

출발 및 도착시각기준 구간통행시간 차이의 원인규명에 관한 연구: 연속류를 중심으로

Comparative Analysis of the Link Travel Times
: Departure Time Based vs Arrival Time Based

김재진 한양대학교 도시대학원 박사과정(제1연구자)

노정현 한양대학교 도시대학원 교수

박동주 서울시립대학교 교통공학과 부교수(교신저자)

남궁성 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원

※ 주요단어 : 구간검지기, 도착시각기준, 출발시각기준, 구간통행시간, TCS

목 차

- I. 서론
- II. 구간검지체계를 이용한 통행시간 관련 연구 고찰
 - 1. 통행시간 및 대표값 산출 개념
 - 2. 기존 연구 검토
 - 3. 시사점
- III. 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값 비교
 - 1. 개념적 비교
 - 2. 실증적 비교
- IV. 통행시간 차이의 원인규명 및 영향분석
 - 1. 기본 가정
 - 2. 모형 구축
 - 3. 적용 및 결과분석
- V. 결론

I. 서론

교통정보는 크게 시간단면에서의 교통상태를 나타내는 지점정보와 어떤 한 시점을 기준으로 구간의 교통상태를 나타내는 구간정보(또는 구간교통정보)로 구분할 수 있다. 여기서 대표적인 구간정보는 통행시간으로서 어떤 시점에서 해당 구간을 통과하는 데 소요되는 시간을 의미한다. 이는 주로 실제 해당 구간을 통행한 차량이 경험한 통행시간 자료로부터 직접 얻는 방법이 널리 쓰이고 있다. 여기서 통행시간 자료가 획득되는 시점은 그 차량이 구간통행을 종료한 시점, 즉, 도착시각이다. 이 때문에 많은 경우, 통행시간 자료가 도착시각기준으로 집계)된다. 그러나 통행시간은 어떤 시점(즉, 출발시각)에서 해당 구간을 통행하는 데 소요되는 시간이라는 점에서 볼 때, 도착시각기준이 아닌 출발시각 기준으로 집계되는 것이 합리적이다.²⁾

이에 구간검지시스템의 통행시간 자료를 이용한 일부 연구에서는 출발시각기준 통행시간 자료를 이용³⁾하고 있으나, 출발 및 도착시각기준 통행시간의 차이의 발생원인과 그 영향정도를 파악하는 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 구간검지시스템에서 수집되는 통행시간 자료에 대한 출발 및 도착시각기준 통행시간 개념을 정립하고자 한다. 그리고 국내에서 운영 중인 고속도로 통행료 징수시스템(TCS)⁴⁾ 자료를 이용하여 출발 및 도착시각기준 통행시간의

차이가 발생하는 원인을 규명하고 그 영향정도를 산출하고자 한다.

II. 구간검지체계를 이용한 통행시간 관련 연구 고찰

1. 통행시간 및 대표값 산출 개념

구간검지체계로부터 통행시간을 산출하기 위해서는 산출구간의 시점과 종점에 구간검지기를 설치하고 시점을 출발한 차량이 종점을 통과할 때 시점에서 종점까지의 통행시간을 산출하게 된다. (홍은주·김영찬, 2002).

통행시간 산출 식은 <식 1>과 같다.

$$t_{ABi} = t_{Bi} - t_{Ai} \quad \text{<식 1>}$$

t_{Ai} : 차량 i 가 시점검지기 A를 통과한 시각

t_{Bi} : 차량 i 가 종점검지기 B를 통과한 시각

t_{ABi} : 구간 AB에서 차량 i 의 산출 통행시간

그리고 구간검지시스템에서 수집되는 개별차량의 통행시간 자료는 여러 가지 요인에 의해 이상치가 발생하여 구간통행시간 산출에서 제외시켜야 할 필요가 있다. 강진기(2001)는 이상치가 발생하는 요인을 다음과 같이 설명하였다.

- 차량 주행도중 고장 및 주차 등에 의하여 통행시간이 너무 장시간인 경우
- 긴급시 주행 또는 불법적인 주행 등으로 인해

1) 구간검지체계에서 수집된 원시자료(개별차량의 통행시간 자료)를 구간 평균통행시간으로 추정하기 위해 모으는 일정한 시간간격(Aggregation Time Interval)을 의미함.

2) 출발시각기준 통행시간 정보 산출에 대한 필요성에 대해서는 참고문헌 11(한국도로공사, 2000 : p49)을 참고하기 바람.

3) 예를 들면, 한국도로공사, 2000; 강정규·남궁성, 2002; 이의은·김정현, 2002; 오세창 외, 2003; Rilett and Park, 2001; Zietsman and Rilett, 2000; Zhang and Rice, 2003; Park et. al, 2000;2002 등

4) TCS(Toll Collection System) : 고속도로 폐쇄구간의 출발 톨게이트 및 도착 톨게이트 통과시각이 기록되는 통행료 징수시스템으로 개별차량의 통행시간 데이터를 제공한다.

구간통행시간이 너무 짧은 경우(강진기 외, 2001 : p25).

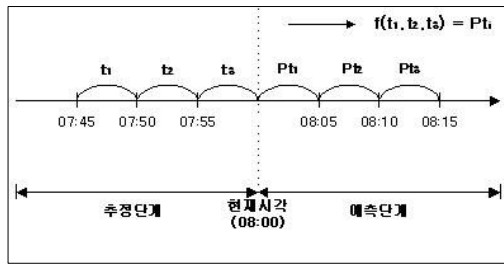
기존 구간검지시스템의 통행시간 자료에 대한 이상치 제거 연구로는 <표 1>과 같이 SwRI (South west Research Institute, 1998) 알고리즘과 강진기 외(2001) 그리고 한국도로공사(2000) 등의 연구가 있다. 이상치가 제거된 개별차량의 통행시간 자료는 특정 시간집계간격 당 하나의 대표값으로 산출되어 통행시간 추정 및 예측을 목적으로 하는 모형에 이용된다.

또한, <그림 1>과 같이 통행시간 추정 및 예측 기간을 5분 단위로 가정하면, 현재 시각이 08:00인 경우 07:46 ~ 07:50, 07:51 ~ 07:55,

<표 1> 기존 구간검지시스템의 이상치 제거관련 연구

구 분	연구 대상	이상치 제거방법	이용 자료
강진기 외 (2001)	단속류	상한값, 하한값 설정에 의한 신뢰구간 추출법 ⁵⁾ 이용	AVI
한국도로공사 (2000)	연속류	중위절대편차(MAD ⁶⁾) 이용	TCS
SwRI (1998)	연속류	이전 집계시간대의 통행시간 대표값을 이용한 이상치 제거법 ⁷⁾ 결정	AVI

<그림 1> 통행시간 대표값을 이용한 통행시간 예측 개념



07:56 ~ 08:00까지의 통행시간 추정 대표값은 각각 t_1, t_2, t_3 가 되며, 이를 $f(t_1, t_2, t_3)$ 이라는 예측 모형에 적용하면 예측된 통행시간 대표값(P_{ti})이 산출된다.

기존 대부분의 통행시간 추정 및 예측 연구들은 통행시간 대표값으로 평균값을 적용하였으며, 김남선 외(2000), 이의은·김정현(2002)의 연구에서는 최빈값을 적용하였다.

기존의 대표적인 구간검지시스템으로는 San Antonio의 TransGuide System을 들 수 있다. 이 시스템은 AVI⁸⁾ 자료를 수집하고 있으며, SwRI(1998)이 개발한 알고리즘에 의해 개별차량의 구간통행시간 대표값을 산출하고 있다. <표 2>는 San Antonio 시스템의 알고리즘이다. 여기서 <식 2>는 종점검지기와 시점검지기의 통과시각

- 5) 상한값 설정: 구간의 설계속도의 2배를 초과하는 구간 통행시간 값은 제외
 하한값 설정: 구간을 10km/h 이하로 통행하는 구간통행시간 값은 제외(단, 이러한 하한치를 보이는 구간통행시간 값들의 개수가 전체 구간통행시간 값들의 50% 이상을 초과할 경우 포함하여 산정)
 신뢰구간 추출법: 상한값과/하한값을 제외한 자료 중 신뢰도 95%의 범위를 초과하는 값들은 제거(강진기 외, 2001: pp26-27).
- 6) MAD(Median Absolute Deviation) : $MAD = 1.4826 \times \text{median} \| x_i - x_{med} \|$, $Z_i^{med} = \frac{x_i - x_{med}}{MAD}$,
 x_i = 변수 x의 관측값,
 x_{med} = 변수 x의 중위값(median)
 1.4826 = MAD를 정규분포에 대한 표준편차와 같도록 만들어 주는 수정계수(Correction factor)
 여기서, $|Z_i^{med}| > Z_{cut}$ 이면 이상치로 판단한다.($Z_{cut} = 3$)(한국도로공사, 2000: p56).
- 7) <식 2>의 $tt'_{ABi}(1-l_{th}) \leq t_{Bi} - t_{Ai} \leq tt'_{ABi}(1+l_{th})$ 를 참조.
- 8) AVI: Automatic Vehicle Identification의 약어로서 도로구간을 통과하는 개별차량의 차량번호판(or tag)을 인식하여 통과시각을 수집하는 자동차량 인식장치.

차를 이용하여 구간 AB의 통행시간을 산출하고 도로의 혼잡수준을 고려한 통행시간 조정계수(l_{th})를 이용하여 이상치를 제거한다. 그리고 <식 3>과 같이 일정 시간집계간격별 통행시간 대표값(평균값)을 산출한다. 또한, 이 알고리즘은 AVI 자료가 가지고 있는 Sample수 부족⁹⁾으로 인해 통행시간 추정의 정확도가 떨어지는 한계점을 극복하고자 하였다.

이에 Dion and Rakha(2003)의 연구를 토대로 <식 4>, <식 5>를 추가하였다. 그러나 이 알고리즘은 <식 2>에서 알 수 있듯이 출발시각기준 변환 과정이 없는 도착시각기준(t_{Bt})의 통행시간 대표값 산출 알고리즘이다.

2. 기존 연구 검토

1) 출발시각기준 통행시간 관련 연구

출발시각기준 통행시간 자료를 이용한 국내·외 연구 동향을 살펴보면 <표 3>과 같다. 국내 연구는

<표 2> San Antonio 시스템의 알고리즘

$S_{t,AB} = \{t_{Bt} - t_{At} \mid t - t_w \leq t_{Bt} \leq t \text{ and } \{tt_{AB}(1 - l_{th}) \leq t_{Bt} - t_{At} \leq tt_{AB}(1 + l_{th})\}\}$	<식 2>
$tt_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^{ St_{AB} } (t_{Bt} - t_{At})}{ St_{AB} }$	<식 3>
$(tts_{AB})_k = (\alpha) \cdot (tts_{AB})_{k-1} + (1 - \alpha) \cdot (tts_{AB})_{k-1}$	<식 4>
$\alpha = 1 - (1 - \beta)^{n_{vk} - 1}$	<식 5>
$S_{t,AB}$: t시점에 구간 AB로부터 기록되는 통행시간 set t_{At} : 검지기 A에서 차량 i의 검지시각 t_{Bt} : 검지기 B에서 차량 i의 검지시각 t : 도착시각 기준선(= 현재시각) t_w : 개별차량의 통행시간 수집주기(1분) l_{th} : 통행시간 조정계수(0.3) tt_{AB} : 구간AB의 t시점에 추정된 평균 통행시간 tt_{ABt} : 구간AB의 이전 집계간격 시간대에 추정된 평균 통행시간 $(tts_{AB})_k$: k번째 수집주기에서 AB구간의 평활화된 평균 통행시간 $(tt_{AB})_k$: k번째 수집주기에서 AB구간에서 산출된 평균통행시간 α : 지수평활화 계수, β : 민감도 계수(0.3) n_{vk} : k번째 수집주기에서 유효 통행시간 수	

<표 3> 출발시각기준 통행시간 정보관련 연구 분류

출발시각기준 통행시간연구		내용	이용자료
통행시간 예측	오세창 외(2003)	•단기 통행시간 추정 및 예측모형 개발(칼만필터링)	TCS
	강정규·남궁성(2002)	•장단거리 시간차집 문제를 해결하기 위한 통행시간 예측모형(신경망) 개발	TCS
	이의은·김정현(2002)	•시간차집을 고려한 고속도로 구간의 통행시간 예측모형(신경망) 개발	TCS
	한국도로공사(2000)	•출발 및 도착시각기준의 통행시간 정보의 개념적 차이 제시 •출발시각기준(Off-Line)데이터 변환 알고리즘 제시	TCS
	Zhang and Rice(2003)	•출발지 기준 단기간 통행시간 예측	AVI + 루프
	Park et. al(2000)	•Link/Corridor에서의 통행시간 추정 및 예측을 위한 최적시간집계간격 결정	AVI
	Rilett and Park(2001)	•SNN을 이용한 고속도로 Corridor/route의 통행시간 예측	AVI
통행시간 추정	Park et. al(2002)	•링크 및 Corridor의 최소시간집계간격의 평균과 분산으로부터 설정된 시간 간격의 평균과 분산을 추정하는 모델을 개발	AVI
	Zietsman and Rilett(2000)	•Link/Corridor의 통행시간 집계자료와 비집계자료의 비교	AVI

9) San Antonio의 AVI 자료는 AVI tag를 장착한 Probe 차량만을 대상으로 통행시간을 산출함.

대부분 통행시간 예측에 치중되어 있으며, 주로 고속도로 TCS 자료를 이용하고 있다. 이들 연구들은 TCS 자료가 가지고 있는 출발시각기준의 시간 처짐¹⁰⁾ 문제를 해결하기 위한 통행시간 예측모형의 예측력을 평가하였다. 국외 연구에서는 AVI 자료를 이용한 연구들이 진행되어 왔다. 통행시간 예측관련 연구에서는 통행시간 예측모형을 이용한 Link/ Corridor 및 장·단기간의 예측력을 평가 하였다. 그리고 통행시간 추정 및 예측을 위한 최적 시간집계간격 결정 연구들이 진행되었다. 또한, 통행시간추정과 관련하여서는 AVI 자료가 가지고 있는 Sample 수의 부족 문제 해결 및 방대한 양의 통행시간 자료 수집에 따른 시스템 저장 능력의 부담을 줄이고자 하는 연구들이 진행되어왔다.

2) 프로브 차량의 최적표본 수 크기 결정 연구

구간검지체계 자료 중 AVI 통행시간 자료를 이용한 연구들은 AVI tag을 장착한 프로브(Probe) 차량을 대상으로 통행시간이 추정되었다. 따라서 AVI tag을 장착하지 않은 차량들을 포함하지 못하고 있으므로 통행시간 추정의 정확성이 문제되었다. 이에 ‘시간집계간격과 최대통행시간 추정

오차가 이미 사전에 정해졌다’는 가정하에 시간집계간격당 필요한 프로브 차량 수를 산출하였다. 이러한 분야의 연구들은 주로 Standard error, One-Sample Kolmogorov-Smirnov test, 중심극한 정리 등의 통계학적 방법론을 적용하였다(유소영 외, 2004 : p111). 그러나 이들 연구들의 대부분은 도착시각 기준자료를 적용하였다.

반면에, Park et. al(2000)은 MSE(Mean Square Error)방법을 이용하여 링크 및 경로 통행시간 추정과 예측을 위한 적정 시간집계간격을 도출하면서 출발시각기준 통행시간 자료를 이용하였다. 이 연구는 MSE모형을 통해 프로브 차량의 표본 수와 혼잡수준이 적정 시간집계간격에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 시사점

본 연구에서는 기존 연구를 검토한 결과 다음과 같은 시사점을 도출하였다.

첫째, 구간검지시스템에서 수집되는 통행시간 자료를 이용한 통행시간 추정 및 예측에 있어 출발 및 도착시각기준 통행시간 자료의 개념적 특징

〈표 4〉 프로브 차량의 최적 표본 수 크기 결정 연구 분류

구분	연구 방법론	연구대상	이용자료	
도착시각 기준	이영인·이정희(2002)	중심극한 정리	연속류, 단속류	AVI
	고승영(2001)	중심극한 정리	도시부 가로망	Beacon
	이청원·박지영(2001)	중심극한 정리	도시부 가로망	AVI
	Chen and Chein(2000)	중심극한 정리	고속도로	AVI
	Shrinivsan and Jovanis(1996)	중심극한 정리	고속도로, 주간선 도로	AVI
	Turner et. al(1995)	중심극한 정리	고속도로	AVI
출발시각 기준	Park et. al(2001) *	MSE	통행시간 추정, 통행시간 예측	AVI

*: 최적 시간집계간격 결정에 관한 연구임.

10) TCS 통행시간 자료를 출발시각기준으로 정렬할 경우, 현재 시점과 자료가 수집되는 시점(출발시각기준)간에 시간 차이가 발생함(한국도로공사, 2000 : p35).

에 대한 연구가 거의 없다는 것이다. 또한 이들 간의 차이가 어느 정도 발생하는가를 파악할 필요성이 있다.

둘째, 출발 및 도착시각기준 통행시간의 차이가 발생하는 이유와 원인을 규명해야 한다. 기존 연구에서는 구간검지시스템에 의해 수집되는 통행시간 자료가 도착시각기준 자료이므로 예측에 이용되는 데 한계가 있음을 제시하고 있으나 이에 대한 원인들에 대해서는 규명하지 않고 있다.

셋째, 출발 및 도착시각기준 통행시간 자료의 차이를 발생시키는 원인들의 영향정도를 파악할 수 있어야 한다. 즉, 이러한 원인들의 영향정도를 수치로 알 수 있다면 기존 연구에서 제시한 출발시각기준 통행시간 자료를 이용하지 않고 이러한 영향정도를 고려한 도착시각기준 자료의 통행시간 추정 및 예측이 가능하다.

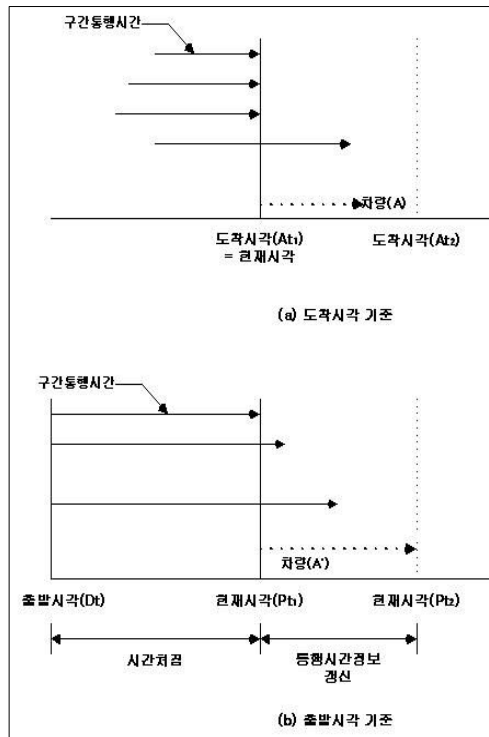
따라서 이러한 시사점들은 구간검지시스템의 통행시간 자료를 이용하여 실시간 구간 통행시간 추정 및 예측을 하는 데 있어 기초적인 연구가 될 것이다.

III. 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표 값 비교

1. 개념적 비교

출발 및 도착시각기준 통행시간의 개념을 서로 비교하면 <그림 2>와 같이 설명할 수 있다. 도착시각기준 통행시간정보(a)는 구간통행시간 산출의 기준이 특정 도착시각 At_1 (현재시각)까지 들어온 차량들에 대해 통행시간을 산출한다. 즉, 동일한 도착시각을 갖는 차량들에 대해 서로 다른 출발시각이 대응된다. 따라서 도착시각기준에 의해 산출된 통행시간 정보를 이용하는 차량(A)의 입장에

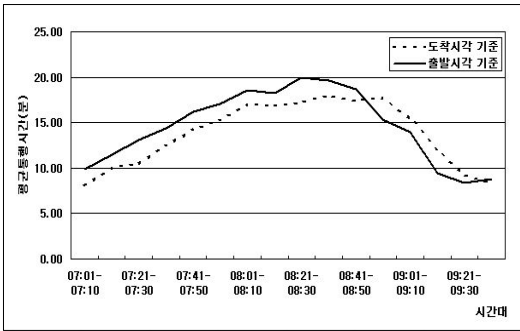
<그림 2> 출발 및 도착시각기준 통행시간의 개념적 비교



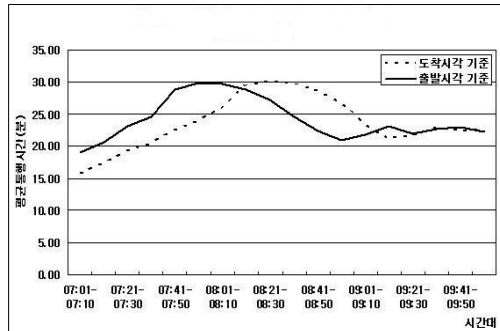
서는 자신이 출발하는 현재시각(At_1)에서 통행시간 정보를 제공받기를 원하므로 도착시각기준의 통행시간 정보는 교통정보로서의 의미가 적다고 할 수 있다.

출발시각기준 통행시간정보(b)는 도착시각기준과는 반대로 동일한 출발시각을 갖는 차량들에 대해 서로 다른 도착시각이 대응된다. 즉, 현재시각에 출발하는 차량(A)와 과거에 동일 시간대에 출발한 차량들의 출발시각 간에 시간 차임이 발생한다. 그리고 동일한 시간대에 출발한 차량 중 현재시각(Pt_1)까지 도착한 차량들에 대한 구간통행시간을 산출하게 되므로, 현재시각 기준이 바뀔 때 ($Pt_1 \rightarrow Pt_2$)마다, 통행시간 정보의 갱신이 이루어짐을 알 수 있다.

〈그림 3〉 수원T/G→기흥T/G의 출발 및 도착시각기준
통행시간 대표값 비교



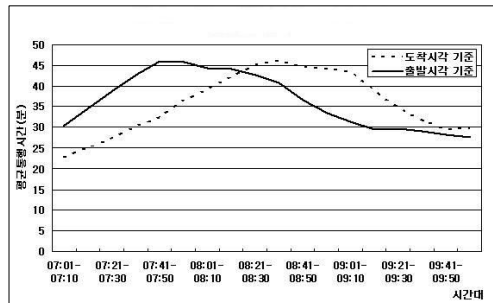
〈그림 4〉 서울 T/G→수원T/G의 출발 및 도착시각기준
통행시간 대표값 비교



2. 실증적 비교

이에 본 연구에서는 출발 및 도착시각기준 통행시간의 차이를 실증적으로 비교하기 위해 고속도로 TCS자료(2004.5.10)를 이용하였다. 통행시간 대표값은 평균값을 적용하였으며, 시간집계간격은 10분으로 설정하였다. 이상치 제거방법은 한국도로공사(2000)에서 적용한 MAD를 이용하였다. 연구대상 구간은 수원T/G(Toll Gate) → 기흥T/G, 서울T/G → 수원T/G, 서울T/G → 기흥T/G로 설정하였다. <그림 3~5>은 이상치를 제거한 각 톨게이트 구간별 출발 및 도착시각기준의 10분 단위의 시간집계간격별 평균통행시간 분포를 비교한 것이다. 그 결과 연구대상 구간인 모든 구간에

〈그림 5〉 서울T/G→기흥T/G의 출발 및 도착시각기준
통행시간 대표값 비교



서 도착시각기준 통행시간 분포에서 출발시각기준 통행시간 분포에 비해 상대적으로 혼잡시간대의 시작 및 종료 인지가 늦어짐을 알 수 있다.

예를 들어, 서울T/G → 수원T/G 구간의 출발시각

〈표 5〉 [07:30 -08:30]의 구간별 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값 차이 비교

구분		수원T/G → 기흥T/G	서울T/G → 수원T/G	서울T/G → 기흥T/G
거리(km)		4.9	9.6	22.2
시간집계 간격(5분)	평균차이(분)	1.89	3.97	8.35
	평균차이(%)	11.07	14.08	18.80
시간집계 간격(10분)	평균차이(분)	1.91	3.92	7.52
	평균차이(%)	11.04	13.91	16.91
시간집계 간격(15분)	평균차이(분)	1.89	3.97	7.51
	평균차이(%)	11.07	14.11	16.87
시간집계 간격(30분)	평균차이(분)	1.91	3.19	6.70
	평균차이(%)	11.06	11.52	15.00

기준 통행시간 분포는 최고 혼잡시간대가 [07:41 - 07:50]인데 반해, 도착시각기준은 [08:21 - 08:30]에 최고 혼잡시간대임을 알 수 있다.

또한, 혼잡시간대는 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 간의 차이가 발생하나 비혼잡시간대인 09:21 이후에는 차이가 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 즉, 출발 및 도착시각기준 평균통행시간의 차이는 혼잡시간대에 더 뚜렷이 나타난다고 할 수 있다.

그리고 <표 5>는 연구대상 구간의 혼잡시간대인 [07:30 - 08:30]의 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값의 차이를 평균적으로 살펴본 것이다. 평균차이(%)에 대한 식은 <식 6>과 같다.

$$\text{평균차이(}\%) = \sum_{t=1}^N \left| \frac{D_t - A_t}{D_t} \right| \times 100 / N$$

<식 6>

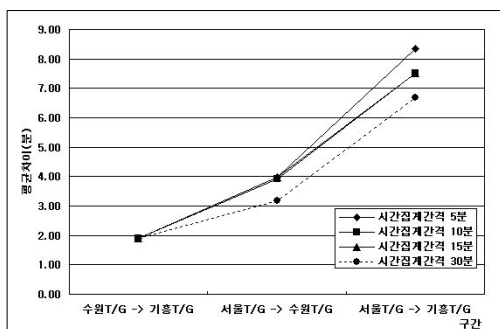
D_t : 출발시각기준 통행시간 대표값

A_t : 도착시각기준 통행시간 대표값

N : 비교 단위시간대 개수

<그림 6>과 <그림 7>을 보면, 출발 및 도착시각 기준 통행시간 대표값 차이의 평균은 혼잡시간대인 [07:30 - 08:30]에 구간별로 약 2~8분(11~

<그림 6> 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값의 평균차이(분)



19%) 정도임을 알 수 있다. 그리고 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값의 차이는 구간길이가 길어질수록 커지며, 시간집계간격의 크기에 따라 통행시간 대표값의 차이가 달라짐을 알 수 있다.

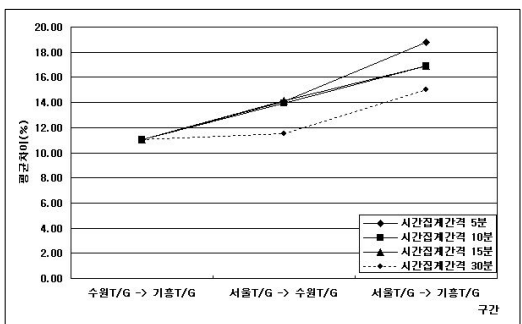
IV. 통행시간 차이의 원인규명 및 영향분석

1. 기본 가정

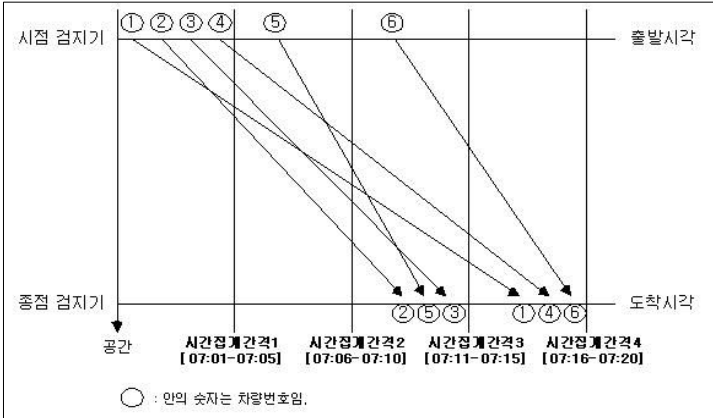
출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값이 차이가 나는 이유에 대해 먼저 생각할 수 있는 것은 '현실적으로 먼저 출발한 차량이 항상 먼저 도착하지 않는다'라는 것이다. 즉, 휴게소에서 쉬거나, 운전자 개인의 운전습관에 의해 다른 차량에 비해 과속 내지는 저속 주행하는 경우가 이에 해당할 것이다. 그러나 이들 대부분은 통행시간 대표값 산정과정 중 이상치 제거 과정에서 어느 정도 제거된다. 따라서 정상적인 주행을 한 차량들을 대상으로 한 출발 및 도착시각기준의 통행시간 차이에 대한 원인을 도출하기 위해서는 다음사항을 고려해야 한다. 첫째, 출발 및 도착시각기준에 의해 산출된 통행시간 대표값의 차이가 왜 발생하는가다.

그 이유는 <그림 8>과 <표 6>에서도 알 수 있듯이 시간집계간격별 출발 및 도착시각기준의 통

<그림 7> 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값의 평균차이(%)



〈그림 8〉 시공도를 통한 출발 및 도착시각기준의 통행시간 차이 비교(예)



〈표 6〉 출발 및 도착시각기준 시간집계간격별 통행시간 대표값 산출대상 차량(예)

시간 집계간격	출발시각기준 통행시간 집계대상 차량	도착시각기준 통행시간 집계대상 차량
1 07:01 - 07:05	①, ②, ③, ④	-
2 07:06 - 07:10	⑤	-
3 07:11 - 07:15	⑥	②, ⑤, ③
4 07:16 - 07:20	-	①, ④, ⑥

행시간 대표값 산출 대상 차량이 서로 다르기 때문이다. 그리고 둘째, <그림 8>의 시간집계간격1의 예에서도 나타나듯이 동일한 시간집계간격 내에 출발한 차량들의 통행시간이 왜 다른가를 생각해 볼 수 있다. 그 이유는 출발 및 도착시각기준의 통행시간 대표값 산출대상 차량이 다르다 하여도 개별차량들이 경험하는 교통혼잡 수준이 같다고 한다면 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값은 같을 것이다. 즉, 동일한 시간집계간격 내에 출발한 차량들이라 할지라도 ‘개별차량들

다 경험하는 혼잡수준’이 다르기 때문에 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값의 차이가 발생한다고 할 수 있다. 또한, 기존 연구¹¹⁾에서는 통행시간 대표값과 개별차량들의 통행시간 차이에 대한 분산은 ‘운전자들의 운전습관에 의한 영향’이라고 정의하였다. 정리하면, 출발 및 도착시각기준의 통행시간 차이의 발생 원인은 ‘개별차량의 운전습관과 혼잡수준에 의한

영향’ 때문이라 할 수 있다.

2. 모형 구축

이에 본 연구에서는 출발 및 도착시각기준의 통행시간 대표값 차이의 원인을 ‘개별 차량 운전자의 운전습관 차이와 혼잡수준 차이에 의한 영향’이라는 전제하에 수리모형을 이용하여 영향정도를 산출하고자 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 표식을 사용하였다.

- D : 출발시각기준에 대한 index
- p : 시간집계간격(h, H) 내의 차량에 대한 index
- h : 최소 시간집계간격 index
- H : 설정 시간집계간격 index
- $\bar{X}_D(h_j)$: 출발시각기준의 j번째 최소시간집계간격 h의 평균통행시간(분)
- $X_D^p(h_j)$: 출발시각기준의 j번째 최소시간집계간격 h 내의 p번째 차량의 통행시간(분)
- $\bar{X}_D(H_i)$: 출발시각기준의 i번째 설정시간집계간

11) Fu and Rilett. 1998의 연구에서는 구간통행시간 대표값과 개별차량들의 통행시간과 차이에 대한 분산을 ‘개별차량 운전자들의 운전습관에 의한 영향’이라고 정의하였다.

격 H의 평균통행시간(분)

$Var_{X_D}(H_i)$: 출발시각기준의 i번째 설정시간집

계간격 H의 분산

$V_D(h_j)$: 출발시각기준의 j번째 최소시간집계간

격 h 내의 차량대수

$Var_{X_D}(h_j)$: 출발시각기준의 j번째 최소시간집

계간격 h의 분산

최소 시간집계간격(Smaller time Interval)의 평균통행시간과 분산은 <식 7>과 <식 8>과 같다.

$$\bar{X}_D(h_j) = \frac{\sum_{p=1}^{V_D(h_j)} X_D^p(h_j)}{V_D(h_j)} \quad \text{<식 7>}$$

$$Var_{X_D}(h_j) = \frac{\sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (X_D^p(h_j) - \bar{X}_D(h_j))^2}{V_D(h_j)} \quad \text{<식 8>}$$

설정 시간집계간격(Larger time Interval)의 평균통행시간과 분산 산출식은 <식 9>와 <식 10>과 같다.

$$\bar{X}_D(H_i) = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{X}_D(h_j) \cdot V_D(h_j)}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \quad \text{<식 9>}$$

$$Var_{X_D}(H_i) = \frac{\sum_{p=1}^{V_D(H_i)} (X_D^p(H_i) - \bar{X}_D(H_i))^2}{V_D(H_i)} \quad \text{<식 10>}$$

여기서, <식 11>은 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$Var_{X_D}(H_i) = \frac{\sum_{p=1}^{V_D(H_i)} (X_D^p(H_i) - \bar{X}_D(H_i))^2}{V_D(H_i)}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (X_D^p(h_j) - \bar{X}_D(H_i))^2}{\sum_{i=1}^N V_D(h_j)} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (X_D^p(h_j) - \bar{X}_D(h_j) + \bar{X}_D(h_j) - \bar{X}_D(H_i))^2}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (X_D^p(h_j) - \bar{X}_D(h_j))^2}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \\ &\quad + \frac{2 \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (X_D^p(h_j) - \bar{X}_D(h_j))(\bar{X}_D(h_j) - \bar{X}_D(H_i))}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \\ &\quad + \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (\bar{X}_D(h_j) - \bar{X}_D(H_i))^2}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \quad \text{<식 11>} \end{aligned}$$

여기서, 설정된 시간집계간격의 총 분산은 두 개의 요소로 구분되는데, 첫 번째 항은 최소 시간집계간격 내의 개별차량들의 통행시간과 최소 시간집계간격의 평균통행시간의 차이에 대한 분산을 나타낸다. 그리고 세 번째 항은 최소 시간집계간격과 설정된 시간집계간격의 평균통행시간 차이의 분산이다.

즉, 첫 번째 항은 '개별 운전자의 운전습관의 영향을 나타내며 세 번째 항은 '혼잡수준에 의한 영향을 의미한다. 또한, 두 개의 교차 항(cross term)은 서로 독립(independent)으로, 각각의 기댓값(expected values)이 '0'이므로 '0'으로 가정한다. 결과적으로 <식 12>는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\text{Var}_{X_D}(H_i) &\approx \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (X_D^p(h_j) - \overline{X_D}(h_i))^2}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \\
&+ \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (\overline{X_D}(h_j) - \overline{X_D}(H_i))^2}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \\
&= \frac{\sum_{j=1}^N \left[\frac{\sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (X_D^p(h_j) - \overline{X_D}(h_j))^2}{V_D(h_j)} \right] V_D(h_j)}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \\
&+ \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (\overline{X_D}(h_j) - \overline{X_D}(H_i))^2}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} \\
&= \frac{\sum_{j=1}^N (\widehat{\text{Var}}(h_j) V_D(h_j))}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)} + \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^{V_D(h_j)} (\overline{X_D}(h_j) - \overline{X_D}(H_i))^2}{\sum_{j=1}^N V_D(h_j)}
\end{aligned}$$

<식 12>

3. 적용 및 결과분석

본 연구에서는 실제 구간통행시간 자료를 모형에 적용하기 위해 최소 시간집계간격은 1분, 설정 시간집계간격은 30분¹²⁾으로 설정한 후, 연구대상을 각 구간별로 분석하였다. <표 7>은 분석결과를 나타낸 것으로 ‘운전자 습관의 영향’은 혼잡시간대나 비혼잡시간대 모두 크게 차이나지 않는 것으로 나타났다. 그러나 ‘혼잡 수준에 의한 영향’은 시간대별로 다르게 나타남을 보여주고 있다. 예를 들어 서울 → 수원 톨게이트 구간은 혼잡시간대인 07:31-08:30의 경우 ‘혼잡수준에 의한 영향’이 6.26으로 나타난 것에 비해 비혼잡시간대인

[09:31-10:00]의 경우는 0.43으로 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이는 다른 구간에서도 동일한 결과를 보이고 있다. 반면에 ‘운전습관에 의한 영향’은 모든 구간에서 0.61~2.59 사이의 값을 나타내고 있어 혼잡과 비혼잡시간대 및 구간크기에 따라 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있었다. 그리고 독립항의 경우는 본 연구에서 적용한 모형의 가정과도 같이 거의 0에 가깝게 나타났다. 또한, 비혼잡시간대의 경우는 전체적으로 ‘혼잡수준에 의한 영향’보다 ‘운전자 습관에 의한 영향’이 더 큰 것으로 나타났다.

V. 결론

본 연구에서는 구간검지시스템에서 수집되는 통행시간 자료의 출발 및 도착시각기준 통행시간의 개념을 정립하고 고속도로 TCS 자료를 이용하여 두 개념 간의 차이를 실증적으로 비교하였다. 그리고 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값의 차이가 발생하는 이유와 원인 및 원인의 영향정도를 산출하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값의 분포를 실증적으로 비교한 결과 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 도착시각기준의 경우 출발시각기준에 비해 상대적으로 혼잡시간대의 시작과 종료에 대한 인지가 늦어짐을 알 수 있었다. 또한, 비혼잡시간대의 경우는 두 개념의 차이가 거의 나타나지 않는 것으로 나타났다.

둘째, 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값의 차이가 발생하는 이유는 시간집계간격별 통행시간 산출 대상 차량이 다르며, 동일한 시간집계간격

12) 연구대상 구간들의 혼잡지속시간이 최소 30분 이상임을 고려함.

<표 7> 구간별 모형적용 결과(예)

구분		운전자 습관에 의한 영향 ¹³⁾		혼잡수준에 의한 영향		독립항	총 분산
		분산	차량 수	분산	차량 수		
수원T/G → 기흥T/G (4.9km)	07:01-07:30	0.61	8	1.97	253	0.777	3.36
	07:31-08:00	1.11	8	2.24	247	-0.023	3.32
	08:01-08:30	0.53	7	1.44	223	0.003	1.97
	08:31-09:00	0.69	7	2.96	213	-0.680	2.97
	09:01-09:30	1.14	7	1.17	209	-0.02	2.29
	09:31-10:00	1.59	8	1.67	227	-0.08	3.174
서울T/G → 수원T/G (9.6km)	07:01-07:30	1.31	20	3.41	598	0.09	4.82
	07:31-08:00	2.15	22	6.26	647	0.14	8.56
	08:01-08:30	1.10	19	1.36	573	-0.04	2.43
	08:31-09:00	2.38	18	3.25	547	0.02	5.64
	09:01-09:30	1.24	18	0.42	546	0.03	1.69
	09:31-10:00	1.14	17	0.43	504	-0.03	1.54
서울T/G → 기흥T/G (22.2km)	07:01-07:30	2.18	15	13.81	456	-0.61	15.38
	07:31-08:00	2.59	16	5.01	470	-0.06	7.54
	08:01-08:30	1.95	11	3.50	319	-0.47	4.98
	08:31-09:00	1.95	12	12.56	369	0.53	15.04
	09:01-09:30	1.11	12	1.26	363	-0.18	2.19
	09:31-10:00	0.80	10	0.65	299	-0.07	1.38
서울T/G → 천안T/G (69.1km)	07:01-07:30	2.35	7	7.49	204	0.24	10.08
	07:31-08:00	1.69	7	21.13	210	0.17	22.99
	08:01-08:30	1.12	10	1.60	287	1.71	4.43
	08:31-09:00	2.06	11	3.31	317	-0.44	4.93
	09:01-09:30	1.05	11	0.43	326	1.28	2.76
	09:31-10:00	1.44	12	1.17	374	-0.02	2.59

내에 출발한 차량들이라 할지라도 개별차량마다 경험하는 혼잡수준이 다르기 때문이다. 따라서 차이의 원인은 ‘개별차량의 운전습관과 혼잡수준에 의한 영향’이라고 할 수 있다.

셋째, 이들 원인들의 영향정도를 산출한 결과, ‘운전자의 습관에 의한 영향’은 혼잡시간대나 비혼잡시간대 또한, 구간거리에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 ‘혼잡수준에 의한

영향’은 시간대별로 다르게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 비혼잡시간대의 경우는 전체적으로 ‘혼잡수준에 의한 영향’보다는 ‘운전자 습관에 의한 영향’이 더 큰 것으로 나타났다.

따라서 출발 및 도착시각기준 평균통행시간이 같아지기 위한 필요충분조건은 혼잡이 없어야 하며, 동일시간대에 출발한 모든 차량이 추월 없이 동일한 속도로 운행해야 한다는 것이다. 이에 기

13) ‘운전습관에 의한 영향’을 나타내는 차량 수는 이상치를 제거한 1분당 평균 차량대수를 의미함.

존연구들이 주장하는 바와 같이 구간검지시스템에서 수집한 통행시간 자료를 실시간 측면(현재시점)의 출발시각기준으로 이용하기 위해서는 다음과 같은 향후 연구가 필요하다.

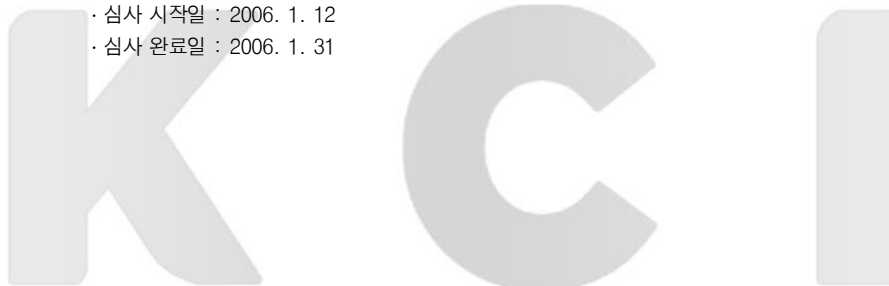
본 연구에서 제시한 출발 및 도착시각기준 통행시간 대표값 비교는 과거에 동일시간대에 출발하여 이미 모두 도착한 차량들을 대상으로 분석한 결과로 실시간 측면의 출발시각기준 통행시간자료에 대한 '혼잡수준 및 운전습관에 대한 영향은 산출하지 못하였다. 그리고 출발시각기준에 의한 통행시간 자료는 동일시간대에 출발한 차량들이 모두 도착해야 정확한 통행시간을 추정할 수 있다. 즉, 이를 기다릴 경우 '시간처집'이 발생한다. 반면에 이를 기다리지 않고 통행시간을 추정할 경우 통행시간의 정확성이 떨어진다. 즉, 혼잡시간대에 대한 실시간 측면의 출발시각기준 통행시간 추정 알고리즘을 개발할 필요성이 있다.

참고문헌

1. 강정규·남궁성. 2002. "고속도로 통행료 수납자료를 이용한 통행시간 예측모형 개발". 대한교통학회지. 제20권(제4호). pp151-162.
2. 김남선·이승환·오영태. 2000. "신경망을 이용한 고속도로 여행시간 추정 및 예측모형 개발". 대한교통학회지. 제18권(제1호). pp47-59.
3. 강진기·손영태·윤여환·변상철. 2001. "비메시식 자동차량 인식장치를 이용한 구간교통정보 산출방법 연구". 한국ITS학회논문지. 제1권(제1호). pp23-31.
4. 고승영. 2001. "Optimal Numbers of Probe Cars Beacon-based Travel Time Data Collection System". WCTR Seoul.
5. 이의은·김정현. 2002. "시간처집 현상을 고려한 장거리 구간 통행시간 산출 방법론 연구". 대한교통학회지. 제20권(제4호). pp51-61.
6. 오세창·김명하·오영태. 2003. "차량검지기 교통량 데이터를 이용한 고속도로 통행시간 추정 및 예측모형 개발에 관한 연구". 대한교통학회지. 제21권(제15호). pp83-116.
7. 이영인·이정희. 2002. "교통정보 제공을 위한 구간 통행시간 산출 방법론 연구". 대한교통학회지. 제20권(제3호). pp55-67.
8. 유소영·노정현·박동주. 2004. "통행시간 추정 및 예측을 위한 루프검지기 자료의 최적 집계간격 결정". 대한교통학회지. 제22권(제6호). pp109-119.
9. 이철원·박지영. 2001. "Determining the Optimal Number of Probe Vehicles for ATIS Applications in Urban Network". WCTR Seoul.
10. 홍은주·김영찬. 2002. "지점검지체계를 이용한 남산 1호터널 구간 통행시간 추정". 한국ITS학회논문지. 제1권(제1호). pp 41-51.
11. 한국도로공사. 2000. ITS 기술개발(IV) 고속도로 통행시간 예측시스템 개발. 최종보고서.
12. Dion. F. and Rakha. 2003. "Estimating Spatial Travel Times using Automatic Vehicle Identification Data". TRB 82th Annual meeting.
13. Fu. L. and L. R. Rilett. 1998. "Expected Shortest Paths in Dynamic and Stochastic Traffic Networks". *Transportation Research. Part B. Vol.32(No.7)* : pp 499-516.
14. Srinivasan. K. K. and P. P. Jovanis. 1996. "Determination of number of Probe Vehicles Required for Reliable Travel Time Measurement in Urban Network". *Transportation Research Record 1537* : pp15-22.
15. Rilett. L. R. and D. Park. 2001. "Direct Forecasting of Freeway Corridor Travel Time using Spectral Basis Neural Networks". *Transportation Research Record 1752* : pp140-147.
16. Chen. M. and S. I. J. Chein. 2000. "Determining the Number of Probe Vehicles for Freeway Travel Time Estimating using Microscopic Simulation". TRB 79th Annual meeting.
17. Park. D., L. R. Rilett. B. Gagewski and C. H. Spiegelman. 2000. "Identifying Optimal Data Aggregation Interval Sizes for Link and Corridor Travel Time Estimation and Forecasting". Presented at the Transportation Research Board Annual meeting.
18. Park. D., L. R. Rilett. and Parichart Pattanamekar. 2002. "Estimating Travel Time Summary statistics of Larger

- Intervals from Smaller Intervals without storing in individual Data". *Transportation Research Record* 1804 : pp39-47.
19. SwRI. 1998. "Automatic Vehicle Identification Model Deployment Initiative - System Design Document". *Report prepared for Trans Guide*. Texas Department of Transportation. Southwest Research Institute. San Antonio, TX.
 20. Turner, S. M. and D. J. Holdner. 1995. "Probe Vehicle Sample Sizes for Real-time Information". The Houston Experience. IEEE VNIS Conference.
 21. Zhang, X. and J. A. Rice. 2003. "Short-term travel time Prediction". *Transportation Research*. Part C. (No.11): pp187-210.
 22. Zietsman, J. and L. R. Rilett. 2000. *A Comparison of Aggregate and Disaggregate Based Travel Time Estimation for Sustainability and ATIS Systems Applications*. Texas Transportation Institute the Texas A&M University College Station : Texas.

· 논문 접수일 : 2006. 1. 10
· 심사 시작일 : 2006. 1. 12
· 심사 완료일 : 2006. 1. 31



ABSTRACTS

**Comparative Analysis of the Link Travel Times
: Departure Time Based vs Arrival Time Based**

Jae-Jin Kim Ph.D. Candidate, Graduate School of Urban Studies, Hanyang Univ.

Jeong-Hyun Rho Professor, Graduate School of Urban Studies, Hanyang Univ.

Dong-Joo Park Associate Professor, Dept of Transportation, University of Seoul

Sung Namkoong Principal Researcher, Highway & Transportation Technology Institute

※ Keywords : Arrival Time Based, Departure Time Based , Link Travel Time, Spatial Detection, TCS

This study compared the arrival time-based and departure time-based link travel time estimates using the spatial detection system's data. The sources of the difference of the two link travel time estimates were identified and the impact of them were quantified. It was found that the arrival time-based link travel time estimates could capture the temporal pattern of the traffic congestion later than the departure time-based ones. In addition, the difference between two travel time estimates occurs only if there is traffic congestion. The difference between two link travel times results from not only the traffic congestion but also the drivers' various driving behaviors. These findings imply that the link travel times have to be estimated based on departure time rather than arrival time.

к с і