

신호교차로의 차로 배정과 신호시간 최적화 모형에 관한 연구

A Study on Optimization of Lane-Use and Traffic Signal Timing at a Signalized Intersection

김 주 현 Kim, Ju Hyun
신 언 교 Shin, Eon Kyo

정회원 · 안양대학교 도시정보공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : jhkim@anyang.ac.kr)
안양대학교 도시정보공학과 겸임교수 (E-mail : mousesek@hanmail.net)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to present a linear programming optimization model for the design of lane-based lane-uses and signal timings for an isolated intersection.

METHODS : For the optimization model, a set of constraints for lane-uses and signal settings are identified to ensure feasibility and safety of traffic flow. Three types of objective functions are introduced for optimizing lane-uses and signal operation, including 1) flow ratio minimization of a dual-ring signal control system, 2) cycle length minimization, and 3) capacity maximization.

RESULTS : The three types of model were evaluated in terms of minimizing delay time. From the experimental results, the flow ratio minimization model proved to be more effective in reducing delay time than cycle length minimization and capacity maximization models and provided reasonable cycle lengths located between those of other two models.

CONCLUSIONS : It was concluded that the flow ratio minimization objective function is the proper one to implement for lane-uses and signal settings optimization to reduce delay time for signalized intersections.

Keywords

objective function, lane-uses, signal settings, movement, flow ratio, cycle length minimization, capacity maximization

Corresponding Author : Kim, Ju Hyun, Professor
Department of Urban Information Engineering, Anyang University,
22 Samdeokro, 37beon-gil, Manan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do,
14028, Korea
Tel : +82.31.467.0840 Fax : +82.31.469.6646
E-mail : jhkim@anyang.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159(Print)
ISSN 2287-3678(Online)
Received Aug. 03, 2015 Revised Aug. 11, 2015 Accepted Sep. 23, 2015

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

접근로별 차로수와 회전방향별 교통량이 주어진 신호 교차로의 신호시간 설계 시 고려되어야 할 조건은 신호 조건, 차로배정(lane use) 조건 등으로 크게 나누어진다. 즉, 상기 두 조건은 신호교차로의 차로군별 용량 산정에 영향을 미친다. 따라서 차로수와 교통량이 주어진 교차로의 서비스 수준은 신호시간과 차로배정이 얼마나

잘 조합이 되어 산정이 되느냐에 달려있다고 할 수 있다. 이러한 차로배정 최적화는 선형계획법으로 이루어지고 있어 이에 대한 기존에 연구된 모형들은 다음 절에서와 같이 목적함수나 최적화 과정에서 문제점들이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 기존에 연구된 모형들의 문제점을 개선하여 신호교차로의 서비스 수준 평가척도인 지체시간을 보다 더 잘 반영해주는 차로 배정과 신호시간을 동시에 최적화하는 모형을 제시하는데 있다. 본 연

구에서 제시하는 모형은 도로계획단계에서 차로 배정을 효율적으로 산정하고 차로 수를 최소화하여 교차로 용량을 효율적으로 활용토록 하고, 도로운영단계에서는 교통혼잡이 발생하는 교차로에 대해서 교통류 특성을 반영하는 차로 배정 및 신호시간 산정으로 교통용량을 최대화하여 소통개선에 기여를 할 수 있다.

1.2. 기존 연구 고찰

C.K Wong 외(2003) (이후 Wong 모형)은 신호주기를 최소화하거나 여유용량을 최대화하는 목적함수를 도입하여 차로 배정과 신호시간을 동시에 최적화하는 선형계획 모형(linear program)을 개발하였다. 그리고 김주현 외(2013) (이후 Kim 모형)은 교통량비(flow ratio, 교통량/포화교통량)를 최소화하는 목적함수를 Wong모형의 차로 배정 모형에 도입하여 차로 배정을 구한 다음 TRANSYT-7F로 신호시간을 최적화하는 2단계 차로 배정 및 신호 최적화 모형을 제시하였다.

그러나 Wong 모형의 목적함수 중 신호주기 최소화는 지체시간 최소화를 보장해주지 못할 뿐만 아니라 오히려 지체시간을 크게 증가시킬 수도 있다. 그리고 여유용량 최대화는 용량 최대화를 위하여 큰 신호주기를 선호하기 때문에 교통량에 따라 적절한 신호주기 산정이 어렵고 지체시간을 최소화하는데는 한계가 있다.

한편 Webster(1966)연구에 의하면 교통량이 증가할수록 지체시간을 최소화해주는 신호주기는 증가하고, 동일 교통량에서는 지체를 최소화해주는 신호주기보다 신호주기가 작거나 클수록 지체시간이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 신호주기가 큰 경우보다 작은 경우가 지체시간이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

그리고 Kim 모형은 교통량 비(flow ratio, 교통량/포화교통량)를 최소화하는 목적함수를 Wong모형의 차로 배정 모형에 도입하여 차로 배정을 구한 다음 TRANSYT-7F로 신호시간을 최적화하는 2단계 차로

Table 1. Description of Wong Model and Kim Model

	Wong model	Kim model
Objective function	Cycle length minimization or capacity maximization	Flow ratio minimization
Lane uses	Optimized simultaneously	Optimized based on Wong model
Signal timings		Optimized separately by Transyt-7F

배정 및 신호 최적화 모형을 제시하여 Wong 모형보다 지체시간을 감소시켰으나 차로 배정과 신호시간을 동시에 최적화하지는 못하므로 가능한 모든 차로 배정과 신호시간 패턴을 고려할 수 없다. 이로 인하여 상기 모형으로 구한 차로배정과 신호시간이 최적해를 보장해주지 못한다. 그리고 횡단보도 신호시간은 최소 녹색신호시간 조건으로 모형에 반영되는데 상기 모형과 같이 신호시간에만 제약하는 것보다 차로배정(직진 차로수)도 동시에 고려하면 보다 더 합리적인 신호시간(신호주기 등) 산정이 가능하게 된다.

따라서 본 연구에서는 신호교차로의 서비스 수준 평가적도인 지체시간을 보다 더 잘 반영해주는 교통량비를 목적함수로 도입한 김주현 등의 차로 배정 모형을 적용하고 차로배정과 신호시간 동시 최적화 모형인 Wong 모형을 개선하여 차로 배정과 신호시간(신호주기, 현시 순서, 현시별 신호시간)을 동시에 최적화하는 선형계획 모형을 구축하고자 한다.

2. 모형 구축

2.1. 차로 배정 모형

차로 배정 모형은 Wong 모형의 BMILP(Binary Mixed Integer Linear Programs) 형태의 차로별 차로 배정과 신호 최적화 모형을 토대로 하면서 교통량비 최소화라는 새로운 목적함수를 도입한 Kim 모형의 차로 배정 모형을 적용한다.

Fig. 1과 같은 독립교차로에 있어서 모형에 도입되는 주요 변수들은 다음과 같다.

N_r : 교차로의 접근로 수, L_i : i (교차로 유입부)의 차로 수로 차로 번호는 중앙선에서 바깥쪽으로 가면서 증가, $EL_j = j$: j (교차로 유출부)의 차로 수

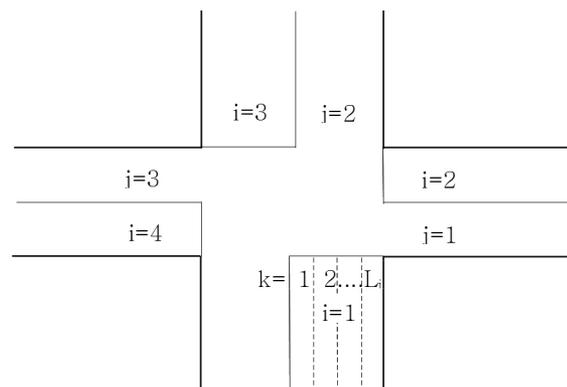


Fig. 1 Numbering Convention for Arms and Lanes

여기서, $i = 1, 2, \dots, N_T$, $j = 1, 2, \dots, N_{T-1}$, $k = 1, 2, \dots, L_i$ 로 반시계 방향으로 진행하면서 숫자 증가(Fig. 1에서 $i=1, 2, 3, 4$; $j=1, 2, 3$)

이동류는 한 개 차로만을 이용할 수도 있고 수 개 차로를 이용할 수도 있다. 그리고 차로(k)를 이동류(ij)가 이용하면 교통량(q_{ijk})을 갖게 되고, 이용하지 않으면 교통량은 0이 된다. 이러한 이동류의 차로이용 상태에 따른 교통량은 Eq. (1)에 의해 산정된다.

$$M\delta_{ijk} \geq q_{ijk} \geq 0 \quad (1)$$

여기서, q_{ijk} : i 접근로의 k 차로에서 j 접근로로 진출하는 교통량, δ_{ijk} : 이진 변수(binary integer)로 i 접근로 k 차로에서 j 접근로로 진출이 이루어지면 1, 그렇지 않으면 0, M : 모든 차로의 이용 교통량보다 큰 수

Eq. (1)에 의해 $\delta_{ijk}=0$ 이면 $q_{ijk}=0$, 그렇지 않으면 $q_{ijk}>0$ 이 된다. 따라서 이동류별 차로 이용 여부가 결정된다.

어느 접근로에서 동일한 회전 방향에 대한 차로별 이용교통량(q_{ijk})을 합하면 그 접근로에서 회전하는 교통량(q_{ij})과 같아야 하므로 Eq. (2)로 표현된다.

$$\sum_{k=1}^{L_i} q_{ijk} = q_{ij} \quad (2)$$

여기서, q_{ij} : i 접근로에서 j 접근로로 회전하는 교통량

교차로를 계획하는 경우에는 Eq. (3)을 도입하여 여유용량을 고려할 수도 있다.

$$\sum_{k=1}^{L_i} q_{ijk} = uq_{ij} \quad (3)$$

여기서, u : 여유용량 계수($u \geq 1$, $u=1$ =여유용량)로 교통수요 증가 및 적정 소통 수준 유지를 위해 적용

서로 다른 차로를 이용하는 이동류들 간에는 서로 상충이 발생되지 않아야 한다. 예를 들어, 1차로에서 직진을 하는데 2차로에서 좌회전을 하게 되면 서로 상충이

발생되므로 이러한 상충 이동류는 허용되지 않아야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 Eq. (4)가 필요하다.

$$1 - \delta_{ijk} \geq \delta_{imk+1} \geq \delta_{ijk} - 1 \quad (4)$$

여기서, $j = 1, \dots, N_T - 2$; $m = j + 1, \dots, N_T - 1$;

$k = 1, \dots, L_i - 1$; $i = 1, \dots, N_T$

$\delta_{ijk} = 1$ 이면, $\delta_{imk+1} = 0$, $\delta_{ijk} = 0$ 이면 $\delta_{imk+1} = 0$ 또는 1

Eq. (4)에서 1차로가 좌회전 포켓 차로인 경우는 직진 이동류(ij)이면 $\delta_{ij1}=0$, 좌회전 이동류(ij)이면 $\delta_{ij1}=1$ 을 추가하면 된다.

이동류의 최대 이용가능 차로 수는 그 이동류를 받아 주는 교차로 유출부의 차로 수(EL_j)를 초과하지 못하도록 한다.

$$EL_i \geq \sum_{k=1}^{L_i} \delta_{ijk} \quad (5)$$

그리고 어느 차로는 한 개 이동류만이 이용할 수도 있지만 수 개의 이동류(직진, 좌회전, 우회전 등)가 함께 이용할 수도 있으므로 차로별 허용 이동류 수의 조건식은 다음 Eq. (6)과 같다.

$$\sum_{j=1}^{N_T-1} \delta_{ijk} \geq 1 \quad (6)$$

그리고 동일 이동류가 이용하는 차로들의 교통량비(교통량/포화교통량)는 모두 동일하도록 한다. 이를 위하여 각 차로의 교통량비(y_{ik})는 Eq.(7)을 만족시켜야 한다.

$$y_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{N_T-1} q_{ijk}}{s_{ik}} \quad (7)$$

그런데,

$$s_{ik} = \frac{s_{ik}^T}{1 + 1.5 \sum_{j=1}^{N_T-1} f_{ijk} / r_{ijk}} \quad (8)$$

$$f_{ijk} = \frac{q_{ijk}}{\sum_{m=1}^{N_T-1} q_{imk}} \quad (9)$$

이므로 Eq. (8)과 Eq. (9)를 Eq. (7)에 대입하면,

$$y_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{N_T-1} (1 + 1.5 / r_{ijk}) q_{ijk}}{s_{ik}^T} \quad (10)$$

여기서, s_{ik} : i 접근로 k 차로의 좌회전(우회전) 포화 교통량, s_{ik}^T : i 접근로 k 차로의 직진 포화교통량, r_{ijk} : i 접근로에서 j 접근로 방향 회전 반경, f_{ijk} : i 접근로 k 차로를 이용하는 전체 교통량에 대한 j 접근로로 회전하는 교통량 비율

즉, 차로이용 형태별 교통량비 산정식 Eq. (10)과 차로별 이동류 이용유무 산정식 Eq. (1)에 의해 각 차로의 차로이용 형태에 따른 교통량비가 산정되게 된다. 이렇게 산정된 차로별 교통량비는 동일 이동류가 이용하는 차로들의 경우에는 교통량비가 동일하도록 Eq. (11)을 적용한다. 이는 동일 이동류는 동시에 진행하게 되므로 차로 혼잡도가 동일하게 운영되게 된다.

$$M(2 - \delta_{ijk} - \delta_{ijk+1}) \geq y_{ik} - y_{ik+1} \geq -M(2 - \delta_{ijk} - \delta_{ijk+1}) \quad (11)$$

여기서, $k = 1, \dots, L_i - 1; i = 1, \dots, N_T$

2.2. 신호시간 산정모형

신호시간 산정모형은 Wong 모형의 신호최적화 관련 모형을 토대로 한다. 신호주기(C)는 최소값(C_{\min})과 최대값(C_{\max}) 범위 내에서 최적값이 선정되게 된다. 그리고 다음에 나오는 여러 신호시간 관련 제약조건들을 선형식으로 만들어 주기 위하여 신호주기는 신호주기에 대한 역수(ζ)를 변수로 도입하여 사용한다.

$$\frac{1}{C_{\min}} \geq \zeta \geq \frac{1}{C_{\max}} \quad (12)$$

여기서, $\zeta = \frac{1}{C}$

동일한 이동류가 수 개의 차로를 이용할 경우 이들 차로들에 대한 신호는 동시에 신호가 부여되도록 하기 위하여 다음의 Eq. (13)~(14) 조건식이 도입된다.

$$M(1 - \delta_{ijk}) \geq \Theta_{ik} - \theta_{ij} \geq -M(1 - \delta_{ijk}) \quad (13)$$

$$M(1 - \delta_{ijk}) \geq \Phi_{ik} - \varphi_{ij} \geq -M(1 - \delta_{ijk}) \quad (14)$$

여기서, $\Theta_{ik}(\Phi_{ik})$ 는 i 접근로 k 차로의 녹색신호 시작시간(녹색신호 지속시간)을 나타내고, M 은 Eq. (13) 및 Eq. (14)가 항상 성립하도록 할 수 있는 아주 큰 양의 수, $1 \geq \theta_{ij} \geq 0, 1 \geq \varphi_{ij} \geq g_{ij}$, ζ, g_{ij} : 최소녹색신호시간

이로 인하여 동일한 차로에서 수 개의 이동류가 이용할 경우에도 모든 이동류의 신호시간은 동일하게 된다.

이동류별 신호시간 및 신호순서는 이진변수($\Omega_{ij,lm}$)를 도입하여 Eq. (15), (16) 두 개의 조건식에 의해 결정된다. 두 조건식은 서로 상충이 발생하는 이동류(ij)와 이동류(lm) 사이($\delta_{ijk} = \delta_{lmn} = 1$ 인 경우만)에만 필요하게 되는데 서로 상충되는 이동류들은 서로 다른 시간대에 신호를 받게 된다. 그리고 $\Omega_{ij,lm} = 0$ 이면 이동류(ij)가 이동류(lm)에 선행하게 되고, $\Omega_{ij,lm} = 1$ 이면 그 반대의 경우에 해당되게 된다.

$$\Omega_{ij,lm} + \Omega_{lm,ij} = 1 \quad (15)$$

$$\theta_{lm} + \Omega_{ij,lm} + M(2 - \delta_{ijk} - \delta_{lmn}) \geq \theta_{ij} + \varphi_{ij} + w_{ijk,lmn} \zeta \quad (16)$$

여기서, M 은 Eq. (16)이 항상 성립하도록 할 수 있는 아주 큰 양의 수

차로별 신호 시작시간과 신호 지속시간 및 이동류별 신호 시작시간과 신호 지속시간은 Eq. (13), (14)에 의해 결정되므로 Wong 모형의 Eq. (15), (16) 대신에 Importa (1984) 등 신호시간모형에 널리 사용되고 있는 Eq. (17), (18)을 적용하여 최적해 탐색시간을 크게 증가시키는 이진변수 수를 크게 줄이고 조건식도 크게 줄일 수 있다.

$$\theta_{ij} + \varphi_{ij} + \zeta Y_{ij,lm} - \alpha_{ij,lm} \leq \theta_{mn} \quad (17)$$

$$\theta_{mn} + \varphi_{mn} + \zeta Y_{ij,lm} + \alpha_{ij,lm} \leq \theta_{mn} + 1 \quad (18)$$

여기서, 이동류(ij)가 이동류(lm)과 상충이 발생되면 $Y_{ij,lm}$ 은 황색신호시간, 상충이 발생되지 않으면 $Y_{ij,lm}$ 는 상기 조건식이 항상 성립되도록 아주 큰 음수

이와 같이 산정되는 모든 이동류들의 신호 시작시간과 신호 지속시간은 한 주기 내에서 존재해야 하므로 다음의 신호시간 제약조건을 추가하였다.

$$\theta_{ij} + \varphi_{ij} \leq 1 \quad (19)$$

$$\Theta_{ik} + \Phi_{ik} \leq 1 \quad (20)$$

도로계획단계에서는 각 차로를 이용하는 교통량의 적정 서비스 수준이 유지되도록 하기 위하여 최대 포화도를 초과하지 못하도록 하는 다음 조건이 주어질 수 있다.

$$q_{ik} / c_{ik} = \frac{q_{ik}}{s_{ik} \Phi_{ik} / C} \quad \text{이므로}$$

$$\rho_{ik} = \frac{y_{ik}}{\Phi_{ik} + e\zeta} \leq p_{ik} \quad (21)$$

$$\forall k = 1, \dots, L_i ; i = 1, \dots, N_T$$

여기서, p_{ik} : 최대 허용 포화도,
 e : 유효녹색시간-실제녹색시간

$$\Phi_{ik} + e\zeta \geq \frac{y_{ik}}{p_{ik}} \quad (22)$$

2.3. 목적함수

선형계획법으로 구성된 Wong모형은 Eq. (23)의 신호주기(C) 최소화 또는 Eq. (24)의 여유용량(u) 최대화 등을 목적함수로 도입하였다.

$$\max \quad 1/C \quad (23)$$

앞 절에서 언급된 것처럼 신호 제약조건들을 선형화 하기 위해 신호주기 대신 사용되는 신호주기의 역수를 최대화하는 Eq. (23)은 신호주기를 최소화하게 된다.

$$\max \quad u \quad (24)$$

Eq. (24)에 의해 산정되는 여유용량 u 는 Eq. (3)을 만족시키면서 u 를 가장 크게 하는 차로배정과 신호조건을 산정하게 된다.

그러나 상기 목적함수들은 서론에서 언급한 Webster 이론과 같이 신호교차로의 지체시간을 최소화하는데 어

려움이 있기 때문에 본 연구에서는 보다 더 지체시간 최소화 개념이 반영될 수 있는 Kim 모형의 교통량비 최소화를 목적함수로 도입하였다. 상기 모형에서는 도로별 중첩 현시가 가능한 효율적인 신호운영이 가능토록 NEMA 체계의 dual ring 조건을 만족하도록 하였다. 즉, Fig. 1에서 서로 진행에 상충이 발생하는 직진과 좌회전을 쌍으로 하는 도로별 동반 현시군 중 Eq. (25)와 Eq. (26)에 의해 산정되는 교통량비가 큰 쌍의 합이 최소화되도록 한다. Eq. (25)와 Eq. (26)은 조건식으로 증괄호 안의 두 개 값 중에서 큰 값이 산정되게 된다.

$$Y_{ew} = \max\{(y_{i_3L_i} + y_{i_11}), (y_{i_1L_i} + y_{i_31})\} \quad (25)$$

$$Y_{ns} = \max\{(y_{i_4L_i} + y_{i_21}), (y_{i_2L_i} + y_{i_41})\} \quad (26)$$

여기서, i_1 과 i_3 (i_2 와 i_4)는 동일 도로상에 있는 대향 접근로이며, 1차로는 좌회전 차로, L_i 는 우회전 전용차로는 고려되지 않으므로 직진 차로에 해당된다.

위 두 식은 조건식으로 선형식이 아니기 때문에 이진변수를 도입하여 조건식의 선형화 기법으로 널리 사용되는 기존의 방법(Kim(1990) 등)을 인용하여 다음과 같이 선형화 하였다. Eq. (25), Eq. (26)의 경우 각각 Eq. (27)~Eq. (30), Eq. (31)~Eq. (34) 등의 8개식으로 대체된다.

$$Y_{ew} \geq y_{i_3L_i} + y_{i_11} \quad (27)$$

$$Y_{ew} \geq y_{i_1L_i} + y_{i_31} \quad (28)$$

$$Y_{ew} - (y_{i_3L_i} + y_{i_11}) \leq M\beta_{ew} \quad (29)$$

$$Y_{ew} - (y_{i_1L_i} + y_{i_31}) \leq M(1 - \beta_{ew}) \quad (30)$$

$$Y_{ns} \geq y_{i_4L_i} + y_{i_21} \quad (31)$$

$$Y_{ns} \geq y_{i_2L_i} + y_{i_41} \quad (31)$$

$$Y_{ns} - (y_{i_4L_i} + y_{i_21}) \leq M\beta_{ns} \quad (33)$$

$$Y_{ns} - (y_{i_2L_i} + y_{i_41}) \leq M(1 - \beta_{ns}) \quad (34)$$

여기서, β_{ew} , β_{ns} : 이진변수

그리고 도로별 임계 교통량비의 합은 Eq. (35)을 만족하도록 한다.

$$Y_{ew} + Y_{ns} \leq y_{\max} \quad (35)$$

여기서, y_{\max} : 교차로 허용 최대 교통량비($y_{\max} \leq 1$)

지체를 최소화해주는 Webster가 산정한 신호주기 산정식은 Eq. (36)과 같다. Eq. (36)에 의하면 신호교차로에서 가장 효율적인 현시는 현시별 임계 교통량비의 합이 가장 작아야 한다.

$$C = \frac{1.5LT + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_{ph_i}} \quad (36)$$

여기서, LT : 주기당 손실시간(초), y_{ph_i} : i 현시의 임계 교통량비

따라서 본 모형에서는 Eq. (36) 지체를 최소화해 줄 수 있는 가장 작은 신호주기(C)를 산정해주는 차로이용 형태를 산정하기 위하여 dual ring 조건에서 임계 이동류의 교통량비 합을 최소화하는 Eq. (37)을 목적함수로 도입한다.

$$\min(k_1 Y_{ew} + k_2 Y_{ns}) \quad (37)$$

여기서, k_1, k_2 는 도로별 교통량비에 대한 가중치로 교통량 등을 고려하여 차등 적용

그리고 본 모형에서는 회전 이동류의 교통량비를 보다 상세하게 반영하기 위하여 Wong 모형의 회전반경

Table 2. Through-Car Equivalent for Left-turn Car

	Exclusive left-turn lanes		Shared left-turn lanes	
	1	2	1	2
Dual left-turn			-	
Directional moving	1.00	1.05	1.00	1.02

Table 3. Formulations by Model

Model type		Model 1	Model 2	Model 3
Objective function		Eq. 22	Eq. 23	Eq. 36
Constraints	for Lane uses	Eq. (1), (2), (4), (5), (6), (10), and (11) are required Eq. (3) can be used or not	Eq. (1), (2), (3), (4), (5), (6), (10), and (11) are required	Eq. (1), (2), (4), (5), (6), (10), and (11) are required Eq. (3) can be used or not
	for Signal control	Eq. (12), (13), (14), (17), (18), (19), and (20) are required Eq. (21) can be used		
	for Objective function	-	-	Eq. (26), (27), (28), (29), (30), (31), (32), and (33) are required Eq. (34) can be used or not

에 따른 좌회전 보정 외에 Table 2와 같은 도로용량편람의 좌회전 차로 수 및 차로 형태에 따라 보정해주는 좌회전 자체 보정계수를 추가한다.

그런데 좌회전 자체의 직진환산계수의 경우 Table 2와 같이 조건에 따라 각각 산정되기 때문에 두 개의 이진변수를 도입하여 Eq. (38)과 같이 선형식으로 구현한다.

$$E_{ij_l} = 1.03 - 0.03\delta_{ij_s2} + 0.02\delta_{ij_l2} \quad (38)$$

여기서, δ_{ij_s2} 와 δ_{ij_l2} 는 2차로의 차로 배정 형태로 각각 직진은 δ_{ij_s2} , 좌회전은 δ_{ij_l2} 에 해당된다.

Eq. (38)에 의해 $\delta_{ij_s2}=1, \delta_{ij_l2}=0$ 이면 2차로는 직진이 되어 1차로는 좌회전 전용차로이든가 직·좌공용차로가 되어 $E_{ij_l}=1.0$ 이 되고, $\delta_{ij_s2}=1, \delta_{ij_l2}=1$ 이면 2차로가 직·좌공용차로가 되어 1차로는 좌회전차로가 된 공용좌회전 차로 수가 2가 되어 1.02가 되고, $\delta_{ij_s2}=0, \delta_{ij_l2}=1$ 이면 2차로가 좌회전차로로 전용좌회전 차로 수 2가 되어 1.05가 산정되어 Table 1을 만족시키게 된다. Eq. (2)의 회전교통량(q_{ij})에서 좌회전인 경우(q_{ij_l})는 다음 식으로 산정되는 $q_{ij_l}^*$ 로 대체된다.

$$q_{ij_l}^* = q_{ij_l} \times E_{ij_l} \quad (39)$$

이렇게 산정된 모형식은 차로이용 형태와 좌회전 자체 보정계수를 결정하는 이진변수, 도로별 임계이동류를 결정해주는 이진변수와 교통량 및 교통량비를 산정하는 연속변수로 구성되는 다음과 같은 수식으로 구성되는 선형계획법(LP, Linear Program)으로 구성된다. 모형은 목적함수에 따라 신호주기 최소화 모형(Model 1), 여유용량 최대화 모형(Model 2), 교통량비 최소화 모형(Model 3) 등으로 구분된다. 각 모형을 정리하면 Table 3과 같다.

3. 모형 적용 및 평가

3.1. 평가 시나리오 작성

본 모형은 주어진 차로 수 조건에서 차로별 차로 배정 및 신호최적화 모형으로 다양한 차로 배정 형태가 가능하도록 하고 간선도로들의 차로수를 감안하여 편도 3차로의 4개 접근로를 갖는 4지교차로를 평가 대상 교차로로 선정하였다. 신호교차로에서 차로 배정이나 신호시간은 좌회전 교통량 비율, 접근로 교통량 및 좌회전 교통량 비율, 그리고 교차로 전체 교통량에 따라 영향을 받게 된다. 이러한 현상이 잘 고려되도록 하고 서비스 수준이 골고루 분포하도록 교통량 시나리오를 다음과 같이 작성하였다. 특히, 교차로의 서비스수준은 'C 수준' 1개, 'D 수준' 2개, 'E 수준' 2개, 'F 수준' 1개 등을 포함하도록 하여 용량상태 전후의 교통량 시나리오가 많이 포함되도록 하였다.

시나리오 1은 접근로별 전체 교통량(1500pcph)과 회전 교통량이 모든 접근로에서 동일하게 적용하면서 각각 회전교통량 비율이 다른 시나리오 3개(1-1, 1-2, 1-3)를 작성하였다. 시나리오 1은 접근로별 전체 교통량 및 좌회전 교통량을 모두 동일하게 하여 차로배정이 합리적인지를 평가하는데 목적이 있다.

시나리오 2는 접근로별 전체 교통량과 회전 교통량이 접근로별로 다르게 적용하면서 각각 교통량이 다른 시나리오 3개(2-1, 2-2, 2-3)를 작성하여 Table 4와 같이 총 6개의 평가 시나리오를 작성하였다.

시나리오 2는 시나리오 1보다 교통량이 다양한 경우로 교통량의 다양성에 따른 차로 배정 결과를 비교하고자 한다. 그리고 일반적으로 좌회전 차로 배정에 영향을 미치지 않는 우회전 교통량은 직진교통량에 포함시켜 별도로 고려하지 않았다.

Table 4. Traffic Volumes for Tests (Unit : pcph)

Scenario	Movement	EB	WB	NB	SB
		Volume	Volume	Volume	Volume
1-1	Through	1,000	1,000	1,000	1,000
	Left	500	500	5,00	500
1-2	Through	1,150	1,150	1,150	1,150
	Left	350	350	350	350
1-3	Through	1,300	1,300	1,300	1,300
	Left	200	200	200	200
2-1	Through	1,100	1,000	900	1,200
	Left	100	150	200	100
2-2	Through	1,100	1,100	900	1,300
	Left	200	150	300	100
2-3	Through	1,200	1,200	1,000	1,400
	Left	300	200	400	100

3.2. 모형 적용 결과

3.2.1. 차로 배정

선형계획모형인 LINDO를 사용하여 산정된 모형별 차로 배정 결과는 Table 5~Table 6과 같다. 시나리오 1-1은 모두 다르게 산정되고, 1-2 경우는 모든 모형이 같게 차로 배정이 산정되고, 1-3 경우는 Model 1과 Model 3이 동일하게 차로 배정이 이루어졌다. 시나리오 2의 경우는 모든 시나리오에서 서로 다르게 차로 배정이 이루어져 접근로별로 교통량과 회전 교통량 비율이 다르므로 시나리오 1보다 다양하게 차로 배정이 이루어졌다. 따라서 접근로별로 교통량이 다양할수록 목적함수에 따라 차로 배정도 다양하게 산정되었다.

접근로별로 직진교통량과 좌회전교통량이 동일한 시나리오 1에 있어서 동일한 시나리오의 경우 접근로별로 동일한 차로 배정이 교통량 처리 및 신호운영 측면에서

Table 5. Lane-uses for Scenario 1

Scenario	Lane	East bound			West bound			North bound			South bound		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1-1	3	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	←	↙	←	↙	←	←	←	↙	←	←	←	←
	1	↙	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↙	↓
1-2	3	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	1	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1-3	3	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	1	↓	↙	↓	↓	↙	↓	↓	↙	↓	↓	↙	↓

Table 6. Lane-uses for Scenario 2

Scenario	Lane	East bound			West bound			North bound			South bound		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
2-1	3	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	←	←	←	←	←	↙	↘	←	←	←	←	←
	1	↘	↙	↘	↘	↙	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
2-2	3	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	1	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘
2-3	3	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	1	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘

유리하다고 할 수 있다. 모형 1과 모형 2는 동일한 시나리오에서 접근로별로 다양하게 차로 배정이 산정되었지만 모형 3은 모든 접근로에서 차로 배정이 동일하고 좌회전 전용차로로 산정되어 다른 모형들보다 합리적인 차로 배정 결과를 얻었다. 특히 시나리오 1-1에서 모형 2는 EB 직좌 공용차로, WB 좌회전 전용차로로 서로 다르게 산정되었는데 이는 용량 최대화로 인하여 신호주기가 커서 차로배정이 비효율적으로 산정된 결과라고 할 수 있다. 접근로별로 교통량이 다른 시나리오 2의 경우는 모든 모형들이 다양하게 차로 배정이 이루어졌다.

3.2.2. 신호시간

시나리오 1의 경우 각 모형으로 산정된 신호시간(신호주기, 현시순서, 신호시간)은 Table 7과 같다. 신호주기는 Model 1과 Model 3은 모두 동일하게 산정되었다. Model 2는 모두 최대 신호주기인 200초로 산정되었다. Model 1과 Model 3은 좌회전 교통량 비율이 작아 질수록 신호주기가 작아지는 것으로 나타났다. 현시순서 패턴은 직좌분리신호, 직좌동시신호, 중첩 현시 등 다양하게 산정되었다. 특히, 신호시간 운영이 보다 효율적으로 활용될 수 있는 중첩현시는 모형 3이 5회, 모형

Table 7. Signal Timmings by TRANSYT-7F (Unit:sec)

Scenario	Model	Phase						Cycle length
		1	2	3	4	5	6	
1-1	Model 1	↔	↘	↙	↘			118
		29	30	30	29			
	Model 2	↔	↘	↙	↘			200
		50	50	50	50			
1-2	Model 3	↘	↙	↔	↔			118
		29	30	30	29			
	Model 1	↘	↔	↙	↘	↔		68
		13	13	9	12	21		
1-3	Model 2	↔	↙	↘	↔	↘		200
		38	62	38	25	37		
	Model 3	↔	↙	↘	↔	↘		68
		13	21	13	9	12		
1-3	Model 1	↔	↙	↘	↘	↔	↘	52
		8	11	7	8	11	7	
	Model 2	↘	↔	↘	↘			200
		50	50	50	50			
1-3	Model 3	↙	↔	↘	↔	↘		52
		25	8	8	14	7		

Table 8. Signal Timmings by TRANSYT-7F (Unit:sec)

Scenario	Model	Phase						Cycle length
		1	2	3	4	5	6	
2-1	Model 1	↔	↘	↙	↘			50
		13	13	13	11			
	Model 2	↔	↘	↙	↘			200
		49	22	57	72			
2-2	Model 3	↔	↘	↙	↘	↘		118
		16	6	34	5	18		
	Model 1	↔	↘	↙	↘	↔		50
		13	7	15	15			
2-3	Model 2	↘	↘	↘	↔			200
		48	54	50	48			
	Model 3	↘	↔	↘	↔	↘		79
		19	16	7	18	19		
2-3	Model 1	↔	↘	↙	↘	↘		71
		18	12	11	11	19		
	Model 2	↘	↔	↘	↘			200
		48	48	52	52			
2-3	Model 3	↘	↔	↘	↔	↙	↘	119
		13	23	18	24	33	8	

1이 3회, 모형2가 1회 등의 순으로 나타나 모형 3이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 모형시나리오별로 현시 순서는 1-2 시나리오의 Model 2와 Model 3이 동일하게 산정된 경우를 제외하면 모두 다르게 산정되었다.

모든 접근로의 교통량이 동일한 시나리오 1의 경우는 Model 1과 Model 3이 신호주기가 동일하게 산정되었으나 접근로별로 교통량이 상이한 시나리오 2의 경우에는 Table 8과 같이 모두 다르게 산정되었다. Model 2의 경우는 마찬가지로 모두 최대 신호주기인 200초로 산정되어 여유용량을 최대화하게 되면 신호주기가 최대화된다는 것을 알 수 있다. 모형별 신호주기는 Model 1이 가장 작게 산정되고 Model 2가 가장 크고 Model 3은 두 모형 사이에 존재하는 주기로 산정되었다. 시나리오별 현시순서는 모형별로 모두 다르게 산정되었다.

3.3. 모형 평가

3.3.1. 목적함수

Model 2의 여유용량 최대화 목적함수는 다른 모형들과 동일한 제약조건에서 지체시간과 상관없이 신호주기가 최대값일 때 산정되어 교통량 변화에 따라 신호주기를 적절하게 산정해주지 못하므로 본 평가에서 제외시켰다. Model 1의 경우(Table 9) 신호주기와 지체시간을 살펴보면 전체 교통량이 동일한 시나리오 1이나 전체 교통량과 좌회전 교통량이 접근로별로 서로 다른 시나리오 2 모두 신호주기와 지체시간에 특정한 관계(상관계수 -0.005)가 없는 것으로 나타나 신호주기 최소화 목적함수가 지체시간 최소화를 잘 반영해주지 못하는 것으로 나타났다.

Table 9. The Delay Time and Objective Function (Cycle length) from Model 1

Scenario	Cycle length (sec)	Delay time (sec/veh)
1-1	118	88.3
1-2	68	99.6
1-3	52	44.1
2-1	50	125.0
2-2	50	96.8
2-3	71	119.3

Model 3의 교통량비 최소화 목적함수는 전체 교통량이 동일한 경우인 시나리오 1의 경우(Table 10)는 좌회전 교통량 비율이 감소할수록 교통량 비, 신호주기, 지체시간 모두 감소되는 것으로 나타났다. 그리고 교통량비

가 작아질수록 신호주기, 지체시간이 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시한 모형의 목적함수인 교통량비 최소화가 지체시간 최소화를 잘 반영해준다고 할 수 있다.

그러나 전체 교통량과 좌회전 교통량이 접근로별로 서로 다른 시나리오 2의 경우(Table 10)는 교통량비가 증가할수록 신호주기는 증가하였으나 지체시간의 경우는 1개 경우를 제외하고 지체시간이 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 접근로별로 교통량이 다양함에 따른 최적화 결과도 복잡하게 산정된 결과라 판단된다.

Table 10. The Result from Model 3

Scenario	Flow ratio (v/s)	Cycle length (sec)	Delay time (sec/veh)	LOS
1-1	0.91	118	83.5	E
1-2	0.84	68	74.0	E
1-3	0.77	52	45.7	C
2-1	0.86	118	101.5	F
2-2	0.74	79	56.6	D
2-3	0.91	119	59.0	D

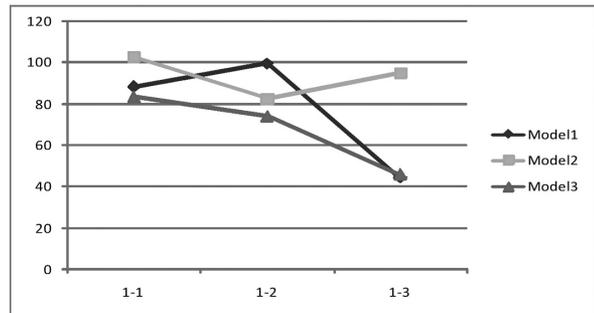


Fig. 2 Numbering Convention for Arms and Lanes

교통량비와 산정된 신호주기와 상관계수는 0.79로 상관관계가 크게 분석되고, 지체시간과의 상관계수는 0.53으로 신호주기와 지체시간 상관계수 -0.005 보다 훨씬 크게 산정되었다. 따라서 Model 3의 교통량비 최소화 목적함수는 Model 1의 신호주기 최소화 목적함수보다 지체시간을 잘 반영해주는 것으로 평가된다.

3.3.2. 지체시간

모형 평가는 신호교차로의 서비스 수준 평가지표인 평균지체시간으로 평가하였다(Table 11). 전체 교통량이 동일한 시나리오 1의 경우 좌회전 교통량이 적을수록 Model 3은 지체시간이 감소되는 것으로 나타났으나, 다른 두 모형은 특정한 패턴을 보이지 않는 것으로

나타났다. 지체시간은 시나리오 1-1과 1-2의 경우는 Model 3이 지체시간이 가장 작게 나타났고 시나리오 1-3의 경우는 Model 1이 가장 작은 것으로 나타났으나 Model 3과 거의 비슷한 수준을 보여 Model 3이 가장 우수한 것으로 나타났다. Model 1이 2개의 시나리오에서 Model 2보다 지체시간이 작게 나타나 신호주기가 가장 큰 용량최대모형인 Model 2가 가장 나쁜 것으로 나타났다.

Table 11. Average Delay Time by TRANSYT-7F for Scenario 1 (Unit : sec/veh)

	1-1	1-2	1-3
Model 1	88.3	99.6	44.1
Model 2	102.5	82.6	95.0
Model 3	83.5	74.0	45.7

접근로별로 회전 교통량이 상이한 시나리오 2의 경우는 시나리오 1에 비해 모형별 지체시간 차이가 큰 것으로 나타났는데 이는 교통량이 다양한 결과라 할 수 있다 (Table 12). 지체시간은 시나리오 2-2와 2-3의 경우 Model 3이 지체시간이 가장 작게 산정되었으며, 시나리오 2-1의 경우는 Model 2가 가장 작게 나타나 가장 우수한 것으로 분석되었다. 그러나 시나리오 1과는 달리 신호주기가 최대값으로 산정된 Model 2가 신호주기가 가장 작은 신호주기 최소화 Model 1보다 모두 지체시간이 작게 산정되어 Model 1이 가장 나쁘게 나타났다. 한편 Model 3의 신호주기는 시나리오 1보다 전체 교통량이 적은 시나리오 2가 큰 것으로 나타났다. 따라서 접근로별 회전방향별 교통량이 다양할수록 큰 신호

Table 12. Average Delay Time by TRANSYT-7F for Scenario 2 (Unit : sec/veh)

	2-1	2-2	2-3
Model 1	125.0	96.8	119.3
Model 2	68.8	79.4	90.0
Model 3	101.5	56.6	59.0

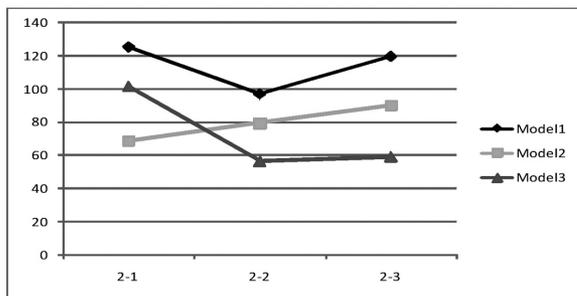


Fig. 3 Numbering Convention for Arms and Lanes

주기가 지체시간을 줄여주는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 차로별 신호를 최적화함으로써 4지교차로에서의 차로운영과 신호를 동시에 최적화하는 선형 계획법을 이용한 BMILP(Binary Mixed Integer Linear Proms)모형을 제시하였다. 제시된 모형은 4지교차로에서의 모든 접근로와 차로들에 대한 개별적인 신호시간을 산정해주게 된다. 차로별 신호 최적화 모형은 목적함수에 따라 신호주기 최소화 모형(Model 1), 여유용량 최대화 모형(Model 2), 교통량비 최소화 모형(Model 3) 등의 3가지 모형으로 구분된다. 모형 평가 결과에 의하면 교통량이 동일한 경우는 Model 3, Model 1, Model 2 순으로 지체시간이 증가되고, 교통량이 다른 경우는 Model 3, Model 2, Model 1 순으로 나타나 Model 3이 전체적으로 가장 작은 지체시간을 산정해주는 것으로 나타났다. 신호주기의 경우는 Model 2, Model 3, Model 1 순으로 감소되는 것으로 나타났다. 특히 Model 2의 경우는 모두 최대 신호주기가 최적으로 산정되어 교통량 변화에 따른 신호주기 변화를 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 Model 3은 지체시간 최소화에서도 가장 효과가 있고 신호주기의 경우에도 다른 두 모형과는 달리 극단적인 값을 보여주지 않아 교통량 변화에 따른 신호시간을 가장 잘 반영해준다고 할 수 있다.

따라서 Model 3은 지체시간을 최소화하는 교차로의 차로 배정과 신호시간을 동시에 최적화하여 신호교차로의 서비스 수준 향상에 기여할 수 있다. 또한 교차로의 효율적인 설계 및 운영방안 도출 등으로 효율적인 도로 계획 및 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 비포화 상태로 운영되는 독립교차로를 대상으로 하였다. 향후 연구과제로는 수 개의 교차로를 연동으로 처리할 수 있는 계통신호에 적용할 수 있도록 확장되어 나가야 할 것이다. 또한 교차로의 서비스 수준 척도로 많이 활용되고 있는 지체시간 등을 목적함수로 모형 내에 포함하는 연구 등이 이루어져야 할 것이다.

REFERENCE

- Importa G. and Cantarella G. E. (1984), Control System Design for An Individual Signalized Junction, Transportation Research 18B(2), 147-167
- Kim, Dong Jae et al. (2002), Development of An Optimal Lane Assignment Model, Journal of Korean Society of

- Transportation, Vol. 20, No. 7, 87-94.
- Kim J. H., Shin E. K.(2013), A Study on Operation Methodology of A Signalized Intersection Based on Optimization of Lane-Uses, International Journal of Highway Engineering, Vol. 15 No. 6, 49-60.
- Kim Y. C. (1990), Development of Optimization Models for Signalized Intersection during Oversaturated Conditions, Ph. D. dissertation, Texas A&M University.
- Korean Society of Transportation (2004), Korean Highway Capacity Manual.
- Lam, W. H. K., Poon, A. C. K and Mung, G. K. S (1997), Integrated Model For Lane-use and Signal-phase Designs, ASCE Journal of Transportation Engineering 123.
- Schrage, L. (1986), User's Manual for Linear Integer and Quadratic Programming with Lindo, The Scientific Press.
- Wallace, C. E., et al. (1998), TRANSYT-7F User's Guides, FHWA, U.S Department of Transportation.
- Webster, F. V. (1958), "Traffic Signal Settings," Road Research Technical Report No. 39, London, United Kingdom.
- Webster, F. V. and Cobbe, B. M. (1966), Traffic Signals, Road Research Technical Paper No. 56, Road Research Laboratory, London.
- Wong, C. K. & Wong, S. C. (2003), Lane-based Optimization of Signal Timings for Isolated Junctions, Transportation Research Part B 37, 63-84.