

■ 論 文 ■

구간검지체계를 이용한 On-Line 출발시각기준 링크 통행시간 추정 (연속류를 중심으로)

On-Line Departure time based link travel time estimation using Spatial Detection System

김 재 진

(한양대학교 도시대학원 박사과정)

노 정 현

(한양대학교 도시대학원 교수)

박 동 주

(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

목 차

- | | |
|---|--------------|
| I. 서론 | 알고리즘 개발 및 평가 |
| II. 구간검지체계를 이용한 통행시간 정보 관련 연구 고찰 | 1. 기본전제 |
| III. On-Line 출발시각기준 통행시간 정보 개념 정립 | 2. 알고리즘 개발 |
| 1. On-Line과 Off-Line의 출발 및 도착시각기준 통행시간 정보 개념 비교 | 3. 평가방법 |
| 2. 시사점 제시 | V. 적용 및 결과분석 |
| IV. On-Line 출발시각기준 링크통행시간 추정 | 1. 자료수집 및 적용 |
| | 2. 결과분석 |
| | VI. 결론 |
| | 참고문헌 |

Key Words : 구간검지체계, 출발시각기준, 도착시각기준, 베이지안, On-Line, TCS

요 약

구간검지시스템에서 수집되는 통행시간 정보는 과거 개별차량의 검지기 통과시각(도착시각)을 기준으로 수집되는 특성이 있다. 따라서 구간검지시스템에 의해 수집되는 통행시간 정보는 도착시각기준이 아닌 출발시각기준으로 산출되어야 하고 현재시점(On-Line)에서 통행시간 추정 및 예측이 되어야 한다. 그러나 기존의 구간검지시스템을 이용한 통행시간 추정 및 예측 연구들은 도착시각기준으로 수집되는 개별차량 통행시간 자료를 이용함으로써 출발시각기준 On-Line 통행시간 정보 관련 연구를 체계적으로 접근하기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 On-Line 출발시각기준의 통행시간 정보의 개념을 정립하고 이에 따른 시사점을 도출하였다. 그리고 베이지안 추론을 이용하여 고속도로를 대상으로 한 출발시각기준의 On-Line 링크통행시간 추정 알고리즘을 개발하였다. 그 결과, 본 연구에서 개발한 알고리즘은 On-Line 통행시간 정보 질의 정확성과 신속성 측면에서 개선된 통행시간 대표값(평균값)을 추정하는 것으로 나타났다.

Spatial detection system such as AVI, GPS, and Beacon etc. can provide spatial travel time only after a vehicle passes through a road section. In this context, majority of the existing studies on the link travel time estimation area has focused on the arrival time-based link travel time estimation, rather than departure time-based link travel time estimation. Even if some of the researches on this area have developed departure time-based link travel time estimation algorithms, they are limited in that they are not applicable in a real-time mode. The objective of this study is to develop an departure time-based link travel time estimation algorithm which is applicable in a real-time mode. Firstly, this study discussed the tradeoff between accuracy and timeliness of the departure time-based on-line link travel time estimates. Secondly, this study developed an departure time-based on-line link travel time estimation algorithm which utilizes the Baysian inference logic. It was found that the proposed approach could estimate departure time-based link travel times in a real-time context with an acceptable accuracy and timeliness.

I. 서론

구간통행시간 정보는 운전자 자신이 가고자 하는 목적지까지의 경로를 선택하는데 직접적인 결정 요소 중 하나이다. 국내외의 여러 교통관리센터들은 구간통행시간 정보를 수집하기 위해 지점 및 구간 교통정보 수집 시스템을 운영 중에 있다. 이들 시스템 중 구간검지시스템(TCS, Beacon, AVI 등)은 '도로구간'의 교통정보를 제공하므로 ATIS 측면에서 지점검지시스템(루프검지기 등)보다는 유리한 장점을 가지고 있다. 그리고 구간검지시스템에 의해 수집되는 통행시간 정보는 과거 개별차량의 검지기 통과시각(도착시각)을 기준으로 수집되는 특성이 있다. 이는 실제 통행시간 정보를 이용하는 운전자 입장에서 보면 자신이 가고자 하는 경로에 대해 과거의 다른 운전자가 경험한 과거 통행시간 자료이다. 즉, 실제 통행시간 정보를 이용하는 운전자 입장에서는 과거 차량의 통행시간 정보가 아닌 현재 자신이 출발하고자 하는 시각에서의 통행시간 정보가 필요하다. 따라서 통행시간 추정 및 예측의 재료인 통행시간 자료는 출발시각기준 자료이어야 한다.¹⁾ 또한, 통행시간 추정 및 예측의 과정도 현재시점(On-Line)²⁾ 측면에서 이루어져야 한다.

그러나 기존의 출발시각기준 통행시간 정보 관련 연구들³⁾은 구간검지시스템에서 수집되는 자료의 시간차집 문제 해결을 위한 통행시간 예측모형의 평가 및 최적 시간집계간격⁴⁾(Optimal time aggregation interval) 결정 등 Off-Line⁵⁾ 측면의 연구들이 진행되어왔다. 따라서 On-Line 출발시각기준 통행시간 정보는 전혀 고려하지 못하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 구간검지 시스템 중 고속도로 TCS(Toll Collection System)⁶⁾ 자료를 이용하여 출

발 및 도착시각기준에 의해 산출된 통행시간 자료를 On-Line과 Off-Line 측면에서 개념적으로 비교하고자 한다. 그리고 이를 토대로 구간검지체계를 이용한 On-Line 출발시각기준 링크통행시간 추정 알고리즘을 개발 및 평가 하고자 한다.

II. 구간검지체계를 이용한 통행시간 정보 관련 연구 고찰

1990년대 초반 미국의 시카고 지역에서 ADVANCE 프로젝트가 수행되면서 구간검지체계를 이용한 통행시간 정보 관련 연구들이 진행되어 왔다. 이들 연구들은 구간검지체계 자료 중 AVI(Automatic Vehicle Identification) 자료를 이용하고 있으며, 통행시간 추정 및 예측과 관련한 연구들 <표 1>이 대부분이다. 그러나 AVI 자료를 이용한 연구들은 AVI tag를 장착한 Probe 차량만을 대상으로 통행시간을 추정하였다. 따라서 AVI tag를 장착하지 않은 차량들을 포함하지 않고 있으므로 통행시간 추정의 정확성이 문제가 되었다. 이에 적은 수의 Probe 표본 수를 가지고 통행시간 추정의 정확성을 높이기 위한 프로브 차량의 최적 표본 수 결정에 관한 연구들이 진행 중에 있다.⁷⁾

그러나 이들 연구들은 구간검지체계에서 수집되는 자료의 특성인 도착시각기준의 자료를 그대로 적용하고 있다. 이에 국내의 일부 연구에서는 <표 2>와 같이 출발시각기준의 통행시간 자료를 이용한 연구들이 진행되어 왔다. 국내 연구에서는 출발시각기준의 고속도로 TCS 자료를 이용하여 시간 차집 문제를 해결하기 위한 통행시간 예측모형의 예측력을 평가하였다. 국외 연구에서는 AVI자료를 이용한 통행시간 추정 및 예측 연구들이 진행 중에 있다.

이들 연구들은 Link/Corridor 및 장단기간의 예측

1) 구간통행시간 정보는 그 정보를 이용하고자 하는 운전자(A)입장에서 보면 자신보다 앞서 자신이 가고자 하는 경로를 통행한 운전자(B)들이 경험한 결과이다. 이때, A가 필요로 하는 정보는 B가 출발했던 시각에서가 아닌 자신이 출발하고자 하는 시각에서의 통행시간이다. 여기서, B로부터 얻어진 통행시간은 A입장에서는 이미 과거정보이기 때문에 A가 원하는 통행시간 정보를 제공하기 위해서는 A가 출발하고자 하는 현재시각과 B가 출발했던 시각과의 차이만큼 예측을 해주어야 한다. 따라서 예측대상은 출발시각에 따른 통행시간이 되며, 예측의 재료가 되는 구간검지시스템의 통행시간 자료는 출발시각기준으로 정렬되어 있어야 한다.(한국도로공사, 2000: p 49).

2) 특정 출발시각에 출발한 차량들 중 현재 시점까지 도착한 차량들의 실시간 통행시간 정보

3) 예를 들어, 한국도로공사, 2000; 강경규·남궁성, 2002; 이의은·김정현, 2002; 오세창 외, 2003; Rilett and Park, 1999; Park et. al, 2001; 2002; Zietsman and Rilett, 2000; Zhang and Rice, 2003 등.

4) 구간검지체계에서 수집된 개별차량 자료를 통행시간 추정 및 예측을 하기 위해 수집하는 시간간격으로 국내의 교통수집체계를 살펴보면 대체로 5~10분단위로 설정하고 있음.

5) 특정 출발시각에 출발하여 이미 모두 도착 완료한 차량들에 대한 통행시간 정보

6) 고속도로 폐쇄구간의 출발 톨게이트 및 도착 톨게이트 통과시각이 기록되는 통행료 수납 시스템으로 개별차량의 통행시간 자료를 제공함.

7) 예를 들어, Turner and Holdner, 1995; Srinivasan and Jovanis, 1996; Chen and Chein 2000; Dion and Rakha, 2003; 이철원·박지영, 2001; 고승영, 2001; 이영인·이정희, 2002 등

〈표 1〉 기존 구간검지체계를 이용한 통행시간 정보 관련 연구 분류

연구영역	기준시간	연구분류	연구대상	이용자료			
통행시간 추정 및 예측 연구	도착 시각 기준	On-Line	정연식·최기주(2001) 김영찬·김태용(2001) 등	연속류 단속류	GPS Probe+루프 AVI+루프		
		Off-Line	Boyce et. al(1991)* Boyce et. al(1993) Dailey(1993) Turner and Holdner(1995) Sen et. al(1997) Srinivasan and Jovanis(1996) Riley(1999) Hellinga and Fu(1999)* Chen and Chein(2000)	연속류 연속류 연속류 연속류 연속류 연속류 연속류 단속류 연속류	AVI AVI AVI AVI AVI AVI AVI AVI AVI		
			이정원·박지영(2001) 고승영(2001) 이영인·이정희(2002) Dion and Rakha(2003) 문학룡 외(2003) Hellinga and Fu(2002) 장진환 외(2004)* 이영우·임채문(2004) 최기주·장정아(2004) 등	단속류 단속류 연속류, 단속류 연속류 단속류 연속류 연속류 단속류 단속류	AVI Beacon AVI AVI AVI AVI AVI GPS GPS		
			출발 시각 기준	On-Line	-	-	-
				Off-Line	한국도로공사(2000)* 강정규·남궁성(2002)* 이의은·김정현(2002)* 오세창 외(2003)* Rilett and Park(1999)* Zhang and Rice(2003)* Park et. al(2001*:2002) Zietsman and Rilett(2000) 등	연속류 연속류 연속류 연속류 연속류 연속류 연속류 연속류	TCS TCS TCS TCS AVI AVI+루프 AVI AVI

주) *: 통행시간 예측 연구임.

〈표 2〉 출발시각기준 통행시간 정보 관련 연구 분류

연구 분류 (Off-Line)	내용	이용 자료	
통행 시간 예측	한국도로공사 (2000)	•출발시각 기준(Off-Line)메이터 변환 알고리즘 제시	TCS
	강정규·남궁성 (2002)	•장단거리 시간차집 문제를 해결을 위한 통행시간 예측모형	TCS
	이의은·김정현 (2002)	•시간차집을 고려한 고속도로 구간의 통행시간 예측모형	TCS
	오세창 외 (2003)	•단기 통행시간 추정 및 예측 모형개발	TCS
	Rilett and Park(1999)	•고속도로 Corridor base의 통행 시간 예측	AVI
	Zhang and Rice(2003)	•출발지 기준 단기간 통행시간 예측	AVI + 루프
	Park et. al(2001)	•통행시간 추정 및 예측을 위한 최적시간집계간격 결정	AVI
통행 시간 추정	Zietsman and Rilett(2000)	•통행시간 집계자료와 비집계 자료의 추정 및 예측력비교	AVI
	Park et. al (2002)	•최소시간집계간격으로부터 설정 시간 간격의 평균과 분산을 추정하는 모델을 개발	AVI

력을 평가하거나, 최적시간집계간격을 결정 및 자료저장 능력의 부담을 줄이고자 하는 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 이 연구들도 Off-Line 통행시간 정보 측면의 출발시각기준 연구들이다. 따라서 On-Line 통행시간 정보 측면의 통행시간 추정 및 예측연구는 전무한 실정이다.

III. On-Line 출발시각기준 통행시간 정보개념 정립

1. On-Line과 Off-Line의 출발 및 도착시각기준 통행시간 정보 개념 비교

본 연구에서는 구간검지시스템의 두 지점 간 원시교 통정보 예제(표 3)을 통하여 On-Line 링크 통행시간 정보와 Off-Line 링크 통행시간 정보를 출발 및 도착 시각기준의 링크통행시간 대표값(평균값)으로 구분하여 그 차이를 비교 하고자 한다.(단, 통행시간 집계간격과

〈표 3〉 구간검지시스템의 원시정보(예)

현재 시각	차량고유 번호	도착 시각	출발 시각	통행시간 (분)
13:01	11	13:01	12:40	21
	12	13:01	12:38	23
	13	13:01	12:37	24
	14	13:01	12:39	22
13:02	15	13:02	12:35	27
	16	13:02	12:36	26
	17	13:02	12:37	25
13:03	18	13:03	12:40	20
	19	13:03	12:41	22
	20	13:03	12:39	24
	21	13:03	12:30	33
	22	13:03	12:33	30
13:07	23	13:07	12:42	25
13:08	24	13:08	12:37	31
13:09	25	13:09	12:43	28
	26	13:09	12:41	28
	27	13:09	12:42	27
	28	13:09	12:40	29
	29	13:09	12:39	30
13:13	30	13:13	12:44	31

On-Line 통행시간 정보의 정보갱신간격⁸⁾은 5분으로 가정한다.)

그 결과, 〈표 4〉의 Off-Line 링크통행시간 대표값 추정 결과를 살펴보면, 도착시각기준은 [13:01~13:15]에 해당하는 시간집계간격의 통행시간 대표값이 나타나지만, 출발시각기준은 [12:31~12:45]의 시간 집계간격과 통행시간 대표값이 나타난다. 따라서 출발 및 도착시각기준의 시간집계간격 및 통행시간 대표값이 서로 다르게 나타남을 알 수 있다. 그리고 〈표 4〉와 〈표 5〉의 도착시각기준의 On-Line과 Off-Line의 결과를 비교하면, 개념상 현재시각과 도착시각이 일치하므로 시간집계간격과 대표 통행시간 값이 같음을 알 수 있다.

그러나 출발시각기준의 Off-Line(〈표 4〉)과 On-Line(〈표 5〉)의 통행시간 대표값을 비교하면 Off-Line의 [12:36-12:40]의 통행시간 대표값은 25분이지만, On-Line의 13:05분 현재 [12:36-12:40]의 통행시간 대표값은 23.12분으로 오차(1.87분)가 발생한다. 그리고 13:10분 현재 [12:36-12:40]의 통행시간 대표값은 [12:36-12:40]에 출발한 차량들이 13:10분까지 모두 중점검지를 통과했으므로 Off-Line과 동일하게 25분을 나타내고 있다. 즉, On-Line 출발시각

〈표 4〉 Off-Line 링크통행시간 대표값 추정결과

구분 (Off-Line)	집계간격 (5분)	해당차량 번호	평균통행 시간(min)
도착 시각 기준	[13:01-13:05]	11~22	24.8
	[13:06-13:10]	23~29	28.3
	[13:11-13:15]	30	31.0
출발 시각 기준	[12:31-12:35]	15,22	28.5
	[12:36-12:40]	11~14,16,17,18, 20,24,28,29	25.0
	[12:41-12:45]	19,23,25,26,27,30	26.8

〈표 5〉 On-Line 링크통행시간 대표값 추정결과

구분 (On-Line)	현재시각 (갱신주기= 5분)	집계간격 (5분)	해당 차량 번호	평균 통행 시간 (min)
도착 시각 기준	[13:05 현재]	[13:01-13:05]	11~22	24.8
	[13:10 현재]	[13:06-13:10]	23~29	28.3
	[13:15 현재]	[13:11-13:15]	30	31.0
출발 시각 기준	[13:05 현재]	[12:31-12:35]	15,22	28.5
		[12:36-12:40]	11~14, 16~18,20	23.1
		[12:41-12:45]	19	22.0
	[13:10 현재]	[12:31-12:35]	15,22	28.5
		[12:36-12:40]	11~14, 16~18, 20,24, 28,29	25.0
		[12:41-12:45]	19,23,25, 26,27	26.0
	[13:15 현재]	[12:31-12:35]	15,22	28.5
		[12:36-12:40]	11~14, 16~18, 20,24, 28,29	25.0
		[12:41-12:45]	19,23,25, 26,27,30	26.8

기준 통행시간 정보의 개념에서는 현재시각이 갱신되면서(13:05→13:10) "통행시간 정보의 갱신"이 이루어지며, 최종적으로는 On-Line과 Off-Line의 통행시간 대표값이 동일해 짐을 알 수 있다.

2. 시사점 제시

출발시각기준 On-Line과 Off-Line 링크통행시간 정보 비교를 통해 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다.

8) On-Line상에 추정된 구간통행시간 대표값을 갱신(Update)하는 시간간격

첫째, On-Line과 Off-Line의 통행시간 정보가 같아지기 위해서는 On-Line의 경우 동일시간대에 출발한 모든 차량이 모두 도착해야 한다. 즉, 추정오차를 줄이기 위해서는 모든 차량이 도착할 때까지 기다려야 한다. 그러나 이를 기다릴 경우 정보갱신상의 시간 차이가 발생한다.

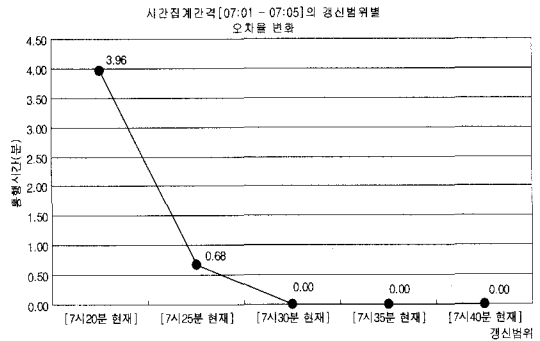
둘째, 반면에 이를 기다리지 않고 통행시간 대표값을 제공할 경우 통행시간이 과소추정 되는 결과를 보이고 있다. 또한, 실질적으로 동일출발시간대에 몇 대의 차량이 출발했는지를 알 수 없기 때문에(또는 출발한 시각을 안다고 해도 그 중 몇 대가 도착했는지 알 수 없음) 언제까지 기다려야 하는지도 불명확하다. 그러므로 이러한 문제를 고려한 On-Line 상의 출발시각기준 링크통행시간 추정 알고리즘 개발이 필요하다.

IV. On-Line 출발시각기준 링크통행시간 추정 알고리즘 개발 및 평가

1. 기본전제

1) On-Line 출발시각기준 링크통행시간 추정방법

예를 들어<그림 1>과 <그림 2>은 2004. 5.10의 서울 T/G(Toll Gate) → 수원T/G 구간(9.6km)에 출발한 차량들의 평균 통행시간 값과 오차율(%)을 On-Line 측면에서 갱신범위⁹⁾별로 살펴본 것이다. 여기서도 알 수 있듯이 [07:01-07:05]에 서울T/G를 출발한 차량들은 7:20부터 수원T/G에 도착하기 시작하

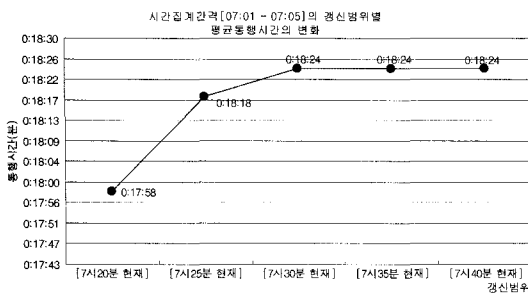


<그림 2> 서울T/G→수원T/G(9.6km)의 갱신범위별 평균통행시간 오차율 변화(예)

로 약 20분 정도의 시간차집이 발생함을 알 수 있다.¹⁰⁾ 그리고 7:20분 이후에도 계속해서 차량들이 도착함으로 인해 모든 차량이 도착한 7:30분까지의 갱신범위 별(5분 단위) 평균 통행시간 값은 계속 변화한다. 반면에 7:30분 이후에는 모든 차량이 도착하였으므로 갱신범위 별 평균 통행시간 값의 변화가 없음을 알 수 있다.

이는 통행시간 정보의 질(Quality)측면에서 있어서 통행시간 정보를 신속하게 제공하기 위해 갱신범위를 줄이면(신속성) 추정 오차율(%)은 높아지고 반대로 추정 오차율(%)을 낮추기 위해(정확성) 동일 시간대에 출발한 모든 차량이 도착하기를 기다리면 갱신범위가 늘어나는 상충(trade-off)관계를 보여주고 있다. 따라서 통행시간 정보의 질을 정확성과 신속성 측면에서 향상시킬 수 있는 On-Line 출발시각기준 링크 통행시간 추정방법이 필요하다.

이에 본 연구에서는 On-Line 링크통행시간 추정 방법으로 베이저안 추론(Baysian Inference)법을 적용하였다. 이 방법은 사전정보(prior information: historical information)의 개별 차량들의 통행시간 값과 추가정보(동일 시간대에 출발한 차량들 중 현재까지 도착한 개별 차량들의 통행시간 정보)를 이용하여 사후정보(posterior information: estimation information) 즉, 평균통행시간을 추정 한다. 사전정보는 과거 이력자료(historical data)에서 동일 출발시간대에 출발한 차량들의 통행시간을 $x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, x_i^0$ 이라고 하고 $P(x_i^0)$ 를 x_i^0 의 사전확률이라고 하자. 그리고 추가로 관측된 자료(θ)가 주어지면, x_i^0 의 사후확률 ($P(x_i^0|\theta)$) 추정 식은 식(1)과 같다.



<그림 1> 서울T/G→수원T/G(9.6km)의 갱신범위별 평균통행시간 변화(예)

9) 일정 시간집계간격의 통행시간 대표값을 갱신하는 횟수

10) 본 연구에서는 이를 "출발시각 기준에 의한 시간차집"이라 정의한다.

$$P(x_i^o|\theta) = \frac{P(x_i^o) P(\theta|x_i^o)}{\sum P(x_i^o) P(\theta|x_i^o)} \quad (1)$$

그리고 일반적으로 베이저안 추론을 적용하기 위해서는 사전 분포를 정의해야 한다. 즉, 사전분포로 이용되는 자료는 표본에 의한 자료들이 대부분이므로 이에 대한 분포를 어떻게 정의하는가에 따라 사후분포의 추정 값이 다르게 나타난다. 베이저안 추론에서는 사전정보에 대한 분포 반영을 우도함수($l(\theta)$)로 나타낸다.(김병휘 외, (2001).) 따라서 베이저안 추론의 장점은 우도함수의 형태를 다양하게 고려함으로써 여러 가지 형태의 사전 분포를 가정해 볼 수 있다는 것이다. 이와 관련해서 기존의 통행시간 추정 연구(Sen et.al, 1997¹¹⁾; Shrinivasan and Jovanis, 1996¹²⁾ 등)에서는 우도함수의 형태를 정규분포(Normal Distribution)으로 가정하였다. 이에 본 연구에서는 On-Line상의 링크 통행시간 추정을 위한 사전분포를 정규분포로 가정 하였으며, 이에 대한 사후확률($P(x_i^o|\theta)$)과 우도함수($l(\theta)$)와의 관계는 식(2), (3)과 같다.

$$l(\theta) \propto \exp\left[-\frac{n}{2\sigma^2}(M - \bar{x})^2\right] \quad (2)$$

M : 모집단의 평균시간, σ 모집단의 표준편차
 \bar{x} 표본의 평균통행시간, n : 표본차량 대수

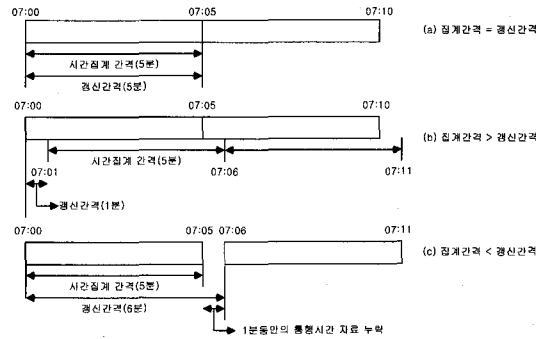
$$P(x_i^o|\theta) \propto \frac{P(x_i^o) \times \exp\left[-\frac{n}{2\sigma^2}(M - \bar{x})^2\right]}{\sum P(x_i^o) \times \exp\left[-\frac{n}{2\sigma^2}(M - \bar{x})^2\right]} \quad (3)$$

그리고 이를 이용한 사후 추정된 통행시간 대표값(\bar{x})은 식(4)와 같다.

$$\bar{x} = \sum x_i^o \cdot P(x_i^o|\theta) \quad (4)$$

2) 시간집계간격과 갱신간격의 관계

국내외 검지기체계를 이용한 교통정보 수집체계를 살펴보면 집계간격 및 갱신간격 모두 5분을 이용하고 있다¹³⁾.(유소영 외, (2004)) 특히, 갱신간격에 대해서



〈그림 3〉 On-Line 출발시간기준의 시간집계간격과 갱신간격의 관계

는 뚜렷한 기준이 설정되어 있기 보다는 경험에 따른 설정기준이 적용되고 있는 실정이다. 그러나 실제로 통행시간 정보를 수집, 제공하는 과정에서는 시간 집계간격과 갱신간격은 다를 수 있다.

〈그림 3〉의 (c)는 시간집계간격이 갱신간격보다 작은 경우로, 시간집계간격과 갱신간격과의 차만큼 개별 차량의 통행시간 자료가 누락됨을 알 수 있다. 따라서 시간집계간격은 갱신간격 보다 크거나 같아야 한다.

3) 이상치 제거방법

구간검지시스템에서 수집되는 개별차량 통행시간 자료는 시스템상의 오류 및 정상적으로 주행한 차량이 아닌 차량들에 대한 이상치 들이 포함되어 있다. 이에 본 연구의 이상치 제거방법으로는 한국도로공사(2000)에서 TCS 자료에 적용한 중위 절대편차(MAD: Median Absolute Deviation)를 적용하였다.

$$MAD = 1.4826 \times median|x_i - x_{med}| \quad (5)$$

x_i : 변수 x 의 관측값, x_{med} 변수 x 의 중위값
 1.4826: MAD를 정규분포에 대한 표준편차와 같도록 만들어 주는 수정계수(Correction factor)

식(5)에서 산출된 MAD를 이용하여 z_i 를 계산하고 그 값을 제거변수(Cutoff Value) z_{cut} 와 비교하면 이상치를 판별하는 것이 가능하다. 만일 $|z_i| > z_{cut}$ 이면,

11) 이 연구에서는 DRGS(Dynamic Route Guidance System)의 도착시각 기준 통행시간 추정을 위해 베이저안 기법을 적용하였음.
 12) 이 연구에서는 고속도로와 간선도로의 통행시간 분포는 모두 정규분포로 가정함으로써 보다 적은수의 프로브 차량대수를 얻을 수 있었음.
 13) 서울 및 경기도에 설치된 비콘 방식의 경우 5분 단위로 링크통행시간을 추정하고 있으며, 대전시 및 제주시의 경우도 AVI 시스템과 루프 검지기를 이용하여 5분단위로 교통정보를 수집하고 있음.

x_i 가 이상치가 된다. $z_i(z_i^{MAD})$ 식(6)과 같이 계산된다.

$$Z_i^{MAD} = \frac{x_i - x_{med}}{MAD} \quad (6)$$

여기서, z_{cut} 의 선정은 어느 정도 임의적 이지만 $z_{cut} = 3$ 이 자주 사용된다.

2. 알고리즘 개발

본 연구에서는 On-Line 출발시각기준 링크 통행시간 추정 알고리즘을 개발하기 위해 다음과 같은 표식을 사용하였다.

1) 표식

- h : 통행시간 집계간격(분)
- u : 통행시간 갱신간격(분)
- P_t : 현재시각
- $x(i)$: i 번째 차량의 통행시간(분)
- $T_b(i)$: i 번째 차량이 중점검지기 b 를 통과한 시각
- $T_a(i)$: i 번째 차량이 시점검지기 a 를 통과한 시각
- $h_s(k)$: k 번째 시간집계간격의 상한시각
($k = 1, 2, 3, \dots$)
- $h_e(k)$: k 번째 시간집계간격의 하한시각
($k = 1, 2, 3, \dots$)
- $x_{MAD_k}(h)$: k 번째 시간집계간격의 MAD 값
- $x_i^k(h)$: k 번째 시간집계간격내의 i 번째 차량의 통행시간(분)
- $x_{med_k}(h)$: k 번째 시간집계간격의 통행시간 중앙값(분)
- $\bar{x}_k(h)$: k 번째 시간집계간격의 평균 통행시간(분)
- $\bar{x}_k(h, u)$: 갱신간격 u 의 k 번째 시간집계간격의 평균 통행시간 추정 대표값(분)
- $x_i^o(h)$: 과거 i 번째 차량의 통행시간(분)
- $\bar{x}_k^o(h)$: k 번째 시간집계간격의 과거 평균 통행시간 대표값(분)
- $P(x_i^o(h))$: 과거 개별차량 통행시간의 사전확률
- $P(x_i^o(h)|\theta)$: 통행시간 $x_i^o(h)$ 가 나타날 사후확률

- $l(\theta)$: 추가정보에 대한 우도함수
- θ : 현재시각까지 관측된 통행시간 자료 (추가정보)
- σ_o : 과거자료의 표준편차
- $z_k(h)$: k 번째 시간집계간격의 표준화 계수
- z_{cut} : 이상치 제거기준(=3)
- $n_k(h)$: k 번째 시간집계간격내의 차량 수

2) On-Line 출발시각기준 링크 통행시간추정 알고리즘

[1단계 : 초기치 설정]

$$u = h, P_t \text{ (단, } h \geq u) \quad (7)$$

[2단계 : 개별차량의 링크통행시간 산출]

$$x(i) = T_b(i) - T_a(i) \quad (8)$$

[3단계 : 출발시각기준 시간집계간격의 범위 설정]

$$\begin{aligned} h_s(k) &\leq T_a(i) \leq h_e(k), \\ h_e(k) - h_s(k) &= h \\ T_b(i) &\leq P_t \end{aligned} \quad (9)$$

[4단계 : 시간집계간격 범위 내에서의 이상치 제거]

$$\begin{aligned} x_{MAD_s}(h) &= 1.4826 \times \text{median} | x_i^h - x_{med_s}(h) | \\ z_k(h) &= \frac{x_i^h - x_{med_s}(h)}{x_{MAD_s}(h)} \\ z_k(h) &> z_{cut} \text{ (} z_{cut} = 3) \end{aligned} \quad (10)$$

[5단계 : 시간 집계간격별 통행시간 대표값 산출]

$$\bar{x}_k(h) = \frac{\sum x_i^k(h)}{n_k(h)} \quad (11)$$

[6 단계 : 베이저안 추론을 적용한 링크통행시간 추정]

$$\begin{aligned} P(x_i^o(h)|\theta) &= \frac{P(x_i^o(h)) \cdot P(\theta|x_i^o(h))}{\sum P(x_i^o(h)) \cdot P(\theta|x_i^o(h))} \\ l(\theta) &\propto [\exp(-\frac{n_k(h)}{2\sigma^2}(\bar{x}_k^o(h) - \bar{x}_k(h))^2)] \\ \bar{x}_k^o(h, u) &= \sum(x_i^o(h)) \cdot \frac{P(x_i^o(h)) \cdot P(\theta|x_i^o(h))}{\sum P(x_i^o(h)) \cdot P(\theta|x_i^o(h))} \end{aligned} \quad (12)$$

[7단계 : 갱신]

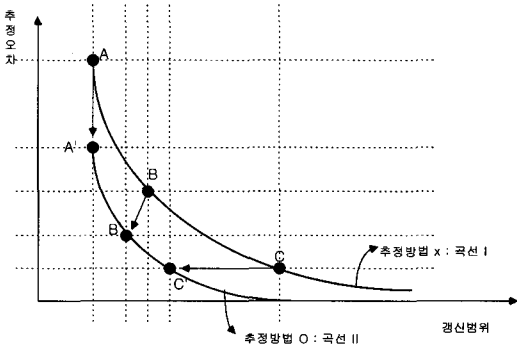
$$u_{t+1} = u_t + P_t \quad (13)$$

3단계로 돌아간다.

3. 평가방법

예를 들어 <그림 4>의 곡선 I은 추정방법을 적용하지 않은 경우라고 하고, 곡선 II는 베이지안 추론에 의해 추정된 곡선이라고 가정하자. 여기서 점A에 해당하는 통행시간 정보는 점B, C에 해당하는 통행시간 정보에 비해 정확성은 떨어지나, 신속성 측면에서는 우수함을 알 수 있다. 반면에, 점C에 해당하는 통행시간 정보는 점A,B에 해당하는 통행시간 정보에 비해 정확성은 높으나, 신속성은 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 앞에서 언급한 바와 같이 On-Line 링크 통행시간추정에 의한 결과는 통행시간 정보의 질 측면에서 정확성(추정 오차)과 신속성(갱신범위)의 상충(trade-off)관계를 나타낸다. 즉, 곡선 I(A,B,C)과 곡선II(A',B',C')의 통행시간 정보를 Pareto Optimal개념을 도입하여 비교하면 다음 세 가지의 경우를 고려할 수 있다.

- 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



<그림 4> On-line 추정기법을 이용한 통행시간정보의 질 평가

V. 적용 및 결과분석

1. 자료수집 및 적용

본 연구에서 사용되는 TCS 통행시간 정보는 출구 T/G(Toll Gate) 통과시각과 입구 T/G 통과시각의

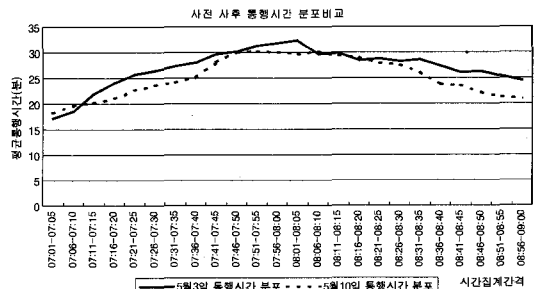
차이가 해당 구간의 통행시간이 된다. 이에 연구대상 구간은 서울T/G→수원T/G(9.6km)으로 설정하였다. 그리고 On-Line 링크통행시간 추정과 관련하여 시간 집계간격과 갱신간격은 5분으로 가정하였다. 베이지안 추론을 적용하기 위한 사전정보는 2004.5.03 일 서울 T/G → 수원T/G 구간의 [07:00-08:00]의 각 시간 집계간격별 출발시각기준 Off-Line 자료를 이용하였다. 그리고 관측된 추가정보(θ)는 5.10의 동일시간대의 시간집계간격별 출발시각기준 On-Line 통행시간 대표값을 적용하였으며, 이에 대한 참값은 5.10의 출발시각기준 Off-Line 통행시간 자료를 이용하였다.

2. 결과분석

베이지안 추론을 적용하기 위해서는 사전·사후 정보로 이용될 통행시간 자료의 분포를 비교할 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 2004. 5. 03과 5. 10의 통행시간 분포를 비교하였다. <그림 5>에서 알 수 있듯이 두 날짜의 통행시간 분포는 유사한 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용한 결과는 <표 6>과 같다. 여기서 추정방법을 적용하지 않은 경우 현재시점부터 10분이 경과한 후에는 동일 출발시간대에 출발한 차량들이 모두 도착하므로 오차율이 '0'로 나타나 정확성은 매우 높다. 그러나 현재시점부터 10분 후어나 정확한 통행시간 정보를 얻을 수 있으므로 신속성은 매우 낮은 경우로 앞의 평가방법에서 언급한 Case 3에 해당된다.

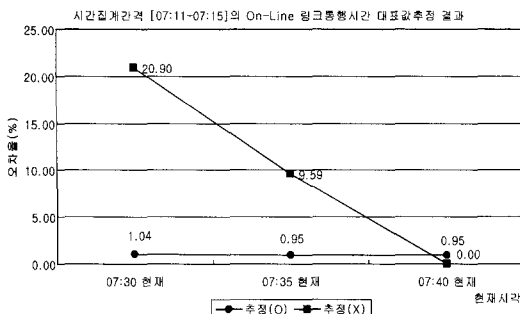
반면에, 추정방법을 적용한 경우는 현재시점에서 추정방법을 적용한 하지 않은 경우보다 정확성과 신속성이 동시에 좋아진 경우로 앞에서 언급한 평가방법의 Case 2에 해당된다. 그리고 예를 들어 <그림 6>, <그



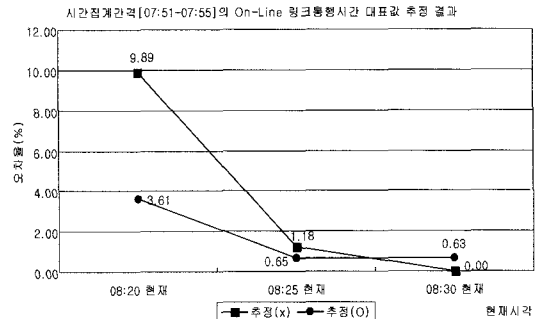
<그림 5> 서울T/G→수원T/G (07:00-09:00)의 사전·사후 통행시간 분포 비교

〈표 6〉 On-Line 통행시간 추정 알고리즘 적용 결과

시간집계간격	현재시각	추정방법 적용(x)		추정방법 적용(O)	
		정확성 (오차율 %)	신속성 (갱신범위: 분)	정확성 (오차율 %)	신속성 (갱신범위: 분)
07:01-07:05	07:20 현재	3.62	현재	1.21	현재
	07:25 현재	0.33	5분 후	0.11	5분 후
	07:30 현재	0.00	10분 후	-0.66	10분 후
07:06-07:10	07:25 현재	11.23	현재	1.19	현재
	07:30 현재	0.48	5분 후	1.19	5분 후
	07:35 현재	0.00	10분 후	1.14	10분 후
07:11-07:15	07:30 현재	20.90	현재	1.04	현재
	07:35 현재	9.59	5분 후	0.95	5분 후
	07:40 현재	0.00	10분 후	0.95	10분 후
07:16-07:20	07:35 현재	16.00	현재	0.38	현재
	07:40 현재	2.70	5분 후	0.15	5분 후
	07:45 현재	0.00	10분 후	0.15	10분 후
07:21-07:25	07:45 현재	8.61	현재	4.92	현재
	07:50 현재	0.00	5분 후	4.56	5분 후
	07:55 현재	0.00	10분 후	4.56	10분 후
07:26-07:30	07:50 현재	8.29	현재	2.21	현재
	07:55 현재	0.17	5분 후	0.21	5분 후
	08:00 현재	0.00	10분 후	0.21	10분 후
07:31-07:35	07:55 현재	7.37	현재	1.61	현재
	08:00 현재	0.61	5분 후	0.57	5분 후
	08:05 현재	0.00	10분 후	0.57	10분 후
07:36-07:40	08:00 현재	13.10	현재	5.91	현재
	08:05 현재	2.68	5분 후	1.84	5분 후
	08:10 현재	0.00	10분 후	0.87	10분 후
07:41-07:45	08:10 현재	8.03	현재	0.30	현재
	08:15 현재	0.69	5분 후	0.23	5분 후
	08:20 현재	0.00	10분 후	0.22	10분 후
07:46-07:50	08:15 현재	9.80	현재	0.81	현재
	08:20 현재	1.60	5분 후	0.00	5분 후
	08:25 현재	0.00	10분 후	0.00	10분 후
07:51-07:55	08:20 현재	9.89	현재	3.61	현재
	08:25 현재	1.18	5분 후	0.65	5분 후
	08:30 현재	0.00	10분 후	0.63	10분 후
07:56-08:00	08:25 현재	9.44	현재	2.31	현재
	08:30 현재	0.69	5분 후	1.77	5분 후
	08:35 현재	0.00	10분 후	0.73	10분 후



〈그림 6〉 비혼잡 시 On-Line 링크통행시간 대표값 추정(예)



〈그림 7〉 혼잡 시 On-Line 링크통행시간 대표값 추정(예)

림 7)과 같이 비 혼잡시 (07:11-07:15)와 혼잡시 (07:56-08:00)의 경우를 살펴보면 두 경우 모두 본 연구에서 제시한 추정방법의 결과가 현재시점에서 오차율(5% 이내)이 낮게 나타나는 결과를 보이고 있다.

따라서 혼잡 및 비 혼잡 시간대 모두 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용한 결과 통행시간 정보의 신속성과 정확성 측면에서 우수한 결과를 보이고 있다.

VI. 결론

기존의 구간검지시스템을 이용한 링크 통행시간 추정 및 예측 연구들은 도착시각 기준으로 수집되는 개별차량 통행시간 자료를 그대로 이용하고 있다. 그리고 일부 출발시각기준 통행시간 정보 연구들은 Off-Line 측면의 연구들이며, On-Line에 적용 가능한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 On-Line 출발시각기준 통행시간 정보의 개념을 정립하였다. 그리고 이에 따른 연구 시사점을 도출하였다. 또한, 베이지안 추론을 적용한 고속도로 중심의 출발시각기준 On-Line 링크통행시간 추정 알고리즘을 개발하였다.

그 결과, 본 연구에서 제시한 알고리즘은 통행시간 정보의 정확성과 신속성측면에서 추정 전보다 개선된 통행시간 대표값을 추정하는 것으로 나타났다. 그러나 출발시각기준의 On-Line 링크통행시간 추정알고리즘을 제시하기 위해서는 향후에 다음과 같은 내용을 고려해야 한다.

첫째, On-Line 추정방법으로 적용한 '베이지안 추론' 방법은 사전분포를 다양한 우도함수의 형태로 적용이 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 사전분포로 사용하기 위한 과거 이력자료의 적절한 통행시간 자료의량 및 다양한 교통상황에 적용하기 위한 사전분포 결정에 관한 연구가 필요하다.

둘째, 본 연구에서는 시간집계간격과 갱신간격의 관계에 대해 시간집계간격 \geq 갱신간격을 제시하였다. 그러나 통행시간의 시간집계간격과 갱신간격을 어떻게 설정하느냐에 따라 교통 혼잡 수준이 다르게 반영되기 때문에 On-Line 출발시각기준의 통행시간 추정 및 예측의 결과는 달라질 수 있다. 따라서 출발시각기준 On-line 상에서 시간집계간격과 갱신간격을 서로 달리 적용해보고 이를 최적화 할 필요성이 있다.

셋째, 본 연구는 출발시각기준 On-Line 상의 통행

시간 추정에 초점을 맞추었다. 그러나 운전자에게 통행시간 정보를 제공하기 위해서는 '출발시각기준에 의한 시간차집' 문제를 해결해야 한다. 즉, 현재 출발하는 운전자에게 정보를 제공하기 위해서는 예측과정을 거쳐야 한다. 이에 On-Line 측면의 링크통행시간 예측이 필요하다.

넷째, On-Line 상의 링크통행시간 추정 및 예측을 위한 적정 단위링크의 크기를 결정해야 한다. 단위링크 크기에 따라 혼잡수준이 다르게 반영되기 때문에 이에 따른 On-Line 상의 통행시간 추정 및 예측의 결과는 다를 수 있다. 그리고 이를 토대로 출발시각기준 On-Line 상의 적정 시간집계간격 및 갱신간격을 설정하여 통행시간정보의 질을 평가할 필요성이 있다.

참고문헌

1. 고승영(2001), "Optimal Numbers of Probe Cars Beacon-based Travel Time Data Collection System", WCTR Seoul.
2. 김영찬·김태용(2001), "검지자료합성을 통한 도시간선도로 실시간 통행시간 추정모형", 대한교통학회지, 제19권 제6호, 대한교통학회, pp.171~182.
3. 강정규·남궁성(2002), "고속도로 통행료 수납자료를 이용한 통행시간 예측모형 개발", 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.151~162.
4. 김병휘·백호유·박태용·오현숙·장인홍(2001), "베이지안 통계계산", 자유아카데미.
5. 문학룡·류승기·김성현·박현석(2003), "주행차량 자동인식시스템을 이용한 구간통행시간 산출", 한국ITS학회지, 제2권 제2호, 한국ITS학회, pp. 23-29.
6. 이청원·박지영(2001), "Determining the Optimal Number of Probe Vehicles for ATIS Applications in Urban Network", WCTR Seoul.
7. 이의은·김정현(2002), "시간차집현상을 고려한 장거리구간 통행시간 예측모형 개발" 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.51~61.
8. 이영인·이정희(2002), "교통정보제공을 위한 구간통행시간 산출 방법론 연구", 대한교통학회지, 제 20권 제3호, 대한교통학회, pp.55~67.
9. 이영우·임채문(2004), "GPS 수집자료를 이용한

- 링크통행시간 분포특성 분석”, 대한교통학회지, 제 22권 제5호, 대한교통학회, pp.8~17.
10. 오세창·김명하·백용현(2003), “차량검지기 교통량 데이터를 이용한 고속도로 통행시간 추정 및 예측모형 개발에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제 21권 제15호, 대한교통학회, pp.83~116.
 11. 유소영·노정현·박동주(2004), “통행시간 추정 및 예측을 위한 루프검지기 자료의 최적집계간격 결정”, 대한교통학회지, 제22권 제6호, 대한교통학회, pp.109~118.
 12. 장진환·백남철·김성현·변상철(2004), “AVI 자료를 이용한 동적 통행시간 예측”, 대한교통학회지, 제22권 제7호, 대한교통학회, pp.169~175.
 13. 정연식·최기주(2001), “GPS/DGPS Probe System을 이용한 실시간 링크통행시간 추정 알고리즘 개발”, 대한토목학회 논문집, 제21권 제1-D호, 대한토목학회, pp.1~12.
 14. 최기주·장정아(2004), “시계열기반의 GPS 프로브 자료의 이상치 제거 알고리즘 개발”, 대한교통학회지, 제 22권 제 6호, 대한교통학회, pp.67~75.
 15. 한국도로공사(2000), “ITS 기술개발 연구(IV) 고속도로 통행시간 예측시스템 개발”, 최종보고서.
 16. Boyce, D., J.Hicks, and A.K.Sen(1991), “In-vehicle Navigation System requirements for monitoring link Travel Times in a dynamic route guidance system. In: Presented at the 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.
 17. Boyce, D., N. Rouphail and A.Kirson(1993), “Estimation and Measurement of Link Travel Times in the ADVANCE Project”, IEEE-IEE Vehicle Navigation & Information Systems Conference, Ottawa, Canada, October 12-15, pp.62~66.
 18. Bruce, R. H. and L. Fu(1999), “Assessing Expected Accuracy of Probe Vehicle Travel Time Reports”, Journal of Transportation Engineering, pp.524~530.
 19. Bruce, R. H. and L. Fu(2002), “Reducing bias in probe-based arterial link travel time estimates”, Transportation Research Part C No.10 pp.257~273.
 20. Chen, M. and S.I.J. Chein(2000), “Determining the Number of Probe Vehicles for Freeway Travel time Estimation using Microscopic Simulation, Transportation Research.
 21. Dailey, D.J.(1993), “Travel Time Estimation using Cross-Correlation Techniques”, Transportation Research-Part B, Vol.27, No.2, pp.97~107.
 22. Dion, F. and Rakha(2003), “Estimating Spatial Travel Times using Automatic Vehicle Identification Data”, TRB 82th Annual meeting.
 23. Park, D., L.R. Rilett, B.Gagewski and C.H.Spiegelman(2001), “Identifying Optimal Data Aggregation Interval Sizes for Link and Corridor Travel Time Estimation and Forecasting”, Forth coming in Transportation Research Part A.
 24. Park, D., L.R. Rilett and P. Pattanamekar (2002), “Estimating Travel Time Summary Statistics of Larger Intervals from Smaller Intervals without Storing Individual Data”, Transportation Research Record 1804. pp.39~47.
 25. Riley, J.D(1999), “Evaluation of Travel time Estimates Derived from Automatic Vehicle Identification Tags in San Antonio, TX, Blacksburg, Virginia.
 26. Rilett, L.R. and D. Park (1999), “Direct Forecasting of Freeway Corridor Travel Time using Spectral Basis Neural Networks”, Transportation Research Board 79th Annual meeting.
 27. 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, pp.15~22.
 28. Sen, A., P. Thakuria, X. Zhu, and A.F. Karr (1997), “Frequency of Probe Vehicle Reports and Variance of Travel Time Estimates”, Journal of Transportation Engineering 123(4), pp.290~297.
 29. Turner, S.M. and D.J.Holdner(1995), “Probe

- vehicle Sample sizes for Real-time information:
The Houston Experience, IEEE VNIS Conference.
30. 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 System College Station, Texas.
31. Zhang, X. and J.A. Rice(2003), "Short-term travel time Prediction", Transportation Research Part C, No.11, pp.187~210.

✉ 주 작 성 자 : 김재진

✉ 교 신 저 자 : 박동주

✉ 논문투고일 : 2005. 12. 5

✉ 논문심사일 : 2006. 1. 18 (1차)

2006. 2. 27 (2차)

2006. 3. 8 (3차)

✉ 심사관정일 : 2006. 3. 8

✉ 반론접수기한 : 2006. 8. 31