

구간단속장비 설치 효과 분석 및 사고예측모형 개발

김다예* · 이호원** · 홍경식***†

A Study on Effectiveness Analysis and Development of an Accident Prediction Model of Point-to-Point Speed Enforcement System

Da Ye Kim* · Ho Won Lee** · Kyung Sik Hong***†

†Corresponding Author

Kyung Sik Hong

Tel : +82-33-749-5447

E-mail : kshong@koroad.or.kr

Received : July 10, 2019

Revised : September 16, 2019

Accepted : October 11, 2019

Abstract : According to the National Police Agency, point-to-point speed enforcement system is being installed and operated in 97 sections across the country. It is more effective than other enforcement systems in terms of stabilizing the traffic flow and inhibiting the kangaroo effect. But it is only 5.1% of the total enforcement systems. The National Police Agency is also aware that its operation ratio is very low and it is necessary to expand point-to-point speed enforcement system. Hence, this study aims to provide the expansion basis of the point-to-point speed enforcement operation through analysis of the quantitative effects and development the accident prediction model. Firstly, this study analyzed the effectiveness of point-to-point speed enforcement system. Naive before-after study and comparison group method(C-G Method) were used as methodologies of analyzing the effectiveness. The result of using the naive before-after study was significant. Total accidents, EPDOs and casualty crashes decreased by 42.15%, 70.64% and 45.30% respectively. And average speed and the ratio of exceeding speed limit decreased by 6.92% and 20.50%p respectively. Moreover, using the C-G method total accidents, EPDOs and casualty crashes decreased by 31.35%, 66.62% and 10.04% respectively. And average speed and the ratio of exceeding speed limit decreased by 3.49% and 56.65%p respectively. Secondly, this study developed a prediction model for the probability of casualty crash. It was dependant on factors of traffic volume, ratio of exceeding speed limit, ratio of heavy vehicle, ratio of curve section, and presence of point-to-point speed enforcement. Finally, this study selected the most danger sections to the major highway and evaluated proper installation sections to the recent installation section by applying the accident prediction model. The results of this study are expected to be useful in establishing the installation standards for the point-to-point speed enforcement system.

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : point-to-point speed enforcement, effectiveness analysis, C-G Method, accident prediction model, casualty crash, ratio of exceeding the speed limit

1. 연구 배경 및 목적

국내 무인교통단속장비는 1997년 전국 32개 지점에 도입되었으며, 교통사고 발생건수 및 사망자수의 현저한 감소 효과로 확대 설치되어 2019년 5월 기준 총 8,801대를 운영 중에 있다. 이 중 2007년에 최초 도입

된 구간단속장비는 현재 97개 구간에서 447대의 카메라를 운영하고 있으며, 사고감소 기여도에 비해 운영 비율이 전체 무인교통단속장비의 약 5.1%로 미미하여 확대 보급이 필요한 실정이다. 이와 관련하여, 경찰청에서는 교통류 안정화, 갱거루 효과 억제 등 사고 예방 효과가 큰 구간단속장비 확대 보급의 필요성을 인정하

*도로교통공단 교통공학연구처 선임연구원 (Department of Traffic Engineering, Korea Road Traffic Authority)

**도로교통공단 교통공학연구처 처장 (Department of Traffic Engineering, Korea Road Traffic Authority)

***도로교통공단 교통공학연구처 책임연구원 (Department of Traffic Engineering, Korea Road Traffic Authority)

고 있다. 그러나, 설치 지점 선정 시 정량적 설치 기준 없이 사고다발지점을 위주로 고려하고 있으며, 다양한 설치 주체와 예산의 한계 등을 이유로 대형사고가 발생한 후에야 설치되거나 필요한 구간에 설치되지 않는 사례가 발생하고 있어 설치 우선순위 산정 등 설치 기준 수립의 필요성이 대두되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 고속도로에 설치된 구간단속장비를 대상으로 공학적 평가 방법론을 적용하여 속도 및 교통사고 감소 효과에 대한 정량적 분석을 수행하고, 효과 분석 결과를 바탕으로 구간단속장비 설치 구간에 대한 사고예측모형 개발을 목적으로 하고 있다. 또한 개발된 사고예측모형을 구간단속장비 최근 설치 구간과 주요 고속도로에 적용하여 평가를 진행하였으며, 이를 통해 구간단속장비 설치 기준 수립을 위한 기초 및 확대 보급의 근거를 마련하고자 하였다.

2. 관련 기준 및 선행연구 검토

2.1 국내의 구간단속장비 설치 기준

국내의 경우 지방경찰청별 설치 기준에 활용 가능한 표준 지침이 없는 실정이며, 단속장비 종류에 관계 없이 사고건수, 사망자수, EPDO(Equivalent Property Damage Only, 대물피해환산계수) 등의 사고자료를 주요 선정 지표로 활용하고 있다. 강원/충북지방경찰청의 경우 최근 2~4년 간 사고건수(사망, 중상, 경상), 인접한 단속장비와의 거리, 도로현장 여건 등을 고려하고 있으며 대구지방경찰청의 경우 최근 3년간 사고건수(물피, 인피, 사망)를 EPDO로 산정하여 활용하고, 현장 조사를 통해 꼬리물기, 속도 분산, 인접한 단속장비와의 거리, 도로현장 여건 등을 고려하고 있다.

국외의 경우 호주, 뉴질랜드 등에서는 구간길이, 교통량, 사고, 속도에 대해 일부 기준을 제시하고 있다. 호주의 경우 구간길이가 6~75 km이며, 중차량을 기준으로 사고빈도 및 심각도, 제한속도 초과비율이 높은 곳에 설치하도록 하고 있다. 뉴질랜드는 구간길이는 최소 2 km 이상, AADT 15,000대/일 이상, 사고건수 및 사고심각도 등을 고려하도록 하고 있으며, 단속을 의도적으로 회피할 수 있는 구간(교차로 등)은 제외하도록 하고 있다^{1,2)}. 영국의 경우 구간길이 5~20 km, KSI(Killed or Seriously Injured) 사고가 구간 내 최소 3건 이상 발생한 구간을 고려하고 있으며^{3,4)}, 노르웨이는 구간길이 2~10 km, 평균속도가 제한속도에 비해 높고, 구간전체가 동일한 제한속도를 가지며 진출입이 없는 구간으로 설치 기준을 제시하고 있다⁵⁾.

2.2 구간단속장비 설치효과 분석 관련 연구

국내외 대부분의 선행 연구에서는 구간단속장비 설치 효과 분석 시 교통안전 및 운영 측면에서의 평가지표를 활용하고 있다.

교통안전 측면에서의 평가지표를 활용한 설치 효과 분석과 관련하여 Montella 외는 구간단속장비 설치 전·후 사고 감소 효과를 분석한 결과 전체사고는 31.2% 감소하였으며 심각한 사고는 55.6% 감소하는 것으로 나타났다⁶⁾.

윤일수 외는 비교그룹방법을 이용하여 무인 구간속도위반 단속시스템의 설치 효과 분석을 진행하였다. 연구 범위는 2008년에 설치된 3개 구간을 대상으로 설치 전·후 1년의 사고 건수를 대상으로 분석하였으며, 비교그룹방법에 의한 분석 결과 49.97%의 사고 감소 효과가 있는 것으로 나타났다⁷⁾.

호주(NSW GOVERNMENT, 2017)의 경우, 1997년에 무인교통단속장비를 최초 도입한 이후 구간단속은 화물차량에 의한 사고 발생구간 위주로 설치·운영하고 있다. 구간단속 시행 전·후 5년 간 교통사고 건수 비교 결과 사고 발생건수는 약 12%, 사망사고는 19%, 중상사고는 8% 감소하는 것으로 나타났다⁸⁾.

정용일 외는 구간단속시스템 운영 구간을 대상으로 사전 2년, 사후 3년에 대한 사고 자료를 비교그룹방법을 활용하여 사고감소 효과를 분석하였다. 사고 발생건수는 32.0%, 사상자 수는 17.1% 감소하는 것으로 나타났다으며 중상 이상 사고의 발생건수는 41.7%, 중상 이상 사고로 인한 사상자 수는 32.2% 감소하는 것으로 분석되어 심각한 사고에서 높은 감소 효과가 나타남을 알 수 있었다⁹⁾.

교통운영 측면에서의 평가지표를 활용한 설치 효과 분석과 관련하여 Cascetta 외는 구간단속장비 설치 전·후 혼잡 교통류 상태(병목현상)에 대해 분석한 결과 차량의 평균속도와 분산이 감소하였으며, 병목현상 또한 감소하는 것으로 나타나 구간단속장비 설치로 인해 교통류 안정 효과가 나타남을 알 수 있었다¹⁰⁾.

이호원 외는 미시령 동서관통도로를 중심으로 구간속도위반 단속장비 설치 전, 설치 후 및 철거 후의 구간통행속도와 교통사고 비교를 통해 설치 효과를 분석하였다. 분석 결과, 평균 구간통행속도가 약 21.4% 감소하였으며 구간단속장비를 터널입구부터 요금소 전방까지 전 구간에 설치하였을 경우 월간 교통사고가 45.9% 감소하였으나, 철거 후에는 설치 전에 비해 65.1% 증가한 것으로 분석되었다¹¹⁾.

박제진 외는 시스템 적용 전·후 속도 등 교통류 특성과 관련된 지표를 이용하여 구간단속장비의 효과 평

가를 수행하였다. 분석 결과, 시스템 설치 후 통행속도가 약 4.8% 감소하는 것으로 나타나 속도저감 효과가 있으며, 해당 구간의 교통류가 안정적인 흐름을 보이는 것으로 나타나 구간단속 운영 구간에 있어 교통류 안정화를 통한 교통안전성 제고 및 사고 감소에 효과가 있는 것으로 판단하였다¹²⁾.

2.3 시사점 및 본 연구의 차별성

설치 효과 분석 관련 선행 연구에서는 교통안전 측면의 사고와 교통운영 측면의 속도 등을 평가 지표로 분석을 진행하였다. 비교그룹방법 등을 통해 효과를 분석하였으며 연구 결과 사고 측면에서는 중상 및 사망 등 심각한 사고의 감소 효과가 높으며, 속도 측면에서는 단순 속도 감소 뿐만 아니라 교통류 안정화 효과 또한 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 다만, 사고 및 속도 관련 평가 지표를 보다 구체적으로 세분화하여 진행할 필요가 있으며, 효과 분석 시 발생할 수 있는 평균으로의 회귀 현상(Regression to the mean) 등의 영향을 최소화하기 위하여 분석의 시간적 및 공간적 범위를 확대할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 국내외 설치 기준 및 선행연구 검토 결과를 토대로 사고 및 속도 관련 평가지표를 세분화하여 선정하고, 단순비교방법과 비교그룹방법을 모두 활용하여 구간단속장비의 효과를 분석하고자 하였다. 사고 관련 평가지표는 전체사고건수, EPDO 및 인명피해사고건수를 선정하였으며, 속도 관련 평가지표는 평균속도와 제한속도 초과비율을 선정하였다. 분석 범위는 고속도로에 설치된 구간단속장비 전체를 대상으로 설치 전·후 최대 3년 간의 설치 효과를 비교 분석함으로써 효과 분석 결과의 신뢰성을 제고하고자 하였다. 또한 향후 구간단속장비 설치 기준 수립 시 활용을 위해 속도 및 교통량 등을 독립변수에 포함하는 사고예측모형을 개발하고 개발된 사고예측모형을 기반으로 설치 구간 적정성 여부 및 위험구간에 대한 평가를 진행하였다.

3. 구간단속장비 설치 효과 분석

3.1 자료 수집 및 분석 범위 설정

구간단속장비 효과 분석을 위해 2007년부터 2016년까지 전국 고속도로에 설치된 구간단속장비 31개 구간을 대상으로 자료를 수집하였다. 단, 진출입이 발생하여 구간단속장비 설치로 인한 효과로 판단하기 어려운 톨게이트나 램프, 인터체인지, 휴게소 등은 범위에서 제외하였다.

사고자료는 구간단속장비 정상 운영일을 기준으로 최소 1년에서 최대 3년까지 설치 전·후 동일기간 동안 개별 사고데이터 취득이 가능한 28개 구간을 대상 그룹으로 설정하고 자료를 수집하였으며, 비교그룹은 도로 및 교통조건이 유사한 대상구간의 상·하행 반대 방향 동일 구간으로 정의하고 이를 분석 범위에 포함하였다.

속도자료는 구간단속장비 정상 운영일 기준 설치 전·후 1년간의 구간 내 VDS 5분 단위 속도데이터 취득이 가능한 21개 구간을 대상그룹으로 설정하고 자료를 수집하였으며, 비교그룹은 도로 및 교통조건이 유사한 대상 구간의 상·하류부 2 km 구간으로 정의하고 이를 분석 범위에 포함하였다.

3.2 분석 방법

일반적인 교통안전시설 설치 전·후 효과 분석 시 단순비교방법, 일대일 비교방법, 비교그룹방법 등을 활용하고 있다.¹³⁾ 본 연구에서는 단순비교방법과 비교그룹방법을 활용하여 사고 및 속도 관련 지표의 증감률을 분석하였다.

단순비교방법은 개선 전·후 단순비교를 통해 설치 효과를 분석하는 방법으로 산출식은 식 (1)과 같다. 이 방법은 계산이 용이하다는 장점이 있으나 외부 요인의 영향을 고려하지 못하며, 신뢰도가 낮거나 정확하지 않은 결과를 도출할 수 있어 본 연구에서는 독립표본 t-test를 통해 통계 검정을 수행하였다.

$$ARF = \frac{N_b - N_a}{N_b} \tag{식(1)}$$

여기서, ARF : 사고감소효과 (Accident Reduction Factor)

N_b : 개선 후 사고건수

N_a : 개선 전 사고건수

비교그룹방법은 분석 대상그룹과 유사한 특성을 가진 비교그룹을 선정하고, 비교그룹의 사전·사후 변화 비율에 의해 대상그룹의 “사후 개선사업 미시행” 시를 추정하여 그 추정치와 사후 대상그룹의 실제 사고 및 속도의 차이를 시행 효과로 판단하는 방법으로 산출식은 식(2)와 같다. 이 방법은 외부요인의 영향을 배제하고 분석이 가능하나 평균으로의 회귀와 관련된 오차가 발생할 수 있어 본 연구에서는 분석년도를 최대 3년까지 확대하여 해당 오차를 줄이고자 하였다.

$$\delta = \pi - \lambda, \theta = \frac{(\lambda/\pi)}{1 + var(\pi)/\pi^2}$$

$$\delta(\theta) = \frac{\theta \sqrt{\text{var}(\lambda)/\lambda^2 + \text{var}(\pi)/\pi^2}}{1 + \text{var}(\pi)/\pi^2} \quad \text{식(2)}$$

여기서, δ : 변화되는 사고건수
 π : 사후시점의 대상그룹에서 사업이 시행되지 않았다는 가정 아래에 예측되는 사고건수
 λ : 대상그룹의 사후 사고 건수
 θ : 교통사고 효율성 척도

또한, 비교그룹방법 수행 시 ‘효율성 척도(θ)’ 지표가 효과척도로 사용되는데, 일반적으로 효율성 척도가 1보다 작은 경우 해당 사업의 시행 효과가 있다고 할 수 있다(김정현 외)¹⁴⁾.

위와 같이 단순비교방법과 비교그룹방법을 이용하여 본 연구에서는 구간단속장비 설치 시 사고 및 속도 감소 효과를 분석하였다.

3.3 분석 결과

3.3.1 사고 분석 결과

단순비교방법을 이용한 구간단속장비 설치 전·후 전체사고, EPDO, 인명피해사고에 대한 분석 결과는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Result of accident analysis(Naive before–after study)

	Before	After	% Change	t-value
Total accident (annual average)	3.87	2.24	-42.15	2.767***
EPDO	26.05	7.65	-70.64	1.674*
Casualty crash ¹⁾ (annual average)	1.54	0.84	-45.35	1.833*

*p<0.1 **p<0.05 ***p<0.01

¹⁾casualty crash : a crash that results in at least one person killed or injured.

사고 감소율은 전체사고 42.15%, EPDO는 70.64%, 인명피해사고 45.30%로 나타났으며, 설치 전·후 사고 건수에 대한 독립표본 t-test 결과 전체사고는 99%, EPDO와 인명피해사고는 90% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

비교그룹방법을 이용한 구간단속장비 설치 전·후 전체사고, EPDO, 인명피해사고 분석 결과는 다음 Table 2와 같다.

사고 감소율은 전체사고 31.35%, EPDO 66.62%, 인명피해사고 10.04%로 나타났으며, 효율성 척도(θ) 또한 모두 1보다 작게 나타나 구간단속장비 설치 시 전체사고, EPDO 및 인명피해사고 감소에 효과가 있음을 확인할 수 있다.

Table 2. Result of accident analysis(C–G Method)

	Total accident (annual average)	EPDO	Casualty crash (annual average)
Number of accident in target group(Before)	185	26.05	75
Number of accident in target group(After) (λ)	109	7.65	37
Number of accident in comparison group (Before)	133	13.65	61
Number of accident in comparison group(After)	115	12.89	34
Number of prediction accident in target group(After) ($\hat{\pi}$)	158.77	22.92	41.13
Reduction in accident(δ)	47.77	15.27	4.13
Effectiveness Index(θ)	0.67	0.28	0.84
Variation rate(%)	-31.35	-66.62	-10.04

3.3.2 속도 분석 결과

단순비교방법을 이용한 구간단속장비 설치 전·후 평균속도, 제한속도 초과비율에 대한 분석 결과는 다음 Table 3과 같다.

Table 3. Result of speed analysis(Naive before–after study)

	Before	After	% Change	t-value
Average speed	97.57 km/h	90.82 km/h	-6.92%	4.156***
Ratio of exceeding the speed limit	28.76%	8.26%	-20.50%p	3.388***

*p<0.1 **p<0.05 ***p<0.01

속도 감소율은 평균속도 6.92%, 제한속도 초과비율 20.50%p로 나타났으며, 설치 전·후 속도에 대한 독립표본 t-test 결과 평균속도와 제한속도 초과비율 모두 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

Table 4. Result of speed analysis(C–G Method)

	Average speed	Ratio of exceeding the speed limit
Speed in target group(Before)	97.57km/h	28.76%
Speed in target group(After) (λ)	90.82km/h	8.26%
Speed in comparison group(Before)	98.96km/h	35.03%
Speed in comparison group(After)	96.41km/h	23.87%
Prediction Speed in target group(After) ($\hat{\pi}$)	94.10	19.05
Reduction in speed(δ)	3.28	10.79
Effectiveness Index(θ)	0.93	0.39
Variation rate(%)	-3.49	-56.65

비교그룹방법을 이용한 구간단속장비 설치 전·후 평균속도, 제한속도 초과비율 분석 결과는 Table 4와 같다.

속도 감소율은 평균속도 3.49%, 제한속도 초과비율 56.65%로 나타났으며, 효율성 척도(θ) 또한 모두 1보다 작게 나타나 구간단속장비 설치 시 평균속도, 제한속도 초과비율 감소에 효과가 있음을 확인할 수 있다.

속도 분석 결과 구간단속장비의 설치는 차량 속도를 제한속도 이하로 낮추는 역할을 하기 때문에 평균속도보다 제한속도 초과비율 감소에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 비교그룹방법을 이용한 속도 감소율의 경우 단순비교방법을 활용해 분석한 경우보다 속도 감소 효과가 낮은 것으로 나타났는데, 이는 비교그룹이 구간단속장비 설치 지점의 상·하류부 2 km 구간으로 설정되어 단속장비 설치에 따른 후광효과(halo effect)로 인해 해당 구간에도 속도 감소의 영향이 미친 것으로 판단된다.

3.3.3 소결

구간단속장비 설치 효과에 대한 분석 결과 교통안전 측면에서의 사고 감소 효과 및 교통운영 측면에서의 속도 감소 효과를 단순비교방법과 비교그룹방법을 통해 분석을 수행하였으며, 분석 결과 관련 선행 연구들과 유사한 결과를 보였다. 사고 감소 효과의 경우 사고 심각도를 반영하는 EPDO의 경우 가장 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 속도 감소 효과의 경우 제한속도 초과율이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 평균속도 및 제한속도 초과율의 평가지표의 경우 구간단속장비 설치에 따른 사고 감소 효과에서의 매개변수의 역할을 수행하기 때문에 교통운영 측면뿐만 아니라 교통안전 측면에서의 평가 지표로도 활용 가능하다고 판단된다.

4. 구간단속장비 사고예측모형 개발

4.1 분석방법

사고예측모형의 반응변수는 효과 분석에 활용된 3 가지 평가 지표 중 인명피해사고를 대상으로 하였다. 전체사고건수의 경우 과속으로 인해 발생하는 사고를 대표하기에는 한계가 있으며, EPDO의 경우 단일 사고에 여러 대의 차량들이 수반된 대형사고 발생 시 그 수치에 왜곡이 발생할 수 있다고 판단하였다. 또한 인명피해사고의 경우 사고건수와 사고 발생 여부 중 모형의 정확도 및 설명력을 고려하여 인명피해사고 발생 여부를 예측하는 모형을 개발하였다.

반응변수인 인명피해사고 발생여부 변수는 ‘인명피해사고 발생=1’, ‘미발생=0’인 범주형 변수로, 예측모형 개발을 위해 로지스틱 회귀모형 중 이분화된 종속변수의 확률값을 예측할 수 있는 이항 로지스틱 회귀 분석을 활용하였다.

모형의 추정은 식(3)과 같으며, 여기서 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ 는 추정될 모수이다. z 는 선형식으로 식(4)와 같은 형태이다.

$$\begin{aligned}
 P(y=1|x_1, \dots, x_p) &= \pi(x_1, \dots, x_p) \\
 &= \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p)} \\
 &= \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)} = \frac{1}{1 + \exp(-z)} = \frac{1}{1 + \exp(-z)} \quad \text{식(3)}
 \end{aligned}$$

$$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad \text{식(4)}$$

4.2 데이터 구축

자료수집은 앞서 사고 분석에 적용한 28개 구간의 구간단속장비 설치 전·후 연도별 인명피해사고를 대상으로 하였다. 또한 해당 구간의 인명피해사고 발생에 영향을 미칠 수 있다고 판단되는 도로조건, 교통조건 및 통제조건에 대한 데이터를 수집하였다. 도로조건은 차로수, 횡/종단경사, 터널, 교량, 유출입 수이며, 교통조건은 교통량, 중차량비, 평균속도, 속도분산 및 제한속도 초과비율, 통제조건은 제한속도, 구간단속장비 설치유무, 구간길이 데이터를 수집하였다.

데이터 구축을 위해 로지스틱 회귀분석은 독립변수의 단위 변화에 대한 반응변수의 변화를 예측하는 것으로 데이터 간 단위가 달라지면 결과 값이 상이해질 수 있다. 따라서, 교통량의 경우 다른 변수에 비해 단위의 규모가 크기 때문에 자연로그를 취하여 데이터 간 편차를 줄이고자 하였다.

4.3 모형 개발

본 연구에서는 사고예측모형 개발을 위해 통계패키지 SPSS 24.0을 이용하였다. 사용된 변수는 대상 구간 170개의 도로/교통/통제조건에 대한 16개 변수를 이용하였다.

각 조건별로 수집된 데이터를 상관분석 및 boxplot, t-test 분석을 통해 인명피해사고와의 관계를 분석하였으며, 변수들간의 연관성을 파악하기 위해 다중공선성을 확인하였다. 분석 결과, 모형의 변수로 구간단속장비 설치유무, 속도초과율, ln(차로당 교통량), 구간길이, 중차량비, 교량비율, 곡선비율, 경사길이를 선정하였다.

Table 5. Result of binary logistic regression analysis

Parameter	B	Std.Err	Walds	d.f.	sig.	Exp(B)
Point-to-point speed enforcement installation(1)	-0.679	0.408	2.766	1	0.096	0.507
Ratio of exceeding the speed limit	0.051	0.013	16.279	1	0.000	1.052
Ln(traffic/lane)	0.829	0.25	10.611	1	0.001	2.291
Ratio of heavy vehicle	0.035	0.021	2.738	1	0.098	1.035
Ratio of curve section	0.020	0.009	4.633	1	0.031	1.021
Constaint	-12.385	3.209	14.900	1	0.000	0.000

후진단계제거법을 이용하여 인명피해 발생여부에 대한 로지스틱 회귀분석을 실시한 결과, 절편만을 포함한 모형과 도출된 모형의 $-2LL(-2 \log \text{likelihood})$ 차이에 대한 χ^2 통계량 값이 신뢰수준 95%에서 유의하게 나타났으며, 종속변수의 실제값과 예측치의 정확도를 측정하는 Hosmer-Lemeshow 검정 결과 p값이 0.488($\chi^2=7.458$)로 귀무가설을 채택함으로써 적합한 회귀모형으로 나타났다.

인명피해 발생유무에 대한 예측 정확도는 인명피해가 없는 경우 66.7%, 인명피해가 있는 경우 72.4%,가 정확히 예측되었으며 전체적으로는 70.0%의 정확도를 가지는 것으로 나타났다.

이분형 로지스틱 회귀분석 결과는 Table 5와 같이 구간단속장비 설치유무를 제외한 변수들은 모두 인명피해 발생확률에 양(+)의 영향을 미치며, 교통량, 중차량비, 제한속도 초과비율, 구간 내 곡선 비율의 순서로 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

각 변수별로 인명피해사고 발생확률에 미치는 영향도는 Exp(B) 값을 통해 해석이 가능하며, Exp(B) 값은 인명피해 발생확률에 미치는 영향도의 기울기로 해석이 가능하다. 즉, 구간단속장비 설치유무에 대한 변수는 설치한 경우 설치하지 않은 경우에 비해 인명피해사고 발생확률이 0.507배로 낮아진다고 할 수 있다.

반면, 속도초과율의 경우는 속도초과율이 1% 증가할 때 인명피해 발생확률이 1.052배 증가하며, ln(차로당교통량)이 한 단위 증가할 때 인명피해 발생확률이 2.291배 증가한다고 해석할 수 있다. 이러한 방법으로 인명피해 발생확률에 양의 방향으로 영향을 미치는 변수들의 영향도를 분석하면 교통량(2.291배), 중차량비(1.035배), 제한속도 초과비율(1.052배), 구간 내 곡선비율(1.021배)의 순서로 영향을 미친다고 할 수 있다. 위 결과를 모형식으로 나타내면 다음 식(5)와 같다.

$$P(\text{사고}=1) = 1 / (1 + \exp(12.385 + 0.679 * (\text{설치유무}) - 0.051 * (\text{속도초과율}) - 0.829 * (\ln \text{차로당교통량}) - 0.035 * (\text{중차량비}) - 0.020 * (\text{곡선비율}))) \quad \text{식(5)}$$

4.4 모형의 적용 및 평가

본 연구를 통해 개발된 사고예측모형의 경우 고속도로에 설치된 구간단속장비를 대상으로 한 것으로 도시부의 연속류 및 단속류 구간을 대상으로 일반화 적용하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 개발한 사고예측모형을 최근 고속도로 내 구간단속장비 설치구간 및 주요 고속도로(경부, 영동, 서해안 및 서울외곽순환)에 적용하여 인명피해사고 발생확률에 대해 평가하고자 하였다. 각 구간별 인명피해사고 발생확률을 예측하여 확률이 50% 이상일 경우 위험구간으로 평가하였다.

2017년 7월 이후 신규로 구간단속장비가 설치된 12개 구간에 대해 사고예측모형을 적용하여 인명피해 발생확률을 예측하였다. 예측 시 ‘설치 후 제한속도 초과율’은 효과 분석을 통해 도출된 값의 평균치인 8.26%를 적용하였다. 구간단속장비 정상운영일 이전 1년 간의 인명피해사고를 기준으로 구간단속장비 설치 전 인명피해사고 예측확률과 실제 인명피해 사고 발생여부를 비교한 결과 72.7%의 정확도를 나타냈으며, 모형을 적용한 설치 전·후 인명피해사고 발생확률은 Table 6과 같다.

Table 6. Result of applying the prediction model for the recent installation section(probability of casualty crash)

No.	Section	Before(%)	After(%)
1	Seoul ring(45.2-54.4)	28.45	3.06
2	Cheongju Sangju(8.9-23.9)	28.05	11.03
3	Honam expressway branch(45.1-39.0)	37.48	16.38
4	Honam expressway branch(41.6-49.5)	59.78	20.56
5	Cheongju-Sangju(24.4-9.4)	71.55	11.52
6	Gyeongbu(247.8-233.7)	76.72	24.11
7	Gwangju Daegu(135.0-145.3)	77.33	8.02
8	Suncheon wanju(97.7-113.0)	78.35	12.53
9	Donghae(70.7-80.8)	77.68	5.80
10	Yeongdong(65.6-56.2)	78.67	26.08
11	Donghae(80.8-70.7)	84.02	61.1
12	Suncheon wanju(22.5-6.8)	91.15	11.13

모형 적용 결과, 설치 시 인명피해사고 발생확률이 약 20~80% 감소하는 것으로 예측하였으며 서울외곽(45.2-54.4), 청주상주(8.9-23.9) 및 호남지선(45.1-39.0)의 경우 설치 전 인명피해사고 발생확률이 50% 미만으로 해당 구간의 설치 적정성에 대한 재검토가 필요하다고 판단하였다.

또한, 도로연장이 길고 교통량이 많은 주요 고속도로 4개 노선(경부, 영동, 서해안 및 서울외곽순환)을 대상으로 사고예측모형을 적용하여 위험구간을 평가하였다. 구간은 IC, JC, 및 TG 등 통행 차량 수가 일정하고 진출입 구간이 없는 고속도로 기본 구간인 “콘존(Conzone)”을 기준으로 구분하였다.

주요 4개 고속도로 중 정부고속도로 각 구간에 대해 모형을 적용한 결과, 위험한 구간으로 판단된 구간은 다음 Table 7과 같다.

Table 7. Result of applying the prediction model for the Gyeongbu expressway(probability of casualty crash)

No.	Direction	Section	% of casualty crash
1	N	Tongdosa IC - W.Ulsan IC	59.06
2	N	YeongCheon IC - Gyeongsan IC	61.29
3	N	Dodong JC - N.Daegu IC	63.59
4	N	Geumho JC - Chilgok logistics IC	75.28
5	N	Chilgok logistics IC - Waegwan IC	71.51
6	N	Waegwan IC - S.Gumi IC	53.18
7	N	S.Gumi IC - Gumi IC	58.71
8	N	Gumi IC - Gimcheon JC	80.73
9	N	Okcheon IC - Biryong JC	50.23
10	N	S.Cheongju IC - Cheongju JC	78.31
11	S	Nami JC - Cheongju JC	56.36
12	S	Sintanjin IC - Hoedeok JC	82.32
13	S	Gimcheon JC - Gumi IC	53.20
14	S	S.Gumi IC - Waegwan IC	61.70
15	S	Chilgok logistics IC - Geumho JC	50.42
16	S	N.Daegu IC - Dodong JC	64.74
17	S	Gyeongsan IC - YeongCheon IC	66.16

적용 결과, 정부고속도로 상/하행 총 130개의 콘존 중 17개 구간에서 인명피해사고 발생확률이 50%를 초과하는 것으로 나타나 위험한 구간으로 판단하였으며, 서울방면 금호JC-김천JC 구간과 같이 위험구간 연속 시 구간 전체에 대해 설치를 고려할 필요가 있다.

영동고속도로 각 구간에 대해 모형을 적용한 결과, 위험한 구간으로 판단된 구간은 다음 Table 8과 같다.

적용 결과, 영동고속도로 상/하행 총 70개의 콘존 중 13개 구간에서 인명피해사고 발생확률이 50%를 초과

Table 8. Result of applying the prediction model for the Yeongdong expressway(probability of casualty crash)

No.	Direction	Section	% of casualty crash
1	E	Ansan IC - Ansan JC	53.72
2	E	Yangji IC - Deokpyeong IC	70.67
3	E	Deokpyeong IC - Hobeop JC	73.55
4	E	Hobeop JC - Icheon IC	68.78
5	E	Munmak IC - Manjong JC	51.86
6	E	Manjong JC - Wonju JC	81.37
7	E	Myeonon IC - Pyeongchang IC	81.93
8	W	Soksa IC - Pyeongchang IC	60.39
9	W	Munmak IC - Yeosu IC	72.97
10	W	Yeosu IC - Icheon IC	57.43
11	W	Hobeop JC - Deokpyeong IC	56.93
12	W	Ansan JC - Ansan IC	79.47
13	W	Gunja TG - Wolgot JC	87.57

하는 것으로 나타나 위험한 구간으로 판단하였으며, 덕평IC-이천IC 또는 문막IC-원주JC 구간과 같이 위험구간 연속 시 구간 전체에 대해 설치를 고려할 필요가 있다. 또한 인천방면의 호법JC-덕평IC의 경우 기존 설치구간인 덕평IC-용인IC와 인접하여 구간 확장설치를 고려할 필요가 있다.

서해안고속도로 각 구간에 대해 모형을 적용한 결과, 위험한 구간으로 판단된 구간은 다음 Table 9와 같다.

Table 9. Result of applying the prediction model for the Seohaean expressway(probability of casualty crash)

No.	Direction	Section	% of casualty crash
1	N	Gwangmyeong Stn. IC - Iljik JC	51.57
2	S	Maesong IC - Bibong IC	62.89
3	S	Haemi IC - Hongseong IC	51.00
4	S	Gochang IC - Gochang JC	50.50
5	S	Gochang JC - Yeonggwang IC	58.72

적용 결과, 서해안고속도로 상/하행 총 82개의 콘존 중 5개 구간에서 인명피해사고 발생확률이 50%를 초과하는 것으로 나타나 위험한 구간으로 판단하였으며, 고창IC-영광IC 구간과 같이 위험구간 연속 시 구간 전체에 대해 설치를 고려할 필요가 있다. 서해안 고속도로의 경우 제한속도가 110 km/h인 구간이 대부분으로 정부고속도로나 영동고속도로에 비해 제한속도 초과율이 낮게 나타났으며 이로 인해 위험구간이 상대적으로 적게 나타난 것으로 판단된다.

서울외곽순환고속도로 각 구간에 대해 모형을 적용

Table 10. Result of applying the prediction model for the Seoul Ring expressway(probability of casualty crash)

No.	Direction	Section	% of casualty crash
1	Pangyo -Ilsan	Tongilro IC - Goyang IC	53.54
2		No-oji JC - Gyeyang IC	57.74

한 결과, 위험한 구간으로 판단된 구간은 Table 10과 같다.

적용 결과, 서울외곽순환고속도로 상/하행 총 76개의 콘존 중 2개 구간에서 인명피해사고 발생확률이 50%를 초과하는 것으로 나타나 위험한 구간으로 판단하였으며, 반대방향(일산-판교방면)에는 위험한 구간으로 판단되는 구간이 없는 것으로 예측되었다.

5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 고속도로에 설치된 구간단속장비를 대상으로 공학적 평가 방법론을 적용한 속도 감소 및 교통사고 감소 효과에 대한 정량적 분석을 수행하고, 효과 분석 결과를 바탕으로 구간단속장비 설치 구간에 대한 사고예측모형 개발을 목적으로 하였다. 또한 개발된 사고예측모형을 구간단속장비 최근 설치 구간과 주요 고속도로에 적용하여 평가를 진행하였으며, 이를 통해 구간단속장비 설치 기준 수립을 위한 기초자료 및 확대 보급의 근거를 마련하고자 하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 구간단속장비의 국내외 설치 기준 및 관련 연구에 대한 검토를 통해 설치 효과 분석 지표 및 방법과 사고예측모형 개발 시 지표 선정 등에 활용하였다.

둘째, 고속도로 내 구간단속장비 설치구간을 대상으로 단순비교방법과 비교그룹방법을 활용하여 사고(전체사고, EPDO, 인명피해사고) 및 속도(평균속도, 제한속도 초과비율) 감소 효과를 분석하였다. 사고 분석 결과 단순비교방법의 경우 구간단속장비 설치 후 전체사고는 42.15%, EPDO 70.64%, 인명피해사고 45.30%가 감소하였으며, 독립표본 t-test 결과 통계적으로 유의하게 나타났다. 비교그룹방법을 통한 분석 결과 전체사고는 31.35%, EPDO 66.62%, 인명피해사고 10.04% 감소하는 것으로 나타났다. 속도 분석 결과 단순비교방법의 경우 구간단속장비 설치 후 평균속도는 6.92%, 제한속도 초과비율 20.50%p가 감소하였으며, 독립표본 t-test 결과 통계적으로 유의하게 나타났다. 비교그룹방법을 통한 분석 결과 평균속도는 3.49%, 제한속도 초과비율은 56.65%p 감소하였다. 이를 통해 구간단속장비 설치 시

속도 및 사고 감소에 효과가 있음을 알 수 있다.

셋째, 구간단속장비의 공학적 설치 기준 수립의 기초 자료 마련을 위해 ‘인명피해사고 발생여부’를 반응 변수로 하는 예측모형을 개발하였다. 이분형 로지스틱 회귀모형을 활용하였으며 인명피해사고 발생에 영향을 미칠 수 있다고 판단되는 도로·교통·통제조건을 선정하여 분석하였다. 모형 개발 결과 구간단속장비 설치 유무는 음(-)의 영향을 미치며, 교통량, 중차량비, 제한속도 초과비율, 구간내 곡선비율은 모두 인명피해사고 발생확률에 양(+)의 영향을 미치며 모형식을 통한 예측 정확도는 약 70%로 나타났다. 또한 개발된 모형을 신규 구간단속장비 설치구간과 주요 고속도로에 적용하여 설치 구간에 대한 적정성 검토와 미설치 구간 중 위험구간을 선정하였다.

본 연구를 통해 구간단속장비 설치 기준 검토, 사고 및 속도 감소 효과 분석, 사고예측모형 개발, 모형의 적용 및 평가를 수행하였으며, 사고 예방 효과가 큰 구간단속장비의 설치 기준 수립의 기초 자료 및 확대 보급의 근거로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 추가적인 검토를 통해 기존에 설치 지점 선정 시 활용되고 있는 지표인 사고자료와 본 연구를 통해 개발된 인명피해사고 발생확률 예측모형 및 도로·환경 조건 등을 반영하여 실무에 적용 가능한 설치 기준 수립이 필요할 것이며, 고속도로와 교통류의 상태가 상이한 도시부 도로의 구간단속장비에 대한 추가적인 설치 기준 연구도 필요할 것으로 판단된다.

References

- 1) Austroads, “Point-to-point Speed Enforcement”, 2012.
- 2) M. Lynch, M. White and R.Napier, “Investigation into the Use of Point-to-Point Speed Cameras”, NZ Transport Agency Research Report, No. 465, 2011.
- 3) TSO of UK, “Handbook of Rules and Guidance for the National Safety Camera Programme for England and Wales for 2005/06”, 2004.
- 4) TSO of UK, “Use of Speed and Red-Light Cameras for Traffic Enforcement : Guidance on Deployment, Visibility and Signing”, 2007.
- 5) Norwegian Public Roads Administration, “Automatic Section Speed Control”, 2011.
- 6) A. Montella, B. Persaud, M. D'Apuzzo and L. Imbriani, “Safety Evaluation of Automated Section Speed Enforcement System”, Transportation Research Record: J. TRB., Vol. 2281, pp. 16-25, 2012.

- 7) I. S. Yun, "Study of the Effect of the Point-to-Point Speed Enforcement System Using a Comparison-Group Method", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 13, No. 4, pp. 177-185, 2011.
- 8) NSW Government, "Annual NSW Speed Camera Performance Review", 2012.
- 9) Y. I. Jung, T. H. Baek, Y. H. Kim and B. H. Park, "Traffic Accident Reduction Effects of Section Speed Enforcement System(SSES) Operation in Freeways", *J. Korean Soc. Transp.*, Vol. 32, No. 2, pp.119-129, 2014.
- 10) E. Cascetta, V. Punzo and M. Montanino, "Empirical Analysis of Effects of Automated Section Speed Enforcement System on Traffic Flow at Freeway Bottlenecks", *Transportation Research Record: J. TRB.*, Vol. 2260, pp. 83-93, 2011.
- 11) H. W. Lee, D. H. Joo, C. S. Hyun, J. H. Jung, B. H. Park and C. K. Lee, "A Study on the Analysis for the Effects of the Section Speed Enforcement System at the Misiryong Tunnel Section", *J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.*, Vol. 12, No. 3, pp. 11-18, 2013.
- 12) J. J. Park, Y. M. Lee, J. B. Park and J. K. Kang, "The Effect of Point to Point Speed Enforcement System on Traffic Flow Characteristics", *J. Korean Soc. Transp.*, Vol. 26, No. 3, pp. 85-95, 2008.
- 13) D. M. Lee, D. H. Kim and K. S. Song, "Analysis of Effects from Traffic Safety Improvement on Roadways using C-G Method", *J. Korean Soc. Transp.*, Vol. 29, No. 3, pp. 31-40, 2011.
- 14) J. H. Kim, K. H. Kim, J. W. Kim and S. B. Lee, "Estimation of Accident Effectiveness Based Upon the Location of Traffic Signal Using C-G Method", *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 28, No. 6, pp. 775-789, 2008.