

메타분석을 이용한 공사구간 가변속도제한시스템(VSL) 효과분석

Effectiveness Analysis of Variable Speed Limit Systems(VSL) in Work Zones based on Meta-analysis

조 영*
(Young Jo)
(Hanyang University)

윤 석 민**
(Seok-min Youn)
(Hanyang University)

오 철***
(Cheol Oh)
(Hanyang University)

요 약

도로를 점용하는 공사구간은 교통의 흐름이 불안정하여 교통사고 발생 가능성을 증대시키고, 교통처리 용량을 저하시켜 혼잡을 초래한다. 이와 같이 공사구간으로 인한 교통류의 부정적 영향을 최소화하기 위해 다양한 교통관리 전략이 연구·개발되고 있다. 그 중 가변속도제한시스템(VSL; Variable Speed Limit)은 운전자에게 실시간 교통상황 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 적절한 제한속도 정보를 제공한다. 본 연구에서는 공사구간에 VSL 적용시 교통운영효율성과 교통안전성 향상 효과를 메타분석 기법을 이용하여 평가하였다. 교통운영효율성 평가에서는 통과교통량의 승산비 효과크기는 1.164로 공사구간에 VSL 적용 시 16.4% 증가하는 것으로 분석되었다. 한편, 주행속도의 승산비 효과크기는 0.835로 음의 관계를 나타내어 16.5% 감소하는 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과는 공사구간의 안전성 및 운영효율성 증대를 위한 VSL의 개발을 효과적으로 지원할 것으로 기대된다.

핵심어 : 메타분석, 공사구간, 가변속도제한시스템(VSL), 교통 운영성, 교통 안전성

ABSTRACT

The work zone traffic management is of keen interest because the unstable traffic stream in work zones leads to not only less productive traffic operational efficiency but also negative impacts on traffic safety. A promising method to address such issues is variable speed limit systems(VSLS). VSLS is expected to increase in throughput and to enhance safety by diminishing the crash potential. In addition, the usefulness of VSLS has been demonstrated by significant amount of existing literature. The objective of this study is to identify the effectiveness of VSLS based on a meta analysis technique. Throughput and travel speed were used as measures of effectiveness for VSLS in terms of the operational efficiency and safety respectively. Results showed that approximately 16.4% increase in throughput and 16.5% decrease in travel speed were obtainable by VSLS. The outcomes of this study would be useful in developing technologies and polices for better operation of VSLS.

Key words : Meta-analysis, Work Zone, Variable Speed Limit, Traffic Operations, Traffic Safety

† 본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업(16TLRP-C096228-02)의 연구비 지원으로 수행하였습니다.

* 주저자 : 한양대학교 교통공학과 석사과정

** 공저자 : 한양대학교 교통공학과 석사과정

*** 교신저자 : 한양대학교 교통·물류공학과 교수

† Corresponding author : Cheol Oh(Hanyang University), E-mail cheolo@hanyang.ac.kr

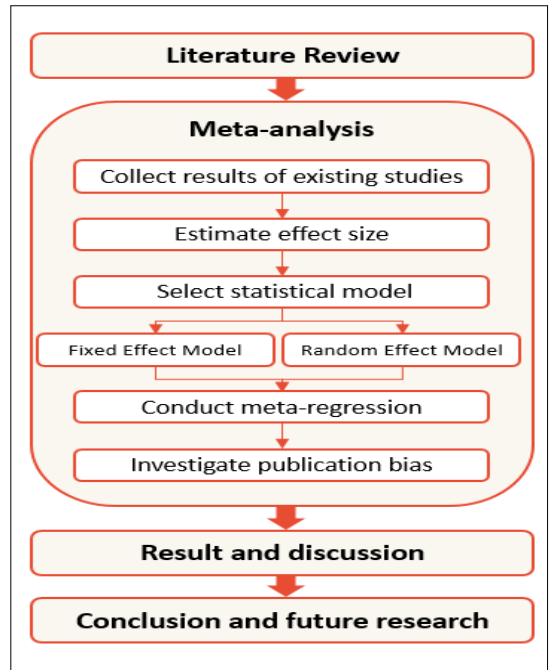
† Received 7 May 2016; reviewed 15 June 2016; Accepted 5 August 2016

I. 서론

최근 도로, 교통안전 및 부대시설 등 주요 도로 기반시설의 노후화로 인해 유지관리의 중요성이 부각되면서 도로·교통 시설물 공사의 빈도가 증가하고 있다. 특히, 교통량이 많고 고속으로 주행하는 고속도로 및 도시간선도로의 도로 보수·확장 공사는 체계적이고 효율적인 공사계획을 필요로 한다. 이러한 도로 공사구간은 도로의 교통처리 용량을 저하시켜 혼잡을 야기한다. 또한 대부분의 도로 공사구간은 도로를 점용하는 공사로 교통의 흐름이 불안정하고 원활하지 않아 운전자의 주의를 더욱 요구한다. 만약 도로 공사구간에 적절치 못한 도로·교통 안전시설이 설치될 경우, 급격한 속도 감소 및 차로변경으로 인한 차량 간 상충으로 인해 운전자와 작업자 모두 교통사고에 노출된다. 그러므로 도로 공사구간 계획 시 교통류에 미치는 부정적 영향을 줄이는 동시에 운전자가 공사구간을 원활히 통과할 수 있는 효과적인 교통관리전략이 필요하다. 이를 위해서 공사구간 교통관리시스템 적용 시 운전자의 반응특성 및 교통류의 변화를 분석하고 공사구간 교통관리시스템에 관한 효과평가가 수행되어야 한다. 공사구간 교통관리시스템 중 가변속도제한시스템(VSL : Variable Speed Limit)은 가변속도와 함께 차로 제한, 차로 허용, 도로주변의 환경 등 운전자에게 필요한 다양한 정보를 제공할 수 있다. 공사구간에 VSL 적용시 기대되는 효과를 체계적으로 분석하여 계량화하는 것은 VSL의 설계 및 운영을 위해 대단히 중요한 기초 작업이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 메타분석 기법을 적용하여 교통 운영효율성 및 교통안전성 측면에서 공사구간 VSL 적용 효과를 통계적으로 제시하였다. 메타분석은 동일한 연구주제에 대한 누적된 연구결과물들을 하나의 정량적인 값으로 통합하여 효과 및 효율성을 평가하기 위한 통계적 기법이다. 즉 연구들마다 서로 상이한 분석방법으로 도출된 결과 값들을 하나의 표준화된 지표로 평가하기 위하여 통합 효과크기를 산출하였다.

선행연구논문의 수집을 통해 VSL 적용 전·후 운전자의 반응특성 및 교통류의 변화 결과값을 추출하였다. 선행연구논문은 국내 학술지의 경우 연구재단 등재 학술지에 게재된 논문으로 한정하며, 국외 연구 사례의 경우 SCI(Science Citation Index), SCIE(Science Citation Index Expanded) 급의 학술지 및 기관보고서를 대상으로 수집되었다. 수집된 연구 중 VSL을 평가할 수 있는 효과적으로도 교통운영 효율성 측면에서 통과교통량, 교통안전성 측면에서 주행속도를 선정하였다. 선정된 효과척도를 기반으로 메타분석을 수행하였으며, 교통운영효율성과 교통안전성 측면에서 VSL의 유용성을 평가하였다. <Fig. 1>에 본 연구의 수행과정을 제시하였다.



<Fig. 1> Research Process

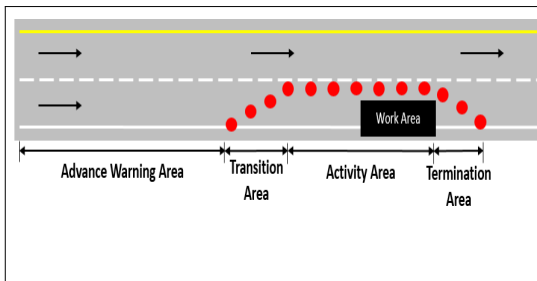
II. 이론적 고찰

1. 공사구간 교통관리 관련 연구 고찰

1) 공사구간의 개념

도로 공사구간은 공용중인 도로에서 점용공사로

인하여 통행에 제한을 주는 도로의 일정한 구역 또는 구간으로 정의되며, 구간별 교통관리가 필요한 구간이다[1]. 도로 공사구간 유형은 공사장 이동여부에 따라 고정 공사와 이동 공사로 구분하고, 고정 공사는 공사기간에 따라 장기, 중기, 단기, 단시간 공사로 구분한다. 단기이상 고정 공사 교통관리는 공사장 상류부로부터 하류부까지 교통류 특성이 다르기 때문에 <Fig. 2>와 같이 주의구간, 완화구간, 작업구간, 종결구간으로 구분하여 세부적으로 관리한다. 주의구간은 운전자가 전방의 교통상황 변화를 사전에 인지할 수 있도록 확보하는 구간이다. 완화구간은 진행 중인 차로를 변화시키는 구간이다. 작업구간은 완충구간과 실제 공사를 수행하는 작업 활동구역으로 구성되며, 여기서 완충구간은 운전자 및 작업자를 보호하는 구간이다. 종결구간은 작업구간을 통과하여 공사 이전의 정상적인 교통흐름으로 복귀하는 구간이다.



<Fig. 2> Work Zone Traffic Management Area

임시 교통통제시설은 도로 공사구간의 원활한 교통운영과 안전을 위해 사용되는 도로·교통 안전 시설을 통칭한다. 운전자에게 주의, 경고, 안내, 규제하기 위해 사용되며 원활한 차량주행을 유도한다. 또한 임시 교통통제시설은 독립적으로 설치할 수 있으며, 다른 시설과 조합·부착하여 사용할 수 있다. 표지와 노면표시, 도류화시설, 임시방호울타리, 충격 흡수시설, 기타시설로 구분된다[1].

2) 공사구간 교통관리 기법

도로 공사구간에서 차량의 주행속도를 관리하기 위해 규제 및 단속을 수행하는 방법은 다음과 같다.

Stationary Enforcement는 공사구간 내에 경찰차량이 주차하여 지속적으로 제한속도 위반차량을 단속하는 방법이다. **Mobile Enforcement**는 주기적으로 레이저 센서를 사용하여 제한속도 위반차량의 영상을 수집하고 차량의 번호를 식별하여 데이터를 수집하는 방법이다. **Dynamic Speed Display**는 차량의 주행속도를 감지하여 운전자에게 속도를 표출하는 방식이다. 만약 제한속도를 초과하면 표출되는 메시지는 깜빡거리거나 빛을 낸다[2]. **Innovative Flagging**은 교통 통제수가 깃발을 들고 다른 한 손으로는 제한속도표지판을 가리키며 속도를 낮추게 하는 방법이다[3].

공사구간에 표지 및 도로 포장에 변화를 주는 등 시설물 설치를 통한 공사구간 교통관리 방법은 다음과 같다. **Fluorescent Orange Sheeting**은 공사구간 표지 색상을 형광 주황색 색상으로 바꾸어 시인성을 증가시키는 방법이다[4]. **Removable Rumble Strips**은 시각적, 청각적 또는 차량 흔들림으로 부주의 차량에게 주의 및 경각심을 주는 방법이다. 기존의 요철포장 보다 설치비용 및 설치시간이 줄고 제거가능하다는 장점이 있다[5]. **Portable Rumble Strips**은 공사구간과 같이 도로 상황이 변화하는 구간의 상류부에 운전자가 속도를 줄이거나 정지하도록 유도한다. 일반적으로 양방향 2차로 도로 공사의 경우 사용된다[6].

공사구간 진입 전 운전자의 행동 변화를 유도하기 위해 정보를 제공하는 시스템은 다음과 같다. **Portable Changeable Message Sign(PCMS)**은 다양한 메시지를 표출하는 장치로 이동이 가능하다는 장점이 있다. 운전자에게 하류부의 교통상황이나 도로 선형의 변화 등과 같은 메시지를 표출한다[4]. **Queue Warning System**은 공사구간에서 갑작스런 정지 및 감속하는 차량이 감지되거나 대기행렬이 길어지면 상류부 운전자들에게 PCMS로 경고 메시지를 표출한다. 또한, 운전자는 표출되는 메시지를 통해 최적의 차로합류 방식을 따르며 그 방법은 다음과 같다. **Dynamic Late Merge System**은 실시간 교통상황에 따라 가장 효율적인 차로합류를 위해 운영되며 혼잡 시 더욱 효과적인 시스템이다. 점유율이

15% 이상일 때 PCMS를 통해 합류지점에서 “TAKE YOUR TURN and MERGE HERE” 라는 메시지를 표출한다[7]. Intelligent Lane Merge System은 지능화된 교통정보 검지 방법을 사용하여 실시간 교통상황에 따라 최적의 차로합류 전략을 선택한다. 차로합류 방식은 VMS 메시지를 통해 운전자에게 표출된다[8].

2. 가변속도제한시스템(VSL) 관련 연구 고찰

VSL은 교통상황, 기상상태 등에 따라 제한속도를 일시적으로 또는 시간대별로 변화시켜 교통류를 관리하는 기법이다. VSL 시스템을 통해 가변속도와 함께 차로 제한, 차로 허용, 도로주변의 환경 등 운전자에게 필요한 다양한 정보를 제공할 수 있다. 이에 따라 운전자는 적정 주행속도를 유지함으로써 부적절한 속도로 인한 교통사고를 예방할 수 있다. 또한 속도의 편차를 줄이는 동시에 차두간격의 균일화를 이루어 충돌사고의 위험을 줄일 수 있다. 공사구간에서 VSL은 운전자에게 도로의 선형이나 차로의 횡단구성의 변화에 따른 적절한 제한속도를 제공한다[9].

Park et al.(2008)은 고속도로 공사구간의 기존 교통운영기준보다 VSL 적용 시 교통소통 및 교통안전 측면에서 더욱 유리하다고 제시하였다. 이는 공사구간에 VSL을 적정한 간격으로 설치하여 단계적인 속도감소를 유도하는 것이 교통소통 및 교통안전 측면에서 효과적인 것으로 나타났다[10]. Lyles et al.(2004)은 미국 미시건 주 I-96 고속도로 공사구간에 VSL 적용시 운전자의 제한속도 준수 여부를 평가하였다. 제한속도준수율이 높을수록 과속차량비율의 감소로 안전성이 향상되고, 통행시간의 감소로 교통흐름이 개선되었다[11]. Lin et al.(2004)은 시뮬레이션 분석 결과 VSL은 통과교통량을 약 4~17% 증가시키고, 주행속도를 최대 30%까지 감소시킨다고 제시하였다. 또한 속도 편차의 감소로 공사구간의 교통 안전성 향상에 기여한다고 평가하였다[12]. Kang et al.(2004)은 공사구간에서 통과교통량을 극대화하고 도로 교통사고를 감소시키기 위한 VSL 알고리즘을 도출하였다. VSL 알고리즘 구현

결과 통과교통량은 5~30% 증가하였고, 주행속도는 4~13% 감소하였다. 알고리즘에 따른 적절한 속도 제어는 사고의 감소와 운영효율성을 향상시킨 것으로 나타났다[14]. Kwon et al.(2006)은 미국 미네소타 주 I-494 고속도로 공사구간에서 충돌사고를 감소시키기 위해 VSL을 적용하였다. 공사구간 상류로부터 2단계에 걸쳐 제한속도를 낮추면 급격한 속도 감소로 인한 충돌사고를 감소시킨다고 제시하였다[15]. Wilson and Saito(2012)은 공사구간 VSL 적용시 주말 야간 침두시간에 속도의 분산이 감소한 결과를 제시하였다. 이는 원활한 교통류 흐름을 제공하고 안전성이 향상된 분석결과를 도출하였다[16]. Edara et al.(2013)은 공사구간의 혼잡/비혼잡에 따른 VSL 적용 효과를 분석하였다. 교통 혼잡시 VSL은 이동성 측면에서 대기행렬길이, 브레이크 횡수를 감소시키며 통과교통량을 증가시켰다. 반면, 교통 비혼잡시 VSL은 안전성 측면에서 주행속도를 감소시키고 제한속도준수율을 8배 증가시켰다[17].

3. 메타분석을 적용한 효과평가 연구 고찰

Elvik(1995)은 가드레일 설치에 관한 선행 연구논문을 바탕으로 메타분석을 수행하였다. 메타분석의 효과적도는 승산비를 통해 산정하였으며, 분석결과 가드레일 설치 시 교통사고율은 30% 증가, 사망률 20%감소, 부상률 10% 감소한 것으로 나타났다[18]. Park et al.(2015)는 2008년부터 2012년까지 부산광역시 도심형 중앙분리대 구간에서 해당 시설의 설치 전·후 발생한 교통사고 수를 메타분석 프로그램을 통해 안전성 효과를 평가하였다. 그 결과, 도심형 중앙 분리대 설치 후 교통사고 수가 증가한 것으로 나타났으며 부산광역시 전역에 걸쳐 교통사고 건수는 약 22.4% 증가한 것으로 나타났다[19]. Choi(2016)는 신호교차로 안전개선을 위해 교차로 교통사고 발생건수를 종속변인으로 하는 선행 연구 논문 24건을 수집하였다. 수집된 논문에서 신호교차로에 설치 및 운영되고 있는 도로안전시설 및 회전 전용신호운영에 대하여 메타분석을 수행하였다. 분석결과 도로안전시설물이 사고감소에 영향을 준다는 통계적인 결과자료를 도출하였다[20].

4. 시사점

기존문헌 고찰 결과, 미국과 유럽 등 여러 나라에서는 공사구간 VSL 적용에 관한 효과평가 연구가 다수 진행되었다. 또한 VSL 적용시 최적의 설치 기준, 방법 등을 도출하기 위한 알고리즘에 관한 연구도 수행되었다. 따라서 공사구간 VSL 적용에 관한 다양한 연구결과를 종합적으로 분석하여 보다 일반적이고 객관적인 결과를 제시하는 것이 필요하다. 또한 통과교통량과 주행속도 외에 통행시간, 속도 표준편차, 최대속도, 과속차량대수를 효과적으로 선정하여 공사구간 내 VSL 적용에 따른 효과를 분석한 연구들도 수집되었다. 총 80건의 연구결과 중 12건을 제외한 절반 이상의 연구들이 통과교통량 41건, 평균속도 27건을 효과적으로 선정하여 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 체계적이고 종합적으로 연구결과를 통합하기 위하여 통과교통량과 주행속도를 효과적으로 선정하여 분석에 활용하였다. 다만 통과교통량과 평균속도를 통한 공사구간 내 VSL 적용에 따른 효과 평가를 한 연구들이 대다수여서 향후 연구에서는 다양한 효과적도를 통한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

다양한 연구결과의 종합적인 분석을 위하여 각 연구별 특성을 고려한 효과평가가 요구된다. 본 연구에서는 메타분석 기법을 통해 공사구간 VSL 적용 효과를 교통운영효율성과 교통안전성 측면에서 통계적으로 제시하였다. 메타분석을 통해 도출된 결과는 공사구간 VSL 적용에 관한 기초 연구 자료로 사용될 것이라 판단된다.

메타분석에 사용된 연구결과물은 동일한 효과적으로 환산될 수 있는 자료로 수집하였으며 표준화된 효과적도 개념을 이용하였다. 표준화된 효과적도 산출시 메타분석 통계적 모형은 랜덤효과모형을 적용하였으며 Stata 프로그램을 이용하여 VSL 적용시 효과를 평가하였다.

III. 분석방법론

메타분석은 자료수집 및 실험환경 등의 서로 다른 제약조건으로 인해 발생할 수 있는 일관적이지 않은 연구 결과들 속에서 타당한 결론을 도출하기

위해 활용되는 통계기법이다[21].

메타분석의 장점으로는 연구별 서로 다른 분석 결과 값들에 대한 표준화를 통해 단위를 통일함으로 하나의 결론으로 종합하는 것이 가능하다는 것이다. 따라서 많은 양의 연구결과를 체계적으로 요약하여 보다 일반적이고 객관적인 정보를 제공할 수 있다. 둘째는 메타분석으로 종합된 결과값은 큰 표본크기를 이용하므로 한정된 결과값보다 신뢰할 수 있고, 높은 통계적 검증력을 가진다[22]. 셋째는 동일한 연구가설을 검증한 선행연구들이 서로 다른 결과를 도출하였을 때, 모든 연구물을 분석대상으로 포함시켜 객관적이고 통합적인 결론에 도달할 수 있다[23]. 마지막으로 메타분석을 통해 도출된 선행연구들의 결과는 기초 연구 자료로 사용되어 효율적인 연구를 진행할 수 있다[24].

1. 메타분석 기법 수행 절차

1) 연구문제 설정 및 변수의 정의

본 메타분석은 ‘공사구간에서 VSL 적용시 교통운영효율성과 교통안전성이 향상될 것이다’라는 연구가설을 검증하기 위해 선행 연구 논문을 조사하였다. 각 연구는 현장조건 및 시뮬레이션환경이 다름으로 개별 연구의 이질성을 반영하기 위한 변수를 설정하였다. 개별 연구의 효과크기(Effect Size)에 영향을 미칠 것이라고 예상되는 변수는 기존 차로 수, 차단된 차로 수, 공사 기간, 주/야 공사 여부 등이 있다. 여기서 효과크기란 선행 연구들의 다양한 연구 결과값을 표준화하여 공통된 단위로 만든 표준화된 값을 말한다.

2) 연구결과물 수집

공사구간 VSL 적용 효과와 관련된 선행 연구결과물을 대상으로 논문과 보고서를 최대한 수집하였다. 이때 수집된 연구 결과물이 메타분석에 포함되기 위해서는 연구결과의 분석통계값이 표준화된 평균차, 상관계수, 승산비 등의 효과크기의 형태로 변환이 가능해야 한다.

본 연구를 위해 SCI(E) 급의 학술지 및 기관보고

서를 대상으로 공사구간에 VSL 적용 효과를 연구한 논문들을 수집하였다. 선행 연구 논문 및 보고서 7건에 대한 연구 결과물은 총 80건이 수집되었으며, 개별 연구의 분석 결과값은 승산비로 정리하였다. 수집된 80건의 연구결과물 중 효과적으로 통과교통량, 주행속도를 사용한 68건의 연구결과를 최종 분석자료로 선정하였다. <Table 1>에 수집된 자료를 정리하여 제시하였다.

또한 총 68건의 연구 중 저널 별 수집건수를 살펴보면, SCI(E)저널의 논문의 연구가 62건, 보고서가 4건으로 전체 수집건수의 94%를 차지하였다. 연도 별로 살펴보면, 모든 연구가 2000년도 이후로 분류되어 최근 15년간의 연구가 활발히 진행된 것으로 나타났다. 시뮬레이션을 통하여 실험한 연구가 63건으로 대부분의 연구가 시뮬레이션을 사용하였다. 공사구간 내 VSL 적용에 따른 자료 수집 결과는 <Fig. 3>에 제시하였다.

<Table 1> Summary of Collected Relevant Studies

Performance Measures of VSL in Work Zone	number of cases
Throughput	47
Travel Speed	27
Speed Standard Deviation	7
Travel Time	3
Maximum Speed	1
Number of Vehicle Overspeed	1
Total	80

3) 효과크기 계산

선행연구 결과의 다양한 결과값을 표준화된 공통 단위 효과크기로 도출하기 위해 본 연구에서는 효과크기 산출시 상관계수와 승산비를 제시하였다. 여기서 상관계수는 두 연속변수 사이의 관계정도를 나타내는 지수이고, 승산비는 비교대상간의 관계를 수량화한 값이다.

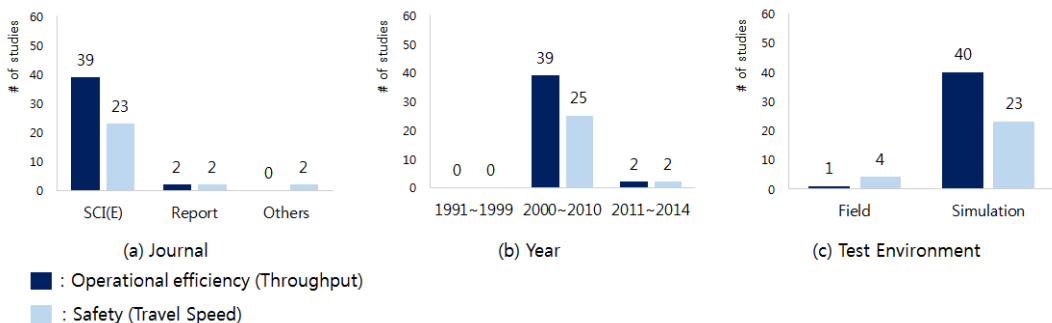
승산비(Odds Ratio)는 식(1)과 같이 1을 기준으로 1보다 크면 효과적도와 교통관리시스템의 관계가 양의 관계, 1보다 작으면 음의 관계로 해석하였다. 예를 들어, 공사구간에 VSL 적용 시 통과교통량이 21% 증가하면 승산비는 1.21이다.

$$Odds\ Ratio = \frac{P}{1-P} (P : \text{사건발생확률}) \dots\dots (1)$$

연구결과로 제시되는 효과크기는 직관적으로 이해하기가 어렵기 때문에 이러한 단점을 극복하기 위해 효과크기의 표현방식 별로 large, medium, small로 구분한다[13, 24]. <Table 2>에 효과크기 표현방식 별 효과크기 정도를 제시하였다. 효과크기 표현방식 중 r은 상관계수, Odds Ratio는 승산비를 의미한다.

<Table 2> Classification of Effect Size

Class.	r	Odds Ratio
Large	0.24 < r ≤ 0.37	2.50 < OR ≤ 4.30
Medium	0.10 < r ≤ 0.24	1.50 < OR ≤ 2.50
Small	r ≤ 0.10	OR ≤ 1.50



<Fig. 3> Characteristics of collected studies

본 연구에서는 개별 연구의 결과값을 승산비로 수집하였다. 그러나 승산비의 통합 효과크기 산출을 위해서는 개별 연구의 실험군, 대조군의 표본수 자료가 필요하다. 따라서 승산비로 수집된 개별 연구의 결과값들을 가중치를 적용하여 표준화된 상관계수 효과크기로 변환하였다. 마지막으로 표준화시킨 상관계수 효과크기를 승산비를 통한 통합 효과크기로 변환하였다.

표준화된 공통 단위 효과크기를 도출하기 위한 과정은 다음과 같다. 우선, 공사구간 VSL 적용 시 개별 연구의 분석결과 값(공사구간 VSL 적용 시 통과교통량과 주행속도 평균값)은 승산비로 수집한다. 개별 연구의 승산비는 상관계수로 변환하며 수식으로 표현하면 식(2)와 같다[25].

$$r = \frac{OR^{\frac{1}{2}} - 1}{OR^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (r : \text{상관계수}, OR : \text{승산비}) \dots (2)$$

상관계수는 Fisher가 제시한 z값으로 표준화시키기 위해 식(3)와 같이 변환하며 표준화된 효과크기 ES로 정의한다. 가중치를 부여하기 위해 분산은 식(4) 같이 계산된다. <Fig. 4>에 표준화된 효과크기를 산출하는 과정을 제시하였다.

Study	Odds ratio (OR)	Correlation coefficient (r)	Standard effect size(ES)	Weighted value(w)	ES × w
1	1.16	0.037	0.037	57	2.109
2	1.17	0.039	0.039	97	3.783
3	1.07	0.017	0.017	137	2.329
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

$$r = \frac{OR^{\frac{1}{2}} - 1}{OR^{\frac{1}{2}} + 1} \quad Z_r = 0.5 \times \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right)$$

<Fig. 4> Example of Calculation of Standard Effect Size

$$Z_r = 0.5 \times \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right)$$

(Z_r : 표준화된 효과크기, r : 상관계수) ... (3)

$$V_{Z_r} = \frac{1}{n-3}$$

(V_{Z_r} : Z_r 의 분산, n : 표본 수) (4)

$$w = \frac{1}{V_{Z_r}} \quad (w : \text{가중치}) \dots \dots \dots (5)$$

각 연구별로 산출한 표준화된 효과크기는 역분산 가중치로 구해지는 가중평균 효과크기로 식(6)과 같이 계산한다. 가중평균 효과크기는 식(7)을 통해 승산비의 효과크기로 나타낼 수 있다.

$$\overline{ES} = \frac{\sum_{i=1}^n ES_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

(\overline{ES} : 가중평균 효과크기,
 ES_i : 표준화된 효과크기) (6)

$$\overline{ES}_{OR} = \left(\frac{1 + \overline{ES}}{1 - \overline{ES}}\right)^2$$

(\overline{ES}_{OR} : 승산비의 효과크기) (7)

4) 메타분석의 통계적 모형 선택

각 연구마다 도출된 효과크기를 결합하여 통합효과크기를 추정하기 위해서는 통계적 모형이 필요하다. 메타분석의 통계적 모형은 고정효과모형(Fixed Effect Model)과 랜덤효과모형(Random Effects Model)으로 구분된다. 고정효과모형은 각 연구의 효과크기를 동일한 값으로 가정하는 모형으로 같은 모집단에서 연구 결과가 얻어졌다는 동질성을 가정한다. 랜덤효과모형은 연구 간의 이질성을 고려하여 효과크기가 동일하지 않다고 가정하는 통계 모형이다. 하지만, 효과크기의 동질성 검증결과 연구별 효과크기가 동질 하다고 도출되어도 분석자가 연구별 특성의 차이를 반영하여 랜덤효과 모형의 메타분석을 진행할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 연구조건이 이질적이라고 판단하여 통계적 모형으로 랜덤효과모형을 적용하였다.

5) 메타분석 및 메타회귀분석 수행

일반 통계 프로그램 중 광범위한 내용의 통계분석이 가능하여 메타분석이 손쉽게 수행되는 통계 패키지인 Stata를 이용해 메타분석과 메타회귀분석을 수행하였다. 메타분석은 각 연구별 표준화된 상관계수와 표준오차(se, 분산의 제곱근 값)를 분석 자료로 사용한다. 메타분석의 결과값으로 통합 효과크기와 유의확률 및 신뢰구간이 도출된다.

메타분석의 결과만을 제시하는 것은 선행연구의 특성과 연구결과의 연관성 및 영향요인을 설명하기 어렵다. 따라서 메타회귀분석을 수행하여 각 연구별 표준화된 효과크기에 영향을 미치는 요인을 도출하고 정량화된 영향정도를 제시해야 한다. 본 연구에서는 랜덤효과 메타회귀분석을 수행하였으며 개별 연구의 표준화된 효과크기를 종속변수로, 각 연구별 특징을 조절변수로 설정하였다

6) 출판편의진단

출판편의(Publication Bias)란 통계적으로 유의한 결과값을 가진 논문만 출판되고, 유의성이 기각된 논문은 출판되지 않는 현상이다. 이에 따라, 메타분석 수행시 학술지에 출판된 연구물만을 포함시킬 경우 왜곡된 값이 발생하여 연구결과가 편향될 수 있다. 따라서 메타분석의 신뢰도를 높이기 위해서는 출판편의를 검정할 필요가 있다[26]. 출판편의가 존재하는 것으로 진단되면 출판된 연구물 외에 출판되지 않은 석·박사학위논문과 학술대회 발표문, 단행본 등을 포함시킴으로 출판편의의 문제를 해결하고자 노력해야 한다.

출판편의에 대한 보고를 할 때에는 Funnel Plot이나 통계량을 제시하여 객관적으로 보고해야한다. 산점도를 통한 검증방법인 Funnel Plot은 개별 연구들의 효과크기와 표준오차 역수에 대한 산점도로 효과추정의 정밀도 및 출판편의를 진단한다. 통계적 검증방법인 Egger 검정은 표준정규편차(SND, 효과크기를 표준오차로 나눈 값)을 종속변수로 두고 추정의 정밀도를 의미하는 표준오차의 역수 값을 독립변수로 하는 회귀모형으로 검증한다. 출판편의

가 없을 경우에 표준정규편차가 0이 되므로 Egger 검증은 절편을 통해 편의 여부를 판단한다[20].

IV. 분석 결과

1. 랜덤효과모형 메타분석 결과

공사구간에 VSL 적용에 관한 연구 결과물을 바탕으로 랜덤효과모형 메타분석을 수행하였다. 랜덤효과모형을 이용한 통과교통량 41건의 메타분석 결과는 <Table 3>에 제시하였다. 통과교통량의 통합 효과크기는 0.038로 작은 효과크기를 나타내며 95% 신뢰구간은 (0.006-0.070)의 범위를 가진다. 승산비의 효과크기는 1.164로 도출되어 공사구간에 VSL 적용 시 통과교통량이 16.4% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 관련성 검정을 통한 유의확률은 Z=2.33(p<0.05)으로 공사구간에 VSL 적용 시 통과교통량의 증가는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 한편, 효과크기의 동질성 검증 결과 Cochran's Q 검정에 따르면 χ^2 은 1.52로 유의확률 p=1.000(p>0.05)이므로 연구 간의 효과크기에 서로 차이가 없는 것으로 도출되었다. 한편 Higgin's I^2 검정 결과 0.0%로 각 연구별 특성이 동질한 것으로 나타났다. 운영 효율성 측면에서 수집한 연구들의 이질성을 가정하여 분석하였지만 실제 연구 간 효과크기들이 동질한 것으로 분석되었다. 그러나 분석가가 연구 조건이 이질적으로 판단할 경우 랜덤효과모형을 사용할 수 있어 본 연구에서는 랜덤효과모형을 활용하여 메타분석에 적용하였다[20].

<Table 3> Result of Average Effect Size by Throughput

Class.	Effect Size	95% Confidence Interval	
		Lower	Upper
Average ES	0.038	0.006	0.070
Average ES _{OR}	1.164	1.024	1.324

Heterogeneity chi-squared=1.52 (d.f.=40) p=1.000
 I-squared(variation in ES attributable to heterogeneity)=0.0%
 Test of ES=0 : z=2.33 p=0.020

<Table 4> Result of Average Effect Size by Travel Speed

Class.	Effect Size	95% Confidence Interval	
		Lower	Upper
Average ES	-0.045	-0.087	-0.004
Average ES_{OR}	0.835	0.705	0.984

Heterogeneity χ^2 -squared=2.27 (d.f.=26) $p=1.000$
 I^2 -squared(variation in ES attributable to heterogeneity)=0.0%
 Test of $ES=0$: $z=2.13$ $p=0.033$

랜덤효과모형을 이용한 주행속도 27건의 메타분석 결과는 <Table 4>에 제시하였다. 주행속도의 통합 효과크기는 -0.045로 작은 효과크기를 나타내며 95% 신뢰구간은 (-0.087~-0.004)의 범위를 가진다. 승산비의 효과크기는 0.835로 도출되어 공사구간에 VSL 적용시 주행속도가 16.5% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 관련성 검정을 통한 유의확률은 $Z=2.13(p<0.05)$ 으로 공사구간에 VSL 적용시 주행속도의 감소는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 효과크기의 동질성 검증 결과 Cochran's Q 검정에 따르면 χ^2 은 2.27로 유의확률 $p=1.000(p>0.05)$ 이므로 연구 간의 효과크기에 서로 차이가 없는 것으로 도출되었다. 또한, Higgin's I^2 검정 결과 0.0%로 각 연구별 특성이 동질한 것으로 나타났다. 안전성 측면의 동질성 검정 결과 연구들이 동질한 것으로 분석되었지만, 연구 조건들이 이질적으로 판단되어 랜덤효과모형을 사용하여 분석하였다[20].

2. 랜덤효과 메타회귀분석 결과

1) 교통 운영효율성 메타 회귀분석

랜덤효과 메타회귀분석 수행 시 종속변수는 표준화된 효과크기로 설정하며, 조절변수는 종속변수에 영향을 미치는 개별 연구의 특징으로 한다. 조절변수는 공사구간 2→1 차로감소 여부(X_{21}), 3→1 차로감소 여부(X_{31}), 3→2 차로감소 여부(X_{32}), 4→2 차로감소 여부(X_{42}), 4→3 차로감소 여부(X_{43}), 현장실험 여부(X_{field})로 설정하였다. 통과교통량의 표준화된 효과크기에 영향을 미치는 조절변수는 <Table 5>와 같이 나타났다.

<Table 5> Result of Random Meta-regression by Throughput

Class.	Coef.	Std. Err.	t	P> t	95% Conf. Interval	
X_{21}	0.131	0.045	2.93	0.006	0.04	0.22
X_{31}	0.093	0.092	1.00	0.324	-0.09	0.28
X_{32}	0.075	0.092	0.81	0.422	-0.11	0.26
X_{42}	0.055	0.095	0.58	0.566	-0.14	0.25
X_{43}	0.104	0.093	1.12	0.270	-0.08	0.29
X_{field}	-0.11	0.11	-1.05	0.302	-0.33	0.11
_cons	1.147	0.018	64.65	0.000	1.111	1.183

$$ES_{throughput} = 0.131X_{21} + 1.147$$

where,

$ES_{throughput}$: standard effect size of throughput

X_{21} : 2→1 lane closed

현장실험 여부 변수를 제외한 모든 조절변수들이 공사구간에 VSL 적용 시 통과교통량 증가에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 유의수준 95%를 기준으로 공사구간 2→1 차로감소 여부 변수를 유의한 값으로 채택하였다. 따라서 랜덤효과 메타회귀분석 결과 2→1 차로감소가 통과교통량의 표준화된 효과크기에 유의한 영향($p<0.05$)을 미치는 조절변수로 도출되었다. 다른 영향요인은 배제함을 전제로 X_{21} 변수는 통과교통량의 표준화된 효과크기에 0.131 만큼 영향을 미친다. 즉, 2→1 차로감소 공사 시행 시 통과교통량이 13.1% 만큼 더 증가하는 것으로 도출되었다.

2) 교통 안전성 메타 회귀분석

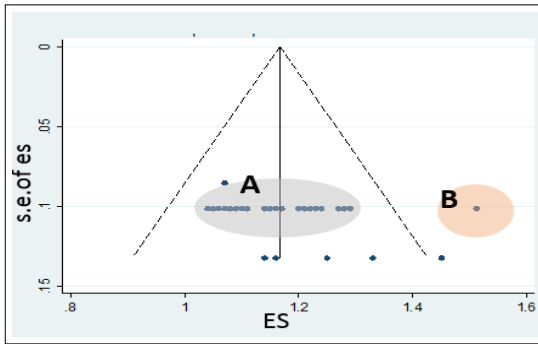
교통안전성 측면에서 주행속도의 표준화된 효과크기를 종속변수로 설정하여 랜덤효과 메타회귀분석을 수행한 결과는 <Table 6>에 제시하였다. 4→2 차로감소 여부, 4→3 차로감소 여부, 현장실험 여부 변수들이 공사구간에 VSL 적용 시 주행속도 감소에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 유의수준 95%를 기준으로 주행속도 감소에 유의한 영향

<Table 6> Result of Random Meta-regression by Travel Speed

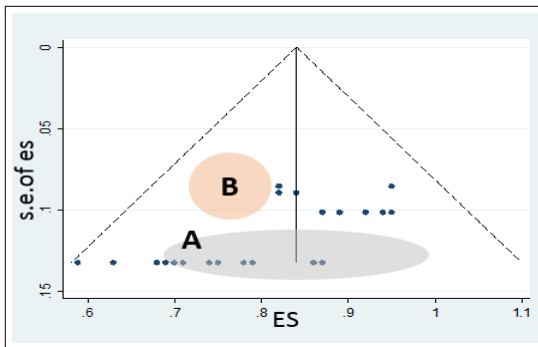
Class.	Coef.	Std. Err.	t	P> t	95% Conf. Interval	
X_{21}	0.018	0.106	0.17	0.869	-0.20	0.24
X_{31}	0.077	0.107	0.72	0.480	-0.15	0.30
X_{32}	0.003	0.105	0.02	0.980	-0.22	0.22
X_{42}	-0.017	0.111	-0.15	0.883	-0.25	0.22
X_{43}	-0.117	0.165	-0.70	0.489	-0.46	0.23
X_{field}	-0.053	0.068	-0.78	0.446	-0.19	0.09
_cons	0.826	0.099	8.29	0.000	0.62	1.03

을 미치는 조절변수는 도출되지 않았다. 이를 종합해 보면 교통 안전성 측면의 통합 효과크기는 공사구간에 VSL 적용 시 주행속도 감소에 영향을 주는 것으로 나타났지만, 조절변수로 설정한 변수들은 주행속도 감소에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

3. 출판편의진단



<Fig. 5> Funnel Plot for effect by Throughput



<Fig. 6> Funnel Plot for effect by Travel Speed

교통운영효율성 측면에서 통과교통량의 Funnel Plot 결과는 <Fig. 5>에 제시하였다. 대부분의 연구는 큰 표준오차를 가지는 작은 규모의 연구로 A영역에 분포하였다. B영역과 같이 통계적으로 유의하지 않은 영역에서 결측된 부분이 발견되었으나 대칭적 형태로 출판편의가 없는 것으로 보인다. <Fig. 6>는 교통안전성 측면에서 주행속도의 Funnel Plot 결과이다. A영역에서 큰 표준오차를 가지는 작은 규모의 연구가 나타났으며 B영역과 같이 비대칭적 형태로 출판편의의 가능성이 있다고 할 수 있다.

교통운영효율성 측면에서 통과교통량의 Egger 검정 결과, 절편(bias)은 3.023으로 추정되었으며 유의확률은 0.063으로 ‘절편이 0이다’라는 귀무가설을 채택하여 출판편의가 존재하지 않는다고 분석되었다. 또한 절편의 신뢰구간이 0을 포함하므로 출판편의가 존재하지 않는 것으로 판단된다.

교통안전성 측면에서 주행속도의 Egger 검정 결과, 절편이 -3.877로 추정 되었으며 유의확률은 0.00으로 ‘절편이 0이다’라는 귀무가설을 기각하여 출판편의가 존재하는 것으로 나타났다. 또한 절편의 신뢰구간이 0을 포함하지 않으므로 출판편의가 존재하는 것으로 판단된다. 교통안전성 측면에서 주행속도에 관한 연구물간에 출판편의가 확인 되었으므로 본 연구결과는 편향될 수 있다. 출판편의의 문제를 해결하기 위해 보다 심도있는 연구결과를 수집이 필요하다. 그러나 출판되지 않은 연구결과를 찾는 것은 한계가 존재한다. 공사구간에서 교통 안전 관점에서 운영관리 방안을 설계하고 평가하는 연구가 향후 다각적으로 수행되어야 할 것이다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 메타분석 기법을 적용하여 공사구간 VSL 적용에 따른 효과를 교통운영효율성과 교통안전성 측면에서 분석하였다. ‘공사구간에서 VSL 적용 시 교통운영효율성과 교통안전성이 향상 될 것이다’라는 연구가설을 검증하기 위해 선행 연구 논문을 수집하였다. 수집된 논문 중 VSL이 통과

교통량과 주행속도에 미치는 영향을 분석한 연구 결과물을 최종 메타분석 자료로 선정하였다. 선정된 연구 결과물의 분석 결과값은 승산비로 정리하였으며 표준화된 효과크기로 변환하기 위해 Fisher가 제시한 z 값 산출 방법을 적용하였다. 각 연구별 표준화된 효과크기와 표준오차는 랜덤효과모형 메타분석의 분석 자료로 사용되었으며 분석 결과 통합 효과크기와 승산비 효과크기를 도출하였다. 추가적으로 선행연구의 특성과 연구결과의 연관성 및 영향요인 등을 분석하기 위해 랜덤효과 메타회귀분석을 수행하였다. 또한, 메타분석의 신뢰도를 높이기 위해 출판편의진단을 수행하였다.

공사구간에 VSL 적용 효과에 관한 총 80건의 연구 결과물 중 통과교통량과 주행속도를 평가지표로 사용한 연구는 각각 41건, 27건 이었다. 랜덤효과모형 메타분석 결과, 교통운영효율성 측면에서 공사구간에 VSL 적용시 통계적으로 유의한 통과교통량의 증가를 확인할 수 있었다. 통과교통량 승산비 효과크기는 1.164로 공사구간에 VSL 적용시 통과교통량이 16.4% 증가하는 것으로 분석되었다. 랜덤효과 메타회귀분석 결과, 2→1 차로감소 공사는 통과교통량의 효과크기에 0.131 만큼 영향을 미치며 13.1% 만큼 더 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 교통안전성 측면에서 랜덤효과모형 메타분석 결과 주행속도는 감소한 결과를 나타내어 VSL이 속도감소에 영향을 준다는 통계적인 결과자료를 도출하였다. 주행속도 승산비 효과크기는 0.835로 공사구간에 VSL 적용 시 주행속도가 16.5% 감소하는 것으로 분석되었다.

출판편의진단 결과 유의수준 95% 수준에서 안전성 측면의 주행속도에 관한 연구물간에 출판편의가 존재하는 것으로 도출되었다. 이는 공사구간 내 VSL 적용에 따른 효과크기가 큰 연구나 통계적으로 유의한 결과값을 가진 논문만이 포함되어 안전성에 관한 연구결과가 편향될 수 있다. 따라서 향후 공사구간 안전성에 관한 연구의 추가적인 수집과 출판되지 않은 석·박사학위 논문, 학술대회 발표문, 단행본들을 포함시키는 노력이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다. 첫째, 다양한 공사구간 환경 및 실험조건을 고려한 각 연구의 특성을 반영하여 추가적인 메타회귀분석이 수행되어야 한다. 각 연구의 효과크기에 영향을 미치는 조절변수를 도출하여 보다 정밀한 결과를 제시해야 할 것이다. 둘째, 출판편의의 문제를 해결하기 위해 공사구간 안전성에 관한 연구를 추가적으로 수집하여 메타분석의 신뢰도를 높여야 한다. 셋째, 통과교통량 및 주행속도의 효과평가 뿐만 아니라 다른 효과적도의 통계적 분석을 통해 공사구간의 교통류 흐름 및 운전자 반응에 미치는 영향을 분석해 볼 필요가 있다.

본 연구에서 사용한 메타분석 기법은 다수 연구의 결과값을 통합하여 표준화된 값으로 도출함으로써 보다 일반적이고 객관적인 정보를 제공할 것으로 판단된다. 또한 메타분석을 통해 도출된 결과는 공사구간 VSL 적용에 관한 기초연구 자료로 공사구간 교통관리 전략 수립 및 관련 정책수립을 위한 의사결정 지원에 활용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2012), Road Work Zone Traffic Control Guiding Principle, pp.1-86.
- [2] Chen Y.(2008), A Highway Work Zone Design and Traffic Management Decision System, ProQuest, pp.38-45.
- [3] Noel E. C.(1987), "Speed control through work zones : techniques evaluation and implementation guidelines," *Federal Highway Administration*, p.1.
- [4] Wang C., Dixon K. and Jared D.(2003), "Evaluating speed-reduction strategies for highway work zones," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board 1824*, pp.44-53.
- [5] Meyer E.(2000), "Evaluation of orange removable rumble strips for highway work zones," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board 1715*, pp.36-42.

- [6] Stout D., Graham J., Bryant-Fields B., Migletz J. and Fish J.(1993), "Maintenance work zone safety devices development and evaluation," *Strategic Highway Research Program*, pp.80-85.
- [7] Wiles P., Cheu R. L., Songchitruksa P., Shelton J. and Cooner S.(2008), "Traffic control strategies for congested freeways and work zones," *Texas Transportation Institute*, No. FHWA/TX-08/0-5326-2, pp.107-110.
- [8] Yulong P. and Leilei D.(2007), "Study on intelligent lane merge control system for freeway work zones," *IEEE In Intelligent Transportation Systems Conference*, pp.586-591
- [9] The Road Traffic Authority(2009), *Variable Speed Limit System Development(I)*, pp.3-6.
- [10] Park J. H., Hwang H. W., Oh C. and Jang M. S.(2008), "A Study on the Application of Variable Speed Limit(VSL) for Preventing Accidents on Freeways," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 26, no. 4, pp.111-121.
- [11] Lyles R. W., Taylor W. C., Lavansiri D. and Grossklaus J.(2004), "A field test and evaluation of variable speed limits in work zones," *In Transportation Research Board Annual Meeting*, pp.2-13.
- [12] Lin P. W., Kang K. P., and Chang G. L.(2004), "Exploring the effectiveness of variable speed limit controls on highway work-zone operations," *In Intelligent transportation systems*, vol. 8, no. 3, pp. 155-168.
- [13] Lipsey, M. W. and Wilson, D. B.(2001), "Practical Meta-analysis," Thousand Oaks, CA : Sage
- [14] Kang K. P., Chang G. L. and Zou N.(2004), "Optimal dynamic speed-limit control for highway work zone operations," *Transportation Research Record :Journal of the Transportation Research Board 1877*, pp.77-84.
- [15] Kwon E., Brannan D., Shouman K., Isackson C. and Arseneau B.(2006), "Field Evaluation of Variable Advisory Speed Limit System for Reducing Traffic Conflicts at Work Zones," *In Transportation Research Board Annual Meeting*, pp.2-17
- [16] Wilson A. B. and Saito M.(2012), "Evaluation of the effectiveness of variable advisory speed system on queue mitigation in work zones," *Procedia-Social and Behavioral Sciences 43*, pp.662-670.
- [17] Edara P., Sun C. and Hou Y.(2013), "Evaluation of Variable Advisory Speed Limits in Work Zones," *Federal Highway Administration*, pp.1-48.
- [18] Elvik R.(1995), "The safety value of guardrails and crash cushions : a meta-analysis of evidence from evaluation studies," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 27, no. 4, pp.523-549.
- [19] Park J. S., Oh Y. P., Kim H. K. and An W. S.(2015), "Experimental Investigation of Macroscopic Analysis of Traffic Safety Using Meta Analysis Focused on Busan Metropolitan City," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 35, no. 6, pp.1339-1345.
- [20] Choi J. H.(2016), "A meta analysis on the effectiveness of road safety features and turn signal : focusing on signalized intersection," Master's Thesis, University of Seoul.
- [21] Jin Y. A.(2015), *Meta-analysis Using Stata*, Korea University Press, pp.9-131.
- [22] Pillemer D. D. and Light R. J.(1980), "Synthesizing outcomes : How to use research evidence from many studies," *Harvard Education Review 50*, pp.176-195.
- [23] Kim B. J. and Han M. W.(1995), "Effect of mental practice on motor performance in Korea : A Meta-analysis," *Korean Society of Sport Psychology*, vol. 6, no. 1, pp.67-88.
- [24] Oh S. S.(2002), *Meta-analysis : theory and practice*, Konkuk University Press, pp.16-19.

[25] Bonett D. G.(2007), "Transforming odds ratios into correlations for meta-analytic research," American Psychologist, vol. 62, pp.254-255.

[26] Kim G. S.(2015), Big Data Analysis and Meta-analysis, Hannarae Publishing, pp.295-297.

저자소개



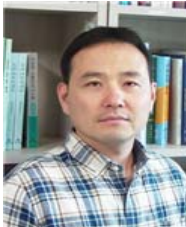
조 영(Jo, Young)

2016년 3월~현재 : 한양대학교 대학원 교통공학과 석사과정
2012년 3월~2016년 2월 : 한양대학교 교통·물류공학과 공학사
e-mail : young2@hanyang.ac.kr



윤 석 민(Youn, Seok-Min)

2015년 3월~현재 : 한양대학교 대학원 교통공학과 석사과정
2009년 3월~2015년 2월 : 한양대학교 교통·물류공학과 공학사
e-mail : you921@hanyang.ac.kr



오 철(Oh, Cheol)

2006년 3월~현재 : 한양대학교 교통·물류공학과 교수
2004년 4월~2006년 2월 : 한국교통연구원 첨단교통기술연구실 책임연구원
2004년 1월~2004년 3월 : Post-Doctorate Researcher, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, CA, USA
1999년 9월~2003년 12월 : University of California, Irvine, 토목환경공학과 공학박사(교통시스템전공)
1998년 9월~1999년 8월 : 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원
1993년 3월~1997년 8월 : 한양대학교 대학원 교통공학과 석사
1989년 3월~1993년 2월 : 한양대학교 교통공학과 공학사
e-mail : cheolo@hanyang.ac.kr