

# 도시고속도로 진출램프제어를 위한 통합신호제어모형 개발

## Development of Integrating Signal Control Model for Urban Freeway Off-ramp Area

임광수 주엔지니어링주식회사 교통기술연구소 이사

※ 주요단어: 내부링크, 선형계획법, 외부링크, 진출램프제어, 총지체시간

### 목 차

- I. 서론
- II. 기존 연구 고찰
  - 1. 형평오프셋(Equity offset)을 이용한 대기행렬 관리이론
  - 2. 대기행렬관리계수를 통한 진출램프제어
- III. 모형개발
  - 1. 네트워크 및 변수 정의
  - 2. 모형개발
  - 3. 제약조건
- IV. 모형적용 및 평가
- V. 결론

## I. 서론

도시고속도로는 도시부 교통의 동맥으로서 교통류의 이동성과 혼잡한 도심교통의 우회도로 역할을 담당하는 것으로 그 기능의 향상여부가 대도시 교통문제 해결의 주요과제 중 하나라 할 수 있다. 이에 도시고속도로의 기능향상을 위한 다양한 제어 전략에 관한 연구가 진행되어 왔으나 대부분 진입 램프제어에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

진입램프제어전략은 진입교통량 제어를 통해 본선구간의 용량저하 예방을 기대하고 있으나 우리나라 대도시 교통특성상 제어 전 이미 본선교통류의 용량 근접상태로 인해 제어를 통한 본선의 용량증대 효과가 크지 않으며, 오히려 진입교통량

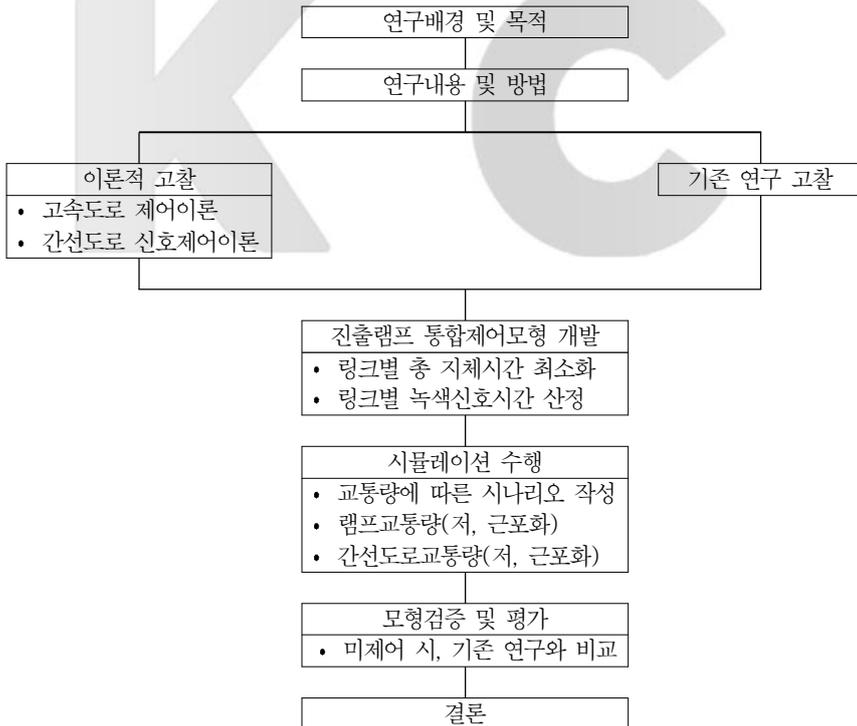
제어로 인한 간선도로의 교통혼잡을 가중시키는 문제로 인하여 실효성이 크지 않아 지금까지 적용이 미미한 실정이다.

진출램프의 경우는 간선도로의 교통혼잡이 램프진출차량에 영향을 주어 진출램프의 대기행렬이 고속도로 본선에 역류하는 현상이 발생하게 되어 도시고속도로 본선 용량의 감소, 교통안전문제 등의 심각한 문제를 안고 있다.

기존의 진출램프제어전략은 진출차량 억제를 위한 차단기 설치, 미터링 기법 등이 있는데 이러한 기법은 교통량이 포화상태에 이른 우리나라의 경우 진출램프 대기행렬의 본선역류를 가중시키는 단점이 있다.

따라서 진출램프 대기행렬의 본선역류를 방지

<그림 1> 연구의 진행과정



하기 위한 합리적인 진출램프제어가 필요하며, 진출램프제어를 통해 본선의 용량을 증대할 경우 진입램프제어전략의 효과향상도 기대할 수 있다.

본 연구에서는 교통량의 비포화 및 과포화 상태 모두를 고려하고 도시고속도로 진출램프와 접속되는 간선도로 상류부 링크의 총지체시간 최소화를 목적으로 하는 도시고속도로 진출램프와 간선도로의 통합신호제어모형을 제시함으로써 도시고속도로의 본선구간 용량증대 및 진출램프로 인한 간선도로 교통혼잡 완화방안을 제시하고자 한다.

본 연구의 방법으로는 기존 연구를 고찰하고 진출램프 접속부에 신호등 설치를 통해 진출램프 통합제어모형을 개발하고 교통량 조건에 따라 시나리오를 작성한 후 각각의 시나리오에 대한 신호시간을 산정하였다.

도출된 신호시간을 토대로 시뮬레이션을 통해 미제어 시와 기존 연구와의 비교를 통해 본 연구 모형을 검증·평가하였다. 본 연구의 범위는 도시고속도로 진출램프와 그에 접속하는 간선도로의 상류부 및 하류부 교차로를 연구대상 범위로 설정하였다.

## II. 기존 연구 고찰

앞서 언급한 바와 같이 진입램프제어에 대한 연구는 많은 반면 진출램프제어에 대한 연구는 미약하다. 진출램프제어와 관련한 국내외 연구는 C.J. Messer(1998)와 김영찬(2001) 등이 제시한 바

있다.

### 1. 형평오프셋(Equity offset)을 이용한 대기행렬 관리이론

미국의 C.J. Messer(1998)는 신호교차로를 가진 다이나몬드 입체교차로에서의 진출램프 신호제어를 위해 교차로 간격이 짧은 두 개의 신호교차로에 대한 제어방법을 입체교차로 하부 과포화 신호교차로에 적용하였다. 과포화 상태에서 발생하는 대기행렬의 역류에 중점을 두고 오프셋(offset)의 변화에 따른 지체시간을 산정하기 위하여 시뮬레이션을 통해 지체시간이 최소화되는 형평오프셋(Equity offset)을 제시하였다.

연구에서 C.J. Messer는 비포화상태(undersaturated conditions,  $V/c = 0.8$ )와 과포화상태(oversaturated conditions,  $V/c = 1.5$ )로 구분하여 비포화상태 제어전략으로 최대교통류율과 최소녹색시간을 산정하고 두 개의 관계식에 의한 신호시간(Critical Cycle)을 구하였으며 과포화상태에서는 HCM(1994)에서 제시하고 있는 지체모형을 이용하여 포화상태 이르기까지 링크통행속도(minimum link travel speed)를 포화상태의 통행속도와 하류부 접근교통류 유효적색시간과 유효녹색시간 비와의 관계식을 통해 산정하고, 이를 통해 지체시간을 구하였다.<sup>1)</sup>

이 연구에서 C. J. Messer는 두 가지 조건에 따라 회전교통량의 비, 녹색시간의 비 등을 고정하고 NETSIM 시뮬레이션 프로그램을 통해 오프셋

1)  $u_1 = \frac{u_s}{(1+\beta)}$

여기서,  $u_1$  = 포화에 이르기까지 링크통행속도(km/h)

〈표 1〉 기존 연구와 본 연구모형 비교

구분	C.J. Messer 연구	김영찬 연구	본 연구
제어 전략	• 대기행렬관리를 통한 본선영향 최소화	• 대기행렬관리를 통한 본선영향 최소화	• 대기행렬관리를 통한 본선영향 및 외부링크 총지체시간 최소화
목적 함수	• 교차로 간 지체를 최소화하는 오프셋(offset) 산정	• 대기행렬관리계수( $\alpha$ )를 통한 신호시간 산정	• 링크별 총지체시간의 합이 최소화되는 신호시간 산정
장점	• 간단한 모형구조 • 교통량에 따른 대기행렬발생 예측 가능	• 대기행렬관리 목표에 부합하는 대기행렬관리계수 선정 가능	• 신호시간에 영향을 주는 교통량과 지체시간을 고려 • 비포화 및 과포화 모두 고려
단점	• 지체가 최소화되는 오프셋(offset)값을 찾기 위해 시뮬레이션에 의존	• 신호시간에 영향을 주는 지체시간을 고려하지 못함 • 과포화 상태만을 고려	• 균일지체만을 대상으로 함

(offset)의 변화에 0~100초까지 10초 단위로 증가하면서 시뮬레이션을 수행하고 수행결과에 따라 지체시간을 최소화하는 형평오프셋(equity offset)을 제시하였다.

상기의 연구는 진출램프 제어의 효과적인 방법론 제시보다는 간단한 수학적 모델을 통해 spillback이 발생하는 문제를 예측하고 오프셋조정을 통해 지체를 최소화하는 방안을 제시한 데 의의가 있다.

## 2. 대기행렬관리계수를 통한 진출램프제어

김영찬(2001)은 진출램프와 전방 교차로를 과포화 상태의 두 개의 인접교차로 문제로 보고 과포화 신호제어기법을 응용하여 진출램프제어전략을 제시하였다.

교차도로의 차량 통과기법인 형평오프셋과 내부 미터링 기법에서의 대기행렬 관리전략 및 링크길이를 고려한 현시배정 방법인 Imbalanced split 기

- $u_s$  = 포화상태의 통행속도(km/h)
- $r, g$  = 유효적색시간, 유효녹색시간(초)
- $\beta = k_q/k_{s,q} (= 2.79r/g)$
- $k_q$  = 차량 한 대가 차지하는 공간(7m/대)
- $k_s$  = 포화교통류의 밀도(vpkmpl)

링크길이(L)에 대한 지체시간 d는

$$d_1 = \frac{L}{u_1} - \frac{L}{u_a}$$

여기서,  $u_q$  = 주행속도(km/h)

법을 응용한 제어방법을 제시하였다. 김영찬 (2001)은 링크길이에 대한 대기행렬 길이의 변화율을  $r$ 이라 하고 진출램프와 간선도로의  $r$ 값의 비율을 대기행렬 관리계수( $\alpha$ )라 정의하고<sup>2)</sup>  $\alpha=0$  (진출램프우선제어),  $0<\alpha<1$ (균등제어),  $\alpha=1$ (간선도로 우선제어)에 따라 대기행렬을 관리할 수 있으며 그에 따른 신호시간을 산정하였다.

$\alpha$ 값에 따른 신호시간을 산정하기 위하여 주어진 신호현시와 도착교통량과 통과교통과의 관계를 통해 대기행렬길이 변화( $\Delta Q$ )를 구하고 신호시간을 산정<sup>3)</sup>하였다.

그러나 상기의 연구는 램프교통량과 간선도로 교통량이 모두 과포화 상태만을 고려하였는데 교통여건이 반드시 과포화 상태만 존재하는 것이

아니기 때문에 비포화 상태에 대한 적용이 어려우며, 신호시간 결정에 영향을 주는 대기행렬 관리계수의 경우 대기행렬 관리정책에 따라 외부 입력변수로 결정하게 되는 단점을 가지고 있다. 또한, 신호교차로의 서비스수준 평가지표(MOE)로 널리 사용되는 지체시간을 고려하지 못하고 있다.

### III. 모형개발

#### 1. 네트워크 및 변수 정의

본 연구에서는 모형개발을 위해 도시고속도로, 간선도로, 진출램프로 구성되는 <그림 2>와 같은 분 석네트워크를 설정하고 기하구조 조건, 교통량 조

2)  $\alpha = \frac{r_r}{r_a}$

여기서,  $\alpha$  = 대기행렬 관리계수  
 $r_r$  = 진출램프 링크길이에 대한 대기행렬 길이의 변화율  
 $r_a$  = 간선도로 링크길이에 대한 대기행렬 길이의 변화율

3)  $\Delta Q = \frac{d-f}{N}$

여기서,  $d$  = 수요(대/시)  
 $f$  = 현시 통과교통량(대/시)  
 $N$  = 차로수

$$\Delta Q_r = \left[ d_r - \frac{G_r - s_r * (3600/C) * N_r}{h_r} \right] / N_r$$

$$\Delta Q_a = \left[ d_a - \left\{ \frac{G_a - s_a * (3600/C) * N_a}{h_a} - \frac{G_r - s_r * (3600/C) * N_r}{h_r} \right\} \right] / N_a$$

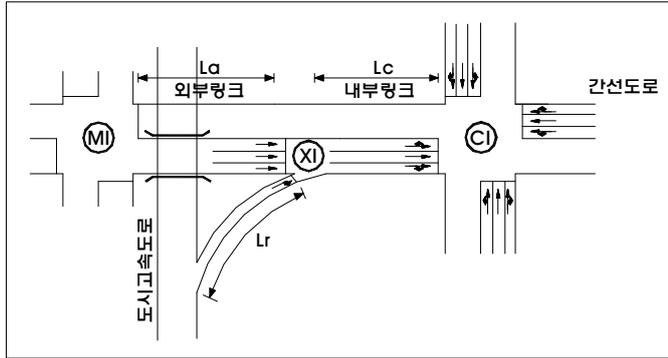
$$\alpha = \left[ N_a L_a \left[ d_r - \frac{G_r - s_r * (3600/C) * N_r}{h_r} \right] \right] / \left[ N_r L_r \left[ d_a - \left\{ \frac{G_a - s_a * (3600/C) * N_a}{h_a} - \frac{G_r - s_r * (3600/C) * N_r}{h_r} \right\} \right] \right]$$

위 식의  $G_r$ 에 대해 정리하면,

$$G_r = \left( \frac{d_r L_a N_a - \alpha d_a L_r N_r + \alpha f_c N_r L_r}{\alpha N_r L_r + L_a N_a} \right) \frac{h_r C}{3600 N_r} + s_r \text{ 되고,}$$

진출램프교차로는 2현시이므로  $G_a = C - G_r$  가 된다.

<그림 2> 모형개발을 위한 네트워크 설정



<표 2> 모형의 변수 설정

구분	변수	변수설명
기하구조조건	$CI$	$XI$ 하류부 교차로
	$XI$	진출램프와 간선도로 접속교차로(진출램프 교차로)
	$MI$	$XI$ 상류부 교차로
	$N_a$	외부링크 차로수
	$N_r$	진출램프 차로수
	$N_c$	내부링크 차로수
	$L_a$	외부링크 길이(m)
	$L_r$	진출램프 길이(m)
	$L_c$	내부링크 길이(m)
교통량조건	$f_a$	$XI$ 를 통과한 외부링크 교통량(대)
	$f_r$	$XI$ 를 통과한 진출램프 교통량(대)
	$f_c$	$CI$ 를 통과한 내부링크 교통량(대)
	$d_a$	$XI$ 에 도착하는 외부링크 교통량(대/시)
	$d_r$	$XI$ 에 도착하는 진출램프 교통량(대/시)
	$Q_c$	내부링크에 남아 있는 대기차량 수(대)
	$Q_r$	진출램프에 남아 있는 대기차량 수(대)
	$Q_a$	외부링크에 남아 있는 대기차량 수(대)
신호조건	$C$	$CI$ 의 최적화된 신호주기(초)
	$G_c$	$CI$ 의 내부링크 녹색시간(초)
	$R_c$	$CI$ 의 내부링크 적색시간(초)
	$G_r$	$XI$ 의 진출램프 녹색시간(초)
	$G_a$	$XI$ 의 외부링크 녹색시간(초)

주: 외부링크는  $XI$ 와  $MI$  사이의 구간 링크, 내부링크는  $XI$ 와  $CI$  사이의 구간 링크를 칭함.

건, 신호 조건 등을 고려하여 변수를 설정하였다.

### 2. 모형개발

본 모형은 도시고속도로 진출램프와 간선도로 접속부에 대해 진출램프 교차로를 설치하여 진출램프 용량을 증대시키는 신호시간 최적화 모형이다. 본 모형은 진출램프 대기차량의 고속도로 본선구간 spillover를 방지하고 외부링크의 spill-back을 방지하면서 진출램프와 외부링크의 총지체시간( $D_i$ )을 최소화하는 목적함수로 설정하였다.

$$MIN \sum_i D_i \quad \text{〈식 1〉}$$

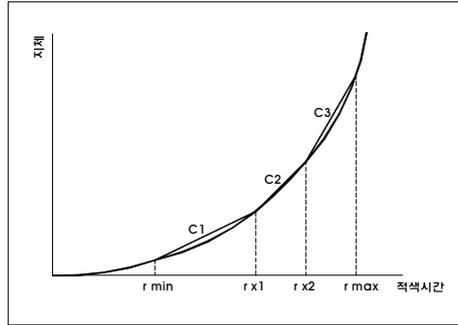
여기서,  $D$ : 총지체시간(초)

$i$ : 접근로(진출램프, 외부링크)

교차로가 인접되어 있고 연동효과에 큰 영향을 주는 것은 균일지체이기 때문에 본 연구에서는 균일지체만을 대상으로 선형계획법(Linear Programming)을 통해 모델링을 구축하였으며, 교차로에서의 균일지체는 적색시간에 대한 2차 함수식(quadratic function)으로 표현된다.

이러한 지체시간은 비선형(non-linear)이므로 선형모형 내 결정변수로 포함시키기 위해서 <그림 3>과 같이 곡선함수식을 수개의 직선구간(piecewise-linear components)으로 나누어 구간별 직선식에 의하여 지체값을 산정하였다. 이때, 중요한 것은 적색시간 최소값( $r_{min}$ )과 최대값( $r_{max}$ )의 결정과 직선구간 분할 수다. 직선구간 분할 수가 많을수록 곡선값에 일치하게 되나 최적해를 구하는 데 소요시간이 증가하게 된다. Yager and Garter et al.은

<그림 3> 지체시간의 선형화



세 개 구간으로 나누었고 Chang-Jen Lan et al.은 두 개 구간으로 나누었는데 만족할 만한 결과를 얻은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 첫 번째 분할점( $r_{x1}$ )으로  $r_{min}$ 과  $r_{max}$ 의 중간지점을 선정하고, 두 번째 분할점( $r_{x2}$ )은  $r_{x1}$ 과  $r_{max}$ 의 중간지점을 선정하여 세 개구간으로 나누어 적용하였다. 이는 교통량의 포화도( $V/c$ )가 증가할수록 곡선의 경사도가 급격히 증가하기 때문에 보다 효율적인 곡선값에 근접토록 하기 위한 방법이다. 그리고 최소값( $r_{min}$ )과 최대값( $r_{max}$ )은 교통량을 감안하여 탄력적으로 적용한다. 즉, 교통량이 적으면 작은 값을 적용하고 교통량이 많을수록 큰 값을 적용한다.

<그림 3>에서 각각의 지점에 해당하는 적색시간( $r_x$ )을 구하기 위해 포화도( $x = \text{교통량} / \text{용량}$ )를 구하면 다음과 같다

$$x = \frac{q}{c} = \frac{q}{sg/C} = \frac{q}{s(C-r/C)} = \frac{q}{s(1-r/C)} \quad \text{〈식 2〉}$$

여기서,  $q$ : 교통량(대),  $s$ : 포화교통량(대)

$g$ : 녹색시간(초),  $r$ : 적색시간(초)

<식 2>를 신호주기로 나누고  $r_x$ 에 대한 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$r_x = 1 - \frac{q}{sx} \quad \langle \text{식 3} \rangle$$

<그림 2>에서 첫 번째 직선구간의 기울기( $C_1$ )를 구하면 다음과 같고

$$C_1 = \frac{A(r_{x1}^2 - r_{\min}^2)}{r_{x1} - r_{\min}} = A(r_{x1} + r_{\min}) \quad \langle \text{식 4} \rangle$$

마찬가지로, 두 번째 직선구간과 세 번째 직선구간의 기울기는 다음과 같다.

$$C_2 = A(r_{x1} + r_{x2}) \quad \langle \text{식 5} \rangle$$

$$C_3 = A(r_{x2} + r_{\max}) \quad \langle \text{식 6} \rangle$$

여기서,  $A = \frac{q}{2(1-q/s)}$

이때, 직선구간 전체의 지체시간은 각 구간의 기울기와 적색시간에 의한 면적의 합이 된다. 따라서 위의 계수값과 결정변수를 이용하여 총 지체시간 최소화를 위한 목적함수를 <식 7>과 같이 구할 수 있다.

$$MIN \sum_i C_i(r_{1i} - r_{\min i}) + C_{2i}r_{2i} + C_{3i}r_{3i} \quad \langle \text{식 7} \rangle$$

$$\begin{aligned} \text{제약조건} \quad & r_{\min i} \leq r_{1i} \leq r_{x1i} \\ & 0 \leq r_{2i} \leq r_{x2i} - r_{x1i} \\ & 0 \leq r_{3i} \leq r_{\max} - r_{x2i} \end{aligned}$$

여기서,  $i$ 는 접근로(진출램프, 외부링크)

### 3. 제약조건

본 연구모형은  $XI$ 에서 진출램프와 외부링크에 대

한 지체시간의 합을 최소화하는 최적신호시간을 구하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여  $CI$ 의 최적신호시간을 구한 다음 신호주기와 내부링크 신호시간을 제약조건으로 하여  $CI$ 와 연동으로 운영될 수 있는  $XI$ 의 신호시간을 최적화한다.

$$C_{CI} = G_c + R \quad \langle \text{식 8} \rangle$$

$$C_{XI} = G_r + G_a + ALLRED \quad \langle \text{식 9} \rangle$$

$$C_{CI} = C_{XI} = C \quad \langle \text{식 10} \rangle$$

여기서,  $G_c$ :  $CI$ 의 총주기(초)

$C_{XI}$ :  $XI$ 의 총주기(초)

교차로에서 녹색시간 동안 진출교통량은 상류부 교통상황이 과포화일 경우 포화교통류 상태로 진출되고 비포화일 경우 도착교통류 상태로 진출되는 것이 일반적이다. 이에 본 연구모형에서는 상류부 교통상황을 반영하기 위해  $XI$ 를 녹색시간 동안 빠져나가는 교통량은 과포화일 경우 포화교통류 상태로 진출되고 비포화일 경우는 한 주기 동안에 도착한 교통량이 진출되도록 <식 11>, <식 12>와 같은 조건식을 적용하였으며, 진출교통량은 이 둘 중에서 작은 값으로 결정된다.

$$f_r = \min[s_i G_r, d_r \frac{C}{3600}] \quad \langle \text{식 11} \rangle$$

$$f_a = \min[s_i G_a, d_a \frac{C}{3600}] \quad \langle \text{식 12} \rangle$$

여기서,  $d_r, d_a$ 는 접근로별 도착교통량

$$s_i = 2200/3600 \times N_i$$

$$f_c = G_c \times \frac{2200}{3600} \times N_c \quad \langle \text{식 13} \rangle$$

위 제약조건 <식 10>과 <식 11>은 조건식이므로 본 연구에서는 이진변수( $Z_r, Z_a$ )를 사용하여 다음과 같이 각각 4개의 선형식으로 전환하였다.

$$f_r \leq sG_r \quad \langle \text{식 14} \rangle$$

$$f_r \leq d_r \frac{C}{3600} \quad \langle \text{식 15} \rangle$$

$$sG_r - f_r \leq M \times Z_r \quad \langle \text{식 16} \rangle$$

$$d_r \frac{C}{3600} - F_r \leq M(1 - Z_r) \quad \langle \text{식 17} \rangle$$

$$f_a \leq sG_a \quad \langle \text{식 18} \rangle$$

$$f_a \leq d_a \frac{C}{3600} \quad \langle \text{식 19} \rangle$$

$$sG_a - f_a \leq M \times Z_a \quad \langle \text{식 20} \rangle$$

$$d_a \frac{C}{3600} - F_a \leq M(1 - Z_a) \quad \langle \text{식 21} \rangle$$

여기서,  $Z_r, Z_a$ 는 이진변수

$$(Z_r = 0 \text{이면 } f_r = sG_r, \quad Z_r = 1 \text{ 이면 } f_r = d_r \frac{C}{3600})$$

$M$ 은 큰 정수

링크상에 존재하는 최대 대기차량의 수( $Q_i$ )는 도착교통량( $d_i$ ) 중 녹색시간 동안 교차로를 통과한 교통량( $f_i$ )을 뺀 값과 한 적색시간동안 도착한 교통량을 더한 값으로 <식 22>, <식 23>으로 나타낼 수 있다.

$$Q_r = d_r - f_r + \frac{G_a d_r}{3600} \quad \langle \text{식 22} \rangle$$

$$Q_a = d_a - f_a + \frac{G_r d_a}{3600} \quad \langle \text{식 23} \rangle$$

내부링크에서의 진출교통량을 최대화하기 위해서  $XI$ 에서 진출램프와 외부링크 교통량을 내부링크에 진입시킨 다음  $CI$ 에서 내부링크 차량을 통과시키도록 한다. 따라서 내부링크 신호시간 후에 남게 되는 대기차량은 <식 24>와 같게 된다.

$$Q_c = f_r + f_a - f_c \quad \langle \text{식 24} \rangle$$

그리고 상기와 같이 발생하는 대기차량이 도시고속도로 본선구간에 영향을 미치지 않도록 하고 진출램프 교차로, 상류부 교차로에 영향을 미치지 않도록 다음과 같은 제약식을 추가하였다.

$$0 \leq kQ_r \leq L_r \times N_r \quad \langle \text{식 25} \rangle$$

$$0 \leq kQ_a \leq L_a \times N_a \quad \langle \text{식 26} \rangle$$

$$0 \leq kQ_c \leq L_c \times N_c \quad \langle \text{식 27} \rangle$$

위와 같이 구축된 본 모형은 진출램프와 외부링크의 총지체시간을 최소화하면서 본선구간에 영향이 없는 진출램프 신호시간을 산정하게 된다.

#### IV. 모형적용 및 평가

신호교차로의 서비스수준은 교통량에 가장 큰 영향을 받게 되며 신호시간 산정에도 교통량이 가장 민감하게 영향을 주게 된다.

〈표 3〉 적용 시나리오

구분	진출램프 교통량( $d_r$ )	간선도로 교통량( $d_a$ )	진출램프 길이( $L_r$ )	내부링크 길이( $L_c$ )	간선링크길이 ( $L_a$ )
시나리오 1	저포화(300대/시)	저포화(600대/시)	200m	100m	300m
시나리오 2	저포화(300대/시)	근포화(1800대/시)	200m	100m	300m
시나리오 3	근포화(600대/시)	저포화(600대/시)	200m	100m	300m
시나리오 4	근포화(600대/시)	근포화(1800대/시)	200m	100m	300m

〈표 4〉 적용 시나리오별 신호시간 산정결과

(단위: 초)

구분	기존 연구(김영찬, 2001)			본 연구		
	$G_r$	$G_a$	$C$	$G_r$	$G_a$	$C$
시나리오 1	20	70	90	63	27	90
시나리오 2	20	100	120	17	103	120
시나리오 3	49	71	120	69	51	120
시나리오 4	43	77	120	33	87	120

따라서 본 연구에서는 모형의 적절한 적용 및 평가를 위하여 교통량 조건을 저포화 상태와 근포화 상태로 구분하여 〈표 2〉와 같이 4개의 적용 시나리오를 작성하였다. 램프와 간선교통량이 저포화와 근포화로 조합한 4개의 시나리오는 대도시 교통상황을 모두 만족시킬 수 있기 때문에 본 연구모형 평가를 위한 시나리오로 적절하다고 판단된다.

한편, 링크길이의 변화는 신호시간 산정에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 본 연구에서는 진출램프 길이의 경우 도시고속도로 진출램프의 일반적 길이인 200m로 고정하였으며, 외부링크와 내부링크의 길이도 마찬가지로 도시 내 간선도로의 평균 교차로 간격이 400~500m 이내임을 고려하여 400m를 적용하고  $XI$ 의 위치는  $CI$ 와의 통합운영

을 고려하여 100m로 설정하였다.

$XI$ 의 신호시간 산정을 위해 먼저  $CI$ 에 대해 신호교차로 최적화 프로그램인 Transit 7F를 이용하여  $CI$ 의 신호시간을 산정한 후 신호주기와 내부링크 신호시간을 고정변수로 하여 본 연구의 제약조건을 만족하는  $XI$ 의 신호시간을 산정하였다. 본 연구모형은 선형계획법(Linear Programming)을 통해 최적해를 구하는 것으로 본 연구에서는 선형계획 프로그램으로 널리 사용되는 LINDO(Linear, Interactive, Discrete Optimizer) package를 사용하였다.

〈표 3〉에서와 같이 적용 시나리오별 신호시간 산정결과를 살펴보면 기존 연구(김영찬, 2001)와 본 연구 모두 링크의 교통량 변화에 따라 신호시간이 변화하는 것으로 나타났다. 특히, 본 연구모형은 간선교통량이 저포화 상태인 시나리오 1과

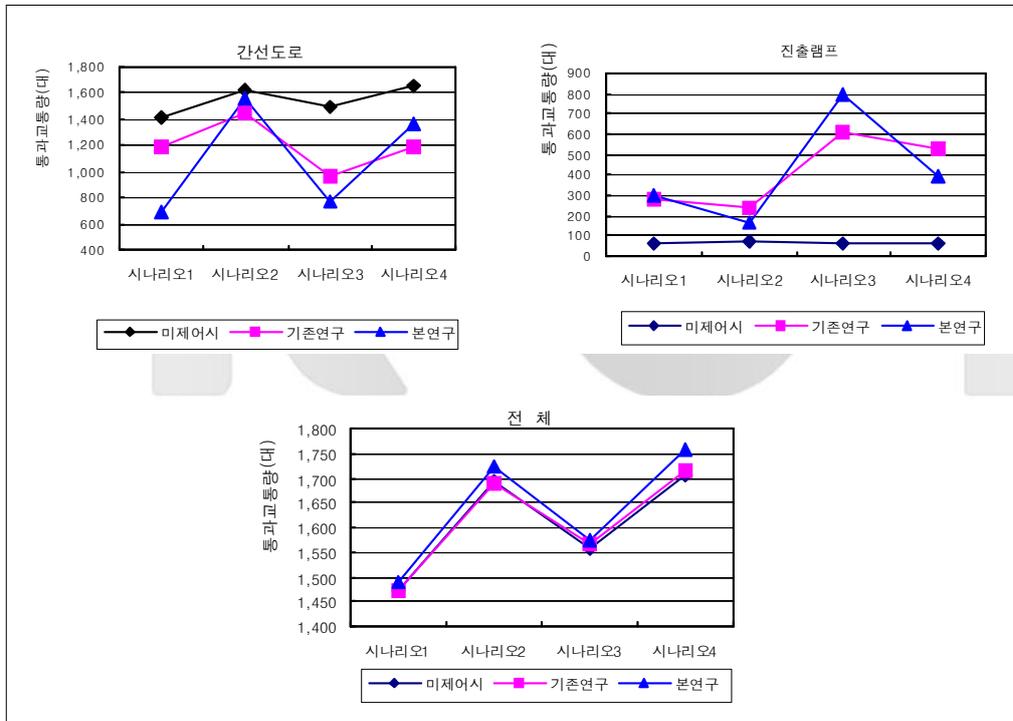
<표 5> 적용 시나리오별 통과교통량 비교

(단위: 대)

구분		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3	시나리오 4
간선도로	미제어 시	1,407	1,623	1,499	1,648
	기존 연구*	1,188	1,453	958	1,186
	본 연구	691	1,556	774	1,366
진출램프	미제어 시	67	71	57	58
	기존 연구*	283	235	609	530
	본 연구	298	168	800	390
합계	미제어 시	1,474	1,694	1,556	1,706
	기존 연구*	1,471	1,688	1,567	1,716
	본 연구	1,489	1,724	1,574	1,756

주: \* 김영찬(2001)

<그림 4> 적용 시나리오별 통과교통량 비교



시나리오 3의 경우  $G_a$ 보다  $G_r$ 에 많은 시간이 할당되는 것으로 나타났으며, 반대로 간선교통량이

근포화 상태인 시나리오 2와 시나리오 4의 경우는  $G_r$ 보다  $G_a$ 에 많은 시간이 할당되는 것으로 나타

〈표 6〉 적용 시나리오별 평균지체시간 비교

(단위: 초/대)

구분		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3	시나리오 4
간선도로	미제어 시	439.0	381.2	413.3	366.5
	기존 연구*	398.2	314.7	499.9	397.1
	본 연구	672.0	289.9	602.1	340.3
진출램프	미제어 시	1,310.6	1,294.6	1,515.2	1,426.6
	기존 연구*	387.4	460.4	168.6	196.5
	본 연구	25.9	626.1	32.3	275.3
평균	미제어 시	478.6	419.5	453.7	402.5
	기존 연구*	396.1	335.0	371.1	335.1
	본 연구	325.7	322.7	312.5	325.9

주: \*김영찬(2001)

났다. 본 연구의 신호시간은 기존 연구에 비해 링크 교통량의 변화에 매우 민감한 변화를 보이는 것으로 나타났으며, 교통량이 포화도에 근접한 링크에 많은 신호시간을 할당하는 것으로 나타나 도시 내 교차로의 일반적인 신호시간 설계요소인 포화도 조건과 비교할 때 타당한 신호시간을 보이는 것으로 나타났다.

본 연구모형의 제어효과를 평가하기 위하여 미시적 시뮬레이션 모형으로 널리 쓰이는 TSIS package를 이용하였으며 미제어 시, 기존 연구, 본 연구로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 링크별 통과교통량과 함께 신호교차로 서비스 수준의 효과척도로 널리 사용되는 평균지체시간을 비교·평가하였다.

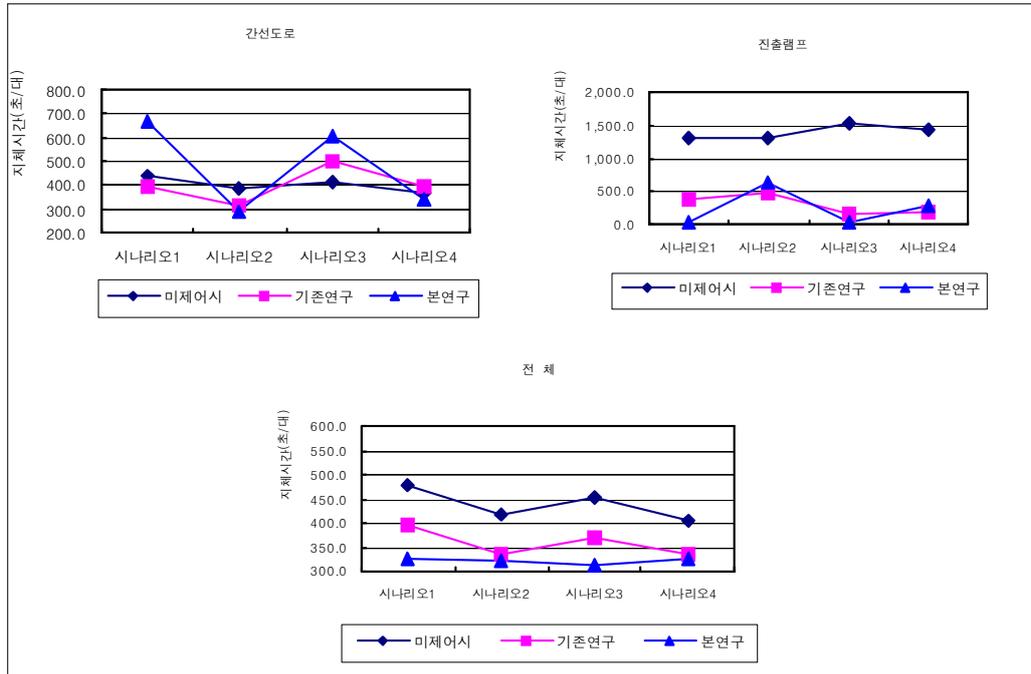
시나리오별 통과교통량을 비교해보면 〈표 4〉에 서와 같이 간선도로의 경우 모든 시나리오에서 본 연구의 평균통과교통량이 미제어 시에 비해 적은 반면 진출램프의 통과교통량은 본 연구가 매우 높은 것으로 나타났다. 이는 진출램프의 통과교통량

을 증가시킴으로써 도시고속도로 본선구간의 영향을 최소화하는 본 연구의 목적에 부합함을 보여주고 있다. 또한 기존 연구 역시 미제어 시와 비교해보면 본 연구와 같은 경향을 보이는 것으로 나타났으나 본 연구의 전체 통과교통량이 기존 연구보다 높은 것으로 나타나 본 연구의 적용효과가 기존 연구에 비해 더 큰 것으로 나타났다.

또한 기존 연구와 본 연구를 비교해 보면 간선도로 교통량이 근포화 상태인 시나리오 2·4의 경우 본 연구는 진출램프 통과교통량을 적게 하는 대신 간선도로의 통과교통량을 크게 함으로써 전체의 통과교통량을 많게 하는 것으로 나타났다. 반대로 진출램프 교통량이 근포화 상태인 시나리오 3의 경우 간선도로의 통과교통량을 적게 하고 진출램프 교통량을 많게 하는 것으로 나타났다.

위와 같이 본 연구모형 적용결과 미제어시나 기존 연구에 비해 교통량이 포화도에 근접한 링크에 대해 통과교통량을 많게 하고 포화도가 낮은 상대링크의 통과교통량을 적게 해주면서 교차로

<그림 5> 적용 시나리오별 평균지체시간 비교



전체 통과교통량을 향상시키는 것으로 나타났다.

시나리오별 평균지체시간을 살펴볼 때 <그림 6>과 같이 미제어 시 진출램프의 지체시간이 1,000 초대 이상으로 나타나 제어의 필요성이 있음을 보여주고 있으며, 기존 연구 또는 본 연구와 같이 제어를 실시함으로써 진출램프의 평균지체시간이 상당히 줄어드는 것으로 나타났다.

본 연구에 의한 평균지체시간을 살펴보면 시나리오 2·4와 같이 포화도가 낮은 진출램프의 평균지체시간이 높은 반면 포화상태인 간선도로의 평균지체시간을 낮게 함으로써 전체 평균지체시간이 미제어 시와 기존 연구보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 반대로 진출램프 교통량이 포화상태인 시나리오 3의 경우는 진출램프의 평균지체시간을 낮게 하고 간선도로의 평균지체시간을 높게 하여 전

체 평균지체시간을 최소화하는 것으로 나타났다.

## V. 결론

본 연구에서는 진출램프 접속부에 신호교차로를 설치하고 진출램프 대기행렬의 본선구간 역류를 방지하면서 교차로의 총 지체시간을 최소화하는 통합신호제어 모형을 개발하였다. 본 모형을 통한 신호시간을 바탕으로 가상의 네트워크와 시나리오를 설정하고 시뮬레이션을 실시한 결과에 의하면 미제어 시와 기존 연구에 비해 전체 통과교통량이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 본 모형은 포화도에 근접한 링크에 신호시간을 크게 하여 통과교통량을 증대시키면서 타 기법들에 비해 평균지체시간을 최소화하는 것으로 분석되었다. 특히, 미제어

시와 비교할 때 진출램프의 통과교통량을 크게 향상시키면서 지체시간을 최소화하는 것으로 나타나 진출램프 대기행렬이 고속도로 본선구간에 영향을 미치지 않도록 하는 본 연구의 목적에 부합하고 있음을 보여주고 있다.

그러나 간선도로 및 진출램프 교통량이 포화 상태에 근접할수록 진출램프의 평균지체시간이 큰 것으로 나타나 일정시간 이후에 도시고속도로 본선에 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서  $XI$ 의 신호시간에 영향을 미치는  $CI$ 의 신호시간과 통합운영될 수 있는 모형개발이 필요하다.

The Scientific Press.

Markos Papageoriou. 1995. "An Integrated Control Approach for Traffic Corridors". *Transportation Research Record* 3 : pp19-30.

Stephanedes Y.J. and Chang K. 1988. "Optimal control of freeway corridors". *ASCE Transportation Engineering* 119 : pp504-514.

Wallance, C.E. Courage, K. G. Hadi, M. A. and Gan. A. C. 1998. *TRANSYT-7F Users Guide*. FHWA. U.S Department of Transportation.

Youngchan Kim. 1990. "Development of Optimization Models for Signalized Intersection during Oversaturated Conditions". Ph.D., dissertation. Texas A&M University.

- 논문 접수일 : 2006. 10. 11
- 심사 시작일 : 2007. 10. 14
- 심사 완료일 : 2007. 11. 29

## 참고문헌

강경표. 1998. "도시고속도로 교통축에 대한 통합제어모형 및 알고리즘 개발". 서울대학교 석사학위 논문.

김영찬 외. 2001. "과포화 신호제어기법을 응용한 도시고속도로 진출램프 제어전략의 개발". *대한교통학회지* 제19권 제3호 : pp89-100.

신연교 외. 1997. "혼합정수선형계획법을 응용한 간선도로 신호연동화모형 개선에 관한 연구". *대한교통학회지* 제15권 제3호 : pp53-74.

C.J. Messer. 1998. "Simulation Studies of Traffic Operations at Oversaturated Closely-Spaced Signalized Intersections". 77th Annual Meeting of the TRB. Washington, D.C.

FHWA. 2001. *TSIS User's Guide version5.0*. McLean, Virginia. FHWA Office of Operations Research.

G.F. Newell. 1999. "Delays caused by a queue at a freeway exit ramp". *Transportation Research part B* : pp337-350.

Lan, C.J. Messer, Chaudhary N. A., and Chang E.C.P. 1992. "Compromise Approach to Optimize Traffic Signal Coordination Problems During Unsaturated". *EASTS*.

L.E. Schrage. 1987. *Users Manual for LINDO*. Redwood City, Calif.

**ABSTRACT**

**Development of Integrating Signal Control Model  
for Urban Freeway Off-ramp Area**

**Kwang-Soo Lim** Director, Transport Research Center, JU Engineering Co., Ltd.

※ Key Words : Total Delay Time, External Link, Internal Link, Linear Programming,  
Off-Ramp Control

The traffic condition in Off-ramp of urban freeway is quite influenced by the traffic situation of urban street. Increased traffic volume on the urban streets affects the volume of exiting traffic, and the queue on the off-ramp in turn affects the main stream of freeways. Therefore it is needed to develop control strategy in order to maximize the capacity of urban freeway off-ramps, thereby maintain the main stream volume.

This model which minimize the total delay times on the urban freeway off-ramp by adjusting the traffic signal of the urban street which the ramp are located in between, with conditions of traffic volume, length of the link, signal interval, queue length.

As we test this model with different traffic volume, it is evaluated that we can maximize the capacity of the traffic volume on the off-ramp by taking elastic green time based on the traffic volume of the advancing intersection. The simulated test on this control model clearly shows increased traffic volume on both off-ramp and urban street compared to non-controlled or previous control model, specially our control model minimizes the average delay times and therefore helps increasing the efficiency of off-ramp. In conclusion, it is studied that the urban freeway main stream traffic capacity could be increased by minimizing the influence of the traffic on the out-ramps through off-ramp control model that we propose.

к с і