

차로배정 최적화를 고려한 신호교차로 운영방안에 관한 연구

A Study on Operation Methodology of A Signalized Intersection Based on Optimization of Lane-Uses

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

정희원 · 안양대학교 도시정보공학과 교수 (E-mail: jhkim@anyang.ac.kr)
(주)한국해외기술공사 교통부 전무이사 (E-mail: mousesek@hanmail.net)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to propose delay-minimizing operation methodology of a signalized intersection based upon optimization of lane-uses on approaching lanes for an intersection.

METHODS : For the optimization model of lane-uses, a set of constraints are set up to ensure feasibility and safety of the lane-uses, traffic flow, and signal settings. Minimization of demand to saturation flow ratio of a dual-ring signal control system is introduced to the objective function for delay minimization and effective signal operation. Using the optimized lane-uses, signal timings are optimized by delay-based model of TRANSYT-7F.

RESULTS : It was found that the proposed objective function is great relation with delay time for an intersection. From the experimental results, the method was approved to be effective in reducing delay time. Especially, cases for two left-turn lanes reduced greater delays than those for a left turn lane. It is noticed that the cases for different traffic volume by approach reduced greater delays than those for the same traffic volume by approach.

CONCLUSIONS : It was concluded that the objective function is proper for lane-uses optimizing model and the operation method is effective in reducing delay time for signalized intersections.

Keywords

objective function, lane-uses, movement, flow ratio, through-car equivalent

Corresponding Author : Kim, Ju Hyun, Professor
Department of Urban Information Engineering, Anyang University,
22 Samdeokro 37beon-gil, Manan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do
430-714, Korea
Tel : +82.31.467.084 Fax : +82.31.469.6646
E-mail : jhkim@anyang.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 연구배경

신호교차로의 서비스수준은 교통량 외에 차로수, 차로배정(Lane-uses) 등의 기하조건과 신호시간 등에 영향을 받는다. 그러나 이러한 조건들을 모두 고려하여 최적의 신호시간을 설계한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 이

로 인하여 주어진 기하조건 하에서 교통량에 따른 신호시간을 최적화하게 된다. 그러나 교통량과 신호시간 및 차로 수가 동일하더라도 차로배정에 따라 서비스수준은 크게 달라질 수 있다. 신호교차로가 최적의 서비스수준을 유지하기 위해서는 주어진 교통량과 차로 수 조건에

서 차로배정과 신호시간이 적정하게 제공되어야 한다. 따라서 차로배정을 고정시킨 상태에서 신호시간만의 최적화로는 최상의 서비스수준을 확보하기 어렵다. 또한 교통량의 변화에 대처하기 위하여 실시간 감응제어 등과 같은 신호시스템 등이 도입되고 있으나 신호시간만으로 크게 변화하는 교통량의 변화를 효율적으로 처리하는 데는 한계가 있다. 그러므로 이러한 모든 조건들이 최적의 조화를 이룰 때 신호교차로의 최대서비스수준을 얻을 수 있다. 한편, 대부분의 교차로 서비스수준 분석에서는 주어진 기하조건을 토대로 교통량과 신호시간을 입력하여 분석하게 된다. 예를 들어 신호최적화모형으로 널리 사용되고 있는 TRANSYT-7F를 사용할 경우 차로배정에 따른 모든 경우 수에 대하여 각각 최적화를 수행하여야 한다. 그리고 도로용량편람에서는 서비스수준 분석이나 신호시간을 계획하기 전에 차로군을 설정하고 있지만 접근로별로 독립적으로 차로군을 설정하게 되어 대향 접근로 등 교차로 전체를 고려한 적정 차로군을 찾는 데는 한계가 있다. 이는 각 접근로별로 차로군을 설정하게 되어 대향 접근로 등 교차로 전체를 고려한 적정 차로군을 찾는 것이 불가능할 뿐만 아니라 시간이 너무 많이 소요되게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 대향 접근로는 물론 모든 접근로의 차로배정을 동시에 산정하면서 지체시간을 최소화하는 모형을 제시하고 타당성을 평가하고자 한다.

2. 관련 연구 검토

2.1. 관련 연구 고찰

김동재 등(2002)(이후 Kim모형)은 주어진 교통량에서 포화도가 1을 넘지 않도록 차로배정을 달리하면서 Transyt-7F를 이용하여 접근로의 평균제어지체가 최소화 될 때의 차로배정을 결정하여 방향별 교통량에 따른 적정 차로수를 결정하는 모형을 개발하였다. 그리고 직·좌 동시신호 운영은 분리신호로 운영될 때보다 비효율적인 신호운영방식으로 간주하여 모형에서 제외되었다. 그러나 어느 접근로의 차로배정은 대향접근로의 차로배정에 상호 영향을 미치게 되는 데 Kim모형은 대향 접근로 등 다른 접근로를 고려하지 않고 개별 접근로별로 차로배정이 산정되게 되어 교차로 전체의 차로배정을 최적화한다고 할 수 없다. 그리고 직·좌 동시신호가 차로배정을 고려할 때 항상 분리신호보다 비효율적인 것만은 아니다.

C.K Wong 등(2003) (이후 Wong모형)은 모든 접근

로의 차로별 차로배정과 신호시간을 산정하기 위하여 신호주기를 최소화하거나 여유용량을 최대화하는 차로별 차로배정과 신호시간을 동시에 최적화하는 모형을 개발하였다. 따라서 Kim모형과는 달리 대향접근로는 물론 직진과 좌회전 공용차로를 모두 고려할 수 있다. Webster(1966)가 제시한 신호주기 변화에 따른 지체시간은 교통량이 증가할수록 지체를 최소화 해주는 신호주기는 증가하고, 동일 교통량에서는 지체를 최소화해주는 신호주기보다 작거나 클수록 지체시간이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 신호주기가 작을수록 지체시간이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 신호주기 최소화가 지체시간 최소화를 보장해주지는 못한다. 그리고 여유용량 최대화는 신호주기를 크게 하는 경향이 있어 지체시간을 최소화하는 데는 한계가 있다.

2.2. 관련 연구와의 차별화

본 연구의 목적은 2.1절의 관련 연구들의 문제점을 극복하고 신호교차로의 서비스수준 평가지표인 지체시간을 최소화하는 차로배정과 신호시간을 산정하는 방안을 제시하는 데 있다. 이를 위해 대향차로 및 직진과 좌회전 공용차로배정이 가능한 Wong모형에서 차로배정과 관련된 모형을 활용하되 지체시간을 반영할 수 있는 새로운 목적함수를 도입한 차로배정모형을 제시한다. 그리고 신호시간도 차로배정과 동시에 산정되는 Wong모형과는 달리 신호시간 산정은 별도로 차로배정모형으로 산정된 차로배정을 적용하여 지체도 모형인 TRANSYT-7F를 활용한 최적화로 지체시간이 최소화 되도록 한다.

3. 차로배정모형 구축

3.1. 제약조건

Wong모형에서 차로배정과 관련된 모형은 다음과 같다. 모형에 적용되는 교차로 기하 관련 변수들은 다음과 같다.

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

여기서, $i=1, 2, \dots, N_T$, $j=1, 2, \dots, N_T-1$ 로 반시계 방향으로 진행하면서 숫자 증가(Fig. 1에서 $i=1, 2, 3$,

4; $j=1, 2, 3$)

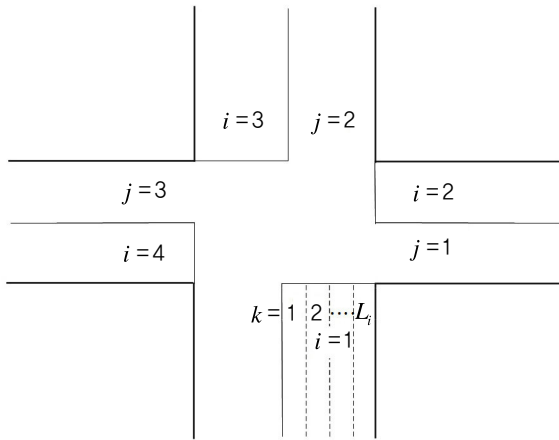


Fig. 1 Numbering Convention for Arms and Lanes

3.1.1. 차로별 이동류 모형

어느 접근로에서 이동류들은 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 회전하는 교통량, δ_{ijk} =이진변수(binary integer)로 i 접근로 k 차로에서 j 접근로로 회전이 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.

3.1.2. 교통량 보존 모형

어느 접근로에서 동일한 회전방향에 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.

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

여기서, u = 여유용량 계수 ($u \geq 1$, $u-1$ = 여유용량)로 교통수요 증가 및 적정소통수준 유지를 위해 적용

3.1.3. 교차로 유입부별 이동류 모형

어느 이동류의 최대 이용가능 차로수는 그 이동류를 받아주는 교차로 유출부의 차로 수(EL_j)를 초과해서는 안 된다.

$$EL_i \geq \sum_{k=1}^{L_i} \delta_{ijk} \quad (4)$$

그리고 어느 차로는 한 개 이동류 만이 이용할 수도 있지만 수 개의 이동류(직진, 좌회전, 우회전 등)가 함께 이용할 수도 있으므로 차로별 허용 이동류 수 조건식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{N_T-1} \delta_{ijk} \geq 1 \quad (5)$$

3.1.4. 인접 차로간 이동류 모형

어느 접근로에서 차로들을 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. (6)이 필요하다.

$$1 - \delta_{ijk} \geq \delta_{imk+1} \geq \delta_{ijk} - 1 \quad (6)$$

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

3.1.5. 이동류의 차로별 교통량 모형

차로이용과 서비스수준이 효율적으로 이루어지도록 동일 이동류가 이용하는 차로들의 교통량비(교통량/포화교통량)는 동일하도록 하였다. 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 회전반경, $f_{ijk} : i$ 접근로 k 차로를 이용하는 전체 교통량에 대한 j 접근로로 회전하는 교통량 비율

즉 차로이용 형태별 교통량비 산정 Eq. (10)과 차로별 이동류 이용 유무 산정식 Eq. (1)에 의해 각 차로의 차로이용형태에 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, $k=1, \dots, L_i-1; i=1, \dots, N_T$

3.2. 목적함수

선형계획법으로 구성된 Wong모형은 비선형함수인 지체시간 대신 Eq. (12)의 신호주기(C) 최소화 또는 여유용량(u) 최대화 등을 목적함수로 도입하였다.

$$\max u(or, 1/C) \quad (12)$$

그러나 Eq. (12)의 목적함수가 2.1절에서 언급한 Webster이론과 같이 신호교차로의 지체시간을 최소화 하는데 어려움이 있기 때문에 본 논문에서는 보다 더 지체시간 최소화 개념이 반영될 수 있는 목적함수를 도입한다. 차로배정은 신호현시 등 신호조건 결정에 영향을 주게 된다. 따라서 본 모형에서는 도로별 중첩현시가 가능한 효율적인 신호운영이 가능토록 NEMA 체계의 dual ring 조건을 만족하도록 한다. 즉, Fig. 1에서 서로 진행 시에 상충이 발생하는 직진과 좌회전을 쌍으로 하는 도로별 동반현시군 중 Eq. (13) and Eqs. (14)에 의해 산정되는 교통량비가 큰 쌍의 합이 최소화되도록 한다. Eq. (13) and Eqs. (14)는 조건식으로 중괄호안의 두 개 값 중에서 큰 값이 산정되게 된다.

$$Y_{ew} = \max\{(y_{i_3L_i} + y_{i_1}), (y_{i_1L_i} + y_{i_3})\} \quad (13)$$

$$Y_{ns} = \max\{(y_{i_4L_i} + y_{i_2}), (y_{i_2L_i} + y_{i_4})\} \quad (14)$$

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 직진차로에 해당된다.

위 두 식은 조건식으로 선형식이 아니기 때문에 이진 변수를 도입하여 선형화 기법으로 널리 사용되는 기존의 방법을 인용하여 다음과 같이 선형화 한다. Eq. (13), Eq. (14)의 경우 각각 Eq. (15)~Eq. (18), Eq. (19)~Eq. (22) 등 8개식으로 대체된다.

$$Y_{ew} \geq y_{i_3L_i} + y_{i_1} \quad (15)$$

$$Y_{ew} \geq y_{i_1L_i} + y_{i_3} \quad (16)$$

$$Y_{ew} - (y_{i_3L_i} + y_{i_1}) \leq M\beta_{ew} \quad (17)$$

$$Y_{ew} - (y_{i_1L_i} + y_{i_3}) \leq M(1 - \beta_{ew}) \quad (18)$$

$$Y_{ns} \geq y_{i_4L_i} + y_{i_2} \quad (19)$$

$$Y_{ns} \geq y_{i_2L_i} + y_{i_4} \quad (20)$$

$$Y_{ns} - (y_{i_4L_i} + y_{i_2}) \leq M\beta_{ns} \quad (21)$$

$$Y_{ns} - (y_{i_2L_i} + y_{i_4}) \leq M(1 - \beta_{ns}) \quad (22)$$

여기서, Y_{ew} , β_{ns} 는 이진변수

그리고 도로별 임계 교통량비의 합은 Eq. (23)을 만족하도록 한다.

$$Y_{ew} + Y_{ns} \leq y_{\max} \quad (23)$$

여기서, y_{\max} = 교차로 허용 최대 교통량비 (≤ 1)

지체를 최소화해주는 Webster가 산정한 신호주기 산정식은 Eq. (24)와 같다. Eq. (24)에 의하면 신호교차로에서 가장 효율적인 현시는 현시별 임계 교통량비의 합이 가장 작아야 한다.

$$C = \frac{1.5LT + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_{ph_i}} \quad (24)$$

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

따라서 본 모형에서는 지체를 최소화해 줄 수 있는 가장 작은 신호주기를 산정해주는 차로이용형태를 산정하기 위하여 dual ring 조건에서 임계 이동류의 교통량비 합을 최소화하는 Eq. (25)를 목적함수로 도입한다.

$$\min(k_1 Y_{ew} + k_2 Y_{ns}) \quad (25)$$

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 좌회전 교통량에 대한 보정은 Table 1과 같은 도로용량편람의 좌회전 차로 수 및 차로형태에 따라 보정해주는 좌회전 자체 보정계수를 Eq. (10)에 추가하여 Eq. (26)과 같이 산정되도록 한다.

Table 1. 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

$$y_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{T-1}} (1 + 1.5/r_{ijk}) E_{ijk} q_{ijk}}{S_{ik}^T J_{ik}^w f_{hv} f_i^g} \quad (26)$$

여기서, E_{ijk} = 도로용량편람의 좌회전 자체 직진환산계수로 좌회전인 경우만 적용되고 나머지 이동류인 경우는 항상 1임, $y_{ik} = i$ 접근로의 k 차로의 교통량비, $f_{ik}^w = i$

접근로 k 차로의 차로폭 보정계수, f_{hv} = 중차량 보정계수, $f_i^g = i$ 접근로의 경사에 대한 보정계수

그런데 좌회전 자체의 직진환산계수의 경우 Table 1과 같이 경우에 따라 각각 산정되기 때문에 두 개의 이진변수를 도입하여 Eq. (27)과 같은 선형식으로 구현한다.

$$E_i^{L1} = 1.03 - 0.03\delta_{ij_2} + 0.02\delta_{ij_{+12}} \quad (27)$$

여기서, δ_{ij_2} 와 $\delta_{ij_{+12}}$ 는 2차로의 차로배정이 직진(ij) 또는 좌회전 ($ij+1$)을 나타내는 이진변수

Eq. (27)에 의해 $\delta_{ij_2} = 1, \delta_{ij_{+12}} = 0$ 이면 2차로는 직진이 되어 1차로는 좌회전 전용차로이든가 직·좌공용차로가 되어 $E_i^L = 1.0$ 이 되고, $\delta_{ij_2} = 1, \delta_{ij_{+12}} = 1$ 이면 2차로가 직·좌공용차로가 되어 1차로는 좌회전차로가 된 공용좌회전 차로수가 2가 되어 1.02가 되고, $\delta_{ij_2} = 0, \delta_{ij_{+12}} = 1$ 이면 2차로가 좌회전차로로 전용좌회전 차로 수 2가 되어 1.05가 산정되어 Table 1을 만족시키게 된다. 이렇게 산정된 모형식은 차로이용 형태와 좌회전 자체보정계수를 결정하는 이진변수, 도로별 임계이동류를 결정해주는 이진변수와 교통량 및 교통량비를 산정하는 연속변수로 구성되는 다음과 같은 수식으로 구성되는 혼합정수선형계획법(MILP; Mixed Integer Linear Program)으로 구성된다.

목적함수 : Eq. (25)

제약조건 : Eq. (1)~Eq. (3), Eq. (4)~Eq. (6),

Eq. (11), Eq. (15)~Eq. (23),

Eq. (26)~Eq. (27)

4. 모형 적용 및 평가

4.1. 시나리오 작성

Kim모형은 TRANSYT-7F를 사용하여 Fig. 2와 같이 지체가 최소화되는 차로배정을 산정하였다. 본 연구에서는 제시된 모형을 적용하여 적용 결과로 산정된 차로배정 결과가 타당한지를 평가하기 위하여 Kim모형의 차로배정 결과와 비교·평가한다. 차로배정 결과를 평가하기 위해서는 교통량에 대한 다양한 시나리오가 설정되어야 한다. 이를 위하여 다양한 차로군 산정이 가능하도록 편도 4개 차로로 충분하게 가정하고 접근로별 회전교통량은 Kim모형의 차로배정 산정기준 교통량 (pcph)(Fig. 2)을 이용하여 Table 2와 같이 7개의 시나리오를 선정한다. 시나리오 1은 Kim모형의 직진 2차로

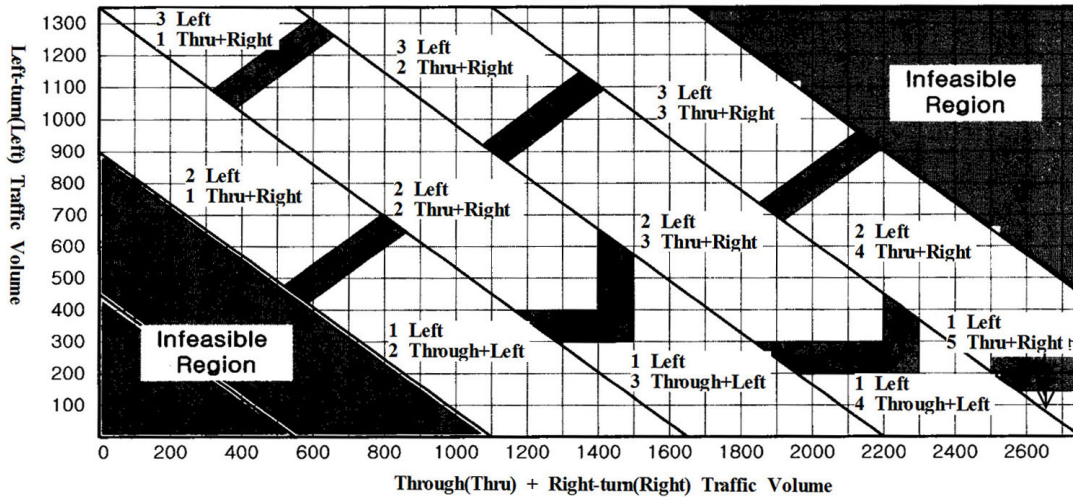


Fig. 2 Traffic Volumes for Assignments of Lane-uses by Kim Model

Table 2. Traffic Volumes for Tests (Unit : pcph)

Scenario	Movement	East Bound		West Bound		North Bound		South Bound	
		Lanes	Volume	Lanes	Volume	Lanes	Volume	Lanes	Volume
1-1	Through	2	1200	2	1200	2	1200	2	1200
	Left	2	700	2	700	2	700	2	700
1-2	Through	2	1400	2	1200	2	1400	2	1200
	Left	2	600	2	500	2	500	2	700
2-1	Through	3	1800	3	1800	3	1800	3	1800
	Left	1	300	1	300	1	300	1	300
2-2	Through	3	1600	3	1800	3	1600	3	1800
	Left	1	400	1	200	1	200	1	300
3	Through	2	1400	3	1800	2	1400	3	1800
	Left	2	600	1	200	2	500	1	300
4	Through	3	1400	2	1200	2	1400	3	1200
	Left	2	700	2	700	2	600	2	900
5	Through	3	1600	3	1800	3	1600	3	1800
	Left	2	600	1	300	1	200	2	400

좌회전 2차로 배정 교통량으로, 시나리오 1-1은 모든 접근로 교통량이 동일한 시나리오이고 시나리오 1-2는 접근로별로 교통량이 다른 시나리오이다. 시나리오 2는 직진 3차로 좌회전1차로 배정 교통량으로 시나리오 2-1은 모든 접근로 교통량이 동일한 시나리오이고, 시나리오 2-2는 접근로별로 교통량이 다른 시나리오이다. 시나리오 3은 직진 2차로 좌회전 2차로와 직진 3차로 좌회전 1차로 교통량이 혼합된 시나리오이다. 그리고 시나리오 4와 시나리오 5는 2개 접근로에서 Kim모형으로 5개 차로가 필요한 교통량 시나리오로, 시나리오 4는 직진 2차로 좌회전 2차로 배정 교통량과 직진 3차로 좌회전 2차로 배정 교통량이 혼합된 시나리오이고

시나리오5는 직진 3차로 좌회전 1차로 배정 교통량과 직진 3차로 좌회전 2차로 배정 교통량이 혼합된 시나리오이다. 시나리오 4와 시나리오 5의 경우에도 본 모형에는 4개 차로로 적용하여 비교·평가한다.

4.2. 모형 적용 결과

4.2.1. 차로배정 최적화 결과

본 모형을 적용하여 산정된 차로배정 결과는 Table 3~Table 5와 같다. Kim모형의 좌회전 전용 2차로/직진 2차로인 경우(시나리오 1-1, 1-2)에는 모든 모형에서 좌회전이 가능한 차로는 두 개 차로로 산정되었다. 그러나 본 모형으로 산정된 차로배정 결과는 공용좌회전 2차로/직진 2차로로 Kim모형과 다르게 산정되었다.

Kim모형의 좌회전전용 1차로/직진 3차로인 경우(시나리오 2-1, 2-2)와 직진 2차로 좌회전 2차로와 직진 3차로 좌회전 1차로 교통량이 혼합된 시나리오 3의 경우에는 본 모형 적용 결과와 동일하게 차로배정이 산정되었다.

Kim모형에 의해 좌회전용 2차로/직진 2차로 및 좌회전전용 2차로/직진 3차로 혼합교통량(시나리오 4), 좌회전용 1차로/직진 3차로 및 좌회전용 2차로/직진 3차로 혼합교통량(시나리오 5)의 경우에는 차로배정을 비교하는 것이 의미가 없지만 서로 다르게 산정되었다. 시나리오 4의 경우 차로수에 상관없이 좌회전전용 2차로가 공용좌회전 2차로로 산정되었다. 시나리오 5의 경우는 South Bound가 좌회전전용 2차로에서 좌회전전용 1차로로 다르게 산정되었다. 따라서 Kim모형의 좌회전전용 2차로의 경우에는 본 모형은 Kim모형에 비해 직진차로 용량이 크게 차로배정이 이루어지는 것으로 나타났다.

Table 3. Lane-uses for Scenario 1

Scenario	Lane	East Bound		West Bound		North Bound		South Bound	
		Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model
		←	←	←	←	←	←	←	←
1-1	4	←	←	←	←	←	←	←	←
	3	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	↖	↘	↖	↘	↖	↘	↖	↘
	1	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
1-2	4	←	←	←	←	←	←	←	←
	3	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	↖	↘	↖	↘	↖	↘	↖	↘
	1	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖

Table 4. Lane-uses for Scenario 2, 3

Scenario	Lane	East Bound		West Bound		North Bound		South Bound	
		Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model
		←	←	←	←	←	←	←	←
2-1	4	←	←	←	←	←	←	←	←
	3	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	←	←	←	←	←	←	←	←
	1	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
2-2	4	←	←	←	←	←	←	←	←
	3	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	←	←	←	←	←	←	←	←
	1	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
3	4	←	←	←	←	←	←	←	←
	3	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	↖	↖	←	←	↖	↖	←	←
	1	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖

Table 5. Lane-uses for Scenario 4, 5

Scenario	Lane	East Bound		West Bound		North Bound		South Bound	
		Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model	Kim model	Proposed model
		←	←	←	←	←	←	←	←
4	5	←	-	-	-	-	-	←	-
	4	←	←	←	←	←	←	←	←
	3	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	↖	↘	↖	↘	↖	↘	↖	↘
	1	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
5	5	←	-	-	-	-	-	←	-
	4	←	←	←	←	←	←	←	←
	3	←	←	←	←	←	←	←	←
	2	↖	↖	←	←	←	←	↖	←
	1	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖

4.2.2. 신호시간 최적화 결과

각 모형으로 산정된 차로배정 결과를 이용하여 TRANSYT-7F로 최적화한 신호시간은 Table 6과 같다. 차로배정이 동일하게 산정된 시나리오 2-1, 2-2, 3을 제외한 시나리오에 있어서는 신호주기는 모두 다르게 산정되었다. 신호주기 크기는 Kim모형이 큰 경우가 2개, 제안모형이 큰 경우가 2개로 나타났다. 현시는 차로배정이 다른 4개 시나리오 중 3개 시나리오(1-1, 1-2, 4)는 다르게 산정되었고 시나리오 5의 경우는 동일하게 산정되었다. 즉, 차로배정이 다르면 대부분 신호주기와 현시가 다르게 최적화 되므로 차로배정은 신호운영에 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다.

Table 6. Signal Timmings by TRANSYT-7F (Unit : sec)

Scenario	Model	Phase					Cycle Length
		1	2	3	4	5	
1-1	Kim Model	↖↘	↕	↖↘	↔		100
	Proposed Model	↖	↘	↕	↘		120
1-2	Kim Model	↕	↖↘	↕	↔	↘	110
	Proposed Model	↖	↘	↕	↘		100
2-1	Kim Model	↖↘	↕	↖↘	↔		100
	Proposed Model	↖↘	↕	↖↘	↔		100
2-2	Kim Model	↖↘	↕	↖↘	↔		100
	Proposed Model	↖↘	↕	↖↘	↔		100
3	Kim Model	↖↘	↕	↖↘	↔		100
	Proposed Model	↖↘	↕	↖↘	↔		100
4	Kim Model	↖↘	↕	↖↘	↔		100
	Proposed Model	↘	↖	↕	↘		140
5	Kim Model	↕	↖↘	↘	↔	↕	130
	Proposed Model	↕	↖↘	↕	↔	↘	120

4.3. 모형 평가

4.3.1. 목적함수 평가

Fig. 3에서 본 모형의 목적함수인 임계 교통량비의 합과 지체시간 변화를 살펴보면 서로 비례관계로 변화 패턴이 비슷하게 나타나 상호 밀접한 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 임계 교통량비가 증가할수록 지체시간도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 이 두 변수들 간의 상관관계는 상관계수(R^2)가 0.94로 아주 큰 것으로 나타났다. 따라서 본 모형에서 목적함수로 도입한 임계 교통량비의 최소화는 신호운영 시 신호교차로의 평가지표인 지체시간을 최소화하는데 크게 기여한다고 할 수 있다.

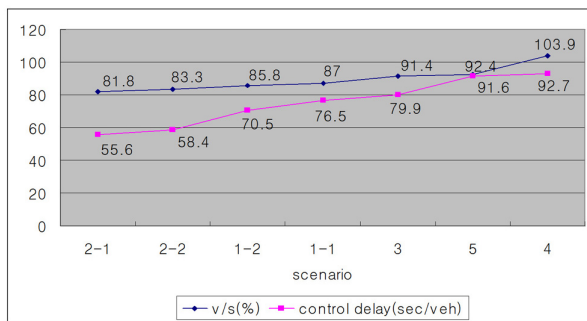


Fig. 3 Ratios of Volume to Saturation Flow (v/s) and Control Delay Times for Examples

4.3.2. 지체시간 평가

본 연구에서 제시된 모형은 차로배정과 신호시간산정 모형인 Wong모형 중 차로배정 관련 모형의 일부 수정과 새로운 목적함수를 도입한 차로배정모형으로 두 모형의 최적화 대상이 다르기 때문에 객관적인 모형평가를 위하여 제시된 모형과 같은 차로배정모형인 Kim모형과의 비교·평가를 수행하였다.

모형을 적용하여 얻어진 차로배정 결과를 토대로 TRANSYT-7F를 활용하여 지체시간 최소화 신호시간을 최적화하여 얻어진 평균제어지체를 비교한 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. Control Delay for Cases (Unit : second/vehicle)

Scenario	1		2		3	4	5
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1		
Kim model	85.2	79.9	55.6	58.4	79.9	102.4	52.1
Proposed model	76.5	70.5	55.6	58.4	79.9	103.9	91.6

좌회전 2차로인 시나리오 1의 경우에는 본 모형이 Kim모형보다 지체시간이 10% 이상 짧은 것으로 나타

났다. 특히 접근로별로 교통량이 동일한 1-1보다 교통량이 상이한 1-2의 경우가 지체감소 효과가 큰 것으로 나타났다. 좌회전차로가 1차로인 시나리오 2의 경우는 차로배정이 동일하게 산정되어 지체시간은 동일하게 나타났다. 접근로별로 좌회전 차로수가 2차로 및 1차로로 상이한 시나리오 3의 경우에도 차로배정이 동일하게 산정되어 지체시간이 동일하게 나타났다. 즉, 동일한 차로수로 분석한 경우에는 본 모형의 적용으로 Kim모형 적용시보다 지체시간이 같거나 작게 산정되어 차로이용 형태가 적절하게 산정되는 것으로 분석되었다. 한편, Kim모형으로 5차로가 필요한 접근로가 존재하는 시나리오4의 경우에 본 모형으로는 1개 차로가 적은 4차로로 운영을 하여도 지체시간이 각각 102.4초/대, 103.9초/대로 비슷한 것으로 분석되었다. 그리고 시나리오 5의 경우에는 본 모형 적용시 1차로 적게 4차로로 운영을 해도 서비스수준 E 수준으로 분석되었다. 이는 접근로별로 차로이용을 결정하는 Kim모형에 비해 본 모형은 대향차로 등 다른 접근로의 영향을 동시에 고려하면서 차로이용을 최적화하는데 따른 것으로 분석된다. 이로 인하여 접근로별로 교통량이 상이할수록 좌회전 교통량이 많을수록 본 모형의 적용효과는 큰 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 신호교차로의 최적 운영을 위해서 모든 접근로의 차로배정을 최적화하고 산정된 차로배정을 이용하여 TRANSYT-7F로 신호시간을 최적화하는 방안을 제시하였다. 제시된 차로배정모형은 Wong모형을 서로 상충이 발생하는 직진과 좌회전을 쌍으로 하는 도로별 동반현시군 중 큰 쌍의 교통량비 합을 최소화하는 목적함수를 도입하여 수정하고 좌회전 이동류의 교통량비를 보다 상세하게 반영하기 위하여 도로용량편람의 좌회전 차로 수 및 좌회전 형태에 따라 보정해주는 좌회전 자체 보정계수를 추가하였다.

본 연구에서 제시된 목적함수는 지체시간과 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되어 신호교차로의 지체시간 최소화에 크게 기여할 것으로 예상된다. 그리고 차로수가 동일한 평가 시나리오에 있어서는 본 연구에서 제안한 모형으로 적용 시 Kim모형 적용 시보다 지체시간이 같거나 짧게 산정이 되어 차로이용 형태가 효과적으로 산정되는 것으로 분석되었다. 특히, 접근로별로 교통량이 다르거나 좌회전 차로 수가 많을수록 지체 감소 효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 제시된 모형은 Kim모형에서 제외한 직진과 좌회전 공용차로를 포함하고, 접근

로별로 차로이용을 결정하는 기존 모형들에 비해 대향 차로 등 다른 접근로의 영향을 동시에 고려하면서 차로 이용을 최적화하는데 따른 것으로 분석된다. 따라서 개별 접근로만을 고려하여 차로군을 설정하는 것은 최적의 결과를 낼 수 없다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 제시된 차로배정모형은 새로운 교차로 계획 단계에서 차로배정을 결정하는데 매우 효율적으로 적용될 수 있다. 그러나 차로배정은 신호운영에 중요한 영향을 미치게 되므로 향후에는 신호시간까지 최적화하는 모형 연구가 필요하다. 그리고 본 연구는 독립교차로를 대상으로 하였지만 향후에는 수 개의 교차로를 연동으로 처리할 수 있는 연동신호에도 적용할 수 있도록 확장되어 나가야 할 것이다. 또한 교차로의 서비스수준 척도로 많이 활용되고 있는 지체시간 함수를 목적함수로 모형 내에 포함하는 연구 등이 이루어져야 할 것이다.

References

- Korean Society of Transportation (2004), *Korean Highway Capacity Manual*.
- Kim, Dong Jae et al. (2002), Development of An Optimal Lane Assignment Model. *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 20, No. 7, pp. 87-94.
- Wong, C.K.& Wong, S.C. (2003), *Lane-based Optimization of Signal Timings for Isolated Junctions*. *Transportation Research Part B* 37, pp. 63-84.
- Schrage, L. (1986), *User's Manual for Linear Integer and Quadratic Programming with Lindo*. The Scientific Press.
- Wallace, C.E., et al. (1991), *TRANSYT-7F User's Guide*. Transportation Research Center, University of Florida, Gainesville, Florida.
- Webster, F.V. and Cobbe. B.M. (1966), *Traffic Signals*. *Road Research Technical Paper No. 56*, Road Research Laboratory, London.
- Webster, F.V., "Traffic Signal Settings," *Road Research Technical Report No. 39*, London, United Kingdom, 1958.
- 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.

(Received : July 16 2013, Revised : July 23 2013, Accepted : Oct. 1 2013)