

## 다기준 의사결정기반 고속도로 공사구간 VSL전략에 관한 연구

박준영<sup>1</sup> · 오철<sup>2\*</sup> · 장명순<sup>2</sup>

<sup>1</sup>센트럴플로리다대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한양대학교 교통·물류공학과

### A Study on Variable Speed Limit Strategies in Freeway Work Zone Using Multi-Criteria Decision Making Process

PARK, Juneyoung<sup>1</sup> · OH, Cheol<sup>2\*</sup> · CHANG, Myungsoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, University of Central Florida, Orlando, FL, 32828, U.S.A

<sup>2</sup>Department of Traffic and Logistics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

#### Abstract

The purpose of this study is to propose a methodology for operating variable speed limit (VSL) strategies in freeway work zones. A notable feature in this study is to incorporate a multi-criteria decision making process into deriving better VSL strategies. Decision criteria in this study include operational efficiency, safety, and environmental impacts. Travel speed, acceleration noise, and CO<sub>2</sub> were used as performance measures for evaluating VSL strategies. A multi-criteria value function was developed through an analytical hierarchical process (AHP) for representing expert's knowledge. Then, a variety of VSL operations scenarios were investigated utilizing a microscopic traffic simulation suite, VISSIM. The proposed methodology would be useful in supporting more efficient, safer, and more environment-friendly traffic operations and control in freeway work zones.

본 연구에서는 고속도로 공사구간에 이동이 가능한 PVMS(Portable Variable Message Sign)를 일정 간격으로 설치하여 VSL을 구현하는 교통류 제어전략을 구성하여 공사구간에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고자 하였다. 다기준 의사결정 기법 중 하나인 AHP기법 및 다기준 가치함수를 이용하여 교통소통, 교통안전, 환경을 대표하는 척도들을 동시에 고려할 수 있는 평가 방법론을 정립하였으며, VSL전략의 도입 전·후 개선효과를 도출하고 실시간으로 수집되는 교통량 및 중차량 혼입율을 고려한 최적 VSL전략 대안선정을 연구의 목표로 하였다. 개발된 평가 방법론을 통해 시뮬레이션 결과를 분석하였으며, 결과의 통계적 유의성 검정을 위해 분산분석을 수행하였다. 분석결과, VSL 대안 2(PVMS 400m간격)가 6개의 Case에서, VSL 대안 1(PVMS 200m간격)이 5개의 Case에서, VSL 대안 4(PVMS 800m간격)는 1개의 Case에서 최적 대안으로 도출되었다. VSL 대안 3(PVMS 600m간격)는 모든 Case에서 최적 대안으로 선택되지 않았으며 4개 Case에서 가장 안 좋은 대안으로 나타났다. 이는 VSL전략이 항상 개선된 효과를 보이지 않는 것을 의미하며 교통상황별로 적정 대안의 도입이 필요하다는 것을 나타낸다. 본 연구에서 시도된 AHP기법을 이용하여 여러 효과척도를 복합적으로 고려한 교통류관리전략 평가방법은 향후 다목적 의사결정방법의 교통류 관리전략에 적용 시 하나의 예시가 될 수 있을 것으로 기대되며, 연구에서 제안하는 PVMS를 이용한 공사구간 VSL 전략은 교통정보센터에서 실시간으로 수집되는 데이터를 통해 교통류 관리를 위한 운영 및 제어방안에 활용될 것으로 기대된다.

#### Key Words

Analytic Hierarchy Process, Multi-criteria Decision Making, Variable Speed Limit, VT-MICRO Model, Work Zone AHP, 다기준 의사결정, VSL(가변속도제한), VT-MICRO Model, 공사구간

\* : Corresponding Author  
cheolo@hanyang.ac.kr, Phone: +82-31-400-5158, Fax: +82-31-436-8147

Received 5 December 2011, Accepted 4 October 2013

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

최근 고속도로 이용자들의 눈높이가 높아지고 안전에 대한 관심과 요구수준이 증가하면서 고속도로 유지관리의 중요성이 대두되고 있다. 도로선형개량, 안전시설 교체, 도로의 확·포장 공사 등의 도로유지보수작업이 증가하고 고속도로 곳곳에 공사구간이 생기게 되며, 한 달 이상의 장기공사 구간도 빈번히 발생하고 있다. 운전자들의 안전성과 편리성을 증진시키기 위해 다양한 정보제공방안에 대한 연구가 진행 중이다. 공사구간에서는 차로 폐쇄로 인해 도로구간의 교통용량이 감소되고 차량의 빈번한 차로변경 및 급격한 가·감속, 통행속도 감소 등으로 인해 교통 혼잡이 발생한다. 이로 인해 고속도로의 서비스 수준 및 안정성을 감소시키며, 최근 중요성이 부각되고 있는 차량들의 배기가스 배출량도 증가하게 된다. 해외에서는 공사구간의 이러한 문제점을 해결하기 위해 제한속도표지만을 이용한 정적인 제어방법과 더불어 VSL (Variable Speed Limits)과 같은 동적인 제어방법을 이용한 공사구간 첨단 교통류제어전략의 적용방안에 대해 많은 연구를 진행해왔다. 그러나 국내에서는 VSL 및 첨단 교통류제어전략에 대한 중요성이 최근 들어 부각되고 있으며 관련 연구가 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 고속도로 공사구간에 이동이 가능한 PVMS(Portable Variable Message Sign)를 일정 간격으로 설치하여 VSL을 구현하는 교통류제어전략을 구성하여 공사구간에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고자 하였다. 최적 VSL전략의 도출을 위해 교통소통, 교통안전, 환경 측면을 고려한 시뮬레이션 평가방법론을 정립하였으며, VSL전략의 도입 전·후 개선효과를 도출하고 실시간으로 수집되는 교통량 및 중차량 혼입율을 고려한 최적 VSL전략 대안선정을 연구의 목표로 하였다.

### 2. 연구 내용 및 수행절차

본 연구에서는 고속도로 공사구간에서 VSL전략 도입을 위한 적정 PVMS설치간격 평가를 위하여 최근 국내외에서 많이 사용되고 있는 미시적 시뮬레이터중의 하나인 VISSIM을 이용하였다. 다기준 의사결정 기법 중 하나인 AHP (Analytic Hierarchy Process)기법 및 다기준 가치함수를 이용하여 교통소통, 교통안전, 환경을 대표하는 척도(평균통

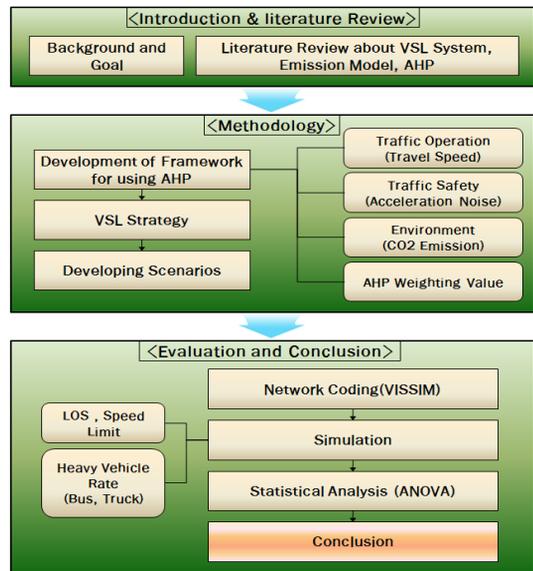


Figure 1. Research flowchart

행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub> 배출량)들을 동시에 고려할 수 있는 평가 방법론을 개발하였으며, VISSIM을 이용하여 교통상황별 PVMS 간격에 따른 개별차량 주행패적을 추출하여 개발한 평가 방법론을 통해 대안별 평가 점수를 도출하였다. 통계분석을 통해 대안별 도출된 점수의 통계적 유의성을 검증하였으며 최종적으로 고속도로 공사구간에 VSL전략의 도입을 위한 적정 PVMS설치간격을 제시하였다.

본 연구의 수행절차를 Figure 1에 제시하였다. 첫 번째로 서론 및 문헌고찰에서는 연구의 배경 및 목적을 명확히 하고, 연구와 관련된 문헌고찰을 수행하였다. 두 번째로 고속도로 공사구간 관리규정, AHP기반 다기준 가치함수 적용방법에 대해 명확히 이해하여 연구의 평가 방법론 개발에 대해 설명하였으며, 세 번째로 VSL전략을 수립하고 연구의 범위를 설정하여 시뮬레이션 수행을 위한 시나리오를 수립하였다. 네 번째로 시뮬레이션을 이용하여 실제 도로에 적용평가를 수행하였으며, 연구에서 제안한 평가 방법론 및 VSL전략을 이용하여 분석 및 평가를 시행하였다. 마지막으로 연구의 결론 및 향후 연구과제를 제시하였다.

## II. 관련 문헌고찰

### 1. VSL전략 평가 및 분석에 관한 연구

최근 VSL전략을 적용하여 교통소통 및 안전 측면에

서 분석한 연구로 Radwan et al.(2011)은 VSL과 Dynamic Lane Merging 시스템이 각각 혹은 조합된 경우에 교통량 및 트럭 혼잡율을 달리하여 이를 공사구간에 적용시켜 전과 후를 비교·평가하였으며, VISSIM을 이용하여 대상구간을 구현하였다. 분석 결과, 교통량이 1500vph이상인 경우에 통과율이 최대 200vph까지 증가하는 것으로 나타났으며, 교통수요에 따른 통계적 차이 또한 없는 것으로 나타났다. Geistefeldt(2011)은 독일의 도로구간을 대상으로 VSL 시스템이 도로용량에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보았으며, 분석결과 LOS E 미만의 모든 교통수준에서 용량 분포함수의 분산이 감소한 것으로 나타났다. 또한, LOS E 이상의 교통량에서는 오히려 높은 수치가 나타났다. Park et al.(2009)은 도로의 합류 구간에 주도로에는 VSL제어전략을, 부도로에는 램프미터링 (Ramp Metering)을 동시에 적용하여 분석을 진행하였다. 분석결과 VSL제어전략을 적용한 경우 제어 전보다 교통류의 통행속도가 증가하였고 평균통행시간, 밀도, 지체는 감소함이 나타났다. Abdel-Aty et al.(2008)은 동적속도 영향권을 설정하여 VSL 제어전략의 간격을 결정하였으며, SSM(Surrogate Safety Measure)지표 중 speed variance를 활용하여 도로상황과 VSL 제어전략 적용 시나리오를 비교·분석하여 교통소통 및 교통안전 측면에서 최적 시나리오를 도출하였다. Allaby et al.(2007)은 미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램인 PARAMICS를 이용하여 VSL전략에 대한 분석 및 효과를 도시부 고속도로를 대상으로 평가한 결과, 첨두시에는 통행시간은 증가하고 안전성이 높아지는 것으로 나타났으나 비첨두시에는 안전성이 감소하는 것으로 나타났다. Abdel-Aty et al.(2006)은 혼잡기준을 60mph로 구분하여 고속상황과 저속상황일 경우에 따라 VSL전략이 교통안전에 미치는 영향정도를 분석하였다. 분석 지표로는 사고다발지점 상·하류부에서 수집되는 각 지점별 루프검지기에서 교통량, 속도, 점유율 등을 추출하여 이를 활용해 충돌잠재모형식을 도출하였다. 모형식은 혼잡기준에 따라 각기 다른 모형식이 도출되었으며 속도표출범위, 속도표출시간, 설치거리 등을 고려하여 최적의 시나리오를 교통소통 및 교통안전 측면에서 분석하였다. Lin et al.(2004)은 공사구간에서 VSL을 적용할 경우 효과를 도출할 수 있는 방법론을 정립하고 미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램인 CORSIM을 이용하여 공사구간 통과율, 지체도, 평균통행속도, 속도변화 등을 효과적으로 이용하여 VSL의 적용효과를 분석하였다.

## 2. Emission Model에 관한 연구

차량의 배기가스 배출에 관한 연구 및 기준으로 MLTM (2009)에서는 차종별, 속도별 대기오염물질 배출기준을 제시하였다. Rakha et al.(2003)은 엔진 안정화 상태에서 경차의 배기가스를 대상으로 MOBILE5A, MOBILE6, VT-MICRO, 그리고 CMEM 모델을 비교·분석하였다. 분석 결과, VT-MICRO model은 CMEM과 MOBILE5A 보다 좋은 예측력을 갖는 것으로 나타났다. Rakha et al.(2003)은 실제 OEM (On-road Emission Measurement) 자료를 이용하여 속도, 가·감속도를 변수로 갖는 emission model을 개발했다. Ahn(1998)은 속도와 가속도를 독립변수로 갖는 emission model (CO, HC and NOx)을 개발하였고, 모델을 검증하기 위해 미시적 교통류 시뮬레이션 INTEGRATION을 사용하였다.

## 3. AHP기반 다기준 가치함수 적용에 관한 연구

Kim et al.(2009)은 연속류 도로상에서 교통사고 발생가능성이 높은 교통상황 시 제공할 수 있는 경고정보 메시지를 제작하고 다목적 의사결정방법을 통하여 최적 경고정보 메시지를 선택하는 방법에 대해 제시하였다. AHP기법을 이용하여 전문가 의사를 반영한 각 항목의 가중치를 산출하고 평가항목을 결합하여 다기준 가치함수를 완성하였으며, 이를 이용하여 메시지의 가치를 평가하고 우선순위를 도출하였다. KDI(2000)은 예비타당성 조사 수행을 위한 다기준분석 방안을 설명하기 위해 다양한 다목적 의사결정방법론에 대해 분석과정 및 이론 등을 정리하여 제시하였다. 해외 참고문헌의 내용을 종합하여 정리하였으며 분석사례를 제시하였다. Saaty et al.(1979)은 AHP기법을 이용한 가중치 적용방법에 대해 이론적인 설명과 사례 연구를 통한 분석예시를 정리하여 제시하였다.

### III. 이론적 고찰 및 평가 방법론 개발

본 절에서는 VT-MICRO model 및 AHP기반 다기준 가치함수에 대한 이론적 고찰과 본 연구에서 사용된 평가 방법론에 대해 설명한다.

## 1. VT-MICRO Model

본 연구에서는 분석결과의 평가를 위해 각 대안 별 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub> 배출량의 추출이 필요하다.

미시적 시뮬레이터의 결과 값과 산술적인 계산과정으로는 배기가스 배출량의 추출에 한계가 있으므로 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 추출된 개별차량 주행제적 자료를 이용하여 배기가스 배출량을 도출할 수 있는 기존 Model을 이용하여 분석을 진행하였다. 배기가스 배출량을 계산하는 Model에는 평균주행속도를 기반으로 추출하는 Environmental Protection Agency(EPA)의 MOBILE model과 California Air Resources Board(CARB)의 EMFAC model이 있다. 차량운행상태를 고려한 주행속도 기반 배기가스 배출 모형으로는 Georgia Institute of Technology의 MEASURE (Mobile Emissions Assessment System for Urban and Regional Evaluation) model이 있으며, 마지막으로 개별차량의 속도와 감·가속도를 이용하여 배기가스 배출량을 추출하는 Virginia Polytechnic Institute and State University의 VT-MICRO model이 있다.

VT-MICRO model이 기존의 다른 model 보다 배기가스 배출량 예측력이 우수하다는 기존 연구결과(Rakha, 2003) 및 개별차량의 속도 및 감·가속도 자료를 모두 사용할 수 있다는 장점을 고려하여 본 연구에서는 배기가스 배출량 평가를 위한 model로 VT-MICRO model을 선정하여 분석에 사용하였다. VT-MICRO model은 개별차량의 속도 및 감·가속도 자료를 각 배기가스 별로 모형에서 주어진 함수식에 대입하여 배출량을

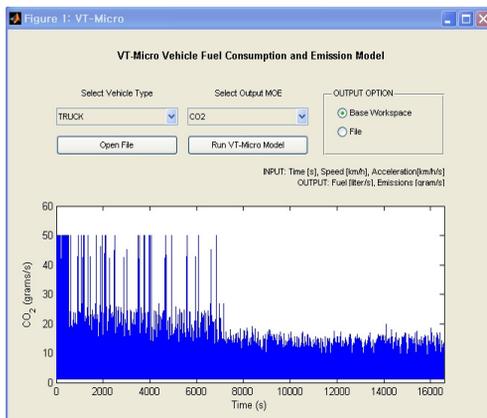


Figure 2. VT-MICRO model

추출할 수 있다. 본 연구에서는 Virginia Polytechnic Institute and State University의 연구진으로부터 VT-MICRO model을 제공받아 연구를 수행하였다. VT-MICRO model의 구성화면 및 출력화면을 Figure 2에 제시하였다.

## 2. 다기준 의사결정기법 및 평가방법론 개발

최적 대안을 선정하는 의사결정 과정에서 한 가지 기준이 아닌 여러 기준이 동시에 고려해야 하는 경우를 '다 기준 의사결정'이라 한다. 즉, 상충하는 여러 목적을 고려해야 하는 의사결정으로서 상충하는 목적을 어떻게 절충하여 최적 대안을 선정할 것인가에 대한 의사결정방법을 의미한다.

본 연구에서는 분석결과의 평가를 위해 교통소통, 교통안전, 환경을 대표하는 척도인 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub> 배출량을 효과적으로 제시하였으며, 각각의 기준들을 동시에 고려할 수 있는 평가 방법론의 개발을 위해 다 기준 의사결정기법(Multi-criteria Decision Making: MCDM)을 사용하였다.

다기준 의사결정방법은 문제의 정의, 가치함수 선정, 가중치 산출, 가치함수 및 가중치를 이용한 평가점수 도출 및 대안선택 과정으로 진행될 수 있으며, 본 연구에서는 가치함수를 이용한 다기준 의사결정 방법을 적용하였다. 먼저 평가 방법론에 사용될 대표 효과척도를 설문조사를 참고하여 선정한다. 선정된 3가지 효과척도를 종합하는 평가 방법론의 개발과정은 먼저 다기준 가치함수를 이용하여 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub>배출량을 가치점수로 환산하는 절차를 정립한다. 다음으로 AHP기법을 이용하여 세 변수간의 가중치를 결정하며, 마지막으로 가치점수에 가중치를 곱하여 대안별 최종 점수를 도출하게 된다.

### 1) 대표 효과척도 결정

분석결과의 평가를 위한 평가 방법론에 사용될 교통소통, 교통안전, 환경을 대표하는 효과척도를 결정하기 위해 총 20명의 교통전문가 집단(박사 10명, 기술사 10명)을 대상으로 설문조사를 Table 1과 같이 수행하였다. 항목별 MOE는 교통전문가 집단에게 사전 설문조사를 통해 운영부분 4개, 안전부분 3개, 환경부분 2개를 결정하였다. 설문조사는 각 항목별로 선호순위를 결정하는 방식으로 수행하였으며, 여러 척도 중 1순위로 가장

**Table 1. Result of experts' survey about MOE**

Measure of Effect				
Traffic Operation	Travel Speed	Travel Time	Delay	Density
rate	13/20	6/20	0/20	1/20
Traffic Safety	Speed Variation	Time to Collision	Acceleration Noise	
rate	13/20	0/20	7/20	
Environment	Fuel Consumption		Emission	
rate	6/20		14/20	

높은 선호를 보인 척도는 교통소통 부분의 평균통행속도, 교통안전 부분의 speed variation, 환경 부분의 배기가스 배출량 등으로 조사되었다. 그러나 차로변경이 많이 발생하고 차량의 가·감속 패턴이 차량통행패턴에 크게 작용하는 공사구간의 특성 및 내리막길이라는 도로의 특성을 고려하고, AHP기법의 적용 측면에서 각 변수들 간에는 독립성이 있어야 한다는 점(Kang(2009))을 참고하여 교통소통을 대표하는 지표인 평균통행속도에서 이미 속도와 직접적으로 관련된 하나의 변수가 고려되었기 때문에 교통안전 부분에서는 2순위로 선호된 가속소음(acceleration noise)을 본 연구에선 교통안전을 대표하는 척도로 사용하였다. 환경 부분에서 가장 높은 선호가 나타난 배기가스 배출량에서는 여러 종류의 배기가스 중 최근 가장 중요성과 심각성이 대두되고 있는 CO<sub>2</sub> 배출량을 대표 척도로 사용하였다.

**2) 다기준 가치함수를 이용한 가치점수 환산**

가치함수는 의사결정자의 선호구조를 표현하는 함수이다. 즉, 대안간의 선호도 차이가 존재하면 선호를 나타내는 가치함수가 존재하고, 또한 가치함수의 값의 크기 순서에 따라 대안 간의 선호순서가 존재하게 된다.

본 연구에서는 각 효과척도(평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub>배출량)의 가치를 산출하기 위하여 Kirkwood(1997)가 제시한 근사적으로 사용할 수 있는 지수가치함수를 사용하였다.

**3) AHP기법을 이용한 가중치(Weighting Value) 산정**

AHP(계층화분석법)는 의사결정의 목표 또는 평가기준이 다수이며 복합적인 경우 상호 배반적인 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정지원기법이다.

본 연구에서는 단일속성 가치함수의 가중치를 산출하기 위하여 AHP에서 사용되는 쌍대비교를 통한 설문조사

**Table 2. Result of weighting value calculation**

	Travel Speed	Acceleration Noise	CO <sub>2</sub> Emission	Geometric Mean	Weighting Value
Travel Speed	1	2.87	4.75	2.14	0.51
Acceleration Noise	1.55	1	3.80	1.54	0.38
CO <sub>2</sub> Emission	0.42	0.36	1	0.45	0.11

를 방법을 이용하였다(Saaty, 1979). 3가지 효과척도의 가중치 결정을 위해 쌍대비교(pairwise comparison) 방법을 이용하였으며, 비교를 위해 Miller(1956)가 제시한 9점 의미척도(semantic scale)를 기준으로 설문 조사를 수행하였다. 또한, 기하평균법을 이용하여 가중치 수치를 도출하였다. 설문조사는 선호도 조사와 마찬가지로 교통분야 전문가 20명을 대상으로 수행하였다.

설문조사의 일관성의 정도는 다음과 같이 일관성지수(Consistency index : CI)와 일관성 비율(Consistency Ratio : CR)을 통하여 식(1)을 이용한 산술적인 계산에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{일관성지수}(CI) &= (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \\
 \text{일관성비율}(CR) &= (CI / RI) \times 100\%
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

일관성 지수를 통해 산출된 일관성 비율이 10% 이내에 들 경우, 응답자의 설문조사 수치, 즉 해당 쌍대비교행렬은 일관성이 있다고 할 수 있다. 일관성 비율의 계산을 위한 RI(난수지수: Random Index)는 n=3일때 0.58로 사용할 수 있다(Saaty, 1995). 본 연구에서는 10%미만의 CR값이 산출된 전문가의 의견만을 반영하여 가중치를 산출하였으며, 계산된 항목의 수치는 Table 2와 같이 각 효과척도의 행렬을 구성하며, 행 별로 기하평균하여 그 비율에 따라 가중치를 산출하였다.

각 효과척도 별 가중치 산출 결과는 평균통행속도가 0.51로 가장 높은 가중치(중요성)를 가지는 것으로 나타났으며, 가속소음이 0.38의 가중치를 가지는 것으로 산출되었다. CO<sub>2</sub> 배출량의 가중치는 0.11로 평균통행속도와 가속소음에 비해 상대적으로 낮은 중요성을 가지는 것으로 나타났다.

**4) AHP기반 다기준 가치함수를 고려한 평가 방법론 개발**

앞선 두 절에서 도출한 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub> 배출량의 다기준 가치함수 계산 값과 가중치 기준을 이

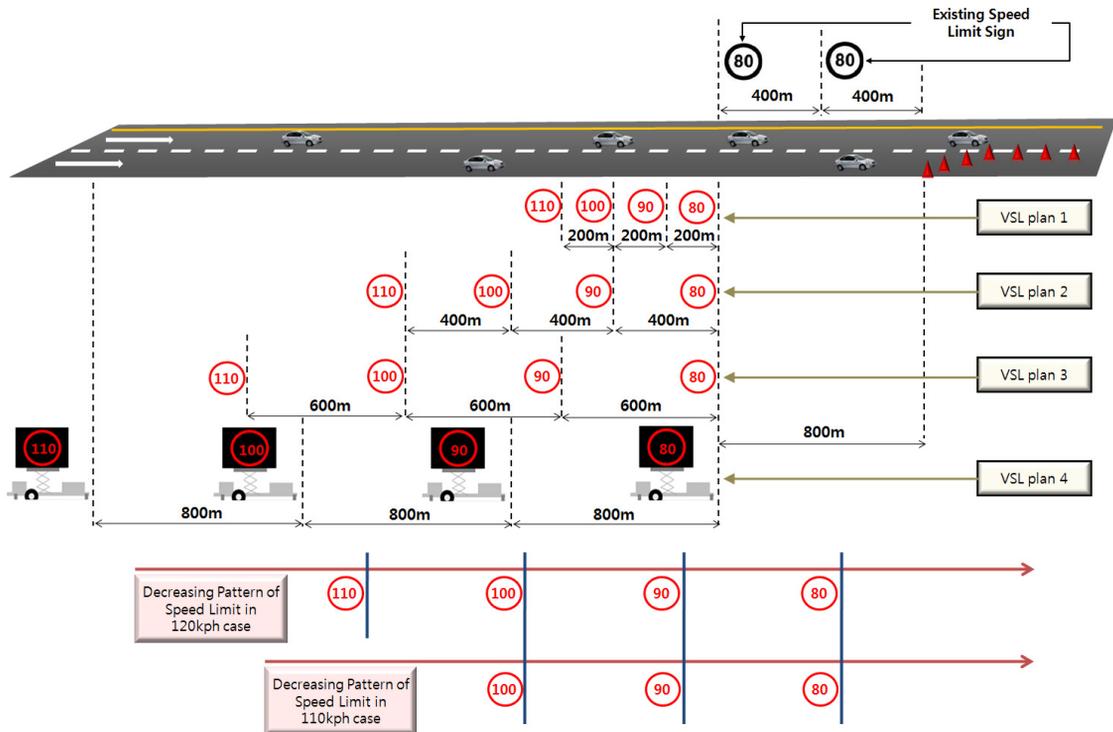


Figure 3. VSL strategy

용하여, VSL전략의 평가에 사용할 최종 평가에 이용된 덧셈 가치함수식을 식(2)와 같이 도출하였다. 여기서  $V(x, y, z)$ 는 어느 한 시나리오의 최종 평가가치(평가점수)를 의미하며  $x$ 는 해당 시나리오의 평균통행속도,  $y$ 는 가속소음,  $z$ 는  $CO_2$ 배출량을 의미한다.

$$V(x, y, z) = 0.51 \left( \frac{1 - e^{-0.0117(x-36.72)}}{1 - e^{-0.0117(85.23-36.72)}} \right) + 0.38 \left( \frac{1 - e^{-0.5373(y-2.05)}}{1 - e^{-0.5373(0.99-2.05)}} \right) + 0.11 \left( \frac{1 - e^{0.1174(z-7.64)}}{1 - e^{0.1174(3.51-7.64)}} \right) \quad (2)$$

#### IV. 공사구간 VSL전략

##### 1. VSL전략

본 연구에서는 공사구간 주의구간에 기존 제한속도에서 10kph씩 감속하는 속도제한 정보를 표출할 수 있는 PVMS를 적정 간격으로 설치하여 공사구간에 진입하는 차량들의 흐름을 원활하게 하는 VSL전략을 구성하였다.

본 연구의 분석 대상구간인 중부내륙고속도로는 4차

로도로이므로 KEC(2009)에서 제시하고 있는 고속도로 공사구간 유형 중 '4차로도로 제2차로 차단' 유형을 고려하여 VSL전략을 수립하였다. '4차로도로 제2차로 차단' 유형의 80kph 속도제한표지 설치기준은 변화구간 시점부를 기준으로 800m 전방이다. 이를 참고하여 본 연구에서는 속도제한표지 설치위치를 기준으로 10kph씩 감속하는 속도제한 정보가 표출되는 PVMS설치간격을 200m씩 증가시켜나가는 시나리오를 수립하였다. 또한 2차로 이상의 차로를 차단하는 공사구간 유형에서 80kph를 60kph까지 감속시키는 표지 간격이 400m로 제시된 점을 참고로 하여 10kph 속도차이로 감속하는 최소 간격을 200m로 설정하였다. 기존 80kph 속도제한표지 설치 위치인 공사구간 도입부 전방 800m를 기준으로 공사구간 전방으로 각각 200m, 400m, 600m, 800m 간격으로 고속도로 제한속도에서 10kph씩 속도를 감소시키는 VSL전략을 Figure 3과 같이 구성하였다. 또한, 연구대상 구간의 기존 제한속도인 110kph를 고려하였으며, 최근 이슈화되고 있는 고속도로 제한속도 상향과 관련된 연구를 감안하여 제한속도 120kph인 경우도 함께 고려하였다.

## 2. 시나리오 구성 및 대상구간 선정

### 1) 시나리오 구성

본 연구는 실제 고속도로에서 VSL전략을 구현하기에 따르는 어려움과 문제점을 해결하기 위해 미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램인 VISSIM을 이용하여 분석을 진행하였다. 공사구간 VSL전략의 분석을 위해서 다양한 교통조건이 고려된 60개의 시나리오를 Table 3과 같이 구성하였다.

2개 제한속도 기준을 고려하였으며, 공사구간에 유입되는 교통량은 Korea Highway Capacity Manual(2001)에서 제시한 고속도로 기본구간 서비스수준 기준 중 LOS B, LOS C, LOS D를 고려하였다. LOS A의 경우는 자유속도로 주행하는 free-flow 상태이며 다른 교통류의 영향을 거의 받지 않기 때문에 VSL전략에 영향을 크게 미치지 않을 것으로 판단되므로 분석에서 제외하였다. 본 연구에서는 2차로에서 1차로로 줄어드는 도로상황에서 LOS D에서부터 차량들이 혼잡상태를 나타내었고, Geistefeldt(2011) 및 Abdel-Aty et al.(2006)는 혼잡상황의 경우 가변속도 제어 전략의 효과가 미비한 것으로 분석하였다. 이를 참고하여 본 연구에서는 이러한 혼잡이 더 커질 경우 정상적인 VSL에 의한 차량의 감속이 아닌 혼잡상황에 의한 차량의 감속이나 막힘이 나타날 것으로 판단되어 용량상태인 LOS E와 LOS F의 경우도 분석에서 제외하였다. 교통량은 중차량의 혼입율에 따라 중차량 보정계수를 변화하여 서비스 수준에서의 교통량을 반영하였으며, 중차량 보정계수는 종단경사가 있는 대상구간의 특성 상 구릉지(종단구배 2-5%)로 설정하여 환산계수를

적용하였다. 화물차의 혼입율은 15%, 30%의 2가지 경우를 설정하였으며 버스 혼입율은 5%로 설정하였다. 마지막으로 VSL전략이 적용되는 경우와 적용되지 않은 경우를 비교하기 위해 기존 고속도로 교통상황도 고려하여 시나리오를 구성하였다.

### 2) 대상구간 선정

본 연구에서는 실제로 운영되고 있는 고속도로 중에서 중차량의 혼입율이 높으며, 속도변동이 심하고 사고가 많이 발생한 구간을 선택하여 연구의 대상구간으로 선정하였다. 이를 고려한 공간적 범위는 중부내륙고속도로의 낙동분기점(이정:140+000)에서부터 선산분기점(이정:123+300)까지의 16.7km의 구간을 선정하였으며, 대상구간은 화물차의 혼입율이 20-25% 이상으로 분포되고 있는 구간이다.

KEC(중부내륙선의 2개 노선 안전진단, 2009)에 의하면 분석대상구간의 2006-2008년도 교통사고 이력자료를 활용하여 분석한 결과, 오르막 종단경사 지점인 Sta 136+000에서부터 터널이 시작되는 134+000까지의 구간은 중부내륙고속도로의 다른 구간에 비해 사고가 비교적 많이 발생하며, 사고발생 시 사고심각도가 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 대상구간은 오르막차로가 끝나면서 좌로 굽은 도로에 이어 곧바로 터널로 진입하게 되기 때문에 운전자의 부주의 및 과실로 인한 사고가 많이 발생하고 있다. 따라서 교통류관리전략의 필요성이 있는 지역이라는 판단 하에 해당구간을 본 연구의 분석 대상구간으로 선정하였다.

**Table 3. Simulation scenarios**

Speed Limit	110kph						120kph					
Heavy Vehicle Rate	15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%
LOS	LOS B		LOS C		LOS D		LOS B		LOS C		LOS D	
Case	Case 1 (1-5)	Case 2 (6-10)	Case 3 (11-15)	Case 4 (16-20)	Case 5 (21-25)	Case 6 (26-30)	Case 7 (31-35)	Case 8 (36-40)	Case 9 (41-45)	Case 10 (46-50)	Case 11 (51-55)	Case 12 (56-60)
VSLplan 1 (200m gap)	scenario 1	scenario 6	scenario 11	scenario 16	scenario 21	scenario 26	scenario 31	scenario 36	scenario 41	scenario 46	scenario 51	scenario 56
VSLplan 2 (400m gap)	scenario 2	scenario 7	scenario 12	scenario 17	scenario 22	scenario 27	scenario 32	scenario 37	scenario 42	scenario 47	scenario 52	scenario 57
VSLplan 3 (600m gap)	scenario 3	scenario 8	scenario 13	scenario 18	scenario 23	scenario 28	scenario 33	scenario 38	scenario 43	scenario 48	scenario 53	scenario 58
VSLplan 4 (800m gap)	scenario 4	scenario 9	scenario 14	scenario 19	scenario 24	scenario 29	scenario 34	scenario 39	scenario 44	scenario 49	scenario 54	scenario 59
No VSL	scenario 5	scenario 10	scenario 15	scenario 20	scenario 25	scenario 30	scenario 35	scenario 40	scenario 45	scenario 50	scenario 55	scenario 60

### 3. 시뮬레이션 구현을 위한 정산 및 검증

미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램을 이용한 분석은 실제 도로를 시뮬레이션 상에 가상의 도로로 코딩하여 교통전략 및 정책에 대해 분석 및 평가를 수행하는 것이기 때문에 실제 교통상황과 흡사한 패턴을 유지해야 한다. 따라서 미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 교통 정책이나 관리전략에 대해 분석할 경우 반드시 정산(calibration) 및 검증(verification) 과정을 수행하여야 하며, 본 연구에서는 Figure 4에 제시된 분석 절차에 의해 시뮬레이션의 정산 및 검증을 수행하였다.

시뮬레이션의 정산 과정을 수행하기 위해 먼저 운전자 행태를 설정하여야 한다. 정산을 위한 대상구간은 연구의 분석구간인 '낙동분기점-선산분기점' 전체 구간을 고려하였으며, 차량 종류, 차량별 혼입율, 차종별 파워, 차종별 속도 분포 등의 시뮬레이션 상에서 고려할 수 있는 차량 종류별 반영 요소들을 분류하여 반영하였다. 마지막으로 운전자 행태인 차로변경 행태와 차량추종 행태를 고속도로 특성을 고려하여 반영하였다.

검증 과정은 정산 과정이 완료된 시뮬레이션 상의 네트워크가 실제 교통패턴과 어느 정도 동일한지 분석하는 과정이며, 검증 과정을 위한 분석기준으로는 U-value를 사용하여 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 본 연구진이 수행한 '중부내륙선의 2개

노선 안전진단, 2009'에서 해당노선에 대해 정산 및 검증 과정을 수행한 결과를 바탕으로 연구를 진행하였다.

#### 1) 정산(Calibration)

VISSIM에서는 차량의 종류별 특징(속도분포, 파워, 재원) 및 운전자 행태(차량추종, 차로변경) 등을 조절할 수 있다.

##### (1) 차량의 종류별 특징

본 연구에서 평가를 수행하는 중부내륙고속도로의 제한 속도는 110km/h이며, 1.5t 이상의 화물차는 90km/h이다. 하지만 실제 운전자들의 주행패턴 및 속도분포는 각기 다르기 때문에 본 연구에서는 Table 4와 같이 차량 종류별로 속도 분포 및 차량의 파워를 설정하였다.

차량들의 길이를 국내 실정에 맞게 적용하기 위해 승용차의 차종은 5가지로 분류하여 4.1-4.8m로 설정하였다. 또한 화물차의 경우 소형, 중형, 대형으로 분류하여 각각 5.1-5.6m, 8.5-11m, 11-16.7m로 설정하였다. 마지막으로 버스는 default값인 12.1m로 설정하였다.

Table 4. Vehicle speed distribution and power

Vehicle Type	Speed Distribution	Power
Passenger Car	90-155km/h	200-300kw
Truck	80-110km/h	400-800kw
Bus	95-120km/h	250-400kw

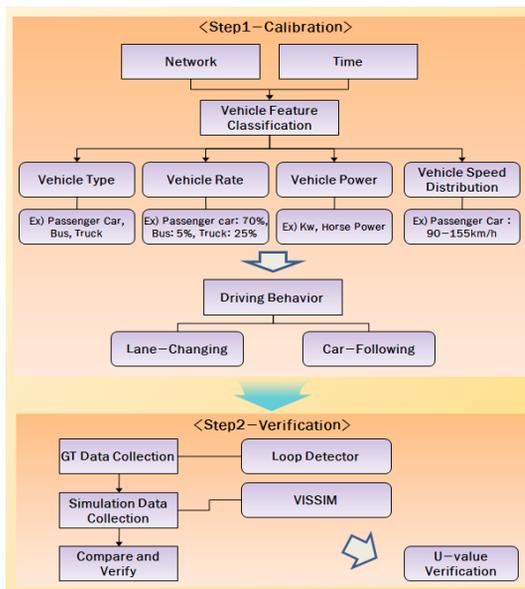


Figure 4. Process of calibration and verification

##### (2) 차량추종 운전자 행태

VISSIM에서 고속도로에 적용하는 car following model은 Wiedemann 99 법칙을 적용하며, 관련 변수에는 CC0부터 CC9까지의 변수와 그 밖에 look ahead distance, look back distance 및 temporary lack of attention 등이 있다. Wiedemann 99 법칙은 VISSIM 프로그램에 기본적으로 탑재된 고속도로 차량 추종 모형으로서, 4가지 차량추종 기본 states(free, approaching, following, and braking)를 바탕으로 차량 간 속도차 및 거리차의 임계값을 기반으로 개발된 모형이다. 본 연구에서는 VISSIM에서 제시한 Wiedemann 99 법칙의 default값을 설정하였다.

##### (3) 차로변경 운전자 행태

차로변경(lane changing) 운전자 행태에는 필수적(necessary) 차로변경과 선택적(free) 차로변경 변수

로 구분하여 설정이 가능하다. 본 연구에서는 선택적 차로 변경 중 하나인 혼동대기시간의 경우를 제외한 나머지 변수들은 default값으로 적용하였다. 혼동대기시간의 경우 default값인 60초인 경우 운전자들의 판단력이 편도 2차로인 도로환경에서 지나치게 길어질 수 있고 이로 인해 차로변경에 의해 머뭇거리는 차량에 의한 추가적인 혼잡이 발생할 수 있기 때문에 30초로 감소시켜 적용하였다.

2) 검증(Verification)

본 연구에서는 차량 추종상황에서 속도 및 교통량에 대한 검증을 위해 U-value를 활용하였으며(Brockfel et al. (2006)), 식(3)을 통해 도출할 수 있다. 두 비교 데이터를 이용한 U-value가 0에 가까울수록 비교 데이터의 일치성이 높으며, 일반적으로 U-value가 0.1이하의 값으로 추출되면 실제 데이터와 일치한다고 판단하고 있다.

$$U = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i - \hat{V}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N V_i^2 + \sum_{i=1}^N \hat{V}_i^2}} \quad (3)$$

$V_i$  : *GT speed(kph)*  
 $\hat{V}_i$  : *VISSIM speed(kph)*

Table 5. Result of u-value calculating

Station	1	2	3	4	5	6	Avg.
U	0.016	0.021	0.038	0.028	0.021	0.030	
Station	7	8	9	10	11	12	0.025
U	0.030	0.025	0.025	0.021	0.032	0.013	

Loop Detector Data				VISSIM Data			
ST.	Station 1	Station 2	Station 3	ST.	Station 1	Station 2	Station 3
Time	Speed(kph)			Time	Speed(kph)		
18:00	103	102	106	18:00	99.19	99.84	99.65
	104	104	100		99.26	99.21	99.21
	102	101	104		99.94	100.06	100.00
	103	105	105		99.61	100.08	100.27
	104	93	118		99.54	99.29	100.04
	104	106	107		99.19	99.38	99.48
	102	103	108		100.19	99.94	100.18
	100	101	102		99.25	99.00	99.5
18:15	103	101	107	18:15	98.57	99.42	99.04
	108	107	100		99.81	100.09	99.81
	103	101	108		100.15	99.48	99.75
	100	103	105		99.27	99.66	99.41
	105	91	120		99.71	99.70	99.78
	101	104	106		100.14	100.03	99.47
	101	102	109		99.37	99.91	99.81

Figure 5. Example of verification analysis

본 연구에서는 검증과정을 위해 분석 대상구간의 12개 지점의 실제 루프검지기 데이터 중 2008년 3월과 4월 목요일의 15분 단위로 집계된 자료와 VISSIM에서 수집되는 자료를 Figure 5와 같이 비교분석하였다. 시뮬레이션상의 네트워크에도 실제 도로 상의 루프검지기 위치와 동일하게 지점을 설정하여 검지하였으며, 수집된 데이터를 15분 단위로 집계하였다.

U-value를 이용한 분석결과, Table 5와 같이 모든 검지 지점에서 0.05이하의 U-value값이 도출되어 신뢰 구간 95%에 유의한 것으로 나타났으며, 이는 시뮬레이션 상의 도로가 실제 도로를 잘 반영한 것으로 판단할 수 있다.

V. 시뮬레이션 분석 및 평가

1. 시뮬레이션

본 연구에서는 60개 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 수집하고 개별차량의 주행패적 데이터를 추출하여 교통소통, 교통안전, 환경을 대표하는 효과적도인 평균주행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub>배출량을 산술적 계산 및 VT-MICRO model을 통해 각각 산출하였다.

자료의 유의성 확보를 위해 시뮬레이션은 각 시나리오 별로 seed값(난수)을 달리하여 5회씩, 총 300회 진행하였다. 시뮬레이션의 분석시간은 1시간(3600초)으로 설정하였으며 시뮬레이션 상에 차량들이 고르게 분포되어 있는 경우를 분석하기 위해 warm-up period와 clearance period를 각각 20분씩 고려하여 분석을 진행하였다.

2. 결과 분석 및 평가

시나리오 별로 도출된 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub> 배출량에 가중치 점수를 적용하여 Table 6과 같이 최종 평가점수로 도출하였다.

평균통행속도 분석 결과, 12개 케이스 모두 기존 교통상황(VSL전략 미적용) 보다 VSL을 적용한 대안(1, 2, 3, 4)이 높은 통행속도를 보였다. 가속소음 분석 결과, 12개 Case 모두 기존 교통상황 보다 VSL을 적용한 대안이 낮아진 가속소음을 보여 안전측면으로 효율적인 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub> 배출량 분석 결과, 통행속도에 많은 영향을 받는 배기가스 배출량 측정 모형의 특성 상 기존 교통상황 보다 CO<sub>2</sub> 배출량이 적게 나타나는 VSL을

**Table 6. Result of calculating point**

Speed Limit Heavy Vehicle Rate	110kph						120kph					
	15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%	15%	30%
LOS	LOS B		LOS C		LOS D		LOS B		LOS C		LOS D	
Case	Case 1 (1-5)	Case 2 (6-10)	Case 3 (11-15)	Case 4 (16-20)	Case 5 (21-25)	Case 6 (26-30)	Case 7 (31-35)	Case 8 (36-40)	Case 9 (41-45)	Case 10 (46-50)	Case 11 (51-55)	Case 12 (56-60)
VSLplan 1 (200m gap)	Scenario 1: 0.780	<b>0.799</b>	<b>0.512</b>	<b>0.457</b>	0.297	0.301	0.797	0.758	<b>0.518</b>	<b>0.465</b>	0.311	Scenario 56: 0.320
VSLplan 2 (400m gap)	Scenario 2: 0.753	0.736	0.462	0.414	<b>0.298</b>	<b>0.310</b>	<b>0.837</b>	<b>0.768</b>	0.485	0.425	<b>0.314</b>	Scenario 57: <b>0.332</b>
VSLplan 3 (600m gap)	Scenario 3: 0.781	0.734	0.458	0.396	0.288	0.298	0.779	0.760	0.469	0.418	0.312	Scenario 58: 0.328
VSLplan 4 (800m gap)	Scenario 4: <b>0.796</b>	0.759	0.489	0.452	0.285	0.307	0.795	0.765	0.504	0.463	0.308	Scenario 59: 0.323
No VSL	Scenario 5: 0.772	0.716	0.489	0.453	0.284	0.262	0.744	0.743	0.476	0.441	0.295	Scenario 60: 0.306

적용한 대안이 전체 12개 Case 중 절반인 6개 case(3, 4, 5, 9, 10, 12)에서 나타났다.

최종 평가점수 분석 결과, 12개 case 모두 기존 교통 상황 보다 VSL을 적용한 대안이 높은 평가점수를 보였으며, 최대 약 0.1점 정도의 평가점수 상승효과가 나타났다. VSL 대안 2(PVMS 400m간격 설치)의 경우 12개 Case 중 절반인 6개 case(5, 6, 7, 8, 11, 12)에서 가장 효과적인 것으로 나타났으며, VSL 대안 1(PVMS 200m간격 설치)의 경우 5개의 case(2, 3, 4, 9, 10)에서 가장 효과적인 것으로 나타났다. VSL 대안 4(PVMS 800m간격 설치)는 case 1에서만 효과적인 것으로 나타났다. 반면, VSL 대안 3(PVMS 600m간격 설치)의 경우 4개 case(3, 4, 9, 10)에서 가장 비효율적인 것으로 나타났다. 이는 교통상황에 따라 적절하지 않은 VSL 대안이 도입 될 경우, VSL을 도입하기 전보다 오히려 운영, 안전, 환경 측면을 고려한 종합적인 효율성이 낮아 질 수 있다는 것을 보여주고 있으며, 따라서 교통조건 및 상황에 따라 적절한 VSL 대안의 도입이 필요하다라는 것을 나타낸다.

일반적으로 화물차의 혼입비율이 높을수록 VSL 전략의 효과가 좋게 나타나야 할 수 있지만, 본 연구에서 적용한 AHP기법이 효과적도마다 가중치를 달리하여 점수를 책정한 것이기 때문에 점수 책정과정에 있어 변수가 많을 수 있고, 3가지(소통, 안전, 환경) 측면에서의 점수가 종합되어지기 때문에 일반적 상식보다는 다른 결과가 나타날 수 있다. 또한, 반드시 화물차의 혼입비율이 높을 때에 VSL을 운영하는 것이 아닌 종합적인 관점에서의 운영방안을 도입해야 한다는 점을 보일 수 있다.

### 3. Case별 통계분석을 통한 유의성 검증

각 case별 최종 평가점수의 통계적 유의성 검정을 위해 통계분석 기법 중 하나인 분산분석(ANOVA: analysis of variance)을 이용하여 분석을 진행하였으며, 분석을 위해 통계분석 Program 중 하나인 SPSS 16.0을 이용하였다. 시나리오별로 반복된 시뮬레이션 결과의 통계적 유의성을 검증하고 시나리오간의 동질성을 확인하기 위해 사후 다중비교(Post Hoc Multiple Comparisons)를 수행하였다. 사후 다중비교를 위한 방법에는 Tukey법, Scheffe법, Bonferroni법 등이 있으며, 본 연구에서는 집단간의 차이를 정밀하게 감지할 수 있는 Tukey법을 이용하여 분산분석을 수행하였다. 유의 수준 0.05 (95%)와 f값 2.87을 기준(df1: 4, df2: 20)으로 각 case별로 통계적 유의성을 검증하였으며, 결과는 Table 7과 같다.

분산분석 결과, 2개 case를 제외한 모든 case에서 통계적 유의성이 나타났으나, case 5와 case 11에서는 통계적 유의성이 나타나지 않았다. 이는 같은 교통량에서도 화물차의 혼입율에 따라 VSL전략의 도입여부가 결정될 수 있다는 것을 나타내며, 또한 교통조건 및 상황에

**Table 7. Result of statistical analysis(ANOVA)**

Case	1	2	3	4	5	6
p-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.459	0.000
f-value	23.621	50.612	25.248	17.382	0.943	17.269
Case	7	8	9	10	11	12
p-value	0.000	0.005	0.000	0.000	0.147	0.002
f-value	34.749	5.283	17.450	15.741	1.915	6.370

**Table 8. Proposed VSL plan**

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
VSL plan 4 (800m gap)	VSL plan 1 (200m gap)	VSL plan 1 (200m gap)	VSL plan 1 (200m gap)	VSL plan 2 (400m gap)	VSL plan 2 (400m gap)
Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
VSL plan 2 (400m gap)	VSL plan 2 (400m gap)	VSL plan 1 (200m gap)	VSL plan 1 (200m gap)	VSL plan 2 (400m gap)	VSL plan 2 (400m gap)

따라 VSL 도입이 큰 효율성을 보일 수 없는 경우도 있다는 것을 의미한다.

**4. VSL전략 운영 시나리오**

본 연구는 고속도로 공사구간에 교통상황에 따른 12개의 Case별로 적정 VSL전략의 도출을 위해 시나리오를 설정하여 시뮬레이션 분석을 진행하였다. 분석결과, 각 Case별로 적정 VSL적용 대안이 도출되었으며, 종합적인 효율성 측면에서 기존 교통상황보다 높은 수치를 나타냈다. 본 연구에서 도출된 VSL전략 적용을 위한 case별 적정 PVMS 설치간격을 Table 8에 제시하였다.

**VI. 결론 및 향후 연구과제**

본 연구는 미시적 데이터를 기반으로 교통소통, 교통안전, 환경을 고려한 고속도로 공사구간에서의 PVMS를 이용한 VSL전략 적용방안에 대해 제시하였다. 미시적 교통류 시뮬레이션 프로그램인 VISSIM을 이용하여 분석대상구간의 네트워크를 구축하였으며, 2가지 제한속도(110, 120kph), 3가지 교통량(LOS B, C, D), 2가지 중차량 혼입율(15%, 30%)을 고려하여 60개의 시나리오를 구성하고 12개의 Case를 설정하여 분석을 진행하였다. 각 시나리오별 5회씩, 총 300회 시뮬레이션을 시행하여 개별차량 주행궤적 데이터를 추출하였으며, 산술적 계산 및 VT-MICRO model을 이용하여 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub>배출량을 도출하였다. 시뮬레이션 결과의 평가를 위해 AHP기반 다기준 가치함수를 이용한 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub>배출량을 하나의 점수로 통합하는 평가 방법론을 개발하였으며, 이를 이용하여 도출된 최종 평가점수를 계산하였다. 결과의 통계적 유의성 검증을 위해 분산분석을 이용하여 분석을 진행하였으며, 마지막으로 도출된 결과를 바탕으로 공사구간에서의 VSL전략 적용을 위한 적정 PVMS설치 대안을 제시하였다.

본 연구의 분석결과를 정리하면 다음과 같다. 첫 번째

로, 고속도로 공사구간의 기존 교통운영기준보다 VSL전략을 적용하는 방안이 교통소통 및 교통안전 측면에서 유리하다. 연구에서 설정한 12개 case에서 모두 기존 교통상황보다 VSL전략을 적용한 시나리오가 더 유리한 것으로 나타났다. 이는 110kph나 120kph로 차량이 주행하다가 800m 전방에서 갑자기 80kph로 속도를 감속하는 패턴보다 적정한 간격을 설정하여 일정기준으로 단계적인 속도감속을 하는 것이 교통소통 및 교통안전 측면에서 효과적임을 나타낸다. 그러나 환경 측면에서는 일부 기존 교통상황이 VSL전략보다 유리한 것으로 나타났으나, 이는 연구에서 사용한 VT-MICRO model이 개별차량의 주행속도가 높을수록 emission이 높게 도출되는 경향을 띄기 때문인 것으로 판단된다.

두 번째로, 본 연구에서는 고속도로 공사구간에서의 VSL전략 적용을 위한 적정 PVMS설치간격을 200m, 400m, 800m로 제안한다. VISSIM을 통하여 추출된 개별차량 주행궤적을 AHP기반 다기준 가치함수를 이용하여 평가점수로 환산해 도출된 적정 PVMS설치 간격은 200m, 400m, 800m이다. 그러나 LOS D, 화물차 혼입율 15%인 교통상황의 경우 case 5와 case 11에서 통계적 유의성을 보이지 않았으며, LOS D, 화물차 혼입율 30%인 case 6과 case 12에서도 동질성이 나타난 그룹이 최적 시나리오가 포함된 경우 4개씩 도출되었다. 이는 공사구간에서의 VSL전략이 교통량이 많은 경우에서보다 일정 기준(LOS C) 이상의 원활한 교통패턴인 경우 효과적인 것을 나타낸다.

본 연구의 한계 및 향후 수행되어야 할 과제는 다음과 같다. 첫째, 본 연구는 교통류시뮬레이션 프로그램을 이용하여 실제 도로교통조건에 공사구간 VSL전략을 도입하지 못하였다. 실제 고속도로 공사구간에 PVMS를 이용한 VSL전략을 도입하는 것에 한계가 있기 때문에 시뮬레이션을 통해 실제 도로교통상황과 비슷한 조건을 구축하여 연구를 진행했다.

둘째, 본 연구에서 교통소통, 교통안전, 환경 측면을 대표하는 척도로 사용된 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub> 배출량은 여러 효과적도 중 교통상황을 단면적으로 나타

내는 1개의 수치이므로 연구에 알맞은 여러 효과척도를 도출하여 고려할 수 있는 종합적인 분석 방법론에 대한 연구가 필요하다.

셋째, AHP기반 다기준 가치함수를 이용한 평가 방법론의 개발과정은 설문자 및 연구자의 판단이 연구에 큰 영향을 미치므로 세밀한 분석과정이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 일관성비율을 고려한 10명의 전문가 의견만으로 가중치를 설정하고 다기준 가치함수 적용을 위한 최상값, 최하값, 중간값 결정에 있어 통계적 근거를 바탕으로 분석을 진행하였다. 또한 AHP기법에서는 각 목적이 독립적이어야 하지만 본 연구에서 목적(MOE)으로 제시한 평균통행속도, 가속소음, CO<sub>2</sub> 배출량은 각각 어느 정도의 연관성이 존재하므로 향후 이를 고려한 연구가 필요하다.

넷째, 시뮬레이션을 이용한 연구의 신뢰성은 정산과 검증과정에 큰 영향을 받을 수 있으며, 본 연구에서는 자료의 한계 및 시나리오에 따른 실제자료 존재 유·무 등으로 인해 기존 제한속도에서의 실제 연속류 교통자료만을 이용하여 정산을 시행하였다. 향후 교통류 상태변화를 세밀하게 고려하기 위해선 안정류, 불안정류, 정체류 등의 다양한 교통패턴을 고려한 정산과정이 필요하다.

본 연구에서 시도된 AHP기법을 이용하여 여러 효과척도를 복합적으로 고려한 교통류관리전략 평가방법은 향후 다목적 의사결정방법의 교통류관리전략에 적용 시 하나의 예시가 될 수 있을 것으로 기대되며, 연구에서 제안하는 PVMS를 이용한 공사구간 VSL전략은 교통정보센터에서 실시간으로 수집되는 데이터를 통해 교통류 관리를 위한 운영 및 제어방안에 활용될 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP) (NRF-2010-0029449).

## REFERENCES

Abdel-Aty M., Cunningham R. J., Gayah V. V., Hsia L. (2008), Considering Dynamic Variable Speed Limit Strategies for Real-time Crash Risk Reduction on Freeways, Transportation Research Board 87th

Annual Meeting, 2078, 108-116.  
 Abdel-Aty M., Dilmore J., Dhindsa A. (2006), Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement, Accident Analysis and Prevention, 38(2), 335-345.  
 Ahn K.h. (1998), Microscopic fuel consumption and emission modeling, Transportation Research Board 77th Annual Meeting.  
 Allaby P., Hellinga B., Bullock M. (2007), Variable Speed Limits: Safety and operational Impacts of a Candidate Control Strategy for Freeway Applications, IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 8(4), 671-680.  
 Brockfeld E., Kuhne R. D., Wagner P. (2005), Calibration and Validation of Microscopic Models of Traffic Flow, Transportation Research Record, 1934, 179-187.  
 Geistefeldt J. (2011), Capacity effects of variable speed limits on German freeways, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 16, 48-56.  
 Kang M. G. (2009), Truth of Decision Making.  
 Kim T. J., Oh C., Oh J. T. (2010), Methodology for selecting Traffic Safety Warning Messages Using Analytical Hierarchical Process(AHP) - based Multi-Criteria Value Function, Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, 9(2), 1-11.  
 Kirkwood C. (1997), Strategic Decision Making: Multi objective Decision Analysis with Spreadsheets, Duxburg Press, Belmont, CA.  
 Korea Development Institute (2000), A Study on Applying Multi-Criteria Analysis to Pre-feasibility Studies.  
 Korea Expressway Corporation (2009), Guideline of Expressway Work Zone Operation.  
 Korea Expressway Corporation (2009), Road Safety Audit for Chungbu-Naeryuk Expressway.  
 Lee C., Hellinga B., Saccomanno F. (2006), Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety, Transportation Research Part C, 14(3), 213-228.  
 Lin P. W., Kang K. P., Chang G. L. (2004), Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls

on Highway Work-Zone Operations, Journal of Intelligent Transportation Systems, 8(3), 155-168.

McCoy P. T., Pesti G. (2001), Dynamic Late Merge Control Concept for Work Zones on Rural Interstate Highways, Transportation Research Board 80th Annual Meeting, 1745, 20-26.

Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (2001), Korea Highway Capacity Manual.

Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (2009), Guideline of Traffic Facilities Investment Estimation.

Park J. E., Kim G. O., Shin H. C. (2009), A Study on Effect of Ramp Metering on Freeway Using VSL, Annual Meeting of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems.

Park J. N. (2007), The Method of Estimation the Length of Transition Area at the Construction Area in the Freeway, Ajou University, Master Dissertation.

Radwan E., Zaidi Z., Harb R. (2011), Operational Evaluation of Dynamic Lane Merging in Work Zones with Variable Speed Limits, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 16, 460-469.

Rakha H., Ahn K.h., El-Shawarby I., Jang, S.b. (2003), Emission Model Development Using In-vehicle On-Road Emission Measurements, 13th CRC ON-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego.

Rakha H., Ahn K.h., Trani A. (2003), Comparison of MOBILE5a, MOBILE6, VT-MICRO, and CMEM models for estimating hot-stabilized light-duty gasoline vehicle emissions, Canadian Journal of Civil Engineering, 30(6), 1010-1021.

Saaty T. L. (1995), Decision Making for Readers, II, AHP series, RWS Publication.

Saaty T. L., Erdener E. (1979), A new approach to performance measurement - the analytic hierarchy process, Design Methods and Theories, 13(2), 64-72.

Schrock S. D., Maze T. H. (2000), Evaluation of Rural Interstate Work Zone Traffic Management Plans in Iowa Using Simulation, Mid-Continent Transportation Symposium 2000 Proceedings.

Song T. J. (2009), Methodology for Evaluating Variable

Speed Limit Control Strategy based on Traffic Safety, Hanyang University, Master Dissertation.

- ☞ 주 작성자 : 박준영
- ☞ 교신저자 : 오철
- ☞ 논문투고일 : 2011. 12. 5
- ☞ 논문심사일 : 2012. 2. 19 (1차)  
2012. 11. 19 (2차)  
2013. 6. 12 (3차)  
2013. 8. 14 (4차)  
2013. 10. 4 (5차)
- ☞ 심사판정일 : 2013. 10. 4
- ☞ 반론접수기한 : 2014. 2. 28
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필