

구간검지시스템을 이용한 출발 및 도착시각 기준 통행시간 비교 연구

- 연속류를 중심으로 -

A Comparative Study of Departure and Arrive based travel time using Probe Vehicle data

김재진

(한양대학교도시대학원 박사과정)

노정현

(한양대학교도시대학원 교수)

박동주

(서울시립대학교교통공학과 부교수)

Key Words : 구간검지시스템, 출발시각 기준, 도착시각 기준, 통행시간, On-Line

목 차

I. 서론

II. 기존연구 고찰

1. 구간 통행시간 및 대표값 산출 연구검토
2. 구간 통행시간 추정연구 검토

III. On-Line과 Off-Line 통행시간 정보개념 정립

1. 출발 및 도착시각 기준의 개념적 비교
2. On-Line과 Off-Line 통행시간 정보 개념 비교

IV. 출발 및 도착시각 기준 통행시간 정보의 실증적 비교

1. 출발 및 도착시각 기준의 통행시간 분포 비교
2. 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 차이 비교
3. On-Line 출발시각 기준 개념 적용상의 문제점

V. 결론

참고문헌

I. 서론

구간검지시스템(TCS, Beacon, AVI 등)은 '도로구간'의 교통정보를 제공하므로 ATIS 측면에서 지점검지 시스템(루프검지기 등)보다 유리한 장점을 가지고 있다. 또한, 구간검지시스템에 의해 수집되는 통행시간 정보는 개별차량의 검지기 통과시각(도착 시각)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 과거차량의 통행시간 정보가 아닌 현재 자신이 출발하고자 하는 시각에서의 통행시간 정보가 필요하다. 따라서 구간검지시스템을 통해

수집되는 과거 개별차량의 구간통행시간 정보는 도착시각 기준이 아닌 출발시각 기준으로 제공 되어야 한다.

기존의 통행시간 정보제공을 위한 통행시간 추정 및 예측 연구에서는 도착시각 기준의 일정 시간간격간격(time aggregation interval)¹⁾별 통행시간 대표값을 제공하고 있어 출발시각 기준의 연구를 체계적으로 접근하기 어려운 실정이다. 또한, 일부 출발시각 기준의 통행시간 정보관련 연구들(한국도로공사, 2000; 강정규, 남궁성, 2002; Park et. al, 2002 등)은 On-Line²⁾ 측면의 출발시각 기준 개념을 전혀 고려하지 못하고 있다.

이에 본 연구에서는 출발시각 기준 통행시간 정보의 개념을 정립하고 국내에서 운영 중인 고속도로 TCS³⁾ 자료를 이용하여 출발 및 도착시각 기준의 통행시간 대표값의 차이를 비교하고자 한다. 그리고 On-Line 출발시각 기준 통행시간 정보제공 상의 문제점을 제시하고자 한다.

II. 기존연구 고찰

1. 구간통행시간 및 대표값 산출 연구 검토

구간검지시스템의 개별차량 통행시간 산출은 통행시간 산출 구간의 시점과 종점에 구간검지기를 설치하고 개별차량의 종점검지기 통과시각에서 시점 검지기 통과시각의 차를 이용한 다.(SwRI, 1998; 한국도로공사, 2000; 강진기 외, 2001 등)

$$t_{AB} = t_B - t_{Ai} \quad (1)$$

t_{Ai} : 차량 i 가 시점검지기 A를 통과한 시각

t_B : 차량 i 가 종점검지기 B를 통과한 시각

t_{AB} : 차량의 구간통행시간

기존의 대표적인 구간검지시스템으로는 San Antonio의 TransGuide System을 들 수 있다. 이 시스템은 AVI(Automatic Vehicle Identification)를 이용하고 있으며, SwRI(1998)(South west Research Institute)에 의해 개발된 알고리즘을 통하여 개별차량의 구간통행시간을 산출하고 있다. 그러나 이 알고리즘은 AVI 자료가 가지고 있는 Sample 수의 부족 문제로 인해

1) 구간검지체계에서 수집된 개별차량 자료를 통행시간 추정 및 예측을 하기 위해 수집하는 일정한 시간간격으로 국내의 교통수집체계를 살펴보면 대체로 5분단위로 설정함.
2) 특정 출발시각에 출발한 차량들 중 현재시점까지 도착한 차량들의 실시간 통행시간 정보

3) TCS(Toll collection System): 고속도로 폐쇄구간의 출발 톨게이트 및 도착톨게이트 통과시각이 기록되는 통행료 수납 시스템으로 개별차량의 통행시간 데이터를 제공한다.

통행시간 추정의 정확도가 떨어지는 문제점을 가지고 있다.(Dion F and Rakha(2003)).

그리고 구간검지시스템에서 수집되는 개별차량 통행시간 자료는 시스템상의 오류 및 정상적으로 주행한 차량이 아닌 차량들에 대한 이상치 등이 포함되어 있다. 따라서 통행시간 패턴을 왜곡 시킬 수 있는 이상치를 제거해야 할 필요성이 있다.

<표 1> 기존 이상치 제거 알고리즘

구분	이상치 제거방법	이용자료
강진기외(2001)	신뢰구간 추출법 이용	AVI
한국도로공사(2000)	MAD (Median Absolute Devision)	TCS
SwRI(1998)	이전 집계시간대의 통행시간 대표값을 이용한 이상치 제거범위 결정	AVI

기존의 이상치 제거 연구로는 SwRI(1998) 알고리즘과 강진기 외(2001)의 연구 한국도로공사(2000)등의 연구가 있다. 이상치가 제거된 개별차량의 통행시간 자료는 특정시간집계간격 상 하나의 대표값으로 산출되어 통행시간 추정 및 예측을 목적으로 하는 모형에 이용된다. 그리고 특정 시간집계간격의 통행시간 대표값은 기존연구(SwRI, 1998; 한국도로공사, 2000; 강진기 외, 2001 등) 대부분이 평균값을 적용하였으며, 김남선 외(2000), 이의은, 김정현(2002)의 연구에서는 고속도로의 TCS 자료를 이용한 통행시간 예측모형을 개발하면서 최빈값을 적용하였다.

2. 구간통행시간 추정 연구 검토

1990년대 초반 미국의 시카고 지역에서 ADVANCE 프로젝트가 수행되면서 최근까지 구간검지체계(AVI)를 이용한 통행시간 추정 <표 2> 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 이들 연구들은 도착시각 기준의 On-Line, Off-Line⁴⁾의 통행시간 추정

<표 2> 기존 구간검지체계를 이용한 구간통행시간 추정연구 분류

연구영역	기준시각	연구분류	연구대상	이용자료	
구간검지 체계를 이용한 통행시간 추정연구	도착 시각 기준	On-Line	정연식, 최기주(2001) 김영찬, 김태용(2001) 등	연속류 단속류	GPS Probe+루프자료 AVI+루프자료
		Off-Line	Boyce, Hicks and Sen(1991)	연속류	AVI
			Boyce, et al(1993)	연속류	AVI
			Dailey(1993)	연속류	AVI
			Tarko and Rouphail(1993)	단속류	AVI
			Rakha and Van Aerde(1995)	연속류	AVI
			Sen, et al(1996)	연속류	AVI
			John D, Riley(1999)	연속류	AVI
			Dion and Rakha(2003)	연속류	AVI
			문학룡 외(2003) 등	단속류	AVI
출발 시각 기준	On-Line				
	Off-Line	Hellinga and Fu(1999)	단속류	AVI	
		Hellinga and Fu(2002)	연속류	AVI	
		Zietsman and Rilett(2000)	연속류	AVI	
		Park,et al(2002)	연속류	AVI	
		Eisele and Rilett(2002)	단속류	AVI	
		강정규, 남궁성(2002)	연속류	TCS	
		오세창 외(2003) 등	연속류	TCS	

4) 과거에 이미 모두 도착 완료한 차량들에 대한 과거 통행시간 정보

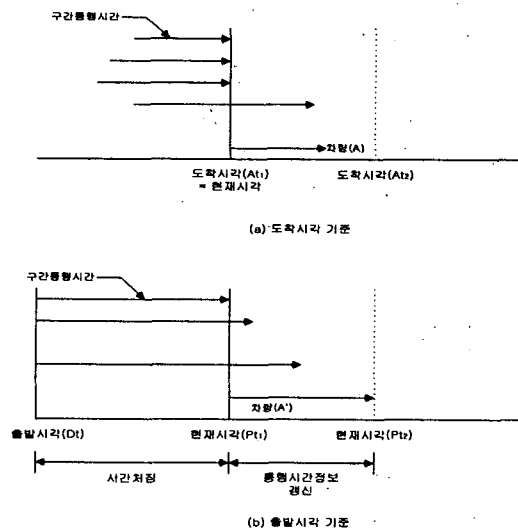
을 고려하였다.

반면에 국내외 일부 연구들에서는 구간검지체계 자료(AVI, TCS 등)를 이용하여 Off-Line 출발시각 기준의 통행시간 추정을 하였다.(예를 들면, Hellinga and Fu,1999; 2002 ; Zietsman and Rilett, 2000; Park et. al, 2002; 강정규, 남궁성, 2002; 오세창 외, 2003 등) 따라서 출발시각 기준 On-Line 측면 통행시간 추정 연구는 전무한 실정이다.

III. On-Line과 Off-Line 통행시간 정보개념 정립

1. 출발 및 도착시각 기준의 개념적 비교

도착시각 기준과 출발시각 기준 개념을 서로 비교하면 다음과 같이 설명할 수 있다.



<그림 1> 출발 및 도착시각 기준의 개념적 비교

<그림 1>의 도착시각 기준 (a)은 구간통행시간 산출의 기준이 특정 도착시각 A_{t_i} (현재시각)까지 들어온 차량들에 대해 통행시간을 산출한다. 즉, 동일한 도착시각을 갖는 차량들에 대해 서로 다른 출발시각이 대응된다. 따라서 도착시각 기준에 의해 산출된 통행시간 정보를 이용하는 차량(A)의 입장에서 자신이 출발하는 현재시각(A_{t_i})에서 통행시간 정보를 제공받기를 원하므로 도착시각 기준의 통행시간 정보는 교통정보로서의 의미가 적다고 할 수 있다.

출발시각 기준(b)은 도착시각 기준과는 반대로 동일한 출발시각을 갖는 차량들에 대해 서로 다른 도착시각이 대응된다. 즉, 현재시각에 출발하는 차량(A')와 과거에 동일 시간대에 출발한 차량들의 출발시각과 시간 차이가 발생한다. 그리고 동일한 시간대에 출발한 차량 중 현재시각(P_{t_1})까지 도착한 차량들에 대한 구간통행시간을 산출하게 되므로, 현재시각 기준이 바뀔 때($P_{t_1} \rightarrow P_{t_2}$)마다, 통행시간 정보의 갱신이 이루어짐을 알 수 있다.

2. On-Line과 Off-Line의 통행시간 정보의 개념비교

본 연구에서는 구간검지시스템의 두 지점 간 원시교통정보 예제<표 3>을 통하여 On-Line(실시간)과 Off-Line의 경우를 출발 및 도착시각 기준으로 구분하여 그 차이를 비교하고자 한다.(단, 통행시간 집계간격과 On-Line의 정보갱신간격)은 5분으로 가정한다.)

<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

그 결과, <표 4>의 Off-Line 구간통행시간 대표값 추정 결과를 살펴보면, 도착시각 기준의 시간집계간격과 출발시각 기

준의 시간집계간격이 다르게 나타난다. 그리고 <표 4>과 <표 5>의 도착시각 기준의 결과를 비교하면, On-Line과 Off-Line의 시간집계간격과 대표 통행시간 값이 같음을 알 수 있다.

그러나 출발시각 기준의 Off-Line(<표 4>)과 On-Line(<표 5>)을 비교하면 Off-Line의 [12:36-12:40]의 구간통행시간 대표값은 25분이지만, On-Line의 13:05분 현재 [12:36-12:40]의 구간통행시간 대표값은 23.12분으로 오차(1.87분)가 발생한다. 그리고 13:10분 현재 [12:36-12:40]의 구간통행시간 대표값은 [12:36-12:40]에 출발한 차량들이 13:10분까지 모두 중점검지기를 통과했으므로 Off-Line과 동일하게 25분을 나타내고 있다. 즉, On-Line의 개념에서는 현재시각이 갱신되면서(13:05→13:10) "통행시간 정보의 갱신"이 이루어진다. 그리고 최종적으로는 On-Line과 Off-Line의 통행시간 대표값이 동일해 짐을 알 수 있다.

<표 4> Off-Line 구간통행시간 평균 대표값 추정결과

구분 (Off-Line)	집계간격 (5분)	해당차량 번호	평균통행 시간(min)
도착시각 기준	[13:01-13:05]	11~22	24.8
	[13:06-13:10]	23~29	28.3
	[13:11-13:15]	30	31.0
출발시각 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 구간통행시간 평균 대표값 추정결과

구분 (On-Line)	현재시각 (갱신간격= 5분)	집계간격 (5분)	해당 차량 번호	평균통행 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

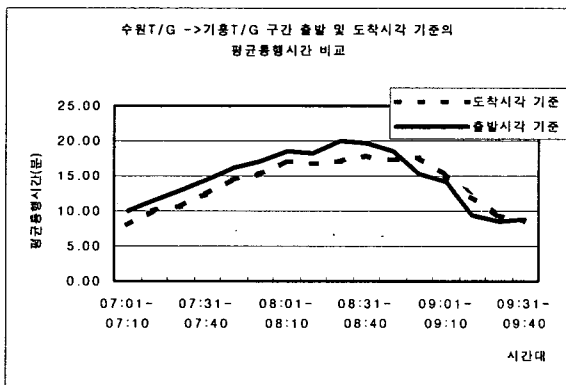
5) On-Line상의 추정된 구간통행시간 대표값을 갱신(upgrade)하는 시간간격

IV. 출발 및 도착시각 기준 통행시간 정보의 실증적 비교

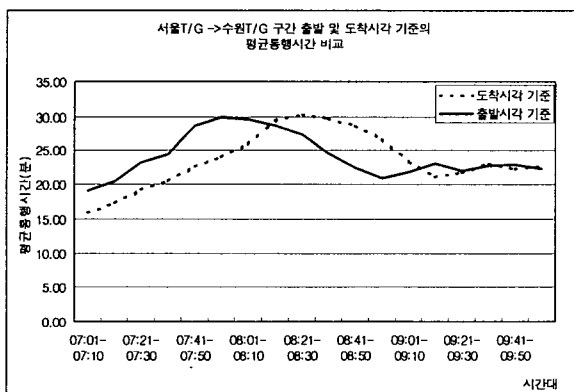
1. 출발 및 도착시각 기준의 통행시간 분포 비교

본 연구에서는 구간별 출발 및 도착시각 기준의 통행시간을 실증적으로 비교하기 위해 수원T/G→기흥T/G(4.9km), 서울T/G→수원T/G(9.6km), 서울T/G→기흥T/G(22.2km), 서울T/G→천안T/G(63.1km)에 대한 2004. 5. 10의 [07:00 - 10:00] 자료를 이용하였다. 그리고 톨게이트 구간별 출발 및 도착시각 기준의 통행시간 분포를 비교하기 위해 시간집계간격은 10분으로 설정하였다. 이상치 제거방법으로는 한국도로공사(2000)에서 TCS 자료에 적용한 중위 절대편차(MAD : Median Absolute Deviation)를 적용하였다.

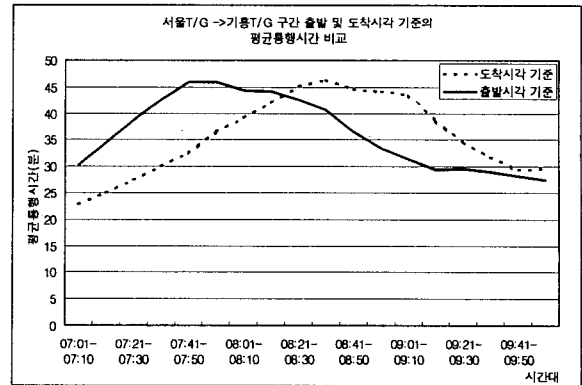
<그림 3> ~ <그림 6>은 각 톨게이트 구간별 출발 및 도착시각 기준의 시간집계간격별 평균통행시간 분포를 비교한 결과이다. 이에 출발시각 기준과 도착시각 기준의 구간통행시간 산출결과는 다르게 나타나며, 도착시각 기준의 경우 출발시각 기준에 비해 혼잡시간의 인지 및 해소가 늦어짐을 알 수 있다.



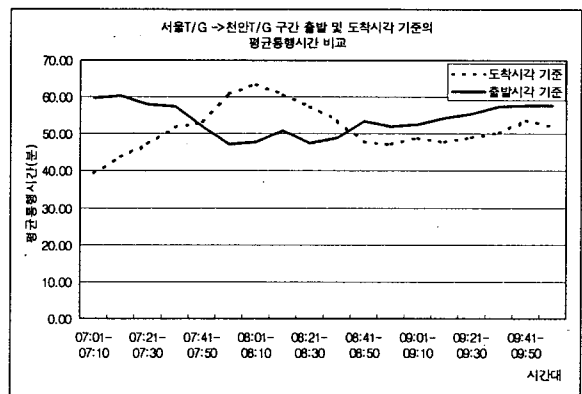
<그림 2> 수원T/G→기흥T/G(4.9km)구간 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 비교



<그림 3> 서울T/G→수원T/G(9.6km)구간 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 비교



<그림 4> 서울T/G→기흥T/G(22.2km)구간 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 비교



<그림 5> 서울T/G→천안T/G(63.1km)구간 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 비교

2. 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 차이 비교

앞에서 알 수 있듯이 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간차는 혼잡시간대가 비 혼잡시간대에 비해 큼을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 혼잡시간대 [07:00 - 09:00]의 톨게이트간 구간거리가 길어짐에 따라 출발시각 기준과 도착시각 기준에 의해 산출된 평균통행시간의 차이를 <표 10>과 같이 시간집계간격 별 평균 차와 분산계수(Coefficient of Variance)를 살펴보았다. 그 결과 톨게이트 간 구간거리가 길어 질수록 평균 차 및 C.V가 커짐을 알 수 있다.

$$CV = \frac{s_i^e}{\bar{X}_i^e} \quad (2)$$

s_i^e : 구간 1의 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 차의 평균

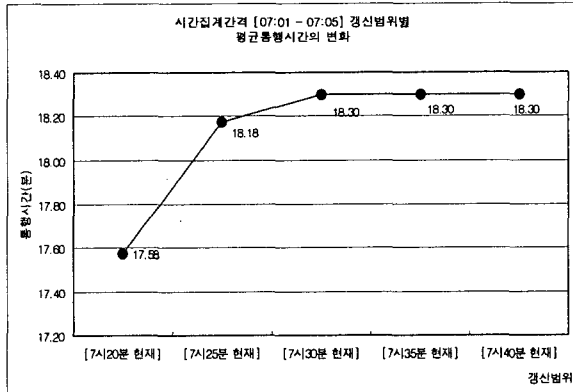
\bar{X}_i^e : 구간 1의 출발 및 도착시각 기준의 평균통행시간 차의 표준편차

3. On-Line 출발시각 기준 개념 적용상의 문제점

<그림 6>은 서울T/G → 수원T/G(9.6km)의 시간집계간격(5분) [07:01-07:05]에 출발한 차량들의 평균 통행시간 값을 On-Line 측면에서 갱신범위(6)별로 살펴본 것이다. 그림에서 알

6) 일정시간집계간격의 통행시간 대표값을 갱신하는 횟수

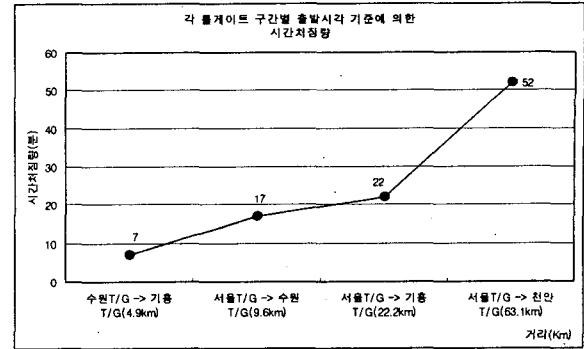
수 있듯이 [07:01-07:05]에 서울T/G를 출발한 차량들은 7:20부터 수원 T/G에 도착하므로 평균 17분정도의 시간차집7)이 발생함을 알 수 있다. 또한, 7:20분 이후에도 계속해서 차량들이 도착함으로 인해 모든 차량이 도착하는 7:30분까지 5분 단위 갱신범위별 평균 통행시간 값이 계속 변화함을 알 수 있다.



<그림 6>서울T/G→수원T/G(9.6km)의 갱신범위별 평균통행시간 변화(예)

따라서 On-Line 출발시각 기준의 평균통행시간 산출은 통행시간 정보의 질 측면에 있어서 통행시간 정보를 제공하기 위해 갱신범위(신속성)를 줄이면 정확성은 낮아지고 반대로 추정오차의 정확성을 높이기 위해 동일 시간대에 출발한 모든 차량이 모두 도착하기를 기다리면 갱신범위가 늘어나는 상충관계(Trade-off)를 보여주고 있다.

그리고 <그림 7>과 같이 톨게이트 간 구간거리별로 출발시각 기준에 의한 시간차집량을 살펴 본 결과 수원T/G → 기흥T/G(4.9km)인 경우는 평균 7분정도 차이가 나지만, 서울T/G → 천안T/G(64.1km)인 경우는 평균 52분이 발생함을 알 수 있다. 즉, 출발시각 기준에 의한 시간차집량도 구간거리가 길어질 수록 커짐을 알 수 있다.



<그림 7> On-Line 출발시각 기준에 의한 구간거리별 시간차집량 비교(예)

V. 결론

구간검지시스템에 수집되는 통행시간 자료는 도착시각 기준으로 수집되는 특성을 지니고 있다. 따라서 통행시간 정보제공을 위해서는 출발시각 기준으로 변환하여야 한다. 이에 본 연구에서는 출발 및 도착시각기준의 통행시간 정보 및 On-Line, Off-Line 개념을 정립하고 고속도로 TCS 자료를 이용하여 실증적으로 비교하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 도착시각 기준의 통행시간 정보는 출발시각 기준의 통행시간 정보에 비해 혼잡시간대 인지가 늦어짐을 알 수 있다. 둘째, 출발시각 기준과 도착시각 기준의 평균 통행시간 자료는 비 혼잡시간대 보다 혼잡시간대 일 수록 그 차이가 커지며, 또한 구간거리가 길어질 수록 그 차이가 더 커짐을 알 수 있다. 셋째, On-Line 출발시각 기준 측면에서에서는 “출발시각 기준에 의한 시간차집”이 발생하며, 이 또한 구간거리가 길어질 수록 증가함을 알 수 있다. 넷째, On-Line 출발시각 통행시간을 추정에 있어 통행시간의 신속성을 높이기 위해 갱신범위를 줄이면 정확성이 떨어지고 정확성을 높이기 위해 갱신범위를 늘리면 신속성이 떨어지는 상충관계임을 알 수 있다.

따라서 출발시각 기준의 통행시간 정보 제공과 관련된 연구에서는 이들을 고려한 구간검지체계 설계 및 운영 최적화가 필요하다.

<표 9> [07:00 - 09:00]의 구간별 출발 및 도착시각 기준 평균통행시간 차이 비교(Off-Line)

구분		수원T/G -> 기흥T/G(4.9km)	서울T/G -> 수원T/G(9.6km)	서울T/G -> 기흥T/G(22.2km)	서울T/G -> 천안T/G(63.1km)
시간집계간격10분	평균 차(분)	1.90	4.25	8.11	9.85
	표준편차	0.48	1.67	3.70	5.80
	C.V	0.25	0.39	0.46	0.59
시간집계간격5분	평균 차(분)	1.99	4.29	8.11	10.65
	표준편차	0.54	1.74	3.73	6.96
	C.V	0.27	0.41	0.46	0.65
시간집계간격4분	평균 차(분)	1.90	4.29	8.14	10.37
	표준편차	0.67	1.72	3.66	6.34
	C.V	0.35	0.40	0.45	0.61
시간집계간격3분	평균 차(분)	1.88	4.31	8.22	10.38
	표준편차	0.58	1.71	3.57	6.71
	C.V	0.31	0.40	0.43	0.65

7) 본 연구에서는 이를 “출발시각 기준에 의한 시간차집”이라 정의한다.

참고문헌

1. 한국도로공사(2000), " ITS 기술개발 연구(IV) 고속도로 통행시간 예측시스템 개발", 최종보고서.
2. 김남선, 이승환, 오영태(2000), " 신경망을 이용한 고속도로 여행시간 추정 및 예측모형 개발 ", 대한교통학회지, 제18권, 제1호, pp.47-59.
3. 강진기 외(2001), " 비매설식 자동차량인식장치를 이용한 구간교통정보 산출 방법 연구 ", 한국ITS학회논문지, 제1권, 제1호, pp.22-31.
4. 정연식, 최기주(2001), " GPS/DGPS Probe System을 이용한 실시간 링크통행시간 추정 알고리즘 개발 ", 대한토목학회 논문집, 제21권, 제1-D호, pp.1-12.
5. 김영찬, 김태용(2001), " 검지자료합성을 통한 도시간선도로 실시간 통행시간 추정모형 ", 대한교통학회지, 제19권, 제6호, pp.171-182.
6. 강정규, 남궁성(2002), " 고속도로 통행료 수납자료를 이용한 통행시간 예측모형 개발 ", 대한교통학회지, 제20권, 제4호, pp.151-162.
7. 이의은, 김정현(2002), " 시간차집현상을 고려한 장거리구간 통행시간 예측모형 개발" 대한교통학회지, 제20권, 제4호, pp.51-61.
8. 오세창 외(2003), "차량검지기 교통량 데이터를 이용한 고속도로 통행시간 추정 및 예측모형 개발에 관한 연구", 대한교통학회지, 제21권, 제15호, pp.83-116
9. 문학룡 외(2003), " 주행차량 자동인식시스템을 이용한 구간통행시간 산출", 한국ITS학회지, 제2권, 제2호, pp. 23-29.
10. Boyce, D., Hicks, J, Sen A.K.,(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.
11. 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.
12. Dailey, D.J.,(1993) " Travel Time Estimation using Cross-Correlation Techniques ", Transportation Research-Part B, Vol.27, No.2, pp.97-107.
13. Ashish Sen, Piyushimita Thakuriah, Xioquon Zhu, and Alan F.Karr (1996), "Frequency of Probe Vehicle Reports and Variance of Arterial Link Travel Time Estimates", NISS, Technical Report Number 54.
14. SwRI(1998), " Automatic Vehicle Identification Model Deployment Initiative - System Design Document. Report prepared for TransGuide, Texas Department of Transportation, Southwest Research Institute, San Antonio, TX.
15. John D. Riley(1999). " Evaluation of Travel Time Estimates Derived from Automatic Vehicle Identification Tags in San Antonio, TX, Blacksburg, Virginia.
16. Bruce R. Hellinga, Liping Fu(1999), "Assessing Expected Accuracy of Probe Vehicle Travel Time Reports", Journal of Transportation Engineering, pp.524-530.
17. Zietsman and 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.
18. Park, Rillett and Pattanamekar(2002), " Estimating Travel Time Summary Statistics of Larger Intervals from Smaller Intervals without Storing Individual Data", Transportation Research Record 1804, pp.39-47.
19. Eisele and Rilett(2002), " Estimating Corridor Travel Time Mean, Variance, and Covariance with Intelligent Transportation Systems Link Travel Time Data", Transportation Research Board 81th Annual meeting, Washigton D.C.
20. Bruce R. Hellinga, Liping Fu(2002), " Reducing bias in probe-based arterial link travel time estimates ", Transportation Research Part C No.10 pp.257-273.
21. Dion and Rakha(2003), " Estimating Spatial Travel Times using Automatic Vehicle Identification Data", TRB 82th Annual meeting.