

공간적 형평성을 고려한 통합 감응 램프미터링 제어 연구

-고속도로 진입로 중심으로-

윤재용* · 신형오** · 이의은***

Yoon, Jae Yong*, Shin, Hyoung O**, Lee, Eui Eun***

A Study on the Coordinated Traffic Responsive Ramp Metering Control considering Spatial Equity

ABSTRACT

Ramp metering is a traffic management technique that reduces the congestion of Expressway by controlling vehicles entering the highway. It is widely used outside the country, and Korea is also operating in seven sites (Seoul Ring Expressway). Ramp metering has the advantage of reducing congestion of Expressway, but there are disadvantages, as queuing occurs because vehicles are waiting for ramp, and the ramp queue affects adjacent roads at rush hour. To solve this problem, we improved the ramp metering algorithm to reduce the metering rate more spaces on ramp and to increase the metering rate less spaces. In order to evaluate this, the combined evaluation index was used and it was found that the result satisfied the equity and efficiency at the same time.

Key words : Coordinated traffic responsive ramp metering, Bottleneck algorithm, Metering rate, Equity, Gini coefficient, Combined index

초 록

램프미터링은 고속도로로 진입하는 차량들을 제어함으로써 고속도로 본선의 정체를 줄이는 교통운영기법으로, 국외에서는 많이 사용되고 있으며 우리나라도 외곽순환도로 7개소에서 운영중이다. 램프미터링은 본선 정체를 줄이는 장점이 있는 반면 단점도 존재하는데, 램프 출구에서 차량들이 신호를 받고 대기하기 때문에 대기행렬이 발생하고 차량이 많은 시간대는 램프 대기행렬이 인접 도로에 까지 영향을 미치게 된다. 따라서 이를 해결하기 위해 공간적으로 여유가 있는 램프는 진입 수요를 많이 제어하고 공간적으로 여유가 없는 곳은 진입 수요를 적게 제어하도록 램프미터링 알고리즘을 개선하였다. 이를 평가하기 위해 통합평가지수(Combined Index)를 사용하였고 평가 결과 형평성과 효율성을 동시에 만족하는 것으로 나타났다.

검색어 : 통합 감응 램프미터링, 병목 알고리즘, 램프제어율, 형평성, 지니계수, 통합평가지수

1. 서론

램프미터링 시스템은 운영방식에 따라 고정식과 감응식으로 구분된다. 우리나라의 경우 고속도로에 램프미터링을 도입하면서 시스템의 안정화, 운전자들의 적응 등의 이유로 최근까지 고정식으로 운영되었다. 그러나 고정식은 시간대별로 교통량 변동에 민감하지 못하고, 주기적으로 교통량 패턴에 대한 업데이트가 필요한 단점이 존재한다. 이를 해결하기 위한 운영방식이 감응식인데, 도로에 매설된 검지기에서

* 한국도로협회 기술연구센터 도로연구실장, 공학박사 (Korea Road Association · yjy@kroad.or.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 명지대학교 교통공학과 박사과정 (Corresponding Author · Myongji University · hanam0579@naver.com)

*** 정회원 · 명지대학교 교통공학과 교수, 공학박사 (Myongji University · eelee@mju.ac.kr)

Received November 26, 2018/ revised March 12, 2019/ accepted March 13, 2019

수집된 자료를 기초로 실시간으로 신호시간을 결정한다. 또한 고속도로 인접한 도로와 연결되는 램프의 부근에 설치된 검지기 자료를 통해 실시간으로 램프의 소통 상태를 확인할 수 있다.

램프미터링은 신호를 통해 램프로 진입하는 수요를 제어하기 때문에 대기행렬이 발생하게 되고, 대기행렬 길이가 램프길이를 넘어서면 인접도로의 정체로 이어질 수 있다. 이처럼 도로 사용시간의 불평등이 증가하게 되면 그 시스템은 대중들에게 외면 받게 되고 그 결과 시스템 확대에 악영향을 미칠 수 있다(Yin et al., 2000). 램프미터링의 경우 과거로부터 고속도로의 정체를 해결하는 효과적인 방법임에도 인접 도로이용자 민원, 도로관리청간 이견 때문에 램프미터링에 대한 부정적인 시각도 존재해왔다.

램프미터링에도 경제에서 사용되는 형평성 개념이 등장한 것도 이러한 문제가 반영된 것으로 볼 수 있다. 형평성은 불평등에서 기인하는 것인데 특히 램프에서 발생할 수 있는 불평등은 공간적으로 다른 램프를 동시에 사용할 때 발생하는 지연현상과 반대로 시간적으로 램프를 동시에 사용할 때 발생하는 지연현상과 같은 불평등을 말한다(Li et al., 2016). 이러한 불평등을 해소하는 것이 형평성 관점에서 중요한 이슈이다.

최근 이러한 형평성을 고려하여 고속도로 인접도로의 영향을 최소화 하도록 제어하는 대표적인 사례가 후주의 HERO (HEuristic Ramp metering, coOrdination, 이하 HERO) 시스템이다. 기존 시스템과 달리 램프 중간에 센서를 설치하고 지속적으로 램프 대기행렬을 관찰하여 진입 수요를 조절하는 방식이다. 램프의 대기 공간 여유가 있다면 고속도로로 진입하는 수요를 더 줄이는 방식이며 여러 개의 램프에서 동시에 적용한다.

이와 같이 램프미터링에서 형평성을 고려하는 것이 필요하나 과거 연구들을 살펴보면 형평성을 평가하는 지표가 부족하다(Li et al., 2016). 또한 형평성 관련해서 여전히 상반된 주장이 존재한다. 먼저, 효율성과 형평성은 맞바꿈 관계(trade-off) 관계, 즉 상충된다는 주장이다(Kotsialos and Papageorgiou, 2003; Levinson and Zhang, 2004). 즉, 둘 중에 하나를 선택해야 한다는 것이다. 반대로 형평성과 효율성은 반드시 상충되지 않는다는 것이다. Zhang and Levinson(2004)은 가장 효율적인 전략이 가장 공정한 전략이라고 주장하였고, Zhang and Shen(2010)은 효율성과 형평성은 동시에 얻어질 수 있다고 주장하였다.

그러나 형평성 관련 연구는 시뮬레이션 기반으로 분석된 것이 대부분이다. 따라서 본 논문은 실시간으로 운영되고 있는 램프미터링 알고리즘 개선을 통해 효율성과 형평성의 관계를 분석하는 것이 목적이다.

2. 기존 문헌고찰

2.1 형평성과 램프미터링

Kotsialos and Papageorgiou(2003)는 AMOC (Advanced

Motorway Optimal Control) 전략에서 램프 저장 제한을 통해 형평성을 고려하였고, 효율성과 형평성 사이의 균형을 관찰했다.

Zhang and Levinson(2005)은 총 통행시간을 최소화하기 위한 램프미터링 목적함수를 제안하였다. 이 함수는 비선형적인 함수로 램프별 대기시간의 가중치를 통해 효율성과 형평성의 균형점을 찾는 것이다. 그러나 효과적인 가중 함수를 찾는 것은 어려운 문제라고 결론지었다.

또한 시뮬레이션을 통한 형평성 관련 연구도 수행되었는데, Yafeng et al.(2004)은 통행시간의 형평성을 제시하였다. 램프미터링 시스템을 운영할 때와 운영하지 않은 경우의 통행시간 비율을 계산하여 본선과 진입램프간의 상대적 차이를 줄이는 것이 목적이다. 이러한 형평성을 평가하기 위해 시뮬레이션을 이용하였고 평가 항목은 지니계수를 사용하였다.

Winyoopadit(2007)는 시뮬레이션(AIMSUN NG)을 이용하여 미제어, 고정식 제어, 감응식 제어를 평가하였다. 그 결과 램프미터링을 적용하면 네트워크의 성능이 최대 40 %까지 높아지는 것으로 나타났으며, 각 교통상황에 최적화된 알고리즘을 제시하였다. 또한 지니계수를 이용하여 형평성을 평가한 결과 Flow 알고리즘이 가장 형평성이 높고, ALINEA가 형평성이 낮은 것으로 나타났다.

경제에서 사용하는 형평성은 모든 사람에게 이익을 적절하게 배분하는 것으로 첫째 동일한 이익을 배분하는 것, 둘째 지불한 만큼 배분하는 것, 계층에 따라 배분하는 것이다. 도로는 공공재이므로 주로 동일한 이익을 배분하는 형평성을 중심으로 연구되어 왔는데 최근 지불한 만큼 배분하는 새로운 형평성 개념을 적용한 연구 결과도 있다. Amini et al.(2016)은 가상의 시뮬레이션을 이용하여 시드니 고속도로에 적용하였다. 램프미터링을 테스트하기 위해 두가지 상황을 비교하였으며, 기존의 문헌들에서 제시한 형평성과 연구에서 제시한 형평성 개념을 비교하였다.

이처럼 각 문헌들에서 사용한 형평성 지표들을 분석한 결과 통계적, 사회 경제적 모델을 기반으로 사용하고 있음을 알 수 있다. 통계적 모델은 주어진 모든 변수 분포를 사용하는 것으로 범위, 분산, Gini 측정 및 엔트로피 측정 등을 통해 분석한다. 또한 사회 경제적 모델은 복지 경제학에 기반한 것으로 벡터 또는 관측 분포의 불평등을 평가하는 데 사용한다(Kesten et al., 2013)

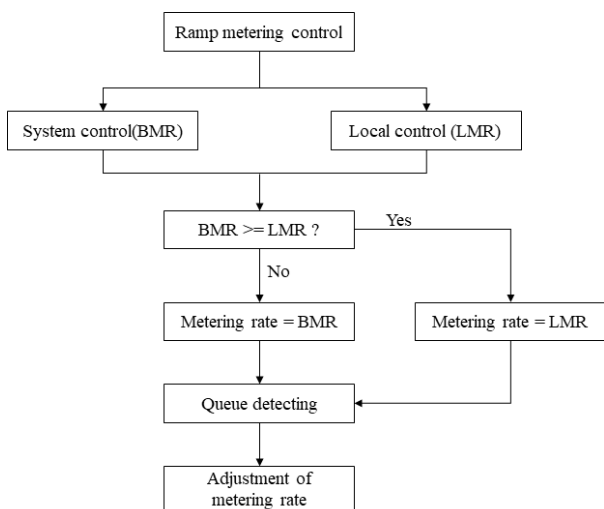
관련 문헌 뿐 아니라 감응식 램프미터링 시스템에서도 일부 형평성이 고려되었는데 병목알고리즘(Jacobson et al., 1989)은 사용자간의 불평등을 줄이기 위해 램프에 대기행렬이 접근도까지 영향을 줄 경우 녹색신호를 증가시켜 고속도로로 차량들을 방출시킨다. 유사하게, 계층적 Zone 알고리즘(Xin et al., 2004)은 운전자가 각 램프에서 대기하는 시간이 4분을 넘지 않도록 설계되어 있다. 또한 HERO 시스템은 각각의 램프에서 발생하는 대기행렬 길이를 서로 비슷한 수준으로 유지하여 공간적으로 형평성을 유지하도록 하였다.

2.2 국내 램프미터링 시스템 알고리즘

현재 외곽순환고속도로 7개소(계양IC, 서운Jct, 중동IC 양방향, 송내IC 양방향, 장수IC)에 설치된 램프미터링 시스템은 개별 제어기 중심으로 램프 각각 신호를 운영하는 지역제어 방식과 모든 데이터를 중앙 시스템에서 제어하는 통합제어 방식 모두 가능하다. 2010년 외곽순환고속도로에 도입한 이후로 주로 고정신호시간으로 운영되었고, 2016년 이후부터 감응식 신호시간으로 운영되었다. 본 논문에서는 감응식 신호운영 중에서도 통합제어 방식에 대한 알고리즘을 중심으로 정리하였다. 통합제어 알고리즘은 1989년에서애들에서 개발한 병목알고리즘이 적용되었고 기본 로직은 경쟁 알고리즘이다. Fig. 1과 같이 통합제어율(BMR)과 지역제어율(LMR)을 비교하여 진입율이 낮은 것을 선택한다. 즉 시간당 진입하는 교통량이 적은 것을 선택하여 고속도로로 진입하는 차량을 제어하는 방식이다. 이 시스템은 통합제어율(BMR)이 지역제어율(LMR)보다 낮을 경우, 통합제어율(BMR)이 진입율(Metering rate)로 결정된다. 진입율(Metering rate)에 따라 신호시간이 결정되며, 진입량을 조절하면서 발생하는 램프의 대기행렬을 파악한다.(Queue detecting) 램프의 대기행렬이 점차 증가하여 임계값을 초과하면 진입율을 조정하여 대기행렬을 감소시킨다.

3. 운영 알고리즘 개선

병목 알고리즘은 램프 저장공간에 모든 차량이 가득차게 되면 고속도로로 진입하는 차량을 증가시켜서 주변도로에 영향을 주지 않도록 하는, 즉 주변도로 이용자들의 형평성을 고려한다. 그러나



Source : Real-Time Metering Algorithm for Centralized Control (Jacobson et al., 1989)

Fig. 1. Coordinated Traffic Responsive Ramp Metering System (Bottleneck Algorithm)

대기행렬 방출 시스템이 작동하는 램프는 형평성이 고려되지만, 만약 그 지점이 고속도로 병목 지점 직전에 위치한 램프라면 오히려 방출되는 양 때문에 고속도로 정체는 더 심해질 수 있다 따라서 이를 개선하기 위해 HERO 시스템을 모터브로 하여 램프의 대기공간이 남는 곳에서 서로 짐을 부담하는 방식으로 램프미터링 알고리즘을 개선하였다.

기존 알고리즘인 병목 알고리즘은 병목으로 선정된 지점에서 임계 속도 이하가 되면 각 램프 별로 진입량을 계산하여 신호를 작동하는 방식이다. 이때 각 램프별로 진입량을 계산하기 위해 필요한 변수는 일교통량, 해당 지점과 병목 지점과의 거리이다. 이 변수만으로는 램프 대기행렬 상황을 알 수 없기 때문에 본 연구에서는 램프 여유 공간 비율을 추가하여 알고리즘을 개선하였다. 램프 여유 공간의 상태는 대기행렬검지기에서 검지되는 속도가 임계속도 기준보다 낮으면 대기차량이 최대가 된 것으로 판단하였다. 또한 임계속도의 경우 실제 조사를 통해 결정하였다. 실제 개선된 알고리즘을 적용하면 램프의 대기 공간 여유가 있는 곳은 진입 차량의 수를 줄여 램프에서 대기하고, 램프 대기공간이 최대가 된 곳은 진입 차량의 수를 증가시키는 방식으로 운영된다.

램프 여유공간을 계산하기 위해서는 먼저 대기 차량수를 계산한다. 대기 차량 수는 추정식을 사용하였으며 미네소타에서 사용한 대기 차량 추정식을 적용하였다. 왜냐하면 미네소타 램프미터링 검지기 설치 구조가 국내와 유사하기 때문이다. 대기행렬을 추정하기 위해서는 현재 램프를 통과하는 차량들의 상황을 측정해야 하는데 램프를 통과하는 수요를 계산하는 통과(수요)검지기와 램프의 대기행렬의 상황을 측정하는 대기행렬 검지기를 이용하여 계산한다. 대기행렬 검지기는 쌍루프 검지기이므로 속도가 측정되므로 현재 대기행렬 검지기를 통과하는 차량이 임계속도보다 높으면 램프안의 대기 차량 수를 추정하게 되고 임계속도보다 낮으면 정체 상황이므로 램프에 대기하는 차량이 가득찬 것으로 계산된다. 다음주기 추정 대기차량수는 이전주기 대기차량수에 대기행렬검지기를 통과한 차량에서 수요검지기를 통과한 차량수를 뺀 값을 더한다. 이론적으로 차량이 들어온 만큼 나가야하므로 대기행렬 통과한 차량이 모두 수요검지기를 통과한다면 이 값은 0이 되고 0보다 크면 램프에 있는 차량이 있는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 이 값이 음수 값이 나오면 차량이 존재하지 않는다는 것으로 0으로 처리하도록 한다. 대기행렬검지기의 임계속도는 실제 차량들의 데이터를 분석하였다. 먼저 CCTV를 통해 실제 차량들이 램프의 끝에 머무른 시간들을 약 일주일 동안 조사하고 그 시간대의 검지기 속도를 조사하여 총 조사시간대의 평균 값을 사용하였다.

$$Q_{jk} = \begin{cases} \max(0, Q_{jk-1} + qd_{jk} - pd_{jk}) & \text{if } spd_queue_{jk} > spd_{j_threshold} \\ \max_queue_j & \text{if } spd_queue_{jk} \leq spd_{j_threshold} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, Q_{jk} = 램프 j의 다음주기(k) 추정 대기차량수
 $Q_{j,k-1}$ = 램프 j의 이전주기(k-1) 추정 대기차량수
 qd_{jk} = 램프 j의 현재주기(k) 대기행렬 검지기 통과 차량 수
 pd_{jk} = 램프 j의 현재주기(k) 정지선 통과 검지기 통과 차량 수
 max_queue_j = 램프 j의 최대 대기행렬 차량 수(램프길이 기반)
 spd_queue_{jk} = 램프 j의 대기행렬 검지기 속도
 $spd_{jthreshold}$ = 램프 j의 대기행렬 검지기 임계속도

$$z_{jk} = \text{해당램프 } j \text{ 현재주기(k) 여유공간 비율}$$

$$v_{jk} = 1/\in vol_{jk} \quad (4)$$

여기서, $\in vol_{jk}$ = 램프 j의 현재주기(1분) 통과검지기 교통량
 v_{jk} = 램프 교통량의 역수 비율

$$F1_{jk} = \frac{v_{jk}}{\sum_{j=1}^n v_{jk}} \quad (5)$$

여기서, $F1_{jk}$ = 1/램프 교통량 비율 가중치

$$F2_j = \text{고정값} \quad (6)$$

$F2(\text{계양판교}) = 0.230$	$F2(\text{장수일산}) = 0.316$
$F2(\text{서운판교}) = 0.243$	$F2(\text{송내일산}) = 0.333$
$F2(\text{중동판교}) = 0.257$	$F2(\text{중동일산}) = 0.351$
$F2(\text{송내판교}) = 0.270$	

다음은 추정된 대기행렬 차량 수를 바탕으로 램프 여유공간 비율을 계산한다. 램프의 추가적으로 차량을 저장할 수 있는 여유공간은 현재 차량 수는 램프의 차량이 가득찼을 때 차량 수에서 현재의 차량 수를 뺀 값이다. 따라서 이 값은 램프가 차량이 가득차지 않았을 때 계산되며, 램프에 차량이 가득차면 1로 처리한다. 왜냐하면 램프 여유공간은 차량수가 아닌 비율로 계산하기 때문에 나눗셈 오류를 없애기 위함이다.

앞서 언급했듯이 가중치에는 포함되는 변수는 램프 여유공간 이외에도 일교통량과 병목지점과 램프간의 거리가 있다. 일반적으로 가중치는 값이 클수록 반영되는 값이 크기 때문에 일 교통량이 많을수록 더 제어하게 된다. 따라서 본 논문에서 적용하고자 하는 형평성을 위해서는 일 교통량이 적을수록 여유공간이 많고 여유공간이 많다면 제어율을 높여서 그 공간에 차량들을 저장할 수 있게 된다. 이를 계산하기 위해 연결로 교통량 가중치는 역수를 적용하였다. 병목 알고리즘의 기본 원리가 병목에서 가까운 램프 일수록 제어율을 높여 병목의 가장 큰 원인을 줄이는 것이므로 기존 알고리즘에서 계산하던 방식을 준용하였다.

각 램프의 최종 적용될 가중치는 이 세가지 변수를 계산한 뒤 램프여유공간 비율을 50 %, 램프 일교통량 비율을 30 %, 병목 지점과의 거리 비율을 20 %로 적용하였다. 이것은 램프의 여유공간이 많을수록, 일교통량 비율이 적을수록 진입제어율이 높고, 병목지점과의 거리도 어느 정도 반영한다는 것을 의미한다.

$$S_{jk} = \begin{cases} max_queue_j - Q_{jk} & \text{if } Q_{jk} < max_queue_j \\ 1 & \text{if } Q_{jk} \geq max_queue_j \end{cases} \quad (2)$$

S_{jk} = 해당램프 j의 현재주기(k) 여유공간(단위 : 차량수)

$$z_{jk} = S_{jk}/max_queue_j \quad (3)$$

$$F3_{jk} = \frac{z_{jk}}{\sum_{j=1}^n z_{jk}} \quad (7)$$

여기서, $F3_{jk}$ = 램프여유공간 비율 가중치

$$wF_{jk} = \sum_{i=1}^3 (w_i \times Fi_{jk}) \quad (8)$$

여기서, wF_{jk} = 현재주기(k)에서 해당연결로 j 가중치

w_i = factor별 가중치(i=1부터 3까지)

4. 효과분석

이 논문은 형평성과 효율성과의 관계를 분석하는 것이 목적이다. 따라서 형평성을 평가하는 지표와 효율성을 평가하는 지표가 필요하다. 형평성을 평가하는 지표는 지나계수를 사용하였고 효율성을 평가하는 지표는 통합평가지수(Combined Index, 이하 CI로 표기)를 사용하였다. CI는 본선 구간의 총 통행시간과 지나계수를 통해 계산한다. 지나계수는 각 램프와 다른 램프와의 지체의 차이의 모든 합을 램프의 평균지체로 나눈 값으로 계산한다. 램프의 지체(veh·min)는 램프를 이용하는 차량의 현재속도와 자유류속도의 차이를 이용하여

계산하였다.(링크길이×교통량×(현재속도 역수- 자유류속도 역수))

$$G = \frac{1}{2n^2\tau} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\tau_i - \tau_j| \quad (9)$$

여기서, $\bar{\tau}$ = 램프의 평균지체
 τ_i = i번째 램프 지체
 τ_j = j번째 램프 지체
 n = 램프의 개수

$$Combined\ index(CI) = W_1 \times G + W_2 \times (TT_{mainline}) \quad (10)$$

여기서, G = 지니계수
 $TT_{mainline}$ = 본선 구간 총 통행시간
 W_1, W_2 = 가중치
 $W_1 + W_2 = 1$

CI는 본선 구간 총 통행시간과 지니계수의 합으로 계산되기 때문에 산술적으로 큰 값에 따라 결정될 수 있다. 따라서 각 개별 값을 표준화(Eq. (11))하여 CI를 산정하였다.

$$(x - \min(x)) / (\max(x) - \min(x)) \quad (11)$$

Table 1. Combined Index

	Before algorithm	After algorithm
Analysis date1 (12:00-17:00)	1.08	1.01
Analysis date2 (12:00-17:00)	0.96	0.94
Analysis date3 (12:00-17:00)	0.92	0.95
Average	0.99	0.97

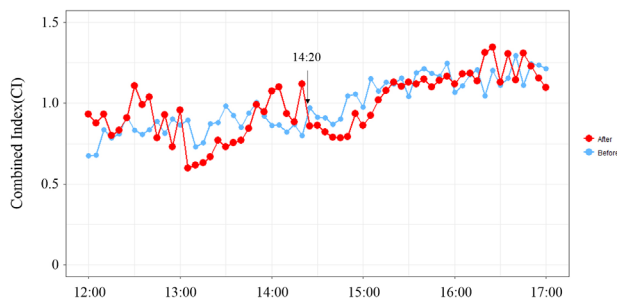


Fig. 2. Combined Index (Average Data)

개선된 운영알고리즘은 서울외곽순환도로 일산방향 장수IC, 송내IC, 중동IC에 적용하였으며, 실제 적용하기 전인 2016년 11월 1일부터 2016년 11월 21일까지 약 3주간 통합 감응 운영시스템을 시범 운영하여 문제점을 개선하였다. 개선된 알고리즘 적용 기간은 2016년 11월 22일부터 2016년 12월 9일까지이며, 효과분석은 데이터 안정화가 이루어진 11월 28일 이후 실시하였다. 기존 알고리즘(1주 운영)은 2016년 11월 29일, 11월 30일, 12월 1일을 분석하였고, 변경 알고리즘(1주 운영)은 2016년 12월 7일, 12월 8일, 12월 9일을 분석하였다.

CI 분석결과, 개선된 알고리즘은 기존 알고리즘보다 CI가 낮은 것으로 나타났다(Table 1). 본 논문에서 정의하는 형평성은 공간적인 형평성이다. 동일 시간대에 램프에 존재하는 차량수를 계산하여 비어 있는 여유공간을 다 활용하여 차량을 저장하면 네트워크 전체적으로 진입하는 차량이 줄어들기 때문에 총 통행시간이 줄어들게 된다. 물론 이때 이전보다 램프에서 대기하는 시간이 증가할 수는 있기 때문에 램프를 통과하는 차량은 불평등하다고 느낄 수는 있다. 그러나 램프미터링 시행으로 고속도로의 정체가 줄어들어 총 통행시간이 줄어들게 되면 한 차량이 경험하는 총 통행시간은

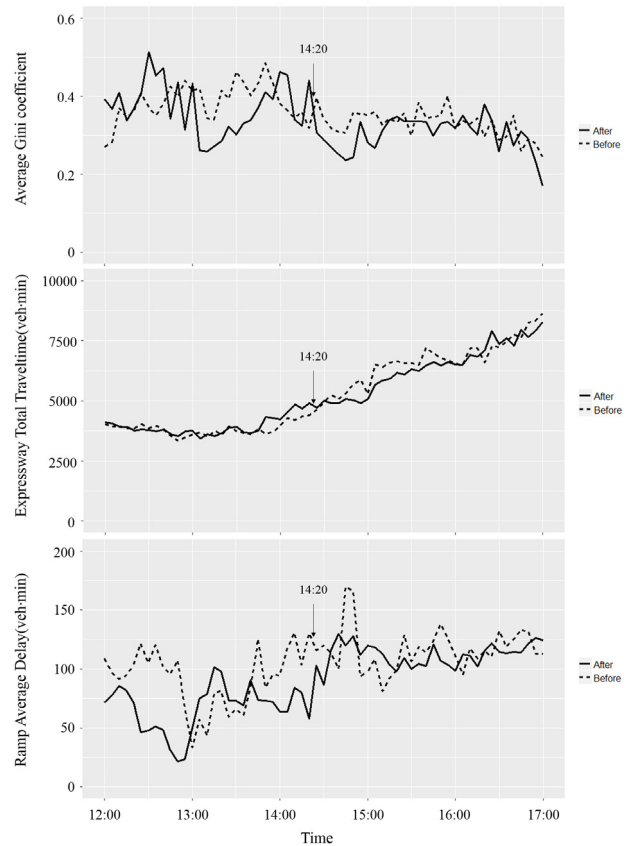


Fig. 3. Gini Coefficient (a), Total Traveltime (b), Delay (c)

Table 2. Difference Between Before and After Data (Unit : Veh-minute)

	Ramp Delay (difference between before and after)	Expressway Total Traveltime (difference between before and after)
14:20	-72.6	487.32
14:25	-12.6	81.16
14:30	-33	51.25
14:35	1.8	-350.04
14:40	29.4	-195.68
14:45	-49.8	-206.82
14:50	-37.8	-662.56
14:55	18	-973.28
15:00	22.2	-193.73
15:05	10.2	-853.45
15:10	31.8	-549.55
15:15	11.4	-665.28
15:20	-1.2	-482.92

줄어들게 되며, 사회 전체적인 혼잡비용도 줄어들게 된다. 이를 간단히 정리하면 지니계수가 낮은 평등한 상태가 유지되면 총 통행시간이 감소하므로 효율이 증가한다는 것을 의미한다. 실제로, Fig. 2에서 14시 20분에 CI가 낮아지는 것을 볼 수 있는데, Fig. 3(a)에서 램프간 지체가 평등한 상태로 변화하면서 고속도로 본선의 총 통행시간이(Fig. 3(b)) 기존 알고리즘에 비해 낮은 것으로 나타났다.

반면 램프의 지체는 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3(c)). 그러나 그 그래프에서도 알 수 있듯이 기존 알고리즘과 비교했을 때 많은 차이가 발생하지는 않았으며 오히려 지체가 일정한 상태를 유지하는 것으로 나타났다.

램프에서 대기하는 차량의 지체시간은 Table 2의 음영으로 표시된 시간대에서 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 그 시간대의 본선의 총 통행시간은 감소하는 것으로 나타났다, 이는 램프에서 대기한 차량이 본선으로 진입하면 총 통행시간이 감소하므로 목적지까지 가는 총 시간은 감소할 수 있으며 고속도로 본선의 통과 차량도 총 통행시간이 감소하는 효과를 볼 수 있다.

5. 결론

일반적으로 효율성과 형평성은 상충된다고 알려져 있다. 또한 과거 램프미터링의 효율성과 형평성에 관계된 논문들에서도 효율성과 형평성 문제는 상충된다고 주장하거나 서로 균형을 이룬다는 주장이 공존하고 있다. 이러한 상황에서 본 논문은 형평성을 고려한

알고리즘 수정을 통해 효율성과 형평성 모두 만족시킬 수 있는지를 분석하고자 했다. 또한 과거 논문들에서 주로 사용한 방식인 시뮬레이션 평가가 아닌 실제 데이터를 통해 분석하였다. 결론부터 말하자면, 공간적 형평성을 통해 네트워크 전체의 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

데이터 분석을 통해 그 결과를 확인하였는데 첫째, 지니계수를 이용하여 분석한 결과 램프 지체의 형평성이 향상되었다. 즉 램프에서 발생하는 지체가 서로 비슷해 졌다는 것을 의미하고, 이는 이전에 비해 램프의 차량이 서로 비슷하게 존재한다는 것을 의미한다. 그것은 여유 공간의 차이가 비슷해 졌다는 것이다.

둘째, CI 평가 결과 고속도로 본선 총 통행시간이 감소하고 램프 지체 형평성도 향상되었다.

국내의 경우 램프미터링이 설치된 곳이 램프간 평균 거리가 2 km로 짧고 조사된 고속도로 OD를 분석하더라도 장거리 통행과 단거리 통행(도심 무료구간)이 혼재하는 곳이라 이러한 효과가 두드러질 수 있다. 하지만 실제 데이터를 이용해 형평성 조정을 통해 효율성을 증가할 수 있다는 점을 발견한 점에서는 의의가 있다.

본 논문에 한계도 존재하는데, 실제 국내와는 다른 환경에서의 추가 연구가 필요하다. 또한 가중치 적용 부분은 충분한 데이터가 쌓인 후 최근 데이터 분석 기법인 머신러닝을 통해 최적 가중치를 찾아낼 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

- Amini, N., Gardner, L. and Travis Waller, S. (2016). "New horizontal equity measure for ramp meters." *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2568, pp. 90-102.
- Jacobson, L. N., Henry, K. C. and Mehyar, O. (1989). "Real-time metering algorithm for centralized control." *Transportation Research Board*, No. 1232, pp. 17-26.
- Kesten, A., Ergun, M. and Yai, T. (2013). "An analysis on efficiency and equity of fixed-time ramp metering." *Journal of Transportation Technologies*, Vol. 3, pp. 48-56.
- Kotsialos, A. and Papageorgiou, M. (2003). "Efficiency and equity properties of freeway network-wide ramp metering with AMOC." *Transportation Research Part C*, Vol. 12, pp. 401-420.
- Levinson, D. and Zhang, L. (2004). *Evaluating the effectiveness of ramp meters*. Assessing the benefits and costs of ITS, D. Gillen and D. Levinson, eds., Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.

- Li, D., Ranjitkar, P. and Zhao, Y. (2016). "Efficiency and equity performance of a coordinated ramp metering algorithm." *PROMET - Traffic&Transportation*, Vol. 28, No. 5, pp. 507-515.
- Winyoopadit, S. (2007). "Development and comparative evaluation of ramp metering algorithms using microscopic traffic simulation." *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 51-62.
- Xin, W., Michalopoulos, P. G., Hourdakis, J., Lau, D. (2004). "Minnesota's new ramp control strategy design overview and preliminary assessment." *Transportation Research Record*, No. 1867. pp. 69-79.
- Yafeng, Y., Hongchao, L. and Benouar, H. (2004). "A note on equity of ramp metering." In *Proceedings of 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, Piscataway, N.J., pp. 497-502.
- Yin, Y., Liu, H. and Benouar, H. (2000). "A Note on Equity of RampMetering." *7th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2000 Oct 1-3; Washington, DC
- Zhang, H. M. and Shen, W. (2010). "Access control policies without inside queues: their properties and public policy implications." *Transportation Research B*, Vol. 44, pp. 132-1147.
- Zhang, L. and Levinson, D. (2004). "Optimal freeway ramp control without origin-destination information." *Transportation Research B*, Vol. 38, pp. 869-887.
- Zhang, L. and Levinson, D. (2005). "Balancing efficiency and equity of ramp meters." *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No. 6, pp. 477-481.