

# 다양한 통계 기법을 활용한 안전성능함수 개발 및 비교 연구 : 트럼펫형 램프를 중심으로

## Development and Exploration of Safety Performance Functions Using Multiple Modeling Techniques : Trumpet Ramps

양 삼 규\* · 박 준 영\*\* · 권 경 주\*\*\* · 이 현 석\*\*\*\*

\* 주저자 : 한양대학교 스마트시티공학과 석사과정  
 \*\* 교신저자 : 한양대학교 교통물류공학과 조교수 / 한양대학교 스마트시티공학과 조교수  
 \*\*\* 공저자 : 한국도로공사 광주전남본부 합평지사 사원  
 \*\*\*\* 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

Samgyu Yang\* · Juneyoung Park\*\* · Kyeongjoo Kwon\*\*\* · Hyunsuk Lee\*\*\*\*

\* Dept. of Smart City Eng., Univ. of Hanyang  
 \*\* Dept. of Transportation&Logistics Eng., Univ. of Hanyang/Dept. of Smart City Eng., Univ. of Hanyang  
 \*\*\* Korea Expressway Corporation Gwangju Jeonnam Regional  
 \*\*\*\* Korea Expressway Corporation Research Institute

† Corresponding author : Juneyoung Park, juneyoung@hanyang.ac.kr

Vol. 20 No.5(2021)  
 October, 2021  
 pp.35~44

pISSN 1738-0774  
 eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.5.35>

Received 30 July 2021  
 Revised 17 August 2021  
 Accepted 28 September 2021

### 요 약

최근 고속도로 본선구간에서 발생한 교통사고에 대한 연구가 다수 수행되고 있으나, 램프와 같이 본선 외 구간에 대한 교통안전을 다루는 연구는 미미한 실정이다. 최근 5년(2015년~2019년)동안 램프에서 발생한 사고는 총 6,717건으로 이는 전체 고속도로 사고의 약 15%를 차지한다. 본 연구에서는 고속도로 램프구간에 대해 보다 정확한 사고 예측 모형을 제공하기 위해 포아송 감마(PG)와 포아송 역가우스(PIG)와 같은 다양한 통계 분포를 비롯하여 램프효과와 같은 기법을 적용하여 Simple 및 Full SPF를 구축하고 비교하였다. 교통 및 도로 기하구조 데이터는 로드뷰와 같은 다양한 시스템에서 수집되었다. 분석 결과, PIG 모형은 일반적으로 더 정확한 사고 예측을 제시하며, Simple SPF와 Full SPF 모두에서 임의효과 모형이 더욱 우수한 성능을 나타내었다. 본 연구결과는 교통실무자들에게 정확한 사고 예측 모형을 기반으로 램프구간 교통안전을 증대시키고 이해할 수 있는 참고자료로써 활용될 수 있다.

핵심어 : 트럼펫형 램프, 안전성능함수, 음이항, 역가우스, 임의효과

### ABSTRACT

In recent times, several studies have been conducted focusing on crashes occurring on the main segment of the highway. However, there is a dearth of research dealing with traffic safety relating to other highway facilities, especially ramp areas. According to the Korea Expressway Corporation's Expressway Information Service, 6,717 crashes have occurred on ramps in the five years from 2015-2019, which accounts for about 15% of all highway accidents. In this study, the simple and full safety performance functions (SPFs) were evaluated and explored using different statistical

© 2021. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

distributions (i.e., Poisson Gamma (PG) and Poisson Inverse Gaussian (PIG)) and techniques (i.e., fixed effects (FE) and random effects (RE)) to provide more accurate crash prediction models for highway ramp sections. Data on the geometric characteristics of traffic and roadways were collected from various systems and with extensive efforts using a street-view application. The results showed that the PIG models present more accurate crash predictions in general. The results also indicated that the RE models performed better than FE models for simple and full SPFs. The findings from this study offer transportation practitioners using the Korea Expressway Corporation's Expressway a dependable reference to enhance and understand traffic safety in ramp areas based on accurate crash prediction models and empirical evidence.

Key words : Trumpet ramp, Safety performance function, Negative binomial, Inverse-gaussian, Random effect

## I. 서 론

고속도로에서 발생한 사고와 관련하여 이에 영향을 미치는 연구는 빈번히 이루어지고 있으나, 주로 고속도로 본선 구간에 초점을 맞추어 수행되었으며, 본선 외 구간에서 발생하는 교통사고에 대한 연구는 미미하다. 그러나 한국도로공사에 따르면 램프구간은 최근 5년(2015년~2019년)동안 6,717건의 사고가 발생하였으며, 이는 전체 고속도로 사고의 약 15%로써 상대적으로 많은 사고가 발생하였다. 이러한 램프는 고속도로 본선과의 진출입을 위해 운전자의 주의가 요구되며, 주로 커브구간으로 이루어져 차량이 과속 할 경우 차체 중심을 잃고 전도 및 전복될 가능성이 높다. 이러한 램프구간은 본선구간에 비해 비교적 동일한 지점에서 반복적으로 교통사고가 발생하기 때문에 안전성 개선사업을 통한 기대 효과가 클 것으로 예상된다. 또한 램프구간은 컬러레인 등 특징적인 기하구조 측면에서 본선 구간과의 차이가 존재하며, 이에 대한 분석이 필요하다. 특히 트럼펫형 램프는 국내 고속도로 램프 유형의 약 64%를 차지하며, 국내 고속도로 램프 사고의 약 65%가 발생한다. 이에 따라 트럼펫형 램프에 대한 세부적인 분석이 필요하다. 또한 트럼펫형 램프는 사고발생지점을 특정시키기 용이하여 분석을 수행함에 있어 적합하다.

이에 따라 본 연구는 최근 5년(2015년~2019년)동안 전국 트럼펫형 램프 300개소에서 발생한 사고 중 사고가 발생한 연결로를 특정시킬 수 있는 사고를 대상으로 사고에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 사고 빈도수 예측을 위한 안전성능함수(Safety Performance Functions, SPFs)를 개발하고자 한다. 안전성능함수는 교통사고에 영향을 미칠 수 있는 도로 기하구조, 교통 특성, 기타주변 환경 등을 통해 해당 도로 구간의 사고 빈도를 추정하는 사고예측모형을 말한다(Hauer, 1997). 일반적으로 음이항 모형을 통해 개발되며, 교통안전대책이 적용되지 않은 참조그룹에 대해 개발할 수 있다(Park et al., 2014) 본 연구에서는 음이항 모형 및 역가우스 모형에 임의효과(random effect)를 적용한 GLM(Generalized Linear Model)을 통해 안전성능함수를 개발하고 비교하고자 한다.

## II. 기존문헌고찰

### 1. 고속도로 사고 관련 연구

Kang and Lee(2002)은 호남고속도로를 중심으로 직선부 및 곡선부의 선형회귀분석 모형을 개발하였으며,

Kim et al.(2011)은 포아송 및 음이항 회귀모형을 통해 평면선형을 직선부, 곡선부, 연속곡선부로 구분하여 사고빈도모형을 개발하였다. 또한 Lemp et al.(2011)은 순서형 프로빗 모형을 통해 대형 트레일러일 경우 사고 심각도가 증가함을 밝혔으며, Choi et al.(2013)은 이항 로지스틱 회귀분석을 통해 고속주행이 가능하거나 열악한 기상조건에서 내리막 주행 시 사고 심각도가 증가함을 밝혔다. Kang et al.(2019)은 순서형 프로빗 모형을 통해 고속도로에서 야간 주행 및 속도가 높을수록 사고 심각도가 증가함을 밝혔다.

Yoon(2007)은 다중회귀모형을 통해 트럼펫형 연결로 유형별로 곡선반경 등 선형조건에 따른 사고 예측모형을 개발하였다. Choi et al.(2012)은 트럼펫형 램프의 도로선형자료와 교통사고 간의 관계를 분석하기 위해 포아송, 음이항, 영과잉 회귀모형을 개발하여 비교하였다.

## 2. 임의효과 모형 관련 연구

Lee et al.(2015)은 교차로나 가로구간의 도로지형 및 기하구조가 이질성(Heterogeneity)을 고려하기 위해 임의효과를 이용한 포아송 및 음이항 회귀모형을 통해 도심지 교차로 교통사고모형을 개발하였으며, 기하구조의 이질성을 고려한 임의효과 음이항 회귀모형으로 개발한 교통사고 발생모형이 기존 고정효과모형보다 설명력이 뛰어난 것으로 분석되었다. Alarifi et al.(2017)은 교차로 구간 교통사고모형 개발하기 위해 Multilevel Poisson-lognormal (MPLN) model을 기반으로 임의효과를 고려한 베이지안 모델을 추정하였으며, 모형에서 임의효과를 포함하는 것의 이점을 밝힌다. Anastasopoulos et al.(2012)은 임의효과 토빗(tobit) 모형을 이용하여 고속도로 교통사고에 미치는 요인에 대하여 연구하였으며, 이는 특정한 도로구간에서의 사고율을 결정하는 요인에 대한 보다 깊은 이해를 제공할 수 있는 가능성을 발견하였다. Yu et al.(2013)은 실시간 기상 정보와 교통 데이터를 포함한 고속도로 교통사고 모형을 개발하기 위해 베이지안 기반 포아송 회귀모형을 개발하였으며, 임의효과를 포함한 모형은 다른 모형보다 뛰어난 성능을 보임을 밝힌다.

## 3. 기존 연구와의 차별성 및 의의

고속도로 교통사고와 기하구조 및 교통조건과의 관계에 대한 연구가 빈번히 수행되었으며, 고속도로 본선부에서 발생한 교통사고와 평면선형과의 관계를 분석한 연구뿐만 아니라 램프와 같은 본선 외 구간에 대해 도로 선형조건과 교통사고와의 관계에 대한 연구도 일부 수행되었다. 그러나 임의효과 모형을 사용하여 고속도로 교통사고 모형을 개발하는 연구들은 대부분 고속도로 본선부에 국한되어 수행되어져 왔으며, 이외의 구간에 대한 연구는 미미하다.

이에 따라 본 연구에서는 고속도로 램프 구간에서 발생하는 사고에 대한 분석을 수행함에 있어 임의효과를 적용함으로써, 램프구간 안전성능함수 개발 시 기존 모형에 비해 임의효과 모형이 가지는 이점을 확인하고 도출한 안전성능함수 간의 비교 및 분석을 수행하고자 한다.

# Ⅲ. 분석개요

## 1. 데이터

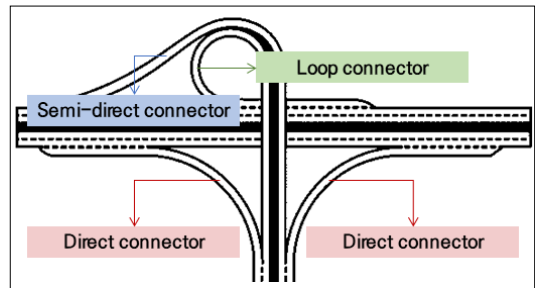
### 1) 사고자료

본 논문에서는 국내 고속도로 트럼펫형 램프 300개소에서 최근 5년(2015년~2019년) 동안 발생한 사고를

대상으로 분석을 수행하였으며, 트럼펫형 램프는 루프연결로, 준직결연결로, 직결연결로로 구성되어 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013). 그러나, 고속도로 사고자료에 기재된 사고발생 노선 및 이정은 본선부를 기준으로 작성되어 있어 램프에서 발생한 사고에 대해 사고발생 이정을 통해 사고가 발생한 연결로 및 지점을 특정시키는 것은 어려움이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 사고 발생 이정과 더불어 사고 내용을 통해 사고 차량의 이동 경로를 파악하여 사고가 발생한 연결로를 매칭하였다. 본 연구에서는 이를 통해 트럼펫형 내 사고가 발생한 연결로를 특정시킬 수 있는 총 3,790건의 사고를 대상으로 분석을 수행하였다.

<Table 1> Accidents by Ramp

		# of Connector	# of Accident
Connector	Direct	599	1,589
	Semi-direct	306	1,122
	Loop	293	1,079
Exit/Entry	Exit	599	1,523
	Entry	599	2,267
Total		1,198	3,790



<Fig. 1> Connector of the Trumpet ramp

## 2) 기하구조 및 교통자료

본 논문에서는 분석을 위해 램프 연결로별 가감속차로 길이, 컬러레인 유무, 제한속도, 차로수를 카카오맵 로드뷰 및 스카이뷰를 통해 수집하였으며, 연도별 기하구조의 변화를 수집하기 어려워 카카오맵을 통해 확인 가능한 2017년 2월을 기준으로 자료를 수집하였다. 또한 VDS를 통해 연결로별 교통량 수집하는 것에 어려움이 있어 TMS 교통량 정보제공 시스템을 통해 2015년에서 2019년까지 램프가 연결된 본선을 통행하는 전체 및 화물차 교통량을 수집하고 이를 산술평균하여 활용하였다.

<Table 2> Geometry and Traffic Data

	Mean	S.D	Min	Max
Length of Ac/Deceleration lane (m)	312.16	135.96	40	1,410
Colorlane	Presence : 87		Absence : 1,111	
Speed Limit (km/h)	45.75	5.68	30	60
Number of Lane	1.09	0.31	1	4
AADT (veh/day)	26,099	21,629	4,326	116,601
Rate of Truck Traffic(VehRate_T)	0.296	0.070	0.118	0.529

## 2. 분석 방법론

### 1) 안전성능함수(SPFs, Safety Performance Functions)

안전성능함수는 교통량, 도로 기하구조와 같은 설명변수를 사용하여 사고건수를 예측하는 교통사고 예측

모형으로서, 일반적으로 일정기간 동안 발생한 교통사고 자료를 이용하여 현재 도로에서의 잠재적 안전성이 나 개선사업이 수행되기 전, 안전효과를 예측하는 모형으로 사고수정계수(CMF, Crash Modification Factor)와 함께 사용된다(AASHTO, 2010). 이러한 안전성능함수는 설명 변수에 따라 Simple SPF와 Full SPF로 구분되며, Simple SPF는 설명변수로 AADT를 적용하지만 Full SPF는 AADT 및 구간길이 외에 다양한 도로 기하구조 등을 적용한다(Srinivasan et al., 2013). 본 연구에서는 차로폭 및 곡선반경 등 일반적인 기하구조 변수는 동일한 이상적 조건이라는 가정 하에 Simple 및 Full SPF를 구축하였으며, Full SPF 구축 시에 포함한 변수는 일반적인 기하구조를 제외하고 연결로 종류, 차로수, 컬러레인 유무와 같은 특징적인 변수를 포함하여 구축하였다.

2) 음이항 모형(NB, Negative Binomial)

음이항 분포는 분산이 평균보다 크다는 가정에서 출발하며, 이는 포아송 회귀식에서 발생할 수 있는 과분산(overdispersion)문제를 해결할 수 있어 널리 사용되고 있다. 이러한 음이항 모형에서 사고발생건수는 평균  $\lambda$ 의 포아송 분포를 따르며,  $\lambda$ 는 랜덤 변수이며 감마 분포를 따른다. 또한 사고발생의 분포는 음이항 확률 분포를 따른다(Kulmala. 1995; Hauer. 1997).

$$y_i | \lambda_i \approx Poisson(\lambda_i) \quad \lambda \approx \Gamma(a, b) \quad \lambda = EXP(\beta X + \epsilon) \dots\dots\dots (1)$$

$$P(y_i) \approx Nebin(\lambda_i, k) = \frac{\Gamma(1/k + y_i)}{y_i! \Gamma(1/k)} \left( \frac{k \lambda_i}{1 + k \lambda_i} \right)^{y_i} \left( \frac{1}{1 + k \lambda_i} \right)^{1/k}$$

- 여기서,  $a$  = shape parameter
- $b$  = scale parameter,
- $y$  = 도로 구간  $i$ 에서 발생하는 사고건수
- $\lambda$  = 도로 구간  $i$ 에서 추정되는 사고건수
- $EXP(\epsilon)$  = 평균 1과 분산  $k$ 를 갖는 감마 분산 오차 항
- $k$  = over-dispersion parameter

3) 역가우스 모형(PIG, Poisson-Inverse Gaussian)

역가우스 모형은 룬테일 현상이 관찰될 때 사고 예측 모형을 개발하는데 용이하다. 음이항 모형에서는  $\lambda$ 에 대해 감마 분포로 가정하지만, 역가우스 모형에서는  $\nu$ 를 역가우스 분포로 가정한다(Dean et al. 1989; Rigby and Stasinopoulos. 2005).

$$g(\nu) = (2 \pi \tau \nu^3)^{-1/2} e^{-(\nu-1)^2/2\nu}, \nu > 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$P(z) = \sum_{i=1}^{\infty} p(y) x^y = \exp(\tau^{-1} [1 - 1 - \tau \lambda (x - 1)^{1/2}])$$

$$p(y_i | \lambda_i, \tau) = \left( \frac{2\alpha}{\pi} \right)^{1/2} \frac{\lambda_i y_i e^{1/\tau} y_i - \frac{1}{2}(\alpha)}{(a_i \tau)^{y_i} y_i!} \quad \alpha_i = \sqrt{\frac{1}{\tau^2} + \frac{2\lambda_i}{\tau}}$$

- 여기서,  $g(\nu) = \nu$ 의 확률밀도함수
- $\tau = \nu$ 의 분산

#### 4) 임의 효과 모형(Random Effect Model)

임의효과 모형은 무한정인 수준의 수를 가진 요인의 모집단이 있을 때, 연구에서 나타난 관심의 수준이 그 모집단으로부터 확률적으로 뽑힌 표본이라고 생각하는 요인의 효과를 말한다. 즉, 도로 기하요소 및 교통 변수가 위치 고유 영향(즉, 그룹 고유 변화)을 가질 가능성이 높기 때문에 무작위 변화를 도입함으로써 관찰 되지 않은 이질성을 설명하는 데 더 적합할 수 있다고 알려져 있다. 이로 인해 임의효과 모형은 사고예측 모형에 빈번히 적용되었다. 이러한 임의효과 모형은 예상되는 사고건수( $\tilde{\lambda}_{it}$ )와 도로 구간  $i$ 의 공변량( $X_{it}$ ) 사이의 관계에 위치에 따른 임의 효과를 도입함으로써 적용될 수 있다(Chin and Quddus, 2003).

$$\tilde{\lambda}_{it} = \exp(X_{it}\beta + \delta_i) \quad (3)$$

여기서,  $\delta_i$  = 임의 효과

$\beta$  = 변수의 추정계수

### IV. 분석결과

#### 1. 모형 결과 : Simple SPF

고속도로 트럼펫형 램프 사고에 대해 음이항 모형(NB, Negative Binomial), 음이항 임의효과 모형(RENB, Random Effect NB), 역가우스 모형(PIG, Poisson-Inverse Gaussian), 역가우스 임의효과 모형(REPIG, Random Effect PIG)을 통해 상수항과 교통량(lnAADT)만을 포함한 Simple SPF를 구축하였으며, 아래 <Table 3>와 같다. 본 논문에서는 SAS의 proc glimmix 프로시저를 사용하여 상수항에 임의효과 처리하여 분석하였다.

적합도 검정은 AIC(Akaike Information Criterion)와 BIC(Bayes Information Criterion)를 기반으로 수행하였다. AIC, BIC는 모두 주어진 데이터 셋에 대한 통계 모델의 상대적인 품질을 평가하는 것으로 낮을수록 성능이 우수하며, BIC는 AIC에 비해 변수가 많을수록 더 패널티를 가하는 성격을 지닌다. 전반적으로 음이항 모형에 비해 역가우스 모형이 더 나은 성능을 제공하는 것으로 나타났으며, 이는 사고 데이터를 분석함에 있어 감마 분포보다 역 가우스 분포의 유연성에 의해 설명이 용이한 것으로 설명될 수 있다(Zha, et al., 2016). 또한 일반적으로 임의효과 항을 GLM에 포함시키면 대상 현장 전반에서 관찰되지 않은 이질성을 설명할 수 있어 모형의 신뢰도를 높일 수 있으며, 본 연구에서도 음이항 및 역가우스 모형 모두 기본 모형에 비해 임의효과 모형의 성능이 더욱 우수한 것으로 도출되었다.

<Table 3> Estimated parameters of different regression models for ramp crashes : Simple SPF

Variable	NB	RENB	PIG	REPIG
Intercept	-7.8093(<.0001)	-7.8021(<.0001)	-4.7362(<.0001)	-5.0855(<.0001)
lnAADT	0.7283(<.0001)	0.7040(<.0001)	0.4567(<.0001)	0.4773(<.0001)
Variance of random effects (S.E)		0.4560(0.07090)		0.4773(0.05753)
-2 log likelihood	2403.75	2329.87	1106.77	1031.60
AIC	2409.75	2337.87	1112.77	1039.60
BIC	2425.01	2355.50	1126.93	1057.24

## 2. 모형 결과 : Full SPF

고속도로 트럼펫형 램프 사고에 대해 음이항 모형(NB), 음이항 임의효과 모형(RENB), 역가우스 모형(PIG), 역가우스 임의효과 모형(REPIG)을 통해 구축한 Full SPF는 아래 <Table 4>와 같다. Full SPF는 상수항과 교통량(lnAADT)을 포함하여 준직결 진출연결로, 차선 수(lane), 제한속도(lnSpeedLimit), 화물차교통량 비율(VehRate\_T), 컬러레인 유무(Colorlane)를 조합하여 구축하였으며, 모형은 모두 90% 신뢰수준에 통계적으로 유의하게 도출되었다. 본 논문에서 SAS의 proc glimmix 프로시저를 이용하여 구간길이는 오프셋으로 설정하고, 상수항에 임의효과 처리하여 분석하였다.

전반적으로 교통량이 많을수록 램프 사고가 빈번히 발생하며, (1)진출하는 준직결 연결로이거나 (2)램프 차선수가 많을수록 (3)제한속도가 높을수록 사고 빈도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 (4)화물차 교통량이 많을수록 사고 빈도는 증가하지만, 컬러레인이 있는 구간은 화물차 교통량이 증가하여도 사고가 감소하는 것으로 나타났다.

적합도 검정은 AIC와 BIC를 기반으로 수행하였으며, Simple SPF에서와 동일하게 Full SPF도 음이항 모형에 비해 역가우스 모형이 더 나은 성능을 제공하는 것으로 나타났다. 또한 음이항 및 역가우스 모형 모두 기본 모형에 비해 임의효과 모형의 성능이 더욱 우수한 것으로 도출되었다.

<Table 4> Estimated parameters of different regression models for ramp crashes : Full SPF

Variable	NB	RENB	PIG	REPIG
Intercept	-12.6082(<.0001)	-12.5215(<.0001)	-10.3206(<.0001)	-10.0083(<.0001)
lnAADT	0.5344(<.0001)	0.5281(<.0001)	0.4359(<.0001)	0.3848(<.0001)
exit * semi_direct	0.4916(<.0001)	0.4898(<.0001)	0.2094(0.1000)	0.3021(0.0202)
lane	0.4677(<.0001)	0.3368(0.0156)	1.3205(0.0001)	0.9309(0.0071)
lnSpeedLimit	0.1211(0.0003)	0.1453(<.0001)	0.1393(<.0001)	0.1514(<.0001)
Colorlane * VehRate_T	-1.3073(0.0043)	0.8436(0.0737)		
VehRate_T			4.4907(<.0001)	3.1777(<.0001)
Variance of random effects (S.E)		0.1707(0.06346)		1.3404(0.06872)
-2 log likelihood	2472.03	2443.62	1242.87	1202.72
AIC	2486.03	2459.62	1256.87	1218.82
BIC	2521.65	2483.43	1289.90	1242.54

## V. 결론

고속도로 램프구간은 본선과의 진출입을 위해 운전자의 주의가 요구되며, 주로 커브구간으로 이루어져 차량의 사고 발생 가능성이 높은 구간으로서, 상대적으로 많은 사고가 발생하고 있다. 즉, 고속도로의 안전성 향상을 위한 분석 시 램프구간을 고려하는 것이 필요하며, 이에 따라 본 연구에서는 고속도로 트럼펫형 램프에서 발생한 사고를 통해 사고영향요인을 분석하고 안전성능함수를 개발하였다. 2015~2019년 사고자료, 교

통자료, 기하구조자료를 수집 및 분석하여 데이터베이스를 구축하였으며, 이를 토대로 NB, RENB, PIG, REPIG 모형 기반의 Simple SPF와 Full SPF를 구축하여 비교하였다.

먼저, Full SPF를 통해 교통량이 많을수록 램프 사고가 빈번히 발생하며, 진출여부, 연결로 종류(준직결), 램프 차선수, 제한속도, 컬러레인 유무가 사고 발생에 영향을 미치는 것을 밝혔다. 이에 따라 고속도로 램프 교통사고를 감소시키기 위해서는 진출하는 준직결 연결로의 제한속도를 하향하거나 램프 차선수의 감소 및 컬러레인 도입을 통해 사고 감소를 꾀할 수 있다.

분석결과 전반적으로 음이항 모형에 비해 역가우스 모형이 더 나은 성능을 제공하는 것으로 나타났으며, 이는 사고 데이터를 분석함에 있어 감마 분포보다 역 가우스 분포의 유연성에 의해 설명이 용이한 것으로 설명될 수 있다(Zha et al., 2016). 본 연구에서 도출된 음이항 모형과 역가우스 모형의 성능은 차이가 매우 크게 도출되었으며, 이는 램프 구간의 데이터 특성일 것으로 판단된다. 이러한 현상은 본 연구에서 사용된 데이터에 한정되어 있음을 밝히며, 추후 모형의 이식성을 고려한 추가적인 분석이 필요하다.

또한, 일반적으로 임의효과 항을 포함시키면 대상 현장 전반에서 관찰되지 않은 이질성을 설명할 수 있어 모형의 신뢰도를 높일 수 있으며, Simple SPF를 비롯하여 Full SPF 모두 상수항에 임의효과를 적용한 모형의 성능이 기존 모형에 비해 더욱 우수한 것으로 도출되었다.

마지막으로 적합도 측면에서 Simple SPF가 Full SPF 보다 더 나은 성능을 나타내고 있으며, 이는 본 연구에서 Full SPF 구축 시 컬러레인 유무, 제한속도와 같이 램프의 특징적인 교통안전대책이 변수로서 사용되어 일반적인 도로 특성 반영이 어려웠기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 이에 따라 향후 추가적인 연구를 통해 Full SPF를 개발 할 경우 제한속도와 같은 도로 운영시설 뿐만 아니라 램프 내 차로폭, 곡선반경, 길어깨 폭, 종단경사 등과 같은 도로 기하구조적 변수를 고려한다면 더욱 높은 성능의 안전성능함수 개발이 가능할 것이다. 또한 이러한 안전성능 함수를 기반으로 사고 위험구간 및 교통 안전대책 도입 우선구간 산정을 통해 체계적인 교통안전관리 전략을 수립할 수 있을 것이다.

이와 더불어 컬러레인과 가감속차로 길이 등 램프의 특징적인 요인들의 사고수정계수를 산정한다면 추후 안전개선 사업 효과 산정 등 안전 사업에 대한 활용도가 증대될 것으로 기대되며, 이에 대한 향후 연구가 수반될 필요가 있다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 한국연구재단(NRF-2019R1G1A1010209)의 지원으로 수행하였습니다.

## REFERENCES

- Alarifi S. A., Abdel-Aty M. A., Lee J. and Park J.(2017), "Crash modeling for intersections and segments along corridors: A Bayesian multilevel joint model with random parameters," *Analytic Methods in Accident Research*, vol. 16, pp.48-59.
- American Association of State Highways and Transportation Officials(AASHTO)(2010), *The Highway Safety Manual*.
- Anastasopoulos P. C., Mannering F. L., Shankar V. N. and Haddock J. E.(2012), "A study of factors



- affecting highway accident rates using the random-parameters tobit model,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 45, pp.628-633.
- Chin H. C. and Quddus M. A.(2003), “Applying the Random Effect Negative Binomial Model to Examine Traffic Accident Occurrence at Signalized Intersections,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 35, no. 2, pp.253-259. doi: 10.1016/S0001-4575(02)00003-9
- Choi S. R. N., Kim M. J., Oh C. and Lee K. Y.(2013), “Effects of Weather and Traffic Conditions on Truck Accident Severity on Freeways,” *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, vol. 33, no. 3, pp.1105-1113.
- Choi Y. H., Oh Y. T., Choi K. C., Lee C. K. and Yun I. S.(2012), “Traffic Crash Prediction Models for Expressway Ramps,” *Int. J. Highw. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp.133-143.
- Dean C., Lawless J. F. and Willmot G. E.(1989), “A mixed poisson-inverse-gaussian regression model,” *Canadian Journal of Statistics*, vol. 17, no. 2, pp.171-181.
- Hauer E.(1997), *Observational Before-After Studies in Road Safety: Estimating the Effect of Highway and Traffic Engineering Measures on Road Safety*, Oxford, UK: Pergamon Press, Elsevier Science Ltd.
- Kang C. M., Chung Y. S. and Chang Y. J.(2019), “Injury Severity Analysis of Truck-involved Crashes on Korean Freeway Systems using an Ordered Probit Model,” *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, vol. 39, no. 3, pp.391-398.
- Kang J. G. and Lee S. G.(2002), “Traffic Accident Prediction Model by Freeway Geometric Types,” *J. Korean Soc. Transp.*, vol. 20, no. 4, pp.163-175.
- Kim S. Y., Choi J. S., Lee S. B., Kim S. M., Cho W. B. and Kim Y. S.(2011), “Freeway Crash Frequency Model Development Based on the Classification of Geometric Alignment Type,” *Int. J. Highw. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp.97-105.
- Kulmala R.(1995), *Safety at Rural Three-and Four-arm Junctions: Development and Application of Accident Prediction Models*, Espoo: Technical Research Center at Espoo, VTT Publications.
- Lee S. H., Park M. H. and Woo Y. H.(2015), “A study on developing crash prediction model for urban intersections considering random effects,” *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 1, pp.85-93.
- Lemp J. D., Kockelman K. M. and Unnikrishnan A.(2011), “Analysis of Large Truck Crash Severity Using Heteroskedastic Ordered Probit Models,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 43, no. 1, pp.370-380.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), *Rules concerning road structure and facilities*. (in Korean)
- Park J., Abdel-Aty M. and Lee C.(2014), “Exploration and comparison of crash modification factors for multiple treatments on rural multilane roadways,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 70, pp.167-177.
- Rigby R. A. and Stasinopoulos D. M.(2005), “Generalized additive models for location, scale and shape,” *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, vol. 54, no. 3, pp.507-554.
- Srinivasan R., Carter D. and Bauer K. M.(2013), *Safety performance function decision guide: SPF calibration vs SPF development (No. FHWA-SA-14-004)*, United States, Federal Highway Administration, Office of Safety.

- Yoon B. J.(2007), “Development of Traffic Accident Forecasting Models for Trumpet IC Ramp Types of Freeway,” *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, vol. 27, no. 1D, pp.81-87.
- Yu R., Abdel-Aty M. and Ahmed M.(2013), “Bayesian random effect models incorporating real-time weather and traffic data to investigate mountainous freeway hazardous factors,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 50, pp.371-376.
- Zha L., Lord D. and Zou Y.(2016), “The Poisson inverse Gaussian(PIG) generalized linear regression model for analyzing motor vehicle crash data,” *Journal of Transportation Safety & Security*, vol. 8, no. 1, pp.18-35.