

■ 論 文 ■

과포화 신호제어 기법을 응용한 도시고속도로 진출램프 제어전략의 개발

Development of Exit-Ramp Control Strategy
Avoiding Mainline Spillover for Urban Freeway

김 영 찬

이 철 기

허 혜 정

(서울시립대학교 도시공학과 부교수) (서울지방경찰청 교통개선기획실 실장) (서울지방경찰청 교통개선기획실)

목 차

<p>I. 서론</p> <p>II. 진출램프 제어전략</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 변수 정의</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 옵션의 결정</p> <p style="padding-left: 20px;">3. 대기행렬 관리정책에 따른 진출램프 신호시간 결정</p>	<p>III. 적용 및 평가</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 평가 대상</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 적용 방법</p> <p style="padding-left: 20px;">3. 평가 결과</p> <p>IV. 결론 및 과제 참고문헌</p>
---	---

Key Words : 도시고속도로, 진출램프 제어전략, 과포화 신호제어전략, Equity offset, 내부미터링

요 약

내부순환로의 진출램프 중 성산, 홍은, 홍제, 길음, 마장 진출램프에서는 램프의 지체가 심각하여, 진출차량의 대기행렬이 내부순환로 본선에까지 이르는 대기행렬 역류현상이 발생하고 있다. 이러한 본선으로의 대기행렬 역류는 본선의 혼잡을 가중시키고 교통사고의 위험도 증가시킨다.

본 논문에서는 이러한 도시고속도로의 진출램프 혼잡을 개선하기 위해 진출램프 제어전략을 개발하였다. 진출램프 제어전략의 목표는 진출램프의 대기차량이 본선으로 역류하지 않도록 하는 것이다. 대기행렬의 역류를 막기 위해서는 진출램프의 차량이 인접한 간선도로로 원활하게 진행하도록 해야 하며, 간선도로와 진출램프의 대기행렬을 제어정책에 따라 관리할 수 있어야 한다. 이를 위해서 진출램프 진출부에 신호를 설치하여 간선도로 차량의 흐름을 제어하고, 진출부 하류부 교차로와 연동제어를 하여 진출공간을 확보하였다. 또한, 대기행렬의 관리를 위해서는 대기행렬 관리계수를 정의하고 이 값에 따라 현시를 결정할 수 있는 제어식을 유도하였다. 진출램프 제어전략은 과포화 신호제어 기법을 응용하여 개발하였으며, 그 중 Equity offset과 내부미터링 기법을 연동제어에 응용하였고, Imbalanced split 기법은 대기행렬 관리계수에 따라 현시가 결정되는 제어식의 개발에 응용하였다.

진출램프 제어전략을 평가하기 위하여 진출램프의 혼잡으로 인해 본선으로 대기행렬 역류가 발생하는 내부순환로의 홍은, 홍제 진출램프를 선정하였으며, NETSIM을 통해 진출램프 제어전략의 효과를 분석하였다. 분석 결과 진출램프의 혼잡이 크게 개선되며, 운영자의 관리목적에 따라 대기행렬의 관리가 이루어지는 것을 볼 수 있었다. 진출램프 제어전략은 내부순환 도시고속도로뿐만 아니라 진출램프 제어가 필요한 타도시고속도로에서도 적용을 하면 좋은 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

※ 본 연구는 2000년 서울시립대학교 부설 도시과학연구원 공모과제로 수행하였음.

I. 서론

서울시는 도심통과 교통량의 급증으로 인한 도시내 교통혼잡을 해결하기 위해서 내부순환 도시고속도로를 건설하였다. 그러나 1998년 내부순환 고속도로의 개통 이후 도로설계와 주변도로와의 연계성 측면에서 안전과 소통에 다수의 문제점이 발생하였다. 특히, 진출램프는 혼잡의 정도가 심각하여 해결이 시급한 문제로 인식되고 있다. 실제로 서울시의 내부순환 도시고속도로 북부 구간 진출램프 중 성산, 홍은, 홍제, 길음, 마장 진출램프에서는 진출차량의 대기행렬이 내부순환 도시고속도로 본선에게까지 이르는 대기행렬 역류현상이 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 진출램프의 혼잡을 효과적으로 해결하여 본선으로의 대기행렬 역류현상을 방지할 수 있는 진출램프 제어전략을 개발하려고 한다.

기존의 진출램프 제어전략으로는 미터링과 차단기법이 있다. 이러한 방법들은 진출램프 차량의 진출을 제한하는 기법으로 도시고속도로 진출램프 문제의 해결책으로는 적합하지 않다. 따라서 램프차량의 진출을 원활하게 할 수 있는 새로운 개념의 진출램프 제어전략이 필요하다. 본 연구에서는 진출램프의 문제를 신호제어를 통해 해결하고자 한다. 양재 I.C.의 진출램프 신호제어 사례는 진출램프의 문제가 신호제어를 통해 해결될 수 있음을 보여주고 있다.

진출램프 제어전략의 개발에서는 진출램프와 전방 교차로를 과포화 상태의 두 개의 인접교차로 문제로 보고 과포화 신호제어 기법을 응용하였다. 교차도로의 차량의 통과를 위한 기법인 형평 오프셋(Equity offset)과 내부미터링 기법에서의 대기행렬 관리전략 및 링크길이를 고려한 현시의 배정방법인 Imbalanced split 기법을 응용하였다.

II. 진출램프 제어전략

진출램프 제어전략의 목표는 시스템의 생산성 최대화와 진출램프와 간선도로간의 시스템 이용 형평성이다. 여기서, 시스템의 생산성(productivity) 최대화란 주어진 시간에 시스템을 이용한 차량수가 최대가 되는 것을 의미하며, 진출램프와 인접간선도로의 시스템 이용 형평성이란 진출램프에서 진출한 차량과 간선도로의 차량이 시스템 내의 교차로를 이용하는 것에서 형평성을 갖도록 하는 것을 의미한다. 이러한

제어목표를 달성하기 위해서는 다음의 제어목적을 만족하도록 제어전략을 개발한다.

- I. 진출램프 하류부 교차로의 대기차량이 진출부를 가로막지 않도록 하여 진출공간을 확보한다.
- II. 전방교차로와 진출램프 교차로의 용량을 최대한 이용할 수 있도록 한다.
- III. 차량저장공간을 효율적으로 이용한다.
- IV. 간선도로 차량의 대기행렬과 진출램프 차량의 대기행렬을 관리할 수 있도록 한다.
- V. 시스템 이용차량의 지체를 최소화한다.

- 진출공간 확보

진출공간을 확보하여 진출램프 차량의 진출을 원활하게 하면 진출램프 이용차량수가 증가하고, 또한 진출램프 차량이 도시고속도로 본선으로 역류하지 않게 되어 차량의 흐름을 방해하지 않으므로, 도시고속도로 본선의 이용차량수가 증가하게 된다. 따라서, 제어 목표 중 시스템의 생산성 최대화를 이룰 수 있다.

- 용량을 최대한 이용

진출램프의 진출차량과 간선도로 차량이 합류하는 진출부에 신호등을 설치하여 진출램프 합류부의 마찰을 감소시킨다. 또한, 진출램프와 간선도로의 차량이 합류하는 진출램프 교차로와 진출램프 하류부 교차로에 적절한 연동제어를 하여 교차로의 현시를 최대한 이용한다. 이로 인해 교차로 이용차량수가 증가하므로 시스템 생산성의 최대화를 이룰 수 있다.

- 차량 저장공간의 효율적 이용

차량 저장공간을 이용하여 적절한 차량군을 형성시켜 교차로를 통과시키면 교차로의 현시 이용율을 증가시킬 수 있으므로 시스템의 생산성의 최대화를 이룰 수 있다. 또한 차량 저장공간을 고려한 대기행렬 관리전략으로 진출램프와 간선도로간의 더욱 합리적인 시스템 이용 형평성을 이룰 수 있다.

- 대기행렬의 관리

교차로 통과차량수를 감소시키면 대기행렬이 증가하며, 반대로 증가시키면 대기행렬이 감소한다. 즉, 대기행렬의 관리를 통해 시스템 이용 형평성을 이루도록 교차로 이용률을 관리한다.

- 이용차량의 지체를 최소화

시스템 이용차량의 지체 최소화는 진출램프 제어전략을 통해 부수적으로 얻을 수 있는 제어 목표이다. 진출램프 제어전략에 의해 간선도로 차량의 지체는 증가하나 진출램프 차량과 도시고속도로 본선 차량의 지체가 크게 감소하게 되므로 시스템 측면에서는 이용차량의 지체가 감소하는 제어목적을 이룰 수 있다.

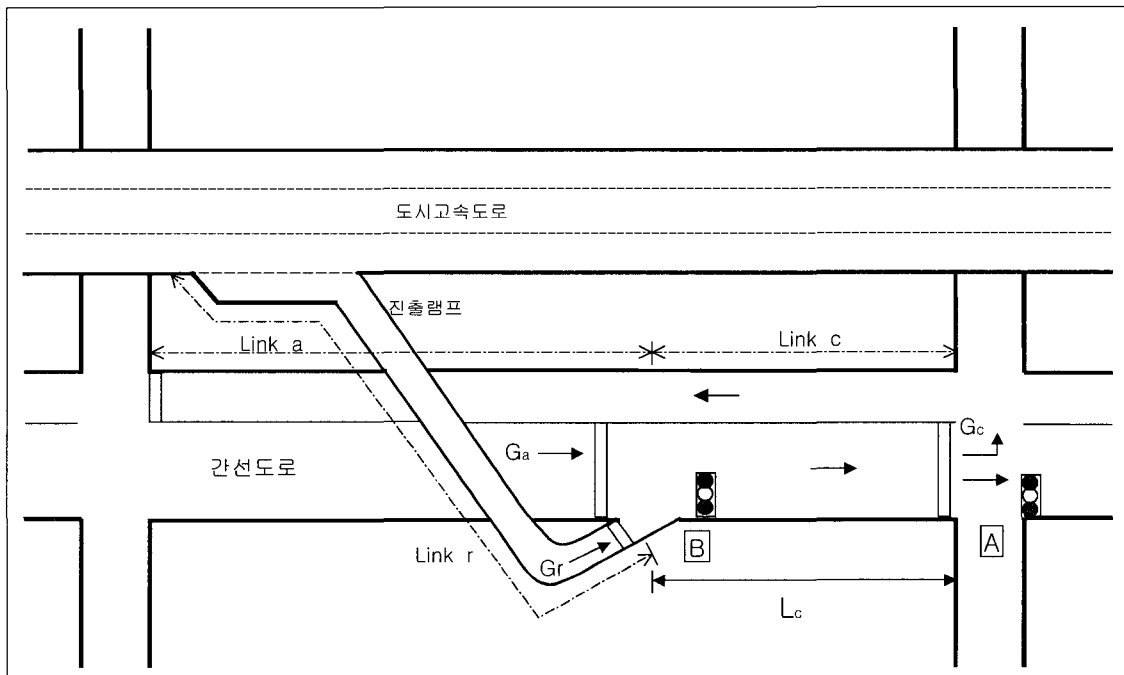
1. 변수 정의

1) 기본 변수 정의

〈그림 1〉은 간선도로에 인접한 도시고속도로 진출램프의 형태를 개략화하여 나타낸 것이다. 진출램프

제어를 위해 진출램프 진출부(그림에서 B교차로)에 신호를 설치하여 새로운 신호교차로를 형성하였다. 〈그림 2〉에서는 〈그림 1〉의 교차로 신호현시를 나타내었다. A교차로 신호의 산정에서 G_c , R_c , C 값이 결정된다. 진출램프의 진출차량과 간선도로의 차량이 A교차로를 빠져나가는 녹색신호시간을 G_c 라고 하고 그 외의 신호현시를 합친 값을 R_c 라고 한다. A교차로의 신호는 기존의 신호를 이용하거나, A교차로의 기하구조와 교통조건에 의해 산정한다.

여기서 주기(C)의 길이는 150초 이상의 큰 값을 갖지 않도록 한다. 주기 길이의 증가는 총 손실시간의 감소로 교차로의 용량을 증가시키지만, 그 증가량은 그다지 크지 않으며, 오히려 주기가 증가함에 따라 대기행렬의 길이가 길어지게 된다. 그로 인해 진



〈그림 1〉 진출램프 개략도

A 교차로					B 교차로				
$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	합계	$\phi 1$	$\phi 2$			합계
				-					-
G_c		R_c		C	G_r	G_a			C

〈그림 2〉 A, B교차로의 현시

출램프 교차로 B를 가로막게 되는 현상을 일으키게 된다. 또한 진출램프 제어전략에서 A, B 두 교차로는 연동제어를 할 것이므로 A교차로의 주기와 B교차로의 주기가 같게 한다.

진출램프 교차로인 B교차로는 2현시의 신호로 한다. 진출램프의 진출차량이 B교차로를 통과하는 시간을 G_r 이라고 하고, 간선도로의 차량이 B교차로를 통과하는 시간을 G_a 라고 한다. G_r 과 G_a 의 값은 대기행렬 관리정책에 따라 진출램프 제어전략에 의해 산정된다.

진출램프 제어전략에서 필요한 변수는 다음과 같으며, 진출램프 제어를 위해 우선적으로 알고 있어야 한다. 변수의 값은 조사와 측정에 의해서 구한다.

- L_c, L_r, L_a : 링크 c, r, a 의 길이(m)
- N_c, N_r, N_a : 링크 c, r, a 의 차로수
- u : 링크 c 의 충격파 속도(m/sec)
- h_c, h_r : 링크 c, r 의 차두시간(sec)
- s_{sc}, s_{sr} : 링크 c, r 의 출발 손실시간(sec)
- s_c, s_r : 링크 c, r 의 총손실시간(sec)
- d_r, d_a : 링크 r, a 의 수요(대/시)

여기에서 충격파는 출발에 의한 충격파(backward recovery shockwave)로서 교차로에서 신호시간에 의해 차량이 정지되어 있다가 다시 움직일 때 발생하는 충격파이다.

2. 오프셋의 결정

진출램프 차량의 진출공간을 확보(제어 목적 I)하기 위해 진출램프 진출부에 신호등을 설치하였으나 신호의 설치만으로는 진출기회를 확보할 수 없다. 여전히 간선도로 차량이 진출램프의 진출공간을 가로막을 것이기 때문이다. 따라서 연동제어를 하여 진출램프의 진출공간을 확보하도록 한다. 이를 위해서 교차도로의 차량을 통과시키기 위한 방법인 형평 오프셋(Equity offset)과 내부미터링 기법의 오프셋 결정 방법을 응용하였다. 형평오프셋으로 진출공간 확보와 더불어 얻을 수 있는 효과는 교차로의 용량을 최대로 이용할 수 있다(제어목적 II)는 것이다. 진출램프 하류부 교차로를 이용하는 접근링크에 차량을 저장시켰

다가 현시를 이용하기 때문에 신호시간을 효율적으로 이용할 수 있다. 또한 진출램프 교차로의 경우는 신호제어로 차량간의 마찰이 감소되어 이용효율이 높아지게 된다.

오프셋은 다음과 같이 결정된다. 진출램프 하류부 교차로의 녹색신호가 켜진 후 출발하는 차량의 충격파가 진출부에 도착하여 진출공간이 생기는 시점에 진출램프의 녹색신호가 시작되도록 한다. 진출램프의 차량이 충분히 빠져나갈 수 있는 녹색시간을 할당하고 나머지 시간을 간선도로에 할당한다. 진출램프 하류부 교차로가 적색이 되어 진출램프 하류부 교차로를 빠져나가지 못한 진출램프 진출차량은 다음 녹색시간이 시작되면 빠져나갈 수 있게 된다. 이를 시공도로 나타내면 <그림 3>과 같다.

<그림 3>의 시공도를 보면 G_c 가 시작된 후 충격파(u)가 B교차로에 도달할 때 G_r 이 시작되도록 하는 오프셋은 식(1)과 같은 관계를 갖는다.

$$s_{sc} + T_A + h_r = \Delta + s_{sr} \tag{1}$$

여기서,

T_A : 충격파가 대기행렬의 끝까지 이르는 데 걸리는 시간(sec)

h_r : 링크 r 의 discharge 차두시간(sec)

Δ : A와 B교차로 신호의 오프셋(sec)

식(1)에서 s_{sc} 와 s_{sr} 을 같다고 하면,

$$T_A + h_r = \Delta \tag{2}$$

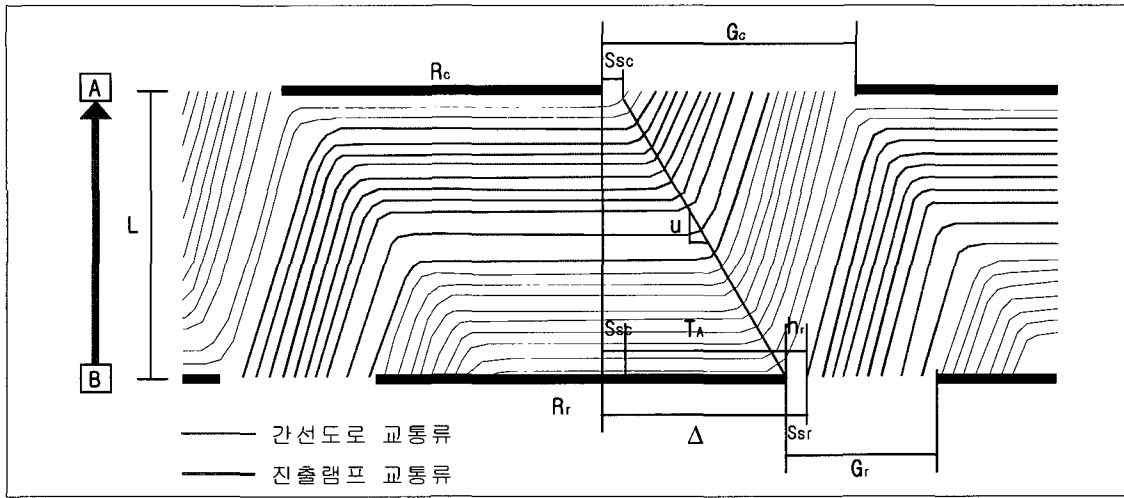
과포화 상태에서 대기행렬이 링크 c 를 채우게 되므로 Q_c 를 L_c 라 할 수 있다. 따라서,

$$T_A = \frac{Q_c}{u} = \frac{L_c}{u} \tag{3}$$

여기서,

Q_c : 링크 c 의 대기행렬 길이(m)

식(3)을 식(2)에 대입하고 정리하면 오프셋은 다음과 같은 값을 갖는다.



〈그림 3〉 진출램프 연동제어 시공도

$$\therefore \Delta = \frac{L_c}{u} + h_r \quad (4)$$

$$r = \frac{\Delta Q}{L}$$

링크의 길이와 충격과 속도는 읍셋의 결정에 중요한 변수이며 충격과 속도에 따라 제어효과가 크게 달라지게 된다. 따라서 정확한 충격과 속도를 구하는 것이 중요하다.

여기서,

L : 링크길이(m)

ΔQ : 대기행렬길이 변화율(대/시)

3. 대기행렬 관리정책에 따른 진출램프 신호시간 결정

이 식을 진출램프 링크인 링크 r과 간선도로 링크인 링크 a에 적용시키면

$$r_r = \frac{\Delta Q_r}{L_r}, \quad r_a = \frac{\Delta Q_a}{L_a} \quad (5)$$

진출램프의 신호설치와 형평 읍셋을 이용한 연동제어를 통하여, 진출램프와 도시고속도로 본선은 지체의 감소와 통과교통량의 증대가 예상된다. 그러나 상대적으로 간선도로의 지체와 대기행렬은 진출램프 제어전보다 증가하게 될 것이 예상된다. 대기행렬의 증가폭이 큰 경우에는 간선도로의 상류부 교차로로의 대기행렬의 역류현상도 발생할 수도 있게 된다. 따라서 진출램프와 간선도로의 차량 저장공간인 링크길이를 고려하여 대기행렬이 관리(목적 III)되도록 하였다. 또한 대기행렬이 도로의 우선순위 또는 교통상황에 따른 대기행렬 관리정책에 따라 조정될 수 있도록 하는 대기행렬 관리계수를 정의하고, 그 값에 따라 진출램프 교차로의 신호시간을 결정하는 식을 개발하였다.

r_r은 진출램프의 링크길이에 대한 대기행렬길이 변화율이고, r_a은 간선도로의 링크길이에 대한 대기행렬길이 변화율이므로 r_r과 r_a값의 비율을 관리하게 되면 진출램프와 간선도로 링크의 대기행렬을 관리할 수 있게 된다. r_r과 r_a값의 비율을 α라고 하고 α를 대기행렬 관리계수라고 정의하였다.

$$\alpha = \frac{r_r}{r_a} \quad (6)$$

식(5)와 (6)의 관계에 의해 α 값에 따라 다음과 같은 대기행렬 관리효과를 가질 것으로 예상된다.

먼저, 링크길이에 대한 대기행렬 길이 변화율을 r이라고 하였다. 링크 길이를 고려하여 대기행렬을 관리함으로써 목적 III을 만족시킬 수 있게 된다.

i) α=0(진출램프 우선제어) :

α=0이 되려면 식(6)에서 r_r=0이어야 하며, r_r=0

이 되려면 식(5)에서 $\Delta Q_r=0$ 이어야 한다. 진출램프 대기행렬 변화율(ΔQ_r)이 0이므로 진출램프의 대기행렬은 증가하지 않고 처음의 대기행렬을 유지하게 된다. 진출램프와 간선도로의 초기 대기행렬의 길이를 0이라고 가정하면, 일정시간이 지난 후의 진출램프의 대기행렬은 증가하지 않은 상태로, 간선도로의 대기행렬은 크게 증가한 상태가 된다.

ii) $0 < \alpha < 1$:

$0 < \alpha < 1$ 이 되려면 식(6)에서 $r_r < r_a$ 이어야 하며, 링크길이에 대한 대기행렬길이 변화율 r 은 링크저장 공간을 채우는 비율이라고 볼 수 있으므로, $r_r < r_a$ 의 경우 대기행렬이 증가하여 진출램프 링크용량에 도달하는 시간이 간선도로 링크용량에 도달하는 시간보다 길게 소요된다.

iii) $\alpha = 1$ (균등제어) :

$\alpha = 1$ 이 되려면 식(6)에서 $r_r = r_a$ 이어야 하며, 이 경우 대기행렬이 증가하여 진출램프 링크용량에 도달하는 시간이 간선도로 링크용량에 도달하는 시간과 같다.

iv) $\alpha > 1$ (간선도로 우선제어) :

$\alpha > 1$ 이 되려면 식(6)에서 $r_r > r_a$ 이어야 하며, 이 경우 대기행렬이 증가하여 진출램프 링크용량에 도달하는 시간이 간선도로 링크용량에 도달하는 시간보다 짧다. 그러나 진출램프 제어 전략은 진출램프의 대기행렬이 도시고속도로로의 역류를 막기 위한 제어이므로 진출램프의 링크용량에 도달하는 시간을 늦춰야 한다. 따라서 대기행렬 관리계수로 $\alpha > 1$ 인 값은 사용하지 않는 것이 좋다.

α 값에 따라 G_r 과 G_a 값을 결정하는 식을 유도하기 위해 ΔQ 값과 G_r 과 G_a 값간의 관계를 구한다. 대기행렬의 길이변화 ΔQ 는 수요 d 에서 주어진 현시에서 통과하는 교통량 f 를 제한 값으로 다음의 관계를 갖는다.

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

여기서,

d : 수요 (대/시)

f : 현시 통과 교통량(대/시)

N : 차로수

따라서, $\Delta Q_r, \Delta Q_a$ 값은 다음과 같다.

$$\Delta Q_r = \frac{d_r - f_r}{N_r}, \quad \Delta Q_a = \frac{d_a - f_a}{N_a} \quad (7)$$

식(7)에서 $f = \frac{G-s}{h}$ 이므로, 대/시로 환산하기 위해 $3600/C$ 와 차로수를 곱하면 f_r, f_c 는 다음과 같다.

$$f_r = \frac{G_r - s_r}{h_r} * (3600/C) * N_r \quad (8)$$

$$f_c = \frac{G_c - s_c}{h_c} * (3600/C) * N_c \quad (9)$$

f_r 의 경우 형평오프셋으로 연동제어를 하므로 G_r 동안 현시를 충분히 활용하여 진출한 차량이 모두 A교 차로를 통과한다고 볼 수 있으므로 식(8)과 같이 나타낼 수 있으나 f_a 의 경우 G_a 동안 진출한 차량이 모두 A교차로를 통과한다고 볼 수 없다. f_c 는 f_r 과 f_a 의 값을 합한 값이므로 A교차로를 빠져나간 차량 f_c 에서 진출램프의 차량에서 빠져나간 차량 f_r 을 빼면 f_a 값이 된다. 진출램프의 수요(d_r)가 현시 이용율 f_r 보다 작은 경우는 f_c 에서 d_r 을 제한한다.

$$f_a = f_c - \text{MIN}(d_r, f_r) \quad f_a = f_c - \text{MIN}(d_r, f_r)$$

과포화 상태라고 가정하였으므로 $d_r > f_r$ 이므로

$$f_a = f_c - f_r \quad (10)$$

식(8,9,10)을 식(7)에 대입하면 $\Delta Q_r, \Delta Q_a$ 값은 다음과 같다.

$$\Delta Q_r = [d_r - \frac{G_r - s_r}{h_r} * (3600/C) * N_r] / N_r \quad (11)$$

$$\Delta Q_a = [d_a - \{ \frac{G_c - s_c}{h_c} * (3600/C) * N_c - \frac{G_r - s_r}{h_r} * (3600/C) * N_r \}] / N_a \quad (12)$$

식(6)에 식(11, 12)를 대입하면 다음과 같다.

$$\alpha = [N_a L_a \{d_r - \frac{G_r - s_r}{h_r} * (3600/C) * N_r\}] / [N_r L_r \{d_a - \{\frac{G_c - s_c}{h_c} * (3600/C) * N_c\} + \{\frac{G_r - s_r}{h_r} * (3600/C) * N_r\}]] \quad (13)$$

식(13)을 G_r 에 대하여 다시 정리하면

$$G_r = \left(\frac{d_r L_a N_a - a d_r L_r N_r + a f_c N_r L_r}{a N_r L_r + L_a N_a} \right) \frac{h_r C}{3600 N_r} + s_r \quad (14)$$

진출램프 교차로는 2현시이므로 $G_r + G_a = C$ 이다. 따라서 G_a 는

$$G_a = C - G_r \quad (15)$$

식(14)(15)에 따라 대기행렬 관리정책에 의해 선택된 α 값에 따라 진출램프 교차로의 진출램프 신호 시간이 결정된다.

III. 적용 및 평가

1. 평가 대상

이 장에서는 개발한 제어전략을 실제의 네트워크에 적용하여 제어효과를 평가하였다. 적용 대상으로는 서울시 내부순환 도시고속도로의 진출램프 중 홍은, 홍제 램프를 선정하고 홍은 진출램프~홍제 진출램프 구간을 함께 시뮬레이션하여 두 개 램프의 진출제어 효과를 평가하였다. 홍은 진출램프의 경우 전형적인 도시고속도로 진출램프와는 차이가 있으므로, 제어식의 계산에서 주의를 기울였다. 교통수요는 1999년 서울시에서 조사한 현황자료를 이용하였고, 평가 시간은 오후 18:00~19:00로 오후 침투 중 한 시간이다. 시뮬레이션 소프트웨어는 ITRAF 2.7과 TSIS 4.2를 사용하였다.

1) 기하구조 및 교통조건

시뮬레이션에 입력할 기하구조 및 교통조건을 요약하여 나타내면 <표 1>과 같다.

<표 1> 기하구조 및 교통조건

홍은 진출램프		홍제 진출램프	
변수	값(단위)	변수	값(단위)
L_c	210(m)	L_c	400(m)
L_r	436(m)	L_r	445(m)
L_a	560(m)	L_a	600(m)
N_c	3	N_c	3
N_r	2	N_r	1
N_a	2	N_a	3

2) 신호조건 및 교통수요

<표 2>에는 교차로 특성과 교통수요 등이 있고, <그림 4>는 홍은, 홍제 진출램프를 개략화하여, 교통수요와 현재 운영되고 있는 신호현시와 신호시간을 함께 나타내었다.

<표 2> 신호조건 및 교통수요

홍은 진출램프		홍제 진출램프	
변수	값(단위)	변수	값(단위)
u	10(m/sec)	u	10(m/sec)
d_r	978(대/시/차로)	d_r	910(대/시/차로)
d_a	1198(대/시/차로)	d_a	968(대/시/차로)
h_c	2(sec)	h_c	2(sec)
h_r	2(sec)	h_r	2(sec)
s_c	3(sec)	s_c	3(sec)
s_r	3(sec)	s_r	3(sec)

2. 적용 방법

1) 시나리오

대기행렬 관리계수 α 에 따른 대기행렬 관리 기능과 제어의 효과를 살펴보기 위해서 다음의 상황에 대해 time period를 5분 간격으로 하여 60분 동안 시뮬레이션 한다.

- ① 진출램프 제어전
- ② $\alpha=0$ 의 진출램프 제어후
- ③ $\alpha=0.5$ 의 진출램프 제어후
- ④ $\alpha=1.0$ 의 진출램프 제어후

2) 절차

- ① 먼저, 시뮬레이션 내의 실제적인 차두시간을 구한다

본 논문의 진출램프 제어전략은 실제적인 f_c, f_r 값의 산정되는 것이 가장 중요하다. f_c, f_r 의 값을 결정하는 중요한 변수는 차두시간이다. 차두시간은 실제 네트워크에서는 조사에 의해 구할 수 있으나 시뮬레이션 상의 값과는 차이가 있다. 시뮬레이션 상황을 실제 상황으로 가정하여 적용 평가하는 것이므로 시뮬레이션 상의 차두시간을 구하여야 한다. <표 3>의 신호시간으로 시뮬레이션하여 시뮬레이션 내의 실제적인 차두시간을 구한다.

<표 1>과 <표 2>, <그림 4>의 값과 <표 3>의 신호를 입력하여 시뮬레이션하여 진출램프와 간선도로 링크의 실제 이용교통량을 구한 후 차두시간을 구한 <표 4>와 같다.

<표 3> 실제적인 차두시간을 구하기 위한 시뮬레이션 신호시간

홍은램프	α	신호시간	
		G_r	G_a
	0	29(3)	85(3)
홍제램프	α	신호시간	
		G_r	G_a
	0	55(3)	59(3)

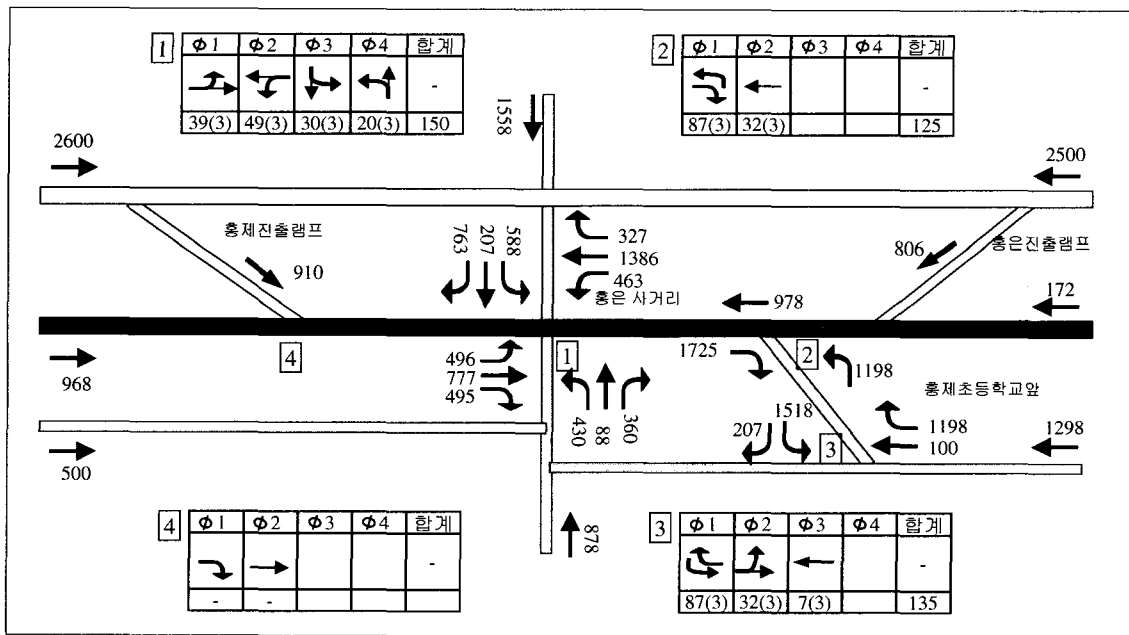
② <표 1>과 <표 2>, <그림 4>의 값을 대입하고 차두시간은 ①에서 구한 시뮬레이션 상의 차두시간 값을 대입하여 각각의 제어 시나리오에 대해 알맞는 신호시간을 진출램프 제어전략에 의해 계산한다.

<표 4> 시뮬레이션내의 실제적인 차두시간

대상램프	링크	이용교통량 (시뮬레이션값)	차두시간
홍은램프	간선도로	985	$h_c = 3.29$
	진출램프	514	$h_r = 3.04$
홍제램프	간선도로	1045	$h_c = 2.39$
	진출램프	630	$h_r = 2.48$

<표 5> 관리계수별 시뮬레이션 신호시간

	α	신호시간	
		G_r	G_a
홍은램프	0	50(3)	64(3)
	0.5	34(3)	80(3)
	1.0	25(3)	89(3)
홍제램프	0	75(3)	39(3)
	0.5	69(3)	45(3)
	1.0	64(3)	50(3)



<그림 4> 시뮬레이션 입력 자료

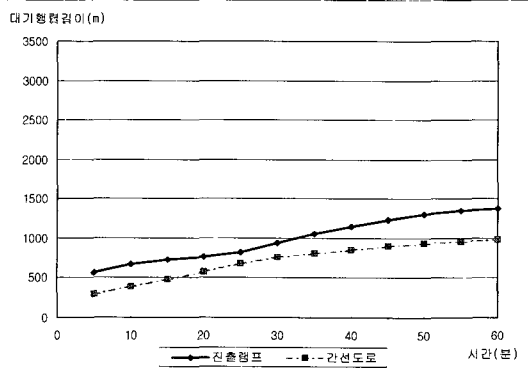
- ③ 각각의 시나리오에 대해 <표 1>과 <표 2>, <그림 4>의 값과 ②에서 구한 각 시나리오에 맞는 신호시간을 입력하여 시뮬레이션 한다.
- ④ 동시에 각각의 시나리오에 대해 진출램프 제어전략에 의한 계산 방식으로 대기행렬의 길이 증가율 및 대기행렬의 길이를 구한다.
- ⑤ 시뮬레이션 결과에서 각 시나리오의 제어효과와 대기행렬의 변화를 분석하고, 각 시나리오에 대해서 ④에 의해 계산된 대기행렬 길이변화와 시뮬레이션 결과값을 비교한다.

3. 평가 결과

1) 대기행렬관리효과

(1) 홍은 진출램프

<그림 5>는 제어전의 진출램프와 간선도로의 대기행렬 길이변화를 나타낸 그림이다. 제어전에는 진출

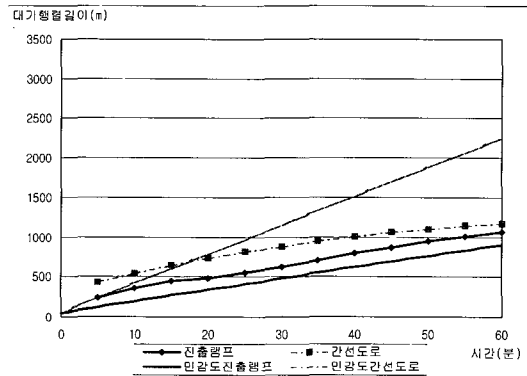


<그림 5> 홍은진출램프 제어전

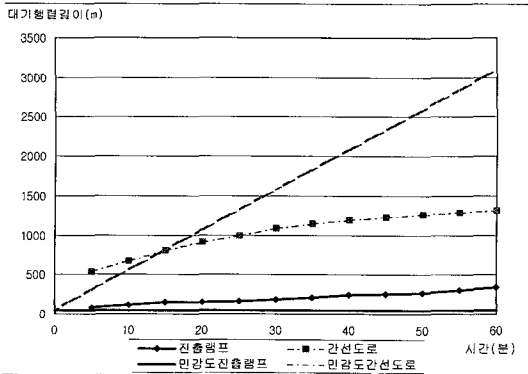
램프의 대기행렬이 크게 증가하여 저장용량인 436m를 초과하여 1000m에 이른 것으로 도시고속도로의 대기행렬 역류현상이 심각함을 보여주고 있다. <그림 6>~<그림 8>은 제어후의 대기행렬 길이변화를 나타낸 것으로 시뮬레이션 결과를 평가하기 위해 계산상의 대기행렬 길이변화와 시뮬레이션 결과를 함께 나타낸 것이다. 계산상의 곡선과 시뮬레이션의 결과는 똑같은 것은 없지만 경향이 비슷하게 나타났다. 또한 대기행렬 관리계수의 의도대로 제어되고 있음을 보여준다. <그림 6>을 보면 대기행렬 관리계수가 0일 때 시뮬레이션 결과 진출램프의 대기행렬이 증가율은 낮아지고 저장용량을 초과하지 않으므로 대기행렬 역류현상을 방지한 것을 볼 수 있다. <그림 8>을 보면 대기행렬 관리계수가 1일 때 시뮬레이션 결과 진출램프와 간선도로의 대기행렬 증가율이 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

(2) 홍제 진출램프

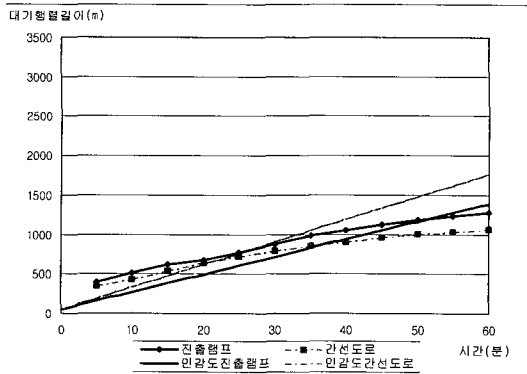
<그림 9>는 홍제 진출램프 제어전의 진출램프와



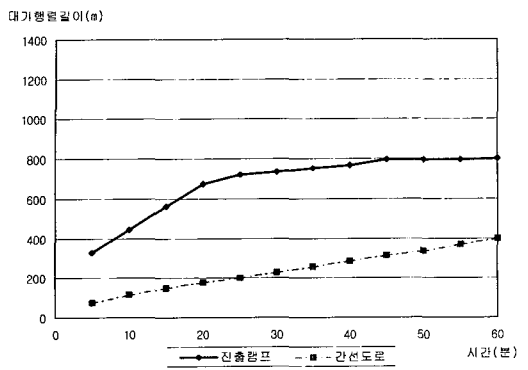
<그림 7> 홍은 진출램프 $\alpha=0.5$



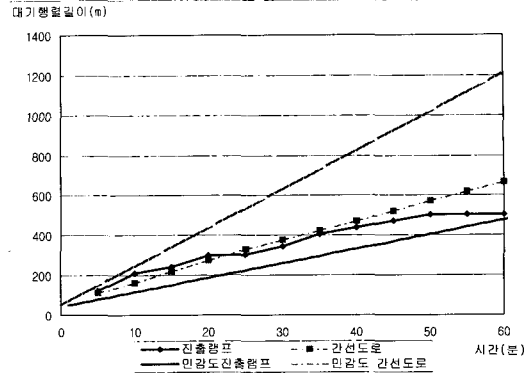
<그림 6> 홍은 진출램프 $\alpha=0$



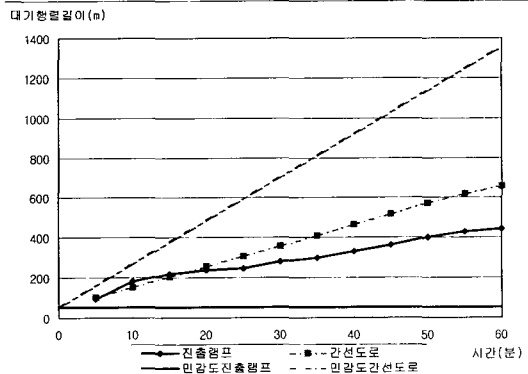
<그림 8> 홍은 진출램프 $\alpha=1.0$



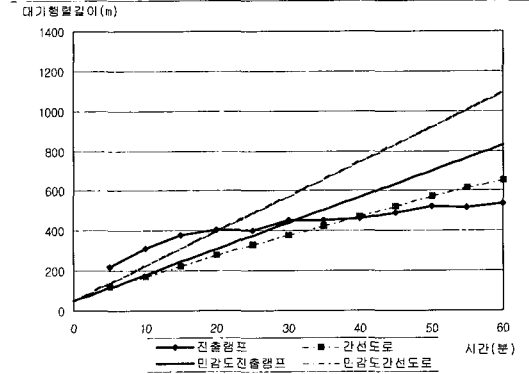
〈그림 9〉 홍제 진출램프 제어전



〈그림 11〉 홍제 진출램프 $\alpha = 0.5$



〈그림 10〉 홍제 진출램프 $\alpha = 0$



〈그림 12〉 홍제 진출램프 $\alpha = 1.0$

간선도로의 대기행렬 길이변화를 나타낸 그림이다. 제어전에는 진출램프의 대기행렬이 크게 증가하여 저장용량인 445m를 초과하여 800m에 이른 것으로 도시고속도로의 대기행렬 역류현상이 심각함을 보여주고 있다. 〈그림 10〉~〈그림 12〉는 제어후의 대기행렬 길이변화를 나타낸 것으로 시뮬레이션 결과를 평가하기 위해 계산상의 대기행렬 길이변화와 시뮬레이션 결과를 함께 나타낸 것이다. 계산상의 곡선과 시뮬레이션의 결과는 똑같지는 않지만 경향이 비슷하게 나타났다. 또한 대기행렬 관리계수의 의도대로 제어되고 있음을 보여준다. 〈그림 10〉을 보면 대기행렬 관리계수가 0일 때 시뮬레이션 결과 진출램프의 대기행렬이 증가율은 낮아지고 저장용량을 초과하지 않으므로 대기행렬 역류현상을 방지한 것을 볼 수 있다. 〈그림 12〉를 보면 대기행렬 관리계수가 1일 때 시뮬레이션 결과 진출램프와 간선도로의 대기행렬 증가율이 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

2) 제어전략시행효과 분석결과

(1)홍은 진출램프 제어효과분석결과

〈표 6〉을 보면 제어전에 비해 진출램프의 속도가 증가하였으며, 간선도로의 속도는 감소하였다. α 값이 0일 때 내부순환로와 진출램프의 속도가 크게 증가되는 것을 볼 수 있다. 또한 α 값이 증가함에 따라 내부순환로와 진출램프의 속도는 감소하고, 간선도로의 속도는 증가하였다. 이용교통량을 보면 제어전에 비해 진출램프의 이용교통량이 증가하였으며, 간선도로의 이용교통량은 감소하였다. α 값이 0일 때의 내부순환로와 진출램프의 이용교통량이 크게 증가되는 것을 볼 수 있다. 또한 α 값이 증가함에 따라 내부순환로와 진출램프의 이용교통량은 감소하고, 간선도로의 이용교통량은 증가하였다. 제어전에 비해 진출램프의 지체시간이 감소하였으며, 간선도로의 지체시간은 감소하였다. α 값이 0일 때 내부순환로와 진출램프의 지체시간은 크게 감소하였다. 또한 α 값이 증가함에 따라

내부순환로와 진출램프의 지체시간은 증가하고, 간선도로의 지체시간은 감소하였다.

(2) 홍제 진출램프

홍제 진출램프 제어의 결과 역시 홍은 진출램프 제어의 결과와 비슷하게 나타났다. <표 7>을 보면 제어전에 비해 진출램프의 속도가 증가하였으며, 간선도로의 속도는 감소하였다. α 값이 0일 때 내부순환로와 진출램프의 속도가 크게 증가되는 것을 볼 수 있다. 또한 α 값이 증가함에 따라 내부순환로와 진출램프의 속도는 감소하였으나, 간선도로의 속도는 큰 변화가 없었다. 이용교통량을 보면 제어전에 비해 진출램프의 이용교통량이 증가하였으며, 간선도로의 이용교통량은 감소하였다. α 값이 0일 때의 내부순환로와 진출램프의 이용교통량이 크게 증가되는 것을 볼 수 있다. 또한 α 값이 증가함에 따라 내부순환로와 진출램프의 이용교통량은 감소하였으나, 간선도로는 증가하였다. 특히 간선도로의 경우 $\alpha=0.5$ 인 경우에 이용교통량이 크게 증가하였다. 지체시간을 보면 제어전에 비해 진출램프의 지체시간이 감소하였으며, 간선도로의 지체시간은 감소하였다. α 값이 0일 때 내부순환로와 진출램프의 지체시간은 크게 감소하였다. 또한 α 값이 증가함에 따라 내부순환로와 진출램프의 지체시간은 증가하고, 간선도로의 지체시간은 감소하였다. 간선도로의 경우 $\alpha=1$ 인 경우 지체가 증가하는 결과가 나왔다.

IV. 결론 및 과제

본 논문에서는 도시고속도로에서 진출부 교통혼잡으로 발생하는 본선 대기차량 역류현상을 다루는 교통관리전략을 제시하였다. 실제 네트워크인 홍은 진출램프와 홍제 진출램프에 진출램프 제어전략을 적용하여 시뮬레이션한 결과 대기행렬 관리계수에 따라 진출램프와 간선도로의 대기행렬이 성공적으로 관리되는 것으로 평가되었다. 진출램프 제어의 효과를 분석한 결과 진출램프 제어전략은 진출램프와 내부순환로의 속도와 이용교통량을 증가시키며, 지체를 크게 감소시켰다. 비록 간선도로의 속도와 이용교통량은 감소하고, 지체는 증가하였으나, 이는 진출램프 제어전에 진출램프에 치중되었던 지체가 간선도로로 균형 배분되어 시스템 이용 형평성을 이룬 것으로 볼 수 있다. 또한 진출램프와 내부순환로의 이용교통량이 크게 증가하여 총 이용교통량이 증가하므로 시스템 생산성 최대화의 목표를 이룬다. 시뮬레이션 결과 진출램프 제어전략은 진출램프 제어전략의 두 가지 목표를 모두 달성시킴을 증명하였다.

제시된 진출램프 교통제어전략은 서울시 내부순환로 교통관리시스템에 반영되어, 현장에 구축중이다. 2001년 여름 시험운영기간동안 본 제어전략을 효과를 직접 관측할 예정이다. 본 제어전략은 진출부 지역의 신호시스템의 기능수준에 따라 일부 보완할 내용도 있을 것으로 예상되며, 이러한 문제는 향후 연구과제로 한다.

<표 6> 홍은 진출램프 제어효과분석결과

구분	속도(km/h)				이용교통량(대/시)				지체시간(초/대)			
	제어전	0	0.5	1	제어전	0	0.5	1	제어전	0	0.5	1
간선도로	8.6	4.0	5.4	6.5	753	253	470	600	907.4	1835.1	1267.8	1025.2
고속도로본선	36.0	64.6	36.0	28.1	1516	2452	2169	1745	102.7	14.1	102	145.4
진출램프	2.9	16.6	6.5	4.3	200	664	407	305	1386	195.3	570.1	828.9
합계	-	-	-	-	2469	3369	3046	2650	2396.1	2044.5	1939.9	1999.5

<표 7> 홍제 진출램프 제어효과분석결과

구분	속도(km/h)				이용교통량(대/시)				지체시간(초/대)			
	제어전	0	0.5	1	제어전	0	0.5	1	제어전	0	0.5	1
간선도로	7.9	5.0	5.0	5.0	607	326	470	364	794.7	1309.7	1267.8	1335.8
고속도로본선	23.4	41.0	34.6	28.1	1636	2331	2169	1745	212.1	14.1	102	145.4
진출램프	6.8	11.2	10.8	10.4	476	725	707	705	456.7	258.3	272.8	281.9
합계	-	-	-	-	2719	3382	3346	2814	1463.5	1582.1	1642.6	1763.1

참고문헌

1. 이광훈(1993), "과포화 교통상태에서의 Split Coordination 신호제어전략", 대한교통학회지, 제11권 제1호, 대한교통학회, pp.87~103.
 2. 최병국(1997), "Signal Optimization for Oversaturated Arterial", 대한교통학회지, 제15권 제2호, 대한교통학회, pp.67~81.
 3. 최병국(1997), "Adaptive Signal Control for Over saturated Arterials", 대한교통학회지, 제15권 제3호, 대한교통학회, pp.111~130.
 4. G. F. Newell.(1999), "Delays caused by a queue at a freeway exit ramp", Transportation Resear ch partB, pp.337~350.
 5. Ghassan Abu-iebdeh and Rahim. F. Benekohal (1997), "Development of Traffic Control and Queue Management Procedures for Over-saturated Arterials", Transportation Research Record 1603, pp.118~127.
 6. University of Florida(1993), "TRAF User Reference Guide".
 7. U.S. Department of transportation(1996), "Traffic Control Systems Handbook", chapter4 p.37.
 8. William R. McShane, Roger P. Roess, and Elena S. Prassas(1998), "Traffic Engineering, second edition", pp.617~623.
- ☞ 주 작 성 자 : 김영찬
 ☞ 논문투고일 : 2001. 3. 27
 논문심사일 : 2001. 4. 23 (1차)
 2001. 5. 17 (2차)
 심사판정일 : 2001. 5. 17