

■ 論 文 ■

양방향 좌회전차로(TWLTLs) 적용효과 분석 및 설치준거 연구

A Study on Effectiveness and Warrant Analysis for Two-Way Left-Turn Lanes

배 광 수

(도로교통안전관리공단 선임연구원)

심 관 보

(도로교통안전관리공단 책임연구원)

송 창 용

(도로교통안전관리공단 책임연구원)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 필요성 및 목적
 - 2. 연구수행방법
 - 3. 연구수행절차
 - II. 문헌고찰 및 기존연구 검토
 - 1. TWLTL의 일반적 특징 및 장단점
 - 2. TWLTL 설치 가이드라인
 - 3. TWLTL와 교통안전
 - 4. TWLTL와 교통운영
 - III. 모의실험 및 결과분석
 - 1. 방법론 검토
 - 2. 시나리오 설계 및 효과척도 선정
 - 3. 결과분석
 - 4. TWLTL 설치준거 제시
 - IV. 현장 네트워크 적용 및 평가
 - V. 결론 및 향후과제
- 참고문헌

Key Words : 양방향 좌회전차로, 여행시간지체, 추돌소요시간, 평균일교통량, 다중경로진입, 설치준거 TWLTL, Travel Time Delay, TTC(Time To Collision), ADT, Multi-Path Entrance, Warrant

요 약

양방향 좌회전차로(TWLTLs : Two-Way Left-Turn Lanes)는 도로중앙에 양방향의 좌회전 차량이 이용할 수 있는 연속진행형 좌회전 차로가 설치된 불균등차로 시스템의 한 형태로써, 접속밀도가 높고 좌회전 교통수요가 각 회전지점별로 넓게 분산되어 있을 때 큰 운영 개선효과를 나타낼 수 있는 접근관리기법으로 알려져 있다. 본 연구에서는 양방향 좌회전차로의 국내 도입 가능성을 검토하기 위한 초기단계로써, 미시적 교통류 분석 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용, 가상 네트워크와 실 네트워크에 대한 TWLTL 설치 전·후 모의실험을 수행하여 운영효율 및 안전성을 평가하였으며, 이를 기초로 설치준거를 제시하였다. VISSIM 모의실험 결과, 주도로의 직진 및 좌회전 이동류에 대한 상당수준의 지체감소를 확인하였으며, 교통 안전적으로도 큰 개선효과가 있었던 것으로 분석되었다. 본 연구는 국내에서 최초로 시뮬레이션 분석모형을 활용하여 양방향 좌회전차로의 운영효과 및 안전성 개선효과를 평가하고, 교통량·지체·안전도를 고려한 TWLTL의 설치준거를 제시하였다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있을 것이다.

A two-way left-turn lane is a continuous center left-turn lane that could be used as a deceleration and refuge area for both directions of left-turning vehicles. TWLTL's have been used effectively for access management treatment when applied to a highway that has wide-spread left turning traffic demand and a high-density of side streets. In this study, an effective analysis was carried out using a computer-based simulation tool, VISSIM, in order to evaluate performance and safety effects of TWLTLs and develop a warrant. In conclusion, the results indicated that there was a remarkable decrease of through and left-turning vehicle travel time delay on the main road and improvement of traffic safety.

1. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

양방향 좌회전차로(TWLTL: Two-Way Left-Turn Lane)는 1950년에서 1970년에 걸쳐 미국에서 처음으로 설치·운영되기 시작하였으며, 이는 기존 도로의 운영 개선과 안전적 측면의 문제를 해결하기 위한 노력의 일환이었다. 도로가 신설되고 시간이 경과함에 따라 도로주변지역이 급속히 개발되었고, 개발지역으로 진입하기 위한 좌회전 교통수요도 동시에 증가하게 되면서 많은 문제들이 유발되기 시작하였는데, 좌회전차량과 직진차량과의 후미충돌사고나 대향 직진차량과의 충돌사고 등 교통사고가 빈발하게 되었으며, 지체도 급격히 증가하게 되었다.

이에 대한 해결방안으로 제시된 대안 중의 하나가 TWLTL이다. TWLTL은 불균등차로제의 한 형태로서, 기존 도로의 중앙선을 제거하고 연속적인 진행이 가능한 양방향 좌회전 및 유턴(U-Turn)차량 전용의 중앙차로를 설치하여 운영한다. 주도로상의 좌회전 차량을 직진차로에서 효과적으로 분리시킬 뿐만 아니라, 대향 직진 교통류 사이에서 회전할 수 있는 허용차간간격(Acceptance Gap)을 발견할 때까지 안전하게 대기할 수 있는 회피공간을 제공함으로써, 주도로의 지체와 상충을 크게 감소시킬 수 있었다. 국내에서도 1994년경 전주에서 간선도로에 빈번한 도로좁음으로 인한 운영적·안전적 문제를 해결하기 위한 방안으로써 제한적으로 양방향 좌회전차로가 설치·운영된 사례가 있었으나, 관련 자료는 현재 남아 있지 않은 상태이다.

TWLTL의 설치를 고려할 수 있는 곳은 주거시설 또는 휴게소 등 편의시설이 비교적 밀집되어 설치된 시가지 주변지역 및 지방부의 소규모 도시지역으로써 평균일교통량(ADT: Average Daily Traffic)이 약 5,000~12,000vpd¹⁾ 수준인 도로가 적합한 것으로 알려져 있다. 따라서 평균주행속도가 상대적으로 낮은 도로로써, 교차로별로 회전수요가 높지 않고, 도로주변 시설에 대한 주민들의 접근 요구가 많은 경우, TWLTL은 적절한 운영적 대안이 될 수 있다.

국내 평면교차로의 좌회전 교통류 처리방법은 신호운

영에 의한 보호 좌회전/비보호 좌회전과, 무신호 교차로에서의 정지/양보 표지 및 통행우선권에 의한 좌회전으로만 구분되어 있다. 그러나 도시외곽지역이나 국도 및 지방도 주행 중 자주 만날 수 있는 도로변의 주거 및 상가밀집지역은 길지 않은 구간 내에 많은 수의 접근지점(Access Points)을 가지고 있고, 좌회전 수요도 공간적으로 넓게 분산되어 있어, 기존의 좌회전 처리방법으로는 운영적·안전적으로 뚜렷한 한계를 보이고 있다. 이러한 구간은 회전지점간 짧은 이격거리 때문에 적정 기준과 제원으로 좌회전 베이(bay)를 설치하기도 어려우며, 각 교차지점을 신호에 의해 통제할 경우, 주 이동류의 심각한 지체를 초래하게 된다. 또한, 직진차량과 감속중이거나 대기하는 좌회전차량과의 추돌사고 위험성을 항상 존재하고 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 연속진행형 좌회전 처리 시스템인 양방향 좌회전차로(TWLTL)의 국내 도입을 검토하기 위한 초기단계로써, 미시적 교통류 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하여 운영효율 및 교통안전 지표에 대한 “사전-사후분석(Before&After Analysis)”을 수행하였으며, 분석결과를 활용하여 양방향 좌회전차로에 대한 설치준거를 제시하였다.

2. 연구 수행방법

본 연구에서는 TWLTL의 평가 툴(Tool)로써 독일 PTV사의 미시적 교통류 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하였다. 분석 네트워크의 링크연장, 접속밀도, 교차로 평균이격거리 등 도로구조적 환경에 대한 모델링은 미국의 TWLTL 설치 가이드라인(Guideline)²⁾을 참고하였다.

분석구간의 평균일교통량(Average Daily Traffic)은 5,000vpd~20,000vpd이며, 이는 양방향 2차로 도로의 용량수준으로 고려할 때 LOS B~F까지의 범위에 해당된다. 교차로별 좌회전 비율은 3단계(10%, 20% 30%)로 구분하였으며, 분석구간내 중요교차로(CI)와 비중요교차로(MI)의 회전비율을 차등화해 설계하였다. 컴퓨터 모의실험의 한계상, 운영개선에 따른 교통안전도의 변화는 직접 분석하기가 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 간접적인 교통안전 지표로써 TTC(Time To

1) 일평균 교통량(ADT) 범위는 미국의 주별 양방향좌회전 차로 설치 가이드라인을 참조

2) 본 연구에서 참고한 미국의 양방향 좌회전차로 설치준거는 아이오와주 교통성(Iowa DOT) 및 오키오주 교통성(Ohio DOT)이 제시한 가이드라인이며, 본 가이드라인에는 최소연장기준, 최대접속밀도기준, 최소차로폭기준, 평균일교통량 기준 등이 제시되어 있음

Collision)³⁾을 활용하였으며, TTC의 단계별 변화상황 분석을 통해 양방향 좌회전차로 적용이 네트워크의 교통 안전에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 연구수행절차

본 연구의 수행절차는 <그림 1>과 같다.



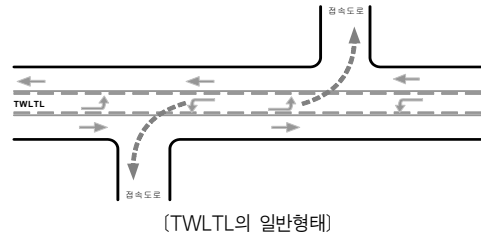
<그림 1> 연구수행절차

II. 문헌고찰 및 기존 연구 검토

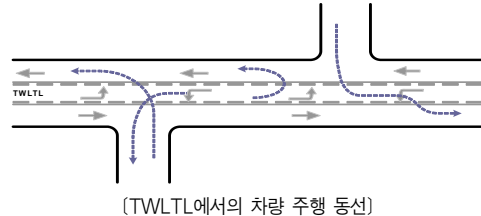
1. TWLTL의 일반적 특징 및 장단점

양방향 좌회전차로는 일반적으로 3차로 형태로 운영되며, 중앙 1개 차로를 양방향 좌회전차량의 감속 및 대기공간으로 활용한다. <그림 2>에서와 같이 양방향 좌회전차로는 좌회전차량 뿐만 아니라, 적정 노폭이 확보되었을 경우는 유턴차량의 대기 공간으로도 이용이 가능하다. 또한, 부도로서 진출한 좌회전 차량은 분선합류에 필요한 허용차간간격(Acceptance Gap)이 발생할 때까지 양방향 좌회전차로 내에 대기할 수 있다.

양방향 좌회전차로는 노면표시에 의한 일반 좌회전차



(TWLTL의 일반형태)



(TWLTL에서의 차량 주행 동선)

<그림 2> TWLTL의 형태 및 차량 주행동선

로 또는, 중앙분리대 등 물리적 시설에 의해 운영되는 도로에 비교해 운영적으로 다양한 특성을 나타낸다. 다음은 일반적 차로운영 방법과 비교한 양방향 좌회전차로의 상대적인 장·단점을 나타낸 것이다(Juan C. Pernia et. al., 2004).

○ 장점(advantage)

- i) 교차도로의 접속밀도가 매우 높은 경우에도, 좌회전 차량을 직진 교통류로부터 효과적으로 분리시킬 수 있음
- ii) 대부분의 적용구간에서 좌회전 차량 및 직진차량의 지체를 감소시킬 수 있음
- iii) 도로인접지역으로의 직접적 접근이 가능
- iv) 탄력적이고 유연한 도로사용 및 운영 가능
: 우회로의 기능, 비상·응급차량의 주행로로 사용, 고장차량의 임시대피 공간으로 활용

○ 단점(disadvantage)

- i) 전방시거가 제한적인 구간에서는 안전적인 문제를 유발시킬 수 있음
- ii) 노면표시 적용에 따른 가시성의 문제
- iii) 차량 상충지점의 증가(접속도로 이용차량)
- iv) 일부 운전자에게 주행차로, 혹은 추월차로로 오용될 가능성

3) TTC(Time To Collision: 추돌소요시간): TTC는 미시적 교통류 시뮬레이션 모형상에서 각 선행-후행차량간의 상대속도와 거리 등의 데이터를 활용하여, 네트워크의 안전도를 평가하는 방법으로, 사고데이터 등의 실제자료의 활용이 여의치 못할 경우, 시뮬레이션 모형을 활용한 교통안전적 효과평가를 위한 대안으로써 FHWA에서 제시하고 있는 기법임. 통상적으로, TTC가 4초 이하인 경우를 위험상황으로 분류되며, 전체 TTC 데이터 중 위험상황으로 분류된 TTC 데이터의 비율을 통해 네트워크의 안전도를 평가할 수 있음

- v) 보행자를 위한 횡단시설 설치 시 대피지역(Refuge Areas)을 제공할 공간이 없음
- vi) 운전자들이 양방향 좌회전차로 이용방법에 대해 잘 인지하지 못하는 경우가 많음

2. TWLTL 설치 가이드라인(Guideline)

AASHTO의 "A Policy on Geometric Design of Highway and Streets"(2001)에는 "TWLTL은 주행속도가 25mph~45mph 수준으로 상대적으로 낮고, 좌회전 교통수요의 과도한 집중이 발생되지 않는 간선도로에 적용할 경우에 개선효과를 나타낼 수 있으며, 도시지역내 각 방향 직진차로가 2개 이하인 도로에 적용토록 해야 한다."라고 명시되어 있어 '주행속도'와 '편도차로수', 그리고, '좌회전 수요'가 주요 고려사항임을 제시하고 있다.

Parker(1983)는 기존 4차로 도로의 평균일교통량(ADT)이 10,000vpd~20,000vpd 범위이며, 마일(mile)당 교차도로(Street)가 5개 이하일 때, 또는 마일당 국지급의 접속도로(Driveway)가 30개 이하일 경우, TWLTL의 적용을 통해 교통사고 발생율을 감소시킬 수 있는 것으로 평가하였다.

〈표 1〉은 오하이오(Ohio)주와 아이오와(Iowa)주 교통성에서 제시한 양방향 좌회전차로의 설치 가이드라인을 나타낸 것으로, 평균일교통량, 최소설치연장, 좌회전 교통량, 차로 폭폭 등 에 대한 기준이 제시되어 있다.

〈표 1〉 TWLTL 설치 가이드라인(미국)

오하이오주 교통부 (Ohio DoT)
· 양방향 2차로 평균일교통량이 5,000~12,000대일 경우
· 첨두시간중 좌회전 교통량이 70대 이상 발생되거나, 총교통량의 20%이상의 좌회전 교통량 발생시
· 최소 설치 연장은 300m임.
· 좌회전 차로폭원은 지역여건에 따라 최소 3.0m에서 최대 3.6m를 적용
아이오와주 교통부 (Iowa DoT)
· 양방향 2차로 평균일교통량이 6,000~10,000대일 경우
· 최소 설치 연장은 400m (더 짧게 설치하려면 별도의 교통영향을 검토)
· 좌회전 차로폭원은 최소 3.3m에서 최대 4.2m 적용

4차로 도로를 3차로 형태로 변환하여 운영하는 과정에서 적용되고 있기 때문에, 양방향 2차로 도로를 TWLTL로 변환한 사례나 혹은, 이 과정에서의 교통사고율 변화 등에 대한 연구자료를 찾기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 주로 기존의 왕복 4차로를 3차로 형태의 양방향 좌회전차로로 변환하여 적용했을 경우의 교통안전적 효과에 대한 기존 연구 및 분석 결과를 정리하여 제시하였다.

Harwood(1986)는 교외 간선도로의 교차지점 개선에 관한 교통안전 효과분석 연구를 수행하였다. 기존의 비분리된 양방향 2차로에 TWLTL을 적용할 경우, 교통사고율이 약 11%~35%까지 감소될 것으로 예측하였다. 또한, 비 분리된 양방향 4차로 도로에 적용할 경우는 19%~35%, 그리고 도시지역내 양방향 4차로도로에 적용할 경우는 약 44%의 교통사고 감소효과가 있을 것으로 분석하였다. 감소될 사고유형으로는 후미충돌(rear-end)사고, 정면충돌(head-on)사고, 접촉(sideswipe)사고 등 대부분의 사고유형이 포함될 것으로 제시하였다.

NCHRP Report 395 (Bonneson et. al., 1997)와 NCHRP Report 420 (Gluck et. al., 1999)에서는 양방향 좌회전차로의 적용과 관련된 다양한 교통사고 예측모형에 대한 종합적 분석결과를 제시하였는데, 비분리도로의 교통사고율이 가장 높고, 다음으로 양방향 좌회전차로와 중앙분리대 설치도로 순으로 높은 교통사고 발생률을 나타낼 것으로 분석하고 있다. 〈표 2〉는 다양한 교통사고 예측모형을 검토하여 '비분리도로', 'TWLTL 설치도로', 그리고 '중앙분리대 설치도로' 등 3개 유형의 도로에서 발생될 것으로 예측되는 연간 마일(mile)당 교통사고율의 분석결과를 나타낸 것이다.

〈표 2〉 다양한 예측모형을 이용한 도로운영형태에 따른 연간 마일당 교통사고 발생률 변화⁴⁾

평균일교통량(vpd)	비분리도로(건/mile)	TWLTL(건/mile)	중앙분리대(건/mile)
10,000	48	39	32
20,000	126	60	55
30,000	190	92	78
40,000	253	112	85

3. TWLTL과 교통안전(Traffic safety)

양방향 좌회전차로(TWLTL)는 대부분 기존의 왕복

2000년대 들어서는 기존 4차로 도로에 TWLTL과 중앙분리대를 설치했을 경우의 교통사고율 변화에 대한

4) 〈표 2〉의 교통사고율 예측에는 "Bonneson & McCoy Model" 등 다양한 모형을 활용하여 산출된 평균값을 제시하고 있음 (참고문헌 6)

비교연구가 진행되었다(Juan C. Pernia, 2004). 연구 결과에 의하면, 양방향 좌회전차로는 모든 교통량 조건 하에서 교차도로 접속밀도가 마일(mile)당 60개 이하일 때 상대적으로 안전한 것으로 분석되었으며, 좌회전차량에 의한 후미상충이 빈번하게 발생하는 구간이나, 소수의 교차구간과 많은 접속도로(Driveway)가 존재하는 간선급 도로에 적용될 경우, 교통안전적 수준을 높일 수 있을 것으로 예상하였다.

4. TWLTL과 교통운영

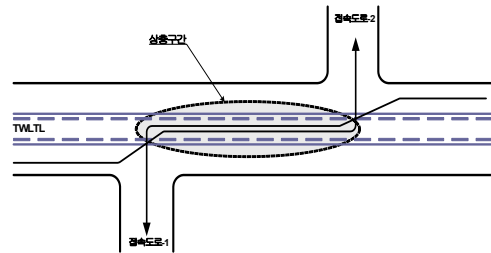
William(2004)은 Texas Avenue 및 Broadway Avenue 등 기존 가로를 대상으로 중앙분리대를 적용했을 경우(U-Turn 허용조건에 따라 다시 2가지 case로 분류)와 TWLTL을 적용했을 경우의 주행속도 및 안전도 변화에 대한 VISSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, Texas Avenue에서는 ADT 18,000(대/일) 이하 범위에서, Broadway Avenue에서는 전체 분석범위(~48,000대/일)에서 TWLTL이 상대적으로 높은 주행속도를 나타내는 것으로 분석되었다. Harwood(1986)는 사례 분석을 통해 기존 양방향 2차로 도로에 TWLTL을 적용했을 경우, 직진 및 좌회전 지체가 감소했음을 보였고, 특히, 좌회전 지체의 감소효과는 교통량 수준 및 도로 접속밀도가 증가할수록 커짐을 확인하였다. 또한, Bonneson(1997)등은 좌회전 교통류 처리형식에 따른 연간지체(Annual Delay) 분석을 통해, TWLTL 또는 중앙분리대가 설치된 도로가 기존의 비분리 도로에 비해 약 50%~60%이상의 지체감소 효과가 있음을 제시하였다.

III. 모의실험 및 결과분석

1. 방법론 검토

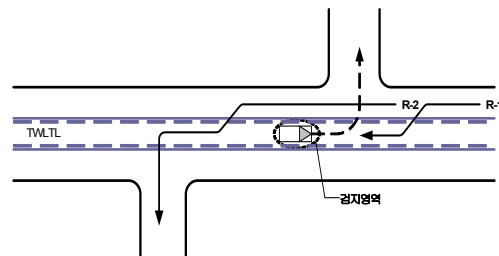
양방향 좌회전차로는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 네트워크를 구현하여 적용효과를 평가하기가 가장 까다로운 운영형태 중 하나로 꼽히고 있다. 그 이유는 대항방향의 두 회전 이동류가 동일차로(좌회전차로)를 점유하기 때문에 경로선택과 모델링 과정에서 상충을 유발시킬 가능성이 매우 높으며, 선행차량의 좌회전 차로내 존재 유무에 따라 후행 좌회전 차량의 주행경로가 동적으로 바뀌는 상황이 묘사되어야 하기 때문이다(Jim Dale, 2002).

VISSIM은 CORSIM 등 타 시뮬레이션 모형에서 구현하기 어려운 동적 다중경로진입(Dynamic Multi-path Entrance) 상황과 대항차량간의 동일차로 점유 등 양방향 좌회전차로의 시뮬레이션에 적합한 모델링 요소들을 가지고 있다. 또한, VISSIM은 VISVAP(VIS-Vehicle Actuated Programming)이라는 확장모듈을 활용해 사용자의 요구에 맞추어 다양한 프로그래밍을 할 수 있다. 양방향 좌회전차로의 상충구간은 <그림 3>에 제시되어 있다.



<그림 3> TWLTL의 상충발생 구간

<그림 4>는 양방향 좌회전차로에서 나타날 수 있는 대항 좌회전차량의 위치에 따른 좌회전차량의 동적 경로 변경상태를 도시한 것이다. 양방향 좌회전차로 내에서 대항방향의 좌회전 대기차량이 없는 경우는 R-1경로를 선택하게 되나, 대항방향의 좌회전 차량이 직진 교통류 사이의 차간간격(Gap)을 찾기 위해 대기하고 있는 경우, 나중에 도착하는 좌회전 차량은 R-1경로상의 대항차량이 소거될 때까지 대기하고 있거나, 또는 R-2경로를 선택하여 접속도로로 진입하게 된다.

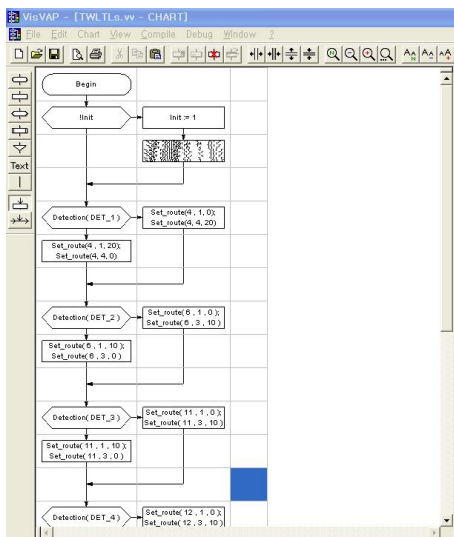


<그림 4> 대기차량에 의한 동적경로 변경

만약, 이때 좌회전 교통량이 더욱 증가하게 되면, 운전자의 주행경로 선택옵션은 더욱 세분화(대기공간이 확보될 때까지 직진차로에서 대기하거나 우회 후 U-Turn, 또

는 좌회전차로 내로 진입하여 기존차량과 side-by-side 형태로 대기)되며, 따라서 시뮬레이션을 통해 구현하기는 사실상 어렵게 된다. 본 연구에서는 현실적인 운전행동을 최대한 반영하기 위해 대항방향 좌회전 교통량이 증가하여 양방향 좌회전차로에 진입이 불가능한 경우, 좌회전 차량은 대기공간이 확보될 때까지 직진차로에서 대기하는 것으로 주행경로를 설정하였다. 따라서, 이 경우 추종하는 직진차량들은 전방에 대기 중인 좌회전 차량이 소거 될 때까지 대기행렬을 형성하게 되어 정체상황은 가중되게 된다.

〈그림 5〉는 검지기 설치를 통해 주행차량의 동적경로 변경상황을 설정하기 위한 VISVAP 프로그래밍 화면을



〈그림 5〉 VISVAP 프로그래밍 (Programming)화면

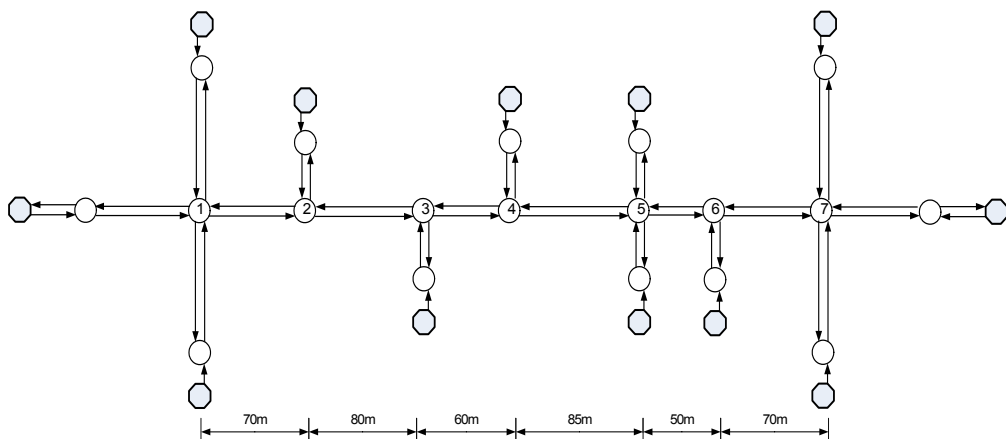
나타낸 것이다. 프로그래밍을 통해 양방향 좌회전차로 상에 설치된 검지기의 점유/비점유 정보를 검출하고, 이를 이용하여 차량이 기 설정된 2가지 주행경로 중 어떤 경로를 선택할지를 결정토록 조건을 부여하였다. 〈그림 4〉를 참고하면, 검지기가 비점유 상태일 경우는 R-1경로 이용하게 되며, 점유상태일 때는 R-2경로를 이용하여 좌회전을 실행하게 된다.

2. 시나리오 설계 및 효과측도 선정

1) 네트워크 구축 및 시나리오 설계

기존 도로에 양방향 좌회전차로를 설치 운영할 경우, 교통상황 및 도로조건에 따라 다양한 효과가 나타날 수 있다. 선행연구에 따르면, 양방향 좌회전차로 적용효과를 평가하기 위한 주요 통제변수는 '평균일교통량(ADT)', '좌회전 교통량 비율', '도로 접속밀도' 등이 있다. 본 연구에서는 '도로 접속밀도'는 고정시킨 상태에서 '평균일교통량'과 '좌회전 비율'을 변화시켜가며, 양방향 좌회전차로의 성능평가를 수행하였다.

VISSIM에서 가상 네트워크를 생성하여 도로구조를 모델링하였으며, 양방향 좌회전차로 적용 전·후의 교통 상황에 따라 총 126회의 모의실험을 시행하였다. 시뮬레이션을 위한 가상 네트워크는 총 620m의 구간연장을 가지고 있으며, 2개의 중요교차로(CI: 교차로 1, 7)와 5개의 비중요교차로(MI: 교차로 2, 3, 4, 5, 6)로 구성되어 있다. 모의실험 네트워크는 총 3개의 4지교차로와 4개의 3지교차로로 구성되어 있으며, 도로접속밀도는



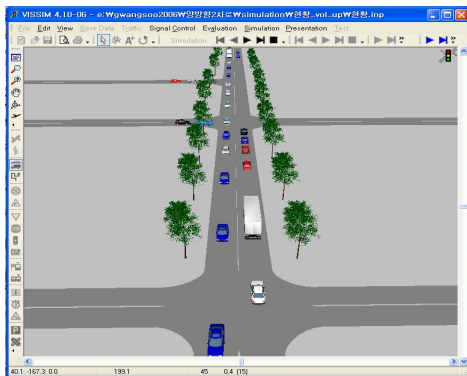
〈그림 6〉 가상 네트워크의 도로망 구조

11.2(개/km)이고, 평균교차로간 거리는 70m로 설정되었다. 총 42개 네트워크를 모델링하였으며, 네트워크 별로 Random Number Seed를 변화시켜가며 각 3회씩의 모의실험을 수행하였다. 모의실험의 주요 통제변수는 다음과 같다.

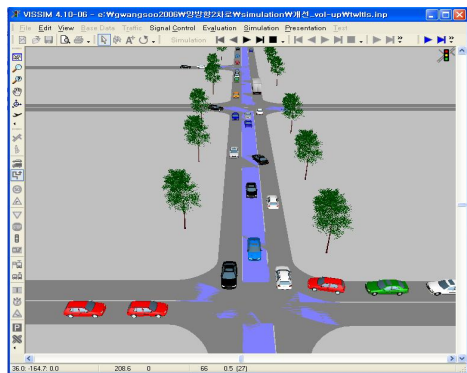
- 평균일교통량(Average Daily Traffic, 대/일)
- 좌회전비율 (Left Turning Traffic Ratio, %)

〈표 3〉 모의실험 개요 및 시나리오 구성

총 실행횟수	ADT (vpd)	주도로 좌회전교통량비율	실행 횟수	전/후 비교
총 126회	5,000	CI : 10%	×3회	×2회
	7,500	MI : 05%		
-TWLTL 적용전 : 63회	10,000	CI : 20%		
	12,500	MI : 10%		
-TWLTL 적용후 : 63회	15,000	CI : 30%		
	17,500	MI : 15%		
	20,000			



TWLTL 적용전



TWLTL 적용후

〈그림 7〉 TWLTL 적용 전·후 VISSIM 스크린샷

평균일교통량은 미국의 주별 양방향 좌회전차로 설치 기준을 기초로 범위를 설정하였으며, 양방향 2차로 도로의 한산상태인 5,000vpd부터 용량이 초과된 혼잡상태인 20,000vpd까지, 2,500vpd 간격으로 7단계 구간의 분석범위를 설정하였다.

좌회전 교통량 비율은 해당링크를 통행하는 전체차량 중 교차도로로 좌회전하는 차량의 비율을 나타낸다. 좌회전 교통량 비율은 중요교차로(CI)를 기준으로 10%, 20%, 30%의 3개 구간으로 설정하였고, 실제 도로의 교통운영 특성을 최대한 반영하기 위해 비중요교차로(MI)의 좌회전 비율은 중요교차로의 50%수준으로 설정하였다. 총 모의실험 시간은 1회당 4,500초이며, 초기 900초는 네트워크 초기화 및 안정화에 소요되는 시간으로 분류하여 효과적도(MOE) 산출시간에서 제외하였고, 후반 3,600초(1시간)동안 검출된 결과를 최종분석에 반영하였다.

2) 효과적도 선정

도로용량편람(2001)에 제시된 양방향 2차로 도로의 효과적도는 총 지체율이며, 이는 일정구간을 주행하는 차량군내에서 각 개별차량이 평균적으로 지체하는 비율을 의미한다. 하지만, 총 지체율은 본 연구와 같이 단속류 성격의 도로구간에는 적용이 바람직하지 못하다. 본 평가에서는 VISSIM에서 적용 가능한 MOE 중 여행시간지체(Travel Time Delay)와 평균통행속도(Average Travel Speed)를 적용하였다. VISSIM의 여행시간지체는 각 개별차량의 실제 네트워크 통행시간에 대한 설정된 자유속도 통행시간과의 차이를 나타낸 것으로 개념적으로 도로용량편람의 총지체율과 유사하다. 또한, 평균통행속도는 도로구간의 서비스 상태에 대한 직접적 반영이 가능하다. 따라서, 여행시간지체와 평균통행속도는 연속된 무신호 교차로로 이루어진 양방향 2차로 도로의 교통상황 및 서비스수준을 적절히 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 교통안전에 대한 평가를 위해 추돌소요시간(TTC: Time To Collision)을 분석하였다. 동일차로내 전·후차량간 추돌소요시간인 TTC는 미시적 교통류 분석 모형상에서 각 선행·후행차량간의 상대속도와 거리 등의 기본 데이터를 활용하여, 네트워크의 안전도를 평가하는 방법이다. TTC는 사고자료 등의 실제자료의 활용이 여의치 못할 경우, 시뮬레이션 모형을 활용한 교통안전 효과평가의 대안으로써 FHWA가 제시하고 있는 기법이다.

본 연구에서는 TTC 데이터 중, 4초 이하의 데이터가 차지하는 비율을 비교하여 안전도 변화를 분석하였다. 4초의 임계값을 사용하는 이유는 시뮬레이션 모형안의 운전자들은 실제 운전자와 달리, 추종주행, 가감속 등에서 완전한 운전행동을 표현하기 때문에, 현실세계에서 통상적으로 사용하는 임계값(3초) 보다는 약간 높은 수준의 기준이 필요하기 때문이다(William, 2004). VISSIM에서 TTC 데이터를 산출하기 위해서는 우선 시뮬레이션 단위시간별로 분석대상 링크를 주행하는 모든 개별차량의 속도 및 전·후 차량간 차간거리 데이터를 추출해야 하며, 이후 프로그램을 통해 TTC 데이터로 변환하는 과정을 거쳐야 한다. TTC 데이터를 산출하기 위해 계산식은 식(1)과 같다.

$$TTC = \frac{D \times 3,600}{(Speed1 - speed2) \times 1,000} \quad (1)$$

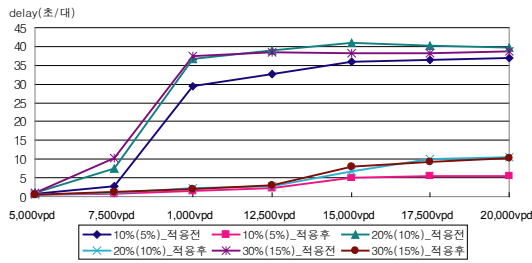
여기서,

- D : 선행·후행차량간의 차간거리 (Gap), m
- Speed1 : 선행차량의 주행속도, km/h
- Speed2 : 후행차량의 주행속도, km/h

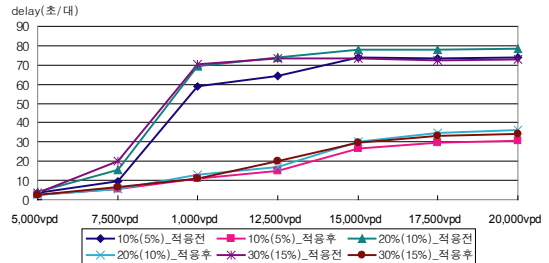
3. 결과분석

1) 지체(Delay) 및 평균통행속도 분석

TWLTL 적용 전·후의 분석결과는 <표 4>에 제시되어 있다. ADT 5,000vpd 부근에서 두 네트워크간 직진지체는 큰 차이가 없는 유사한 수준을 나타냈으나, 교통량 증가에 따라 5,000vpd~7,500vpd 구간에서는 적용 전 네트워크의 지체 증가폭이 크게 확대되고 있음을 확인할 수 있다. 적



<직진이동류 지체분석 그래프>



<좌회전이동류 지체분석 그래프>

<그림 8> 이동류별 지체분석 그래프

<표 4> 시나리오별 여행시간지체 및 평균통행속도 분석결과

MOE	이동류/방향	좌회전 비율	ADT 구분	5,000vpd	7,500vpd	1,000vpd	12,500vpd	15,000vpd	17,500vpd	20,000vpd
				Before	After	Before	After	Before	After	Before
Delay (초/대)	직진 이동류	10%(5%)	Before	0.65	2.86	29.38	32.76	36.01	36.4	37.05
			After	0.39	0.78	1.56	2.34	5.07	5.46	5.59
		20%(10%)	Before	0.91	7.54	36.79	38.87	41.08	40.2	39.65
			After	0.39	0.91	2.34	2.73	6.89	10.14	10.66
		30%(15%)	Before	1.04	10.27	37.44	38.35	38.09	38.22	38.61
			After	0.39	1.17	2.08	3.12	7.93	9.23	10.27
	좌회전 이동류	10%(5%)	Before	3.51	9.49	58.63	64.48	73.9	73.45	73.97
			After	2.6	5.59	11.05	19.89	29.9	33.02	34.19
		20%(10%)	Before	3.9	15.34	69.16	73.84	77.99	77.74	78.39
			After	2.47	5.59	12.87	17.16	30.29	34.45	36.14
		30%(15%)	Before	3.51	20.02	70.2	73.32	73.45	72.41	73.06
			After	2.34	6.63	10.92	15.21	28.08	29.77	30.81
Speed (km/h)	EB	평균	Before	34.2	24.5	11.4	10.7	11.0	10.7	10.2
			After	35.2	33.8	31.5	30.7	27.1	25.2	24.3
	WB	평균	Before	34.8	26.1	13.7	13.4	12.1	11.8	11.3
			After	36.0	34.6	33.2	31.8	27.7	27.5	26.4

용 전 네트워크는 7,500vpd~10,000vd 구간에서 약 500%이상의 급격한 지체증가가 발생되었으며, 좌회전 비율 증가에 따라 증가폭이 커지고 있었다. ADT 10,000vpd 이후에는 다시 지체 증가율이 둔화되었으며, 일부구간은 소폭 감소하는 것으로 나타났다. 일부구간에서 지체감소가 나타난 이유는 시물레이션 시간내 네트워크에 진입한 차량이 설정된 종료시간까지 소거되지 못하고 네트워크에 남아 있는 영향 때문인 것으로 분석되었다. 전체적으로, TWLTL 적용 전 직진 지체는 ADT 7,500vpd~10,000vpd 범위에서, 그리고 적용 후 지체는 ADT 12,500vpd~15,000vpd 범위에서 가장 큰 증가율을 나타냈다.

ADT 15,000vpd 이후 지체증가 추세가 둔화된 이유는 TWLTL 적용후 네트워크 처리용량이 15,000vpd~17,500vpd 부근에서 임계점에 도달했기 때문이며, 연속류가 아닌 연속된 7개의 무신호 교차로로 이루어진 네트워크 구조를 감안할 때, 산술적으로 적절한 수치로 판단된다. 좌회전 교통류는 직진에 비해 약 2배 이상 높은 지체도를 나타내고 있는데, 이는 비신호 교차로에 설정된 통행권 우선순위가 반영된 결과이다.

TWLTL 적용 후 좌회전 지체의 개선효과는 주로 비신호 교차로에서의 좌회전 차량의 동시회전 용량에 기인하고 있다. 즉, 직진 및 좌회전 차량이 혼재되어 있는 기존도로에서는 대향 이동류에서 허용 차간간격이 발생할 경우에도 대부분 좌회전 차량 1대만의 회전이 가능하나, 양방향 좌회전차로에서는 중앙차로에 여러 대의 좌회전 차량이 압축되어 대기하고 있기 때문에 적정 차간간격이 확보된다면 동시에 2대~3대의 차량회전이 가능하게 되어 기존 운영방법에 비해 좌회전 지체가 감소하게 된다.

주도로의 평균통행속도는 ADT별 평균값을 제시하였으며, TWLTL 적용 후가 적용 전에 비해 최대 약

20km/h까지 높은 수준을 유지하는 것으로 분석되었다. 통행속도 차이는 10,000vpd~12,500vpd 범위에서 가장 크게(약 17km/h~21km/h) 나타났다.

2) TTC(Time To Collision) 분석

〈표 5〉는 시나리오별로 주도로 직진링크5)의 각 개별차량의 추돌소요시간(TTC)을 산출한 결과를 나타낸다. 산출된 TTC 데이터는 시나리오에 따라 9,003개~28,565개의 범위를 가지고 있으며, 전체 TTC 데이터 중, 10초 이하와 4초 이하인 데이터 비율을 산출하여 TWLTL 적용 전·후 네트워크의 안전도 변화를 분석하였다.

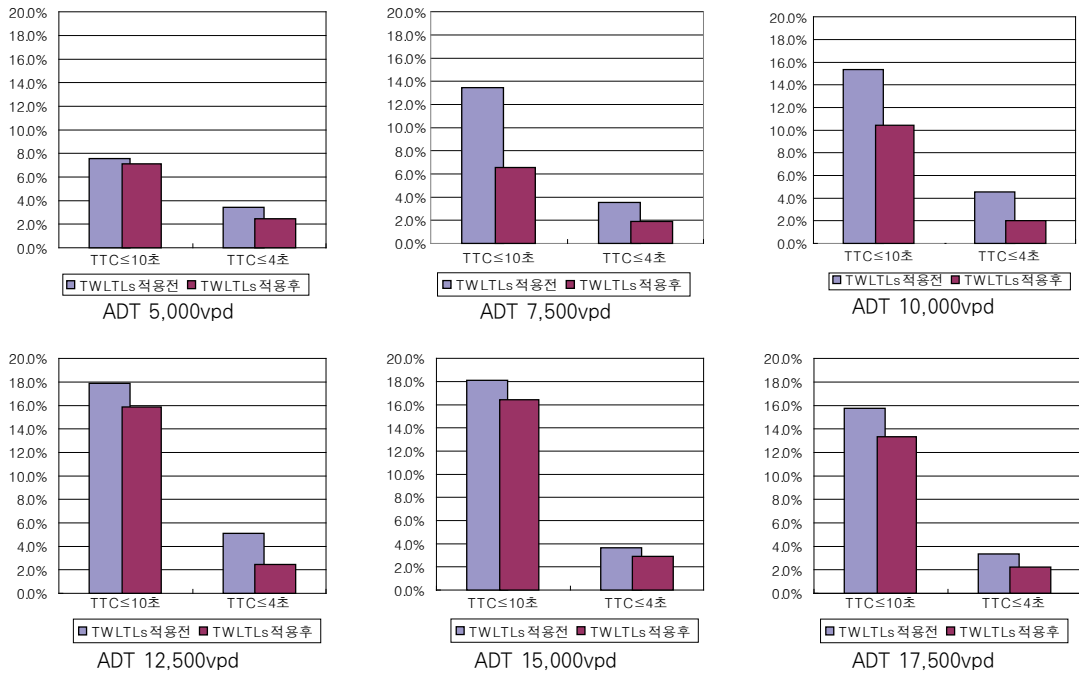
TTC 분석은 각 일평균 교통량내에서 좌회전 비율이 20%(10%)인 시나리오만을 대상으로 하였으며, 1차 필터링 결과 속도차가 "0"인 데이터는 우선 삭제하였다. 분석결과에서 포화상태로 갈수록 TTC 데이터 수가 감소추세를 보이는 이유는 혼잡상황이 진행됨에 따라 선·후행 차량간 속도편차가 감소하여 전체적으로 속도차가 "0"인 사례가 증가하였기 때문이다. 분석결과를 보면, 모든 ADT에서 양방향 좌회전차로 적용 후의 "TTC≤10초" 및 "TTC≤4" 데이터 비율이 적용 전에 비해 상대적으로 낮게 산출되어 있음을 알 수 있다. 한산상태(ADT 5,000vpd)에서는 TTC 데이터 비율차이가 유사하게 나타나고 있으나, 7,500vpd~10,000vpd 범위에서는 "TTC≤10초" 데이터 비율은 약 51.9%이상, "TTC≤4초" 비율은 51.7%이상으로 평균 약 51.8%의 차이가 발생된 것으로 분석되었다.

특히, 교통안전과 밀접한 관련이 있는 "TTC≤4초" 데이터 비율의 경우, 한산상태와 용량에 근접한 15,000 vpd이상 구간을 제외한 모든 ADT 범위에서 적용전에 비해 약 50% 가까이 크게 감소하는 것으로 나타나, TWLTL 적용으로 주도로의 안전도가 개선되고 있음을 확인할 수 있었다.

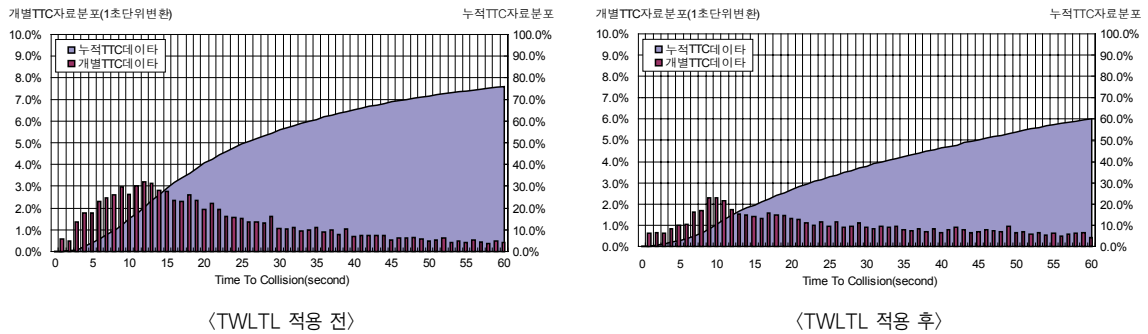
〈표 5〉 TTC 데이터 분석결과

구분	5,000vpd		7,500vpd		10,000vpd		12,500vpd		15,000vpd		17,500vpd		20,000vpd	
	before	TWLTL	before	TWLTL	before	TWLTL	before	TWLTL	before	TWLTL	before	TWLTL	before	TWLTL
TTC 전체	26,201	22,121	28,565	24,622	17,341	16,176	15,954	13,293	14,707	10,915	14,270	9,235	13,383	9,003
TTC≤10초 (개)	1,991	1,577	3,855	1,614	2,653	1,688	2,855	2,113	2,647	1,790	2,256	1,235	2,342	1,071
TTC≤4초 (개)	905	548	1,015	477	788	322	813	332	529	321	476	206	441	227
% (TTC≤10)	7.60	7.13	13.50	6.56	15.30	10.44	17.91	15.93	18.07	16.42	15.81	13.37	17.51	11.94
%(TTC≤4)	3.45	2.48	3.55	1.94	4.54	1.99	5.08	2.45	3.62	2.94	3.34	2.23	3.31	2.53

5) 동일분석조건을 유지하기 위해, TWLTL 적용 전 네트워크의 TTC 데이터는 주도로 직진차로(직진이동류와 좌회전 이동류가 동일차로를 공유하기 때문)를 대상으로 추출하였으며, 적용 후 네트워크에서는 직진 및 양방향 좌회전차로를 분석대상으로 하였다



〈그림 9〉 TTC 데이터 분석결과(ADT 20,000vpd는 생략)



〈그림 10〉 개별/누적 TTC 데이터 분포도(10,000vpd)

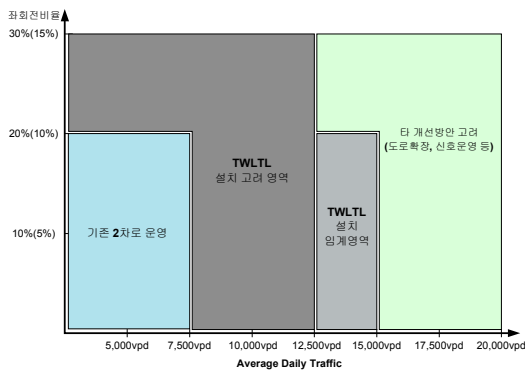
〈그림 10〉은 ADT 10,000vpd 기준에서 산출된 양방향 좌회전차로 적용 전·후 TTC 데이터의 개별분포⁶⁾ 및 누적분포 그래프를 도시한 것이다. 양방향 좌회전차로 적용 전 개별 TTC 데이터는 10초 이하의 작은 값에 데이터가 밀집되어 있는 형태를 나타내고 있으며, 이에 따라서, 누적 데이터도 급한 슬로프를 형성하고 있다. 반면, 적용 후에는 10초 부근에서 가장 높은 도수분포를 나타내는 것은 동일하나, 개별 데이터의 밀집도가 현저히 감소하여 전체 데이터 범위에 걸쳐 상대적으로 고른 분산을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

4. TWLTL 설치준거 제시

VISSIM 모의실험에서 도출된 TWLTL 적용 전/후 지체도 변화 및 TTC 데이터 분석결과를 기초로 하여 평균일교통량(ADT)과 주도로 좌회전 비율을 고려한 양방향 좌회전차로의 개략적 설치준거를 제시하였다.

전체영역을 '①기존 2차로 운영영역', '②TWLTL 설치고려 영역', '③TWLTL 설치 상한 영역', '④타 개선방안 적용 영역' 등의 4개 영역으로 구분하였다.

6) 그래프에서 나타난 개별 TTC데이터는 원 데이터를 1초단위 구간으로 변환시킨 가공 데이터를 사용하였음



〈그림 11〉 TWLTL 설치준거

i) ADT 5,000vpd~7,500vpd구간

- CI기준 좌회전 비율이 30%이상일 경우에만 양방향 좌회전차로를 적용을 고려하고, 그 이하일 경우는 기존 2차로로 운영

ii) ADT 7,500vpd~12,500vpd구간

- 모든 좌회전 교통량 비율에서 양방향 좌회전차로의 적용을 고려

iii) ADT 12,500vpd~15,000vpd 구간

- 좌회전비율 10%~20% 구간은 양방향 좌회전차로를 적용할 수 있는 상한 임계영역으로 안전적/구조적 조건 등을 면밀히 검토하여 양방향 좌회전차로 설치를 신중히 고려
- 좌회전 비율이 30%가 초과되는 경우는 도로확장이나 신호운영 등 타 개선방안 적용

iv) ADT 15,000vpd 초과 구간

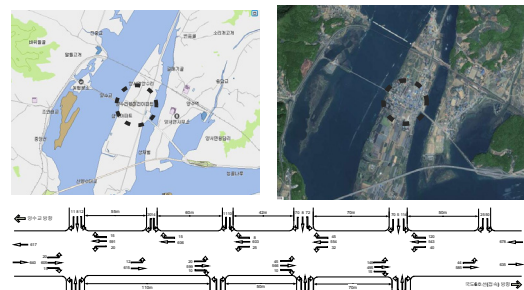
- 도로확장이나 신호운영 등 다른 근본적 개선방안 적용 필요

IV. 현장 네트워크 적용 및 평가

양방향 좌회전차로의 운영 개선효과를 검증하기 위해 경기도 양평군에 위치한 실제 도로구간을 대상으로 TWLTL 적용 전·후 네트워크를 구축하여 모의실험을 수행하였다. 적용 전 네트워크는 현 상태의 도로환경, 차로운영상태, 교통량 등을 입력하였으며, 적용 후는 현 도로환경에 양방향 좌회전차로만을 추가하여 분석을 수행하였다. 연구대상구간은 '(구)국도 6호선 양수교~국도 6호선 접속구간'이다(행정구역명 : 경기도 양평군 양서면 용담리). 모의실험은 양방향 좌회전차로 적용 전과

적용 후로 구분하여 Random Number Seed를 변화시켜가며 각 5회씩 시행한 결과를 분석하였다.

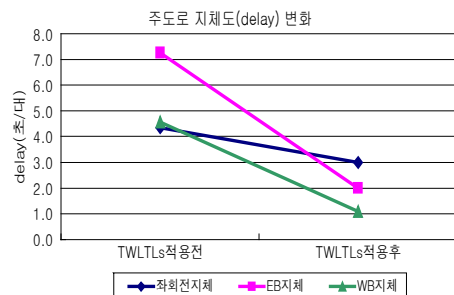
도로구조 모델링, 교통량, 동적경로 및 통행우선권 설정 등의 기본 데이터 입력을 모두 완료한 후 최종적으로 애니메이션 화면과 MOE 산출결과를 통해 Vissim 네트워크가 실 네트워크를 잘 묘사하는지에 대한 검토를 수행하였다. 이동류별 지체 및 평균통행속도, 교차구간 주행행태, 대기행렬 길이 등에 대한 적정성을 검토하며 모형을 정산(Calibration)하였다. 효과척도는 설치준거 설정에 적용했던 것과 동일하게 여행시간지체(Travel Time Delay), 평균통행속도(Average Travel Speed) 및 TTC를 대상으로 하였다



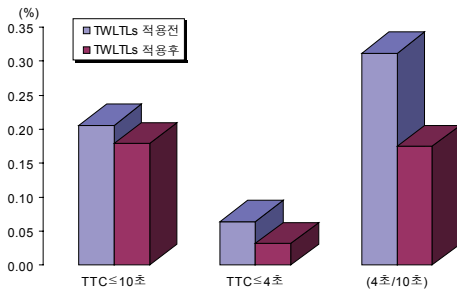
〈그림 12〉 연구대상구간 위치 및 교차로별 교통량

〈표 6〉 연구대상구간 개요

구분	내용
구간연장	520m
왕복차로수	2차로
평균주행속도	약 35~40km/h
차로폭	4.0m~5.0m
교통 발생원 접속밀도	18개/km
평균일교통량(ADT)	약 6,500~7,000vpd
평균구간주행속도	40km/h
교차로 운영형태	무신호 교차로
좌회전 교통량 비율	약 20%~35%
주변토지이용현황	상가밀집구간, 주택가



〈그림 13〉 주도로 직진 및 좌회전 지체변화 분석



〈그림 14〉 TTC 분석 그래프

〈표 7〉 양수리 네트워크 TTC 데이터 분석결과

구분		Before	TWLTL
1회 평균 TTC 데이터		33,032개/회	28,807개/회
① TTC ≤ 10.0초	평균빈도	6828.3개	5,176.6개
	%	20.67%	17.97%
② TTC ≤ 4.0초	평균빈도	2,130개	922.6개
	%	6.41%	3.22%
(②/①)×100		31.20%	17.48%

주도로 직진 이동류 및 좌회전 이동류에 대한 여행시간지체 분석결과, 양방향 좌회전차로 적용 후 직진지체는 평균 73.4%, 그리고 좌회전 지체는 평균 31.1% 감소한 것으로 나타났으며, 평균통행속도는 약 8% 이상 증가한 것으로 분석되었다.

TTC 데이터 분석에서, 10초 이하 데이터 비율은 13.2%, 그리고 4초 이하 데이터 비율은 평균 50%이상 감소한 것으로 나타났다. 또한, TTC 10초 이하 데이터 중, 4초 이하 데이터가 차지하는 비율은 적용 전 31.20%에서 적용 후 17.48%로 감소한 것으로 분석되어, TWLTL 적용 후 네트워크의 안전도가 크게 되었음을 확인할 수 있었다.

V. 결론 및 향후과제

양방향 좌회전차로(TWLTL: Two-Way Left-Turn Lane)는 접속도로 밀도가 높고, 좌회전 교통수요가 각 회전지점별로 넓게 분산되어 있는 제한속도 60km/h수준 이하의 도로에 적용될 경우, 기존 회전처리 방법에 비해 운영적·안전적으로 큰 개선효과를 거둘 수 있는 접근관리기법으로 알려져 있다.

본 연구에서는 양방향 좌회전차로의 도입을 검토하기 위한 초기단계로서, VISSIM 모의실험을 통한 운영 및 안전성 개선효과 평가에 초점을 두고 수행되었으며, 모의실험의 결과를 토대로 설치준거를 제시하였다. 성능평

가를 위한 효과척도(MOE)는 여행시간지체와 평균통행속도를, 그리고 안전성 평가를 위한 효과척도로는 TTC (Time To Collision)을 사용하였으며, 가상 네트워크와 실 네트워크에 동일하게 적용하였다. 가상 네트워크에 대한 모의실험 결과, 주도로 직진지체는 평균 84.6%, 그리고 좌회전 지체는 평균 64.9% 수준으로 감소하였다. 또한, TTC 데이터 분석(4초 이하 데이터 기준)에서도 전체 ADT 범위에 걸쳐 최소 18.7%~최대 51.6%까지 감소하는 것으로 나타나, 양방향 좌회전차로가 기존 2차로 운영방법과 비교할 때 개선효과가 컸던 것으로 분석되었다. 또한, 실 네트워크에 대한 분석결과에서도 유사한 개선효과를 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 양방향 2차로 도로에 양방향 좌회전차로를 설치했을 경우를 고려하여 사전-사후평가를 수행하였다. 하지만, 양방향 좌회전 차로의 적용효과 평가 및 국내 도입 가능성 검토 측면에서 볼 때, 기존 양방향 4차로 도로와의 성능 비교가 이루어지지 못한 점은 본 연구의 한계로 지적될 수 있을 것이다.

따라서 향후에는 양방향 4차로 도로를 대상으로 '전용 좌회전차로가 설치된 구간', '부분적 신호운영 구간', 또는 '비신호로 운영되는 구간' 등 다양한 도로조건과 비교한 TWLTL의 상대적 효율 및 안전성 변화에 대한 규명이 필요할 것으로 보이며, 이를 통해 보다 정교한 TWLTL의 설치준거 제시 및 도입 가능성 평가가 이루어 질 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2001), "도로용량편람".
2. 광동근·서문성(2005), "양방향 좌회전 차로 설치에 대한 고찰", 교통기술과 정책, 제2권 제4호, 대한교통학회, pp.162~173.
3. 심관보 외 (2005~2006), "양방향 2차로 도로의 교통운영 및 안전성 개선방안 연구(I,II)", "도로교통안전관리공단".
4. 조한선·오주택·이재명·박동주(2006), "VISSIM을 이용한 Signal Preemption 전략도입 및 효과분석", 대한교통학회지, 제24권 제4호, 대한교통학회, pp.93~101
5. AASHTO(2001), "A Policy on Geometric Design of Highway and Streets".
6. Jim Dale P.E. & Tony Woody E.I.T.(2002), "Simulating Access Management Strategies",

- 68th Annual ITE Meeting, ITE, pp.2~8.
7. Harwood, D.W(1986). "Mult-lane Design Alternative for Improving Suburban Highway", NCHRP 282, Transportation Research Council.
 8. Keith K. Knapp & Thomas M. Welch(1999), "Converting Four-Lane Undivided Roadways to a Three-Lane Cross Section", Center for Transportation Research And Education, Iowa State University, pp.3~15.
 9. Bonneson, J.A, & P.T. McCoy(1997), "Capacity and Operational Effects of Midblock Left-Turn Lanes", National Cooperative Highway Research Program 395, TRB, National Research Council.
 10. Juan C. Pernia & Jian John Lu(2004), "Safety Issues Related to Two-Way Left-Turn Lanes", University of South Florida, Florida DOT, pp.5~15.
 11. Gluck J. & H.S. Levinson,(1999), "Impact of Access Management Techniques", National Cooperative Highway Research Program 420, TRB, National Research Council, Washington DC.
 12. William L. Eisele & William E. Frawley(2004), "Estimating the Impact of Access Management with Micro Simulation", Texas Transportation Institute, The Texas A&M University, pp.8~14.
 13. FHWA (2003), "Manual on Uniform Traffic Control Devices", US DOT.
 14. PTV AG(2004), "VISSIM User Manual-Ver. 4.00".

✉ 주 작 성 자 : 배광수
 ✉ 교 신 저 자 : 배광수
 ✉ 논문투고일 : 2007. 4. 20
 ✉ 논문심사일 : 2007. 7. 4 (1차)
 2007. 8. 27 (2차)
 2007. 10. 11 (3차)
 ✉ 심사판정일 : 2007. 10. 11
 ✉ 반론접수기한 : 2008. 4. 30