

■ 論 文 ■

통행시간 추정 및 예측을 위한 루프검지기 자료의 최적 집계간격 결정

Investigating Optimal Aggregation Interval Size of Loop Detector Data for Travel Time Estimation and Prediction

유 소 영

(교통개발연구원 연구원)

노 정 현

(한양대학교 도시대학원 교수)

박 동 주

(공주대학교 건설환경공학부/방재연구센터 부교수)

목 차

I. 서론	4. 경로통행시간추정을 위한 집계간격 결정 모형
II. 선행연구 고찰	5. 링크통행시간예측을 위한 집계간격 결정 모형
1. 최적 집계간격 결정에 관한 연구	6. 경로통행시간예측을 위한 집계간격 결정 모형
2. 국내외 교통정보 수집주기	IV. 모형의 적용 및 결과분석
3. 문제점 제기	1. 자료수집 및 분석
III. 최적 집계간격 결정 모형	2. 모형의 적용 및 결과분석
1. 표식	V. 결론 및 향후 연구과제
2. 모형 개발을 위한 기본 가정	참고문헌
3. 링크통행시간추정을 위한 집계간격 결정 모형	

Key Words : 집계간격, 통행시간추정, 통행시간예측, 교통정보, 루프검지기, 지점검지기

요 약

1990년대 후반부터 구간 검지기를 이용한 링크통행시간 추정에 필요한 최소 표본수와 링크 및 경로 통행시간 추정과 예측을 위한 적정 집계간격에 대한 연구가 폭넓게 진행되어 왔다. 그러나 루프(지점)검지기를 이용한 교통정보수집체계의 경우, 합리적인 검증 없이 선정된 1분~5분의 집계간격을 이용하고 있다. 본 연구의 목적은 지점 검지기인 루프검지기를 이용하여 통행시간자료를 수집하는 경우, 링크 및 경로 통행시간 추정과 예측을 위한 적정 집계간격 결정 모형을 개발하고 현장의 자료에 적용하는 것이다.

본 논문은 링크 및 경로 통행시간 추정을 위한 적정 집계간격 결정 모형으로 CVMSE(Cross Validated Mean Square Error)방법을 이용하였으며, 링크 및 경로 통행시간 예측을 위한 적정 집계간격 결정 모형으로는 FMSE(Forecasting Mean Square Error)를 적용하였다. 개발된 방법론은 경부고속도로의 루프데이터에 적용되었다. 적용결과 링크 및 경로 통행시간 추정을 위한 적정 집계간격은 3~5분으로, 링크 및 경로 통행시간 예측을 위한 적정 집계간격은 10~20분으로 분석되었다.

I. 서론

도로상에 설치된 각종 교통정보수집체계를 통해 얻어지는 교통정보는 운전자의 의사결정에 중요한 역할을 한다. 특히, 도로구간의 통행시간정보는 운전자의 경로 선정에 있어서 직접적인 결정요소 중 하나이다. 또한, 교통체계 운영·관리측면에서도 통행시간정보는 주요 효과척도가 된다.

현재 교통분야에서 정보수집을 위해 사용되는 시스템으로는 크게 지점검지체계와 구간검지체계로 구분된다. 지점검지체계는 루프검지기(Loop Detector)와 영상 검지기 등이 있고, 구간검지체계로는 AVI(Automatic Vehicle Identification), 휴대전화추적, AVL(Automatic Vehicle location), 노측비콘(Roadside Beacon) 등이 있다. 구간검지체계는 프로브 차량을 이용한 표본 자료 수집에 그치지만, 지점검지체계는 모집단 전체 자료를 수집할 수 있는 장점이 있으며 교통류관리 등의 목적으로 구간검지체계보다 상대적으로 많은 구간에 설치되어 있다.

루프검지기 데이터를 이용하여 단위링크 또는 경로(또는 교통축)에 대한 통행시간을 추정하거나 예측하기 위해서는 루프검지기 데이터를 일정 시간간격(interval)로 집계하여야 한다. 현재 국내의 루프검지기를 이용한 교통정보수집체계를 살펴보면, 대체로 1분~5분의 집계간격을 이용하고 있다. 이러한 집계간격은 통계학적 검증을 통해 결정되었기보다는 경험적으로 선정되어 이용되고 있는 실정이다.

1990년대 후반부터 프로브 정보를 이용하여 링크통행시간을 추정할 경우에 필요한 최소 표본수에 대한 연구는 폭넓게 진행되어 왔다(이정희, 2001; Ashish et al. 1997; Srinivasan and Jovanis, 1996; Turner et al. 1995). 또한 프로브 정보를 이용할 경우 링크 및 경로 통행시간의 추정과 예측을 위한 적정 집계간격에 대한 연구도 수행되었다(Park et al., 2001).

루프검지기 자료를 이용할 경우의 적정집계간격에 대한 연구는 상대적으로 적었다. 이 분야의 유일한 연구는 Gajewski et al. (2001)로 링크가 아닌 한 지점에 대한 루프검지기 데이터를 DB화 할 경우의 최적 집계간격을 결정할 수 있는 통계학적 모형(CVMSE)을 개발하였다.

본 연구의 목적은 루프검지기 자료를 이용하여 연속류 상의 링크 및 경로¹⁾ 통행시간을 추정하고 예측하기 위한 적정 집계간격을 결정하는 통계학적 모형을 개발하고, 현장의 자료에 적용해 보는 것이다. 구체적인 연구의 목적은 다음과 같은 4가지 경우를 위한 최적 집계간격 결정모형을 개발하고 적용하는 것이다.

- 링크통행시간추정(Link Travel Time Estimation)
- 경로통행시간추정(Corridor Travel Time Estimation)
- 링크통행시간예측(Link Travel Time Forecasting)
- 경로통행시간예측(Corridor Travel Time Forecasting)

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 선행 연구에 대한 고찰을 통해 기존 교통정보수집체계의 문제점을 정리하였다. 3장에서는 첫째, 통행시간 추정을 위한 적정 집계간격을 결정하는 단계로 CVMSE(Cross Validated Mean Square Error)방법을 제안하였으며, CVMSE가 최소화되는 집계간격을 적정 집계간격으로 결정하였다. 둘째, 통행시간 예측을 위한 적정 집계간격을 결정하기 위한 모형으로 FMSE(Forecasting Mean Square Error)를 구성하였다. 4장에서는 개발모형을 현장의 자료에 적용하여 적정 집계간격을 도출하고 결과를 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 연구결과의 의미와 향후 연구과제에 대해 논하였다.

II. 선행연구 고찰

1. 최적 집계간격 결정에 관한 연구

Gajewski et al. (2001)는 루프검지기 자료를 이용하여 지점속도를 추정하기 위한 최적 집계간격 결정모형을 제시하였다. 개발된 방법론은 점추정기법과 구간추정기법으로 대표되는 CVMSE방법과 F-검정 방법이다. 연구결과, 점추정기법인 CVMSE가 구간추정기법인 F-검정보다 집계간격결정에 민감하게 작용하며, 교통류 측면에서 구체적인 설명이 가능한 것으로 평가되었다. 그러나, Gajewski et al.(2001)의 연구는 링크가 아닌 한 지점에 대한 루프검지기 데이터(속도)를 DB화 할 경우의 최적 집계간격을 결정할 수 있는 통계학적 모형으로, 단위 링크의 통행시간 추정이나 통행

1) 링크 : 루프검지기와 다음 분석대상 루프검지기 사이 구간(분석상 단위구간임)
경로 : 2개 이상의 링크로 구성된 구간(본 연구에서는 전 구간에 해당함)

〈표 1〉 최적집계간격 결정에 관한 기존 연구

	연구 방법론	연구 영역	검지기 종류
Turner et al.(1995)* Sen et al. (1997)*	Standard Error	통행시간추정	프로브 차량
Srinivasan & Jovanis (1996)*	중심극한정리를 이용한 통계적 산출식	통행시간추정	프로브 차량
Gajewski et al.(2001)	CVMSE F검정	통행시간추정	루프 검지기
이정희 (2001)*	One-Sample Kolmogorov-Smirnov test	통행시간추정	프로브 차량
Park et al. (2001)	MSE	통행시간추정 통행시간예측	AVI 시스템

* 필요 표본수 결정에 관한 연구

시간 예측을 위한 모형을 제시하지는 못하였다.

루프·검지기를 이용한 경우의 적정 집계간격결정에 대한 연구가 매우 드문 것과는 대조적으로, 프로브 정보를 이용한 경우의 적정 집계간격 또는 적정 프로브 표본수에 대한 연구는 폭넓게 진행되어왔다. Park et al. (2001)의 연구는 MSE (Mean Square Error) 방법을 이용하여 AVI를 이용할 경우의 링크 및 경로 통행시간 추정과 예측을 위한 적정 집계간격을 도출하였다. 이 연구는 MSE모형을 통해 프로브 차량의 표본수와 혼잡수준이 적정 집계간격에 미치는 영향을 분석하였으며, 인접 링크간의 영향관계(공분산)를 모형에 포함하였다. 집계간격과 최대통행시간 추정오차가 이 사전에 정해졌다는 가정 하에 집계간격당 필요한 프로브 수(즉, 표본수)에 대한 연구도 진행되었다.

이러한 분야의 연구들은 주로 standard error, One-Sample Kolmogorov-Smirnov test, 중심극한정리 등의 통계학적 방법론을 적용하였다(이정희, 2001; Ashish et al.1997; Srinivasan and Jovanis, 1996; Turner et al. 1995).

이상과 같은 국내의 최적집계간격 결정 또는 필요 표본수 결정에 대한 기존 연구는 〈표 1〉과 같이 정리된다.

2. 국내·외 교통정보 수집주기

서울 및 경기도에 설치된 비콘 방식의 경우 5분 단위로 링크통행시간을 추정하고 있다. 대전시는 택시를 프로브 차량으로 이용하여 5분 단위로 교통정보를 집락하고 있고, 제주시에서는 국지적으로 설치된 AVI 시

〈표 2〉 국·내외 교통정보수집주기 현황

		원시정보 수집방법	원시정보 수집·전송 주기	정보추정 주기 (집락간격)
국내	로티스 서울, 부천, 고양, 군포, 수원, 광명, 과천 등	Beacon	전송주기 : 1초 50회	5분
	대전시	프로브차량 (택시)	차량이 들어오는 대로 전송	5분
	SK C&C / 제주시	AVI + Loop	차량이 들어오는 대로 전송	5분
미국	Houston	AVI	30초	기준식
	San antonio	Loop 410	20초	5분
		AVI	60초	기준식
	Smart Traveler	영상 검지기	60초	60초
영국	Traffic master	Infra-red sensor	-	3분

자료 : 대전시 교통국 <http://www.metro.daejeon.kr>
 제주시 교통행정과 <http://www.jejusi.go.kr>
 (주) 로티스 <http://www.rotis.com>
 Houston <http://www.traffic.houstiotransfer.org>
 San antonio <http://www.transguide.org>
 Smart Traveler <http://www.smartguide.org>

스템과 루프검지기를 이용하여 5분 단위로 교통정보를 제공하고 있다.

미국의 AVI시스템이나 지점검지체계의 경우 20초~60초 사이의 주기로 수집된다. 정보를 추정하는 주기인 집계간격을 살펴보면 루프검지기 이용시 5분을 사용하고, AVI시스템을 이용할 경우 자체 개발한 기준식을 이용하고 있다.

3. 문제점 제기

이상과 같은 기존 연구들을 통행시간의 추정 및 예측, 그리고 검지기의 종류(지점 및 구간)에 따라 구분

〈표 3〉 기존 연구의 분류

구분	검지기 종류	
	지점	구간
통행 시간 처리	추정 (Estimation)	Gajewski et al. (2001)** Park et al.(2001) Turner et al.(1995)* Sen et al.(1997)* Srinivasan & Jovanis(1996)* 이정희(2001)*
	예측 (Prediction)	없음 Park et al. (2001)

* 필요 표본수 결정에 관한 연구

** 링크 통행시간이 아닌 지점 속도에 관한 연구

하면 <표 3>과 같다.

<표 3>에서와 지점검지기를 이용하는 경우의 링크 또는 경로의 통행시간 추정 및 예측시 적정 집계간격을 결정하는 연구는 아직 진행되지 않았다. 이에 본 연구의 목적은 지점검지기인 루프검지기 자료를 수집하는 경우, 링크 및 경로 통행시간 추정과 예측을 위한 적정 집계간격 결정 모형을 구축하고 현장의 자료에 적용하는 것이다.

III. 최적 집계간격 결정 모형

본 장에서는 루프검지기의 속도 및 교통량 자료를 통해, 실시간 통행시간을 추정하고 장래 통행시간을 예측하기 위한 적정 집계간격을 결정하는 통계적 방법을 제시하였다.

첫째, 본 연구에서는 통행시간 추정을 위한 적정 집계간격결정을 위해 Gajewski et al.(2001)이 제시한 CVMSE 개념을 이용하였다. Gajewski et al.(2001)의 연구는 속도추정을 위한 적정 집계간격 결정을 위한 모형이었다. 일반적으로 ATIS를 위해서는 지점속도보다는 구간통행시간이 요구되므로, 본 연구에서는 이를 수정하여 구간의 통행시간 추정을 위한 적정 집계간격 결정을 위한 모형을 개발하였다.

둘째, 통행시간 예측을 위한 집계간격결정 방법론인 FMSE는 프로브 차량을 위해 개발한 Park et al. (2001)의 \widehat{MSE} (Estimated Mean Square Error) 방법론을 루프검지기 자료에 맞게 수정하였다.

1. 표식

본 연구에서는 다음과 같은 표식을 사용하였다.

$CVMSE(h)$: h간격으로 집계시 평균통행시간과 관측된 통행시간의 오차의 기대값

$\widehat{CVMSE}(h)_{x_1, x_2}$: h간격으로 집계시 구간 1,2의 CVMSE

$\widehat{CVMSE}(h)_{x_1, x_2, \dots, x_L}$: h간격으로 집계시 해당경로의 CVMSE

$\widehat{CVMSE}(H)$: H간격으로 집계시 CVMSE

$\widehat{FMSE}(h, k)$: k시점 이후 h간격 집계시 추정된 MSE

$\widehat{FMSE}(h, P)$: P시점 이후 h간격 집계시 추정된 MSE

$\widehat{FMSE}(H, P)$: P시점 이후 H간격 집계시 추정된 MSE

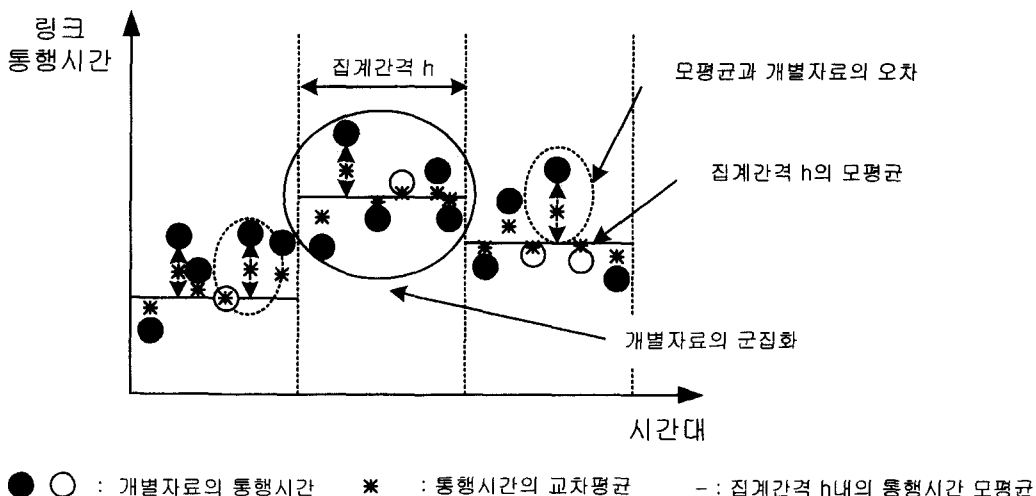
$x_i(h)$: h간격으로 집계시 i번째로 관측되는 통행시간

$\overline{X}_i(h)$: h간격으로 집계시 i번째의 관측치를 제외한 가중평균통행시간

$\overline{X}(h)$: h간격으로 집계시 관측된 가중평균통행시간(모평균)

$\hat{X}(h, k)$: k시점 이후 h간격으로 예측된 통행시간

$x_i(h, k)$: k시점 이후 h간격으로 집계시 관측되는 통행시간



<그림 1> 집계시간을 고려한 통행시간변화

- $\overline{X}_i(h, k)$: k시점 이후 h간격으로 집계시 i번째의 관측치를 제외한 가중평균통행시간
- $\overline{v}_i(h)$: h간격으로 집계시 i번째 구간의 통과 차량대수
- $V(h)$: h간격으로 집계시 관측된 통과 차량대수
- $v_i(h, k)$: k시점 이후 h간격으로 집계시 i번째 구간의 통과 차량대수
- $V(h, k)$: k시점 이후 h간격으로 집계시 관측된 통과 차량대수
- i : 루프검지기로부터 30초 간격으로 얻어지는 자료의 순서
- H : 통행시간추정 및 예측을 위한 최대집계 간격
- P : 통행시간예측을 위한 최대 예측 시간
- h : 통행시간예측을 위한 최소자료 집계 간격
- n : 집계간격 h동안의 원시정보가 집계횟수
- N : H시간동안 집계간격 h의 갯수($\frac{H}{h}$)

2. 모형 개발을 위한 기본 가정

루프검지기를 이용한 VDS(Vehicle Detection System)는 30초 동안 통과한 차량들의 속도평균(모평균)을 제공한다. 그러나, window time (30초)동안 지나간 차량의 개별속도는 관측되지 않기 때문에, 개별 차량의 속도는 차량이 속한 window time의 모평균과 동일하다고 간주한다. 적정 집계간격 h는 60초와 60분 (3,600초)사이에 존재한다고 가정한다. 또한, 집계 간격과 정보 갱신주기는 동일하다고 가정하였다.

루프검지기의 경우, AVI시스템과 달리 모평균을 알고 있기 때문에 AVI시스템과 같은 형식의 MSE적용이 불가능하다. 따라서, 루프검지기는 관측 값의 특성을 파악하여 비슷한 속성을 가진 관측 값을 동일한 간격으로 집계하는 그룹화 개념으로 설명할 수 있다.

즉, 시간적인 연속성을 가진 집단의 포함여부를 결정하기 위해 관측치 간의 차이 또는 집단간의 차이를 교차평균을 통해 계량화하였다.

3. 링크통행시간추정을 위한 집계간격 결정 모형

통행시간추정²⁾을 위한 적정 집계간격은 각 window time별로 수집되는 개별통행시간과 다수의 window time으로 구성되는 특정 집계간격의 교차평균과의 차이를 최소로 하는 집계간격이다 (Gajewski et al. 2001). 특정 집계 간격 h로 통행시간을 추정했을 때의 CVMSE는 식(1)과 같다. 식(1)에서 교차평균은 식(2)와 같이 정의된다. 식(1)의 의미를 파악하기 위해 식(1)을 재구성하면 식(3)과 같다. 식(3)에서 두 항목의 곱으로 표현된 부분은 각 항목의 기댓값이 0이고 두 항목이 독립적이라 할 수 있기 때문에 무시될 수 있다. 따라서 식(3)은 식(4)과 같이 정리된다.

식(4)의 $\widehat{CVMSE}(h)$ 는 크게 두 개의 항목으로 구성된다. 첫 번째 항목은 MSE로, 통계학에서의 Precision을 의미한다. 이 Precision의 물리적 의미를 살펴보면, 집계간격이 작을수록 오차가 줄어드는 경향이 있다. 극단적으로 window time과 집계간격이 동일하면 MSE는 0이다. 두 번째 항목은 집계간격 h의 통행시간 평균값과 i번째 관측치를 제외한 표본들의 평균(교차평균: 식 2)과의 차이이다. 이는 통계학에서의 Bias를 의미하며 평균값에 대한 신뢰도를 나타낸다. 일반적으로 이러한 Bias는 집계간격이 커질수록 표본수가 증가하므로 감소한다. 따라서 루프검지기를 이용한 통행시간 추정 시 적정 집계간격은 식(4)의 Precision과 Bias의 총합을 최소화하는 간격이다. 즉, 적정 집계간격은 Precision과 Bias의 상쇄관계에 따라 결정된다고 할 수 있다.

〈그림 1〉은 루프검지기 자료를 통해 얻어지는 개별 통행시간, 통행시간의 모평균, 그리고 교차평균의 관계를 보여준다. 집계간격 내 직선부분인 모평균과 점으로 표현되는 개별통행시간의 차이는 precision이며, *로 표현되는 교차평균과 모평균의 차이는 Bias이다.

식(4)는 집계간격 h로 집계했을 때의 CVMSE를 나타낸다. 따라서 이러한 방법론을 상위 수준의 특정 시간대 (H, 예: 60분 간격-즉, 특정 60분 동안의 적정 집계간격을 선정하고자 할 경우)동안 적용할 경우의 적정 집계간격은 식(5)에 의해 결정된다. 식(5)은 H 시간대를 구성하는 CVMSE(h) N개의 교통량가중 평균값이다. 즉, 예를 들어 특정 60분에 대한 적정 집계간격을 결정할 때, 5분 간격으로 통행시간을 집계하면

2) 통행시간추정은 현재시점을 기준으로, 관측된 통행시간에서 이상치를 제거하는 과정을 거쳐 통행시간을 산출하는 과정

12개의 CVMSE(h)가 도출되고 해당 60분 동안의 총 CVMSE(H)는 12개 CVMSE(h)의 교통량 가중 평균이 된다.

4. 경로통행시간추정을 위한 집계간격 결정 모형

일반적으로 교통정보 이용자들은 링크보다는 경로에 대한 통행시간 추정 값을 제공받고자 한다. 따라서, 링크를 기반으로 추정된 교통정보를 경로 중심의 정보로 가공해야 한다.

여러 개의 링크로 구성된 경로의 CVMSE(H)는 링크를 구성하는 모든 링크의 CVMSE(H)와 각 링크간의 공분산으로 구성된다. L개의 링크로 구성된 특정 경로의 CVMSE(H)는 식(6)과 같이 정리된다.

5. 링크통행시간예측을 위한 집계간격 결정 모형

링크통행시간예측(3)을 위한 적정 집계간격은 '예측모형을 통해 얻어진 통행시간과 관측된 window time 별 통행시간과의 차이를 최소화 하는 간격'이다(Park et al., 2001). 이러한 개념을 수식으로 표현하면 식(7)과 같다.

식(7)의 $\widehat{FMSE}(h, k)$ 를 정리하면, 두 개의 항목으로 구성된다. 첫 번째 항목은 실제 관측된 window time 별 통행시간과 집계간격 h로 집계된 평균통행시간과의 차이이며, 이는 통행시간 추정을 위한 적정 집계간격 결정 모형의 Bias에 해당한다. 두 번째 항목은 집계간격 h로 집계된 평균통행시간과 예측된 평균통행시간과의 차이로 통행시간 예측오차이다.

$$CVMSE(h) = E \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i(h) - \bar{X}_i(h))^2 \cdot v_i(h)}{V(h)} \right) \tag{1}$$

$$\bar{X}_i(h) = \frac{[\bar{X}(h) \cdot V(h) - x_i(h) \cdot v_i(h)]}{V(h) - v_i(h)} \tag{2}$$

$$CVMSE(h) = E \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i(h) - \bar{X}_i(h))^2 \cdot v_i(h)}{V(h)} \right) = E \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i(h) - \bar{X}(h))(\bar{X}(h) - \bar{X}_i(h))]^2 \cdot v_i(h)}{V(h)} \right)$$

$$= E \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i(h) \cdot [(x_i(h) - \bar{X}(h))^2 + (\bar{X}(h) - \bar{X}_i(h))^2 + 2(x_i(h) - \bar{X}(h)) \cdot (\bar{X}(h) - \bar{X}_i(h))]}{V(h)} \right) \tag{3}$$

$$\widehat{CVMSE}(h) \cong \frac{\sum_{i=1}^n v_i(h) \cdot ((x_i(h) - \bar{X}(h))^2 + (\bar{X}(h) - \bar{X}_i(h))^2)}{V(h)} \tag{4}$$

$$\widehat{CVMSE}(H) \cong \frac{\sum_{k=1}^N \widehat{CVMSE}(h) \cdot V(h)}{\sum_{k=1}^N V(h)} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \widehat{CVMSE}(H)_{X_1, X_2, \dots, X_L} &\cong \frac{\sum_{k=1}^N \widehat{CVMSE}(h)_{X_1, X_2, \dots, X_L} \cdot V_{1 \dots L}(h)}{\sum_{k=1}^N V_{1 \dots L}(h)} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^N \widehat{CVMSE}(h)_{X_1} \cdot V_1(h)}{\sum_{k=1}^N V_1(h)} \\ &+ \frac{\sum_{k=1}^N \widehat{CVMSE}(h + \Delta h_1)_{X_2} \cdot V_2(h + \Delta h_1)}{\sum_{k=1}^N V_2(h + \Delta h_1)} + \dots \\ &+ \frac{\sum_{k=1}^N \widehat{CVMSE}(h + \Delta h_{L-1})_{X_L} \cdot V_L(h + \Delta h_{L-1})}{\sum_{k=1}^N V_{L-1}(h + \Delta h_{L-1})} \\ &+ \frac{2 \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{L-1} \sum_{i=j+1}^L Cov(x_i(h), x_j(h + \Delta h_{j-i-1})) \cdot v_i(h)}{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{L-1} \sum_{i=j+1}^L V_{L-1}(h + \Delta h_{L-1})} \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \widehat{FMSE}(h, k) &= E \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i(h, k) - \bar{X}(h, k) \cdot v_i(h, k)}{V(h, k)} \right) \\ &= E \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i(h, k) \cdot [(x_i(h, k) - \bar{X}(h, k)) + (\bar{X}(h, k) - \bar{X}_i(h, k))]^2}{V(h, k)} \right) \\ &\cong E \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i(h, k) \cdot [(x_i(h, k) - \bar{X}(h, k))^2 + (\bar{X}(h, k) - \bar{X}_i(h, k))^2]}{V(h, k)} \right) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\widehat{FMSE}(h, P) \cong \frac{\sum_{k=1}^K \widehat{FMSE}(h, k) \cdot V(h, k)}{\sum_{k=1}^K V(h, k)} \tag{8}$$

$$\widehat{FMSE}(H, P) \cong \frac{\sum_{k=1}^N \widehat{FMSE}(h, P) \cdot V(h, P)}{\sum_{k=1}^N V(h, P)}$$

3) 통행시간예측의 기준시점은 미래(t시점 이후)이며, 관측된 통행시간을 바탕으로 t시점 이후의 통행시간을 도출하는 과정

$$= \frac{\sum_{h=1}^N \sum_{k=1}^K \widehat{FMSE}(h, k) \cdot V(h, k)}{\sum_{h=1}^N \sum_{k=1}^K V(h, k)} \quad (9)$$

$$\widehat{FMSE}(H, P)_{X_1, X_2, \dots, X_L} \cong \frac{\sum_{h=1}^N \sum_{k=1}^K \widehat{FMSE}(h, k)_{X_1, X_2, \dots, X_L} \cdot V_{1 \dots L}(h, k)}{\sum_{h=1}^N V_{1 \dots L}(h, k)} \quad (10)$$

$$= \frac{\sum_{h=1}^N \widehat{FMSE}(h, k)_{X_1} \cdot V_1(h, k)}{\sum_{h=1}^N V_1(h, k)} + \frac{\sum_{h=1}^N \widehat{FMSE}(h, k + \Delta k_1)_{X_2} \cdot V_2(h, k + \Delta k_1)}{\sum_{h=1}^N V_2(h, k + \Delta k_1)} + \dots + \frac{\sum_{h=1}^N \widehat{FMSE}(h, k + \Delta k_{L-1})_{X_L} \cdot V_L(h, k + \Delta k_{L-1})}{\sum_{h=1}^N V_L(h, k + \Delta k_{L-1})} + \frac{2 \sum_{h=1}^N \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L Cov(x_i(h, k), x_j(h, k + \Delta k_{j-i})) \cdot v_{ij}(h, k)}{\sum_{h=1}^N \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L v_{ij}(h, k)}$$

식(7)에서 Bias부분은 집계간격이 작을수록 작아진다. 반면 통행시간예측오차 부분은 집계간격이 클수록 작아진다. 왜냐하면 집계간격이 커지면 통행시간의 변화 폭이 작아지기 때문이다 (즉, 일종의 Smoothing Effect 때문).

따라서 링크 통행시간예측을 위한 적정 집계간격 결정은 이러한 Bias와 통행시간 예측오차와의 상쇄관계를 감안하여 이루어져야 한다.

$\widehat{FMSE}(h, k)$ 는 적정 집계간격을 기준으로 k시점 이후의 예측치에 대한 적합성을 평가하고자 정리한 식이다. 일반적으로 ATIS에서는 다주기⁴⁾로 통행시간이 예측되어야 하는 것이 바람직하다.

따라서 예측치에 대한 평가를 위해서는 특정 인터벌 k에 대한 예측 뿐만 아니라 1부터 K인터벌까지의 예측에 대한 평가가 이루어져야 한다. 식(8)은 식(7)를 다주기로 예측할 경우에 적용할 수 있도록 확장한 것이다.

또한, 추정 단계에서와 같이 예측을 위한 집계간격의 적절성은 일정 시간대 (예:60분)를 단위로 이루어진다. 식(8)을 H 시간대에 대한 평가가 가능하도록 확장할 경우 식(9)로 정리된다.

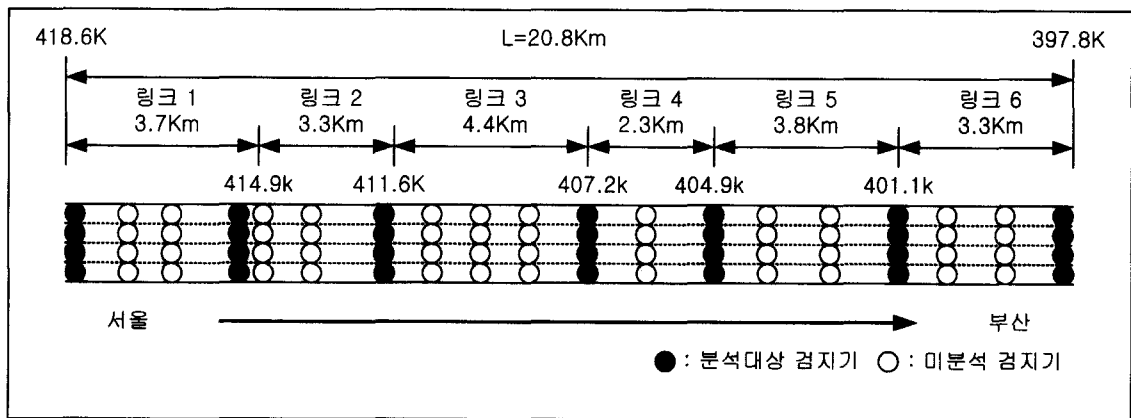
6. 경로통행시간예측을 위한 집계간격 결정 모형

N개의 h 집계간격으로 구성된 H시간대 동안 1~K개의 장래 인터벌에 대한 통행시간을 예측할 때의 경로통행시간 예측 오차는 식(10)과 같이 정리된다.

IV. 모형의 적용 및 결과분석

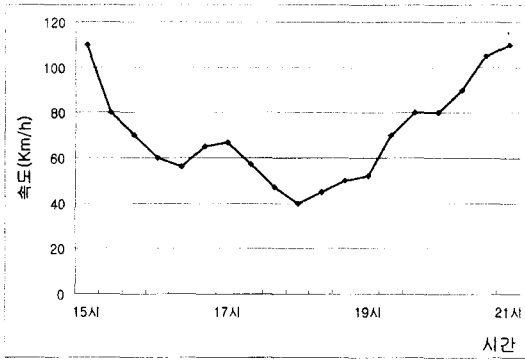
1. 자료수집 및 분석

본 연구는 한국도로공사의 FTMS가 운영되는 구간 중 루프자료의 상태가 양호하며 다양한 혼잡수준이 발생하는 부산기점 397.8km~418.6km 구간 (20.8km,



〈그림 2〉 분석대상지역의 검지기 설치현황

4) 서로 다른 집계간격의 적합성을 평가하기 위해 최소 집계간격(1주기)을 분석시간(1시간)으로 환산하여 2개이상의 최소집계간격으로 구성되는 것을 의미



〈그림 3〉 대상구간의 시간대별 30일 평균 속도

하행)을 분석구간으로 선정하였다. 분석구간 내에 설치되어 있는 21개 지점의 루프 검지기중 2003년 6월(30일) 내내 통행속도 정보를 제공한 7개의 루프 검지기를 대상으로 분석하였다. 해당구간은 6개의 링크로 구분되었다. 링크 속도는 링크의 시종점에 있는 루프 검지기 속도의 교통량 가중 평균으로 추정되었다. 즉, 지점속도는 시·공간 평균속도사이의 관계식에 의하여 공간평균속도로 변환되며, 지점간 거리 및 도출된 공간 평균속도를 이용하여 통행시간이 추정되었다.

〈그림 2〉은 분석구간의 이점, 검지기 위치, 링크의 위치 등을 나타낸다.

경로통행시간 추정 및 예측을 위한 적정 집계간격 결정을 위해 본 연구는 〈그림 2〉의 6개 링크로 구성된 20.8km 구간을 분석 대상 구간으로 선정하였다.

〈그림 3〉은 6월 한 달간 분석 구간의 20분 단위의 각 시간대별 평균통행속도를 나타낸다. 분석구간의 혼잡은 오후 3시 이후에 시작되어 오후 8:30분경에 종료하는 것으로 조사되었다.

2. 모형의 적용 및 결과분석

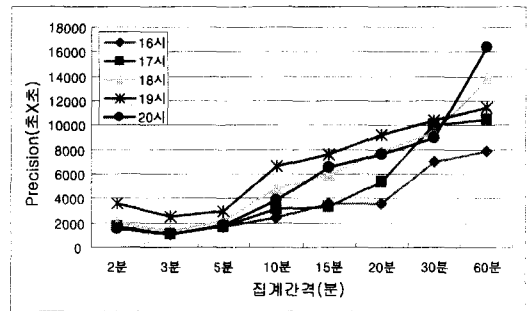
분석대상구간에서 수집된 루프검지기 자료를 이용하여 3장에서 구성한 적정 집계간격 결정 방법론을 적용하였다. 통행시간추정을 위한 집계간격을 결정하기 위해 본 연구에서는 시행착오법을 적용하였다. 즉, 적정 집계간격을 결정하기 위해 2분, 3분, 5분, 10분, 15분, 20분, 30분, 60분을 제시한 모형에 적용한 후 통행시간 추정 및 예측 오차를 최소화하는 집계간격을 선정하였다. 적정 집계간격은 링크별로 도출된 30일간 오차항목을 합산하여 평균적으로 최소화하는 집계간격으로 결정하였다.

1) 링크통행시간추정을 위한 적정 집계간격

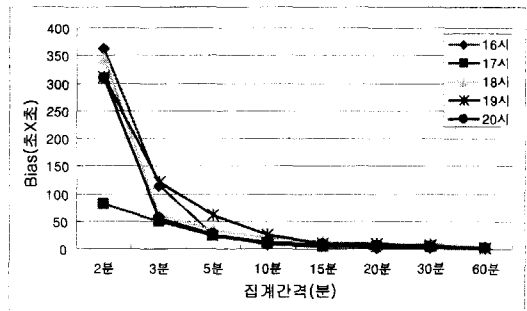
〈그림 4〉은 집계간격별 각 시간대별 6개 링크의 평균 Precision 값을 나타낸다. 예상된 바와 같이 일반적으로 집계간격이 커질수록 Precision은 커짐을 알 수 있다.

교차평균과 모평균의 차이인 Bias는 집계간격이 커질수록 거의 0에 가까워진다. 또한 Bias는 Precision에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 〈그림 5〉는 이러한 결과를 보여준다.

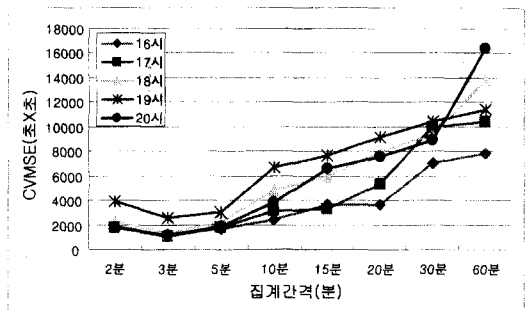
〈그림 6〉은 Precision과 Bias를 합친 CVMSE값을 나타낸다. 오목(Convex)형태의 모양을 보이며, 대체적으로 3~5분 단위의 집계간격을 이용할 때 가장 작은



〈그림 4〉 링크통행시간 추정의 Precision



〈그림 5〉 링크통행시간 추정의 Bias

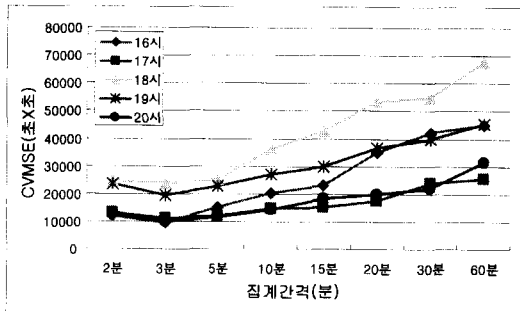


〈그림 6〉 링크통행시간 추정의 CVMSE

CVMSE값을 보임을 알 수 있다.

2) 경로통행시간추정을 위한 적정 집계간격

20.8km의 경로에 대한 통행시간 추정시 발생하는 CVMSE를 평가한 결과는 <그림 7>과 같다. 링크통행시간과 마찬가지로 대체로 오목형태(Convex)의 모양을 보이며, 3~5분 단위의 집계간격을 이용할 때 가장 작은 CVMSE값을 보임을 알 수 있다. <그림 6>와 <그림 7>을 비교해 보면 대체로 경로 통행시간 추정의 CVMSE는 링크통행시간 추정의 평균 CVMSE의 약 6배 정도임을 알 수 있다. 즉, 경로통행시간 추정 CVMSE는 인접 링크간의 공분산에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 경로상의 특정 링크쌍 간의 공분산이 존재하나 경로상의 모든 링크 쌍간의 공분산의 합은 대체로 "0"이 되기 때문인 것으로 판단된다 (Park et al. 2002 참조)

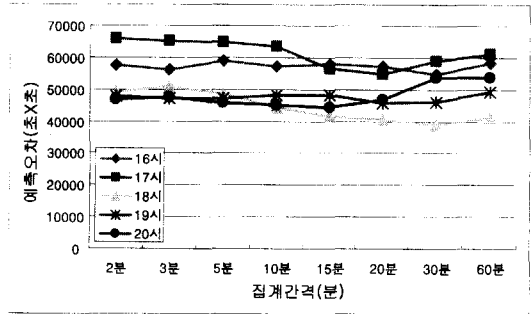


<그림 7> 경로통행시간 추정의 CVMSE

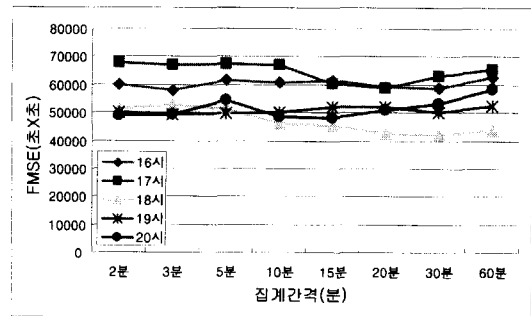
3) 링크통행시간예측을 위한 집계간격

통행시간예측을 위한 집계간격에 대한 방법론을 대상지역의 실제 자료를 이용하여 분석하기 위해서는 예측모형을 통해 얻어진 통행시간 예측치와 예측된 시점에서 관측된 통행시간 및 교통량 자료가 요구된다. 이에 본 연구는 루프검지기를 통해 추정된 링크통행시간을 바탕으로 현재 시각부터 1시간 이후까지 예측하였다. (예를 들면, 16시를 기준으로 하면, 16시 이전의 통행시간자료를 이용하여 16시부터 17시사이의 통행시간을 예측하였다.) 링크통행시간 예측은 SAS 프로그램의 ARIMA모형⁵⁾을 이용하였다(조신섭, 손영숙, 2002; 김기영 외 2인, 2001).

3장에서 살펴본 바와 같이 FMSE는 Precision과



<그림 8> 링크 통행시간 예측 오차



<그림 9> 링크 통행시간 예측의 FMSE

통행시간 예측 오차로 구성된다. 전 절에서 Precision에 대한 분석이 이루어졌으므로 본 절에서는 통행시간 예측오차만을 살펴본다. <그림 8>은 집계간격별 링크통행시간 예측 오차를 나타낸다. 통행시간 예측오차는 집계간격에 덜 민감한 것으로 분석되었다. 즉, 집계간격이 2분에서 3분으로 증가하면 대체로 통행시간 예측오차가 감소하지만 3분에서 20분 사이에는 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 반대로 집계간격이 20분보다 커지면 통행시간 예측오차가 다소 증가하였다. 이러한 경향은 모든 시간대에서 관측되었다. 한편, 통행시간 예측오차와 Precision의 크기를 비교해 보면, 통행시간 예측오차가 Precision의 10배 정도임을 알 수 있다.

<그림 9>은 통행시간 예측오차와 Precision의 합으로 구성된 FMSE를 나타낸다. 위에서 언급된 바와 같이 통행시간의 예측오차가 Precision보다 월등히 크기 때문에 FMSE의 모양도 통행시간 예측오차의 모양과 비슷하게 나타났다. 대체적으로 10분~20분 정도의 집계간격에서 FMSE가 최소화 됨을 알 수 있다. 그러나 이러한 적정 범위 내에서 FMSE는 매우 둔감하게 변하는 것으로 나타났다.

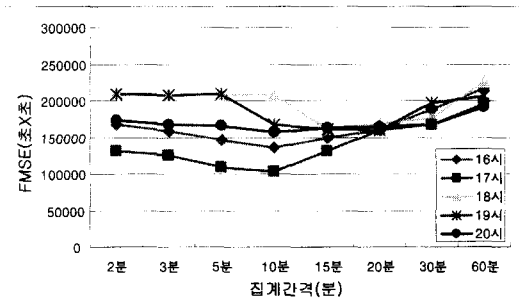
5) ARIMA모형(통행시간예측)을 수행하기 위해 사용된 입력자료는 다양한 최소 집계간격이 고려된 입력자료(통행시간자료)를 이용하였다.

4) 경로통행시간예측을 위한 집계간격 결과분석

〈그림 10〉는 경로통행시간예측을 위한 FMSE를 나타낸다. 링크통행시간 예측을 위한 적정 집계간격과 같이 경로통행시간예측을 위한 적정 집계간격은 10분~20분 정도인 것으로 분석되었다. 주목할 만한 사실은 경로통행시간 예측의 FMSE는 경로를 구성하는 각 링크의 통행시간예측 FMSE의 합보다 작다는 것이다.

예를 들어 20시의 경우, 6개 링크의 링크통행시간 예측의 FMSE평균값(집계간격 2분 적용시)은 약 50,000초×초이고 경로통행시간예측의 FMSE는 약 175,000초×초이다. 산술적으로 경로통행시간 예측의 FMSE는 50,000초×초의 약 6배(즉, 약 300,000초×초)가 되어야 하나 이보다 훨씬 작다.

이는 경로를 구성하는 각 링크의 통행시간 예측 오차의 부호가 다를 수 있으며, 부호가 다를 경우 서로 상쇄되기 때문이다(Rilett and Park, 1999).



〈그림 10〉 경로통행시간 예측의 FMSE

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 루프검지기 자료 이용시 적정 집계간격을 설정할 수 있는 통계적 모형을 제시하였다. 개발된 모형은 링크 및 경로 통행시간 추정과 통행시간 예측을 위한 적정 집계간격 결정을 위한 것이다. 이를 위해 논문에서는 기존의 CVMSE방법론과 MSE방법론을 수정 및 보완하였으며, 개발된 방법론은 경부고속도로의 루프검지기 자료에 적용되었다. 적용결과 링크 및 경로 통행시간 추정을 위한 적정 집계간격은 3~5분으로, 링크 및 경로 통행시간 예측을 위한 집계간격은 10~20분으로 분석되었다. 따라서, 각종 첨단교통체계에서 이루어지고 있는 실시간 통행시간 추정이 현 시점에서의 소통상태를 제공하기 위한 것이라면 현재 일반적인

로 사용되고 있는 통행시간 추정의 집계간격인 5분이 적절하다고 할 수 있다. 그러나, 실시간 통행시간 추정과 더불어 장래 시간대에 대한 통행시간 예측이 이루어진다면 5분 단위로 장래 통행시간을 예측하는 것은 비합리적이라 판단된다.

다음과 같은 측면에서의 향후 연구가 지속될 경우 보다 신뢰성 있는 교통정보 제공이 가능할 것으로 여겨진다. 첫째, 본 연구는 연속류 상에서 이루어졌기 때문에 단속류에서 생겨나는 교통특성과 상황을 반영하지 못한다. 따라서, 본 연구의 연속류상 window time 기준 자료를 이용한 방법론과 달리 신호등에 의한 교통류 흐름 제어를 포함하는 단속류에 대한 포괄적이고 추가적인 연구가 필요하다. 둘째, 본 연구는 이미 설치되어 있는 루프검지기를 바탕으로 연구를 진행하였기 때문에 다양한 단위링크의 길이를 고려하지 못하였다. 따라서 단위링크의 길이를 고려한 적정 집계간격결정이 요구된다. 셋째, 본 연구는 집계간격을 목적식에 직접 대입하여 최적치를 찾는 시행착오(Trial and Error)방법을 사용하였다. 즉, 본 연구는 불연속적(Discrete)으로 적정 집계간격을 추정한 것이다. 보다 최적의 집계간격을 도출하기 위해서는 연속적(Continuous)인 집계간격에 대한 고려가 필요하다.

참고문헌

1. 김기영·강현철·최병진(2001), "예제로 배우는 SAS 프로그래밍 입문", 자유아카데미.
2. 김영찬·김태용(2001), "검지자료합성을 통한 도시 간선도로 실시간 통행시간 추정모형", 대한교통학회지, 제19호 제6호, 대한교통학회, pp.171~182.
3. 오세창·김명하(2003), "차량검지기 교통량 데이터를 이용한 고속도로 통행시간 추정 및 예측모형 개발에 관한 연구", 대한교통학회지, 제21호 제5호, 대한교통학회, pp.83~95.
4. 이근희(2002), "사회과학 연구방법론", 범문사.
5. 이정희(2001), "교통정보제공을 위한 구간통행시간 산출 방법론 연구 ; 적정표본수 결정방법을 중심으로", 서울시립대학교.
6. 정연식·최기주(1999), "GPS probe 및 루프검지기 자료의 융합을 통한 통행시간추정 알고리즘 개발", 대한교통학회지, 제17호 제3호, 대한교통학회, pp.97~116.