

도시고속도로 혼잡진출램프제어를 위한 교통 신호제어 전략 및 평가

Development of Traffic Signal Control Strategy for Congested Exit-Ramp Area in Urban Freeway

김 성 룬 김 영 찬 이 철 기
(서울시립대, 석사과정) (서울시립대, 교수) (서울시경)

목 차

- I. 서론
- II. 혼잡진출램프 제어 전략
 - 1. 진출제어 원리
 - 2. X의 녹색신호시간 결정
- III. 시뮬레이션에 의한 모형테스트
- IV. 현장실험 및 효율성 검증
 - 1. 현장실험
 - 2. 효율성 검증
- V. 결론 및 향후연구과제

I. 서 론

서울시의 경우 올림픽대로, 강변북로, 내부순환로와 같은 도시고속도로망을 구축하여 도시교통의 이동기능의 중추적인 역할을 담당하게 하고 있다. 최근 수년간 차량의 지속적인 증가로 인하여, 도시고속도로들은 만성 교통정체에 시달리고 있다. 통상 도시고속도로의 진출부는 혼잡한 시가지 도로에 접속하게 되는데, 그 시가지도로의 혼잡이 진출램프를 통하여 유출하는 차량의 대수를 제약하게 된다. 도시고속도로 교통정체의 교통정체는 과다한 교통수요, 본선의 용량부족 등 다양한 원인이 있겠으나, 진출부 교통처리 미비의 원인이 대표적인 문제로 대두되고 있다.

특히, 내부순환로의 진출램프 중 홍은, 성산, 길음 등이 대표적인 사례이며, 최근에는 홍은 진출램프가 가장 심각한 혼잡을 야기하고 있다. 이러한 현상은 본선의 용량을 감소하여, 소통에 직접적인 악영향을 미치며, 본선상의 교통사고 위험성을 야기 시키고 있는 실정이다.

본 논문에서는 혼잡 진출부중에서 인접도로와의 교통신호제어를 통하여 해결이 가능한 사례를 중심으로 제어전략을 제시하며, 대표적 혼잡 진출램프인 홍은 진출램프에 적용하여 제어전략의 효과를 입증하는데 목적이 있다.

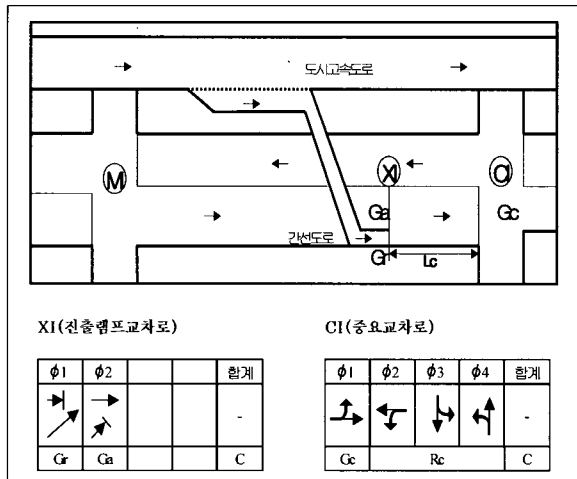
II. 혼잡진출램프 제어전략

1. 진출제어 원리

진출제어 원리는 진출램프 차량의 진출을 확보하여 본선의 흐름을 보호하면서 간선도로의 영향을 최소화하기 위한 알고리즘이다. 진출램프 하류의 합류지점에 신호기를 설치하여 교통신호제어시스템에 따라 제어를 실시한다.

제어이론은 과포화신호 제어방법에서 Equity Offset과 내부미터링 기법을 진출부 제어에 응용한 것이다. 진출제어는 하류부 교차로와의 신호연계를 통해 이루어진다. 진출제어는 하류부 교차로의 직진신호에 의한 충격파가 진출부 끝지점에 도달할 때 생기는 저장공간을 진출램프가 녹색신호를 받아 진출하게 된다. <그림 1>은 전형적인 혼잡 진출부를 개념화하여 작성한 것이다. 진출램프가 기존 간선도로와 합류하고 형성된 교차로(진출램프교차로, XI)가 있으며, 하류부에 병목의 원인이 되는 주 교차로(중요교차로, CI)가 존재한다. 내부순환로 홍은진출램프부를 예를 들면, 홍은 사거리가 CI가 되며, 홍제초등앞교차로가 XI가 된다. 혼잡시간대에는 CI로 인하여 발생한 대기행렬이 길게 자라나면서, XI를 차단하게 된다. 이러한 차단현상으로 XI에서 진출램프 방향의 신호가 녹색이 되어도, 차

량이 교차로를 통과할 기회를 거의 갖지 못한다. 이러한 진출용량 저하로 인하여, 램프부에 대기차량이 누적되고, 결국 본선까지 대기차량이 역류하는 현상을 초래하고 있다. 본 논문에서 제안하는 전략은 간선도로에 형성된 대기길이를 XI에서 절체하여 진출램프 차량이 원활하게 간선도로로 합류하도록 하여, 진출차량 대수를 목표치만큼 통과하게 하는 것이다.



〈그림 1〉 진출램프 시스템 제어 그림 개략도 및 현시

2. XI의 녹색신호시간 결정

진출제어는 도시고속도로 진출램프 합류부 간선도로의 혼잡으로 인해 발생하는 대기차량이 도시고속도로 본선에 영향을 줄 때 효과적인 제어이다. XI의 진출제어를 위한 신호시간 결정에서 XI는 CI와 동일한 주기를 사용하며 XI의 녹색시간분할의 기준은 진출램프 녹색시간(G_r)이 된다. 그리고 XI는 2현시로 운영되므로 주기는 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = G_r + G_a + Y_r + Y_a \quad (1)$$

CI에서의 직진 녹색시간동안 빠져나가는 교통량은 다음 식과 같다.

$$OUT_c = G_c \times \frac{SAT_c}{3600} \quad (2)$$

OUT_c 는 G_c 의 변수인데, G_c 는 외부변수인 것으로 전제한다. CI에서 G_c 가 커진후 충격파가 진출부 지점에 도달하면 진출램프 녹색시간이 커지게 되므로, 진출차량을 위한 공간이 확보된다. 따라서, 진출램프의 경우는 진출램프차량들이 주어진 녹색시간동안 XI를 빠져나갈 수가 있다.

$$IN_r = G_r \times \frac{SAT_r}{3600} \quad (3)$$

하지만 간선도로의 경우 주어진 G_a 동안 모든 차량이 XI를 통과할 수 없다. 이유는 XI 하류 링크는 진출램프차량이 많은 부분을 채우고 있기 때문이다. CI를 통과한 차량(OUT_c)에서 XI에서 지나간 진출램프 차량(IN_r)을 빼면 간선도로에서 통과 가능한 차량대수(IN_a)가 된다.

$$IN_a = OUT_c - IN_r \quad (4)$$

만약, $OUT_c = IN_r$ 이라면, 진출램프차량만 100% 통과하는 것이 된다. 하지만 간선도로의 경우도 고려해야하므로, 항상 $OUT_c \geq IN_r$ 이 되도록 한다. 이를 G_r 과 G_c 에 대한 관계식으로 표현하면 아래와 같다.

$$G_r \leq \frac{SAT_c}{SAT_r} \times G_c \quad (5)$$

여기서, $G_r = K \times G_c$ 라 하면 K 는 다음과 같이 표현이 된다.

$$K \leq \frac{SAT_c}{SAT_r} \quad (6)$$

반대의 경우로 $OUT_c = IN_a$ 라고 설정하면, 간선도로차량만 100% 통과하게 되는 것이다. $IN_r = 0$ 이면 $G_r = 0$ 이고, 따라서 $K = 0$ 이 된다. K 의 범위를 설정하면, 다음과 같다.

$$K = \left[0, \frac{SAT_c}{SAT_r} \right]$$

K 의 값은 사전에 결정하게 된다. 간선도로의 녹색시간(G_a)은 주기에서 G_r 를 뺀 나머지 부분이 된다.

$$G_a = C - G_r - (Y_r + Y_a) \quad (7)$$

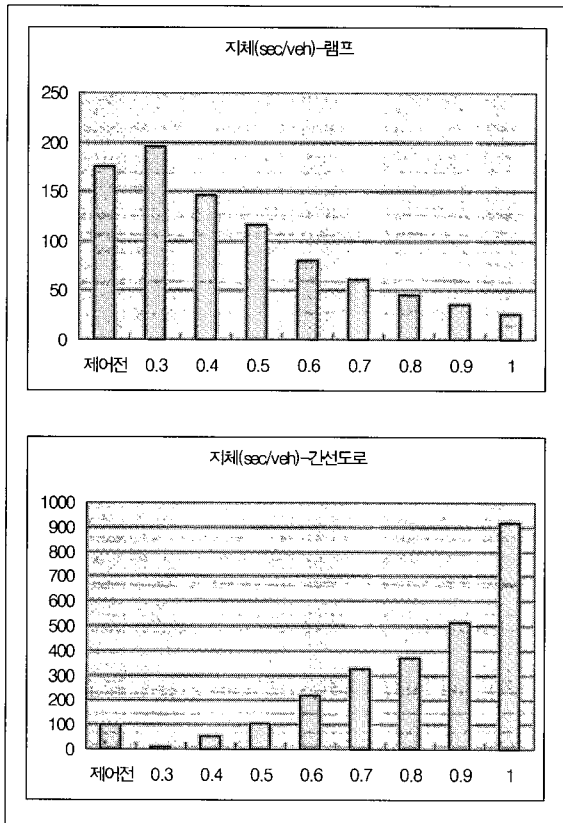
여기서, $K = \frac{SAT_c}{SAT_r}$ 이면 진출램프(G_r)가 모두 사용하게 되며, $K = 0$ 이면 간선도로(G_a)가 모두 사용하게 된다. 간선도로 고려를 위한 β (배분계수)를 사용하여 $K = \beta \times \frac{SAT_c}{SAT_r}$ 라 놓고 $\beta = [0, 1]$ 라고 범위를 한정한다.

XI에서 녹색시간 배분을 위하여, 배분계수(β)를 결정해야 한다. 배분계수는 0과 1사이의 값을 가지며, 0에 가까운 값을 사용하면, 간선도로 방향 차량 통행에 우선권을 두는 것이고, 1에 가까운 값을 사용하면, 진출부 차량에 비중을 두는 것이다. 이 계수는 간선도로와 진출부와 연계된 도시고속도로의 소통상황에 따라 판단해서 사용하게 된다. 본 고에서 제시하는 제어전략은 고속도로의 대기행렬 역류현상이 극심한 경우를 대상으로 제안된 것으로, 진출부 우선제어에 해당하는 1에 가까운 값을 사용하게 된다.

III. 시뮬레이션에 의한 모형의 테스트

전 절에 제시된 제어전략에서 결정변수로 배분계수 (β)가 있다. 배분계수의 값에 따라, XI의 녹색시간이 결정되며, 이에 따라 도로별로 통과교통량이 변화한다. 이론적으로 산출된 통과교통량이 적절한지를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

시뮬레이션 툴로 TRAF-NETISIM을 이용하였다. 대상지는 서울시 내부순환 도시고속도로의 진출램프 중 홍은 램프를 선정하였다. 주기(C)를 140초로 고정하고 CI의 녹색시간(G_c)값은 45초를 사용하여 K값의 변화에 따른 XI의 진출램프 녹색시간(G_r)값과 진출제어를 통해 진출제어전후의 진출램프와 간선도로의 지체를 분석하였다.



〈그림 2〉 β 값에 따른 간선도로와 진출램프지체

〈그림 2〉는 진출제어 전·후의 간선도로와 진출램프의 지체를 보여주고 있다. 배분계수 β 값이 커질수록 간선도로의 지체는 커지고, 진출램프의 지체는 줄어드는 현상을 보게 된다. 기존에 운영방식은 배분계수 값이 0.4 근처에 상응하는 제어 효과가 있다고 볼 수 있으며, 배분계수 값을 0.5보다 큰 값을 사용하면, 진출부 우선제어가 실시되는 것을 알 수 있다.

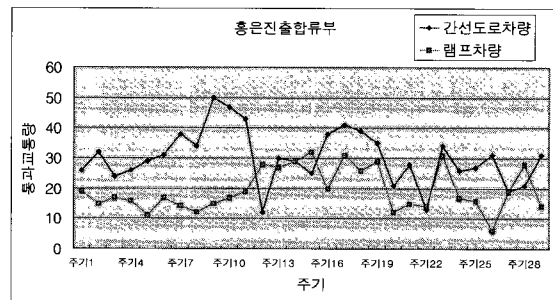
IV. 현장실험 및 효율성 검증

1. 현장 실험

본 연구에서 실시한 현장실험 장소로는 내부순환로 북부구간에서 홍은 진출램프부를 선정하였다. 이 램프는 진출부 혼잡이 파생되어 본선 혼잡으로 이어지는 대표적이 예이다. 본선 혼잡의 심각성은 출퇴근 시간에 극심하며, 휴일에도 발생하는 혼잡 유형이다. 현장 실험은 1차 현장실험과 2차 현장실험으로 나누어 실험을 실시했다. 1차 현장실험 실시 날짜 및 시간은 2002년 3월 21일 오후 6시 20분 ~ 오후 7시 40분 이고 2차 현장실험은 2002년 4월 17일 오후 4시 00분 ~ 오후 7시 00분에 실시하였다.

2. 효율성 검증

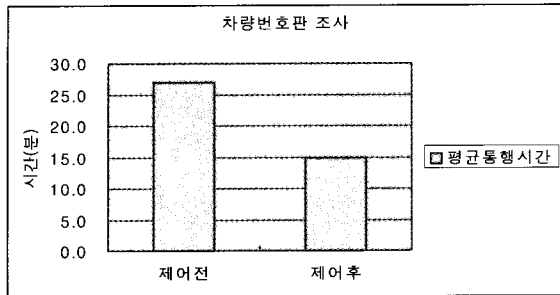
1차 현장실험은 초기실험으로 진출제어를 실시할 경우 홍은 진출램프를 통과하는 차량이 현재 신호운영 방법에 비하여 충분히 증가하는가를 확인하는 과정이었다. 〈그림 3〉은 주기별로 통과하는 차량대수를 간선도로차량과 램프차량에 대하여 보여준다. 주기1에서 7까지는 기존 운영방식으로 진행되었으며, 3주기의 패턴전이과정을 거쳐, 주기10부터 18까지 진출제어방식으로 운영하였으며, 그 후는 원상복귀 하였다. 기존운영방법에서는 주기당 15대 내외의 진출램프 통과차량이 조사되었는데 반하여, 주기10부터 통과교통량이 주기당 30대 수준으로 증가하는 결과를 볼 수 있다. 주기19이후에는 다시 15대 수준으로 환원되었다.



〈그림 3〉 홍은진출부 주기별 녹색시간 통과교통량

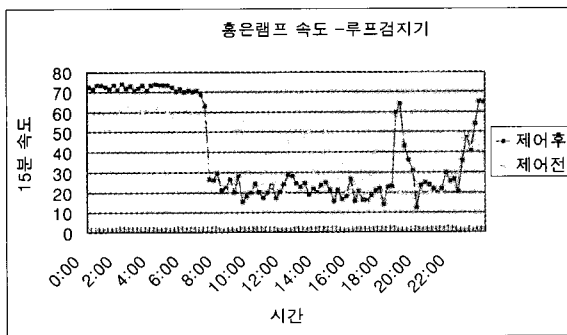
2차 현장실험시에는 진출제어를 실시하면서 소통효과를 확인하기 위하여, 교통조사를 실시하였다. 〈그림 4〉은 내부순환로 본선상의 홍지문터널 출구부터 홍제초등앞 교차로까지의 통행시간을 차량번호판 조사에 의하여 측정한 결과를 보여준다. 제어전에는 홍지문터널 출구부터 홍제초등앞 교차로까지 도달하는데 약 27

본이 소요되던 것이 제어시간동안에는 15분으로 줄어드는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 홍지문터널 → 홍은진출램프 평균통행시간

〈그림 5〉는 홍은 진출램프상에 설치된 검지기에서 수집된 자료를 보여준다. 조사일인 4월 17일에는 출근 시간전인 오전 7시까지 70KPH의 속도대가 유지되다가, 그후부터 시속 20KPH대의 혼잡상황이 지속되고 있었다. 진출제어는 18:00에서 19:00까지 실시하였는데, 이 시간동안은 램프상 차량속도가 65KPH까지 회복하는 것을 알 수 있다. 그후 시간대에는 혼잡상태로 복구되었다. 참고를 목적으로 3월 6일 검지기자료를 수록하였는데, 조사당일에 비하여 다소 차이는 있으나 비슷한 형태의 혼잡시간대를 보이고 있다. 특히, 18:00에서 19:00까지는 20KPH의 낮은 속도를 보여, 본 진출제어의 효과와 대비되고 있다.



〈그림 5〉 홍은진출램프 진출제어 전·후 속도비교

진출부 제어시 고속도로 혼잡을 완화하기 위해서 진출차량에 우선권을 둘 경우 인접 간선도로방향의 용량은 상대적으로 저하되게 된다. 진출제어를 통하여 고속도로 혼잡의 일부가 간선도로로 전이되는 현상은 불가피하다. 현장실험 당일은 진출램프에 우선이 되도록 신호운영을 하였으므로, 간선도로에 악영향이 주어지게 된다. 진출램프 제어 전·후 간선도로의 대기행렬

변화는 진출제어 전에 110미터이던 대기행렬이 진출제어로 인하여 200미터까지 증가되는 것으로 조사되었다. 고속도로 본선의 혼잡이 크게 줄어든 효과에 비하여 간선도로 혼잡은 증가하기는 하지만 심각한 수준은 아니었다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에 제시된 진출제어기법은 도시고속도로의 진출부가 혼잡한 기존 간선도로에 접속됨으로 인하여 발생한 혼잡을 완화하고자 개발되었다. 내부순환로 홍은 진출램프에 대하여 진출제어 전략을 적용하였으며, 현장실험을 통하여 효과를 확인했다. 실험 결과 본선과 해당 진출램프의 차량속도가 현저하게 증가하였다. 하지만 실험인 관계로 제한된 시간동안 운영하였으며, 향후 혼잡시간대에 확대 운영할 필요가 있다. 본 전략은 기존 TOD방식의 시스템에 적용하였는데, 향후 실시간 신호시스템과 같은 실시간제어로 연장이 가능하다.

참고문헌

1. Web Site, <http://www.smartway.seoul.kr>
2. U.S. Department of Transportation. Traffic Control Systems Handbook, 1996, pp. 5-1 ~ 5-10
3. Carroll J. Messer. 'Simulation Studies of Traffic Operations at Oversaturated Closely-Spaced Signalized Intersections.' 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 1998.
4. Web Site, www.itsq.com.au/streams/default.htm
5. Web Document, lcewww.et.tudelft.nl/~deschutt/msc/msc_8.html
6. 김영찬, 이철기, 허혜정. "과포화 신호제어 기법을 응용한 도시고속도로 진출램프 제어전략의 개발." 대한교통학회지 제19권 제3호, 대한교통학회, 2001.6. pp. 89-100.
7. William R. McShane, Roger P. Roess, and Elena S. Prassas. Traffic Engineering. 2nd edition, Prentice Hall, 1998, pp.617-623