

영동고속도로 결빙사고 다발구간의 교통사고 심각도 영향요인 분석

김진국*

전우훈

한국건설기술연구원

도로교통연구본부

지난 100년간 한반도 기온은 약 1.6도가 상승하여 지구 평균 기온 대비 온난화 속도가 2배나 더 빨라지고 있으며, 미래사회에는 이러한 이상기후로 인해 전 세계적으로 지속적인 피해 발생이 우려되는 상황이다. 동절기 교통사고는 지형 특성, 도로교통 특성, 기상변화에 따른 환경 특성 등 복합적인 위험요인으로부터 기인된다. 결빙으로 인한 교통사고는 이러한 위험요인들에 취약한 지점에서 주로 발생한다. 따라서 이를 예방하기 위해서는 결빙사고 다발구간을 대상으로 사고 심각도에 영향을 주는 요인들을 점검해볼 필요가 있다. 본 연구에서는 고속국도 결빙사고 다발구간을 대상으로 사고 심각도에 영향을 미치는 요인들을 도출하여 안전성 증진을 위한 대응책을 제시하는 데 목적이 있다. 사고 심각도의 확률적 영향 관계를 파악하기 위해 순서형 프로빗 모형을 이용하여 동절기와 비동절기를 대상으로 교통사고 심각도에 미치는 영향 요인들을 도출하였다. 분석결과, 동절기에는 노면온도 하강으로 인해 노면결빙에 취약한 교량 구간과 노면이 젖은 상태에서 사고가 발생할 확률이 비동절기 보다 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 향후 고속국도 결빙사고 발생 및 심각도 감소를 위한 미래 동절기 도로 유지관리대책 수립시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 결빙사고, 도로 살얼음, 사고 심각도, 순서형 프로빗 모형, 도로 유지관리

* 교신저자: 김진국/ 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 전임연구원/경기도 고양시 고양대로 283 /Tel: 031-910-0064/ E-mail: jingukkim@kict.re.kr

I. 서론

지구 온난화 현상으로 인해 잦은 태풍과 폭염, 폭우 등 이전과는 달리 예측 불가능한 이상기후 현상이 자주 발생하고 있다. 세계기상기구(WMO)는 최근 몇 년 사이 지구 기온이 빠르게 상승하면서 해수면 상승과 빙하의 녹는 속도가 빨라지고 있으며 이로 인해 미래사회에는 이상 기후변화의 조짐과 영향이 더욱 가속화될 것임을 경고하고 있다(IPCC, 2022). 최근 5년간(2016~2020년) 도로 살얼음으로 인한 교통사고 사망자 수는 199명으로 최저 기온 0℃ 이하이며 일교차가 9℃를 초과하는 일수가 1일 증가할 때마다 하루 평균 약 59건의 교통사고가 증가하는 것으로 조사되었다. 교통사고 치사율도 전체 교통사고 평균보다 1.6배 높게 나타났다(삼성교통안전문화연구소, 2020). 또한, 도로교통공단 교통사고 통계분석 보고서에 의하면 동기간 발생한 도로 살얼음 관련 교통사고는 100건당 사망자 수가 2.9명이었으며, 마른 노면상태의 사망자 수 1.6명과 비교했을 때 약 80% 많은 것으로 나타났다(도로교통공단 2021).

도로 살얼음으로 인한 대형 결빙사고의 경우 2018년 남해고속도로 17중 추돌사고, 2019년 상주-영천 고속도로 44중 추돌사고, 2023년 구리-포천 고속도로 47중 추돌사고 등과 같이 해마다 크고 작은 사고들이 반복되는 상황이다. 도로 살얼음으로 인한 교통사고는 이와 같이 대형사고로 쉽게 이어질 수 있으며, 일반 교통사고 보다 치사율이 높은 특징이 있다.

일반적으로 도로 기상조건이 좋지 않거나, 어는 비(freezing rain)에 의해 도로의 노면상태가 미끄러워지게 되면 교통사고의 위험은 크게 증가한다. 겨울철 도로의 노면상태는 계절적 요인, 기하구조적 요인 등으로 인해 비동절기와 비교하여 교통사고 발생 확률이 매우 높아지게 된다. 겨울철 폭설시 뿐만 아니라 강우, 안개 등이 발생하게 되면 대기온도

의 급격한 하락으로 도로 노면 위에 살얼음이 만들어지게 되어 차량의 주행 안전성에 큰 위험 요인으로 작용하게 된다. 과거 많은 연구를 통해 도로 살얼음으로 인한 노면상태와 차량 추돌사고 위험성은 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다(Black et al., 2015).

도로상의 노면온도를 실시간으로 파악하는 것은 동절기 운전자의 안전을 확보하는데 매우 중요한 요인이다. 그럼에도 불구하고 현재까지 실시간으로 모든 도로의 노면온도 정보를 수집하여 제공하는 것은 매우 어렵다. 기상학 관점에서, 강우 발생 시 대기온도가 0℃가 되면, 대기 중에서 강설로 변하게 되고, 그것이 도로의 노면에 쌓일 경우 결빙이 발생하게 된다. 따라서 기상과 노면온도 정보를 동시에 고려하여 결빙이 발생할 가능성이 높은 도로 구간에 대한 정보를 운전자들에게 선제적으로 제공하는 것은 매우 중요하다. 실제로 도로가 결빙이 없고 건조한 상태인 경우, 시속 60km로 주행하는 차량은 약 18m의 제동거리를 가지게 되지만, 0.15mm 정도 결빙이 발생한 상태에서 동일한 속도로 주행하다가 제동하게 되면 제동거리는 약 71m까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 결빙이 발생한 노면상태의 제동거리는 그렇지 않은 도로 보다 약 3배 이상 증가한다는 것을 의미한다(김진국 외, 2018).

앞서 설명한 바와 같이 동절기 교통사고는 지형 특성, 도로교통 특성, 기상변화에 따른 환경 특성 등 복합적인 위험요인으로부터 기인되며, 결빙으로 인한 교통사고는 이러한 위험요인들로부터 취약한 지점 및 구간에서 주로 발생한다. 그러나 현재 고속도로 및 일반국도 등 결빙사고 다발구간 지정 시 단순히 반경 200m에서 결빙사고가 3건 이상 일어난 지점으로 교통안전을 위해 시설 개선이 필요한 지역을 위주로 교통안전 담당자의 현장 판단에 의해 최종적으로 선정된다. 즉 고속도로 결빙위험 다발구간에 대한 지형, 기하구조, 기상 특성 등은 고려되고 있지 않다. 따라서 실제로 이러한 결빙위험

구간에서 어떠한 요인들이 교통사고 심각도에 영향을 미치는지 분석해보고 이에 대한 대응책을 검토해볼 필요가 있다.

기상이 교통사고에 영향을 미치는 요인을 도출하기 위한 다양한 기존 연구들이 수행되었다. 이수일(2008)은 안개시 발생한 사고 및 기상 자료를 기반으로 도로 기하구조 및 주변 환경요소 등의 설명변수를 수집하여 안개가 발생했을 때의 교통사고 사고율 및 사고 심각도 모형을 개발하였다. 안개 발생시 교통사고에 영향을 미치는 요인은 안개 지속시간, 시정거리, 주·야 구분, 기상현상, 성별 등인 것으로 나타났다. 최세로나(2013)는 기상요인과 사고 심각도의 확률적 증가와의 관계를 알아보기 위해 고속도로 화물차 사고의 심각도에 미치는 기상 및 도로교통 요인을 이항 로지스틱 회귀분석을 이용하여 분석하였다. 이를 통해 사고 심각도 감소를 위한 대책으로 과속단속, 속도관리, 화물차 전용차로 등과 같은 교통안전 향상을 위한 방안을 제안하였다. 이상준(2017)은 노면결빙 교통사고 당시의 기상학적 특성을 기반으로 교통사고와의 관련성을 분석하였다. 결빙사고가 발생했을 때의 기상 현황자료를 분석하여 사고 심각도와 영향 관계를 검토한 결과 -3.3°로 영하인 상태에서 결빙사고가 주로 발생하였으며 온도가 낮을수록 온도의 변화가 적을수록 사고 심각도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이선영(2020)은 전국 고속도로를 대상으로 교통류, 기상, 기하구조 등의 자료 수집을 통해 순서형 프로빗 모형을 이용하여 도로환경 요인이 사망, 중상, 경상, 대물사고와 같은 사고 심각도에 미치는 영향을 분석하였다. 사고 심각도는 화물차와 관련이 있는 경우, 풍속이 초속 4m 이상인 경우, 내리막 도로인 경우에 사고발생 가능성에 영향을 미친다는 결론을 도출하였다. 기상뿐만 아니라 도로 기하구조 공사구간을 대상으로 사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 도출하기 위한 연구들도 수행되었다. 박수빈(2022)은 고속도로의 터널 교통사고를 보다 세부적

으로 분석하기 위해 우선적으로 사고 발생 위치별 특성 분석과 교통사고 처리시간별 영향요인을 도출하였다. 기존 터널 안전과 관련된 연구는 터널에서 발생하는 교통사고의 심각도, 발생원인, 처리시간, 안전성 등의 연구가 대부분 이었다. 따라서 고속도로 본선과 터널 구간의 교통사고 현황분석을 통해 순서형 프로빗 모형을 이용하여 교통사고 영향요인을 도출하였다. 최종적으로 고속도로 본선 구간과 비교하여 터널 입·출구부와 내부별 사고 심각도 영향요인과 사고특성을 비교·분석하였다. 윤석민(2016)은 고속도로 공사구간 사고자료(2010~2014년)를 수집 후, 순서형 프로빗 모형을 이용하여 교통상황 자료 및 공사장 이력 자료를 기반으로 사고 심각도에 대한 영향 요인을 도출하였다. 분석결과, 공사구간 내에서의 사고 심각도는 속도, 차로 폐쇄에 의한 용량감소, 주의구간 내 사고위치, 공사작업 유형 등이 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 차로 합류 및 차단, 주의구간 내 정보 제공, 공사구간 속도 관리, 공사구간 경고 정보 제공, 공사구간 교통안전시설 도입, 공사구간 안전성 효과분석 및 모니터링 등 공사구간 안전성 향상 방안을 제시하였다.

매년 겨울철이 되면 노면결빙으로 인한 교통사고가 지속적으로 발생되고 있으며, 향후 미래사회에는 이상기후로 인해 더 큰 사회문제로 대두될 것으로 예상된다. 앞서 살펴본 바와 같이, 기상조건, 도로조건과 관련된 연구들은 활발하게 수행되어 오고 있으나, 결빙사고 예방과 관련된 연구들은 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 결빙위험 구간에 대한 지형 특성, 기하구조 특성, 기상 특성 등을 고려하여 고속국도 결빙사고 다발구간에 대한 사고 심각도에 대한 영향요인을 도출하는데 차별성을 두었다.

II. 연구 방법론

2-1 분석 방법론

본 연구에서는 종속변수에 순위가 있는 분석 자료를 설명하기 위해 주로 활용되는 순서형 확률모형 중 하나인 순서형 프로빗 모형(Ordered Probit Model, OPM)을 이용하였다. 순서형 프로빗 모형은 오차항의 분포에 따라 크게 순서형 로지스틱 모형(Ordered Logit Model, OLM)과 순서형 프로빗 모형으로 구분되며, 순서형 프로빗 모형은 사고 심각도와 차량 특성(화물차, 버스 등), 기상 특성, 기하 구조 특성, 인적 요인 등의 관계를 파악하기 위해 활용되는 대표적인 모형이다(박수빈 외, 2022). 순서형 프로빗은 오차항이 정규분포를 따르는 것을 가정하고 종속변수가 발생할 확률을 분석하는 모형으로 독립변수와 종속변수 각각의 변화에 따른 파악이 가능하다(Chung, 2018). 따라서, 본 연구에서는 분석을 위한 사고등급을 사망, 중상, 경상으로 구분하여 자료를 구축하였다. 순서형 프로빗 모형은 기존의 다양한 연구를 통해 적은 양의 데이터를 사용하여 모형 구축이 가능하며, 로짓 모형보다 종속변수의 순서적 특성을 보다 잘 설명할 수 있다.

순서형 프로빗 모형은 식(1)과 같다. x_i 는 독립변수, β' 는 독립변수의 추정계수, ϵ_i 는 정규분포의 오차항을 의미한다. y_i^* 는 사고 심각도를 나타내며, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 식(3)의 μ_1 과 μ_2 는 독립변수의 추정계수에 대한 임계값을 나타낸다.

$$y_i^* = \beta' x_i + \epsilon_i \quad (i = 1, \dots, n) \dots\dots\dots (1)$$

$$y = \begin{cases} 0 & \text{if } 1 - \infty \leq y_i^* \leq \mu_1 \\ 1 & \text{if } \mu_1 < y_i^* \leq \mu_2 \\ 2 & \text{if } \mu_2 < y_i^* \leq \infty \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

$$P(y_i = 0) = \int_{-\infty}^{-\beta x_i} f(\epsilon_i) f \epsilon_i = \Phi(-\beta_i x_i) \dots\dots\dots (3)$$

$$P(y_i = 1) = \int_{-\infty}^{\mu_1 - \beta x_i} f(\epsilon_i) d\epsilon_i = \Phi(\mu_1 - \beta_i x_i) - \Phi(-\beta_i x_i)$$

$$P(y_i = 2) = \int_{\mu_2 - \beta x_i}^{\infty} f(\epsilon_i) d\epsilon_i = 1 - \Phi(\mu_2 - \beta_i x_i)$$

독립변수가 사고 심각도에 얼마나 영향을 미치는지 파악하기 위해 한계효과(Marginal effect) 분석을 사용한다. 한계효과는 설명변수의 연속성을 가정하므로 독립변수가 명목형 변수인 경우 독립변수가 사고 심각도에 얼마나 영향을 미치는지 Pseudo elasticity 계산을 통해 정량적인 분석이 가능하다(윤석민 외, 2016).

$$Prob(y = 1) = \Phi\left(-\sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) \dots\dots\dots (4)$$

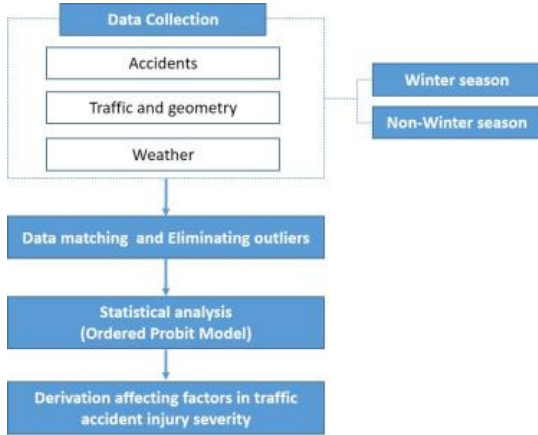
$$Prob(y = 2) = \Phi\left(\mu_2 - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) - \Phi\left(-\sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right)$$

$$Prob(y = 3) = \Phi\left(\mu_3 - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) - \Phi\left(\mu_2 - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right) :$$

$$Prob(j = .j) = 1 - \Phi\left(\mu_{j-1} - \sum_{k=1}^K \beta_k x_k\right)$$

먼저 분석을 위한 데이터를 동절기와 비동절기로 나누어 구축하였다. 결측 데이터 및 오류 데이터들은 전처리를 통해 필터링 작업을 수행하였다. 사고 심각도는 사망, 중상, 경상 3단계 순서형으로 구분하였다. 또한, 각 독립변수들이 종속변수의 확률적 증가에 얼마나 영향을 미치는지를 분석하기 위해 한계효과를 검토하였다. 한계효과는 순서형 프로빗 모형으로부터 도출된 독립변수가 사고 심각도에 미치는 영향이 어느 정도인지를 파악하는데 주로 활용된다. 예를 들어, 독립변수(x= 0 or 1) 중 1은 0을 선택할 때보다 확률적으로 교통사고 심각도가 얼마나 증가 또는 감소하는지를 의미한다(박수빈 외, 2022). 즉 종속변수를 편미분하여 독립변수의 증가로 인한 사고 심각도의 변화에 대한 수치적 추정

가능하다. 본 연구에서는 고속도로 결빙사고 다발구간 교통사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위한 연구 흐름도는 그림 1과 같다.



<그림 1> 연구 흐름도

2-2 자료 수집

본 연구에서는 고속도로 결빙사고 다발구간의 교통사고 심각도 모형 구축을 위해 고속도로 사고 자료, 기하구조 자료, 기상 자료를 각각 수집하여 분석자료를 구축하였다. 사고 및 기하구조 자료는 교통사고분석시스템(TAAS)의 최근 5년간(2014~2018년) 발생한 교통사고 자료를 통해 수집하였으며, 기상 자료는 국토교통부에서 운영하는 도로관리통합시스템에 연계되어 있는 이력 자료를 통해 수집하였다.

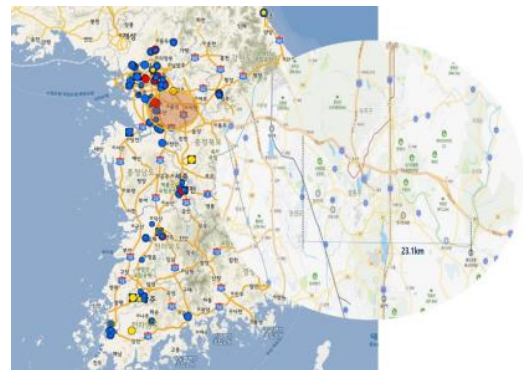
2014년부터 2018년까지 분석구간의 동절기 교통사고 건수는 총 239건으로 사망 8건, 중상 79건, 경상 152건으로 나타났다. 경상사고가 가장 많았으며, 중상사고에 비해 2배 정도 많이 발생하였다. 동 기간 비동절기의 경우 사망 9건, 중상 134건, 경상 194건으로 나타났으며, 경상사고와 중상사고의 비율 차이는 크지 동절기 사고에 비해 크지 않았다. 또한, 교통사고 사망자 수의 경우 동절기 3.3%로 비동절기에 비해 0.6% 정도 높은 것으로 나타났다. 교통사고분석시스템에 의하면 현재 전국 결빙사고 다발

구간은 총 136곳으로 지정되어 있다. 본 연구에서는 영동고속도로에 위치한 북수원IC~용인IC 왕복 46.2km을 분석구간으로 선정하였다. 본 구간은 다양한 기본구간, 교량구간, 터널구간과 같이 다양한 도로조건을 갖추고 있으며, 기상청 자동기상관측시스템(AWS)도 인근에 설치되어 있어 기상자료와의 매칭이 용이한 장점을 가지고 있다.

중속변수는 경상, 중상, 사망과 같이 치사율이 높은 순서형으로 자료를 구축하였다. 독립변수는 교통 특성, 인적 특성, 기하구조 특성, 기상 특성 등 교통사고 심각도에 영향을 주는 14개 요인을 대상으로 선정하였다. 일반적으로 다중공선성 문제는 독립변수들 간의 상관관계가 높을 경우 발생하게 된다. 이를 위해 독립변수들을 대상으로 상관관계 분석을 수행한 결과 다중공선성의 문제는 없는 것으로 나타났으며, 최종적으로 선정된 독립변수는 표 2와 같다.

<표 1> 동절기와 비동절기의 교통사고 수집 건수

Accident severity	Winter season (Nov.~Mar.)		Non-winter season (Apr.~Oct.)	
	# of accidents	%	# of accidents	%
Fatality	8	3.3	9	2.7
Severely injured	79	33.1	134	39.8
Slightly injured	152	63.6	194	57.6
total	239	100	337	100



<그림 2> 분석자료 수집 대상 구간

<표 2> 분석자료 변수 설명

Division		Injury severity
		0 : Slightly injured 1 : Severely injured 2 : Fatality
X1	Week	0 : weekend, 1 : weekday
X2	Day_night	0 : day_time, 1 : night_time
X3	Gender	0 : female, 1 : male
X4	Vehicle_type	0 : car, 1 : truck
X5	Road_section	0 : basic section 1 : bridge and tunnel
X6	Geometry	0 : non-curve, 1 : curve
X7	Road_surface	0 : dry, 1 : wet
X8	Weather_condition	0 : sunny, 1 : rainy
X9	age	driver age
X10	temperature	m/s
X11	humidity	℃
X12	rainfall_time	%
X13	rainfall_day	mm
X14	wind_speed	mm

III. 연구 결과

3-1 교통사고 특성 분석

고속도로 결빙사고 다발구간의 교통사고 특성을 분석하기 위해 최근 5년간(2014~2018년) 발생한 교통사고 현황 자료를 분석한 결과는 그림 3과 같다.

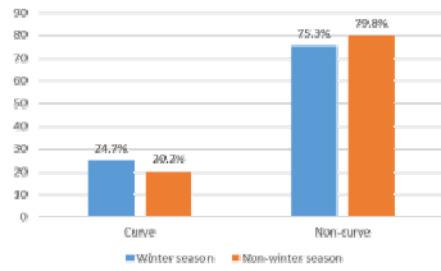
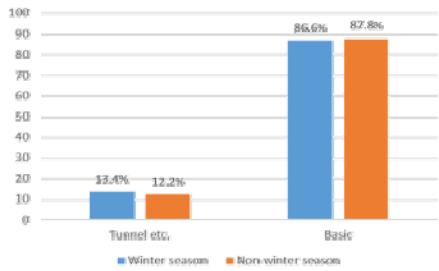
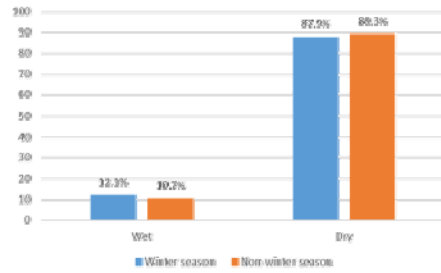
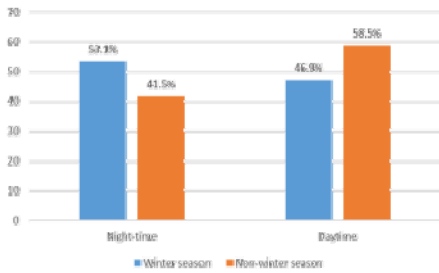
고속도로 결빙사고 다발구간의 교통사고는 동절기와 비동절기 모두 주말보다 주중에 더 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 주말과 같이 일시적인 나들이 교통량이 아닌 출퇴근으로 인한 지속적인 교통량 증가에 따른 것으로 판단된다. 시간대별 교통사고의 경우 동절기에는 야간에, 비동절기에는 주간에 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 비동절기의 야간 시간대는 동절기 보다 짧기 때문인 것으

로 판단된다. 도로 노면상태의 경우 동절기(12.1%)가 비동절기(10.7%)에 비해 높은 사고율을 보였으며, 동절기와 비동절기 모두 맑은 날보다 기상조건이 좋지 못했을 경우 치사율이 높은 것으로 나타났다. 기본구간, 교량, 터널과 같이 도로구간에 따른 교통사고는 교량구간에서 비동절기보다 동절기에 더 많은 사고가 발생한 것으로 나타났다. 이는 교량구간의 경우 기본구간 보다 온도가 더 낮은 특성 때문에 사고가 많이 발생한 것으로 판단된다. 동절기 곡선부 교통사고는 24.7%의 사고율을 보였으며, 비동절기의 사고율 20.2%에 비해 약 4% 이상 증가한 것으로 나타났다. 또한, 곡선부에서의 교통사고 치사율도 비동절기 보다 동절기가 높은 것으로 분석되었는데, 이는 동절기, 비동절기 모두 직선부 보다 곡선부에서 사고 위험성이 매우 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

3-2 사고 심각도 영향요인 분석

본 연구에서는 고속도로 결빙사고 다발구간에서 교통사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 도출하기 위해 Stata 13 통계 패키지를 이용하여 분석을 수행하였다. 앞에서 구축한 14개의 독립변수를 기반으로 순서형 프로빗 모형을 이용하여 동절기와 비동절기의 사고 심각도에 영향을 미치는 요인들을 도출하였다. 유의확률은 0.1 이하로 설정하였으며 표본 평균 차이의 통계적 지표인 t-value를 계산하였다. t-value는 계수(coefficient)를 표준오차(Standard error)로 나눈 값으로 독립변수와 종속변수 간에 선형관계가 존재하는 정도를 나타낸다. t-value가 크다는 것은 표준 편차가 작다는 것을 의미하며, 즉 독립변수와 종속변수 간의 상관관계가 높은 것으로 볼 수 있다. 반면에 t-value가 작다는 것은 표준 편차가 크다는 것을 의미하며, 독립변수와 종속변수 간의 상관관계가 낮은 것으로 볼 수 있다.

먼저, 동절기 기간 동안 고속도로 결빙사고 다발



<Accident rates for road section>

<Accident rates for geometry>

<그림 3> 교통사고 현황 분석

구간의 교통사고 심각도에 영향을 미치는 영향 요인은 주간/야간 시간대, 도로 구간, 도로 노면상태, 대기온도, 습도인 것으로 나타났다. 특히 도로 노면상태와 주간/야간 시간대가 사고 심각도에 영향을 크게 주는 것으로 분석되었다. 반면 비동절기 기간 동안 고속도로 결빙사고 다발구간의 교통사고 심각도에 영향을 미치는 영향 요인은 주간/야간 시간대, 기상상태, 나이, 시간 강수량, 풍속인 것으로 나타났다. 특히 시간 강수량, 기상상태, 주간/야간 시간대, 나이가 사고 심각도에 영향을 크게 주는 것으로 분석되었다. 동절기와 비동절기에 대한 순서형 프로빗 모형으로부터 도출된 결과는 표 3 및 표 4와 같다.

3장에서 설명한 바와 같이 순서형 프로빗 모형으로부터 도출된 독립변수들이 종속변수의 사고 심각도에 확률적으로 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위해 한계효과 분석을 한 결과는 표 5 및 표 6과 같다. 한계효과를 통해 도출된 영향 요인을 살펴보면, 동절기의 경우 주간/야간 시간대, 도로 구간, 도로 노면상태, 대기온도, 습도가 영향을 미치는 것으로

분석되었다. 비동절기는 주간/야간 시간대, 기상조건, 나이, 시간 강수량, 풍속이 영향을 미치는 것으로 나타났다.

사고 위험도에 따른 분석결과를 살펴보면, 동절기에는 터널, 교량 등의 도로 구간에서 경상사고가 발생할 확률이 15.8% 증가하는 것으로 나타났다. 중상사고의 경우에는 시인성이 저하되는 야간 시간대에 사고가 발생할 확률이 11.4% 증가하였으며, 도로의 젖은 노면상태에 따라 22.2% 정도 사고 확률이 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 사망사고가 발생할 확률은 시인성이 저하되는 야간 시간대에 1.9% 증가하며, 도로의 젖은 노면상태일 때 7.9% 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 비동절기에는 도로상에 강한 바람이 불 경우 경상사고가 발생할 확률이 4.5% 증가하는 것으로 나타났으며, 중상사고가 발생할 확률은 비 또는 눈이 내리는 기상상태에 따라 13.4% 증가하며, 시간 강수량에 따라 5.3% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 사망사고가 발생할 확률은 비 또는 눈이 내리는 기상상태에 따

라 12.8%, 시인성이 저하되는 야간 시간대에 따라 1.4% 증가하는 것으로 나타났다.

<표 3> 순서형 프로빗 모형 분석 결과 (동절기)

Variables	T-value	Coef.	Std. Err.	P>[z]
Day_night	1.983	0.361	0.182	0.048
Road_section	-1.730	-0.462	0.267	0.084
Road_surface	2.976	0.756	0.254	0.003
Temperature	-3.000	-0.033	0.011	0.004
Humidity	-1.750	-0.007	0.004	0.055

<표 4> 순서형 프로빗 모형 분석 결과 (비동절기)

Variables	T-value	Coef.	Std. Err.	P>[z]
Day_night	1.675	0.268	0.160	0.093
Weather_condition	1.697	0.409	0.241	0.089
Age	1.600	0.008	0.005	0.098
Rainfall_time	1.848	0.159	0.086	0.067
Wind_speed	-1.772	-0.117	0.066	0.075

<표 5> Marginal Effect 분석 결과 (동절기)

variables	Slightly injured	Severely injured	Fatality
Day_night	-0.133	0.114	0.019
Road_section	0.158	-0.141	-0.018
Road_surface	-0.293	0.222	0.071
Temperature	0.012	-0.011	-0.002
Humidity	0.003	-0.003	-0.000

<표 6> Marginal Effect 분석 결과 (비동절기)

variables	Slightly injured	Severely injured	Fatality
Day_night	-0.105	0.091	0.014
Weather_condition	-0.162	0.134	0.028
Age	-0.003	0.003	0.000
Rainfall_time	-0.061	0.053	0.008
Wind_speed	0.045	-0.040	-0.006

IV. 결론

본 연구에서는 고속도로 결빙사고 다발구간의 교통사고 심각도 모형 구축을 위해 사고 자료, 기하구조 자료, 기상 자료를 각각 수집하여 총 14개의 독립변수를 분석자료로 구축하였다. 순서형 자료에 주로 활용되는 확률모형 중 하나인 순서형 프로빗 모형을 이용하여 고속도로 결빙사고 다발구간의 교통사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 또한, 독립변수가 사고 심각도에 얼마나 영향을 미치는지 파악하기 위해 한계효과 분석을 통해 독립변수가 사고 심각도에 미치는 영향 정도를 도출하였다. 최종적으로 도출된 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

동절기에는 노면온도 하강으로 인해 노면 결빙에 취약한 교량구간과 노면이 젖은 상태에서 사고가 발생할 확률이 증가하는 것으로 나타났다. 교량구간은 일반 도로구간과 비교하여 최대 6℃ 정도 낮아 결빙 가능성이 높아지게 된다. 비동절기에는 도로 상에서 발생하는 강풍과 비 또는 안개 등과 같은 기상상태 그리고 시간 강수량에 따라 사고 발생 가능성이 높아지는 것으로 분석되었다. 동절기에 비해 주로 강우가 사고 심각도에 영향을 미치는 요인인 것으로 나타났다.

위와 같이 고속도로 결빙사고 다발구간의 사고 심각도를 감소시키기 위해서는 IoT시스템 등을 통한 동절기 결빙사고다발구간의 실시간 노면상태 모니터링을 강화할 필요가 있다. 그리고 곡선부, 교량, 터널 진출입부 등 상습위험구간을 대상으로 자동염수분사장치(FAST: Fixed Anti-icing Spray System) 확대 설치, 신속한 제설체계 등을 통한 사고 위험성 경감 등의 노력이 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로 시인성이 저하되는 야간 시간대의 경우 VSL(Variable Speed Limit), 네비게이션 등을 통한 실시간 위험정보를 제공할 필요가 있다. 본 연구결과는 고속도로 동절기 도로관리대책 수립시 기초자

료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 전국 고속도로 결빙사고 다발구간 대상이 아닌 일부 구간으로 한정하여 분석을 수행한 한계점을 가지고 있다. 따라서, 향후 전국 136개 지점의 교통사고 다발구간을 대상으로 사고 심각도 영향 요인을 분석해 본다면 지역특성별 사고 심각도 영향 요인 등 더욱 유의미한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 강찬모, 정연식, 장유진(2019). 순서형 프로빗 모형을 적용한 고속도로 화물차 사고 심각도. 대한토목학회논문집, 39. 391-398.
- 김선중, 정연식(2018). 차량 블랙박스 자료를 활용한 택시-이륜차 사고에서의 이륜차 이용자 사고 심각도 분석. 대한토목학회논문집, 38. 917-923.
- 김진국, 양충현, 류현주, 문재필(2018). 도로구간 특성에 따른 노면온도변화패턴 추정 모형 성능 분석. 한국도로학회논문집, 20. 121-128.
- 도로교통공단(2021). 교통사고 통계분석.
- 박수빈, 김진국, 최윤혁, 양충현(2022). 고속도로 터널 교통사고 발생 위치별 사고 영향요인 분석. 한국도로학회논문집, 24. 85-94.
- 삼성교통안전문화연구소(2020). 겨울철 블랙아이스(빙판) 사고 특성과 대책.
- 이상준(2017). 결빙구간의 교통사고 심각도 영향요인 연구. 한국안전학회지, 32. 150-156.
- 이수일, 원제무, 하오근(2008). 안개지역의 교통사고 심각도 모형개발에 관한 연구. 한국안전학회지, 23. 171-177.
- 이선영, 한상진, 정연식(2020). 순서형 프로빗모형을 이용한 강우 시 고속도로 교통사고 심각도 분석. 교통연구, 27. 1-11.
- 윤석민, 오철, 박현진, 정봉조(2016). 공사구간 교통관리특성을 고려한 고속도로 교통사고 심각도 영향요인 분석 및 안전성 증진 방안. 대한교통학회지, 34. 354-372.
- 최세로나, 김미정, 오철, 이기영(2013). 기상 및 교통조건이 고속도로 화물차 사고 심각도에 미치는 영향분석. 대한토목학회논문집, 33. 1105-1113.
- Abdel-Aty, M. (2003). Analysis of driver injury severity levels at multiple locations using ordered probit models. *Journal of Safety Research*, 34(5), 597-603.
- Black, A., W. Mote, T. L. (2015). Effects of Winter Precipitation on Automobile Collisions, Injuries, and Fatalities in the United States. *Journal of Transport Geography*, 48, 165-175.
- Chung, Y. S. (2018). Injury severity analysis in taxi-pedestrian crashes: An application of reconstructed crash data using a vehicle black box. *Accident Analysis & Prevention*, 111, 345-353.
- Hyodo, S., Hasegawa, K. (2021). Factors Affecting Analysis of the Severity of Accidents in Cold and Snowy Areas Using the Ordered Probit Model. *Asian Transport Studies*, 48, 165-175.
- IPCC Working Group I. (2022). *AR6 Synthesis Report: Climate Change*.

투고일자: 2023. 5. 3.

심사일자: 2023. 6. 5.

게재확정일자: 2023. 6. 9.

Analyzing the Traffic Accident Severity of High-Risk Road Surface Freezing Locations on the Yeongdong Expressway

JinGuk Kim

WooHoon Jeon

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Over the century, the Korean Peninsula temperatures have risen by 1.6 degrees Celsius, which is twice as rapid as the global average. Abnormal climate changes may cause continuous damage to society worldwide. During winter, traffic accidents are caused by complex risk factors such as topographical features, road traffic characteristics, and environmental factors. Traffic accidents caused by freezing occur mainly at points where the mentioned risk factors are vulnerable. Therefore, investigating the factors that affect the accident severity in frozen road sections is necessary to prevent accidents. This study presents measures for improving safety factors that can affect accident injury severity during freeway freezing accidents. An ordered probit model was used to determine the stochastic impact of accident severity. Factors affecting the severity of traffic accidents in winter and non-winter derived the probabilistic influence relationship of the accident severity. The results show that the probability of accidents due to wet road surfaces, and bridge sections vulnerable to freezing due to decreased road surface temperature during winter, is higher than that in non-winter seasons. The results of this study can be beneficial for maintaining roads and establishing operational strategies during winter to reduce the severity and the occurrence of freezing-related accidents on freeways.

Key words: Freezing accident, Black ice, Accident injury severity, Ordered probit model, Road maintenance