한국ITS학회논문지
제10권 제2호 (2011년 4월)
pp.9~21

진입제어 전략 적용 시 적정 운영영역 설정에 관한 연구

A Study on the Operation Boundary of Ramp Metering System

김 규 옥* (Kyu-Ok Kim) 박 준 형** (Joon-Hyeong Park) 박 지 은*** (Ji-Eun Park) 신 희 철**** (Hee-Cheol Shin)

요 약

첨두시 고속도로의 혼잡이 심각할 경우 수요와 용량을 조절하는 운영방안이 필요하다. 고속도로의 연결로에서 본선으로 진입하는 교통류가 본선의 용량을 초과하지 않도록 진입제어 시스템을 이용하여 혼잡을 감소시키고, 안전성을 증진시킬 수 있다. 본 연구에서는 램프부에 위치한 차량들을 본선의 교통상황을 고려하여 진입시키는 진입제어 전략을 보다 효과적으로 운영하기 위한 방안으로 진입제어 실시영역에 대하여 연구하였다. 본선의 교통상황에 따라 진입제어를 실시하거나 미실시하는 교통영역이 존재할 것이라 판단하고, 제어 불필요・제어 필요・제어 최소화 등으로 교통량 수준에 따라 진입 제어 전략이 운영될 수 있는 교통상황 영역을 도출하였다. 이를 위해 고속도로 본선 및 램프부의 교통량에 따라 시나리오를 수립하고 널리 이용되고 있는 진입제어 알고리즘 중의 하나인 ALINEA를 미시적 교통류 시뮬레이터에서 구현하여 모의실험을 수행하였다. 밀도와 평균속도를 효과척도로 하여 본선교통량과 본선으로 투입되는 교통량에 따라 진입제어를 운영해야하는 적정 교통수요 영역을 도출하였다. 분석결과, 본선의 교통량이 많아질수록 밀도는 감소하는 경향을 보이며 감소폭도 크게 산출되었다. 또한, 평균속도는 진입제어를 운영하는 것이 15%의 개선효과를 보였으며, 본선교통량이 3000~5000대/시이고 진입교통량이 700~900대/시일 때 통행속도의 증가폭이 크게 나타났다. 본 연구에서 도출된 교통수요 영역은 적정 진입제어 영역으로 볼 수 있으며 이에 따라 본선으로 진입하는 교통류를 제어할 경우 밀도와 평균속도 측면에서 유의미한 효과가 있을 것으로 판단된다.

Abstract

The ramp metering strategy is one of the effective ways to solve the freeway traffic congestion in peak time periods. The study was initiated with assurance that the traffic conditions of ramp and mainline that mitigate the congestion would exist. Under the moderate traffic volume levels, ramp metering is expected to improve the quality of freeway operation. To derive a range of traffic condition, three operation strategies(Do nothing, ramp metering, minimum ramp control) were set up and the ALINEA algorithm was implemented with microscopic traffic simulator “VISSIM”. The volumes of mainline and ramp are key parameters for the simulation scenarios. Measures of effectiveness for the study include mainline density and average vehicle speed. Operation boundaries in terms of traffic volume were proposed for operating ramp metering strategy. The results show that under the proposed traffic conditions the ramp metering was more successful to increase average vehicle speeds. Traffic controls under the operation boundaries of traffic levels give significant effects for density and average vehicle speed. The outcomes of this study would be useful to improve the performance of ramp metering strategies.

Key words : Ramp metering, ALINEA algorithm, operation boundary, ramp management and control, microscopic simulation

† 본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.(스마트하이웨이사업(07기술혁신A01))
* 주저자 : 한국교통연구원 글로벌녹색융합연구본부 연구위원
** 공저자 : 한국교통연구원 글로벌녹색융합연구본부 연구원
*** 공저자 : 한국교통연구원 도로연구실 前연구원
**** 공저자 및 교신저자 : 한국교통연구원 도로연구실 연구위원
† 논문접수일 : 2010년 12월 15일
† 논문심사일 : 2011년 1월 26일(1차), 2011년 3월 14일(2차)
† 논문접수일 : 2011년 3월 15일

Ⅰ. 서 론

최근 지역간 교통수요가 급증함에 따라 교통 혼잡 문제가 심각해지고 있는 실정이다. 특히, 첨두시의 고속도로는 포화상태에 달하여 운전자들이 잦은 지·정체 현상을 겪고 있어 통행에 어려움이 있는 상황이다. 이러한 교통 혼잡 문제를 해결하기 위해서는 수요와 용량을 조절하는 운영 방안이 필요하다. 고속도로의 수요관리를 목적으로 연결로에서 본선으로 진입하는 교통류가 본선의 용량을 초과하지 않도록 진입 제어시스템을 이용하여 혼잡을 감소시키고, 안전성을 확보하도록 할 수 있다. 고속도로 유입부의 유입 교통량을 조절하는 교통류 제어기법 중 하나인 진입제어시스템은 현재 다양한 전략과 알고리즘이 개발되어 미국 캘리포니아 미네소타, 애리조나와 유럽지역 등에서 운영되고 있다. 국내에서는 경부고속도로와 서울시 도시고속도로인 내부순환로 월곡, 홍은, 홍제 등의 진입램프를 비롯하여 12개소에 시범적으로 진입제어 시스템을 구축하였으나, 국내 교통 상황 상 현재는 시스템이 운영되지 못하고 있다. 다만, 최근 서울외곽순환고속도로 중동 IC 의 현장시험을 통해 개선효과가 나타나면서 진입제어시스템의 효과적인 운영 방안 등을 도입 검토 하고 있는 상황이다.

본 연구는 연결로에서 고속도로 본선으로 진입하려는 차량들을 대상으로 본선 교통상황을 고려하여 진입시키기 위해 신호제어를 수행하는 진입제어 전략을 보다 효과적으로 운영하기 위한 교통수요 영역에 대해 연구하였다. 기존의 국내 연구에서는 연결로에서 본선으로 진입시키는 제어 전략의 방법론에 대한 연구와 방법론을 개선하는 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 본 연구에서는 기존에 개발된 진입제어 알고리즘의 효과적인 운영방법 및 운영영역에 대한 연구를 수행하였다. 진입제어 알고리즘은 지체 최소화, 통과교통량의 최대화, 본선진입 최대화 등의 다양한 목적에 따라 운영될 수 있으며 교통상황에 맞게 운영되기 위한 기준이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 본선의 교통상황에 따라서 진입제어를 실시 또는 진입제어의 실시가 불필요한 영역이 존재 할 것이라고 판단하고, 제어 불필요, 제어 필요, 제어 최소화 등으로 교통량 수준에 따라 진입 제어전략이 운영될 수 있는 교통상황 영역을 도출하였다. 이를 위해 고속도로 본선 교통량과 진입 교통량의 수준에 따라 시나리오를 수립하고, 미시적 교통류 시뮬레이터인 VISSIM을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 본선 교통류의 밀도와 평균속도를 효과척도로 설정하고 고속도로 진입부에서 진입제어 전략을 실시하는데 필요한 적정 운영영역을 제시하였다.

Ⅱ. 기존 이론 및 관련연구 고찰

1. 국내외 램프미터링 기법 발전동향

램프미터링은 크게 지역 램프미터링과 시스템 램프 미터링으로 구분된다. 지역 램프미터링은 인근의 고속도로 축과 독립적으로 운영되는 것으로 주로 첨두시간대에 교통수요가 많은 대도시 지역에서 고속도로로의 진입율을 제어하기 위해 사용된다. 시스템 미터링은 개별 램프를 하나의 운영시스템으로 통합하여 고속도로 전체 축의 교통흐름을 개선하기 위해 사용된다. 국내에서는 램프미터링의 운영 경험이 거의 전무하기 때문에 단계별로 추진할 필요가 있으며, 우선 효율적으로 램프를 운영할 수 있는 지역 램프미터링 시스템이 개발되고 연속된 램프들을 연계하여 운영하는 시스템 램프미터링 시스템을 개발 및 도입하는 것이 바람직할 것이다.

램프미터링을 현장에서 구현하기 위한 교통시설을 구축하는 데에는 기술적으로 큰 어려움이 없으나 램프미터링 전략을 수립하는 데에는 지역적, 도로기하구조적, 교통특성 등의 환경적인 요인들을 고려해야 한다. 기존의 다양한 연구결과를 검토한 결과 국내에 적용 가능한 지역 램프미터링 알고리즘은 유럽의 대부분 국가에서 사용하고 있는 ALINEA 알고리즘이 적절하다고 판단되었다. 다만 국내의 지역적, 교통특성을 고려하여 독자적인 램프미터링 알고리즘과 구축전략에 대한 연구가 시급하다. 국내외의 고속도로 진출입제어 시스템 발전동향을 연대별로 정리하여 <표 1>에 제시하였다.

〈표 1〉 연대별 고속도로 진입제어 시스템 발전 동향
〈Table 1〉 Developments of freeway ramp metering systems

연대별	발전 동향
1960년대	- 디트로이트, 시카고에서 루프검지기와 CCTV를 이용한 고속도로 감시 및 제어 시스템에 대한 연구개발이 시작되어 고속도로 차로제어 표시, 가변속도 표지, 고정식 램프미터링, 램프폐쇄 등의 다양한 시스템 등장
1970년대	- 램프 및 교차로에서의 버스 우선처리를 포함한 램프미터링과 고속도로 축과 간선도로의 제어를 통합한 교통축 통합제어 연구개발 시작됨
1980년대	- 램프미터링 기법이 다른 지역의 많은 주에도 구축되기 시작하였으며 더욱 다양한 고속도로 운영관리 시스템과 운영기법이 개발됨
1990년대	- 고속도로 관리에 ITS가 적용되어 유고검지 및 관리, 차로이용제어, 램프제어, 다인승차량우선처리제어, 정보제공 등의 고속도로 관리시스템 구축이 활발히 진행됨 - 유럽에서도 네델란드, 영국, 프랑스를 중심으로 램프미터링에 대한 연구가 수행되어 대도시의 혼잡 도시고속도로 구간에 설치 및 운영되기 시작함 - 국내에서도 교통혼잡이 경제적, 사회적 이슈가 되고 혼잡을 완화시키고자 서울 도시고속도로와 경부고속도로에 램프미터링 시스템이 구축되었음
2000년대	- 미국 뿐만아니라 유럽에서도 적극적으로 램프미터링에 대한 연구를 수행하기 시작하여 유럽의 특성에 맞는 램프미터링을 개발하기 위한 네델란드, 프랑스, 벨기에, 독일, 영국, 이스라엘 등의 국가가 협력하여 EURAMP 프로젝트를 수행하고 이를 토대로 구축계획을 수립

본 연구에서 진입제어 기법으로 사용한 ALINEA 알고리즘과 관련된 기존 연구들에 대해 다음과 같은 문헌고찰을 수행하였다. Papageorgiou(1997)는 ALINEA 알고리즘의 주된 특성을 요약하고, 여러 유럽 국가에서 실제로 현장 운영한 결과를 통해 ALINEA기법 적용의 편의성과 적용성, 그리고 효율성을 검증하였다. Single램프와 Multiple램프 각각의 적용효과를 알아보기 위해 파리 Boulevard Peripherique와 암스테르담 A10 West Motorway에서의 실제 적용결과를 검토하고 다른 기법 적용결과와 비교하였다. 평가지표는 TTT(total travel time), TWT(total waiting time), TTS(total time spend), TTD(total travel distance), MS(mean speed) MCD(mean congestion duration)를 사용하였다. Single램프의 경우 파리와 암스테르담 모두 통행시간과 지체는 감소하고 통행속도는 증가하는 결과를 보였다. Multiple램프일 경우에도 파리에서는 통행시간과 지체 감소, 통행속도는 증가하는 결과가 나타났고 암스테르담에서는 손실시간이 감소하는 결과를 보였다. 모든 경우에서 ALINEA기법이 다른 미터링 기법들에 비해 가장 효과적인 것으로 나타났다[1].

Masroor Hasan(2002)은 ALINEA와 FLOW 알고리즘을 미시적 교통시뮬레이터인 MITSIM에 구현하여 평가하였다. 교통류 모델의 파라메터들을 루프검지기 자료를 이용하여 비선형최적화 기법으로 보정하였다. ALINEA에서는 목표점유율과 주도로 검지기의 위치를 보정하고 FLOW에서는 영향 존 설정을 보정하였다. 알고리즘의 평가에 사용된 주요 변수는 교통수요와 하류부 교통상황, 대기행렬 관리정책이며 하류부 병목현상의 영향에 따른 평가에서 하류부 병목현상이 없을 경우 ALINEA의 성능이 만족스러웠으나 하류부 병목현상이 있을 경우에는 FLOW가 균형을 이루는 성질에 의해 ALINEA보다 좋은 결과를 보였다. ALINEA는 교통량이 적을 경우, FLOW는 교통량이 많을 경우 성능이 향상되는 결과를 보여주었다. 전체적으로 교통량 수요가 적을 경우에는 램프미터링은 효과가 미미하거나 오히려 시스템의 악화를 초래했고 교통량 수요가 많을 때 효과가 나타났다. 수요를 변화시키면서 분석·비교한 결과로 ALINEA는 본 연구에서 적용한 모든 수요수준에서 성능이 개선되는 결과를 보였으나 FLOW는 높은 수요수준에서 성능이 떨어지는 결과를 보였다[2].

Lianyu Chu(2004)는 고정제어식 미터링 기법과 감응식 미터링기법, 통합형 미터링 기법의 효과와 최적화방법에 대해 분석하였다. Fixed-time 방식,

ALINEA, BOTTLENECK, BOTTLENECK-ALINEA 통합방식, ZONE, ZONE-ALINEA 통합방식의 5가지 알고리즘을 적용하여 분석하였으며 시간당 통과교통량, 본선의 평균통행시간, 램프부에서의 총 지체를 MOE로 설정하였다. ALINEA는 모든 시나리오에서 BOTTLENECK과 ZONE 알고리즘보다 좋은 결과를 나타내었다. ALINEA알고리즘과의 통합방식으로 개선된 BOTTLENECK 알고리즘과 ZONE 알고리즘은 기존의 BOTTLENECK 알고리즘, ZONE 알고리즘보다 좋은 결과를 보였다. 그러나 실내모의시험에 의한 결과에 대한 한계성은 향후 연구에서 해결되어야 할 점으로 판단된다[3].

Arizona 대학의 연구센터 ATLAS(Advanced Transpotatiopn and Logistics : Algorithm and System)(2006)에서는 Arizona 교통부의 ATRC(Arizona Transportation Research Center)의 지원으로 MILOS((Multi-Objective, Integrated, Large-Scale, Optimized System))로 불리는 Adaptive Ramp Metering System을 개발했다. MILOS는 본선 상류부와 램프부를 고려하고 경로를 사용하는 차량의 총 지체를 최소화하기 위해 속도들을 조정한다. 초기 시뮬레이션 결과에서는 MILOS가 고속도로 흐름을 원활히 하고 지체를 감소시키는데 잠재적으로 높은 효과가 있고, 과포화상태에서의 회복도 빠른 것으로 나타났다[4].

2. 국내 진입제어 운영기준

고속도로의 본선은 혼잡하지 않으나 진입부의 길이가 짧음으로 인해 대기행렬이 길어져 하부도로에 영향을 미치는 경우에는 진입제어 운영에 적합한 교통조건 및 도로조건을 충족한 지역을 선정하는 등의 진입제어 운영을 위한 일정한 기준이 있어야 한다. 국내에서는 진입제어 알고리즘의 개선을 위한 연구[5]와 검지기 적정 위치에 대한 연구[6-8]와 같이 진출입제어 기법의 운영향상과 관련된 연구가 지속적으로 진행되어 왔으나 현재 진입제어 운영기준에 대해서는 연구결과 또는 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다.

일반적으로 진입제어 운영 시에는 교통류율, 교통량, 속도, 서비스 수준 등을 고려하여야 한다. 서비스 교통류율은 주어진 시간, 도로 및 교통조건에서 일정한 서비스 수준을 유지하면서 도로나 차로의 일정구간 또는 지점을 차량이 통과하리라 기대되는 교통류율을 의미하는 것으로 진입제어 운영기준 설정하는데 영향을 미치는 요소로 볼 수 있다. 서비스 수준은 A ~ F 로 구분하여 설계속도, 교통량에 따른 도로의 이상적인 조건에 대하여 정의 하고 있다. 일반적으로 고속도로 본선의 서비스 수준은 밀도를 효과척도로 이용하여 판단한다. <표 2>에 고속도로 기본구간, 연결로의 밀도에 따른 서비스수준을 제시하고 <표 3>에는 본선 차로수에 따른 기준 교통량과 서비스 수준을 제시하였다. 본 연구에서는 밀도와 평균속도를 평가지표로 설정하고 밀도를 이용하여 서비스수준과 적정 운영영역을 도출하는데 사용하였다. 밀도는 일정구간에 들어 있는 차량들의 대수를 의미하며 고속도로 통행의 안전 측면에서 앞뒤 차량과의 거리를 나타낼 수 있는 기준이다. 도로 설계 서비스 수준에 의해 연결로 역시 밀도를 효과척도로 이용한다. 연결로는 기본구

〈표 2〉 고속도로 기본구간, 연결로 서비스수준
〈Table 2〉 Level of service for freeway basic section and ramp

서비스수준	밀도(pcpkmpl)	
	기본구간(본선)	연결로
A	≤6	≤ 6
B	≤10	≤ 12
C	≤14	≤ 17
D	≤19	≤ 22
E	≤28	>22
F	>28	용량 초과

〈표 3〉 본선 차로수에 따른 기준 교통량과 서비스수준
〈Table 3〉 Base volume and level of service by number of freeway lanes

본선 차로수	기준 교통량(대/시)	서비스 수준
2	2,650 (1,325/차로)	D
3	4,250 (1,417/차로)	D
4	5,850 (1,463/차로)	D
5	7,450 (1,490/차로)	D
6	9.050 (1,508/차로)	D

간과 동일한 교통량을 갖는다 하더라도 속도가 상대적으로 낮기 때문에 서비스수준 E를 22대/km로 정의 하고, 용량을 초과하게 되면 서비스 수준을 F로 처리하게 된다.

3. 국외 진입제어 운영기준

국외의 진입제어 운영기준을 살펴보면 미국의 “Ramp Management and Control Handbook”에 일반적으로 고속도로의 진입제어 적용 기준이 속도, 교통량, 사고율 등에 의해 결정 된다[9].

- 고속도로의 첨두시 속도가 48km/h 이하인 구간
- 본선의 교통량이 1,200 ~ 1,500 대/시/차로 인 구간
- 사고율이 높은 구간

또한, 진입로 차로수에 따른 허용 가능한 진입 교통량은 <표 4>와 같이 1차로의 진입 교통량이 900 ~ 1,200대/시를 초과하는 경우에는 진입제어를 실시 할 때 진입로 상의 차량 대기 공간이 충분히 확보되어야 한다. 미국의 애리조나 주에서는 진입제어 운영 기준을 교통량, 속도, 서비스 수준, 기하구조 등으로 구분하여 보다 더 상세하게 제시하여 사용하고 있으며, 서비스 수준이 D 인 경우는 진입제어 실시를 고려할 수 있다.

- 연중 200일 이상 60km/h 이하의 속도로 30분 이상 운영
- 사고발생 빈도가 높은 경우
- 계획/설계에 의해 제시된 서비스 수준(LOS)을 만족시키지 못하는 경우

〈표 4〉 램프의 진입가능 교통량
〈Table 4〉 Possible entry volume for number of ramp lanes

진입램프 차로수	진입가능 교통량 (대/시)	진입방식	용량 (대/시)
1	240~900	1대 진입/녹색	900
	240~1,200	2대 이상 진입/녹색	1,100~1,200
2	400~1,700	1대/녹색/차로	1,600~1,700

- 수요/용량 비율이 주변 램프에 비해 높은 경우
- 램프 주변에 대규모 쇼핑센터, 위락시설, 관광지, 운동경기장 등으로 인한 비반복적 혼잡이 발생할 경우
- 램프와 합류부 본선 합류 차로 교통량이 2,100대/시 이상일 경우
- 본선 교통량에 대한 기준이 충족되는 경우

Ⅲ. 진입제어 운영영역 도출을 위한 모의실험

1. 진입제어 적정 운영영역의 설정

진입제어 전략의 운영으로 인해 발생할 수 있는 지체를 감소시키고 교통상황에 적절한 진입제어 전략 수립 및 적용을 위해 교통량 수준에 따른 적정한 진입제어 운영영역의 도출은 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 적정 운영영역을 도출하기 위하여 본선 교통량 수준에 따라 시나리오를 수립하고 교통류 시뮬레이션 분석을 수행하였다.

진입제어를 효과적으로 운영하기 위한 교통 운영 영역을 도출하기 위해 본선 상류부, 본선 하류부, 진입부로 구분하여 각각의 구간에서의 서비스 수준에 따라 <표 5>와 같이 기본적인 진입제어 운영 영역을 설정하였다.

본 연구에서는 본선의 서비스 수준이 A, B이고 차량간의 갭(gap)이 상대적으로 크며 진입부의 교통량도 많지 않아 본선에 큰 영향을 미치지 않는 상황에서 진입제어의 실시로 인해 불필요한 지체가 발생할 수 있다. 또한 LOS F 이상에서는 차량간의 갭이 너무 작고 진입제어의 수행이 어려워진다. 따라서 진입제어를 실시 할 수 있는 영역을

〈표 5〉 진입제어 운영 영역 설정
〈Table 5〉 Ramp operation by level of service in freeway

기 준	운영방식
서비스 수준 A, B	제어 불필요
서비스 수준 C, D, E	제어 필요
서비스 수준 F	진입 최소화

LOS가 A, B일 경우에는 제어 불필요, C, D, E에서는 진입제어 실시, F 이상의 상황에서는 진입최소화로 설정하여 분석을 수행하였다. 서비스수준이 F 일 때는 도착 교통량이 그 지점 또는 구간 용량을 넘어선 상태로 이미 도로의 기능을 다하고 있지 못한 상태이므로 차량진입을 최소화하여야 한다. “진입최소화”는 본선의 교통량이 증가되어 혼잡이 지속되는 상황에서 합류부에 진입 가능한 교통량을 최소화하여 고속도로 본선의 혼잡 확산을 예방하는 것을 의미한다.

2. 시뮬레이션 조건

본 연구는 현장실험을 통한 정확한 분석 및 실험이 어려운 점을 감안하여 미시적 교통류 시뮬레이션 툴인 VISSIM을 이용하였으며, 지엽적인 교통특성 및 기하구조에 의해 분석결과가 변동되지 않도록 하기 위해 이상적인 교통상황과 도로기하구조를 설정하여 분석을 수행하였다. 시뮬레이션에 적용된 조건들을 <표 6>에 제시하였다.

분석 대상의 범위는 연속류 도로의 본선 구간 및 진입 연결로 부분으로 설정하였다. 분석구간의 도로 기하구조는 총 6km 구간, 편도 3차로로 구성하였다. 차로폭은 3.5m로 설정하였고, 진입램프 구간 길이는 1km로 설정하였으며, 본선 상류로부터 2.5km에 진입로가 연결되는 것으로 설정하였다. 본선과 진입 교통량 수준에 따라 진입 제어의 운영가능 영역을 판단하기 위하여 본선 교통량과 진입 교통량의 유입 수준을 변화시켰다. 차량 구성비는 승용차가 90%, 중차량이 버스 5%, 트럭 5% 로 총 10%로 구성되도록 설정하였다.

진입제어를 실시하기 위하여 본선은 차로별로 2m 검지기 3개, 연결로는 5m 검지기 1개를 설치하였으며 진입제어 방법은 ALINEA 알고리즘을 적용하여 분석을 수행하였다. ALINEA알고리즘은 1991년 M.Papageorgiou에 의해 고안된 진입제어 알고리즘으로 고속도로 합류부의 하류부에서 측정한 점유율을 이용하여 미터링율을 결정하는 알고리즘이다. 미터링율은 전 시간대 미터링율, 목표점유율, 하류부에서 측정된 점유율에 의해 결정되며, 조정상수(Kr)값과 목표점유율(Target Occupancy)은 일반적으로 각각 10~100 vph, 13~25%의 범위값을 가진다. Papageorgiou(1997)[1]의 연구에서 조정상수값을 70 vph, 목표점유율을 18%로 설정할 때 최적의 결과가 도출되었고, 김규옥(2006)[10-11]의 연구, 조한선(2008)[5]의 연구에서도 이와 같은 값을 적용하여 분석하였다. 본 연구에서 적용한 값이 모든 교통환경에 최적값으로 적용될 수 없으며, 각 현장의 환경에 따라 최적값을 도출하는 과정은 필요할 것이다. 제시된 시뮬레이션 적용 조건 외의 차량추종모형, 차량제원, 합류모형 등의 교통환경 설정은 시뮬레이션 툴의 기본설정을 유지하였다.

〈표 6〉 시뮬레이션 조건
〈Table 6〉 Simulation study conditions

항 목	조 건	
차로폭	3.5m	
차로수	본선	편도 3차로
	연결로	1차로
본선길이	진입부 기준	상류 : 2,500m
		하류 : 2,500m
진입연결로 길이	1,000m	
투입교통량	본선	2,000 ~ 5,000 대/시
	연결로	300 ~ 900 대/시
제한속도	100km/h (분산 : 10km/h)	
연결로 제한속도	50km/h (분산 : 10km/h)	
차량구성비	승용차	90%
	중차량	10% (버스 5%, 트럭 5%)
차량추종 모형	Wiedemann Car-Following Model 99	
진입제어 속성	Target Occupancy	0.18
	kr	70
	Minimum Metering Rate	240
	Maximum Metering Rate	900
	Green Interval(sec)	2.0

3. 시나리오 구성

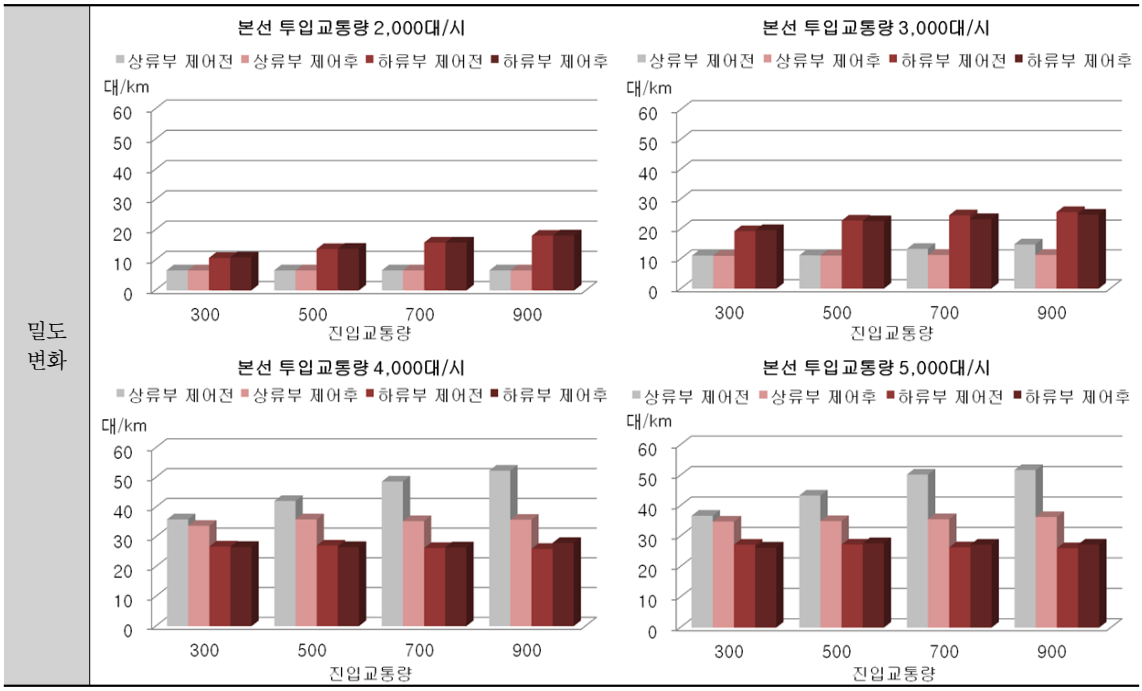
정의한 시뮬레이션 조건들을 기반으로 교통량 수준에 따라 진입 제어의 운영가능 영역을 판단하기 위하여 본선 교통량은 2,000, 2,500, 3,000, 3,500, 4,000, 4,500, 5,000 대/시로, 진입 교통량은 300, 500, 700, 900대/시로 설정하여 시나리오를 구성하였다. 진입제어 운영 전과 후로 나누어 분석하였고, 분석시간은 1시간으로 설정하였다.

Ⅳ. 진입제어 운영가능영역 결과 분석

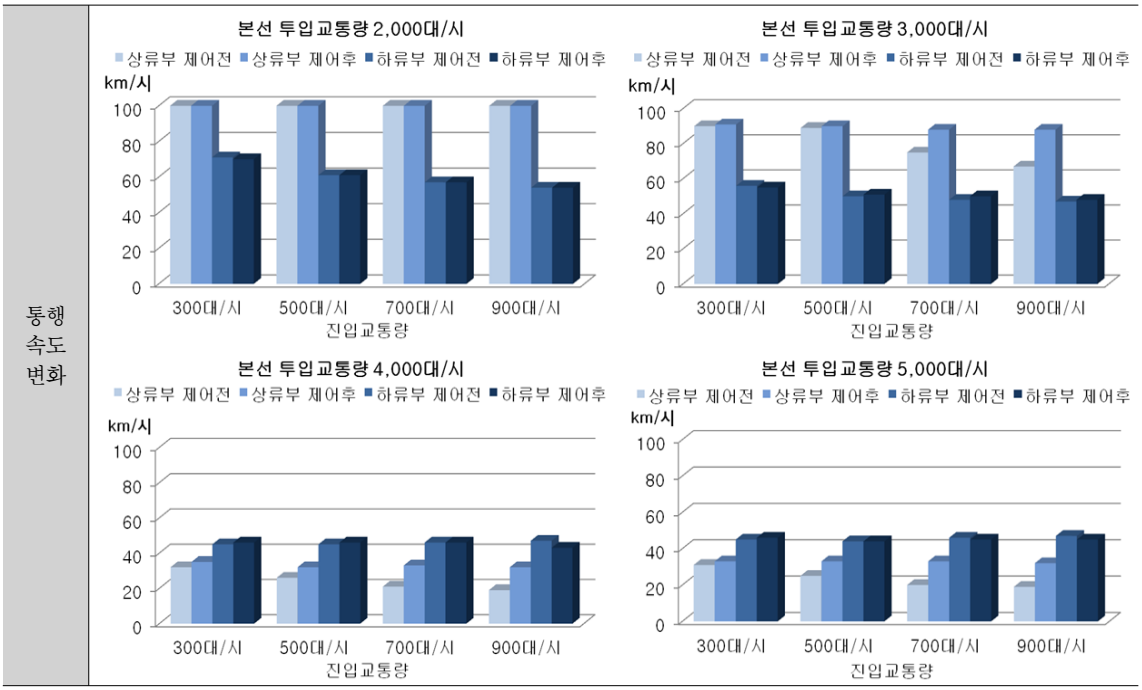
본선과 진입 교통량 수준에 따라 분석 시나리오를 수립하고 적정한 진입제어 운영영역을 도출하기 위한 효과척도를 밀도, 평균속도로 선정하였다. 밀도와 평균속도를 효과척도로 사용한 이유는 진입제어의 운영영역의 도출이 목적이므로 진입부의 운영상태를 판단하기 위한 지표를 사용하였다. <그림 1>과 같이 본선 상류부와 본선 하류부의 진입제어 전·후 분석 결과로 밀도는 진입제어를 운영하였을 때 감소하는 것으로 분석되었다. 본선 교통량이 2,000~3,000대/시 일 때 보다 4,000~5,000대/시 일 때 밀도의 변화 폭이 더 크게 나타났지만, 이는 교통류 상태가 이미 과포화 상태에 도달한 것이므로 제어가 필요한 영역으로 보기 보다는 제어를 최소화 하여 본선과 연결로의 밀도를 감소 시켜 주는 것이 적절할 것으로 판단된다. 본선구간으로 진입 또는 통과하는 교통량이 증가할 경우 진입제어 알고리즘의 효과가 감소되면서 진입제어를 지양해야한다는 점은 기존문헌고찰 내용에서 인용한 Masroor Hasan(2002)[2]의 연구와 일맥하는 부분이다.

평균속도는 진입제어를 운영하는 시나리오 결과에서 운영하지 않았을 때보다 약 15%의 개선효과가 있는 것으로 <그림 2>와 같이 나타났다. 또한, 본선 교통량과 진입 교통량의 수준에 따라 개선정도가 다르게 분석되었다. 본선 교통량이 2,000대 일 때는 제어 전·후의 속도 차이가 미미한 것으로 분석되었으나 본선 교통량이 3,000대/시, 4,000대/시 일 때는 진입 교통량이 900대/시 일 때가, 본선 교통량이 5,000대/시 일 때는 진입 교통량이 700대/시 일 때 통행속도의 증가폭이 크게 나타났다.

서비스 수준은, 분석결과 본선 상류부와 연결로가 A, B 일 때는 진입제어가 불필요 하며, 서비스 수준이 C, D, E 일 때는 진입제어가 필요한 것으로 판단된다. 본선 상류부와 연결로 중 어느 한 구간의 서비스 수준이 F가 된다면 진입제어를 최소화 하여 전체 네트워크의 서비스 수준이 F 상태에 도달하지 않도록 조절해 주어야 할 것으로 판단된다. 본선교통량이 2,500대/시이고, 진입 교통량 900대/시, 본선 교통량이 3,000대/시이고, 진입 교통량이 300~900대/시, 본선교통량 3,500대/시 이고, 진입 교통량이 300, 500대/시일 경우 진입제어가 필요한 것으로 분석되었다. 이는 연결로와 본선 합류부의 교통량의 총합이 3,500대/시~3,600대/시 일 경우이다. 분석결과를 통해 진입제어 가능 영역을 진입제어 불필요, 필요, 진입 최소화 3가지로 나누어 구체화하였다. 본선 교통량과 진입 교통량의 합이 3,200대/시 미만이면 본선 상류부, 연결로의 서비스 수준이 LOS A, B 이지만, 네트워크 전체의 서비스 수준은 LOS C의 상태까지 나타났다. 도로별 설계 서비스 수준이 고속도로 도시지역은 D의 수준 까지 가능 한 것을 토대로 제어가 불필요 한 것으로 판단된다. 따라서 제어가 필요한 상황을 본선과 진입 교통량의 합이 약 4,000대/시가 되는 경우로 설정 할 수 있다. 이때의 본선 상류부, 연결로의 서비스 수준은 LOS C, D, E 로 나타났으며, 네트워크 전체 역시 D와 E의 수준으로 진입제어 적용을 고려해야 한다. 본선과 진입 교통량의 합이 4,000대/시가 넘는 경우에는 본선 상류부, 연결로의 서비스 수준이 이미 F 상태로 진입을 최소화 하여야 한다. 본선과 진입부의 교통량이 약 4,400대/시 까지는 제어를 했을 때 서비스 수준이 E로 증가하는 상황이 있으나, 이때의 평균속도가 50km/시에도 못 미치는 결과가 나타났다. 이를 통해 본선의 상류부나 연결로 두 구간 중 한 구간의 서비스 수준이 F가 되면 진입을 최소화 하여야 한다. 효과분석 결과를 <표 7>과 <표 8>에 제시하였고 이를 이용하여 진입제어 운영 가능 영역을 <그림 3>에 제시하였다.



〈그림 1〉 진입제어 적용 전/후의 밀도 변화
〈Fig. 1〉 Density before and after ramp metering



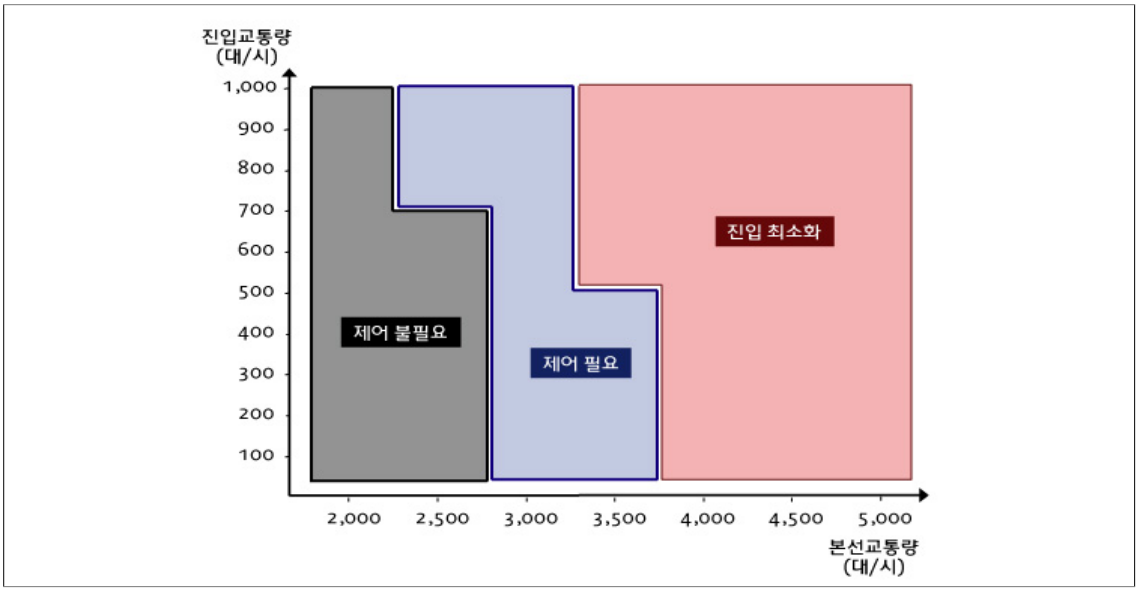
〈그림 2〉 진입제어 적용 전/후의 통행속도 변화
〈Fig. 2〉 Travel speed before and after ramp metering

〈표 7〉 효과분석 결과 (밀도(대/km/lane) (서비스 수준))
〈Table 7〉 Results of measures of effectiveness(Density)

본선 교통량 (대/시)	진입 교통량 (대/시)	본선 상류부		본선 하류부		진입로		네트워 전체		효과 (%)	운영여부
		제어전	제어후	제어전	제어후	제어전	제어후	제어전	제어후		
2,000	300	6 (A)	6 (A)	10 (B)	10 (B)	6 (A)	6 (A)	7 (B)	7 (B)	0	제어 불필요
	500	6 (A)	6 (A)	13 (C)	13 (C)	10 (B)	10 (B)	9 (B)	9 (B)	0	제어 불필요
	700	6 (A)	6 (A)	15 (D)	15 (D)	14 (C)	14 (C)	11 (C)	11 (C)	0	제어 불필요
	900	6 (A)	6 (A)	18 (D)	18 (D)	19 (D)	19 (D)	13 (C)	14 (C)	- 8	제어 불필요
2,500	300	8 (B)	8 (B)	14 (C)	14 (C)	6 (A)	6 (A)	10 (B)	10 (B)	0	제어 불필요
	500	8 (B)	8 (B)	17 (D)	17 (D)	10 (B)	10 (B)	12 (C)	12 (C)	0	제어 불필요
	700	8 (B)	8 (B)	20 (E)	20 (E)	14 (C)	15 (C)	14 (C)	14 (C)	0	제어 불필요
	900	8 (B)	8 (B)	22 (E)	22 (E)	19 (D)	30 (E)	16 (D)	17 (D)	- 6	제어 필요
3,000	300	11 (C)	10 (B)	19 (D)	19 (D)	5 (A)	6 (A)	14 (C)	14 (C)	0	제어 필요
	500	11 (C)	11 (C)	22 (E)	22 (E)	10 (C)	13 (C)	16 (D)	16 (D)	0	제어 필요
	700	11 (C)	11 (C)	24 (E)	23 (E)	15 (D)	59 (E)	18 (D)	21 (E)	- 17	제어 필요
	900	14 (C)	11 (C)	25 (E)	24 (E)	56 (E)	79 (E)	23 (E)	23 (E)	0	제어 필요
3,500	300	20 (E)	20 (E)	25 (E)	24 (E)	5 (A)	13 (C)	21 (E)	21 (E)	0	제어 필요
	500	28 (E)	22 (E)	26 (E)	26 (E)	10 (B)	66 (E)	25 (E)	26 (E)	- 4	제어 필요
	700	36 (F)	22 (E)	26 (E)	26 (E)	21 (D)	90 (E)	29 (F)	27 (E)	7	진입 최소화
	900	40 (F)	21 (E)	25 (E)	26 (E)	65 (E)	107 (E)	35 (F)	27 (E)	24	진입 최소화
4,000	300	35 (F)	33 (F)	26 (E)	26 (E)	5 (A)	34 (E)	29 (F)	29 (F)	0	진입 최소화
	500	42 (F)	35 (F)	27 (E)	26 (E)	10 (B)	88 (E)	32 (F)	33 (F)	- 3	진입 최소화
	700	48 (F)	35 (F)	26 (E)	26 (E)	14 (C)	104 (E)	34 (F)	33 (F)	3	진입 최소화
	900	52 (F)	35 (F)	25 (E)	27 (E)	57 (E)	112 (E)	39 (F)	34 (F)	13	진입 최소화
4,500	300	36 (F)	34 (F)	26 (E)	27 (E)	5 (A)	32 (E)	29 (F)	30 (F)	- 3	진입 최소화
	500	43 (F)	36 (F)	27 (E)	26 (E)	10 (B)	93 (E)	32 (F)	33 (F)	- 2	진입 최소화
	700	49 (F)	36 (F)	26 (E)	27 (E)	14 (C)	108 (E)	34 (F)	34 (F)	0	진입 최소화
	900	50 (F)	35 (F)	25 (E)	27 (E)	65 (E)	115 (E)	39 (F)	34 (F)	13	진입 최소화
5,000	300	36 (F)	34 (F)	27 (E)	26 (E)	5 (A)	31 (E)	30 (F)	29 (F)	3	진입 최소화
	500	43 (F)	34 (F)	27 (E)	27 (E)	10 (B)	96 (E)	32 (F)	33 (F)	- 3	진입 최소화
	700	50 (F)	35 (F)	26 (E)	27 (E)	14 (C)	110 (E)	34 (F)	34 (F)	0	진입 최소화
	900	51 (F)	36 (F)	26 (E)	27 (E)	65 (E)	114 (E)	40 (F)	34 (F)	15	진입 최소화

〈표 8〉 효과분석 결과 (평균속도(/km))
〈Table 8〉 Results of measures of effectiveness(Average speed)

본선 교통량 (대/시)	진입 교통량 (대/시)	본선 상류부		본선 하류부		진입로		네트웍 전체		효과 (%)
		전	후	전	후	전	후	전	후	
2,000	300	100.5	100.5	71.4	70.2	50.2	50.3	82.6	82	- 1
	500	100.5	100.5	61.3	60.9	49.4	49.1	75.7	75.5	0
	700	100.5	100.5	57.0	57.2	48.8	48.2	71.9	71.9	0
	900	100.4	100.5	53.8	53.6	47.6	46.4	68.8	68.5	0
2,500	300	99.6	99.6	63.4	63.3	50.2	49.8	78.7	78.7	0
	500	99.4	99.4	56.5	56.3	49.4	47.5	73.7	73.4	0
	700	99.1	99.0	52.6	52.9	48.8	45.1	70.2	70	0
	900	98.8	99.0	49.6	50.0	47.6	30.0	67.3	65.3	- 3
3,000	300	89.9	90.9	56.3	55.4	50.2	44.1	71.3	71.1	0
	500	89.3	89.8	50.5	50.9	49.3	37.1	67	66.6	-1
	700	74.6	88.2	48.3	50.1	46.6	10.4	58.9	62.6	6
	900	66.9	88.3	47.0	47.9	14.3	8.3	51.4	61	16
3,500	300	55.1	54.8	47.5	48.5	50.2	23.1	51.1	50.4	-1
	500	39.3	51.4	45.3	46.0	49.3	6.2	42.9	46.2	7
	700	28.5	50.0	45.4	45.5	32.1	4.8	37	45.1	18
	900	25.5	54.3	46.8	45.5	11.6	3.6	34.4	47.3	27
4,000	300	32.0	34.8	45.3	45.9	50.2	8.6	39.3	39.2	0
	500	25.9	32.2	44.9	45.7	49.3	4.0	36.8	37.4	2
	700	21.2	32.9	46.0	46.0	29.1	3.2	34	37.9	10
	900	19.0	32.2	46.7	43.5	14.2	2.9	32	36.4	12
4,500	300	31.1	33.4	46.3	44.4	50.2	9.1	39.3	37.8	-4
	500	24.9	31.9	45.0	46.6	49.3	3.8	36.4	37.7	3
	700	20.5	32.2	45.3	45.0	45.7	2.9	35	37.2	6
	900	20.0	32.7	46.9	44.0	11.6	2.6	32.2	37	13
5,000	300	31.2	33.5	44.7	46.4	50.2	9.5	38.6	38.8	1
	500	24.9	33.4	44.3	44.2	49.3	3.4	36.1	37.3	3
	700	20.2	32.7	45.9	44.8	47.5	2.8	35.4	37.4	5
	900	19.4	31.8	46.6	44.9	12.0	2.7	31.9	37	14



〈그림 3〉 진입제어 운영 가능 영역
〈Fig. 3〉 Possible operation range of ramp metering

Ⅴ. 적정 진입제어 영역의 현장적용과 관련된 기술적 이슈

본선의 소통에 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단되는 교통량 범위인 적정 운영영역을 실제 현장에 적용시키기에 앞서 교통환경적, 도로기하구조적 측면에서 고려해야할 사항들을 기술하였다. 본 연구에서는 다양한 진입제어 기법들 중에서 ALINEA 알고리즘을 사용하였다. 다른 진입제어 기법을 이용하여 적정 운영영역을 도출할 경우 본 연구의 분석결과와 다를 수 있다. 각 알고리즘 마다 장단점이 있으므로 현장적용 시 환경에 맞게 적용하는 것이 바람직 할 것이다.

실제 본선으로 진입하는 교통량의 도착율이 본 연구에서 수행한 시뮬레이션 환경과 다를 수 있다. 미시적 교통류 시뮬레이터 VISSIM에서는 차량들을 포아송분포로 차량들을 네트워크에 투입시키며, 현장에서는 진입교통량의 도착분포가 상이할 것이다. 또한 해당 램프에 교차로가 연결되어 있을 경우, 교차로의 신호운영에 영향을 받을 것이므로 이에 대한 고려가 필요하다.

램프부의 차로수, 구배, 차로폭, 가속차로 길이 등의 도로기하구조에 따라 진입교통량의 도착율 및 분포가 달라 질 수 있으며 본 연구의 결과와는 상이한 결과가 도출 될 수 있다. 그러므로 향후 도로기하구조에 따른 적정 진입제어 교통영역에 대한 분석이 필요할 것이다. 진출입부가 비교적 짧은 구간 내에 연속적으로 위치하고 인접램프와의 상호간 영향이 유의미하여 하나의 램프가 독립적으로 운영되지 않는 상황에서는 인접한 램프들을 연동하여 운영하는 시스템 미터링(System metering)기법이 적용 될 수 있다. 각 램프의 진입율(metering rate)을 결정하기에 앞서 본선으로 진입하는 교통수요를 검지하고 각 램프의 진입제어 운영여부를 결정하는데 본 연구의 결과를 적용 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 분석결과가 하나의 램프를 대상으로 분석된 결과이나 램프의 진입율 결정이 아닌 운영여부 결정과 관련되므로 적용가능 할 것으로 판단되며 실제로 이에 대한 연구가 향후 필수적이라 할 수 있다.

현장에 따라 시간별, 월별, 계절별로 교통류의 패턴이 상이할 수 있으며, 단기간의 분석으로 도출된 적정 운영영역으로 변화하는 교통상황에 대응할 경우 진입제어를 시행하는 것이 오히려 교통류 상황을 악화시킬 수 있다. 시간적인 변수를 고려하여 장기간에 걸친 분석을 통해 적정 운영영역을 도출하

고 일정 기간마다 갱신하는 과정이 필요할 것이다.

Ⅵ. 결론 및 향후 연구과제

고속도로에서 진입제어 전략의 효율적인 운영을 목적으로 본선과 진입부의 교통량을 고려하여 진입제어를 적용하는 교통수요의 범위를 제시하였다. 이를 위해 진입제어 알고리즘중의 하나인 ALINEA 알고리즘을 미시적 교통류 시뮬레이터로 구현하여 본선교통량과 진입 교통량 수준에 따른 진입제어 운영 가능 영역을 도출하였다. 본선과 진입 교통량 수준을 고려하여 도출된 적정 진입제어 영역에 따라 진입 교통류를 제어할 시 밀도와 평균속도 측면에서 효과가 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 한계점과 향후추진과제를 다음과 같이 제시하였다. 첫 번째로, 본 연구의 시뮬레이션 분석 과정에서는 진입 최소화 전략이 완벽하게 반영되지 않았다. 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 상황에 맞는 진입제어 알고리즘 개발이 필요하며, 진입 최소화 제어 알고리즘도 추가적으로 구현될 필요가 있는 것으로 판단된다. 향후 알고리즘을 보완하고 이에 대한 효과분석 및 평가과정을 수행하여 교통상황에 대해 보다 세밀하게 진입제어 운영 영역을 도출하는 방법론에 대한 연구가 추진되어야 할 것이다.

두 번째, 본문의 현장적용과 관련된 기술적 이슈와 같이 실제 현장에 제시한 적정 진입제어 영역에 따라 진입제어 알고리즘을 운영하고 검증하는 과정이 수행되어야 할 것이다. 다른 알고리즘을 적용할 시 적정 운영영역을 도출하고 도로기하구조 및 시간별 교통류 패턴, 진입부와 본선간 연결형태, 진입부와 간선도로간 연결형태, 인접 램프와의 연동여부에 따른 검증과정이 필요하다.

세 번째, ALINEA 알고리즘은 집계된 점유율 자료를 이용하여 진입율을 결정한다. 무선통신기술과 정보수집 및 제공 기술의 발달을 통해 실시간으로 개별차량정보의 수집이 가능한 환경이 구축됨에 따라 보다 정확한 진입차량 제어가 가능한 알고리즘이 개발되고 이에 대한 적정 운영영역이 도출되어야 할 것이다.

본 연구는 지체 최소화를 목적으로 진입제어를 실시하는 방법론에 대해서가 아닌 교통상황을 고려하여 진입제어를 실시하는 적정한 교통상황을 도출하는데 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 효과적인 지체 최소화를 목적으로 하는 진입제어 알고리즘이 개발되더라도 이를 교통상황에 따라 운영하지 못한다면 알고리즘을 적용함으로써 생기는 지체가 발생할 수 있다. 향후 연구과제로 제시한 부분과 기술적 이슈를 보완한다면 보다 효과적인 진입제어 운영전략 개발이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem and F. Middelham, “ALINEA local ramp metering: summary of field results,” *Transportation Research Record 1603,* no. 97-0032, pp.90~98, January 1997.

[2] M. Hasan, M. Jha and M. Ben-Akiva, “Evaluation of ramp control algorithms using microscopic traffic simulation,” *Transportation Research Part C,* vol.10, Issue.3, pp.229~256, June 2002.

[3] L. Y. Chu, H. X. Liu, W. Recker and H. M.Zhang, “Performance evaluation of adaptive ramp-metering algorithms using microscopic traffic simulation model,” *Journal of Tansportation Engineering,* ASCE, vol.130, Issue. 3, pp.330~338, May 2004.

[4] L. Head and P. Mirchandani, “Real-time adaptive ramp metering : phase Ⅰ - MILOS proof of concept,” *ATLAS(Advanced Transpotatiopn and Logistics : Algorithm and System), Arizona Department of Transportation Project 595,* December, 2006.

[5] 조한선, 이준, 이호원, 김은미, “속도를 이용한 ALINEA 모델 보완에 관한 연구,” *대한교통학회지,* 제26권, 제5호, pp.73~80, 2008. 10.

[6] 송기욱, 이의은, “시뮬레이션 모형을 이용한 국도에서의 적정 검지기 위치에 관한 연구,” *대한토목학회 논문집,* 제25권, 제1D호 pp.57~65, 2005. 1.

[7] 양충헌, 손영태, “고속도로 합류부 지점에서의 최적 검지기 설치 위치 산정에 관한 연구,” *한국도로*

학회 논문집, 제10권, 제1호, pp.221~227, 2008. 7.

[8] 이재형, 김규옥, 신희철, "검지기 위치에 따른 진출입제어 효과평가에 관한 연구," *한국ITS학회 춘계학술대회 논문발표집* , 2009. 4.

[9] L. Jacobson, J. Stribiak, L. Nelson and D. Sallman, "Ramp management and control handbook," Federal Highway Administration, pp.224, January 2006.

[10] 김규옥, 이은미, *"첨단교통정보를 활용한 도로운영 및 제어방안 연구,"* 한국교통연구원, 기본연구보고서, 2006. 12.

[11] 건설교통부, "도로용량편람," 2001.

[12] 건설교통부, "연속류 도로체계 연결부 동적운영 제어시스템 개발(3차년도 연구보고서)," 2007.

[13] 한국건설교통기술평가원, *"스마트하이웨이 사전기획연구,"* 한국도로공사, 2007.

[14] 한국건설교통기술평가원, *"스마트하이웨이 3차년도 2핵심 3세부 중간보고서 - 네트워기반 최적교통류 유지 및 제어기술 개발 연구 - 기술동향,"* 한국도로공사, pp.283~290, 2010. 5.

저자소개

김 규 옥 (Kim, Kyu-Ok)

2002년 : Texas A&M University 박사(교통공학 전공)
2003년 4월 ~ 현 재 : 한국교통연구원 연구위원
2002년 5월 ~ 2003년 3월 : Texas Transportation Institute PostDoc.
1998년 1월 ~ 2002년 4월 : Texas A&M University 연구조교

박 준 형 (Park, Joon-Hyeong)

2002년 3월 ~ 2008년 8월 : 한양대학교 교통시스템공학과 공학사
2008년 8월 ~ 2010년 2월 : 한양대학교 교통공학과 석사
2008년 3월 ~ 현 재 : 한국교통연구원 글로벌녹색융합연구본부 연구원

박 지 은 (Park, Ji-Eun)

2003년 3월 ~ 2007년 2월 : 명지대학교 교통공학과 공학사
2007년 8월 ~ 2009년 2월 : 서울시립대학교 교통공학과 석사
2009년 3월 ~ 2010년 4월 : 한국교통연구원 도로연구실 연구원

신 희 철 (Shin, Hee-Cheol)

2001년 : University of California at Berkeley 박사(교통공학전공)
2008년 10월 ~ 현 재 : 한국교통연구원 연구위원
2003년 5월 ~ 2008년 10월 : 교통개발연구원 책임연구원
2002년 2월 ~ 2003년 3월 : Institute of Transportation Studies PostDoc.
1998년 5월 ~ 2001년 12월 : University of California at Berkeley 연구조교