



구간통행속도 추정을 위한 고속도로 검지기자료 처리기법 개발

Quality of Departure Time Based On-line Link Travel Time Estimates

박 동 주* 김 재 진** 노 정 현*** 김 상 범****
 Park, Dongjoo Kim, Jaejin Rho, Junghyun Kim, Sang-Beom

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the quality of on-line departure time-based link travel time estimates. For this, accuracy (i.e. estimation error) and timeliness (i.e. degree of time lag) are proposed as MOE of the quality of on-line link travel time estimates. Then the relationship between quality of link travel time estimates and link length and level of congestion is analyzed. It was found that there is trade-off between the accuracy and timeliness of link travel time estimates. The estimation error was modeled to consist of two components: one is systematic error and the other is mean square error which reflects level of congestion. Further, time lag was again segmented into three parts for the analysis purpose. There are minimum one, congestion-related one, and update interval-related one. From the real-world data using AVI system, it was revealed that regardless of the link length and level of congestion, 10 minutes of time lag occurs in general.

Keywords : *spatial detection system, travel time, departure time based, AVI, on-line*

요 지

본 연구의 목적은 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정정보의 질을 평가하는 것이다. 이에 본 연구는 통행시간 정보의 질을 정확성(추정오차)과 신속성(시간차짐) 측면에서 평가하였다. 그리고 통행시간 정보의 질과 링크길이 및 혼잡수준과의 관계를 규명하였다. 분석결과, 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정정보의 정확성과 신속성은 서로 상충관계임을 알 수 있었다. 또한 정확성을 나타내는 '추정오차'는 계통오차(systematic error)와 혼잡수준을 반영하는 평균자승오차(MSEE)로 구성되는 것으로 분석되었다. 시간차짐은 '최소시간차짐', '혼잡에 의한 시간차짐', '갱신간격에 의한 시간차짐'으로 구분하여 평가하였다. 이를 실제 AVI 자료에 적용한 결과, 링크길이와 혼잡수준에 관계없이 추정오차가 5%일 때, 시간차짐은 약 10분 정도 발생하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : *구간검지체계, 통행시간, 출발시각기준, AVI, on-line*

* 정회원 · 서울시립대학교 교통공학과 부교수
 ** 비회원 · 강원발전연구원 환경·지역개발실 책임연구원
 *** 비회원 · 한양대학교 도시대학원 교수
 **** 비회원 · 서울시 교통국 교통정보센터



1. 서론

국내외의 여러 교통관리센터들은 링크통행시간 자료를 수집하기 위해 지점 및 구간교통자료 수집 시스템을 운영하고 있다. 이들 시스템들은 크게 구간검지체계 (TCS¹⁾, Beacon²⁾, AVI³⁾ 등)와 지점검지체계 (루프 검지기 등)로 구분할 수 있다. 구간검지체계는 '도로구간'의 교통자료를 수집할 수 있으므로 ATIS(Advanced Traveler Information System) 측면에서 지점검지체계보다 통행시간정보를 제공하는데 유리하다. 이러한 구간검지체계에서 수집되는 통행시간자료는 통행시간추정 및 예측에 이용됨에 있어 출발시각기준 자료이어야 한다. 이와 관련된 연구들이 활발히 진행중에 있다(한국도로공사:2000, 강정규 남궁성:2002; 이의은 김정현:2002, 오세창 외:2003, 김재진 외:2006a, 2006b, 2007, Rilett

and Park:1999, Park et.al:2001,2002, Zietsman and Rilett:2000, Zhang and Rice:2003 등).

그러나 출발시각기준의 실시간(on-line⁴⁾) 링크 통행시간 정보를 제공하기 위해서는 반드시 추정단계를 거쳐야 한다. 이와 관련하여 김재진 외(2006b)은 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정 알고리즘을 제시하였다. 추정단계에서는 출발시각기준이므로 동일시간대에 출발한 차량들 중 현재시각에 관측되는 차량들만으로 통행시간 정보가 추정되기 때문에 '추정오차'⁵⁾가 발생한다. 또한 현재 관측되는 차량들에 의해 생성되는 통행시간정보는 현재보다 과거에 출발한 차량들의 통행시간이므로 현재 출발하는 차량들에 정보를 제공하는 시점에서 '시간차짐'⁶⁾이 발생한다. 즉, 출발시각기준 실시간 통행시간정보의 질(quality)측면에서 정확성(추정오차)과 신속성(시간차짐)의 적절성을 판단할 필요가 있다.

표 1. 출발시각 기준 통행시간 정보관련 연구 분류

연구 분류		내 용	이용자료	
off-line ⁷⁾	통행 시간 예측	한국도로공사(2000)	출발시각 기준(Off-Line)데이터 변환 알고리즘 제시	TCS
		강정규· 남궁성(2002)	장단거리 시간차짐 문제해결을 위한 통행시간 예측모형	TCS
		이의은· 김정현(2002)	시간차짐을 고려한 고속도로 구간의 통행시간 예측모형 개발	TCS
		오세창 외(2003)	단기 통행시간 추정 및 예측모형개발	TCS
		Rilett and Park(2001)	고속도로 corridor base의 통행시간 예측	AVI
		Zhang and Rice(2003)	출발지 기준 단기간 통행시간 예측	AVI+루프
		Park et al(2000)	통행시간 추정 및 예측을 위한 최적시간집계간격 결정	AVI
on-line	통행 시간 추정	Zietsman and Rilett(2000)	통행시간 집계자료와 비집계자료의 추정 및 예측력 비교	AVI
		Park et al(2002)	최소시간집계간격으로부터 설정 시간간격의 평균과 분산을 추정하는 모델을 개발	AVI
		김재진 외(2006a)	출발 및 도착시각기준 통행시간의 차이가 발생하는 원인 및 원인의 영향정도 산출	TCS
		김재진 외(2006b)	출발시각기준 on-line 링크통행시간 추정 알고리즘 개발	TCS
	김재진 외(2007)	출발시각기준 링크통행시간 정보의 공간적 설계(적정 링크길이를 결정)	AVI	

- 1) Toll Collection System의 약어로서, 고속도로 폐쇄구간의 출발 불계이트 및 도착 불계이트 통과시각이 기록되는 통행료 징수 시스템으로 개별차량의 통행 시간 자료를 수집함.
- 2) 도로상의 일정한 구간단위로 차량 내 통신장치와 통신이 가능한 지점에 비콘을 설치하고 이 지점을 통과하는 프로브 차량 내의 통신장치와의 통신으로 구간 교통정보를 수집하는 시스템.
- 3) Automatic Vehicle Identification의 약어로서 도로구간을 통과하는 개별차량의 차량번호판(or tag)을 인식하여 통과시각을 수집하는 자동차량 인식장치.
- 4) on-line 통행시간은 특정 출발시각에 출발한 차량들 중 현재시각까지 도착완료하여 관측되는 실시간 통행시간을 의미함.
- 5) 추정오차란 동일 출발시간대에 출발한 차량들 중 현재까지 도착한 차량들의 관측된 평균통행시간과 모두 도착완료했을 때 관측되는 평균통행시간의 차이를 의미함.
- 6) 시간차짐은 실시간 통행시간 정보제공 시점과 통행시간 산출 차량의 출발시점 불일치로 인해 발생하는 통행시간 차이를 의미함.
- 7) off-line 통행시간은 특정 출발시각에 출발하여 이미 모두 도착완료한 차량들에 대한 통행시간으로 과거 통행시간 이력자료가 이에 해당됨.



이러한 '추정오차'와 '시간처짐'은 교통혼잡수준에 따라 달라진다. 예를 들어 일정한 길이의 링크구간에서 교통혼잡이 심하면, 현재시각에 관측되는 차량의 표본수가 적어 '추정오차'는 증가한다. 그리고 '시간처짐'도 차량들의 도착시각이 길어지면서 증가한다. 반면에 혼잡이 작으면, 관측되는 차량의 표본수가 적게 관측되고, 도착차량들의 통행시간도 단축되어 '추정오차'와 '시간처짐'은 같이 감소한다.

따라서 혼잡수준에 따른 '추정오차'와 '시간처짐'의 발생정도는 출발시각기준 링크 통행시간 추정정보의 질(정확성, 신속성)을 판단하는 기준이 된다. 이에 본 연구에서는 출발시각기준 링크통행시간 추정의 '추정오차'와 '시간처짐'이 혼잡수준에 따라 어느 정도인지 파악하고 이를 평가하고자 한다.

2. 기존연구 검토

2.1 출발시각기준 통행시간 관련 연구

그동안 구간검지체계의 통행시간자료를 이용한 출발시각기준 통행시간 관련 연구들의 유형과 내용은 표 1과 같다. 국내 연구들은 구간검지체계의 공간적 특성때문에 발생하는 '시간처짐'을 해결하기 위해 고속도로 TCS 자료를 이용한 통행시간 예측모형의 예측력을 평가하였다. 그리고 김재진 외(2006a)는 구간검지체계의 출발 및 도착시각기준 차이에 대한 원인을 규명하였다.

국외 연구들은 AVI 자료를 이용한 통행시간 추정 및 예측연구들이 진행되어 왔다. 이들 연구들은 AVI 자료의 단점인 표본수 부족을 해결하기 위해 link/corridor 및 장·단기간에 따른 예측모형의 정확성을 평가하였다. 그리고 통행시간 자료수집을 위한 최적시간집계간격을 결정하여 방대한 자료의 저장능력 부담을 줄이고자 하였다. 그러나 이들 연구들은 과거 이력자료(off-line)측면의 출발시각기준 연구이다.

반면에, 김재진 외(2006b)는 기존의 출발시각기

준 통행시간 정보 연구들이 실시간 측면의 연구가 아님을 지적하였다. 이에 출발시각기준 실시간 통행시간 추정의 개념을 제시하였다. 그리고 베이지안(Baysian Inference)추론을 적용한 고속도로 중심의 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정 알고리즘을 개발하였다. 또한, 김재진 외(2007)은 출발시각기준 실시간 링크통행시간 정보를 제공하기 위한 적정 링크길이를 제시하였다. 기존연구들을 검토한 결과, 출발시각기준 실시간 통행시간 추정정보의 질 측면에서 혼잡수준에 따른 정확성(추정오차)과 신속성(시간처짐)을 정량화한 연구는 없는 것으로 판단된다.

2.2 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정

김재진 외(2006b)에서 제시한 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정의 개념을 설명하면 다음과 같다. 그림 1과 그림 2는 서울T/G(Toll Gate)→수원T/G(9.6km)와 서울T/G→천안T/G(63.1km)의 [07:01-07:05]에 출발한 차량들의 관측시각(현재 시각)별 평균통행시간을 추정한 것이다. 서울T/G→수원T/G의 [07:01-07:05]에 출발한 차량들은 총 94대로 관측시각 07:20분에 40대의 차량이 관측되어 0.43분의 추정오차가 발생한다. 그리고 07:25분에는 91대가 관측되어 0.10분의 추정오차가 발생하며, 07:30분 이후에는 모든 차량이 관측(94대)되어 추정오차는 '0'이다. 그리고 서울T/G→천안T/G의

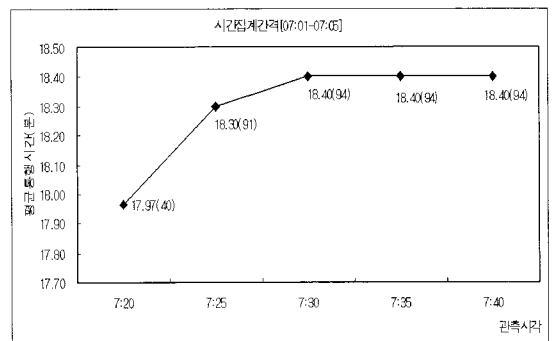


그림 1. 서울T/G→수원T/G의 실시간 링크통행시간 추정결과(예)



경우는 [07:01-07:05]에 출발한 차량들은 총 33대로 08:00분에 2대의 차량이 관측되어 6.92분의 추정오차가 발생하며, 08:05분, 08:10, 08:15분에는 각각 11대, 25대, 32대의 차량이 관측되어 3.52분, 1.34분, 0.24분의 추정오차가 발생함을 알 수 있다. 또한, 08:20분 이후에는 모든 차량이 관측(33대)되어 추정오차는 '0'이다. 시간처짐은 서울T/G→수원T/G은 약 19분, 서울T/G→천안T/G은 약 59분이 발생함을 알 수 있다.

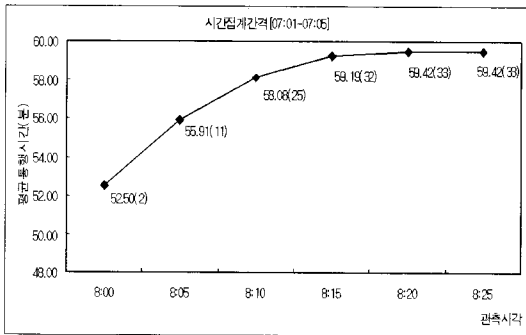


그림 2. 서울T/G→천안T/G의 실시간 링크통행시간 추정결과(예)

즉, 링크길이가 길수록 동일한 출발시각기준 시간 집계간격에 출발한 차량들 중 추정시각에 관측되는 차량의 표본수가 적어 '추정오차'가 증가함을 알 수 있다. 또한 시간처짐도 이와 동일한 결과를 나타낸다. 그리고 링크길이 설정에 따라 반영되는 혼잡수준도 다르다. 따라서 링크길이와 교통혼잡수준에 따라 출발시각기준 링크통행시간 추정의 정확성(추정오차)과 신속성(시간처짐)은 달라질 수 있다.

예를 들어 그림 3의 곡선 I은 추정방법을 적용하지 않은 경우라고 하고, 곡선 II는 베이지안 추론에 의해 추정된 곡선이라고 가정하자. 여기서 점 A에 해당하는 통행시간정보는 점 B, C에 해당하는 통행시간정보에 비해 정확성은 떨어지나, 신속성 측면에서는 우수함을 알 수 있다. 반면에, 점 C에 해당하는 통행시간정보는 점 A, B에 해당하는 통행시간정보에 비해 정확성은 높으나, 신속성은 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 앞에서 언급한 바와 같이 실시간 링크

통행시간 추정에 의한 결과는 통행시간정보의 질 측면에서 정확성(추정오차)과 신속성(개신범위)의 상충(trade-off)관계를 나타낸다. 즉, 곡선 I (A,B,C)과 곡선 II (A',B',C')의 통행시간정보를 Pareto Optimal개념을 도입하여 비교하면 다음 세 가지의 경우를 고려할 수 있다.

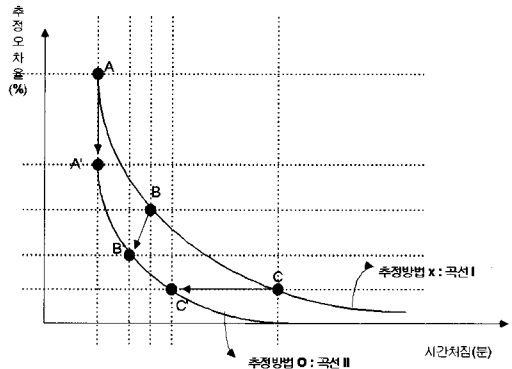


그림 3. 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정정보의 질 평가

- Case 1 : A → A' : 신속성은 매우 높으나 정확성이 낮은 경우
- Case 2 : B → B' : 정확성과 신속성이 동시에 좋아진 경우
- Case 3 : C → C' : 정확성은 매우 높으나 신속성이 낮은 경우

3. 출발시각기준 실시간 통행시간 추정정보의 질 판단기준 설정

3.1 전제조건

3.1.1 기본가정

본 연구에서는 출발시각기준 링크통행시간 추정정보의 질을 판단하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

첫째, 과거통행시간 이력자료(off-line 통행시간 자료)의 일정시간대에 출발한 차량들의 링크통행시간 자료를 이용하므로 실제 링크통행시간 값을 알고



있다고 가정한다.(실제 링크통행시간 값은 이상치⁸⁾가 제거된 값임.)

둘째, 실시간 링크통행시간 추정에 적용되는 통행시간 자료의 시간집계간격⁹⁾별 통행시간 대표값¹⁰⁾은 평균값으로 설정한다.

셋째, 통행시간 자료의 시간집계간격과 통행시간 관측시점의 갱신간격¹¹⁾은 모두 5분으로 설정한다.

3.1.2 표식

본 연구에서는 출발시각기준 실시간 통행시간 추정 정의 '추정오차'와 '시간처짐'을 정의하기 위해 다음과 같은 표식을 사용하였다.

- h : 출발시각기준 시간집계간격
- t : 현재시각(통행시간 추정시점)
- i, j : 시간집계간격 및 현재시각 index
- L_a : 링크 a의 구간거리(km)
- v_f : 자유류 속도(km/h)
- $e_{h_i}(t_j)$: t_j 시점에서의 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 의 추정오차(분)
- $\partial_{h_i}(t_j)$: t_j 시점의 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 에 출발한 차량들의 시간처짐(분)
- $TT_{h_i}^o$: 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 의 모든 차량이 관측된 평균통행시간(분)
- $TT_{h_i}^e(t_j)$: 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 의 t_j 시점에서 관측된 평균통행시간(분)
- $T_{h_i}^p(t_j)$: 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 의 t_j 시점에서 p 째 관측된 개별차량의 평균통행시간(분)
- $\partial_{h_i}^1$: 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 의 t_j 시점에서 최소 시간처짐(분)
- $\partial_{h_i}^2$: 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 의 t_j 시점에서 혼잡에 의한 시간처짐(분)
- $\partial_{h_i}^3$: 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 의 t_j 시점에서 갱신간격에 의한 시간처짐(분)

3.2 정확성의 판단기준 설정

출발시각기준 실시간 통행시간 추정의 정확성을 판단하는 추정오차의 정의는 다음과 같다. 출발시각기준 시간집계간격 h_i 의 t_j 시점에 발생한 추정오차 ($e_{h_i}(t_j)$)는 출발시각기준 시간집계간격 h_i 의 off-line 참값($TT_{h_i}^o$: 모든 차량이 도착 완료하여 관측된 평균통행시간)과 t_j 시점에서 추정된 평균통행시간 ($TT_{h_i}^e(t_j)$)의 차이로 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$e_{h_i}(t_j) = |TT_{h_i}^o - TT_{h_i}^e(t_j)| \quad (1)$$

그리고 출발시각기준 실시간 통행시간 추정오차는 다음과 같이 구분할 수 있다. 출발시각기준 시간집계 간격 h_i 의 t_j 시점에 추정된 평균통행시간 $TT_{h_i}^e(t_j)$ 에 대한 기대치가 $TT_{h_i}^o$ 일 때, 이 추정량을 $TT_{h_i}^e(t_j)$ 의 불편추정량(unbiased estimator)이라 한다. 그리고 식 (2)와 같은 관계가 성립 된다.

$$E(TT_{h_i}^e(t_j)) = TT_{h_i}^o \quad (2)$$

또한, 시간집계간격 h_i 의 t_j 시점에서 개별차량들의 통행시간 ($T_{h_i}^p(t_j)$)과 실제 통행한 평균통행시간과 ($TT_{h_i}^o$)의 차이 ($MSE_{h_i}(t_j)$)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$MSE_{h_i}(t_j) = \frac{\sum_{p=1}^{V_h(t_j)} (T_{h_i}^p(t_j) - TT_{h_i}^o)^2}{V_h(t_j)} = \frac{\sum_{p=1}^{V_h(t_j)} (T_{h_i}^p(t_j) - TT_{h_i}^e(t_j) + (TT_{h_i}^e(t_j) - TT_{h_i}^o))^2}{V_h(t_j)}$$

$$= \frac{\sum_{p=1}^{V_h(t_j)} (T_{h_i}^p(t_j) - TT_{h_i}^e(t_j))^2}{V_h(t_j)} + \frac{2(TT_{h_i}^e(t_j) - TT_{h_i}^o) \sum_{p=1}^{V_h(t_j)} (T_{h_i}^p(t_j) - TT_{h_i}^e(t_j))}{V_h(t_j)}$$

$$+ \frac{(TT_{h_i}^e(t_j) - TT_{h_i}^o)^2}{V_h(t_j)} \quad (3)$$

8) 차량이 주행도중 고장 및 주차, 긴급시 주행 또는 불법적인 주행 등으로 인해 정상운행을 하지 못하는 개별차량의 통행시간.
 9) 구간검지체계에서 수집된 개별차량 통행시간 자료를 추정 및 예측을 하기 위해 수집하는 시간간격.
 10) 구간검지체계에서 수집되는 통행시간 자료는 특정 시간집계간격 당 하나의 대표값으로 산출되어 통행시간 추정 및 예측을 목적으로 하는 모형에 이용됨.
 11) 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정 및 제공에서 통행시간 대표값을 갱신(update)하는 시간간격.



식 (3)에서 $MSE_{h_i}(t_j)$ 는 두 개의 분산요소로 구분되는데, 첫 번째 항은 출발시각기준 시간집계간격 h_i 에 출발한 차량들 중 현재 관측된 개별차량들의 통행시간들($T_{h_i}^p(t_j)$)과 이들 차량들의 추정된 평균 통행시간($TT_{h_i}^e(t_j)$)의 차이에 대한 분산을 나타낸다. 그리고 세 번째 항은 출발시각기준 시간집계간격 h_i 에 출발한 차량들의 관측시점별 추정된 평균통행시간($TT_{h_i}^e(t_j)$)과 이들 차량이 모두 도착완료했을 때의 평균통행시간($TT_{h_i}^o$)과의 차이에 대한 분산을 나타낸다. 즉, 첫 번째 항은 관측시점에서의 개별차량들의 '운전습관에 의한 영향'을 나타내며 계통오차(systematic error)를 의미한다. 그리고 세 번째 항은 '혼잡수준의 영향'에 의해 관측된 표본수가 달라지므로 발생하는 추정된 평균자승오차(Estimated Mean Square Error:MSEE)를 의미한다. 그리고 두 번째 항은 서로 독립(independent)이고 각각의 기댓값이 '0'이므로 '0'으로 간주한다. 결과적으로 식 (3)을 정리하면 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$MSE_{h_i}(t_j) \approx \frac{\sum_{p=1}^{V_h(t_j)} (T_{h_i}^p(t_j) - TT_{h_i}^e(t_j))^2}{V_h(t_j)} + \frac{(TT_{h_i}^e(t_j) - TT_{h_i}^o)^2}{V_h(t_j)} \quad (4)$$

3.3 신속성의 판단기준 설정

본 연구에서는 출발시각기준 실시간 통행시간 추정의 신속성을 판단하는 '시간처짐($\varepsilon_{h_i}(t_j)$)'을 '최소 시간처짐($\varepsilon_{h_i}^1$)', '혼잡에 의한 시간처짐($\varepsilon_{h_i}^2(t_j)$)', '갭신간격에 의한 시간처짐($\varepsilon_{h_i}^3(t_j)$)'으로 구분하였다. 그리고 이들에 대한 정의는 다음과 같이 하였다.

- 최소시간처짐 : 과거 일정시점에서 출발한 차량들 중 관측시점까지 혼잡을 겪지 않고 가장 빨리 도착한 차량의 통행시간
- 혼잡에 의한 시간처짐 : 과거 일정시점에서 출발한 차량들 중 관측시점까지 도착한 차량들의 평

- 균통행시간과 '최소시간처짐'의 차이
- 갭신간격에 의한 시간처짐 : 통행시간 추정시점인 관측시각과 추정된 평균통행시간과의 차이

그리고 시간집계간격 h_i 의 t_j 시점에서의 출발시각기준에 의한 '시간처짐($\varepsilon_{h_i}(t_j)$)'은 각각의 시간처짐들의 합으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{h_i}(t_j) = \varepsilon_{h_i}^1 + \varepsilon_{h_i}^2 + \varepsilon_{h_i}^3(t_j) \quad (5)$$

여기서,

$$\varepsilon_{h_i}^1 = L_a / (V_f \cdot 1/60)$$

$$\varepsilon_{h_i}^2(t_j) = TT_{h_i}^e(t_j) - \varepsilon_{h_i}^1$$

$$\varepsilon_{h_i}^3(t_j) = t_j - TT_{h_i}^e(t_j)$$

여기서, '최소시간처짐($\varepsilon_{h_i}^1$)'은 링크길이(L_a)와 자유류 속도(v_f)에 의해 결정된다. '혼잡에 의한 시간처짐($\varepsilon_{h_i}^2(t_j)$)'은 관측시각 t_j 시점에 추정된 평균 통행시간에서 '최소시간처짐'을 뺀 값과 같다. 그리고 '갭신간격에 의한 시간처짐($\varepsilon_{h_i}^3(t_j)$)'은 관측시각에서 평균통행시간을 뺀 값과 같다. 따라서 '최소시간처짐($\varepsilon_{h_i}^1$)'과 '혼잡에 의한 시간처짐($\varepsilon_{h_i}^2(t_j)$)'의 합은 평균통행시간($TT_{h_i}^e(t_j)$)과 같다. 이를 식 (6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$TT_{h_i}^e(t_j) = \varepsilon_{h_i}^1 + \varepsilon_{h_i}^2(t_j) \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 종합하면 출발시각기준에 의한 '시간처짐($\varepsilon_{h_i}(t_j)$)'은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{h_i}^3(t_j) = TT_{h_i}^e(t_j) + \varepsilon_{h_i}^3(t_j) \quad (7)$$

그림 4는 지금까지 언급한 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정에서 단일링크에 대한 정확성과 신속성 판단기준의 개념을 나타낸 것이다.

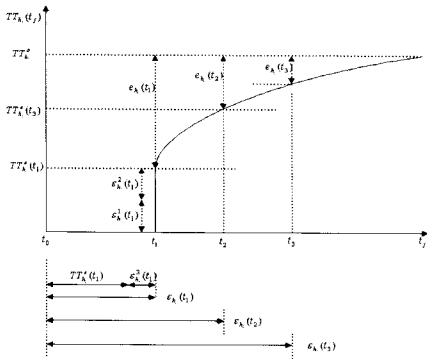


그림 4. 단일링크에서의 추정오차와 시간차점의 개념도

4. 자료구축 및 적용 결과

4.1 자료구축

본 연구에 사용된 통행시간자료는 그림 5와 같이 미국 Texas, Houston에 위치한 US-290 도시고속도로에 설치된 4개의 AVI reader station(3개링크: case1:2.5km, case2:3.95km, case3:4.6km)에서 수집된 자료이다.

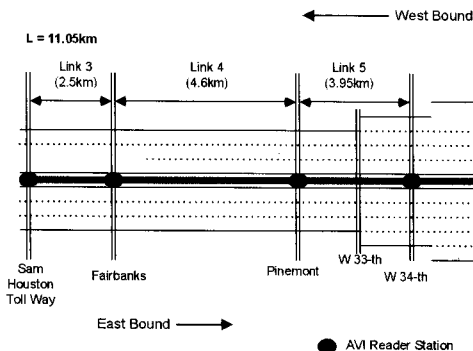


그림 5. 연구대상구간 : US-290 Houston, Texas

이용자료는 1997년 5월의 평일자료를 이용하였다. (단, 이용자료에 대한 가정은 본 연구에서 제시한 가정과 동일하게 적용함.) 실시간 상에서의 이상치 제거방법은 식 (8), 식 (9)와 같이 한국도로공사(2000)의 중위절대편차(MAD : Median Absolute

Deviation)를 이용하였다. 그리고 그림 6은 연구대상 링크들의 5월 평일의 오전 첨두시간대[06:00-09:00]의 평균통행속도를 나타낸 것이다. 이에 본 연구에서 고려한 혼잡수준은 속도 20km/h~100km/h를 고려하였다.

$$MAD = 1.4826 \times \text{median} \|T_{h_i}^p(t_j) - T_{h_i}(t_j)_{med}\| \quad (8)$$

$$Z_i(t_j)_{med} = \frac{T_{h_i}^p - T_{h_i}(t_j)_{med}}{MAD} \quad (9)$$

여기서, $|Z_i(t_j)_{med}| > Z_{cut}$ 이면 이상치로 판단한다 ($Z_{cut} = 3$).

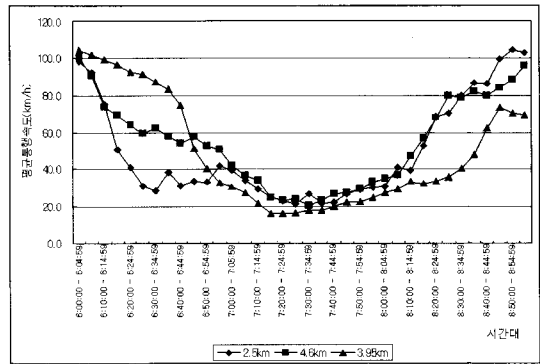


그림 6. 1997년 5월 평일의 오전 첨두시간대의 평균통행속도 분포

4.2 적용결과

4.2.1 혼잡수준별 정확성 분석결과

본 연구에서는 각 출발시각기준 시간집계간격 h_i 에 대해 처음 관측시점(t_1^e)을 기준으로 case별 혼잡수준에 따른 추정오차(MSE, 계통오차, MSE)를 산출하였다. 그리고 이에 대한 신뢰성 검증은 표 2에서 알 수 있듯이 관측시점에서 수집되는 표본수가 매우 작은 경우로 식 (10)과 같이 t -분포를 이용하였다.

$$TT_{h_i}(t_j) - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} < TT_{h_i} < TT_{h_i}(t_j) + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

그 결과, 각 case별 혼잡수준별 '추정오차(MSE),



계통오차, MSE)'는 99%의 신뢰구간(confidence interval) 범위내에서 그림 7~그림 9와 같은 결과를 보였다. 표 2와 그림들에서 나타나듯이 MSEE, 계통오차, MSE는 링크길이가 적을수록 낮게 나타났다. (단, MSE와 MSEE는 속도가 80km/h 이상인 경우에는 링크길이가 혼잡수준에 상관없이 '0'에 가까운 결과를 보이고 있다.) 그리고 계통오차(운전자 습관에 의한 영향)는 50km/h 이상인 경우 링크길이와 혼잡수준에 상관없이 '0'의 값을 나타내고 있다.

또한, 표 2에서 각 case별 추정오차율(%)을 살펴보면, case 1(2.5km/h)은 30km/h이상, case 2(3.95km)에서는 40km/h이상 그리고 case 3(4.6km)에서는 50km/h이상에서 5% 이내의 오차율을 나타냈다.

4.2.2 혼잡수준별 신속성 분석결과

본 연구에서 정의한 각각의 '시간처짐'을 산출하기 위해 각 링크들을 통행하는 차량들의 자유류 속도는 100km/h로 설정하였다. 그 결과, '최소시간처짐' ($\alpha_{h_i}^1(t_j)$)과 '혼잡에 의한 시간처짐' ($\alpha_{h_i}^2(t_j)$)은

표 2. case별 혼잡수준별 추정오차 분석결과 ($\alpha = 0.01$)

구 분		속 도 (km/h)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	
case 1 (2.50 km)	표본수	6	9	11	13	16	18	20	22	22	
	MSEE	0.28	0.15	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	
	계통오차	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	MSE	1.14	0.15	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	
오차율(%)		10.84	2.07	1.27	1.7	2.34	0.62	1.03	0.69	0.44	
case 2 (3.95 km)	표본수	5	8	11	13	15	16	18	20	21	
	MSEE	0.61	0.43	0.24	0.16	0.08	0.06	0.02	0.01	0.01	
	계통오차	1.27	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	MSE	1.88	0.99	0.24	0.18	0.09	0.06	0.02	0.01	0.01	
오차율(%)		6.75	5.79	2.70	2.30	1.76	1.19	0.97	0.94	0.01	
case 3 (4.60 km)	표본수	3	4	9	11	14	16	18	20	21	
	MSEE	0.76	0.54	0.33	0.22	0.15	0.09	0.04	0.02	0.02	
	계통오차	2.52	0.75	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	MSE	3.28	1.29	0.60	0.22	0.15	0.09	0.04	0.02	0.02	
오차율(%)		10.44	8.49	6.92	0.29	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	

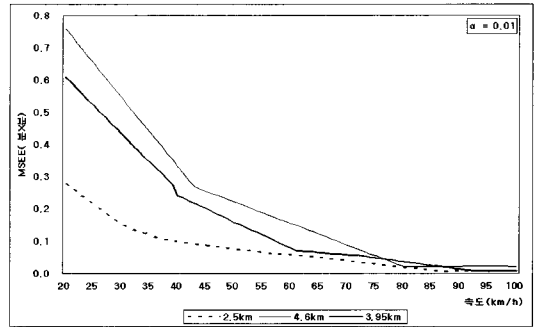


그림 7. Case별 혼잡수준별 MSEE 결과

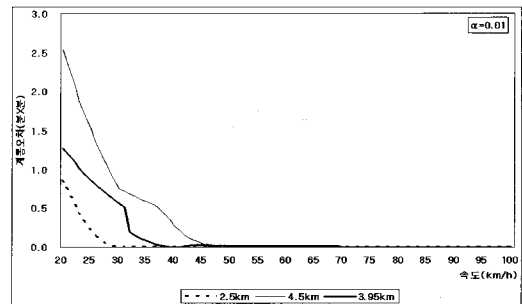


그림 8. Case별 혼잡수준별 계통오차 결과

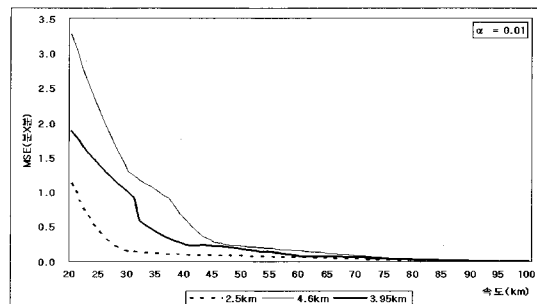


그림 9. Case별 혼잡수준별 MSE 결과

그림 10, 그림 11 같이 속도가 증가하면 감소하는 것으로 나타났다. 이와 반대로 '갱신간격에 의한 시간처짐' ($\alpha_{h_i}^3(t_j)$)은 속도가 증가하면서 같이 증가하는 것으로 나타났다(그림 12). 그리고 각각의 '시간처짐'을 모두 합한 결과는 그림 13과 같다.

따라서 결과를 종합해 보면, 앞에서 추정오차율(%)이 5%인 경우를 고려해 볼 때, 연구대상 링크에 대해 '시간처짐'이 10분정도 발생하는 것으로 나타났다.

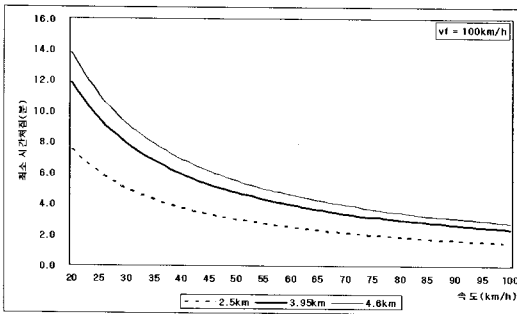


그림 10. 혼잡수준별 최소시간처짐 결과

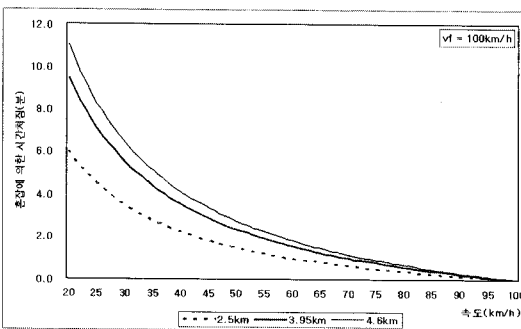


그림 11. 혼잡수준별 혼잡에 의한 시간처짐 결과

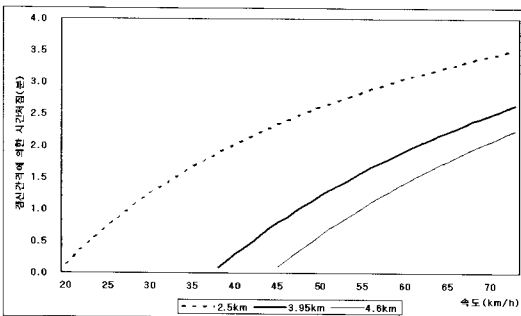


그림 12. 혼잡수준별 갱신간격에 의한 시간처짐 결과

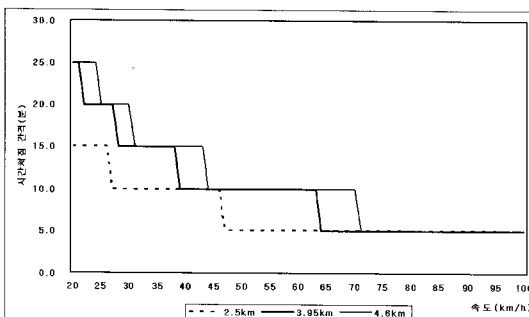


그림 13. 혼잡수준별 시간처짐 결과

5. 결론

본 연구는 구간검지체계에서 수집되는 통행시간 자료를 이용하여 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정정보의 질을 평가하고자 하였다. 이에 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정의 개념 및 정확성(추정오차)과 신속성(시간처짐)의 개념을 정립하였다. 또한 통행시간정보의 질이 링크길이와 혼잡수준에 따라 어느 정도 발생하는지 파악하고, 적정판단 기준을 제시하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정정보는 통행시간정보의 질 측면에서 정확성(추정오차)과 신속성(시간처짐)이 서로 상충(trade-off)관계이다. 이는 통행시간정보를 신속하게 제공하기 위해 시간처짐을 줄이면(신속성 향상) 정확성은 감소(추정오차는 증가)한다. 반대로 추정오차를 감소시키기 위해(정확성 향상) 동일시간대에 출발한 차량이 모두 도착하기를 기다리면 신속성(시간처짐 증가)은 감소한다.

둘째, 추정오차는 관측시점에서의 개별차량의 '운전습관에 의한 영향'을 나타내는 계통오차와 '혼잡수준에 의한 영향'을 나타내는 평균자승오차(MSEE)로 구분된다. 이것은 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정정보의 정확성을 판단할 수 있다.

셋째, 시간처짐은 '최소시간처짐', '혼잡에 의한 시간처짐', '갱신간격에 의한 시간처짐'으로 구분하여 출발시각기준 실시간 링크통행시간의 신속성을 판단할 수 있다.

넷째, 이를 기초로 case별로 적용한 결과, 계통오차는 50km/h, MSEE는 80km/h 이상이면 링크길이와 혼잡수준에 상관없이 '0' 값을 나타내었다. 그리고 시간처짐의 경우에는 '최소시간처짐'과 '혼잡에 의한 시간처짐'은 속도가 증가하면 감소하지만, '갱신간격에 의한 시간처짐'은 반대로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 본 연구의 case에서 링크길이와 혼잡수준에 관계없이 추정오차율이 5%인 경우를



고려할 때 '시간처짐'은 약 10분정도 발생하는 것으로 평가되었다.

본 연구는 통행시간 자료수집의 제약으로 인해 보다 많은 case에 적용하지 못하였으므로 향후 연구에서는 보다 많은 자료와 다양한 case에 적용할 필요성이 있다. 그리고 본 연구에서 제시한 통행시간 추정 의 적정기준인 추정오차율 5%, 시간처짐 10분의 기준은 시간집계간격과 갭시간격을 5분으로 설정했을 때의 결과이다. 따라서 향후 연구에서는 이를 다양하게 변화시키면서 분석할 필요성이 있다.

또한, 출발시각기준 링크통행시간 추정정보의 질에 영향을 주는 요인으로는 통행시간자료의 시간적 설계(시간집계간격, 갭시간격, 예측간격), 공간적 설계(링크길이), 표본수(혼잡수준에 따라 관측되는 차량의 수) 결정이라 할 수 있다. 이에 본 연구를 기초로 이들을 고려한 최적화 측면의 실시간 통행시간 정보의 질을 평가할 수 있는 기준설정 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2006년 서울시립대학교 교내연구비지원에 의해 연구된 것임.

참고문헌

강정규 · 남궁성(2002) "고속도로 통행료 수납자료를 이용한 통행시간 예측모형 개발", 대한교통학회지, 대한교통학회, 제20권, 제4호, pp 151-162.

김재진 · 노정현 · 박동주 · 남궁성(2006a) "출발 및 도착시각기준 구간통행시간 차이의 원인규명에 관한 연구:연속류를 중심으로", 국토연구, 국토연구원, 제48권, pp 71-86.

김재진 · 노정현 · 박동주(2006b) "구간검지체계를 이용한 on-line 출발시각기준 링크통행시간 추정: 연속류를 중심으로", 대한교통학회지, 대한교통학회, 제24권, 제2호, pp.157-168.

김재진 · 노정현 · 박동주(2007) "출발시각기준 링크통행시간 정보의 공간적 설계(연속류를 중심으로)", 대한교

통학회지, 대한교통학회, 제25권, 제2호, pp 145-155.

오세창 · 김명하 · 오영태(2003) "차량검지기 교통량 데이터를 이용한 고속도로 통행시간 추정 및 예측모형 개발에 관한 연구", 대한교통학회지, 대한교통학회, 제21권 제15호, pp 83-116.

이의은 · 김정현(2002) "시간처짐 현상을 고려한 장거리 구간 통행시간 산출 방법론 연구", 대한교통학회지, 대한교통학회, 제20권, 제4호, pp 51-61.

남궁성 등(2000). "ITS 기술개발(IV) 고속도로 통행시간 예측시스템 개발", 한국도로공사 도로연구소

Park. D., Rilett. L. R., Gajewski. B. J. and Spiegelman W. L.(2000) "Optimal Aggregation Interval Size of Probe-Based Travel Time Information for ATIS", *Presented at the 80th Transportation Research Board Annual Meeting Washington D.C.*

Park. D., Rilett. L. R., and Pattanamekar P.(2002) "Estimating Travel Time Summary statistics of Larger Intervals from Smaller Intervals without storing individual Data". *Transportation Research Record, No. 1804*, pp. 39-47.

Rilett. L. R. and Park. D.(2001) "Direct Forecasting of Freeway Corridor Travel Times using Spectral Basis Neural Networks", *Transportation Research Record, No. 1752*, pp. 140-147.

Zhang. X. and J.A. Rice(2003) "Short-term travel time Prediction". *Transportation Research Part C, No. 11*, pp. 187-210.

Zietsman. J. and Rilett. L. R.(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.*

접 수 일: 2008. 2. 25
심 사 일: 2008. 2. 25
심사완료일: 2008. 2. 28