

고속도로 램프부 교통안전개선대책 사고감소효과 평가

곽현준*

한국도로공사 건설처 실장

Safety Evaluation of Multiple Treatments for Expressway Ramp

KWAK, Hyun-Jun* 

Team Leader, Construction Division, Korea Expressway Corporation, GyeongBuk 39660, Korea

*Corresponding author: jun0563km@ex.co.kr

Abstract

Various treatments are applied to improve safety in the ramp section on highways in Korea. However, despite continuous efforts, the effectiveness of applying treatments has been reduced due to insufficient management and the lack of quantitative effects analysis. This study outlined treatments for improving traffic safety in domestic and overseas ramp sections, benchmark these element, and proposed in-depth verification and application for treatments. To estimate quantitative crash reduction effects, a safety assessment was performed on three treatments (speed limit changes, installation of colorful guide-lane and changes of number of lanes) by applying the cross-sectional analysis technique. The safety effect were evaluated through development of two different models (a data mining technique MARS model and a negative binomial model). It was found that the crash modification factor estimated through the MARS model was shown to be more reliable than the negative binomial model. At the speed limit of 40km/h, the crash reduction effect was higher at about 36%. Implementation of colorful guide-lane has been shown to be effective in improving safety on trumpet-type loop ramps. Finally, the results show that if one lane is operated compared to the two-lane ramp section, the crash reduction effect will be about 52%. The results of this study are expected to be used as basic data for future strategies for improving traffic safety on ramp sections.

Keywords: cross-sectional method, expressway, ramp, safety evaluation, treatments

초록

국내 고속도로에서는 램프구간 교통안전을 도모하기 위해 다양한 대책을 적용하고 있다. 하지만 지속적인 노력에도 불구하고 대책의 사후관리 및 정량적 영향분석이 미흡하여 실효성이 저하되고 있다. 또한, 제한속도 및 급커브 등의 표지판 설치, 시선유도봉 등 다양한 형태의 대책들이 적용되어 있어 실효성 제고를 위해서는 대책별 정량적 효과평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내외 램프구간 교통안전 개선을 위한 대책을 정리하고 벤치마킹 요소를 도출하였으며 일부 대책에 대해 심층적 검증 및 도입방안을 제시하였다. 정량적 사고감소효과 도출을 위해 Cross-sectional 분석 기법을 적용하여 국내 데이터로 검증 가능한 제한속도 감소, 컬러레인 설치, 차로수 변화 등 3가지 대책에 대한 안전성 평가를 수행하였다. 효과 산출을 위해 데이터마

J. Korean Soc. Transp.
Vol.38, No.6, pp.452-461, December 2020
<https://doi.org/10.7470/jkst.2020.38.6.452>
pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY

Received: 3 November 2020

Revised: 8 November 2020

Accepted: 18 November 2020

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.

이닝 기법인 MARS(Multivariate Adaptive Regression Splines) 모형과 전통적 사고빈도 통계모형인 음이항 모형을 각각 개발하여 결과를 비교하였다. 연구 결과, 연결로 제한속도는 40km/h일 경우 사고감소효과가 약 36%로 가장 안전하게 나타났다. 컬러레인은 트럼펫형 루프연결로 안전 개선에 효과적인 것으로 나타났으며 이는 급격한 커브구간 및 복잡한 경로로 인해 나타난 결과로 예상된다. 마지막으로 차로수 변화는 2개로 구성된 램프구간에 비해 1개의 차로를 운영할 경우 사고감소효과가 약 52%로 도출되어 교통량이 적고 과속사고가 다발적으로 발생하는 구간을 대상으로 차로를 감축하여 운영하는 등에 대한 대책 마련이 필요할 것으로 예상된다. 본 연구에서 도출된 주요 결과는 향후 램프구간 교통안전 증진 전략을 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: cross-sectional 분석방법론, 고속도로, 램프구간, 안전성 평가, 교통안전개선대책

서론

램프구간은 급격한 커브구간으로 인해 차량이 과속할 경우 균형을 잃기 쉬워 사고 위험성이 높으며 본선과의 진입 및 진출을 위해 운전자의 주의가 요구되는 구간이다. 국가 차원에서는 램프구간의 안전을 개선시키기 위해 다양한 사고분석이 진행되었으나, 사고발생 추이 및 현황 등 단순 기초통계 수준에서 원인을 분석하고 있어 정확한 사고 발생 원인을 규명하기에 미흡한 실정이다.

국내 고속도로에서는 램프구간에서 발생한 사고를 감소시키기 위해 다양한 대책을 적용하여 교통안전을 도모하고 있다. 그러나 지속적인 노력에도 불구하고 대책의 사후관리 및 정량적 영향 분석이 미흡한 실정이다. 이와 더불어 램프구간에서는 표지판, 충격흡수시설, 시선유도봉 등 다양한 형태의 안전시설물이 혼재되어 있어 운전자의 혼란을 가중시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 고속도로 램프부에 적용 가능한 안전대책 및 대책별 사고감소효과를 체계적으로 정리하고 고속도로 램프부 교통안전 증진을 위해 국내외 적용되고 있는 주요 대책들 중 일부 대책에 대해 심층적인 검증 및 안전 효과를 추정하였다. 안전성 평가를 위해 램프 내 사고를 명확하게 구분할 수 있으며 국내 고속도로에서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 트럼펫형 램프를 대상으로 분석을 수행하였다. 램프구간 교통안전 개선방안 마련을 위하여 교통관리 기법 적용방안에 대해 검토하고 교통안전 도모를 위한 운영전략을 제시하는 것을 목표로 하였다.

기존문헌고찰

국내의 램프부 교통안전 증진을 위해 적용한 다양한 대책의 효과를 체계적으로 정리하였다. 또한 국내의 램프에 적용된 대책에 대하여 효과평가 연구를 수행한 선행연구 고찰을 통해 벤치마킹 요소를 도출하였다.

1. 램프 운영 및 시설물 관련 효과평가 연구

고속도로 램프 진출입부에서의 운전자 주행 속도는 가·감속차로 길이, 도로 기하구조 요소 등 여러가지 요인에 의해 영향을 받는다. 화물차의 경우 일반 차량과 무게중심이 다르고 급격한 커브구간 내에서는 과속할 경우 전도 또는 전복 가능성이 있어 교통안전을 고려한 적정 속도 고려가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존 램프부 제한속도 설정 방법론을 고찰하고 제한속도별 안전 효과를 추정한 선행연구 고찰을 통해 주요 시사점을 도출하였다.

Haleem et al.(2013)은 중앙선 및 길어깨 길이 변화에 따른 사고감소효과 추정을 위해 MARS 및 NB(Negative Binomial) 모형을 개발하고 비교하였다. 사고 영향요인으로 교통량, 길어깨 길이 및 유형, 제한속도 등이 도출되었다. 분석결과, 길어깨 길이가 4ft 이하 및 4ft 이상 6ft 미만일 경우 4ft에 비해 안전하게 나타났으며 MARS 모형의 예측 성능 및 모형 적합도가 NB 모형에 비해 우수한 것으로 나타났다.

Lim et al.(2007)은 85백분위 속도에 대한 조사 및 추정을 통해 속도차를 감소시킬 수 있는 방안을 모색한 제한속

도 설정 방법론을 제시하고 표지판 적정 설치 방안을 검토하였다. 이는 현재 운영 중인 도로에 대한 단계적 제한속도 조정 및 표지판 설치를 통해 교통안전을 향상시키고 적절한 제한속도를 설정하도록 하였다. Lee et al.(2013)은 고속도로 진출램프에서 대기열로 인한 문제를 해결하기 위해 VSL(Variable Speed Limit) 적용방안을 제시하였으며 이는 운영효율성에 부정적인 영향을 미치지 않으면서 안전 개선 효과가 있음을 밝혔다. Voigt et al.(2008)은 램프구간에서 승용차 및 화물차가 안전하게 진입할 수 있는 속도의 차이가 있음을 제시하였으며 트럭의 전도 위험이 있는 속도를 제시하여 화물차의 안전한 진입을 위한 제한속도를 제시하였다. 기존 연구결과에 따르면 곡선구간의 제한속도를 감소시켰을 때 사고감소효과가 증대되며 제한속도, 편경사, 곡선반경 변화에 따른 사고감소효과를 제시하였다. 제한속도를 55mph에서 45mph로 변화할 때 약 16%의 사고감소 효과를 도출하였다(FHWA, 2019).

램프구간은 적절한 정보 제공 및 표지판 설치를 통해 운전자가 적절히 진입 및 진출할 수 있도록 해야한다. Lee and Abdel-Aty(2009)은 로그선형, 이항 로지스틱, 프로빗 등 다양한 모형 개발을 통해 사고발생 위치 및 제한속도 표지판 유무에 따른 안전 효과를 추정하였다. 이를 통해 램프 유형 및 설계, 사고발생 위치 변수 간 상호작용 효과가 있음을 제시하였으며 진출램프 내 제한속도 표지판이 존재할 경우 사고감소에 효과적인 것으로 나타났다. Choi et al.(2005)는 갈매기 표지의 적정 간격에 대한 연구를 수행하였으며 속도 및 경관을 고려한 시뮬레이션 및 설문조사 분석결과, 이상적인 설치 간격은 약 30-35m이며 경사에 따라 다르게 적용되어야 함을 제시하였다. Srinivasan et al.(2009)은 평면곡선 상에서 갈매기표지의 사고감소 효과는 전체사고 약 4%, 사망 및 부상 사고가 약 16%인 것으로 도출되었다. Voigt et al.(2008)은 화물차의 전도사고 예방을 위한 적정 제한속도를 제시하였으며 승용차와 화물차의 제한속도 및 전도전복 위험 표지판 디자인의 설계 기준을 제시하였다.

2. 램프 유형 및 도로 기하구조 요소 관련 효과평가 연구

교통사고는 운전자, 차량, 도로여건 등 다양한 요인에 의해 발생되며 특히 램프구간의 경우 도로 설계 기준에 따라 영향을 받게된다. 이에 따라 도로 기하구조 요소 및 램프 설계 기준과 교통사고 간 관계를 규명하는 선행 연구를 고찰하고 주요 시사점을 제시하였다.

Firestine et al.(1989)은 화물차 안전을 저하시키는 요인으로 편경사가 급격하게 변하는 구간, 짧은 감속차로, 램프 바깥쪽이 연석으로 구성된 구간, 낮은 마찰력, 급격한 커브 및 내리막구간 5가지 요인이 화물차 사고에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. No et al.(2008)은 트럼펫형 및 클로버형 램프를 대상으로 음이향 회귀모형을 개발하였으며 곡률차, 속도 차이, 유출입 여부가 교통사고에 영향을 미치는 주요 요인으로 도출되었다.

Chen et al.(2009)은 램프 진출부의 차선수 및 연결로 형태(평행식/직접식)에 따른 안전 효과를 추정하였다. Generalized Linear model을 개발하였으며 Cross-sectional 분석을 통해 안전 효과를 추정하였다. 사고건수 및 상충률 측면에서 평행식 1차로를 갖는 진출램프구간의 안전 효과가 큰 것으로 나타났다.

Bared et al.(1999)은 램프 진입 및 진출부의 가·감속 차로에 따른 사고빈도모형을 구축하였으며 감속차로 길이가 짧을수록 사고 발생 개연성이 높은 것으로 도출되었다. 안전 및 경제적 관점에서 가속차로의 최소 길이는 AASHTO(2010)에서 권장하는 최소 길이와 유사한 것으로 도출되었다. Hong(2013)은 시뮬레이션을 활용하여 차량의 속도 및 배출가스 감소를 위한 고속도로 유출연결로 노면표시 설계기법을 제시하였다. 엔트로피방법과 AHP 방법을 통해 1.2m 간격 가로 일직선 줄로 구성된 시나리오가 교통 안전 및 환경을 고려한 최적 노면표시로 선정되었다.

3. 기존 연구와의 차별성 및 의의

국내외에서는 주로 제한속도, 교통안전 표지판, 도로 기하구조 요소 3가지 부문에서 교통안전 개선을 위한 연구를 수행하고 있다. 제한속도 부문에서는 램프구간 내 승용차와 화물차의 제한속도를 차등화 방안에 대한 연구를 고

찰하였다. 표지판 부문에서는 제한속도 표지판 설치가 사고 감소에 효과적임을 밝혔으며 도로 기하구조는 램프 연결로의 형태 및 유형, 진출입부, 차선수 등 다양한 사고 분석을 수행하였다.

국의 램프부 교통안전대책 효과평가와 관련된 선행 연구들은 차종별 제한속도 차등화 및 램프 기하구조 요소를 통한 연구가 다수 진행되고 있으나 국내의 경우 램프부 교통안전대책의 효과를 정량적으로 산출하고 체계적으로 정리한 연구는 미흡하다. 이에 따라 본 연구에서는 국내외 고속도로 램프부 안전을 증진시키기 위해 도출된 제한속도, 차로수, 컬러레인 3가지 주요 대책에 대해 사고감소효과를 정량적으로 산출하고 국내 적용방안을 검토하고자 한다.

향후 본 연구는 고속도로 램프부 안전 대책에 대한 효과분석의 기초자료로 활용 가능하며 고속도로 램프부 위험 구간의 안전대책 시행의 초석이 될 수 있다.

분석자료

2015년부터 2019년까지 최근 5년간 한국도로공사가 관리하고 있는 고속도로 트럼펫형 인터체인지 총 305개소를 분석 대상으로 설정하였으며 Table 1은 연결로 형태별 램프 개소수 및 사고건수를 나타냈다.

Table 1. Number of crash by connector

Connector	# of connector	Crash
Direct connector	616	458
Semi-direct connector	318	395
Loop connector	305	372

트럼펫형 305개소 중 루프연결로 305개, 준직결연결로 318개, 직결연결로 616개로 구성되어 있으며 5년간 발생한 1,225건을 토대로 분석하였다. 램프의 경우 별도의 이정을 관리하고 있지 않아 사고건수 분류를 위해 사고 내용 및 본선 이정을 활용하였으며 추가 데이터 수집을 위해 제한속도, 컬러레인 유무, 차로수 등은 위성지도 및 로드뷰를 활용하였다.

본 연구의 분석 범위인 트럼펫형 인터체인지 중 진입 및 진출 연결로는 각각 619개, 620개로 구성되어 있으며 Table 2에 진입 및 진출 연결로별 개소 및 사고건수를 나타냈다. 대책별 안전성 평가를 위해 트럼펫형 연결로 유형(직결/준직결/루프) 및 진입 및 진출 여부에 따라 다양한 모형을 개발하였으며 각 대책별 통계적으로 유의하고 가장 우수한 모형을 최종 모형으로 선정하여 분석을 수행하였다.

Table 2. Number of crash by entry/exit connector

Connector	# of ramps	Crash
Entry ramp	619	510
Exit ramp	620	715

분석 방법론

본 연구는 고속도로 램프구간에서 발생하는 교통사고의 감소를 위해 시행한 정책의 효과평가를 수행하기 위해 미국 HSM(AASHTO, 2010)에서 제시한 Cross-sectional 분석 기법을 적용하여 사고감소효과를 추정하였다. 국내 데이터를 통해 검증이 가능하고 국내에 적용되고 있는 차로수, 제한속도, 컬러레인 3가지 대책을 선정하여 안전 효과를 추정하였다.

1. 안전성능함수(Safety Performance Function, SPF)

안전성능함수는 도로 및 교통조건 등 다양한 환경을 독립변수로 설정하여 교통사고를 예측하는 모형으로, 음이항 모형(Negative Binomial, NB)을 통해 개발될 수 있으며 교통안전대책이 적용되지 않은 참조그룹에 대하여 개발할 수 있다(Park et al., 2014). 포아송 회귀모형은 평균과 분산이 같다는 가정 하에 모형을 개발하지만 실제 사고건수는 분산이 평균보다 큰 과분산 현상을 나타낸다. 이를 보완한 음이항 모형은 분산이 평균보다 크다는 가정 하에 개발된 모형으로 과분산을 설명할 수 있기 때문에 일반적으로 많이 사용된다.

안전성능함수는 Full SPF와 simple SPF의 두 가지 형태가 주로 사용되었으며, Full SPF는 교통 및 도로 특성과 관련된 변수를 사용하는 반면 Simple SPF는 AADT와 같은 교통 특성만 설명변수로 고려한다.

미국 HSM에서 제시하는 음이항 회귀모형을 적용한 SPF형태는 Equation 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{predicted,i} = \exp(\beta_0 + \beta_1(AADT_i) + \beta_2(L_i) + \dots + \beta_k(X_{ki})) \tag{1}$$

여기서, $N_{predicted,i}$: 구간 i의 예측 사고건수

β_k : 변수 k에 대한 계수

$AADT_i$: 구간 i의 연평균일교통량

L_i : 구간 i의 연장

X_{ki} : 구간 i의 도로 특성 k

2. Cross-sectional 분석

특정 교통안전대책의 정확한 적용 날짜를 알 수 없거나 데이터가 불충분할 경우 유용하게 활용되는 접근법이다. 전·후 분석을 통해 동시에 적용된 교통안전대책의 효과를 분리하기 어렵기 때문에 도로 특성에 대한 특정 대책의 효과를 추정하는데 사용될 수 있다. Cross-Sectional 분석을 통한 CMF 도출 시에는 교통안전대책 적용 전후 사고빈도 비율로 추정되며 두 구간은 교통안전대책을 제외하고 특성이 유사해야 한다(Carter et al., 2012). 사고수정계수는 모델이 로그 선형일 때, 변수 계수의 지수로 계산되고 Equation 2와 같이 나타낼 수 있으며(Lord and Bonneson, 2007), 표준편차는 Equation 3과 같다(Harkey et al., 2008).

$$CMF = \exp(\beta_k \times (x_{kt} - x_{kb})) \tag{2}$$

$$SE = \frac{\exp(\beta_k + SE_{\beta_k}) - \exp(\beta_k - SE_{\beta_k})}{2} \tag{3}$$

여기서, β_k : 변수 k에 대한 계수

x_{kt} : 조치된 구간에서의 선형 예측 변수 k

x_{kb} : 조치되지 않은 구간에서의 선형 예측 변수 k

SE_{β_k} : β_k 의 표준편차

3. MARS(Multivariate Adaptive Regression Splines)

연속형 변수를 처리하는데 효과적인 모형으로 변수 간 상호작용 효과를 고려할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이는 단계별 선형회귀 또는 의사결정나무를 비모수 회귀모형으로 확장한 것으로 고차원 회귀문제에 적합한 방법이며, 선

형 스플라인을 사용하여 조각별로 선형인 연속함수로 추정한다. MARS의 원리는 일련의 절차에 따라 회귀모형을 적합시키게 되며 모델을 개선하기 위해 상호 작용 여부를 반복적으로 확인하며 각 모델의 결합 결과에 기초한 최적 변수 조합을 선택한다. 모형이 복잡할 경우 과다적합 문제를 해결하기 위해 GCV(Generalized Cross-Validation)을 최소화하여 보다 단순한 모형으로 적합 시키게 된다. MARS의 기본 형태는 Equation 4 및 Equation 5와 같이 나타낼 수 있다(Friedman, 1991).

$$f(x) = \sum_{i=1}^k c_i B_i(x) \quad (4)$$

$$GCV(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - f_\lambda(x_i)]^2}{[1 - M(\lambda)/N]^2} \quad (5)$$

여기서, c_i : 계수

$B_i(x)$: 경첩함수

분석결과

1. 제한속도 변화에 따른 안전성 평가

램프구간에서 화물차 전복사고 방지를 위해 화물차 및 일반차량의 제한속도를 별도로 운영하고 있다. 본 연구에서는 국내 데이터를 활용하여 제한속도 운영 수준에 따른 안전성 평가를 수행하였다. 음이항으로 개발된 안전성능 함수 결과는 Table 3에 나타났다. 제한속도와 사고건수는 양의 상관관계를 가지며 이는 제한속도가 높을수록 위험하다는 것으로 해석할 수 있다.

Table 3. Estimated parameter of SPF for trumpet interchange

Variable	Coefficient	Standard error	p-value	AIC
lnAADT	0.756	0.125	<.0001	566
lnSpeedLimit	2.462	0.344	<.0001	

MARS 모형은 변수 간 상호작용 효과를 고려할 수 있으며 변수의 비선형성을 동시에 고려할 수 있다는 장점이 있다(Park, 2015). 선행 연구에서는 MARS 모형이 NB 모형에 비해 우수하며 변수 간 상호작용 및 비선형을 분석하기 위해 사용하는 것을 추천하였다(Park et al., 2015). 본 연구에서는 기존 음이항 모형의 단점을 보완하여 MARS 모형을 적용한 안전성능함수를 개발하였으며 결과는 Table 4에 제시하였다. MARS 모형을 통해 추정된 계수는 모두 95% 통계수준 내 유의하게 도출되었다. 교통량의 로그값이 11.220 이하 및 제한속도가 약 40km/h 이상일때 교통량 및 제한속도 두 변수 간 상호작용 효과가 도출되었다.

Table 4. Developed MARS model

Basis function	Coefficient	Standard error	p-value	AIC
MAX (lnAADT-9.311,0)	-32.271	3.267	<.0001	962
MAX (lnAADT-9.393,0)	33.690	3.444	<.0001	
MAX (lnAADT-11.220,0)	-10.581	2.673	<.0001	
MAX (11.220-lnAADT,0)*MAX (lnSpeedLimit-3.688,0)	-3.394	0.433	<.0001	

Table 5는 음이항 및 MARS 모형을 통해 추정된 사고수정계수 및 표준편차를 나타냈다. 제한속도 관련 요인은 두 개 모형 모두 트럼펫형 전체 연결로에서 유의하게 도출되었으며 40km/h, 50km/h, 60km/h일때의 사고감소효과를 추정하였다.

Table 5. Estimated crash modification factors (CMFs) for speed limit

Variable	NB			MARS		
	CMF	Standard error	CI (95%)	CMF	Standard error	CI (95%)
Speed limit (60km/h)_base	-	-	-	-	-	-
Speed limit (50km/h)	0.82	0.02	0.76-0.88	0.53	0.01	0.51-0.54
Speed limit (40km/h)	0.64	0.02	0.59-0.70	0.21	0.01	0.19-0.22

음이항 모형은 제한속도 60km/h에 비해 50km/h일 경우 사고감소효과가 21%, 40km/h일때 36% 각각 도출되었다. MARS 모형을 통해 개발된 모형은 제한속도가 50km/h일때 사고감소효과가 약 47%, 40km/h일때 79%로 60km/h에 비해 40km/h일 경우 가장 안전하게 나타났다. MARS를 통해 도출된 사고감소효과는 교통량이 약 75,000대/일(lnAADT=11.22) 이하인 구간에서 효과가 있는 것으로 나타났으며 음이항 모형에 비해 표준오차가 적게 나타나 비교적 신뢰도가 큰 것으로 나타났다. 음이항 및 MARS 모형을 통해 도출된 제한속도 수준별 사고감소효과는 제한속도 40km/h를 갖는 램프구간이 상대적으로 사고가 적게 발생함을 나타내며 운전자의 과속으로 인해 사고가 다발적으로 발생하는 램프에 대해 속도를 하향하여 운영하는 등의 대책 마련이 필요하다.

2. 컬러레인 적용 유무에 따른 안전성 평가

국내에서 적용되고 있는 컬러레인은 운전자의 명확한 주행 흐름을 유도할 뿐만 아니라 혼란을 감소시켜 사고 예방에 효과적인 대책이다. 본 연구에서는 국내 고속도로 램프부 컬러레인 적용에 따른 운전자 주행행태 및 사고감소효과를 추정하였다. 컬러레인 적용 유무에 따른 안전성 평가를 위해 트럼펫형 루프연결로의 안전성능함수를 개발하였으며 결과는 Table 6에 제시하였다. 컬러레인과 사고건수는 음의 상관관계를 가지며 이는 컬러레인이 있는 경우 사고 감소에 유의한 영향을 주는 것으로 해석할 수 있다.

Table 6. Estimated parameter of SPF for trumpet loop ramps

Variable	Coefficient	Standard error	p-value	AIC
Intercept	-4.968	2.017	0.013	
lnAADT	0.447	0.191	0.001	196
Colorlane	-0.717	0.369	0.052	

컬러레인은 트럼펫형 루프연결로의 사고 영향요인으로 도출되었으며 개발된 안전성능함수를 토대로 추정한 사고수정계수는 Table 7과 같다. 컬러레인은 루프연결로에서 사고감소효과가 약 52%로 도출되었으며 신뢰수준 95% 내 유의하게 도출되었다.

Table 7. Estimated crash modification factors (CMFs) for colorlane

Variable	CMF	Standard error	CI (95%)
Colorlane (0)_base	-		
Colorlane (1)	0.48	0.18	0.12-0.83

3. 차로수 변화에 따른 안전성 평가

국내에서는 운영효율성을 향상시키기 위해 차로수를 증가하여 운영하고 있다. 본 연구에서는 교통안전 측면에서 차로수 변화에 따른 안전성 평가를 통해 주요 시사점을 제시하였다.

차로수에 따른 안전성 평가를 위해 트럼펫형 진출램프의 안전성능함수는 Table 8에 나타났다. 교통량 및 차로수 모두 95% 통계적 수준 내 유의하게 도출되었다. 모형 분석 결과, 차로수와 사고건수는 양의 관계를 갖는 것으로 나타났다.

Table 8. Estimated parameter of SPF for trumpet exit ramps

Variable	Coefficient	Standard error	p-value	AIC
Intercept	-10.280	1.176	<.0001	
lnAADT	0.737	0.122	<.0001	565
Number of lanes	0.723	0.210	0.000	

MARS모형 기반 안전성능함수는 Table 9에 제시하였으며 3가지의 기저함수가 트럼펫형 진출램프 사고에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 3가지 변수는 모두 95% 통계적 수준 내 유의하게 도출되었으며 교통량이 32,000대/일 이하일때 차로수 변수와 상호작용하는 것으로 나타났다.

Table 9. Estimated parameter of SPF for trumpet exit ramps

Variable	Coefficient	Standard error	p-value	AIC
lanes*MAX (10.383-lnAADT,0)	-2.809	0.162	<.0001	
MAX (lnAADT-9.505,0)	2.710	0.275	<.0001	569
MAX (lnAADT-9.257,0)	-3.907	0.662	<.0001	

모형 개발을 통해 추정된 사고수정계수는 Table 10과 같다. NB 모형을 통해 추정된 차로수 변화에 따른 사고감소효과는 트럼펫형 진출램프에서 유의하게 도출되었으며 차로수가 2개로 구성된 램프구간에 비해 1개일 경우 안전효과가 약 52%인 것으로 나타났다. 반면 MARS 모형을 통해 추정된 사고감소효과는 약 81%로 이는 교통량이 약 32,000대/일 이하일 경우 유의하게 나타났다. 음이항 모형을 통해 추정된 사고수정계수보다 MARS 모형을 통해 추정된 사고수정계수의 표준오차가 적게 나타나 비교적 신뢰성이 높게 나타났다.

Table 10. Estimated crash modification factors (CMFs) for lanes

Variable	NB			MARS		
	CMF	Standard error	CI (95%)	CMF	Standard error	CI (95%)
Lane (2)_base	-	-	-	-	-	-
Lane (1)	0.48	0.43	0.27-0.87	0.19	0.03	0.11-0.26

기존 MARS 모형을 통해 도출된 사고감소효과는 교통량이 약 32,000대/일 이하인 비교적 교통량이 적은 진출램프에서 효과적인 것으로 나타났다. 해당 기준값을 토대로 운영효율성에 미치는 영향을 파악하기 위해 차량의 평균 주행속도를 60km/h로 가정하여 서비스수준을 산정한 결과, LOS B 수준인 것으로 나타났다. 차로수를 1개 차로로 감축하여 운영할 경우 LOS D까지 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 해당 서비스수준은 특정 램프를 지정할 수 없기 때문에 임의적으로 산출된 수치이며 향후 고속도로 차로수 감소 대책 적용을 위해 램프별 정확한 서비스수준의 고려를 통해 운영효율성이 저하되지 않는 범위 내 적용이 필요할 것으로 예상된다.

4. 결과 종합

본 연구에서는 고속도로 트럼펫형 램프를 대상으로 주요 대책인 컬러레인 유무, 제한속도, 차로수 3가지 요인에 따른 안전성 평가를 수행하였다. 제한속도는 60km/h에 비해 40km/h일 경우 사고감소효과가 약 36%로 가장 안전하게 나타났다. 컬러레인의 경우 루프연결로에 효과가 있는 것으로 나타났으며 이는 급격한 커브구간 및 복잡한 경로로 인해 나타난 결과로 예상된다. 또한 운전자의 혼란 감소 및 명확한 주행 흐름을 유도하기 위해 루프연결로 사고 감소를 위해 컬러레인의 우선적 설치가 고려된다. 마지막으로 차로수는 2개로 구성된 램프구간에 비해 1개일 경우 사고감소효과가 약 52%로 도출되어 과속사고가 다발적으로 발생하는 구간을 대상으로 차로를 감소하여 운영하는 등에 대한 대책 마련이 필요할 것으로 예상된다.

결론

국가차원에서는 고속도로 램프부 교통안전 개선을 위해 다양한 대책을 적용하여 교통안전을 도모하고 있다. 하지만 지속적인 노력에도 불구하고 대책의 사후관리 및 정량적 영향 분석이 미흡한 실정이다.

이와 더불어 램프구간에서는 비교적 짧은 구간에도 불구하고 여러가지 종류의 표지판, 충격흡수시설, 시선유도봉 등 다양한 형태의 안전시설물이 혼재되어 있어 운전자의 혼란을 가중시킬 수 있다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 국내 고속도로 램프부에 적용 가능한 안전대책 및 대책별 사고감소효과를 체계적으로 정리하였으며 국외의 대책 및 효과평가 연구 고찰을 통해 벤치마킹 요소를 도출하였다. 국외의 경우 사고유형, 대책의 세분화를 통해 사고감소효과를 추정하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.


따라서 본 연구는 고속도로 램프구간 교통안전 개선을 위해 적용 가능한 안전대책 중 사고감소효과를 체계적으로 정리하기 위한 주요 대책 3가지를 선정하여 미국 HSM에서 제시하는 Cross-sectional 분석을 통해 안전성 평가를 수행하였다. 효과분석을 위해 제한속도, 컬러레인, 차로수 3가지 대책을 중점적으로 검토하였으며 음이향 및 MARS 모형을 통해 결과를 비교하였다. 컬러레인을 제외한 2가지 대책에 대해서는 MARS 모형 및 NB 모형 모두 유의하게 도출되었으며 추정된 사고수정계수의 표준오차가 작게 나타나 비교적 신뢰도가 크게 나타났다. 반면 컬러레인 관련 모형은 MARS 모형이 유의하게 도출되지 않아 NB모형의 결과만 제시하였다.

본 연구에서는 고속도로 램프부에 적용 가능한 안전대책 및 대책별 사고감소효과를 체계적으로 정리하고 고속도로 램프부 교통안전 증진을 위해 국내외 적용되고 있는 주요 대책들 중 일부 대책에 대해 심층적인 검증 및 효과분석을 수행하였다. 또한 추정된 사고감소효과의 신뢰성 제고를 위해 기존 음이향 모형을 보완한 MARS 모형을 적용하여 결과를 비교하였으며 표준오차가 적게 나타나 MARS를 통해 도출된 사고수정계수의 신뢰성이 음이향 모형에 비해 높은 것으로 나타났다.

제한속도는 60km/h에 비해 40km/h일 경우 사고감소효과가 크게 나타나 과속사고가 다발적으로 발생하는 구간을 대상으로 제한속도 하향 또는 화물차 제한속도 차등 적용방안 등에 대한 대책이 필요할 것으로 예상된다. 컬러레인의 경우 트럼펫형 루프연결로 사고 감소에 효과적인 것으로 나타났으며 차로수는 진출램프일 경우 2차로에 비해 1차로 운영 시 안전 효과가 큰 것으로 나타났다.

본 연구의 한계점 및 향후 연구과제는 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 길이 및 다양한 변수 수준에 따른 대책이 아니기 때문에 사고수정계수를 도출하였으나 가·감속차로 길이 등을 평가하기 위해 사고수정계수 뿐만 아니라 CMFunction을 통해 세분화된 결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다. 둘째, 본 연구에서는 안전성 평가를 위해 트럼펫형 램프구간을 분석 범위로 한정하였으나 클로버형 등 램프 유형에 따라 다른 결과가 도출될 수 있을 것으로 기대된다. 셋째, 안전성 평가를 위해 컬러레인, 제한속도, 차로수 3가지 대책을 고려하였으나 가·감속차로, 속도저감 노면표시, 제한속도 표지판 등 보다 많은 대책을 고려할 수 있을 것으로 예상된다.

ORCID

KWAK, Hyun-Jun  <http://orcid.org/0000-0003-1598-6522>

References

- AASHTO (2010), The Highway Safety Manual.
- Bared J., Giering G. L., Warren D. L. (1999), Safety Evaluation of Acceleration and Deceleration Lane Lengths, *ITE Journal*, 69, 50-54.
- Carter D., Srinivasan R., Gross F., Council F. (2012), Recommended Protocols for Developing Crash Modification Factors.
- Chen H., Liu P., Lu J. J., Behzadi B. (2009), Evaluating the Safety Impacts of the Number and Arrangement of Lanes on Freeway Exit Ramps, *Accident Analysis & Prevention*, 41(3), 543-551.
- Chio H., Park H. K., Kang I. J. (2005), A Study on the Optimal Intervals For Chevron Signs, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers D*, 25(2D), 331-339.
- FHWA (2019), Evaluation of Low-Cost Safety Improvements Pooled-Fund Study.
- Firestine M., McGee H., Toeg P. (1989), Improving Truck Safety at Interchanges, Summary Report (No. FHWA-IP-89-024).
- Friedman J. H. (1991), Multivariate Adaptive Regression Splines, *Annals of Statistics*, 19(1), 1-67.
- Haleem K., Gan A., Lu J. (2013), Using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) to Develop Crash Modification Factors for Urban Freeway Interchange Influence Areas, *Accident Analysis and Prevention* 55, 12-21.
- Harkey D. L., Srinivasan R., Baek J., Council F. M., Eccles K., Lefler N., Gross F., Persaud B., Lyon C., Hauer E., Bonneson J. A. (2008), Accident Modification Factors for Traffic Engineering and ITS Improvements, NCHRP Report 617, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Hong S. M. (2013), Methodology for Designing Pavement Marking to Reduce Vehicle Speed and Emission on Freeway Off-ramp(Master thesis), Hanyang University.
- Lee C., Abdel-Aty M. (2009), Analysis of Crashes on Freeway Ramps by Location of Crash and Presence of Advisory Speed Signs, *Journal of Transportation Safety & Security*, 1(2), 121-134.
- Lee J. B., Qian G., Chung E. (2013), Using Variable Speed Limits for Motorway Off-ramp Queue Protection, In Transportation Research Board 92nd Annual Meeting Proceedings, Transportation Research Board of the National Academies.
- Lim G. H., Kim. H. S., Chio H. S. (2007), A Study of Posted Speeds on Freeway Exits and Entrances, *J. Korean Soc. Transp.*, 25(4), Korean Society of Transportation, 7-19.
- Lord D., Bonneson J. A. (2007), Development of Accident Modification Factors for Rural Frontage Road Segments in Texas, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2023, 20-27.
- No C. G., Park J. S., Son B. S. (2008), A Study of Accident Models for Highway Interchange Ramps, *J. Korean Soc. Transp.*, 26(4), Korean Society of Transportation, 29-40.
- Park J. (2015), Exploration and Development of Crash Modification Factors and Functions for Single and Multiple Treatments, *Electronic Theses and Dissertations*, 2004-2019. 706.
- Park J., Abdel-Aty M., Lee C. (2014), Exploration and Comparison of Crash Modification Factors for Multiple Treatments on Rural Multilane Roadways, *Accident Analysis & Prevention*, 70, 167-177.
- Park J., Abdel-Aty M., Wang J., Lee C. (2015), Assessment of Safety Effects for Widening Urban Roadways in Developing Crash Modification Functions using Nonlinearizing Link Functions, *Accident Analysis and Prevention* 79, 80-87.
- Srinivasan R., Baek J., Carter D. L., Persaud B., Lyon C., Eccles K. A., Gross F., Lefler N. (2009), Safety evaluation of improved curve delineation (No. FHWA-HRT-09-045), United States, Federal Highway Administration.
- Voigt A. P., Stevens Jr C. R., Borchardt D. W. (2008), Dual-advisory Speed Signing on Freeway-to-freeway Connectors in Texas, *Transportation Research Record*, 2056(1), 87-94.