

고속도로 공사구간 차로 합류기법 안전성 평가 연구

황동환¹ · 오철^{1*} · 박현진¹ · 정봉조²

¹한양대학교 교통물류공학과, ²한국도로공사 도로교통연구원

Safety Evaluation of Traffic Merging Control Methods for Freeway Work Zone

HWANG, Dong Hwan¹ · OH, Cheol^{1*} · PARK, Hyun Jin¹ · JEONG, Bong Jo²

¹Transportation and Logistics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea

²Transportation Research Division, Korea Expressway Corporation, Gyeonggi 18489, Korea

*Corresponding author: cheolo@hanyang.ac.kr

Abstract

Traffic safety in freeway work zones is of keen interest since both crash frequency and severity are much higher than those in general freeway sections. The lane closure in work zones results in greater work load of drivers due to compulsory lane changes and speed reduction. Therefore, traffic merging control is an effective countermeasure for enhancing work zone safety. This study proposed an integrated framework based on driving and traffic simulations to evaluate traffic merging control methods in terms of traffic safety. In addition to the conventional merging method using the taper, joint merge and chicane-type merge were evaluated by the proposed methodology. Chicane-type merge outperformed other methods under level of service (LOS) A and B. On the other hand, it was identified that joint merge showed the best safety performance under LOS C traffic conditions.

Keywords: chicane, joint merge, merge methods, simulation, work zone

초록

고속도로 공사구간은 차로의 차단 및 공사구간 내 다양한 시설물에 운전자가 노출되기 때문에 사고가 빈번하게 발생하는 구간이다. 공사구간 중 완화구간은 차로차단으로 인하여 차량의 합류가 발생하므로 사고의 위험도가 높다. 따라서 본 연구에서는 주행 시뮬레이션(Driving Simulation)과 교통 시뮬레이션(Traffic Simulation)의 연계 분석을 적용하여 세 가지 유형의 차로합류 기법에 대한 안전성을 비교 평가하였다. 분석 결과, 기존 차로차단 기법보다 사전 유도기법 또는 Joint Merge 기법이 안전성 측면에서 효과적인 것으로 나타났다. 서비스 수준(LOS) A, B인 경우 사전 유도기법이 적정 합류기법으로 판단되었으며, 서비스 수준 C의 경우 Joint Merge 기법이 적정 합류기법으로 판단되었다. 본 연구는 현재 운영되고 있는 차로차단 기법 외에 공사구간 교통상황에 따른 다양한 합류기법의 적용 타당성을 주행 및 교통 시뮬레이션의 연계분석을 통하여 안전성 관점에서 평가하였다는 데 의의가 있다.

주요어: 사전유도구역, Joint Merge, 합류기법, 시뮬레이션, 공사구간

J. Korean Soc. Transp.
Vol.34, No.3, pp.263-277, June 2016
<http://dx.doi.org/10.7470/jkst.2016.34.3.263>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 23 March 2016

Revised: 24 May 2016

Accepted: 27 June 2016

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

1. 연구의 배경 및 목적

차로차단은 공사구간 교통관리 기법 중 한 차로 이상을 차단하는 기법으로 도로 재포장 등의 공사 시 필요한 교통관리 기법이다. 차로차단공사 시 공사구간을 통과하는 차량은 안전한 차로변경을 통하여 인접 차로로 합류할 수 있어야 한다. 이때 적절한 속도 감소를 통한 공사구간 내 교통류의 안정화가 필수적이다.

2010년부터 2014년까지 최근 5년간 고속도로 사고 이력 자료를 분석한 결과, 전체 사고의 약 3%가 공사구간 내에서 발생한 것으로 나타났다. 사고 1건당 사망자 수는 약 0.28명으로 고속도로 전체 구간의 약 0.12명보다 약 2.3배 높은 것으로 나타났으며, 사고 1건당 부상자수는 약 0.70명으로 고속도로 전체구간의 0.54명보다 약 1.3배 높은 것으로 나타났다.

기존 차로차단 기법(Conventional Lane Merge, CLM)의 경우, 공사가 이루어지고 있는 차로만을 도류화 시설 등을 통해 직접 차단하여 차량 통행을 금지하고 있다. 국내에서는 고속도로 공사구간 내 차로 합류기법을 이와 같은 방식으로만 운영하고 있어 다양한 교통상황을 고려한 적정 합류기법을 평가하고자 하는 노력이 미비한 상황이다.

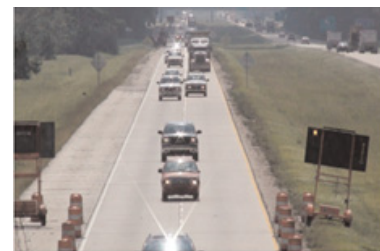
해외에서는 기존 차로차단 기법 외에 Figure 1과 같이 다양한 합류기법을 적용하고 있다. 사전 유도구간은 Figure 1(a)와 같이 공사구간 진입 전 합류 차로를 우선적으로 차단하여 강제적으로 차로 변경을 유도하는 방법으로 차로 감속을 유도한다. 사전 유도구간은 공사구간 내 속도 감소 효과가 큰 장점이 있으나, 기존 완화구간보다 길이가 길어지는 단점이 있다. 이는 1960년대 미국 아이오와 교통국(Iowa DOT)에서 처음으로 적용한 기법으로 'Chicane' 또는 'Iowa Weave'라고도 불린다. 본 연구에서는 사전 유도구역의 영문명을 Chicane으로 정의하였다(NCHRP Synthesis 482, 2015).

Joint Merge(Joint Lane Merge, JLM)기법은 Figure 1(b)와 같이 공사구간 진입 전 길어깨와 중앙분리대 양쪽의 차로 폭을 동시에 줄여 차로를 차단하는 기법으로, 기존 차단 차로와 합류 차로에서 발생할 수 있는 통행우선권의 불균형 문제를 해소할 수 있다. 또한 완화구간 진입 전 감속을 유도하여 공사구간 내 안전성 확보가 가능하다.

이에 본 연구에서는 현재 운영되고 있는 차로차단 기법 외에 고속도로 공사구간에 적용할 수 있는 합류기법을 주행(Driving) 및 교통(Traffic) 시뮬레이션의 연계분석을 통하여 안전성 관점에서 평가하고 교통상황별 적정 합류기법을 제시하고자 한다.



(a) Chicane (Iowa Weave)



(b) Joint Merge

Figure 1. Work zone merge methods

2. 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 공사구간 내 적정 합류기법을 평가하기 위하여 시뮬레이션 연계 기법을 활용한 연구를 진행하였다. 다양한 교통상황을 분석하기 위한 가장 좋은 방법은 현장 상황에서 실험을 진행하는 것이다. 그러나 현장 실험의 경우 실험 중 발생할 수 있는 사고의 위험성이 크며, 시간적, 경제적인 소요가 크기 때문에 제한적 상황에서만 실험이 진행되는 것이 현실이다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 교통 분야에서 시뮬레이션을 이용한 연구가 계속해서 이루어지고 있다. 교통 시뮬레이션(Traffic Simulation) 중 미시적 시뮬레이션(Microscopic Simulation)은 개별 차량의 행태를 모델링하여 세부적인 교통흐름 변화를 네트워크 단위로 분석하는 프로그램이며, 주행 시뮬레이션(Driving Simulation)은 가상의 도로를 구현하여 개별 운전자의 반응 및 차량의 움직임을 분석하는 프로그램이다. 미시적 시뮬레이션의 경우 운전자의 주행 행태를 변수로 활용하여 네트워크 내 전반적인 교통상황을 분석하는 데 활용하고 있으며, 주행 시뮬레이션의 경우 개별 운전자의 주행 행태 및 특성이 반영된 결과를 도출하는 데 활용되고 있다.

미시적 시뮬레이션의 도구인 VISSIM은 다양한 운전자의 행태를 반영할 수 있어 한 분야에 다양하게 활용되고 있다. 그러나 VISSIM에서 사용되는 파라미터의 기본값은 국내 운전자의 주행 행태가 충분히 반영되지 않은 값들이며, 국내 운전자들의 교통특성을 반영하기 위해서는 파라미터의 조정이 필수적이다. 따라서 본 실험에서는 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 주행 시뮬레이션과 교통 시뮬레이션을 연계한 시뮬레이션 연계기법을 우선 기존 차로차단 기법의 상황을 주행 시뮬레이션 상에 구현하여 실험을 진행한 뒤 수집된 자료를 교통 시뮬레이션의 입력 자료로 활용하여 실험을 진행하였다. 이후 교통 시뮬레이션 상에 다양한 합류기법을 네트워크화 시켜 분석을 진행하였다. 제안하고 다음과 같이 연구를 수행하였다.

주행 시뮬레이션 상의 네트워크 구현 시 ‘고속도로 공사장 교통관리기준 (한국도로공사, 2013)’에 의거한 표지를 구현하여 실험을 진행하였으며, 가·감속패턴, 속도 프로파일, 차로변경 시·중점의 데이터를 추출하였다. 이를 교통 시뮬레이션에 반영하여 실험을 진행하였으며, 통행속도, 상충빈도, 지체시간 자료를 분석하여 적정 합류기법을 선정하였다.

주행 시뮬레이션에서 얻어진 자료는 시간 또는 거리의 측정 단위가 일치하지 않은 상태로 출력되므로, 단위 거리(m)에 따른 데이터의 변화를 분석하기 위하여 MATLAB을 활용한 보간법을 적용하여 분석에 활용하였다. 또한 교통 시뮬레이션에서 수집된 데이터를 이용한 교통 안전성 평가를 위하여 상충 분석프로그램인 Surrogate Safety Assessment Model (SSAM)을 활용하였다.

본 연구의 내용 및 방법을 수행과정에 따라 정리하면 Figure 2와 같다.

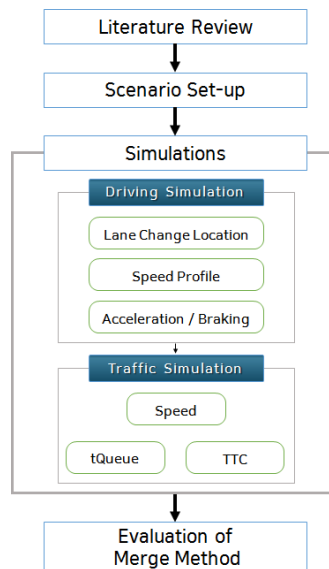


Figure 2. Study process

기존 문헌 고찰

1. 국내 공사구간 관련 연구

고속도로 공사장 교통관리기준(2013)에서는 공사구간을 Figure 3과 같이 주의구간, 완화구간, 작업구간, 완충구간, 종결구간으로 구분하고 있으며, 완화구간 내에서 테이퍼를 설치하여 주행차로를 차단하고 차로변경을 유도하도록 하고 있다.

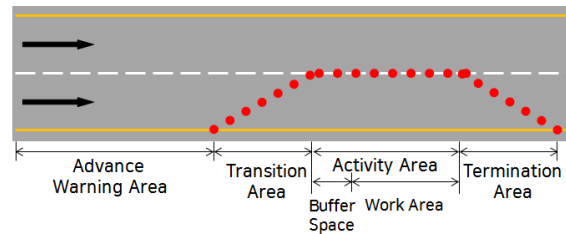


Figure 3. Traffic control area in work zone

국내에서는 공사구간 내 합류행태에 대한 내용은 부재한 상태이며, 합류기법에 대한 연구 역시 부족한 상황이다. 국내에서 진행된 공사구간 관련 연구는 적정 완화구간 길이 산정을 위해 교통시뮬레이션을 적용한 연구가 수행된 바 있다.

Park et al.(2007)는 기존 차로차단 공사를 VISSIM 통해 구현하였으며, 테이퍼의 길이를 변화시키며 밀도, 통행속도, 통과교통량을 비교하여 적정 테이퍼 길이를 산출하는 연구를 진행하였다. 분석 결과, 편도 3차로 공사 시 밀도와 통행속도는 250m 길이 이후 값의 변화가 완만해지는 것으로 나타났다. 통과 교통량은 300m 길이 이후로 값이 떨어지는 것으로 나타났으며, 300m 길이가 적정 완화구간의 길이라고 판단하였다.

Lee et al.(2013)는 차로 수에 따른 공사구간의 적정 완화구간 길이 산정을 위하여 VISSIM을 통해 이동성(교통량, 지체도, 통과시간) 및 상충빈도를 분석하였다. 분석 결과, 편도 3차로의 경우 300m 길이 이후 교통량, 지체도, 통과시간에 대한 값의 변화가 완만해지는 것으로 나타났으며, 300m 길이가 적정 완화 구간의 길이라고 판단하였다.

2. 국외 공사구간 합류기법 관련 연구

NCHRP Synthesis 482(2015)에서는 사전 유도기법(Chicane)을 공사구간 내 속도관리 기법 중 하나로 소개하고 있다. 사전 유도기법 적용 시 공사구간 내 제한속도 준수율이 기존 차로차단 기법보다 20%가량 높은 것으로 나타났다. 또한 사전 유도구역 적용 시 약 30%의 사고 감소율을 나타낸 것으로 나타났다.

Wakeel et al.(2010)은 기존 차로차단 기법과 Joint Merge기법을 현장에 적용하여 완화구간 진입 전, 후의 속도를 비교하여 속도의 개선 정도를 평가하였다. 분석 결과, 교통량이 적은 경우(1,200vphpl 미만), 모든 합류기법에서 진입 후 속도가 좀 더 낮은 것으로 나타났으며, 교통량이 많을 경우(1,200vphpl 이상), Joint Merge기법의 속도 개선 정도가 약 34% 높은 것으로 나타났다.

Ishak et al.(2012)은 CLM과 JLM을 교통 시뮬레이션인 VISSIM을 활용하여 기법 별 급감속 정도와 속도 편차를 분석하였다. 분석 결과, 교통량이 500~1,500vphpl 일 경우 JLM에서, 교통량이 2,000~2,500vphpl 일 경우 CLM의 급감속 및 속도 편차가 적은 것으로 나타났다.

Shakouri et al.(2014)은 기존 차로차단 기법과 Joint Lane Merge를 Full-size 주행 시뮬레이션을 활용하여 이동성(속도, 통과시간) 및 안전성(차로변경 시점, 제동력)을 비교·분석하였다. 분석 결과, 차로 변경 시점은 CLM의 경우 완화구간 시점부터 진입 전 150m 구간으로 나타났으며, JLM은 완화구간 진입 후로 나타났다. 통과속도는 두 합류기법의 통계적인 차이가 없는 것으로 나타났으며, 제동력은 JLM 기법이 약 34% 낮은 것으로 나타났다. 또한 JLM 기법의 작업 부하가 약 15% 낮은 것으로 나타났다.

3. 기존 연구와의 차별성

국내에서는 공사구간뿐만 아니라 합류기법과 관련된 연구가 진행되지 않은 상황이며, 공사구간에 대한 전반적인 연구 역시 부족한 상황이다. 국외의 경우 기존 공사구간 합류기법 관련 연구에서 기존 차로차단 기법과 다른 기법에 대한 비교·분석이 진행 되었으며, 분석 시 주행 시뮬레이션, 교통 시뮬레이션 또는 현장실험을 독립적으로 수행한 연구가 진행되었다. 그러나 세 가지 이상의 합류기법을 비교·분석한 연구는 부재한 상황이다.

본 연구에서는 주행 및 교통 시뮬레이션 각각의 기법이 가지고 있는 한계를 극복하기 위하여 연계분석 방안을 제시하였다. 이를 적용하여 기존 차로차단 기법과 사전 유도구역, Joint Merge기법의 비교 분석을 수행하고 교통상황별 적정 합류기법을 제시하였다는 점에서 기존 연구와 차별화될 수 있다.

분석 방법론

1. 분석 시나리오 구성

실험을 진행하기 위한 공사구간의 시나리오는 다음과 같이 설정하였다. 제한속도가 110kph인 고속도로 편도 3차로 중 우측 1개 차로차단 공사를 진행하는 상황을 설정하였으며, 차로 폭은 고속도로 차로의 최소 폭 기준인 3.5m를 적용하였다.

공사구간 내 완화구간 길이는 고속도로 공사장 교통관리지침 기준에 제시된 Equation(1)에 의해 산정되며, 제한속도가 110kph인 구간에 대한 합류 테이퍼 길이는 245m로 규정되어 있다. 따라서 본 연구에서는 완화구간의 길이를 245m로 설정하여 실험을 진행하였다.

$$L = \frac{W \times S}{1.6} \quad (\text{제한속도 } 60\text{kph} \text{ 초과시}) \quad (1)$$

여기서, L : 완화구간길이 (m)

W : 차로 폭 (m)

S : 제한속도 (kph)

2. 주행 시뮬레이션 Driving Simulation

본 실험에서는 교통 시뮬레이션 실험 진행에 앞서 더욱 정확한 분석을 진행하기 위하여 Figure 4와 같이 주행 시뮬레이터를 활용하여 실험을 진행하였으며, 주행 시뮬레이션을 통하여 얻은 자료를 활용하여 교통시뮬레이션의 입력 자료로 반영하였다.



Figure 4. Snapshot of driving simulator

1) 주행 시뮬레이션 시나리오 설정

주행 시뮬레이션 진행 시 실험 시나리오를 다음과 같이 설정하였다. 피실험자 20명을 대상으로 실험을 진행하였으며, 피실험자의 평균 연령은 24.8세, 주당 약 1.9회 운전을 하는 것으로 나타났다. 실험구간은 공사구간 내 주의구간 진입 전 200m부터 작업구간과 완화구간 종점까지 총 2,045m를 주행하였다. 시뮬레이션 상 주변 차량의 분포는 지방부 고속도로 설계기준인 LOS C²⁾의 밀도를 나타내는 상황을 구현하였다. 실험은 시나리오별 각 1회씩 주행하도록 하였고, 실험 진행 전 고속도로의 제한속도에 대한 정보만 주었으며, 차단차로 주행 후 차로 변경을 진행해야 한다고 판단하는 시점에서 자유롭게 차로 변경을 진행하도록 사전교육을 실시하였다.

2) 차로변경 시·종점 설정

주행 시뮬레이션 진행에 앞서 차로변경의 시·종점의 분석을 위해 다음과 같이 차로변경 시·종점을 정의하였다. 실험에 사용된 주행 차량은 고속도로 통행차량의 대부분을 차지하는 소형차종을 대상으로 진행하였으며³⁾, 제원은 폭 1.83m, 길이 4.80m인 차량을 대상으로 실험을 진행하였다. 차로변경 시·종점을 정의하기 위해서는 운전자가 차로변경을 수행해야 한다고 결정한 순간 및 차로변경을 완료했다고 판단하는 순간으로 정의하거나, 차량의 특정 지점이 차로 상의 특정 지점을 통과하는 경우로 설정할 수 있다. 그러나 전자의 경우, 실험 중 차로변경을 판단한 시점을 확인할 수 있는 방법이 제약적이므로 본 실험에서는 차로 변경 시점은 차량 앞 범퍼의 좌측과 차로변경 전 좌측 차선이 만나는 경우로 가정하였으며, 차로변경 종점은 차로 변경 후, 차량 뒤 범퍼와 합류 차로의 우측 차선이 만나는 경우로 가정하였다. 차로 변경 시점 및 종점에 대한 도식은 Figure 5와 같다.

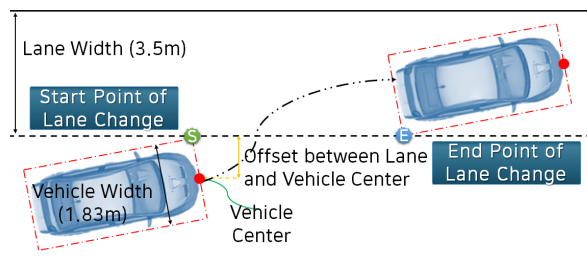


Figure 5. Definition of lane change

2) 국토교통부(2009), 도로의 구조시설 기준에 관한 규칙 해설, 100,

3) 2014년 전국 고속도로 교통량 중 87%가 소형자동차인 것으로 나타났으며, 소형자동차의 기준은 2축 차량, 유폭 279.4mm 이하의 승용차, 소형차, 소형화물차를 포함함

3) 주행 시뮬레이션 실험 결과

주행 시뮬레이션 결과 중 완화구간 진입 전 구간별 통행속도 분석 결과는 Tabel 1과 같다. 완화구간 진입 전 400~200m는 평균 86.20kph, 완화구간 진입 전 200m~완화구간시점은 평균 76.17kph, 완화구간 내에서는 평균 69.46kph의 속도를 나타냈다. 구간별 속도의 표준편차는 각 4.22, 5.16, 5.08로 나타났다.

차로변경 시 · 종점에 대한 분석 결과는 Table 2, Figure 6과 같다. 완화구간 진입 전 평균 197m 지점에서 차로변경을 시작하였으며, 평균 132m 지점에서 차로변경을 끝내는 것을 확인할 수 있었다. 또한 80%의 피실험자가 완화구간 진입 전 차로변경을 진행하는 것을 확인할 수 있었다.

주행 시뮬레이션 이후 피실험자를 대상으로 공사구간 시설물의 영향 정도에 대한 설문을 추가로 진행하였다. 공사장을 인지하는데 가장 큰 영향을 준 요인은 차로변경 표지가 78%, 임시 통제시설이 11%, 공사 중 표지가 6%로 나타났다. 또한 차로변경 시 가장 큰 영향을 준 요인은 주변차량이 56%, 차로변경표지가 28%, 임시 통제시설이 11%로 나타났다.

Table 1. Analysis result of average speeds in advance warning area (unit: kph)

| Data | -400~-200m | | | | -200~0m | | | | Transition Area | | | |
|-------|------------|-------|-------|------|---------|-------|-------|------|-----------------|-------|-------|------|
| Speed | Max | Min | Avg | STD | Max | Min | Avg | STD | Max | Min | Avg | STD |
| | 92.79 | 78.31 | 86.20 | 4.22 | 83.14 | 65.10 | 76.17 | 5.16 | 76.69 | 59.93 | 69.46 | 5.08 |

Table 2. Result of lane change locations (unit: m)

| Start Points ⁴⁾ | End Points | Moving Distance | Lane Change Duration (s) | Average Speed (kph) | Average Acceleration (m/s ²) |
|----------------------------|------------|-----------------|--------------------------|---------------------|--|
| -197 | -132 | 65 | 3.33 | 75.75 | -0.46 |

note: Reference Point of Start and End Points of Lane Change is Start Point of Transition Area

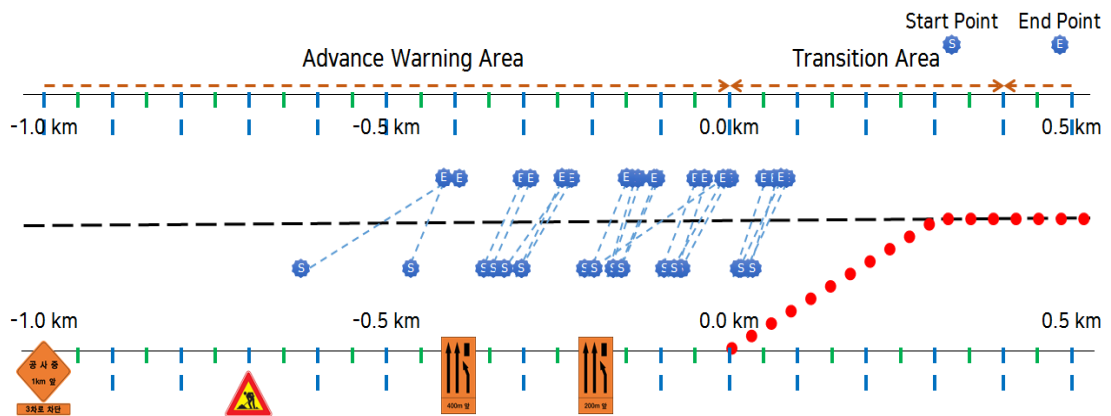


Figure 6. Result of lane change locations

3. 교통 시뮬레이션 시나리오 설정

1) 분석 영향권 설정

분석을 진행하기 전, 더욱 효율적인 분석을 진행하기 위한 분석 영향권을 Figure 7과 같이 설정하였다.

대부분의 운전자가 차단 차로 진입 전 차로변경을 진행하였으며, 완화구간 진입 전 약 200m 지점에서 차로변경을 진행한다는 것을 앞선 주행 시뮬레이션 실험에서 확인할 수 있었다. 따라서 현 지침에 의해 설치된 완화구

4) 차로변경 시종점 위치에 대한 기준은 완화구간의 시작점을 기준으로 판단함

간 진입 전 200m에 설치된 '차로 없어짐 주의표시'부터 완화구간 종점을 분석 영향권으로 설정하여 분석을 수행하였다.

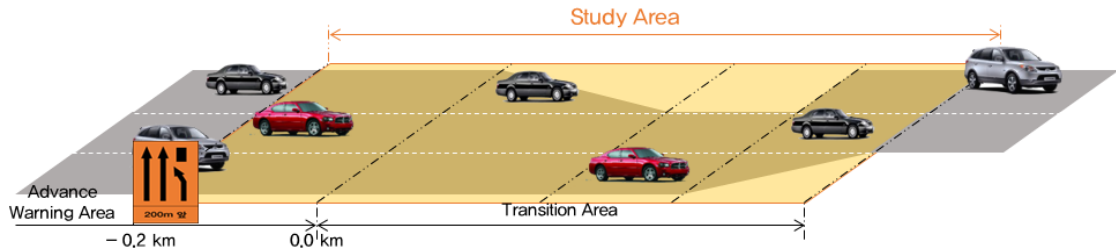


Figure 7. Definition of study area

2) 교통 시뮬레이션 시나리오 설정

본 연구에서 교통 시뮬레이션은 VISSIM을 활용하였으며, 구현형태 및 차로 폭은 주행 시뮬레이션과 동일하게 적용하였다. 교통량은 제한속도 110kph인 상황의 서비스 수준에 따른 교통량을 각 LOS A (650pcphpl), LOS B (1,075pcphpl), LOS C (1,425pcphpl)로 적용하여 교통상황을 고려한 적정 합류기법을 도출하고자 하였다. LOS C보다 교통상황이 나쁠 경우, 즉 설계 서비스 수준의 교통량보다 통과 교통량이 많은 경우 해당 도로는 합류 기법과 상관없이 교통 혼잡을 겪게 될 것이다. 그러므로 차량의 분·합류 행태가 잘 나타나지 않을 것으로 판단되며, 본 연구의 주요 분석 대상인 운전자의 속도 감소 및 차로변경 행태가 반영된 합류기법의 안전성 평가에는 한계가 있다. 따라서 본 분석에서는 설계 서비스 수준인 LOS D보다 교통 상황이 좋은 상황만을 분석하였다.

Simulation 상의 네트워크는 Figure 8과 같이 구성하였으며, 주의구간은 영향권 분석에 활용하기 위하여 각 300m, 200m, 200m로 구분하여 구현하였다.

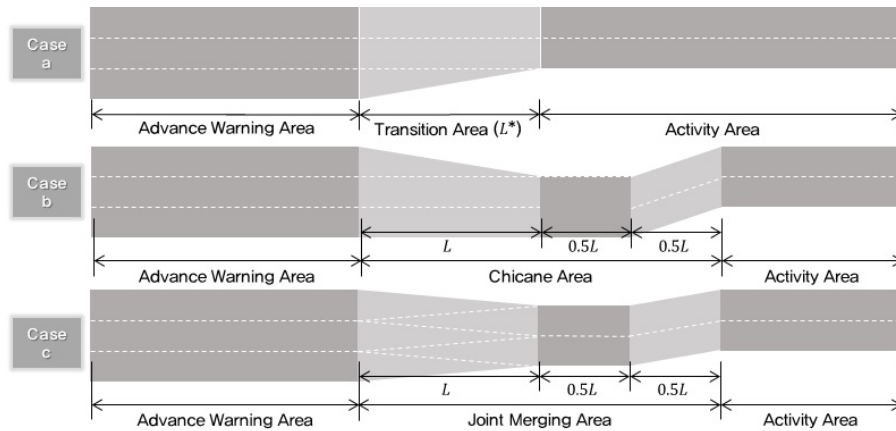


Figure 8. Network coding techniques in VISSIM: (a) Conventional merge, (b) Chicane and (c) Joint merge

3) 주행-교통 시뮬레이션 연계 방안

교통 시뮬레이션 실험을 진행하기에 앞서 주행 시뮬레이션에서 추출한 차로변경 시점 및 구간별 속도분포 자료를 활용하기 위한 분석 작업을 다음과 같이 진행하였다.

우선 구간별 통과속도를 보정하기 위하여 Figure 9와 같이 VISSIM상에서 사용자가 설정할 수 있는 기능 중의 하나인 Desired Speed Distribution을 이용하여 주행 시뮬레이션에서 얻어진 속도 분포를 구간 통과 속도에 동일하게

적용하였다. 속도 분포 반영을 위해 Table 2와 같이 주행 시뮬레이션의 결과를 100% 누적분포로 분석하였으며, 5% 간격으로 증가하는 속도에 해당되는 값의 범위를 입력하여 구간 통과 속도에 반영하였다.

차로 변경 행태를 반영하기 위하여 Figure 10과 같이 네트워크 구현 시 사용한 Connector의 차로변경 시점 (Route Lane Change Point)을 주행 시뮬레이션의 평균 차로변경 시점 값인 197m로 적용하였다. 이를 반영할 경우 차량이 완화구간 진입 전 197m 지점에서 차로변경을 시작하는 행태를 반영할 수 있다. 또한 차량들이 완화구간 진입 전 차로변경을 수행하는 차로변경행태를 반영하기 위하여 차단차로의 통과를 줄이기 위해 Vehicle Route를 설정하여 완화구간 진입 전 차로변경을 완료하도록 유도하였다.

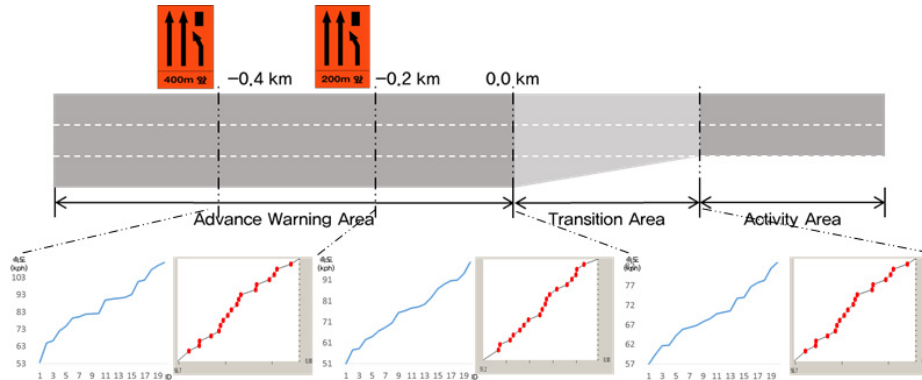
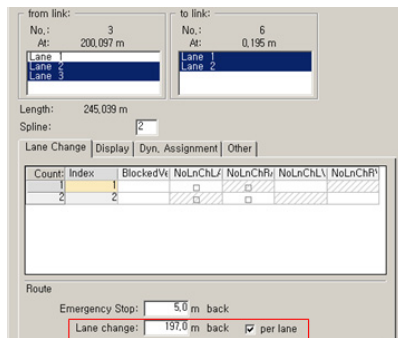
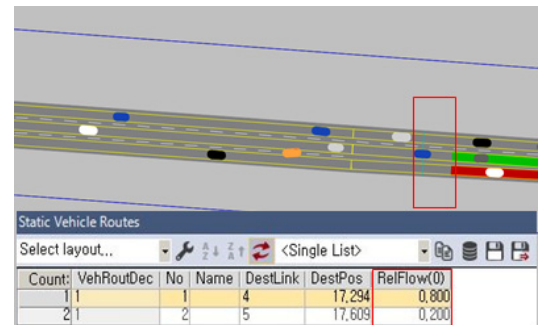


Figure 9. Application speed profile in VISSIM



(a) Adjustment of average lane change point



(b) Adjustment of lane change behavior

Figure 10. Simulation of lane change behavior in VISSIM

4. 교통 상충 분석

교통 시뮬레이션에서 얻어진 개별차량의 주행궤적 자료를 통해 시나리오상에서 발생한 상충을 분석할 수 있으며, 상충빈도의 정의는 다음과 같다.

1) 상충 유형

SSAM을 활용한 상충 분석 시 두 차량의 각도 및 상충 이벤트가 발생한 시·종점을 고려한 상충 유형을 Figure 11과 같이 구분할 수 있으며, 상충 유형에 대한 정의는 다음과 같다(Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report, 2008).

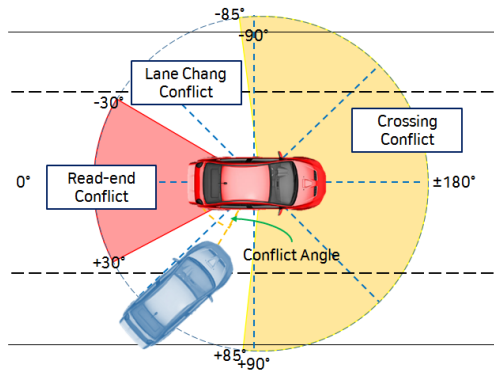


Figure 11. Definition of conflict type

(1) 후미추돌 상충 (Rear-End Collision)

상충 발생 시점과 중점이 동일 차로, 링크에서 발생하거나 상충 발생 시점과 중점이 다른 링크에서 발생한 경우 두 차량의 상충 각도가 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 인 경우 후미추돌 상충으로 분류한다.

(2) 차로변경 상충 (Lane Change Collision)

상충 발생 시점과 중점이 다른 링크에서 발생하고 두 차량의 상충 각도가 $-30^{\circ} \sim -85^{\circ}$ 또는 $30^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 인 경우 차로변경 상충으로 분류한다.

(3) 교차 상충 (Crossing Collision)

두 차량의 상충 각도가 $-85^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 또는 $85^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 인 경우 교차 상충으로 분류한다.

2) TTC (Time to Collision)

$$TTC = \frac{x_s(t) - x_f(t) - l}{v_s(t) - v_f(t)} \tag{2}$$

여기서, x_s : 선두차량의 Position x_f : 주체차량의 Position
 v_s : 선두차량의 속도 v_f : 주체차량의 속도
 l : 차량길이

TTC(Time to Collision)는 현시점에서 현재의 속도 및 경로가 계속 유지될 경우, 충돌이 발생하기까지 소요되는 시간으로 이 시간이 임계 값 이하일 경우, 상충이 발생된다는 정의이다. TTC는 Equation(2)과 같이 두 차량의 간격과 속도 차이에 의하여 도출되는 값으로, 이 값이 낮을수록 충돌 확률이 높다. 통상 TTC의 임계 값은 1.5초로 규정하여 사용⁵⁾하고 있으며, 임계 값 이하의 TTC값을 나타낼 경우 상충이 발생한다고 가정한다. 본 분석에서도 임계 값을 1.5초로 사용하였다.

또한 분석에서 상충빈도를 미터(m)당으로 산출하여 계산하였다. 이는 기존 차단 기법보다 사전 유도기법이나 Joint Merge기법의 완화구간 길이가 길기 때문에 구간 내에서 발생하는 상충빈도의 객관적 비교를 수행하기 위함이다.

5) 본 연구에서 사용된 상충분석프로그램인 SSAM에서 지정된 Default값은 1.5초이며, 본 연구의 분석 시 이 값을 활용하였다.

분석결과

1. 상충빈도 분석

완화구간은 차로변경으로 인한 차량 간 상충이 가장 많이 발생하는 구간으로 완화구간 내에서 발생하는 상충을 비교하여 합류기법별 안전성을 평가할 수 있다. 따라서 본 분석에서는 합류기법별 상충빈도를 분석하였으며, 결과를 Table 3에 제시하였다. 또한 상충유형별 상충빈도 분석결과를 Table 4에 제시하였다.

Table 3. Analysis of conflict frequency in study area

| Data | Type | LOS A | LOS B | LOS C |
|-------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| Conflict Frequency (/m) | Conventional Merge | 0.02 | 0.42 | 1.19 |
| | Joint Merge | 0.09 | 0.41 | 0.76 |
| | Chicane | 0.01 | 0.22 | 1.24 |

Table 4. Analysis of conflict frequency by conflict types in study area

| Data | Type | Lane Change Conflict | | | Rear-End Conflict | | |
|---------------------------------------|--------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| | | LOS A | LOS B | LOS C | LOS A | LOS B | LOS C |
| Conflict Frequency (# of Conflict /m) | Conventional Merge | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.02 | 0.41 | 1.13 |
| | Joint Merge | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.09 | 0.40 | 0.75 |
| | Chicane | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.22 | 1.18 |

상충 분석 결과, 정면충돌 상충은 한 건도 발생하지 않았으며, 후미 추돌 상충이 전체 상충의 96%를 차지하는 것으로 나타났다.

차로변경 상충 및 후미 추돌 상충 모두 LOS A, B인 경우 사전 유도기법이 가장 낮은 빈도를 나타내었으며, LOS C의 경우 Joint Merge기법의 빈도가 가장 낮은 값을 나타내었다.

차로변경 상충 빈도는 LOS A, B의 경우 사전 유도기법이 각 0.00건/m, 0.01건/m로 가장 낮은 값을 나타내었다. 그러나 ANOVA-Test 결과 합류기법별 집단 간 통계적이 차이는 없는 것으로 나타났으며 모두 동일한 부집단으로 분류되는 것을 확인할 수 있었다(유의수준 $\alpha=0.05$). 이는 대부분의 상충이 후미 추돌 상충의 형태로 발생하였기 때문에 교통상황이 복잡하지 않은 경우 합류기법에 대한 차로변경 상충 빈도는 큰 차이를 나타내지 않음을 의미한다. LOS C의 경우 Joint Merge기법의 차로변경 상충 빈도가 가장 낮은 값을 나타내었다. ANOVA-Test 결과 집단 간 통계적인 차이가 유의미한 것으로 나타났으며(유의수준 $\alpha=0.001$), 기존 차로차단 기법과 사전 유도기법이 동일한 부집단으로 분류되었다.

후미 추돌 상충 빈도는 LOS A, B의 경우 사전 유도기법이 각 0.01건/m, 0.22건/m로 가장 낮은 값을 나타내었으며, LOS C의 경우 Joint Merge기법이 0.75건/m로 가장 낮은 값을 나타내었다. 후미 추돌 상충 빈도에 대한 ANOVA-Test 결과, 모든 서비스 수준에서 집단 간 통계적인 차이가 유의미한 것으로 나타났다.

따라서 상충빈도를 기준으로 적정 합류기법을 판단할 때에는 LOS C보다 교통상황이 좋은 경우 사전 유도기법이 적정 합류기법으로 판단되며, LOS C인 경우 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 판단된다.

2. 속도 증감 분석

적정한 합류기법은 완화구간의 통과 시 주행속도의 회복력이 좋은 경우 이동성이 높다고 할 수 있다. 따라서 영향권의 시점 및 종점의 속도 증감 정도를 비교하였으며, 결과를 Table 5에 제시하였다.

LOS A, B의 경우 기존 차단 기법의 경우 완화구간 통과 후 속도가 각 -32%, -30% 정도로 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 반면 동일 서비스 수준에서 합류기법 중 Joint Merge기법의 속도 개선 정도가 약 25%, 33%로 가장 큰

것으로 나타났다.

LOS C의 경우 모든 합류기법에서 완화구간 통과 후 속도가 개선되는 것을 확인할 수 있었으며, 사전 유도기법의 속도 개선율이 136%로 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 그러나 사전 유도구역 및 기존 차단 기법의 경우, 영향권 통과 시점의 속도가 40kph 이하로 느린 속도를 나타내고 있다. 지나치게 낮은 진입속도는 공사구간 진입 후 급가속을 유발할 수 있으며, 영향권 진입 속도가 너무 낮은 기존 차단 기법과 사전 유도기법은 적절하지 않다고 판단할 수 있다. 따라서 영향권 진입 속도가 너무 낮지 않고 개선의 정도가 큰 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 판단된다.

속도 증감에 대한 서비스 수준별 ANOVA-Test 결과, 시점 및 종점의 속도가 모두 집단 간 통계적인 차이가 있는 것을 확인할 수 있었으며(유의수준 $\alpha=0.05$), 사후 분석 결과 부집단으로 분류되는 합류기법은 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 각 서비스 수준별 합류기법의 시·종점 속도가 통계적으로 모두 다르다는 것을 의미한다.

따라서 속도 변화의 측면에서 봤을 때에는 서비스 수준과 상관없이 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 판단된다.

Table 5. Average speed at start/end point and percent increase in travel speed (unit: kph)

| Data | Type | Entry | | | Exit | | | Speed Increase (%) | | |
|---------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|------------|-------------|
| | | LOS A | LOS B | LOS C | LOS A | LOS B | LOS C | LOS A | LOS B | LOS C |
| Average Speed | Conventional Merge | 75.61 | 70.51 | 31.32 | 51.07 | 49.44 | 49.58 | -32% | -30% | 58% |
| | Joint Merge | 77.49 | 71.05 | 64.33 | 96.93 | 94.82 | 93.85 | 25% | 33% | 46% |
| | Chicane | 78.99 | 74.45 | 39.60 | 97.09 | 94.69 | 93.60 | 23% | 27% | 136% |

3. 구간통과속도 분석

이동성 및 안전성 측면에서 적정한 합류기법은 완화구간 내에서 속도가 제한속도보다 낮으면서 급가속 또는 급감속이 발생하지 않는 경우이다. 따라서 완화구간의 통과 시 속도가 제한속도보다 낮은 상태에서 속도 편차가 크지 않은 상황이 적정 합류기법이라 판단할 수 있다. 따라서 영향권 내 구간평균속도와 표준편차를 비교하였으며, 결과를 Table 6에 제시하였다.

영향권 내 구간 평균 속도는 LOS A, B인 경우는 사전 유도기법의 구간평균속도가 75.78kph로 가장 높은 값을 나타내었으며, LOS C인 경우는 Joint Merge기법이 61.14kph로 가장 높은 것으로 나타났다. 구간속도의 표준편차는 모든 서비스 수준에서 Joint Merge기법이 가장 낮은 것으로 나타났다.

합류기법별 평균속도는 모두 제한속도보다 낮은 값을 가지므로 완화구간 내에서 과속에 의한 위험을 배제하며 적절한 통과속도를 지닌 상태로 안전하게 통과한다고 판단할 수 있다.

구간통과속도에서 대한 ANOVA-Test 결과, 모든 서비스 수준에서 집단 간 통계적인 차이가 유의미한 것으로 나타났으며(유의수준 $\alpha=0.05$), 사후분석 결과 모든 서비스 수준에서 동일한 부집단으로 분류되는 경우는 없었다. 이는 각 서비스 수준별 합류기법의 구간통과속도 평균은 모두 통계적으로 차이가 있다는 것을 의미한다.

따라서 구간통과속도를 기준으로 적정 합류기법을 판단할 경우 LOS C보다 교통상황이 좋은 경우 사전 유도기법, LOS C일 경우 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 판단된다.

Table 6. Average speed in study area

| Data | Type | Average Speed | | | Std Deviation of Speed | | |
|----------------|--------------------|---------------|--------------|--------------|------------------------|-------------|--------------|
| | | LOS A | LOS B | LOS C | LOS A | LOS B | LOS C |
| Interval Speed | Conventional Merge | 61.32 | 55.35 | 26.25 | 7.00 | 9.29 | 13.87 |
| | Joint Merge | 73.26 | 67.51 | 61.14 | 6.73 | 7.76 | 10.52 |
| | Chicane | 75.78 | 70.66 | 40.81 | 7.57 | 7.80 | 15.77 |

4. 지체시간

영향권 진입 전 지체시간(tQueue)의 분석결과는 Table 7과 같다. LOS A일 경우, 모든 유형에서 거의 지체시간이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었으며, LOS B의 경우 기존 차로차단기법이, LOS C인 경우 Joint Merge기법의 지체시간이 가장 낮은 것으로 나타났다.

지체시간에 대한 ANOVA-Test 결과, 모든 서비스 수준에서 집단 간 통계적 차이가 유의미한 것으로 나타났으며 (유의수준 $\alpha=0.05$), LOS A일 경우 기존 차로차단기법과 사전 유도기법이 동일한 부집단으로 분류되는 것으로 나타났다. 이는 LOS A일 경우 기존 차로차단기법과 사전 유도기법의 통계적인 차이가 없다는 것을 의미한다.

따라서 지체 시간을 기준으로 보았을 때 LOS C보다 교통상황이 좋을 경우 기존 차로차단기법 또는 사전 유도기법, LOS C인 경우 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 판단된다.

Table 7. Time in queue at start point of study area

(unit: Sec)

| Data | Type | LOS A | LOS B | LOS C |
|--------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| tQueue | Conventional Merge | 0.00 | 0.02 | 27.32 |
| | Joint Merge | 0.02 | 0.52 | 6.14 |
| | Chicane | 0.00 | 0.07 | 12.98 |

5. 분석 결과 종합

본 연구에서는 적정 합류기법을 평가하기 위하여 상층 분석, 속도증감 정도, 구간평균속도, 지체시간을 분석하였다. LOS A인 경우 속도증감 정도를 제외한 모든 결과에서 사전 유도기법이 적정합류기법으로 나타났다. LOS A인 경우 속도 증감 정도는 Joint Merge기법 및 사전 유도기법의 차이가 약 2%였으며, 시·종점 속도 역시 큰 차이를 나타내지 않았기 때문에 LOS A인 경우 사전 유도기법을 적정 합류기법으로 판단할 수 있다.

LOS C인 경우 모든 결과가 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 나타났으므로, LOS C인 경우 Joint Merge기법을 적정 합류기법으로 판단할 수 있다.

LOS B인 경우 각 지표별로 다양한 합류기법이 적정 합류기법으로 판단되었는데, 상층빈도, 구간통과속도의 경우 사전 유도기법이 적정 합류기법으로 나타났으며, 지체시간의 경우 기존 합류기법이, 속도증감 정도는 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 나타났다. 속도증감 정도의 경우 적정 합류기법으로 판단된 결과가 사전 유도기법과 동일한 부집단으로 설정되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 LOS B의 경우 사전 유도기법을 적정 합류기법으로 판단할 수 있다.

해당 지표들을 종합적으로 분석했을 때에는 LOS C보다 교통상황이 좋을 경우 사전 유도기법이 적정 합류기법으로 판단되며, LOS C인 경우 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 판단된다. 이는 교통량이 적을 때에는 Joint Merge 기법이 교통량이 많을 때에는 기존 차로차단 기법의 안전성에 높다는 기존 연구와는 차이가 있다. 기존 미국의 연구에서는 편도 2차로인 현장 상황에서 실험을 진행하였기 때문에, 편도 3차로인 상황을 시뮬레이션으로 구현한 본 연구와 차이가 있으므로 상이한 결과가 나온 것으로 판단된다.

결론

고속도로 노후화가 진행되면서 도로 재포장 또는 도로 확장 등의 공사로 인하여 앞으로 고속도로에서 진행될 차로 차단 공사는 계속 증가할 것으로 판단된다. 그러나 국내에서는 기존 차로차단 기법 외에 다른 차로 합류기법만 운용하고 있어 다양한 교통 상황에 적합한 합류기법 적용이 불가능한 상황이며, 이에 대한 국내 연구 역시 부재인 상태이다.

따라서 본 연구에서는 고속도로 차로차단 공사 중 발생하는 차로 합류기법을 서비스 수준별 교통량에 따른 적정

합류기법을 주행 시물레이션과 교통 시물레이션의 연계기법을 통해 분석을 시행하였다. 합류기법에 대한 현장실험은 각 합류기법에 대한 현실적인 효과를 증명할 수 있으나, 실험 중 발생할 수 있는 사고의 위험성 및 시간적, 금전적 소요가 크기 때문에 제한적으로 실험을 진행할 수밖에 없다. 따라서 시물레이션을 통한 실험을 통하여 현장실험을 대신할 수 있는 주행 시물레이션을 통하여 운전자의 주행 행태를 분석하고, 이 자료를 토대로 교통 시물레이션에 공사구간 내 운전자의 주행 행태를 반영하여 공사구간의 적정 합류기법을 분석하였다.

분석 결과, 기존 차로차단 기법보다 사전 유도기법 또는 Joint Merge기법이 안전성 측면에서 효과적인 합류기법으로 판단되었다. LOS C보다 교통상황이 좋을 경우는 사전 유도기법이 적정 합류기법이, LOS C인 경우 Joint Merge기법이 적정 합류기법으로 판단되었다.

본 연구는 기존 국내에서 진행되지 않았던 공사구간 합류기법에 대한 연구를 시물레이션 연계기법으로 평가하는데 그 의의가 있으나 이를 현장에 바로 적용하기에는 무리가 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구를 발전시키기 위해서는 다음과 같은 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

첫째, 새로운 합류기법 도입에 대한 운전자의 작업 부하를 고려한 선호도 조사가 필요하다. 적정 합류기법으로 선정된 합류기법들의 현장 적용 시 가장 문제가 될 것으로 고려되는 요소는 운전자의 혼란이다. 앞서 제시되었던 기법들은 국내 고속도로에 적용된 적이 없는 기법이기 때문에 사전 공지가 없는 경우 공사구간을 주행하는 운전자들의 혼란을 야기할 수 있다. 따라서 새로운 합류기법의 현장적용 이전, 표지설치 및 안내방송을 통한 알림을 통하여 새로운 합류기법이 전방 공사구간에 운영됨을 알림으로써 운전자의 혼란을 최소화 시켜야 할 것이다. 또한 시물레이션의 결과만을 통해 현장에 바로 적용하는 것은 운전자의 혼란을 야기하고 그 적용성에 문제가 있을 수 있으므로, 새로운 합류기법에 대한 시범적인 현장 적용을 통해 합류기법별 효과평가 및 적용성에 대한 부분을 분석하여 최종적으로 현장에 적용해야 한다고 판단한다.

둘째, 차량의 합류기법 별 작업구간 침범 확률에 대한 연구가 필요하다. 본 분석에서 진행된 주행 시물레이션에서는 운전자가 공사구간에 침범할 수 없도록 시나리오를 구성하였으며, 교통 시물레이션도 동일하게 주행 차량의 작업구간 침범이 불가능한 시나리오로 구성되어 있다. 그러나 공사구간 내에서 위험 운전을 하는 운전자가 공사구간 내에 침범하여 작업자와 충돌하여 대형사고로 발전될 가능성이 크다. 따라서 주행 시물레이션 시나리오 구성 시 합류기법에 따른 작업구간 진입 여부에 대한 평가를 진행해야 할 것으로 판단된다.

셋째, 편도 2차로, 4차로 공사구간에 적용할 수 있는 적정 합류기법의 적용방안 및 다양한 교통상황에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 편도 3차로 중 우측 1개 차로 차단 공사에 대한 연구만 수행하였다. 그러나 고속도로 현장에서는 편도 3차로 외의 구간에서도 공사가 진행되기 때문에 현장에 적용하기 위해서는 다양한 차로 수와 차로차단 조합을 고려한 연구가 필요하다. 또한 본 분석에서는 세 가지 LOS에 해당하는 교통량만을 통해 분석을 실시하였으나, 현장에서는 각 도로 상황별로 다양한 교통량이 존재한다. 따라서 서비스 수준별로 교통량을 나누어 분석하는 것보다 교통량을 보다 세분화시켜 분석하고 혼잡상태인 교통상황을 추가로 분석할 경우, 보다 다양한 환경에서의 적정 합류기법의 평가가 가능할 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구에서 활용한 VISSIM이 아닌 다른 교통 시물레이션으로 연구를 진행하고, TTC 이외에 안전도를 평가할 수 있는 다른 효과평가 지표인 DSSM(Tak et al., 2015)을 활용한다면 더욱 다양하고 정확한 연구 결과 도출이 가능할 것으로 판단된다. 또한 공사구간의 한정된 공간적 범위가 아닌 다양한 교통상황에 대한 연구에 시물레이션 연계기법을 적용할 경우, 보다 신뢰성 높은 시물레이션 통합운영에 대한 연구결과 도출이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 주행 시물레이션의 결과를 교통 시물레이션의 입력 자료로만 활용하였지만, 향후 연구에서는 교통 시물레이션의 결과를 주행 시물레이션의 자료로 활용하는 통합적 시물레이션 분석방안에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government (MSIP) (NRF-2010-0028693).

This work was also supported by a research project of the Korea Expressway Corporation.

REFERENCES

- Federal Highway Administration (2009), Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report, 24.
- Idewu W., Wolshon B. (2010), Joint Merge and Its Impact on Merging Speeds in Lane Reduction Areas of Construction Zone, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2169, 31-39.
- Ishak S., Qi Y., Rayaprolu P. (2012), Safety Evaluation of Joint and Conventional Lane Merge Configurations for Freeway Work Zones, Traffic Injury Prevention, 13(2), 199-208.
- Korea Expressway Corporation (2013), Highway Work Zone Traffic Control Standard (고속도로 공사장 교통관리기준), 19.
- Lee M. R., Kim D. G. (2013), The Proper Length of Transition Area for Work Zones on Urban Freeways, J. Korean Soc. Transp., 31(4), Korean Society of Transportation, 58-66.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009), Rules About the Road Structure and Facilities Standards Explanation (도로의 구조 · 시설 기준에 관한 규칙 해설), 100.
- Park J. N., Oh Y. T. (2007), The Method to Estimate the Length of Transition Area at the Construction Area in the Freeway, Master's Dissertation, Ajou University, 393-401.
- Shakouri M., Ikuma L. H., Aghazadeh F., Punniaraj K., Ishak S. (2014), Effects of Work Zone Configurations and Traffic Density on Performance Variables and Subjective Workload, Accident Analysis and Prevention, 71, 166-176.
- Tak S. H. (2015), Development of Multi-level Connected Safety System With Traffic Predictive Cruise Control, Master's Dissertation, KAIST, 13.
- Transportation Research Board (2015), Work Zone Speed Management, National Cooperative Highway Research Program Synthesis 482, 37-38.