

■ 論 文 ■

# 출발시각기준 링크통행시간 정보의 공간적 설계 (연속류를 중심으로)

Optimal Link Length Design for Departure Time-based Link Travel Time Information

**김 재 진**

(서울시립대학교 교통공학과 연구교수)

**노 정 현**

(한양대학교 도시대학원 교수)

**박 동 주**

(서울시립대학교 교통공학과 부교수)

**남 궁 성**

(한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원)

## 목 차

- |                                   |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|
| I. 서론                             | 정립                    |
| II. 기존연구 고찰                       | 3. 실시간 통행시간정보 제공방법 설정 |
| 1. 출발시각기준 통행시간 관련 연구 검토           | IV. 적용 및 결과분석         |
| 2. 출발시각기준 실시간 통행시간 추정             | 1. 자료구축 및 적용          |
| III. 출발시각기준 실시간 통행시간정보<br>제공방법 설정 | 2. 결과분석               |
| 1. 기본가정                           | VI. 결론                |
| 2. 실시간 통행시간정보 제공오차 개념             | 참고문헌                  |

Key Words : 구간검지체계, 출발시각기준, 통행시간, 베이저안 추론, 링크길이, AVI  
Spatial detection system, Departure time based, Travel time, Bayesian Inference, Link length, AVI

## 요 약

본 연구는 출발시각기준 실시간 통행시간 정보를 제공을 위한 공간적 설계의 적절성을 판단하는 것이다. 그리고 적정 링크길이를 평가하기 위해 실시간 통행시간 정보제공 오차를 정의하고, 기존의 방법보다 개선된 실시간 통행시간 제공방법을 제시하였다. 이를 연구대상에 적용한 결과, 첫째, 실시간 통행시간 정보제공을 위한 공간적 설계는 경로단위보다는 링크단위가 오차가 적은 것으로 나타났다. 둘째, 실시간 통행시간 정보 제공방법 비교에서는 기존방법보다 본 연구에서 제시한 방법(동적특성 반영)이 오차가 적은 것으로 나타났다. 그리고 셋째, 적정 링크길이는 약 4km가 적정한 것으로 나타났다.

결론적으로, 출발시각기준 실시간 통행시간 정보제공을 위한 공간적 설계는 동적특성을 반영한 링크단위로 적용하는 것이 효과적이다.

The objectives of this study are to develop an on-line departure time-based travel time estimation method and to determine an optimal link length for the estimation. This study developed a link-based rolling horizon logic as the travel time estimation method. In order to determine an optimal link length, the information error of the travel time provision from the user's perspective was defined and employed as a selection criterion. It was found that, when the travel time aggregation size was set as five minutes, a link length of four kilometers gave the most accurate result.

## 1. 서론

구간검지체계에서 수집되는 통행시간 자료는 과거 개별차량의 검지기 통과시간(도착시각기준)을 기준으로 수집되는 특성이 있다. 즉, 실제 통행시간 정보를 이용한 운전자 입장에서는 과거차량의 통행시간 정보가 아닌 현재 자신이 출발하고자 하는 시각(출발시각기준)에서의 통행시간 정보가 필요하다. 따라서 통행시간 추정 및 예측에 이용되는 통행시간 자료는 출발시각기준 자료이어야 한다<sup>1)</sup>. 또한 통행시간 추정 및 예측의 과정도 현재시점에서 실시간(on-line<sup>2)</sup>)으로 이루어져야 한다.

이에 기존연구들에서는 출발시각기준 통행시간 예측 방법들과 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정 알고리즘을 개발하였다. 그러나 출발시각기준 실시간 통행시간 정보의 정확성과 신속성(시간차짐)은 링크길이 설정에 영향을 받는다. 즉, 추정 및 예측의 공간적 대상이 되는 링크길이 설정에 따라 반영되는 교통혼잡 수준이 다르기 때문에 실시간 통행시간 정보의 정확성과 신속성은 달라질 수 있다.

기존의 통행시간 정보 제공 연구들은 지리적인 특징만으로 이미 설정되어 있는 링크길이를 이용하였다. 이에 링크길이 설정이 통행시간 정보 제공에 미치는 영향을 고려하지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는

출발시각기준 실시간 통행시간 정보제공을 위한 공간적 설계의 적절성을 판단하기 위해 미국 Texas, Houston의 일부 링크들의 AVI 통행시간 자료를 이용하였다. 그리고 적정 링크길이를 평가하기 위해 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공측면의 오차개념을 정립하였다. 또한 기존의 실시간 통행시간 정보 제공방법의 문제점을 지적하고, 개선된 출발시각기준 실시간 통행시간 제공방법을 제시하였다.

## II. 기존연구 고찰

### 1. 출발시각기준 통행시간 관련 연구 검토

구간검지체계에서 수집되는 통행시간 자료를 이용한 출발시각기준 통행시간 관련 연구들의 유형과 내용은 <표 1>과 같다. 국내 연구의 경우 김재진 외(2006a)는 구간검지체계에서 수집되는 통행시간 자료의 출발 및 도착시각기준 통행시간의 차이에 대한 이유와 원인을 규명하였다. 그리고 그 이외의 여러 연구들에서 통행시간 자료가 포함하고 있는 공간적 특성 때문에 발생하는 '시간차짐'문제를 해결하기 위해 고속도로 TCS 자료를 이용한 통행시간 예측모형의 예측력을 평가하였다.

국외 연구에서는 AVI 자료를 이용한 통행시간 추정

<표 1> 출발시각기준 통행시간 정보 관련 연구 분류

연구분류		내용	이용 자료	
off-line	통행 시간 예측	한국도로공사(2000)	· 출발시각 기준(Off-Line)데이터 변환 알고리즘 제시	TCS
		강정규·남궁성(2002)	· 장단거리 시간차짐 문제를 해결을 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	
	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
on-line	통행 시간 추정	김재진 외(2006b)	· 출발시각기준 on-line 링크통행시간 추정 알고리즘 개발	TCS

1) 예를 들어, 한국도로공사, 2000; 강정규·남궁성, 2002; 이의은·김정현, 2002; 오세창 외, 2003; 김재진 외, 2006a ; 2006b; Rilett and Park, 1999; Park et. al, 2001;2002; Zietsman and Rilett, 2000; Zhang and Rice, 2003 등.

2) 김재진 외.(2006b)에서는 특정 출발시각에 출발한 차량들 중 현재시점까지 도착한 차량들의 실시간 통행시간 정보로 정의하였음.

및 예측 연구들이 진행되어 왔으나, 이들 연구들은 AVI 자료의 단점인 표본 수 부족 해결을 위한 통행시간 추정 및 link/corridor 그리고 장·단기간에 따른 예측모형의 정확성을 평가하였다. 또한 자료수집을 위한 최적 시간 집계간격을 결정하여 방대한 자료저장 능력의 부담을 줄이고자 하였다. 그러나 이들은 과거 이력자료에 대한 (off-line<sup>3)</sup>) 측면의 출발시각기준 연구이다.

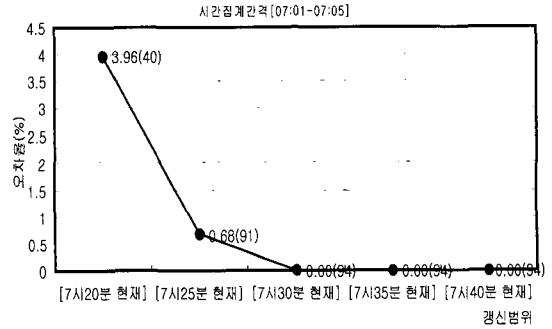
반면에, 김재진 외(2006b)는 기존의 출발시각기준 통행시간 정보 연구들이 실시간 측면의 연구가 아님을 지적하고, 출발시각기준 실시간 통행시간 정보의 개념을 정립하였다. 그리고 베이지안(Baysian Inference) 추론을 적용한 고속도로 중심의 출발시각기준 실시간 링크 통행시간 추정 알고리즘을 제시하였다.

따라서 기존 연구들을 살펴본 결과, 실시간 통행시간 추정과 예측연구들은 활발히 진행되어 왔다. 그러나 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공방법과 정보제공 차원에서 링크길이의 적절성을 판단하는 연구는 전무한 실정이다.

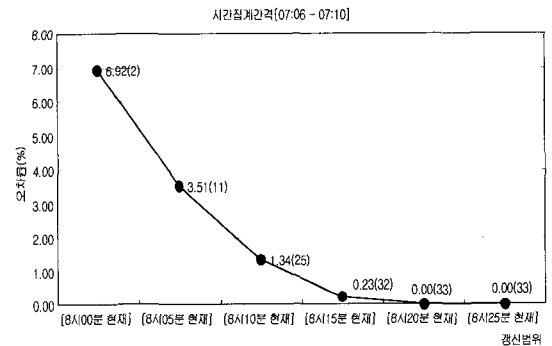
## 2. 출발시각기준 실시간 통행시간 추정

출발시각기준 실시간 통행시간 정보는 동일시간대에 출발한 차량들이 모두 도착해야 오차가 발생하지 않는다. 그러나 실질적으로 동일 출발시간대에 몇 대의 차량이 출발했는지 알 수 없으며, 현재까지 도착한 차량이 모두 도착한 한 것인지 이후에도 또 도착할 것인지는 알 수 없다. 이에 통행시간 추정단계가 필요하다. 예를 들어 <그림 1>은 서울T/G(Toll Gate) → 수원T/G(9.6km)의 구간에서 [07:01~07:05]에 출발한 차량들의 총 대수는 94대(실제 실시간 측면에서는 알 수 없음.) 중 현재 시각 07:20에 관측된 차량 수는 40대로 3.96%의 오차율이 발생한다. 그리고 현재 시각 07:30분에는 모든 차량이 도착 완료하여 오차율이 '0' 가된다.

그러나 [07:01~07:05]에 출발한 차량들은 07:20부터 수원T/G에 도착하기 시작하므로 약 15분 정도의 출발시각기준에 의한 '시간처짐' 이 발생한다. <그림 2>는 서울T/G → 천안T/G(63.1km)의 경우 [07:06~07:10]에 출발한 총 차량 수 32대 중 현재 시각 08:00에 2대의 차량이 도착하여 6.9%의 오차율을 나타낸다. 그리고 50



<그림 1> 서울T/G→수원T/G의 추정시점별 오차율 변화(예)



<그림 2> 서울T/G→천안T/G의 추정시점별 오차율 변화(예)

분 정도의 출발시각기준에 의한 '시간처짐'이 발생함을 알 수 있다. 즉, 출발시각기준 실시간 통행시간 추정에서는 '추정오차'와 '시간처짐'이 발생한다. 따라서 추정단계에서 산출된 통행시간을 운전자에게 제공하기 위해서는 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다.

출발시각기준 실시간 추정에서의 '추정오차'와 '시간처짐'은 링크길이 설정의 영향을 받는다. '추정오차'는 링크 길이가 작을수록 동일시간대에 출발한 차량들이 구간점 지기에서 검지되는 통행시간이 짧아지므로 링크 길이가 클 때 보다 상대적으로 많은 수의 표본수를 확보할 수 있다. 그리고 혼잡수준을 잘 반영하므로 '추정오차'가 적어진다. 또한, '시간처짐'의 경우는 앞의 예에서도 알 수 있듯이 링크길이가 크면, 커짐을 알 수 있다. 즉, 링크길이 설정에 따라 교통혼잡 수준이 다르게 반영되며, 관측되는 차량수도 달라지므로 실시간 통행시간 정보의 제공 결과는 다를 수 있다. 따라서 출발시각기준 실시간 통행

3) 김재진 외, (2006b)에서는 특정 출발시각에 출발하여 이미 모두 도착완료한 차량들에 대한 통행시간 정보로 정의하였음.  
 4) 동일한 출발시간대에 출발한 차량들 중 현재까지 도착한 차량들의 평균통행시간과 이들 차량이 모두 도착완료한 경우의 관측된 평균통행시간과의 차이

시간 정보를 제공하기 위한 적정 단위링크 길이를 설정할 필요성이 있다.

### III. 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공방법 설정

#### 1. 기본가정

과거 통행시간 이력자료(off-line)를 이용하여 <표 2>와 같이 실시간 상황에서의 링크 통행시간을 추정하였다 고 가정하자. 여기서 출발시각기준 실시간 상황에서는 현재시각에 출발한 차량들(시점 검지기에서 출발)이 언제 중점 검지기를 통과할지를 알 수 없으므로 실제 해당 링크의 통행시간 값을 알 수 없다.

이에 본 연구에서는 과거 통행시간 이력자료를 이용하여 출발시각기준 실시간 상황을 구현하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

첫째, 과거 통행시간 이력자료(off-line 통행시간 자료)의 일정시간대에 출발한 개별 차량들의 링크통행시간 자료를 이용하므로 실제 링크 통행시간 값을 알고 있다고 가정한다.(실제 링크통행시간 값은 이상치가 제거된 값임.)

둘째, 실시간 통행시간 추정 및 정보제공 방법에 이용되는 통행시간 자료의 시간집계간격<sup>5)</sup>과 갱신간격<sup>6)</sup>은 5분으로 설정한다.

셋째, 실시간 통행시간 추정 및 정보제공에 적용되는 통행시간 자료의 시간집계간격별 통행시간 대표값은 평균값으로 설정한다<sup>7)</sup>.

넷째, 현재시각에 제공되는 통행시간 값(대표값)은 현재시각과 가장 가까운 이전 출발시각기준 시간집계간격에 출발한 차량들 중 현재까지 도착 완료한 차량들을 대상으로 산출된 평균통행시간 값으로 한다.

#### 2. 실시간 통행시간 정보 제공오차 개념 정립

예를 들어, 통행시간 정보 제공자는 현재시각 6:15에 출발시각기준 시간집계간격 [6:15:00~6:19:59]에 출발한 차량들에 실제 평균 통행시간 값을 제공할 수 없다.

그러나 바로 이전 출발시각기준 시간집계간격인 [6:10:00~6:14:59]에 출발한 차량들 중 현재 6:15까지 도착 완료한 개별차량들의 관측 평균통행시간 값은 1.81분으로 이미 알고 있다. 따라서 본 연구의 네 번째 가정을 적용하여 [6:15:00~6:19:59]에 출발하는 차량들에게 1.81분의 통행시간 값을 제공한다. 즉,

<표 2> 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공 예

링크 크기	시간집계간격	정보제공 시점				
		6:05	6:10	6:15	6:20	6:25
2.5km	6:10:00-6:14:59		1.61	1.81	2.13	
	6:15:00-6:19:59			1.81	3.25	3.35
	6:20:00-6:24:59				3.25	3.93
	6:25:00-6:29:59					3.93
	6:30:00-6:34:59					
4.6km	6:15:00-6:19:00			3.98	4.32	4.28
	6:20:00-6:24:59				4.32	
	6:25:00-6:29:59					4.28
	6:30:00-6:34:59					
3.95km	6:15:00-6:19:00			2.32	2.52	2.50
	6:20:00-6:24:59				2.52	2.61
	6:25:00-6:29:59					2.61
	6:30:00-6:34:59					-

주) □은 각 정보제공시점에 제공된 평균통행시간 값임.

5) 구간검지체계에서 수집된 개별차량의 통행시간 자료를 통행시간 추정 및 예측에 적용하기 위해 수집하는 시간간격  
 6) 일정한 출발시각기준의 시간집계간격으로 수집되는 통행시간 자료 및 정보를 갱신하기 위한 시간간격  
 7) 구간검지체계에서 수집되는 통행시간 자료는 특정 시간집계간격 당 하나의 대표값으로 산출되어 통행시간 추정 및 예측을 목적으로 하는 모형에 이용된다. 기존의 대부분의 통행시간 추정 및 예측연구들은 통행시간 대표값으로 평균값을 적용하고 있으며, 김남선 외(2000), 이의은·김정현(2002)의 연구에서는 최빈값을 적용하였다.

{6:15:00~6:19:59}에 출발한 차량들의 실제 평균통행시간 값은 본 연구의 첫 번째 가정에 의해 현재시각 6:25의 3.35분이다. 따라서 실시간 링크통행시간 제공 값 1.81분과 1.54분의 오차가 발생한다. 이에 본 연구에서는 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공오차에 대해 식(1)과 같이 정의하였다.

$$E_{h_i}(t_j) = |TT_{h_i}^p - TT_{h_i-\epsilon}^v(t_j)| \quad (1)$$

여기서,  $TT_{h_i}^v$ 는 출발시각기준 시간집계간격  $h_i$ 에 출발한 차량들의 실제 경험하는 평균 통행시간 값으로 참값을 의미한다<sup>8)</sup>.  $TT_{h_i-\epsilon}^v(t_j)$ 는 현재시각( $t_j$ )에 제공된 통행시간 정보로 가장 최근에 갱신된 평균통행시간이다. 이 통행시간 정보는 현재시각과 가장 가까운 과거 인접 출발시간대(현재시각과  $\epsilon$ 만큼의 시간차집이 발생)에 출발한 차량들 중 현재시점까지 도착완료 한 차량들의 통행시간 정보를 갱신한 것이다<sup>9)</sup>.

### 3. 실시간 통행시간 정보 제공방법 설정

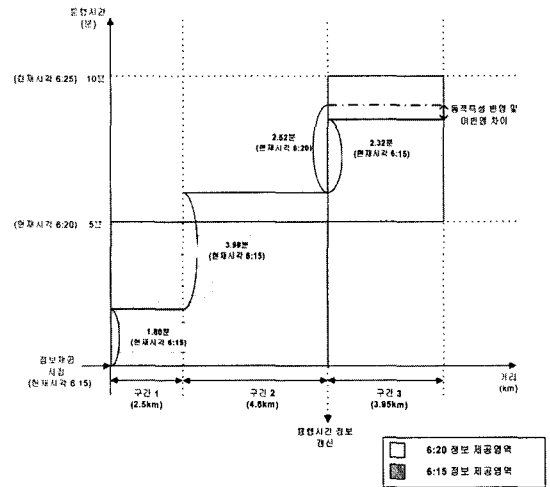
현재 한국도로공사 FTMS(Freeway Traffic Management System)는 지점검지기에서 수집된 교통자료를 이용하여 <표 2>와 같은 방법으로 링크단위<sup>10)</sup>의 실시간 통행시간 정보를 제공하고 있다. 여기서 특정 출발시각에 출발한 차량이 처음 제공받는 통행시간 정보는 출발시점에서의 통행시간 정보이다. 그러나 차량이 주행하면서 일정시간이 흐르고 나면 출발시점이 아닌 현재 시점에서 갱신된 통행시간 정보를 제공해야 한다. 즉, <표 2>의 기존 방식은 이를 반영하지 못하는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 특정 출발시각에 출발한 차량들의 경우 일정시간 동안 주행함에 따라 출발 당시의 통행시간 정보가 아닌 주행 중인 현재시점에서 가장 최근에 갱신된 통행시간 정보를 제공하는 것을 '동적특성 반영' 방법이라 정의하였다. 예를 들어, <표 2>와 같이 각각의 통행시간 정보제공 시점에 제공된 평균 통행시간 값들을 가지고 링크단위의 FTMS 방법과 동적특성 반영

<표 3> 출발시각기준 실시간 통행시간 제공방법 비교(예)

현재 시각	링크별 평균 통행시간 제공 값(분)			FTMS (분)	동적 특성 (분)	차이 (분)
	2.5km	4.6km	3.95km			
6:15 (정보 제공 시점)	1.81	3.98	2.32	8.11	8.31	0.20
6:20	3.25	4.32	2.52	10.09	10.18	0.09
6:25	3.93	4.28	2.61	-	-	-

주) □는 동적특성 반영에서의 통행시간 제공 값임.



<그림 6> 링크단위의 실시간 동적특성 반영 개념도

방법을 비교하면 <표 3>과 같다.

FTMS 방법에 의하면, 06:15 현재 2.5km 구간에는 1.81분, 4.6km 구간에는 3.98분, 3.95km 구간에는 2.32분이 제공된다. 그러나 현재시각 06:15에 출발한 차량들이 2.5km 구간과 4.6km 구간을 통과하는데 걸리는 통행시간은 5.79분(1.81분+3.98분)이다. 즉, 차량이 3.95km 구간을 진입했을 때는 이미 앞의 두 구간을 지나오면서 걸린 통행시간이 갱신간격(5분)보다 커지므로 통행시간 정보제공 값도 갱신해서 제공해야 한다.

따라서 차량이 3.95km 구간에 진입했을 때, 통행시간 정보 제공 값은 06:15에 관측된 2.32분을 주는 것이 아니라 현재시각 06:20에 3.95km 구간에 대해서 갱신된 통행시간정보 2.52분을 제공해야 한다.

8) 동일한 출발시각기준에 출발한 차량들이 모두 도착완료 했을 때, 산출되는 평균통행시간 값을 의미함. 본 연구에서는 과거 통행시간 이력자료를 이용하므로 이미 알고 있다고 가정함.  
 9) 현재 출발하는 차량이 앞으로 통행시간이 얼마나 걸리는지는 알 수 없음. 따라서 현재 출발하는 차량에게 제공되는 통행시간 정보는 현재시각과 가장 가까운 과거에 출발한 차량들 중 현재까지 도착완료 해서 관측되는 차량들의 평균통행시간을 제공함. 이 값은 계속해서 갱신됨.  
 10) 하나의 경로를 두 개 이상의 검지기를 설치하여 각 링크의 평균통행시간 제공 값을 합하여 경로의 평균통행시간 값을 제공 함.

〈그림 3〉은 〈표 3〉의 결과를 토대로 동적특성을 반영한 링크단위의 실시간 통행시간 정보제공에 대한 개념도를 나타낸 것이다.

### IV. 적용 및 결과분석

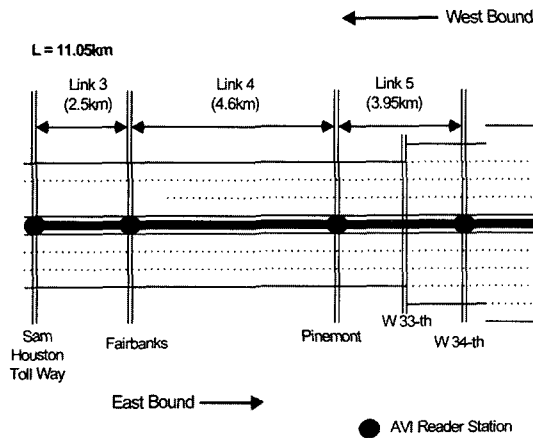
#### 1. 자료구축 및 적용

앞에서 언급한 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공오차와 제공 방법을 적용하기 위한 연구대상은 〈그림 4〉와 같이 미국 Texas, Houston에 위치한 US-290(6 차로) 도시 고속도로이다.

분석에 사용된 AVI 통행시간 자료는 1997년 5월 평일(5일, 12일)의 US-290에 설치된 4개의 AVI reader station(3개 구간: link 3(2.5km), link 4(4.6km), link 5(3.95km))에서 수집된 자료이다. 그리고 실시간 측면에서의 이상치(outlier) 제거방법은 식(2), 식(3)과 같이 한국도로공사(2000)에서 이상치 제거방법으로 적용한 중위절대편차(MAD: Median Absolute Deviation)를 이용하였다.

$$MAD = 1.4826 \times median \| T_{h_i}^p(t_j) - T_{h_i}(t_j)_{med} \| \quad (2)$$

$$Z_i(t_j)_{med} = \frac{T_{h_i}^p(t_j) - T_{h_i}(t_j)_{med}}{MAD} \quad (3)$$



〈그림 4〉 연구대상 : US-290 Houston, Texas

여기서,  $T_{h_i}^p(t_j)$  : i번째 시간집계간격 h에 대한 j번째 추정시점에서 p번째 차량의 통행시간(분)

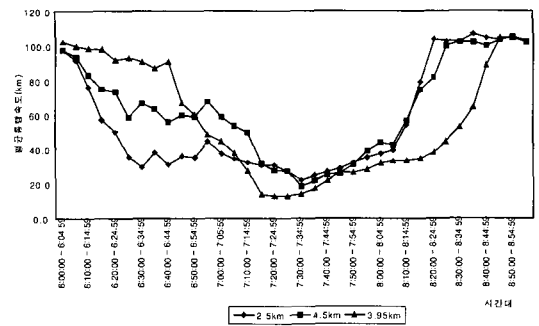
$T_{h_i}(t_j)_{med}$  : i번째 시간집계간격 h에 대한 j번째 추정시점에서 통행시간 중앙값(분)

1.4826 : MAD를 정규분포에 대한 표준편차와 같도록 만들어 주는 수정계수(correction factor)

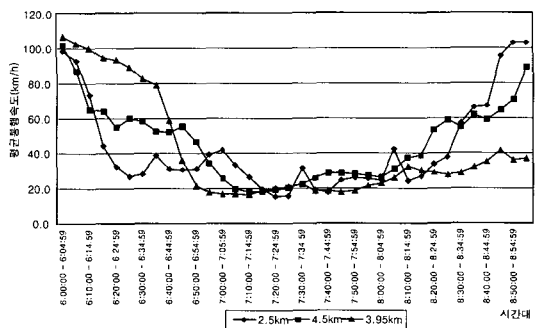
여기서,  $|Z_i(t_j)_{med}| > Z_{cut}$ 이면 이상치로 판단된다. ( $Z_{cut} = 3$ )

통행시간 자료 사용 시간대는 〈그림 5〉, 〈그림 6〉에서도 나타나듯이 혼잡이 가장 심한 [07:00 - 08:00]로 설정하였다.

출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공에 있어 적정 링크길이를 제시하기 위해 우선 경로단위<sup>11)</sup>(corridor/

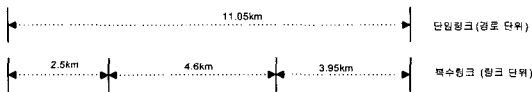


〈그림 5〉 (06:00~09:00)의 평균통행속도 분포(5.5일 자료)



〈그림 6〉 (06:00~09:00)의 평균 통행속도 분포(5.12일 자료)

11) 하나의 경로에 대해 여러 링크로 구분하지 않고 동일한 출발시각에 출발하는 차량들의 시점에서 최종도착시점까지의 평균통행시간 값을 제공함.



〈그림 7〉 통행시간 제공오차 분석을 위한 case 구분

route)와 링크단위로 구분하여 분석하였다. 이에 본 연구에서는 〈그림 7〉과 같이 전체 11.05km 구간을 하나의 링크로 보는 경우(경로단위)와 3개의 복수링크(링크단위: 2.5km, 4.6km, 3.95km)로 구분하였다. 그리고 출발시각기준 실시간 통행시간 정보제공 오차를 비교하였다.

또한, 링크단위의 경우에는 본 연구에서 제시한 '동적 특성 반영' 방법과 FTMS 방법을 적용하여 실시간 통행시간 정보 제공오차를 비교하였다.

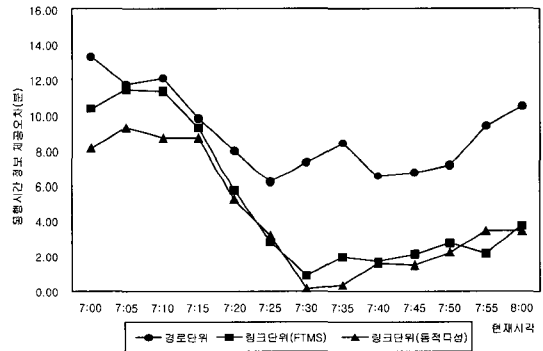
## 2. 결과분석

〈표 4〉와 〈그림 8〉은 경로단위와 링크단위(동적특성 미반영)에 대해 출발시각기준 실시간 통행시간 정보

제공오차를 비교한 결과이다. 이를 살펴보면, 경로단위보다 링크단위의 통행시간 정보 제공오차가 더 적게 나타남을 알 수 있다. 그리고 〈표 5〉에서 알 수 있듯이 링크단위의 경우에서도 기존의 FTMS 방법보다 본 연구에서 제시한 '동적특성을 반영' 방법이 오차가 더 적게 나타났다.

따라서 출발시각기준 실시간 통행시간 정보를 제공하기 위해서는 경로단위보다는 동적특성을 반영한 링크단위의 통행시간 정보제공이 이루어져야 한다. 이는 기존의 출발시각기준 측면의 연구에서 제시한 결과와 다르게 나타났다.<sup>12)</sup>

그러나 이 결과는 김재진 외(2006b)에서 제시한 출발시각기준 실시간 링크 통행시간 추정방법인 베이저안 추정을 적용하지 않은 결과이다. 이에 본 연구에서는 동적특성을 반영한 링크단위 통행시간 정보제공에 대해 김재진 외 (2006b)에서 제시한 베이저안 추론(Baysian Inference)방법을 적용하였다. 이 방법은 사전정보(prior information: historical information)의 개별 차량들의 통행시간 값과 추가정보(동일시간대에 출발한 차량들 중



〈그림 8〉 경로 및링크단위 통행시간 정보 제공오차 비교

〈표 4〉 링크 및 경로단위 실시간 통행시간 정보제공 오차 비교

현재 시각	링크단위						경로단위	오차(분)			
	각 링크별 평균 통행시간(분)			각 링크별 실제 평균 통행시간(분)			구간 평균 통행 시간 (분)	구간 평균통행 시간(분)	실제구간 평균 통행 시간(분)	링크 단위 (분)	경로 단위 (분)
	2.5km	4.6km	3.95km	2.5km	4.6km	3.95km	11.05km	11.05km	11.05km		
7:00	4.50	4.74	6.20	4.36	8.12	13.38	15.44	12.50	25.86	10.42	13.36
7:05	4.16	5.40	8.48	3.56	11.68	14.28	18.04	17.75	29.52	11.48	11.77
7:10	3.60	7.13	10.62	4.56	13.98	14.19	21.35	20.61	32.73	11.38	12.12
7:15	4.04	9.27	13.21	6.61	15.04	14.19	26.52	25.98	35.84	9.32	9.86
7:20	4.35	11.68	13.77	7.55	15.41	12.60	29.80	27.56	35.56	5.76	8.00
7:25	5.49	12.82	14.28	8.98	14.60	11.84	32.59	29.23	35.42	2.83	6.19
7:30	7.38	13.87	14.19	9.64	13.40	11.48	35.45	27.14	34.52	0.92	7.38
7:35	7.44	15.04	12.87	9.64	12.13	11.63	35.36	24.92	33.40	1.96	8.48
7:40	9.22	15.39	11.94	11.12	10.82	12.90	36.54	28.25	34.84	1.70	6.59
7:45	9.64	13.25	10.91	8.57	10.82	12.33	33.81	38.53	31.71	2.09	6.81
7:50	9.64	12.37	10.77	7.77	9.56	12.69	32.78	37.24	30.02	2.75	7.22
7:55	8.57	10.82	11.19	5.62	10.12	12.69	30.58	37.85	28.42	2.15	9.42
8:00	8.33	10.82	11.78	6.03	9.88	11.25	30.93	37.70	27.16	3.77	10.54

12) 강정규·남궁성.(2002)는 링크단위의 통행시간 예측은 모든 O/D간 예측을 수행하여야 하는 경우 연산량이 있어서는 효율적이나, 각 링크에서의 오차 누적으로 인해 예측의 정확도가 떨어짐으로 경로단위의 통행시간 예측을 수행하였다.

〈표 5〉 링크단위의 실시간 통행시간 정보 제공오차 비교결과

현재 시각	FTMS에 의한 링크 별 평균통행시간 (분)			동적특성 반영에 의한 링크 별 평균통행시간 (분)			링크별 실제 평균 통행시간(분)			구간 전체 평균 통행시간 (분)		실제 구간 평균 통행 시간(분)	오차 (분)	
	2.5km	4.6km	3.95km	2.5km	4.6km	3.95km	2.5k m	4.6k m	3.95k m	FTMS	동적 특성		FTMS	동적 특성
7:00	4.50	4.74	6.20	4.50	4.74	8.48	4.36	8.12	13.38	15.44	17.72	25.86	10.42	8.14
7:05	4.16	5.40	8.48	4.16	5.40	10.62	3.56	11.68	14.28	18.04	20.18	29.52	11.48	9.34
7:10	3.60	7.13	10.62	3.60	7.13	13.21	4.56	13.98	14.19	21.35	23.94	32.73	11.38	8.79
7:15	4.04	9.27	13.21	4.04	9.27	13.77	6.61	15.04	14.19	26.52	27.08	35.84	9.32	8.76
7:20	4.35	11.68	13.77	4.35	11.68	14.28	7.55	15.41	12.60	29.80	30.31	35.56	5.76	5.25
7:25	5.49	12.82	14.28	5.49	13.87	12.87	8.98	14.60	11.84	32.59	32.24	35.42	2.83	3.19
7:30	7.38	13.87	14.19	7.38	15.04	11.94	9.64	13.40	11.48	35.45	34.36	34.52	0.92	0.16
7:35	7.44	15.04	12.87	7.44	15.39	10.91	9.64	12.13	11.63	35.36	33.74	33.40	1.96	0.34
7:40	9.22	15.39	11.94	9.22	13.25	10.77	11.12	10.82	12.90	36.54	33.24	34.84	1.70	1.60
7:45	9.64	13.25	10.91	9.64	12.37	11.19	8.57	10.82	12.33	33.81	33.20	31.71	2.09	1.48
7:50	9.64	12.37	10.77	9.64	10.82	11.78	7.77	9.56	12.69	32.78	32.24	30.02	2.75	2.22
7:55	8.57	10.82	11.19	8.57	10.82	12.49	5.62	10.12	12.69	30.58	31.88	28.42	2.15	3.45
8:00	8.33	10.82	11.78	8.33	9.56	12.69	6.03	9.88	11.25	30.93	30.58	27.16	3.77	3.42

현재까지 도착한 개별차량들의 통행시간 정보)를 이용하여 사후정보(posterior information: estimation information) 즉, 추정시점(현재시각)에서의 평균통행시간을 추정한다. 사전정보는 과거이력자료에서 동일 출발 시간대에 출발한 차량들의 통행시간( $x_1^o, x_2^o, x_3^o, \dots, x_i^o$ )의 사전확률( $P(x_i^o)$ )이다. 그리고 추가로 관측된 자료( $\theta$ )가 주어지면,  $x_i^o$ 의 사후확률( $P(x_i^o|\theta)$ ) 추정 식은 식(4)와 같다.

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

그리고 일반적으로 베이시안 추론을 적용하기 위해서는 사전분포를 정의해야 한다. 베이시안 추론에서는 사전정보에 대한 분포반영을 우도함수( $l(\theta)$ )로 나타낸다(김병휘 외, 2001). 이와 관련해서 기존의 통행시간 추정연구(Sen et.al, 1997<sup>13</sup>);Shrinivasan and Jovanis, 1996<sup>14</sup>); 김재진 외 2006b 등)에서는 우도함수의 형태를 정규분포(normal distribution)으로 가정하였다. 이에 본 연구에서는 출발시각기준 실시간 통행시간 추정을 위한 사전분포를 정규분포로 가정하였으며, 이에 대한 사후확률( $P(x_i^o|\theta)$ )과 우도함수( $l(\theta)$ )와의 관계는 식(5), 식(6)과 같다.

$$l(\theta) \propto \exp\left[-\frac{n}{2\sigma^2}(M-\bar{x})^2\right] \quad (5)$$

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

$$P((x_i^o)|\theta) \propto \frac{P(x_i^o) \times \exp\left[-\frac{n}{2\sigma^2}(M-\bar{x})^2\right]}{\sum (P(x_i^o) \times \exp\left[-\frac{n}{2\sigma^2}(M-\bar{x})^2\right])} \quad (6)$$

그리고 이를 이용하여 사후 추정된 통행시간 대표값( $\bar{x}$ )는 식(7)과 같다.

$$\bar{x} = \sum x_i^o \cdot P((x_i^o)|\theta) \quad (7)$$

베이시안 추정방법을 적용하기 위해 사전정보로 1997년 5월 5일(평일) [07:00-08:00]의 통행시간 자료를 이용하였으며, 5월12일 [07:00-08:00]의 각 출발시각기준 시간집계간격별 실시간 링크통행시간을 추정하였다.

그리고 이를 링크단위 '동적특성 반영' 방법에서 베이시안 추정을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우의 오차를 비교하였다. 그 결과, 〈표 6〉과 〈그림 9〉에서도 나타나듯이 베이시안 추정을 적용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 실시간 통행시간 정보 제공오차가 적은 것으로 나타났다.

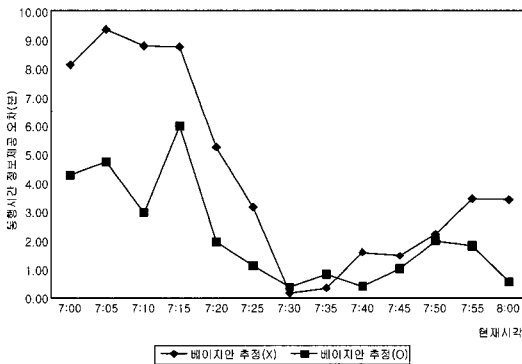
13) 이 연구에서는 DRGS(Dynamic Route Guidance System)의 도착시각 기준 통행시간 추정을 위해 베이시안 기법을 적용하였다.

14) 이 연구에서는 고속도로와 간선도로의 통행시간 분포는 모두 정규분포로 가정함으로써 보다 적은수의 프로브 차량대수를 얻을 수 있었음.



〈표 6〉 베이지안 추정 적용에 의한 실시간 통행시간 정보제공 결과(링크단위 동적특성 반영)

현재 시간	각 링크별 평균 통행시간 제공 값(분)			각 링크별 실제 평균 통행시간(분)			각 링크별 오차(분)			평균 구간 통행시간 제공 값(분)	실제 구간 평균 통행시간(분)	오차(분)
	2.5km	4.6km	3.95km	2.5km	4.6km	3.95km	2.5km	4.6km	3.95km			
7:00	4.36	5.57	11.51	4.36	8.12	13.38	0.00	2.55	1.87	21.55	25.86	4.31
7:05	3.56	7.84	11.62	3.56	11.68	14.28	0.00	3.84	2.66	24.78	29.52	4.74
7:10	4.49	11.07	13.38	4.56	13.98	14.19	0.07	2.91	0.81	29.74	32.73	2.99
7:15	4.51	11.07	14.18	6.61	15.04	14.19	2.10	3.97	0.01	29.86	35.84	5.98
7:20	6.31	13.67	14.28	7.55	15.41	12.60	1.24	1.74	1.68	33.62	35.56	1.94
7:25	7.42	14.71	14.19	8.98	14.60	11.84	1.56	0.11	2.35	34.31	35.42	1.11
7:30	7.55	15.04	12.60	9.64	13.40	11.48	2.09	1.64	1.12	34.12	34.52	0.40
7:35	9.64	15.38	11.85	9.64	12.13	11.63	0.00	3.25	0.22	34.22	33.40	0.82
7:40	9.64	13.40	11.19	11.12	10.82	12.90	1.48	2.58	1.71	34.41	34.84	0.43
7:45	9.64	12.12	11.18	8.57	10.82	12.33	1.07	1.30	1.15	32.76	31.71	1.04
7:50	8.57	10.82	12.65	7.77	9.56	12.69	0.80	1.26	0.04	32.01	30.02	1.99
7:55	7.99	10.82	12.30	5.62	10.12	12.69	2.37	0.70	0.39	30.25	28.42	1.82
8:00	5.62	9.56	12.62	6.03	9.88	11.25	0.41	0.32	1.37	26.58	27.16	0.58



〈그림 9〉 베이지안 추정 적용결과 비교(링크단위 동적특성)

이 결과를 토대로 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공을 위한 적정 링크길이를 결정하기 위한 평가지표는 MAE(Mean Absolute Error)와 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 적용하였다. MAE와 MAPE의 산출 식은 식(8)과 식(9)이다.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |TT_{h_i}^o - TT_{h_i-\epsilon}^e(t_j)|}{N} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{TT_{h_i}^o - TT_{h_i-\epsilon}^e(t_j)}{TT_{h_i}^o} \right| \times 100}{N} \quad (9)$$

그 결과, 〈표 7〉에서 알 수 있듯이 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공을 위한 적정 링크길이는 베이지

안 추정방법 적용 유무 경우 모두 3.95km(약4km)일때 MAE는 1.51과 1.01 그리고 MAPE는 11.16, 9.34로 최적 링크길이로 결정되었다.

〈표 7〉 각 링크별 MAE와 MAPE 산출결과

구분	링크길이	MAE(분)	MAPE(%)
베이지안 추정(X)	2.5km	1.96	27.06
	4.6km	2.92	23.95
	3.95km	1.51	11.66
베이지안 추정(O)	2.5km	1.18	13.37
	4.6km	2.01	17.06
	3.95km	1.01	9.34

## V. 결론

본 연구의 의의는 주행하는 차량들에게 출발시각기준 실시간 통행시간 정보를 제공함에 있어 실시간 통행시간 정보 제공방법론과 공간적 설계기준을 제시하는 것이다. 이에 실시간 통행시간 정보제공을 위한 적정 링크길이를 결정하고자 하였다. 이를 평가하기 위해 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공오차의 개념을 정립하였다. 또한, 동적특성을 반영한 출발시각기준 실시간 통행시간 제공방법을 제시하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공오차를 경로단위와 링크단위로 적용한 결과 링크단위가 경로단위에 비해 오차가 적게 나타나는 결과를 얻었다. 따라서 출발시각기준 실시간 통행시간 정보를 제공함에 있어

대상도로 구간을 하나의 경로단위로 설정하는 것보다 링크단위로 설정하는 것이 더 나은 것으로 나타났다.

둘째, 링크단위에서도 기존의 FTMS(동적특성 미반영)방법보다 본 연구에서 제시한 '동적특성을 반영한 경우의 오차가 더 적게 나타났다.

셋째, '동적특성을 반영'한 링크단위의 통행시간 정보 제공의 경우도 베이지안 추정방법을 적용한 결과 통행시간 제공오차가 훨씬 적어짐을 알 수 있었다. 그리고 실시간 통행시간 정보제공을 위한 적정 링크길이로는 베이지안 추정방법의 적용유무에 관계없이 3.95km(약4km)가 적정한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구의 결과는 통행시간 정보제공 관련기관 및 시스템 운영자가 실시간 통행시간 정보를 제공할 때, 통행시간 정보의 질을 판단할 수 있는 기준으로 활용이 가능하다.

그러나 본 연구는 다음과 같은 한계가 있다.

첫째, 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공오차에 영향을 미치는 시간집계간격과 갭시간격의 변화에 따른 링크길이와 혼잡수준과의 관계에 대해서 연구가 미흡하였다. 즉, 출발시각기준 실시간 통행시간 정보 제공오차가 시간집계간격과 갭시간격에 따라 어떻게 변화하며, 이를 토대로 링크길이와 혼잡수준과의 관계를 살펴볼 필요성이 있다.

둘째, 본 연구에서 이용한 AVI 통행시간 자료는 AVI tag를 장착한 차량들만을 대상으로 통행시간 자료가 수집되므로 대상구간 전체 차량들의 통행시간 모집단을 알 수 없다. 따라서 향후 연구에서는 출발시각기준 실시간 통행시간 추정 및 정보제공에 있어서의 적정 표본 수를 결정하는 연구도 필요하다.

셋째, 출발시각기준 실시간 링크통행시간 추정방법으로 적용한 '베이지안 추론'방법은 사전분포를 다양한 유도함수의 형태로 적용이 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 사전분포로 이용하기 위한 과거 이력자료의 적정한 통행시간 자료의 량 및 다양한 교통상황에 적용하기 위한 사전분포에 관한 연구가 필요하다.

넷째, 본 연구를 현실적으로 활용하기 위해서는 통행시간 정보 제공시점에서의 통행시간 예측방법의 개발이 필요하다. 통행시간 정보 제공오차는 근본적으로 출발시각기준 실시간 상에서의 '추정오차'와 '시간처짐'에 의해 결정된다고 할 수 있다. '추정오차'의 경우는 본 연구에서 적용한 베이지안 추론방법에 의해 어느 정도 극복이 가능하나, '시간처짐'은 도로의 혼잡상황에 따라 동적으로

변화한다. 따라서 출발시각기준 실시간 통행시간 정보제공 측면에서의 새로운 예측기법 개발이 필요하다.

다섯째, 본 연구의 결과는 자료수집 및 적용상의 제약으로 인해 본 연구의 대상의 경우에서만 해당하는 결과이다. 따라서 향후 연구에서는 보다 더 많은 case로 구분하여 적용할 필요성이 있다.

## 참고문헌

1. 강정규·남궁성(2002), "고속도로 통행료수납자료를 이용한 통행시간 예측모형 개발", 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.151~162.
2. 김병희·백호유·박태룡·오현숙·장인홍(2001), "베이지안 통계 계산, 자유아카데미.
3. 김재진·노정현·박동주·남궁성(2006a), "출발 및 도착시각기준 구간통행시간 차이의 원인규명에 관한 연구 : 연속류를 중심으로", 국토연구, 제48권, 국토연구원, pp.71~86.
4. 김재진·노정현·박동주(2006b), "구간검지체계를 이용한 On-Line 출발시각기준 링크 통행시간 추정 (연속류를 중심으로)", 대한교통학회지, 제24권 제2호, 대한교통학회, pp.157~168.
5. 이의은·김정현(2002), "시간처짐현상을 고려한 장거리구간 통행시간 예측 모형 개발", 대한교통학회지, 제20권 제4호, 대한교통학회, pp.51~61.
6. 오세창·김명하·오영태(2003), "차량검지기 교통량 데이터를 이용한 고속도로 통행시간 추정 및 예측모형 개발에 관한 연구", 대한교통학회지, 제21권 제5호, 대한교통학회, pp.83~116.
7. 한국도로공사(2000), ITS 기술개발(IV) 고속도로 통행시간 예측시스템 개발, 최종보고서.
8. Park, D., L.R.Rilett, B.J. Gajewski and W.L. Spiegelman(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.
9. 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.

10. Rilett, L.R. and D.Park(2001), "Direct Forecasting of Freeway Corridor Travel Times using Spectral Basis Neural Networks", Transportation Research Record 1752, pp.140~147.
11. Zhang. X. and J.A. Rice (2003), "Short-term travel time Prediction", Transportation Research, Part C, No. 11, pp.187~210.
12. 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.

✉ 주 작 성 자 : 김재진  
✉ 교 신 저 자 : 박동주  
✉ 논문투고일 : 2006. 10. 28  
✉ 논문심사일 : 2007. 1. 29 (1차)  
                  2007. 2. 23 (2차)  
✉ 심사판정일 : 2007. 2. 23  
✉ 반론접수기한 : 2007. 8. 31