

보호·비보호 혼용좌회전 신호체계를 고려한 부산지역 신호교차로의 최적설계에 관한 연구

김 병 철* · 김 태 곤**

Optimal Design of the Signalized Intersections in Pusan Area using the
Protected-Permissive Left-Turn Signal System

B. C. Kim · T. G. Kim

Key Words : 교통체계개선(Transportation System management, TSM), 통행체계분석(Travel System Analysis), 도로체계분석(Roadway System Analysis), 신호체계분석(Signal System Analysis), 첨두교통량(Peak Traffic Volumes), 평균지체시간(Average Delay, AD), 연료소모량(Fuel Consumption, FC), 보호좌회전(Protected Left-Turn), 비보호좌회전(Permissive Left-Turn), 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn)

Abstract

The purpose in this study was to review the travel characteristics of the left-turn signal system on the signalized intersections under the study in Pusan area, construct the appropriate transportation systems under the different left-turn signal systems : Protected Left-Turn signal system, Permissive Left-Turn signal system, and Protected-Permissive Left-Turn signal system based upon the travel characteristics reviewed, and finally suggest the optimal left-turn signal system which could reduce traffic delay and fuel consumption, and also improve traffic safety on the signalized intersections based upon the optimal transportation system constructed.

Based upon the results, it was concluded that the Protected-Permissive Left-Turn signal system would be better and safer than the Permissive Left-Turn signal system in the aspects which could reduce decrease delay and fuel consumption, and simultaneously increase traffic safety on the signalized intersections, even if the optimal Permissive

* 한국해양대학교 산업대학원

** 한국해양대학교 해양토목공학과 교수

Left-Turn signal system was found to be the best left-turn signal system in the aspects of the Measures of Effectiveness(MOE) on the intersections under the study.

1. 서론

1.1 연구 배경

오늘날 대부분의 도시지역에 있어서 가장 해결하기 어려운 문제 중의 하나가 교통문제다. 특히, 도시지역내 주요 간선도로를 포함하여 대부분의 도로가 출·퇴근시간대(rush hours)에 극심한 교통체증을 겪고 있기 때문에 교통문제는 우선적으로 해결되어야 할 심각한 도시문제가 되고 있다. 그런데, 대부분의 도시지역에서 확보하고 있는 교통시설은 매우 열악하며, 새로운 교통시설을 확충하기 위한 투자재원 및 시설용지 또한 한정되어 있다. 그러므로, 도시지역에서는 지속적으로 새로운 교통시설의 확충과 함께 기존 교통시설을 최대한으로 활용할 수 있는 적절한 교통체계개선(Transportation Systems Management, TSM)방안이 절실히 요구되고 있으며, 이러한 교통여건에 있어서 부산지역 또한 예외는 아니다.

부산지역은 인구 4백만의 대도시로서 약 30% 이상이 산지로 구성되어 있고, 도로형태가 남북방향의 대상형으로 발달되어 있으며, 간선도로를 중심으로 대체도로와 우회도로가 극히 부족한 지역이다. 또한, 도시인들의 생활수준이 향상되고, 활동영역이 확대됨으로써 통행수요가 날로 급증하고 있으며, 연평균 약 16%이상의 높은 차량증가율과 1996년 현재 약 15%정도의 현저하게 부족한 교통시설로 인하여 심각한 교통문제에 직면함은 물론, 도시기능까지 마비되는 사태에 이르고 있다. 더구나, 주요 간선가로와 신호교차로에 있어서의 전반적인 교통체계가 효율적으로 설계·운영되지 못하여 간선도로의 소통능력을 저하시킴으로써 교통문제는 한층 더 심화되고 있는 실정이다.

1.2 연구 목적 및 필요성

일반적으로 도시지역에서는 출·퇴근시간대에 한하여 간선도로에 출·퇴근차량이 집중함으로써

교통체증이 발생하고 있으나, 대도시지역에서는 대부분의 간선도로가 출·퇴근시간대에 관계없이 많은 차량으로 붐비고 있다.

부산지역의 경우 대부분의 간선도로가 교통량의 집중으로 인해 교통 서비스수준(Level of Service, LOS)이 최악의 서비스수준(LOS)인 F수준을 나타내고 있고, 또한 대부분의 간선도로가 용량이 초과되어 운영됨으로써 교통체증이 가중되고 있으며, 더구나 간선도로의 그릇된 도로체계와 부적절한 신호체계의 운영으로 가로와 교차로의 소통능력이 더욱 감소되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 신호교차로의 교통체계개선(TSM) 방안에 근거를 두고 i) 신호교차로(Signalized Intersection)에 있어서 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계의 통행특성을 검토하고, ii) 통행특성자료를 바탕으로 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계, 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계 그리고 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체계를 구축하여 비교 분석하며, iii) 신호교차로의 소통능력과 안전을 증대시킬 수 있는 최적의 좌회전 신호체계를 제시하고자 한다.

1.3 문헌 조사

미국의 Gerry De Camp와 R. W. Denny, JR에 따르면, '간선도로의 신호교차로상에서 녹색의 직진 신호현시 중에 좌회전 차량으로 하여금 좌회전 통행(left-turning)을 할 수 없을 정도로 반대 방향의 직진통행이 많은 경우를 제외하고 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체계는 좌회전 차량에 대해서 평균지체시간(AD)을 감소시켜 주고 있다. 특히, 비보호좌회전 신호 중에 좌회전통행을 해야 하는 차량이 많은 경우에 보호·비보호 혼용좌회전 현시체계는 좌회전 차량의 통행이 다른 신호에 다소 피해를 주면서까지 확보하고 있는 녹색 좌회전 시간(green arrow)

을 상당한 부분을 줄일 수 있다.’ 라고 보고함으로써 도시지역내 보호 신호교차로상의 교통체증을 완화시키기 위해서는 보호·비보호 혼용좌회전 신호체계가 더 효율적임을 역설하였다.

미국의 Kenneth R. Agent의 보호·비보호 혼용 좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체계 적용지침에 따르면, ‘간선도로의 신호교차로상에서 보호·비보호 혼용좌회전 신호체계는 보호좌회전 신호체계와 비교하여 신호시간을 단축시킬 수 있기 때문에 보다 효율적인 좌회전 신호체계의 운영방법이다. 그러나, 보호·비보호 혼용좌회전 신호체계가 보호좌회전 신호체계에 비하여 다소 좌회전 교통사고의 발생 가능성이 높기 때문에 가능하다면 신호교차로의 접근로상에서 제한속도가 시속 70Km이하이거나, 좌회전 차량이 좌회전통행시에 교차하게 되는 반대방향 직진 차량의 수가 2차로 이하이거나, 좌회전 교통사고의 발생건수가 1년에 3건 이하인 신호교차로에 대해서 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체계를 권장할 수 있다.’ 라고 보고함으로써 신호교차로의 보호·비보호 혼용좌회전 신호체계의 적용에 있어서 좌회전 차량으로 인한 교통안전 측면을 강조하였다.

미국의 Ronald R. Greiwe에 따르면, ‘좌회전 전용차로가 없이 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계로 운영되는 신호교차로에 대해서는 좌회전 전용차로를 설치하고, 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계를 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계로 전환시키며, 신호등을 현대화시킨 결과, 좌회전 교통사고가 약 78%정도 감소하였고, 우회전 교통사고 역시 약 85%정도 감소하였으며, 교차로 전체의 교통사고가 약 67%정도 감소하였다.’ 라고 보고함으로써 신호교차로에 있어서 보호좌회전 신호체계가 비보호좌회전 신호체계에 비하여 약 70%정도의 교통사고를 줄일 수 있다는 측면에서 더 안전한 신호체계임을 입증하였다.

미국의 Nazir Lalani, Daniel Cronin, David Hattan과 Terrence Searls에 의해 마련된 좌회전 현시(Left-Turn Phasing) 적용기준에 대한 기술위원회 보고서(Technical Notes)에 따르면, ‘미국내

신호교차로상에 좌회전 현시가 꼭 필요한 경우는 여러 가지가 있을 수 있겠으나, 특히 그 중에서도 1) 신호교차로상에서 연간 좌회전 교통사고가 3-5건 이상인 경우, 2) 반대 방향의 직진 차량이 2차로이면 좌회전차량과 직진차량의 곱(cross product)이 30,000-50,000을 초과하는 경우, 3) 반대 방향의 직진 차량이 4차로이면 좌회전차량과 직진차량의 곱(cross product)이 50,000-100,000을 초과하는 경우, 4) 시간당 좌회전 차량의 수가 50-100대를 초과하는 경우, 5) 매 신호주기당 좌회전 차량의 수가 2대를 초과하는 경우, 그리고 6) 좌회전차량의 비율이 직진차량의 10%를 초과하는 경우 등에는 좌회전 현시를 반드시 고려할 필요가 있다.’ 라고 보고함으로써 신호교차로상의 좌회전 현시를 적용하는데 있어서 신중해야 함을 강조하였다.

따라서, 연구대상 신호교차로상에서 좌회전차량의 소통을 원활하게 하고, 도로용량을 증대시키기 위해 보호좌회전 신호체계를 갖는 교차로에 대한 교통체계분석 : 통행체계분석, 도로체계분석 및 신호체계분석을 기초로 한 최적의 교통체계를 구축할 필요가 있었다.

1. 4 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 부산지역내 보호좌회전 현시체계를 갖는 26개의 신호교차로 즉, A 교차로(시청앞 교차로), B 교차로(부산 우체국앞 교차로), C 교차로(세관앞 교차로), D 교차로(범내골 교차로), E 교차로(서면 교차로), F 교차로(송공 교차로), G 교차로(양정 교차로), H 교차로(연산 교차로), I 교차로(내성 교차로), J 교차로(수안 교차로), K 교차로(유엔묘지앞 교차로), L 교차로(대연 교차로), M 교차로(수영 교차로), N 교차로(서대신 교차로), O 교차로(괴정 교차로), P 교차로(부암 교차로), Q 교차로(백병원앞 교차로), R 교차로(미남 교차로), S 교차로(안락 교차로), T 교차로(범곡 교차로), U 교차로(금정 경찰서앞 교차로), V 교차로(봉래 교차로), W 교차로(원동 I.C. 교차로), X 교차로(덕천 교차로), Y 교차로(하마정 교차로), Z 교차로(사하 경찰서앞 교차로)등이 선정되었다. 그러나, 연구대

상 신호교차로에 대한 분석결과 H 교차로(연산 교차로), I 교차로(내성 교차로), K 교차로(유엔모지 앞 교차로), P 교차로(부암 교차로), R 교차로(미남 교차로)와 S 교차로(안락 교차로)등 6개 교차로는 교차로의 처리용량에 비하여 첨두시간대 교통량이 과다하게 집중되어 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 지나치게 높게 산정됨으로써 연구대상 교차로의 분석결과에 대한 신뢰성을 저해시킬 수 있다고 판단되어 나머지 20개 신호교차로에 대해서만 교통체계분석을 실시하였다.

특히, 신호교차로에 대해 시뮬레이션(Simulation) 분석과 최적화(Optimization)분석을 실시하여 서비스수준(LOS)분석과 주요 통행방향별 교통량흐름도(Flow Profile Diagrams)분석결과를 상호 비교함으로써 첨두시간대를 중심으로 최적의 좌회전 교통체계를 제시하였다.

2. 교통 체계 분석

본 연구에서는 교차로별 첨두교통량을 중심으로 통행체계분석을 실시하였고, 교차로상의 기하구조 현황을 중심으로 도로체계분석을 실시하였으며, 노면표지와 신호표지, 신호주기와 신호현시 그리고 통과차량의 도류화 형태 등 신호체계의 현황을 중심으로 신호체계분석을 실시하였다.

2.1 통행 체계 분석

본 연구에서는 부산지역내 연구대상 교차로의 각 통행방향에 대해 1일 12시간 교통량을 4개의 서로

다른 시간대 즉, 오전 출근시간대(AM Commuting Period ; 07:00~09:00), 오전 업무시간대(AM Non-Commuting Period ; 09:00~12:00), 오후 업무시간대(PM Non-Commuting Period ; 14:00 ~ 17:00) 그리고 오후 퇴근시간대(PM Commuting Period ; 17:00~19:00)로 분류하여 각 교차로별 첨두시간대를 결정하였다(참조 Fig. 2.1).

또한, 연구대상 교차로의 첨두교통량을 산정하기 위하여 미국의 도로용량편람(Highway Capacity Manual, HCM)에 근거를 두고 조사된 차종별 통행량에 대해 Table 2.1과 같은 승용차환산단위(Passenger Car Units, pcu)를 적용하였다.

Table 2.1 Passenger Car Units for the Vehicles (Unit : pcu)

Veh. Type	승용차	택시	승합차	트럭	버스	이륜차	특수차	컨테이너
PCU	1	1	1.5	2.5	2	0.5	2.5	4

첨두시간계수(Peak Hour Factor, *PHF*)는 관측된 첨두시간대의 첨두 1시간 교통량을 15분 단위의 교통량으로 분류하여 첨두 15분 동안 교통량의 집중정도를 나타내는 것으로 다음 식(2. 1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,
PHF ; 첨두 시간 계수

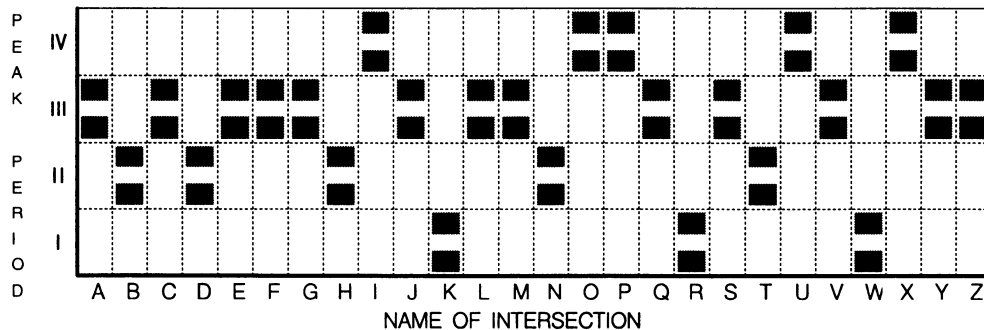


Fig. 2.1 Peak-Time Periods of the Signalized Intersections in Pusan

V_{15} ; 첨두 15분 교통량
 V ; 첨두 1시간 교통량

능력을 증대시키는 측면에서 이루어져야 된다고 판단되었다(참조 Figs. 2.1, 2.2).

연구대상 교차로에 대한 첨두시간계수(PHF)는 시간대별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았기 때문에 첨두교통량 산정시 각 교차로에 대해 시간대별 첨두시간계수의 평균치를 적용하였다. 특히, 교차로별 첨두시간계수의 평균치를 산정한 결과, T 교차로(범곡 교차로)와 W 교차로(원동 IC)를 제외한 대부분의 교차로에서 첨두시간계수(PHF)가 0.9 이상으로 나타났으며, 대부분의 교차로에서는 첨두 1시간 동안에 통행량이 고루 분포하고 있었다(참조 Table 2.2).

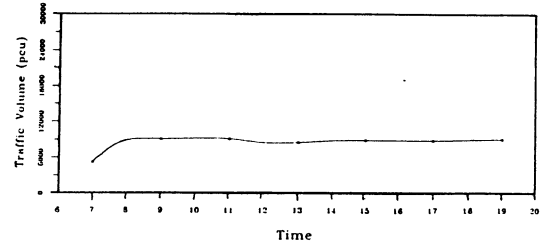


Fig. 2.2 Traffic Volume Distribution on the Intersections under the Study

2. 2 도로 체계 분석

본 연구는 연구대상 교차로의 기하구조와 도로

Table. 2.2 Average Peak Hour Factor(PHF) on the Intersections

Intersection	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
PHF	0.94	0.96	0.96	0.95	0.95	0.96	0.93	0.99	0.91	0.98	0.97	0.91	0.93
Intersection	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
PHF	0.94	0.94	0.94	0.97	0.98	0.97	0.88	0.98	0.98	0.87	0.93	0.98	0.92

또한, 연구대상 교차로의 총 통행량은 교차로마다 차이는 있었지만, 대체적으로 약 5,500pcu~17,060pcu정도로 나타났다. 그러나, F 교차로(송공삼거리 교차로)를 포함한 몇몇 교차로에서는 방향별로 좌회전차량의 점유비율이 10%미만으로 낮게 관측된 반면, 대부분의 교차로에서는 좌회전차량의 점유비율이 최저 10%에서 최고 81%까지 관측됨으로써 좌회전차량으로 인한 교차로의 교통체증이 가중되고 있었고, 대부분의 교차로에서 각 교차로별 신호주기당 최저 9대에서 최고 196대에 이르는 좌회전차량을 통과시킴으로써 좌회전차로상에서 긴 대기행렬이 발생되고 있었다.

따라서, 연구대상 교차로들에 있어서 출·퇴근시간대와 첨두시간대가 일치한다고 볼 수 없었으며, 오히려 오전과 오후 업무시간대에 업무통행이나 화물통행 그리고 기타통행(상품구매통행 포함)이 집중함으로써 교차로의 교통체증을 더욱 가중시키고 있었기 때문에 통행체계분석은 교차로의 소통

체계를 중심으로 실측을 통해서 이루어졌다. 연구대상 교차로는 대체적으로 간선도로의 핵심교차로로서 도시교통체계의 근간을 이루고 있었으나, 교차로의 접근부에 있어서 차로가 통행방향별로 적절하게 지정되어 있지 않아 통행량을 효율적으로 처리할 수 없었고, 차로폭이 도로시설용량에 비하여 비효율적으로 배정되어 있었으며, 교차로내의 공간이 지나치게 넓어 주어진 신호시간에 미처 통과하지 못한 대기차량들로 인하여 교차로의 정체가 가중되고 있었다.

특히, 연구대상 교차로의 접근부 폭원은 대체로 약 10~30m로 동일방향에서도 약간의 차이가 있었으며, 각 차로폭은 약 3~5m정도로 이상적인 차로폭(3.6m)과 비교해 볼 때 현저한 차이를 보이고 있었다. 또한, 교차로 접근부에 있어서 차로수는 편도 1~7차로까지 확보되어 있었는데, 그 중에서 직진과 좌회전 차로수는 편도 1~5차로까지 확보되어 있었고 우회전 차로는 직진과 공유 차로로 지

정되었거나 또는 1~2차로는 확보되어 있었으나, 교차로 우측 주변에 일시적으로 주·정차하고 있는 택시와 각종 차량들로 인해 실제 우측 차로가 제대로 이용되지 못하고 있었다. 더구나, 동일방향의 차로폭과 차로수의 불균형으로 인해 운전자들로 하여금 혼란을 주고 있었고, 교차로 접근부에서 차량의 접근능력이 저하됨으로써 교통혼잡과 정체가 점점 심화되고 있었다.

따라서, 연구대상 교차로 접근부의 차로폭 및 차로수를 재조정해야 했고, 교차로내의 공간을 활용하여 접근차량의 대기공간을 확보해야 했으며, 교차로 주변의 불법차량에 대한 단속을 강화시킬 필요가 있었다. 또한, 첨두시간대에 집중하는 좌회전 차량의 점유율이 상대적으로 높은 교차로에서 좌회전차량의 과다로 인한 교차로의 정체가 가중되고 있었기 때문에 도로체계분석은 교차로의 소통능력을 증대시키는 측면에서 이루어져야 한다고 판단되었다.

2.3 신호 체계 분석

본 연구는 연구대상 교차로에 있어서 각 방향별 신호등, 신호현시, 교통표지 그리고 노면표시 등을 중심으로 실측을 통해서 이루어졌다. 또한, 교차로의 각 방향별 차량통행에 따른 신호등의 신호주기, 신호현시, 교통표지 및 노면표시 등을 면밀히 관측하였는데, 신호체계는 대체적으로 110~280초(sec) 사이의 신호주기와 3~6단계의 신호현시와 함께 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계로 운영되고 있었고, 교차로 접근부에서는 노면표시와 도류화표시가 방향별로 표시되어 있었다.

특히, 각 교차로의 주방향별 유효녹색시간비(Effective Green Time)는 F 교차로(송공삼거리 교차로)가 0.91로 다른 교차로에 비하여 상대적으로 높게 나타난 것을 제외하고는 대체적으로 약 0.19~0.64사이의 값을 나타내고 있었다. 또한, 연구대상 교차로의 차량통계방법으로는 신호등(Signals), 신호현시(Signal Phase), 교통표지(Signs), 노면표시(Markings)와 도류화표시(Channelizations) 등이 있었으나, 대체적으로 신호등을 제외한 나머

지 신호현시, 교통표지, 노면표시와 도류화표시는 차량들에 의해 제대로 지켜지지 않고 있었고, 교통표지 역시 적절한 위치에 있지 않았기 때문에 오히려 교차로의 접근부와 교차로내에서 교통사고의 위험성과 교통정체의 요인이 되고 있었으며, 신호등의 위치와 신호주기 및 신호현시가 방향별 유·출입통행량에 대해 적절하게 설계되어 있지 않아 신호교차로의 소통체계를 악화시키고 있었다.

따라서, 연구대상 교차로의 신호주기, 신호현시, 교통표지, 노면표시와 도류화표시가 각 방향별 통행특성과 신호체계운영에 적합하지 않았기 때문에 신호체계에 대한 재조정이 요구되었고, 또한 대부분의 신호교차로상에서 좌회전차량의 집중으로 인한 교통정체가 가중되고 있었기 때문에 신호체계 분석은 교차로의 소통능력을 증대시키는 측면에서 이루어져야 된다고 판단되었다.

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

연구대상 교차로의 소통능력은 교차로의 서비스 수준(Level of Service, LOS)으로 상호 비교·분석하였다. 일반적으로, 교차로의 서비스수준(LOS) 분석에는 (1) 교통량과 교통용량의 비(v/c ratio)에 의한 서비스수준(LOS) 분석과 (2) 평균지체시간(AD)에 의한 서비스수준(LOS) 분석 등이 있으나, 본 연구에서는 평균지체시간(AD)에 의해 서비스수준(LOS)을 분석하였고, 또한 서비스수준(LOS)을 극대화시키기 위해서 TRANSYT-7F의 최적화 목적함수(Objective Function)가 사용되었다.

평균지체시간에 의한 교차로의 서비스수준(LOS) 분석 모형(Model)에는 Webster Model, TRANSYT-7F1Model, HCM Model, Queueing Model 등이 있으나, 신호교차로의 서비스수준(LOS)분석에 널리 사용되고 있는 모형(Model)은 TRANSYT-7F 모형이다. 특히, TRANSYT-7F 모형에서 신호교차로상의 총 평균지체시간(Total Average Delay, D)은 교차로 상에 차량의 대기행렬로부터 산출되는 균일지체시간(Uniform Delay, D_u)과 차량의 임의도착 및 포화상태로 인한 임의포화지체시간(Random and Saturation Delay, D_s)의 합으로 구



성되어 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = D_u + D_{rs} \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서,

- D ; 총 지체시간 (sec)
- D_u ; 균일지체시간 (sec)
- D_{rs} ; 임의포화지체시간 (sec)

또한, 차량들의 규칙적인 도착에 의하여 발생하는 균일지체시간(Uniform Delay, D_u)은 다음과 같다.

$$D_u = \sum_{t=1}^N m_t / N \dots\dots\dots (2.3)$$

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_{rs})은 다음과 같다.

$$D_{rs} = 900 TX^2 \{ (X-1) + [(X-1) + (4X/cT)]^{1/2} \} \cdot (3600/v) \dots\dots\dots (2.4)$$

여기서,

- D_{rs} ; 임의 포화지체(random-plus-saturation delay) (veh-hr/hr)
- X ; 포화도
- c ; 용량 (vph)
- v ; 교통량 (vph)
- T ; 주기(Period Length, 보통 60분)

더구나, 본 연구대상 교차로의 서비스수준을 극대화시키기 위해 사용된 TRANSYT-7F(Ver 7.2, 1994)의 목적함수는 표준지체(Standard Delay)와 정지횟수(Stops)를 중심으로 구성된 불용지수(Disutility Index, DI)를 최소화(Minimization)시키

는 것으로 정의되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimize } DI = \sum_{i=1}^n [W_{di} \cdot d_i + K \cdot W_{si} \cdot S_i] + U_i [W_{di-1} \cdot d_{i-1} + K \cdot W_{si-1} \cdot S_{i-1}] + Q \cdot B_i [W_q (q_i - qc_i)^2] \dots\dots\dots (2.5)$$

여기서,

- DI ; 불용지수(disutility index)
- d_i ; 링크 i상에서의 지체 (veh-hr)
- K ; 지체와 관련하는 "stop penalty"
- S_i ; 링크 i상에서의 정지(stops/sec)
- W_{di}, W_{si} ; 링크 i의 지체 및 정지에 대한 가중치
- U_i ; 링크 i에 대해 가중치가 주어졌다면 '1', 그렇지 않다면 '0'
- Q ; DI 상에 최대 후미 대기행렬 "penalty"를 사용자가 포함하고자 한다면 '1', 그렇지 않다면 '0'
- B_i ; 최대 후미 대기행렬(q_i)이 사용자가 정의한 storage capacity를 증가한다면 '1', 그렇지 않다면 '0'
- W_q ; 전체 network에 대해 "spillover"를 나타내기 위해 적용되는 "penalty"
- q_i ; 링크 i상에서의 계산된 최대 후미 대기행렬의 길이
- qc_i ; 링크 i상에서의 최대 후미 대기행렬의 용량

또한, 평균지체시간에 의해 교차로의 서비스수준(LOS)을 분석할 때 평균지체시간이 약 78.0초를 초과하면 교차로의 서비스수준이 매우 열악한 상태(LOS F수준)로 간주되는데, 본 연구대상 교차로에 대한 서비스수준(LOS)분석 결과, 대부분 교차로상에서 평균지체시간이 약 78.0초를 초과하는 것으로 나타났다.

따라서, 연구대상 교차로에 대해 방향별 차로수와 차로용량을 재조정해야 하고, 서비스수준(LOS) 분석 결과에 따라 전반적인 통행체계, 도로체계 및 신호체계 등을 개선시키는 측면에서 교통체계개선(TSM)방안 이 수립되어야 한다고 판단되었다.



2.5 교통량 흐름도(Flow Profile Diagrams) 분석

본 연구에서는 연구대상 교차로의 각 신호체계별 시뮬레이션분석(Simulation)과 최적화분석(Optimization)을 통해서 선정되는 주요 통행방향(Link)에 대해 교통량흐름도(Flow Profile Diagrams)를 비교·분석한 결과, 대체적으로 좌회전 차로(Left-turn Lane)에서는 녹색시간에 도착하는 많은 차량들이 교차로를 빠져나가지 못해 녹색신호시간인데도 정체차량이 누적되고 있었고, 또한 직진 차로(Thru Lane)나 우회전 차로(Right-turn Lane)에서도 용량부족으로 인해 심한 정체가 나타나고 있었다. 그러나, 연구대상 교차로에 있어서 동일 통행방향(Link)이라 하더라도 서로 다른 최적의 신호체계가 구축됨으로써 보다 원활한 소통을 보이고 있었다.

따라서, 연구대상 교차로의 방향별 통행량을 보다 원활하게 소통시킬 수 있는 통행체계, 도로체계 및 신호체계를 개선시키는 측면에서 교통체계개선(TSM)방안이 수립되어야 할 것으로 판단되었다.

3. 교차로 분석

본 연구에서는 연구대상 교차로에 대해 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계, 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계와 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체계에 따른 시뮬레이션분석(Simulation)과 최적화분석(Optimization)을 통해 상대적인 효과측도(Measures of Effectiveness, MOE)를 종합적으로 비교·분석하였다.

연구대상 교차로에 대한 시뮬레이션분석(Simulation)의 결과 E 교차로(사하경찰서앞 교차로)를 제외하고 대체적으로 심각한 지체수준인 F 수준을 나타내고 있었으므로 기존의 신호체계에 대한 타당성을 검토와 개선방안을 제시할 필요가 있었다. 특히, 현재 운영되고 있는 보호좌회전 신호체계를 최적화하여 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 약 55%정도 감소하는 것으로 나타났다, 기존의 보호좌회전(Protected Left-Turn)

신호체계를 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 변경하여 동일 신호주기로 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)의 감소율이 각각 약 82%와 81%정도로 나타났다. 또한, 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계를 최적화하여 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)은 보호좌회전 신호체제로 운영할 때에 비하여 각각 약 93%와 92%정도 감소하는 것으로 나타났으며, 기존의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 최적의 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 88%와 87%정도 감소하는 것으로 나타났다(참조 Tables 3.1, 3.2, 3.3, 3.4).

Table 3.1 MOEs between Protected Initial Setting and Protected Optimal Setting

Analyses Parameter	Initial Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Protected Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	1,995.5	786.6	55.43
Fuel Consumption (lit/hr)	16,588.4	6,199.0	54.53

Table 3.2 MOEs between Protected Initial Setting and Permissive Initial Setting

Analyses Parameter	Initial Setting of Protected Signal Phase	Initial Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	1,995.5	243.8	81.62
Fuel Consumption (lit/hr)	16,588.4	2,144.6	80.86

Table 3.3 MOEs between Protected Initial Setting and Permissive Optimal Setting

Analyses Parameter	Initial Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	1,995.5	135.9	93.19
Fuel Consumption (lit/hr)	16,588.4	1,283.3	92.26

Table 3.5 MOEs between Protected Optimal Setting and Permissive Initial Setting

Analyses Parameter	Optimal Setting of Protected Signal Phase	Initial Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	786.6	243.8	69.01
Fuel Consumption (lit/hr)	6,199.0	2144.6	65.40

Table 3.4 MOEs between Protected Initial Setting and Mixed Optimal Setting

Analyses Parameter	Initial Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Mixed Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	1,995.5	159.8	88.42
Fuel Consumption (lit/hr)	16,588.4	1,455.8	87.36

Table 3.6 MOEs between Protected Optimal Setting and Permissive Optimal Setting

Analyses Parameter	Optimal Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	786.6	135.9	83.63
Fuel Consumption (lit/hr)	6,199.0	1283.3	82.07

또한, 기존의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 최적화하여 운영할 경우와 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계로 변경하여 동일주기로 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 69%와 65%정도 감소하는 것으로 나타났고, 최적의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계로 운영할 경우와 최적의 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계로 변경하여 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 84%와 82%정도 감소하는 것으로 나타났으며, 최적의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계로 운영할 경우와 최적의 보호·비보호 혼용좌회전(Protected -Permissive Left-Turn) 신호체계로 변경하여 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 둘다 약 74%정도 감소하는 것으로 나타났다(참조 Tables. 3-5, 3-6, 3-7).

Table 3.7 MOEs between Protected Optimal Setting and Mixed Optimal Setting

Analyses Parameter	Optimal Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Mixed Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	786.6	159.8	74.31
Fuel Consumption (lit/hr)	6,199.0	1455.8	73.50

더구나, 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계로 변경하여 최적으로 운영할 경우와 단순히 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계로 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 57%와 52%정도 감소하는 것으로 나타났고, 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계로 운영할 경우와 최적의 보

호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제로 변경하여 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 약 14%정도 감소하는 것으로 나타났으며(참조 Tables. 3-8, 3-9), 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제와 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제를 최적으로 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 43%와 38%정도 감소하는 것으로 나타났다(참조 Table. 3-10). 한편, 연구대상 교차로들 중에서 J 교차로(수안 교차로)에 대한 교차로 분석결과는 다음과 같았다.

Table 3.8 MOEs between Permissive Initial Setting and Permissive Optimal Setting

Parameter \ Analyses	Initial Setting of Permissive Signal Phase	Optimal Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	243.8	135.9	56.60
Fuel Consumption (lit/hr)	2144.6	1283.3	51.91

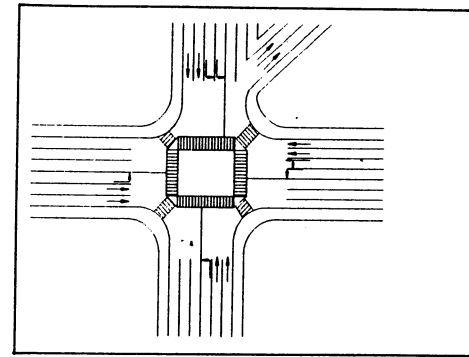
Table 3.9 MOEs between Permissive Initial Setting and Mixed Optimal Setting

Parameter \ Analyses	Initial Setting of Permissive Signal Phase	Optimal Setting of Mixed Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	243.8	159.8	14.40
Fuel Consumption (lit/hr)	2144.6	1,455.8	13.74

Table 3.10 MOEs between Permissive Optimal Setting and Mixed Optimal Setting

Parameter \ Analyses	Optimal Setting of Permissive Signal Phase	Optimal Setting of Mixed Signal Phase	Rates of Increase
Average Delay (sec/veh)	135.9	159.8	43.38
Fuel Consumption (lit/hr)	1283.3	1,455.8	38.79

3.1. J 교차로(수안 교차로)



4-Leg Intersection(J)

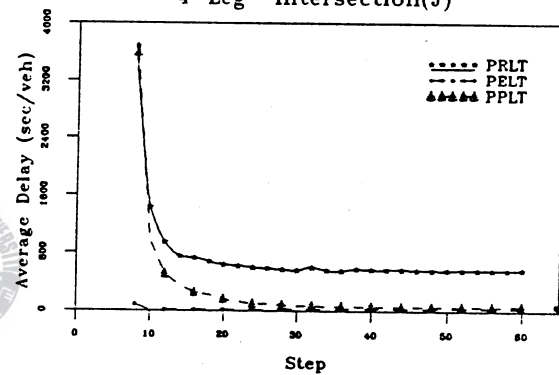


Fig. 3.1 Geometric Conditions and Cycle Evaluation(Intersection J)

본 교차로분석을 위해 선정된 J 교차로(수안 교차로)는 4지(4-Leg) 교차로로 신호주기는 180초에 5현시(Phase)로 운영되고 있었다. 역시 Fig. 2.1에서 알 수 있듯이 J 교차로(수안 교차로)의 첨두시간대는 출퇴근시간대와는 달리 오후 2시에서 5시 사이로 이때의 첨두교통량은 약 8,870pcu정도를 나타내고 있었다.

한편, J 교차로(수안 교차로)에 대해 첨두시간대를 중심으로 시뮬레이션분석을 실시한 결과, 평균 지체시간(AD)은 1,821.3 sec/veh정도로 나타났고, 연료소모량(FC)은 12,502 lit/hr정도로 나타났으며, 첨두시간대에 가장 심한 지체를 나타내는 통행방향(Link)을 살펴보면, 남쪽에서 북쪽방향으로 향하는(N-Bound) 좌회전 통행(Left-Turn Link, Link 1302)에서 가장 심한 교통체증이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 보호좌회전 신호체제를 최적화

하여 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)에 있어서 각각 약 70%와 69%정도 감소하는 것으로 나타났고, 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 변경하여 동일 신호주기로 운영할 경우 평균지체시간(SD)과 연료소모량(FC)의 감소율이 약 98%정도로 나타났다. 특히, 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계를 최적화하여 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)은 보호좌회전 신호체제로 운영할 때에 비하여 각각 약 98%와 99%정도 감소하는 것으로 나타났으며, 기존의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 최적의 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 97%와 96%정도 감소하는 것으로 나타났다(참조 Tables 3.11, 3.12, 3.13, 3.14).

Table 3.11 MOEs between Protected Initial Setting and Protected Optimal Setting (Intersection J)

Analyses Parameter	Initial Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Protected Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	1,821.3	553.6	69.60
Fuel Consumption (lit/hr)	12,502.0	3,843.0	69.26

Table 3.12 MOEs between Protected Initial Setting and Permissive Initial Setting (Intersection J)

Analyses Parameter	Initial Setting of Protected Signal Phase	Initial Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	1,821.3	34.7	98.09
Fuel Consumption (lit/hr)	12,502.0	282.0	97.74

Table 3.13 MOEs between Protected Initial Setting and Permissive Optimal Setting (Intersection J)

Analyses Parameter	Initial Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	1,821.3	15.0	98.18
Fuel Consumption (lit/hr)	12,502.0	144.0	98.85

Table 3.14 MOEs between Protected Initial Setting and Mixed Optimal Setting (Intersection J)

Analyses Parameter	Initial Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Mixed Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	1,821.3	59.4	96.74
Fuel Consumption (lit/hr)	12,502.0	458.0	96.34

또한, J 교차로(수안 교차로)에 대해 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 최적화하여 운영할 경우와 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 변경하여 동일주기로 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 94%와 93%정도 감소하는 것으로 나타났고, 최적의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우와 최적의 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 변경하여 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 97%와 96%정도 감소하는 것으로 나타났으며, 최적의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체제와 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 89%와 86%정도 감소하는 것으로 나타났다(참조 Tables 3.15, 3.16, 3.17).

Table 3.15 MOEs between Protected Optimal Setting and Permissive Initial Setting (Intersection J)

Analyses Parameter	Optimal Setting of Protected Signal Phase	Initial Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	553.6	34.7	93.73
Fuel Consumption (lit/hr)	3,843.0	282.0	92.66

Table 3.16 MOEs between Protected Optimal Setting and Permissive Optimal Setting (Intersection J)

Analyses Parameter	Optimal Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	553.6	15.0	97.29
Fuel Consumption (lit/hr)	3,843.0	144.0	96.25

Table 3.17 MOEs between Protected Optimal Setting and Mixed Optimal Setting (Intersection J)

Analyses Parameter	Optimal Setting of Protected Signal Phase	Optimal Setting of Mixed Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	553.6	59.4	89.27
Fuel Consumption (lit/hr)	3,843.0	458.0	88.08

더구나, J 교차로(수안 교차로)에 대해 기존의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 변경하여 최적으로 운영할 경우와 단순히 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 57%와 49%정도 감소하는 것으로 나타났고, 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우와 최적의 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호

체제로 변경하여 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 42%와 38%정도 감소하는 것으로 나타났으며(참조 Tables 3.18, 3.19), 최적의 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계와 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우를 비교하면 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 75%와 69%정도 감소하는 것으로 나타났다(참조 Table 3.20).

Table 3.18 MOEs between Permissive Initial Setting and Permissive Optimal Setting (Intersection J)

Analyses Parameter	Initial Setting of Permissive Signal Phase	Optimal Setting of Permissive Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	34.7	15.0	56.77
Fuel Consumption (lit/hr)	282.0	144.0	48.94

Table 3.19 MOEs between Permissive Initial Setting and Mixed Optimal Setting (Intersection J)

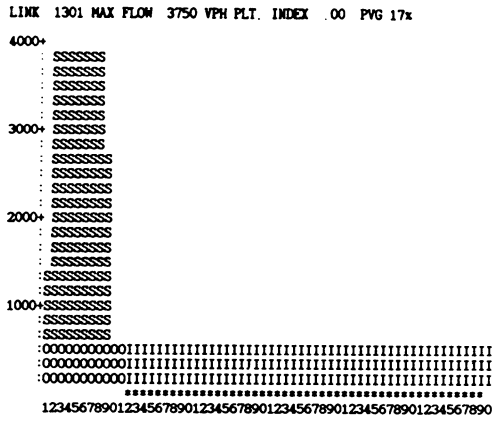
Analyses Parameter	Initial Setting of Permissive Signal Phase	Optimal Setting of Mixed Signal Phase	Rates of Reduction
Average Delay (sec/veh)	34.7	59.4	41.58
Fuel Consumption (lit/hr)	282.0	458.0	38.43

Table 3.20 MOEs between Permissive Optimal Setting and Mixed Optimal Setting (Intersection J)

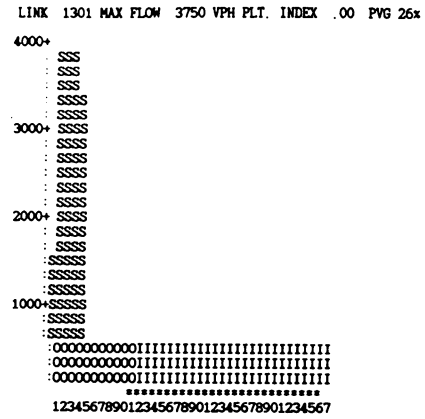
Analyses Parameter	Optimal Setting of Permissive Signal Phase	Optimal Setting of Mixed Signal Phase	Rates of Increase
Average Delay (sec/veh)	15.0	59.4	74.75
Fuel Consumption (lit/hr)	144.0	458.0	68.56

보호·비보호 혼용좌회전 신호체계를 고려한 부산지역 신호교차로의 최적설계에 관한 연구

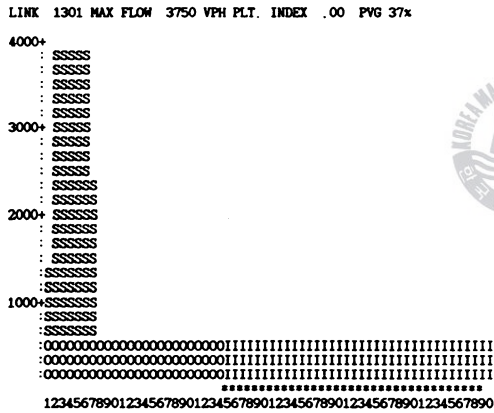
○ 보호좌회전 현황분석 (Simulation)



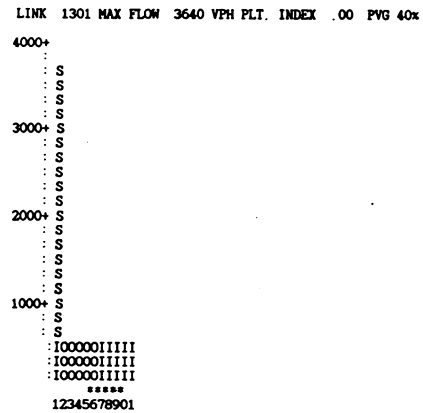
○ 보호좌회전 최적화분석 (Optimization)



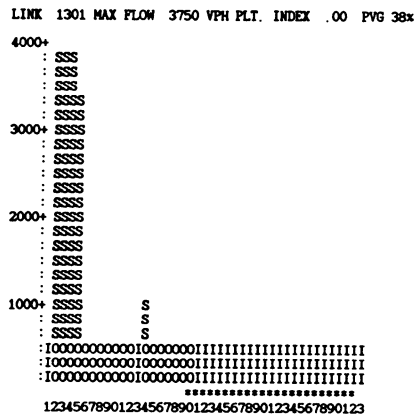
○ 비보호좌회전 현황분석 (Simulation)



○ 비보호좌회전 최적화분석 (Optimization)



○ 보호·비보호좌회전 최적화분석 (Optimization)



<기호설명>

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

Fig. 3.2 Flow Profile Diagrams of Thru Link 1301(Intersection J)

따라서, J 교차로(수안 교차로)의 교통체계개선을 위해서는 역시 교차로의 통행특성에 대한 심도 있는 분석과 함께 직진통행(thru movements)보다는 좌회전통행(left-turn movements)에 보다 역점을 두어 교차로 기하구조를 재설계해야 하며, 첨두시간대의 첨두교통량에 적절히 대처할 수 있도록 현재의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 최적의 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제로 전환하여 운영하는 것이 좌회전차량을 한층 원활하게 통행시킬 수 있고, 또한 교차로상에서 좌회전 차량으로 인한 대기행렬과 교통사고를 줄일 수 있기 때문에 보다 효율적이고 안전하다는 사실을 알 수 있었다(참조 Figs 3.2, 3.3).

4. 결 론

본 연구에서는 부산지역의 간선도로를 중심으로 유·출입통행량이 집중되고 있는 26곳의 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 갖는 신호교차로를 연구대상 교차로로 선정하여 통행체계, 도로체계 및 신호체계에 대하여 분석한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

i) 연구대상 교차로의 첨두시간대를 결정하는데 있어서 교차로별로 상당한 어려움이 있었다. 대부분의 교차로에서 첨두시간대와 출·퇴근시간대가 일치하지 않았기 때문에 자료분석의 신뢰성을 증대시키기 위하여 각 교차로의 교통체계분석은 첨두시간대를 중심으로 이루어졌다.

ii) 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 최적으로 운영할 경우 현황과 비교하여 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 약 55%정도 감소하였으므로 교차로 신호체계에 대한 최적화문제가 적극 검토될 필요가 있었다.

iii) 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우 현황과 비교하여 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 82%와 약 81%정도 감소하였으며, 또한 최적의 비보호좌회전

(Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 93%와 약 92%정도 감소하였으므로 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계를 최적의 신호체제로 제시할 수도 있었으나, 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체제로 전환함으로써 교통사고가 상당히 증가하였다는 외국의 연구결과에 따라 이에 대해서 지속적으로 연구를 해야 할 필요가 있었다.

iv) 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 최적의 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영할 경우 현황과 비교하여 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)이 각각 약 88%와 약 87%정도 감소하였으나, 비보호좌회전 신호체계에 비하여 다소 평균지체시간(AD)과 연료소모량(FC)은 증가하였다고 하더라도 좌회전현시를 허용함으로써 교차로상에서 보다 안전을 증대시킬 수 있기 때문에 적극 검토할 필요가 있었다.

이상의 연구결과를 바탕으로, 부산지역내 보호좌회전(Protected Left-Turn) 신호체계를 갖는 연구대상 교차로에 대해 검토되었던 좌회전 신호체계 중에서 비록 최적의 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계가 가장 효율적이라는 분석결과에도 불구하고 교통사고의 추가 발생가능성을 고려하여 비보호좌회전(Permissive Left-Turn) 신호체계보다는 보호·비보호 혼용좌회전(Protected-Permissive Left-Turn) 신호체제로 운영하는 것이 효율성과 안전성측면에서 더 바람직하다고 판단되었다.

참고문헌

- 1) Gerry De Camp and R. W. Denny, JR., "Improved Protected-Permitted Left-Turn Signal Displays-The Texas Approach", ITE Journal, pp. 21-24, October 1992.
- 2) Kenneth R. Agent, "Guidelines for the Use of

- Protected/Permissive Left-Turn Phasing”, ITE Journal, pp. 37-42, July 1987.
- 3) Ronald R. Greiwe, "Intersection Management Techniques for the Left-Turning Vehicle : The Indianapolis Experience", ITE Journal, pp. 23-28, October 1986.
 - 4) Nazir Lalani, Daniel Cronin, David Hattan, and Terence Searls, "A Summary of the Use of Warrants for the Installation of Left-Turn Phasing at Signalized Intersections", ITE Technical Notes ITE Journal, pp. 57-59, April 1986.
 - 5) W. H. Kraft, "Traffic Congestion-What Have We Learned ?", ITE Journal, pp. 24-26, February 1989.
 - 6) A. K. Rathi and E. B. Lieberman, "Reducing Traffic Congestion in Herald Square", ITE Journal, pp. 27-31, September 1986.
 - 7) ITE Technical Council Committee 4A-24, "Management of Damaging Traffic Queues(A Summary Report)", ITE Journal, pp. 37-38, June 1988.
 - 8) Shui-Ying Wong, "Application of TRANSYT-7F in China", ITE Journal, pp. 38-42, August 1988.
 - 9) Transportation Research Board, "Highway Capacity Manual", Special Report 209, 1985.
 - 10) McTrans, "TRANSYT-7F Software(Ver. 7.2) Users Manual", the Center, University of Florida, December 1991.
 - 11) James L. Pline, "Traffic Engineering Handbook 4th Edition", Institute of Transportation Engineers, 1991.
 - 12) W. S. Homburger and J. H. Kell, "Fundamentals of Traffic Engineering 12th Edition", published by Univ. of California at Berkeley, October 1989.
 - 13) 김태곤, "부산지역 도시교통체계의 개선방안에 관한 연구", 한국항만학회, 제8권 제1호, 6. 1994.
 - 14) 김태곤, "교차로 신호체계 최적화를 이용한 소통체계 개선방안에 관한 연구", 한국해양대학교 부설 산업기술연구소, 제11집, 12. 1993.
 - 15) 김태곤, "대도시 교통문제완화를 위한 간선도로별 신호체계의 최적설계에 관한 연구", 한국항만학회, 제8권 제2호, 12. 1994.
 - 16) 안현철, "TSM기법을 고려한 부산지역 간선도로의 최적설계에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 2. 1994.
 - 17) 이은진, "Bus Links를 고려한 부산지역 간선도로 소통체계의 최적설계에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 2. 1995.
 - 18) 김아영, "부산지역 고정식 신호교차로의 시간대별 소통체계 최적설계에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원, 8. 1996.
 - 19) 오영태 외 1인, "도시부 신호교차로의 기본용량 및 기하구조 보정계수", 대한교통학회지, 제10권 제2호, 8. 1992.
 - 20) 도철웅, 교통공학원론(상, 하), 청문각, 1. 1994.
 - 21) 부산광역시, '94년도 차량교통량 조사결과, 12. 1994.
 - 22) 부산광역시, '95년도 차량교통량 조사결과, 12. 1994.
 - 23) 부산광역시 교통관광국, 교통 및 관광통계자료, 5. 1994.