

■ 論 文 ■

차로공동이용화를 위한 신호최적화모형 개발 연구

Signal Optimization Model Reflecting Alternative Use of Lanes
for Left/Through Traffic at A Signalized Intersection

신 언 교

((주)용마엔지니어링 상무이사)

홍 성 표

((주)송현R&D 부설
교통기술연구원 원장)

김 동 병

(단국대학교 토목공학과 교수)

목 차

- I. 서론
 - II. 차로공동이용기법
 - III. 차로공동이용을 위한 신호최적화모형
 - 1. 주교차로 신호최적화
 - 2. 주·부교차로 간격 산정
 - 3. 부교차로 신호최적화
 - 4. 목적함수
 - IV. 모형적용 및 평가
 - 1. 모형적용
 - 2. 모형평가
 - V. 결론 및 제언
- 참고문헌

Key Words : 혼합정수선형계획법, 차로공동이용기법, 신호최적화모형, 주교차로, 부교차로, 선두옴셋, 후미옴셋

요 약

본 연구에서는 신호등이 설치되어 있는 교차로에서 교통용량을 최대한 활용하고, 방향별 교통량에 부응하는 교통용량을 배분하기 위하여 교차로 후방에 정지선을 설치한 차로공동이용방안 및 이에 따른 혼합정수선형계획법의 신호최적화기법을 제시하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 부도로에서 주교차로와 후방 정지선 사이의 대기 차량 저장공간으로 진입되는 직진과 좌회전 차량은 주교차로 해당 이동류 현시에 완전히 소거되어 모형의 안정성을 입증해주었다. 그리고 본 모형 적용으로 평균지체시간 46~64%, 연료소모량 18~32% 정도를 줄여주는 것으로 나타났다. 특히 교통량이 증가할수록 본 모형의 적용효과는 커지는 것으로 나타났다. 그리고 주교차로 후방에 수반되는 정지선의 영향으로 연료소모량 감소효과 보다 지체시간 단축효과가 큰 것으로 나타났다. 본 모형은 좌회전포켓 설치가 곤란한 교차로나 좌회전 교통량이 많은 교차로를 포함하여 혼잡이 심한 교차로(critical intersection)등에 적용할 경우 큰 효과가 기대되며, 세가로 등이 교차로로부터 멀리 떨어지고 교차로 간격이 큰 도로 등에 적용이 추천된다.

1. 서론

도시교통은 물론 지역간 도로의 경우에도 교통량의 증가로 교차로에서 극심한 정체가 발생되고 있다. 이러한 교통문제 해결을 위하여 도로건설 등 시설투자, 각종 교통체계개선사업(TSM)에 의한 용량증대사업 등이 이루어지고 있으나 교통수요의 급증으로 교차로에서의 혼잡은 날로 심각해지고 있는 실정이다. 교차로의 효율성은 다양한 회전 교통량을 처리하기 위하여 제한된 교통용량을 어떻게 활용하느냐에 달려 있다. 적절한 교통용량 배분은 현시순서패턴과 현시별 신호시간에 달려있다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 신호등이 설치되어 있는 교차로에서 교통용량을 최대한 활용하고, 방향별 교통량에 부응하는 교통용량을 배분하기 위하여 교차로(이후 주교차로로 정의)후방에 정지선(이후 부교차로로 정의)을 수반하는 차로공동이용방안 및 이에 따른 신호최적화기법을 제시하였다.

제시된 기법은 혼합정수선형계획법(Mixed integer linear programming)을 이용하여 최적화모형으로 구축하고, 모형의 특성 및 적용효과를 산정하기 위하여 교통량에 따라 시나리오를 작성하여 평가하였다. 마지막으로 모형의 적용 및 운영에 따른 한계 및 향후연구과제를 제시하였다.

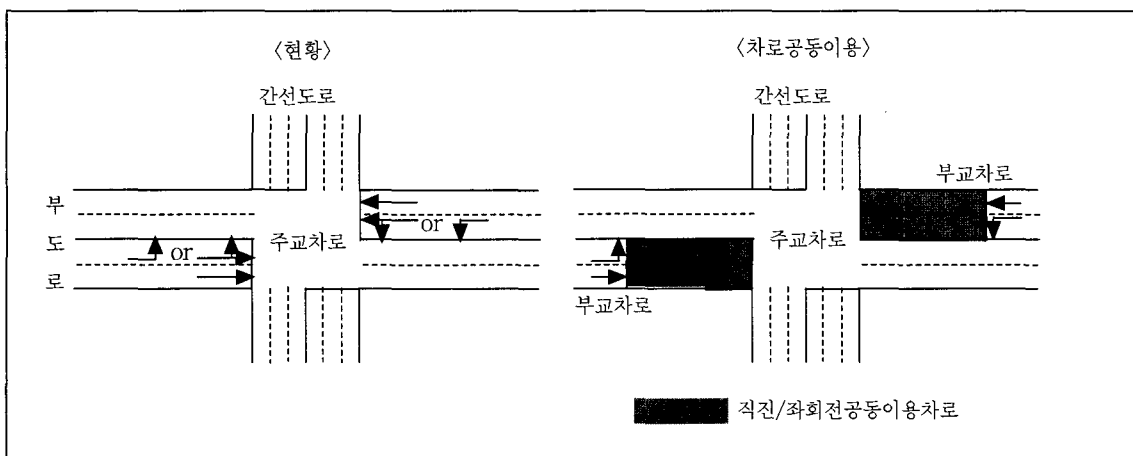
II. 차로공동이용기법

교차로는 각 접근로별로 좌회전, 직진 및 우회전

차량 등 방향별로 차로가 할당되고 상충교통류의 분리 진행에 따른 회전방향별로 주어진 신호시간동안 주어진 차로를 이용하여 교차로를 통과하게되므로 전체 차로에 대한 차로이용률은 가로구간에 비하여 매우 낮다. 이로 인하여 도로용량의 활용도도 크게 떨어지고 있다. 직진과 좌회전 분리신호의 경우에는 주어진 차로수에 회전방향별로 전용차로가 배타적으로 제공되어야 하고, 공유차로의 경우에는 회전교통류간 차로차단현상이 발생되지 않도록 하기 위해서 동시신호가 요구되므로 신호시간의 할당이 부적절하게 되는 경우가 발생되게 된다.

이러한 문제점을 극복하고자 주교차로에서 적정거리 후방에 정지선(부교차로)을 설치하여 좌회전과 직진을 교대로 진입시켜 주교차로에서 각각의 회전교통량을 위하여 최대한의 차로를 할당하는 방안이 차로공동이용방안이다. 김동녕(1988)은 차로공동이용방안을 제시하고 편도 4차로인 주도로와 편도 2차로인 부도로의 교차로에 적용한 용량증대효과를 제시하였다. 본 연구에서는 전자의 차로공동이용에 따른 신호최적화기법을 제시하였다. 개발된 모형은 혼합정수선형계획법 모형으로 구성된다.

차로공동이용이란 <그림 1>에서와 같이 어느 수개의 차로를 직진과 좌회전이 번갈아 가면서 서로 다른 주어진 시간대에 교대로 이용하는 것을 의미한다. <그림 1>에서 차로공동이용시 직진과 좌회전이 번갈아 가면서 2개의 공동차로를 이용하게 되므로 도로용량은 4개차로가 있는 것과 같게 된다. 따라서 직진과 좌회전차량이 동시에 이용할수 있는 공유차로(shared lane)



<그림 1> 차로공동이용 개념도

와는 다르다.

이러한 차로공동이용방안은 <그림 1>과 같은 편도 2차로인 경우뿐만아니라 좌회전 포켓 설치가 곤란한 경우에도 효율적으로 적용할 수 있다. 그리고 좌회전 포켓이 설치된 경우라도 혼잡이 발생하는 신호교차로에서 수개차로를 공동이용차로화하여 주어진 주기동안에 용량을 증대할 수 있다. 예를 들어 좌회전 포켓 1차로와 직진 3개차로를 갖는 접근로의 경우 1개 이상 차로를 공동이용할 경우 좌회전 2~4개차로, 직진 3~4개차로(총 5~8개차로) 까지의 용량증대 효과를 얻을 수 있다. 공동이용차로수를 포함한 이동류별 차로수는 교차로 유출부의 차로수보다 많아서는 안된다. 따라서 다차로도로에서 교차로 접근로 전체차로수가 공동이용차로가 될 수도 있고 일부 차로만이 공동이용차로가 될 수도 있다.

III. 차로공동이용을 위한 신호최적화모형

차로공동이용을 위한 신호최적화모형은 주교차로와 부교차로간의 연동신호모형으로 두 개 교차로간 옵션을 포함하여 최적신호시간을 산정하게 된다.

1. 주교차로 신호최적화

차로 공동이용을 고려하여 주교차로(main intersection) 신호를 최적화한다. 차로 공동이용은 이동류별 교차로 차로수 조화(유입차로수 ≤ 유출차로수)를 만족시켜야 한다. 부도로 접근로는 직진/좌회전 분리 신호만 허용되며 회전이동류 교통량 비율에 따라 주도로 현시순서를 <표 1>에서 선정한다.

<표 1>에서, $g_{i,1}$ 은 주교차로 i 이동류의 녹색신호 시간, $g_{i,2}$ 는 부교차로 j 이동류의 녹색신호시간이다.

$g_{2,1}$ 은 $g_{1,2}$ 와, $g_{4,1}$ 은 $g_{2,2}$ 와 같은 이동류를 위한 녹색신호시간이다. 각 현시의 녹색시간은 최소녹색시간 ($\min(g_{i,j})$)을 만족시켜야 한다.

$$g_{i,j} \geq \min(g_{i,j}) \quad (1)$$

여기서, $g_{i,j}$ 는 j 교차로($j=1$ 주교차로, $j=2$ 부교차로) i 이동류의 녹색시간, $\min(g_{i,j})$ 는 j 교차로 i 이동류의 최소녹색시간을 나타낸다.

2. 주·부교차로 간격 산정

주·부교차로 간격(d)은 교통량은 물론 두 개 교차로의 신호조건과 옵션에 따라서 변하게 된다. 이들 관계를 시간·공간도상에 도식화하면 <그림 2>와 같다. <그림 2>는 교차로간 차량출발 및 도착분포 등 차량진행과정을 평균속도를 적용하여 작성된 것이다.

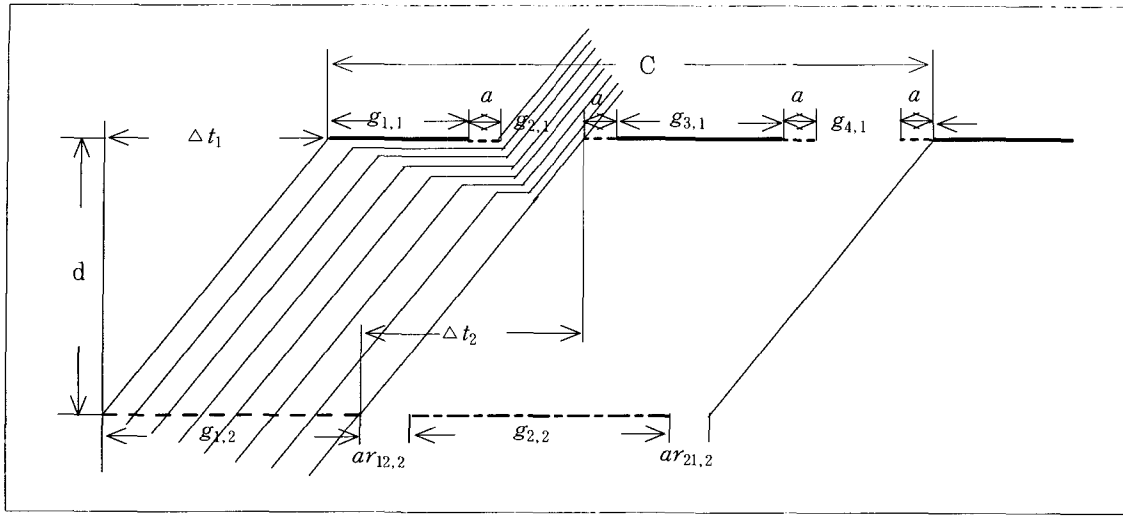
<그림 2>에서, C 는 신호주기, a 는 주교차로 황색 시간, $ar_{12,2}$ ($ar_{21,2}$)는 부교차로 전방향적색시간, Δt_1 은 부교차로 정지선을 통과한 선두차량이 주교차로 정지선에 도착하는시간으로 교차로간 선두옵션(starting offset)으로 정의하고, 부교차로에서 이동류 현시시작 시간과 주교차로에서 해당 이동류 바로 앞 현시시작 시간 간격을 의미한다, Δt_2 는 후미차량이 도착하는데 소요되는 시간으로 후미옵션(finishing offset)으로 정의된다.

일반적으로 부 교차로에서 출발하는 선두차량은 <그림 3>과 같이 정지상태에서 출발하여 주 교차로에서 정지하게 되어 가속 및 감속을 하게된다.

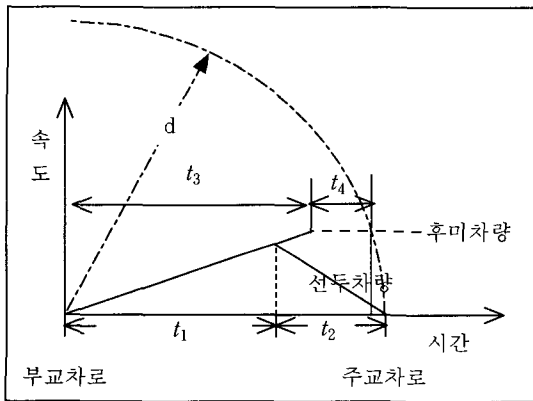
여기서, t_1 (t_3)은 수락가속도(a_1) ($1.5\sim 2.5 m/sec^2$)으로 선두차량(후미차량) 가속시간, t_2 는 수락감속도(a_2)

<표 1> 주·부교차로 신호현시순서

현시순서	접근로	주교차로 현시시간		부교차로 현시시간		옵션 조건	교통량 조건	
		Case 1	Case 2	Case 1	Case 2		Case 1	Case 2
1	주도로	$g_{1,1}$		$g_{1,2}$	$g_{2,2}$		$g_{1,1} \geq g_{3,1}$ $g_{1,2} \geq g_{2,2}$	$g_{1,1} \geq g_{3,1}$ $g_{2,2} \geq g_{1,2}$
2	부도로	$g_{2,1}$	$g_{4,1}$	$g_{1,2}$	$g_{2,2}$	$\geq \Delta t_2$		
3	주도로	$g_{3,1}$		$g_{2,2}$	$g_{1,2}$			
4	부도로	$g_{4,1}$	$g_{2,1}$	$g_{2,2}$	$g_{1,2}$	$\geq \Delta t_2$		
				$g_{1,2}$	$g_{2,2}$			



〈그림 2〉 차량진행 시간·공간도



〈그림 3〉 선두차량과 후미차량의 시간/속도/공간도

(2-3 m/sec²)으로 감속시간, t₄는 정속(v) 주행시간, (t₁+t₂)는 교차로간 선두움셋(Δt₁), (t₃+t₄)는 후미움셋(Δt₂)을 의미한다. 가·감속도는 차종별로 차이가 나므로 성능이 떨어지는 차가 있을 경우 이의 영향을 받게되므로 이를 고려하여 적용되어야 한다.

〈그림 3〉과 같은 차량의 가·감속시간을 고려할 경우 선두차량의 시간-공간도상에서의 차량진행 궤적은 〈그림 2〉와 같이 직선이 아니라 다음 식을 따르는 곡선을 따르게 된다.

$$a_1 \times t_1 - a_2 \times t_2 = 0$$

$$\frac{1}{2} a_1 \times t_1^2 + \frac{(a_1 t_1)^2}{2a_2} = d^*$$

$$\Delta t_1 = t_1 + t_2, \text{ or } \Delta t_1 \geq t_1 + t_2$$

부 교차로에서 마지막으로 출발하는 후미차량은 부 교차로의 교통류 상태에 따라 다르다. 과포화상태인 경우에는 〈그림 3〉과 같이 정지상태에서 출발하게 되어 주 교차로 정지선에 도착하는 시간은 다음과 같다.

$$t_3 = \frac{v}{a_1} \tag{2}$$

$$t_4 = \frac{d - \frac{1}{2} a_1 t_1^2}{v} \tag{3}$$

$$\Delta t_2 = t_3 + t_4, \text{ or } \Delta t_2 \geq t_3 + t_4 \tag{4-1}$$

비포화상태일 경우에는 부교차로에서 정지상태가 아니고 특정속도로 진입되게 되므로 과포화상태에서의 도착시간보다 작게된다.

본 모형에서는 후미차량은 주 교차로에서 정지하지 않고 안전하게 통과해야만 하므로 도착시간이 가장 긴 과포화상태의 도착시간을 후미움셋 값으로 적용한다. 후미움셋 값은 선두움셋보다 작게된다.

$$\Delta t_1 \geq \Delta t_2 \tag{5}$$

〈그림 2〉 처럼 주교차로에 진입한 차량은 주 교차

로 해당 현시 동안에 완전히 교차로를 통과해야 한다. 따라서 최대교차로간격(d_{max})는 다음 제약조건을 만족시켜야 한다.

$$d_{max} \leq \min \left\{ \frac{g_{2,1} \times S}{sh_{2,1}}, \frac{g_{4,1} \times S}{sh_{4,1}} \right\} \quad (6)$$

여기서, $sh_{2,1}(sh_{4,1})$ 는 주 교차로에서의 부도로 이동류들의 포화교통류율 차두간격을 의미한다.

그리고, 교차로간격은 부 교차로에서 현시별로 진입되는 교통량을 수용할 수 있어야 한다. 부 교차로에 도착되는 교통량이 랜덤하게 도착되는 것으로 간주하면,

$$\begin{aligned} \text{Min} \left\{ \frac{V_{1,2}}{3,600} \times C \times n_{1,2} \times S, sf_{1,2} \times g_{1,2} \times n_{1,2} \times S \right\} \\ \leq d_{max} \times n_{2,1} \end{aligned} \quad (7-1)$$

$$\begin{aligned} \text{Min} \left\{ \frac{V_{2,2}}{3,600} \times C \times n_{2,2} \times S, sf_{2,2} \times g_{2,2} \times n_{2,2} \times S \right\} \\ \leq d_{max} \times n_{4,1} \end{aligned} \quad (7-2)$$

여기서, S는 차두거리간격, $V_{1,2}$ 는 부도로 좌회전 교통량, $V_{2,2}$ 는 부도로 직진과 우회전 교통량, $n_{1,2}$, $n_{2,2}$ 는 부교차로 이동류 차로수, $n_{2,1}$, $n_{4,1}$ 은 주 교차로 부도로 이동류 차로수, sf 는 포화교통류율 ($sf_{1,2} = sf_{0,1,2} n_{1,2} f_{w1,2} f_{HV1,2} f_{g1,2} f_{p1,2} f_{bb1,2} f_{a1,2} f_{RT1,2} f_{LT1,2}$)로 sf_0 은 이상적 조건하에서의 포화교통류율, f 는 각각 차로폭, 중차량, 중단구배, 주차, 버스정류장, 토지이용, 우회전, 좌회전 보정계수를 나타낸다.

기존 주교차로에서 l 만큼 떨어진 지점에 세가로가 있을 경우에는 앞에서 산정되는 d_{max} 값의 적정성을 검토해야 한다. $d_{max} \leq l$ 조건을 만족하면 d_{max} 을 그대로 사용하면 되지만 앞의 조건이 만족되지 않으면 d_{max} 는 l 로 대체되어야 한다.

$$d^* \leq \min \{ d_{max}, l \} \quad (8)$$

상기의 조건을 만족시키는 교차로간격은 평균속도(v)를 사용할 경우 결정변수로 도입될 수도 있다. 이 경우 식(4-1)는 다음식으로 대체된다.

$$\Delta t_2 = \frac{d}{v} \quad (4-2)$$

3. 부교차로 신호최적화

주/부교차로가 연동으로 통합 운영되기 위해서는 신호주기가 같아야 한다.

$$g_{1,1} + g_{2,1} + g_{3,1} + g_{4,1} + 4a = C \quad (9-1)$$

$$g_{1,2} + g_{2,2} + ar_{12,2} + ar_{21,2} = C \quad (9-2)$$

공통신호주기(common cycle length)는 주 교차로 신호최적화에서 산정된 신호주기를 기준으로 한다. 그러나 주 교차로가 독립교차로로 운영되는 경우에는 신호주기를 변수로 하여 최적화도 가능하다. 부 교차로에서 현시별로 진입되는 교통량은 부 교차로 교통량의 포화여부에 따라 달라진다. 즉 과포화상태(도착교통량 \geq 진입교통량)일때는 포화교통류율로 진입하게 되고 비포화상태인 경우는 한 주기동안에 도착된 차량이 진입하게 된다. 즉, 다음 식과 같이 두 값중에서 작은 값을 갖게된다.

$$\text{Min} \left\{ \frac{V_{1,2}}{3,600} \times C \times n_{1,2}, sf_{1,2} \times g_{1,2} \times n_{1,2} \right\}$$

$$\text{Min} \left\{ \frac{V_{2,2}}{3,600} \times C \times n_{2,2}, sf_{2,2} \times g_{2,2} \times n_{2,2} \right\}$$

부교차로에서 현시별로 진입되는 교통량은 주 교차로에서 해당현시에 완전히 소거되어야 한다.

$$\begin{aligned} \text{Min} \left\{ \frac{V_{1,2}}{3,600} \times C \times n_{1,2}, sf_{1,2} \times g_{1,2} \times n_{1,2} \right\} \\ \leq \frac{n_{2,1} \times sf_{2,1}}{3,600} \times g_{2,1} \end{aligned} \quad (10-1)$$

$$\begin{aligned} \text{Min} \left\{ \frac{V_{2,2}}{3,600} \times C \times n_{2,2}, sf_{2,2} \times g_{2,2} \times n_{2,2} \right\} \\ \leq \frac{n_{4,1} \times sf_{4,1}}{3,600} \times g_{4,1} \end{aligned} \quad (10-2)$$

윗 제약조건식에서 좌측함수는 비선형이므로 선형 계획법으로 풀기 위해서 다음과 같이 변환되어야 한다.

$$\text{Inflow}_{1,2} \leq \frac{V_{1,2}}{3,600} \times C \times n_{1,2} \quad (11)$$

$$Inflow_{1,2} \leq sf_{1,2} \times g_{1,2} \times n_{1,2} \quad (12)$$

$$\frac{V_{1,2}}{3,600} \times C \times n_{1,2} - Inflow_{1,2} \leq MZ_i \quad (13)$$

$$sf_{1,2} \times g_{1,2} \times n_{1,2} - Inflow_{1,2} \leq M(1 - Z_i) \quad (14)$$

여기서, M은 아주 큰 정수, Z_i 는 이진변수이다. 따라서, 식(10-1)은 식(15)로 대체된다.

$$Inflow_{1,2} \leq \frac{n_{2,1} \times sf_{2,1}}{3,600} \times g_{2,1} \quad (15)$$

식(10-2)도 마찬가지로 변환될 수 있다.

위 제약조건과 함께 부교차로 진입차량이 주어진 신호 시간에 주 교차로를 완전히 통과하기 위해서는 <그림 2>로부터 다음과 같은 조건식이 만족되어야 한다.

$$g_{1,1} + a + g_{2,1} + \Delta t_1 \geq g_{1,2} + \Delta t_2 \quad (16-1)$$

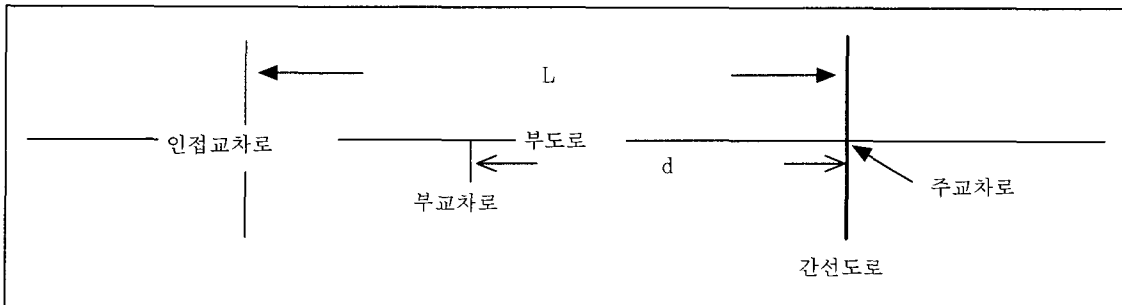
$$g_{3,1} + a + g_{4,1} + \Delta t_1 \geq g_{2,2} + \Delta t_2 \quad (16-2)$$

$$\begin{aligned} g_{1,1} + a + g_{2,1} + a + g_{3,1} + a + g_{4,1} + \Delta t_1 \\ \geq g_{1,2} + ar_{12,2} + g_{2,2} + \Delta t_2 \end{aligned} \quad (17)$$

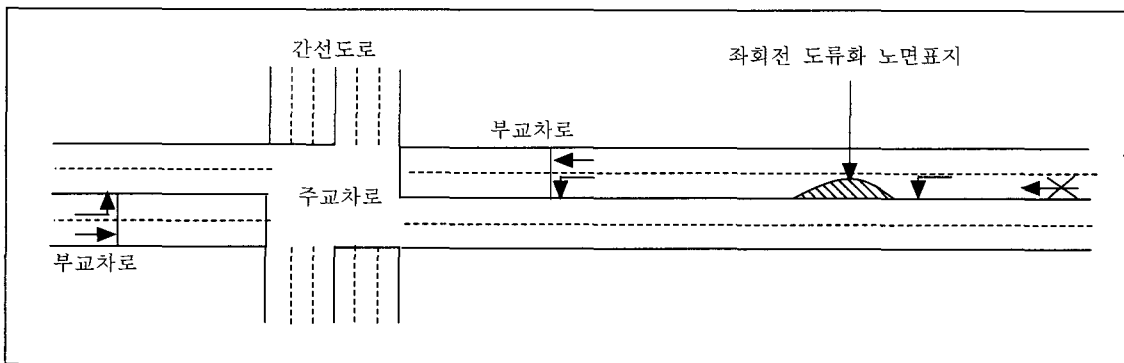
부도로 진입교통량이 적은 경우, 같은 부 교차로 신호조건에서도 주 교차로에서의 부도로 녹색시간을 식(10)을 만족시키는 범위내에서 줄이고 간선도로 신호시간을 키워줌으로서 부도로의 교통흐름을 저해하지 않고 주도로의 소통을 증대시킬 수 있다. 앞에서 제시된 제약조건들을 만족하는 신호최적화 결과는 인접교차로에 부교차로의 대기차량에 의한 spillback 현상을 초래할 수 있으므로 이를 제어할 수 있는 제약조건이 필요하다. 비포화상태에서는 적색시간에 도착된 차량이 최대 대기차량이 되고 녹색시간동안에 모든 대기차량은 소거되게 된다. 따라서, <그림 4>와 같은 도로망체계에서 부교차로에서 발생하는 대기차량이 인접교차로에 영향을 미치지 않도록 다음 제약조건이 필요하다.

$$L - d^* \geq \frac{V_{2,2} \times S}{3,600 \times n_{2,2}} \times (g_{1,2} + ar_{12,2}) \times \alpha \quad (18-1)$$

$$L - d^* \geq \frac{V_{1,2} \times S}{3,600 \times n_{1,2}} \times (g_{2,2} + ar_{21,2}) \times \alpha \quad (18-2)$$




<그림 4> 대상 교통망도



<그림 5> 부교차로 좌회전 도류화시설

여기서, α 는 여유계수로 1보다 큰 값을 갖는다.

부교차로의 최적화된 신호운영과 더불어, 직진차량이 좌회전차로를 이용하는 경우에 대비하여 부교차로 접근로에서 좌회전차로를 직진차로부터 구분하고 운전자들에게 좌회전차로 인지를 제고하기 위하여 <그림 5>와 같이 좌회전차로 상류부에 좌회전도류화 노면표시() 한다. 도류화 노면표시는 좌회전 교통량 등을 고려하여 적절한 지점을 선정한다. 그리고 도류화 상류부에 좌회전 진행, 직진금지 노면표시를 설치한다.

4. 목적함수

본 모형은 차로공동이용에 따른 주 교차로의 신호 최적화 결과를 이용하여 주도로의 신호시간을 저해하지 않으면서 부도로의 유출량을 최대화하기 위하여 부 교차로를 설치하여 신호를 최적화하게 된다. 따라서, 주 교차로의 신호최적화 결과를 이용하여 부교차로의 현시별 녹색시간을 최대화하는 것이다. 따라서 주 교차로의 신호최적화 상태에서 부도로의 통과량이 최대가 되는 목적함수는 다음과 같다.

$$Max (g_{1,2} + g_{2,2}) \tag{19}$$

앞의 최적화 결과 주 교차로에서 부교차로 신호시간이 여유가 있을 때에는 다음과 같은 조건식 추가에 의한 간선도로 위주의 신호최적화를 실시할 수 있다.

$$g_{1,1} \geq g_{opt,1} \tag{20-1}$$

$$g_{3,1} \geq g_{opt,3} \tag{20-2}$$

이 경우 목적함수는 다음과 같다.

$$Max (g_{1,2} + g_{2,2} - g_{2,1} - g_{4,1}) \tag{21}$$

마지막으로 독립교차로로 운영되는 교차로는 부도로의 교통량에 따른 다음과 같은 목적함수 도입이 가능하다.

$$Max C \tag{22}$$

본 연구에서 제시된 모형은 다음식들로 요약된다.

목적함수 : (19), (필요시 : (21), (22))

제약조건 : (1), (5)~(18)

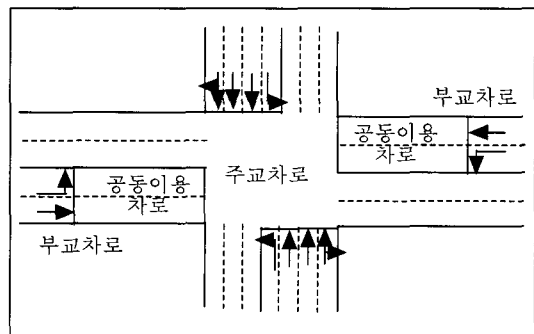
(필요시 : (4-2), (20))

IV. 모형적용 및 평가

1. 모형 적용

모형의 적용을 위해서 범용 선형계획법프로그램을 이용하였다. 모형 적용 교차로는 <그림 5>와 같이 좌회전포켓 1차로를 포함한 편도 4차로인 주도로와 편도 2차로인 부도로와 교차한다. 포화교통류율은 "1800대/시", 정속주행속도는 "40km/h", 수락가속도는 "2m/sec²"를 적용하였다.

그리고 모형적용결과를 다양하게 평가하기 위하여 교통량을 3가지로 구분하여 시나리오를 작성하였다. 교통량은 서비스수준 D 수준 교통량(교통량 1)을 기준으로 부도로 좌회전 교통량을 2배로 증가시킨 교통량(교통량 2), 모든 교통량을 20% 증가시킨 용량수준 교통량(교통량3)으로 나뉜다. 기준교통량은 <표 2>와 같다.



<그림 6> 모형적용 교차로

<표 2> 기준 교통량(교통량 1)

방향	교통량(단위:대)			
	좌회전	직진	우회전	계
E-bound	124	425	100	649
W-bound	126	424	80	630
S-bound	212	862	126	1,200
N-bound	253	1,046	138	1,437

〈표 3〉 주도로 신호최적화 결과 비교

구 분		녹색시간 비율(%)		신호주기 (초)
		주도로	부도로	
교통량 1	현황(분리신호)	51 (1.00)	49	85
	현황(동시신호)	51 (1.00)	49	80
	공동차로 이용	60 (1.18)	40	65
교통량 2	현황(분리신호)	47 (1.00)	53	85
	현황(동시신호)	47 (1.00)	53	90
	공동차로 이용	60 (1.28)	40	65
교통량 3	현황(분리신호)	50 (0.98)	50	110
	현황(동시신호)	51 (1.00)	49	110
	공동차로 이용	63 (1.24)	37	80

모형 미적용시 신호현시는 직진/좌회전 분리신호와 직진/좌회전동시신호를 모두 고려하고, 모형적용시는 좌회전과 직진이 번갈아가면서 2개 차로를 공동사용하는 것으로 간주하여 TRANSYT-7F를 이용하여 신호를 최적화하였다.

주 교차로 신호최적화 결과는 〈표 3〉과 같다. 〈표 3〉에서 ()는 현황 주도로 최대녹색시간비에 대한 비율이다. 〈표 3〉에 의하면 차로 공동이용으로 신호주기를 줄일 수 있고, 주도로 신호시간을 교통량 증가순으로 각각 18, 28, 24%를 증가시키는 것으로 나타났다. 그리고 교통량이 많은 경우가 그 효과가 큰 것으로 분석되었다.

차로 공동이용시 주 교차로 신호최적화 결과를 자세히 제시하면 〈표 4〉와 같다.

〈표 4〉의 주도로 신호최적화 결과를 모형에 적용하여 주/부교차로간의 간격과 연동신호를 최적화한 결과는 〈표 5〉와 같다. 두 개 교차로간 간격은 〈표 4〉에서 부도로 접근로 신호시간중 작은 값인 좌회전 현시값(10초)에 제약되어 산정되고, 오프셋은 속도와 교차로 간격에 의해 산정되기 때문에 모두 동일하게 산정되었다.

〈표 4〉 차로 공동이용시 주교차로 신호최적화 결과

구 분	신호시간 (주도로) (초)		신호시간 (부도로) (초)		신호주기 (초)
	양방향 좌회전 (1현시)	양방향 직진 (3현시)	양방향 좌회전 (2현시)	양방향 직진 (4현시)	
교통량 1	16	23	10	16	65
교통량 2	16	23	10	16	65
교통량 3	21	29	10	20	80

〈표 5〉 모형 적용 신호최적화 결과

구 분	교차로 간격 (m)	오프셋 (초)	부교차로 신호시간 (초)		신호주기 (초)
			양방향 좌회전	양방향 직진	
교통량 1	33	5.75	26 (3)	39 (3)	65
교통량 2	33	5.75	26 (3)	39 (3)	65
교통량 3	33	5.75	31 (3)	49 (3)	80

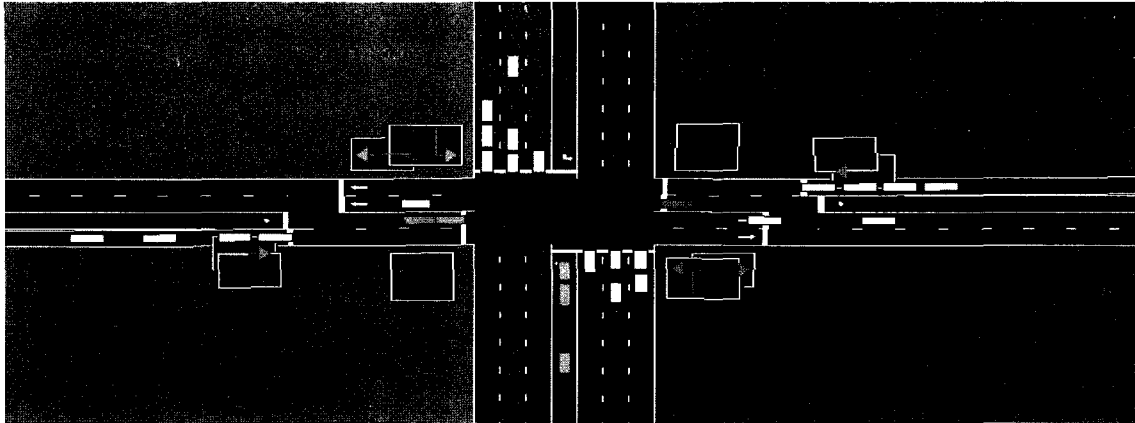
주 : ()는 전방향적색시간임

2. 모형평가

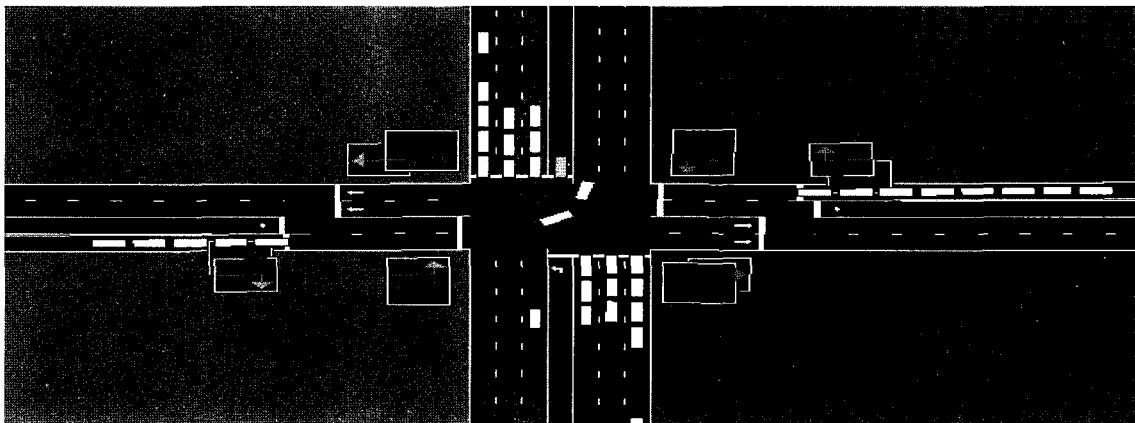
최적화 결과가 모형의 주요 특성인 부도로 진입차량이 주도로 해당현시에 완전히 통과되는지를 NETSIM을 이용하여 평가한 결과는 〈그림 7〉~〈그림 18〉과 같다. 그림들은 NETSIM에 의한 애니메이션(animation) 수행 동안 시간 경과에 따른 주요 교통상태를 나타낸 것이다. 차로공동이용 상황을 구현하기 위해서 주교차로의 부도로 접근로는 차로이용을 지정하지 않으므로써 각각의 이동류(직진 또는 좌회전)에 할당된 녹색신호에 2개차로를 모두 이용할 수 있도록 하였다.

그림들에 의하면 주/부교차로간의 대기차량 저장공간은 부교차로에서 진입되는 직진과 좌회전 대기차량을 주 교차로 해당 이동류 현시에 완전히 소거시켜주고 있음을 보여주고 있어, 본 연구에서 제시된 공동이용차로 신호제어 알고리즘이 잘 구현되고 있음을 보여준다.

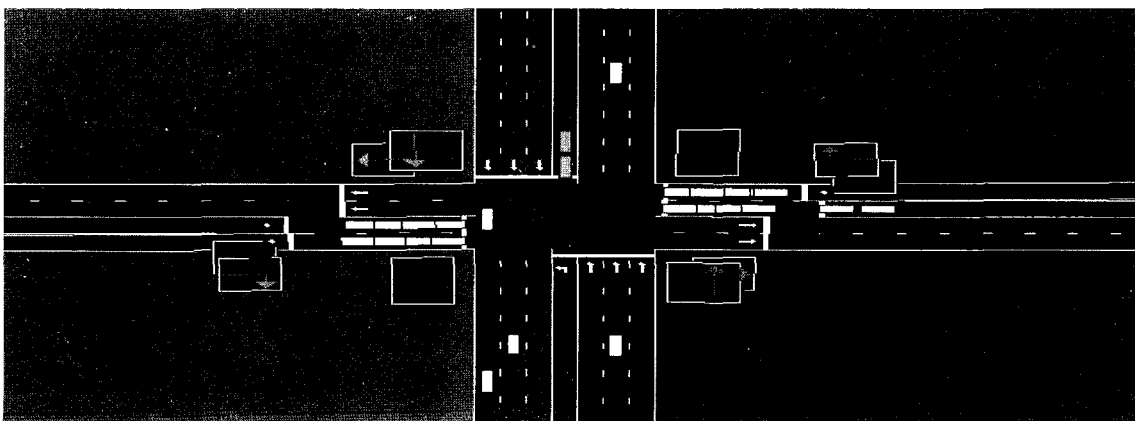
〈그림 7〉은 부 교차로로부터 진입한 좌회전 대기차량이 주 교차로를 통과하기 직전의 교통상태로 대기차량 저장공간내에 직진차량은 바로 전 현시동안에 완전히 소거되고 부교차로에서 대기공간에 진입하기 위하여 대기하고 있는 상태이다. 〈그림 8〉은 주교차로에서 좌회전 대기차량이 완전히 소거되고 부교차로에서 직진차량이 진입하기 위하여 대기하고 있는 순간이다. 〈그림 9〉는 주교차로에서 좌회전 대기차량이 전 현시에 완전히 소거되고 직진 대기차량이 출발직전의 상황이다. 〈그림 10〉은 주교차로에서 대기하던 직진차량이 소거되고 부교차로에서 좌회전차량이 진입하기 위하여 대기하고 있는 순간이다. 〈그림 10〉 다음 상황은 〈그림 7〉로 나타나 계속 순환되게 된다. 〈그림 11〉~〈그림 14〉는 (교통량 2)의 교통흐름 상태이고, 〈그림 15〉~〈그림 18〉은 (교통량 3)의 교통흐름 상태이다. (교통량 2)와 (교통량 3)의 경우도 교차로 차단없이 차로공동이용이 잘 이루어지고 있는 것으로 나타났다.



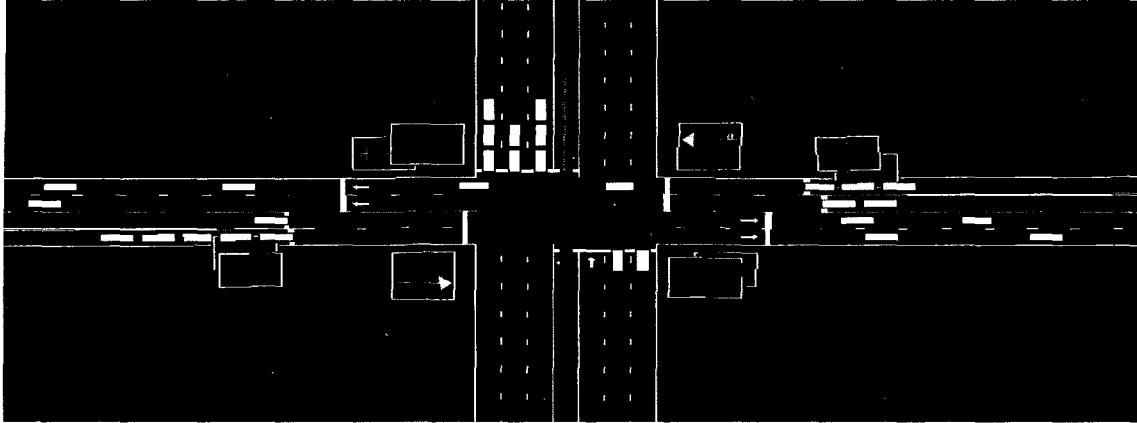
〈그림 7〉 주교차로 부도로 좌회전신호 시작전, 부교차로 좌회전 종료 전 교통상태(교통량1)



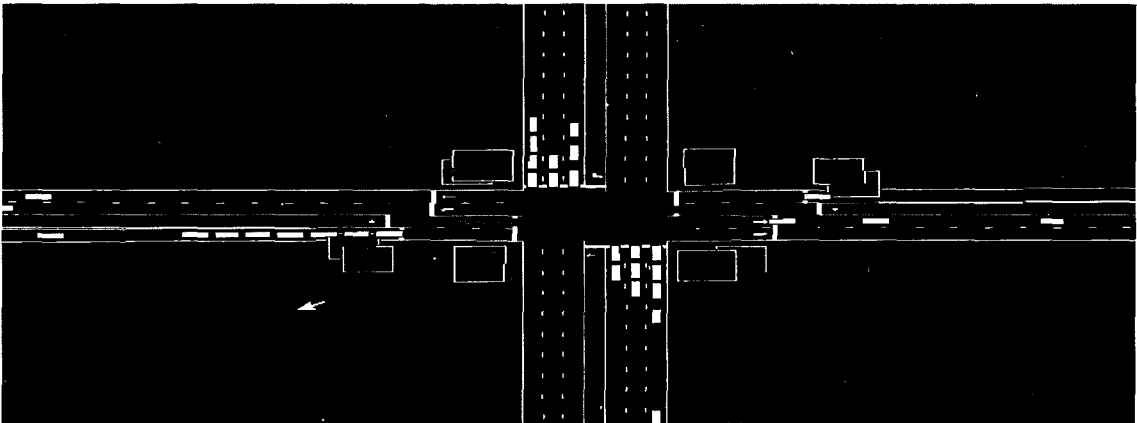
〈그림 8〉 주교차로 좌회전신호 종료 직전, 부교차로 직진신호 시작 직전 교통상태(교통량1)



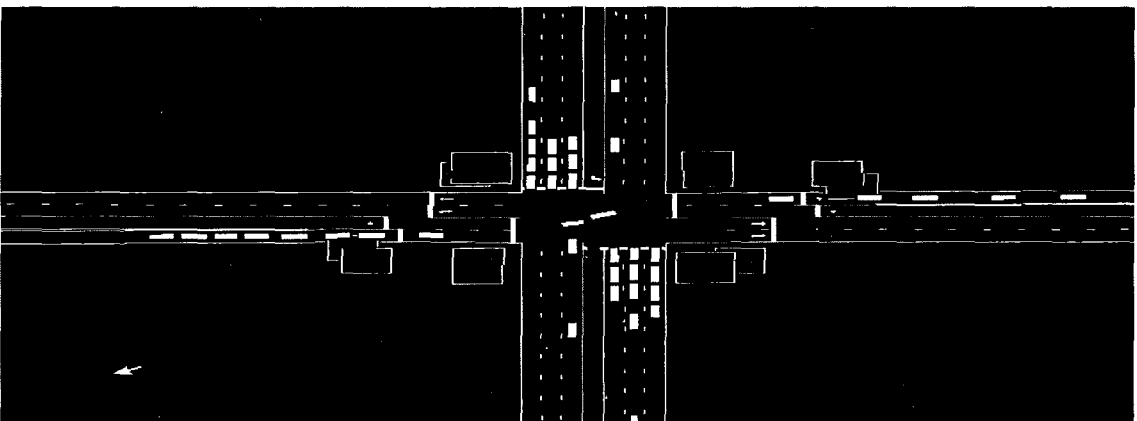
〈그림 9〉 주교차로 부도로 직진신호 시작 직전, 부도로 직진신호종료 직전 교통상태(교통량1)



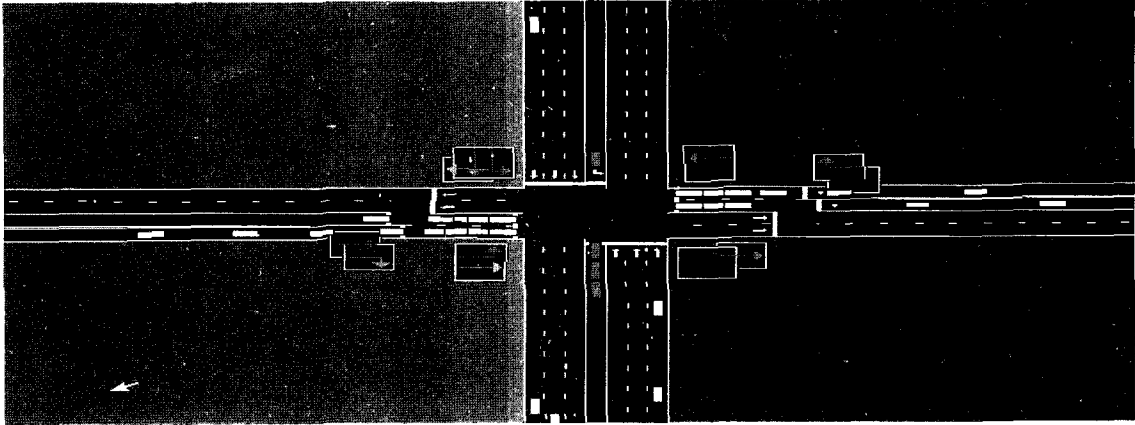
〈그림 10〉 주교차로 부도로 직진신호 종료 직전, 부교차로 좌회전 시작 직전 교통상태(교통량1)



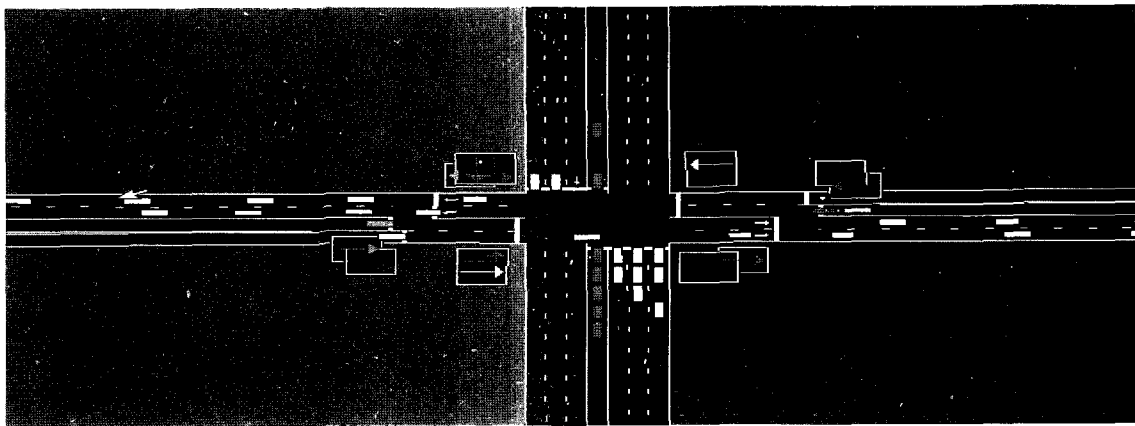
〈그림 11〉 주교차로 부도로 좌회전신호 시작전, 부교차로 좌회전 종료 전 교통상태(교통량2)



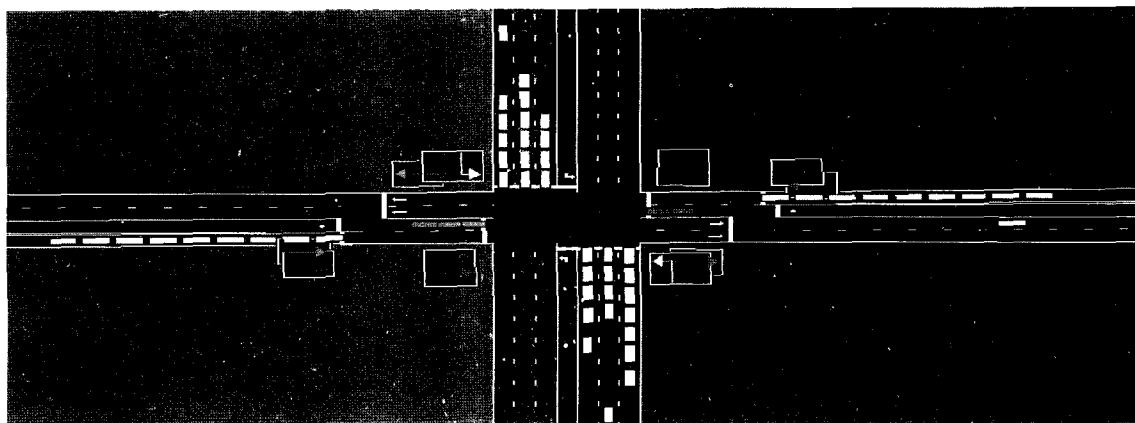
〈그림 12〉 주교차로 좌회전신호 종료 직전, 부교차로 직진신호 시작 직후 교통상태(교통량2)



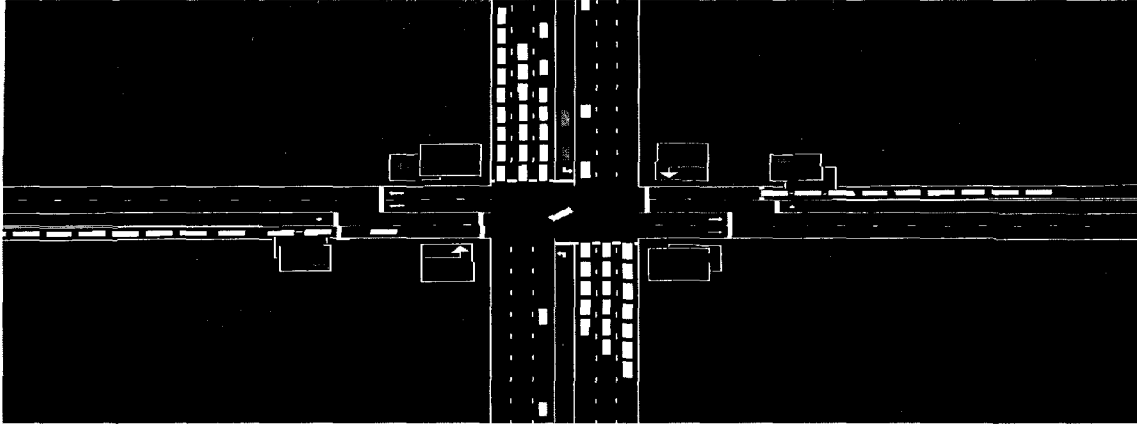
〈그림 13〉 주교차로 부도로 직진신호 시작 직전, 부도로 직진신호종료 직전 교통상태(교통량2)



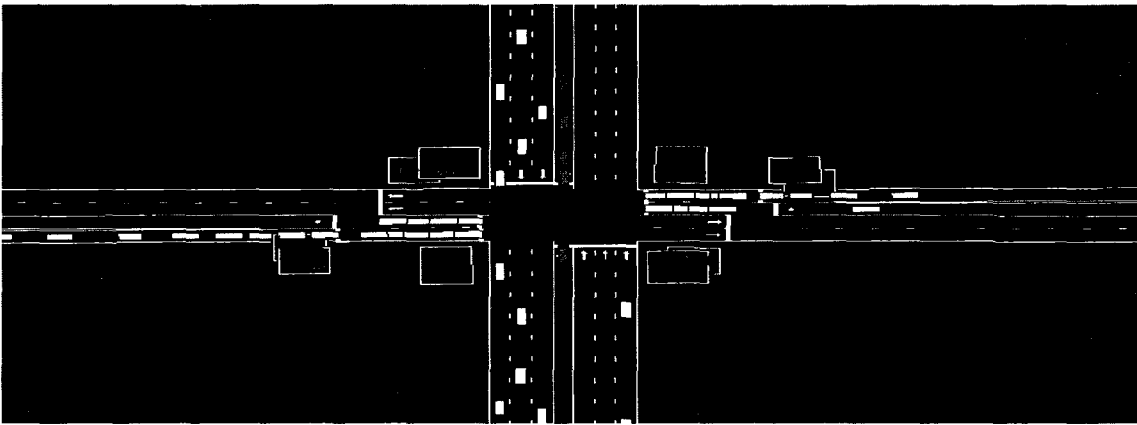
〈그림 14〉 주교차로 부도로 직진신호 종료 직전, 부교차로 좌회전 시작 교통상태(교통량2)



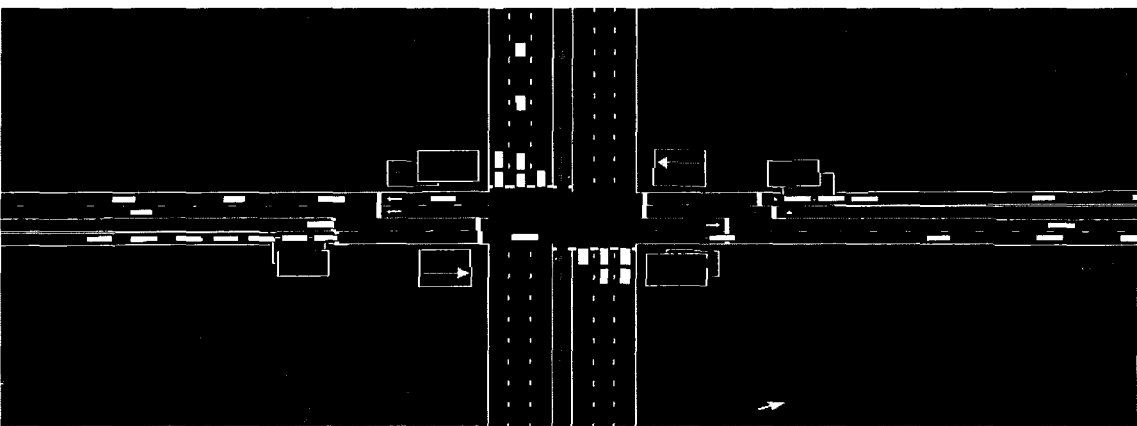
〈그림 15〉 주교차로 부도로 좌회전신호 시작전, 부교차로 좌회전 종료 교통상태(교통량3)



〈그림 16〉 주교차로 좌회전신호 종료, 부교차로 직진신호 시작 직후 교통상태(교통량3)



〈그림 17〉 주교차로 부도로 직진신호 시작 직전, 부도로 직진신호종료 직전 교통상태(교통량3)



〈그림 18〉 주교차로 부도로 직진신호 종료 직전, 부교차로 좌회전 시작 교통상태(교통량3)

〈표 6〉 모형적용 효과 비교결과

평균지체시간(초/대)	구 분	평균지체시간(초/대)	연료소모량(리터/시간)	수행지수(DI)	
교통량 1	현황	분리신호	42.5 (1.09)	344 (1.03)	63.80 (1.04)
		동시신호	39.0 (1.00)	334 (1.00)	61.15 (1.00)
	부교차로 설치	21.1 (0.54)	274 (0.82)	40.65 (0.66)	
교통량 2	현황	분리신호	60.1 (1.18)	426 (1.07)	83.86 (1.10)
		동시신호	51.0 (1.00)	397 (1.00)	76.22 (1.00)
	부교차로 설치	21.4 (0.42)	301 (0.76)	45.37 (0.60)	
교통량 3	현황	분리신호	82.2 (1.15)	563 (1.07)	116.4 (1.10)
		동시신호	71.6 (1.00)	525 (1.00)	106.2 (1.00)
	부교차로 설치	26.0 (0.36)	355 (0.68)	55.47 (0.52)	

TRANSYT-7F를 이용하여 모형적용 결과를 평가한 결과는 〈표 6〉과 같다. 본 모형을 적용한 신호 최적화 결과가 기존 교차로 신호최적화 결과들보다 평균지체시간은 각각 교통량순으로 46, 58, 64%를 줄여주는 것으로 나타났다. 그리고 연료소모량 18, 24, 32%, 수행지수 34, 40, 48% 만큼씩 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 TRAF-NETSIM에 의한 시뮬레이션 결과와도 비슷하다. 특히 교통량이 증가할수록 본 모형의 적용효과는 커지는 것으로 나타났다. 그리고 연료소모량 감소효과 보다 지체시간 단축효과가 큰 것은 후방 정지선이 수반되는데 따른 본 모형의 특성을 잘 설명해준 결과라고 할 수 있다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 신호등이 설치된 교차로에서 부교차로를 이용한 차로 공동이용화를 통해 주어진 도로용량을 최대한 활용할수 있는 기법을 제시하고 실제 교차로에 적용하여 모형을 평가하였다. 그 결과에 의하면 본 모형은 기존 교차로 운영기법보다 교통소통 증진은 물론 에너지 효율성을 크게 제고할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 주요 교차로에 인접된 세가로로 인한 혼잡이 극심한 상황에서 본 모형은 계획 가로망 설계시 교차로에서의 교통처리를 위한 세가로의 이격거리를 산정할 수 있는 준거로서도 활용할 수 있으리라 사료된다. 그러나 본 모형은 두 개의 상충되는 교통량(좌회전과 직진)을 번갈아 가면서 처리해야 하기 때문에 세가로나 버스정류장이 교차로에 인접되

어 이격거리가 모형값보다 크게 작은 곳 등에서는 적용이 곤란하다. 그러므로 버스 정류장, 택시, 세가로 등은 본 모형의 적용을 위한 주요 조건이 된다. 세가로는 주 교차로에서 운전자들이 기대하는 최소녹색신호시간에 유출될 수 있는 대기차량 저장공간 이상 이격되고, 인접 교차로간격은 spillback 제약조건을 만족시킬 수 있는 거리 이상 이격되어야 바람직하다. 따라서 이들 시설물이 주교차로로부터 멀리 이격되어 있고 교차로 간격이 큰 도로 등에 적용이 편리할 것으로 사료된다. 특히 좌회전포켓 설치가 곤란한 교차로나 좌회전 교통량이 많은 교차로를 포함하여 혼잡이 심한 교차로(critical intersection)등에 적용할 경우 큰 효과가 기대된다. 그러나 본 연구에서 제시한 신호체계는 기존 신호체계와 크게 상이하므로 운전자들에 대한 충분한 교육 및 홍보가 사전에 실시되어야 한다. 그리고 교차로의 기하구조 및 교통여건은 아주 다양하기 때문에 모형적용을 위한 보다 정확한 옵션의 산정을 위한 차량 도착 및 출발분포, 차두간격 등에 따른 충분한 자료수집을 통한 통계적 검증에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

참고문헌

1. 김동영, 교차로 방향별 차로공동이용 연구, 대한교통학회지, 제6권 제2호, 1988.
2. Youngchan Kim, Development of Optimization Models for Signalized Intersections During Oversaturated Conditions, Ph. D. dissertation, Texas A&M University, 1990.

3. Wallace, C.E., et al. TRANSYT-7F User's Guide, Transportation Research Center, University of Florida, Gainesville, Florida, 1991.
 4. Webster F.V. and Cobbe B.M., Traffic Signals, Road Research Technical Paper No. 56, Road Research Laboratory, London, 1966.
 5. Schrage, User's Manual for Linear, Integer and Quadratic Programming with Lindo, The Scientific Press. 1986.
 6. Federal Highway Administration, Traffic Software Integrated System Version 4.2 User's Guide, 1998.
- ✎ 주 작성자 : 신언교
 ✎ 논문투고일 : 2001. 2. 22
 논문심사일 : 2001. 3. 28 (1차)
 2001. 4. 18 (2차)
 2001. 5. 25 (3차)
 심사판정일 : 2001. 5. 25