

계층 이항 로지스틱모형에 의한 고속도로 교통사고 심각도 분석

Analysis of Traffic Crash Severity on Freeway Using Hierarchical Binomial Logistic Model

문승라 Mun Sung Ra | 정희원 · 서울대학교 환경대학원 박사 (E-mail: mun7007@hanmail.net)
이영인 Lee Young Ihn | 서울대학교 환경대학원 정교수

ABSTRACT

In the study of traffic safety, the analysis on factors affecting crash severity and the understanding about their relationship is important to be planning and execute to improve safety of road and traffic facilities. The purpose of this study is to develop a hierarchical binomial logistic model to identify the significant factors affecting fatal injuries and vehicle damages of traffic crashes on freeway. Two models on death and total vehicle damage are developed. The hierarchical structure of response variable is composed of two level, crash-occupant and crash-vehicle. As a result, we have gotten the crash-level random effect from these hierarchical structure as well as the fixed effect of covariates, namely odds ratio. The crash on the main line and in-out section have greater damage than other facilities. Injuries and vehicle damages are severe in case of traffic violations, centerline invasion and speeding. Also, collision crash and fire occurrence is more severe damaged than other crash types. The surrounding environment of surface conditions by climate and visibility conditions by day and night is a significant factor on crash occurrence. On the other hand, the geometric condition of road isn't.

KEYWORDS

crash severity, hierarchical binomial logistic model, odds ratio

요지

교통사고발생시 사고 심각도에 영향을 미치는 요인과 그 관계를 이해하는 것은 기하구조나 환경 측면에서 교통사고 발생을 예방하고 운전자와 사고 차량의 특성을 이해하는데 도움을 준다. 본 연구에서는 계층 이항 로지스틱모형에 의한 고속도로 교통사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 파악하고 영향변수 간 차이를 나타내는 비교위험도(odds ratio)를 도출하였다. 사고 심각도는 인명피해와 차량피해로 구분하여 사망사고모형과 차량완파사고모형을 구축하였다. 종속변수는 사망자 발생과 완파차량 발생 여부이며, 각각 사고-탑승자, 사고-차량의 2수준 계층구조를 적용하였다. 추정 결과 설명변수의 고정효과는 두 모형이 유사한 결과를 보이거나 종속변수의 속성에 따라 차별화된 결과를 나타내기도 하였다. 본선과 진출입부에서의 사고가 가장 위험하며, 중앙선 침범과 통행위반, 과속 사고의 상해나 차량 파손 위험도가 높고, 충돌사고와 추돌사고, 화재 사고의 피해가 크다. 사고 심각도는 노면 상태나 시야 조건 등 외부환경에 영향을 받으나 기하구조 조건은 관련이 없다.

핵심용어

사고 심각도, 계층 이항 로지스틱모형, 비교위험도

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

교통사고는 줄음이나 운전 부주의 등에 의한 인적요

인이나 차량의 고장 등에 의해 발생하게 된다. 또한 설계기준에 맞게 건설된 도로이더라도 기하구조의 특성이 사고 발생에 복합적 요인 중의 하나로 작용할 수 있으

며, 그 외 기상 여건 및 노면상태 등의 환경요인에 의해서도 사고 발생 여부와 그 정도가 영향을 받게 된다. 이러한 요인들이 교통사고 발생에 어느 정도의 영향을 미치는지와 어떤 요인이 더 직접적인지 등 사고와 사고 발생에 영향을 미치는 외부 요인과의 관계를 규명하는 것은 교통사고 연구의 출발점이었으며 지속적인 관심사로써 오랫동안 다양한 이론을 적용하여 진행되어 왔다. 이러한 연구는 그 목적에 따라 사고 이력자료를 통해 모형을 구축하여 사고 발생을 예측하는 연구와 모형을 통해 교통사고와 그것의 발생에 영향을 미치는 요인과의 관계를 밝히는 연구의 두 가지 형태로 구분된다. 후자는 사고 발생 여부나 사망자 등 상해 정도에 미치는 요인과 그 영향 정도를 해석하는 것으로써 주로 명목형 종속변수에 의한 확률선택모형이 적용된다.

본 연구는 고속도로 교통사고를 대상으로 하며, 사고 심각도 수준을 인명피해와 물질 피해로 구분하여 각각의 발생에 영향을 미치는 요인을 분석하고 영향의 정도를 상대적으로 비교하였다. 이러한 분석을 통해 사고 상해나 물질 피해에 영향을 미치는 사고 원인과 유형을 정확하게 이해하고, 사고에 영향을 미치는 주요인과 위험 정도를 파악함으로써 사고 발생시 상해 및 물질 피해에 대한 대응책 수립에 참고 자료로 활용 가능하도록 함을 목적으로 하였다.

교통사고 심각도 분석 및 영향요인 해석에 대한 연구에는 확률선택모형과 확률사건모형을 모두 적용할 수 있다. 이때 분석에 적합한 모형의 선택은 종속변수의 형태에 따라 달라진다. 종속변수가 사건의 발생빈도인 경우에는 확률사건모형을 적용하며 사건 발생 유무나 정도의 차이 등인 경우에는 확률선택모형을 적용하게 된다. 본 연구에서는 사고피해 정도를 나타내는 지표로써 인명피해와 물질 피해를 구분하여 모형을 구축하였으며, 인명피해에 대해서는 사망자 발생 여부와 물질 피해에 대해서는 차량 파손 정도를 종속변수로 하였다. 이에 따라 확률선택모형의 적용이 적합하며, 가장 대표적인 로지스틱모형을 적용하였다. 또한 종속변수의 선택항을 사망자 발생 여부와 차량 완파 여부로 하였으므로 이항 선택모형을 적용하도록 한다. 본 연구에서는 여기에서 더 나아가 데이터 구축 단계에서 사고와 탑승자, 사고와 사고차량 간의 계층적 종속 관계를 적용하였고, 이에 따라 사고 수준에서 사망자 발생과 차량 완파에 영향을 미치는 설명변수로 정의되지 않은 확률효과가 추가로 도출되었다. 모형 추정에 의해 사망자 발생 및 차량 파손에 유의하게 영향을 미치는 요인을 규명하였을 뿐만 아니라 각 영향 요인의 상대적인 값의 차이인 비교위험도

(odds ratio)를 도출하였다. 모형에 적용된 설명변수 요인으로는 환경 및 기하구조 요인과 사고차량 및 운전자 특성 등이며, 사고발생지점과 사고원인, 사고유형 등도 변수로 포함하여 각 변수별 영향 정도의 차이를 분석하였다. 사고발생지점에 따라 사고 피해가 어떻게 다른지와 어떤 원인, 어떤 유형의 사고가 상해 및 물질 피해가 큰 사고이며 위험도의 차이가 어느 정도인지를 도출함에 의해 고속도로 사고 특성을 명확하게 이해할 수 있게 된다. 또한 사고 발생시 고려할 수 있는 모든 외부요인으로써 기하구조 특성과 환경 요인, 차량 및 운전자 특성이 있으며 이들이 상해와 차량 피해에 미치는 영향을 파악하는 것은 사고를 이해하는데 중요하다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 2005년부터 2008년까지 우리나라 전체 고속도로에서 발생한 교통사고를 대상으로 하였다. 아래 표 1에서 보듯이 고속도로 교통사고는 매년 조금씩 감소 추세에 있으며 2008년 기준으로 전체 25개 노선의 3,211km에 대해 총 2,449건의 사고가 발생하였다. 교통사고 자료에 분류된 고속도로 기하구조 중에 분선, 램프, 진출입부, 톨게이트, 터널의 5개 구간에서 발생한 사고를 연구 대상으로 하였고 교량, 비상활주로, 정류장, 평면교차로, 휴게소에서의 사고는 자료의 수가 적어 연구 대상에서 제외하였다. 이에 따라 전체 10,462건의 사고 중 10,133건을 분석 표본수로 하였다.

표 1. 고속도로 교통사고 현황(2005~2008년)

구 분	2005년	2006년	2007년	2008년	계
노선수(개)	23	24	25	25	-
총연장(km)	2,850	2,874	3,132	3,211	-
총사고건수	2,880	2,583	2,550	2,449	10,462
연구대상 사고건수	2,801	2,500	2,463	2,369	10,133

주) 민자고속도로 제외

본 연구에서는 사고 심각도에 미치는 요인 분석을 위해 이항 로지스틱모형을 적용하였다. 사고 심각도를 나타내는 지표로써 인명피해에 대해서는 사망자를 물질 피해에 대해서는 차량 완파를 종속변수로 하여 각각 모형을 구축하였다. 여기에 사고와 탑승자, 사고와 사고차량의 관계를 구조화한 계층모형(hierarchical model)을 활용하였다. 모형 추정을 통해 사고에 영향을 미치는 위험요인(risk factor)을 도출하고 요인 간의 비교위험도를 통해 이들의 상대적 값의 차이를 비교하였다. 또한 계층 구조에 의한 사고의 확률효과도 도출하였다.

2. 선행연구고찰

2.1. 사고 심각도 분석에 대한 선행연구

사고와 사고 발생 요인과의 관계를 밝히는 사고예측 모형은 사고건수를 예측하여 다른 목적에 활용하도록 하는 연구와 사고에 영향을 미치는 요인을 분석하는 연구의 두 가지 방향에서 진행되어 왔다. 사고건수를 예측하는 경우는 포아송분포나 음이항분포 등의 계수자료모형(count data model)이 적용되고, 사고 발생에 영향을 미치는 요인의 분석이 목적일 경우에는 계수자료모형 뿐 아니라 이항이나 다항의 명목형 반응변수에 의한 확률선택모형이 일반적으로 적용된다. 연구의 목적에 적합한 통계모형의 적용은 종속변수의 형태에 따라 결정된다. 일반화 선형모형(Generalized Linear Model, GLM)에서, 정수 형태의 이산적 종속변수인 사고 자료에 대해서는 포아송분포나 음이항분포를 적용한다. 그러나 종속변수가 범주형 자료인 경우에는 이들 두 분포가 부적합하며 이때는 이항이나 다항의 확률선택모형을 적용한다. 계수자료모형이나 확률선택모형을 적용하여 사고 발생에 미치는 영향 요인을 분석한 국내외 연구 사례 중 몇 가지를 제시하면 다음과 같다.

Shankar(1995)는 음이항분포모형에 의해 기하구조, 날씨와 다른 계절 요인 등이 지방부 고속도로의 구간별 사고 발생 빈도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 그 다음해에 발표한 연구에서 Shankar(1996)는 네스티드 로짓모형에 의해 사고 심각도를 유형화한 사고예측모형을 개발하였다. Al-Ghamdi(2002)는 이항 로지스틱회귀모형에 의해 사고 심각도에 영향을 미치는 위험 요인을 비교·분석하였다. 국내에서 사고 심각도 분석에 대해 이산형 선택모형을 적용한 연구 사례로는 심관보(1998), 하오근(2005)의 연구가 있다. 심관보(1998)는 운전자 특성 및 사고 유형에 따른 사고 심각도를 로그선형모형 및 로짓모형으로 분석하여, 부상 또는 사망 기준의 사고 심각도에 대한 비교위험도(odds multiplier)를 도출하였다. 하오근(2005)은 교차로 사고에 대해 순서형 프로빗모형을 적용하여 사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 분석하였으며, 각 변수가 사고 심각도에 미치는 영향을 나타내는 한계효과(marginal effect)를 도출하였다. 고속도로 사고의 심각도에 대한 연구로는 이주연(2008)의 연구가 있다. 이 연구에서는 사고 심각도와 영향을 미치는 요인 간의 복합적 관계를 규명하기 위해 구조방정식모형을 구축하였다. 분석 결과 도로 및 환경요인이 사고 심각도와 강한 관계를 나타내며 환경요인이 도로요인이나 운전자요인에 비해 사고 심각도에

더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2.2. 계층 모형에 대한 선행연구

전통적인 일반화 선형모형이 종속변수가 하나의 개체에 의한 단일 수준(single level)이며 개체간 상호 독립적인 관계를 가정하고 있다면, 종속변수의 개체간 독립적이지 않은 상관관계가 존재할 수 있고 이러한 상관관계를 반영하기 위해 종속변수에서 여러 계층구조를 만들어 분석하는 통계모형이 있다. 가령 학생과 성적간의 관계, 환자와 치료 여부와의 관계에 대해 전통적인 모형에서는 종속변수를 학생이나 환자의 단일 수준으로 하여 분석하였다. 그러나 지역별 학교 수준의 차이가 성적에 영향을 줄 수도 있고 병원 규모나 유형에 따라 치료 여부가 차이 날 수 있으므로 이들 개체 간의 영향을 반영하여 종속변수를 학교-학생, 병원-환자의 두 단계로 계층화하는 방법을 고려할 수 있다. 이러한 종속변수의 계층 구조에 의해 상위 계층인 학교와 병원의 그룹내(within group) 개체간의 상관관계와 그룹간(between group)의 상관관계를 밝히고, 계층의 영향에 의한 확률효과가 도출되어진다. 이는 종속변수에 내재된 상관관계를 계층화하여 모형화 한다는 의미에서 계층모형(hierarchical models), 다수준모형(multilevel models), 혹은 확률계수모형(random coefficient models)이라 한다(Goldstein, 2003).

교통사고 연구에서 계층모형을 처음 적용한 예는 Shankar(1998)로써 그는 음이항분포모형에 공간단위 확률효과와 시간 지표를 포함하여 사고모형의 설명력을 유의하게 개선할 수 있었다. 이후 교통사고 연구에서 다수준 모형을 적용하여 사고 자료의 계층 구조를 개념화한 연구는 Jones와 Jorgensen(2003)에 의해 시작되었다. 이들은 교통사고 자료에서 가능한 계층구조의 유형을 밝혀내고 개별 사상자의 상해 위험도에 영향을 미치는 요인의 예측을 위한 계층 이항 로지스틱모형을 개발하였다. 이후 사고 심각도 분석에 계층모형을 적용한 몇 편의 연구가 발표되었다. Lenguerrand(2006)는 사고-차량-탑승자의 3수준 계층구조를 설정하고 사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위한 로지스틱회귀모형을 개발하였다. Kim(2007)은 지방부도로 교차로의 사고심각도에 영향을 미치는 요인을 예측하기 위해 교차로-사고의 2수준 계층구조에 의한 로지스틱모형을 개발하였다. Yannis(2007)는 음주운전에 대한 단속의 강화가 도로안전에 미치는 영향을 분석하기 위해, 단속 지역과 사고건수를 계층구조로 한 음이항분포

모형을 개발하였다. Huang(2008)은 도시부도로 교차로의 교통사고에서 인명피해와 차량파손의 심각도에 영향을 미치는 요인 분석을 목적으로 사고와 사고에 속한 개체(탑승자 및 사고 차량) 간에 계층구조를 정립하고 베이저안 계층 이항 로지스틱모형을 개발하여 상해 위험도를 예측하였다. 또한 Huang(2010)은 그의 여러 후속 연구를 종합하여 교통사고 분석에서 적용 가능한 5개의 시·공간적 계층 구조를 제안하였는데, 이는 지리적 공간 단위-교통구역 및 구간-사고-차량 및 운전자 단위-탑승자의 5개 수준이다.

3. 계층 이항 로지스틱모형 구축

본 연구는 고속도로 교통사고의 심각도에 영향을 미치는 요인을 추정하고 각 요인별 위험도의 차이를 분석하고자 하며 이를 위해 로지스틱 회귀모형을 적용하였다. 또한 사고와 탑승자, 사고와 사고차량을 계층구조로 한 자료를 구축하여 계층 이항 로지스틱모형을 구축하였다.

3.1. 변수의 정의

교통사고 피해를 나타내는 계량화가 가능한 지표로써 인명피해와 물질 피해를 들 수 있다. 이중 사망자가 발생하였거나 차량이 완파된 경우 심각한 중대 사고로 볼 수 있으므로, 사고 심각도를 나타내는 지표로써 인명피해에 대해서는 사망자 발생과 물질 피해에 대해서는 사고 차량의 완파를 기준으로 하였다. 사고 발생시 인명피해와 차량파손에 영향을 미치는 요인이 구분될 수 있으며 같은 변수라도 그 영향의 정도가 달라질 수 있기 때문에, 본 연구에서는 사망자 발생과 사고차량 완파를 각각 종속변수로 한 모형을 구축하고자 한다.

사고는 운전자에게 노출된 외부환경이나 차량의 기계적 결함, 운전자의 부주의에 의한 내적 요인 등이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 이러한 차량 결함과 운전자 과실, 환경적 특성 등의 가변적 요인 외에도 도로의 기하구조나 연령, 성별 등 운전자 고유 속성에 따라 사고 발생에 미치는 영향이 달라질 수 있다. 고속도로 교통사고 자료로부터 외부 환경과 기하구조 특성, 차량 및 운전자 특성 외에도 운전자 과실 요인 등 인명피해와 차량파손에 영향을 미칠 수 있는 모든 요인을 변수로 포함하도록 하였으며 이는 표 2와 같다. 구체적으로 환경 요인으로는 노면상태와 사고시간대를 기하구조 요인으로는 평면선형, 종단경사를 그리고 사고차량 요

인으로는 사고차량수와 사고원인 차량 크기를 운전자 요인으로는 사고 원인 운전자 성별을 변수로 하였다. 이외에 운전자과실과 차량결함 등 직접적으로 사고를 발생시키는 원인을 변수로 포함하였다. 기타 고속도로 시설물별 사고 발생지점과 사고 유형에 따른 위험도의 차이를 분석하고자 이들도 변수로 포함하였다. 이에 따라 총 10여개 요인, 39개 변수를 더미변수 형식으로 입력하여 모형을 추정하고자 한다.

표 2. 변수의 정의

구 분		변수의 정의	
종속 변수	모형 I(인명 피해)	사망자 발생 여부	
	모형 II(물질 피해)	완파차량 발생 여부	
설명 변수	사고 발생 지점	(1) 분선 (2) 터널 (3) 램프 (4) 진출입부 (5) 톨게이트	
	사고 원인	(1) 안전거리 미확보 (2) 과속 (3) 음주 (4) 졸음 (5) 주시태만 (6) 중앙선침범 (7) 추월차량 (8) 통행위반 ¹⁾ (9) 핸들과대조작 (10) 차량결함 ²⁾ (11) 타이어파손	
	사고 유형	(1) 단독 (2) 차-사람 (3) 차-시설 (4) 접촉 (5) 추돌 (6) 충돌 (7) 화재	
	환경	사고시간	(1) 야간 (2) 주간
		노면상태	(1) 건조 (2) 습기 (3) 결빙/적설
	기하 구조	평면선형	(1) 직선구간 (2) 곡선구간
		종단경사	(1) 평탄부 (2) 오르막 (3) 내리막
	차량	사고 차량수	(1) 1대 (2) 2대 이상
		사고원인 차량크기 ³⁾	(1) 소형 (2) 중·대형
	운전자	사고 원인 운전자 성별	(1) 남자 (2) 여자

종속변수인 사망자 발생 및 차량 완파 여부와 39개 설명변수 자료의 집계 결과는 표 3과 같다. 사망자수와 완파 차량수는 925명과 835대로써 전체 탑승자수와 사고 차량수와 대비해서 각각 6.4%와 6.3%의 발생률을 나타내고 있다. 또한 대부분의 설명변수에 대해 각 모형이 비슷한 데이터 구성비를 나타내고 있다. 본선에서의 사고가 83% 이상으로 가장 많이 발생하고 있다. 운전자 과실과 차량결함에 대한 11개의 사고원인 중 졸음, 과속, 주시태만, 핸들과대조작 등이 높은 비율을 나타내고

1) 통행위반은 중량 초과, 적재 불량, 높이 초과, 갓길 역주행, 차선 급변경 등이 해당된다.
 2) 차량결함에는 엔진과열, 전기장치, 제동장치, 조향장치, 허부장치, 동력 전달장치 고장이 포함된다.
 3) (1) 소형에는 승용(영업, 자가, jeep)과 소형 승합차가 포함되며, (2) 중·대형에는 승합(중형, 대형), 화물, 트레일러와 특수차량이 포함된다.

있는데, 이는 대부분의 사고가 운전 행태나 미숙함에 의해 발생함을 나타내 주는 결과이다. 고속도로 사고는 차-시설사고(53.5%), 추돌사고(27.3%), 단독사고(13.2%)가 대부분을 차지하며, 이중 차-시설사고가 가장 많이 발생하는 사고유형이다.

사고시간은 주간(59.4%), 노면상태는 건조(74.8%), 평면선형은 직선구간(65.3%), 종단경사는 평탄부구간(48.4%)에서의 사고 발생률이 높다. 사고원인 차량은 소형(55.2%)이 사고원인 운전자 성별은 남성(88.6%)의 비율이 높다. 그러나 이는 각 요인별로 총량 대비 비교는 아니므로 표 3에 나타난 구성비 자체로 사고 발생률의 높고 낮음을 단정하여 설명할 수는 없다.

표 3. 종속변수 및 설명변수 자료의 집계 결과

구분	변수	빈도(명)	비율(%)	빈도(대)	비율(%)
모형1	탑승자수	14,547	100.0	-	-
	사망자수	925	6.4	-	-
모형2	사고 차량수	-	-	13,217	100.0
	완파 차량수	-	-	835	6.3
사고발생 지점	본선	12,171	83.7	10,987	83.1
	터널	443	3.0	369	2.8
	램프	1,059	7.3	1,007	7.6
	진출입부	242	1.7	235	1.8
	톨게이트	632	4.3	619	4.7
사고원인	안전거리 미확보	864	5.9	774	5.9
	과속	2,789	19.2	2,566	19.4
	음주	365	2.5	348	2.6
	졸음	3,786	26.0	3,413	25.8
	주시태만	2,608	17.9	2,306	17.4
	중앙선침범	62	0.4	46	0.3
	추월불량	286	2.0	272	2.1
	통행위반	94	0.6	89	0.7
	핸들과대조작	2,223	15.3	2,092	15.8
	차량결함	440	3.0	424	3.2
	타이어 파손	1,030	7.1	887	6.7
사고유형	단독	1,925	13.2	1,646	12.5
	차-사람	226	1.6	214	1.6
	차-시설	7,788	53.5	7,361	55.7
	접촉	99	0.7	92	0.7
	추돌	3,968	27.3	3,429	25.9
	충돌	318	2.2	260	2.0
	화재	223	1.5	215	1.6
사고시간	야간	5,903	40.6	5,356	40.5
	주간	8,644	59.4	7,861	59.5
노면상태	건조	10,879	74.8	9,815	74.3
	습기	3,556	24.4	3,291	24.9
	결빙/적설	112	0.8	111	0.8

(표 계속)

평면선형	직선구간	9,492	65.3	8,619	65.2
	곡선구간	5,055	34.7	4,598	34.8
종단경사	평탄부	7,048	48.4	6,453	48.8
	오르막	3,242	22.3	2,951	22.3
	내리막	4,257	29.3	3,813	28.8
차량크기	소형	8,023	55.2	7,375	55.8
	중대형	6,524	44.8	5,842	44.2
사고 차량수	1대	7,057	48.5	6,445	48.8
	2대 이상	7,490	51.5	6,772	51.2
운전자성별	남자	12,887	88.6	11,705	88.6
	여자	1,660	11.4	1,512	11.4

3.2. 모형 구축

본 연구에서는 인명피해와 차량피해의 두 가지 관점에서 사고 심각도에 영향을 미치는 위험 요인을 분석하는 것이 목적이다. 각 모형에 대해 사고-탑승자, 사고-차량의 2수준 계층구조를 적용한 계층 이항 로지스틱모형을 구축하였다.

3.2.1. 모형식

종속변수에 존재하는 상관관계를 모형에서 반영하기 위해 사고와 탑승자 및 차량 관계를 상위수준(level2)과 하위수준(level1)으로 계층화한 이항 로지스틱모형을 적용하였다. 종속변수는 인명피해에 대해서는 사망, 차량피해에 대해서는 완파를 발생 여부에 대한 이항의 더미변수로 적용하여 각각의 모형을 구축하였다.

상위수준 j 번째 사고에서 하위수준의 개체(사고차량 혹은 탑승자)가 i 라고 하면, 계층모형에서는 개별수준 모형(level1 model), 사고수준모형(level2 model), 결합모형의 세 개 식이 공식화된다.

이항분포를 따르므로 j 번째 사고에서 개체 i 에 대한 종속변수 Y_{ij} 는 사망 혹은 완파로써 $Y_{ij} = (0, 1)$ 의 이항이다. $Y_{ij} = 1$ 인 확률을 $\pi_{ij} = \Pr(Y_{ij} = 1)$ 이라 할 때 개별수준에서의 로지스틱 확률모형식 (1)과 상위 사고수준 모형식 (2), (3)은 다음과 같다.

$$\text{logit}(\pi_{ij}) = \log\left(\frac{\pi_{ij}}{1-\pi_{ij}}\right) = \beta_{0j} + \sum_{p=1}^P \beta_{pj} X_{pji} + \gamma_{ij} \quad (1)$$

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \sum_{q=1}^Q \gamma_{0q} Z_{qj} + u_{0j} \quad (2)$$

$$\beta_{pj} = \gamma_{p0} + \sum_{q=1}^Q \gamma_{pq} Z_{qj} + u_{pj} \quad (3)$$

여기서, X_{pij} 는 사고 j 에서 개체 i 에 대한 p 번째 공변량이고 Z_{qj} 는 사고 j 에 대한 q 번째 공변량이다.

상위수준모형에서는 그룹별로 확률요인에 의한 기울기가 다양한 확률기울기모형(random slope model)과 기울기는 같으나 절편이 다른 확률절편모형(random intercept model)이 있는데, 본 연구에서는 많은 공변량으로 인한 정산 과정의 복잡성을 피하기 위해 사고 j 의 확률효과를 상수로만 정의한 확률절편모형을 적용하였다. 이에 따라 식 (3)의 β_{pj} 는 다음 식과 같다.

$$\beta_{pj} = \gamma_{p0} \quad (4)$$

위의 식 (2)와 (4)를 식 (1)에 대입한 결합모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \log \text{it}(\pi_{ij}) &= \log\left(\frac{\pi_{ij}}{1-\pi_{ij}}\right) \\ &= \gamma_{00} + \sum_{p=1}^P \gamma_{p0} X_{pij} + \sum_{q=1}^Q \gamma_{0q} Z_{qj} + \gamma_{ij} + u_{0j} \end{aligned} \quad (5)$$

결합모형의 연결함수는 고정효과(fixed effect)와 확률효과(random effect)의 두 부분으로 구성된다. 고정효과는 공변량 X 나 Z 에 의해 설명되는 값이며, 확률효과는 다수의 오차항에 의해 확률적으로 결정되는 값이다. 위 식 (5)의 각 요소의 의미는 구체적으로 다음과 같다.

① 고정효과(fixed effect) :

- γ_{00} 는 모든 공변량이 0인 경우의 주효과 상수이다.
- $\gamma_{p0} X_{pij}$ 는 하위수준(level 1)의 공변량 X_{pij} 가 종속변수에 미치는 주효과 계수이다. 또한 하위수준인 사고차량이나 탑승자와 관련된 속성이 공변량 X_{pij} 가 된다. 여기에는 표 2의 변수 중 사고차량 속성으로는 사고차량수와 사고원인 차량크기, 탑승자 속성으로는 운전자 성별이 된다.
- $\gamma_{0q} Z_{qj}$ 는 상위수준(level 2)의 공변량 Z_{qj} 가 종속변수에 미치는 주효과 계수이다. 또한 상위수준인 사고와 관련된 속성이 공변량 Z_{qj} 가 된다. 여기에는 위의 하위수준에 대한 3개 속성을 제외한 표 2의 모든 변수가 해당된다.

② 확률효과(random effect) :

- γ_{ij} 는 하위수준 개체인 사고차량이나 탑승자에 잠재되어 있으나 고정효과로는 설명되지 못한 확률효과를 설명하는 오차항이며 $\gamma_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ 인 정규분포를 따르며 IID(identical independent distributed)를 가정한다.
- u_{0j} 는 상위수준인 사고그룹에 잠재된 확률효과를 설명하는 오차항으로써 $u_{0j} \sim N(0, \tau^2)$ 이며 사고그룹 간에 IID를 가정한다.

확률효과 u_{0j} 에 의해 같은 그룹에 속한 개체는 같은 분산(within-group covariance)을 공유하게 되며 이 값은 그룹간 변동(between-group variation)을 나타낸다. 이와 반대로 γ_{ij} 는 그룹 내에서의 개체간 변동(between-individual variation)을 나타낸다. γ_{ij} 는 기존 단일수준 모형에서도 도출되는 개체 내에 잠재된 교란항이나 u_{0j} 는 계층모형에서만 도출되는 값이며 사고그룹이 개체에 미치는 확률효과를 나타낸다. 또한 u_{0j} 에 의해 상위 사고수준에서 관측될 수 없거나 누락된 이질성(heterogeneity)을 설명하는 것이 가능해진다 (Huang, 2010).

모형에서 계층구조를 적용하는 경우 다음의 장점을 가진다. 첫째, 계층모형의 구조상 상위수준과 하위수준에 적합한 변수를 구분하여 적용하므로 보다 정확한 추정이 가능해진다. 즉 식 (5)에서 보듯이 하위수준인 운전자 및 차량 특성을 나타내는 공변량 X_{pij} 와 상위수준인 사고 특성을 나타내는 공변량 Z_{qj} 가 구분되어 적용된다. 둘째, 계층 구조를 반영한 데이터의 구축 방식에 의해 편이가 줄어들어 보다 정확한 추정이 가능해진다. 단일수준 모형에서는 한 사고에서 사망자나 완파차량이 많아도 모두 1명이나 1대가 발생하는 것으로 데이터가 구축된다. 반면 계층구조를 적용하는 경우 사망자나 완파차량의 발생 개체수 대로 데이터가 구축되므로 종속변수와 영향요인의 관계에 대한 보다 정확한 추정이 가능해진다. 셋째, 계층구조에 의해 상위수준에 의한 확률효과가 도출된다. 이는 모형에서 설명변수로 정의한 고정효과 외에 사망자나 완파차량 발생에 영향을 미치는 사고 자체의 설명되지 않은 요인에 의한 효과이다. 이러한 장점에 따라 사망사고모형에서는 사고-탑승자의 2수준 계층구조를 또한 완파차량사고모형에서는 사고-사고차량의 2수준 계층구조를 적용하여 데이터를 구축하고 모형을 추정하였다.

3.2.2. 모형의 추정과 해석

모형의 추정과 정산은 통계 패키지인 SAS/STAT를 활용하며, 계층 이항 로지스틱모형은 GLIMMIX 프로시저에 의한다. 각 계층의 변수에 대한 고정효과와 비교 위험도, 그리고 상위수준의 그룹간 변동을 나타내는 확률효과가 주요 결과로 도출된다.

모형에서 정의한 공변량에 대한 고정효과와 해석은 비교위험도(오즈비, odds ratio)에 의한다. 이는 로지스틱 모형의 연결함수가 로그이므로, 식 (5)에 의해 추정된 계수의 지수값 $\exp(\gamma_{p0})$, $\exp(\gamma_{0q})$ 에 의해 도출되며 각 위험도는 설명변수의 그룹별로 상대적으로 비교한다. 각 설명변수 그룹에서 기준(base case)으로 정한 변수의 계수 추정치는 0이고 이것의 지수값은 1이다. 이를 기준으로 타 변수의 비교위험도 값의 크기를 상대적으로 비교한다. 오즈비가 1.0 미만이면 공변량 X_{pi} (혹은 Z_{qj})가 한 단위 증가할 때 지수함수의 승수효과에 의해 오즈비가 심각하게 감소될 것이며, 오즈비가 1.0 이상이면 그 반대의 영향이 나타날 것이다. 오즈비가 1.0 미만인 경우 기준 변수와 비교해 해당 변수는 사망자나 완파차량 발생에 미치는 영향이 상대적으로 적고 1.0 이상인 경우는 그 반대이다. 또한 해당 변수 오즈비로부터 1을 빼고 100을 곱하면 설명변수가 한 단위 변할 때 발생하는 사건의 확률 변화를 나타낸다(Kim, 2007). 계수 추정치의 유의확률을 통해 유의한 영향변수를 가리지만, 비교위험도는 각 변수가 사건에 영향을 미치는 상대적 차이를 나타내므로 유의하지 않은 변수라도 비교위험도를 통한 해석은 의미가 있다. 또한 모형 추정 결과에서 유의확률이 10% ($Pr < 0.1$) 미만이면 영향변수가 유의한 것으로 해석하였다.

3.2.3. 계층간 상관계수에 의한 확률효과의 평가

계층모형에서 Y_{ij} 의 분산은 다음의 두 요소이다.

- ① 상위수준에서 사고간 변동을 나타내는 오차항 u_{0j} 의 분산 τ_0^2 ,
- ② 하위수준에서 사고내 사고차량이나 탑승자 등의 개체간 변동을 나타내는 오차항 γ_{ij} 의 분산 σ^2 .

계층간 상관계수(intra-class correlation coefficient, ICC) ρ 는 전체 잔차 분산에 대한 상위 사고수준 잔차의 분산의 비로써 상위수준인 사고간 변동의 크기, 즉 전체 잔차 분산에서 계층에 의한 확률효과의 영향이 어느 정도인지는 나타내는 지표이며 식 (6)과 같다. ρ 값이 0에 가까워질수록, 상위수준 사고그룹 간

에 변동이 작다는 것을 의미하며 이때는 일반 로지스틱 모형이 적합하다. 반대로 이 값이 클수록 계층모형이 적합함을 의미한다(Jones과 Jorgensen, 2003).

$$\rho = \frac{\tau_0^2}{\tau_0^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

위 식에서 τ_0^2 은 모형의 정산을 통해 도출되나, σ^2 은 추정 결과로 도출되지 않는다. 따라서 이 값은 표준 로지스틱분포의 분산을 적용하며, 일반적인 이 값의 크기는 $\sigma^2 = \pi^2/3$ 을 적용한다(Kim, 2007).

4. 모형의 추정 및 분석

사망사고모형과 차량완파사고모형의 추정 결과는 표 4와 같다. 각 설명변수 그룹에서 기준(base case)으로 정한 변수의 계수 추정치는 0이고 이것의 오즈비가 1로 산정되므로, 가능한 나머지 변수들의 오즈비가 1보다 큰 값이 나오도록 기준변수를 정하였다. 말하자면 각 설명변수 그룹별로 위험도가 최소일 것으로 예상되는 변수를 기준으로 정하여 모형을 추정하였다. 모형의 주요한 결과는 각 설명변수에 대한 고정효과로써 계수추정치와 비교위험도, 그리고 계층에 의한 상위 사고수준의 확률효과 등이며 이에 대한 결과의 해석은 각 설명변수 그룹별로 기술하였으며 다음과 같다.

4.1. 설명변수의 고정효과

4.1.1. 사고발생지점

사고발생지점에 대해서는 톨게이트를 기준으로 본선, 터널, 램프, 진출입부의 상대적 위험도를 비교하였다. 사망사고모형에서는 톨게이트의 사망자 발생 위험도가 1일 때, 본선 3.95, 터널 3.16, 램프 2.90, 진출입부 3.99로 본선과 진출입부가 가장 위험하며 모든 변수가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 또한 차량완파사고모형에서는 본선과 진출입부는 7.72, 터널은 6.60, 램프는 5.15로써 사망자 발생보다 차량완파의 위험이 두 배 정도 높다. 이는 톨게이트에서는 저속인 상태에서 사고가 많이 발생함을 감안할 때, 다른 지점은 주행 중인 상황에서 사고가 발생하므로 인명피해 정도에 비해 차량 파손 피해가 더 심각할 수 있음을 반영해주는 결과로 볼 수 있다. 인명피해와 차량피해 측면에서 두 모형이 본선과 진출입부에서의 사고가 가장 위험도가 높는데, 이것은 본선에서는 고속주행과 빈번한 통행 패턴 변

표 4. 계층 모형 추정결과

변수	추정 결과	사망사고모형				차량완파사고모형				
		계수추정치 (β, γ)	표준 오차	유의확률 (Pr> t)	비교위험도 $\exp(\beta, \gamma)$	계수추정치 (β, γ)	표준 오차	유의확률 (Pr> t)	비교위험도 $\exp(\beta, \gamma)$	
고정 효과	상수 (γ_{00})	-7.68	1.08	<.001	0.0005	-8.15	1.11	<.001	0.0003	
	사고 발생지점	본선	1.37	0.43	<.001	3.95	2.04	0.46	<.001	7.72
		터널	1.15	0.49	0.02	3.16	1.89	0.51	<.001	6.60
		램프	1.06	0.46	0.02	2.90	1.64	0.49	<.001	5.15
		진출입부	1.38	0.52	0.01	3.99	2.04	0.54	<.001	7.72
		톨게이트	0	-	-	1	0	-	-	1
	사고원인	안전거리미확보	0	-	-	1	0	-	-	1
		과속	1.21	0.23	<.001	3.35	1.17	0.27	<.001	3.21
		음주	0.16	0.36	0.65	1.18	0.24	0.41	0.57	1.27
		졸음	1.08	0.20	<.001	2.96	1.15	0.25	<.001	3.14
		주시태만	0.81	0.21	<.001	2.24	0.97	0.26	<.001	2.65
		중앙선침범	1.76	0.43	<.001	5.80	1.51	0.53	0.004	4.53
		추월불량	0.90	0.32	0.01	2.46	0.49	0.41	0.23	1.63
		통행위반	1.24	0.43	<.001	3.46	1.29	0.47	0.01	3.65
		핸들과대조작	0.54	0.24	0.02	1.72	0.82	0.27	0.003	2.26
		차량결함	-1.75	0.65	0.01	0.17	1.35	0.33	<.001	3.86
		타이어파손	1.10	0.25	<.001	3.01	0.66	0.30	0.03	1.93
	사고유형	단독	0.58	0.62	0.36	1.78	0.43	0.62	0.49	1.53
		차-사람	2.76	0.63	<.001	15.85	-0.45	0.76	0.55	0.64
		차-시설	-0.42	0.62	0.50	0.66	0.06	0.61	0.93	1.06
		접촉	0	-	-	1	0	-	-	1
		추돌	1.39	0.61	0.02	4.03	0.81	0.60	0.18	2.26
		충돌	1.99	0.63	0.002	7.30	1.48	0.63	0.02	4.41
		화재	1.68	0.66	0.01	5.39	3.30	0.63	<.001	27.08
	사고시간	야간	0.42	0.08	<.001	1.53	0.25	0.08	0.002	1.29
		주간	0	-	-	1	0	-	-	1
	노면상태	건조	1.38	0.74	0.06	3.96	1.61	0.76	0.03	4.98
습기		0.95	0.74	0.20	2.60	1.09	0.76	0.15	2.97	
결빙/적설		0	-	-	1	0	-	-	1	
평면선형	직선구간	0.16	0.09	0.07	1.17	0.08	0.09	0.38	1.08	
	곡선구간	0	-	-	1	0	-	-	1	
종단경사	평탄부	0	-	-	1	0	-	-	1	
	오르막	-0.01	0.10	0.95	0.99	0.10	0.10	0.32	1.10	
	내리막	0.07	0.09	0.48	1	0.13	0.10	0.19	1	
사고원인 차량크기	소형	0.23	0.08	0.01	1.26	0.06	0.09	0.51	1.06	
	중대형	0	-	-	1	0	-	-	1	
사고 차량수	1대	0.53	0.14	<.001	1.69	0.43	0.12	<.001	1.53	
	2대 이상	0	-	-	1	0	-	-	1	
사고원인 운전자성별	남자	0.16	0.13	0.24	1.17	0.04	0.15	0.77	1.04	
	여자	0	-	-	1	0	-	-	1	
확률 효과	계층간 분산 (τ_0^2)	0.52	0.09	-	-	0.43	0.10	-	-	
	계층내 분산 (σ^2)	3.29	-	-	-	3.29	-	-	-	
	계층간 상관관계, ICC(ρ)	0.137 (13.7%)	-	-	-	0.115 (11.5%)	-	-	-	

화 등에 기인하고, 진출입부는 차량의 가·감속과 차로 변경 등의 교통류 변화가 빈번함으로 인해 나타나는 결과로 볼 수 있다.

4.1.2. 사고원인

사고원인은 운전자 과실과 차량 결함 등에 대한 11개의 변수중 안전거리 미확보를 기준으로 분석하였다. 사망사고모형에서 중앙선침범(5.80), 통행위반(3.46), 과속(3.35), 타이어 파손(3.01), 졸음(2.96) 등의 순으로 사망자 발생 위험이 높은 것으로 나타났으며 차량결함에 의한 사고에서는 사망자 발생 위험도가 0.17로 가장 낮게 나타났다. 차량완파사고모형에서는 중앙선침범(4.53), 차량결함(3.86), 통행위반(3.65), 과속(3.21), 졸음(3.14) 등의 순으로 차량 파손 위험이 높으며, 사망사고모형과 달리 차량결함에 의한 사고 발생시 차량 완파의 위험이 높은 것으로 나타나고 있다.

결론적으로 중앙선침범, 통행위반, 과속 등이 위험도가 높은 사고가 되는데, 이는 운전자가 통행방법이나 규정 속도를 준수할 경우 예방할 수 있거나 위험도를 낮출 수 있게 된다. 또한 고속도로 주행시 졸음운전(중앙선침범도 졸음 등의 2차적 원인에 의한 결과임)을 예방할 수 있는 시설조치가 절실하다.

4.1.3. 사고유형

사고유형은 7개의 변수 중 가장 경미한 사고인 접촉사고를 기준으로 비교하였다. 사망사고모형에서는 차-사람(15.85), 충돌(7.30), 화재(5.39), 추돌(4.03), 단독(1.78) 사고의 순으로 사망자 발생 위험이 높은 것으로 나타났으며 차-시설 사고(0.66)는 접촉 사고보다 인명피해가 적게 나타나고 있다. 반면 차량완파사고모형에서는 화재로 인한 사고의 차량피해가 27.08로 가장 크다. 그 외에 충돌(4.41), 추돌(2.26), 단독(1.53)의 순으로 차량 파손 위험이 나타났으며 차-시설 사고는 1.06으로 접촉 사고와 피해 정도가 비슷하다. 또한 차-사람 사고는 0.64로 차량파손 위험은 낮으나 사망자 발생 위험은 15.85로 가장 높아 상반되는 정도를 보여주고 있다.

4.1.4. 사고시간

사고시간은 주간과 야간으로 변수를 구분하였으며, 주간을 기준으로 분석하였다. 추정 결과 야간의 사망자 발생과 차량 완파 위험도가 각각 1.53, 1.29로 나타나 주간보다는 야간 사고의 상해나 물적 피해 위험도가 높음을 알 수 있다.

4.1.5. 노면상태

노면상태는 사고 발생 당시의 날씨와 외부환경의 영향을 간접적으로 나타내주는 지표이다. 따라서 노면상태는 기후와 그로 인한 노면조건을 반영하여 건조, 습기, 결빙/적설로 구분하였으며 모형에서는 결빙/적설을 기준으로 분석하였다. 사망사고모형과 차량완파사고모형에서 건조 노면의 오즈비가 각각 3.96, 4.98로써 결빙/적설 노면에 비해 상해 및 물적 피해의 위험도가 높게 나타나고 있다. 이는 결빙이나 적설 등의 미끄러운 노면에서는 저속 및 주의 운전으로 사고 발생시 인명피해나 물적 피해가 건조 상태의 노면보다 낮게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 습윤상태 노면의 비교위험도가 각각 2.60, 2.97로 건조한 노면보다 높게 나타나는 것도 같은 맥락으로 설명할 수 있다.

이러한 결과를 사고원인과 결부하여 설명하면, 가령 건조한 노면상태인 경우 외부환경이 과속과 졸음 등에 노출되는 위험이 높으므로 상해 및 피해가 큰 사고발생의 가능성이 높아지게 된다. 따라서 건조노면 사고의 위험도를 낮출 수 있는 방법으로써 과속이나 졸음운전의 예방 조치를 고려할 수 있다.

4.1.6. 기하구조(평면선형, 종단경사)

사고발생시 상해나 물적 피해에 영향을 미칠 수 있는 기하구조 요인으로써 평면선형과 종단경사를 고려하였다. 평면선형은 직선구간과 곡선구간으로, 종단경사는 평탄부와 오르막, 내리막으로 변수를 구분하였다. 추정 결과 사망사고모형과 차량완파사고모형 모두 대부분의 기하구조 변수가 통계적으로 유의하지 않았으며, 변수간 비교위험도 값의 차이도 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 사고 발생시 인명피해나 차량 피해는 선형이나 경사 등의 기하구조에 의해 영향을 받지 않는다고 할 수 있다. 이러한 결과는 고속도로 사고 심각도에 대한 이주연(2008)의 연구 결과와 같다.

4.1.7. 차량 요인(차량크기, 사고차량수)

사고발생시 상해나 물적 피해에 영향을 미치는 차량 요인으로써 사고원인 차량크기와 사고차량수를 고려하였다. 사고원인 차량크기는 소형과 중·대형으로 구분하였고, 사고차량수는 1대와 2대 이상으로 변수를 구분하였다. 모형 추정 결과 사고원인 차량이 소형인 경우가 중·대형 차량에 의한 사고에 비해 인명피해가 좀 더 큰 것으로 나타났다. 반면 차량파손 피해 정도는 사고원인 차량크기와는 무관한 것으로 나타났다.

사망사고모형에서 단독차량 사고와 다중차량 사고의 인명피해를 비교한 결과, 단독차량사고의 사망자 발생 위험도가 좀 더 높은 것으로 나타났으며 차량완파사고 모형에서도 같은 결과를 보이고 있다. 이는 사고유형에서 단독사고와 나머지 사고유형(접촉, 추돌, 충돌 등)을 이원화하여 분석한 결과로 볼 수 있다(화재 등 나머지 유형은 양쪽 모두에 포함 가능). 이렇듯 사고차량수를 기준으로 분석하였을 때, 한대의 차량이 일으킨 사고가 여러 대의 차량에 의한 사고보다 상해 및 차량피해가 더 큰데, 이는 차량단독사고의 사고원인을 명확히 분석하여 이에 따른 대응책을 수립할 필요가 있다.

4.1.8. 운전자 요인(운전자 성별)

사고발생시 상해나 물적 피해에 영향을 미치는 운전자 요인으로써 사고원인 운전자의 성별을 고려하였다. 사망사고모형에는 여성보다는 남성 운전자의 상해 위험이 약간 높은 것으로 나타나고 있다. 반면 차량완파사고 모형의 결과에서는 차량 파손 피해에 대해 운전자의 성별 구분이 의미가 없는 것으로 나타났다. 전자의 결과에 대해서는 여성보다 남성이 중대사고 유발의 위험이 더 크다고 볼 수 있으나 값의 차이가 미미하며, 후자의 결과로 볼 때 사고 발생에서 성별 차이에 의한 피해수준의 차이는 거의 없는 것으로 결론지을 수 있다.

결론적으로 상해나 차량 파손 등의 사고 피해는 기하구조 여건에 따른 영향의 차이는 거의 없으나 시야 조건이나 기상 상태 등 외부 환경에는 영향을 받는다. 각 요인의 비교위험도는 사고 심각도 수준을 이해하고 안전정책을 수립하는데 도움이 될 수 있다. 또한 사고발생지점, 사고유형, 노면상태 등의 요인은 사고원인과 연계하여 각 변수의 비교위험도의 차이를 구체적으로 분석하여 이를 감소할 수 있는 적절한 대응책을 수립할 수 있을 것이다.

4.2. 계층 구조에 의한 확률효과

사망사고모형과 차량완파사고모형의 사고그룹의 확률 오차항 u_{0j} 의 분산(그룹간 분산) τ_0^2 은 0.52, 0.43으로 추정되었으며 표준오차가 0.09, 0.10으로써 통계적으로 유의하다. 또한 하위수준 개체의 확률 오차항 γ_{ij} 의 분산(그룹내 분산) σ^2 은 3.29이다. 이 두 값에 의해 계층간 상관계수(ICC) ρ 을 산정하면 사망사고모형은 0.137, 차량완파사고모형은 0.115로써 사고 발생 시 사망, 차량 완파 등 상해 심각도에 영향을 미치는 요인에 의한 전체 효과중 상위 사고그룹에 내재된 측정되지 않

는 확률효과에 의한 영향은 각각 13.7%, 11.5%인 것으로 나타났다. 이러한 확률효과 영향은 일반로지스틱 모형으로 분석하였을 때는 알 수 없는 요인으로써 값의 크기가 상당하여 일반모형보다는 계층모형을 적용하는 것이 더 바람직하다고 볼 수 있다.

상위그룹 확률효과에 대한 선행연구 사례를 살펴보면, Jones와 Jorgensen(2003)의 연구에서는 사고-사상자의 관계에서 사고그룹 확률효과 분산이 0.63으로 나왔고 Lenguerrand(2006)의 연구에서는 사고-차량의 관계에서 0.35로 나왔다. 이는 본 연구의 사망사고모형과 차량완파사고모형의 결과인 0.52, 0.43과 각각 유사한 결과를 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 계층 이항 로지스틱모형에 의해 고속도로 교통사고 심각도에 영향을 미치는 요인을 도출하고 영향변수 간의 차이를 나타내는 비교위험도를 산정하였다. 사고 심각도는 인명피해와 차량피해로 구분하여 사망사고모형과 차량완파사고모형을 구축하였다. 종속변수는 사망자 발생과 완파차량 발생 여부이며, 각각 사고-탑승자, 사고-차량의 2수준 계층구조를 적용하였다. 주요한 결과로써 각 설명변수에 의해 설명되는 고정효과와 사고가 사망자 발생 혹은 차량 완파에 미치는 확률효과가 추정되었다. 설명변수에 의한 고정효과는 두 모형이 대체적으로 유사한 결과를 나타내었으나, 종속변수와 설명변수의 관계와 설명변수가 가진 속성에 따라 결과가 큰 차이를 나타내기도 하였다. 이에 대한 주요한 연구 결과는 다음과 같다.

사고발생지점은 본선과 진출입부 사고의 상해 및 차량피해의 위험도가 높다. 사고원인은 중앙선침범과 통행위반, 과속 사고의 상해나 차량 파손 위험도가 높으며, 특히 차량결합에 의한 사고는 인명피해는 적으나 차량 완파의 위험은 높은 것으로 나타났다. 사고유형은 화재사고, 충돌사고와 추돌사고의 피해가 크며, 차-사람 사고는 차량 피해는 거의 없으나 치명적인 상해 위험이 있는 것으로 나타났다. 사망사고모형과 차량완파모형 모두 주간보다는 야간 사고가 적설이나 습윤 상태의 노면보다는 건조한 노면에서의 사고 피해가 큰 것으로 나타났다. 그러나 평면선형, 종단경사 등의 기하구조는 사고 피해에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 결과적으로 상해나 차량 파손 등의 사고 피해는 기하구조 여건에 따른 영향의 차이는 없으나 시야 조건이나 기

상 상태 등 외부 환경에는 영향을 받는다고 볼 수 있다. 차량요인에 대해서는 중·대형보다는 소형 차량의 인명 피해가 좀 더 크며, 차량단독사고인 경우 다중차량사고에 비해 상해 및 차량 피해가 더 큰 것으로 나타났다. 마지막으로 운전자 요인으로써 사고 발생에서 성별 차이에 의한 피해수준의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 결론적으로 각 요인의 비교위험도는 사고 심각도 수준을 이해하고 안전 정책을 수립하는데 활용될 수 있다. 또한 사고발생지점, 사고유형, 노면상태 등의 요인은 각 변수의 비교위험도의 차이가 사고원인과 연계되어 있으므로 이를 구체적으로 분석하여 적절한 대응책을 수립할 수 있을 것이다.

계층모형과 일반모형의 차이는 종속변수 내에 내재된 상관관계를 계층 구조화하여 계층에 의한 확률효과가 종속변수에 어느 정도 영향을 나타내는가를 확인할 수 있다는 점이다. 그러나 설명변수에 의한 고정효과는 두 모형 간에 큰 차이가 없이 유사하게 나온다. 따라서 사고 심각도를 예측하는 모형에서 확률효과를 도출한다는 점 외에 굳이 계층모형을 적용해야 할 필요는 없다. 그러나 이 문제는 해결할 연구 목적과 계층구조의 설정과 모형 설계를 어떻게 하는가에 따라 대답이 달라질 수 있다. 추정 결과가 더 정확하고 확률효과의 영향이 크고 중요한 결과라면 계층 모형의 적용이 바람직할 것이다. 가령 사고 발생에 대한 지역별 차이를 구분하여 분석하고자 한다면 분석 지역을 그룹으로 구분하는 계층 모형에 의해 각 지역이 미치는 확률효과 값을 도출할 수 있다. 이러한 확률효과의 구분을 필요로 하는 교통사고 분석이나 기타 연구과제에서 계층모형을 더 많이 제대로 활용할 수 있는 방안을 찾는 것이 연구자의 역할이며 향후 연구과제가 될 것이다.

참고 문헌

심관보·권기환(1998), "교통사고 심각도 분석 연구", *대한교통학회 제34회 학술발표회*, 대한교통학회

이수범·김명숙·장일준·김장욱(2009), "교통섬 설치가 보행자 교통사고에 미치는 영향 연구", *대한교통학회지*, 제27권 제2호, 대한교통학회, pp107-115

이주연·정진혁·손봉수(2008), "구조방정식모형을 이용한 고속도로 교통사고 심각도 분석", *대한교통학회지*, 제26권 제2호, 대한교통학회, pp.17-24

하오근·오주택·원제무·성낙문(2005), "순서형 프로빗 모형을 이용한 사고심각도 분석", *대한교통학회지*, 제23권 제4호, 대한교통학회, pp.47-55

Al-Ghamdi, A. S.(2002), "Using logistic regression to estimate the influence of accident factors on accident severity", *Accident Analysis and Prevention* 34, pp.729-741

Gelman, A., Hill, J.(2007), *Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Model*, Cambridge University Press

Goldstein, H., 2003. *Multilevel Statistical Models*, 3rd ed. Edward Arnold, London.

Huang, H., Abdel-Aty, M.(2010), "Multilevel data and Bayesian analysis in traffic safety", *Accident Analysis and Prevention* 42, pp.203-212

Huang, H., Chin, H.C., Md. Mazharul H.(2008), "Severity of driver injury and vehicle damage in traffic crashes at intersections: A Bayesian hierarchical analysis", *Accident Analysis and Prevention* 40, pp.45-54

Jones, A. P., Jorgensen, S. H.(2003), "The use of multilevel models for the prediction of road accident outcomes", *Accident Analysis and Prevention* 35(1), pp.59-69.

Kim, D.G., Lee, Y., Washington, S., Choi, K.(2007), "Modeling crash outcome probabilities at rural intersections: application of hierarchical binomial logistic models" *Accident Analysis and Prevention* 39(1), pp.125-134.

Lenguerrand, E., Martin, J.L., Laumon, B.(2006), "Modeling the hierarchical structure of road crash data: application to severity analysis", *Accident Analysis and Prevention* 38(1), pp43-53.

Shankar, V., Mannering, F. and Barfield, W.(1995), "Effect of Roadway Geometrics and Environmental Factors on Rural Freeway Accident Frequencies", *Accident Analysis and Prevention*, 27(3), pp.371-389.

Shankar, V., Mannering, F. and Barfield, W.(1996), "Statistical Analysis of Accident Severity on Rural Freeways", *Accident Analysis and Prevention*, 28(3), pp.391-401.

Shankar, V.N., Albin, R.B., Milton, J.C., Mannering, F.L., 1998. Evaluation of median crossover likelihoods with clustered accident counts: an empirical inquiry using the random effect negative binomial model. *Transportation Research Record* 1635, 44-48.

Yannis, G., Papadimitriou, E., Antoniou.(2007), "Multilevel modelling for the regional effect of enforcement on road accidents", *Accident Analysis and Prevention* 39, pp.818-825.

접 수 일 : 2011. 8. 11
 심 사 일 : 2011. 8. 14
 심사완료일 : 2011. 9. 26