

도로기하구조가 기상상태에 따라 고속도로 교통사고 심각도에 미치는 영향 분석

The Effects of Road Geometry on the Injury Severity of Expressway Traffic Accident Depending on Weather Conditions

박수진* · 고승영** · 박호철***

* 주저자 : 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

** 공동저자 : 서울대학교 건설환경공학부 교수

*** 교신저자 : 서울대학교 건설환경종합연구소 선임연구원

Su Jin Park* · Seung-Young Kho** · Ho-Chul Park***

* Dept. of Civil and Environmental Eng, Seoul National Univ.

** Dept. of Civil and Environmental Eng, Seoul National Univ.

*** Institute of Construction and Environmental Eng, Seoul National Univ.

† Corresponding author : Ho-Chul Park, hochul.park@snu.ac.kr

Vol.18 No.2(2019)

April, 2019

pp.12~28

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.2.12>

2019.18.2.12

Received 4 January 2019

Revised 7 February 2019

Accepted 3 March 2019

© 2019. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요약

도로기하구조는 교통사고를 발생시키는 다양한 요인 중 하나이지만, 동일한 도로기하구조 조건하에서도 기상상태에 따라 교통사고에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 본 연구에서는 2001년부터 2014년까지 14년간 전국 고속도로 사고자료와 기상자료를 매칭하여 교통사고 심각도에 영향을 미치는 변수들을 분석하였다. 도로기하구조와 기상상태의 상호작용이 사고심각도에 미치는 영향뿐만 아니라, 개별사고 심각도 간의 지역별 상관성을 반영하기 위해 위계적 순서형 모형을 사용하였다. 위계적 모형 중에서도 도로기하구조와 기상상태의 상호작용 변수를 포함한 임의절편모형과 기상상태의 지역별 특성을 상위변수로 포함하는 임의계수모형을 모두 활용하였다. 분석결과 톨게이트 및 램프구간, 내리막 경사 3%이상, 콘크리트 방호벽 등이 기상상태에 따라 사고 심각도에 미치는 영향이 달라지는 것을 확인하였다. 또한 도로기하구조와 기상상태의 복합적인 영향은 강우량 또는 강설량에 선형적이지 않을 수 있음을 보여주었다. 끝으로 본 연구의 분석결과를 기반으로 안전개선 대책을 제시하였으며, 이를 토대로 향후 교통사고 심각도 감소가 가능할 것으로 기대된다.

핵심어 : 기상상태, 도로기하구조, 위계적 순서형 로짓 모형, 교통사고 심각도

ABSTRACT

Road geometry is one of the many factors that cause crashes, but the effect on traffic accident depends on weather conditions even under the same road geometry. This study identifies the variables affecting the crash severity by matching the highway accident data and weather data for 14 years from 2001 to 2014. A hierarchical ordered Logit model is used to reflect the effects of road geometry and weather condition interactions on crash severity, as well as the correlation between individual crashes in a region. Among the hierarchical models, we apply a random intercept model including interaction variables between road geometry and weather condition and a random coefficient model including regional weather characteristics as upper-level variables. As a result, it is confirmed that the effects of toll, ramp, downhill slope of 3% or more, and concrete barrier on the crash severity

vary depending on weather conditions. It also shows that the combined effects of road geometry and weather conditions may not be linear depending on rainfall or snowfall levels. Finally, we suggest safety improvement measures based on the results of this study, which are expected to reduce the severity of traffic accidents in the future.

Key words : Weather Condition, Road Geometry, Hierarchical Ordered Logit Model, Crash Severity

I. 서론

교통사고의 발생원인은 인적요인, 도로환경요인, 차량요인 3가지로 구분할 수 있으며, 대부분 요인 간 상호작용으로 인해 교통사고가 발생하게 된다. 이 중 도로환경요인은 교통사고 발생원인의 약 34%를 차지하는 것으로 나타났다(AASHTO, 2010). 도로환경요인에 포함된 여러 요소 중 차로수, 길어깨 폭, 종단경사, 곡선반경, 노면상태, 날씨 등이 교통사고 심각도에 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Othman et al., 2009; Park et al., 2013).

도로환경요인 중 도로기하구조에 따라 교통사고 심각도에 미치는 영향요인이 다르지만 동일한 도로기하구조 조건에서 기상상태에 따라 교통사고 심각도에 미치는 영향이 다를 수 있다(Dadashova et al., 2016; Park et al., 2010). <Table 1>에서 볼 수 있듯이 지난 10년 간 도로노면 상태에 따른 고속도로 사망건수 비율은 건조한 상태(4.14%)에 비해 습윤 또는 빙설 시(5.67%) 높은 것으로 나타났다. 도로노면 상태를 기상상태와 동일하게 판단할 수 없으나 맑은 날씨에 비해 강우, 강설, 안개 시 사고 심각도가 높아지는 것은 기존 연구에서도 찾아볼 수 있다(Kim et al., 2017). 이러한 악천 후 기상상태는 고속도로의 연결로 또는 요금소, 종단경사 여부, 곡선반경 여부 등에 따라 더 심각한 사고를 발생시킬 수 있다. 따라서 도로환경요인이 교통사고 심각도에 미치는 영향을 명확히 분석하기 위해서는 단순 도로기하구조 뿐만 아니라 기상상태에 따른 복합적인 분석이 필요하다.

사고 심각도 분석에 있어서 각 개별사고는 발생 지역에 따라 상관성을 가질 수 있다. 지역에 따라 지형, 인구구성, 의료 환경, 도로관리 수준 등의 차이가 존재하기 때문에 유사한 사고에 대해서도 지역에 따라 심각도가 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지역에 따른 상관성을 고려하여 기상상태와 도로기하구조가 교통사고 심각도에 미치는 복합적인 영향을 분석하기 위해 위계적 순서형 로짓 모형(Hierarchical Ordered Logit Model)을 적용하였다. 본 연구의 목적은 두 가지로 구분된다. 먼저 고속도로 교통사고 심각도에 영향을 미치는 기상상태와 도로기하구조의 복합적인 위험요인을 확인하는 것이다. 이를 위해 위계적 순서형 로짓 모형을 적용하였으며, 그 적용타당성 및 타 모형 대비 우수성을 검토하였다. 다음으로 분석된 위험요인을 바탕으로 향후 고속도로 사고 심각도 개선을 위한 방안을 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 교통사고 사고건수 및 심각도와 관련된 기존문헌 고찰을 수행하였다. 분석을 위한 연구방법론 및 사용 데이터에 대한 기술은 3장에, 위계적 순서형 로짓모형을 활용한 연구결과 및 논의사항을 4장에 서술하였다. 마지막 5장에서는 분석결과를 토대로 도로기하구조 및 기상상태에 따른 교통사고 심각도 개선방안 및 향후 연구과제에 대해 제시하였다.

<Table 1> Fatality ratio(2008~2017, TAAS)

Days	Years (Year)										
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Avg.
Dry	6.1%	5.6%	5.1%	3.9%	5.0%	4.2%	3.4%	2.6%	3.0%	2.5%	4.14%
Others	11.1%	9.7%	7.2%	4.3%	5.8%	4.7%	4.3%	3.2%	2.7%	3.7%	5.67%

II. 기존문헌 고찰

도로기하구조 및 기상상태가 교통사고 사고건수 또는 심각도에 미치는 영향요인을 밝혀내기 위해 다수의 연구들이 수행되었다. <Table 2>는 논문의 저자 및 년도와 분석 타겟 및 교통사고에 영향을 미치는 원인을 밝히기 위해 사용된 변수, 분석모형, 대상구간 등에 대하여 정리하였다. 한국(No.5, 6, 7, 9), 미국(No.1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 13) 등 다양한 지역의 사고데이터를 활용한 연구결과를 제시하였다. 기존 연구들은 특정 도로나 지역에서 발생하는 사고발생여부, 사고발생률, 사고심각도 등을 분석하기 위해 기상상태와 도로기하구조를 포함한 다양한 변수를 활용하였다. 분석방법으로는 로짓모형, 다중회귀모형, 군집분석, 베イズ 모형 등 다양한 분석모형들이 사용되었다.

기존문헌에서는 다양한 기상상태(강우, 강설, 온도, 풍속, 풍향, 습도)와 도로기하구조(노면상태, 곡선반경, 종단경사, 중앙분리대, 길어깨) 요인들이 교통사고에 영향을 미치고 있음을 제시하였다. 기상상태가 심각도에 미치는 영향의 경우 산지에서 강설로 인해 시야확보가 어렵거나(Ahmed et al., 2011; Ahmed et al., 2012), 풍향이 차량운행방향과 다를 경우 차량제어에 한계가 발생하고, 풍속이 높을수록 시야확보의 어려움과 강풍으로 인해 도로에 나뭇가지 등의 지장물로 인해 심각도가 높아지게 된다(Khattak and Knapp, 2001; Bilonis, 2013; Liu, 2013). 또한 강우나 강설로 인해 노면마찰력이 저하되어 사고 심각도에 영향을 미친다(Lee et al., 2000; Kim, 2001). 기하구조가 심각도에 미치는 영향의 경우 편경사나 곡선반경에 따라 강우 시 시야가 제한적이거나 운전오류가 발생할 수 있으며, 차량의 주행궤적 이탈 시 회피가능한 공간이 부족하여 심각도가 증가하게 된다(Othman et al., 2009; Song et al., 2006; Jung, 2011; Ma et al., 2017), 버스베이가 존재하는 구간인 경우 버스가 본선으로 진입 시 차선변경에 따라 다른 차량과의 충돌가능성으로 인해 심각도가 높아지는 것으로 분석되었다(Zeng et al., 2017).

동일한 기하구조라 할지라도 기상상태에 따라 교통사고에 미치는 영향이 달라질 수 있다. 지금까지 연구들은 강우, 강설 시 또는 산악지형, 교통사고 잦은 지점, 특정 노선, 주간 발생사고 등 한정적 조건에서만 분석되었다. 이에 본 연구는 조건을 특정하지 않고 국내에서 발생한 고속도로 교통사고 자료와 기상자료를 바탕으로 위계적 순서형 로짓모형을 활용하여 기상상태에 따라 도로기하구조가 교통사고 심각도에 미치는 영향을 분석하였다.

<Table 2> Summary of literature review

No	Author and Year	Analysis target	Geometry and Weather condition	Area	Model
1	Abdel-Aty and Abdalla (2004)	Crash Frequency	<ul style="list-style-type: none"> • The existence of horizontal curve • The existence of an upstream on-ramp • Pavement condition • Standard deviation of traffic volume/speed • Average speed 	Florida	Generalized Estimating Equations
2	Ahmed et al. (2011)	Crash rate	<ul style="list-style-type: none"> • Snow/dry season • Number of lanes • Degree of curve per segment 	Colorado (mountainous freeway)	Hierarchical Bayes Models
3	Ahmed et al. (2012)	Crash Frequency	<ul style="list-style-type: none"> • Snow/dry season • Vertical slope, Median width • Average speed • Degree of curve per segment 	Colorado (mountainous freeway)	Bayesian Logistic Regression

No	Author and Year	Analysis target	Geometry and Weather condition	Area	Model
4	Bilionis (2013)	Crash severity	<ul style="list-style-type: none"> • Wind (speed and direction) • Temperature • Rainfall, Snowfall 	Iowa	Logit Model
5	Hong (2009)	Total cost (Flat, Mountain)	<ul style="list-style-type: none"> • Terrain Type • Median, Curve radius, Vertical slope, Shoulder 	Korea (National Highway)	Multiple Regression Model
6	Jung (2011)	Crash rate	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitation • Curve radius, Curve(left/right) 	Korea	Poisson Regression Model
7	Khattak and Knapp (2001)	Crash severity (Injury, No injury)	<ul style="list-style-type: none"> • Traffic volume • Straight and flat • Crash on weekend • Wind gust speed, snowfall intensity 	Iowa (Interstate Highway)	Logit Model
8	Kim (2001)	Crash rate (Injury, Severe Injury)	<ul style="list-style-type: none"> • Access facility • Vertical slope • Rainfall, snowfall 	Korea (National Highway)	Multiple Regression Model
9	Lee et al. (2000)	EPDO	<ul style="list-style-type: none"> • Season(spring, summer, autumn, winter) • Traffic Volume • Rainfall days and precipitation • Number of Snow days and Snowfall • Average temperature 	Korea (Jung-bu Expressway)	Hierarchical Clustering
10	Liu (2013)	Crash severity	<ul style="list-style-type: none"> • Air temperature • Average wind speed • Visibility • Humidity • Total precipitation(past 24 hours) 	Maryland	Logit Model
11	Ma et al. (2017)	Crash Frequency	<ul style="list-style-type: none"> • Degree of curve • Grade differences • Lane width • AADT 	China	Negative Binomial Model
12	Naik et al. (2016)	Crash severity (Visible, disabling, Fatal)	<ul style="list-style-type: none"> • Wind Speed, Air temperature • Precipitation • Number of lanes • pavement condition • Lighting condition 	Nebraska	Ordered Logit Model
13	Song et al. (2006)	Crash type	<ul style="list-style-type: none"> • Weather variations • Spatial variations in percent of sharp horizontal curves • Spatial variations in roadside conditions 	Texas	Hierarchical Bayes Models
14	Othman et al. (2009)	Crash rate	<ul style="list-style-type: none"> • Carriageway width • Super elevation • Shoulders • Curve(left/right) • Curve radius 	Western sweden	Multiple Regression Model
15	Zeng et al. (2017)	Crash severity	<ul style="list-style-type: none"> • Number of merging ramps • Number of diverging ramps • Number of intersections • Lane changing opportunity 	Hong kong	Tobit Model

Ⅲ. 데이터 및 분석모형

1. 데이터 수집 및 기초분석

본 연구에서는 2001년부터 2014년까지 14년간 전국 고속도로 교통사고 자료와 기상자료를 사용하였다. 전국 고속도로 교통사고 자료는 사고발생 일시, 위치, 평면선형, 종단경사, 노면상태, 방책시설 형태(중앙분리대 및 갓길)와 같은 도로기하구조 및 도로시설물에 대한 정보를 포함하고 있다. 교통사고 자료에 기상정보를 포함하기 위해 교통사고 발생지역과 발생시각을 기준으로 기상청에서 제공하는 지역별 1시간 단위 강우량 및 적설량을 매칭하였다. 기상자료는 1시간 단위이므로 가장 가까운 시점을 교통사고 발생시각과 매칭하였다. 최종적으로 누락정보 및 이상치를 제거한 51,461건의 사고 자료를 분석에 사용하였다. <Table 3>은 고속도로 교통사고 심각도 및 사고지점에 대한 도로기하구조와 기상자료의 기초통계량을 정리한 결과이다. 고속도로 교통사고 자료는 교통사고 심각도에 따라 부상없음, 부상, 사망 3가지로 구분하였으며, 부상없음, 부상, 사망 순으로 많은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 도로기하구조는 사고발생 구간(톨게이트, 램프구간), 곡선반경(500m이하, 500m초과 1000m미만, 1000m이상), 종단경사(상향 3%이상, 하향 3% 이상), 방호벽 형태(가드레일, 콘크리트)로 구분하였으며, 각 도로기하구조의 분석기준을 설정하였다. 기상자료의 경우 기상청에서 제시하는 예보업무에 따라 시간당 강우량과 적설량을 분류하였다.

<Table 3> Description of Highway Accident(Road Geometry Statistics) and Weather Statistics

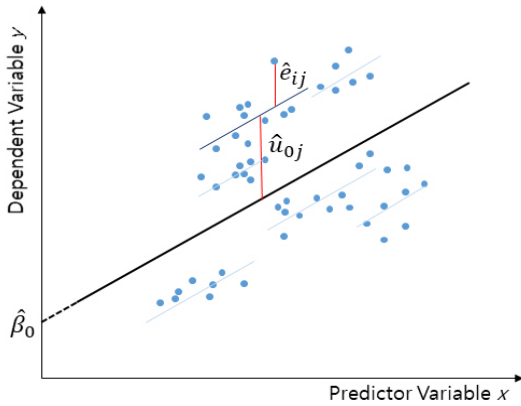
Data class	Category	Number	Percent(%)	
Highway Accident	Severity	No Injury	43,385	84.3
		Injury	6,982	13.6
		Death	1,094	2.1
	Segment	Toll	1,645	3.2
		Ramp	2,854	5.5
		others*	46,962	91.3
	Radius Curve	R=0*	34,180	67.1
		0<R≤500m	2,480	4.9
		500m<R<1000m	8,063	15.8
		R≥1000m	6,198	12.2
	Vertical Slope	Slope≥3.0%	1,781	15.5
		0<Slope<3.0%*	9,745	84.5
		Slope≤ -3.0%	2,415	17.3
		-3.0%<Slope<0*	11,575	82.7
	Barrier	Concrete	5,199	10.1
		Guard	31,228	60.7
		ETC or None*	15,034	29.2
	Weather	Rainfall (mm)	0*	43,035
less than 1			2,400	4.7
1 to less than 5			3,666	7.1
over 5			2,360	4.6
Snowfall (cm)		0*	48,903	95.0
		less than 1	386	0.8
		1 to less than 5	1,065	2.1
	over 5	1,107	2.1	

*is base line variable.

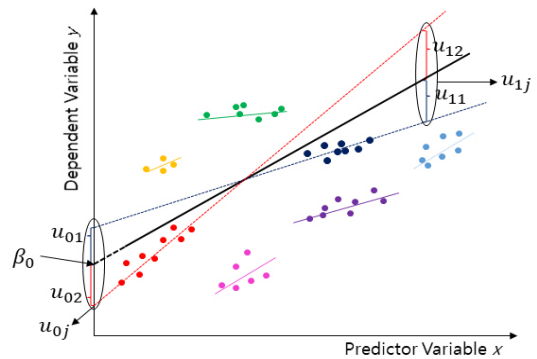
2. 분석모형

위계적 순서형 로짓모형은 하위수준(개인 또는 개별사고)과 상위수준(집단 또는 지역)을 가지는 위계구조 데이터를 분석하기 위한 목적을 가지며, 상위 그룹에 따른 하위 개별사고 간의 상관관계를 고려할 수 있는 방법론이다. 상위 그룹에 의한 영향으로 상관관계를 가진 개별사고를 일반적인 순서형 로짓모형으로 분석할 경우 계수의 표준오차를 과소추정하며 좁은 신뢰구간을 도출하게 된다(Park et al., 2017). 따라서 위계적 구조를 가진 사고 자료는 위계적 모형을 활용한 분석이 필요하다.

위계적 모형은 서로 다른 수준의 변수를 동시에 분석할 수 있는 통계적 방법으로 절편과 기울기의 영향에 따라 임의절편모형(Random Intercept Model)과 임의계수모형(Random Coefficient Model)으로 구분된다. 임의절편모형의 경우 <Fig. 1>과 같이 집단별로 다른 절편을 가지며, 기울기는 동일한 모형으로 오차항이 전체 평균으로부터 각 집단평균과의 오차(\hat{u}_{0j})와 각 집단 내에서의 오차(\hat{e}_{ij})로 구분된다. 임의계수모형의 경우 <Fig. 2>과 같이 집단별로 절편과 기울기가 모두 다른 모형으로 2수준의 설명변수와 1수준의 설명변수간의 상호작용 효과가 종속변수에 미치는 영향에 대한 분석이 가능하다.



<Fig. 1> Random Intercept Model



<Fig. 2> Random Coefficient Model

본 연구에서는 임의절편모형과 임의계수모형이 모두 활용되었다. 임의절편모형은 도로기하구조와 기상상태의 상호작용을 반영한 더미변수를 포함하며, 이를 통해 도로기하구조와 기상상태의 복합적 영향이 사고 심각도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 기상상태는 지역별 특성이 상이하므로 이를 반영한 지역수준의 상위변수를 포함하는 임의계수모형을 구축하였다. 본 연구의 임의계수모형은 사고수준(1수준)의 도로기하구조와 지역수준의 기상특성 변수(2수준)를 포함하며, 이를 통해 각 수준별 설명변수의 상호작용에 대한 분석이 가능하다. 또한 분석결과를 통해 지역의 기상특성에 따라 개별 도로기하구조에 대한 사고 심각도 개선대책을 마련하고자 하였다. 각 분석모형에 대해서 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$\eta_{mij} = \log\left(\frac{\text{pr}(y_{ij} \leq M)}{\text{pr}(y_{ij} > M)}\right), M = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{prob}(y_{ij} = 1) &= \text{prob}(\text{Noninjury}) = \phi_{1ij} \\ \text{prob}(y_{ij} = 2) &= \text{prob}(\text{Injury}) = \phi_{1ij} + \phi_{2ij} \\ \text{prob}(y_{ij} = 3) &= \text{prob}(\text{Death}) = 1 \end{aligned}$$

$$1level: \eta_{mij} = \beta_{0j} + \sum_{p=1}^P \beta_{pj} z_{p ij} + \delta_m \quad (2-1)$$

$$2level: \beta_{0j} = \gamma_{00} + u_{0j}$$

$$\beta_{pj} = \gamma_{p0}$$

$$\eta_{mij} = \gamma_{00} + u_{0j} + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \gamma_{0q} z_{p ij} + \delta_m \quad (p = 1, 2, 3, \dots, P, q = 1, 2, 3, \dots, Q) \quad (2-2)$$

$$1level: \eta_{mij} = \beta_{0j} + \sum_{p=1}^P \beta_{pj} x_{p ij} + \delta_m \quad (3-1)$$

$$2level: \beta_{0j} = \gamma_{00} + u_{0j}$$

$$\beta_{pj} = \gamma_{p0} + \sum_{q=1}^Q \gamma_{pq} w_{qj} + u_{pj}$$

$$\eta_{mij} = \gamma_{00} + u_{0j} + \sum_{p=1}^P \gamma_{p0} x_{p ij} + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \gamma_{pq} w_{qj} x_{p ij} + \sum_{p=1}^P u_{pj} x_{p ij} + \delta_m \quad (p = 1, 2, 3, \dots, P, q = 1, 2, 3, \dots, Q) \quad (3-2)$$

j 지역의 i 번째 사고가 주어진 것으로 가정할 때, 수식(1)의 η_{mij} 는 사고 심각도를 나타내는 종속변수로서 순서형 변수의 누적확률 형태로 표현된다. 수식(2-1)은 임의절편모형으로 1수준과 2수준으로 구분된다. β_{0j} 는 기상상태와 도로기하구조의 상호작용이 사고심각도에 미치는 지역적 평균효과(γ_{00})와 편차(u_{0j})로 구성되고, β_{pj} 는 도로기하구조와 기상상태의 상호작용 변수($z_{p ij}$)에 대한 계수로 지역에 관계없이 상수(γ_{p0})를 가진다. 수식(3-1)은 임의계수모형이며, 여기서 β_{0j} 는 기상상태가 사고심각도에 미치는 지역적 평균효과(γ_{00})와 편차(u_{0j})로 구성된다. β_{pj} 는 도로기하구조 변수($x_{p ij}$)에 대한 계수로 지역별 기상특성(w_{qj})이 도로기하구조에 미치는 평균효과(γ_{p0}), 기상상태와 도로기하구조 간 상호작용효과(γ_{pq}), 각 도로기하구조 대한 편차(u_{pj})로 구성된다. 수식 (2-2)와 (3-2)은 1-수준과 2-수준을 통합하여 표현한 수식으로, δ_m 는 임계값(Threshold)을 나타낸다.

위계적 순서형 로짓 모형에서는 모형의 필요여부를 독립변수를 포함하지 않은 무제약 모형에서 집단 내 상관관계수(Intra Correlation Coefficient: ICC)를 통해 판단하게 된다. 이는 전체 관찰 분산 중 그룹 간 분산이 차지하는 비율로써 수식(4)와 같으며, 5%~25%수준일 때 모형을 적용할 수 있다.

$$ICC = \frac{u_{0j}}{\sigma^2 + u_{0j}} \quad (4)$$

교통사고 심각도 수준에 따라 구분된 부상없음, 부상, 사망에 대한 각 설명변수의 영향력을 한계효과를 통해 확인하였다. 위계적 순서형 로짓 모형을 통해 분석된 설명변수의 계수 값을 활용하여 한계효과를 분석할 수 있으며 이는 수식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial prob(y = m)}{\partial x_k} = \left[\frac{\exp(\delta_{j-1} - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k)}{(1 + \exp(\delta_{j-1} - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k))^2} - \frac{\exp(\delta_j - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k)}{(1 + \exp(\delta_j - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k))^2} \right] * \beta_k \quad (5)$$

IV. 연구결과 및 논의

1. 위계적 순서형 로짓 모형의 적용타당성 검토

본 연구에서는 기상상태에 따라 도로기하구조가 교통사고 심각도에 미치는 영향을 분석하기 위해 기상자료와 매칭된 51,461건의 고속도로 사고자료를 사용하였다. 연구결과를 해석하기 위해서는 먼저 도로기하구조와 기상상태에 따른 고속도로 심각도가 위계적 순서형 로짓 모형을 활용하기에 타당한 자료인지 검토가 필요하다. 위계적 순서형 로짓 모형의 적용타당성은 분석모형 파트에서 설명한 것과 같이 집단 내 상관계수 (Intra Correlation Coefficient: ICC)를 통해 판단할 수 있다. 분석 결과, 본 연구의 무제약 모형 ICC는 8.9%로 위계적 순서형 로짓모형을 사용하는 것이 타당한 것으로 분석되었다. 또한 전통적인 순서형 로짓 모형 대비 위계적 순서형 로짓 모형이 우수한 모형임을 확인하기 위해 모형 적합도를 제시하였다. 분석 결과, 전통적인 순서형 로짓 모형의 AIC는 704.5, 위계적 순서형 로짓 모형은 489.1 로 위계적 순서형 로짓 모형이 높은 적합도를 보였다.

2. 임의절편모형 및 한계효과

개별사고의 도로기하구조와 기상상태의 상호작용을 반영한 변수를 포함하는 임의절편모형의 결과는 <Table 4>와 같다. <Table 4>는 1수준 변수의 계수와 표준오차, t-ratio, odd-ratio를 포함하며, p-value를 통해 각 변수의 유의성에 대해 판단하였다. 그러나 분석결과의 계수만으로는 교통사고 심각도에 대한 설명변수의 영향을 설명하는데 한계가 있기 때문에 설명변수가 각 사고 심각도 범주에 미치는 한계효과를 고려해야 한다. 교통사고 심각도에 미치는 설명변수들의 영향에 대한 추정치를 바탕으로 3개로 구분된 심각도 수준에 따른 설명변수 각각의 한계효과 분석 결과를 <Table 5>와 같이 정리하였다.

사고구간에 따른 사고 심각도의 경우 톨게이트의 적설량 1cm미만의 경우 충분한 데이터 확보가 어려워 분석에서 제외되었다. 분석결과를 보면, 톨게이트($r_{10}=2.430$, $r_{20}=1.682$, $r_{40}=2.239$, $r_{50}=1.815$)와 램프구간($r_{60}=1.783$, $r_{70}=1.224$, $r_{80}=0.917$, $r_{90}=2.253$, $r_{10}=2.075$, $r_{10}=1.112$)에서 강우 및 강설시 사고 심각도가 증가하며 강우량 및 적설량이 적을수록 심각도가 높아지는 결과를 보였다. 이는 강우와 적설량이 적은 악천후 초기에 차량 평균주행속도는 감소하지 않는 반면에 노면 마찰계수가 급격히 증가하여 심각도가 증가하는 것으로 판단되며(Hong et al., 2012; Lee and Won, 2003), 특히 차로 간 또는 차량 간 속도편차가 존재하는 구간에서 강우나 적설로 인한 영향이 더욱 커지기 때문인 것으로 판단된다(Yun et al., 2012; Abdel-aty et al., 2006). 각 구간에서의 한계효과를 보면 톨게이트가 램프구간 대비 사망사고 증가율이 강우 시 1.1~1.4배, 강설 시에는 1.1~1.6배 높게 나타나는데, 이는 톨게이트 구간에서 요금정수를 위한 차로변경으로 인해 차량의 엇갈림이 발생하고 진입 시 속도편차가 크기 때문인 것으로 판단된다.

곡선반경 크기에 따른 기상상태와의 상호작용은 대부분 고속도로 사고 심각도에 미치는 영향이 통계적으로 유의하지 않았다. 곡선반경이 1,000m 이상이며 강우량이 5mm 이상일 경우($r_{260}=0.339$) 통계적으로 유의한 양의 계수를 나타냈다. 고속도로의 곡선반경과 기상상태의 상호작용은 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

중단경사의 경우 3%이상의 하향 중단경사에서만 기상상태와의 상호작용이 통계적으로 유의한 결과를 보였다. 여기서 주목할 점은 3%이상의 하향 중단경사와 기상상태가 사고 심각도에 미치는 복합적인 영향은 강우량 및 강설량의 수준에 따라 달라질 수 있다는 것이다. 강우량 1~5mm($r_{310}=0.572$) 및 강설량 1~5cm(r_{340}

=-0.721)에서는 3%이상의 하향 종단경사가 사고 심각도를 높이는 방향으로 영향을 주지만, 소량 또는 대량의 강수량($r_{300}=-0.308$, $r_{320}=-0.772$) 과 강설량($r_{330}=-0.820$, $r_{350}=-0.700$)에는 사고 심각도를 낮추는 결과를 보여준다. 소량의 강우 및 강설은 하향 종단경사 도로를 주행하는 차량에 주는 영향이 적으며, 대량의 강우 및 강설 시에는 운전자의 방어운전으로 인해 사고 심각도가 낮아질 수 있다. 이 결과는 도로기하구조와 기상상태의 복합적인 영향이 선형적이지 않을 수 있음을 시사한다. 또한 하향 종단경사 3%이상에서의 한계효과를 살펴보면 강우 대비 강설에 의한 심각도가 다소 높은 것으로 나타나는데, 이는 강설로 인해 노면결빙 등으로 인해 노면마찰력 저하 및 차량 제동능력 저하가 비교적 크기 때문인 것으로 판단된다.

가드레일 형태와 콘크리트 형태의 방호벽의 경우 일부 기상상태($r_{430}=0.145$, $r_{440}=0.430$, $r_{470}=0.361$, $r_{490}=-0.548$)에서만 통계적 유의성을 확보하였다. 가드레일 형태의 방호벽은 모든 악천후 기상상태에서 사고 심각도를 높이는 방향으로 영향을 준다. 방호벽과 같은 도로 시설물은 강설시 차량 제동능력 저하로 차량이 도로를 이탈하였을 때 차량에 위험요소로 작용하여 사고의 심각도를 높이는 원인이 되기도 한다(Gabauer, 2010; Zou et al., 2014). 그러나 가드레일 형태와 달리 콘크리트 형의 방호벽일 경우 기상상태와의 복합적인 영향이 유의하지 않으며, 예외적으로 1~5mm의 강우가 있을 경우($r_{490}=-0.548$)에는 사고 심각도를 낮추는 요인으로 분석되었다. 따라서 고정식 방호벽도 설치 형태에 따라 사고 심각도에 미치는 기상상태와의 상호작용이 다를 수 있음을 보여준다. 한계효과를 보면 기상상태에 따라 대부분 심각도가 증가하게 되는데 방호벽이 사고가 발생하였을 때 다른 차선으로 침범함으로 인해 2차 사고의 발생위험이 높기 때문인 것으로 판단된다.

3. 임의계수모형

임의절편모형을 통해 개별사고의 도로기하구조와 기상상태가 고속도로 사고 심각도에 미치는 영향을 파악할 수 있었다. 그러나 이를 바탕으로 각 도로기하구조와 기상상태를 파악하고 개별적인 개선대책을 마련하기에는 한계가 있으며, 또한 지역에 따라 기상상태가 상이한 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 사고수준(1수준)의 도로기하구조와 지역수준의 기상특성 변수(2수준)를 모두 포함하는 임의계수모형을 분석하였으며, 그 결과는 <Table 6>과 같다.

분석결과, 툴게이트와 램프구간은 기상상태의 영향이 없을 경우 그 상수 $r_{10}(=1.192)$ 와 $r_{20}(=0.127)$ 가 통계적으로 유의하지 않은 결과를 보여준다. 그러나 5mm 미만의 강우량이 자주 있는 지역의 툴게이트의 경우($r_{11}=0.969$, $r_{12}=0.578$) 사고 심각도를 높이는 방향으로 통계적 유의성을 보여준다. 또한 램프구간의 경우에도 1~5mm의 강우($r_{22}=0.175$) 또는 1~5cm의 강설($r_{25}=0.220$)이 많은 지역에서 사고 심각도가 높아질 수 있다.

곡선반경의 상수 $r_{30}(=-0.827)$, $r_{40}(=0.413)$, $r_{50}(=0.328)$ 는 모두 통계적 유의성을 가지며, 곡선반경이 500m 이상에서 사고 심각도가 높아지는 결과를 보여준다. 5mm 이상의 강우 또는 5cm 이상의 강설이 많은 지역에서 곡선반경이 500m 이상인 변수는 통계적으로 유의한 결과를 보이지만 그 계수값($r_{43}=-0.086$ 및 $r_{56}=0.053$)이 상수값에 비해 작은 결과를 보였다. 따라서 곡선반경은 지역별 기상특성에 따라 사고 심각도에 미치는 영향이 크게 달라지지 않는 것으로 판단된다.

종단경사와 방호벽의 종류에 따라서도 일부 지역별 기상 특성이 통계적으로 유의한 영향을 주고 있다. 이와 같이 지역의 기상특성에 따라 도로기하구조가 심각도에 미치는 영향이 달라지기 때문에 각 지역의 기상특성과 도로기하구조에 따라 적절한 안전관리전략을 마련하여 사고 심각도를 개선할 필요가 있다.

<Table 4> Estimation Result Summary for the Random Intercept Model

1-level Variables		Coefficient	Standard error	t-ratio	odd ratio		
Intercept	r_{00}^{***}	1.660	0.058	28.614	5.261		
Segment	Toll	rainfall(less 1mm), r_{10}^{**}	2.430	1.010	2.406	11.364	
		rainfall(1~5mm), r_{20}^{**}	1.682	0.721	2.333	5.378	
		rainfall(over 5mm), r_{30}	1.027	1.033	0.994	2.792	
		snowfall(1~5cm), r_{40}^{**}	2.239	1.014	2.208	9.381	
		snowfall(over 5cm), r_{50}^*	1.815	1.020	1.779	6.143	
	Ramp	rainfall(less 1mm), r_{60}^{***}	1.783	0.285	6.258	5.949	
		rainfall(1~5mm), r_{70}^{***}	1.224	0.220	5.576	3.402	
		rainfall(over 5mm), r_{80}^{**}	0.917	0.357	2.571	2.501	
		snowfall(less 1cm), r_{90}^{**}	2.253	1.039	2.168	9.519	
		snowfall(1~5cm), r_{10}^{***}	2.075	0.523	3.968	7.963	
		snowfall(over 5cm), r_{110}^{**}	1.112	0.415	2.678	3.039	
	Others						
	Curve	$0 < R \leq 500m$	rainfall(less 1mm), r_{120}	-0.178	0.285	-0.625	0.837
			rainfall(1~5mm), r_{130}	0.166	0.258	0.641	1.180
rainfall(over 5mm), r_{140}			-0.446	0.310	-1.437	0.640	
snowfall(less 1cm), r_{150}			0.128	0.787	0.163	1.137	
snowfall(1~5cm), r_{160}			-0.569	0.429	-1.326	0.566	
snowfall(over 5cm), r_{170}			-0.157	0.480	-0.327	0.855	
$500m < R \leq 1000m$		rainfall(less 1mm), r_{180}	0.058	0.173	0.335	1.060	
		rainfall(1~5mm), r_{190}	0.057	0.127	0.451	1.059	
		rainfall(over 5mm), r_{200}	-0.109	0.155	-0.702	0.897	
		snowfall(less 1cm), r_{210}	-0.033	0.458	-0.072	0.968	
		snowfall(1~5cm), r_{220}	-0.285	0.244	-1.169	0.752	
		snowfall(over 5cm), r_{230}	-0.228	0.234	-0.971	0.796	
$R \geq 1,000m$		rainfall(less 1mm), r_{240}	0.319	0.217	1.468	1.376	
		rainfall(1~5mm), r_{250}	0.221	0.161	1.374	1.247	
		rainfall(over 5mm), r_{260}^*	0.339	0.201	1.689	1.403	
		snowfall(less 1cm), r_{270}	-0.135	0.506	-0.266	0.874	
		snowfall(1~5cm), r_{280}	0.197	0.363	0.543	1.218	
		snowfall(over 5cm), r_{290}	0.521	0.386	1.349	1.684	
R=0							
Vertical slope		Slope $\leq -3\%$	rainfall(less 1mm), r_{300}	-0.308	0.259	-1.192	0.735
			rainfall(1~5mm), r_{310}^{**}	0.572	0.290	1.972	1.771
			rainfall(over 5mm), r_{320}^{***}	-0.772	0.232	-3.322	0.462
			snowfall(less 1cm), r_{330}^*	-0.820	0.508	-1.615	0.441
			snowfall(1~5cm), r_{340}	0.721	0.485	1.486	2.057
	snowfall(over 5cm), r_{350}^{**}		-0.700	0.328	-2.132	0.497	

1-level Variables		Coefficient	Standard error	t-ratio	odd ratio	
	-3%<Slope<0					
	Slope ≥ 3%	rainfall(less 1mm), r_{360}	-0.214	0.317	-0.675	0.807
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{370}	0.050	0.244	0.206	1.052
		rainfall(over 5mm), r_{380}	-0.296	0.296	-1.000	0.744
		snowfall(less 1cm), r_{390}	-0.160	0.813	-0.196	0.853
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{400}	-0.257	0.474	-0.542	0.773
		snowfall(over 5cm), r_{410}	1.525	1.027	1.484	4.593
0<Slope<3%						
Barrier	Guard rail	rainfall(less 1mm), r_{420}	0.128	0.094	1.359	1.137
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{430}^*	0.145	0.074	1.948	1.156
		rainfall(over 5mm), r_{440}^{***}	0.430	0.096	4.477	1.538
		snowfall(less 1cm), r_{450}	0.362	0.247	1.467	1.437
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{460}	0.171	0.138	1.244	1.187
		snowfall(over 5cm), r_{470}^{***}	0.361	0.140	2.568	1.434
	Concrete	rainfall(less 1mm), r_{480}	-0.018	0.199	-0.091	0.982
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{490}^{***}	-0.548	0.147	-3.741	0.578
		rainfall(over 5mm), r_{500}	0.281	0.211	1.330	1.324
		snowfall(less 1cm), r_{510}	0.483	0.498	0.969	1.621
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{520}	-0.072	0.282	-0.256	0.930
		snowfall(over 5cm), r_{530}	-0.036	0.276	-0.132	0.964
	ETC or None					
	Threshold	δ_2 (between Injury and Death)***	2.163	0.029	74.963	0.462

Note: * $p < .10$, ** $p < .05$, *** $p < .01$.

<Table 5> Marginal Effects of the Random Intercept Model

1-level Variables		Baseline Variable	No injury	Injury	Death
Toll gate	rainfall(less 1mm)	Others	-0.307	-0.276	0.582
	rainfall(1 ~ 5mm)		-0.212	-0.191	0.403
	rainfall(over 5mm)		-0.129	-0.117	0.246
	snowfall(1 ~ 5cm)		-0.282	-0.254	0.536
	snowfall(over 5cm)		-0.229	-0.206	0.435
Ramp	rainfall(less 1mm)	Others	-0.225	-0.202	0.427
	rainfall(1 ~ 5mm)		-0.154	-0.139	0.293
	rainfall(over 5mm)		-0.116	-0.104	0.220
	snowfall(less 1cm)		-0.284	-0.256	0.540
	snowfall(1 ~ 5cm)		-0.262	-0.235	0.497
	snowfall(over 5cm)		-0.140	-0.126	0.266
Curve less 500m	rainfall(less 1mm)	R=0	0.022	0.020	-0.043
	rainfall(1 ~ 5mm)		-0.021	-0.019	0.040
	rainfall(over 5mm)		0.056	0.051	-0.107

1-level Variables		Baseline Variable	No injury	Injury	Death
	snowfall(less 1cm)		-0.016	-0.015	0.031
	snowfall(1 ~ 5cm)		0.072	0.065	-0.136
	snowfall(over 5cm)		0.020	0.018	-0.038
Curve 500 ~ 1,000m	rainfall(less 1mm)		-0.007	-0.007	0.014
	rainfall(1 ~ 5mm)		-0.007	-0.007	0.014
	rainfall(over 5mm)		0.014	0.012	-0.026
	snowfall(less 1cm)		0.004	0.004	-0.008
	snowfall(1 ~ 5cm)		0.036	0.032	-0.068
	snowfall(over 5cm)		0.029	0.026	-0.055
Curve over 1,000m	rainfall(less 1mm)		-0.040	-0.036	0.077
	rainfall(1 ~ 5mm)		-0.028	-0.025	0.053
	rainfall(over 5mm)		-0.043	-0.038	0.081
	snowfall(less 1cm)		0.017	0.015	-0.032
	snowfall(1 ~ 5cm)		-0.025	-0.022	0.047
	snowfall(over 5cm)		-0.066	-0.059	0.125
Slope ≤ 3%	rainfall(less 1mm)	-3% < Slope < 0	0.039	0.035	-0.074
	rainfall(1 ~ 5mm)		-0.072	-0.065	0.137
	rainfall(over 5mm)		0.097	0.088	-0.185
	snowfall(less 1cm)		0.103	0.093	-0.196
	snowfall(1 ~ 5cm)		-0.091	-0.082	0.173
	snowfall(over 5cm)		0.088	0.079	-0.168
Slope ≥ 3%	rainfall(less 1mm)	0 < Slope < 3%	0.027	0.024	-0.051
	rainfall(1 ~ 5mm)		-0.006	-0.006	0.012
	rainfall(over 5mm)		0.037	0.034	-0.071
	snowfall(less 1cm)		0.020	0.018	-0.038
	snowfall(1 ~ 5cm)		0.032	0.029	-0.062
	snowfall(over 5cm)		-0.192	-0.173	0.365
Guard rail barrier	rainfall(less 1mm)	ETC or None	-0.016	-0.015	0.031
	rainfall(1 ~ 5mm)		-0.018	-0.016	0.035
	rainfall(over 5mm)		-0.054	-0.049	0.103
	snowfall(less 1cm)		-0.046	-0.041	0.087
	snowfall(1 ~ 5cm)		-0.022	-0.019	0.041
	snowfall(over 5cm)		-0.045	-0.041	0.086
Concrete barrier	rainfall(less 1mm)		0.002	0.002	-0.004
	rainfall(1 ~ 5mm)		0.069	0.062	-0.131
	rainfall(over 5mm)		-0.035	-0.032	0.067
	snowfall(less 1cm)		-0.061	-0.055	0.116
	snowfall(1 ~ 5cm)		0.009	0.008	-0.017
	snowfall(over 5cm)		0.005	0.004	-0.009

<Table 6> Estimation Result Summary for the Random Coefficient Model

1-level variables		2-level variables	Coefficient	Standard error	t-ratio	Odds Ratio	
Intercept	r_{00}^{***}		1.578	0.062	25.580	4.846	
Segment	Toll	r_{10}	1.192	0.774	1.540	3.294	
		rainfall(less 1mm), r_{11}^{**}	0.696	0.268	2.600	0.499	
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{12}^{**}	0.578	0.232	2.491	1.782	
		rainfall(over 5mm), r_{13}	-0.039	0.106	-0.364	0.962	
		snowfall(less 1cm), r_{14}	-0.751	0.632	-1.187	0.472	
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{15}	0.281	0.246	1.145	1.325	
		snowfall(over 5cm), r_{16}	0.030	0.100	0.296	1.030	
	Ramp	r_{20}	0.127	0.316	0.401	1.135	
		rainfall(less 1mm), r_{21}	0.006	0.090	0.067	1.006	
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{22}^{**}	0.175	0.080	2.176	1.191	
		rainfall(over 5mm), r_{23}	-0.064	0.052	-1.228	0.938	
		snowfall(less 1cm), r_{24}	-0.424	0.281	-1.511	0.655	
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{25}^{**}	0.220	0.108	2.030	1.246	
		snowfall(over 5cm), r_{26}	-0.046	0.036	-1.277	0.955	
	others						
	Curve	0<R≤500m	r_{30}^{**}	-0.827	0.410	-2.016	0.437
			rainfall(less 1mm), r_{31}	0.171	0.107	1.593	1.186
			rainfall(1 ~ 5mm), r_{32}	-0.088	0.104	-0.846	0.916
			rainfall(over 5mm), r_{33}	0.075	0.062	1.210	1.078
			snowfall(less 1cm), r_{34}	-0.201	0.336	-0.598	0.818
			snowfall(1 ~ 5cm), r_{35}	0.197	0.127	1.552	1.218
			snowfall(over 5cm), r_{36}	-0.033	0.028	-1.188	0.968
	Curve	500m<R≤1,000m	r_{40}^{**}	0.413	0.186	2.217	1.512
			rainfall(less 1mm), r_{41}	0.004	0.068	0.064	1.004
			rainfall(1 ~ 5mm), r_{42}	-0.014	0.058	-0.237	0.986
			rainfall(over 5mm), r_{43}^{**}	-0.086	0.035	-2.450	0.918
snowfall(less 1cm), r_{44}			0.119	0.122	0.971	1.126	
snowfall(1 ~ 5cm), r_{45}			-0.055	0.061	-0.903	0.947	
snowfall(over 5cm), r_{46}			0.010	0.015	0.647	1.010	
R≥1,000m		r_{50}^*	0.328	0.199	1.653	1.389	
		rainfall(less 1mm), r_{51}	-0.060	0.070	-0.859	0.941	
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{52}	0.069	0.060	1.152	1.072	
		rainfall(over 5mm), r_{53}	-0.039	0.030	-1.275	0.962	
		snowfall(less 1cm), r_{54}	-0.016	0.142	-0.114	0.984	
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{55}	-0.110	0.074	-1.497	0.895	
		snowfall(over 5cm), r_{56}^{**}	0.053	0.022	2.382	1.055	
R=0							

1-level variables		2-level variables		Coefficient	Standard error	t-ratio	Odds Ratio	
Vertical slope	Slope ≤ -3.0%	r_{60}		0.460	0.318	1.447	1.584	
		rainfall(less 1mm), r_{61}		0.126	0.111	1.141	1.134	
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{62}^*		-0.179	0.097	-1.849	0.836	
		rainfall(over 5mm), r_{63}		0.044	0.044	0.981	1.045	
		snowfall(less 1cm), r_{64}^{**}		0.419	0.190	2.206	1.521	
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{65}^{**}		-0.232	0.102	-2.285	0.793	
		snowfall(over 5cm), r_{66}		0.016	0.021	0.758	1.016	
	-3.0% < Slope < 0							
	Slope ≥ 3.0%	r_{70}^*		0.636	0.345	1.845	1.890	
		rainfall(less 1mm), r_{71}		0.101	0.120	0.845	1.106	
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{72}^*		-0.195	0.103	-1.892	0.823	
		rainfall(over 5mm), r_{73}		0.012	0.044	0.282	1.012	
		snowfall(less 1cm), r_{74}		0.244	0.204	1.197	1.276	
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{75}		-0.110	0.110	-1.003	0.895	
		snowfall(over 5cm), r_{76}		0.021	0.027	0.751	1.021	
	0 < Slope < 3.0%							
	Barrier	Guard	r_{80}^*		0.236	0.144	1.634	1.266
			rainfall(less 1mm), r_{81}		0.057	0.047	1.227	1.059
			rainfall(1 ~ 5mm), r_{82}		-0.010	0.041	-0.256	0.990
			rainfall(over 5mm), r_{83}^{**}		-0.054	0.024	-2.297	0.947
			snowfall(less 1cm), r_{84}		0.051	0.104	0.496	1.053
snowfall(1 ~ 5cm), r_{85}				-0.064	0.046	-1.376	0.938	
snowfall(over 5cm), r_{86}				0.007	0.013	0.557	1.007	
Concrete		r_{90}^*		0.377	0.209	1.809	1.459	
		rainfall(less 1mm), r_{91}		0.096	0.067	1.426	1.101	
		rainfall(1 ~ 5mm), r_{92}		-0.075	0.058	-1.278	0.928	
		rainfall(over 5mm), r_{93}^{**}		-0.090	0.036	-2.463	0.914	
		snowfall(less 1cm), r_{94}^*		0.246	0.148	1.656	1.279	
		snowfall(1 ~ 5cm), r_{95}^{**}		-0.158	0.073	-2.154	0.854	
		snowfall(over 5cm), r_{96}		0.003	0.019	0.165	1.003	
ETC or None								
Threshold		δ_2 (between Injury and Death)***			2.177	0.029	75.253	8.822

Note: * $p < .10$, ** $p < .05$, *** $p < .01$.

V. 결론 및 향후연구

교통사고는 여러 복합적인 요인에 의해 발생하며, 그에 따른 심각도에 미치는 영향도 복합적이므로 효과적인 안전관리전략 수립을 위해서는 복합적인 요인에 대한 명확한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 2001년부터 2014년까지 발생한 고속도로 교통사고자료와 기상청의 기상자료를 매칭하여, 강우량 및 적설량 수준에

따라 도로기하구조가 사고 심각도에 미치는 영향을 위계적 순서형 로짓모형을 이용하여 분석하였다. 또한 임의절편모형과 임의계수모형을 모두 활용하여 개별사고의 기상상태 및 지역별 기상특성에 따라 도로기하구조가 사고 심각도에 미치는 영향을 분석할 수 있었다.

임의절편모형의 분석결과 기상상태에 따라 사고 심각도에 유의한 영향을 주는 도로기하구조 변수는 톨게이트 및 램프구간, 내리막 3%이상, 콘크리트 방호벽으로 나타났다. 또한 도로기하구조는 기상상태에 따라 사고 심각도에 미치는 영향이 달라질 수 있으며, 도로기하구조와 기상상태의 복합적인 영향은 강수량 또는 강설량에 선형적이지 않을 수 있음을 보여주었다. 또한 기상상태는 지역별 특성이 상이하므로 이를 반영한 지역수준의 상위변수를 포함하는 임의계수모형을 구축하였다. 분석결과 1~5mm 강수량의 비가 많이 내리는 지역은 톨게이트와 램프구간, 적설량 1cm미만의 눈이 많이 내리는 지역은 하향 3%이상 종단경사와 콘크리트 방호벽, 적설량 1~5cm의 눈이 많이 내리는 지역은 램프구간, 적설량 5cm 이상의 눈이 많이 내리는 지역은 곡선반경 1,000m이상 구간에서 심각도가 증가하는 것으로 나타났다.

분석결과를 바탕으로 개선을 위한 대책을 제시할 수 있다. 차량의 진출입이 발생하는 램프와 톨게이트 구간의 경우 속도편차가 존재하게 되고 적설시 온도는 비교적 낮아 도로 노면이 결빙으로 인해 차량 제동력이 저하되고, 또한 적설시 발생 가능한 블랙아이스 현상으로 인해 운전자가 노면상태를 정확히 인지하기 어렵기 때문에 강우시에 비해 더욱 면밀한 속도관리전략이 필요한 것으로 판단된다. 곡선부의 경우 직선부에 비해 시야반경이 적고, 강설로 인해 시야확보의 어려움이 있으므로(Song et al., 2006), 시야가 확보되는 범위 내에서 안전정보나 도로시설물 설치를 고려해야 한다. 콘크리트 형태의 방호벽의 경우 강설로 인한 제동능력 상실로 인해 차량이 방호벽에 충돌함으로써 본선을 침범하거나, 다른 차량과 충돌 없이 본선으로 돌아올 수 있는 공간을 확보하지 못할 경우 심각도가 증가하기 때문에 노면마찰력을 높이거나 방호벽의 적절한 설치공간을 확보해야 한다. 종단경사의 경우 내리막으로 인해 노면이 건조하지 않은 상태에서는 차량 제동능력이 감소하여 적절한 안전거리를 유지하지 못하기 때문에 노면마찰력을 높이는 것이 중요할 것이다.

본 연구의 결과에서는 기상 및 곡선반경에 따른 사고 심각도에 대해 통계적인 결과를 얻지 못했다. 곡선 구간에서 발생하는 부상 또는 사망사고 중 대부분이 종단경사가 존재하거나 다른 도로시설물에 의한 영향을 받은 것으로 추정되며, 이는 곡선반경 하나의 기하구조만으로 사고 심각도 영향을 분석하는데 한계가 있음을 시사한다. 따라서 향후 연구에서는 곡선반경과 종단경사 등이 함께 존재하는 복합선형 및 곡선구간의 길이, 편경사 등 기하구조 변수를 포함하고, 사고원인의 특성(인적요인, 차량요인, 도로환경요인의 상호작용으로 발생)을 고려하는 운전자 연령, 법규위반항목, 사고당시 속도, 교통량, 구간의 설계속도, 차종 등 복합적으로 고려한 사고심각도 영향 요인 분석이 이루어져야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비지원(과제번호 18RDRP-B076268-05)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

AASHTO(2010), *Highway Safety Manual*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

- Abdel-Aty M. and Abdalla F.(2004), "Linking Roadway Geometrics and Real-time Traffic Characteristics to Model Daytime Freeway Crashes: Generalized Estimating Equations for Correlated Data," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1897, pp.106-115.
- Abdel-Aty M., Pemmanaboina R. and Hsia L.(2006), "Assessing Crash Occurrence on Urban Freeways by Applying a System of Interrelated Equations," *Transportation Research Record*, vol. 1953, no. 1, pp.1-9.
- Ahmed M., Abdel-Aty M. and Yu, R.(2012), "Assessment of Interaction of Crash Occurrence, Mountainous Freeway FGometry, Real-time Weather, and Traffic Data," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2280, pp.51-59.
- Ahmed M., Huang H., Abdel-Aty M. and Guevara B.(2011), "Exploring a Bayesian Hierarchical Approach for Developing Safety Performance Functions for a Mountainous Freeway," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 43, no. 4, pp.1581-1589.
- Bilionis D. V.(2013), *Interaction Effects of Prevailing Weather Conditions and Crash Characteristics on Crash Severity: A Case Study on Two Corridors in Iowa*, Iowa State University.
- Chang L. Y. and Chen W. C.(2005), "Data mining of tree-based models to analyze freeway accident frequency," *Journal of Safety Research*, vol. 36, no. 4, pp.365-375.
- Choi S., Lee K. and Oh C.(2012), "Prioritizing Freeway Segments for Variable Speed Limit (VSL) Operations based on Traffic Safety," *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 30, no. 3, pp.57-70.
- Dadashova B., Ramirez B. A., McWilliams J. M. and Izquierdo F. A.(2016), "The Identification of Patterns of Interurban Road Accident Frequency and Severity using Road Geometry and Traffic Indicators," *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp.4122-4129.
- Gabauer D. J.(2010), "Secondary Collisions Following a Traffic Barrier Impact: Frequency, Factors, and Occupant Risk," In *Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference, Association for the Advancement of Automotive Medicine*, vol. 54.
- Hong S. M., Oh C., Yang C. H. and Jeon W. H.(2012), "Effects of Snowfall Intensity on Freeway Travel Speed (Focused on Seohaean Freeway)," *International Journal of Highway Engineering*, vol. 14, no. 4, pp.93-101.
- Hong W. T.(2009), *Inclusion of the Highway Terrain Type in Crash Models and Analysis of its Safety Effects*, University of Seoul.
- Jung S. J.(2011), *A Study of the Characteristics of Traffic Accidents in Rainy Conditions on Freeway*, University of Seoul.
- Khattak A. and Knapp K.(2001), "Interstate Highway Crash Injuries During Winter Snow and Nonsnow Events," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1746, pp.30-36.
- Kim H. D.(2001), *The Effects of Road Environmental Characteristics on Traffic Accident*, Seoul National University Graduate School of Environment Studies.
- Kim M., Kho S. Y. and Kim D. K.(2017), "Hierarchical ordered model for injury severity of pedestrian crashes in South Korea," *Journal of Safety Research*, vol. 61, pp.33-40.
- Lee Y. T., Kim Y. J., Kim D. H. and Lim K. W.(2000), "Analysis of Seasonal Variation Effect of

- the Accident on Freeway,” *Korean Society of Transportation*, vol. 18, no. 5, pp.7-16.
- Liu Y.(2013), *Weather Impact on Road Accident Severity in Maryland*, University of Maryland.
- Ma Z., Zhang H., Steven I., Chien J., Wang J. and Dong, C.(2017), “Predicting Expressway Crash Frequency using a Random Effect Negative Binomial Model: A Case Study in China,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 98, pp.214-222.
- Naik B., Tung L. W., Zhao S. and Khattak A. J.(2016), “Weather Impacts on Single-vehicle Truck Crash Injury Severity,” *Journal of Safety Research*, vol. 58, pp.57-65.
- Othman S., Thomson R. and Lannér, G.(2009), “Identifying Critical Road Geometry Parameters Affecting Crash Rate and Crash Type,” In *Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference, Association for the Advancement of Automotive Medicine*, vol. 53, pp.155-165.
- Park H. C., Kim D. K., Kho S. Y. and Park P. Y.(2017), “Cross-classified multilevel models for severity of commercial motor vehicle crashes considering heterogeneity among companies and regions,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 106, pp.305-314.
- Park J. H., Yun D. G. and Sung J. G.(2013), “Analysis on Factors Affecting Traffic Accident Severity - Case Study : Arterial Included Curve Section,” *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 28, no. 6, pp.84-89.
- Park J. T., Hong J. Y. and Lee S. B.(2010), “Development of Traffic Accident Safety Index under Different Weather Conditions,” *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 28, no. 1, pp.157-163.
- Song B. K., Lim J. B., Lee S. B. and Park J. H.(2012), “A Study on the Analysis of Driver’s Visual Behavior Characteristics according to the Type of Curve Radius,” *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 27, no. 2, pp.117-126.
- Song J. J., Ghosh M., Miaou S. and Mallick B.(2006), “Bayesian Multivariate Spatial Models for Roadway Traffic Crash Mapping,” *Journal of Multivariate Analysis*, vol. 97, no. 1, pp.246-273.
- Yun I. S., Park S. H., Yoon J. E., Choi J. H. and Han E.(2012), “Prediction Models for the Severity of Traffic Accidents on Expressway On-and Off-Ramps,” *International Journal of Highway Engineering*, vol. 14, no. 5, pp.101-111.
- Zeng Q., Wen H., Huang H., Pei X. and Wong S. C.(2017), “A Multivariate Random-parameters Tobit Model for Analyzing Highway Crash Rates by Injury Severity,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 99, pp.184-191.
- Zou Y., Tarko A. P., Chen E. and Romero M. A.(2014), “Effectiveness of Cable Barriers, Guardrails, and Concrete Barrier Walls in Reducing the Risk of Injury,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 72, pp.55-65.