

본선미터링과 램프미터링을 이용한 고속도로 통합교통관리 전략

Integrated Traffic Management Strategy on Expressways Using Mainline Metering and Ramp Metering

정영제* 김영찬** 이승준***
(Youngje Jeong) (Youngchan Kim) (Seungjun Lee)

요약

본 연구에서는 램프미터링과 요금소 본선미터링을 이용한 고속도로 통합교통관리 전략을 제시하였다. 램프와 본선의 통합 미터링을 위해 FREQ에서 램프미터링 진입허용 교통량의 최적화에 사용되는 Demand-Capacity 모형을 수정하여 최적 신호시간 산정모형을 제시하였다. 본 모형은 구간별 통과교통량을 최대화하는데 목표가 있으며, 본선 요금소 및 램프의 미터링 신호시간을 결정할 수 있다. 서울외곽순환선의 김포요금소~시흥요금소 구간을 대상으로 PARAMICS와 API를 이용하여 시뮬레이션 효과분석을 시행하였다. 시뮬레이션 분석결과, 본선미터링을 통해 램프미터링 단독 운영 대비 본선을 소통원활 상태의 속도로 유지할 수 있었으며, 정체구간에서 본선의 통과교통량이 14% 개선된 결과를 나타내었다. 또한 요금소에서의 신호운영으로 400m의 대기행렬이 발생되나, 정체의 분산으로 인해 본선과 램프 모두에서 보다 효율적 교통운영이 가능함을 확인하였다.

핵심어: 통합교통관리, 램프미터링, 본선미터링, FREQ, Demand-Capacity 모형

Abstract

This research proposed integrated expressway traffic management strategy using ramp metering and toll mainline metering. This research suggested a traffic signal optimization model for integrated operation of ramp and mainline metering based on Demand-Capacity Model that is used to optimize allowable input volume for ramp metering in FREQ model. The objective function of this model is sectional throughput volume maximization, and this model can calculate optimal signal timings for mainline metering and ramp metering. This study conducted an effectiveness analysis of integrated metering strategy using PARAMICS and its API. It targeted Seoul's Outer Ring Expressway between Gimpo and Siheung toll gate. As a simulation result, integrated operation of mainline and ramp metering provided more smooth traffic flow, and throughput volume of mainline increased to 14% in congested section. In addition, a queue of 400 meter was formed at metering point of toll gate. This research checked that integrated traffic management strategy facilitates more efficient traffic operation of mainline and ramp from diffused traffic congestion.

Key words : Integrated traffic management, Ramp metering, Mainline metering, FREQ, Demand-Capacity model

† 본 논문은 2012년 11월 한국ITS학회 추계학술대회에서 발표된 논문을 수정보완하여 작성된 것임을 밝힙니다.

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수

** 공저자 및 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

*** 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

† 논문접수일 : 2013년 3월 25일

† 논문심사일 : 2013년 4월 10일

† 게재확정일 : 2013년 4월 20일

I. 서 론

2012년 우리나라 최초의 고속도로인 경부고속도로가 개통 42주년을 맞이하였다. 1970년 서울과 부산을 연결하는 428km의 국내 최초 자동차전용 고속도로인 경부선이 개통한 이래 전국의 고속도로 연장은 2012년 말 현재 4,042km로 전국을 거미줄처럼 연결하는 고속도로 네트워크로 발전하여 국민생활과 경제활동을 지원하는 사회간접자본으로서 역할을 수행하고 있다 [1]. 고속도로 이용차량은 2000년 연간 280만대에서 2012년 현재 일평균 330만대로 2000년 이후 꾸준한 증가세를 보이고 있으며, 이에 따라 교통혼잡의 사회적 비용으로 2008년 현재 고속도로에서만 총 2.8조원의 혼잡비용이 발생되고 있다. 2000년대 이후 고속도로의 혼잡비용은 지속적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다 [2].

한국도로공사는 1992년 경부고속도로 서울, 대전 구간에서 고속도로 교통관리시스템(FTMS)을 시범 설치하여 고속도로 지능형교통관리체계 구축을 시작하였으며, 2013년 1월을 기준으로 경부선 등 31개 노선의 3,763km 구간에서 실시간 교통관리 서비스를 제공 중에 있다. 성공적인 교통관리 시스템 구축에도 수도권 및 부산, 대구 등의 광역권 교통수요 증가는 지속되어 2011년을 기준으로 40kph 이하의 반복정체구간은 전국 고속도로에서 51개 구간, 373km에 이른다. 또한 도로 및 철도의 종합교통개선행대책을 반영한 고속도로 정체구간 전망에 따르면, 2016년 단기 예측을 기준으로 수도권 정체구간이 10% 이상 확대될 것으로 예측되고 있다 [3, 4].

도로교통에서 정체개선을 위한 대책에는 신설, 확장 등 물리적인 개선으로 시설의 공급을 확대하는 방법과 시설의 효율성을 높이기 위한 교통관리의 방법이 적용될 수 있다. 여기에서 교통관리란 사람과 재화의 통행을 개선하기 위해 교통류에 대해 제어, 안내, 경고를 시행하는 것을 의미한다. 도로의 확장 및 신설을 의미하는 물리적 개선에는 비용 및 시간의 제약이 따르며, 도로의 운영개선에는 개선효과의 한계가 있다 [5, 6]. 정체완화의 최대 효과를 거두기 위해서는 이들 간의 조화가 이루어져야하나 국내

에서 교통관리에 대한 인식은 여전히 부족한 실정이다. 일례로 2007년부터 시행된 한국도로공사의 ‘고속도로 교통정체 개선계획’에서는 정체구간을 183km 단축시키는 성과를 거둔바 있으나, 도로 신설 및 확장 등 물리적 개선대책이 주류를 이루고 있다. 효율성 개선을 위한 전형적인 운영개선 기법에 해당하는 램프미터링의 경우 서울외곽순환선 송내~장수 구간의 시범사업 이후 적극적인 확대적용에는 이르지 못하고 있는 실정이다 [7].

이에 본 연구에서는 교통류 제어 중심의 고속도로 교통관리기법의 확산을 위해 적극적 교통관리, 정체가 제어 가능한 교통관리의 구현을 목표로 복수의 교통관리기법을 통합 운영하기 위한 고속도로 통합교통관리의 개념을 제시하며, 이중 램프미터링, 요금소 본선미터링의 통합운영을 통해 반복정체구간의 발전된 교통관리방법을 제시하였다. 교통관리와 관련한 세계적인 추세 또한 Active Traffic Management, Integrated Traffic Management, Sustainable Traffic Management를 모토로 정체상황에 대해 적극적으로 대응하기 위한 교통관리체계가 확산되고 있으며, 이는 교통관리의 기법 측면에서는 기존의 일반적인 교통관리와 동일하나 교통류제어를 수행하는 교통관리기법들을 통합하여 적극적인 정체관리를 수행한다는데 차이가 있다 [7-10, 21].

본 연구에서는 고속도로 통합교통관리의 일환으로 고속도로 본선과 연결로의 정체를 동시에 제어하기 위해 램프미터링과 요금소 본선미터링의 통합미터링 신호시간 산정모형을 제시하였다. 본선이 이미 과포화 상태에 있는 경우 램프미터링 만으로는 효과적인 제어가 어려우며, 이때 고속도로 본선에 대해 적극적 교통관리를 위해 요금소에서 교통류를 직접제어하기 위한 미터링 방법에 해당한다. 이와 함께 고속도로 통합교통관리 전략에 대한 효과 분석을 위해 서울외곽순환선 김포요금소에서 시흥요금소까지 15km 구간을 대상으로 미시적 시뮬레이션 분석을 시행하였으며, 이때 Quadstone PARAMICS 및 이의 API에 해당하는 Programmer 기능을 이용하여 고속도로 교통관리기법들을 구현함으로써 통합교통관리에 따른 정량적 효과를 파악하였다.

II. 통합교통관리 이론 및 사례 검토

고속도로 통합교통관리와 관련한 개념정립 및 사례들을 확인하였다. 고속도로 통합교통관리의 개념을 제시한 사례로 FHWA에서는 <표 1>과 같이 동일한 영향권을 가지는 교통관리기법들 간에 통합 운영의 필요성을 강조한바 있으며, 간선도로의 교차로 신호운영계획을 수립하는데 있어 고속도로 정체를 고려하기 위해 램프미터링과 간선도로 신호운영의 통합을 강조한 바 있다 [11]. 또한 Corridor Management에서는 교통관리의 요소를 고속도로, 간선도로, 교량, 터널 등 도로의 구성요소, 승용차와 버스, 철도 등 통행수단, 교통관리시스템 등으로 구분하고, 이들의 통합관리가 필요함을 지적하였으며 [12, 13], 이외 네덜란드의 Sustainable Transportation Management, 독일의 Integrated Transportation Management 등 교통관리 매뉴얼에서 또한 통합교통관리의 중요성을 역설한 바 있다 [9, 14].

본 연구에서의 고속도로 통합교통관리란 램프미터링, 갓길차로제, 가변속도제어와 같이 고속도로의 소통상태에 따라 독립적으로 운영되어왔던 개별 교통관리기법들을 복합적으로 운영하기 위한 방법을 의미하며, 고속도로 통합교통관리를 통해 소통개선 등 교통관리기법 간의 시너지 효과와 개별기법 운영에 따른 문제점 보완을 목표로 한다.

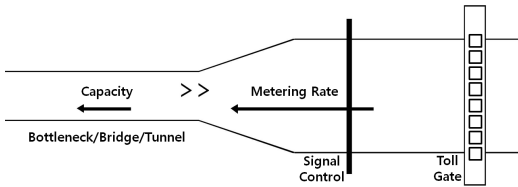
최근 미국과 유럽에서 이슈가 되고 있는 적극적 교통관리라는 의미의 Active Traffic Management를 확인하였다. ATM은 시행지역에 따라 기법의 차이는 있으나, 정체 또는 돌발상황 관리를 위해 적용 가능한 모든 교통관리기법들을 이용해 적극적인 대응을 한다는데 맥락을 같이한다. 영국에서는 M42의 3a~7 JC 구간에서 교통상황을 제어가 가능한 수준에 두는 것을 목표로 ATM 시범사업이 진행되나 있다. 정체관리 관점에서 기존 교통관리와 유사하나 속도제어, 차로관리, 연결로 관리 등 개별 교통관리전략들을 통합된 형태로 적용하는데 차이가 있으며, 가변속도제어와 갓길차로제, 교통정보제공이 통합된 형태로 이뤄져 7~9%에 이르는 용량증대, 최대 24%의 통행시간 감소효과가 확인된 바 있다 [15-21]. 미국 워싱턴주 ATM은 I-5, I-90 등에서 램프미터링, 가변속도제어, HOV 및 HOT, 운전자 교통정보제공, 대기행렬경고, 돌발상황관리를 ATM Sign을 이용하여 통합 및 연계된 형태로 운영 중에 있으며 [22], I-5에서는 최대 30%에 이르는 통행시간 감소효과가 확인된바 있다 [23]. 또한 버지니아에서는 I-66에서 발생하는 반복정체와 사고 개선을 위해 ATM을 구축하였다. 버지니아주 또한 가변속도제어, 차로제어, 대기행렬 경고를 통합된 형태로 운영 중에 있으며 [10, 24], 갓길차로제와 같은 용량확대기법을 통해 통행시간이 최대 30%까지 개선된 결과를 나타내었다 [25].

<표 1> 교통관리 매뉴얼에서의 통합교통관리 정의와 대상
<Table 1> Definition and Object of Integrated Management in Traffic Management Manuals

Manuals & studies	Definition of integrated traffic management	Integration object
Traffic Control System Handbook [11]	Integrated operation of traffic management techniques (example: ramp metering and arterial signal control)	Space & section
Corridor Management [13]	Integrated operation of roadway elements (example: highway, bridge, tunnel)	
Freeway Corridor Management [12]	Integrated operation of traffic management systems (example: traffic information dissemination and monitoring system)	Center system
Sustainable Traffic Management [9]	Integration between roadway agency (example: expressway and signalized arterial)	Organization
Integrated Traffic Management [14]	Integration of mode, route and drive choices (example: traffic information dissemination and ramp metering)	Process

본 연구에서는 고속도로 통합교통관리를 교통관리기법들의 통합운영으로 정의하고, 다양한 교통관리기법들 중 본선미터링 및 램프미터링의 통합운영 전략을 제시하였으며, 교통관리기법에 대한 이론적 고찰 또한 본선미터링을 대상으로 하였다.

본선미터링이란 고속도로에 교통량 집중 또는 병목으로 인한 정체의 개선을 위해 고속도로 본선에서 신호운영으로 교통수요를 제어하는 방식의 교통관리기법을 의미한다. 정체지점 상류부에서 본선 교통류를 제어하며, 일반적으로 <그림 1>과 같이 개방식 요금소가 적용되는 구간은 요금소의 차로합류시점부에서 신호제어가 시행된다. 본선미터링은 본선부에서 신호운영으로 인한 지체가 발생되나, 정체지점에서 교통류 와해가 발생되기 전 본선 교통수요를 제어함으로써 고속도로 시스템 전체의 효율을 높일 수 있다. 본선미터링은 고속도로 본선을 제어한다는 관점에서 가변속도제어와 동일한 개념에 해당하나, 본선에서 신호운영을 통해 미터링 지점의 통과교통량을 직접 제어한다는 차이가 있다.



<그림 1> 본선미터링의 운영원리
<Fig. 1> Operation Concept of Mainline Metering



<그림 2> 본선미터링의 운영사례
<Fig. 2> Practice Case of Mainline Metering

본선미터링은 정체지점을 병목지점과 미터링지점으로 분산시켜 심각한 지체가 발생하는 것을 예방하는 효과가 있다. 본선미터링은 제어가 이루어지는 지점이 요금소의 합류부 시작지점, 고속도로간 연결로, 요금소, 터널 및 교량 시작지점 등 다양하며, 다음과 같은 유형으로 구분할 수 있다 [26, 27].

- 요금소 본선 신호제어(가장 일반적 본선미터링)
- 분기점의 연결로 신호제어 (JC 램프미터링)
- 요금소 서비스 창구수 조정
- 병목, 교량, 터널 등 기타 정체유발 지점 상류부 고속도로 본선 신호제어

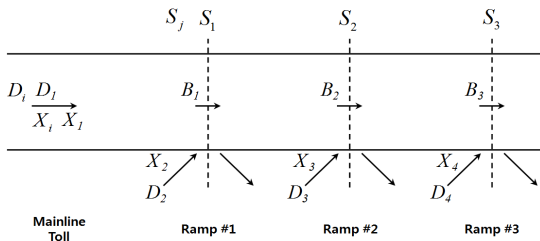
본선미터링의 대표적 운영사례로 <그림 2>와 같이 샌프란시스코와 오클랜드를 연결하는 Bay Bridge의 요금소 신호제어시스템이 있으며, 20차로의 본선 요금소 이후 5차로의 교량으로 짧은 구간에서 연결되어 발생하는 정체를 해결하고자 1974년부터 본선미터링을 운영 중에 있다. Bay Bridge는 일일 통과교통량이 20만대 이상으로 금문교의 2배에 이르는 샌프란시스코의 중요 교량에 해당한다. 본선미터링은 본선 요금소 하류부 약 300m 지점에서 신호운영을 통해 병목현상 없이 교량부의 5차로로 합류시키는 역할을 하고 있다. 본선미터링 시행 이후 통과교통량은 시간당 10,000대 수준으로 15% 이상 증가하였으며, 정체구간의 통행시간은 3분 이상 감소하였다 [27]. 이외 버지니아의 Hampton Road Bridge-Tunnel과 메릴랜드의 Baltimore Harbor Tunnel에서는 터널 내부의 정체로 인한 온도 상승 및 일산화탄소 오염을 개선하고자 터널 입구에서 수행되는 본선미터링을 시행한바 있다 [26]. 일본의 한신고속도로에서는 고속도로 본선 요금소의 창구수를 조절함으로써 하류부의 정체를 제어하는 교통관리가 수행된 바 있으며, 정체구간의 통행속도가 23%, 통행시간이 19% 까지 감소하는 효과를 나타내었다 [28, 29]. 국내에서는 램프 상에 존재하는 요금소의 서비스 창구수를 조절하는 형태의 요금소 미터링에 관한 연구들이 수행된바 있으며, 6개월간의 효과분석에서 경부선의 경우 10% 이상의 속도개선이 확인되었다 [30].

IV. 램프 및 본선 미터링 기반 통합교통관리

본 연구에서는 고속도로 통합교통관리를 위해 고속도로 본선을 위한 대표적 교통류 제어기법에 해당하는 본선미터링과 램프미터링의 통합모형을 개발하였다. 본 모형은 거시적 연속류 모형에 해당하는 **FREQ**의 램프미터링 교통량 최적화 모형에서 착안하였다. **FREQ**에서는 일련의 연속된 진입램프에 대해 연동방식의 램프미터링(Coordinated Ramp Metering)을 운영하기 위한 최적 램프 진입교통량을 결정할 수 있으며, <그림 3>에서 j 구간을 통과하는 교통량 S_j 를 최대화시키기 위한 i 번째 램프의 진입허용 교통량 X_i 를 결정하게 된다. 이때 본선 및 램프의 OD 자료로부터 i 에서 진입하여 j 구간을 통과하는 교통량 비율을 의미하는 A_{ij} 를 이용하며, j 번째 램프의 교통 수요 D_j 에서 진입이 허용되는 교통량 X_i 의 크기를 결정할 수 있다. S_j 는 식 (1)과 같이 j 번째 램프 상류부에서 진입하는 교통량 $\sum A_{ij}X_i$ 와 j 번째 램프에서 진입하는 교통량 $A_{j+1,j}D_{j+1}$ 의 합으로 표현된다.

$$S_j = \left(\sum_{i=1}^j A_{ij}X_i \right) + A_{j+1,j}D_{j+1} \quad (1)$$

FREQ는 구간별 용량 B_j 이내에서 통과교통량 S_j 를 최대화시키기 위한 램프미터링 교통량 최적화 모형을 포함하고 있으며, 램프미터링 신호시간 산정을 위한 대표적인 Demand-Capacity 모형에 해당한다. 해당 모형을 이용하여 램프미터링의 연동운영을 위한 신호시간 계획을 작성 할 수 있다 [11, 31].



<그림 3> 미터링 모형을 위한 네트워크
<Fig. 3> Network for Metering Model

본 연구에서는 **FREQ**의 Demand-Capacity 모형을 수정하여 본선의 요금소를 고려한 미터링 모형을 제시하였으며, 목적함수가 구간별 통과교통량 최대화에 있는 선형계획 모형에 해당한다. 램프의 진입허용 교통량은 수식 (1)에서와 동일한 개념으로 진출입 비율 A_{ij} 를 기반으로 j 구간을 통과하는 교통량에 따라 결정되며, **FREQ**에서와는 수식 (2)와 같이 본선교통량 $A_{1,j}X_1$ 를 고려하여 구간별 미터링 교통량을 결정한다.

$$A_{1,j}X_1 + \left(\sum_{i=2}^{j+1} A_{ij}X_i \right) \leq B_j \quad (2)$$

이때 진입허용 교통량 X_i 는 식 (3) 및 (4)와 같이 교통수요 D_i 와 최소 허용교통량 x_i 이내에서 결정되며, 램프의 최소 미터링 비율을 고려함으로써 미터링으로 인한 대기행렬의 크기를 제어할 수 있다.

$$X_i \leq D_i \quad (3)$$

$$X_i \geq x_i \geq 0 \quad (4)$$

본 모형을 이용해 산정된 최종 진입허용 교통량 X_i 에 차로수 L_i 와 시간길이 3600초에 나누어 줌으로써 램프미터링의 최적 주기길이 C_i 를 식 (5)와 같이 산정하며, 이때의 주기길이는 1주기당 1대의 차량을 진입시키는 Single Entry 방식에 해당한다.

$$C_i = 3600 * L_i / X_i \quad (5)$$

제약조건들을 종합하여 본 연구에서 제시하는 본선 및 램프를 위한 통합 미터링 신호시간 산정모형은 다음과 같이 표현된다.

Find X_i

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^n X_i$$

식 (2); $j = 1, \dots, n-1$

식 (3); $i = 1, \dots, n$

식 (4); $i = 1, \dots, n$

식 (5); $i = 1, \dots, n$

여기에서,

- X_i = i 번째 미터링 지점의 진입 허용 교통량
(1: 본선 요금소, 2~ n : 램프)
- D_i = i 번째 미터링 지점의 수요 교통량
- B_j = j 번째 구간의 용량
- $A_{i,j}$ = i 에서 진입하여 j 구간을 통과하는 교통량 비율
(OD로부터 산정)
- n = 총 미터링 지점의 개수
- x_i = i 번째 미터링 지점의 최소 허용 교통량
- C_i = i 번째 미터링 지점의 주기길이
- L_i = i 번째 미터링 지점의 차로수

본 연구에서 제시하는 본선미터링 및 램프미터링의 통합 교통관리를 위한 최적 미터링 신호시간 산정 모형은 다음과 같은 특징이 있다.

첫째, 본 모형은 전통적인 램프미터링 신호최적화 방법인 FREQ의 Demand-Capacity 모형을 수정하여 요금소 본선미터링의 최적 통과허용 교통량을 결정할 수 있다. 고속도로 본선이 이미 과포화 상태로 램프미터링 만으로는 효과적인 정체관리가 수행될 수 없는 경우 고속도로 본선의 제어는 불가피 하다. 이때 고속도로 통합교통관리의 일환으로 본선 상에 위치하는 요금소 하류부에서 신호운영을 통해 미터링을 수행함으로써 효과적인 정체관리가 가능하다.

둘째, 본 모형은 FREQ의 램프미터링 신호최적화 기능을 유지함과 동시에 정체관리를 위한 본선미터링을 수행할 수 있다. 본 연구에서 제시하는 통합 미터링 모형은 FREQ에서와 동일하게 통과교통량 최대화를 목적함수로 하는 선형계획모형으로 전역해를 결정할 수 있다. 또한 본선요금소 및 분기점에서 수행되는 미터링에 대해서는 최소 미터링 교통량을 조정함으로써 중요 지점의 통과교통량 제어가 가능하다.

최근 고속도로 교통관리에서는 적극적 교통관리, 통합된 교통관리가 확산되고 있다. 이중 미터링 기법은 가장 효과적이며, 강력한 정체관리 대안에 해당한다. 본 연구에서 제시하는 램프 및 본선 통합미터링 신호시간 최적화 모형을 이용해 고속도로의 효과적인 정체관리가 가능할 것으로 판단된다.

V. 시뮬레이션 효과분석

램프미터링 및 요금소 본선미터링을 기반으로 하는 고속도로 통합교통관리 방안에 대해 시뮬레이션 효과분석을 수행하였다. 효과분석은 <그림 4>와 같이 수도권 대표적 반복정체 구간에 해당하는 서울외곽순환선 김포요금소~시흥요금소의 판교방향 20km 구간을 대상으로 하였으며, 해당 구간의 교통관리시스템 검지기 수집자료와 연결로별 진출입 교통량의 현장조사 결과를 이용하였다.

해당 구간은 중동 및 송내에서 램프미터링이 시행중에 있으나, 계양 및 서운에서의 과도한 진입교통량으로 인해 반복정체가 발생되고 있다. 또한 주말 오후침두 시간대를 기준으로 가장 극심한 반복정체가 발생됨에 따라 시뮬레이션 분석 또한 2012년 4월의 토요일 평균 교통량 및 속도자료를 이용하여 18~20시 까지 2시간의 오후침두 시간대 정체상황을 대상으로 하였다.



<그림 4> 시뮬레이션 효과분석을 위한 대상구간
<Fig. 4> Study Site for Simulation Analysis

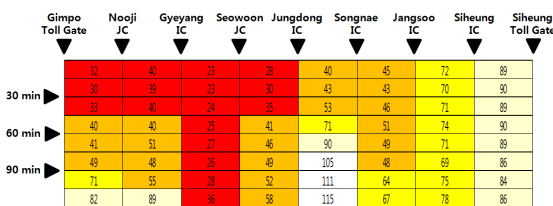
본 연구의 효과분석 대상에 해당하는 서울외곽 순환선 김포요금소~시흥요금소 구간 중 판교방향은 본선이 포화 상태에 해당하는 전형적인 반복정체 구간이다. 정체는 중동~계양구간에서 발생되고 있으나, 김포요금소 지점의 본선 교통량이 시간당 6,000대 이상으로 4차로 구간에 중차량 비율이 약 10% 이상인 점을 감안할 때 정체지점 상류부가 이미 근포화 상태로 판단된다. 이로 인해 현재 중동, 송내에서 램프미터링이 운영되고 있으나, 계양 및 서운의 과도한 진입교통량으로 인해 반복정체가 발생되고 있다. 본 연구에서는 <그림 5>와 같이 시뮬레이션을 통해 검지기 수집자료와 유사한 정체패턴을 구현하여 본선미터링에 따른 효과를 확인하였다.

시뮬레이션 효과분석을 위한 대안의 구성은 표 2와 같이 현황에서는 송내와 중동에서만 램프미터링이 시행되고 있으며, 대안1의 경우 정체구간에 해당하는 김포요금소에서부터 송내까지 전체 지점에 램프미터링을 시행한다. 또한 대안2에서는 대안1과 같이 전체 지점에서 램프미터링을 수행함과 동시에 김포요금소에서 본선미터링을 수행한다.

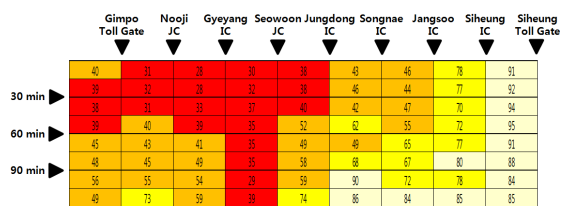
본 연구에서 제시한 통합 미터링 신호시간 산정 모형을 이용하여 본선 및 램프들의 진입 허용교통량을 산정하였다. 대안1에서는 계양, 서운 등 전체 램프의 진입 교통량이 현황 대비 평균 27% 감소하였으며, 대안 2에서는 김포요금소 본선 미터링으로 요금소에서 약 500대 수준의 미터링으로 램프 지점의

<표 2> 통합 미터링 교통량의 최적화 결과
<Table 2> Optimization Result of Integrated Metering Volume

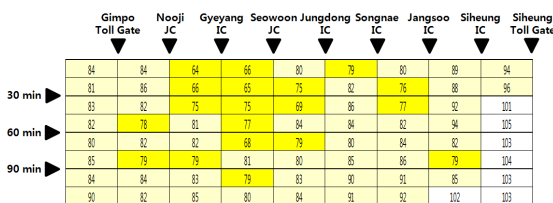
Scenario	Traffic management techniques	Metering volume (vph)					
		Gimpo Toll Gate	Nooji JC	Gyeyang IC	Seowoon JC	Jungdong IC	Songnae IC
Current conditions	IC ramp meting	6,729	162	1,799	2,693	1,436	809
Alternative 1	IC & JC ramp metering	6,729	118	1,544	1,650	1,080	550
	-	-	27% ↓	14% ↓	39% ↓	25% ↓	32% ↓
Alternative 2	Alternative 1 & toll metering	6,230	118	1,683	2,036	1,080	700
	-	7% ↓	27% ↓	6% ↓	24% ↓	25% ↓	13% ↓



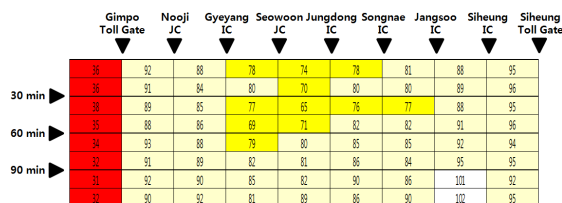
① Current conditions(traffic detector information)



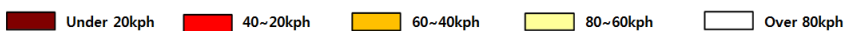
② Current conditions(simulation result)



③ Alternative 1 (IC and JC ramp metering)



④ Alternative 2 (alternative 1 and mainline metering)



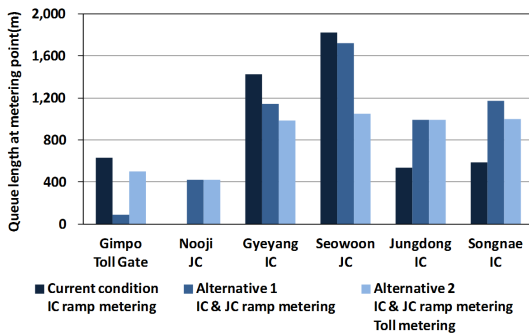
<그림 5> 통합교통관리에 따른 본선 통행속도의 분석 결과
<Fig. 5> Analysis Result of Mainline Speed According to Integrated Traffic Management

진입허용 교통량 비율은 현황 대비 평균 19% 까지 감소한 결과를 나타내었다. 본선 미터링을 통해 램프미터링 단독 운영 대비 평균 8% 수준까지 계양 및 서운의 진입 허용교통량 증가 효과를 확인할 수 있으며, 램프부 정체 완화 가능하다.

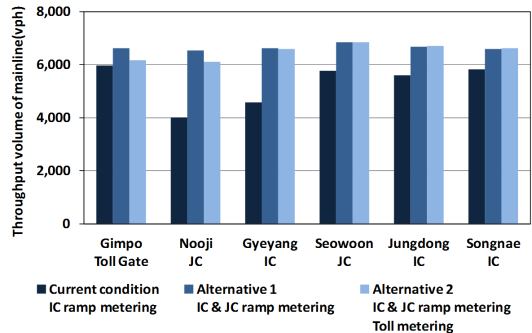
본선미터링과 램프미터링 기반의 고속도로 통합 교통관리에 의한 본선의 구간별 통행속도를 분석결과에 따르면, 현황에서는 <그림 5>와 같이 중동에서 김포요금소 까지 대기행렬이 발생하여 본선의 평균 통행속도는 32kph 수준을 나타내었다. 램프미터링 만이 전체 램프로 확대 시행하는 대안 1에서는 전체 구간에서 정체가 해소되어 본선의 통행속도는 81kph 까지 개선되며, 대안 2에서는 본선 정체구간은 해소되나 요금소 하류부의 신호운영으로 인해 요금소 지체시간을 포함하여 73kph 수준을 나타내었다.

미터링 지점에서의 대기행렬의 경우 <그림 6>에 서와 같이 현황에서는 계양 및 서운에서 미터링이 수행되고 있지는 않으나, 정체로 인한 대기행렬이 최대 1.8km 수준까지 발생되고 있다. 대안 2의 경우 진입허용 교통량 증가에 따라 서운의 대기행렬이 약 1.0km 수준까지 감소하며, 본선미터링이 이뤄지는 김포요금소의 경우 400m 수준의 대기행렬이 발생하였다. 이는 고속도로 본선 요금소에서 일시적인 대기를 통해 본선의 정체개선 및 램프의 대기행렬 감소에 명확한 효과를 나타내고 있음을 보여주며, 정체지점의 통과교통량 또한 현황 대비 대안 2에서 30% 이상 개선된 결과를 나타내었다.

고속도로 통합교통관리로 인한 정체개선 원리 및 효과는 <그림 7>과 같이 정체구간 상하류부의 교통량-밀도 그래프를 통해 설명될 수 있다.



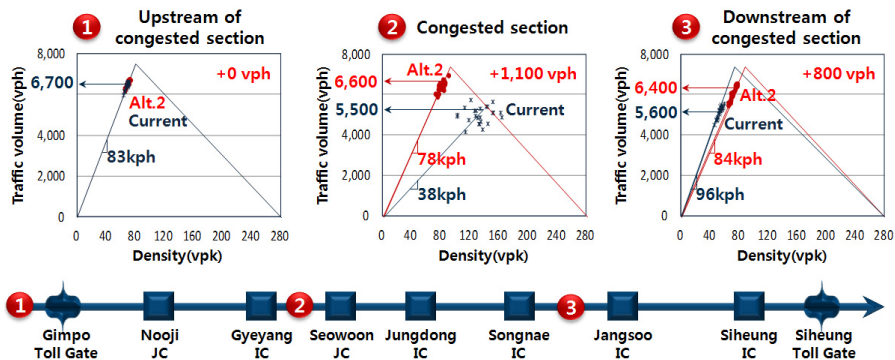
① Queue Length



② Throughput Volume

<그림 6> 통합교통관리에 따른 대기행렬 및 통과교통량의 분석 결과

<Fig. 6> Analysis Result of Queue and Throughput According to Integrated Traffic Management



<그림 7> 통합교통관리에 따른 교통량-밀도 관계의 분석 결과

<Fig. 7> Analysis Result of Flow-Density Relation According to Integrated Traffic Management

정체구간의 상류부에 해당하는 1번 지점에서는 현황과 대안 모두 동일한 통과교통량 및 속도를 나타내나, 정체지점에 해당하는 2번 지점에서는 현황 대비 통행속도의 개선과 함께 통과교통량 또한 시간당 약 1,000대 이상의 증가효과를 나타내고 있다. 이는 현황에서는 계양 및 서운 지점에서 병목으로 인해 통과교통량 저하가 발생되기 때문으로 용량을 모두 사용하지 못하고 있는 상황을 나타내고 있다. 이때 정체 지점 하류부에서도 시간당 약 800대 이상의 통과교통량 개선효과를 나타내어 고속도로 축의 관점에서 통과교통량의 개선효과를 나타내었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 정체상황에 적극적으로 대응하기 위한 방법으로 램프미터링과 본선미터링을 이용한 고속도로 통합교통관리 전략을 제시하였다. 이는 최근 세계적인 이슈가 되고 있는 Active Traffic Management, Integrated Traffic Management와 맥락을 같이하며, 교통관리기법 간의 통합운영을 통해 정체에 보다 적극적으로 대응하기 위한 전략에 해당한다. 본 연구에서는 FREQ에서 램프미터링 최적화에 사용되는 Demand-Capacity 모형을 수정하여 본선미터링과 램프미터링을 통합운영하기 위한 최적 미터링 신호시간 산정모형을 제시하였으며, 서울외곽순환선을 대상으로 시뮬레이션 분석에서는 본선의 신호 제어를 수행하여 램프미터링 단독 적용시 대비 본선의 정체개선과 함께 램프의 대기행렬을 개선시켜 고속도로 축의 관점에서 보다 효율적 운영이 가능함을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 통합교통관리 모형은 이력 자료들을 이용한 최적 미터링 운영계획수립의 측면에서 접근함에 따라 정체상황이 고정적으로 반복되는 구간에 한해 적용이 가능하며, 고속도로 네트워크의 OD를 모두 알고 있어야만 하는 단점이 있다. 이에 향후 연구로서 램프미터링과 본선미터링 통합모형의 적용성을 높이기 위해서는 하류부의 정체수준과 요금소 상류부의 교통수요 변동에 따른 실시간 미터링 신호시간 최적화 모형의 개발이 요구된다.

참고문헌

- [1] Statics Korea, *E-National Indicator: The Status of Expressway*(2013), Retrieved Jan., 30, 2013, from http://www.index.go.kr/egams/stts/jsp/potal/stts/PO_STTS_IdxMain.jsp?idx_cd=1209.
- [2] The Korea Transport Institute, *2008 Traffic Congestion Costs: Estimation and Trend Analysis*, 2010.
- [3] Korea Expressway Corporation, *Expressway Congestion Improvement Measures for Client-Focused Management*, 2011.
- [4] Korea Expressway Corporation, *User-Sympathetic Congestion Improvement*, 2011.
- [5] Federal Highway Administration, *Freeway Management Handbook*, 1997.
- [6] Federal Highway Administration, *Freeway Management and Operations Handbook*, 2003.
- [7] Korea Expressway Corporation, *Development of Subsystem Coordination and Application Method for Integrated Expressway Traffic Management*, 2012.
- [8] Mott MacDonald, *M42 ATM Monitoring and Evaluation*, 2009.
- [9] Rijkseaterstaat, *Sustainable Traffic Management Handbook*, 2003.
- [10] Virginia DOT, *I-66 Active Traffic Management (ATM) System*, 2011.
- [11] Federal Highway Administration., *Traffic Control Systems Handbook*, 1996.
- [12] Transportation Research Board, *Freeway Corridor Management*, NCHRP Synthesis of Highway Practice 177, 1992.
- [13] Transportation Research Board, *Corridor Management*, NCHRP Synthesis of Highway Practice 289, 2000.
- [14] Stoelhorst, H.J. and Middleham, F., "State of the art of regional traffic management planning in the Netherlands", *Presented at 11th IFAC*

- Symposium on control in transportation systems*, Nederlands, Aug, 2006.
- [15] Ogawa, M.J., Arlow, A.J., Meekums, R.J., Self, S., and Unwin, P. "M42 Active Traffic Management Monitoring and Evaluation: Results from Hard Shoulder Running up to 60 mph", *Presented at 5th IET(Institution Engineering and Technology) Conference*, Manchester, UK, July, 2010.
- [16] Grant, D., "M42 active traffic management pilot project", *Presented at the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Jan, 2008.
- [17] Sisiopiku, V.P., and Cavusoglu, O., "Operational Impacts from Managed Lanes Implementation in Birmingham", *Presented at ITE 2008 Annual Meeting and Exhibit*, San Francisco, CA, Aug, 2008.
- [18] Chase, P. and Avineri, E., "Maximizing Motorway Capacity Through Hard Shoulder Running: UK Perspective", *The Open Transportation Journal*, vol. 2, pp.7-18, 2008.
- [19] Highway Agency, *Active Traffic Management (ATM) Project M42 Junctions 3A-7*, 2004.
- [20] Olyott, S.C., "Active Traffic Management Control System for English Motorways. Reducing Congestion Through Innovation", *Presented at the 12th ITS World Congress*, San Francisco, CA, Nov, 2005.
- [21] Federal Highway Administration, *Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management*, 2007.
- [22] Havinovski, G.N., "Active Traffic Management Around the World: Lessons for Virginia", *Presented at ITS Virginia Annual Conference*, Richmond, VA, May, 2011.
- [23] DeGaspari, M., Jin P.J., Wall W.J., and Walton C.M. "Effect of Active Traffic Management on Travel Time Reliability: Case Study of I-5 in Seattle" *Presented at the 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Jan, 2013.
- [24] Sripathi, H.K., "Active Traffic Management and Integrated Corridor Management: Concept to Reality in Virginia", *Presented at the 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Jan, 2013.
- [25] Francis, C. "I-66 Active Traffic Management Initiative", *Presented at ITS Virginia Annual Conference*, May, 2011.
- [26] Haboian, A.K., *Freeway management strategies, Executive Summary*, Parsons Brinckerhoff, 1993.
- [27] MacCalden, M.S., *Metering The San Francisco-Oakland Bay Bridge, To Optimize Traffic Flow*, 1985.
- [28] Saita, K., Fumitaka, K., Masashi, O., and Takehiko, D., "Establishment of HEROINE Hanshin Expressway Real-time Observation-based & Integrated Network Evaluator", *Presented at the 9th ITS World Congress*, Chicago, IL, Oct, 2002.
- [29] Takehiko, Y., Okushima, M., Uno, N., and Daito, T., "Evaluation of On Ramp Metering on Hanshin Expressway Using Traffic simulator (HEROINE)", *Presented at 9th ITS World Congress*, Chicago, Oct, 2002.
- [30] Im, J.W., Yoon, J.Y., LEE, E.E., and Kim K.M., "A Study of Expressway Tollbooth Metering Effect", *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, no. 4, pp.1-10, Aug, 2011.
- [31] Institute of Transportation Studies, *FREQ8PE: A Freeway Corridor Simulation and Ramp Metering Optimization Model*, University of California, Berkeley, 1985.

저자소개



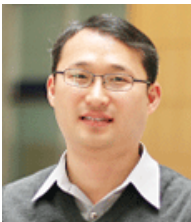
정 영 제 (Jeong, Youngje)

2011년 3월 ~ 현 재 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수
2011년 2월 : 서울시립대학교 교통공학과 박사
2006년 2월 : 서울시립대학교 교통공학과 석사
e-mail : sleep108@hanmail.net
연락처 : 02-2210-2671



김 영 찬 (Kim, Youngchan)

1996년 ~ 현 재 : 서울시립대학교 교통공학과 교수
1996년 : 명지대학교 교통공학과 교수
1993년 : 도로교통안전협회 연구소 연구위원
1991년 : 교통개발연구원 선임연구원
1990년 : Texas A&M University 토목공학과 박사
e-mail : yckimm@uos.ac.kr
연락처 : 02-2210-2768



이 승 준 (Lee, Seungjun)

2003년 7월 ~ 현재 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원
2002년 8월 : 서울시립대학교 도시공학과 박사(교통공학 전공)
1998년 2월 : 서울대학교 토목공학과 석사(교통공학 전공)
e-mail : samuellee@ex.co.kr
연락처 : 031-371-3427