

[연구논문]

실시간교통정보에 의한 경로선정의 투명성 개선효과

- 남산1호터널 교통정보시스템 사례연구를 중심으로 -

A Study on the Transparency Improvement of Drivers' Route Choices by Providing with Real-time Traffic Information

- A Case Study on Namsan 1st Tunnel Transportation Information Systems -

이 청 원* · 권 병 철**

목 차

I. 서론

III. 사례 연구

II. 실시간교통정보제공과 경로선택

IV. 결론

ABSTRACT

Chungwon Lee · Byungchul Kwon

When drivers encounter multiple available routes, they may evaluate the utility of each route. Two important factors in the evaluation are travel time and toll charge if any. Without knowing the current travel time of each route, their decisions are not necessarily optimum. It is called "transparency issue" that drivers are blinded to choose the optimum route among the others because of the limited travel time information.

Providing travel time information is assumed to help drivers choose their optimum route. This assumption is investigated in two ways in this paper on a simple network with a tolled and a free route. First, the probability to choose a non-optimal route is calculated in three different cases depending on the information availability. Second, using the real network data, the route decision improvement by real time traffic information provision is statistically verified in the Namsan hillside network. The result implies the real time traffic information system can improve the transparency problem in route decision makings, and also justifies the necessity of a real time traffic information system.

키워드(Key Words): 실시간교통정보(real time traffic information system), 첨단교통정보체계(ATIS), 통행비용사전인지(transparency issue), 경로선택(route choice)

* 서울시정개발연구원 도시교통연구부 연구위원

** 서울시정개발연구원 도시교통연구부 연구원

I. 서론

본 논문은 실시간 교통정보시스템이 운전자의 경로선택에 미치는 영향을 실제 교통망에서 분석한 논문이다. 운전자가 통행료를 내야하는 상황에서 무료의 대안도로가 있는 경우에, 실시간 통행시간에 관한 정보제공은 운전자의 경로결정과정에 있어서 불확실성을 감소시키게 된다. 이를 경로효용평가에 있어서 통행비용사전인지 혹은 투명성(transparency) 개선이라 하는데, 실시간 교통정보시스템의 중요한 순기능에 해당한다. 이러한 투명성(transparency) 개선효과를 정보제공 상황에 따라 확률적으로 설명한 후, 유사사례인 서울시 남산1호터널교통정보시스템의 사전사후 자료를 활용하여 통계적으로 검정해 보았다.

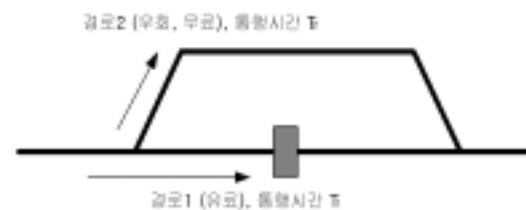
일반적으로 운전자는 경로 선정시, 사회경제적인 특성과 통행목적 외에도, 통행시간 및 비용을 매우 중시하는 것으로 알려져 있다. 특히, 이용 가능한 대안경로 중에, 유료도로나 유료터널을 포함하는 경우에는 통행시간과 통행료를 비교하며 경로를 선정 혹은 변경하곤 한다. 도시부 도로는 특성상 통행시간의 변화가 매우 심하여, 경험에 의존한 통행시간과 실제상황의 불일치 가능성이 매우 높다. 예컨대, 도심의 유료장대터널은 유출부의 정체가 터널내로 과급되면서 예측 불가능한 정체가 터널내까지 빈번히 발생한다. 이때, 이를 모르고 통행료를 내고 터널로 진입한 운전자들은 폐쇄된 공간이 주는 심리적 압박감까지 가중되어 커다란 불만을 갖게 된다. 이때, 교통상황 모니터링 장비를 구축한 후, 통행시간을 가공하여 운전자들에게 실시간으로 제공한다면, 운전자들은 통행시간과 통행료 둘을 경로선택시에 사전인지하

게 되어, 경로선택의 불확실성이 감소하고 불만이 적어질 것이다.

서울 남산1호터널 교통정보시스템은 두 경로(터널과 소파·소월길)를 관장하고 있다. 우선 남산1호터널은 유료의 장대터널이며 소파·소월길은 무료의 우회로이다. 시스템개통 이전의 자료를 통하여 통행비용사전인지의 불확실성이 야기하는 문제점을 제기하고, 시스템개통으로 인한 실시간 교통정보제공이 이러한 불확실성을 개선했는지를 통계적으로 분석해 보았다. 분석결과, 실시간 교통정보제공으로 운전자 통행비용사전인지에 있어서 개선효과가 있음이 입증되었다. 이는 실시간 교통정보제공이 교통관리에 있어서 상당한 역할 수행이 가능함을 확인시키는 사례 중 하나이다.

II. 실시간교통정보제공과 경로선택

실시간교통정보제공과 경로선택의 관계를 설명하기 위해 <그림 1>과 같은 간단한 네트워크를 고려할 수 있다.



<그림 1> 경로선택 테스트 네트워크

빠르지만 유료인 경로1의 통행시간(T_1)과 우회하지만 무료인 경로2의 통행시간(T_2)은 교통 상황에 따라 상당한 폭을 갖게 되는 연속확률변수라 할 수 있다. 그 통행시간 분포에 관한 밀도

함수를 각각 f_{T_1} , f_{T_2} 라 정의하고, 만약 어느 시간대에 $T_2 = t_2 < T_1 = t_1$ 인데도(즉, 경로2가 더 빠름) 경로1을 지나게 되는 운전자는 통행료를 지불하고도 더 느린 경로를 택하게 되는 문제가 발생하게 된다. 이를 확률적으로 설명하면,

$$\begin{aligned} & \Pr(T_2 < T_1) \\ &= \int_0^{\infty} \Pr\{T_2 < T_1 | T_1 = t_1\} f_{T_1}(t_1) dt_1 \quad \text{<식 1>} \\ &= \int_0^{\infty} \Pr\{T_2 < t_1 | T_1 = t_1\} f_{T_1}(t_1) dt_1 \end{aligned}$$

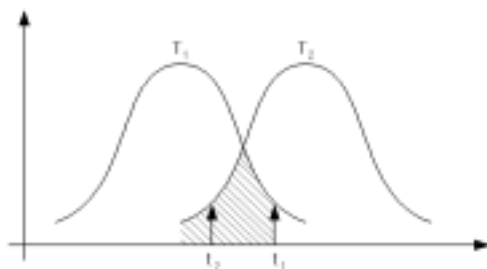
만약 T_2 , T_1 이 독립이라면,

$$\begin{aligned} &= \int_0^{\infty} \Pr\{T_2 < t_1\} f_{T_1}(t_1) dt_1 \\ &= \int_0^{\infty} F_{T_2}(t_1) f_{T_1}(t_1) dt_1 \quad \text{<식 2>} \\ & \text{(단, } F_{T_2}(t_1) = \int_0^{t_1} f_{T_2}(t_2) dt_2) \end{aligned}$$

여기서, t_1 , t_2 는 경로1과 경로2의 특정 통행시간값을 의미한다.

실시간 교통정보제공이 운전자에게 어떤 가치를 가지게 되며 경로선택의 스트레스와 어떻게 관련이 있는지를 살펴보기 위해 다음 3가지 경우를 검토해 볼 수 있다.

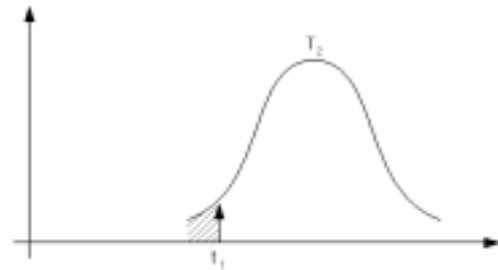
[Case 1] 경로1과 경로2 통행시간 모두를 제공하지 않는 경우



<그림 2> 두 경로의 통행시간을 모르는 경우

$T_1 = t_1$ 이고 $T_2 = t_2$ 인지 모르는 상황이므로 겹치는 부분에서 경로2가 오히려 빠를 수 있음에도 운전자는 경로1을 택할 소지가 있게 된다. <그림 2>에서 경로1은 일반적으로 경로2에 비해 우세(dominant)하나 운전자는 잘못된 경로를 선택하게 될 여지가 있다. 왜냐하면 운전자들은 자신의 경험에 의존한 확률밀도함수를 이용하여 경로를 선택할 수밖에 없기 때문이다. 즉, T_1 이 T_2 에 비해 시간절약 측면에서 우세하지만 확률적(stochastic)이기 때문에 운전자에게는 통행료 징수에 따른 경로선택시에 정보부족으로 인한 상당한 스트레스를 받게 된다.

[Case 2] 경로1의 통행시간만을 제공하는 경우

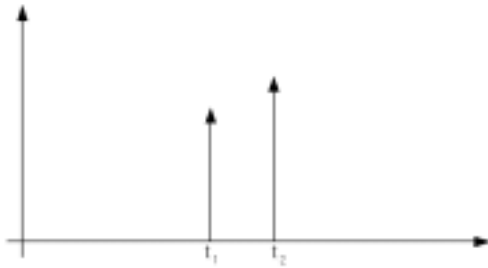


<그림 3> 경로1의 통행시간(t_1)만을 아는 경우

경로1의 통행시간(t_1)을 운전자에게 제공한다면 하더라도 여전히 경로2가 빠를 수 있는 가능성이 <그림 3>의 빗금친 부분처럼 있기 때문에 운전자들의 경로선택 어려움은 여전히 존재한다. 다만, 그 확률이 어떨지 대강은 경험적으로 감을 잡을 것이기에 스트레스는 상당히 절감될 것이다. 그러나, 통행료를 징수하는 경로1만의 교통정보제공으로는 계속해서 경로선택의 불확실성이 존재한다. 이 때문에 우회도로를 포함하는 교통정보

제공이 운전자입장에서는 매우 긴요할 것이다.

[Case 3] 경로1과 경로2의 통행시간을 모두 제공 하는 경우



<그림 4> 두 경로의 통행시간을 모두 아는 경우

이때 운전자는 두 경로 모두의 통행시간을 알기에 자신의 시간가치를 따져서 어느 한쪽을 택할 수 있을 것이다. <그림 4>와 같이 경로1의 통행시간(t_1)이 적지만 경로2의 통행시간(t_2)와의 차이를 알기 때문에 통행료 지불을 하면서 경로1을 택할 것인지, 아니면 통행료를 아끼고 경로2를 택할 것인지를 사전에 알고 결정할 수 있게 된다. 즉, 실시간 교통정보제공으로 통행비용사전인지가 가능해져서 경로선택의 스트레스가 해소될 수 있는 것이다.

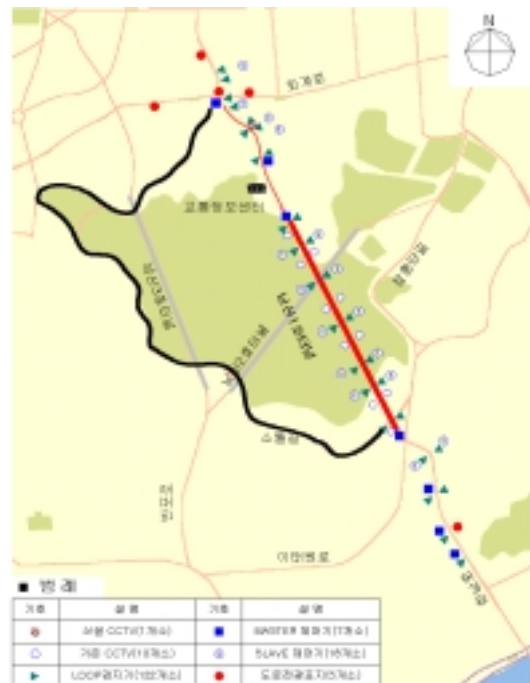
III. 사례 연구

본 연구는 실시간교통정보제공에 따른 운전자의 통행비용사전인지 즉, 투명성(transparency) 개선효과를 입증하는 것이다. 남산1호터널 교통정보시스템 사례는 <그림 1>에서 설정한 테스트 네트워크와 거의 동일하기 때문에 본 연구의 사례연구 대상지로 설정하였다.

1. 남산1호터널 교통정보시스템 개요

서울시 남산1, 3호터널은 도심유출입 차량을 우회노선으로 유도하거나 억제하여 터널 및 주변의 혼잡을 완화하고자 1996년 11월부터 혼잡통행료를 징수하고 있다. 하지만, 남산1, 3호터널이 유료임에도 불구하고 열악한 도로여건으로 인한 빈번한 터널내 지체는 이용자에 대한 불만요인이 되어왔다. 이에 운전자의 우회도로 이용을 활성화하고, 혼잡통행료 부과의 취지를 적극 살리기 위해 서울시는 2000년 12월부터 남산1호터널 교통정보시스템을 운영하고 있으며 현재는 남산2, 3호터널 및 주변도로를 포함한 확장된 시스템을 구축하고 시범운영중에 있다.

현재 남산1호터널 교통정보센터는 서울시 도시철도공사 연수원 내에 위치하고 있으며 운영은



<그림 5> 남산1호터널 교통정보시스템 시설 현황

서울시 시설관리공단에서 맡고 있다. 운영요원이 24시간 실시간 교통정보를 제공하기 위해 교대근무를 수행하고 있으며 시설물 현황은 <그림 5>와 같다.

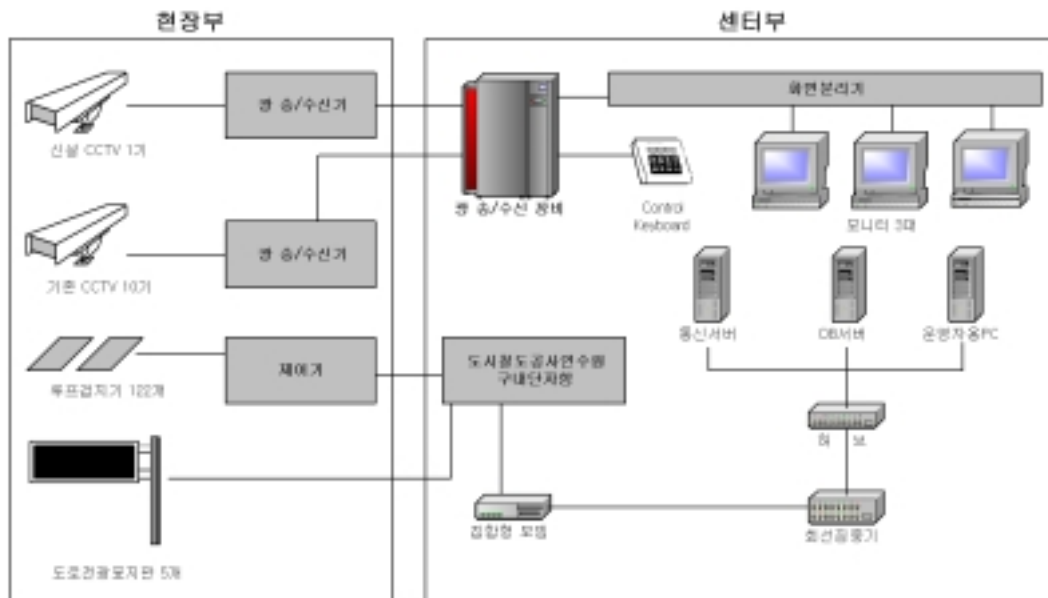
남산1호터널에 구축되어 있는 교통정보시스템의 구성 내용을 간략히 살펴보면 크게 현장부와 센터부로 나누어 볼 수 있고 각 부분별 구성요소들의 시스템 구성도는 <그림 6>과 같다.

<그림 5>와 <그림 6>에서 보는 바와 같이 초기에 구축된 남산1호터널 교통정보시스템은 소월길과 같은 우회도로에 대한 정보수집은 불가능하고 단지 1호터널에 대한 배타적인 교통정보를 제공하는 시스템으로 시작하였다. 앞서 설명한 '2. 실시간교통정보제공과 경로선택'과 연계해 본다면 남산1호터널 교통정보시스템을 구축함으로써 운전환경이 [Case 1] 상태에서 [Case 2] 상태로 전이된 것이다.

2. 경로선정의 투명성 (transparency) 개선효과 분석

실시간 교통정보제공에 의한 경로선정의 투명성 개선효과를 분석하기 위해서는 시스템 개통직후의 데이터들보다는 시스템이 안정화에 접어든 시기의 데이터들이 오히려 유용하지만 이럴 경우 전과 후 자료에 대한 계절요인이 존재할 확률이 높아진다. 따라서 본 연구에서는 각 경로의 통행시간에 대한 계절요인의 영향을 없애기 위해서 분석항목을 남산1호터널과 우회경로(소월길)의 상대적인 통행시간차로 설정하였다. 이는 대안경로들의 효용차이를 평가할 때, 절대적인 통행시간값을 몰라도 대안간 통행시간의 차이를 알면 분석이 가능하기 때문이다.

개통전 자료의 수집기간은 2000년 12월 10일(일요일)~2000년 12월 16일(토요일)이며, 개통후



<그림 6> 시스템 구성도

자료의 수집기간은 2001년 3월 11일(일요일)~2001년 3월 17일(토요일)이다. 눈과 비와 같은 날씨영향이 없는 날을 선정하였으며 전반적인 분석과정은 <그림 7>과 같다.



<그림 7> 분석과정

통행시간자료: (주)로티스의 프로브차량의 원시데이터 이용

각 링크별 프로브데이터를 이용 → 5분단위 평균속도를 산정 → 링크통행시간 산출

남산1호터널과 소월길의 경로통행시간 산출

두 경로의 통행시간 상관계수 산출(상관관계 분석)

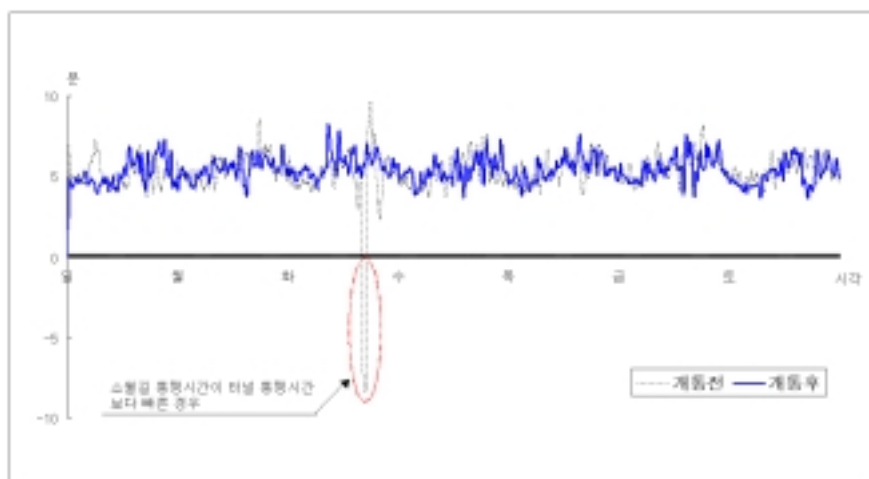
시스템 개통전후에 경로통행시간차의 평균, 분산 비교(가설검정)

<식 2>에서 T_1 과 T_2 가 독립이라는 가정은 매우 강한 가정이어서 현실적이지 않을 수 있다. 로티스(주)의 원시자료를 이용하여 남산1호터널 통행시간(T_1)과 우회로인 소월길 통행시간(T_2)간의 상관계수를 구한 결과는 <표 1>과 같다.

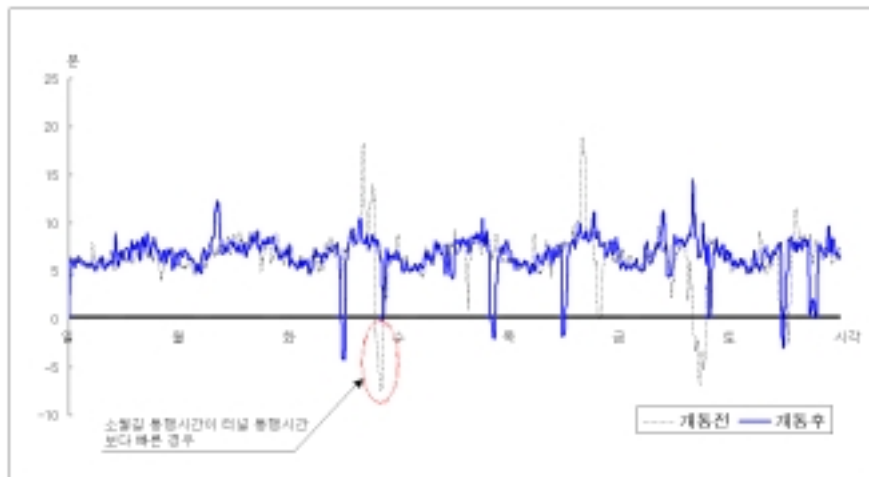
<표 1> 1호터널과 소월길 통행시간 상관관계

시간대	상관계수
오전 첨두 (7:30-9:00)	0.31
비첨두 (10:30-12:00)	0.24
오후 첨두 (6:00-7:30)	0.52

두 경로통행시간의 상관계수가 첨두시에 상대적으로 높은 것은 터널이 막힐 때 소월길도 막히는 현상이 발생함을 의미하나 상관계수 자체가 그리 크다고 볼 수는 없다. 높지 않은 상관계수는 앞서 설명한 바와 같이 교통정보의 부족으로 운전자가 경로선택시에 자신에게 유리한 선택을 하지 못할 수 있는 개연성이 충분히 있음을 암시한다.



<그림 8> 도심방향 통행시간차 (실제통행시간)



<그림 9> 외곽방향 통행시간차 (실제통행시간)

<그림 8>과 <그림 9>는 각각 도심방면, 외곽방면에 대해서 시스템 개통전후의 남산1호터널과 소월길의 통행시간차를 1주일동안의 데이터를 가지고 시간대별로 비교한 것이다. 그래프에서 세로축인 0을 기준으로 아래쪽으로 치우친 부분은 소월길의 통행시간이 남산1호터널의 통행시간보다 더 빠른 경우를 나타낸다. 전체적으로 그래프가 6분 영역에서 그려지는데 이는 소월길의 통행시간이 남산1호터널의 통행시간보다 대략 6분 정도 크다는 것을 의미다.

도심방향의 경우 개통전과 후를 비교해볼 때 차이가 미미한 것으로 나타났고, 외곽방향의 경우에는 그래프상 변화가 보다 뚜렷하게 관측되었다. 시스템 개통전에 비해 시스템 개통후 통행시간차의 변동폭이 줄어들었고, 특히 차이가 뚜렷하게 나타나는 화요일, 목요일, 금요일의 경우에는 실시간 교통정보제공 후에 변동폭이 줄어드는 시간대가, 터널부 외곽방향에서 지체가 나타났던 오후 2시~8시대이다.

특히, 그래프 상에서 알 수 있듯이, 시스템 개

통전에는 통행료를 내고도 터널이용경로의 통행시간이 더 걸리는 경우가 발견되었다. 즉, 통행료를 내면서 통행시간은 더 소요되는 불합리한 상황이 발생한 것이다. 그래프상에서 도심방향 화요일 저녁시간대, 외곽방향 화요일 저녁과 금요일 저녁시간대가 이에 해당한다. 이러한 불합리한 경우는 통행시간 사전인지가 안되기 때문이며, 시스템 개통후에는 이러한 현상이 현격히 줄었음을 그래프를 통해서 확인할 수 있다. 다만, 소월길에 대한 교통정보는 현재 제공하고 있지 않기 때문에 여전히 불확실성은 남아있다고 볼 수 있겠다.

시스템 개통으로 인한 두 경로의 통행시간차 변화를 좀 더 상세히 알아보기 위해서 개통전후에 대한 통행시간차에 대해서 평균 및 분산 비교를 실시하였다.

통행시간차 평균비교의 귀무가설은 시스템 개통전과 개통후의 통행시간차가 동일($H_0: \mu_{\text{개통전}} = \mu_{\text{개통후}}$)하다고 설정하고, 대립가설($H_1: \mu_{\text{개통전}} > \mu_{\text{개통후}}$)은 개통전의 통행시간차가 크다는 것으로 설정하여 0.01의 유의수준(α)에서 단측검

정을 실시하였다. <표 2>는 평균비교에 대한 분석결과를 나타내고 있으며, 표에서 보는 바와 같이 유의수준 0.01에서 시스템 개통전후의 통행시간차의 평균이 동일하다는 귀무가설(H_0)은 모두 기각된다.

통행시간차 분산비교의 귀무가설은 시스템 개통전과 개통후의 통행시간차의 분산이 동일(H_0 : $\sigma^2_{\text{개통전}} = \sigma^2_{\text{개통후}}$)하다고 설정하고, 대립가설은 개통전의 통행시간차 분산이 크다(H_1 : $\sigma^2_{\text{개통전}} > \sigma^2_{\text{개통후}}$)는 것으로 설정하여 유의수준 0.01에서 F-test를 수행하였다. <표 3>에서 보는 바와 같이 유의수준 0.01에서 시스템 개통전후

의 통행시간차의 분산이 동일하다는 귀무가설(H_0)은 모두 기각된다.

통계분석결과, 남산1호터널 교통정보시스템으로 인해서 소월길과 남산1호터널의 통행시간차 자체의 크기도 감소했고 그 변동의 크기도 상당히 감소한 것으로 나타났다. 이는 실시간 터널통행시간 정보로 인하여 비록 소월길의 실시간 통행시간 정보가 없는 가운데서도 소월길을 적극적으로 이용하는 현상이 발생하기 때문이며, 운전자들의 통행비용사전인지의 개선, 즉 경로선택의 투명성(transparency) 개선으로 인하여 교통류가 보다 안정적으로 변화되었음을 의미한다.

<표 2> 교통정보시스템 개통전후 통행시간차 평균비교

항목	도심방향	외곽방향
귀무가설(H_0)	$\mu_{\text{개통전}} = \mu_{\text{개통후}}$	$\mu_{\text{개통전}} = \mu_{\text{개통후}}$
대립가설(H_1)	$\mu_{\text{개통전}} > \mu_{\text{개통후}}$	$\mu_{\text{개통전}} > \mu_{\text{개통후}}$
유의수준(α)	0.01	0.01
기각역	$z > 2.326$	$z > 2.326$
표본통계량	$\bar{x}_{\text{개통전}} = 6.125, \bar{\sigma}_{\text{개통전}} = 8.785$ $\bar{x}_{\text{개통후}} = 5.42, \bar{\sigma}_{\text{개통후}} = 0.757$	$\bar{x}_{\text{개통전}} = 11.182, \bar{\sigma}_{\text{개통전}} = 23.77$ $\bar{x}_{\text{개통후}} = 9.097, \bar{\sigma}_{\text{개통후}} = 16.15$
검정통계량	$z = 3.589$	$z = 3.258$
결과	H_0 기각	H_0 기각

<표 3> 교통정보시스템 개통전후 통행시간차 분산비교

항목	도심방향	외곽방향
귀무가설(H_0)	$\sigma^2_{\text{개통전}} = \sigma^2_{\text{개통후}}$	$\sigma^2_{\text{개통전}} = \sigma^2_{\text{개통후}}$
대립가설(H_1)	$\sigma^2_{\text{개통전}} > \sigma^2_{\text{개통후}}$	$\sigma^2_{\text{개통전}} > \sigma^2_{\text{개통후}}$
유의수준(α)	0.01	0.01
기각역	$F > 1.00$	$F > 1.00$
표본통계량	$S_{\text{개통전}} = 8.785, S_{\text{개통후}} = 0.757$	$S_{\text{개통전}} = 23.77, S_{\text{개통후}} = 16.15$
검정통계량	$F = 134.65$	$F = 2.167$
결과	H_0 기각	H_0 기각

IV. 결론

도시가로망의 교통류는 매우 불안정하여 주변 교통상황에 대한 인지도가 높은 운전자조차도 때때로 불합리한 선택을 하게 된다. 사례연구 대상지인 남산1호터널의 경우에 터널부의 지체나 유고에도 불구하고 이를 인지하지 못하여 통행료를 지불하고 터널내에 장시간 대기하게 되는 상황이 발생할 수 있다. 혼잡통행료 부과 타당성에도 불구하고 운전자 입장에서는 불만의 여지가 높은 것이다.

본 연구에서는 운전자의 통행비용사전인지 혹은 투명성(transparency) 개선을 위해서는 실시간 교통정보제공이 필요하다는 것을 대안경로를 갖는 간단한 네트워크의 3가지 case를 통해 설명하였다. 또한, 실제 남산1호터널과 소월길에 대해서 실시간 교통정보제공 전후로 경로통행시간차 변화도를 통계적으로 분석하였다. 그 결과, 남산1호터널에 대해서만 배타적인 정보를 제공했음에도 불구하고 통행시간차의 변동이 상당히 안정화되었고, 소월길 통행시간이 남산1호터널 통행시간보다 빨라지는 통행시간 역전현상이 개선되어 운전자의 통행비용사전인지에 있어서 상당한 개선이 있었음을 확인하였다. 이러한 결과는 실시간 교통정보시스템이 운전자에게는 물론이고 교통관리측면에서도 매우 효과적일 수 있다는 것을 보여주는 것이다.

본 연구의 통행시간자료 산출을 위해 사용한 프루브차량자료는 샘플링 및 링크기반 통행시간 등의 요인들로 인해 경로통행시간을 정확히 산출하는 데 다소 한계가 있었으며, 남산1호터널 정보시스템이 터널에 대한 배타적인 정보만을 제공함

으로 인해 우회로 정보제공을 포함할 경우의 개선효과는 분석하지 못했다. 향후, 구간검지자료를 활용한 정확한 통행시간자료와 우회로를 포함한 실시간교통정보를 활용하여 보다 광범위한 영역에 적용할 수 있는 교통관리전략 개발이 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- 남산1호터널 교통정보시스템 모니터링, 서울시정개발연구원, 2001
- 남산3호터널/서울역고가도로 교통정보시스템 구축 기본 계획(안), 서울시정개발연구원, 2001
- Berry, D.A. and Lindgren, B.W., *Statistics Theory and Methods*, Duxbury press, 1996
- Mahmassani, H.S. and Jayakrishnan, R., *System Performance and User Response Under Real-Time Information in a Congested Traffic Corridor*, TR Vol.25A, No.5, pp.293~307, 1991
- Hau, T., *Congestion Charging Mechanism for Roads: An Evaluation of Current Practice*, The Worldbank, 1992
- May, A.D., *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice Hall, 1984