

고속도로 합류부 지점에서의 최적 검지기 설치 위치 산정에 관한 연구

Studies on Determining Optimal Downstream Loop Detector Location on Freeway Merging Section

양 충 현* 손 영 태**
Yang, Choon Heon Son, Young Tae

Abstract

This study identifies the relationship between traffic data quality obtained from loop detectors and their location. Traffic data basically shows traffic flow conditions and thus, these information can be used as inputs for various transportation management strategies. Our study presents how to determine optimal downstream detector location on merging area in order to enhance the effects of ramp metering strategies. Microscopic simulation model, PARAMICS, is used as the main analytical tool. Assuming that detector location relies heavily on traffic flow characteristics in each roadway segment, we perform statistical analysis to identify homogeneous traffic conditions on merging area.

Keywords : *PARAMICS, ALNEA, covariance, correlation, loop detector*

요 지

고속도로 합류부 지점의 감응식 루프 검지기를 통한 정보 수집의 질은 검지기의 설치 위치와 관련이 있다. 검지기로부터 얻은 교통자료들은 안정된 교통의 흐름과 높은 안전 수준을 유지하게 위해 필수적으로 사용된다. 또한, 이러한 정보는 교통관리전략 위한 입력 자료로도 사용된다.

본 연구에서는 대표적인 교통관리 전략중 하나인 램프 미터링의 효과를 극대화하기 위해 고속도로 합류부에서의 검지기 최적 설치 위치를 통계기법을 이용하여 산정하였고, 주요한 분석도구로써 미시적 교통 시뮬레이션 모형인 PARAMICS를 사용하였다. 검지기 설치 위치 산정은 통계분석을 통해 도로 구간 별 교통류 특성에 매우 의존하고 있음을 규명하였다.

핵심용어 : 파라믹스, 램프 미터링, 공분산, 상관분석, 검지기

* 캘리포니아 주립대학교 어바인, Ph. D, Research Scientist
** 정회원 · 명지대학교 교통공학과 교수 공학박사 교신저자



1. 서론

교통 시스템 운영을 관한 대표적인 장비로는 루프 검지기(Loop Detectors)가 있다. 이는 감응식(Inductive)과 고정식(Fixed)으로 나뉘어진다. 이것들 중 특히, 고속도로 교통 운영에 있어서 감응식 루프 검지기는 매우 유용하게 사용될 수 있다. 루프 검지기로부터 나오는 교통 자료들 현재의 교통 상태를 나타내기 때문에 원활한 교통의 흐름과 안전 수준을 향상하기 위한 전략 시행에 중요한 근거가 된다.

그러나 검지기 통제기 (Controller)의 에러(error), 오작동 (malfunction), 부적절한 검지기 설치 위치 (inappropriate location)등으로 인해 루프 검지기로부터 얻은 교통자료의 신뢰성이 상대적으로 높지 못한 것이 현실이다. 앞서 말한 두 가지 요인들 (controller error and malfunction)은 IT 기술이 발전함에 따라 성능 면에서 많이 개선되고 있다.

검지기 설치 위치는 해당 구간의 교통류 특성을 잘 반영해야 하지만, 일반적으로 고속도로의 경우 일정한 간격으로 설치되어 있어 특정 구간에서는 검지기의 자료만으로는 그 구간의 교통 특성을 제대로 반영하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 그러한 구간에서는 검지기로부터 나온 교통자료가 높은 신뢰성을 가지고 있다고 볼 수 없다. 예를 들어 위빙구간이나 램프가 본선과 연결된 지점은 다양한 교통류가 상충되는 지점이기 때문에 검지기 설치 위치에 따라 교통자료의 신뢰성이 결정 될 수 있다.

검지기의 최적 위치 설정과 관련된 기존의 연구는 Sisiopiku et al (1994) 와 Thomas (1999), 가 있다. 특히 Sisiopiku et al (1994) 는 한 링크에 안에 있는 하나 이상의 감응식 루프 검지기를 통해 평균 속도와 검지기의 위치의 관계를 규명하였다. 이 연구는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검지기의 위치와 그 위치에서 얻어진 통행시간의 정확성간의 관계를 규명하였다. Thomas 는 간선도로상에서 검지기의 위치와 통행 특성사이의 관계를 연구하였다. 그 연구에서 검지기 output values (점유율과 속도)와 링크 통행 특성과의 관계를 대표적인 통계 기법인 회

귀분석방법을 사용하여 평가하였다. 결과적으로 모든 링크에 대해 최적 검지기 위치의 산정을 매우 어려운 것으로 나타났다.

그러나 이 두 연구는 고속도로가 아닌 간선도로에서의 검지기 위치 산정에 관한 연구로 한정되었다. 본 연구에서는 고속도로 상에서의 특히 하류부 검지기 위치 선정을 통해 이를 입력자료(inputs)로 사용하는 다양한 교통 관리 전략에 도움을 주는 것을 목적으로 한다.

널리 알려지고 사용되는 교통 관리 전략으로는 램프 미터링 (Ramp metering)이 있다. 램프 미터링이란 교통 신호의 한 부분으로써, 고속도로로 진입하는 차량의 수를 규제하는 것이다. 이를 통해, 고속도로 본선의 용량과 수요를 균형 있게 유지할 수 있도록 해주고, 고속도로 운영을 효율적으로 할 수 있다. 램프 미터링 전략을 시행하기 위해서는 고속도로 하류부, 즉 on-ramp가 본선에 연결된 후 지점과 on-ramp 상의 검지기의 자료를 통해 이루어지게 된다. 따라서 하류부에 설치된 검지기의 위치가 램프에서 들어온 교통류와 상류부에서 하류부로 진행하는 두 가지 교통류가 합류된 후의 상태를 제대로 검지해야만 램프 미터링 전략의 효과가 극대화된다. 아래 다음 그림 1. 은 일반적인 램프 구간의 형태를 보여주고 있고, 전형적인 램프 미터링 설치 개요를 나타낸다.

본 연구에서는 고속도로 본선구간 하류부에 설치될 검지기의 최적 위치 산정 방법을 제시하고, 미시적 교통 시뮬레이션 모형을 통해 적정 검지기 설치 위치에 따른 램프미터링의 효과를 통계적 방법으로 검증한다. 미시적 교통 시뮬레이션 모형으로써는 PARAMICS가 주요 분석도구로 사용되었다.

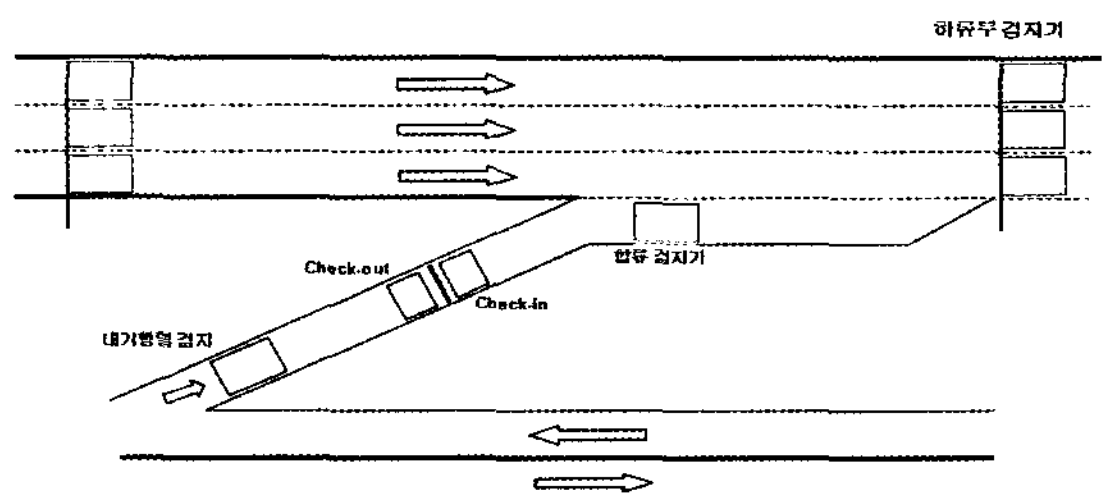


그림 1. 일반적인 램프 미터링 설치 개요



본 연구에서는 고속도로 본선구간 하류부에 설치될 검지기의 최적 위치 산정 방법을 제시하고, 미시적 교통 시뮬레이션 모형을 통해 적정 검지기 설치 위치에 따른 램프미터링의 효과를 통계적 방법으로 검증한다. 미시적 교통 시뮬레이션 모형으로 써는 PARAMICS가 주요 분석도구로 사용되었다.

2. 미시적 시뮬레이션 모형

PARAMICS 시뮬레이션 모형은 사용자가 직접 개별 코드를 입력하여 프로그램화 할 수 있는 기능을 갖추고 있다. API (Application Programming Interface)를 통해 기존 모형과 개발된 코드를 서로 연결시켜 주어, 다양한 효과를 측정할 수 있다. 이 기능은 기본적인 시뮬레이션 모형의 많은 특성들은 사용자의 요구에 맞도록 설정을 바꿀 수 있다. PARAMICS는 미시적 모형으로써, 개별 차량을 전체 통행 동안 추적하고, 차량 종류별로 시뮬레이션이 가능하다 (Duncan, 1995 and Quadstone Ltd, 2003). 전체적인 교통 특성과 혼잡 정보를 제공해 준다. 또한 다양한 ITS 전략의 효과 평가 시행이 가능하다. 가장 주목할 만한 특징은 PARAMICS가 갖는 확장성(scalability)이 뛰어나고 이 확장성은 네트워크의 크기를 조절할 수 있으며 다중(multiple) 시나리오를 실시간보다 더 빠르게 시뮬레이션 할 수 있다. PARAMICS는 확률적 모형이기 때문에, 교통 존으로부터 차량의 배출, 운전자의 특성(적극성과 인지성)을 묘사하는 데 random number가 많은 영향을 미친다. 즉 서로 다른 random number를 설정한 후 시뮬레이션을 하면 결과 값이 항상 다르다. 다른 random number를 가지고 시뮬레이션을 하면 그 만큼 신뢰성이 큰 결과 값을 얻을 수 있다.

다음은 부가적인 PARAMICS의 특징을 보여준다.

- 도로망, 교통 수요, 운전자, 차량 그리고 교통 통

- 제 장비들에 대한 상세한 묘사
- 다양한 ITS 표현 능력 (교통관리전략, 정보, 그리고 통제)
- 고정식과 감응식 신호체계의 표현 기능
- 차량의 배기가스 배출량 계산, 유고, 버스, 그리고 주차장 모형화
- 시뮬레이션 결과를 보여주는 다양한 시각적 효과

본 연구의 연구지점은 남 캘리포니아 오렌지카운티에 있는 I-405 지점이다. 시뮬레이션에서 사용된 scale은 GIS map에 근거하여 실제 크기에 비례한다. 본 연구에서는 2005년에 조사된 오전 첨두 연평균 일일 교통량 (AADT)을 사용하였다. 편도 5차로 도로구간이다. 오전 첨두시 동안 혼잡이 매우 심하고, 이 시간동안 램프 미터링이 작동한다. 시뮬레이션 시간은 총 60분이며, 이전 20분은 warm-up 시간으로 설정되었다. 이 시간은 교통류의 상태가 안정된 것을 식별하기 위해 사용된다. 매 2초마다 시뮬레이션은 업데이트 된다. 각 존에서 배출되는 차량의 형태 (pattern)는 정규분포를 따르며, 존에서의 차량 배출 형태 (pattern)은 seed number에 따라 조정된다. 총 30개의 서로 다른 seed number를 바탕으로 30번의 시뮬레이션이 수행되었다. 아래 표 1.은 연구지점의 연평균 일일 교통량을 나타낸다.

표 1. 연구지점의 연평균 일일 교통량

오전 첨두	연평균 일일 교통량 (AADT)
고속도로 본선구간 (북쪽 방향)	9600 대/시
램프 구간	540 대/시

2.1 모형의 정산

PARAMICS 모형은 운전자의 운전 행태와 관련된 Parameter들을 제공하고, 이를 통해 사용자가 원하는 링크 별로 운전 행태를 보정할 수 있다. 또한 평균 차두시간, 운전자 반응시간, 도로 구배과



같은 여러 가지 parameter 정산을 통해 구축된 네트워크를 정교하게 수정하고, 시뮬레이션을 통한 outputs의 신뢰성을 높일 수 있다.

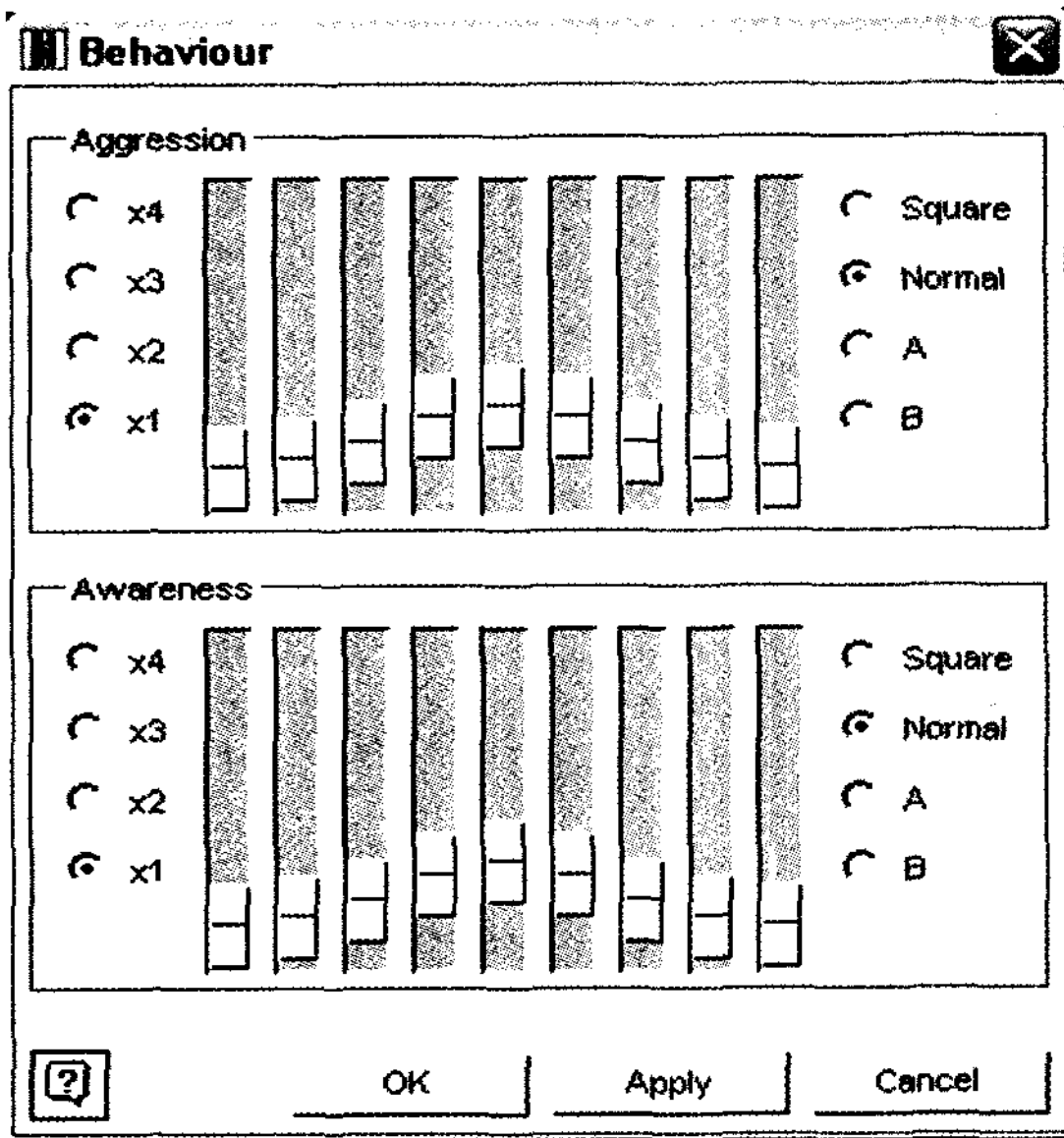
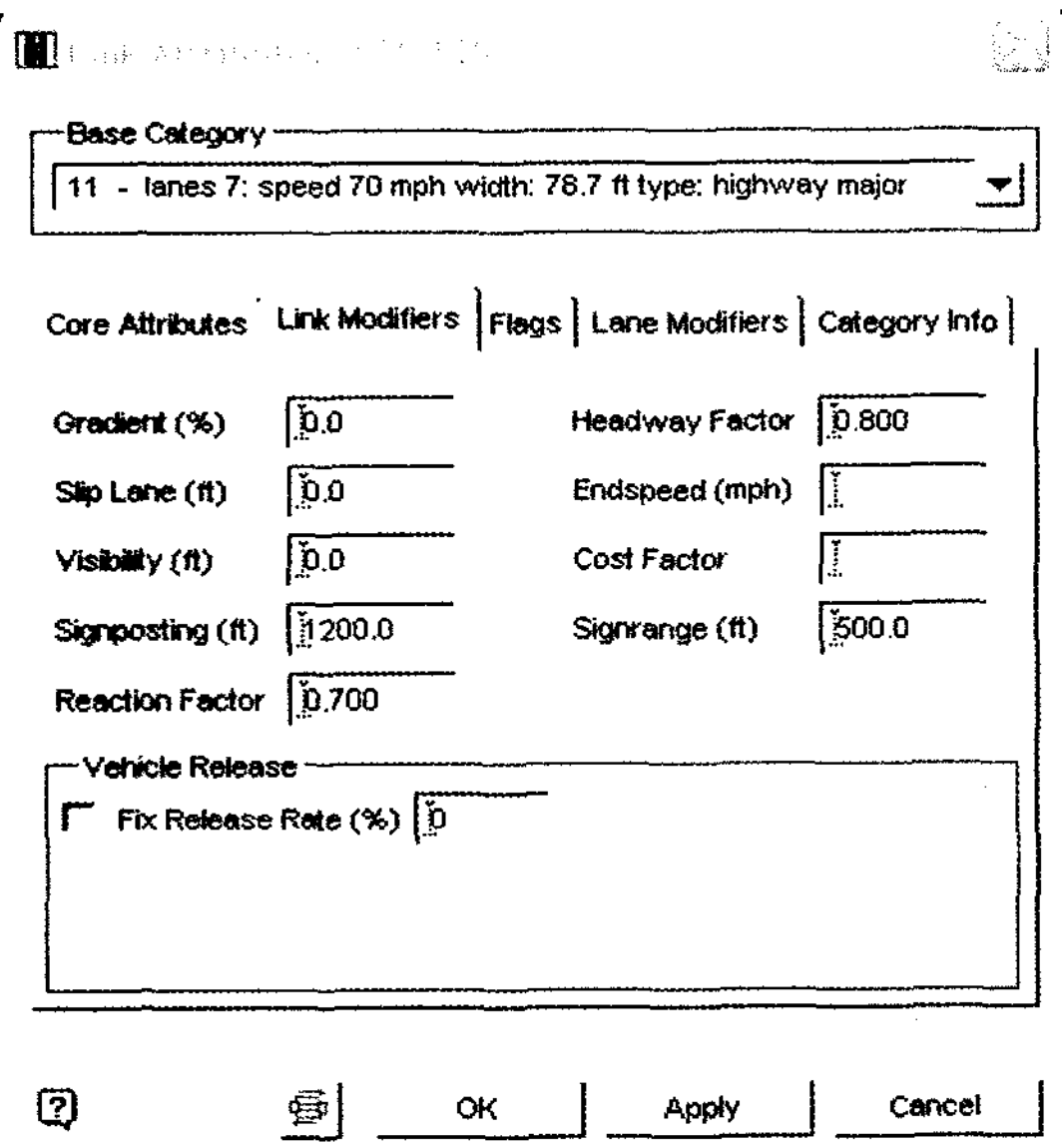


그림 2. Parameter 보정창



도로 기본구간으로 추정되는 지점에 설치되었고, 나머지 검지기들(ML3, ML4, ML5, ML6, ML7)은 합류구간으로 추정되는 구간에 설치되었다. 그러나 기본구간과 합류구간의 경계를 명확히 정의하기 어렵기 때문에 유무가설(hypothesis test)을 이용하여 합류구간을 결정하였다. 하류부 검지기 위치를 확인하기 위해서는 이 단계가 필요하다. 고속도로 기본구간의 효과측도는 교통 용량 편람에 제시된 대로 구간밀도를 사용하였다 (USHCM, 2001). 구간 밀도는 고속도로 교통 상태와 교통류 그 자체를 가장 잘 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나 검지기로부터 구간 밀도를 바로 얻을 수 없으므로, 대신 점유율 자료를 사용하였다. 귀무가설 검증을 통해 합류구간으로 예상되는 지점에 설치된 검지기들 사이의 상관분석을 시행하였다. 구간 밀도와 가장 큰 상관관계를 가진 검지기가 선택될 것이고, 이 검지기의 위치가 하류부 검지기의 최적 위치로 고려 될 것이다. 이러한 결과를 뒷받침하기 위해, 램프 상에서의 평균대기 행렬의 길이와 고속도로 본선에서의 평균지체가 램프미터링 운영 하에 조사될 것이다.

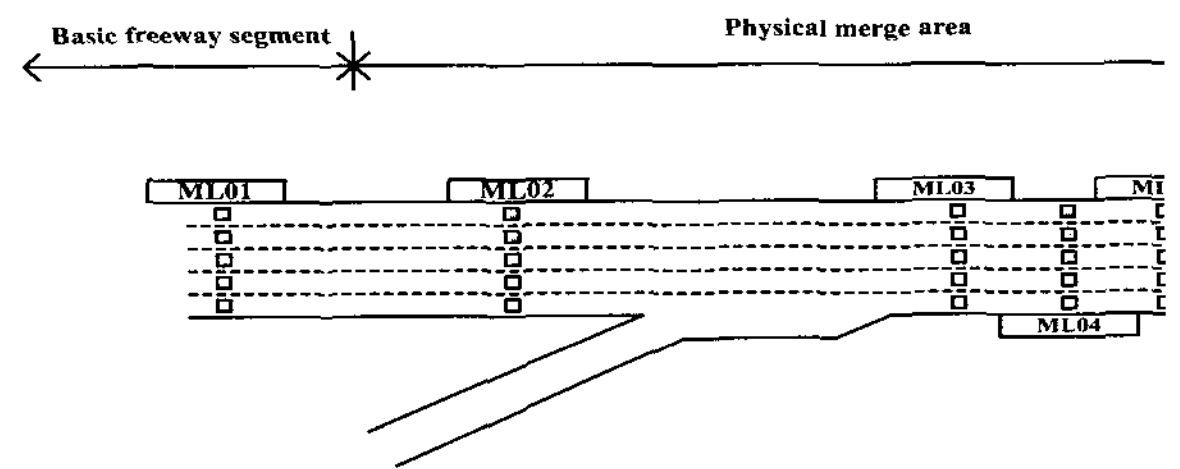


그림 3. 검지기 설치 위치

3. 통계분석

3.1 귀무가설 검정

총 8개의 가상 검지기가 150m 간격으로 본선을 따라 PARAMICS 네트워크상에 설치되었다. 그림 3. 에서와 같이 검지기 ML1, ML2 과 ML8은 고속

귀무가설 검정을 통해 ML03부터 ML07 검지기들 중에 위빙 구간에 놓여 있는 것이 어떤 것들인지 식별한다. ML01, ML02, 그리고 ML08은 고속



도로 기본구간에 놓여 있다고 가정한다. 다음의 3가지 형태의 귀무가설의 성립이 가능하다. $H_0: \mu = \mu_0$ 일 때 $H_1: \mu > \mu_0$ 또는 $H_1: \mu < \mu_0$ 또는 $H_1: \mu \neq \mu_0$ 일 수 있다. 여기서, μ 는 위빙구간에 설치된 검지기의 평균 점유율이고, μ_0 는 기본구간에 설치된 검지기의 평균이다. 검정역은 양측검정을 통해 정의 된다. 다음 표는 각 검지기에서 올라온 평균 점유율을 보여준다.

표 2. 점유율 결과

검지기	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8
평균 점유율	0.159	0.215	0.199	0.224	0.195	0.187	0.159	0.151

ML1, ML2 and ML8 의 평균 점유율은 0.155이다. 귀무가설이 각 검지기의 평균점유율은 0.155과 같다 이다 일때, ML3부터 ML 7까지는 이 가설을 만족하지 못한다. 따라서 ML3부터 ML 7를 합류구간으로 결정하였고, ML1, ML2, 그리고, ML8 는 기본구간으로 결정하였다.

3.2 공분산과 상관계수

상. 하류부의 교통량과 구간 길이를 통해 합류부 구간의 밀도를 구하였고, 이 결과를 가지고 공분산과 상관계수 분석이 시행하였다. 상관계수는 두 개의 변수의 상관관계를 표현하는 반면, 공분산은 두 변수의 상관도를 나타낸다. 이 분석의 목적은 어떤 검지기의 점유율이 구간 밀도에 대응한 구간 특성을 가장 잘 표현하는 가를 설명하기 위함이다. 일반적으로 다음의 두 식이 사용된다.

$$Cov(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$Corr(x, y) = \frac{Cov(x, y)}{S_x S_y}$$

위의 식을 이용하기 위해서는 구간 밀도가 필요

하고, 이것은 누적 교통량과 구간 길이를 통해 구하였다.

$$\text{구간 밀도} = \frac{UCV - DCV}{\text{구간 길이 (mile)}}$$

여기서,

UCV= 상류부 누적 교통량 (대)

DCV= 하류부 누적 교통량 (대)

표 3. 검지기별 공분산 및 상관계수 결과

검지기	공분산	상관계수
ML3	1.045	0.587
ML4	1.049	0.522
ML5	0.946	0.677
ML6	0.700	0.514

ML 5가 밀도와 가장 높은 상관계수를 보인다. 그러므로 단지 통계분석을 통한 검증으로부터 ML5가 설치된 지점이 가장 적합한 합류부에서의 설치 위치로 판단되었다. 본 지점은 합류부에서 약 0.28mile 떨어진 지점이다.

4. 램프 미터링 알고리즘

램프 미터링 알고리즘으로는 Pre-time, adaptive, integrated 등 3가지 형태가 사용된다. Pre-time은 고속도로 교통 조건에 직접적으로 영향을 받지 않는 반면, adaptive는 local 또는 coordinated traffic responsive에 따라 영향을 받는다. 이 중에서 integrated는 VMS routing, 간선도로 관리 그리고 램프 미터 링이 동시에 이루어지기 때문에 다소 복잡한 측면이 있다. 본 연구에서는 adaptive 알고리즘의 한 종류인 ALINEA를 이용하였다. 이 알고리즘은 Papageorgiou에 의해 개발된 것으로서, local feedback 전략을 사용한다. 이 알고리즘은 매우 간단하며, 효율적이고, 현장에서 쉽게 시행될 수 있다는 장점을 가지고 있다. ALINEA control 하에서 시간 간격 (t, t+1)동안의 미터링은 다음 식을 바탕으로 계산된다.



$$r(t+1) - r(t) = K_R^* \times (O^* - O(t)) \quad \text{식 (1)}$$

$r(t+1)$: 다음 시간에서의 램프 미터링

$r(t)$: 현재 시간에서의 램프 미터링

K_R : 램프 밀도 (대/마일)

O^* : 하류부 최적 점유율

$O(t)$: 시간 t에서 하류부 검지기 점유율

O^* 의 값은 일반적으로 임계 점유율 혹은 용량 상태에서의 점유율보다 작거나 같도록 조정된다. 앞서 말한 바와 같이 PARAMICS는 plugin 파일을 통해 사용자가 직접 코드를 개발해 시뮬레이션 상에서 상호 호환 가능하도록 하는 API 기능을 이용한다. "alinea_control" 파일은 ALINEA plugin (Lianyu Chu, 2003)에 요구되는 모든 필요한 정보를 포함한다.

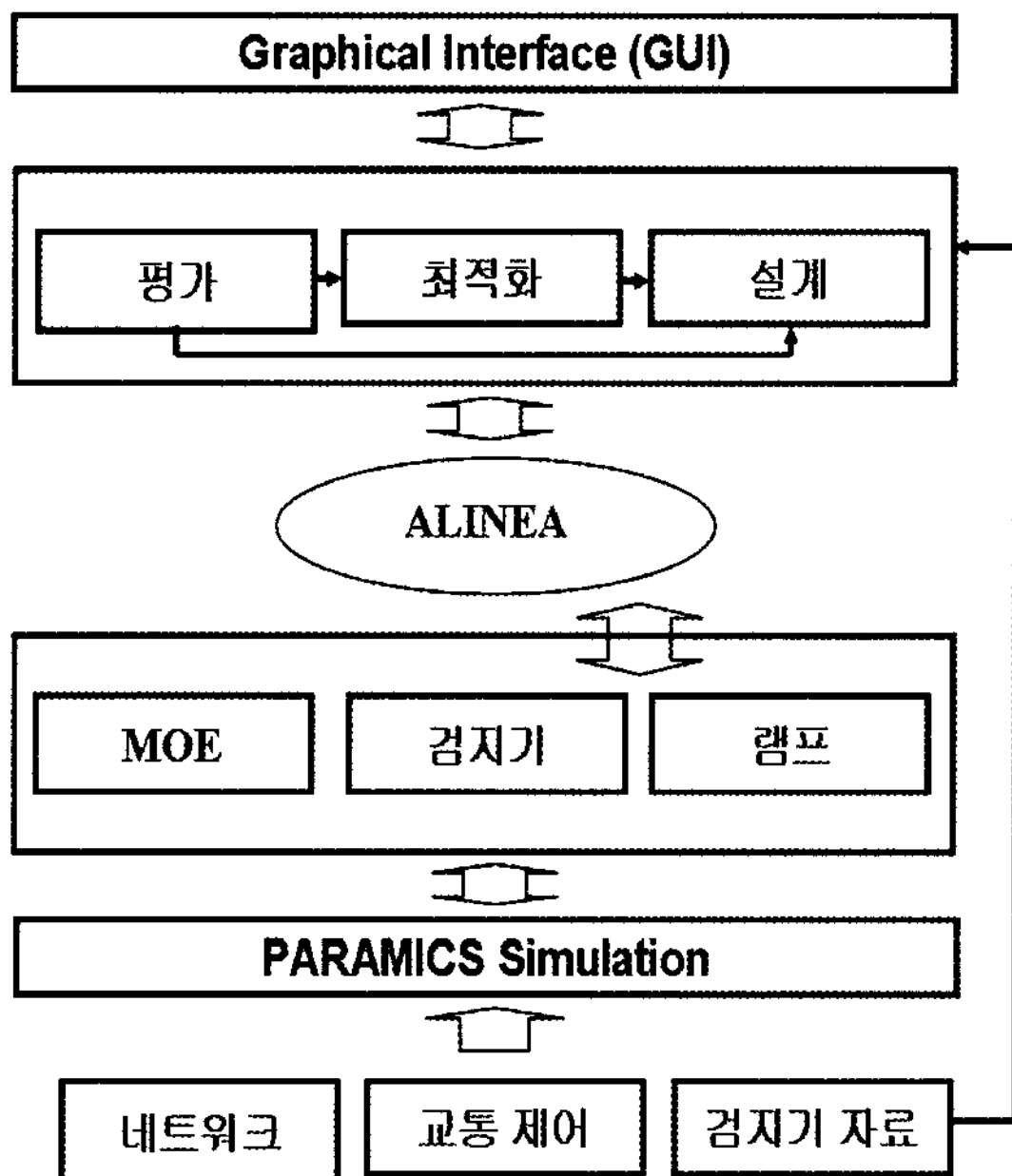


그림 4. PARAMICS API 와 ALINEA 알고리즘

4.1 효과 척도 (MOE)

교통 혼잡의 정도를 나타내는 효과척도 (Measure of Effectiveness)를 이용하여, 통계분석을 통해 선

정된 최적 검지기 설치 위치 지점한 검증을 실시하였다. 두 가지의 효과척도가 본 연구에서는 사용되었다. 첫째로, 평균 지체(average delay)이다. 이 척도는 축 분석 (corridor analysis)시에 주요하게 쓰인다. (NCHRP, 1999). 두 번째로는 평균 통행시간이다. 이것은 교통공학에서의 기본적인 효과척도로 널리 쓰인다. 검지기가 설치된 각 지점에 대한 이 두 효과척도의 값들은 램프미터링 운영 하에, 구해진다. 분석 구간의 총 길이는 램프구간을 포함하여 약 5mile 구간이다.

평균지체 (average delay)

PARAMICS는 시뮬레이션이 끝난 후 "General" 파일 안에 여러 가지 다양한 시뮬레이션 결과들을 제공한다. 이들 중 총 차량수와 총 통행시간에 대한 결과가 있다. 이들을 통해 차량 당 평균 지체를 산정하였다.

평균통행시간(average travel time)

링크별 통행시간을 산정하기 위해, link. dll API function을 개발하였다. 이 function을 PARAMICS에 Plugin 하면, 한 시간 시뮬레이션 동안 5분 단위의 링크별 차량 통행시간을 산출한다.

이전과 마찬가지로, 총 시뮬레이션 시간은 80분으로 설정되었고, 이중 처음 20분은 warm-up 시간으로 구성하였다. 최종 통계계산은 마지막 60분만 포함되었고, 시뮬레이션 결과에 대한 타당성을 위해 여러 가지 다른 seed number를 사용하여, 최종 값은 이들의 평균값들로 정하였다.

그림 1. 과 같이 검지기를 설치하였고, 각각의 경우, 예를 들어 하류부 검지기의 위치가 ML3과 같을 때의 평균 지체 및 평균 통행시간과 하류부 검지기의 위치가 ML6와 같을 때의 값들을 구한 후 결과를 비교하여 보았다. 아래의 결과는 총 구간 5mile에 ALINEA 램프미터링이 시행 하에 얻은 것이다.



표 4. 검지기별 평균지체 및 평균 통행 시간 결과

검지기	평균지체	평균 통행시간
ML3	13.41 분/대	1.53 분
ML4	13.41 분/대	1.51 분
ML5	12.33 분/대	1.39 분
ML6	13.38 분/대	1.57 분

두 가지 효과척도를 비교해본 결과, 통계검정 결과와 마찬가지로, 하류부 검지기의 위치가 ML5와 같을 때, 램프미터링의 효과를 최대화 시키는 것으로 나타났다.

5. 결론

일반적으로 고속도로 상에 설치된 루프검지기는 도로 포장면 안에 설치되기 때문에 일단 한번 설치되면 그 위치를 재설정하기 어려운 점이 있다. 따라서 설치 계획 단계에서부터 현재 와 장래 교통량을 정확히 예측하여 그 구간에서의 교통류 상태를 가장 잘 나타내줄 수 있는 위치를 설정하는 것이 교통의 원활한 흐름뿐만 아니라 교통관리 전략 측면에서 매우 중요하다. 특히, 램프미터링 실시를 계획 중인 곳에서는 더욱 그러하다.

램프미터링 실시의 효과는 램프교통량과 본선 하류부에서의 교통량 상태에 대한 정보가 얼마나 정확한가에 달려있다. 램프미터링의 효과를 극대화하기 위해 최적의 하류부 검지기 설치 위치를 기본적인 통계 분석을 통해 본선 구간의 교통류 상태의 동질성을 파악하여 고속도로 구간에서 하류부 검지기 설치 위치 산정하였다. 교통 시뮬레이션 모형을 주요 분석 도구로 사용하였으며, 결과의 타당성을 위해 연구구간에서의 본선과 램프구간에 대한 실제 연평균 일일교통량을 사용하였다. 램프미터링 알고리즘으로 ALINEA를 사용하였다. 검지기 설치 위치 산정은 통계분석을 통해 도로 구간별 교통류 특성에 매우 의존하고 있음을 규명하였다.

감사의 글

본 논문은 명지대학교 교내 연구지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Quadstone Ltd. PARAMICS Modeller V.5.1 User Guide. 2005
- Robert V. Hogg. "Probability and Statistical Inferences." Prentice Hall, 1993
- Transportation Research Board. Highway Capacity Manual, 2001
- Gray B. Thomas and J. E. Upchurch. "Simulation of Detector Locations on an Arterial Street Management System". Mid-Continent Transportation Symposium 2000.
- Transportation Research Board. Quantifying Congestion Volume 1 Final Report. National Cooperative Highway Research Program Report 398.
- Sisiopiku V. P and Roupail, N, M. "Analysis of correlation between arterial travel time and detector data from simulation and field studies." *Transportation research record 1457, pp166-173. 1994.*

접 수 일: 2008. 4. 28

심 사 일: 2008. 4. 29

심사완료일: 2008. 5. 14