

공학석사 학위논문

고정식 4지 신호교차로의 실시간 주기별 현시최적화
분석에 관한 연구

The Real-time Cycle-based Phase Optimization of the Pre-timed 4-leg
Signalized Intersections

지도교수 金 殆 坤

2002年 2月

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원
토 목 환 경 공 학 과 權 德

本 論 文 을 權 德 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

위 원 장 金 度 三 인

위 원 慶 甲 秀 인

위 원 金 殆 坤 인

2001年 12月

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

토 목 환 경 공 학 과 權 德

The Real-time Cycle-based Phase Optimization of the Pre-timed 4-leg Signalized Intersections

Duk, Kwon

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

ABSTRACT

Traffic congestion is becoming a serious urban problem in Pusan area, where is suffering from the severe traffic congestion because of the incoming and outgoing traffic regardless of the peak periods. In addition, traffic congestion is getting more serious on the arterials because of the insufficient transportation facilities and the inappropriate transportation systems with increased traffic. Thus, the purpose of this study is to identify the real-time cycle-based traffic characteristics, compare and analyze the real-time cycle-based transportation systems before/after the optimal settings and before/after the optimal phase settings, and finally suggest the validity of the real-time cycle-based optimal phase settings on the pre-timed 4-leg signalized intersections of the arterials in Pusan area.

From the above transportation system analyses based upon the real-time cycle-based traffic characteristics on the pre-timed 4-leg signalized intersections, the following results were obtained:

i) The real-time cycle-based transportation system analyses were thought to be more efficient than the existing hour-based ones, because the typical peak characteristics were not found on the pre-timed 4-leg signalized intersections under study.

ii) Delay from the real-time cycle-based transportation system analyses was shown to increase by 20 percentage or more on the pre-timed 4-leg signalized intersections under study, when compared with delay from the existing

hour-based delay analyses.

iii) Delay after the real-time cycle-based optimization was shown to reduce by 20 percentage or more on the pre-timed 4-leg signalized intersections under study, when compared with delay before the real-time cycle-based optimization.

iv) Delay after the real-time cycle-based phase optimization was shown to reduce by 30 percentage or more on the pre-timed 4-leg signalized intersections under study, when compared with delay before the real-time cycle-based phase optimization.

목 차

ABSTRACT	i
NOMENCLATURE	v
LIST OF FIGURES	viii
LIST OF TABLES	ix
1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 기존 연구 고찰	2
1.3 자료 수집 및 연구 방법	3
2. 교통체계분석	5
2.1 통행 체계 분석	5
2.2 도로 체계 분석	8
2.3 신호 체계 분석	10
2.4 교차로 서비스 수준 분석	11
2.5 교통량 흐름도 분석	15
3. 교차로 분석	17
3.1 4지(Four-leg) 교차로 분석	17
3.2 Cycle 최적화 전·후 지체 분석	18
3.3 Phase 최적화 전·후 지체 분석	20
3.4 Cycle/Phase 최적화 전·후 비교 분석	23
4. 결론 및 향후 연구과제	31

참고문헌 32

NOMENCLATURE

	A binary variable which is '1' if the maximum back of queue
B_i	(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
	Adjustment factor for heavy vehicles
f_{HV}	Adjustment factor for left turns
f_{LT}	
f_p	Adjustment factor for the existence of a parking lane

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

Q	A binary variable 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

Fig. 2-1	Traffic Volume(pcu/hr/ln) Distribution on 4-leg Intersection (A Intersection)	7
Fig. 2-2	Traffic Volume(pcu/hr/ln) Distribution on 4-leg Intersection (B Intersection)	7
Fig. 3-1	Geometric Condition of the Pre-timed Signalized Intersection ..	17
Fig. 3-2	Simulation and Optimization of Cycle- and Hour-based Delays	20
Fig. 3-3	Ascending Array of Cycle-based and Hour-based Delays	21
Fig. 3-4	Average Delay Shift B/A Optimizations	24
Fig. 3-5	Phase Type Ratios of the Periods	25
Fig. 3-6	Delay Distribution of Cycle-based and Hour-based Optimizations	26
Fig. 3-7	Flow Profile Diagram (A Intersection)	27
Fig. 3-8	Flow Profile Diagram (B Intersection)	28
Fig. 3-9	Flow Profile Diagram (A Intersection)	29
Fig. 3-10	Flow Profile Diagram (B Intersection)	30

LIST OF TABLES

Table 2-1. Passenger Car Units for the Vehicles	5
Table 2-2. Peak Hour Factor(PHF) on the Intersections	8
Table 2-3. Cycle Length and Phase on Intersection	10
Table 2-4. Phase Types for the Intersections under Study	11
Table 3-1. Cycle-based and Hour-based Average Delay B/A Optimizations	18
Table 3-2. Cycle-based Optimal Cycle Lengths(B Intersection)	19
Table 3-3. Hour-based Optimal Cycle Lengths(B Intersection)	19
Table 3-4. Fuel Consumption Reduction under Optimal Setting	21
Table 3-5. Fuel Consumption Shift B/A Phase Optimizations	22
Table 3-6. Average Delay Shift B/A Optimizations	22
Table 3-7. Average Delay Shift B/A Phase Optimizations	23
Table 3-8. Average Delay Shift B/A Phase Optimizations	23
Table 3-9. Average Delay Shift of Phase Optimization by Type	24

1. 서론

1. 1 연구배경 및 목적

오늘날 도시지역에서는 사회·경제활동의 확대에 의하여 통행수요가 급격히 증가하고 있는데 반하여 도시지역 내 도로위계(highway hierarchy)가 제대로 구축되어 있지 못하기 때문에 대부분의 간선도로(arterial)가 도시교통의 중추 역할을 담당하고 있고, 또한 도시지역 내 주요 간선도로를 중심으로 차량들이 집중하고 있기 때문에 출·퇴근 시간대에 관계없이 극심한 교통체증을 겪고 있으며, 더구나 간선도로의 교통체계가 부적절하게 설계·운영되고 있기 때문에 간선도로의 교통체증을 더욱 심화시키고 있다.

특히, 본 연구대상지역인 부산지역은 배산임해의 항구도시로서 도로형태가 남북방향의 대상형으로 발달되어 있어 다른 도시지역들에 비하여 주요 간선도로시설을 포함한 대체도로나 우회도로와 같은 간선도로시설이 턱없이 부족하다. 그러나, 부산지역은 낮은 도로율에도 불구하고 연평균 10%이상의 높은 차량증가율에 의하여 통행수요는 날로 증가하고 있고, 새로운 교통시설의 확충과 기존 교통시설의 개선을 위한 투자재원의 부족으로 인하여 교통여건은 날로 악화되고 있으며, 운전자들 역시 교통문화와 질서에 대한 인식부족과 교통사고의 증가와 교통시설의 효율성 감소로 인하여 도시교통문제는 날로 심화되고 있다. 더구나, 부산지역은 남북방향의 핵심 간선도로를 따라 주요 도심 상업중심지구(central business districts, CBD)들이 형성되어 있고, 이들 상업중심지구들을 중심으로 통행량이 집중되고 있으며, 이들 도심통행량을 수송하기 위해 대부분의 대중교통수단과 개인교통수단들이 대부분의 간선도로에 집중함으로써 교통정체로 인하여 도심지역과 부도심지역의 기능이 거의 마비상태에 이르고 있다. 그러므로, 부산지역에서는 투자재원의 허용범위 내에서 새로운 도로시설의 확충과 병행하여 기존의 교통시설을 최대한 효율적으로 활용할 수 있는 적절한 교통체계개선(Transportation Systems Management, TSM)대책의 필요성이 점점 증대되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 부산지역내 간선도로의 교통특성이 유사한 2개의 고정식 4지 신호교차로를 중심으로 실시간의 교통특성을 파악하고, 실시간 주기별·시간별

최적화 전·후와 현시 최적화 전·후의 교통체계를 비교·분석하며, 마지막으로 연구대상 신호교차로에 대한 실시간의 주기별·시간별 지체분석결과를 상호 비교함으로써 실시간 주기별 교차로 교통운영체계 최적화의 타당성을 제시하고자 한다.

1. 2 기존 연구 고찰

본 연구와 관련된 외국의 연구에서 미국의 N. M. Rouphail(1991)¹⁾에 따르면, 도시 지역 간선도로의 신호교차로 상에 도착하는 교통류의 형태가 차량군 형태(Platoon)로 구성되어 있고, 교차로의 신호체계가 고정식(pre-time)으로 운영되고 있으며, 교차로의 접근로별 교통량/용량의 비(volume-to-capacity ratio, v/c)가 제한이 없는 교통체증이 극심한 신호교차로의 서비스 수준(Level of Service)분석을 위해서는 기존의 15분 단위 첨두교통량(Peak Traffic)중심의 분석보다는 신호주기별(Cycle-by-Cycle) 분석을 채택하는 것이 더 바람직하다고 보고함으로써 고정식 신호교차로에 대해 신호주기별 신호체계분석의 필요성을 역설하였다. 특히, W. H. Kraft(1989)²⁾에 따르면, 도심지역에서는 간선도로의 신호체계개선으로 지체가 15% 정도 감소하였고, 또한 통행체계개선으로 교차로 용량을 15%정도 증대시킬 수 있었으며, 특히 부도심지역에서는 교차로의 재 설계와 신호체계의 최적설계를 통해서 도로용량을 50%까지 증대시킬 수 있었다고 보고함으로써 고정식 신호교차로에 대해 교통체계개선의 필요성을 역설하였다. 또한, 미국의 A. K. Rathi와 E. B. Lieberman³⁾에 따르면, 도시지역 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 신호교차로에 대해 역시 신호체계개선의 필요성을 역설하였다. 더구나, 미국교통학회(Institute of Transportation Engineer, ITS) 기술 소위원회 보고서(4A-24)⁴⁾에 따르면, 간선도로의 신호교차로에 접근하는 차량의 대기행렬(Queue)이 효율적으로 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 줄어든다고 보고함으로써 신호교차로의 녹색시간비(g/C)에 대한 심도 있는 분석의 필요성을 역설하였다.

본 연구와 관련된 국내의 연구에서 진동준⁵⁾은 신호교차로의 보다 효율적인 현시체계구축을 위해 기존의 현시제어원리에 입각한 현시단계방법보다 비록 현시 수를 증가시키더라도 모든 교통류를 제어하여 전반적인 녹색시간손실이 감소하는 개별현시방법의 도입을 제시하였고, 개별현시방법의 타당성을 입증하기 위하여 실제 신호교차로에 적용한 결과 지체시간이 상대적으로 낮게 산출됨으로써 개별현시방법에 의한 현시체계구축의 필요성을 역설하였다. 또한, 김태곤과 차진풍⁶⁾의 연구에 따르면, 간선도로의 고정식 신호교차로에 대해 실시간 주기별 최적화분석을 통해 약 30%이상의 지체감소효과를 기대할 수 있을 것으로 나타났고, 기존의 시간별 지체분석결과와 실시간 주기별 지체분석결과사이에 최대 약 20%정도까지 지체편차가 발생하는 것으로 보고함으로써 간선도로의 고정식 신호교차로에 대해 실시간 주기별 신호체계구축의 필요성을 역설하였다. 특히, 김태곤과 김아영⁷⁾의 연구에 따르면, 도심지역과 부도심지역의 고정식 신호교차로에 대한 시간대별 최적화분석을 통해 적어도 50%이상 평균지체시간의 감소와 30%이상 연료소모량의 감소를 기대할 수 있을 것으로 보고함으로써 고정식 신호교차로의 신호체계개선의 필요성을 강조하였다.

1. 3 자료 수집 및 연구 방법

본 연구에서는 Digital Videologging 시스템을 이용하여 부산지역 간선도로상의 유사한 교통특성을 가지는 2개의 고정식 신호교차로(부산대학병원 앞 사거리 : A 교차로와 백병원 앞 사거리 : B 교차로)에 대해 오전 첨두시간대(07:00~09:00(T1)), 오전·오후 비첨두시간대(10:00~12:00(T2), 14:00~16:00(T3)) 그리고 오후 첨두시간대(18:00~20:00(T4))로 분류하여 3개월 동안 유·출입통행의 변화가 적은 주중(화, 수, 목)을 중심으로 실시간의 교통특성 자료를 반복하여 관측하였다. 또한, 관측된 실시간의 교통특성 자료를 바탕으로 연구대상 교차로에 대해 교통체계분석(통행체계분석, 도로체계분석, 신호체계분석, 서비스수준(level of service, LOS) 분석 및 교통량 흐름도 분석)을 실시하였으며, 대상 교차로에 대한 교통체계분석결과와

실시간의 교통특성 자료 및 Transyt-7F(Ver 8.2 1999)⁸⁾의 지체모형을 이용하여 계산된 지체특성에 대해 실시간의 주기(cycle)별 현황 분석, 최적화 분석 및 현시최적화 분석 그리고 시간별 현황 분석, 최적화 분석 및 현시최적화 분석의 결과를 상호 비교 분석하여 신호교차로의 실시간 주기별 신호운영체계의 현시 최적화에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 교통 체계 분석

본 연구에서는 실시간으로 조사한 교통량을 바탕으로 첨두시간대 교통량의 집중 및 첨두시간계수, 각 방향별 통행량분포에 대한 통행체계분석, 교차로 기하구조의 교통특성에 대한 도로체계분석, 교차로 신호체계의 교통특성에 대한 신호체계분석을 실시하였다. 또한, 고정식 신호교차로의 주기별·시간별 최적화 전·후 지체특성과 현시 최적화 전·후 지체특성을 비교 분석하기 위해 Transyt-7F Model이 사용되었다.

2.1 통행 체계 분석

본 연구대상 신호교차로에 대해 통행특성을 분석하기 위하여 2000년 3월에서 6월까지 2개의 고정식 4지 신호교차로(부산대학병원 앞 사거리 : A 교차로와 백병원 앞 사거리 : B 교차로)를 선정하고 주중(화, 수, 목)을 중심으로 4개의 시간대, 즉 오전 첨두시간대(AM On-peak ; 07:00~09:00), 오전 비첨두시간대(AM Off-peak ; 10:00~12:00), 오후 비첨두시간대(PM Off-peak ; 14:00~16:00), 그리고 오후 첨두시간대(PM On-peak ; 18:00~20:00)로 분류하여 관측하였다. 특히, 실시간으로 관측된 차종별 교통량은 차량의 도로 점유면적과 길이 그리고 미국의 도로용량편람(highway capacity manual, HCM¹⁰)을 고려하여 승용차환산단위(passenger car units, PCU)로 전환한 후 분석에 사용하였다. (참조 Table. 2-1)

Table 2-1. Passenger Car Units for the Vehicles (Unit : PCU)

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

본 연구대상 A와 B 교차로에 있어서 첨두시간대에 통행량 집중이 뚜렷하게 나타나지 않았으나, B교차로에서는 A교차로에 비하여 상대적으로 첨두시간대에 통행량

집중이 다소 많은 것으로 확인되었다. 특히, 주중에 연구대상 A 교차로의 오전·오후 첨두시간대 차로당 첨두 교통량은 400~600(pcu/hr/ln)로 나타났고 B 교차로의 오전·오후 첨두시간대 차로당 첨두 교통량은 550~650(pcu/hr/ln)로 나타났으며 오후 첨두시간대보다는 오전 첨두시간대 통행량이 다소 많은 것으로 나타났다. 또한, 오전·오후 비첨두시간대 통행량도 A 교차로와 B 교차로에서 각각 350~450(pcu/hr/ln)와 450~600(pcu/hr/ln)로 나타남으로써 화물통행이나 기타통행(업무, 쇼핑)으로 인한 통행량 증가로 첨두시간대와 비첨두시간대를 뚜렷하게 구별할 수 없었다. (참조 Fig. 2-1, Fig. 2-2)

또한, 첨두시간대의 시간통행량을 첨두교통량으로 환산하기 위해서 이용되는 첨두시간계수(peak hour factor, PHF)는 첨두 1시간 교통량과 첨두 15분 교통량의 상호 비교를 통해 첨두 15분 동안 교통량의 집중정도를 나타내는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,

- PHF ; 첨두시간계수
- V_{15} ; 첨두 15분 동안의 교통량
- V ; 첨두 1시간 동안의 교통량

A 교차로와 B 교차로의 주중의 평균 첨두시간계수(PHF)는 약 0.95로 동일하게 나타나 첨두 1시간 동안 통행량의 변화가 많지 않았으나, 오후 첨두시간대 비하여 오전 첨두시간대 통행량의 변화가 많음을 알 수 있었다. (참조 Table. 2-2)

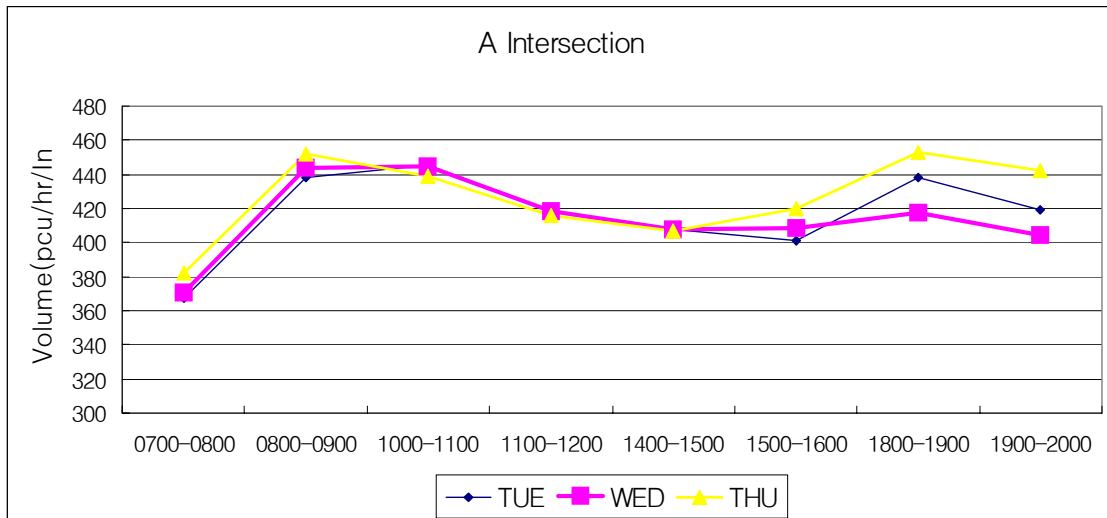


Fig 2-1. Traffic Volume Distribution on 4-leg Intersection(A Intersection)

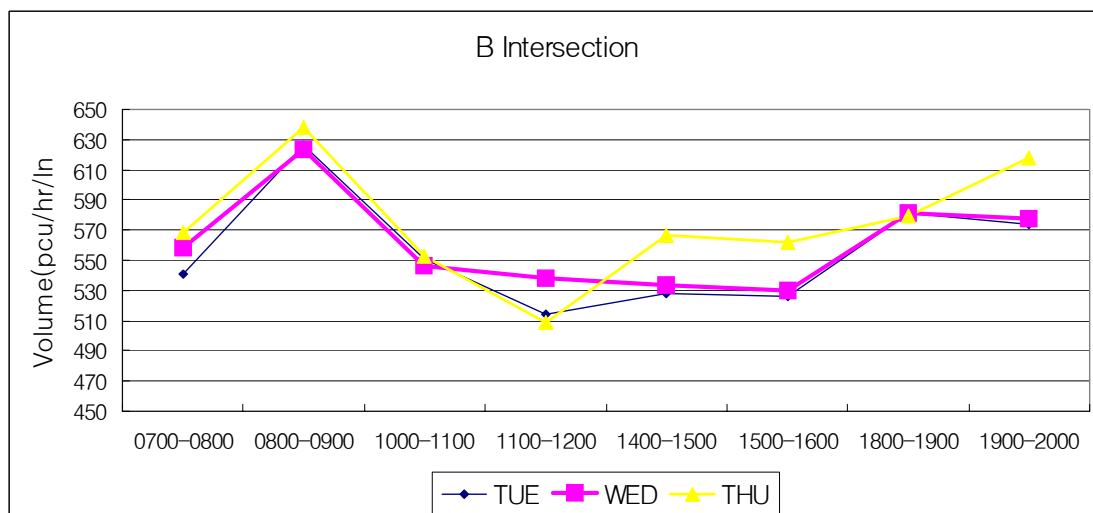


Fig 2-2. Traffic Volume Distribution on 4-leg Intersection(B Intersection)

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

Intersection	A Intersection						B Intersection					
Day	TUE		WED		THU		TUE		WED		THU	
Peak Period	AM Peak	PM Peak	AM Peak	PM Peak	AM Peak	PM Peak	AM Peak	PM Peak	AM Peak	PM Peak	AM Peak	PM Peak
PHF	0.93	0.95	0.95	0.93	0.93	0.97	0.92	0.93	0.92	0.97	0.91	0.97

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

2.2 도로 체계 분석

본 연구대상 교차로의 기하구조와 도로체계의 분석은 실측을 통해서 이루어졌다. 교차로의 차로 폭원은 대체적으로 약 2.8~4.0m 정도로 이상적인 차로 폭원(3.6m)에 비해 상당한 차이를 보였고, 접근부의 차로수는 양방향 4~10차로였다. 특히, 교통특성에 적절치 못한 차로 폭원과 차로수의 배정으로 운전자들로 하여금 혼란을 야기시키고, 교차로의 교통체증을 더욱 가중시키고 있었다.

또한, 교차로 분석을 위해 사용된 접근 차로당 이동류 용량은 미국의 도로용량편람(highway capacity manual, HCM)에 기초하여 지역여건에 따른 적정의 보정계수와 함께 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 나타낼 수 있다.

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

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 ; 구매 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)

특히, 보다 신뢰성 있는 도로체계분석을 위해서는 위에서 정의한 모든 보정계수를 고려해야 하겠지만, 본 연구에서는 도로특성, 차량특성, 지역여건, 차로 폭원 및 자료수집 등의 한계를 고려하였다. 이상적인 차로 용량으로 미국의 도로용량편람 (highway capacity manual, HCM)에서는 3.6m의 차로 폭원에 대하여 일반적으로 1,900vph로 정하고 있고 Transyt-7F(Ver 8.2 1999)에서는 정상적으로 1,600~1700vph로 정하고 있으나, 본 연구에서는 미국의 도로용량편람(HCM)의 용량기준과 신호체계 최적화 프로그램인 Transyt-7F의 용량기준을 중심으로 우리나라 도로 기하구조의 특성과 차량의 크기를 고려하여 이상적인 차로 폭원(3.6m)을 기준으로

직진 차로(thru lane)에 대해서 2,250vph, 회전 차로(turning lane)에 대해서 2,000vph, 직진과 회전 겸용 차로(shared lane)에 대해서 2,100vph의 차로 용량을 배정하여 분석에 적용하였다.

그러므로, 고정식 신호교차로 분석의 신뢰성을 증대시키기 위해서는 교차로별 교통특성을 고려하여 도로체계가 수립되어야 한다고 판단되었다.

2.3 신호 체계 분석

본 연구대상 신호교차로의 각 방향별 신호등, 신호현시, 교통표지 그리고 노면표시 등의 관측은 실측을 통해서 이루어졌다. 교차로의 신호현시는 최소 4현시에서 최대 5현시로, 신호주기는 150sec로 동일하게 운영되고 있었고, A와 B 교차로는 시간대별 교통특성이 제대로 반영되지 못한 채 고정된 신호주기로 운영되거나 또는 고정된 신호주기 내에서 현시 길이만이 조정되고 있었으며, 특히 B 교차로에서는 유·출입통행량에 대한 신호등의 신호주기(cycle length)와 신호현시(signal phase)가 방향별 통행량에 대해 적절하게 설계되어 있지 않아 첨두시간대에 극심한 spillback 현상(녹색시간에 통과하지 못하고 교차로의 후미에 차량의 대기행렬이 계속되는 현상)이 관측되었다. (참조 Table 2-3)

Table 2-3. Cycle Length and Phase on the Intersection

	4-leg Intersection									
	A					B				
Phase	4					5				
Cycle(sec)	150					150				
Phase Diagram										

그러므로, 신호체계의 타당성을 증대시키기 위해서는 다음과 같은 현시 형태를 중심으로 교차로 교통특성을 고려한 주기별 최적의 현시체계가 수립되어야 한다고 판단되었다. (참조 Table. 2-4)

Table 2-4. Phase Types for the Intersections under Study

Types	Phase Type															
	I				II				III				IV			
Phase Diagram	↓↑	↙↘	←→	↕	↙↑	↓↘	↕	↙↓	↕	↙↑	↓↘	←→	↙↘	↓↑	↙↘	↕

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) 분석방법과 ii) 평균지체시간(average delay)에 의한 서비스수준(LOS) 분석방법이 있는데, 특히 평균지체시간(average delay)에 의한 서비스수준(LOS) 분석방법에 있어서 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 서비스수준(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 구배(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 i 의 용량 (vph)

s_i ; 이동류 i 의 포화교통량 (vphg)

- g_i ; 이동류 i 의 유효녹색신호시간(sec)
- $(g/C)_i$; 이동류 i 의 유효녹색신호시간 비율
- C ; 신호주기 (sec)

이때, 교차로상의 각 차로군(lane group)이나 또는 접근로(approach)상에서의 교통량과 교통용량의 비(X)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_i = v_i/c_i = (v/c)_i \quad (2.5)$$

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

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

여기서,

- X_i ; 이동류 i 의 v/c 비
- v_i ; 이동류 i 의 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 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,

- X_c ; 교차로 전체에 대한 임계교통량과 교통용량의 비
- $\sum_j (v/s)_j$; 임계 차로군, 접근로 j 의 교통량 비의 합

- C ; 신호주기길이(sec)
 L ; 신호주기당 총 손실시간
 (출발지연시간 + 황색시간 - 진행연장시간)

(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, 본 연구에서는 신호교차로의 서비스수준분석에 널리 사용되고 있는 모형은 Transyt-7F 모형이 사용되었다. 한편, Transyt-7F 모형에서 이용하는 신호교차로상의 총 평균지체시간(total average delay, D)은 교차로 상에 차량의 대기행렬로부터 산출되는 균일지체시간(uniform delay, D_u)과 불규칙한 도착으로부터 발생하는 임의 포화지체시간(random and saturation delay, D_{ro})과 합으로 구성되어 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = D_u + D_{ro} \quad (2.8)$$

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 같이 나타낼 수 있다.

$$D_u = \sum_t^N m_t / N \quad (2.9)$$

여기서,

- D_u ; 균일지체시간(veh-hr/hr)

m_t ; step t동안 대기차량행렬의 길이

N ; 신호주기당 step의 수

반면, 차량들의 불규칙한 도착에 의하여 발생하는 임의 포화지체시간(random and saturation delay, D_{ro})은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,

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

X ; 포화도

c ; 용량(vph)

v ; 교통량(vph)

T ; 주기(period length, 보통 60분)

또한, 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 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,

DI ; 불용 지수(disutility index)

d_i ; 링크 i 상에서의 지체(veh-hr)

K ; 지체와 관련하는 “stop penalty”

- S_i ; 링크 i 상에서의 정지(stop/sec)
- W_{di}, W_{si} ; 링크 i 의 지체 및 정지에 대한 가중치
- U_i ; 링크 i 에 대해 가중치가 주어졌다면 '1', 그렇지 않다면 '0'
- Q ; DI 상에 최대 후미 대기행렬 "penalty" 를 사용자가 포함한다면, '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 i 상에서의 계산된 최대 후미 대기행렬의 길이
- q_{ci} ; 링크 i 상에서의 최대 후미 대기행렬의 용량

또한 신호교차로의 서비스수준(LOS)을 교통량과 교통용량의 비(v/c ratio)나 평균 지체시간(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 간주하는데, 본 연구대상 교차로들에 대한 실시간의 서비스수준 분석결과, 특히 첨두시간대와 일부 비첨두시간대 실시간 주기별로 교통량과 교통용량의 비가 모두 1.0 이상과 평균지체시간은 약 78.0초를 초과하는 값을 나타내고 있었다. 그러므로, 연구대상 교차로에 대해 방향별 차로수 및 차로 용량의 재검토와 실시간의 서비스수준 분석 결과에 따른 전반적인 통행체계, 도로체계 및 신호체계에 대한 교통체계개선(TSM)방안 수립이 요구되어졌다.

2. 4 교통량 흐름도(Flow Profile Diagrams) 분석

본 연구대상 2개의 고정식 4지 신호교차로에 대한 실시간 주기별·시간대별 현황 분석, 최적화분석 및 현시최적화 분석을 통한 교통량 흐름도의 분석결과, 대체로 좌회전 차로에서 적절치 못한 신호체계에 의한 차량 소통의 악화로 녹색시간인데도

불구하고 많은 차량이 누적되고 있었고, 직진과 우회전 차로에서 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 연구대상으로 선정된 고정식 4지 교차로 A와 B에 대해 반복 관측된 자료를 바탕으로 실시간 주기별·시간별 현황분석(simulation) 및 최적화분석(optimization)과 현시 최적화(Phase Optimization)분석을 실시하여 상호 비교·분석하였다.

3.1 4지(Four-leg) 교차로 분석

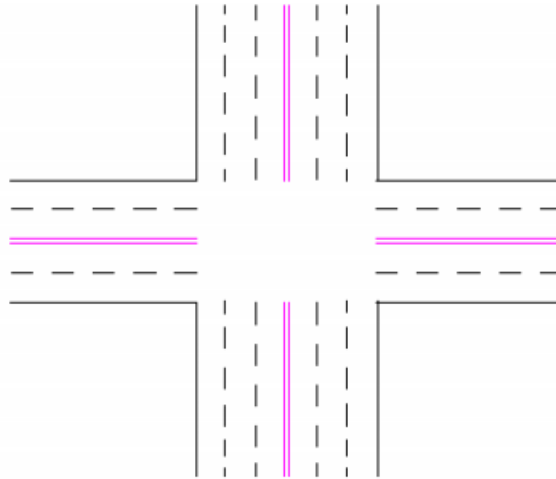


Fig 3-1. Geometric Condition of the Pre-timed Signalized Intersection

부산지역의 주요 간선도로상에 위치한 A, B 교차로는 12개의 link를 가진 4지(4-leg) 교차로로써, 신호주기는 150초로 동일하고, 신호현시는 4~5현시로 운영되고 있었다. 특히, 각 시간대별 통행량은 오전 첨두시간대(AM on-peak)에는 약 8,000pcu~20,500pcu, 오전 비첨두시간대(AM off-peak)에는 약 8,600~18,400pcu, 오후 첨두시간대(PM on-peak)에는 약 9,000~20,350pcu, 그리고, 오후 비첨두시간대(PM off-peak)에는 8,300~19,200pcu 정도로 4지(4-leg) 교차로 역시 집중통행량으로 비교해 볼 때 첨두시간대와 비첨두시간대를 뚜렷이 구별할 수 없었다.

3. 2 Cycle 최적화 전·후 지체 분석

연구대상 A, B 교차로의 실시간 주기별·시간별 최적화 전 지체분석에서 실시간 주기별 평균지체시간이 기존의 시간별 평균지체시간보다 약 19.2%~21.8% 정도 높게 나타났고, 최적화 후 지체분석에서도 역시 실시간 주기별 평균지체시간이 기존의 시간별 평균지체시간보다 약 16.3%~31.9% 정도 높게 나타났다.

또한, 기존의 첨두교통량 중심의 시간별 지체분석은 실시간 주기별 지체분석에 비하여 통과 차량당 평균지체가 약 50sec정도 낮게 산정되었고, 특히 주기 최적화에 따른 지체감소율에 있어서 시간별 지체분석에서는 상당한 편차를 보인 반면, 실시간 주기별 지체분석에서는 약 20%정도의 고른 지체감소율을 보임으로써 실시간 주기별 신호운영체계가 기존의 시간별 신호운영체계에 비하여 안정성과 신뢰성을 보이는 것으로 나타났다. (참조 Table 3-1, Fig. 3-2)

Table 3-1. Cycle-based and Hour-based AD B/A Optimizations

4-leg Intersection			
Intersection	Before Cycle Optimization		
	A	B	Average
Cycle-based AD(sec/veh)	255.4	254.4	254.9
Hour-based AD(sec/veh)	206.4	201.4	203.9
Intersection	After Cycle Optimization		
	A	B	Average
Cycle-based AD(sec/veh)	188.3	188.6	188.5
Hour-based AD(sec/veh)	157.7	128.5	143.1

Table 3-2. Cycle-based Optimal Cycle Lengths (B Intersection)



















































Setting	Intersection B					Cycle Length(sec)
	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 5$	
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 3-3. Hour-based Optimal Cycle Lengths (B Intersection)

Setting	Intersection B					Cycle Length(sec)
	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$	$\phi 4$	$\phi 5$	
Initial Setting (%)						150
	25	21	18	22	14	
Optimal Setting(%) (AM on-peak)						90
	41	17	18	13	11	
Optimal Setting(%) (AM off-peak)						80
	31	17	25	15	12	
Optimal Setting(%) (PM off-peak)						90
	33	15	27	16	9	
Optimal Setting(%) (PM on-peak)						150
	30	18	33	11	8	

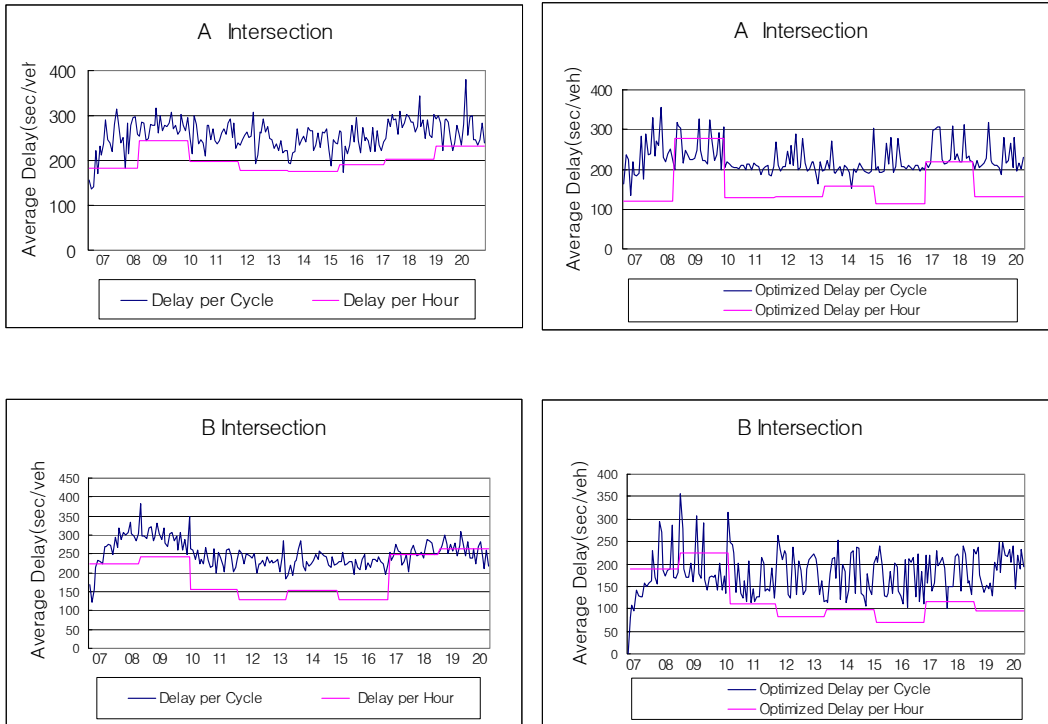


Fig 3-2. Simulation and Optimization of Cycle- and Hour-based Delays

3. 3 Phase 최적화 전 · 후 지체 분석

본 연구대상 고정식 4지 교차로의 경우 실시간 주기별 현시최적화 후 평균지체시간이 현시최적화 전 평균지체시간보다 오전·오후 첨두시간대에 각각 약 25.1%, 29.2% 정도 감소하는 것으로 나타났고, 그 외의 시간대에는 약 23.2%정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 기존의 시간대별 현시최적화 후 평균지체시간은 시간대별 최적화 전 평균지체시간보다 오전·오후 첨두시간대에 역시 각각 약 29.7%, 10.2% 정도 감소하는 것으로 나타났고, 그 외의 시간대에서는 약 22.6%, 58.1% 정도 감소하는 것으로 나타났다. (참조 Table. 3-4,5,6,7 Fig. 3-3)

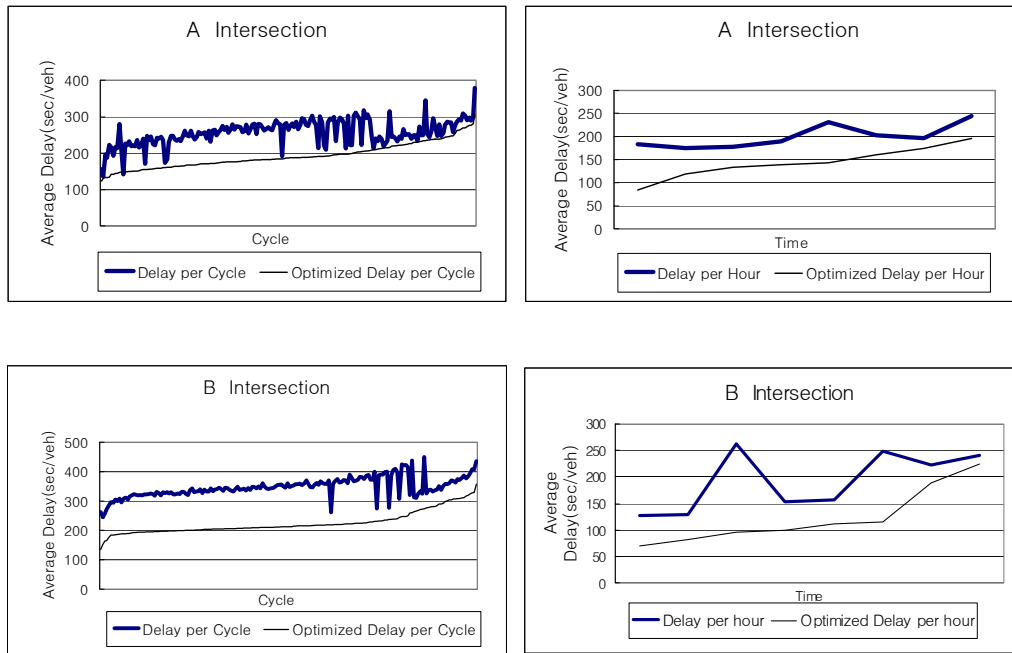


Fig 3-3. Ascending Array of Cycle-based and Hour-based Delays

Table 3-4. Fuel Consumption Reduction under Optimal Setting

Intersection	4-leg Intersection			
	A		B	
Peak Periods	AM Peak	PM Peak	AM Peak	PM Peak
FC Before Cycle-based Optimization (lit/hr)	13314	17269	16978	14563
FC After Cycle-based Optimization (lit/hr)	10530	12637	11523	10943
Reduction (%)	26	37	47	33
FC Before Hour-based Optimization (lit/hr)	11861	13072	14541	12528
FC After Hour-based Optimization (lit/hr)	8710	9457	9649	8793
Reduction (%)	36	38	50	42

Table 3-5. Fuel Consumption Shift B/A Phase Optimizations

Intersection	4-Leg Intersection			
	A		B	
	AM Peak	PM Peak	AM Peak	PM Peak
FC Before Cycle-based Phase Optimization (lit/hr)	10530	12637	11523	10943
FC After Cycle-based Phase Optimization (lit/hr)	8481	10662	9458	8623
Reduction (%)	24	18	22	26
FC Before Hour-based Phase Optimization (lit/hr)	8710	9457	9649	8793
FC After Cycle-based Phase Optimization (lit/hr)	6481	6956	7361	7026
Reduction (%)	34	35	31	25

Table 3-6. Average Delay Shifts B/A Optimizations

Intersection	4-Leg Intersection			
	A		B	
	AM Peak	PM Peak	AM Peak	PM Peak
AD Before Cycle-based Optimization (sec/veh)	258.1	265.7	289.0	260.1
AD After Cycle-based Optimization (sec/veh)	193.2	200.1	204.5	203.6
Reduction (%)	25.1	24.7	29.2	21.7
AD Before Hour-based Optimization (sec/veh)	232.7	242.0	236.8	277.5
AD After Hour-based Optimization (sec/veh)	163.6	187.4	212.6	116.4
Reduction (%)	29.7	22.6	10.2	58.1

Table 3-7. Average Delay shifts B/A Phase Optimizations

Cycle/Phase	Before Phase Optimization			After Phase Optimization			Reduction(%)		
	All Day	AM Peak	PM Peak	All Day	AM Peak	PM Peak	All Day	AM Peak	PM Peak
Cycle-based AD(sec/veh)	254.7	279.6	261.8	162.6	165.3	173.4	36.2	40.9	33.8
Hour-based AD(sec/veh)	202.9	235.6	266.8	139.8	179.9	144.8	31.1	23.6	45.7
Shift(sec)	51.8	44.0	5.0	22.8	14.6	28.6	-	-	-

3. 4 Cycle/Phase 최적화 전·후 비교 분석

연구대상 고정식 4지 교차로에 대해 실시간의 현시최적화에 따른 현시형태별 비교·분석에서는 각 시간대별로 Type I의 현시형태가 전체의 40%이상을 점유함으로써 상대적인 우위를 나타내고 있었으며, 모든 현시형태가 고루 분포하고 있었다. 특히, 오전 첨두시간대에는 Type II의 현시형태 점유율이 9.8%로 낮은 반면, 오후 첨두시간대에는 오히려 Type IV의 현시형태 점유율이 10.1%로 낮게 나타남으로써 각 시간대별로 통행특성에 따라 서로 다른 현시체계를 구축하는 것이 바람직한 것으로 생각되었다. (참조 Table 3-8,9 Fig 3-4,5,6)

Table 3-8. Average Delay Shifts B/A Phase Optimizations

Intersection	A				B			
	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type I	Type II	Type III	Type IV
Component Ratio (%)	26.0	22.1	18.8	33.1	64.2	3.0	27.1	5.7
AD Before Cycle-based Phase Optimization(sec/veh)	255.8	254.8	246.4	260.2	257.0	251.6	249.7	245.0
AD After Cycle-based Phase Optimization(sec/veh)	171.6	169.4	169.5	171.5	151.6	231.0	149.0	228.6
Reduction (%)	32.9	33.5	31.2	34.1	41.0	8.2	40.3	6.7
AD Before Hour-based Phase Optimization(sec/veh)	230.9	174.7	192.3	206.5	247.0	238.9	167.5	0
AD After Cycle-based Phase Optimization(sec/veh)	153.4	118.6	111.8	175.7	244.5	129.2	134.2	0
Reduction (%)	33.6	32.1	41.9	14.9	1	45.9	19.9	0

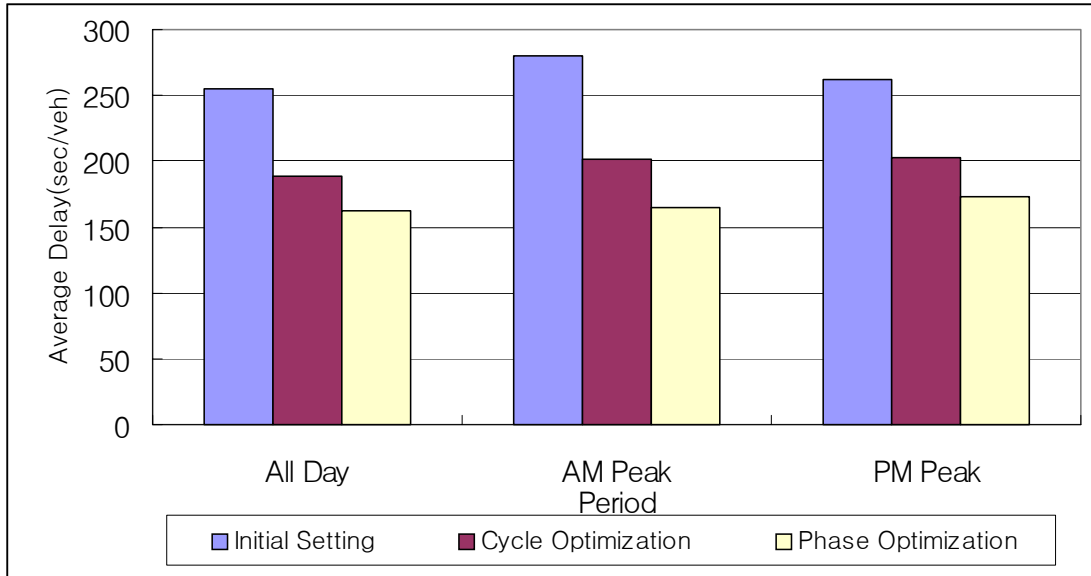


Fig 3-4. Average Delay Shift B/A Optimizations

Table 3-9. Average Delay Shift of Phase Optimization by Type

Period	All Day				AM Peak				PM Peak			
	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type I	Type II	Type III	Type IV
Cycle-based AD(sec/veh)	154.7	183.9	153.9	186.9	160.5	177.0	162.2	191.0	169.2	207.3	164.4	191.5
Rate of Types(%)	45.1	12.5	22.9	19.5	41.4	9.8	28.3	20.5	43.8	21.9	24.2	10.1

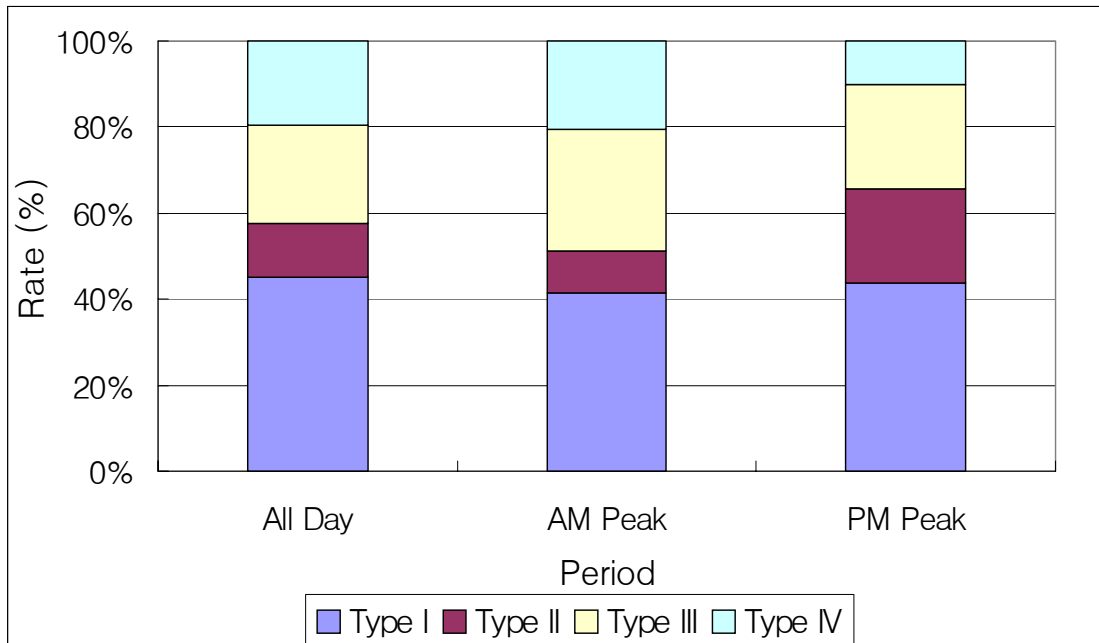


Fig 3-5. Phase Type Ratios of the Periods

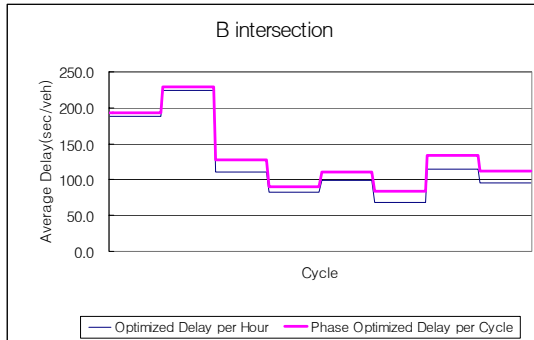
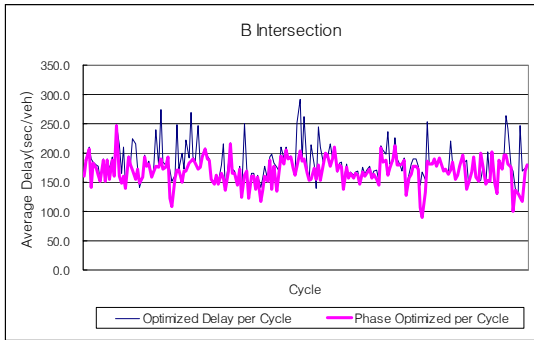
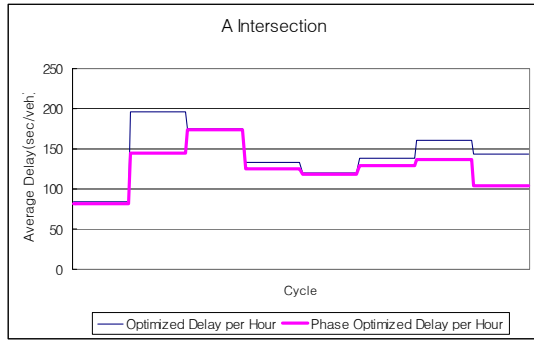
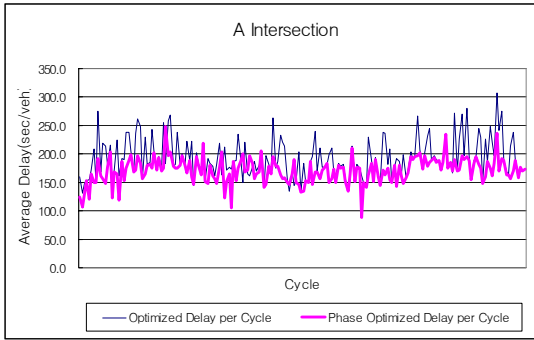


Fig 3-6. Delay Distribution of Cycle-based and Hour-based Optimizations

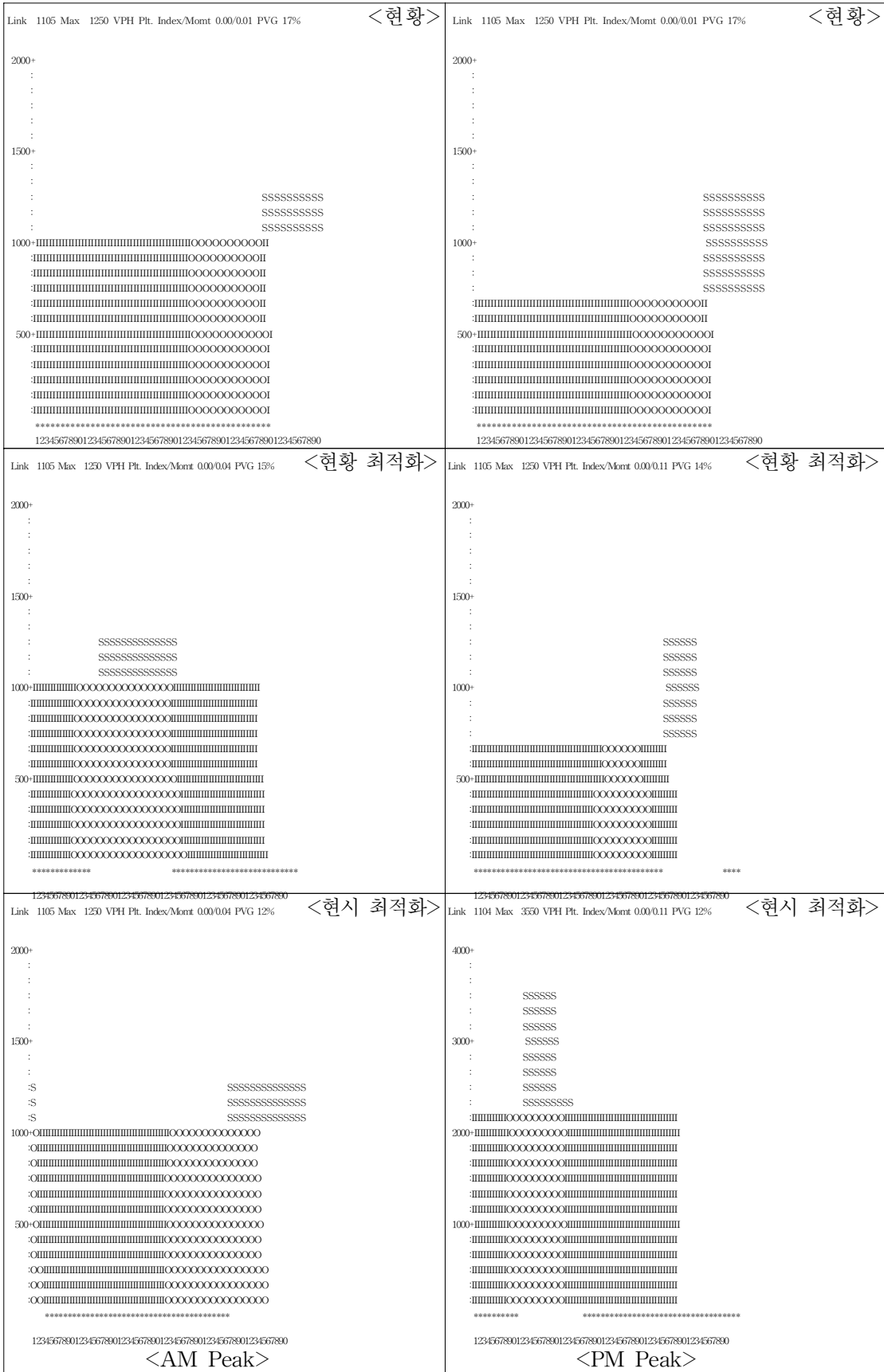


Fig 3-7. Flow Profile Diagram(A Intersection)

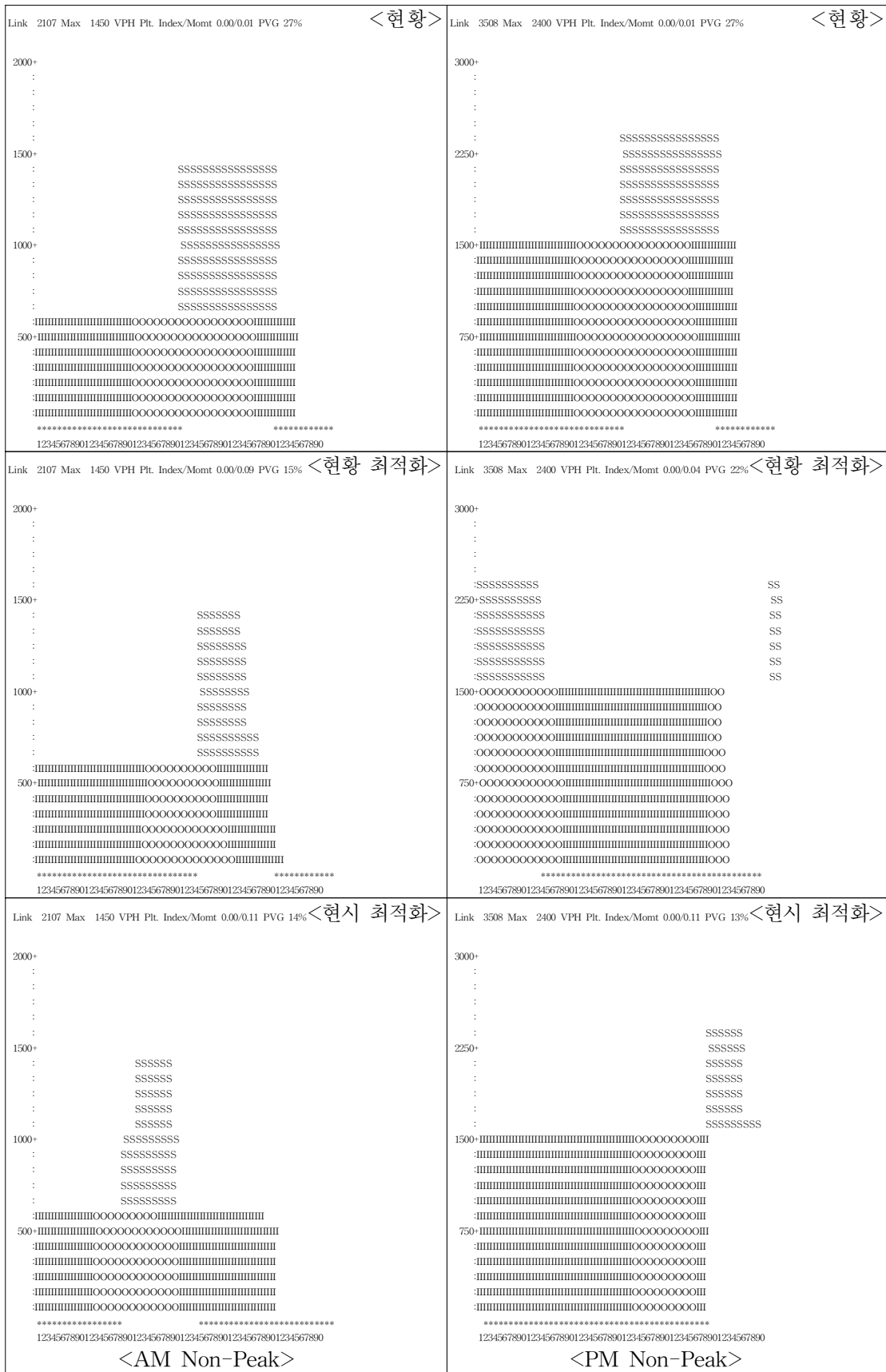


Fig 3-9. Flow Profile Diagram(A Intersection)

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 부산지역내 주요 간선도로상의 고정식 4지 신호교차로의 교통체계 분석과 실시간의 주기별 관측자료를 바탕으로 주기/현시 최적화 전(simulation)·후(optimization) 지체특성 분석결과를 비교함으로써 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- i) 고정식 4지 교차로에 대한 교통체계의 특성분석결과 첨두시간대의 전형적인 첨두특성이 나타나지 않았으므로 기존의 첨두 1시간 교통량 중심의 시간별 교통체계에 비하여 실시간 주기별 교통체계가 효율적일 것으로 판단되었다.
- ii) 고정식 4지 교차로에 있어서 기존의 시간별 지체분석의 결과는 실시간 주기별 지체분석의 결과에 비하여 통과 차량당 약 50sec정도 지체 편차가 발생하는 것으로 나타나 실시간 주기별 교차로 운영체계 구축이 필요할 것으로 판단되었다.
- iii) 고정식 4지 교차로에 있어서 실시간 주기별 신호주기 최적화 전·후 지체분석의 결과로부터 통과 차량당 적어도 약 20%이상의 지체감소효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.
- iv) 고정식 4지 교차로에 있어서 실시간 주기별 신호현시 최적화 전·후 지체분석의 결과로부터 통과 차량당 적어도 약 30%이상의 지체감소효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

이상의 본 연구결과를 바탕으로 향후에 간선도로 전 구간에 대해 실시간 현시체계 중심의 연동화 시스템에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

- 1) N. M. Roupail, "Cycle-By-Cycle Analysis of Congested Flow at Signalized Intersection ?" , ITE Journal, pp. 33-36, March. 1991.
- 2) W. H. Kraft, "Traffic Congestion - What Have We Learned ?" ,ITE Journal, pp. 27-31 February. 1989.
- 3) A. K. Rathi and E. B. Lieberman, "Reducing Traffic Congestion in Herald Square" , ITE Journal, pp. 27-31, September. 1986.
- 4) ITE Technical Council Committee 4A-24, "Management of Damaging Traffic Queues(A summary Report)" , ITE Journal, pp. 37-38, June. 1988.
- 5) 진 동 준, "독립교차로의 신호현시 최적화에 관한 연구" , 국민대학교 대학원, 2, 1995.
- 6) 차 진 풍, "실시간 주기별 교차로 신호체계 최적화에 따른 지체변화에 관한 연구" , 한국 해양대학교 대학원, 2, 2001.
- 7) 김 아 영, "부산지역 고정식 신호교차로의 시간대별 소통체계 최적설계에 관한 연구" , 한국 해양대학교 대학원, 2, 1997.
- 8) McTrans, "TRANSYT-7F Software(Ver. 8.2) Users Manual" , the Center, University of Florida, Dec. 1999.
- 9) Transportation Research Board, "Highway Capacity Manual" , Highway Capacity Manual , 2000.
- 10) McTrans, "Study Shows TRANSYT-7F Benefits Tallahassee Motorists" , Transportation Research Center, University of Florida, Vol. 10, No. 2, Dec. 1995.
- 11) 안 현 철, "TSM기법을 고려한 부산지역 간선도로의 최적설계에 관한 연구" 한국해양대학교 대학원, 2, 1994.
- 12) 김 병 철, "보호·비보호 혼용좌회전 신호체계를 고려한 부산지역 신호교차로의 최적설계에 관한 연구" 한국해양대학교 대학원, 2, 1998.
- 13) 이 은 진, "Bus Links를 고려한 부산지역 간선도로 소통체계의 최적설계에 관한 연구" 한국해양대학교 대학원, 2, 1995.

- 14) 김 경 철, “교통신호의 페이스 순서 및 페이스 간격을 고려한 신호최적화” 대한교통학회지, pp. 45-58. 06, 1996.
- 15) 도 철 응, “TSM 전략과 효율 측정-사례연구를 중심으로” 대한교통학회지, pp. 3-11. 07, 1986.
- 16) 임 용 택, “혼잡시 신호제어전략 연구” 대한교통학회지, pp. 81-92. 09, 1998
- 17) 건 설 부, “도로용량편람(KHCM)” , pp. 33-85. 1992
- 18) 도 철 응, “교통공학원론(上, 下)” , 청문각, 1998.
- 19) 원 제 무, “도시교통론” , 청문각, 1998.

감사의 글

먼저 부족한 저를 이 자리에 있기까지 이끌어 주시고 많은 관심과 따뜻한 애정을 보여주신 김태곤 교수님과 사모님께 깊은 감사의 말씀을 올립니다. 바쁘신 와중에도 논문 심사를 맡아주신 김도삼 교수님, 경갑수 교수님과 학부과정에서부터 지금까지 끊임없는 관심을 보여주신 이중우 교수님께도 감사를 드립니다.

대학원 생활 동안 멀리서나마 많은 조언과 격려를 아끼지 않은 안현철, 이은진, 신광식, 김아영, 김동수, 김승길 선배님 연구실 생활을 함께 하며 저에게 직접적인 도움을 주시고 추억을 함께 한 김정훈 선배님, 진풍, 양주씨 특별히 자료정리에 도움을 준 태준에게도 깊은 감사를 전합니다.

또한, 바쁜 와중에도 도움을 아끼지 않은 대호, 경진, 동환, 순범, 인석씨 그리고 연구실의 지영, 현아와 토목공학과 후배들과 윤석, 진원, 정권, 진배, 나의 절친한 친구 종훈, 한준, 희탁, 건식, 성철, 옆에서 힘이 되어준 재석, 광호씨, 승현씨 이 글을 더불어 고마움을 전합니다.

못난 아들을 지금까지 공부시키느라 고생 많으셨던 아버님과 낮으로 밤으로 뒷바라지하시느라 마음고생 많으셨던 어머니, 믿고 지켜봐 준 정미, 정혜, 매제 그리고 나의 유일한 조카 예림이에게 깊은 감사와 사랑의 마음을 전합니다.