공학석사 학위논문

실시간 주기별 교차로 신호체계 최적화에 따른 지체변화에 관한 연구

Delay Shifts of Real-time Cycle-based Signal System Optimization on the Signalized Intersections

지도교수 金 殆 坤

2001年 2月

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

토 목 환 경 공 학 과 車 鎭 豊

Delay Shifts of Real-time Cycle-based Signal System Optimization on the Signalized Intersections

Jin Pung, Cha

Department of Civil and Environmental Engineering,
Graduate School, Korea Maritime University, Pusan Korea

ABSTRACT

Today the arterials play a key role in urban transportation. However, they experience a severe congestion with the upstream or downstream traffic on the signalized intersections regardless of the peak periods. Thus, the purpose of this study is to identify the real-time cycle-based traffic characteristics, analyze the real-time cycle-based delay and the existing hour-based delay shifts by the simulation delay model and finally suggest the necessity of the operation of the real-time cycle-based signalized intersections in urban area.

From the transportation system analyses, and the real-time cycle-based delay and the existing hour-based delay analyses by the simulation delay model on the signalized intersections, the following results were obtained:

i) Traffic flow did not show a distinct difference depending on the time periods. Rather, more traffic flows were concentrated on the signalized intersections in the non-peak periods when compared with the on-peak periods.

ii) The delay shifts were also shown to be a big difference of 30% to 80% between the real-time cycle-based signal and the existing hour-based signal operations before and after optimization processes depending on the time periods.

iii) The delay showed the maximum deviation of 20 percentage between the real-time cycle-based signal and the existing hour-based signal operations by the simulation process depending on the time periods.

iv) The real-time cycle-based signal operation was shown to have a higher explanatory power than the existing hour-based signal operation through the simulation and optimization processes depending on the time periods.

목 차

NOMENCLATURE

B_i	A binary variable which is '1' if the maximum back of queue (q_i) exceeds the user specified storage capacity, or zero otherwise
C	Cycle length in sec
c	Capacity of lane group or approach in vph
D	Total delay in $veh - hr/hr$
d_i	Delay on link i in $veh - hr$
DI	Disutility Index
D_i	Delay of lane group or approach i in $\sec/veh$
D_{rs}	Random and saturation delay
D_u	Uniform delay in $veh - hr/hr$
f_a	Adjustment factor for area type
f_{bb}	Adjustment factor for the blocking effect of local buses stopping within the intersection area
f_g	Adjustment factor for approach grade
f_{HV}	Adjustment factor for heavy vehicles
f_{LT}	Adjustment factor for left turns
f_p	Adjustment factor for the existence of a parking lane

f_{RT}	Adjustment factor for right turns
f_w	Adjustment factor for lane width
g/C	Green ratio for lane group or approach
$(g/C)_i$	Effective green ratio for cycle length of lane group or approach i
g_i	Effective green time for lane group or approach i in sec
K	A user coded "stop penalty" factor to express the importance of stops relative to delay
L	Total lost time per cycle computed as the sum of "start up" and change interval lost time minus the portion of the change interval used by vehicles for each critical signal phase
LOS	Level of Service
m_t	Queue length during step t
N	Number of steps in the Cycle
N_L	Number of lanes
PCU	Passenger Car Unit
PHF	Peak Hour Factor
q_i	Computed maximum back of queue on link i
q_{ci}	Maximum back of queue "capacity" on link i

Q	A binary varialbe set by the user which if '1' includes the maximum back of queue penalty in the DI, or zero otherwise
S	Stops
S_i	Stop on link i in $stops/\sec$
s	Saturation flow rate for lane group or approach in vph
s_i	Saturation flow rate of lane group or approach i in sec vph
s_o	Ideal saturation flow rate(1,900 pcphgpl)
T	Period length, normally 60 minutes
V	Hourly traffic volume in vph
V_{15}	Traffic volume during peak 15-min period in vph
$(v/c)_i$	Traffic flow rate of lane group or approach i in vph
U_i	A binary variable which is '1' if the link-to-link weighting has been established for link i, or zero otherwise
W_{di}, W_{si}	Link specific weighting factors for delay(d) and stops(s) for link i
W_q	A network-wide "penalty" applied to the excess queue "spillover"
X	Degree of saturation
X_c	Critical v/c ratio for a intersection
X_i	v/c ratio of lane group or approach i
$\sum_j (v/s)_j$	The summation of flow ratios for all critical lane group or approach j

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

오늘날 경제성장과 더불어 생활수준의 향상으로 통행수요가 날로 급증하고 있는 상황하에서 도시지역의 간선도로(arterial)는 지역교통의 중추 역할을 담당하고 있다. 그러나, 대부분의 간선도로는 차량들의 집중으로 인하여 출퇴근시간대에 관계없이 극심한 교통체증에 시달리고 있고, 더구나 간선도로의 교통체계가 교통특성에 부적절하게 설계 · 운영되고있기 때문에 간선도로의 교통체증이 더욱 가중되고 있는 실정이다.

본 연구대상인 부산지역은 배산임해의 항구도시이자 남북방향의 대상형 도시로서 우리 나라의 주요 대도시들 중에서 도로율이 17%로 가장 낮고, 게다가 낮은 도로율에 비하여 연평균 20%이상의 높은 차량증가율을 보이고 있다. 특히, 부산지역에서는 간선도로의 60%를 차지하는 이면도로의 계층구조(hierarchy)와 도로의 각 계층 상호간에 연계체계가 제대로 형성되어있지 못하기 때문에 간선도로를 포함한 대부분의 도로상에서 여러가지 교통문제를 겪고있다. 그러나, 부산지역의 이러한 교통문제를 해결하기 위한 새로운 도로의 확충은 많은 어려움이 있다. 왜냐하면, 새로이 도로를 건설하는 데에는 막대한 재원과 함께 오랜 기간이 요구되며, 더구나 새로이 도로를 건설하더라도 또 다른 통행수요를 유발함으로써 교통문제를 완전히 해결할 수 없기 때문이다. 그러므로, 부산지역에서는 투자재원의 허용범위 내에서 새로운 도로건설과 병행하여 기존 간선도로의 교통체계를 효율적으로 설계 · 운영함으로써 간선도로의 교통체증을 감소시킬 수 있는 교통체계개선(transportation systems management, TSM)방안에 대한 보다 심도 있는 연구가 중요한 연구과제로 대두되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 연구대상 신호교차로로 선정된 부산지역 간선도로의 3지와 4지 신호교차로를 중심으로 실시간의 교통체계분석을 실시하고, 시뮬레이션 지체

모형을 이용한 실시간의 지체 현황분석과 최적화분석을 실시하며, 마지막으로 연구대상 신호교차로에 대한 실시간의 주기별 지체분석 결과와 시간별 지체분석 결과를 상호 비교함으로써 실시간 주기별 교차로 운영체계의 타당성을 제시하고자한다.

1. 2 기존 연구 고찰

본 연구와 관련된 연구에서 미국의 W. H. Kraft[1)]의 연구에 따르면, 간선도로와 국지도로 신호체계의 효율적인 운영으로 지체가 15%정도 감소하였고, 또한 차량통행의 개선으로 도로용량을 15%정도 증대시킬 수 있었으며, 특히 부도심지역에서는 간선도로상의 좌회전 차로(left-turn lane)를 증대시키고 주차로 인한 마찰을 감소시키며 신호체계의 최적설계를 통해서 도로용량을 50%까지 증대시킬 수 있었다고 보고함으로써 간선도로의 효율성과 용량증대를 위해서는 교차로 신호체계의 최적설계에 대한 필요성을 역설하였다. 또한, 미국의 A. K. Rathi와 E. B. Lieberman[2)]은 도시지역내 간선도로상의 신호교차로 유효녹색시간(effective green time)을 적절히 조절하면 지체를 약 39.9%정도 줄일 수 있고, 또한 통행량도 약 7.1%정도 증대시킬 수 있다고 보고함으로써 신호체계개선의 중요성을 역설하였다.

미국교통학회(Institute of Transportation Engineer, ITS) 기술 소위원회 보고서(4A-24)[3)]에 따르면, 간선도로의 신호교차로상에 접근하는 차량의 대기행렬(queue)이 처리할 수 없을 정도로 지나치게 길 경우, 대기행렬의 길이를 줄일 수 있는 가장 간단하면서도 직접적인 해결방법으로는 신호교차로의 녹색시간비(green-to-cycle length ratio, g/C)를 증가시키는 것인데, 이와 같이 신호교차로의 녹색시간비(g/C)를 증가시키는 것은 항상 접근하는 차량의 대기행렬을 줄어들게 하였다고 보고함으로써 신호교차로의 신호체계분석에 있어서 녹색시간비에 대한 심도 있는 분석이 필요하다는 사실을 역설하였다. 또한, 김아영[4)]의 연구에 따르면, 신호교차로에 대한 최적화분석(optimization)을 통해 평균지체시간이 약 57%정도 감소하였다고 보고함으로써 최적의 신호교차로 운영체계 구축의 필요성을 강조하였다.

유충식[5])은 기존에 신호시간 최적화를 위해 주로 이용되어 왔던 최적화방법들을 탈피해 진화 알고리즘의 하나인 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 신호시간 요소들을 최적화 시키는 모형을 제시하였다. 또한, 신언교[6])는 최대통과폭모형인 PASSER-Ⅱ와 지체최소화 모형인 TRANSYT-7F의 단점을 극복하여 지체를 최소화할 수 있는 새로운 신호시간계획모형을 구축하였다.

김태곤[7])과 이은진[8])의 연구에 따르면, 부산지역 간선도로에 대한 신호체계의 최적설계를 통해서 차량의 정지지체가 약 68%정도 감소하는 것으로 나타났고, 현시의 재배열과 현시시간의 조절을 통해서 차량의 정지지체가 약 67%정도 감소하는 것으로 나타났다고 보고함으로써 간선도로의 효율적인 운영을 위해 교차로 신호체계의 최적설계에 대한 필요성을 제시하였다.

1. 3. 자료 수집 및 연구 방법

본 연구에서의 자료수집은 부산지역 간선도로상의 신호교차로 중 3지 교차로 세 개 ⅰ) 구시청앞 삼거리(이하 A), ⅱ) 과정 삼거리(이하 B), ⅲ) 동산 삼거리(이하 C), 4지 교차로 세 개 ⅳ) 부산대학병원 사거리(이하 D), ⅴ) 백병원 앞 사거리(이하 E), ⅵ) 세원 사거리(이하 F) 등 여섯 개를 선정하여 1일 8시간씩 2000년 3월부터 6월까지 4개월에 걸쳐 총 144시간 실시간으로 반복 관측하였다. 또한, 수집된 자료를 바탕으로 실시간의 교통체계분석(통행체계분석, 도로체계분석 및 신호체계분석, 서비스 수준 분석, 교통량 흐름도 분석)을 실시하였으며, 실시간의 교통체계분석결과와 TRANSYT-7F[9])의 지체모형을 이용하여 계산된 지체특성에 대해 실시간의 주기(cycle)별 현황분석과 최적화분석, 그리고 시간별 현황분석과 최적화분석의 결과를 상호 비교 분석하여 실시간의 주기별 교차로 운영체계의 타당성을 검토하였다.

2. 교통 체계 분석

본 연구에서는 실시간 조사한 교통량을 바탕으로 첨두시간대 교통량의 집중 및 첨두시간계수, 각 방향별 통행량분포에 대한 통행체계분석, 교차로 기하구조의 특성에 대한 도로체계분석, 교차로 신호체계의 특성에 대한 신호체계분석을 실시하였다. 또한, 연구대상 3지, 4지 교차로에 있어서 주기별·시간별 소통체계에 대한 현황분석(simulation)과 최적화분석(optimization)을 실시하였다.

2.1 통행 체계 분석

본 연구대상 신호교차로에 대해 통행체계를 분석하기 위하여 2000년 3월에서 6월까지 3지, 4지 각각의 교차로에서 관측한 교통량을 하루 4개의 시간대 즉, 오전 첨두시간대(AM On-peak ; 07:00 09:00), 오전 비첨두시간대(AM Off-peak ; 10:00 12:00). 오후 비첨두시간대(PM On-peak ; 14:00 16:00), 그리고 오후 첨두시간대(PM On-peak ; 18:00 20:00)로 분류하였다. 특히, 실시간에 관측된 차종별 교통량에 미국의 도로용량편람(highway capacity manual, HCM[10)])을 근거로 한 승용차환산단위(passenger car units, PCU)를 적용하여 첨두교통량을 산정하였다. (참조 Table. 2-1)

Table. 2-4 Passenger Car Units for the Vehicles (Unit : PCU)

veh. type	승용차	택시	승합차	버스	트럭(대형트럭포함)
PCU	1	1	1.2	2	2.5

연구대상 교차로의 통행량은 3지 교차로의 경우 오전·오후 첨두시간대가 비첨두

시간대를 비교하여 평균 약 0.02%정도 높게 나타났고, 4지 교차로의 경우 첨두시간대의 교통량이 비첨두시간대의 교통량보다 오히려 평균 약 14%정도 낮게 나타났다. 따라서, 집중하는 통행량으로 비교해 볼 때 비첨두시간대의 화물통행이나 기타통행(업무, 여가)이 증가함으로써 첨두시간대와 비첨두시간대를 뚜렷하게 구별할 수 없었다. (참조 Fig. 2-1, 2)

또한, 첨두시간대의 시간통행량을 첨두교통량으로 환산하기 위해서 이용되는 첨두시간계수(peak hour factor, PHF)는 첨두 1시간 교통량을 15분 단위의 교통량으로 분류하여 첨두 15분동안 교통량의 집중정도를 나타내는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PHF = V/(4 \times V_{15}) \qquad (2.1)$$

여기서,

PHF ; peak hour factor,

V_{15} ; traffic volume during peak 15 minutes, veh/15min

V ; traffic volume during peak 1 hour, veh/hr

통행체계의 특성분석결과에 따르면, 3지 교차로에서는 C 교차로, 4지 교차로에서는 E 교차로와 F 교차로에서 첨두시간대에 다소 통행량이 집중하였으나, 나머지 교차로에서는 첨두시간대에 통행량이 집중하지 않았으며, 오히려 A 교차로에서는 비첨두시간대에 통행량의 집중이 확인되었다. 특히, 교차로별 첨두시간계수(peak hour factor, PHF)가 3지, 4지 모든 교차로에서 약 0.90이상으로 나타나 첨두 1시간 동안 통행량이 고루 분포함을 알 수 있었다.(참조 Table. 2-2)

Table 5-2. Peak Hour Factor(PHF) on the Intersection

Intersection	3-leg Intersection			4-leg Intersection		
	A	B	C	D	E	F
PHF	0.96	0.96	0.94	0.95	0.95	0.95

그러므로, 교차로 분석의 신뢰성을 증대시키기 위해서는 교차로별 교통특성을 고려하여 실시간 주기별 통행체계가 수립되어야한다고 판단되었다.

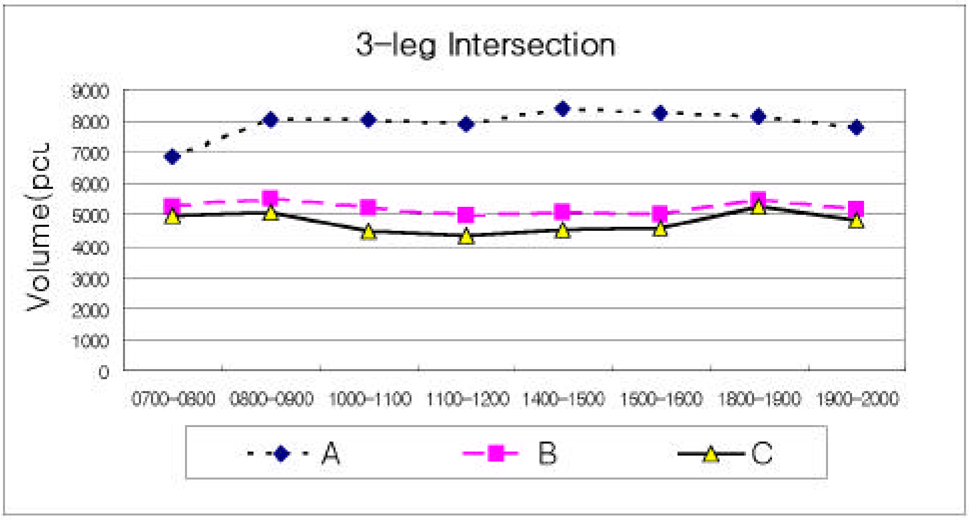


Fig. 2-1 Traffic Volume Distribution on 3-leg Intersections

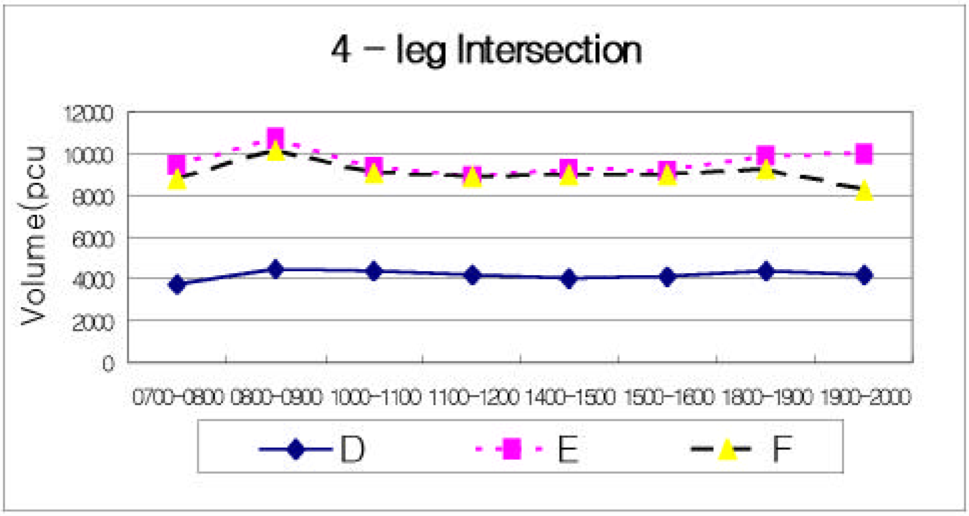


Fig. 2-2 Traffic Volume Distribution on 4-leg Intersections

2. 2 도로 체계 분석

본 연구대상 교차로의 기하구조와 도로체계의 분석은 실측을 통해서 이루어졌다. 교차로의 차로폭원은 대체적으로 약 2.7 4.4m 정도로 이상적인 차로폭원(3.6m)에 비해 상당한 차이를 보였고, 접근부의 차로수는 2 6차로 였다. 특히, 교통특성에 적절치 못한 차로폭원과 차로수의 배정으로 운전자들로 하여금 혼란을 일으키고, 교차로의 교통체증을 더욱 가중시키고 있었다. 또한, 신호 교차로 분석을 위한 차로당 용량은 미국의 Highway Capacity Manual(HCM)에 근거하여 다음과 같이 계산된다.

$$c = s \times (g/C) \tag{2.2}$$

여기서,

- c ; 신호교차로 이동류의 용량 (vph)
- s ; 이동류의 포화교통량 (vphg)
- (g/C) ; 이동류의 유효녹색신호시간 비율
- C ; 신호주기 (sec)

또한, 포화교통량(s)은 이상적인 상태의 기본 포화교통량 (s_0)과 도로여건과 관련된 각종 보정계수를 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$s = s_0 \cdot N_L \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{RT} \cdot f_{LT} \tag{2.3}$$

여기서,

- s ; 이동류의 포화교통량 (vphg)
- s_0 ; 이동류의 기본 포화교통량 (1,900pcphgpl)
- N_L ; 이동류의 차로 수

f_w ; 차로폭 보정계수 $(1 + \frac{W - 3.6}{9})$

f_{HV} ; 중차량 보정계수

f_g ; 구배 보정계수

f_p ; 주차 보정계수

f_{bb} ; 버스 정류장 방해 보정계수

f_a ; 용지활용 보정계수

f_{RT} ; 우회전 보정계수

f_{LT} ; 좌회전 보정계수

W ; 차로폭(m)

보다 신뢰성 있는 도로체계분석을 위해서는 위에서 정의한 보정계수 모두를 고려해야 하겠지만, 본 연구에서는 부산지역의 도로특성, 차량특성, 현실여건 및 차로 폭원을 중심으로 용량을 산정하였다.

이상적인 차로당 용량의 배정에 있어, 미국의 도로용량편람(highway capacity manual, HCM)에서는 3.6m의 차로폭에 대하여 일반적으로 1900vph로 정하고 있으나, 본 연구에서는 미국의 도로용량편람(HCM)의 용량기준과 신호체계 최적화 프로그램인 TRANSYT-7F의 용량기준을 중심으로 우리나라 도로 기하구조의 특성과 차량의 크기를 고려하여 이상적인 차로폭(3.6m)를 기준으로 직진차로(thru lane)에 대해서는 2,250vph, 회전차로(turning lane)에 대해서는 2,000vph, 직진과 회전 겸용차로(shared lane)에 대해서는 2,100vph의 차로용량을 배정하였다.

2.3 신호 체계 분석

본 연구대상 교차로의 각 방향별 신호등, 신호현시, 교통표지 그리고 노면표시 등의 관측은 실측을 통해서 이루어졌으며, 신호현시는 최소 3현시에서 최대 5현시로, 신호주기는 최소 130sec에서 최대 180sec로 운영되고 있었고, B 교차로를 제외한 모든 교차로들은 시간대별 교통특성이 제대로 반영되지 못한 채 고정신호주기로 운영되거나 또는 고정된 신호주기 내에서 현시 길이만이 조정되고 있었으며, 특히 E 교차로와 F 교차로에서는 유·출입통행량에 대한 신호등의 신호주기(cycle length)와 신호현시(signal phase)가 방향별 통행량에 대해 적정하게 설계되어 있지 않아 첨두시간대에 극심한 spillback 현상(녹색시간에 통과하지 못하고 교차로의 후미에 차량의 대기행렬이 계속되는 현상)이 관측되었다. (참조 Table. 2-3)

Table. 2-6 Cycle Length and Phase on the Intertsection

	3-leg Intersection			4-leg Intersection		
	A	B	C	D	E	F
phase	3	3	3	4	5	5
cycle(sec)	150	180,160	130	150	150	160

2.4 교차로 서비스 수준(Level of Service, LOS) 분석

교차로 서비스수준(Level of Service, LOS) 분석방법으로는 ⅰ) 교통량과 교통용량의 비(v/c ratio)에 의한 서비스수준(LOS) 분석과 ⅱ) 평균지체시간(average delay)에 의한 서비스수준(LOS) 분석방법이 있고, 이러한 서비스 수준(LOS)을 극대화시키기 위해서 최적화 목적함수(optimization objective function)가 사용된다.

(1) 교통량과 교통용량의 비(v/c ratio)에 의한 서비스수준(LOS)분석 : 교차로 서

비스수준(LOS) 분석에 있어서 가장 기본적인 지표인 교통량과 교통용량의 비는 가로(street)나 교차로(intersection)의 소통능력을 수치로 나타내기 위해 흔히 사용되는 분석방법으로 특히, 미국의 도로용량편람(HCM)에 따르면 도로의 교통용량(capacity)은 포화교통량(saturation flow)과 신호운영체계에 의하여 결정된다. 포화교통량의 경우 차로 수, 도로의 경사도(grade) 등 도로여건과 대형차량의 혼재비율에 따라 상당한 차이를 보이고 있기 때문에 이런 조건들을 모두 고려한 상태의 교통용량과 포화교통량과의 관계는 다음과 같다.

$$c_i = s_i \times (g/C)_i \tag{2.4}$$

여기서,

c_i ; 신호교차로 이동류 i의 용량 (vph)

s_i ; 이동류 i의 포화교통량 (vphg)

g_i ; 이동류 i의 유효녹색신호시간(sec)

$(g/C)_i$; 이동류 i의 유효녹색신호시간 비율

C ; 신호주기 (sec)

이때, 교차로상의 각 차로군(lane group)이나 또는 접근로(approach)상에서의 교통량과 교통용량의 비(X)는 다음과 같다.`

$$X_i = v_i/c_i = (v/c)_i \tag{2.5}$$

위의 식(2.4)과 식(2.5)로부터 교통량과 교통용량의 비(X)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_i = (v/c)_i = v_i / [s_i \times (g/C)_i] \tag{2.6}$$

여기서,

X_i ; 이동류 i의 v/c 비

v_i ; 이동류 i의 교통량(vph)

또한, 교차로 분석에 있어서 교차로 용량의 효율성 개념인 임계교통량과 교통용량의 비(critical v/c ratio, X_c)는 교차로의 전 차로군(lane group)이나 접근로(approach)상에서의 전반적인 교통량과 교통용량의 비(v/c ratio)로서 다음과 같다.

$$X_c = \frac{C}{C-L} \times \sum_j (v/s)_j \tag{2.7}$$

여기서,

X_c ; 교차로 전체에 대한 임계교통량과 교통용량의 비

$\sum_j (v/s)_j$; 임계차로군, 접근로 j의 교통량비의 합

C ; 신호주기길이(sec)

L ; 신호주기당 총 손실시간
(출발지연시간 + 황색시간 - 진행연장 시간)

(2) 평균지체시간(average delay, AD)에 의한 서비스 수준 분석 : 일반적으로 평균지체시간에 의한 교차로의 서비스수준분석에 적용할 수 있는 모형에는 Webster Model, TRANSYT-7F Model, HCM Model, Queueing Model 등이 있으나, 신호교차로의 서비스수준분석에 널리 사용되고 있는 모형은 TRANSYT-7F 모형이다. TRANSYT-7F 모형에서 이용하는 신호교차로상의 총 평균지체시간(total average

delay. D)은 교차로 상에 차량의 대기행렬로부터 산출되는 균일 지체시간(uniform delay, D_u)의 합으로 구성되어 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = D_u + D_{ro} \tag{2.8}$$

여기서,

D ; 총 지체시간(sec)

D_u ; 균일 지체시간(sec)

D_{ro} ; 임의 포화지체시간(sec)

특히, 차량들의 규칙적인 도착에 의하여 발생하는 균일지체시간(uniform delay, D_u)은 다음과 같다.

$$D_u = \sum_t^N m_t / N \tag{2.9}$$

여기서,

D_u ; 균일지체시간(veh-hr/hr)

m_t ; step t동안 대기차량행렬의 길이

N ; 신호주기당 step의 수

반면, 차량들의 불규칙한 도착에 의하여 발생하는 임의 포화 지체시간(random and saturation delay, D_{ro})은 다음과 같다.

$$D_{ro} = 900TX^2\{(X-1) + [(X-1)^2 + (4X / cT)]^{1/2}]\} \cdot (3600 / v) \qquad (2.10)$$

여기서,

D_{ro} ; 임의 포화지체(random-plus-saturation delay) (veh-hr/hr)

X ; 포화도

c ; 용량(vph)

v ; 교통량(vph)

T ; 주기(period length, 보통 60분)

한편, 본 연구에서 사용된 최적화 목적함수(optimization objective function)는 교차로 서비스수준을 극대화시키기 위한 목적함수로 TRANSYT-7F(Ver 8.2 1999)의 목적함수가 사용되었는데, 이 목적함수는 표준지체(standard delay)와 정지횟수(stops)를 중심으로 구성된 불용지수(disutility index, DI)를 최소화(minimization)시키는 것으로 정의되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Minimize\ DI = \sum_{i=1}^{n} [W_{di} \cdot d_i + K \cdot W_{si} \cdot S_i] + U_i [W_{di-1} \cdot d_{i-1} + K \cdot W_{si-1} \cdot S_{i-1}] + Q \cdot B_i [W_q (q_i - q_{ci})^2] \qquad (2-11)$$

여기서,

DI ; 불용지수(disutility index)

d_i ; 링크 i상에서의 지체(veh-hr)

K ; 지체와 관련하는 " stop penalty "

S_i ; 링크 i상에서의 정지(stop/sec)

W_{di}, W_{si} ; 링크 i의 지체 및 정지에 대한 가중치

U_i ; 링크 i에 대해 가중치가 주어졌다면 '1', 그렇지 않다면 '0'

Q ; DI상에 최대 후미 대기행렬 " penalty "를 사용자가 포함하고자 한다면, '1', 그렇지 않다면 '0'

B_i ; 최대 후미 대기행렬 (q_i)이 사용자가 정의한 storage capacity를 능가한다면 '1', 그렇지 않다면 '0'

W_q ; 전체 network에 대해 " spillover "를 나타내기 위해 적용되는 " penalty "

q_i ; 링크 i상에서의 계산된 최대 후미 대기행렬의 길이

q_{ci} ; 링크 i상에서의 최대 후미 대기행렬의 용량

또한 신호교차로의 서비스수준(LOS)을 교통량과 교통용량의 비(v/c ratio)나 평균지체시간(Average Delay, AD)의 분석결과에 따라 결정할 때, 교통량과 교통용량의 비(v/c ratio)가 1.0이상인 교차로, 혹은 평균지체시간이 약 78.0초를 초과하는 교차로는 서비스수준이 매우 열악한 상태(LOS F수준)로 간주하게 되는데, 본 연구대상 교차로들에 대한 서비스수준 분석결과, 모든 교차로에서 교통량과 교통용량의 비가 1.0 이상 평균지체시간은 약 78.0초를 초과하는 값을 나타내고 있었다. 그러므로, 연구대상 교차로에 대해 방향별 차로수 및 차로용량의 재검토와 서비스수준 분석결과에 따른 전반적인 통행체계, 도로체계 및 신호체계에 대한 교통체계개선(TSM) 방안 수립이 요구되어졌다.

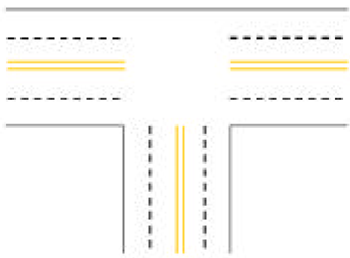
2. 5 교통량 흐름도(Flow Profile Diagrams) 분석

본 연구대상 3·4지 교차로의 실시간 주기별·시간대별 현황분석과 최적화분석을 통한 교통량 흐름도 분석결과, 대체로 좌회전 차로에서 적절치 못한 신호체계로 인한 차량 소통의 악화로 녹색시간인데도 불구하고 많은 차량이 누적되고 있었고, 직진과 우회전 차로 역시 동일한 상황을 보여주고 있었다. 특히, 교통량 흐름도에서 기호‘I’는 적색시간에 도착하는 차량을 나타내고 기호 ‘S’는 적색시간에 누적된 차량이 녹색신호시간에 출발하는 차량을 나타내며, 기호 ‘O’는 녹색시간에 출발 또는 도착하는 차량을 나타낸다.

3. 교차로 분석

본 연구에서는 연구대상 3지, 4지 교차로의 실시간 관측한 자료를 바탕으로 실시간 주기별·시간별 현황분석(simulation) 및 최적화분석(optimization) 작업을 실시하여 상호 비교·분석하였다.

3.1 3지(three-leg) 교차로 분석



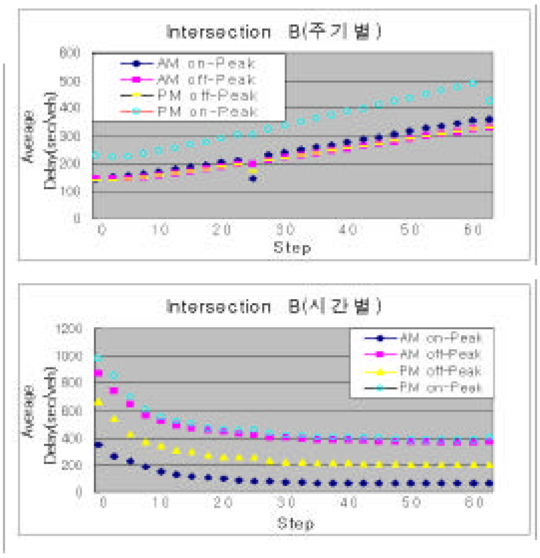


Fig. 3-1 Geometric Conditions and Cycle Evaluation(Intersection B)

부산지역의 주요 간선도로상에 위치한 A, B, C 교차로는 6개의 link를 가진 3지(Three-legs) 교차로로써, 신호주기는 최저 130초에서 최대 180초, 신호현시는 모두 3현시로 운영되고 있었고, 각 시간대별 통행량은 오전 첨두시간대(AM on-peak)에는 약 4,980 8,060pcu, 오전 비첨두시간대(AM off-peak)에는 약 4,350 8,350pcu, 오후 첨두시간대(PM on-peak)에는 약 4,850 8,160pcu, 그리고, 오후 비첨두시간대(PM off-peak)에는 4,550 8,390pcu 정도로 교통량으로 비교해 볼 때 첨두시간대와 비첨두시간대를 뚜렷히 구별할 수 없었다.

교차로의 실시간 주기별, 시간별 최적화 전 지체분석에서는 A 교차로를 제외한 나머지 교차로에서 주기별 지체시간이 시간별 지체시간보다 평균지체시간이 약 39% 낮게 나타났고, 최적화 후 지체분석에서는 B 교차로를 제외한 나머지 교차로에서 주기별 지체시간이 시간별 지체시간보다 평균지체시간이 약 69% 높게 나타났다. (참조. Table. 3-1 Fig. 3-1)

Table. 3-1 Simulation and Optimization results on Intersection(3-leg)

Simulation			
Intersection	3-leg Intersection		
	A	B	C
주기별 평균지체 (sec/veh)	241	273	114
시간별 평균지체 (sec/veh)	76	425	213
Optimization			
주기별 평균지체 (sec/veh)	104	160	72
시간별 평균지체 (sec/veh)	34	225	20

Table. 3-2 Cycle Length and Phase(Intersection A, 주기별)

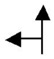
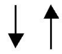
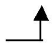
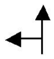
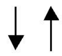
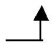
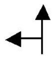
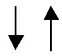
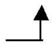
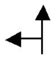
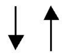
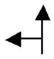
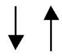
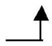
setting	Intersection A				
	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	cycle length(sec)
initial setting (%)					150
	18	41	41		
optimal setting(%) (AM on-peak)					40
	24	26	50		
optimal setting(%) (AM off-peak)					40
	24	34	42		
optimal setting(%) (PM off-peak)					40
	34	26	40		
optimal setting(%) (PM on-peak)					40
	34	26	40		

Table. 3-3 Cycle Length and Phase(Intersection A, 시간별)

setting	Intersection A				
	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	cycle length(sec)
initial setting (%)	↰	↓↑	↱		150
	18	41	41		
optimal setting(%) (AM on-peak)	↰	↓↑	↱		150
	16	26	58		
optimal setting(%) (AM off-peak)	↰	↓↑	↱		90
	18	33	49		
optimal setting(%) (PM off-peak)	↰	↓↑	↱		100
	20	35	45		
optimal setting(%) (PM on-peak)	↰	↓↑	↱		110
	19	31	50		

Table. 3-4 Fuel Consumption Reduction under Optimal Setting(3-leg Intersection)

	3-leg Intersection			
	AM on-peak	AM off-peak	PM off-peak	PM on-peak
주기별 최적화 전 연·소(lit/hr)	21221	18575	19535	21768
주기별 최적화 후 연·소(lit/hr)	12453	12439	13414	14010
감소율(%)	41	33	31	36
시간별 최적화 전 연·소(lit/hr)	20624	17510	17324	23038
시간별 최적화 후 연·소(lit/hr)	5932	8598	8756	12686
감소율(%)	71	51	49	45

(Simulation) (Optimization)

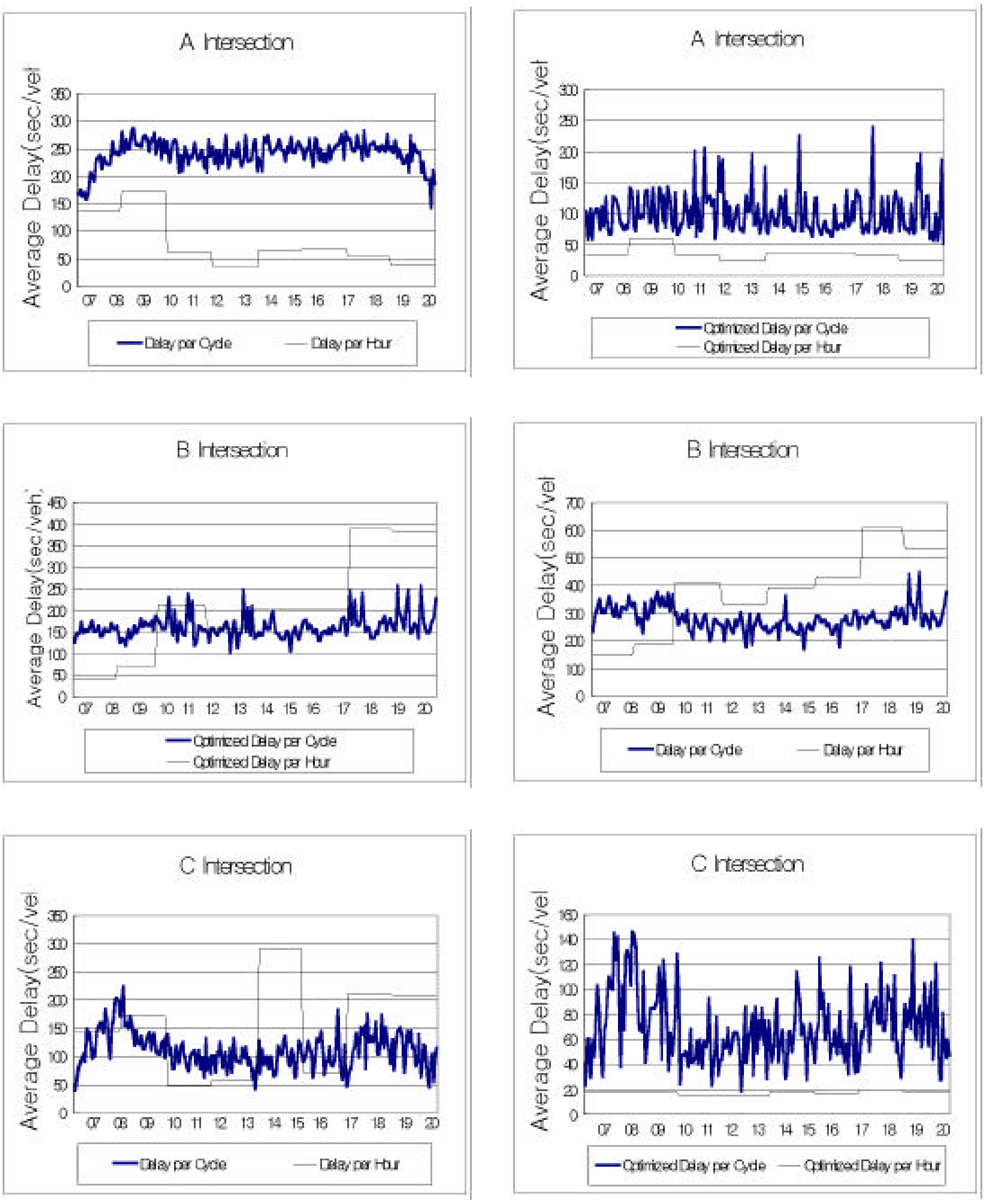


Fig. 3-2 Cycle-based and Hourly-based Delay (3-leg)

본 연구대상 3지 교차로의 경우 실시간 주기별 최적화 후 지체시간은 최적화 전 지체시간보다 평균지체시간이 출퇴근시간대에 각각 약 54%, 42% 정도 감소하는 것으로 나타났고, 그 외의 시간대에서는 약 48%, 43% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 연료소모량은 각각 약 41%, 36%, 33%, 31%정도 감소하는 것으로 나타났다.

또한, 시간대별 최적화 후 지체시간은 시간대별 최적화 전 지체시간보다 평균지체시간이 출퇴근시간대에 각각 약 82%, 49% 정도 감소하는 것으로 나타났고, 그 외의 시간대에서는 약 57%정도 감소하는 것으로 나타났으며, 연료소모량도 각각 약 71%, 45%, 51%, 49%정도 감소하는 것으로 나타났다. (참조 Table. 3-4 5, Fig. 3-2)

연구대상 교차로 상에서 가장 심한 지체를 보이는 링크(link)를 살펴보면, A 교차로는 102, 106, B 교차로는 106, C 교차로는 109 링크에서 전 시간대에 걸쳐 서비스 수준(Level of Service, LOS) F 상태를 나타내고 있었고, 또한, 교통량 흐름도(Flow Profile Diagrams)분석으로부터 동일 링크(link)라 하더라도 주기별 및 시간대별로 최적의 교통체계를 구축함으로써 보다 원활한 소통상태가 나타남을 알 수 있었다.(참조 Fig. 3-3, 3-4)

Table 3-5. Cycle-based and Hourly-based delay shifts B/A optimization(3-leg)

	3-leg Intersection			
	AM on-peak	AM off-peak	PM off-peak	PM on-peak
주기별 최적화 전 지체(sec/veh)	200	191	196	223
주기별 최적화 후 지체(sec/veh)	91	100	112	130
감소율(%)	54	48	43	42
시간별 최적화 전 지체(sec/veh)	238	219	214	281
시간별 최적화 후 지체(sec/veh)	43	94	92	143
감소율(%)	82	57	57	49

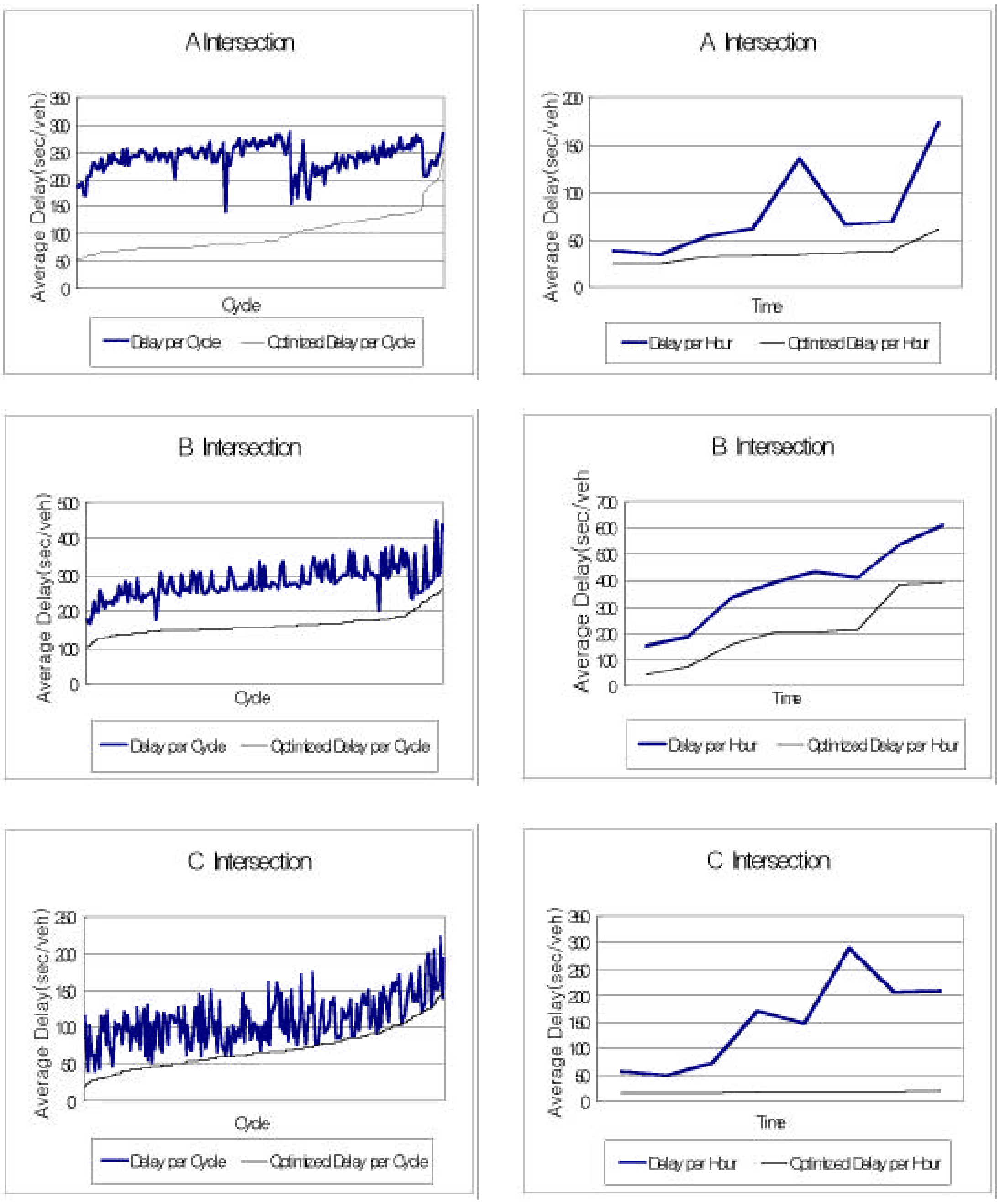
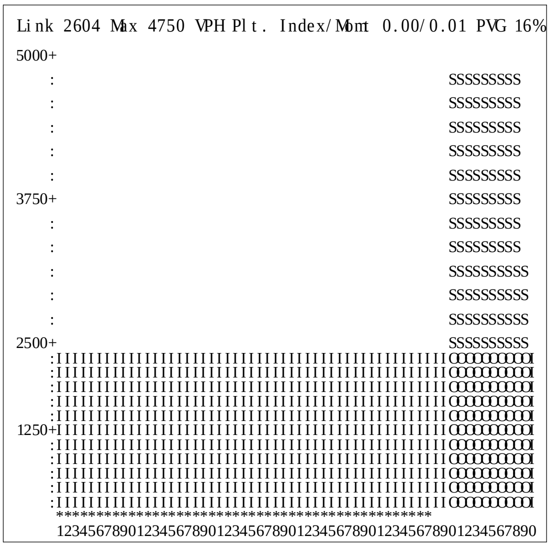


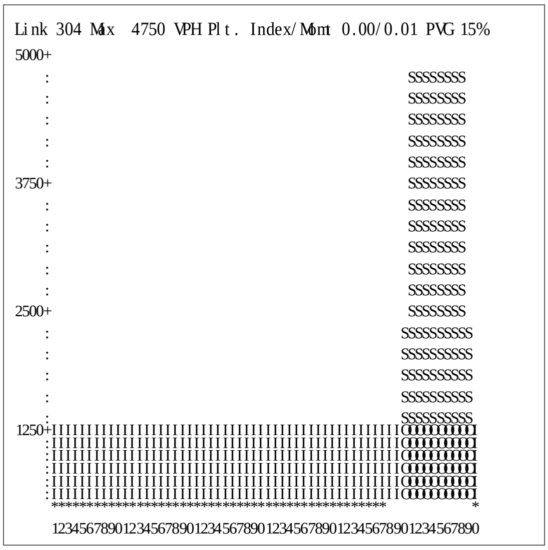
Fig. 3-3 Ascending Array of Cycle-based and Hourly-based Delay (3-leg)

◎ **주기별 현황 분석**(simulation)

〈AM on-peak〉

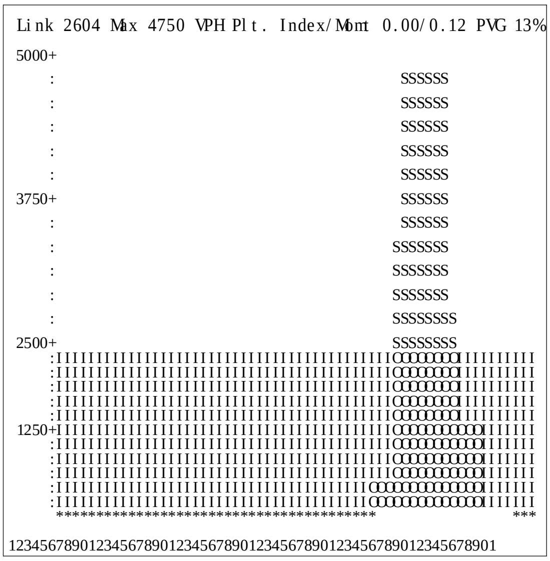


〈PM on-peak〉

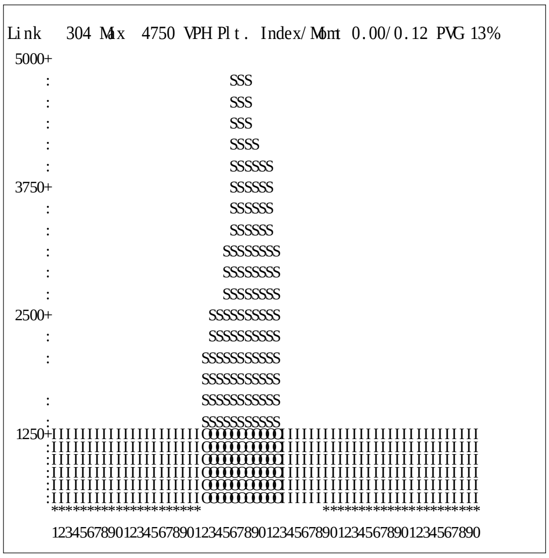


◎ **주기별 최적화 분석**(optimization)

〈AM on-peak〉



〈PM on-peak〉

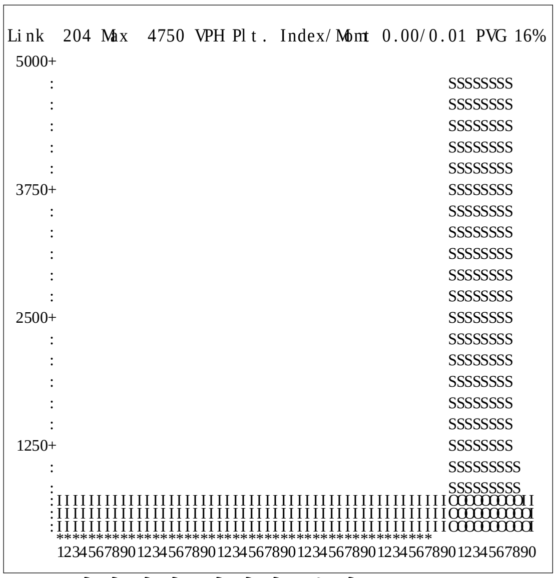


I : **적색시간에 도착하는 차량** S : **적색신호구간에 누적되었다가 녹색신호시간에 출발하는 차량**
O : **녹색신호시간에 도착 또는 출발하는 차량** * : **적색신호구간** 0 9 : **한 신호주기의** step **수**

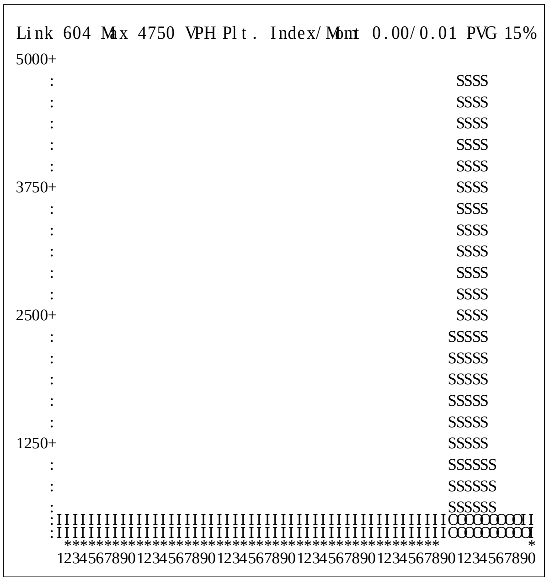
Fig. 3-4 Flow Profile Diagram (Intersection B)

◎ **시간대별 현황 분석**(simulation)

〈AM on-peak〉

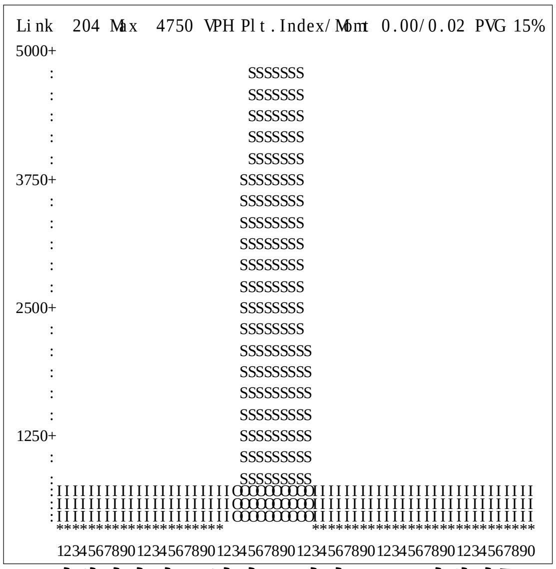


〈PM on-peak〉

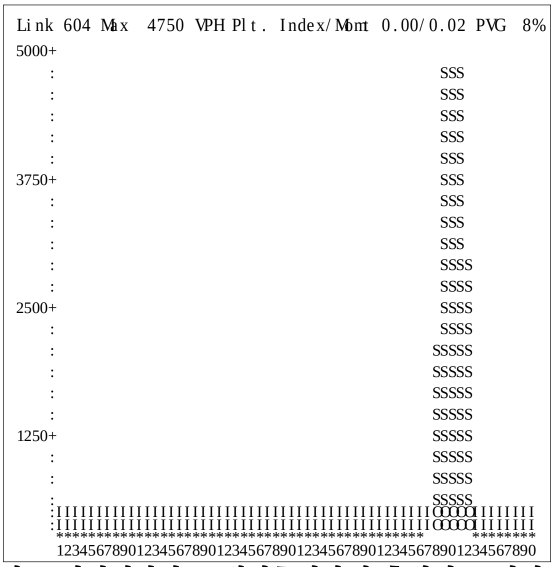


◎ **시간대별 최적화 분석**(optimization)

〈AM on-peak〉



〈PM on-peak〉



I : **적색시간에 도착하는 차량** S : **적색신호구간에 누적되었다가 녹색신호시간에 출발하는 차량**

O : **녹색신호시간에 도착 또는 출발하는 차량** * : **적색신호구간** 0 9 : **한 신호주기의** step **수**

Fig. 3-5 Flow Profile Diagram (Intersection B)

3. 2 4지(four-leg) 교차로 분석

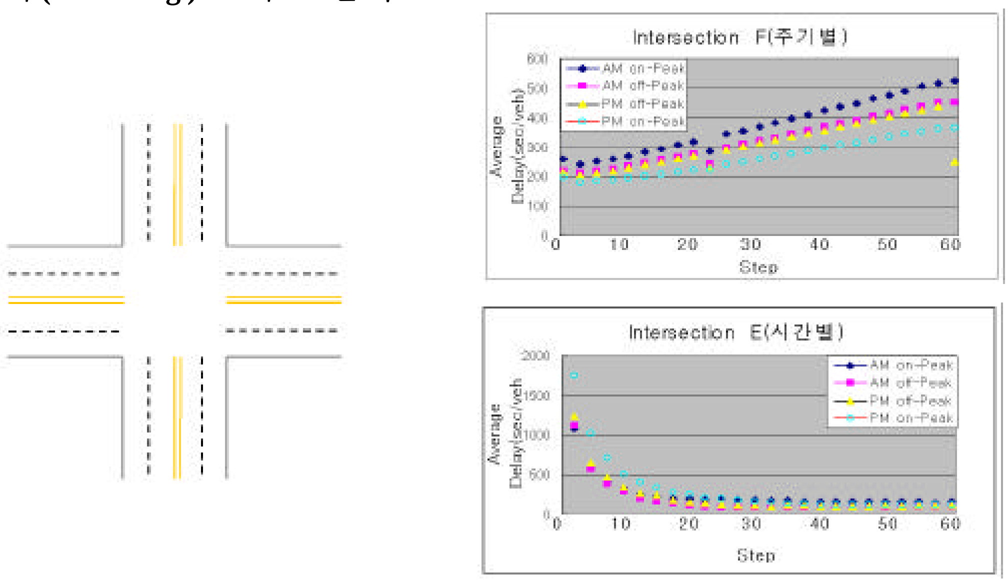


Fig. 3-6 Geometric Conditions and Cycle Evaluation(Intersection F)

부산지역의 주요 간선도로상에 위치한 D, E, F 교차로는 12개의 link를 가진 4지(4-leg) 교차로로써, 신호주기는 최소 150에서 최대 160초, 신호현시는 4 5현시로 운영되고 있었고, 각 시간대별 통행량은 오전 첨두시간대(AM on-peak)에는 약 8,000pcu 20,500pcu, 오전 비첨두시간대(AM off-peak)에는 약 8,500 18,400pcu, 오후 첨두시간대(PM on-peak)에는 약 8,000 1,9100pcu, 그리고, 오후 비첨두시간대(PM off-peak)에는 8,200 20,300pcu 정도로 4지(4-leg) 교차로 역시 집중통행량으로 비교해 볼 때 첨두시간대와 비첨두시간대를 뚜렷히 구별할 수 없었다.

교차로의 실시간 주기별, 시간별 최적화 전 지체분석에서는 C, D, E 모든 4지(4-leg)교차로에서 주기별 지체시간이 시간별 지체시간보다 평균지체시간이 약 19% 21% 정도 높게 나타났다. 최적화 후 지체분석에서도 역시 모든 4지(4-leg)교차로에서 주기별 지체 시간이 시간별 지체시간보다 평균지체시간이 약 16% 28% 정도 높게 나타났다. (참조. Table. 3-6, Fig. 3-7)

Table. 3-6 Simulation and Optimization results on Intersection(4-leg)

Simulation			
Intersection	Four-leg Intersection		
	D	E	F
주기별 평균지체 (sec/veh)	252	252	347
시간별 평균지체 (sec/veh)	205	199	296
Optimization			
주기별 평균지체 (sec/veh)	186	186	222
시간별 평균지체 (sec/veh)	156	126	160

Table. 3-7 Cycle Length and Phase(Intersection E, 주기별)

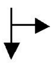
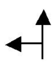
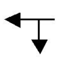
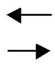
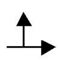
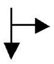
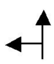
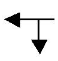
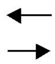
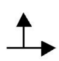
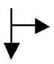
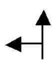
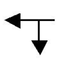
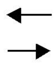
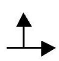
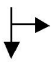
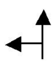
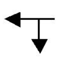
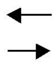
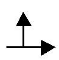
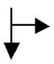
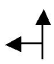
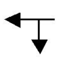
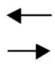
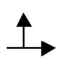
setting	Intersection E					
	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Φ5	cycle length(sec)
initial setting (%)						150
	25	21	18	22	14	
optimal setting(%) (AM on-peak)						90
	26	17	15	32	10	
optimal setting(%) (AM off-peak)						80
	23	14	19	33	11	
optimal setting(%) (PM off-peak)						90
	37	12	11	30	10	
optimal setting(%) (PM on-peak)						150
	24	17	33	18	8	

Table. 3-8 Cycle Length and Phase(Intersection E, 시간별)

setting	Intersection E					
	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Φ5	cycle length(sec)
initial setting (%)	25	21	18	22	14	150
optimal setting(%) (AM on-peak)	41	17	18	13	11	300
optimal setting(%) (AM off-peak)	31	17	25	15	12	200
optimal setting(%) (PM off-peak)	33	15	27	16	9	180
optimal setting(%) (PM on-peak)	30	18	33	11	8	250

Table 3-9. Fuel Consumption Reduction under Optimal Setting(4-leg Intersection)

	4-leg Intersection			
	AM on-peak	AM off-peak	PM on-peak	PM off-peak
주기별 최적화 전 연·소(lit/hr)	32794	26050	26622	30289
주기별 최적화 후 연·소(lit/hr)	22175	20516	18904	22843
감소율(%)	32	21	29	25
시간별 최적화 전 연·소(lit/hr)	28437	18646	20652	29248
시간별 최적화 후 연·소(lit/hr)	21338	11768	12081	16020
감소율(%)	25	37	42	45

(Simulation) (Optimization)

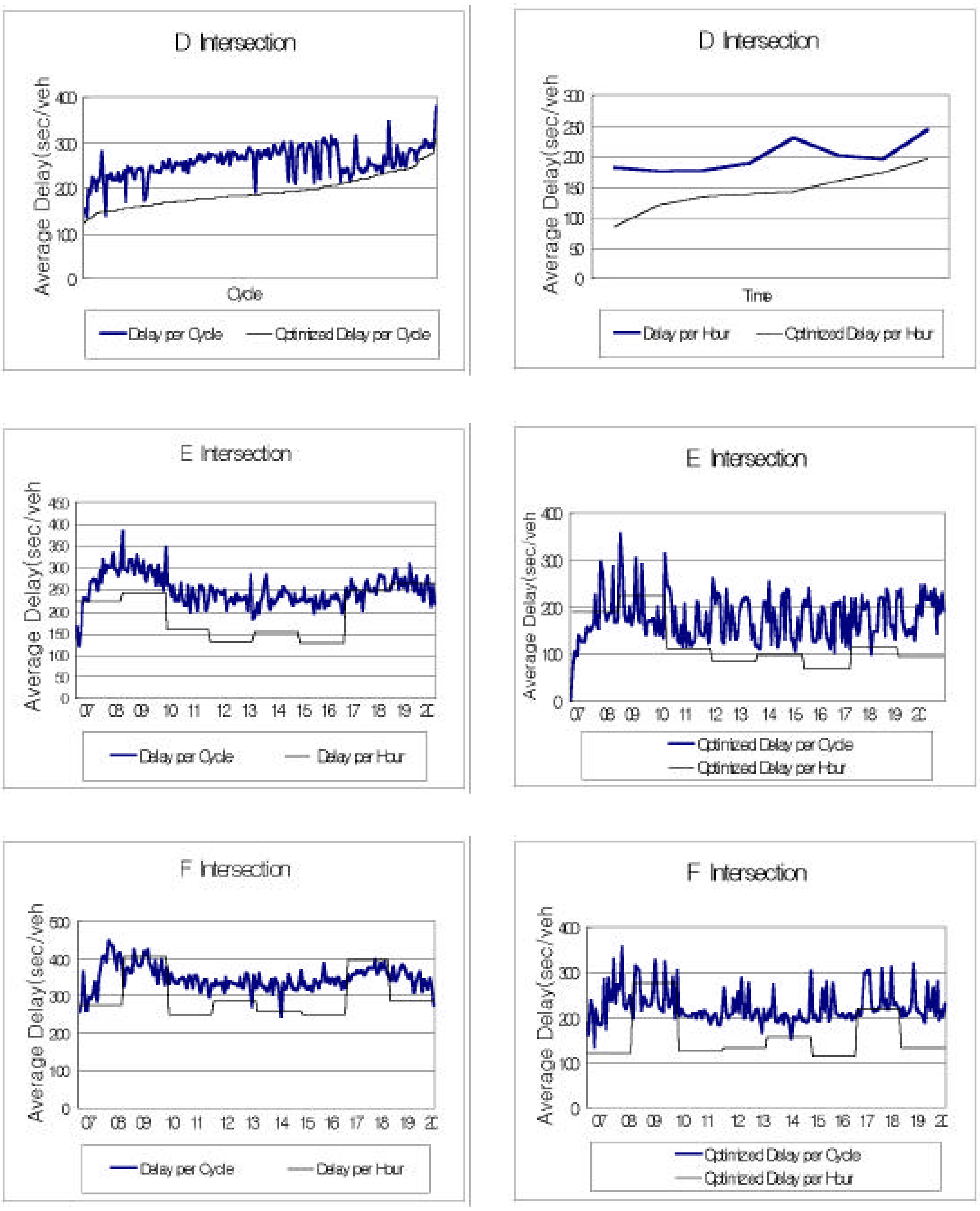


Fig. 3-7 Cycle-based and Hourly-based Delay (4-leg)

본 연구대상 4지(4-leg) 교차로의 경우 실시간 주기별 최적화 후 지체시간은 최적화 전 지체시간보다 평균지체시간이 출퇴근시간대에 각각 약 30%, 28% 정도 감소하는 것으로 나타났고, 그 외의 시간대에는 약 31%정도 감소하는 것으로 나타났으며, 연료소모량은 각각 약 32%, 25%, 21%, 29%정도 감소하는 것으로 나타났다.

또한, 시간대별 최적화 후 지체시간은 시간대별 최적화 전 지체시간보다 평균지체시간이 출퇴근시간대에 각각 약 34%, 36%정도 감소하는 것으로 나타났고, 그 외의 시간대에서는 약 41%, 48% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 연료소모량도 각각 약 25%, 45%, 37%, 42%정도 감소하는 것으로 나타났다. (참조 Table. 3-9, 10 Fig. 3-8)

연구대상 교차로 상에서 가장 심한 지체를 보이는 링크(link)를 살펴보면, D 교차로는 102, 105, 107, E 교차로는 101, 102, 103, 104 F 교차로는 101, 104, 106, 108 링크에서 전 시간대에 걸쳐 서비스 수준(Level of Service, LOS) E F 상태를 나타내고 있었고, 또한, 교통량 흐름도(Flow Profile Diagrams)분석으로부터 동일 링크(link)라 하더라도 주기별 및 시간대별로 최적의 교통체계를 구축함으로써 보다 원활한 소통상태가 나타남을 알 수 있었다. (참조 Fig. 3-9, 10)

Table 3-10 Cycle-based and Hourly-based delay shifts B/A optimization(4-leg)

	4-leg Intersection			
	AM on-peak	AM off-peak	PM off-peak	PM on-peak
주기별 최적화 전 지체(sec/veh)	297	273	268	293
주기별 최적화 후 지체(sec/veh)	207	188	185	211
감소율(%)	30	31	31	28
시간별 최적화 전 지체(sec/veh)	244	207	224	257
시간별 최적화 후 지체(sec/veh)	185	122	117	164
감소율(%)	24	41	48	36

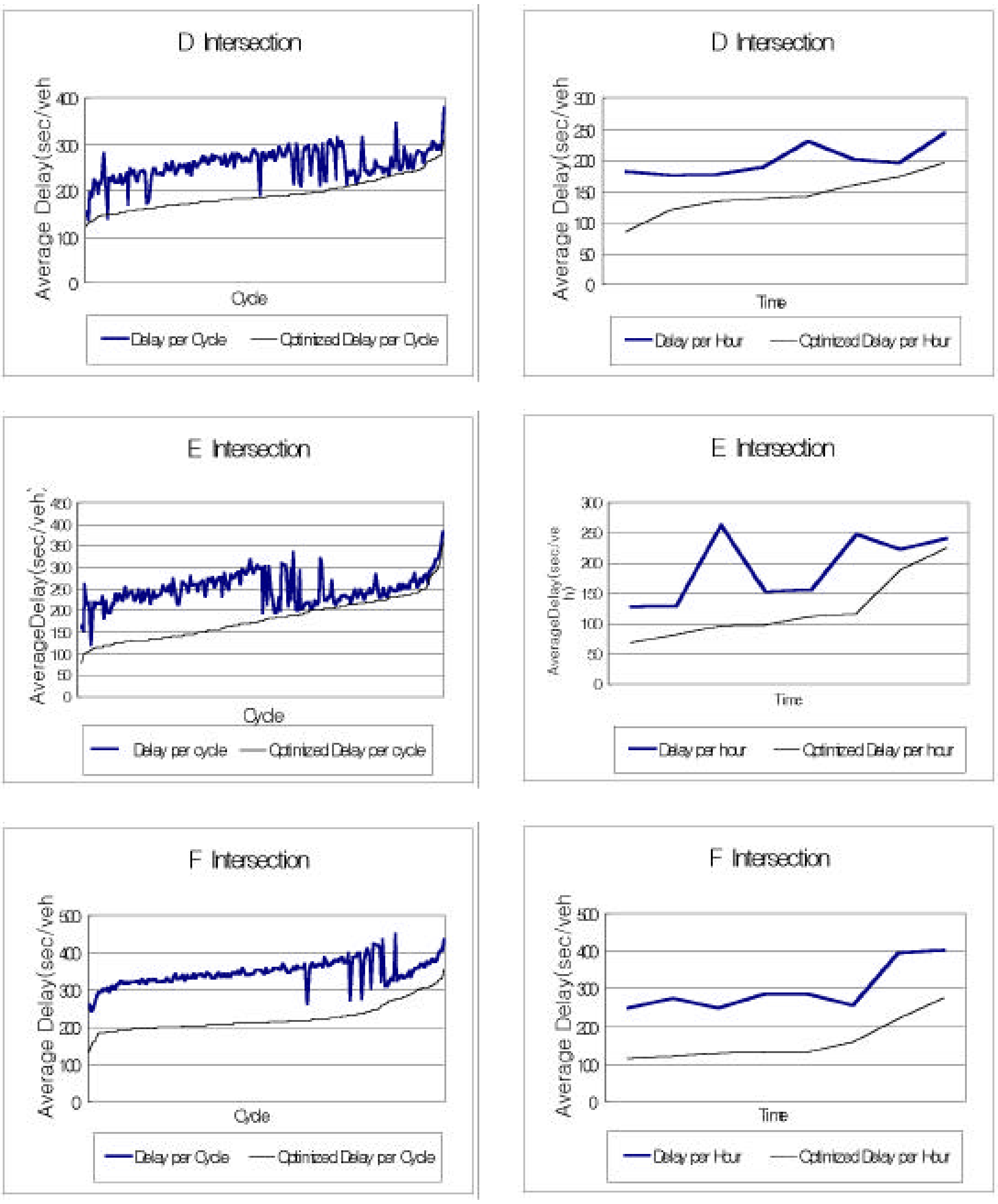
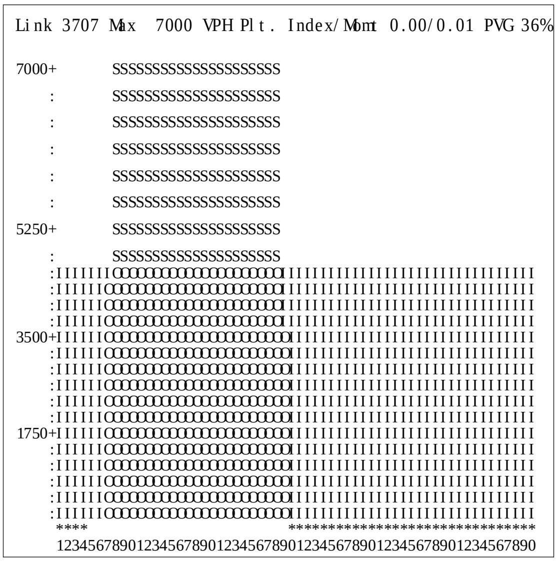


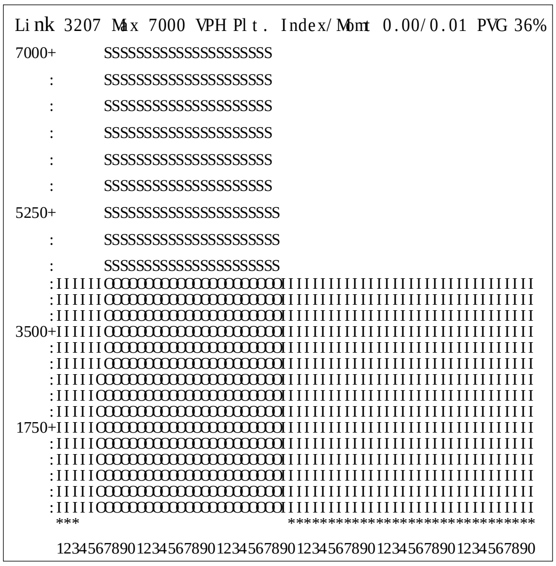
Fig. 3-8 Ascending Array of Cycle-based and Hourly-based Delay (4-leg)

◎ 주기별 현황 분석(simulation)

〈AM on-peak〉

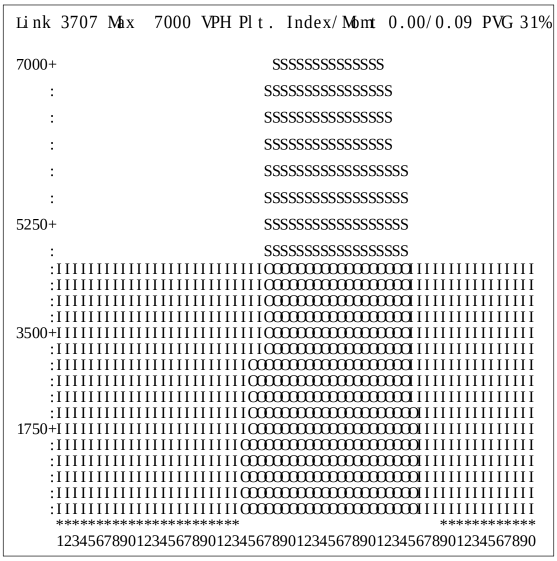


〈PM on-peak〉

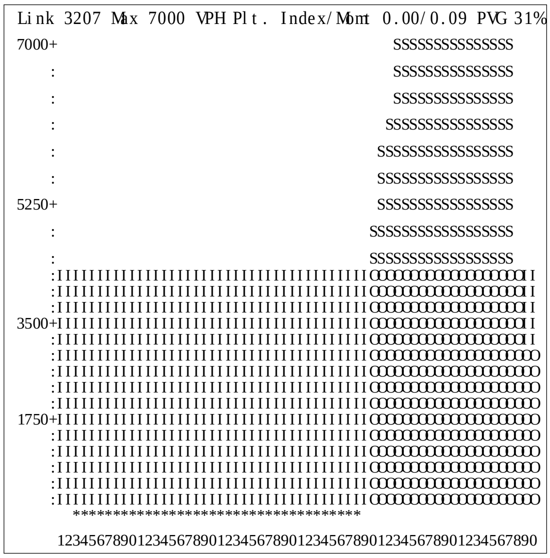


◎ 주기별 최적화 분석(optimization)

〈AM on-peak〉



〈PM on-peak〉

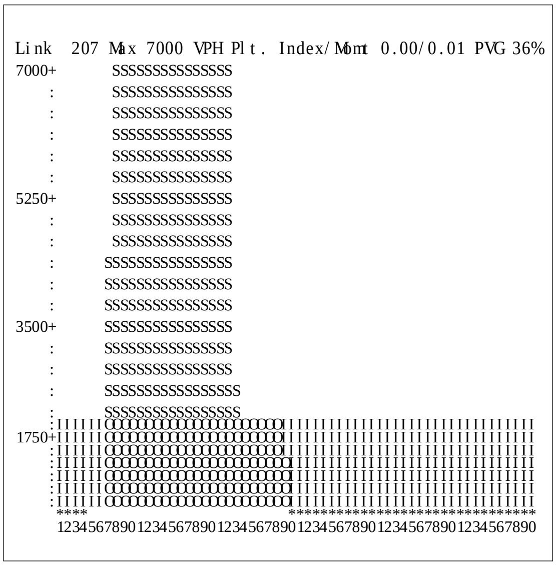


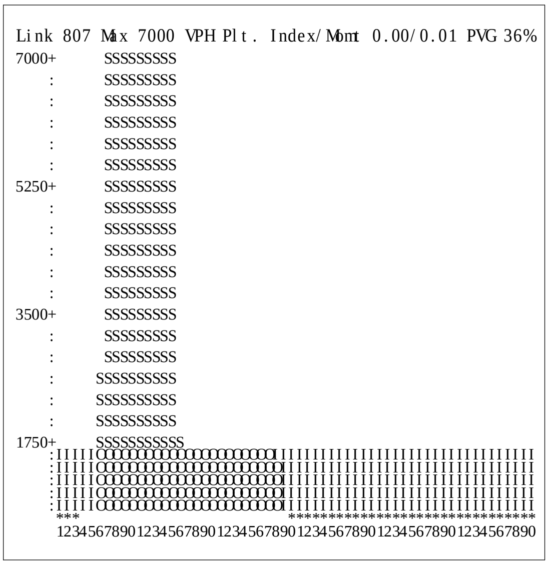
I : 적색시간에 도착하는 차량 S : 적색신호구간에 누적되었다가 녹색신호시간에 출발하는 차량
O : 녹색신호시간에 도착하는 차량 * : 적색신호구간 0 9 : 한 신호주기의 step 수

Fig. 3-9 Flow Profile Diagram (Intersection F)

◎ **시간대별 현황 분석**(simulation)

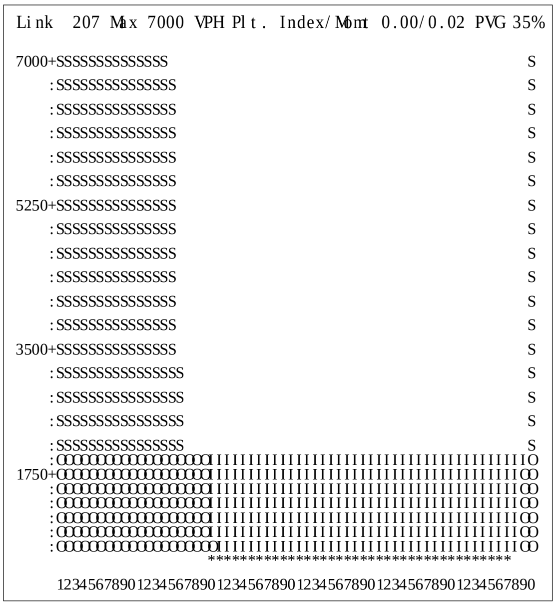
〈AM on-peak〉 〈PM on-peak〉

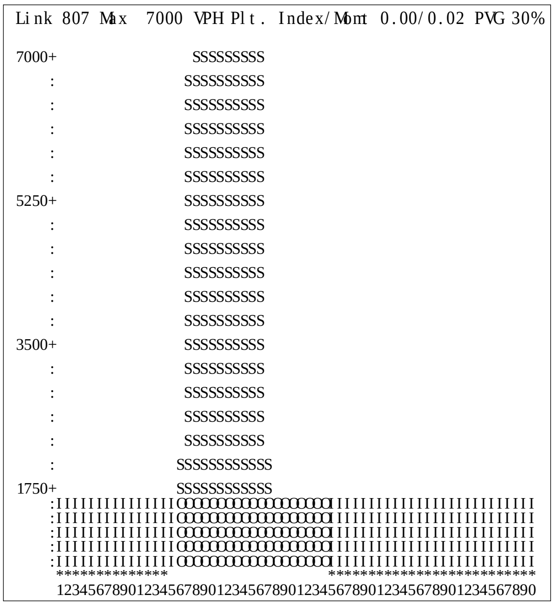




◎ **시대별 최적화 분석**(optimization)

〈AM on-peak〉 〈PM on-peak〉





I : **적색시간에 도착하는 차량** S : **적색신호구간에 누적되었다가 녹색신호시간에 출발하는 차량**
O : **녹색신호시간에 도착하는 차량** * : **적색신호구간** 0 9 : **한 신호주기의** step **수**

Fig. 3-10 Flow Profile Diagram (Intersection F)

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 부산지역 간선도로에 대한 6개 교차로의 교통체계분석과 실시간의 관측자료를 바탕으로 최적화 전(simulation)·후(optimization) 지체분석결과를 비교함으로써 다음과 같은 결론에 도달하였다.

ⅰ) 연구대상 교차로에 대한 교통체계의 특성분석결과 첨두시간대의 명확한 구분이 없었으므로 실시간 교통특성을 바탕으로 교통체계가 구축되어야 교통시설의 효율성을 증대시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

ⅱ) 실시간 주기별 최적화 후 교차로 지체분석의 결과는 최적화 전 교차로 지체분석의 결과와 비교하여 약 30%이상의 지체감소효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

ⅲ) 기존의 시간별 지체분석 결과와 실시간 주기별 지체분석 결과 사이에 최대 약 20%정도까지 지체 편차가 발생됨으로써 실시간 주기별 교차로 운영체계 구축의 필요성이 요구되었다.

이상의 본 연구결과를 바탕으로 간선도로 축 중심의 실시간 주기별 교통운영체계에 대한 연구가 향후에 수행되어야 할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1) W. H. Kraft, “Traffic Congestion - What Have We Learned ?”, ITE Journal, pp. 24-26, Feb. 1989.

2) A. K. Rathi and E. B. Lieberman, “Reducing Traffic Congestion in Herald Square”, ITE Journal, pp. 27-31, S데. 1986.

3) ITE Technical Council Committee 4A-24, “Management of Damaging Traffic Queues(A summary Report)”, ITE Journal, pp. 37-38, Jun. 1988.

4) **김 아 영**, “**부산지역 고정식 신호교차로의 시간대별 소통체계 최적설계에 관한 연구**”, **한국 해양대학교 대학원**, 2, 1997.

5) **유 충 식**, “**네트워크형 가로망의 교통신호제어 최적화 모형개발**”, **대한교통학회지 제**18**권 제**1**호**, 2. 2000.

6) **신 언 교**, “**지체최소화를 위한 도시간선도로 좌회전현시체계 최적화에 관한 연구**”, **대한교통학회지 제**15**권 제**1**호**, 1997.

7) **김 태 곤**, “**교차로 신호체계 최적화를 이용한 소통체계 개선방안에 관한 연구**”, **한국해양대학교 부설 산업기술연구소**, **제**11**집**, 12, 1993.

8) **이 은 진**, “Bus Links**를 고려한 부산지역 간선도로 소통체계의 최적 설계에 관한 연구**”, **한국해양대학교 대학원**, 2. 1995.

9) McTrans, “TRANSYT-7F Software(Ver. 8.2) Users Manual”, the Center, University of Florida, Dec. 1999.

10) Transportation Research Board, “Highway Capacity Manual”, Special Report 209, 1998.

11) McTrans, “Study Shows TRANSYT-7F Benefits Tallahassee Motorists”, Transportation Research Center, University of Florida, Vol. 10, No. 2, Dec. 1995.

12) **김 병 철**, “**보호·비보호 혼용좌회전 신호체계를 고려한 부산지역 신호교차로의 최적설계에 관한 연구**” **한국해양대학교 대학원**, 2. 1998

13) **안 현 철**, “TSM**기법을 고려한 부산지역 간선도로의 최적설계에 관한 연구**” **한국해양대학교 대학원**, 2. 1994.

14) **김 영 찬**, “**혼잡 신호교통로 제어를 위한 최적화 모형 개발**” **대한교통학회지** pp. 75-102. 10, 1992.

15) **김 경 철**, “**교통신호의 페이스 순서 및 페이스 간격을 고려한 신호최적화**” **대한교통학회지**, pp. 45-58. 06, 1996.

16) **최 병 국**, “**과포화 간선도로의 실시간 신호처리**” **대한교통학회지**, pp. 111-130 09, 1997.

17) **임 용 택**, “**혼잡시 신호제어전략 연구**” **대한교통학회지**, pp. 81-92. 09, 1998

18) **건 설 부**, “**도로용량편람**(KHCM)”, pp. 33-85. 1992

19) **도 철 웅**, “**교통공학원론**(上)”, **청문각**, 1998.