ARTICLE

고속도로 엇갈림구간의 효율적 운영을 위한 구간길이 설계기준 적정성 평가

김태완[1] · 이승준[2] · 김덕녕[3] · 임찬수[4] · 김영준[5] · 이은탁[5*] · 손봉수[6]
[1]중앙대학교 도시공학과 교수, [2]한국도로공사 도로교통연구원 연구위원,
[3]한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, [4]한국도로공사 도로교통연구원 실장,
[5]연세대학교 도시공학과 연구원, [6]연세대학교 도시공학과 교수

An Evaluation of Design Standard for Freeway Weaving Section Length for Operational Efficiency

KIM, Taewan[1] · LEE, Seungjun[2] · KIM, Ducknyung[3] · REEM, Chansu[4] · KIM, Youngjun[5] · LEE, Euntak[5*] · SON, Bongsoo[6]

[1]Professor, Department of Urban Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea
[2]Research Fellow, Korea Expressway Corporation, Kyeonggi-do 18489, Korea
[3]Deputy Principal Researcher, Korea Expressway Corporation, Kyeonggi-do 18489, Korea
[4]Department Manager, Korea Expressway Corporation, Kyeonggi-do 18489, Korea
[5]Researcher, Department of Urban Planning and Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea
[6]Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

*Corresponding author: 92yahoo@yonsei.ac.kr

J. Korean Soc. Transp.
Vol.39, No.1, pp.62-77, February 2021
https://doi.org/10.7470/jkst.2021.39.1.062

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY
Received: 1 February 2021
Revised: 9 February 2021
Accepted: 15 February 2021

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.

Abstract

On freeway weaving sections, traffic congestion and accidents occur frequently due to the disturbance generated by lane-changing vehicles. In order to reduce the disturbance, weaving section should be sufficiently long. The relationship between weaving length and density, or equivalent level of service, is suggested in Korea Highway Capacity Manual (KHCM). However, it is not fully demonstrated whether the suggested relationship is appropriate or not. The purpose of this paper is to investigate the appropriateness of KHCM standard compared with field data and micro-simulation results. The analysis results show that the density or level of service estimated by KHCM and micro-simulation are significantly different. This implies that KHCM has employed a single equation in order to estimate the densities of many different types of weaving sections, so it is not enough to represent vehicular behaviors somewhat complicated occurring on weaving sections. It, consequently, is suggested that KHCM standard for freeway weaving length should be carefully reassessed by using the data obtained from the field.

Keywords: freeway weaving section, Korea highway capacity manual (KHCM), traffic operation, traffic safety, VISSIM

초록

고속도로 엇갈림구간은 잦은 차로변경으로 인해 통행속도가 급격하게 저하함에 따라 교통혼잡이 발생하며 교통사고 발생 가능성이 있는 구간이다. 이에 엇갈림구간은 정체와 사고를 줄일 수 있도록 설계단계부터 면밀한 검토가 필요하나 국내에는 엇갈림구간 설계기준이 아직 미비한 상태이다. 엇갈림구간 설계에서 가장 중요한 것은 엇갈림구간의 길이로서, 적정한 길이 산정은 주로 한국도로용량편람(Korea highway capacity manual, KHCM)의 엇갈림구간 밀도

산정식을 활용하고 있으나 이 산정식의 적정성에 대하여는 아직 명확히 밝혀진 바가 없다. 본 연구에서는 전국의 54개 고속도로 엇갈림구간을 6개 유형으로 분류하고, KHCM 밀도산정식의 적정성을 현장관측자료로 평가한 후 미시교통시뮬레이션 프로그램을 활용한 시나리오 분석을 진행하여 엇갈림구간 길이의 설계기준에 대한 적정성을 평가하였다. 분석결과, KHCM과 미시시뮬레이션의 결과 값은 많은 차이를 보였는데 그 이유는 KHCM의 밀도식이 차량의 급가감속 등 불규칙적인 통행행태를 제대로 반영하지 못하기 때문인 것으로 추정된다. 석수IC 엇갈림구간 유형에 대한 VISSIM 분석결과, 구간길이가 250m 이하이면 교통량에 따라 서비스수준이 매우 민감하게 변화하여 교통운영과 안전 측면에서 매우 불안정한 교통류가 발생하는 것으로 분석되었다. 구간길이가 550m 이상인 경우 엇갈림구간의 서비스수준은 거의 변화하지 않는 것을 확인하였으며, 이는 구간길이를 최대 750m로 제시하는 KHCM의 설계 길이 범위에 대해 고찰할 필요가 있음을 시사하고 있다. 본 연구의 결과는 향후 KHCM 밀도식의 개정의 필요성을 제시하고 있으며, 이를 위해서는 보다 많은 현장관측자료와 이를 설명할 수 있는 이론의 개발이 요구된다.

주요어: 고속도로 엇갈림구간, 교통운영, 교통안전, 한국도로용량편람, VISSIM

서론

고속도로의 엇갈림구간은 고속도로 합류구간과 분류구간이 연속되어 나타나는 구간으로, 교통 통제시설의 도움 없이 두 교통류가 맞물려 동일 방향으로 도로를 따라가면서 서로 다른 방향으로 엇갈리는 구간을 말한다. 엇갈림 교통류는 고속도로 본선을 직진하는 교통류, 연결로에서 본선으로 진입하는 교통류, 본선에서 연결로로 진출하는 교통류로 구성된다. 잦은 차로변경에 의한 교통류 상충 빈도가 높은 고속도로 엇갈림구간은 통행속도가 급격하게 감소함에 따라 교통 혼잡이 발생하며 교통사고 발생 가능성이 높은 구간이다. 이러한 특성으로 인해 고속도로 엇갈림구간은 도로 설계 단계에서부터 충분한 분석을 통하여 설계되어야 한다.

하지만 국내 고속도로 엇갈림구간 설계기준은 명확히 제시되어있지 않으며, 이에 따라 일반적으로 설계 시 한국도로용량편람(Korea highway capacity manual, KHCM)(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013b)의 엇갈림구간 운영평가방법을 활용하고 있다. 엇갈림구간의 운영특성은 교통류의 통행행태에 영향을 미치는 엇갈림구간의 유형에 따라 다르게 산정되는데, KHCM에서는 엇갈림구간을 본선-연결로 엇갈림구간과 연결로-연결로 엇갈림구간의 2가지 기본유형으로 분류하고 있다. 본선-연결로 엇갈림구간은 본선차로와 가감속차로가 이격되지 않은 유형으로, 엇갈림교통류가 본선의 직진교통류에 영향을 미치는 특징이 있다. 연결로-연결로 엇갈림구간은 본선에서 측도로 분리된 이후에 엇갈리는 유형으로, 본선의 직진교통류에 영향을 미치지 않는 특징을 보인다. 하지만 Table 1에서 볼 수 있듯 전국의 54개 고속도로 엇갈림구간 중 29개 지점의 엇갈림구간 형태는 KHCM의 2가지 기본유형에 포함되지 않는 한계점을 확인하였다. 또한 KHCM의 운영평가방법은 교통안전의 측면을 충분히 고려하지 못하고 있다.

Table 1. Freeway weaving sections and KHCM applicability

Expressway	Number of weaving sections	KHCM applicable	KHCM not applicable
Kyeongbu	8	4	4
Gyeongin	2	2	-
Second Gyeongin	4	1	3
Yeongdong	7	4	3
Capital region first ring	23	7	16
Jungbu	4	2	2
Namhae	2	2	-
Pyeongtaek Jecheon	2	2	-
Incheon international airport	1	-	1
Seohaean	1	1	-
Total	54	25	29

효율적인 엇갈림구간 운영을 위한 설계기준을 마련하려면 우선적으로 전국 고속도로 엇갈림구간의 유형을 파악하고, 이를 토대로 체계적인 운영평가방법을 정립해야할 것이다. 본 연구의 목표는, 첫째, 전국의 고속도로 엇갈림구간을 유형구분 기준에 따라 분류하고, 둘째, 현장관측자료와 미시교통시뮬레이션을 활용하여 엇갈림구간의 유형별로 KHCM 엇갈림구간 설계기준의 적정성을 평가하는 데 있다.

문헌고찰

1. 국내외 엇갈림구간 지침

고속도로 엇갈림구간의 효율적인 운영을 위해 각국에서는 지침을 마련하여 다양한 기준을 적용하고 있다. 국내 지침과 관련하여, KHCM은 엇갈림구간을 구조물의 물리적 고어부 사이 구간으로 정의하고 최대 길이는 750m로 제한하였으며, 엇갈림구간의 유형은 본선차로와 가감속차로의 이격여부를 기준으로 2가지로 분류하였다. 도로의 구조시설에 관한 규칙해설(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013a)은 엇갈림구간의 유형을 엇갈림교통류의 최소차로변경횟수를 기준으로 크게 3가지, 세부적으로는 5가지로 분류하였다. 도로설계기준 및 도로공사표준시방서(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016)는 엇갈림구간의 길이를 확보하여야 한다는 언급은 있으나, 구체적인 설계기준을 제시하지 않았다. 국내 지침 중 KHCM이 고속도로 엇갈림구간을 가장 상세하게 다루고 있으나, 엇갈림구간의 가장 기본적인 유형만 다루는 한계가 있으므로 설계기준을 보완할 필요성이 있다.

외국 지침의 경우, 미국의 Highway capacity manual(USHCM)(Transportation Research Board, 2016)은 엇갈림구간을 갈매기표지 사이의 구간으로 정의하였는데 이는 KHCM과 달리 실제 차량이 이용할 수 있는 도로구간을 기준으로 하고 있다. 엇갈림구간의 최대 길이는 고속도로 상황을 고려한 수식으로 산정되며 일반적으로 1km와 2km 사이의 범위로 제한된다. 엇갈림구간의 유형은 1개로 설정되어 미국의 엇갈림구간에는 모두 동일한 분석방법이 적용된다. 영국의 Design manual for roads and bridges(DMRB)(Highways England, 2006)은 미국과 마찬가지로 엇갈림구간을 갈매기표지 사이의 구간으로 정의하였다. 엇갈림구간 최대 길이는 3km로 제한하였으며, 유형은 차로수의 변화, 테이퍼 유무 등의 도로기하구조에 따라 5가지로 구분하고 있다. 독일의 German highway capacity manual(HBS)(Lemke, 2016)도 엇갈림구간을 갈매기표지 사이의 구간으로 정의하였다. 엇갈림구간의 최대길이는 제한하지 않았으며, 엇갈림구간의 유형은 미국과 동일하게 1개로 설정되어 모든 엇갈림구간에 동일한 분석방법을 적용하고 있다. 일본의 교통현상과 교통용량(Japan Society of Traffic Engineers, 1987)은 타 국가와 마찬가지로 엇갈림구간을 갈매기표지 사이의 구간으로 정의하였다. 엇갈림구간의 최대길이는 언급되지 않았으며, 엇갈림구간 유형은 국내의 도로의 구조시설에 관한 규칙해설(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013a)과 동일하게 크게 3가지, 세부적으로는 5가지로 분류되었다. 엇갈림구간에 대한 국가별 기준은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2. Freeway weaving section definitions

Country	Manual	Definition of weaving section	Maximum weaving length	Types
Korea	Korea highway capacity manual (KHCM, 2013)	Area including unpaved physical gore (design standard)	750m	2
US	Highway capacity manual (USHCM, 2016)	Area including paved road (operation standard)	1-2km	1
UK	Design manual for roads and bridges (DMRB, 2006)	Area including paved road (operation standard)	3km	5
Germany	German highway capacity manual (HBS, 2015)	Area including paved road (operation standard)	No limit	1
Japan	Japanese highway capacity manual (JHCM, 1987)	Area including paved road (operation standard)	Not mentioned	5

2. 엇갈림구간에 대한 해석적 접근법

앞서 국내외 지침들은 주로 실용적 목적으로 다양한 유형에 관한 관측자료를 바탕으로 방향별 교통량, 엇갈림구간의 길이 등을 독립변수로 속도를 계산하고 이를 밀도=교통유율/공간평균속도 식에 대입하여 밀도를 계산, 최종적으로 LOS를 도출하는 방식이다. 그런데 이러한 지침들은 다양한 엇갈림구간의 기하구조에서 나타나는 차량들의 복잡한 행태에 대한 이해나 논리적인 설명이 없이 소수의 경험식으로 그 현상을 설명하는 것이어서 해석적 접근법으로 이를 설명하려는 노력도 지속되어 왔다.

엇갈림구간에 대한 해석적 접근법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 엇갈림구간에서의 용량 또는 용량저하 현상에 관한 것이다(Sarvi and Kuwahara, 2007; Chen and Ahn, 2018; Cassidy and Bertini, 2019). 이들의 연구에 의하면 용량 저하는 최대 관측교통유율의 10-30%내외인 것으로 조사되었으며 그 원인은 엇갈림 차량의 앞부분에서 공극이 발생하여 공간을 충분히 활용하지 못하는 것이라고 하였다. 또 다른 접근법은 차량의 행태에 관한 연구로서 합류나 분류 등 차로 변경의 위치에 관한 것(Leclercq et al., 2016), anticipation과 relaxation 효과에 관한 것(Schakel et al., 2012), 강제차로변경과 임의차로변경에 관한 것(Kusuma et al., 2020) 등이 있다. 위빙구간의 길이와 관련한 연구로 Marczak et al.(2014)은 프랑스 고속도로 자료를 분석한 결과 위빙구간의 길이 중 60%만이 실제 활용되며 40%는 사용되지 않는다고 하였다. Beinun et al.(2018)은 네덜란드에서의 3개 합류부 구간, 3개 분류부 구간, 8개의 위빙구간에 대한 차량궤적 자료를 이용하여 merging, diverging, pre-allocation, cooperation, anticipation, relaxation, keeping right 현상들이 발생하는 지점들을 조사하였으며 차로변경 위치와 강도, 위빙구간 활용도, cooperation 차량의 차두시간과 속도의 변화, acceptance gap distribution, ramp influence area 등에 대한 광범위한 분석결과를 제시하였으나 이는 관측 자료에 대한 통계만을 제시한 것으로 차량의 행태와 직접 연관성을 설명하지는 못하였다. 이와 같이 엇갈림구간에 대한 해석적 접근법은 차로변경 위치, 간격수락행태, 차량간의 상호작용 등 다양한 요소에 대한 단편적 현상이나 통계를 설명하고 있으나 이러한 요소들이 복합적으로 작용하여 나타나는 엇갈림구간에서의 속도나 밀도 변화 등을 계산하는 식을 제시하지 못하는 한계가 있다.

3. 미시교통시뮬레이션 프로그램을 활용한 교통분석

엇갈림구간의 도로기하구조에 따른 엇갈림 차량과 비엇갈림 차량의 통행행태 및 상호관계를 해석하여 수식으로 제시하거나 밀도 및 서비스수준을 산출하는 데에는 한계가 있다. 또한 KHCM 밀도산정식의 적정성을 평가하기 위해서는 교통량 비율 및 엇갈림구간 길이 등 다양한 요소의 변화에 따른 수많은 시나리오 분석과정이 요구된다. 이에 대한 실측자료를 구하는 것에는 많은 제약이 있으므로, 본 연구에서는 그 대안으로 미시교통시뮬레이션 프로그램 VISSIM을 활용하였다.

통행행태를 모사하려면 VISSIM의 40개 이상의 통행행태 입력변수에 대한 조정이 필요한데, 각 변수의 입력값은 실수단위이므로 모든 변수의 최적값을 도출하기 위해서는 그 탐색범위가 무한하여 시간적 어려움이 따른다. 따라서 대부분의 연구에서는 입력변수를 선별하고 변수 값을 최적화하는 방법을 활용하였다. 유전 알고리즘(genetic algorithm), 다중회귀분석 등의 최적화 기법을 적용한 신호교차로에서의 통행행태에 관한 연구(Lu et al., 2016; Manjunatha et al., 2013; Yang et al., 2016), 차종별 통행행태에 관한 연구(Durrani et al., 2016; Maheshwary et al., 2018), 교통수요 최적화에 관한 연구(Tettamanti et al., 2015) 등이 있다. 또한 최적화에 대한 효과척도를 다양하게 적용하여 그 적합성을 검증하는 연구도 진행되었다(Mahmood and Kianfar, 2019; Kim et al., 2020).

4. 기존연구와의 차별성

엇갈림구간 관련 연구는 대부분 해석적인 접근법을 적용하여 시행되어 왔으며, 지침의 엇갈림구간 관련 내용을 보완 및 개선함으로써 엇갈림구간 길이의 설계기준을 고찰하는 연구는 이제 시작단계인 상태이다. 본 연구에서는

효율적인 엇갈림구간의 운영을 위한 설계기준을 마련하기 위하여 엇갈림구간을 유형구분 기준에 따라 세분화하고, 현장관측자료와 미시교통시뮬레이션을 활용한 미시적인 분석방법을 통해 거시적 결과물을 도출하고 KHCM 엇갈림구간 설계기준의 적정성을 평가하였다.

엇갈림구간 길이에 대한 설계기준 평가 방법

대부분의 국내외 설계기준들은 엇갈림구간의 길이가 증가함에 따라 동일한 교통량 조건에서 서비스 수준이 개선되는 것으로 분석하고 있으나, 엇갈림구간의 기하구조적 특성에 따라 그 효과는 조금씩 다를 것이다. 본 연구의 1단계에서는 엇갈림구간 유형구분 기준을 수립하여 전국의 54개 고속도로 엇갈림구간을 6가지 유형으로 분류하였다. 2단계에서는 6가지 유형의 현장관측 분석결과와 비교하여 지침들 중 밀도산정식이 가장 적정한 지침을 선정하였다. 3단계에서는 다양한 교통량 조건과 엇갈림구간 길이 조건에 대하여, 선정된 지침과 미시교통시뮬레이션의 결과를 비교하였으며 이에 따라 현재 엇갈림구간의 길이 결정에 활용되고 있는 KHCM과 엇갈림구간 길이에 대한 개선 방향을 제시하고자 한다.

1. 엇갈림구간의 유형 구분

엇갈림구간은 그 기하구조적 특성에 따라 차량들의 엇갈림 행태가 달라지므로 분석을 위해서는 먼저 엇갈림구간의 유형을 구분할 필요가 있다. 본 연구에서는 유형구분 기준을 크게 3단계로 구분하였다. 1단계에서는 본선차로와 가감속차로의 이격여부로, 2단계에서는 본선에서의 엇갈림이 발생할 경우 본선의 기본 차로 수 유지 여부로, 3단계에서는 측도에서의 엇갈림 발생 여부로 구분한다.

Figure 1은 전국의 54개 고속도로 엇갈림구간 현황을 바탕으로 엇갈림구간의 유형을 3가지의 대분류 및 소분류 기준에 따라 구분한 결과를 나타내고 있다. 첫 번째로, 본선차로와 가감속차로의 이격 여부로 엇갈림구간을 크게 구분하였다. 이는 KHCM의 엇갈림구간 유형구분 기준과 동일하며, 이격 여부에 따라 본선 직진 교통류에 대한 엇갈림 교통류의 영향 여부가 결정된다. 1차적으로 분류된 엇갈림구간에는 서로 다른 소분류 기준이 적용된다. 본선차로와 가감속차로가 이격되지 않은 엇갈림구간의 경우, 본선의 기본 차로수 유지 여부가 구분기준으로 적용되었다. 반면 본선차로와 가감속차로가 이격된 엇갈림구간은 엇갈림이 본선의 측도에서 발생하는지 여부가 구분기준으로 적용되었다. 이에 따라 엇갈림구간의 유형은 크게 4가지(A, B, C, D)로 분류되며, 진출입 연결로의 차로 수에 따라 유형은 최종적으로 6가지(A-1, A-2, B, C, D-1, D-2)로 세분화된다. KHCM에서 제시하는 2가지 기본유형은

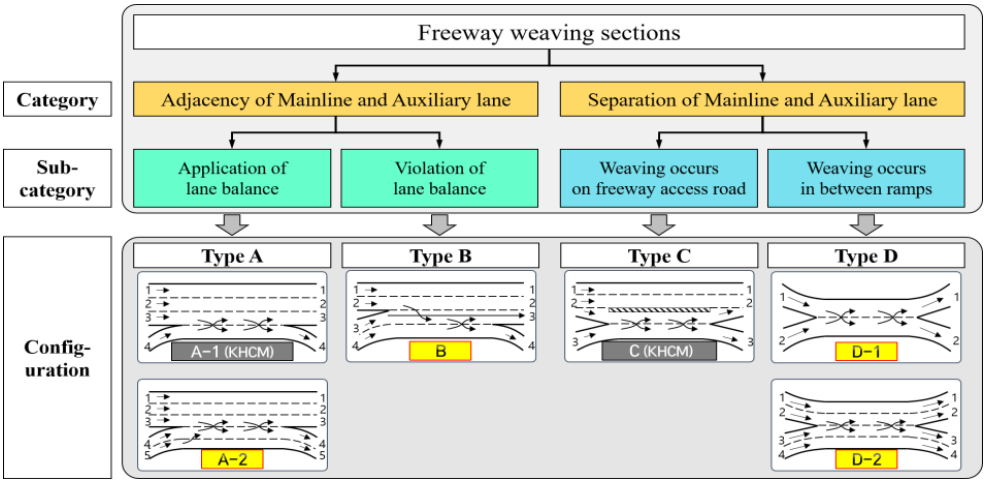


Figure 1. Classification of freeway weaving section

A-1과 C로 분류되었으며, 세분화된 유형을 통해 고속도로 엇갈림구간을 분류하였다. 본 연구에서 제시하는 유형 외의 다른 엇갈림구간 유형이 존재한다면 그에 상응하는 유형 구분기준이 수립되어야 할 것이다.

2. KHCM과 USHCM 밀도산정식의 현장 적용성 분석

영국과 일본의 고속도로는 좌측통행을 적용하고, 독일의 고속도로 아우토반은 제한속도가 없는 구간이 존재하여 국내 고속도로 교통체계와 상이하므로 해당 국가의 지침은 적정성 분석대상에서 제외되었다. 한국의 KHCM과 미국의 USHCM에 대한 밀도산정식의 현장 적용성 분석을 위하여 본 연구에서는 6가지 엇갈림구간 유형을 대표하는 지점을 8개로 선정하여 현장조사를 실시하고 관측자료를 구득하였다. 두 지침의 밀도산정식을 활용한 추정밀도와 실측밀도 간 비교를 통해 국내 환경에 가장 적정한 지침을 선정하였다. 추정밀도와 실측밀도를 산정하는 수식은 Equation 1, 2와 같다.

$$d = \frac{q}{v} \tag{1}$$

$$\hat{d} = \frac{q}{\hat{v}} \tag{2}$$

여기서, d : KHCM 및 USHCM의 추정밀도(pcu/km/lane)
v : KHCM 및 USHCM의 추정평균통행속도(km/h)
q : KHCM 및 USHCM의 승용차단위환산교통량(pcu/h/lane)
$\hat{d}$: KHCM 및 USHCM의 방법을 적용한 실측밀도(pcu/km/lane)
$\hat{v}$: 관측된 평균통행속도(km/h)

두 지침의 밀도산정식은 Equation 1로 동일하며, 밀도d는 추정평균통행속도v와 승용차단위환산교통량q를 통해 산정된다. 하지만 추정평균통행속도v와 환산교통량q를 구하는 과정에서 각 지침은 다른 방법을 적용하고 있다. Equation 2의 실측밀도$\hat{d}$를 산정하는 과정에서, 현장조사를 통해 관측된 평균통행속도$\hat{v}$는 지침과 무관하게 동일하게 적용되지만 환산교통량q는 지침별로 다르게 적용된다.

추정밀도의 오차를 산정하기 위한 평가척도로 평균절대비율오차(mean absolute percentage error, MAPE)를 적용하였으며, 이에 대한 수식은 Equation 3과 같이 나타난다.

$$\text{MAPE} = \frac{1}{sn}\sum_{i=1}^{s}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{\hat{d}_{i,t} - d_{i,t}}{\hat{d}_{i,t}}\right| \tag{3}$$

여기서, s : 엇갈림구간 지점 수
n : 1시간 단위로 조사한 관측시간대 수
$\hat{d}_{i,t}$: 엇갈림구간 지점i의 시간대t에서의 KHCM 및 USHCM 실측밀도($i \in S$, $t \in N$)
$d_{i,t}$: 엇갈림구간 지점i의 시간대t에서의 KHCM 및 USHCM 추정밀도($i \in S$, $t \in N$)

Equation 3의 평균절대비율오차는 각 엇갈림구간 지점i의 시간대t에 대하여 실측밀도$\hat{d}_{i,t}$와 지침의 추정밀도$d_{i,t}$의 절대비율오차들의 평균값으로 측정된다. 엇갈림구간 지점 수는 총 s(=8)개이며, 각 지점의 관측시간은 n시간으로 설정하여 1시간 단위로 분석을 진행하였다.

3. 유전 알고리즘을 활용한 엇갈림구간 유형별 VISSIM 입력변수 추정

1) VISSIM 입력변수 선정

시나리오별 엇갈림구간의 운영상태를 평가하기 위해, 앞에서 선정된 지침에서 추정한 통행속도, 승용차단위환산교통량 등을 미시교통시뮬레이션 프로그램 VISSIM으로 모사하는 최적화 모형을 구축하였다. 엇갈림구간의 통행행태를 모사하려면 VISSIM의 40개 이상의 통행행태 입력변수에 대한 조정이 필요한데, 각 변수의 입력값은 실수단위이므로 모든 변수의 최적값을 도출하기 위해서는 그 탐색범위가 무한하여 시간적 어려움이 따른다.

본 연구에서는 고속도로 엇갈림구간 관련 VISSIM 연구의 고찰내용을 바탕으로 개별차량의 빈번한 가감속행태과 차로변경행태에 영향을 가장 크게 미치는 5개의 주요 입력변수를 선별하여 Table 3과 같이 나타냈다. 엇갈림구간에서 개별차량의 통행행태는 차량추종모형(car-following model)과 차로변경모형(lane-changing model)으로 표현할 수 있다.

차량추종모형의 입력변수 중 차량의 종방향 움직임에 가장 큰 영향을 주는 3개 입력변수를 선별하였다. CC0(stand-still distance)은 후행차량이 정차하였을 때 선행차량과의 간격을 의미한다. 이 변수는 정차가 발생하는 교통 혼잡상황에서 안전유지거리에 큰 영향을 미치는 요소이다. CC1(headway time)은 후행차량이 이동 중에 선행차량과 유지하려는 차두시간을 나타낸다. Figure 2에서 확인할 수 있듯 VISSIM에서의 안전유지거리는 CC0 및 CC1과 관련성이 있다. CC2(following variation)는 통행에서 발생하는 교통진동(traffic oscillation)의 크기를 나타낸다. 이는 차간 최소거리를 나타내는 안전유지거리에 추가되는 여유거리를 의미한다.

차로변경모형의 입력변수에 대해서는 차량의 횡방향 움직임에 가장 큰 영향을 주는 2개 입력변수를 선별하였다. Maximum deceleration은 차량이 차로를 변경하기 위한 감속도의 최대값을 의미하며, Safety distance reduction factor는 변경하려는 목적차로의 선행차량과 안전유지거리를 어느 비율로 감소시키며 차로를 변경할 것인지를 의미한다. 최적화 모형에 포함되지 않은 나머지 입력변수에는 기본값을 적용시켜 분석을 진행했다.

Table 3. Driving behavior parameters for VISSIM calibration

Model	Driving behavior parameters	Default	Lower-bound	Upper-bound
Car-following model	CC0 (standstill distance)(m)	1.50	0.00	3.00
	CC1 (headway time)(s)	0.90	0.00	2.00
	CC2 (following variation)(m)	13.12	0.00	40.00
Lane-changing model	Maximum deceleration (own vehicle)(m/s^2)	-3.00	-9.00	0.00
	Safety distance reduction factor	0.60	0.00	1.00

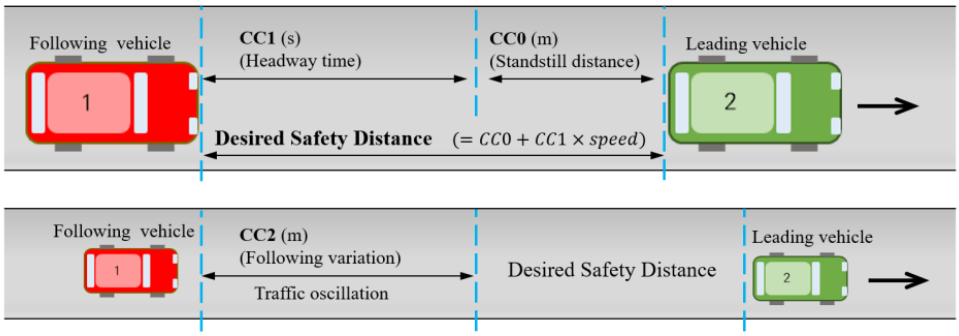


Figure 2. Relationships between selected parameters of car-following model in VISSIM (CC0, CC1, and CC2)

2) 유전 알고리즘을 활용한 VISSIM 입력변수 최적화

엇갈림구간 유형별 차량 통행행태를 가장 잘 모사하는 입력변수의 조합을 탐색하는 최적화 기법으로 유전 알고리즘(genetic algorithm, GA)이 적용되었다. 유전 알고리즘은 표본들의 효과척도(measure of effectiveness, MOE)를

기준으로 열등한 표본은 제거하고 우수한 표본 간의 재생산 과정을 반복하며 최적의 표본을 탐색하는 기법이다.

본 연구에서 적용한 유전 알고리즘 최적화기법의 수행과정은 아래의 내용과 같이 진행된다. 첫 번째, 초기값을 설정하는 단계에서는 표본 수 M을 설정하고 각 표본$i(i=1,2,...,M)$의 j번째 입력변수($j=1,2,3,4,5$)의 값x_{ij}을 임의로 지정한다. 값을 지정할 때에는 하한범위lb와 상한범위ub를 고려한다. 두 번째, 표본i의 j번째 입력변수의 값x_{ij}을 VISSIM에 입력하고 분석을 수행한다. 각 표본i의 효과척도$[P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}]=[MAPE, RMSPE, GEH]$)를 산출하여 성능이 우수한 표본 순으로 배열한다. 세 번째, 수렴 조건을 검토한다. 수렴조건에 부합하는 표본 N이 전체 M개 중 절반 이상이면 분석을 마치고 그 중 가장 우수한 표본의 값을 도출한다. 수렴조건이 부합하지 않는다면, 전체 표본 중 열등한 절반의 표본을 제거하고 나머지 우수한 표본들끼리의 조합으로 새로운 표본x_{kj}을 생성함으로써 표본 수를 M개로 복구한다. 생성이 완료되면 두 번째 방법으로 돌아가 수렴조건을 만족할 때까지 과정을 반복한다.

본 연구에서는 미시교통시뮬레이션 프로그램 VISSIM에 유전 알고리즘 최적화기법 적용하기 위해 공학용 소프트웨어 프로그램 MATLAB을 연동시키는 방법을 활용하였다.

Step 1. 초기값 설정
- ✓ M : 표본 수 설정
- ✓ x_{ij}: i번째 표본의 j번째 parameter의 입력값, $\forall i=1,2,...,M \ \forall j=1,2,3,4,5$
- ✓ $lb=(lb_1, lb_2, lb_3, lb_4, lb_5)$: 각 parameter의 lower-bound
- ✓ $ub=(ub_1, ub_2, ub_3, ub_4, ub_5)$: 각 parameter의 upper-bound

Step 2. 각 표본에 대한 VISSIM 시뮬레이션 분석 수행
- ✓ Set driving behavior parameter as x_{ij}, $\forall j=1,2,3,4,5$
- ✓ Run VISSIM microscopic traffic simulation
- ✓ Measurement of Effectiveness (MOE)
  - P_{im} : i번째 sample의 m번째 performance
  - $[P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}]=[MAPE, RMSPE, GEH]$
- ✓ Iterate Step 2 for all i and sort P_{im} with ascending order

Step 3. Convergence Test
- ✓ $N=\{i|P_{im}<0.05, \ \forall m=1,2,3\}$
- ✓ *if* $n(N)>M/2$,
  - Convergence test passed and select parameters of best performance

else,
- Delete the last $M/2$ samples
- Generate new $M/2$ samples using combination of survived samples
- $[x_{aj}, x_{bj}]$: pick two survived samples for new generation
- $x_{kj}=\dfrac{p_j \times x_{aj}+q_j \times x_{bj}}{p_j+q_j}$: k번째 new sample, $p_j, q_j \geq 0, p_j+q_j=1, \forall j$
- Go to Step 2

end

VISSIM의 모사수준을 평가하는 효과척도에는 평균절대비율오차(MAPE), 평균제곱근백분율오차(root mean squared percentage error, RMSPE), 그리고 GEH 통계가 적용되었다. MAPE와 RMSPE는 평균통행속도 및 통행량에 대한 효과척도로 활용되었다. GEH 통계는 교통분석모형에 사용되는 검증된 효과척도로, 미시시뮬레이션의 통행량 모사수준을 분석하는데에 활용되었다. Equation 4, 5, 6은 3가지 효과척도에 대한 수식을 나타낸 것이다.

$$\text{MAPE}=\frac{1}{2}\left(\left|\frac{\hat{v}-v}{\hat{v}}\right|+\left|\frac{\hat{q}-q}{\hat{q}}\right|\right) \tag{4}$$

$$\text{RMSPE}=\sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\hat{v}-v}{\hat{v}}\right)^2+\left(\frac{\hat{q}-q}{\hat{q}}\right)^2\right]} \tag{5}$$

$$\text{GEH}=\sqrt{\frac{2(\hat{q}-q)^2}{\hat{q}+q}} \tag{6}$$

여기서, $\hat{v}$: 지침에서 도출된 평균통행속도 v : 시뮬레이션에서 도출된 평균통행속도
$\hat{q}$: 지침에서 도출된 통행량 q : 시뮬레이션에서 도출된 통행량

Equation 4는 Equation 3과 동일한 효과척도이지만, 측정항목을 평균통행속도와 통행량으로 바꾼 수식으로 적용되었다. 지침에서 도출된 평균통행속도 $\hat{v}$와 통행량 $\hat{q}$에 대하여, 시뮬레이션에서 도출된 평균통행속도 v와 통행량 q의 평균절대비율오차를 산정하였다. Equation 5는 평균통행속도와 통행량의 평균제곱근백분율오차를 나타낸 수식이다. MAPE와 RMSPE의 경우, 일반적으로 효과척도가 0.05 이하로 도출되면 모사수준이 합리적인 것으로 판단한다. Equation 6은 통행량에 대해 모사수준을 평가하는 수식이며, 일반적으로 수치가 5 이하의 값으로 도출되면 모사수준이 합리적인 것으로 판단한다.

4. 적용 시나리오 설정: 엇갈림구간의 KHCM 운영 및 설계기준 적합성 고찰

밀도산정식이 가장 적정한 지침과 그것을 모사한 VISSIM 모형 각각을 활용하여 엇갈림구간 운영상태 평가 시나리오분석을 진행하였다. 시나리오의 변수는 시간당 교통량과 엇갈림구간의 길이로 설정하였다. 교통량 수준은 25pcu/h/lane 단위로 증가하도록 설정하여 875pcu/h/lane부터 2,250pcu/h/lane까지의 56개 경우로 구성하였고, 엇갈림구간의 길이는 50m 단위로 증가하도록 설정하여 100m부터 1,000m까지 19개 경우로 구성하였다.

본 분석에서는 KHCM과 VISSIM 분석을 위하여 6개 유형 8개 지점별로 각각 2,128개씩 총 17,024개의 시나리오가 구축되었으며 운영상태 평가결과를 활용하여 엇갈림구간 설계기준을 고찰하였다. 엇갈림 교통량 비는 현장에서 관측된 값으로 적용하였으며 엇갈림구간 운영상태 평가방법에는 밀도 기반의 서비스수준 구분 방법을 활용하여 분석하였다.

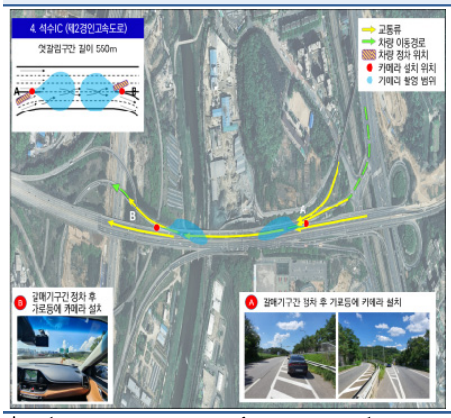
실측자료 수집

본 연구에서는 전국의 54개 엇갈림구간 중 각 유형을 대표하는 지점을 선정하고 현장조사를 통해 자료를 구축하였다. 엇갈림구간만의 특성을 분석하기 위해 외부요인을 최소화하고 원활한 현장조사를 위해 지점 선정조건을 아래와 같이 수립하였다. 이에 따라 현장조사 지점은 김포IC, 석수IC, 판교JC, 대감JC, 대동JC, 조남JC, 서운JC, 낙동JC 등 8개 지점으로 선정되었다.

1. 엇갈림구간의 길이가 750m 이하인 지점
2. 엇갈림구간의 도로구조가 복잡하지 않은 지점
3. 교통사고 데이터 기반 하에 교통사고 위험이 높은 지점
4. 교통통제시설의 영향을 받지 않는 지점(신호등 등)
5. 엇갈림구간 하류부 교통상황의 영향을 받지 않는 지점(지정체에 따른 대기행렬 등)
6. 카메라 설치에 문제가 없는 지점(카메라 설치위치가 적합하고, 추락사고위험이 없는 지점)
7. 지리적인 접근성이 떨어지거나 현장조사 필요성이 없다고 판단되는 지점은 제외

지점별 교통특성은 2020년 9월과 10월의 현장조사 자료를 통해 구득되었다. 선정된 8개 지점에 대하여 카메라를 설치하고 6시간의 촬영을 통해 엇갈림구간의 진행방향별 차종별 통행량을 1분단위로 관측하였다. 차종은 승용차, 트럭, 버스 3종으로 구분하여 관측한 후 교통량을 승용차단위로 환산하였다. 지점별 녹화영상 6시간 중 본선 하류부 대기행렬의 영향으로 인해 엇갈림구간의 특성을 분석하기 어려운 시간대와 시인성이 떨어져 차량 추적이 어려운 저녁 시간대는 제외하였다. 엇갈림유형 A-2인 석수IC의 경우, 엇갈림구간의 길이는 물리적 고어부를 기준으로 550m이며, 차선표시가 되어 실제 차량이 주행하는 구간은 400m이다. 현장조사에서는 카메라 2대가 각각 구간상류부와 구간하류부에 설치되었다. 분석시간대 14-16시의 통행량은 7,084대이며, 엇갈림 교통량 비는 0.23으로 관측되었다. Table 4는 현장조사를 통해 구축한 엇갈림구간 분석데이터를 나타낸 것이다.

Table 4. Data descriptiion

Test site (Seoksu IC)	Weaving type	Junction	Time (h)	Total volume			Volume ratio*
				Vehicle	KHCM (pcu)	USHCM (pcu)	
	A-1	Nakdong JC	16-22 (6h)	8,075	12,262	10,634	0.34
	A-2	Seoksu IC	14-16 (2h)	7,084	12,036	11,844	0.23
	B	Daegam JC	14-18 (4h)	11,687	17,257	15,003	0.14
	B	Daedong JC	14-18 (4h)	12,069	17,843	15,417	0.21
	B	Pangyo JC	16-19 (3h)	21,587	25,716	24,326	0.24
	C	Gimpo IC	14-17 (3h)	5,549	7,391	6,672	0.98
	D-1	Jonam JC	14-20 (6h)	7,766	10,348	9,638	0.98
	D-2	Seoun JC	12-18 (6h)	24,421	32,606	29,424	0.33

*Volume ratio: ratio of weaving volume to total traffic volume.

엇갈림구간 운영 및 설계기준 적합성 분석 결과

1. KHCM과 USHCM 밀도산정식의 비교 분석 결과

Table 5와 Figure 3은 KHCM과 USHCM 밀도산정식의 적정성 분석과정을 각각 표와 그래프로 나타낸 것이다. 분석시간대는 정시를 기준으로 구분하였고, 관측교통량이 가장 많아 교통운영상태 분석에 중요한 정보를 제공하는 혼잡시간대를 추가적으로 선별하였다. 분석결과, 일부 시간대에서는 KHCM의 오차가 크게 산정되었으나, 혼잡시간대를 포함한 대부분의 시간대에서는 KHCM의 오차가 작은 경향을 보였다. 최종 오차는 KHCM이 0.192, USHCM은 0.239로 도출되었으므로, 국내 환경에는 KHCM 밀도산정식이 적합한 것으로 확인되었다.

Table 5. Accuracy comparison of KHCM and USHCM

Weaving type	Junction	Time	Density based on KHCM			Density based on USHCM		
			Observed	Estimated	MAPE	Observed	Estimated	MAPE
A-1	Nakdong JC	16:00-17:00	5.30	6.10	0.15	4.04	5.65	0.40
		17:00-18:00	5.83	6.47	0.11	4.60	5.90	0.28
		18:00-19:00	6.03	7.11	0.18	4.78	6.46	0.35
		19:00-20:00	4.51	5.18	0.15	3.67	4.72	0.29
		20:00-21:00	3.52	4.17	0.19	2.73	3.79	0.39
		21:00-22:00	3.45	4.10	0.19	2.73	3.67	0.34
		17:32-18:32 (Max.Vol)	6.93	7.40	0.07	5.41	6.71	0.24

Table 5. Accuracy comparison of KHCM and USHCM (continued)

Weaving type	Junction	Time	Density based on KHCM			Density based on USHCM		
			Observed	Estimated	MAPE	Observed	Estimated	MAPE
A-2	Seoksu IC	14:00-15:00	15.60	14.00	0.10	18.10	17.30	0.04
		15:00-16:00 (Max.Vol)	27.10	23.20	0.14	26.00	22.40	0.14
B	Daegam JC	14:00-15:00	21.66	11.09	0.49	13.55	10.07	0.26
		15:00-16:00	21.56	11.26	0.48	13.24	10.50	0.21
		16:00-17:00	21.75	11.88	0.45	13.24	11.50	0.13
		17:00-18:00	19.73	12.44	0.37	13.11	12.43	0.05
		16:50-17:50 (Max.Vol)	17.55	12.99	0.26	16.09	12.12	0.25
B	Daedong JC	14:00-15:00	9.41	13.18	0.40	10.81	12.37	0.14
		15:00-16:00	7.91	11.02	0.39	8.82	10.44	0.18
		16:00-17:00	8.33	11.49	0.38	9.44	10.94	0.16
		17:00-18:00	9.17	13.27	0.45	10.87	12.80	0.18
		17:01-18:01 (Max.Vol)	18.62	19.46	0.05	16.09	11.25	0.30
B	Pangyo JC	16:00-17:00	12.20	13.10	0.07	19.40	15.10	0.22
		17:00-18:00	12.10	12.90	0.07	21.80	15.00	0.31
		18:00-19:00	11.60	12.30	0.06	27.70	14.40	0.48
		17:20-18:20 (Max.Vol)	12.00	12.70	0.06	23.40	14.80	0.37
C	Gimpo IC	14:00-15:00	22.64	23.08	0.02	19.76	16.22	0.18
		15:00-16:00	21.59	24.87	0.15	18.95	17.27	0.09
		16:00-17:00	23.75	25.68	0.08	21.19	17.77	0.16
		15:52-16:52 (Max.Vol)	25.25	26.75	0.06	22.37	18.02	0.19
D-1	Jonam JC	14:00-15:00	6.88	6.31	0.08	5.78	4.16	0.28
		15:00-16:00	15.97	14.40	0.10	13.36	8.51	0.36
		16:00-17:00	8.88	8.58	0.03	7.83	5.59	0.29
		17:00-18:00	12.42	12.33	0.01	11.12	8.33	0.25
		18:00-19:00	9.71	8.37	0.14	8.57	6.15	0.28
		19:00-20:00	5.19	5.17	0.00	4.66	3.48	0.25
		17:10-18:10 (Max.Vol)	14.34	12.32	0.14	12.43	8.57	0.31
D-2	Seoun JC	12:00-13:00	23.34	30.40	0.30	21.00	16.34	0.22
		13:00-14:00	26.45	32.73	0.24	22.49	17.27	0.23
		14:00-15:00	25.07	32.83	0.31	22.31	17.27	0.23
		15:00-16:00	23.36	32.70	0.40	21.75	17.15	0.21
		16:00-17:00	24.12	30.40	0.26	20.94	17.03	0.19
		17:00-18:00	19.87	24.10	0.21	18.39	14.98	0.19
		15:28-16:28 (Max.Vol)	28.29	32.09	0.13	23.30	17.15	0.26
	MAPE			0.192			0.239	

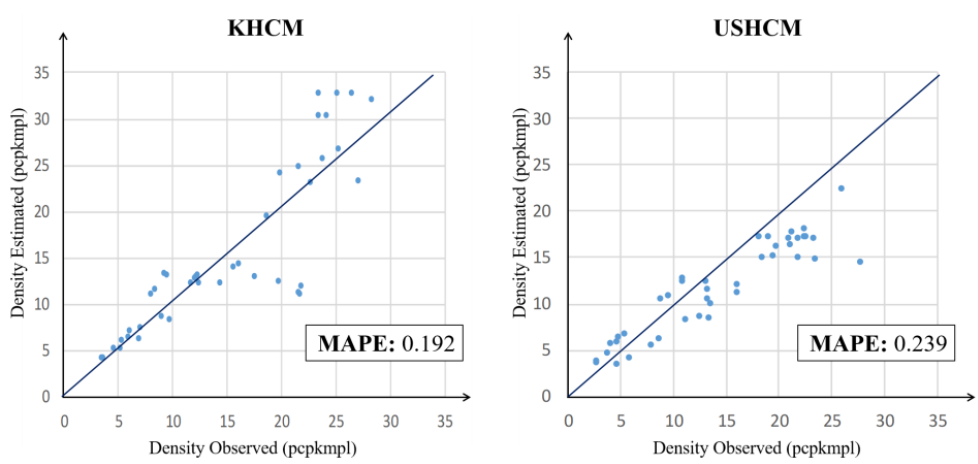


Figure 3. Accuracy comparison of KHCM and USHCM

2. VISSIM 입력변수 추정 결과

Table 6은 KHCM의 분석과정에서 도출된 승용차환산교통량과 평균통행속도를 미시교통시뮬레이션 프로그램 VISSIM으로 모사한 Driving Behavior Parameters를 엇갈림구간 지점별로 나타낸 것이다. 각 지점의 VISSIM 입력변수 추정결과, 모사수준은 매우 우수하게 도출되었으며 KHCM의 산정밀도도 모두 모사되었음을 확인하였다. 이는 엇갈림구간 지점별 차량 통행특성을 VISSIM으로 구현하였음을 의미한다. 예를 들어 유형 A-1과 C의 경우, 차량추종이론 입력변수(CC0, CC1, CC2)의 값의 합은 각각 5.3443과 5.4155로 비슷하지만, CC2의 값은 유형 A-1이 3.3391로 유형 C의 1.9693보다 크게 선정되었다. 이는 차량이 안전 확보를 위해 유지하게 되는 거리는 비슷하지만, 유형 A-1은 본선 직진 교통류를 포함하여 구간의 모든 교통류가 엇갈림 교통류의 영향을 받게 되어 교통진동(traffic oscillation)이 더 크게 발생하게 되는 현상을 합리적으로 설명하고 있다.

Table 6. Result of selected driving behavior parameters for VISSIM

Weaving type	Junctions	Calibrated driving behavior parameters					Performance measure		
		CC0	CC1	CC2	Max. Decel.	Safety factor	MAPE	RMSPE	GEH
A-1	Nakdong JC	1.2402	0.7632	3.3391	-1.4310	0.1908	0.0002	0.0149	0.7652
A-2	Seoksu IC	1.5536	0.3649	4.9281	-2.9708	0.1482	0.0047	0.0064	0.0002
B	Daegam JC	2.6182	1.5709	5.3203	-2.6182	0.6807	0.0011	0.0089	0.5867
B	Daedong JC	1.4812	0.7378	4.1530	-3.2688	0.6640	0.0018	0.0130	1.0162
B	Pangyo JC	0.3581	0.1143	3.5806	-5.9677	0.3800	0.0185	0.0187	0.2481
C	Gimpo IC	2.4616	0.9846	1.9693	-2.9539	0.0295	0.0001	0.0187	0.9513
D-1	Jonam JC	2.1393	0.5094	6.6216	-4.0749	0.6112	0.0007	0.0027	0.1271
D-2	Seoun JC	1.0023	0.0100	3.0069	-4.0092	0.5012	0.0137	0.0147	0.3892

3. VISSIM 분석결과: LOS별 교통량 수준 및 엇갈림구간 길이 분석 결과

Figure 4는 KHCM과 VISSIM을 활용한 엇갈림구간 유형별 시나리오 분석결과를 나타낸 것이다. 엇갈림구간 유형 A-2의 석수 IC의 분석결과, KHCM 평가방법에는 이론적 수식이 적용되므로 엇갈림구간의 운영상태는 시나리오 요인(교통량 및 엇갈림구간의 길이)에 비례하는 것으로 분석되었다. 이는 서비스수준 경계선(boundary 1, 2, 3, 4)의 간격(interval 1, 2, 3)이 서비스수준과 무관하게 동일하며, 각 경계선의 기울기(slope)가 거의 균등하게 유지되는 것을 통해 확인할 수 있다. 시나리오 요인에 의한 서비스수준 변화의 민감성은 낮게 표출되는 것으로 분석되었다. 이러한 시나리오 요인과 운영상태 분석결과 간의 선형비례관계를 보여주는 KHCM의 분석방법은, 엇갈림구간 내 차로 변경에 따른 차량 간 안전거리 확보를 위한 급가감속 등의 통행행태를 충분히 반영하지 못하는 것으로 해석할 수 있다. 반면 VISSIM 분석결과에서는, KHCM에 비하여 동일한 시나리오에서 서비스수준이 악화된 것을 확인하였고 서비스수준 경계선이 다소 불규칙적인 비선형성을 나타내는 것으로 분석되었다. 이는 차량의 임의적 통행행태를 반영한 합리적인 결과로 판단된다.

KHCM과 VISSIM의 상이한 분석결과는 엇갈림구간 길이의 적정성에 대하여 다르게 해석될 수 있다. 실제 엇갈림구간의 길이가 400m인 석수IC에 대하여, 서비스수준 E를 유지할 수 있는 교통량 범위는 KHCM과 VISSIM에서 각각 6,900-7,900(pcu/h), 7,400-7,800(pcu/h)로 분석되었다. 서비스수준 E는 용량상태의 불안정 교통류로 작은 혼란이 발생하여도 와해 상태가 발생하는 교통류 상태이며, 교통량 범위가 KHCM에 비해 상대적으로 작은 VISSIM의 분석결과는 이를 타당하게 보여준다고 해석할 수 있다.

또한 교통수요가 7,000pcu/h인 경우, 서비스수준 E를 유지하는 엇갈림구간 길이의 범위는 KHCM과 VISSIM에서 각각 100-450m, 200-250m로 분석되었다. KHCM은 엇갈림구간의 길이가 100m보다 짧아도 서비스수준이 E로 유지되는 것으로 분석하고 있는 반면, VISSIM의 경우 서비스수준을 유지할 수 있는 최소 길이를 200m로 제시하고 있다. 엇갈림구간의 길이가 짧으면 엇갈림 교통류가 보조차로를 이용하는데 원활하지 않게 되며, 이는 결국 비엇갈림 교통류에 영향을 미치게 되어 엇갈림구간 전체 소통상황의 악화를 초래한다. 따라서 VISSIM이 KHCM보다

차량의 실제 통행행태를 반영한 분석결과를 도출한 것으로 판단할 수 있다. VISSIM을 활용한 엇갈림구간 운영상태 분석결과는 차량의 미시적 통행행태가 누적되어 도출된 거시적인 결과물이라는 의미를 시사하고 있다.

VISSIM 분석결과는 엇갈림구간 길이의 설계기준을 재고할 수 있는 근거를 보여주고 있다. 서비스수준 E와 F의 경계인 Boundary 4의 기울기의 크기가 감소하는 시점을 기준으로 하여, 엇갈림구간 길이의 적정 설계범위는 250-550 m로 고려할 수 있다.

Figure 4에서 엇갈림구간의 길이가 250m 이하인 경우, 서비스수준이 악화됨에 따라 경계선의 기울기(slope)가 급격히 증가하고 경계선 간 간격(interval 1, 2, 3)이 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 각 경계선의 기울기의 크기가 감소하는 시점(엇갈림구간의 길이)도 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 교통량이 증가함에 따라 서비스수준이 매우 민감하게 변화하는 것을 의미한다. 엇갈림구간의 길이가 짧은 경우에서는 빠른 시간 내에 차로를 변경해야 하는 본선 진출입 차량이 구간 내 교통류를 방해하게 되고, 안전거리확보를 위한 차량들의 감속 및 급정거 행태로 인해 교통량이 증가함에 따라 교통소통수준이 급격히 악화되는 것으로 분석되었다. 엇갈림구간의 길이가 250m보다 짧은 경우에는 교통 운영과 안전 측면에서 매우 불안정한 교통류를 보여주고 있다.

엇갈림구간의 길이가 550m 이상인 경우, 서비스수준은 교통량 수준 및 엇갈림구간의 길이와 무관하게 거의 일정하게 유지되는 것으로 분석되었다. KHCM에서는 엇갈림구간 길이를 최대 750m까지 고려하고 있으나, VISSIM 분석결과에서는 엇갈림구간의 길이가 550m 정도면 충분한 것으로 나타났다. 나머지 유형에 대한 KHCM과 VISSIM의 분석결과도 모두 비슷한 경향을 보인 것을 확인하였다.

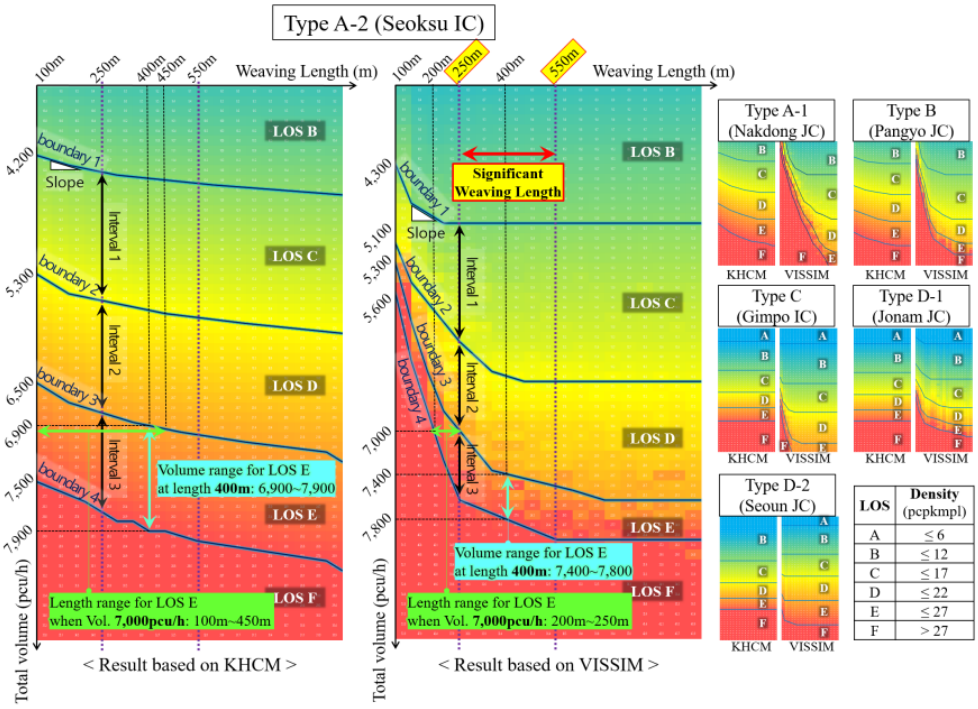


Figure 4. Analysis results for weaving length using KHCM and VISSIM

KHCM의 엇갈림구간 운영 및 설계기준의 적합성 고찰

Table 7은 서비스수준 내에서 엇갈림구간이 수용할 수 있는 최대교통수요를 승용차단위로 분석한 것이다. 유형 A-1(낙동JC)의 경우, 엇갈림구간의 길이가 150m이고 엇갈림교통량비 0.34를 유지하는 4차로도로의 엇갈림구간인 낙동JC에서 서비스수준 D를 유지하려면, KHCM 기준으로 최대교통수요가 6,400대/시이며 VISSIM 기준으로

는 최대 4,100대/시인 것으로 분석되었다. 서비스수준 E를 유지하려면 KHCM과 VISSIM 기준으로 최대교통수요가 각각 7,400대/시와 4,600대/시인 것으로 분석되었다. 서비스수준 E를 유지할 수 있는 교통수요 범위의 폭은 KHCM은 1,000대/시(7,400-6,400)이고 VISSIM은 500대/시(4,600-4,100)인 것을 확인하였다. 낙동JC에서 관측된 최대교통량은 2,617대/시로 수용범위 내에 있는 것으로 파악되었다. 유형 B의 대감JC에서 관측된 최대교통량은 4,398대/시이며, 이에 대해 KHCM은 서비스수준 D까지 도달하기에 여유가 많은 것으로 제시한 반면 VISSIM은 서비스수준 E로 제시하였다. VISSIM의 서비스수준 E에 대한 수용범위가 상대적으로 작은 것을 고려했을 때 대감JC의 서비스수준은 F로 쉽게 도달할 것으로 보인다. KHCM과 VISSIM은 같은 상황에 대해 일부 다른 결과를 보이고 있으며, KHCM에 의한 엇갈림구간 설계 적합성을 재검토할 필요성이 있다.

Table 7. Estimation of maximum volume for KHCM and VISSIM: operation criteria (pcu/h)

Weaving type	Junction	Vol. ratio	Lanes	Weaving length	Observed Max. volume	Max. volume for LOS D		Max. volume for LOS E	
						KHCM	VISSIM	KHCM	VISSIM
A-1	Nakdong JC	0.34	4	150m	2,617	6,400	4,100	7,400	4,600
A-2	Seoksu IC	0.23	4	400m	7,076	6,900	7,400	7,900	7,800
B	Daegam JC	0.14	4	400m	4,398	6,000	4,200	7,000	4,500
B	Daedong JC	0.21	4	400m	6,237	6,900	6,400	7,900	6,700
B	Pangyo JC	0.24	8	250m	8,580	13,400	12,600	15,600	13,400
C	Gimpo IC	0.98	2	100m	2,570	2,300	2,100	2,600	2,350
D-1	Jonam JC	0.98	3	100m	2,223	3,450	2,850	3,900	3,000
D-2	Seoun JC	0.33	4	350m	5,567	4,700	4,800	5,200	5,800

Table 8은 엇갈림구간이 교통수요를 서비스수준 내에서 수용할 수 있는 최소길이를 분석한 것이다. 교통수요가 표에서 제시하는 바와 같이 변화한다면, 대동JC(유형 B)의 엇갈림구간의 길이(400m)는 KHCM 기준으로 적절하게 설계되었으나 VISSIM 기준으로는 600m까지 증가시켜야 엇갈림구간의 운영이 원활하다. 이처럼 현재 적용되고 있는 KHCM의 분석결과에 더불어 VISSIM에서 제시하는 엇갈림구간의 길이를 추가적으로 고려한다면 엇갈림구간 설계기준의 마련에 도움이 될 것으로 판단된다.

Table 8. Estimation of minimum weaving length for KHCM and VISSIM: design criteria

Weaving type	Junctions	Weaving length	Min. weaving length for LOS D			Min. weaving length for LOS E		
			Demand (pcu/h)	KHCM	VISSIM	Demand (pcu/h)	KHCM	VISSIM
A-1	Nakdong JC	150m	6,500	250m	350m	7,500	250m	550m
A-2	Seoksu IC	400m	6,800	350m	250m	7,800	350m	400m
B	Daegam JC	400m	6,100	350m	150m	7,000	350m	250m
B	Daedong JC	400m	6,800	350m	600m	7,700	250m	600m
B	Pangyo JC	250m	13,600	350m	300m	15,800	350m	400m
C	Gimpo IC	100m	2,300	100m	100m	2,600	100m	100m
D-1	Jonam JC	100m	3,450	100m	200m	3,900	100m	250m
D-2	Seoun JC	350m	4,700	350m	350m	5,200	350m	350m

결론 및 제언

고속도로 엇갈림구간 분석을 위해서 현재까지 국내에서는 KHCM이 주로 활용되어 왔으나 과연 KHCM에 제시하는 분석값이 적정한 것인지에 대해서는 확인된 바 없다. 본 연구에서는 고속도로 엇갈림구간의 길이가 서비스수준에 미치는 영향을 분석하는데 KHCM의 기준이 과연 적절한 것인지를 현장관측자료와 미시교통시뮬레이션 프로그램을 활용하여 분석하였다.

본 연구에서 제시한 고속도로 엇갈림구간의 대표유형 6개에 대하여 다양한 교통량과 엇갈림구간 길이를 적용한

시나리오별 운영상태를 분석한 결과, KHCM은 서비스수준을 대표하는 밀도와 엇갈림구간의 길이 관계가 하나의 식을 바탕으로 평가되므로 서비스수준 간 경계선은 거의 선형으로 형성되고 차량의 통행행태를 충분히 반영하지 못하는 것으로 해석된다. 반면 VISSIM의 경우, 엇갈림구간의 길이에 짧아짐에 따라 엇갈림 교통류의 차로변경행태는 본선 직진교통류의 소통에 크게 영향을 미쳐 서비스수준 경계선은 비선형으로 나타났으며, 이는 차량의 실질적 통행행태를 반영한 합리적인 결과로 판단된다. 또한 VISSIM 분석의 경우 차간 안전거리를 유지하기 위한 감속 및 급정거 행태가 반영되어 불안정한 교통류가 형성되는 것을 확인하였고, 이를 활용할 경우 엇갈림구간에 대한 설계시 특정 서비스수준을 유지하기 위한 엇갈림구간 길이의 하한값을 구할 수 있음을 알 수 있었다. 한편, 엇갈림구간의 길이가 일정한 값을 초과하면 서비스 수준은 계속 유지되는 것을 확인함으로써 엇갈림구간 설계기준의 상한선을 파악할 수 있었다. 엇갈림구간의 기하구조적 특성에 따른 유형별로 설계기준의 범위는 다양하게 분포함을 확인하였다.

본 연구는 엇갈림구간의 설계에서 가장 중요한 엇갈림구간 길이가 실제 서비스수준에 어떤 영향을 미치는 지를 KHCM과 시뮬레이션 결과값을 통하여 비교 분석하였다. 보다 정확한 값은 관측자료를 통한 분석결과일 것이나, 현실적으로 다양한 유형의 엇갈림구간에 대하여 엇갈림구간 길이와 교통량 실측자료를 충분히 수집하는 것이 어렵다. 따라서 실측자료를 대체하는 방법으로 시뮬레이션을 통한 분석방법을 사용하는 것을 고려하였다. 다만, 시뮬레이션 분석의 신뢰성을 높이기 위해서는 현장관측자료를 통한 정밀한 보정과, 그 결과를 이론적으로 뒷받침할 수 있는 연구가 수반될 필요가 있다. 고속도로 엇갈림구간의 운영 효율성은 주변 도로와의 연계성, 지역적 특성, 그리고 운전자의 도로 이용특성에 크게 영향을 받는다. 또한 부지공간이 부족하여 엇갈림구간의 설계가 어려운 상황에 노면표시 및 표지봉 등의 교통안전시설 구축방안 등의 실질적인 요소들도 고려하면 더 나은 설계기준이 마련될 수 있을 것이다. 본 연구를 기초로 엇갈림구간 설계기준 마련에 대한 연구가 지속적으로 수행되기를 기대한다.

알림

본 논문은 대한교통학회 제84회 학술발표회에서 발표된 내용을 수정 · 보완하여 작성된 것입니다.

ORCID

KIM, Taewan http://orcid.org/0000-0002-8306-3159
LEE, Seungjun http://orcid.org/0000-0001-9461-5011
KIM, Ducknyung http://orcid.org/0000-0002-3052-3422
REEM, Chansu http://orcid.org/0000-0002-8799-9384
KIM, Youngjun http://orcid.org/0000-0002-7392-850X
LEE, Euntak http://orcid.org/0000-0002-2575-0196
SON, Bongsoo http://orcid.org/0000-0002-1719-2884

References

Beinun A., Farah H., Wegman F., Hoogendoorn S. (2018), Driving Behaviour at Motroway Ramps an Weaving Segments Based on Empirical Trajectory Data, Transportation Research Part C, 92, 426-441.

Cassidy M. J., Bertini R. L. (2019), Some Traffic Features at Freeway Bottlenecks, Transportation Research Part B, 33, 25-42.

Chen D., Ahn S. (2018), Capacity-drop at Extended Bottlenecks: Merge, Diverge, and Weave, 108, 1-20.

Durrani U., Lee C., Maoh H. (2016), Calibrating the Wiedemann's Vehicle-following Model Using Mixed Vehicle-pair

Interactions, Transportation Research part C: Emerging Technologies, 67, 227-242.

Highways England (2006), Design Manual for Roads and Bridges.

Japan Society of Traffic Engineers (1987), Highway Capacity and Quality of Service (道路の交通容量).

Kim J., Kim J. H., Lee G., Shin H. J., Park J. H. (2020), Microscopic Traffic Simulation Calibration Level for Reliable Estimation of Vehicle Emissions, Journal of Advanced Transportation, 2020.

Kusuma A., Liu R., Choudhury C. (2020), Modelling Lane-changing Mechanisms on Motorway Weaving Sections, Transportmetrica B, 8, 1-21.

Leclercq L., Knoop V. L., Marczak F., Hoogendoorn S. P. (2016), Capacity Drops at Merges: New Analytical Investigations, 62, 171-181.

Lemke K. (2016), The New German Highway Capacity Manual (HBS 2015), Transportation Research Procedia, 15, 26-35.

Lu Z., Fu T., Fu L., Shiravi S., Jiang C. (2016), A Video-based Approach to Calibrating Car-following Parameters in VISSIM for Urban Traffic, International Journal of Transportation Science and Technology, 5(1), 1-9.

Maheshwary P., Bhattacharyya K., Maitra B., Boltze M. (2018), A Methodology for Calibration of Traffic Micro-simulator for Urban Heterogeneous Traffic Operations, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7(4), 507-519.

Mahmood B., Kianfar J. (2019), Driver Behavior Models for Heavy Vehicles and Passenger Cars at a Work Zone, Sustainability, 11(21), 6007.

Manjunatha P., Vortisch P., Mathew T. V. (2013), Methodology for the Calibration of VISSIM in Mixed Traffic, In Transportation research board 92nd annual meeting, 11, Transportation Research Board Washington, DC, United States.

Marczak F., Daamen W., Buisson C. (2014), Empirical Analysis of Lane Changing Behavior at a Freeway Weaving Section, Transport Research Arena, Paris.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013a), Rules About the Road Structure & Facilities Standards (도로의 구조시설 기준에 관한 규칙).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Korea Construction Specifications and Design Standards (도로설계기준 및 도로공사표준시방서).

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2013b), Korea Highway Capacity Manual 2013.

Sarvi M., Kuwahara M. (2007), Microsimulation of Freeway Ramp Merging Processes Under Congested Traffic Conditions, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 8, 470-479.

Schakel W., Knoop V. L., Arem B. (2012), Integrated Lane Change Model with Relaxation and Synchoronization, Transportation Research Record, 2316, 47-57.

Tettamanti T., Csikós A., Varga I., Eleőd A. (2015), Iterative Calibration of VISSIM Simulator Based on Genetic Algorithm, Acta Technica Jaurinensis, 8(2), 145-152.

Transportation Research Board (2016), HCM 2016: Highway Capacity Manual (6th ed.), Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Yang Y., Dong H., Qin Y., Zhang Q. (2016), Parameter Calibration Method of Microscopic Traffic Flow Simulation Models Based on Orthogonal Genetic Algorithm, In The 22nd International Conference on Distributed Multimedia Systems, Salerno, 25-26.