

교차로 지체 균형을 위한 통행시간 기반 신호 제어 연구

A Singal Control Study Based on Travel Time for the Balance of Delay

한여희

(서울시립대학교, 석사과정)

김영찬

(서울시립대학교, 교수)

문학룡

(건설기술연구원, 선임연구원)

Key Words : 통행시간, 환산 교통량, 지체시간

목 차

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

2. 연구의 내용 및 범위

II. 이론적 배경 검토

1. HCM 2000 delay model

2. Webster's Green Split

III. 통행시간 기반 신호제어 알고리즘 개발

1. 알고리즘 기본개념

2. 알고리즘 개발모형

IV. 알고리즘 검증

1. 시나리오 구성

2. 시나리오 분석 결과

V. 결론 및 향후 연구과제

참고문헌

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

현재 신호교차로는 각 방향별 교통량의 비율에 따라 신호시간을 배분한다. 교통량이 많은 방향으로 신호시간을 많이 배분한다. 이를 운영하기 위해서 각 도로에 검지기를 매설하여 교통량을 수집하여야 하는데, 이러한 신호제어방법에는 몇 가지 한계가 드러난다.

신호시간 배분을 위하여 필요한 교통량은 그 교차로 수요교통량인데 반해 검지기를 통해 수집되는 교통량은 통과 교통량이다. 신호시간 배분시 수요교통량이 많은 방향에 신호시간을 더 많이 주어야 양방향 균형이 이루어진다. 그러나 많은 교통량으로 인해 차량의 지체가 발생하여 검지기를 통과하는 교통량이 적게 되면 신호시간 배분 시 그 적은 통과교통량을 사용하여 오류가 발생한다.

또한 검지기를 매설하는데 드는 설치비용이 비싸고 이를 운영하고 유지관리 하는데 어려움이 따른다. 검지기를 모든 도로에 설치할 수가 없어 중요교차로나 대표차로의 교통량을 수집하고 있어 그 외의 교차로는 교통량 정보의 수집이 이루어지고 있지 않다.

이러한 현 신호제어전략의 한계와 더불어, 최근 ITS와 텔레매틱스의 발전 및 활성화에 따라 보다 정확하고 신속한 구간 통행시간 정보의 수집이 이루어지고 있으며 이를 통한 정보의 제공도 활발하다. 이에 따라 통행시간 정보를 이용한 신호제어 전략을 수립하여 효과적인 신호교차로 운영을 도모하고자 한다.

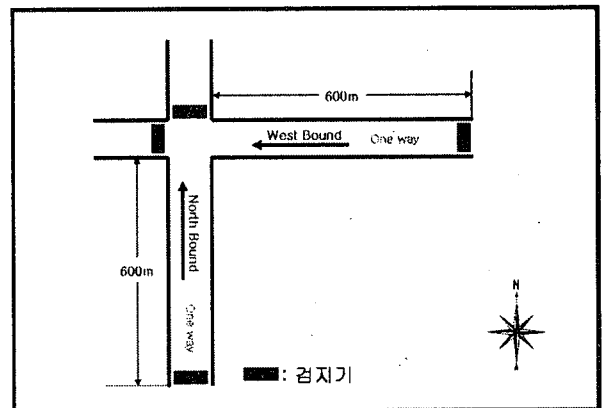
2. 연구의 내용 및 범위

새로운 신호제어 전략은 교차로 각 방향의 균형을 맞추는데

주안점을 두고 연구를 진행한다. 교차로 균형의 초점은 운전자가 가장 민감하게 느끼는 시간으로 하였다. 운전자의 입장에서 어느 도로에서 운전하게 되더라도 자신이 피해를 입는다고 생각하지 않아야 하기 때문이다. 한 교차로를 예로 들었을 때, 주방향이나 부방향에서 신호를 기다리는 운전자가 느끼는 지체를 비슷하게 한다는 것이다.

이를 만족하기 위해서는 통행시간 자료를 활용해야 한다. 교차로의 수요 교통량을 표현하기 위해서 그 교차로의 통행시간 자료를 기반으로 한 환산교통량을 사용하여 현 신호제어전략의 한계를 극복하고자 한다.

본 연구에서는 새로운 모형개발에 주안점을 두어 연구범위를 독립교차로로 제한하고 일방통행 1차로를 대상으로 연구하였다.



<그림 1> 연구 공간적 범위

II. 이론적 배경 검토

통행시간 기반 제어 알고리즘은 차량의 지체에 가장 민감하다. 따라서 delay 개념을 가장 잘 나타낸 HCM delay식을 이용하여 알고리즘을 연구하였다. 신호시간 배분은 신뢰성을 높이기 위해 현재 널리 쓰이고 있는 Webster's Green Split을 사용하였다.

1. HCM 2000 delay model

1) 지체 (Delay)

분석기간 동안에 도착한 차량에 대한 평균제어지체를 뜻한다. 제어지체에는 접근부의 감속지체 및 정지지체, 출발시의 가속지체를 모두 합한 접근지체를 말하여 분석기간 시작 전에 남아 있는 대기행렬에 의한 영향도 포함된다.

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3$$

여기서,

d 차량 당 평균제어지체 [s/veh]

d_1 균일 제어지체 [s/veh]

PF 신호연동에 의한 연동보정계수

(독립교차로 : 연동계수 $PF=1$)

d_2 증분지체 [s/veh]

d_3 추가지체 [s/veh]

2) 균일지체 (Uniform Delay)

차량이 일정하게 도착한다고 가정했을 때의 지체를 말한다. 이는 Webster's delay 식의 첫 번째 term에 기초를 두고 있다.

$$d_1 = \frac{0.5C(1 - \frac{g}{C})^2}{1 - [\min(1, X) \frac{g}{C}]}$$

여기서,

d_1 균일 제어지체 [s/veh]

C = 신호주기 [s]

g = 유효녹색시간 [s]

X = 포화도 (= v/c)

3) 증분지체 (Incremental Delay)

과포화로 인한 'oversaturation delay'와 비균일 도착과 신호제어실패에 따른 'random delay'로 구성된다.

$$d_2 = 900T \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kX}{cT}} \right]$$

여기서,

d_2 증분지체 [s/veh]

T 분석기간 [h]

k 증분지체계수 (비감응식 제어이기 때문에 0.5)

f 상류부 보정계수 (증분지체의 보정계수인 1.0)

c 용량 [veh/h]

4) 추가지체 (Supplemental Delay)

분석 전 과포화로 인한 초기 대기행렬 때문에 발생한다.

$$d_3 = \frac{1800Q_b(1+u)t}{cT}$$

여기서,

d_3 추가지체 [s/veh]

Q_b = 분석기간 시작 시점의 초기 대기 행렬 [veh]

f = 분석기간 동안 수요 불충족 기간 [h]

$t=0$ if $Q_b=0$,

else $t = \text{Min} \left[T, \frac{Q_b}{c(1 - \text{Min}(1, X))} \right]$

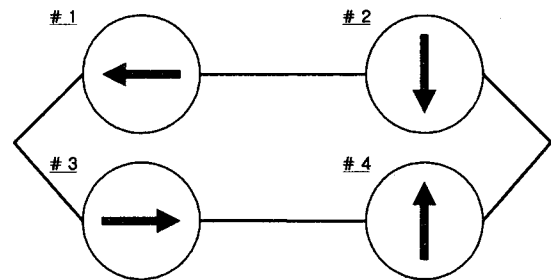
u 지체변수

$u=0$ if $t < T$,

else $u = 1 - \frac{cT}{Q_b} [1 - \text{Min}(1, X)]$

2. Webster's Green Split

Webster 이론을 바탕으로 한 신호시간분할을 살펴본다. 2 현시라 가정하고 교통량이 더 많은 현시를 critical path로 설정하여 식을 유도한다.



<그림 2> 연구대상 교차로의 현시

임계차로를 현시1과 현시2로 가정하면 $\phi_1 + \phi_2 = C$ 이다. 포화도(x)와 교통량비(y)를 다음과 같이 정의한다.

$$x_i = (v/c)_i = \frac{v_i}{s_i \frac{g_i}{C}} \Rightarrow g_i = \frac{v_i}{s_i} \cdot \frac{C}{x_i} = \frac{y_i}{x_i} C$$

$$x_1 = x_2 = X_c, \quad y_1 + y_2 = \sum y$$

위의 정의를 바탕으로 녹색 분할식을 정리한다.

$$(G + Y + AR)_1 + (G + Y + AR)_2 = C$$

$$(g + l)_1 + (g + l)_2 = C$$

$$(g_1 + g_2) + (l_1 + l_2) = C$$

$$g_1 + g_2 = C - L$$

$$\frac{y_1}{x_1} + \frac{y_2}{x_2} = \frac{C - L}{C}$$

$$\frac{\sum y}{X_c} = \frac{C - L}{C}$$

$$\therefore g_i = \frac{y_i}{\sum y} (C - L)$$

III. 통행시간 기반 신호제어 알고리즘 개발

1. 알고리즘 기본개념

각 방향별 도로의 기본 데이터를 바탕으로 지체시간을 계산한 후, 통행시간을 교통량으로 환산한다. 이 교통량으로 신호시간 배분을 한다. 4단계로 나누어 진행하였다.

○ Step 1 : 초기 데이터 입력 값 설정

$$C, s, D, V_f, T$$

$$WB\lambda, c, v, Q_b$$

$$NB\lambda, c, v, Q_b$$

○ Step 2 : 통행시간 산출

초기 v, Q_b 와 λ 를 통해 방향별 TT 를 산출한다.

$$TT = D/V_f + d$$

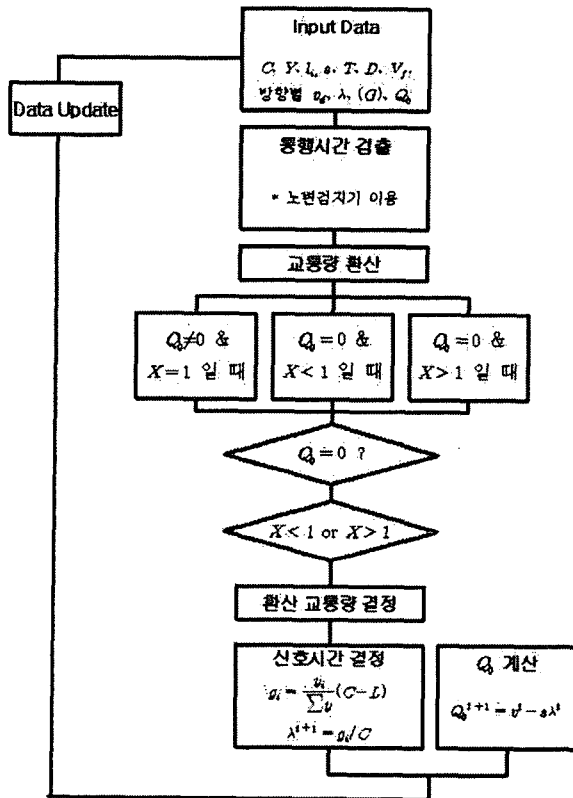
○ Step 3 : v 산출 (HCM delay 이용)

Q_b 와 $X (=v/c)$ 판단에 따라 case별로 식을 산정한다.

○ Step 4 : 방향별 v 에 따른 신호시간 g 배분

(Webster 식 이용)

$$g = \frac{y}{\sum y} (C - L) \text{ 을 통해 신호시간 } g \text{ 를 배분}$$



<그림 3> 알고리즘 순서도

※ '*노변검지기 이용'은 본 연구단계에서 얻을수 없기 때문에 $TT = d + D/V_f$ 를 이용하여 계산된 값을 사용한다.

2. 알고리즘 개발모형

초기 잔여 대기행렬과 교차로 포화도에 따라 6가지 경우로 나누어 정리하였다. 알고리즘을 간단하게 정리하기 위하여 영향이 미비하면서 복잡한 식은 가정하거나 생략하였다. 이는 분석시간마다 갱신되기 때문에 해당 분석시간 동안 위의 과정으로 인해 생기는 오차는 그 다음 주기에서 다시 반영되기 때문에 영향이 작다고 판단하였다.

1) $Q_b = 0$ 이고, $X < 1$ 일 때,

$$d_1 = \frac{0.5C(1-\lambda)^2}{1-v/s}$$

$$d_2 = 900T \left[(v/c-1) + \sqrt{(v/c-1)^2 + \frac{4V}{c^2T}} \right]$$

$$d_3 = 0$$

(d_2 의 $\sqrt{\quad}$ 부분의 영향은 미비하다고 판단하여 0으로 본다.)

$d = d_1 + d_2 + d_3$ 에 각 값을 대입하면,

$$[900T]v^2 + [-900Ts - cd - 900cT]v + [c\{d + 900T - 0.5C(1-\lambda)^2\}] = 0$$

여기서, 각 계수들을 A, B, C로 치환한 후, v 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$A = 900T$$

$$B = -(900Ts + cd + 900cT)$$

$$C = c\{d + 900T - 0.5C(1-\lambda)^2\}$$

$$v = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

2) $Q_b = 0$ 이고, $X = 1$ 일 때,

$X = 1$ 이기 때문에 $v = c$ 이다.

v 를 정리하면 $v = c = s\lambda$ 이다.

3) $Q_b = 0$ 이고, $X > 1$ 일 때,

$$d_1 = 0.5C(1-\lambda)$$

$$d_2 = 900T \left[(v/c-1) + \sqrt{(v/c-1)^2 + \frac{4V}{c^2T}} \right]$$

$$d_3 = 0$$

(d_2 의 부분의 영향은 미비하다고 판단하여 0으로 본다.)

$d = d_1 + d_2 + d_3$ 에 각 값을 대입하여 v 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$v = c \left[\frac{d - 0.5C(1-\lambda)}{900T} + 1 \right]$$

4) $Q_b \neq 0$ 이고, $X < 1$ 일 때,

$$\begin{aligned} \cdot d_1 &= \frac{0.5C(1-\lambda)^2}{1-v/s} \\ \cdot d_2 &= 900T \left[(v/c-1) + \sqrt{(v/c-1)^2 + \frac{4V}{c^2T}} \right] \\ \cdot d_3 &= \frac{1800Q_b^2}{c^2(1-v/c)T} \end{aligned}$$

($t = \frac{Q_b}{c(1-v/c)}$ 이고, $u=0$ 일 때)

$$\cdot d_3 = \frac{1800Q_b}{c} \left\{ 2 - \frac{cT(1-v/c)}{Q_b} \right\}$$

($t = T$ 이고, $u = 1 - \frac{cT}{Q_b}(1-v/c)$ 일 때)

이 경우에 d_3 에서 v/c 의 값에 따라 t 의 값이 달라지기 때문에 2가지의 경우로 나눌 수 있다.

5) $Q_b \neq 0$ 이고, $X=1$ 일 때,

$$\begin{aligned} \cdot d_1 &= 0.5C(1-\lambda) \\ \cdot d_2 &= 900T \sqrt{\frac{4}{cT}} \\ \cdot d_3 &= \frac{3600Q_b}{c} \quad (t=T \text{ 이고, } u=1 \text{ 일 때}) \end{aligned}$$

$d = d_1 + d_2 + d_3$ 에 각 값을 대입하여 Q_b 에 관하여 정리한다.

$$Q_b = \frac{c(d-d_1-d_2)}{3600} = \frac{c \left(d - 0.5C(1-\lambda) - 900T \sqrt{\frac{4}{cT}} \right)}{3600}$$

따라서 v 에 관하여 정리하면 $v = c + Q_b$ 이다.

6) $Q_b \neq 0$ 이고, $X > 1$ 일 때,

$$\begin{aligned} \cdot d_1 &= 0.5C(1-\lambda) \\ \cdot d_2 &= 900T \left[(v/c-1) + \sqrt{(v/c-1)^2 + \frac{4V}{c^2T}} \right] \\ \cdot d_3 &= \frac{3600Q_b}{c} \quad (t=T \text{ 이고, } u=1 \text{ 일 때}) \end{aligned}$$

위의 6가지의 경우에 따라 v 에 관하여 정리한 식을 이용하여 신호시간배분하기 위한 교통량 값을 산출한다. 단, $Q_b \neq 0$ 일 때는 Q_b 라는 변수가 있기 때문에 v 라는 변수가 없어야 Q_b 를 구할 수 있다. 따라서, '4)'와 '6)'의 경우에는 식이 너무 복잡해지기 때문에 두 개의 변수를 산출할 수 없어 '5)'의 경우만 생각한다.

IV. 알고리즘 검증

1. 시나리오 구성

알고리즘의 4단계 과정을 진행하여 알고리즘 신뢰도를 검증한다. 우선 다음과 같이 초기 입력 값을 설정한다.

<표 1> 초기 입력 값 가정

	WB	NB
양방향 데이터	$C=100$ 초, $Y=4$ 초, $l_i=4$ 초, $T=0.25$ 시, $s=2000$ 대/시, $D=600m$, $V_j=50km/h$	
방향별 데이터	$v_d=1200$ 대/시 $\lambda_{WB}=0.7$ $Q_b=0$ 대/주기	$v_d=500$ 대/시 $\lambda_{NB}=0.22$ $Q_b=0$ 대/주기

개발한 알고리즘을 바탕으로 포화도(X)의 변화에 따른 3가지의 시나리오를 구성한다. 시나리오 1은 주방향 및 부방향의 포화도가 1보다 작은 경우, 시나리오 2는 주방향의 포화도는 1보다 작고 부방향의 포화도는 1보다 큰 경우, 그리고 시나리오 3은 주방향 및 부방향의 포화도가 1보다 큰 경우로 구성하였다.

2. 시나리오 분석 결과

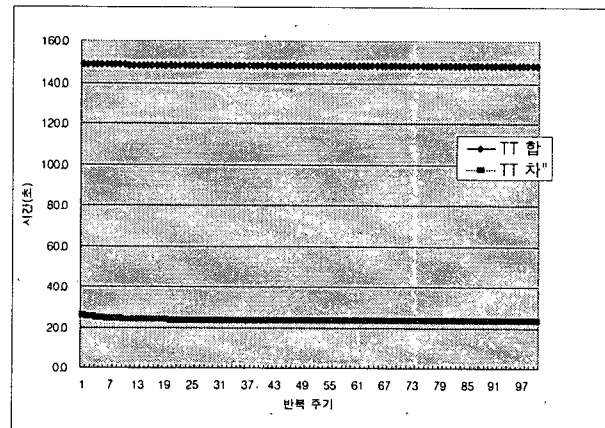
1) 테스트 결과 자료

각 시나리오의 테스트 분석결과 자료는 다음과 같다.

(1) 시나리오 #1 ($X_{WB} < 1$, $X_{NB} < 1$ 인 경우)

<표 2> Test #1 결과

초기 입력값	WB(주방향)				NB(부방향)			
	$v_d=1200$ 대/시, $Q_b=0$, $\lambda=0.7$				$v_d=300$ 대/시, $Q_b=0$, $\lambda=0.22$			
	WB	NB	WB	NB	WB	NB	WB	NB
주기	λ	λ	Q_b	Q_b	TT	TT	TT합	TT차
10	0.70	0.22	0.00	0.00	61.4	87.3	148.7	-25.9
20	0.70	0.22	0.62	0.24	62.1	86.2	148.3	-24.1
30	0.69	0.23	0.65	0.23	62.3	85.9	148.2	-23.6
40	0.69	0.23	0.66	0.22	62.4	85.8	148.2	-23.4
50	0.69	0.23	0.66	0.22	62.4	85.8	148.2	-23.3
60	0.69	0.23	0.66	0.22	62.4	85.7	148.2	-23.3
70	0.69	0.23	0.66	0.22	62.4	85.7	148.2	-23.3
80	0.69	0.23	0.66	0.22	62.4	85.7	148.2	-23.3
90	0.69	0.23	0.66	0.22	62.4	85.7	148.2	-23.3
100	0.69	0.23	0.66	0.22	62.4	85.7	148.2	-23.3

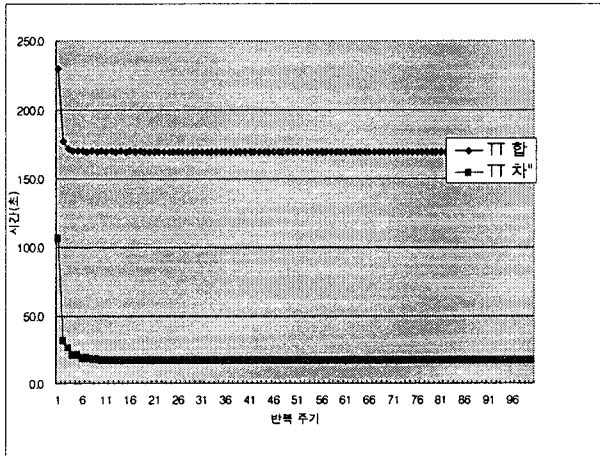


<그림 4> Test #1 결과 그래프

(2) 시나리오 #2 ($X_{WB} < 1, X_{NB} > 1$ 인 경우)

<표 3> Test #2 결과

초기 입력값	WB(주방향)				NB(부방향)			
	$v_d=1200$ 대/시, $Q_b=0, \lambda=0.7$				$v_d=400$ 대/시, $Q_b=0, \lambda=0.22$			
	WB	NB	WB	NB	WB	NB	WB	NB
주기	λ	λ	Q_b	Q_b	TT	TT	TT합	TT차
10	0.70	0.22	0.00	0.00	61.4	168.0	229.4	-106.5
20	0.63	0.29	2.19	1.05	76.2	93.5	169.7	-17.3
30	0.63	0.29	2.23	1.02	76.4	93.3	169.7	-16.9
40	0.63	0.29	2.24	1.02	76.4	93.3	169.7	-16.9
50	0.63	0.29	2.24	1.02	76.4	93.3	169.7	-16.9
60	0.63	0.29	2.24	1.02	76.4	93.3	169.7	-16.9
70	0.63	0.29	2.24	1.02	76.4	93.3	169.7	-16.9
80	0.63	0.29	2.24	1.02	76.4	93.3	169.7	-16.9
90	0.63	0.29	2.24	1.02	76.4	93.3	169.7	-16.9
100	0.63	0.29	2.24	1.02	76.4	93.3	169.7	-16.9

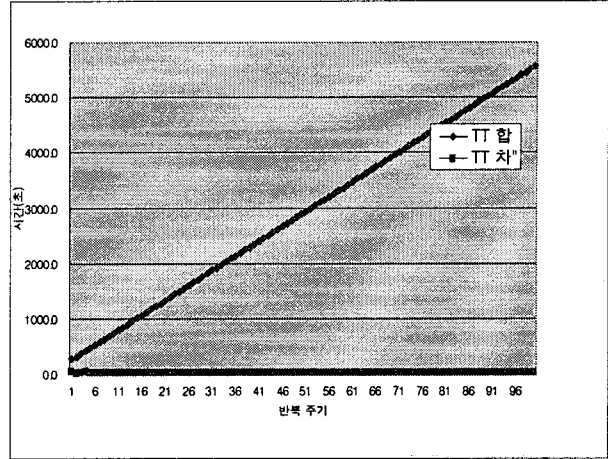


<그림 5> Test #2 결과 그래프

(3) 시나리오 #3 ($X_{WB} > 1, X_{NB} > 1$ 인 경우)

<표 4> Test #3 결과

초기 입력값	WB(주방향)				NB(부방향)			
	$v_d=1200$ 대/시, $Q_b=0, \lambda=0.7$				$v_d=500$ 대/시, $Q_b=0, \lambda=0.22$			
	WB	NB	WB	NB	WB	NB	WB	NB
주기	λ	λ	Q_b	Q_b	TT	TT	TT합	TT차
10	0.70	0.22	0.00	0.00	103.9	168.0	271.9	-64.1
20	0.69	0.23	92.19	30.63	350.2	390.3	740.5	-40.1
30	0.69	0.23	195.14	64.74	618.2	659.1	1277.2	-40.9
40	0.69	0.23	298.06	98.89	886.3	927.2	1813.6	-40.9
50	0.69	0.23	400.98	133.03	1154.5	1195.4	2349.9	-40.9
60	0.69	0.23	503.90	167.18	1422.7	1463.6	2886.2	-40.9
70	0.69	0.23	606.82	201.32	1690.8	1731.7	3422.6	-40.9
80	0.69	0.23	709.74	235.47	1959.0	1999.9	3958.9	-40.9
90	0.69	0.23	812.66	269.62	2227.2	2268.1	4495.3	-40.9
100	0.69	0.23	915.58	303.76	2495.4	2536.3	5031.6	-40.9



<그림 6> Test #3 결과 그래프

2) 테스트 결과 분석

본 연구에 실은 테스트에는 수요교통량의 변화에 따른 결과만 나타났다. 신호시간비율이나 초기대기행렬길어도 조정하면서 결과를 본 결과 같은 양상이 나타났기 때문이다.

위의 결과를 정리하면, 양방향 교통량이 적은 경우 ($X < 1$)는 양방향 소통에 문제가 나타나지 않기 때문에 신호시간이 초기치와 거의 유사하고 양방향 지체균형도 잘 맞는다.

한쪽 방향에만 교통량이 과포화 될 경우에는 교통량이 많은 쪽으로 녹색시간을 더 많이 분할을 하기 때문에 용량이 커져 지체가 떨어진다. 이와 더불어 양방향 지체의 균형을 이루게 된다.

양 방향 과포화시에는 교통량이 둘 다 많기 때문에 신호시간에는 별다른 영향을 끼치지 않는다. 지체의 균형은 이루지만 양방향 지체가 심해져 결국 심한 정체를 일으키게 된다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 통행시간 기반으로 신호제어전략 알고리즘을 개발하여 양방향 지체의 균형을 이루도록 하였다. 기존의 교통량 기반 신호제어전략은 검지기에 드는 비용과 올바른 교통량을 수집하지 못하는 한계가 있었다. 따라서 통과교통량이 아닌 수요교통량으로 신호시간 조절을 하기 위하여 양방향 통행시간 자료를 토대로 녹색시간 분할을 하였다. 간단한 현상상황을 설정하여 알고리즘을 테스트 한 결과 양방향 통행시간 균형을 이루는데는 어느 정도 성과를 이루었다.

그러나 본 연구에서 테스트한 환경은 현장감이 다소 저하되는 대상을 공간적 범위로 설정하였다. 이에 네트워크를 대상으로 하여 연동을 고려하고 각 방향별 현상이 존재하는 교차로를 대상으로 연구하여야 한다. 또한 검증단계에서 simulation의 활용으로 노변검지기의 구간통행시간 데이터 값을 얻어 신뢰성을 입증해야 하고 지체 감소를 위한 신호주기 변동에 관한 연구도 필요하다.

또한 알고리즘 개발에 있어 가장 중요한 환산교통량에 대한 식에서 오차검증과 각 case 범주에 들지 않는 예제를 검

증하여야 한다. 마지막으로 문제점으로 지적된 녹색시간 분할 방법에 대하여 Webster의 방법이 아닌 다른 방법을 고려하는 것도 필요하다.

따라서 본 연구를 토대로 연구를 계속 진행시켜 현장에 적용할 수 있는 알고리즘 개발을 위해 보다 깊이 있는 연구가 필요하겠다.

참고문헌

1. Highway Capacity Manual 2000.,Transportation Research Board.
2. Roger P. Roess, Elena S. Prassas and William R. McShane, Traffic Engineering, Pearson Prentice Hall, 2004