

고속도로 톨게이트 진입제어용 효과분석 툴의 개발

Development of an Effectiveness Analysis Tool for Freeway Tollgate Entrance Control

이 환 필*
(Hwan-Pil Lee)

윤 일 수**
(Il-Soo Yun)

오 영 태***
(Young-Tae Oh)

김 수 희****
(Soo-Hee Kim)

요 약

본 연구에서는 고속도로 교통류 관리를 위해 현재 시행중인 톨게이트 진입제어기법에 대해서 교통관리자가 교통상황의 변동에 따라 능동적으로 대처할 수 있도록 정보를 제공할 수 있는 톨게이트 진입제어의 효과분석 툴을 개발하였다. 개발을 위해 현재 시행되고 있는 한국도로공사 톨게이트 진입제어기법의 문제점을 진단하여 감지체계, 혼잡판단지표, 판단기준, 혼잡관리단위를 개선하였고 톨게이트 진입제어를 위한 절차를 수립하였다. 개발효과분석 툴은 개선된 톨게이트 진입제어 시행절차를 구현할 수 있도록 크게 교통상황 진단, 톨게이트 조절, 통행속도 산출 부문으로 구성하였다. 효과분석을 위해 톨게이트 진입제어과정을 구현한 효과분석 툴을 이용, 분석을 수행하였으며 혼잡기준속도를 80km/h로 적용하였을 때 톨게이트 진입제어 미시행시 및 기존 한국도로공사방안에 비해 통행속도가 각 21.5%, 8.8% 개선되는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper aims at developing an active expressway entrance control effectiveness analysis tool which operators can utilize and manage traffic based on current traffic condition. For this, after identifying the current problems of tollgate-based entrance policy being used, a new set of decision element such as congestion index, decision criteria for congestion, and congestion management unit has been proposed together with the procedure of newly developed tollgate control policy. Three key parts developed are traffic condition identification module, tollgate metering module, and travel speed calculation module. Some measures of effectiveness were also identified and the newly developed effectiveness analysis tool produced better result. According to classification of traffic condition by reference speed as 80km/h, the improved tollgate entrance procedure increased 21.5% in average travel speed compared with Do-Nothing case and also increased 8.8% compared with current entrance control method.

Key words : Tollgate Entrance Control, Freeway Metering, Booths Control, FTMS, Hi-Pass, DSRC

* 주저자 : 한국도로공사 교통정보통합활용지원센터(OASIS)

** 교신저자 : 아주대학교 환경건설교통공학부 조교수

*** 공저자 : 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

**** 공저자 : 한국도로공사 교통정보통합활용지원센터(OASIS)

† 논문접수일 : 2012년 1월 9일

† 논문심사일 : 2012년 5월 2일

† 게재확정일 : 2012년 5월 7일

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

첨두시, 주말, 휴일 및 명절 동안 용량을 초과하는 교통수요 집중현상으로 인하여 고속도로 지·정체가 빈번히 발생하며, 이로 인해 고속도로 본연의 기능인 이동성 확보에 곤란을 겪고 있는 실정이다.

그간 고속도로 지·정체를 해결하기 위하여 다양한 고속도로 교통류 관리기법이 국내에 적용되어 왔다. 고속도로 교통류 관리의 대표적인 기법인 램프미터링은 진입램프에서 교통량을 조절함으로써 고속도로 본선의 이동성을 확보하는 기법으로 다양한 장점에도 불구하고, 국내에서는 여러 가지 이유로 도입 및 정착이 어려웠다. 또 다른 대안으로 대부분이 폐쇄식으로 운영 중인 국내 고속도로 운영실태²⁾를 반영한 미터링 기법인 톨게이트 진입제어기법도 적용되고 있다.

톨게이트 진입제어기법은 본선 교통상황에 따라 톨게이트 개방 부스수를 조절, 본선으로 진입하는 교통량을 관리하여 통행환경을 유지하는 방식으로 명절 특별수송기간과 주말 일부 영업소에서 실시하고 있다. 하지만, 운영기준 및 세부운영기법에 대한 사전연구는 충분하지 않은 시작단계라 할 수 있다.

이와 더불어 교통관리용 정보수집 인프라는 루프검지기 위주의 지점수집방식에서 탈피, 전자지불 시스템인 Hi-Pass OBU(On-Board Unit)와 고속도로 본선 노변에 설치된 RSE(Road Side Equipment) 간 DSRC(Dedicated Short Range Communication) 통신을 통한 구간수집방식으로 다변화되고 있다.

이러한 배경에서 국내 고속도로 운영 특성에 적합한 톨게이트 진입제어의 시행효과 증진과 다양한 교통정보를 활용한 제어기준, 시행방안, 최적운영방안 등에 대한 검토가 선행되어야 할 필요가 있다.

- 1) 올림픽대로, 내부순환로 등에서 엇갈림구간, 기하구조불량, 과다 위반에 의한 효율성 저하, 불만가중 등으로 적용에 실패. 2009년 12월 장수, 중동, 송내IC에 실시중임
- 2) 2012년 1월 현재 개방식 톨게이트는 13개소, 234차로(하이패스차로포함), 폐쇄식 톨게이트는 304개소, 2330차로(하이패스 차로포함)가 운영 중에 있음

본 연구는 고속도로 교통관리자가 교통관리 의사결정시 의사결정도구로 활용할 수 있도록 톨게이트 진입제어에 대하여 운영방식을 개선하고 제어과정을 반영, 톨게이트 진입제어에 대한 운영결과를 제공할 수 있는 효과분석 톨 개발을 목적으로 한다.

II. 선행연구 및 기존사례 고찰

톨게이트 진입제어는 신호등에 의해 진입량을 조절하는 램프미터링과 달리 요금징수시설인 톨게이트를 진입조절 시설로 이용하게 되며 대부분의 톨게이트가 진출입 램프에 설치된 폐쇄식 고속도로에 적합한 기법이다. 고속도로가 폐쇄식으로 운영되는 국내 및 일본 이외에는 설치사례가 전무한 실정이고 개방식으로 고속도로가 운영되는 대부분의 국가에서 램프미터링이 적용중이다. 이러한 제한적인 적용 및 운영으로 직접적으로 연관된 선행연구 및 설치사례는 희소하다고 할 수 있다.

1. 톨게이트 진입제어 사례 및 기준

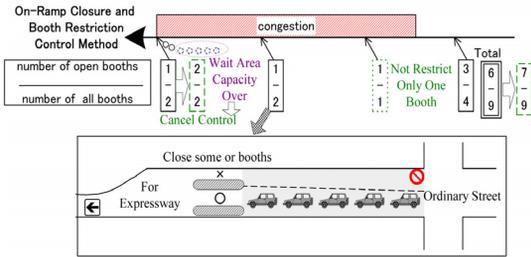
1) 일본사례

일본 한신고속도로는 1980년대부터 램프미터링과 톨게이트 진입제어기법을 혼용하여 사용하고 있으며, 미터링 적용방법은 <표 1>과 같다[1].

한신고속도로의 진입로 미터링 제어를 위한 세부사항은 다음과 같으며 제어방식을 설명한 내용은 <그림 1>과 같다[2, 3].

<표 1> 일본 한신고속도로 미터링 적용방법
<Table 1> Metering Method For Hanshin Expressway

구분	방법	방식명
진입로	• 진입로 부스별 신호제어기를 설치, 유입교통량 조절	진입신호방식
	• 진입로 부스 일부 또는 전체를 폐쇄하여 유입교통량 조절	진입폐쇄부스제한방식
본선	• 본선에 신호기를 설치, 하류부의 진행교통량 조절	본선신호방식
	• 차선별 신호제어기를 설치, 하류부 차선별 교통량을 조절	차선신호방식
	• 차선분리대와 출구제한으로 위빙의 양 감소	위빙제한방식



〈그림 1〉 한신고속도로 진입제어방식
 〈Fig. 1〉 Entrance Control Method of Hanshin Expressway

- 제어기준은 혼잡길이를 사용하며 5단계로 분류
- 교통류 상태별 톨게이트 부스 개방수를 지점 및 혼잡단계별로 사전정의된 계획에 따라 조절
- 혼잡상태는 5분마다 지점별 교통량과 점유율로 산출하고 혼잡발생 지점과 길이도 동시에 산정
- 혼잡 미발생의 차량 headway의 기준은 6초이며 부스별 통과교통량을 시스템 전송
- 혼잡 발생시 차량 톨게이트 부스 통과간격 조절
- 진입램프 최대폐쇄시간은 30분임

HEROINE(Hanshin Expressway Real-time Observation-based & INtegrated Evaluator)은 한신고속도로 단기 교통상황 묘사용 거시 시뮬레이터로 교통수요모형, 교통류모형, 경로선택모형, 교통제어 모형 등으로 구성된다. 10초단위 이동차량을 묘사하여 유입교통량, 통과차량, 구간내 차량, 속도, 점유율, 밀도, 혼잡판단, 톨게이트 대기차량 등을 파악할 수 있다.

Yukimoto 외(2002)의 연구에서 진입램프폐쇄와 톨게이트 부스제어의 효과를 HEROINE를 통해 분석한 결과 오사카-이케다선의 오전첨두시 고속도로 본선에서 혼잡발생교통량은 약 10.4%가 감소하고 전체 통행속도는 약 2.7%가 증가하는 것으로 밝혀고 있다[3].

2) 국내사례

한국도로공사 일부관리구간에서는 “영업소 진입교통량 자동조절 시스템”의 명칭으로 2009년 12월부터 주말 및 명절 특별수송기간에 톨게이트 진입제어를 실시 중에 있으며 대상 영업소 진입부 정체

및 민원 등을 고려하여 탄력적으로 시행하고 있다.

제어기준은 VDS(Vehicle Detection System : 차량 정보 수집체계로 FTMS(Freeway Traffic Management System)에서 주로 루프검지기를 사용) 지점속도로 추정된 구간별 통행상황이며 제어실시에 대한 최종 확인은 CCTV를 통해 운영자가 지·정체길이를 확인, 제어조건을 만족할 경우 톨게이트 개수를 조절하게 된다. 동일 노선내에서 노선전체의 혼잡길이에 따라 제어 강도를 1, 2단계로 구분하여 운영하며 노선별 세부진입조절 기준은 <표 2>와 같다[4].

〈표 2〉 한국도로공사 영업소 진입조절의 노선별 기준
 〈Table 2〉 Tollgate Entrance Control Criteria for Each line of Korea Expressway

구간	1단계	2단계	해제
경부선 서울~남이	서행길이 ≥ 25km	서행길이 ≥ 50km, 정체길이 ≥ 15km	서행길이 < 25km
서해안선 서서울~당진	서행길이 ≥ 15km	서행길이 ≥ 40km, 정체길이 ≥ 12km	서행길이 < 15km
영동선 군자~여주	서행길이 ≥ 15km	서행길이 ≥ 40km, 정체길이 ≥ 12km	서행길이 < 15km
중부선 동서울~음성	서행길이 ≥ 15km	서행길이 ≥ 40km, 정체길이 ≥ 12km	서행길이 < 15km

대상 톨게이트는 제어방향별로 개수가 틀리며 경부선, 서해안선, 영동선, 중부선 등 하행 15개소, 상행 18개소이다. 전술한 것처럼 VDS 및 CCTV를 통해 전체구간의 지·정체 길이를 합산하여 진입조절기준을 만족시키지는지를 확인하고 조건을 만족시킬 경우 단계별 제어를 실시한다. 1단계의 경우 입구차로를 1개 차로 폐쇄하고, 2단계는 2개 차로를 폐쇄한다. 2차로 운영영업소의 경우 최소 운영차로 수 확보를 위해 2단계는 시행하지 않게 된다.

2008년 명절 특송기간부터 시범적으로 운영되었으며, 2009년 설연휴 4개 노선 22개 영업소를 대상으로 실시한 결과 귀성 및 귀경 방향 정체길이를 40~60km 가량 단축시키는 효과를 나타낸 것으로 확인되었다[5]. 임진원(2011)의 연구에서는 교통시뮬레이터인 VISSIM을 이용하여 톨게이트 진입제어의 효과를 분석한 결과 1단계 시행시 6백만원/시의

3) 2010년 12월 기준

절감효과가 나타났고 2단계 시행시 12백만원/시의 절감효과가 나타나는 것으로 분석하고 있다[6].

2. 혼잡지표 및 기준

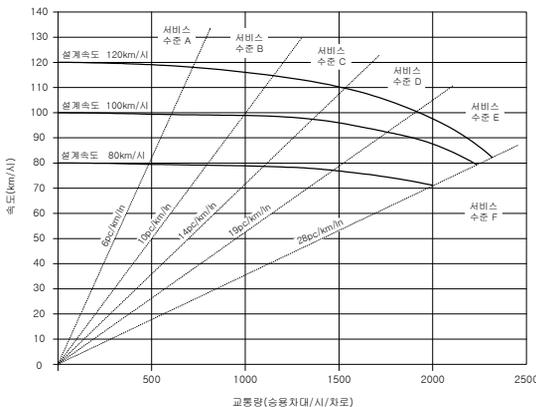
이승준 외(2008)는 기존에 사용 중인 혼잡 측정 기준의 정리를 통해 교통량기반 측정기준, 통행시간기반 측정기준, 통행밀도기반 측정기준 등 세 가지 유형으로 분류하였다[7].

원제무(2004)는 도시교통시설의 혼잡도를 나타내는 지표로 속도, 교통시설의 v/c 특성, 자유이동류를 제약하는 차량의 비율 및 제약시간 길이 등을 함께 나타낼 수 있어야 한다고 정의하고 있다[8].

오오쿠라 이즈미(2007)는 “자동차 전용도로에서 정체검출의 상태량으로서는 평균 속도를 쓰는 경우가 많다”라고 명시하고 있다[9].

도로용량편람(2005)에서는 “일반적으로 Level of Service(LOS) E수준과 F수준의 경계는 용량이 된다.”라고 명시하고 LOS F는 “차량 행렬(queue) 또는 와해상태(breakdown) 지점의 운행상태를 설명하는 데 사용된다. 도착교통량이 통과교통량보다 많으면 차량 대기 행렬이 형성된다.”라고 정의하고 있다[10].

이러한 정의를 토대로 LOS F 이하 상태를 혼잡상태로 규정할 수 있고 <그림 2>의 속도-교통량 곡선에 의해 설계속도 100km/h일 때 혼잡상태 기준속도는 약 80km/h임을 알 수 있다.



<그림 2> KHCM 속도-교통량곡선에서 혼잡상태 분류
<Fig. 2> Congestion Classification in KHCM

대부분 교통관리시스템에서는 교통정보수집수단의 1차 수집 정보 중 산출이 편리한 평균통행속도를 주로 사용하고 있다. 국내의 경우 평균통행속도에 따라 정체, 서행, 소통원활 3단계로 소통상태를 구분하고 있으며 세부사항은 <표 3>과 같다.

일본 도로공단에서도 통행속도 기반으로 혼잡을 “통행속도 40km/h 이하로 저속 주행하는 상태”로 정의하고 “정지 및 발진을 반복하는 차량대기행렬의 규모가 1km 이상이고 15분 이상 지속되는 상태”와 같은 혼잡 길이를 통한 기준이 추가되어 있다.

<표 3> 국내 교통관리시스템별 지·정체 수준 정의
<Table 3> Congestion Definition for each Agency

운영주체	정의	지표	
지방부 고속도로 (한국도로공사)	소통원활	70km/h 이상	속도
	서행	30~70km/h	
	정체	30km/h 미만	
도시부고속도로 (서울도시고속도로 교통관리센터)	소통원활	50km/h 이상	속도
	서행	30~50km/h	
	정체	30km/h 미만	
국도(한국건설 기술연구원)	소통원활	40km/h 이상	속도
	서행	20~40km/h	
	정체	20km/h 미만	

III. 톨게이트 진입제어 효과분석 톨 개발

1. 현 톨게이트 진입제어방식의 개선

톨게이트 효과분석 톨에서는 기본적으로 현재 운영하고 있는 진입제어기법의 문제점을 진단하고 개선사항을 반영하여 구성하도록 하였다.

기존 진입조절기준은 서행 및 정체 발생구간 길이이며 교통패턴이 변동되거나 기존 패턴을 따르지 않는 교통현상이 발생하였을 때에는 적용이 어려운 문제가 있다. 또한 대상구간의 전체 서행길이 및 정체길이를 지표로 사용할 경우 다음과 같은 문제점이 발생할 여지가 있다.

첫째, VDS 지점속도를 기초자료로 IC(JC)~IC(JC)의 제어구간 공간평균속도를 추정하는 현 방식에서는 지점기반변수를 공간기반변수로 변환해야 하며 공간기반 변수 또한, 속도에서 서행 및 정체길이를

변환하여야 하므로 최종 변환된 제어변수가 구간의 교통상황에 대한 대표성을 나타내기가 어렵다.

둘째, 제어구간별 서행 및 정체길이가 아니라 전체 제어구간의 서행 및 정체길이를 산출하여 제어 기준과 비교를 수행하므로 특정지점에 혼잡이 발생, 파급되어 제어기준까지 도달 전에는 제어 실시가 이루어지지 않으므로 상승정체구간 및 특정지점 혼잡발생시 국지적인 제어가 불가능하다.

셋째, 세부적인 혼잡판별 기준을 혼잡상태 변이의 이론적 속도인 80km/h보다 낮은 70km/h를 사용하고 있다. 속도기준은 그간 운영 경험치이며 이러한 기준 적용시에는 교통류의 혼잡상태로의 변이 이후에 제어가 실시되므로 빠른 대응이 어렵다.

자료수집 측면에서도 신뢰도가 저하된 VDS 수집 자료를 근간으로 최종적으로는 CCTV를 통한 운전자 육안 확인자료를 이용하므로 제어 전과정을 자동화, 시스템화하기에는 한계가 있다.

운영자측면에서도 제어를 실시할 때 진입제어에 따른 교통상황 변화를 확인할 수 있는 의사결정용 정보 없이 직관적인 운영을 해야 하므로 책임소재로 인한 소극적 대응이 발생할 소지가 있다.

이러한 전반적 문제점을 개선하고 운영자에게 톨게이트 진입제어시 교통류변화에 대한 정보를 제공할 수 있는 효과분석 툴을 개발하였고 개발된 효과분석 툴에는 다음 사항을 개선하였다.

- 기존 혼잡길이에서 통행속도로 제어기준의 변경 및 제어기준속도 변경
- 신뢰성 높은 수집매체로 수집수단 변경
- 관리구간을 노선단위에서 IC~IC로 세분화
- 혼잡길이에 따라 제어강도를 조절

2. 효과분석 툴의 구성

1) 효과분석 툴 기능구성

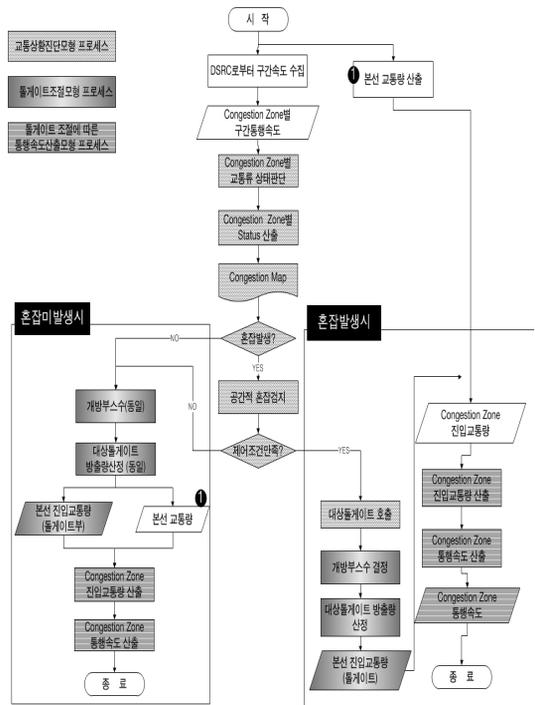
기존 톨게이트 진입제어 방식의 개선내용이 포함된 효과분석 툴을 교통상황 진단, 톨게이트 조절, 톨게이트 조절에 따른 통행속도 산출 등 3개 부문으로 구성하였다.

〈표 4〉 효과분석 툴의 부문별 세부설명
(Table 4) Specific Description for Effectiveness Analysis Tool of Each Parts

부문	내용
교통상황 진단	<ul style="list-style-type: none"> • 본선 관리구간의 혼잡상태 모니터링 • 교통류별 Status 판정 • 혼잡의 지속시간 확인 • 톨게이트 진입제어 시, 종점을 결정
톨게이트 조절	<ul style="list-style-type: none"> • 교통상태에 따라 개·폐 부수수 결정 • 본선 진입 교통량 및 대기행렬 처리
톨게이트 조절에 따른 통행속도 산출	<ul style="list-style-type: none"> • 진입제어시 변화되는 교통량에 따른 영향도 산출 • 톨게이트 조절시 본선통행속도 산출

2) 효과분석 툴의 톨게이트 진입제어 절차

효과분석 툴에서 구현한 톨게이트 진입제어절차는 <그림 3>과 같으며 관리구간의 교통상황검치 및 제어조건 만족여부 판단, 제어조건 만족시 진입제어 실시 등의 기본적 절차는 기존모형과 동일하다.



〈그림 3〉 효과분석 툴의 톨게이트 진입제어절차
(Fig. 3) Tollgate Entrance Control Process

3. 교통상황 진단부문 세부구성

1) 혼잡지표 및 교통정보수집매체 선정

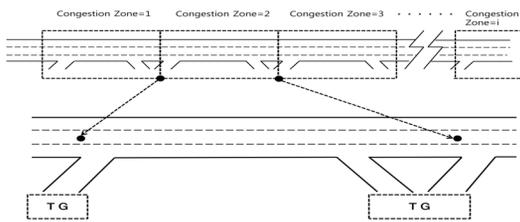
효과분석 톨의 혼잡지표 선정을 위한 기본 전제는 “수집 및 가공이 용이하고, 이해 및 인식이 쉬우며 현재 FTMS에서 가장 활발히 사용되어 혼잡상황의 분류가 가능”이며 이러한 조건을 만족시키는 구간통행속도를 혼잡지표로 선정하였다.

현재 FTMS에서 사용되고 있는 구간통행속도 수집매체는 VDS와 Hi-Pass용 RSE를 이용한 방식이 있다.4) 수집정보 신뢰성이 확보되지 않을 시 교통상황 파악이 어렵고 제어 효과가 반감되게 되므로 구간통행속도 산출을 위해 실측조사자료와 매체별 산출자료의 비교를 통한 신뢰성 검증을 실시하였다.5)

신뢰성 검증 결과 잦은 고장과 낮은 신뢰성을 나타내는 VDS를 대체할 수 있는 Hi-Pass용 RSE를 통한 수집방식을 정보수집매체로 선정하였다.

2) 제어단위 구성

기존 노선단위 톨게이트 진입제어방식의 문제점을 보완하기 위해서 제어단위를 IC to IC(JC)를 기본으로 단위(Congestion Zone, 이하 ConZone)별로 혼잡관리를 실시하도록 구성하였다. 구성방안은 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 개발모형의 제어단위 구성
<Fig. 4> Effectiveness Analysis Tool Control Unit

- 4) 또 다른 구간정보수집매체로 TCS(Toll Collection System)가 있으나 요금징수전용매체로 FTMS에서 활용도가 낮으며 자료의 접근이 어려우므로 연구의 검토대상에서 제외
- 5) 현장조사는 2010년 4월 3일(토) 06~13시, 경부고속도로 서울TG~오산IC구간(하행)에서 실시. 평균통행속도주행법으로 주행한 시험차량의 GPS 로그파일과 VDS 및 하이패스 RSE 구간통행속도를 분석결과 실측자료 대비 오차율이 VDS는 약 29.8%, 하이패스 RSE는 약 12.8%로 분석됨.

3) 교통상황 진단모형

효과분석 톨의 교통상황 진단부문은 교통류 상태를 파악하기 위한 부문으로 세부적으로 단구간 검지모형과 다구간 검지모형으로 구성하였다.

단구간 검지모형은 ConZone별 교통상태 및 혼잡의 시간적 변화를 파악하기 위한 모형이다. 다구간 검지모형은 단구간 검지모형의 검지결과를 기반으로 ConZone 결합을 통해 혼잡의 공간적인 정도를 파악하기 위한 모형이다.

단구간 검지모형의 교통상태 파악은 하이패스용 RSE 수집자료의 5분 통행속도로 산출하며 교통류 상태 기준은 <표 5>와 같이 도로용량편람상의 이론적 기준속도인 80km/h를 사용하였다.

<표 5> 단구간 검지모형의 교통류 상태 분류 세부기준
<Table 5> Traffic Condition Criteria for Each ConZone Detection Model

구분	구간통행속도 기준	교통류상태
Status 0	80km/h 이상	소통원활, 정상상태
Status 1	30km/h ~ 80km/h	서행
Status 2	30km/h 미만	정체
Status 3 ⁶⁾	30km/h 미만이 지속될시	심각한 정체

다구간 검지모형은 단구간 검지모형 조합을 통해 노선전반의 교통상태를 파악하는데 사용되며 단구간 검지모형 교통상태 분류결과를 입력자료로 한다. 즉, 혼잡과급효과를 파악하기 위한 모형으로서 혼잡과급에 따른 교통류 상태 악화를 방지하기 위해 제어가 필요한 조건을 다음과 같이 설정하였다.

- 2개 이상 연속구간이 Status 2일 때 각 구간의 Status를 2에서 3으로 1단계 증가(정체상태의 공간적 과급방지를 위한 제어실시조건)
- 3개 이상 연속구간이 Status 1일 때 각 구간의 Status를 1에서 2로 1단계 증가(서행상태의 공간적 과급방지를 위한 제어실시조건)

단구간, 다구간 교통류 상태를 파악한 최종 결과

- 6) 단구간 검지모형에서 Status 3는 진입제어를 실시하여도 혼잡이 지속되는 경우로서 동일 ConZone의 Status가 연속적으로 2주기 이상일 시 Status 3에 해당됨

는 운전자에게 Congestion Map 형태를 통해 제공하게 되며 톨게이트 조절을 위한 기준자료로 활용된다. Congestion Map에서 가로축은 공간, 세로축은 시간을 나타내므로 세로축을 통한 세부구간의 시간별 교통 상태변화와 가로축을 통한 특정시간대 발생하는 혼잡구간 및 혼잡길이 등의 부가적인 자료를 파악할 수 있으며 예시는 <그림 5>와 같다.

	서울TG- 신갈JC	신갈JC- 수원JC	수원JC- 기흥JC	기흥JC- 동탄JC	동탄JC- 오산JC	오산JC- 안성JC
1	82	81	79	82	86	83
2	79	71	36	81	80	78
3	84	63	32	81	69	79
4	85	26	32	81	48	76
5	85	29	41	82	35	78
6	75	30	76	82	33	75
7	67	29	77	77	33	72
8	59	32	42	65	30	69
9	60	38	37	43	32	67
10	68	64	22	28	30	66
11	76	30	26	27	39	68
12	84	27	35	28	40	66
13	78	31	25	27	42	62
14	66	34	37	31	36	60
15	60	29	38	31	38	58
16	83	38	23	31	31	60
17	102	29	29	26	31	61
18	69	35	30	27	33	33
19	65	28	29	29	34	32
20	65	34	24	28	35	32

<그림 5> Congestion Map 예시
<Fig. 5> Example of Congestion Map

4. 톨게이트 조절부문 세부구상

1) 제어시행방식

톨게이트 용량과 이용률이 적은 경우 진입제어를 실시하더라도 본선에 대한 진입제어 효과가 미비하여 제어의 실효성이 떨어진다. 또한, 진입제어를 시행함에 있어 고속도로 진입이 불가능한 이용자의 불만도 함께 고려해야할 사항이다.

제어시행방식은 관리구간 내 전체 톨게이트를 대상으로 하는 일괄시행방식과 필요한 톨게이트만 제어하는 일부시행방식으로 구분된다. 본 연구에서는 수요조절 능력이 낮은 톨게이트를 제외하고, 비제어 톨게이트를 대안 경로로 활용할 수 있는 일부시행방식을 채택하였다.

2) 대상톨게이트 선정

일부 시행방식에서는 관리구간 톨게이트 중 필

요한 톨게이트에 대해서만 제어를 실시하므로 진입 제어 대상 톨게이트를 선정할 필요가 있다.

대상 톨게이트 선정을 위해서 톨게이트 용량과 이용률(분석기간 동안 최대진입교통량/용량)을 변수로 군집분석(Cluster Analysis)을 통해 톨게이트를 분류하였으며 군집분석을 위한 통계분석프로그램은 PASW Statistic 18(SPSS)을 사용하였다.

이용률에 따라 3개 유형으로 톨게이트 그룹을 분류하였으며 이용률이 높은 그룹과 보통인 그룹만을 제어대상 톨게이트에 포함하였다. 하지만, 이용률이 보통인 그룹 중 TCS 차로가 1차로인 경우 진입제어가 불가능하므로 대상에서 제외하였다.

진입제어가 실시되고 있는 경부선 하행 서울~남이JC 구간에 대한 대상톨게이트 선정결과는 비교는 <표 6>과 같다.8)

기존방안에서 대상톨게이트인 기흥 TG는 설치 차로수에 비해 적은 통과교통량으로 이용률이 낮은 그룹에 속하였다. 이런 경우 제어를 실시하더라도 제어의 영향력이 미비하고 제어효과가 반감되므로 본 연구의 대상톨게이트 선정결과에서는 제외하였다. 반면 청원 TG는 분석결과 이용률이 보통인 그룹에 포함되어 대상 톨게이트에 포함되었다.

<표 6> 대상톨게이트의 선정결과 및 기존방식과 비교
<Table 6> Selectin Result for Subject Tollgate

기존 한국도로공사방안	본 연구 선정결과
수원TG, 기흥TG, 오산TG, 안성TG, 천안TG 등 5개소	수원 TG, 안성TG, 오산TG, 천안TG, 청원 TG 등 5개소

3) 관리구간별 제어 대상 톨게이트의 지정

ConZone은 기본 제어단위로서 제어대상 톨게이트는 해당 Conzone의 시작노드에 위치한 톨게이트로 설정한다. 하지만, 일부 시행방식에서 ConZone

7) 2010년 4월 한달 동안의 서울TG-청원TG구간 TCS(하이패스를 제외한 기존 요금징수방식) 차로 최대진입교통량 자료와 하이패스 및 TCS 차로수 자료를 통해 분석하였음

8) 동일한 구간에 대해서 군집분석을 통해서 대상톨게이트 선정결과를 비교하였으며, 실제 분석 시에는 서울TG~안성JC 구간 내의 톨게이트만을 대상으로 함

과 제어대상 톨게이트 관계가 1:1대응이 불가능하므로 ConZone별로 대상 톨게이트를 매칭할 필요가 있다. ConZone의 시작노드에 JC(신갈JC~수원IC)가 포함된 경우나 ConZone(기흥동탄IC~동탄JC)에 대상 톨게이트가 없을 경우 가장 가까운 상류부 톨게이트를 매칭하였다. 제어대상 톨게이트를 매칭한 결과를 TG Matching table이라 하며 <표 7>과 같다.

<표 7> TG Matching Table 예시
(Table 7) Example of TG Matching Table

구간	서울TG ~신갈JC	신갈JC ~수원IC	수원IC~ 기흥동탄	기흥동탄 동탄JC	동탄JC ~오산IC	오산IC ~안성JC
대상 TG	서울TG	서울TG	수원TG	수원TG	수원TG	오산TG

4) 톨게이트 조절 방안

톨게이트 조절은 해당 ConZone의 교통상황 (Status)에 따라 개폐되는 부스수가 결정된다. 교통류 상태별 조절 부스수의 산정은 <표 8>과 같다.

톨게이트 폐쇄를 피하기 위해 TCS 차로는 최소 1개 이상 운영하며 제어단위는 1개차로로 설정하였다. 본선진입교통량은 개방 부스수에 따라 TCS 차로별 용량을 기준으로 산정되도록 구현하였다.

<표 8> 교통류 상태별 조절 부스수
(Table 8) Control Criteria for Traffic Condition

Status	조절부스수	비고
0	0개 폐쇄	제어미실시
1	0개 폐쇄	제어미실시
2	1개 폐쇄	제어시작
3	(이전주기-1)개 폐쇄	Status 3 지속시 주기마다 1개 차로씩 추가폐쇄(최소 1개차로 운영시까지)

5. 통행속도 산출부문 세부구성

진입제어시에는 본선 진입교통량 변동과 본선 통행속도가 변화하며 효과분석 톨에서 제어시행효과의 확인을 위해서는 변동되는 교통량에 따른 교통류 상태를 피드백하는 기능이 필요하다. 이를 위해 Greenshields 모형으로 통행속도 산출모형을 구성하였다. Greenshields 모형은 사용이 간단하고 연속교통류의 형태를 잘 나타내며, 넓은 범위에 걸쳐

만족스러운 적합성을 나타낸다[11].

Greenshields 교통량-속도 관계식을 모형 종속변수인 속도를 기준으로 정리하면 <식 1, 2>와 같다.

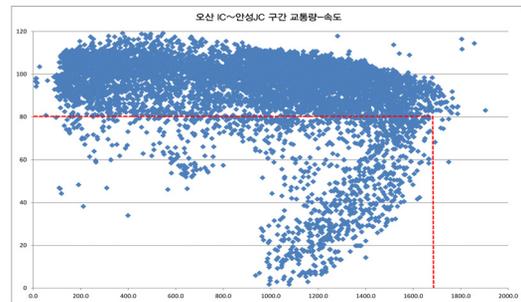
$$q = k_j(u - \frac{u^2}{u_f}) \tag{1}$$

$$u = \frac{u_f}{2} \pm \sqrt{\frac{u_f^2}{4} - \frac{u_f}{k_j} q} \tag{2}$$

- 여기서, k_j = jam 상태의 임계치
- u_f = 자유류 상태의 통행속도
- u = 통행속도 (km/h)
- q = 교통량 (vph)

모형식 수립을 위한 교통량-속도관계에 대한 기초분석은 VDS 자료(9)를 토대로 분석하였다.

분석결과 오산IC~안성JC구간을 제외하고 대부분 구간에서 자유류 및 안정류에서 강제류로 전이시 교통류가 와해되는 현상이 발생하므로 정상교통류에서 혼잡교통류로 전이과정이 발생하는 오산IC~안성JC 구간 데이터를 기준자료로 활용하였으며, 해당 구간의 교통량-속도관계는 <그림 6>과 같다.



<그림 6> 오산IC~안성JC 교통량 속도 관계
(Fig. 6) Relation between Volume and Speed of Osan IC~AnsungJC

<그림 6>에서 보듯이 정상 및 혼잡교통류의 기준 속도는 약 80km/h에서 나타나며, 정상교통류와 혼잡교통류가 비대칭을 나타내고 있다. 따라서 속

9) 혼잡 발생이 예상되는 5월 1달간의 주말 VDS 자료를 활용하여 ConZone별 교통량-속도관계 그래프를 확인하였으며, 차종분류는 실시하지 않았음

도산출모형은 Greenshields 모형을 기본으로 하되, 정상교통류와 혼잡교통류의 모형식을 차별화한 2-Regime 모형으로 구성하였고 기본모형 구성 후 ConZone별로 모형식을 조정하였다.

제약조건인 제공근에 의한 허수 발생을 방지하고자 해당 도로의 최대교통량을 설정, 이에 따라 k_j 값을 조정하였고 산출식의 정확도를 높이기 위해 조정계수 α 를 추가하였다.

최종 속도-교통량 관계식은 <식 3>과 같다.

$$u = \alpha \times \left(\frac{u_f}{2} \pm \sqrt{\frac{u_f^2}{4} - \frac{u_f}{k_j} q} \right) \quad (3)$$

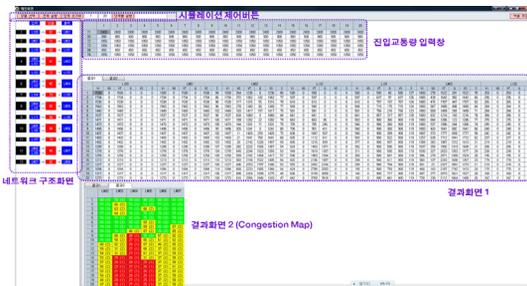
6. 기타부분

1) 네트워크 구성

노드는 IC 및 JC에 해당하는 Model Node와 톨게이트를 표현하기 위한 Tollgate node로 구분하고 속성에 처리용량 개념인 Limit Volume을 부여하여 대기행렬 산출시 활용하였다. 링크는 유입링크인 Input Link와 유출링크인 Output Link로 구성하였다.

2) 기타 기능 구성

효과분석 툴은 크게 제어부와 네트워크 구조부, 진입교통량 조절부, 결과화면으로 구성되며, 네트워크 관계 및 기하구조, 교통량 등의 입력자료는 별도의 파일을 통해 작성한다. 효과분석 툴의 실행화면은 <그림 7>과 같다.¹⁰⁾



<그림 7> 효과분석 툴 화면구성
(Fig. 7) Layout of Effectiveness Analysis Tool

10) 효과분석 툴은 Delphi를 통해 구현

IV. 적정성 검증 및 개선방안 효과분석

1. 효과분석 툴 적정성 검증

효과분석 툴의 경우 현실상황을 모사할 수 있는 능력이 우선되어야 하므로 본 연구에서 개발한 효과분석 툴에 대한 적정성 검증을 실시하였다.

적정성 검증을 위하여 수집매체별 신뢰도 분석시 활용하였던 2010년 4월 3일 토요일 07~12시, 서울TG~안성JC 구간의 주행속도 실측조사 자료와의 비교를 수행하였다.

분석은 IC~IC(JC) 구간인 ConZone별 5분 단위 통행속도를 비교하였으며 분석결과 평균절대오차(MAE : Mean Absolute Error)는 전 구간 평균 약 9.09%로 일정수준 이상의 현실모사력을 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

2. 개선방안 효과분석

1) 분석조건

일정수준 이상의 현실모사력을 나타내고 있는 효과분석 툴을 토대로 톨게이트 진입제어 미시행시와 기존의 한국도로공사 진입제어기법, 그리고 본 연구에서 제시한 개선방안이 반영된 기법에 대한 비교 분석을 수행하였다.

분석구간은 경부고속도로 하행선 서울TG~안성JC구간이며 분석시간은 2010년 4월 3일 토요일 07~12까지 총 5시간이다.

기존 한국도로공사 진입제어기법과 본 연구에서 제시한 개선방안의 경우 상이한 점이 존재하므로 다음과 같은 가정 및 전제조건을 통해서 가능한 동일한 기준에서 분석하였다.

- 효과적인 연구를 위해 분석구간을 고속도로 본선과 톨게이트 인근으로 한정(하류부 교차로 미포함)
- 한국도로공사방안의 제어기준을 적용시키기 위해 기존기준에서 전체구간대비 혼잡구간의 비율을 산정, 혼잡기준길이를 재산정
- 톨게이트 부스는 전체 개방상태이며 상하행

- 비율은 램프교통량을 통해 조사한 비율적용
- 기흥 IC 진출교통량은 기흥동탄 IC로 진출¹¹⁾
 - 상습혼잡구역(서울TG~기흥IC)은 대상 및 상류부 톨게이트 등 총 2개 톨게이트를 ConZone에 할당하고 상습혼잡구역이외의 톨게이트는 1:1 할당
 - 한국도로공사방안의 경우 기흥TG 포함하고 혼잡기준속도도 80km/h로 설정
 - 서울TG~수원IC 구간의 실질적인 제어를 위해서 Mainline Metering 개념에서 서울 TG도 제어대상에 포함
 - 서울TG의 경우 혼잡관리를 위해 개폐되는 부스의 수를 2개 단위로 조정

2) 분석결과

효과분석 톨을 통한 분석결과 개선방안과 톨게이트 진입제어 미시행사와 비교했을 경우 약 21.5%의 통행속도가 개선된 것으로 분석되었다. 기존 한국도로공사 진입제어방안과 개선방안을 비교한 결과 통행속도 개선율은 약 11.7%로 나타났다.

세부적으로 가장 높은 개선율을 나타내는 구간은 수원IC~기흥동탄IC 구간이며 가장 높은 통행속도를 나타내는 구간은 서울IC~신갈JC로 평균 통행속도 85.2km/h를 나타내고 있다.

톨게이트 진입제어 미시사와 개선방안, 기존 한국도로공사 톨게이트 진입제어시의 통행속도 분석 결과는 <표 9> 및 <그림 8>과 같다.¹²⁾

대부분의 통행여건 개선은 서울 TG~기흥동탄IC 구간에서 나타났고 이러한 결과는 해당 구간이 높은 본선교통량과 높은 진입교통량을 나타내기 때문으로 분석된다. 즉, 제어 실시 전 높은 본선진입 수요교통량은 진입이 제한되어 톨게이트 외부에서 대기하게 되고 간선도로 지체상황은 빠르게 악화 및 혼잡지점이 고속도로 본선에서 간선도로로 이동하게 되는 결과를 가져오게 된다.

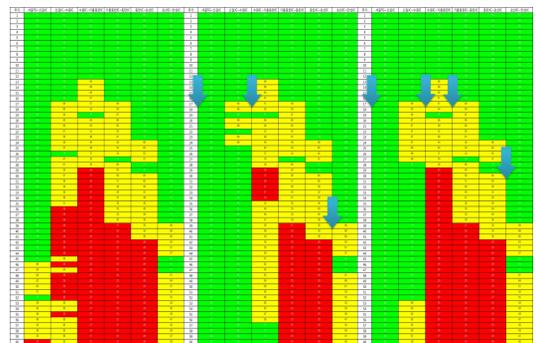
11) 기흥IC(하행)의 경우 현재 진출램프만 위치하므로, 네트워크 구성시 기흥IC는 별도로 구현하지 않고 진출교통량은 기흥동탄IC에 포함

12) 효과분석 결과는 5시간 전체를 평균한 결과임

<표 9> 개선효과 분석결과
<Table 9> Analysis Results of Effectiveness

		1	2	3	4	5	6	전체
미시행시	속도(km/h)	74.5	50.0	43.9	49.8	57.2	76.7	56.2
	개선방안	속도(km/h)	85.2	82.7	74.4	49.8	57.2	76.7
개선방안	개선율(%)	14.4	65.4	69.5	0.0	0.0	0.0	21.5
	기존방안	속도(km/h)	84.7	81.4	47.9	49.8	57.2	76.7
기존방안	개선율(%)	13.7	62.8	9.1	0.0	0.0	0.0	11.7

주 : 구간 1 서울TG~신갈JC, 구간 2 신갈JC~수원IC, 구간 3 수원IC~기흥동탄IC, 구간 4 기흥동탄IC~동탄JC, 구간 5 동탄 JC~오산IC, 구간 6 오산IC~안성JC



<그림 8> Congestion Map 결과
<Fig. 8> Results of Congestion Map

이러한 현상에 대해서는 연구의 한계로 수행하지 못한 고속도로 톨게이트 진입제어와 간선도로 신호제어전략을 아울러 평가할 수 있는 네트워크 최적화 측면에서의 분석이 요구되어진다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 고속도로에서 빈번하게 발생하는 혼잡을 해소하기 위한 미터링 기법 중 톨게이트 진입제어기법에 대해 제어시행효과를 증진하고 교통류관리를 위한 의사결정과정에 필요한 정보를 제공하는 톨게이트 진입제어의 효과분석 톨을 개발하고 현행 톨게이트 진입제어기법을 개선하는 것을 그 목적으로 하였다.

현 톨게이트 진입제어를 개선하기 위해 제어변수 및 세부기준, 정보수집매체, 관리의 공간적 단위,

운영방식 등을 개선하였고 이를 효과분석 톨에 구현하여 미시행시, 기존 한국도로공사 진입제어 방안, 개선방안에 대한 효과분석을 실시하였다.

분석 결과, 동일 조건에서 미제어시와 한국도로공사 기존 톨게이트 진입제어방식보다 개선방안이 효과가 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 폐쇄식으로 운영되는 국내 고속도로 환경에서 필수적인 진·출입 시설을 이용하는 톨게이트 진입제어의 시행은 통행속도 개선 효과를 가져올 수 있으며 국내 고속도로 특성이 반영된 적합한 관리기법이라 추론할 수 있다. 즉, 고속도로 교통류 관리를 위해서 톨게이트 진입제어의 시행은 지속적으로 필요하며 전반적인 통행여건 개선을 위한 적용범위의 시·공간적 확대와 상습혼잡구간의 해소를 위한 특정구간 상시적용 등과 같은 적극적인 검토가 요구된다.

본 연구효과를 증진시키기 위해서는 추가연구가 필요하며 관련항목을 다음과 같이 제시하였다.

첫째, 데이터 연계로 수집되는 단기에측교통량을 개발 모형내에서 예측할 수 있는 기능이 필요하다. 예측기능이 확보되면 가까운 장래의 교통류 관리에 대한 모의실험결과를 확인할 수 있으므로 교통류 제어시행을 위한 의사결정지원이 가능하다.

둘째, 톨게이트 진입제어기법의 한계인 톨게이트 진입교통량의 방향별 수요를 확인하기 위한 수단의 설치가 필요하다. 현 톨게이트 진입제어방식에서는 제어방향 및 타방향 차량도 포함됨으로써 진입제한 및 대기행렬의 증가 현상 등이 발생한다. 이러한 문제점은 향후 램프상 검지기 설치를 통해서 개략적인 방향별 통행수요를 실시간으로 파악할 수 있을 경우 제어방식에 이를 반영하여 해결할 수 있으며 이러한 방안에 대한 연구 역시 추가로 필요하다.

셋째, 개별차량의 특성이 반영된 보다 정밀한 수준의 Microscopic Simulator의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 효과분석 톨은 진입제어에 대한 기초적인 기능을 수행하는 톨로서 그 한계가 분명히 있다.

넷째, 연구의 한계상 고속도로 본선의 교통류 관리효과 극대화를 목표로 수행하였으며 톨게이트 진입제어의 효과를 배가시키기 위해서는 간선도로 대기행렬을 조절하면서 고속도로 본선 교통류 관리를

수행할 수 있는 간선도로 및 고속도로 연계제어전략, 최대제어시간, 본선부 교통상태와 톨게이트 이용수요에 따른 동적제어 등에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Toru Takkahashi(1994), *Institutional Design for IVHS in Osaka : Applying the Concept of ISTE A in Japan*, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, pp.26-27
- [2] 한국도로공사(2009), *고속도로 RMS 타당성 조사 연구*, 한국도로공사
- [3] Takehiko YUKIMOTO et al.(2002), "Evaluation of On Ramp Metering on Hanshin Expressway Using Traffic Simulator(HEROINE)," Proceeding of 9th ITS World Congress
- [4] 팽우선(2010), "고속도로 영업소 진입교통량 조절 시행," 도로정책 Brief 27, 국토연구원
- [5] 이승준(2009), *고속도로 미터링 적용방법 및 효과분석에 관한 연구*, 아주대학교 ITS 대학원 석사학위논문
- [6] 임진원 외(2011), "고속도로 영업소 미터링 효과에 관한 연구," 한국 ITS학회논문지, 제10권 제4호, pp.1-10
- [7] 이승준 외(2008), "소통관리 지표 개발을 위한 기존 혼잡지표의 국내 적용성 평가 연구," 한국 도로학회 논문집, 10(3), pp.119-128.
- [8] 도철웅(2004), *교통공학원론(상)*, 청문각
- [9] 오오쿠라 이즈미(2007), *교통공학*, 동화기술
- [10] 대한교통학회(2001), *도로용량편람*, 대한교통학회
- [11] Daniel L. Gerlough et al.(1975), *Traffic Flow Theory; A Monograph*, Special Report 165, Transportation Research Board

저자소개



이 환 필 (Lee, Hwan-Pil)

2011년 2월 : 아주대학교 교통공학 박사
2005년 3월 ~ 2012년 2월 : 아주대학교 교통연구센터(ATRI) 연구원
2003년 2월 : 아주대학교 교통공학 석사
2012년 2월 ~ 현 재 : 한국도로공사 교통정보통합활용지원센터(OASIS)



윤 일 수 (Yun, Il-Soo)

2006년 1월 : University of Virginia 교통공학 박사
1995년 2월 : 한양대학교 일반대학원 교통공학 석사
1993년 2월 : 한양대학교 도시공학과 학사
2009년 9월 ~ 현 재 : 아주대학교 교통시스템공학과 조교수



오 영 태 (Oh, Young-Tae)

1989년 1월 : Polytechnic University 교통공학 박사
1985년 1월 : Polytechnic Institute of New York, 교통공학 석사
1993년 3월 ~ 현 재 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수



김 수 희 (Kim, Soo-Hee)

2007년 8월 : 아주대학교 교통공학 박사
1999년 3월 : 아주대학교 교통공학 석사
2002년 3월 ~ 2011년 5월 : 아주대학교 교통연구센터(ATRI) 연구원
2011년 6월 ~ 현 재 : 한국도로공사 교통정보통합활용지원센터(OASIS)