분담률

<표 5> 정보이용률, 정보제공전략, 혼잡정도에 따른 자가용 분담률

구분			delta						
			0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	
v/c	0.3	gamma	0.0	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
			0.5	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53	0.54
			1.0	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
	0.7	gamma	0	0.47	0.47	0.46	0.46	0.47	0.47
			0.5	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.46
			1.0	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
	1.0	gamma	0.0	0.37	0.37	0.36	0.36	0.36	0.37
			0.5	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
			1.0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

<표 6> 이용률, 정보제공전략, 혼잡정도에 따른 총 통행비용

구분				이용률 0% ← delta → 이용률 100%					
				0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
사용자 ↑	0.0	v/c	0.3	2878.84	2878.48	2878.26	2878.09	2879.00	2878.66
				(99.99)	(99.98)	(99.97)	(99.97)	(100.00)	(99.99)
				4814.01	4812.03	4811.32	4811.57	4812.21	4815.57
	0.7	v/c	0.3	(99.97)	(99.93)	(99.91)	(99.92)	(99.93)	(100.00)
				10505.84	10496.70	10492.48	10494.00	10496.09	10505.24
				(100.00)	(99.91)	(99.87)	(99.89)	(99.91)	(99.99)
	1.0	v/c	0.3	2874.90	2873.46	2873.99	2872.54	2874.34	2874.58
				(100.00)	(99.95)	(99.97)	(99.92)	(99.98)	(99.99)
				4799.87	4798.13	4798.02	4799.38	4798.27	4799.19
0.7	v/c	0.3	(100.00)	(99.96)	(99.96)	(99.99)	(99.97)	(99.99)	
			10455.90	10449.01	10447.94	10445.69	10446.72	10466.49	
			(99.90)	(99.83)	(99.82)	(99.80)	(99.81)	(100.00)	
1.0	v/c	0.3	2871.41	2870.61	2870.55	2870.36	2871.15	2871.85	
			(99.98)	(99.96)	(99.95)	(99.95)	(99.98)	(100.00)	
			4786.62	4786.07	4785.15	4786.12	4786.38	4787.12	
0.7	v/c	0.3	(99.99)	(99.98)	(99.96)	(99.98)	(99.98)	(100.00)	
			10413.94	10407.03	10406.30	10403.14	10407.23	10415.04	
			(99.99)	(99.92)	(99.92)	(99.89)	(99.93)	(100.00)	

주) 괄호안 수치는 각각의 최적 조건별로 이용률0%, V/C 0.3일 때 총 통행비용을 기준으로 해당 셀 의 비용을 나눈 백분을 값임.

(3) 시나리오Ⅲ의 분석결과

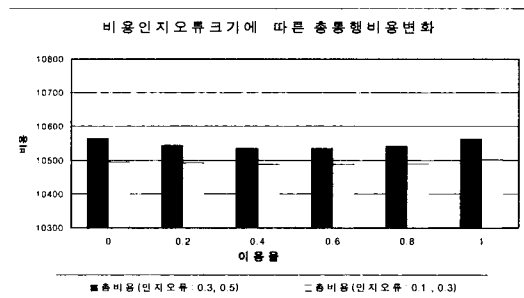
시나리오Ⅲ는 정보이용자의 비용인지오류의 크기가 정보 비이용자보다 크며, 이 때 버스 이용자가 자가용 이용자보다 더큰 값을 갖는다고 가정한다.

이 때의 정보이용률, 정보제공전략, 혼잡정도에 따른 총 통행비용의 변화와 수단분담률의 변화는 <표 6>과 <표 7>과 같으며 전체적인 변화패턴은 시나리오 I,Ⅱ과 유사하다.

(4) 시나리오Ⅳ의 분석결과

시나리오 I 은 정보이용여부에 따른 통행자 특성을 비용인지 오류크기로 반영하였으며, 수단별로 동일한 값을 적용하였다. 시나리오Ⅳ에서는 비용인지 오류를 시나리오 I 보다 크게 하여 비용인지오류 크기에 따른 총 통행비용 및 수단분담률의 변화특성을 살펴본다.

<그림 11>에서 보여주듯이 비용 인지 오류가 클때 총 통행비용이 더 크게 소요됨을 알 수 있다.



<그림 11> 비용인지 오류크기에 따른 총 통행비용의 변화(v/c=1.0, 사용자최적)

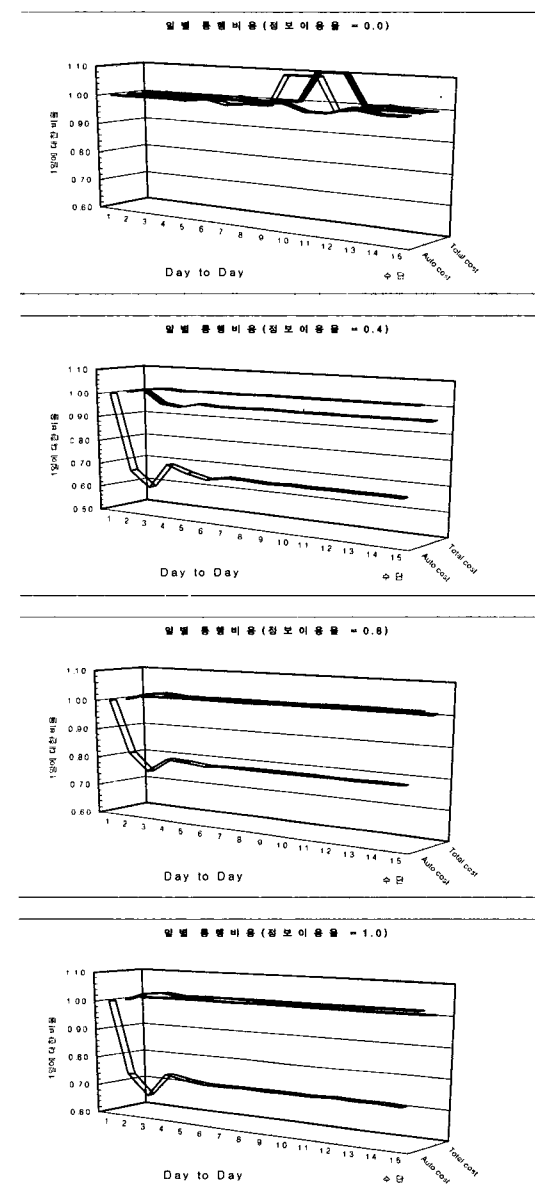
<표 7> 정보이용률, 정보제공전략, 혼잡정도에 따른 자가용 분담률

구분			0%← 이용률(delta) →100%					
			0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
v/c	0.3	gamma	0.0	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
			0.5	0.54	0.53	0.53	0.53	0.54
			1.0	0.53	0.52	0.52	0.52	0.53
	0.7	gamma	0.0	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
			0.5	0.46	0.45	0.45	0.45	0.46
			1.0	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45
	1.0	gamma	0.0	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
			0.5	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
			1.0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

4) 결과 분석2

가상네트워크 Ⅲ을 통해 정보제공전략과 정보 이용률 변화에 대하여 분석기간 15일 동안의 총 통행비용과 수단분담률의 변화 추이를 살펴보았다. (단 혼잡정도는 v/c=1.0으로 고정하였다.)

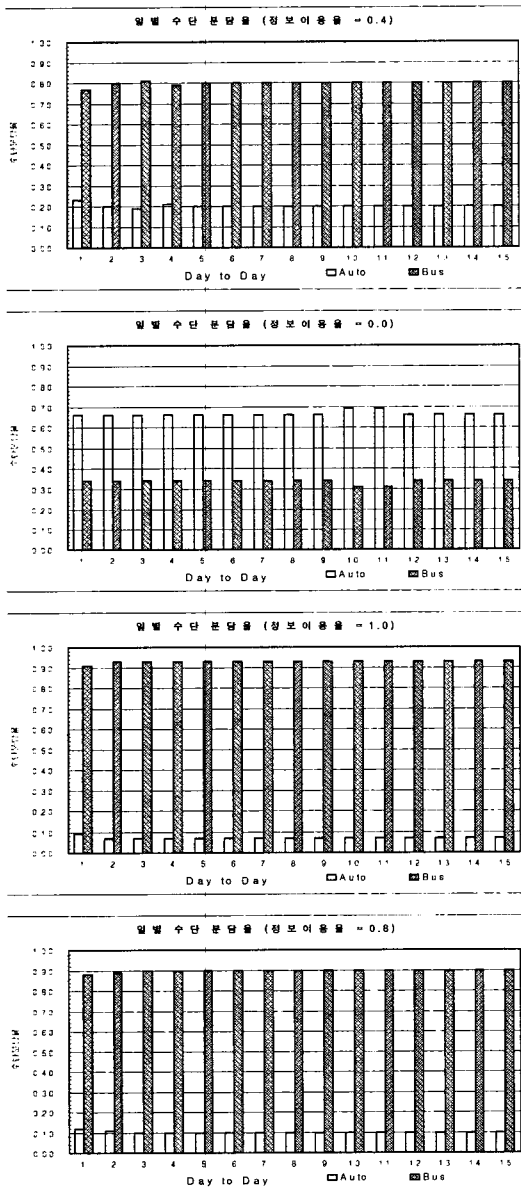
정적통행모형분석결과와는 달리 일별동적통행모형에서는 정보 이용률이 0.0인 경우를 제외하고 대체로 안정된 정보제공효과를 나타내고 있다. 즉 일별동적



<그림 12> 일별동적통행모형에서 정보이용률별 통행비용 변화 추이 (체계최적전략, 혼잡정도(v/c)=1.0)

통행모형에서는 정보제공의 역효과는 발생하지 않았으며, 오히려 정보이용률이 높을수록 정보의 이용가치가 향상됨을 알 수 있다.

사용자최적이나 혼합최적, 체계최적에 따른 각 이용률별 총 통행비용의 분포는 모두 유사하였다. <그림 12>와 <그림 13>은 체계최적전략을 구사할 때 통행비용과 수단분담률의 변화추이를 나타낸 것이다.



<그림 13> 일별동적통행모형에서 정보이용률별 수단분담률의 변화 추이 (체계최적전략, 혼잡정도(v/c)=1.0)

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 사전통행 정보 제공시 정보제공전략, 혼잡정도, 이용률 변화에 따른 정보제공효과 비교와 이를 위한 평가 모형에 관해서 다루었다.

기존 연구와 다른 점은 크게 두 가지로 정리할 수 있다. 첫째는 정보제공에 따른 경로변경 뿐 아니라 수단전환 행태를 파악하기 위해서 수단선택과 통행배정의 결합 모형을 적용하였다는 점이다. 둘째는 정적통행정보와 더불어 일별 동적 통행정보의 제공효과까지 분석대상에 포함하였다.

이에 따른 분석 결과를 열거하면 다음과 같다.

첫째, 정보제공전략과 총 통행비용과의 관계는 평형조건이 사용자에서 체계로 이동할 때 점차 줄어들었다. 이는 기존의 평형원리와 일치한 것이다.

둘째, 정보제공효과는 혼잡이 심할수록 크게 나타났다. 각 시나리오별로 약간의 차이는 있으나 대체로 v/c가 1.0일 때 총 통행비용의 감소 비율이 가장 컸으며, v/c가 0.3일 경우에는 정보제공효과가 거의 나타나지 않았다.

셋째, 혼잡정도에 따른 수단분담률 변화는 정보제공전략에 따른 변화보다 훨씬 크게 나타났다. 자가용분담률의 경우 혼잡이 심할수록 그 비율이 작아졌으며, 최대 20%의 이용차이가 있었다. 그러나 정보이용률에 따라서는 거의 변화가 없었다.

넷째, 정보제공전략이나 혼잡정도 모두 정보이용률이 0.4~0.6일 때 가장 좋은 효과가 나타나고, 1.0에 근접할수록 오히려 증가하는 것으로 미루어 정보제공효과는 정보이용률에 반드시 비례하지는 않으며, 이용률이 어느 한계선을 넘어서면 과잉반응, 과집중, 과포화 등에 의한 역효과-가령 Braess의 역설과 같은-가 야기될 수 있음을 암시하고 있다. 그러나 본 모형에서는 이용률이 1.0일지라도 비록 그 효과는 미미하나 정보를 전혀 이용하지 않는 경우보다는 총 통행비용이 절감되어 모든 정보이용자는 정보제공효과를 누릴 수 있었다.

다섯째, 정적모형에서는 정보제공시스템이 총 통행비용의 절감이라는 효과를 기대할 수 있다. 그러나 그러한 효과의 극대화는 다음의 환경에서 이뤄질 수 있다.

- ① 정보이용률이 40~60%일 때
 - ② 혼잡이 시작되거나 매우 심각하지 않은 교통류상
황에서
 - ③ 체계 최적의 원리를 적용한 정보를 제공할 때
- 여섯째, 일별동적통행모형을 통해 총 통행비용과
수단분담률을 살펴보았을 때 정적모형과는 다음의 차
이점이 있었다.

우선 정보이용률에 따른 정보제공효과는 분석기간
내내 정보를 이용하는 비율이 증가할수록 더 커졌으
며, 정보를 전혀 이용하지 않을 경우 많은 통행비용
을 소모하였다.

또한 정보이용률이 증가할수록 자가용분담률이
크게 감소하여 정적통행정보 제공시 이용률 변화에
따른 수단분담률의 변화가 거의 없던 것과는 대조
되었다.

본 연구에서 미진한 점은 다음과 같으며, 이를 향
후 연구과제로 남겨둔다.

첫째, 정보제공의 효과의 시간적 특성을 살펴보기
위해 일별동적통행모형을 적용하였으나 보다 더 현실
적인 통행행태 반영을 위해서는 실시간적인 분석이
가능한 일중동적 모형(With-in-day Dynamic Model)이
바람직할 것이다.

둘째, 본 연구에서 다른 요소 외에도 제공정보차
의 표현방법, 제공방식, 통행자의 개성 등 다양한 원
인에 따라 정보제공효과가 달라질 수 있다. 따라서
이들의 중요도를 평가하고, 이를 모형에 내재화함으
로써 통행자의 행태를 정확히 분석할 수 있어야 한다.

셋째, 수단전환 행태를 더욱 정확히 반영하기 위해
서는 대중교통수단의 환승이나 정류장 대기 등을 설
명할 수 있는 비용함수 연구가 시급하며, 선택통행자
(Choice Rider)와 의존통행자(Captive Rider)에
대한 섬세한 구분이 요구된다.

참고문헌

- 1. 임용택(1996), 신호제어 및 가변교통정보를 고려
한 동적 교통관리모형의 개발 연구, 박사학위논문.
- 2. Ben-Akiva, M., De Palma, A., and Kaysi,
I. (1991), Dynamic Networks Models and

- Driver Information Systems, *Transportation Research*, Vol. 25A, pp.252~266.
- 3. Breheret, L., Hounsell, N. B., and McDonald, M.(1990), The Simulation of Route Guidance and Traffic Incidents, Presented at 22nd Annual Universities Transport Studies Group Conference, Hatfield, U.K.
- 4. David Walting외(1993), A Probabilistic Multi-pass Traffic Assignment model Which Obviates Path Enumeration, *Transportation Research*5, pp.93~111.
- 5. Mahmassani, H. S. and Jayakrishman, R. (1989), System Performance and User Response Under Real-time Information in a Congested Traffic Corridor, Presented at Seminar on Urban Traffic Networks, Capri, Italy.
- 6. Kobayashi, F., Feasibility study of route guidance system(1979), *Transportation Research Record 737*, TRB, National Research Council, Washington,D.C., pp.107~112.
- 7. Smith, J. C. and Russam, K.(1989), Some Possible Effects of Autoguide on Traffic in London, *Proceedings of 1st Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, Toronto, Canada, pp.282~287.
- 8. Tsuji, J. C. and Russam, K.(1989), Some Possible Effects of Autoguide on Traffic in London, *Proceeding of 1st Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, Toronto, Canada, pp.282~287.
- 9. Vuren, T. V., Vliet, D.V. and Smith, M. J.(1989), Combined Equilibrium in a Network With Partial Route Guidance. In *Traffic Control Methods*(S.Yagar and S.E. Rowe, eds.), Engineering Foundation, New York, pp.375~387.
- 10. Vuren, T. V. and Waling, D.(1991), multiple User Class Assignment Model for Route Guidance, *Transportation Research Record 1306*.