

메타분석을 이용한 차체자세제어장치(ESC)의 교통안전성 효과분석: 사고율 분석을 중심으로

오민수¹ · 윤석민¹ · 정은비^{2*} · 오철¹¹한양대학교 교통·물류공학과, ²한국철도기술연구원 녹색교통물류시스템공학연구소 교통체계분석연구팀

Evaluating Traffic Safety Benefits of Electronic Stability Control System Using a Meta Analysis: Focused on Accident Rates

OH, Minsoo¹ · YOUN, Seokmin¹ · JEONG, Eunbi^{2*} · OH, Cheol¹¹Transportation and Logistics Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea²Transportation System Research Team, Korea Railroad Research Institute, Gyeonggi 16105, Korea

*Corresponding author: jeb0120@krii.re.kr

Abstract

The objective of this study is to identify the effectiveness of ESC(Electronic Stability Control) based on a meta analysis technique. Accident Rate, Fatal Crash Rate, Loss of Control Crash Rate were set as indexes of traffic safety evaluation. Also, reviews on the effectiveness of ESC were collected using keyword, 'ESC'. As a result, the Effect size of accident rate odd ratio was 0.90. When ESC system was applied on vehicles, accident rate decreased by 10%. Also, the Effect size of fatal crash rate odd ratio was 0.64. When ESC system was applied on vehicles, fatal crash rate decreased by 36%. Lastly, the Effect size of loss of control crash rate odd ratio was 0.73. When ESC system was applied on vehicles, loss of control crash rate decreased by 27%. The outcome of this study would be effectively used for developing polices and regulations for ESC installation obligation of commercial vehicles.

Keywords: accident rate, effect size, ESC(electronic stability control), meta-analysis, traffic safety

초록

본 연구는 메타분석(Meta-Analysis) 기법을 적용하여 ESC(Electronic Stability Control) 시스템의 교통안전 측면의 효과를 평가하였다. 교통안전성의 평가지표로 사고율, 사망사고율, 통제상실 사고율을 설정하였으며 ESC를 주요 키워드로 선정하여 기존 문헌을 수집하였다. 수집된 연구결과를 승산비의 효과크기(Effect-size)로 정리하였고, 개별 연구들 간의 이질성을 고려하여 랜덤효과모형을 적용해 통합 승산비 효과크기를 도출하였다. 분석결과, 사고율의 승산비 효과크기는 0.90으로 차량에 ESC 적용 시 사고율이 10% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 사망사고율의 승산비 효과크기는 0.64로 차량에 ESC 시스템 적용 시 사망사고율이 36% 감소하는 것으로 분석되었다. 통제상실 사고율의 승산비 효과크기는 0.73으로 도출되어 ESC 시스템 적용 시 통제상실 사고율이 27% 감소하는 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과는 상용차 ESC 장착 의무화를 위한 제도 정비 및 관련 기술 개발 전략 수립 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

J. Korean Soc. Transp.
Vol.35, No.4, pp.307-320, August 2017
<https://doi.org/10.7470/jkst.2017.35.4.307>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 8 May 2017

Revised: 23 June 2017

Accepted: 30 August 2017

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.

주요어: 사고율, 효과크기, 차체자세제어장치, 메타분석, 교통안전성

서론

최근 교통안전공단의 조사에 따르면 2011-2015년 동안 눈길·빙판길에서 발생한 교통사고는 약 20,000건 발생하였으며, 35,000명의 부상자가 발생하는 등 미끄러운 길 위에서 교통사고위험이 높은 것으로 나타났다. 눈길·빙판길 교통사고의 주된 원인은 운전자의 차량 제어 능력 상실로, 눈길·빙판길에서 차량 제어 불능 상황은 차량이 높은 속력으로 곡선구간에 진입할 때 미끄러짐 현상에 의해 발생한다. 이로 인해 발생한 눈길·빙판인 곡선구간에서의 교통사고는 마른노면에서의 교통사고에 비해 치사율이 5.3% 더 높은 것으로 확인되었다(Korea Transportation Safety Authority, 2015). 이에 따라 사고의 원인이 되는 차량 제어 불능 현상을 감소시키고 차량의 안전성을 개선하기 위해 차체자세제어장치(ESC: Electronic Stability Control)가 개발되었다. ESC는 운전자의 차량 제어 능력을 향상시키고 교통사고를 예방하는 장치로 효과적인 자동차 안전 보조 장치이다. 또한 선진국 및 우리나라에서는 ESC 차량 장착이 의무화되었고¹⁾ ESC와 관련된 다양한 연구가 이루어지는 등 관심도가 증가하고 있다.

Høye(2011)는 메타분석(Meta-analysis) 기법을 활용하여 ESC 장착 의무화 이전의 연구 결과들을 통합하고, ESC 장착에 따른 효과를 추정하였다. 또한 ESC 장착 의무화 이후에도 ESC의 차량 장착이 교통안전에 미치는 영향에 관련된 연구들이 지속적으로 수행되고 있다. 기존 연구에서 수행한 메타분석은 과거 자료로만 구성되어 있기 때문에 본 연구에서는 ESC의 차량 장착 의무화 전·후의 연구결과를 통합하고, ESC 장착이 교통안전성 측면에 미치는 효과를 메타분석을 통하여 객관적으로 분석하고자 한다.

ESC 장착에 따른 교통안전성의 평가지표는 교통사고율²⁾로 설정하였다. 교통사고율은 단순 사고율, 사망 사고율, 통제상실 사고율로 세분화하였다. 메타분석을 위한 기존 문헌 고찰은 ESC 시스템에 관련된 개별 연구 결과물을 대상으로 하였으며, ESC를 주요 키워드로 입력하여 논문과 보고서를 수집하였다. 국내 논문은 한국교육학술정보원 학술연구정보서비스(RISS), 한국학술정보(KISS), 누리미디어(DBPIA) 등을 검색하여 연구재단 등재 학술지에 게재된 논문을 선정하였고, 국외 논문은 SCI, SCIE급의 학술지(IEEE, TRR, TRC 등) 및 기관보고서(NAHSC, PATH 등)의 자료를 이용하였다.

본 연구의 수행과정은 Figure 1에 제시하였다. 2장에서는 ESC 시스템과 ESC 시스템 작동 원리 및 메타분석에 대한 이론적 배경을 기술하였고, 3장에서는 메타분석의 방법론을 제시하였다. 4장에서는 메타분석을 위한 기존 문헌 수집의 기준과 결과를 제시하였다. 5장에서는 효과적도에 영향을 미치는 요소 및 효과적도에 따른 통합 효과 크기를 도출하였으며, 6장에서는 결론 및 향후 과제를 제시하였다.

이론적 고찰

1. 능동형 안전장치

차량 주행 시 가장 중요한 요소는 안전이며, 주행 안전성을 위해서는 적절한 시간, 정확한 위치에서 제동하는 것이 중요하다. 차량의 정확하고 안전한 제동을 위해서 도로에서 미끄러지기 직전까지의 타이어에 마찰력을 가해서 정지해야하지만, 운전자가 직접 브레이크를 조절하여 최적의 제동력을 만드는 것은 쉽지 않다. 이를 위하여 능동형 안전장치의 시초인 ABS (Anti-lock Brake System)가 고안되었다.

ABS는 1초에 8번에서 30번까지 브레이크를 잡았다 놓기를 반복하면서 미끄러지기 직전의 제동력을 제공한다. 즉, ABS는 사람의 발로 조절하기 힘든 최적의 제동력을 만들어 주며, 차량이 급제동할 때 발생하는 바퀴 잠김 현상³⁾

1) 미국(2008), EU(2011), 한국(2012)

2) 사고건수/등록차량대수

3) 차량은 진행하고 있지만 바퀴는 완전히 멈춰선 상태

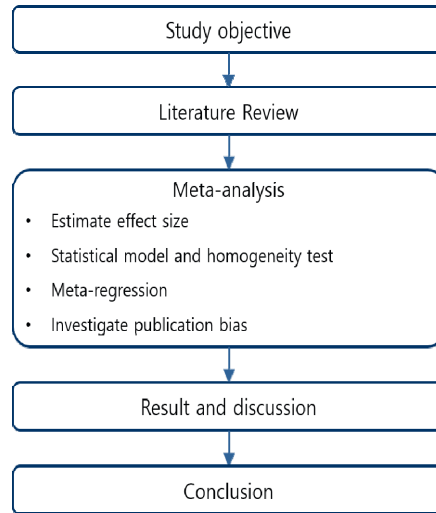


Figure 1. Study process

을 제어하여 사고를 예방한다.

ABS가 차의 제동력만 조절하는 장치라면 TCS (Traction Control System)는 ABS의 기능을 확장시켜 차의 제동력과 엔진의 출력까지 조절하는 장치이다. TCS는 공회전 하는 바퀴에만 브레이크를 작동시키거나 공회전 하는 바퀴에 전달될 힘을 다른 바퀴로 배분해 주행 안정성을 높인다. 즉, TCS는 마찰계수가 낮은 노면에서 차량이 출발하거나 가속할 때 과한 구동력이 발생하여 타이어가 공회전하지 않도록 차량의 구동력을 통제하는 시스템이다.

ABS와 TCS가 차의 제동력과 엔진의 출력을 제어한다면 ESC는 ABS와 TCS를 통합 제어하고 차량 주행 상태를 판단한다. 이를 통해 ESC는 사고로 이어질 수 있는 상황을 사전에 탐지하여 차량의 움직임을 안정시키고 안전한 주행을 유지하게 한다. 예를 들어 ESC는 차량 주행 중 갑작스러운 장애물이 등장하여 급선회를 하는 경우나 미끄러운 길에서 차체가 균형을 잃을 때 차체 자세를 제어한다.

2. ESC 작동원리

ESC는 차륜속도센서, 조향각센서, 가속페달센서, 압력센서, 선회속도센서, 측방향가속도센서로 구성된다. 센서들을 통해 수집된 정보는 ECU(Electronic Control Unit)에 입력된다. 이를 통해 ESC는 차량의 주행방향과 운전자가 스티어링 휠을 조작하는 각도를 실시간으로 감지한다. ESC는 조향 각도와 주행속도를 근거로 운전자가 의도하는 주행방향을 판단한다. 운전자가 의도한 주행 방향과 실제 주행방향이 상이한 것으로 판단되면 ESC는 바퀴에 제동을 걸어주고 엔진의 출력을 낮추면서 차체의 움직임을 제어한다.

ESC가 작동되는 대표적인 경우는 언더 스티어링(Under steering), 오버 스티어링(Over steering)으로 Figure 2에 제시하였다. 언더 스티어링은 자동차가 커브를 선회하거나 장애물을 피하기 위하여 갑자기 방향을 전환할 때, 앞 차축에 의해 직진방향으로 밀리게 되는 것을 의미한다. 이 경우 도로의 바깥쪽으로 차량이 이탈하게 된다. 이를 방지하기 위하여 ESC는 커브 안쪽 뒷바퀴의 브레이크 압력을 제어하고, 이를 통해 형성된 요-토크⁴⁾가 자동차를 수직축으로 회전시켜 언더 스티어링 현상을 예방한다. 오버 스티어링은 자동차가 커브를 선회하거나 장애물을 회피할 때, 주행 중 도로의 회전반경보다 좁은 각도로 차량이 회전을 하는 경우이다. 이 경우 ESC는 커브 바깥쪽 앞바퀴를 제동하여 자동차를 정상적인 주행 궤적으로 진행하도록 차량을 제어한다.

4) 차량의 중심축을 기준으로 회전하는 힘

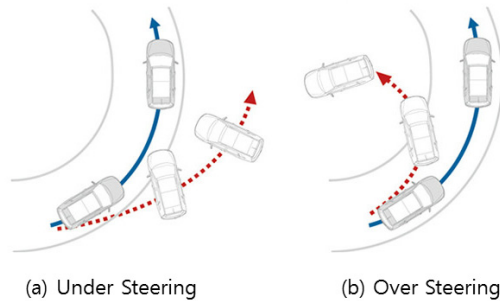


Figure 2. Under steering and over steering

분석 방법론

1. 메타분석의 정의

메타분석은 기존연구를 분석하는 방법으로, 동일하거나 유사한 주제로 수행된 연구결과를 통합하는 방법이다. 즉, 메타분석은 일관적이지 않은 연구 결과들 속에서 모든 연구결과를 융합하여 거시적이며 포괄적이고 일반적인 결론을 도출하는 통계적 방법을 의미한다(Kontopantelis et al., 2009). 메타분석을 이용하면 동일 연구주제 하에서 다양한 연구결과를 체계적으로 통합하여 일반화된 신뢰성 높은 효과 추정치를 도출할 수 있으며, 실험환경에 차이가 있는 독립적인 연구들을 종합하여 일반화 할 수 있다(Jin, 2015). 또한 메타분석으로 도출된 실험 결과는 연구 결과들의 집합이므로 개별 연구의 표본 크기보다 큰 표본크기를 갖게 되어, 이는 한정된 결과 값 보다 신뢰할 수 있고, 높은 통계적 검증력을 갖는 장점이 있다(Pillemer et al., 1980).

2. 메타분석의 수행 절차

메타분석을 실시하기 위해서는 연구 목적 및 변수를 설정하고 연구 목적과 변수에 적합한 논문, 보고서를 수집해야 한다. 수집된 논문, 보고서의 연구결과는 개별 효과크기로 수량화해야 하며, 각 연구의 개별 효과크기를 결합하기 위해 통계적 모형을 채택하고 평균 효과크기를 추정한다. 선택된 통계적 모형을 이용하여 메타분석을 실시하고 평균 효과크기를 도출하며, 개별 연구로부터 도출된 효과크기의 신뢰성을 보장하기 위해 개별 효과크기들 간의 동질성 검증을 실시한다. 본 연구에서는 통계 소프트웨어인 Stata를 이용하여 메타분석을 수행하였다.

1) 효과크기 산출

효과크기란 동일한 주제를 대상으로 시행된 연구 결과를 비교·통합할 수 있도록 표준화된 척도로 수량화한 값이다. 즉, 효과크기는 비교하려는 집단 사이의 차이를 나타내는 표준화 된 지표이다. 효과크기가 0이면 비교 집단 간의 차이(연관성)가 없다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 효과크기 산출하기 위해 표준화된 상관계수와 승산비를 제시하였다. 이 때, 표준화된 상관계수는 두 연속변수 사이의 관계정도를 나타내는 지수이고, 승산비는 비교대상간의 관계를 수치로 나타낸 값이다. 승산비(Odds Ratio)는 Equation 1과 같이 1을 기준으로 1보다 크면 효과적도와 ESC 시스템의 관계가 양의 관계, 1보다 작으면 음의 관계로 해석된다. 예를 들어 차량에 ESC 장착 시 사고율이 36% 감소하면 승산비는 0.64로 도출된다.

$$Odd Ratio = \frac{P}{1-P} \quad (1)$$

여기서, P : 사건발생확률

연구결과로 제시되는 효과크기는 직관적으로 이해하기 어렵기 때문에 효과크기 표현방식 별로 small, medium, large로 구분한다(Lipsey, 2001; Oh, 2002). 효과크기의 구분은 메타분석에 직접적으로 활용되지는 않지만, 다양한 연구결과를 수집할 때, 효과적도에 대한 직관적인 효과정도를 파악 할 수 있는 용도로 활용 할 수 있다. 효과크기 표현방식 별 효과크기의 정도를 Table 1에 제시하였으며, 효과크기 표현방식 중 표준화된 상관계수는 r , 승산비는 Odds Ratio로 표기하였다.

Table 1. Classification of effect size

Class	r	Odds Ratio
Large	$0.24 < r \leq 0.37$	$2.50 < OR \leq 4.30$
Medium	$0.10 < r \leq 0.24$	$1.50 < OR \leq 2.50$
Small	$r \leq 0.10$	$OR \leq 1.50$

2) 통계적 모형 선택

메타분석에서는 각 연구의 효과크기들을 결합하고 통합효과크기를 추정하기 위한 통계적 모형이 필요하다. 메타분석의 통계적 모형은 고정효과모형(Fixed Effect Model)과 랜덤효과모형(Random Effect Model)이 존재한다. 우선 고정효과모형은 각 연구의 효과크기는 같은 모집단에서 얻어졌다는 동질성을 가정한다. 또한 개별 연구 결과의 차이는 표본추출에서 생기는 표준편차로부터 기인한다고 가정한다. 따라서 고정효과모형은 연구 내 분산만을 고려하기 때문에 도출된 통합 효과크기는 분석에 사용된 연구에 한정하여 설명이 가능하다(Jin, 2015). 랜덤효과모형은 개별 연구마다 효과크기가 하나씩 존재한다는 가정을 기반으로 하는 통계모형이다. 연구 간의 이질성을 고려하고 연구 내 분산뿐만 아니라 연구 간 분산을 효과크기에 반영한다.

메타분석의 통계적 모형 선택 시, 효과크기가 동질하다고 도출되어도 분석자가 연구 특성의 차이를 고려하여 랜덤효과모형을 선택할 수 있다(Choi, 2016). 따라서 본 연구에서는 수집한 연구들 간의 이질성이 존재함을 가정하여 랜덤효과모형을 사용하였다.

3) 승산비의 통합 효과크기 산출

본 연구에서는 ESC 시스템 장착에 따른 안전성 개선 효과 평가지표를 사고율, 사망사고율, 통제상실 사고율로 설정하여 이에 대한 승산비를 이용하여 효과크기를 산출하였다. 산출된 개별 효과크기들을 승산비의 통합 효과크기로 변환하여 최종적인 결과를 분석하였다. Figure 3에 표준화된 효과크기를 산출하는 과정을 제시하였다. 통합 효과크기를 산출하기 위해 개별 연구 결과를 승산비로 산출하고 표준화된 상관계수로 변환한다. 표준화된 상관계수 변환식은 Equation 2와 같다.

$$r = \frac{OR^{\frac{1}{2}} - 1}{OR^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (2)$$

여기서, r : 표준화된 상관계수

OR (Odds Ratio) : 승산비

위 식에서 산출된 표준화된 상관계수와 가중치를 적용한 통합 효과크기를 산출한다. 가중치는 개별 연구마다 표본의 크기, 연구 가정사항 등이 상이하기 때문에 부여한다. 가중치와 통합상관계수 효과크기 산출 식은 Equation 3과 같다.

$$w = \frac{1}{STD^2}$$

$$ES_r = \frac{1}{STD^2} \times r$$
(3)

여기서, w : 가중치
 STD : 표준편차
 ES_r : 통합 상관계수 효과크기
 r : 표준화된 상관계수

마지막으로 표준화된 상관계수로 표시된 통합상관계수 효과크기를 승산비로 나타낸 통합 효과크기로 변환하였다. 통합승산비 효과크기 변환 식은 Equation 4와 같다.

$$ES_{OR} = \left(\frac{1 + ES_r}{1 - ES_r} \right)^2$$
(4)

여기서, ES_{OR} : 통합 승산비 효과크기
 ES_r : 통합상관계수 효과크기

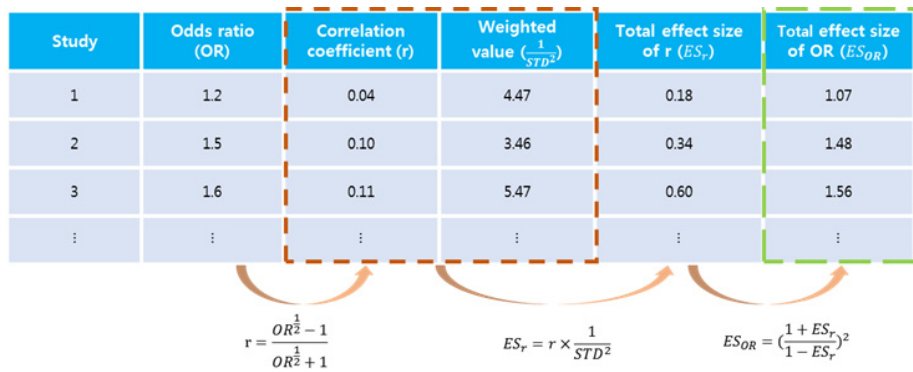


Figure 3. Estimation of total effect size of by transforming odds ratio

4) 효과크기의 동질성 검증

메타분석을 위해 수집된 개별 연구는 연구의 조건, 대상, 가정사항 등이 동일하지 않기 때문에 개별 연구 결과의 효과크기 이질성이 존재할 수 있다. 따라서 도출된 효과크기의 신뢰성을 보장하기 위해 개별 효과크기들 간의 동질성 검증이 반드시 필요하다(Jang et al., 2011).

동질성 검증 결과 개별 연구의 효과크기가 서로 이질성이 있는 경우 랜덤효과모형을 채택해서 분석하여야 하고 이질성이 없는 경우 고정효과모형을 활용한다. 동질성 검사를 위해 사용되는 방법은 Cochran's Q와 Higgin's I²이 있다. Cochran's Q는 메타분석에 사용된 연구의 수가 충분하지 않을 때는 낮은 검증력을 보이고 연구의 수가 많아지면 지나치게 높은 검증력을 보인다. 따라서 Cochran's Q 방법을 이용하여 동질성 검사를 실시하는 경우 해석에 주의해야 한다. Cochran's Q의 식은 Equation 5에 제시하였다.

$$Q = \sum_{i=1}^n (ES_i - \overline{ES})^2 \times w_i \quad (5)$$

여기서, Q : x^2 통계량

ES_i : 개별 연구의 효과크기

\overline{ES} : 통합 효과크기

w_i : 개별 효과크기 분산의 역수

Higgin's I^2 방식은 메타 분석에 포함되는 연구들의 수와는 관련 없는 통계값으로 계산된다. I^2 이 25%보다 낮으면 낮은 이질성, 50%이면 중간정도의 이질성, 75% 이상이면 높은 이질성을 가지는 것으로 해석하며, Higgin's I^2 의 식은 Equation 6과 같다.

$$I^2 = \frac{Q - df}{Q} \times 100 \quad (6)$$

여기서, Q : x^2 통계량

df : x^2 통계량의 자유도

문헌 수집 및 고찰

1. 문헌 수집 및 선정

메타분석은 개별 연구들의 특성 및 연구결과를 종합하여 하나의 효과크기로 통합하는 통계적 분석방법이며, 메타분석을 실시하기 위해서는 통합하고자 하는 연구주제와 관련된 선행 연구들의 수가 충분하여야 한다(Shin et al., 2015; Kang, 2015). 따라서 본 연구에서는 ESC 장착에 따른 교통안전성 효과를 키워드로 선정하여 여러 연구 결과를 수집하였다. ESC의 교통안전성에 관련된 문헌 수집 결과, ESC 장착에 따른 교통 사고율 변화와 관련된 연구가 주로 수집되었다. 메타분석을 위해 수집된 연구들의 분석결과 값은 승산비(Odd Ratio)로 정리하였다. 승산비는 1을 기준으로 1보다 크면 ESC 시스템 장착 유무와 효과척도의 관계가 양의 관계, 1보다 작으면 음의 관계로 해석된다.

논문 수집 시, 국내 논문은 한국교육학술정보원 학술연구정보서비스(RISS), 한국학술정보(KISS), 누리미디어(DBPIA) 등을 검색하여 연구재단 등재 학술지에 게재된 논문을 선정하였다. 국외 논문은 SCI, SCIE급의 학술지(IEEE, TRR, TRC 등) 및 기관보고서(NAHSC, PATH등)에 게재된 논문이나 보고서를 선정하였다. 자료 수집 결과, 총 191건의 연구결과를 수집하였으며, 연구결과물 중 실험군과 대조군이 명확하게 명시되어 있지 않은 차선이탈사고(Lane Departure Crashes)와 최대조향각(Max Steering Angle)을 사용한 34건의 연구결과를 제외하고 사고율(Accident Rate), 사망사고율(Fatal Crash Rate), 통제상실 사고율(Loss of Control Crash Rate)을 사용한 157건의 연구결과를 최종 분석 자료로 선정하였다. Table 2에 수집된 자료를 효과척도로 정리하여 제시하였다. 저널별 수집 건수를 살펴보면 SCI(E) 저널의 논문 연구가 79건, 보고서의 연구가 67건으로 전체 수집 건수의 76%를 차지하였다. 연도 별로 살펴보면 2010년도 이전의 연구건수는 179건, 이후의 연구건수는 12건으로 대부분의 ESC 안전성 관련 연구가 2010년 이전에 수행되었다. 또한 현장 자료가 113건으로 전체 연구 조건의 60%를 차지하였다. 연구결과 수집 건수를 저널, 연구년도, 실험환경, 사고유형에 대한 특성을 구분하여 Figure 4에 제시하였다. 191건의 조사 자료 중, 113건은 현장조사를 통한 분석 결과이며, 78건은 시뮬레이션 분석을 통한 결과를 수집하였다. 또한, 대부분의 연구는 전체 사고를 대상으로 분석하였으며, 차량 단독사고와 다중추돌사고에 대한 비중은 높지 않았다. ESC

의 효과는 실험환경, 방법, 차종, 사고유형 등에 의해 차이가 나타날 수 있으나, 다양한 실험조건에 의한 효과분석에는 자료의 한계가 있기 때문에, 본 연구에서는 효과척도만을 구분하여 메타분석을 수행하였다.

Table 2. Summary of collected relevant studies

Measures of Effectiveness	Number of Cases	Total Number of Cases	Number of Analysis Cases
Accident Rate	98	191	157
Fatal Crash Rate	39		
Loss of Control Crash Rate	20		
Lane Departure Crashes	18		-
Maximum Steering Angle	16		

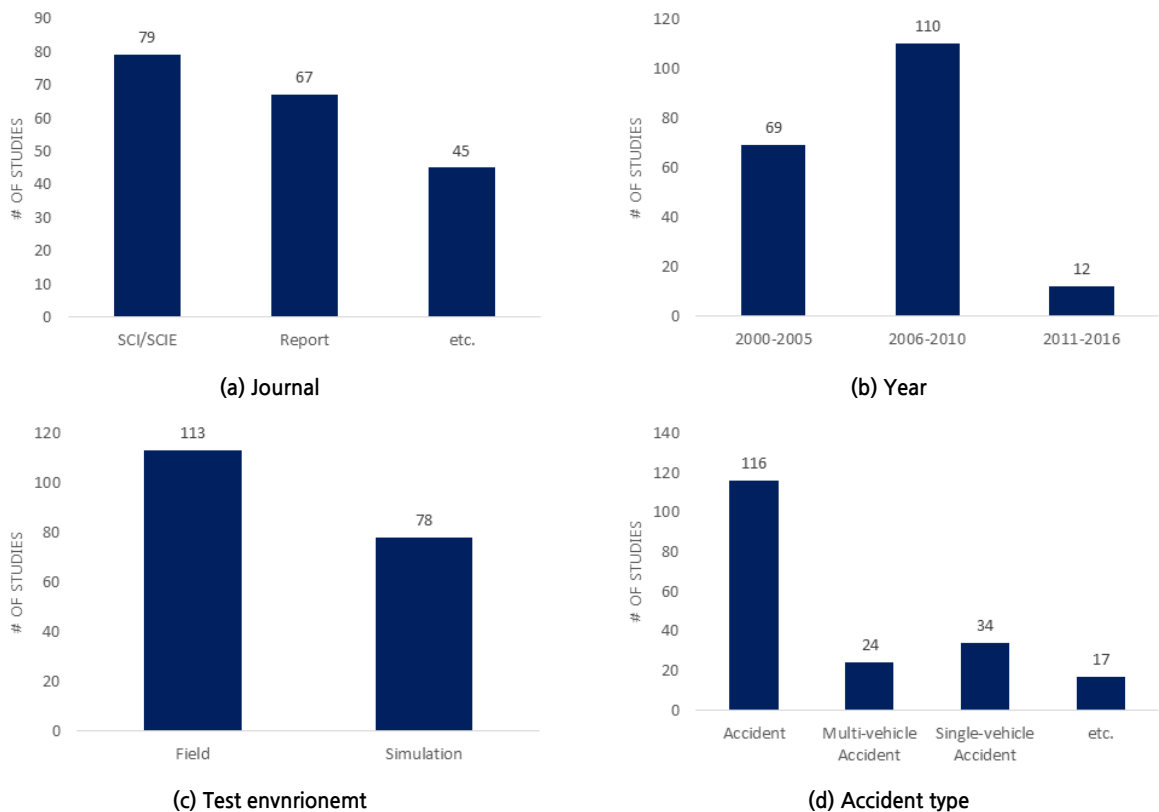


Figure 4. Characteristics of collected studies

2. 문헌 고찰

1) 사고율

다양한 연구에서 교통안전 측면에서의 ESC 장착 여부에 따라 실제 사고율 차이를 분석한 연구결과를 제시하였다. Masami Aga et al.(2003)은 연구 진행시 사고 유형의 구분 없이 차종을 승용차로 한정하여 ESC의 효과를 분석하였다. 또한 미국 및 유럽에서 특정 지역에 한정하여 ESC 장착과 교통 사고율 감소의 관계를 도출하기 위한 다양한 연구가 수행되었다(Farmer, 2004; Bahouth, 2005; Baum et al., 2007). Lie et al.(2004)은 날씨조건을 3가지로 구분하여 ESC 장착 여부에 따른 사고율 감소 효과를 분석하였다. 연구 결과, ESC 장착에 따른 사고율 감소효과가 일

반 상황에서는 16.7%, 우천 상황에서는 31.5%, 빙설 상황에서는 38.2%로 분석되었다. 또한 Page et al.(2005)은 노면상태를 2가지로 구분하여 연구를 실시하였다. 분석결과, ESC 장착 시 습윤한 노면에서는 55%의 사고율 감소효과를 보였고, 건조한 노면에서는 14%만큼 사고율 감소효과가 발생하는 것으로 분석되었다. Dang(2004)은 설문조사를 통하여 승용차와 SUV로 구분하고 ESC 장착에 따른 사고율 감소 효과를 분석하였다. ESC 장착 시, 승용차의 경우 35%의 사고율 감소 효과를 보였고 SUV의 경우 67%의 사고율 감소 효과가 확인되었다. Padmanaban(2007)은 차량단독사고에 관련하여 연구하였다. 사고 유형은 차량 전복사고와 차량 비전복사고, 기타 사상사고로 구분하였고, 차량은 승용차와 트럭으로 분류하여 ESC 장착에 따른 사고율 감소효과를 확인하였다. 대표적으로 ESC 장착 시 트럭의 차량 전복 사고율 감소효과는 56%로 분석되었다. Scully and Newstead(2008)은 ESC 장착 유무에 따른 사고율을 사고의 유형에 따라 차량단독사고(Single Vehicle Accident), 차대차사고(Multi Vehicle Accident)로 구분하여 연구하였다. 분석결과, ESC 장착 시 차량단독사고율이 감소하는 것을 확인하였다.

2) 사망사고율

사고 유형 및 차량의 구분 없이 ESC 장착에 따른 사망사고 감소효과를 분석한 연구가 수행되었다(Sferco et al., 2001; Page et al., 2005; Farmer, 2006; Dang, 2004; Dang, 2007). Blower and Woodrooffe(2012)은 트럭의 ESC 장착에 따른 안전성 효과에 대하여 연구하였다. 분석결과 트럭에 ESC 장착 시 사망사고율이 17% 감소하는 것으로 분석되었다. Lie et al.(2006)은 노면 상태를 구분하여 ESC 장착 시 사망사고율 변화에 대한 연구를 수행하였다. 분석결과 차량에 ESC 장착 시 일반적인 상황에서는 사망사고율 21.6% 감소효과를 보였고 노면이 습윤한 상황에서는 사망사고율 56.2% 감소효과를 확인하였다. Krafft et al.(2009)은 사고의 유형을 차량단독사고, 차대차사고로 구분하여 ESC 장착에 따른 사망사고율 감소효과를 분석하였다. 분석결과 ESC 장착의 사망사고율 감소 효과가 사고 유형에 관계없이 존재하는 것이 확인되었다. 특히 ESC 장착 시 사망사고율 감소효과는 차대차사고에서 26.9%, 차량단독사고에서는 40.7%로 분석되어, ESC 장착에 따른 사망사고율 감소효과가 차량단독사고에서 차대차사고의 경우보다 높은 것으로 나타났다. 그러나 Padmanaban(2007)의 연구에서는 사고 유형이 차대차사고인 경우 ESC 장착이 사망사고율 변화에 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다. 또한 Scully and Newstead(2007)의 연구에서도 차종은 4륜구동 차량, 사고 유형은 차대차사고인 경우 ESC 장착에 의한 사망사고율 감소효과는 무의미하다고 제시하였다.

3) 통제불능 사고율

통제상실 사고는 차량 제어 능력상실이 원인이 되어 발생한 사고를 의미한다. Papelis et al.(2010)은 ESC 장착에 따른 통제상실 사고율 감소 효과를 분석하였다. 분석결과 ESC 장착 시 통제상실 사고율이 32% 감소하는 것을 확인하였다. 또한 Strandroth et al.(2012)의 분석결과, ESC 장착 시 통제상실 사고율이 24% 감소하는 것으로 분석되었다. Watson et al.(2005)은 도로 환경, 날씨 등 다양한 연구 조건에서 ESC 장착이 통제상실 사고율 감소에 미치는 영향을 연구하였다. 분석결과, ESC 장착이 통제상실 사고율을 줄이는 것으로 확인되었고, 특히 바람이 부는 경우 ESC 장착 시 통제상실 사고율이 76.9% 감소하는 것으로 분석되었다. Paul et al.(2006)의 연구에서는 노면 상태가 건조한 경우보다 습윤한 경우에 ESC 장착의 통제상실 사고율 감소효과가 20% 더 높고, 승용차보다는 SUV일 경우 ESC 장착에 따른 통제상실 사고율 감소 효과가 10% 높은 것으로 분석되었다. Markkula et al.(2013)은 ESC 장착 여부에 따른 통제상실 사고율 변화를 운전 숙련자와 비숙련자로 구분하여 연구하였다. 분석결과 ESC 장착 시 비숙련자의 경우 15%의 통제상실 사고율 감소효과를 보였고, 숙련자의 경우 통제상실 사고율이 12% 감소하는 것으로 분석되었다.

4) 시사점

본 장에서는 수집된 문헌을 효과적도에 따라 사고율, 사망사고율, 통제상실 사고율로 구분하였다. 기존문헌 고찰 결과, 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 ESC의 안전성 개선효과에 관련된 연구가 사고 유형, 차종, 실험 방법 등을

구분하여 진행되었다. 분석결과에 따르면, ESC 장착에 따른 안전성 효과는 실험 조건에 따라 상이하게 분석되었고, 도로 기하구조, 차량의 ESC 장착 비율 등 변수에 따라 사고율 감소 효과도 영향을 받는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 ESC 시스템 효과분석 연구의 종합적이고 객관적인 통합결과를 제시하기 위하여 메타분석을 실시하고자 하며, 이를 통해 교통안전성 측면에서의 ESC 시스템 적용 효과를 사고율, 사망사고율, 통제상실 사고율 감소효과를 통해 제시하고자 한다.

분석결과

1. 사고율 통합 효과분석

사고율 측면의 통합 효과분석은 랜덤효과모형을 이용하여 사고율 측면의 연구결과 91건을 활용하여 효과분석을 실시하였다. 사고율 측면의 효과 크기 분석결과, 통합상관계수 효과크기는 -0.03 으로 도출되어 1보다 작아 음의 관계이므로 ESC 시스템 적용 시 사고율 감소에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 통합승산비 효과크기는 0.90 으로 분석되어 ESC 시스템 적용 시 사고율이 10% 감소하는 것으로 분석되었다. ESC 시스템을 적용한 실험집단과 통제집단의 관련 정도를 파악하기 위한 유의확률은 $z = 10.21$ ($p = 0.03$)로 나타나 두 집단의 관련 정도는 유의한 것으로 분석되었다.

*Cochran's Q*를 이용한 효과크기의 동질성 검증 결과 χ^2 은 1022.87이고 유의확률 $p = 0.00$ 으로 연구들 사이의 효과크기가 서로 차이가 있는 것으로 도출되었다. *Higgin's I^2*을 이용하여 동질성 검증을 한 결과 I^2 값이 90.6%로 분석되어 각 연구들은 높은 이질성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 랜덤효과모형을 사용하여 도출한 효과크기 값은 유의미한 것으로 판단된다. 사고율 측면의 효과크기 분석결과는 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Result of average effect size of traffic accident rate

Class	Effect Size	95% Confidence Interval	
		lower	upper
Average ES_c	-0.03	-0.03	-0.02
Average ES_{OR}	0.90	0.84	0.95

Heterogeneity chi-squared=1022.87 (d.f.=97) $p = 0.00$, I-squared(variation in ES attributable to heterogeneity)=90.6%, Test of ES=0 : $z = 10.21$ $p = 0.00$

2. 사망사고율 통합 효과분석

사망사고율에 관한 39건의 연구결과를 활용하여 랜덤효과모형을 이용해 효과분석을 실시한 결과, 통합상관계수 효과크기가 -0.11 로 도출되어 1보다 작아 음의 관계이므로 ESC 시스템 적용이 사망사고율 감소에 영향을 끼치는 것으로 분석되었다. 또한 통합승산비 효과크기는 0.64 로 도출되어 ESC 시스템 적용 시 사망사고율이 36% 감소하는 것을 확인하였다. 실험집단과 통제집단의 관련 정도를 확인하기 위한 유의확률은 $z = 9.93$ ($p = 0$)로 분석되어 두 집단의 관련 정도는 유의미한 것으로 판단되었다.

*Cochran's Q*를 이용한 효과크기의 동질성 검증 결과 χ^2 은 38.30, 유의확률 $p = 0.456$ 으로 연구들 사이의 효과크기가 서로 차이가 없는 것으로 도출되었다. *Higgin's I^2*을 이용하여 동질성 검증을 한 결과 I^2 값이 0.8%로 분석되어 각 연구들은 낮은 이질성을 보이는 것으로 나타나 사망사고율 측면의 동질성 검증 결과 연구들이 동질한 것으로 분석되었다. 그러나 분석가가 연구 조건이 이질적으로 판단할 경우 랜덤효과모형을 사용할 수 있기 때문에 본 연구에서는 다양한 실험조건에서 수집된 연구결과들이 이질적이라 판단하여 랜덤효과모형을 활용하여 메타분석에 적용하였으며, 랜덤효과모형을 통한 사망 사고율 측면의 효과크기 분석결과를 Table 4에 제시하였다.

Table 4. Result of average effect size of traffic fatality

Class	Effect Size	95% Confidence Interval	
		lower	upper
Average ES_r	-0.11	-0.14	-0.09
Average ES_{OR}	0.64	0.51	0.76

Heterogeneity chi-squared=38.30 (d.f.=38) p=0.456, I-squared(variation in ES attributable to heterogeneity)=0.8%, Test of ES=0 : z=9.93 p = 0.00

3. 통제상실 사고율 통합 효과분석

마지막으로, 통제상실 사고율과 관련된 연구결과 20건에 대하여 메타분석을 수행한 결과, 통제상실 사고율 측면 통합 효과분석에서는 상관계수의 효과크기가 -0.08로 나타나 1보다 작아 음의 관계이므로 ESC 시스템 적용이 통제상실 사고율 감소에 영향을 끼치는 것으로 확인되었다. 또한 승산비의 효과크기가 0.73으로 도출되어 ESC 시스템 적용 시 통제상실 사고율이 27% 감소하는 것으로 나타났다. 실험집단과 통제집단의 관련 정도를 확인하기 위한 유의확률은 $z = 2.33$ ($p = 0.02$)로 확인되어 두 집단의 관련 정도는 유의한 것으로 분석되었다.

Cochran's Q를 이용한 효과크기의 동질성 검증 결과 χ^2 은 4.20, 유의확률 $p=1.000$ 으로 연구들 사이의 효과크기가 서로 차이가 없는 것으로 도출되었다. Higgin's I²을 이용하여 동질성 검증을 한 결과 I²값이 0.0%로 분석되어 각 연구들은 낮은 이질성을 보이는 것으로 나타났다. 통제상실 사고율 측면의 동질성 검증 결과 연구들이 동질한 것으로 분석되었지만, 수집된 연구결과에 대한 실험방법, 차종, 사고유형, 제약조건 등이 동일한 조건에서 수행된 연구결과가 아니므로, 연구결과들이 이질적으로 판단하여 랜덤효과모형을 사용하여 분석하였으며, Table 5에 통제상실 사고율 측면의 효과분석 결과를 제시하였다.

Table 5. Result of average effect size of loss of control accident rate

Class	Effect Size	95% Confidence Interval	
		lower	upper
Average ES_r	-0.08	-0.14	-0.01
Average ES_{OR}	0.73	0.11	1.35

Heterogeneity chi-squared=4.20 (d.f.=38) p=1.000, I-squared(variation in ES attributable to heterogeneity)=0.0%, Test of ES=0 : z= 2.33 p = 0.02

결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 메타분석 기법을 통해 개별적인 연구결과를 통합하고 ESC 장착에 따른 효과를 교통안전성 측면에서 객관적으로 분석하였다. 분석을 위한 교통안전성 효과척도는 사고율, 사망사고율, 통제상실 사고율로 설정하였으며, 효과척도 별 승산비의 효과크기를 이용해 ESC의 교통안전성 개선효과를 분석하였다. 자료 수집은 차량 ESC 장착 여부에 따라 교통안전성 향상에 관련된 연구를 실시한 국내·외 연구에 한하여 수집하였다. 국내 논문은 연구재단 학술지에 게재된 논문을 선정하였고 국외논문은 SCI(E)급의 학술지 및 기관보고서에서 선정하였다.

ESC 장착에 따른 효과에 관한 191건의 연구 결과물을 수집하였고, 수집된 개별 연구 결과들을 사고율, 사망사고율, 통제상실 사고율로 구분하여 통합하고 정리하였다. 사고율, 사망사고율, 통제상실 사고율을 평가지표로 사용한 연구는 각각 98건, 39건, 20건이 수집되었으며, 개별 연구 결과에 따른 사고율, 사망사고율 및 통제상실 사고율 감소 결과를 승산비로 변환하였다. 본 연구에서는 수집된 개별 연구 간의 이질성이 존재하는 것으로 가정하고 변환된 승산비를 랜덤효과모형을 이용하여 통합 승산비 효과크기로 도출하였다. 또한 수집된 연구 결과들간의 동질성 검정을

실시하여 이질성 존재 여부를 판단하였다.

사고율 측면에서는 통합 승산비 효과크기가 0.90으로 분석되어 ESC 시스템 적용 시 사고율이 10%감소하는 것으로 도출되었고, 사망사고율 측면에서는 통합 승산비 효과크기가 0.64로 도출되어 사망사고율이 36% 감소하는 것으로 도출되었다. 또한 통제상실 사고율 측면에서는 통합 승산비 효과크기가 0.73으로 나타나 ESC 시스템 적용 시 통제상실 사고율이 27% 감소하는 것으로 도출되었다.

본 연구의 신뢰성을 높이기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다. 첫째, 채택된 연구들은 ESC 장착에 따른 사고율 변화에 대한 효과분석이 대다수였다. 그러나 교통사고는 복합적인 요인으로 인해 발생하기 때문에 사고율뿐만 아니라 최대 조향각도, 속도 등 다양한 효과척도에 대한 분석이 필요하다. 둘째, ESC 장착에 따른 효과에 대한 연구를 추가적으로 수집하여 메타분석의 신뢰도를 높여야 한다. 특히 국내에서는 ESC 효과분석에 대한 정량화된 결과가 아닌 사고감소 여부, 효과여부 등을 제시하는 연구가 대부분으로, 메타분석에는 활용이 어려워 채택된 연구들 중 국내 자료의 수가 미비하였다. 따라서 향후 연구 시 국내에서 진행된 ESC 장착 효과에 관련된 연구를 수집할 필요가 있으며, ESC 관련 연구를 메타분석이 아닌 다양한 연구방법론을 활용하여 분석할 필요가 있다. 셋째, 동일한 목적을 지닌 연구일지라도 실험조건, 환경 등이 연구 결과에 영향을 미칠 수 있기 때문에 추가적인 연구 결과를 활용하여 효과척도에 따라 다양한 연구조건, 실험조건 등을 반영한 메타분석 결과를 도출할 필요가 있다. 마지막으로, 교통사고는 차량의 성능 뿐 아니라 운전자의 특성에 의해서 좌우될 수 있기 때문에 운전자에 대한 분석이 필요하다. 본 연구의 결과는 상용차 ESC 장착 의무화와 관련 법 정비 및 제도 개선을 유도하고 향후 관련 기술 개발 전략 수립 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport. It was also supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(Project No.: 16PTSI-C054118-08).

알림: 본 논문은 대한교통학회 제73회 학술발표회(2015.09.16)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

REFERENCES

- Aga M., Okada A. (2003), Analysis of Vehicle Stability Control (VSC)'s Effectiveness From Accident Data, In Proceedings of the 18 th ESV Conference, 541.
- Bahouth G. (2005), Real World Crash Evaluation of Vehicle Stability Control (VSC) Technology, In Annual Proceedings/Association for the Advancement of Automotive Medicine, 49, 19.
- Baum H., Grawenhoff S., Geißler T. (2007), Cost-Benefit Analysis of the Electronic Stability Program (ESP), Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 78(3), 192.
- Blower D., Woodrooffe J. (2012), Survey of the Status of Truck Safety: Brazil, China, Australia, and The United States, Ann Arbor, The University of Michigan, Transportation Research Institute.
- Choi J. H. (2016), A Meta Analysis on the Effectiveness of Road Safety Features and Turn Signal: Focusing on Signalized Intersection, Master's Thesis, Seoul National University.
- Dang J. N. (2004), Preliminary Results Analyzing the Effectiveness of Electronic Stability Control (ESC) Systems (No.HS-809 790), US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- Dang J. N. (2007), Statistical Analysis of the Effectiveness of Electronic Stability Control (ESC) Systems-Final Report

(No.HS-810 794).

- Farmer C. M. (2004), Effect of Electronic Stability Control on Automobile Crash Risk, *Traffic Injury Prevention*, 5(4), 317-325.
- Farmer C. M. (2006), Effects of Electronic Stability Control: An Update, *Traffic Inj. Prev.*, 7(4), 319-324.
- Fay P., Sferco R., Frampton R. (2003), Vehicle Rollover- An Important Element in Multiple Impact Crashes, In *Proceedings of the 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Nagoya, Japan.
- Green P. E., Woodrooffe J., Oodrooffe J. (2006), The Effectiveness of Electronic Stability Control on Motor Vehicle Crash Prevention.
- Høye A. (2011), The effects of Electronic Stability Control (ESC) on crashes- An Update, *Accid. Anal. Prev.*, 43(3), 1148-1159.
- Jang B. S., Shin I. S. (2011), The Effect of Self-regulated Program on Elementary School Students: A Meta-analysis, *The Journal of Curriculum Studies*, 29(4), 187-211.
- Jin Y. A. (2015), *Meta-analysis Using Stata*, Korea University Press, 9-131.
- Kang H. (2015), *Statistical Considerations in Meta-Analysis*, *Hanyang Med Rev*, 35, 22-32.
- Kontopantelis E., Reeves D. (2009), MetaEasy: A Meta-analysis Add-in for Microsoft Excel, *J. Stat. Softw.*, 30(7), 1-25.
- Korea Transportation Safety Authority, <http://blog.naver.com/autolog/220575954000>, 2016.12.15.
- Krafft M., Kullgren A., Lie A., Tingvall C. (2009), From 15% to 90% ESC Penetration in New Cars in 48 Months-the Swedish Experience, In *21st International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*.
- Lie A., Tingvall C., Krafft M., Kullgren A. (2004), The Effectiveness of ESP(Electronic Stability Program) in Reducing Real Life Accidents, *Traffic Inj. Prev.*, 5(1), 37-41.
- Lie A., Tingvall C., Krafft M., Kullgren A. (2006), The Effectiveness of Electronic Stability Control (ESC) in Reducing Real Life Crashes and Injuries, *Traffic Inj. Prev.*, 7(1), 38-43.
- Lipsey M. W. (1992), *Juvenile Delinquency Treatment: A Meta-analytic Inquiry Into the Variability of Effects, Meta-analysis for Explanation: A Casebook*, 83-127
- Markkula G., Benderius O., Wolff K., Wahde M. (2013), Effects of Experience and Electronic Stability Control on Low Friction Collision Avoidance in a Truck Driving Simulator, *Accid. Anal. Prev.*, 50, 1266-1277.
- Oh S. S. (2002), *Meta-analysis: Theory and Practice*, Konkuk University Press, 16-19.
- Padmanaban J. (2007), Field Performance Study of Electronic Stability Control System Effectiveness in US Fatal Crashes, In *2007 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact*, 19-21.
- Padmanaban J., Shields L. E., Scheibe R. R., Eyges V. E. (2008), A Comprehensive Review of Rollover Accidents Involving Vehicles Equipped With Electronic Stability Control (ESC) Systems, In *Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference*, 52, 9.
- Page Y., Cuny S. (2005), Is ESP Effective on French roads?, *Berichte Der Bundesanstalt Fuer Strassenwesen, Unterreihe Fahrzeugtechnik*, 55.
- Page Y., Foret-Bruno J., Cuny S. (2005), Are Expected and Observed Effectiveness of Emergency Brake Assist in Preventing Road Injury Accidents Consistent, 5, 268.
- Papelis Y. E., Watson G. S., Brown T. L. (2010), An Empirical Study of the Effectiveness of Electronic Stability Control

- System in Reducing Loss of Vehicle Control, *Accid. Anal. Prev.*, 42(3), 929-934.
- Pillemer D., Light R. (1980), Synthesizing Outcomes: How to Use Research Evidence From Many Studies, *Harv. Educ. Rev.*, 50(2), 176-195.
- Scully J., Newstead S. (2007), Preliminary Evaluation of Electronic Stability Control Effectiveness in Australasia (No.271), Monash University Accident Research Centre.
- Scully J., Newstead S. (2008), Evaluation of Electronic Stability Control Effectiveness in Australasia, *Accid. Anal. Prev.*, 40(6), 2050-2057.
- Sferco R., Page Y., Le Coz Y., Fay P. (2001), Potential Effectiveness of the Electronic Stability Programs (ESP), What European Field Studies Tell Us?, 17th ESV Conference, Amsterdam, The Netherlands, National Highway Traffic Safety Administration
- Shin H., Jo S. J., Kim D. H., Kwon O., Myung S. K. (2015), Efficacy of Interventions for Prevention of Chemotherapy-Induced Alopecia: A Systematic Review and Meta-Analysis, *International Journal of Cancer*, 136(5), 442-454.
- Strandroth J., Rizzi M., Olai M., Lie A., Tingvall C. (2012), The Effects of Studded Tires on Fatal Crashes With Passenger Cars and the Benefits of Electronic Stability Control (ESC) in Swedish Winter Driving, *Accid. Anal. Prev.*, 45, 50-60.
- Watson G., Papelis Y., Ahmad O. (2006), Design of Simulator Scenarios to Study Effectiveness of Electronic Stability Control Systems, *Transp. Res. Rec.*, Journal of the Transportation Research Board, 1980, 79-86.