

차로간 Queue 불균형을 고려한 Toll Plaza 본선미터링 전략

장성훈¹ · 이용관² · 고승영¹ · 이청원^{1*}

¹ 서울대학교 건설환경공학부, ² 서울대학교 건설환경종합연구소

A Mainline Metering Strategy at Toll Plaza Considering Queue Imbalance Among Lanes

JANG, Sunghoon¹ · LEE, Yong-Gwan² · KHO, Seung-Young¹ · LEE, Chungwon^{1*}

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

² Integrated Research Institute of Construction and Environment, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

Abstract

This study aims to develop a mainline metering strategy considering queue imbalance among lanes that can reduce congestion at a toll plaza section by managing queue caused by mainline metering. The suggested strategy considers simultaneously optimizing the number of cars in merging area and managing queue by lane. This study analyzes the effectiveness of the strategy with respect to the average travel time and the occurrence rate of spillback using the PARAMICS. The results show that the suggested strategy has an effect on reducing congestion and improving operation efficiency at toll plaza. In particular, the congestion become more intensified when the length of waiting space is shorter; however, this study shows that the suggested strategy can relieve the congestion in that condition.

본 연구는 Toll Plaza에서 본선미터링 시행으로 인해 야기되는 대기행렬로 인한 평균통행시간 증가와 요금소 서비스 용량 저하를 완화하기 위해 차로간 대기행렬의 균형을 추가적으로 고려한 제어전략을 제시하고 효과를 분석한다. 본 연구에서 제시된 전략은 합류부에 존재하는 차량 수의 최적화와 차로별 대기행렬 제어를 동시에 고려하며, 전략의 효과를 분석하기 위해 PARAMICS를 이용한 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 미시행시 및 기존연구의 전략과 비교한 결과, toll plaza 구간에서 평균통행시간 감소에 효과가 있는 것으로 분석되었으며, spillback 발생비율을 감소시킴으로써 요금소 서비스 용량도 개선되는 것으로 나타났다. 특히 대기공간의 길이가 짧을수록 혼잡이 심해지는데, 본 연구의 알고리즘을 통해 이를 해소할 수 있음을 보였다.

Keywords

ALINEA, mainline metering, queue management, spillback, toll plaza
ALINEA, 본선미터링, 대기행렬 제어, Spillback, 톨플라자

* : Corresponding Author
chungwon@snu.ac.kr, Phone: +82-2-880-7368, Fax: +82-2-873-2684

Received 3 February 2014, Accepted 2 November 2014

서론

1. 연구의 배경 및 목적

1970년 경부고속도로가 개통된 이래로 우리나라의 고속도로 이용차량은 지속적으로 증가해 왔다. 이에 따라 고속도로 연간 혼잡비용은 2000년도 이후에 연평균 4.58%의 가파른 증가세를 보이며 2010년 기준, 약 3 조원에 이르렀다(Cho et al., 2013).

고속도로 본선의 toll plaza는 고속도로를 이용하는 차량의 정체가 발생하는 주요 지점으로써, 특히 toll plaza 하류부에서 차로수가 감소함에 따라 병목현상이 발생하여 혼잡을 야기하고 이는 고속도로 본선 전체의 기능을 저하시킨다. Toll plaza 용량 증대를 통하여 이러한 혼잡을 감소시키는 것은 한계가 있으므로 최근 toll plaza 본선미터링이 미국을 비롯한 세계 각지에서 활발하게 도입되고 있다.

Toll plaza 본선미터링은 고속도로 본선부의 정체를 감소시킬 수 있음에도 불구하고, 신호제어로 인하여 대기행렬이 발생하는 단점이 있다. 대기행렬이 요금소까지 증가할 경우 이는 요금소 서비스 시간을 증가시켜 요금소 서비스 용량의 감소를 야기하고, 요금소를 넘어서 증가하면 toll plaza로 진입하는 차량들의 분류를 제한함으로써 toll plaza 구간 통행시간을 증가시켜 본선미터링의 효과를 상쇄한다. 특히 차로간 대기행렬의 불균형이 발생하면 특정 차로의 대기행렬이 심각하게 증가함에 따라 이러한 문제의 심각도가 더 높아진다. 국내의 toll plaza의 경우 요금징수체계가 자동징수체계(Hi-pass)와 수동징수체계(toll collection system, TCS)로 나뉘는데, 2012년 기준으로 하이패스 보급율은 47%, 고속도로 통행 차량 가운데 하이패스 이용차량은 전국 기준으로 56.6%, 수도권 기준 62%로 나타나(Korea Expressway Corporation, 2012) 전체 이용차량의 절반에 가까운 약 40%의 차량은 여전히 수동징수창구를 이용하며, 이는 차로별 대기행렬 길이의 불균형(두 징수체계 간, 또는 동일 징수체계 간)을 야기한다. 또한, 현재 본선미터링을 적용하고 있는 해외사례와 비교하였을 경우, 국내 요금소에서 신호등까지 저장공간의 길이가 짧아 대기행렬이 쉽게 요금소를 넘어서 증가할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 징수체계의 차이에 따른 각 차

로별 대기행렬을 고려한 toll plaza 본선미터링을 시행하여 toll plaza 구간의 평균통행시간을 감소시키고 요금소의 서비스 용량을 높이는 방안을 모색하고자 한다.

2. 연구의 범위

본 연구에서는 merging area의 차량 수를 최적화하는 기존의 toll plaza 본선미터링 전략에(Papageorgiou, 2008) 차로간 대기행렬 불균형을 고려한 전략을 추가로 반영함으로써 toll plaza 구간의 통과시간을 최소화하고, 신호제어로 인한 대기행렬이 요금소까지 증가하는 spillback 발생을 최소화하고자 한다. 이는 기존 본선미터링 시스템과 비교하여 인프라 구축비용이 거의 차이가 나지 않는다는 장점이 있으며, 국내 기하구조의 특성을 고려한 본선미터링 도입 근거를 마련할 수 있다. 본선미터링 전략은 가장 효과적으로 통과교통량을 증가시킬 수 있는 Asservissement Linéaire d'Entrée Autoroutière (ALINEA)를 기반으로 개발한다.

연구의 방법은 본선미터링에 관한 연구를 검토하여 이를 바탕으로 알고리즘을 설정하고, 다양한 시나리오별 평균통행시간, spillback 발생비용 등의 변화를 분석한다. 이를 위해 미시적 교통 시뮬레이션 프로그램인 PARAMICS를 활용하여 대기행렬 길이를 고려한 본선미터링 도입의 효과 및 적용성을 제시하였으며, 구체적인 제어 전략은 application programming interface(API)를 통하여 구현한다.

이론적 배경 및 관련연구 고찰

1. 본선미터링의 정의

본선미터링이란 고속도로 본선에서 발생하는 교통량 집중 또는 병목으로 인한 정체를 개선하기 위해 신호운영을 통한 교통수요를 제어하는 교통관리기법으로 본선부에서 신호운영으로 인한 지체가 발생되나, 정체지점에서 교통류 와해가 발생되기 전 교통수요를 제어하여 정체지점을 분산시킴으로써 특정 지점에서 심각한 지체가 발생하는 것을 예방하는데 목적이 있다. 이에 따라 본선 제어 시행구간에서의 통과교통량, 통행시간, 지체 등의 개선이 가능하다(Haboian, 1993; MacCalden, 1985; Saita et al., 2002).

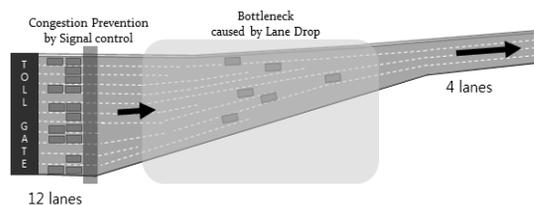


Figure 1. Mainline metering at toll plaza

본선미터링은 본선 신호제어가 이루어지는 지점이 toll plaza 하류부에 위치한 합류부 시작지점, 고속도로간 연결로, 요금소, 터널 및 교량 시작지점 등으로 다양하며, 이에 따라 다음과 같이 크게 4가지로 구분된다(Haboian, 1993).

- Toll plaza 본선미터링
- 분기점 연결로 본선미터링
- 영업소(연결로) 본선미터링
- 기타 정체유발지점(교량, 터널 등) 본선미터링

이 중에서 toll plaza 본선미터링은 본선미터링의 가장 일반적인 형태로써, Figure 1에서 보듯이 toll plaza 하류부에서 차로 수의 감소로 인하여 발생하는 지체를 감소시키기 위하여 신호제어를 통해 merging area의 차량 수를 조절, 정체발생을 완화시키는 교통관리기법이다.

2. 국내의 본선미터링 관련 연구

본선미터링은 현재 국내의 다양한 지점에서 시행되고 있으며, 평균속도 및 통과교통량 등의 측면에서 그 효과가 입증되었다.

Toll plaza 본선미터링을 운영 중인 대표적인 곳으로 미국의 샌프란시스코 Bay Bridge가 있다(Figure 2).¹⁾ 해당 지역에서는 과도한 통행량으로 인한 상습정체를 예방하고자 1974년부터 본선미터링을 운영 중이다. 병목 지점 하류부에 설치된 검지기로부터 수집된 점유율 수준에 따라 미터링 여부를 결정하며, 미터링 비율은 합류부의 용량과 대기공간을 고려하여 결정된다. 신호제어는 주로 오전 및 오후 첨두시에 운영되며, 시작 및 종료 시기와 미터링 비율은 경험적인 방법에 따라 결정된다. 대기행렬의 한계치를 30분으로 설정하여 운영하고 있으며, 통과교통량 15% 이상 증가, 정체지점의 통행시간 3분

이상 감소, 사고건수 감소 등의 효과를 얻은 것으로 분석되었다(Haboian, 1993).

분기점 연결로 본선미터링은 분기점 연결로에서 차로 수 감소로 인한 병목에서의 정체를 감소하기 위해 시행하는 미터링 전략으로, 미국 Minnesota 주에서는 1971년을 기준으로 총 50개의 고속도로 연결로에서 고속도로간 본선미터링이 운영되었다(Figure 3).²⁾ 이는 고속도로간 본선미터링으로 교통류 왜해 방지 등 질적 향상과 함께 도로간 교통량 불균형 해소에도 큰 효과가 있는 것으로 분석되었다(Haboian, 1993).

연결로 영업소 서비스 창구 수 제어는 본선의 정체완

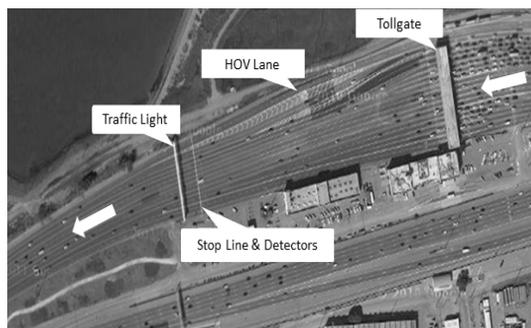


Figure 2. Mainline metering at toll plaza (Oakland Bay Bridge, San Francisco, U.S.)

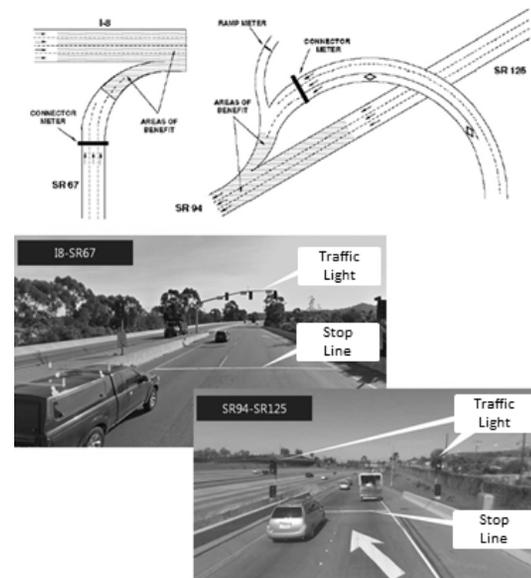


Figure 3. Mainline metering at junction (Minnesota, U.S.)

1) 자료: 구글 인터넷지도, 2011년 8월 24일 접속
 2) 자료: Haboian, 1993; 구글 인터넷지도, 2011년 8월 24일 접속

화를 위해 진입연결로 폐쇄와 영업소 창구수를 제한하는 방식으로(Figure 4), 한국도로공사는 경부선 등 4개 구간에서는 명절 특별수송대책에 따른 요금소 진입교통량 조절을 총 18개 요금소에 대하여 각 요금소별 기준을 산정하여 운영하고 있다. 진입도로 정체상황과 요금소 용량을 고려해 단계별 진입가능 요금소 수를 제시하고 있는데 본선미터링의 시행 기준을 교통상태에 따라 1, 2단계 및 해제 등 3개 단계로 나누어 시행하고 시행절차는 조절분석(진입교통량 산정 및 전·후방구간 통행속도 측정), 조절판단(통제여부 판단), 조절시행(통제지시 및 시행), 해제 등의 순서를 따라서 수행한다. 시행 결과 통제 평균 통행속도가 9.7km/h 증가한 것으로 분석되었다(Korea Expressway Corporation, 2012).

정제유발지점 본선미터링의 대표적인 예로 Hampton Roads Bridge-Tunnel를 들 수 있다(Figure 5).³⁾ 해당구간에서는 과도한 정체와 그로 인한 터널내부 온도상승 및 심각한 일산화탄소 오염을 방지하기 위하여 상류

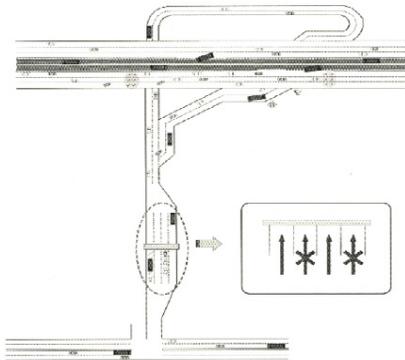


Figure 4. Mainline metering at tollbooth (Korea Expressway Corporation, 2012)

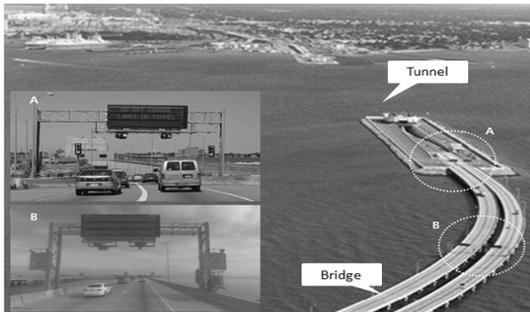


Figure 5. Mainline metering at areas causing traffic congestion (Hampton roads bridge-tunnel, Virginia, U.S.)

부를 신호제어하고 있으며, 터널 내 차량의 속도가 15mph 이하로 정체가 발생하는 경우 신호제어를 통해 터널 진입을 차단하며, 미터링 비율에 따라 진입교통량이 결정된다. 본선미터링이 적용된 이후 터널 내 교통류를 안정적인 상태로 유지할 수 있었으며, 터널과 교량으로 연결되는 구간의 통과교통량 또한 증가하였다. 정체로 인해 터널내부의 폐쇄된 공간에서 차량들이 과도한 시간동안 대기하는 상황이 해소되었으며, 터널 내 온도상승과 일산화탄소 오염의 개선이 확인되었다(Haboian, 1993).

본선미터링에 대한 연구는 그 중요성에 비해 관련 연구가 매우 제한되어 있다. 기존의 본선미터링 기법은 대부분 경험적 판단에 근거하여 시행되어 그 이론적 배경이 매우 약하다고 볼 수 있다.

Papageorgiou et al.(2008)는 현재 toll plaza 본선미터링을 적용 중인 미국의 San Francisco Bay Bridge를 대상으로 merging area의 최적 차량수를 유지하도록 merging area control 전략을 통하여, 합류부에서 교통류 와해가 발생되기 전 교통수요를 제어하여 정체지점을 분산시킴으로써 병목지점에서 심각한 지체가 발생하는 것을 예방하고자 ALINEA에 기반한 본선미터링 전략을 구축하였다.

$$r(k) = r(k-1) + K_R(\hat{N} - N(k)) \quad (1)$$

$$r_i(k) = r(k)/M \quad (2)$$

$r(k)$: k 지점에서의 metering rate

$r_i(k)$: k 지점 i 차로에서의 metering rate

K_R : 조정계수

$N(k)$: 합류부의 차량 수

\hat{N} : 합류부 통과시간을 최소화 하는 최적 차량 수

M : Number of lanes

시뮬레이션 수행 결과, 미시행시 대비 평균 차량 지체가 약 50% 감소하였다. 그러나 ALINEA 기반의 전략은 대기행렬의 발생 및 확산에 대한 직접적인 고려가 없어 혼잡이 심화될 경우 효과적으로 대응하지 못하는 단점이 있으며(Kim, 2003), 차로간의 대기행렬의 불균형을 고려하지도 못하였다. 또한, 요금소 하류부만을 대상으로 분석을 수행함으로써 spillback과 같이 대기행렬이 요

3) 자료: 구글 인터넷지도, 2011년 8월 24일 접속

금소 상류부에 미치는 영향을 고려하지 못하였다. 또한 요금소가 자동징수체계와 수동징수체계로 구분되어 있는 경우 차량들이 본선에서 toll plaza로 진입할 때 각 차량은 각각에 적합한 징수체계를 선택하기 위해 차선을 변경하는데(diverging behavior), 차로간 대기행렬의 불균형이 발생하여 특정 차로의 대기행렬이 심각하게 발생하면 이러한 차량들의 diverging behavior를 제한하여, 통행시간을 증가시키고 이는 toll plaza의 운영효율성을 저해하는 원인이 된다.

따라서 본 연구에서는 toll plaza 본선미터링 시행 시 차로간 대기행렬의 균형을 고려한 본선미터링 알고리즘 전략을 수립하여 toll plaza 구간의 평균통행시간을 감소시키고 요금소 서비스 용량을 높이고자 한다. 이를 위해 미시적 교통 시뮬레이션인 PARAMICS를 통하여 제시된 전략의 개선효과를 검증한다.

방법론

1. 연구 절차

본 연구는 Figure 6과 같은 절차로 이루어졌다. 차로별 대기행렬을 고려한 본선미터링 알고리즘을 개발하기 위해 먼저 기존의 알고리즘을 검토하여 기본 본선미터링 알고리즘(ALINEA)을 선정하였다. 다음으로 ALINEA 알고리즘에 차로별 대기행렬을 고려한 부분을 추가하여 새로운 알고리즘을 구축하였고 시뮬레이션을 통해 그 효과를 분석하였다.

2. 알고리즘 구축

본 연구에서는 Papageorgiou et al.(2008)이 제안한 기존의 merging area control 전략에 queue management 전략(queue control, queue override)을 추가로 고려하여 차로간 대기행렬 불균형을 고려한 toll plaza 신호 제어 알고리즘을 개발하였다.

가장 효과적인 queue management 방법 중 하나는 차로별로 대기공간(요금소에서 신호정지대기선까지 공간)에 대기행렬이 가득 찰 때를 최적으로 판단하고 이를 기준으로 차로별 미터링률을 조정하는 것이다(queue control). 이를 위해 차로 별 요금소와 신호등 사이 저장공간에 허용가능한 최대차량수를 결정하여 저장공간의

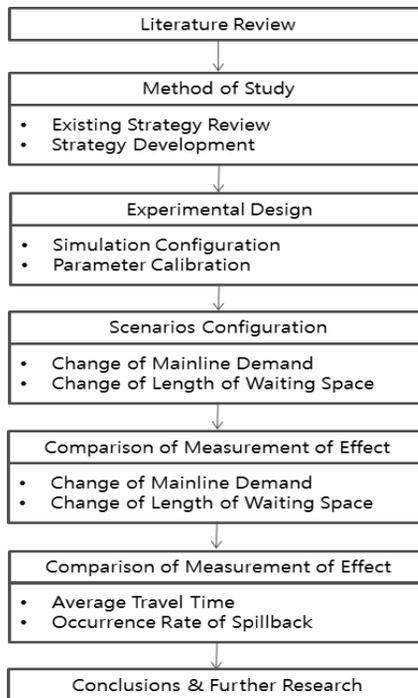


Figure 6. Study process

차량 수를 통해 미터링률을 산출한다(Smaragdis et al., 2003).

대기행렬 차량 수는 대기공간으로 들어오는 차량과 나가는 차량을 감지하여 산출한다.Queue control은 차로별 감지자료를 바탕으로 실시간 미터링률을 결정해야 하기 때문에 실제 현장 적용이 어렵다는 단점이 있지만, 선행연구에서 queue override 전략에 비해 향상된 개선효과를 나타내었다(Gordon, 1996).

$$w_i(k+1) = w_i(k) + T[d_i(k) - r_i'(k)] \tag{3}$$

$w(k)$: 대기행렬 길이(대)

$d(k)$: 대기공간 진입 교통류율

$r'(k)$: 대기공간 진출 교통류율

i : i 번째 차로

T : 제어 주기

$$r_i'(k) = -\frac{1}{T}[\hat{w} - w_i(k)] + d_i(k-1) \tag{4}$$

\hat{w} : 최대 허용가능 대기행렬 길이(대)

신호제어로 인한 대기행렬이 요금소를 넘어서 증가하

지 않도록 조절하기 위하여 queue override 전략을 수립 하였다. queue override 전략이란 요금소 진출지점 차로 의 겹지기 점유율이 일정 수준 이상으로 넘어서면 해당 차로에 대기행렬이 요금소까지 증가한 것으로 판단하고 이를 감소시키기 위하여 미터링률을 증가시키는 방법을 의미한다. 전략이 간단하기 때문에 현장적용이 용이하다.

최종적으로 차로별 미터링률을 적용하기 위하여, spillback이 발생하면 해당차로에 우선적으로 queue override 전략을 적용하여 대기행렬을 우선적으로 감소 시킨다. Spillback이 발생하지 않으면, merging area control과 queue control을 통하여 산출된 미터링률 중 더 큰 값을 적용하였다(Smaragdis et al., 2003; Papamichail and Papageorgiou, 2011).

$$R_i(k) = \text{Max}[r_i(k), r_i'(k)] \quad (5)$$

미터링률이 결정된 후 차로별 신호주기가 결정된다. 본 알고리즘에 사용된 램프미터링 방법은 Two Vehicle per One green으로 한 주기에 차량이 두 대씩 지나갈 수 있는 시간으로 고정되고(4초), 미터링률에 따라 신호 주기가 변동되는 방식이다. 또한 신호주기는 최댓값 및 최솟값을 고려하여 설정하게 된다. 차로별 신호주기

$C_i(k)$ 는 다음과 같이 계산되며 여기서 G 는 고정된 녹색 시간, R_i 은 최소 적색시간이다.

$$C_i(k) = 3600 * 2M / R_i(k) \quad (6)$$

$$C_i(k) = G + R_i \quad (7)$$

다음과 같은 과정을 모두 포함한 알고리즘의 수행 과정은 Figure 7과 같다.

실험 설계

1. 시뮬레이션 구성

본 연구에서 제시한 알고리즘의 효과 분석을 위해 PARAMICS를 통한 시뮬레이션이 수행되었다. 네트워크는 알고리즘 효과 분석을 위해 합류부에서 정체가 수시로 발생하는 서울외곽순환고속도로 김포요금소의 판교 방향으로 설정하였다. 해당 지역은 침두시에도 하류부 구간(노오지JC)에서 생성된 대기행렬이 toll plaza에 영향을 미치지 않으므로 본선미터링을 통한 개선효과를 얻을 수 있을 것으로 판단하였다. 네트워크 구성은 Figure

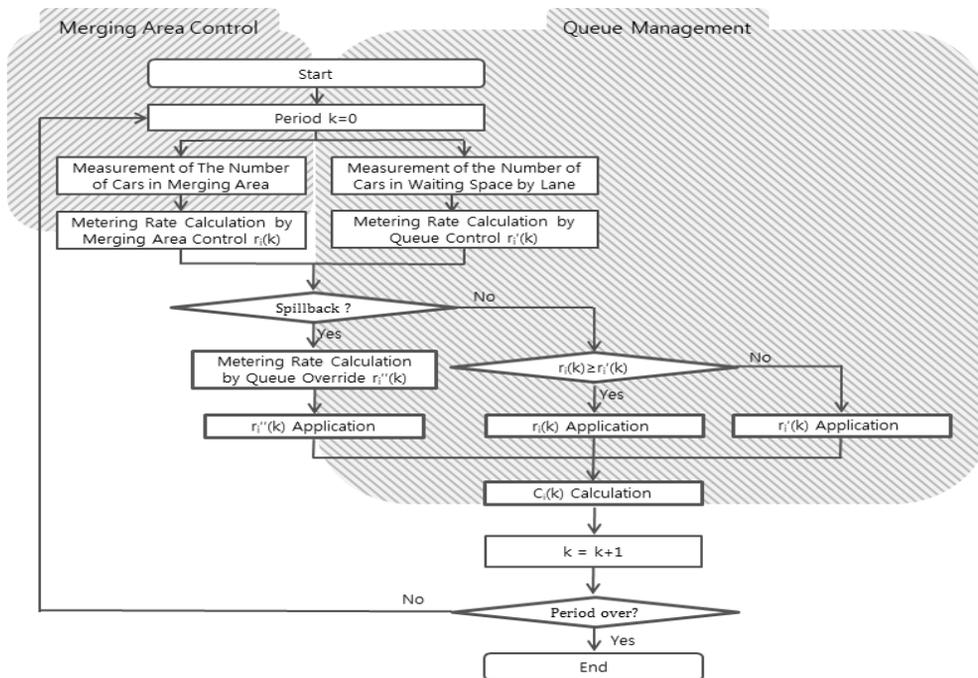


Figure 7. Suggested algorithm

8과 같다.

본선부 4차로의 설계속도는 현황자료에 근거하여 100km/h로 설정하였고, toll plaza 12차로의 설계속도는 마찬가지로 30km/h로 설정하였다.

신호대기정지선에서 합류부까지의 거리는 현재 본선 미터링을 시행 중인 샌프란시스코의 Bay Bridge의 사례를 참고하여 20m로 설정하였다.

시뮬레이션 시간은 현장의 오후 첨두지속시간을 근거로 하여 2시간으로 설정하였으며, random seed를 30회씩 실행하여 분석하였다. 시뮬레이션에서 차량들이 네트워크에 진입하여 안정화되기 위한 warm-up time은 40분으로 설정하였다. 또한 profile 기능을 통해 교통량이 서서히 증가하였다가 용량수준의 교통량을 30분 유지하고 다시 감소하도록 설계하였다.

PARAMICS에서는 차로별 신호제어 기능을 제공하지 않으므로, API의 lane closure 코드를 통하여 차로별 신호제어를 구현하였다.

그 외에 차량의 lane changing behavior와 관련하여 PARAMICS의 next-lane allocation과 lane-choice rule 기능은 선행연구를 참고하여 설정하였다(Nezamuddin and Al-Deek, 2008).

2. 정산

시뮬레이션 분석의 정확성을 높이기 위해서는 시뮬레이션 모델의 정산과정이 필요하다. 본 연구의 정산과정

은 시뮬레이션에 입력되는 교통현황 관련 변수들에 대한 부분과 알고리즘 관련 변수들에 대한 부분으로 이루어졌으며 현장자료를 기반으로 정산을 실시하였다.

먼저 시뮬레이션 입력 변수들과 관련하여, mean target headway는 현장 영상 자료를 바탕으로 측정한 결과 1.2초를 적용하였고, mean driver reaction time은 직접적인 측정이 어렵기 때문에 선행연구를 참고하여 그 값을 0.6초로 적용하였다(May, 1992). 또한 요금소의 특징을 표현하기 위하여 차량들의 차구별 이용비율을 현장 자료에 맞추어 조정하였으며(자동징수차구 비율 63%, 수동징수차구 비율 37%, 2013년 7월 4일 오후 첨두시 기준), 차량의 type에 따라 일반차량과 하이패스 차량으로 구분하였다. 요금소에서의 서비스 시간은 하이패스차량의 경우 0초, 일반차량의 경우 현장자료를 바탕으로 6초로 설정하였다.

시뮬레이션이 실제 현장을 얼마나 잘 묘사하고 있는지 판단하기 위해 첨두시와 비첨두시 실제 구간통행속도와 시뮬레이션 상의 구간통행속도를 확인하였다(2013년 7월 4일 목요일 기준). Table 1에서 보듯이 실제 구간통행속도보다 시뮬레이션 상의 구간통행속도가 조금 더 높게 나타났으나 약 0.6km/h(0.17m/s) 수준으로 분석을 수행하는 데 있어 큰 무리가 없는 수준이라고 판단하였다.

알고리즘 관련 변수들에 대한 정산은 세 가지 과정으로 나누어 진행하였다. 먼저 queue override 전략에 관련하여 선행연구를 참고, 차로별 신호제어로 인한 대기행렬이 요금소까지 증가하였는지를(spillback) 판단하는

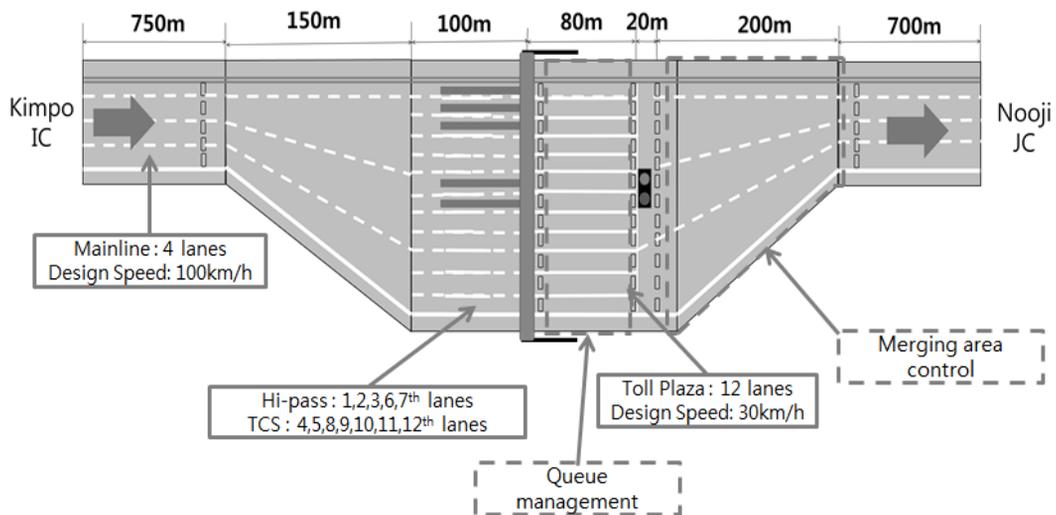


Figure 8. Simulation network

Table 1. Difference in observed and simulated speed

		(unit: km/h)			
Section	Traffic Volume	Observed Speed (A)	Simulated Speed (B)	Difference (B-A)	
Peak	Gimpo IC	6,365	22.12	22.57	0.45
-	Gimpo TG				
	Gimpo TG	6,221	25.45	26.02	0.57
-	Nooji JC				
Non-Peak	Gimpo IC	3,421	87.63	88.41	0.78
-	Gimpo TG				
	Gimpo TG	3,630	83.65	84.29	0.64
-	Nooji JC				

기준으로 차로별 요금소 진출지점 검지기의 점유율이 50% 이상일 때를 선정하였고, 그에 따른 queue override 미터링률을 1,300대/시로 적용하였다(Papamichail and Papageorgiou, 2011). Merging area의 통과시간을 최소로 하는 최적 차량수 및 대기공간에서의 차로별 최대 대기행렬 길이는 시뮬레이션 결과 각각 25대 및 14대로 설정하였다.

3. 시나리오 설정

본 연구에서 개발한 알고리즘의 효과분석 및 적용범위를 판단하기 위해 시나리오를 설정하였다. 본선의 교통수요 및 대기공간의 길이를 변화시키면서 알고리즘의 효과를 각각 평가하였다. 구체적인 시나리오 방안은 Table 2와 같다. 본선 교통수요의 경우 오후 첨두시 수요인 6,000대/시를 기준으로 3,000대/시에서 9,000대/시까지 수요를 1,000대씩 변화시키면서 총 7개의 시나리오를 적용, 수요가 적을 때와 많을 때를 종합적으로 분석하였다.

또한 대기행렬의 발생으로 인한 문제를 해결하기 위해서는 대기공간(wating space)이 충분해야 한다(Figure 9). 그러나 국내 toll plaza에서 대기공간의 길이는 80-100m로 현재 toll plaza 본선미터링을 시행 중인 샌프란시스코 Bay Bridge의 경우(약 250m)와 비교하여

Table 2. Set up scenario

Classification	Scenario	Number of cases
Mainline demand	3,000-9,000(vph)	7
Length of waiting space	40-280m	7

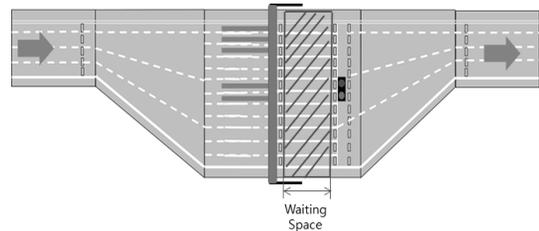


Figure 9. Waiting space

Table 3. Set up method

	No control	Merging area control	Queue management
Method 0 (No Control)	○	-	-
Method 1 (Papageorgiou, 2008)	○	○	-
Method 2 (This Study)	○	○	○

매우 짧은 편이다. 따라서 대기공간이 짧은 경우(국내)와 충분히 긴 경우(현재 본선미터링을 시행 중인 Bay Bridge)의 알고리즘 효과를 종합적으로 분석하기 위하여 오후 첨두 시 수요(6,000대/시)에 대하여 대기공간의 경우 현재 길이인 80m를 기준으로 40m에서 280m까지 40m씩 증가시켜 총 7개의 시나리오를 적용하였다(전체 구간의 길이를 일정하게 유지하기 위하여 대기공간 길이의 변화만큼 하류부의 길이를 변화시켰다).

각 시나리오에 대한 대안을 수립하기 위해 3개의 method를 설정하였다. Table 3에서 보듯이, method 0은 아무런 전략을 고려하지 않은 no control을 의미하고, method 1은 merging area control을 고려한 기존의 toll plaza 본선미터링 알고리즘이다(Papageorgiou et al., 2008). 마지막으로 method 2는 merging area control에 queue management를 추가로 고려한 본 연구의 알고리즘이다.

분석 결과

1. 수요의 변화에 따른 결과

수요의 변화에 따른 toll plaza 구간 평균통행시간 변

화는 Figure 10과 같다. 본 연구에서 제시한 method 2는 수요가 적을 때에는 method 0(미시행시)나 method 1(기존 연구)와 비교하여 큰 차이를 나타내지 않는다. 하지만 수요가 5,000대/시 이상이 되면서 평균통행시간 절감효과가 나타난다. 특히 수요가 5,000대/시에서 6,000대/시(대상구간 오후 침두시 수요) 일 때 평균통행시간이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

Method 1은 method 0에 비해서 평균통행시간이 오히려 증가되는 것으로 나타났는데, 이는 신호제어로 인한 대기행렬이 요금소를 지나서 길게 형성됨에 따라 toll plaza로 진입하는 차량들의 diverging behavior를 크게 제한하기 때문인 것으로 해석된다.

Table 4는 method 0 대비 수요에 따른 평균통행시간의 변화율을 나타낸 것이다. Method 1은 method 0에 비하여 통행시간이 증가하는 것으로 나타났고, method 2는 통행시간이 감소하는 것으로 나타나는데 특히 수요가 5,000-6,000대/시 일 때, 평균통행 시간이 method 0에 비해 약 10% 감소하는 것으로 나타났다.

수요가 너무 적거나 많으면 method 별 통행시간이 크게 차이가 나지 않는데, 이는 수요가 적을 때는 toll plaza 구간에서 지체가 거의 발생하지 않기 때문에 어 method를 적용하던지 큰 의미가 없는 것이고, 수요가 많을 때는 toll plaza 구간에서 용량초과의 상태로 차량들이 꽂 들어차 있기 때문에 어떤 method를 적용하던지 큰 효과가 없는 것으로 해석된다.

구간별 통행시간 변화를 알아보기 위하여 전체 분석 구간을 3개의 구간으로 나누었다. Figure 11에서 보듯

이, section 1은 toll plaza의 상류부, 즉 시작점부터 diverging area까지이고 section 2는 toll plaza 구간을 의미하여 section 3은 toll plaza의 하류부, 즉 merging area에서 종착점까지이다.

Section 1과 2에서 method 1을 적용했을 때 평균통행시간이 가장 높게 나타났는데, 이는 merging area control로 인한 대기행렬의 증가로 Toll Plaza 및 그 상류부에서 diverging behavior의 제한에 따른 지체가 발생되었기 때문으로 해석된다. Method 2를 적용했을 때 평균통행시간이 가장 적게 나왔는데, 이는 queue management 전략을 적용함으로써 toll plaza 및 그 상류부에서 발생하는 지체를 줄여서이기 때문으로 판단된다.

Section 3에서는 method 1을 적용하였을 때, 통행시간이 가장 적게 나타났는데, 이는 merging area control로 인하여 차량들이 merging area를 통과하는데 걸리는 시간이 감소되었기 때문으로 판단된다.

Method 2 적용 시에는 method 0 적용 시 보다는 통행시간이 적게 나타났지만, method 1에 비해서는 높게 나타났는데 이는 대기행렬의 상태에 따라 미터링물이 결정된 경우 merging area를 통과하는 차량들 사이에 지체가 발생되었기 때문으로 해석된다.

차량 이용이 가장 많은 6번째 차로를 기준으로 각 method에 따른 spillback 발생비율을 살펴보았다(Figure 12). 먼저 각 method에 관계없이 수요가 증가하면 spillback 발생비율 또한 증가하는 것으로 나타났다. Method 1은 method 0에 비해서 spillback 발생비율이 더 높게 나타났는데 이는 merging area control로 인하여 생환 대기행렬이 추가적인 spillback을 야기시켰기 때문인 것으로 해석된다. method 2에서 spillback 발생 비율이 가장 적게 나타났는데, 이는 queue management 전략의 영향으로 spillback의 발생을 억제시켰기 때문인 것

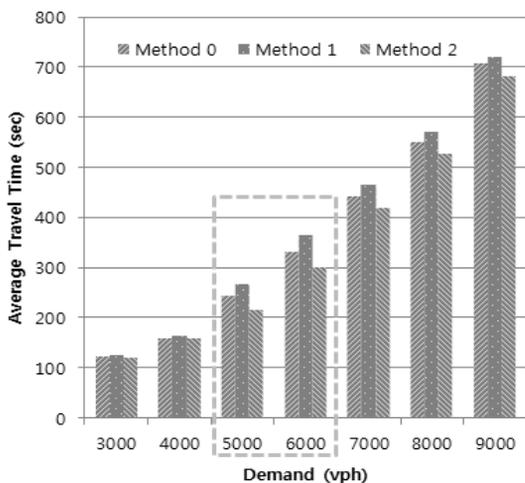


Figure 10. Change of average travel time by traffic demand

Table 4. Change rate of average travel time by traffic demand comparing to method 0

(unit: %)		
Demand (vph)	Method 1	Method 2
3,000	2.91	-2.54
4,000	2.92	-4.13
5,000	8.87	-11.73
6,000	9.62	-9.71
7,000	4.98	-5.25
8,000	3.68	-4.05
9,000	1.50	-2.64

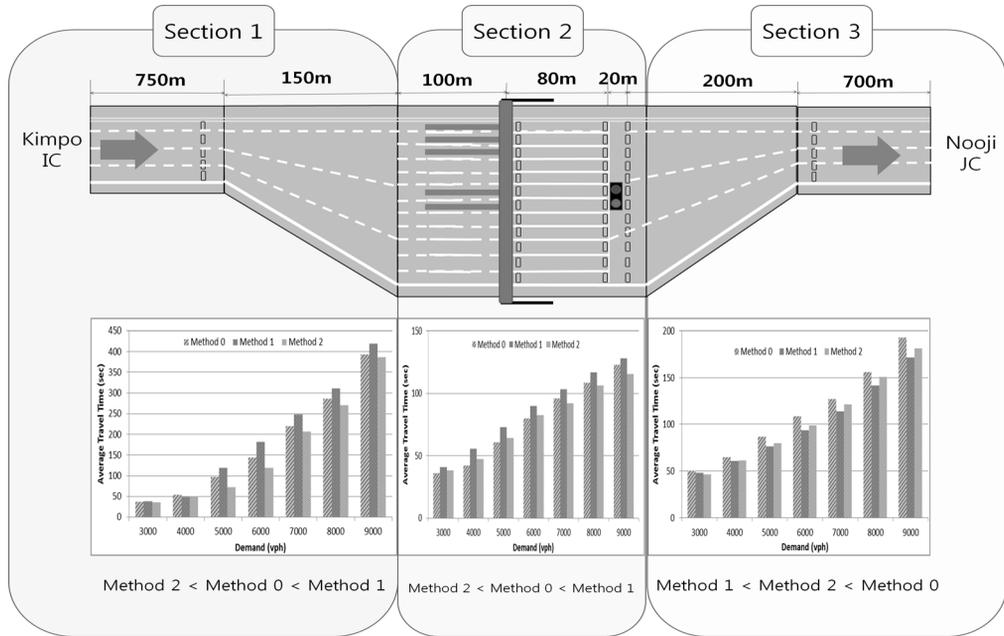


Figure 11. Change of average travel time by traffic demand for each section

으로 판단된다.

Method 2에서는 method 0과 비교하여 spillback 발생비율이 약 20~60% 정도 감소하였으며, 평균통행시간 결과와 마찬가지로 수요가 5,000대/시에서 6,000대/시 사이일 때 효과가 가장 크게 나타났다.

결론적으로, method 1을 적용 시 method 0와 비교하여 평균통행시간 및 spillback 발생비율 측면에서 모두 증가되는 것으로 나타났다. 이는 국내 요금소의 대기공간의 길이가 100m 이하로 짧기 때문에 merging area control시 추가적으로 발생하는 대기행렬의 영향에 따른 것으로 해석된다.

이에 비해 method 2에서는 method 0와 비교하여

평균통행시간 및 spillback 발생비율 측면에서 모두 감소되는 것으로 나타났다. 이는 기존의 merging area control 전략에 queue management 전략을 추가로 반영함으로써 신호제어로 인하여 생성되는 대기행렬을 제어했기 때문으로 판단된다. 특히, method 2는 수요가 5,000대/시에서 6,000대/시 일 때 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다.

2. 대기공간의 변화에 따른 결과

오후 침두시 수요 6,000대/시에 대하여 대기공간의 변화에 따른 평균통행시간의 변화를 관찰하였다. Figure

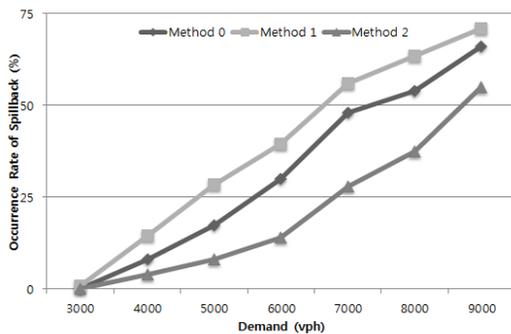


Figure 12. Occurrence rate of spillback by traffic demand

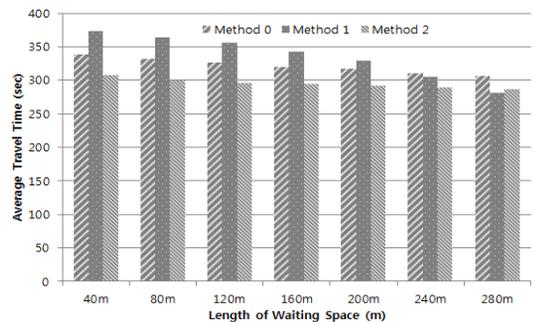


Figure 13. Change of average travel time by length of waiting area

13에서 보듯이, 대기공간이 적을 때에는 본 연구에서 제시한 method 2를 적용하였을 경우, 평균통행시간 측면에서 효과가 가장 뛰어났다. 하지만 대기공간이 충분히 긴 경우에는 method 1에서 충분한 평균통행시간 감소 효과가 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 대기공간이 짧을 때에는 신호제어로 인하여 발생한 대기행렬이 요금소를 넘어 증가하여 toll plaza로 진입하는 차량들의 diverging behavior를 크게 제한하여 통행시간 증가를 야기하지만, 대기공간이 증가함에 따라 이러한 현상이 크게 완화되기 때문으로 해석된다. 따라서 평균통행시간 측면에서 국내 toll plaza와 같이 대기공간이 적은 경우에는 본 연구에서 제시한 알고리즘이 가장 효과적이지만, 대기공간이 충분한 미국의 Bay Bridge와 같은 경우 (250m)에는 기존의 알고리즘도 충분한 효과를 낼 수 있을 것으로 해석된다.

요금소 창구 이용 차량수가 가장 많은 6번째 차로를 기준으로 대기공간 길이에 따른 spillback 발생비율을 살펴보았다. Figure 14에서 보듯이, 공통적으로 본 연구에서 제시한 알고리즘(method 2)을 적용하였을 때 spillback 발생비율이 가장 낮게 나왔다. 기존 연구 알고리즘(method 1)을 적용하였을 경우에는 대기공간이 적을 때 spillback 발생비율이 높게 나오지만 대기공간이 길어지면 많이 완화가 되는 것으로 나타났다.

대기공간 길이에 따른 분석 결과, 본 연구의 전략(method 2)을 적용했을 경우 대기공간의 길이에 따른 평균통과시간 및 spillback 발생 비율 측면에서 가장 좋은 효과를 갖는 것으로 나타났다. 특히 대기공간의 길이가 짧을수록 혼잡이 심각하게 발생하는데, 본 연구에서 제시한 전략을 통해 이를 완화시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 대기공간이 충분히 긴 경우, 기존 연구의 알고리즘(method 1) 적용 시에도, 특히 평균통행시간의

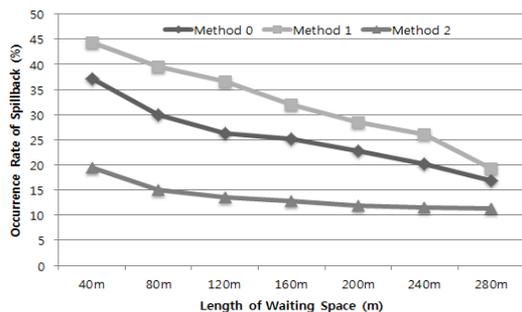


Figure 14. Occurrence rate of spillback by length of waiting area

측면에서, 좋은 효과를 갖는 것으로 분석되었다.

따라서 국내 toll plaza와 같이 대기공간의 길이가 부족한 경우에는 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용하는 것이 가장 좋은 효과를 갖지만, 만약 대기공간이 충분한 미국의 Bay Bridge의 경우에는 기존의 알고리즘으로도 좋은 효과를 갖는 것으로 해석된다. 이는 대기공간이 짧으면 신호제어로 인하여 발생하는 대기행렬이 차량의 분류행동을 크게 제한하여 평균통행시간을 늘리고 spillback 발생을 야기하는데 비하여 대기공간이 증가함에 따라 이러한 제한이 상당부분 완화된기 때문으로 판단된다.

결론 및 향후연구과제

1. 결론

본 연구에서는 기존의 Toll Plaza 본선미터링 전략의 문제점을 지적하고 이를 보완하여 차로별 대기행렬 제어를 고려하는 Toll Plaza 본선미터링 전략을 제시하고 이에 대한 효과를 현장자료를 통한 시뮬레이션 구현으로 검증하였다.

수요의 변화에 따른 분석 결과, 본 연구에서 제시된 알고리즘 적용 시 Toll Plaza를 이용하는 차량들의 평균통행시간을 낮추고, 신호제어로 인한 대기행렬이 요금소를 넘어서 형성되는 spillback 발생 비율도 감소하는 것으로 나타났다. 특히 수요가 5,000대/시에서 6,000대/시일 때 효과가 가장 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

대기공간의 길이에 따른 분석 결과, 대기공간이 짧을수록 혼잡이 심각하게 발생하는데 본 연구에서 제시한 본선미터링 전략을 통해 이를 완화시킬 수 있음을 보였다.

따라서 본 연구에서 제시된 알고리즘은 Toll Plaza에서 수요가 용량상태에 도달하는 첨두시간 대에 적용이 적합할 것으로 판단되며, Toll Plaza 대기공간의 길이를 증가시킨다면 더 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 결과는 기존 Toll Plaza 신호제어 전략의 단점을 보완한 차로별 대기행렬을 고려한 Toll Plaza 신호제어 전략을 제시, Toll Plaza에서의 원활한 교통 운영을 한다는 점에서 그 의의가 있다고 사료된다.

2. 향후 연구과제

본 연구에서는 다양한 본선미터링 기법 중 차로별 대

기행렬을 고려한 toll plaza 신호제어 알고리즘을 개발하였다. 평균통행시간과 spillback 발생비율을 통하여 효과를 평가하였으나 이외에도 연료소모량 및 배기가스 배출량의 변화를 고려하면 친환경적인 측면에서 검토가 가능할 것으로 예상된다. 또한 구간별 차량들의 속도표준편차를 통해 교통류의 안전성 측면에서도 검토가 가능할 것으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 toll plaza에서 운전자들의 요금소 창구 선택 행동에 따른 합류와 분류 과정에서 발생하는 지체를 완화시키는 신호제어 전략을 구축하였다. 따라서 운전자들의 요금소 창구선택 행동을 추가적으로 분석한다면, 창구 수 증가나 자동 및 수동 요금소의 위치 변화에 따른 다양한 분석들이 추가적으로 가능할 것으로 판단된다.

마지막으로, 본 연구는 toll plaza 구간을 중심으로 연구를 수행하였지만, 이를 확장하여 다른 고속도로 운영관리기법들, 램프미터링 및 variable speed limit (VSL)등, 과 함께 운영한다면 좀 더 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 toll plaza의 기하학적 요소 중에서 요금소와 신호등 사이의 대기공간의 길이에 따른 분석을 수행하였다. 향후 toll plaza의 다양한 기하학적 요소들을 대상으로 분석을 수행한다면 새로운 발견점을 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Cho H., Lee D., Kim Y. (2013), 2010 Traffic Congestion Costs : Estimation and Trend Analysis, The Korea Transport Institute.
- Eleftheriadou L., Ross R. P., McShane W. R. (1995), Probabilistic Nature of Breakdown at Freeway Merge Junctions, *Transportation Research Record*, 1484, 80-89.
- Gordon R. L. (1996), Algorithm for Controlling Spillback From Ramp Meters, *Transportation Research Record*, 1554, 162-171.
- Haboian A. K. (1993), Freeway Management Strategies, Executive Summary, Parsons Brinckerhoff, New York, NY.
- Kim T. (2003), Analysis of the Effectiveness of Freeway Ramp-Metering With Computer Simulation, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 23(6D), 785-792.
- Korea Expressway Corporation (2012), Analyzing Trial Effect for Entering Traffic Control at Tollbooth (고속도로 영업소 진입 교통량 조절 시행효과 분석).
- Kosmatopoulous E., Papageorgiou M., Hayden J., Higginson R., McCabe K., Rayman N. (2006), Real-time Estimation of the Critical Occupancy for Maximum Motorway Throughput, *Transportation Research Record*, 1959, 65-76.
- MacCalden, M.S. (1984), A Traffic Management System for the San Francisco-Oakland Bay Bridge, *Institute of Transportation Engineers Journal*, 54(5), 46-51.
- May A. D. (1992) Factors Affecting The Design of Dynamic Route Guidance Systems, 6th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, London, 158-162.
- Nezamuddin N., Al-Deek H. (2008), Developing Microscopic Toll Plaza and Toll Road Corridor Model With PARAMICS, *Transportation Research Record*, 2047, 100-110.
- Papageorgiou M., Hadj-Salem H., Blosseville J. M. (1991), ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering, *Transportation Research Record*, 1320, 58-64.
- Papageorgiou M., Hadj-Salem H., Middleham F. (1997), ALINEA Local Ramp Metering : Summary of Field Results, *Transportation Research Record*, 1603, 90-98.
- Papageorgiou M., Kosmatopoulous E., Papamichail I., Wang Y. (2007), ALINEA Maximises Freeway Throughput-an Answer to Flawed Criticism, *Traffic Engineering and Control*, 48, 271-276.
- Papageorgiou M., Papamichail I., Spiliopoulou A. D., Lentzakis A. F. (2008), Real-time Merging Traffic Control With Applications to Toll Plaza and Work Zone Management, *Transportation Research Part C*, 16, 535-553.
- Papamichail I., Papageorgiou M. (2011), Balancing of Queues or Waiting Times on Metered Dual-Branch On-Ramps, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(2), 438-452.
- Saita K., Fumitaka K., Masashi O., Takehiko D. (2002),

Establishment of HEROIN Hanshin Expressway Real-time Observation-based and Integrated Network Evaluator, The 9th ITS World Congress, Chicago, IL.

Smaragdis E., Manolis M., Papamichail I., Papageorgiou M. (2010), Queue Management Techniques for Metered Freeway On-Ramps, Transportation Research Record, 2178, 40-48.

Smaragdis E., Papageorgiou M. (2003), A Series of New Local Ramp Metering Strategies, Transportation Research Record, 1856, 74-86.

Smaragdis E., Papageorgiou M., Kosmatopoulos E. (2004), A Flow-Maximizing Adaptive Local Ramp Metering Strategy, Transportation Research Part B, 38, 251-270.

Takehiko Y., Okushima M., Uno N., Daito T. (2002), Evaluation of On Ramp Metering on Hanshin Expressway Using Traffic Simulator (HEROINE), The 9th ITS World Congress, Chicago, IL.

Vigos G., Papageorgiou M., Wang Y. (2008), Real-time Estimation of Vehicle Count Within Signalized Links, Transportation Research Part C, 16(1), 18-35.

http://www.ex.co.kr/portal/cus/public_relations/press_release/1196257_3960.jsp?clickNum=39&clickParentNum=4&pageURL=/portal/cus/public_relations/press_release/bodo_list

- ☞ 주 작 성 자 : 장성훈
- ☞ 교 신 저 자 : 이청원
- ☞ 논문투고일 : 2014. 2. 24
- ☞ 논문심사일 : 2014. 5. 14 (1차)
2014. 7. 9 (2차)
- ☞ 심사판정일 : 2014. 7. 9
- ☞ 반론접수기한 : 2015. 6. 30
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필