

다중선형 회귀분석을 이용한 고속도로 터널구간의 교통사고 예측모형 개발

Development of Accident Forecasting Models in Freeway Tunnels using Multiple Linear Regression Analysis

박 주 환*
(Ju-Hwan Park)

김 상 구**
(Sang-Gu Kim)

요 약

본 논문은 고속도로 터널구간을 대상으로 교통사고특성을 다각적으로 분석하여 다양한 독립변수를 선정하고 종속변수를 건, 건/km, 건/백만대km로 다양화하여 다중선형회귀모형을 개발하였다. 그리고 개발된 모형들은 상호 비교 검토하여 최종적으로 교통사고영향요인으로 구성된 신뢰성 있는 교통사고예측모형을 결정하였다. 교통사고예측모형은 모형의 R^2 , F값 등 검정통계량 수준, 다중공선성, 잔차분석 등 모형검증과정이 수행되었고 터널구간의 교통사고특성 반영여부 등을 검토하여 최종적으로 터널길이에 따라 총 2개의 모형을 선정하였다. 선정된 종속변수는 $\ln(\text{건/백만대km})$ 이며, 독립변수는 연평균일교통량(AADT), 종단구배, 터널높이로 구성되었다. 추정모형은 RMSE, MAE를 이용하여 예측한 값과 실제 관측값과의 차이를 분석하여 터널구간의 교통사고를 설명하는데 적합한 모형으로 파악되었다.

핵심어 : 터널구간, 교통사고특성, 교통사고예측모형, 터널길이, 다중선형회귀모형

Abstract

This paper analyzed the characteristics of traffic accidents in all tunnels on nationwide freeways and selected some various independent variables related to accident occurrence in tunnels. The study aims to develop reliable accident forecasting models using the various dependent variables such as the number of accident (no.), no./km, and no./MVK. Finally, reliable multiple linear regression models were proposed in this paper. This study tested the validity verification of developed models through statistics such as R^2 , F values, multicollinearity, residual analysis. The paper selected the accident forecasting models considering the characteristics of tunnel accidents and two models were finally proposed according to two groups of tunnel length. In the selected models, natural logarithm of $\ln(\text{no./MVK})$ is used for the dependent variable and AADT, vertical slope, and tunnel height are used for the independent variables. The reliability of two models was proved by the comparison analysis between field data and estimating data using RMSE and MAE. These models may be not only effective in evaluating tunnel safety under design and planning phases of tunnel but also useful to reduce traffic accidents in tunnels and to manage the traffic flow of tunnel.

Key words : Tunnel Section, Accident Characteristics, Accident Forecasting Model, Tunnel Length, Multiple Linear Regression Model

* 주저자 : 경기개발연구원 교통연구부 연구원

** 공저자 및 교신저자 : 전남대학교 물류교통학전공 부교수

† 논문접수일 : 2012년 11월 28일

† 논문심사일 : 2012년 12월 5일

† 게재확정일 : 2012년 12월 9일

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

2010년 기준 터널은 수도권을 포함한 전국 고속도로 연장 3,859km 중 510.7km로 전체 연장의 13.23%를 차지하고 있으며, 2009년과 대비하여 전국 고속도로 연장이 2.20% 증가한 반면 터널은 5.82% 증가로 약 2배 정도로 높은 수치이다. 이러한 터널증가는 높은 설계수준 유지와 통행시간 단축 효과 등 운전자들의 원활한 주행을 위한 방안으로 터널건설을 선호하기 때문이라 생각된다.

하지만 우리나라는 산지가 전국토의 70%를 차지하고 지형적 불리함으로 인해 고속도로 확장 및 신설공사에서 터널건설은 어려움을 겪을 수밖에 없다. 그리고 터널은 본선에 비해 심리적, 공간적으로 제한적임에 따라 인명사고를 동반한 대형사고를 유발할 가능성이 높으며, 2차, 3차 사고를 유발할 가능성도 높다. 그 중 화재로 인한 사고는 본선에 비해 환기 및 방재처리가 어려워 사고위험도가 매우 높다고 할 수 있다. 또한 터널구간 교통사고로 인한 사고처리시간 역시 다른 고속도로 구간에 비해 상대적으로 길게 나타날 가능성이 높다. 이로 인해 터널구간 교통사고는 심각한 교통혼잡을 야기하고 사회적 큰 손실비용을 초래하게 된다.

그동안 고속도로 터널에 대한 연구들은 용량을 포함한 주로 교통류특성과 운전자 심리에 관한 주제들로 국한하여 수행된 것이 대부분이고 터널과 관련된 교통사고에 관한 연구들은 본선에 비해 극히 제한적으로 연구되어져 왔다. 최근 터널의 증가와 중요성에 비추어 고속도로 터널에 관한 교통사고 특성분석과 교통사고 예측모형의 개발 필요성이 있음에도 불구하고 터널구간에서 교통사고관련 자료수집이 용이하지 않고 자료의 양도 충분하지 않아 거의 수행되지 못하였던 것도 사실이다.

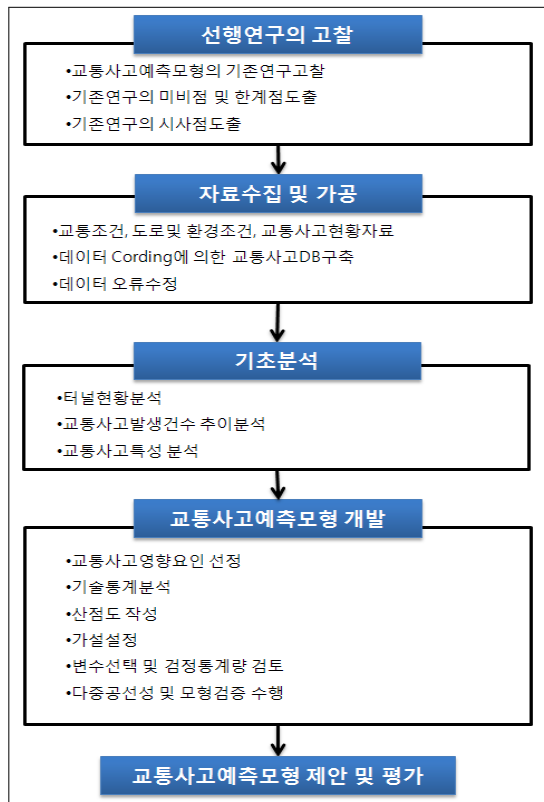
본 연구는 고속도로 터널구간 교통사고자료를 최대한 수집하여 터널구간에 대한 교통사고 특성분석과 신뢰성 있는 교통사고 예측모형을 개발하는데 목적이 있다.

2. 연구방법

본 연구는 고속도로 터널구간의 교통사고특성을 분석하고, 주요 교통 및 도로조건, 그리고 환경조건 등을 고려하여 교통사고예측모형을 개발하는데 초점을 두었다.

본 연구의 분석범위는 전국 고속도로 상에 위치하는 터널구간을 대상으로 자료를 수집하고 분석하였다. 자료를 수집한 공간적 범위로서는 행정구역 상으로 경기 50개소, 강원 158개소, 경남 65개소, 경북 77개소 등 총 557개소에 이른다.

본 연구의 수행과정을 단계별로 살펴보면 5단계로서 관련 선행연구의 고찰, 자료수집 및 가공, 기초분석, 교통사고예측모형 개발과 마지막으로 모형의 평가와 구성되고 자세한 내용은 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 연구수행과정
(Fig. 1) Flow Chart of Research Process

II. 선행연구 고찰

1. 교통사고예측모형

교통사고예측모형에 대한 기존연구는 크게 본선과 유출입시설을 대상으로 이루어져왔으며 먼저, 본선에 관한 연구는 다음과 같다.

진교남(1983), 강정규(1985), 백승걸 등(2005)은 사고율을 종속변수로 하는 교통사고모형을 개발하였다[1-3]. 이주환(1997), 강민욱(2002)과 강정규 등(2002)은 사고건수를 종속변수로 하는 교통사고모형을 개발하였으며 특히, 강정규 등(2002)은 호남고속도로를 중심으로 곡선반경, 곡선길이 등을 이용해 선형조건별 모형을 구축하였다[4-6]. 그리고 이수범 등(2003)은 도로등급별 도로의 물리적 특성과 교통특성을 회귀분석을 통하여 개발하였고 개발한 모형은 실제 사고자료와의 상관성이 높은 것으로 나타났고 특히, 고속도로의 경우 교통량이 증가할수록 사고건수도 증가함을 알 수 있었다[7].

C.V. Zegeer 등(1986)은 독립변수들에 대한 단계별 선형회귀분석을 통하여 변수를 선정하였다. 그리고 비선형회귀분석을 통해 지방부 2차로도로에 대한 사고예측모형을 개발하였고 분석결과, 도로폭과 길어깨폭이 1m씩 확장될 경우 사고율은 각각 30%, 10%씩 감소함을 도출하였다[8].

두 번째로 유출입시설에 관한 연구는 다음과 같다. 박효신(2006), 김희경(2009), 하태준 등(2002)은 사고건수를 종속변수로 하여 교통사고예측모형을 개발하였다[9-11]. 특히, 김희경(2009)은 고속도로 분기점 연결로 선형조건 및 교통조건에 따른 교통사고특성분석 및 연결로 교통사고예측모형을 개발하였다. 윤병조(2007)와 노창균(2008)은 사고율을 종속변수로 하여 교통사고예측모형을 개발하였다. 특히, 윤병조(2007)는 트럼펫IC 유출연결로를 대상으로 모형을 개발하였으나 설명변수의 수가 적어 모든 설명변수를 적용하는 All possible regression 방식을 이용하였다[12, 13].

기존연구 검토결과, 대부분의 연구에서 종속변수가 사고건수(건)일 경우, 사용빈도가 가장 높은 교

통량의 계수부호는 양(+)으로 결정되는 것으로 보아 교통량이 증가할수록 사고건수(건)가 증가함을 알 수 있었다. 또한 종속변수가 건/백만대km의 경우, 교통량의 계수부호는 대부분 음(-)으로서 사고건수(건)와 상반된 부호로 결정됨을 알 수 있었다.

교통사고 모형 관련하여 살펴본 국내 12개, 국외 2개 총 14개 선행연구에서 개발된 교통사고예측모형에 사용된 변수들을 각각 항목별로 분류하여 빈도수를 분석하였다. 이 중 교통량 변수가 25%로 가장 높았으며, 곡선반경과 구간길이의 적용빈도가 각각 13%로 분석되었고 사용빈도가 높은 독립변수는 교통사고와 상관관계가 높다고 판단할 수 있다.

또한, 기존 연구에서 개발된 교통사고 예측모형의 종류는 선형모형 10개(단순 3, 다중 7), 비선형모형 6개, 가산모형(음이항) 3개로 조사되어 본 연구에서는 가장 많이 사용되었던 선형회귀모형을 중심으로 개발하고자 한다.

〈표 1〉 기존 교통사고예측모형의 주요 변수
(Table 1) Variables Used in Existing Accident Forecasting Models

	구분	횟수	비율(%)
종속변수	건	8	57
	건/km(건/mile)	2	14
	건/백만대	1	7
	건/백만대km	3	21
독립변수	교통량	8	25
	곡선반경	4	13
	구간길이	4	13
	편경사	3	9
	길어깨폭	2	6
	중단경사	1	3
	중차량비율	1	3
	차선수	1	3
기타	8	25	

2. 기존연구의 미비점 및 한계점

첫째, 기존 연구들은 대부분의 교통사고예측모형에서 고속도로 본선 및 유출입시설을 대상으로 개발되어져 왔으며 고속도로 터널에 대한 연구는 거

의 전무한 실정이다.

둘째, 호남고속도로, 중부내륙고속도로 등 일부 고속도로 노선만을 대상으로 설정하여 전국적인 대표성에 한계점이 있다고 판단된다.

셋째, 일반적으로 도로 및 기하조건, 교통조건 등 정량화가 가능한 설명변수를 교통사고영향요인으로 이용하였다. 반면 운전자 심리 및 생리적 조건 등의 인적영향요인들은 반영하지 못하고 있다.

넷째, 이주환(1997), 강민욱(2002)은 다중공선성, 잔차분석 등 개발된 모형에 대한 통계적 검증방법에 대한 내용이 없다. 이는 개발된 모형이 교통조건 및 도로조건과 교통사고간의 복합적인 상호관계를 설명하는데 무리가 있을 것이라 판단된다.

이와 같이, 기존연구에서 설명변수는 도로설계 및 계획시 모두 고려할 수 있는 교통사고영향인자를 적용하고 있다. 이는 정량적인 설명변수를 이용함으로써 도로설계시 교통사고분석을 수행함과 더불어 교통사고 감소효과를 분석할 수 있는 점을 고려한 것이라 할 수 있겠다. 하지만 대부분 고속도로 본선 및 유출입시설에 대해 연구되어져 왔다는 점, 일부 모형들은 모형적용에 있어 전국적인 대표성 결여, 개발된 모형에 대한 명확한 검증내용이 제시되지 않는다는 점 등의 한계점을 가지고 있다.

Ⅲ. 자료수집 및 기초분석

1. 자료수집

본 연구에서는 2004년부터 2009년까지 6년간의 고속도로 전 노선에 대하여 한국도로공사의 교통사고 발생 현황자료를 수집하였다[14]. 수집된 자료는 사고건수, 사고위치, 사고차종 등 고속도로 터널에서 발생한 교통사고에 대한 자세한 내용을 포함하고 있으며 교통사고자료는 고속도로 노선별 시점부터 100m 단위로 수집된 자료들이다. 또한 교통조건인 연평균일교통량(AADT: Annual Average Daily Traffic)과 도로조건인 터널연장, 종단구배, 평면선형, 터널높이 등을 포함하는 터널 기하구조 자료들이 포함되어 있다[15]. 이 중 터널구간에서는 총

367건의 교통사고가 발생하였으나 본 연구에서는 해당터널구간의 교통량 수집가능여부, 기하구조 수집여부 등을 거쳐 총 170건 터널구간의 교통사고를 대상으로 분석을 수행하였다.

터널구간 교통사고 발생은 고속도로에서 최초사고발생지점이 터널이며, 터널주변부(입구부 및 출구부)와 터널구간내에서 운전자의 과실(졸음, 핸들과대조작, 주시태만 등), 차량결함 등으로 인해 발생한 모든 유형의 교통사고를 고속도로 터널구간의 교통사고로 정의하여 분석을 수행하였다.

〈표 2〉 수집자료 내용
〈Table 2〉 Data Inventory Collected

구분	수집내용
교통조건	교통량(AADT)
도로 및 환경조건	종단구배, 평면선형, 터널연장, 이경, 터널폭원, 날씨, 주야간, 계절 등
사고현황	사고건수, 사고위치, 사고일시, 처리방법 등

2. 터널 교통사고 특성

터널구간 사고원인은 2009년 기준으로 운전자 과실이 약 80%이상으로 가장 높았으며, 이 중 졸음이 29.7%, 주시태만 15.6%로 나타났다.

또한, 본선구간과 비교분석한 결과, 터널구간이 운전자과실의 안전거리미확보와 차량결함 항목에서 본선구간에 비해 발생빈도순위가 높다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 현재 수집한 자료항목과 사고원인항목과의 상관관계를 비교해본 결과, 터널연장은 졸음과 주시태만, 종단구배와 평면선형은 과속, 교통량은 졸음과 주시태만 그리고 과속과 관련 있다고 판단되어진다. 이와 관련한 기존연구로 O'Hanlon과 Kelly(1977)는 주행시간이 길수록 졸음운전 유발할 가능성이 있다는 것을 규명하였다[16]. 따라서, 고속도로에서 장시간 운전행위는 정신적·신체적 피로감을 야기하게 되고 상대적으로 변화가 적은 환경요소들을 가진 터널은 졸음, 주시태만 등 운전부주의로 인한 사고발생확률과 관련이 있다고 판단된다. 하지만 이러한 사고원인항목들은 정량화가 어려운 인적요인

이 대부분임에 따라 본 연구에서 교통사고예측모형의 변수로 사용하는 데는 한계가 있었다.

〈표 3〉 사고원인별 사고건수
(Table 3) Number of Accidents by Accident Cause

구분	본선				터널			
	2008년		2009년		2008년		2009년	
	사고 (건)	비율 (%)	사고 (건)	비율 (%)	사고 (건)	비율 (%)	사고 (건)	비율 (%)
졸음	475	26.1	432	24.5	13	25.5	19	29.7
주시태만	213	11.7	210	11.9	3	5.9	10	15.6
안전거리미확보	55	3.0	70	3.9	3	5.9	5	7.8
과속	383	21.0	378	21.4	9	17.7	8	12.5
핸들과대조작	284	15.6	278	15.7	12	23.5	8	12.5
기타	144	7.9	119	6.7	1	1.9	1	1.6
차량결합	205	11.3	203	11.5	9	17.7	12	18.8
기타	63	3.5	76	4.3	1	1.9	1	1.6
계	1822	100	1766	100	51	100	64	100

자료 : 한국도로공사, 연차별교통사고정보, 2004-2009

터널구간의 사고유형은 2009년 기준으로 차대시설물 사고가 42.19%로 가장 높게 나타났다. 이는 터널구간의 시설물 안전관리 및 시설에 대한 신중한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 본선과 비교분석한 결과, 터널과 발생빈도순위에서 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

〈표 4〉 사고유형별 사고건수
(Table 4) Number of Accidents by Accident Type

구분	본선				터널			
	2008년		2009년		2008년		2009년	
	사고 (건)	비율 (%)	사고 (건)	비율 (%)	사고 (건)	비율 (%)	사고 (건)	비율 (%)
단독	235	12.90	269	15.23	10	19.61	10	15.63
충돌	26	1.43	21	1.19	1	1.96	0	0.00
추돌	329	18.06	314	17.78	6	11.76	19	29.69
접촉	11	0.60	12	0.68	0	0.00	1	1.56
차-시설	1106	60.7	1030	58.3	30	58.8	27	42.2
차-사람	52	2.85	25	1.42	0	0.00	0	0.00
화재	36	1.98	44	2.49	3	5.88	6	9.38
기타	27	1.48	51	2.89	1	1.96	1	1.56
계	1822	100	1766	100	51	100	64	100

자료 : 한국도로공사, 연차별교통사고정보, 2004-2009

사고유형별 사고처리시간은 터널, 본선 모두 피해 정도에 따라 다양하게 나타났고 특히 터널은 화재로 인한 사고건수가 다른 사고유형에 비해 적으나 사고처리시간은 가장 길게 나타났다.

〈표 5〉 사고유형에 따른 발생빈도 및 사고처리시간
(Table 5) Proportion of Occurrence and Clearance Time

구분	본선			터널		
	발생빈도		사고처리	발생빈도		사고처리
	건수 (건)	비율 (%)	시간 (시:분)	건수 (건)	비율 (%)	시간 (시:분)
단독	2094	17	0:41	66	18	0:49
추돌	2053	17	0:59	88	24	0:47
충돌	184	1	0:53	6	2	0:48
접촉	76	1	0:42	2	1	0:37
차-사람	225	2	0:47	0	0	-
차-시설	7150	58	0:41	171	47	0:44
화재	273	2	1:00	30	8	1:46
기타	227	2	0:45	4	1	0:16
계	12282	100	0:47	367	100	0:51

주: 2004년~2009년에 해당함

IV. 교통사고예측모형 개발 및 검증

1. 모형선정 및 분석과정

본 연구에서는 터널의 교통사고와 관련된 다양한 독립변수(도로 및 교통조건)들을 사용하여 교통사고 예측모형을 개발하는 것으로써 여러 독립변수를 사용하고자 다중회귀모형을 적용하였다. 그리고 모형개발에 앞서, 기술통계와 히스토그램분석을 통해 종속변수의 분포를 살펴보고, 종속변수를 이차, 삼차 등 차수함수, 지수함수, 로그함수 등으로 변환한 분포 중 표준정규분포와 가장 유사한 연결함수로 구성된 종속변수를 이용하여 가장 합리적인 모형을 개발하였다.

먼저, 회귀분석을 통한 교통사고예측모형을 개발하기 위해 앞서 선정된 교통사고영향인들과 종속변수의 기술통계로 요약통계량(최소, 최대, 평균, 표준편차 등)을 검토하였고 산점도를 통해 종속변수에 대한 설명변수들의 유의성 및 다중공선성 예상, 이상치 존재여부를 1차적으로 검토하였다. 그리고

회귀모형의 활용성 및 기존연구와의 차별성을 위해 기술통계 및 상관분석 결과를 토대로 군집화 여부를 판단하고 그에 따라 모형을 추정하였다. 그리고 추정된 회귀모형은 유의성 검증, 다중공성선 진단, 이상치 및 영향치 진단, 잔차분석 등을 통해 모형의 적용성과 신뢰성을 확보하였다.

2. 모형의 변수선정

교통사고는 교통조건, 도로 및 환경조건 등이 사고발생 원인이 될 수 있지만 대부분이 이러한 요인들 간의 복합적인 상호작용으로 발생하게 된다. 그러나 교통사고 발생시, 이러한 영향요인들과의 상호작용의 정도를 정확히 파악하고 계량화하기는 현실적으로 어렵다. 따라서 독립변수는 교통량, 종단경사, 곡선반경 등 계량화가 가능한 변수를 중심으로 영향요인을 선정하였다. 종속변수는 건, 건/km, 건/백만대km로 다양화하여 결과를 비교하였다.

〈표 6〉 터널구간 교통사고영향요인
(Table 6) Factors affecting Accident in Tunnels

구분	세부요소	
종속변수	건, 건/km, 건/백만대km	
독립변수	교통조건	연평균일교통량(AADT), 일교통량, 시간대 등
	도로 및 환경조건	종단구배, 평면선형, 측방여유폭, 터널연장, 터널높이, 주야간 등

대표적으로 터널연장의 최대값은 4.6km이고 최소값은 0.135km으로서 범위는 약 4.5km이었다. 평균은 0.98km이고 표준편차는 786.869이었다. 분포의 왜도는 2.095로서 비교적 꼬리가 긴 비대칭 분포이고 첨도는 5.421로서 표준정규분포에 비해 비교적 뾰족한 분포임을 알 수 있다.

또한 종속변수가 로그함수일 때 표준정규곡선과 가장 비슷한 분포를 이루는 것으로 분석됨에 따라 본 연구에서는 연결함수로 로그를 사용하는 로그선형모형을 개발하고자 한다.

일반적인 로그선형모형의 형태는 다음과 같다.

$$\log(u_i/(u_i+k)) = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_n X_{in} \quad (1)$$

〈표 7〉 기술통계표
(Table 7) Descriptive Statistics Data

구분	최소값	최대값	평균	표준편차
설계속도	80	120	109.76	10.488
종단구배	-3.00	5.00	.9299	1.57970
평면선형	0	8000	1157.15	1745.14
터널연장	135	4600	981.62	786.869
터널폭원	9.00	20.40	11.8637	2.28058
차도폭원	7.20	14.40	8.6800	2.23738
터널높이	6.33	10.00	7.3748	.77885
차로수	2	4	2.33	.604
측방여유폭	1.02	5.36	2.6976	.90633
AADT	3616	84355	25476.4	21957.774

이변량 상관분석결과, 차도폭원과 터널폭원 0.875, 터널높이와 터널폭원 0.742, 터널높이와 차도폭원 0.760, 차로수와 터널폭원 0.918, 차로수와 차도폭원 0.922, 차로수와 터널높이 0.750 등 4가지 변수들 간에 높은 양의 상관관계를 보였다. 그리고 유의확률은 모두 0.00으로서 독립변수간의 다중공성선이 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 <표 8>와 같이 총 8개의 독립변수들을 선정하였다.

〈표 8〉 교통사고예측모형 구성변수
(Table 8) Variables for Accident Forecasting Models

구분	변수	정의	변수 형태	비고	
사고	Y ₁	터널구간의 사고노출기준 건, 건/km, 건/백만대km	연속형	-	
교통 조건	X ₁	터널구간의 연평균일교통량(AADT:대/일)	연속형	-	
	X ₂	터널구간의 종단구배(%)	연속형	-	
	X ₃	터널구간의 평면선형	범주형	직선:0 곡선:1	
	X ₄	터널구간의 터널연장(km)	연속형	-	
	도로 및 환경 조건	X ₅	터널구간의 측방여유폭	범주형	2.5m미만:0 2.5m이상:1
		X ₆	터널구간의 터널높이(m)	연속형	-
		X ₇	터널구간의 설계속도	범주형	100kph:0 120kph:1
		X ₈	터널구간 사고발생시, 진출입 전/후 주야간상태	범주형	주간:0 야간:1

또한 모형의 활용성 및 효율적인 모형개발을 위해 군집화 가능여부를 분석하였다. 각 종속변수별 상관분석 결과를 토대로 유의확률을 만족하며 터널 특성을 반영할 수 있을 것으로 판단되는 터널연장과 설계속도를 군집화하고자 하는 대상변수로 설정하였다. 터널연장은 상관분석결과 유의확률을 만족하는 측방여유폭, 종단구배 항목별로 사고율(건/백만대)과 터널연장간의 산점도 분석결과를 이용하였다. 이에 따라 측방여유폭은 2.5m, 종단구배는 2%를 기준으로 각각 나누어 산점도 분석을 수행하였다. 분석결과, 측방여유폭 2.5m미만과 종단구배 2% 이상에서 사고율(건/백만대)이 터널연장 1km를 기준으로 차이를 보였다. 설계속도는 터널연장과 같이 자료의 성격이 연속형이 아니므로 어떤 특정 값을 기준으로 설정하는 것이 어렵다. 그러므로 설계속도는 현재 수집된 자료형태인 현행 고속도로 설계기준 100kph와 120kph를 기준으로 설정하였다.

본 연구에서 터널연장은 장대터널의 기준인 1km 이상과 1km미만, 설계속도는 100kph와 120kph로 각각 군집화하여 교통사고예측모형을 개발하였다. 또한, 독립변수의 추가와 제거를 적절히 조합하여 최적의 회귀모형을 도출하는 단계별 회귀방법을 이용하여 변수를 선택하였다.

터널연장의 경우, 종속변수가 건인 경우는 분석이 불가능하였으며, ln(건/km)와 ln(건/백만대km)의 R²는 모두 0.6이하로 분석되었다. 특히, ln(건/km)의 R²는 0.035로 도출됨에 따라 모형의 적합도가 가장 떨어졌다. 회귀계수 분석결과, ln(건/백만대km) 경우 1km미만은 1km이상과 달리 터널높이가 독립변수로 채택되었다. 이는 터널연장 1km미만인 경우, 운전자가 심리적·공간적 압박감으로 인해 교통사고에 영향을 받지만 1km이상인 경우 운전자가 터널환경에 적응하여 1km미만과 달리 교통사고 영향요인으로 터널높이가 채택되지 않는 것으로 판단된다.

설계속도의 경우, 종속변수가 건인 경우는 분석이 불가능하였으며, R²는 설계속도 120kph일 경우 ln(건/백만대km)가 0.712로 가장 높게 분석되었으며 그 외 다른 모형들은 0.6이하로 모형의 적합도가 떨어지는 것으로 분석되었다.

〈표 9〉 터널연장의 분석분석결과
〈Table 9〉 ANOVA Test for Tunnel Length

구분	1km미만			1km이상		
	R ²	F	유의확률	R ²	F	유의확률
건	분석 불가능					
ln(건/km)	0.035	4.058	0.046	0.440	28.271	0.000
ln(건/백만대km)	0.600	83.406	0.000	0.326	22.254	0.000

〈표 10〉 터널연장의 회귀계수 분석결과
〈Table 10〉 Regression Coefficients for Tunnel Length

구분	1km미만		1km이상		
	t	유의확률	t	유의확률	
건	분석 불가능				
ln(건/km)	상수	-14.943	0.000	-20.103	0.000
	종단구배	2.015	0.046	-	-
	AADT	-	-	5.317	0.000
ln(건/백만대km)	상수	-1.444	0.152	-19.844	0.000
	AADT	-12.845	0.000	-4.717	0.000
	터널높이	-2.221	0.028	-	-

〈표 11〉 설계속도의 분석분석결과
〈Table 11〉 ANOVA Test for Design Speed

구분	1km미만			1km이상		
	R ²	F	유의확률	R ²	F	유의확률
건	분석 불가능					
ln(건/km)	0.374	45.363	0.000	0.335	39.754	0.000
ln(건/백만대km)	0.583	53.908	0.000	0.712	94.103	0.000

〈표 12〉 설계속도의 회귀계수 분석결과
〈Table 12〉 Regression Coefficients for Design Speed

구분	1km미만		1km이상		
	t	유의확률	t	유의확률	
건	분석 불가능				
ln(건/km)	상수	-6.058	0.00	-5.816	0.00
	터널연장	-6.735	0.00	-6.305	0.00
ln(건/백만대km)	상수	-13.861	0.00	-12.786	0.00
	AADT	-9.277	0.00	-12.483	0.00
	터널연장	-6.259	0.00	-6.943	0.00

3. 교통사고예측모형 개발

다중선형 회귀분석을 통해 개발된 교통사고예측 모형은 총 8개로 <표 13>에 제시되어 있다.

터널연장으로 군집화된 모형은 연평균일교통량과 종단구배 그리고 터널높이를 독립변수로 채택되었으며, 설계속도로 군집화된 모형은 연평균일교통량(AADT)과 터널연장을 독립변수로 채택되었다.

모형 적합도는 터널연장에 의한 군집모형에서 1km미만일 때 ln(건/백만대km)와 설계속도에 의한 군집모형에서 120kph일 때 ln(건/백만대km)일 경우 각각 0.600, 0.712로 같은 성격의 군집모형들 중에서 가장 설명력이 높은 것으로 분석되었다.

<표 13> 교통사고예측모형 결과
<Table 13> Developed Accident Forecasting Models

구분		교통사고 예측모형	
터널연장	1km 이상	건	-
		ln(건/km)	$\ln(Y) = -0.923 + 0.064(X_2)$
		ln(건/백만대km)	$\ln(Y) = -0.786 - 3.059E-5(X_1) - 0.162(X_6)$
1km 미만	건	-	
		ln(건/km)	$\ln(Y) = -1.937 + 1.945E-5(X_1)$
		ln(건/백만대km)	$\ln(Y) = -2.874 - 2.308E-5(X_1)$
설계속도	100kph	건	-
		ln(건/km)	$\ln(Y) = -0.595 - 0.001(X_4)$
		ln(건/백만대km)	$\ln(Y) = -1.823 - 2.548E-5(X_1) - 0.001(X_4)$
120kph	건	-	
		ln(건/km)	$\ln(Y) = -0.545 - 0.001(X_4)$
		ln(건/백만대km)	$\ln(Y) = -1.593 - 3.216E-5(X_1) - 0.001(X_4)$

주 : Y=터널구간의 교통사고(건,ln(건/km),ln(건/백만대km))
 X₁=터널구간을 통과하는 연평균일교통량(AADT:대/일)
 X₂=터널구간의 종단구배(%)
 X₃=터널구간의 평면선형(직선:0, 곡선:1)
 X₄=터널구간의 터널연장(km)
 X₅=터널구간의 측방여유폭(2.5m미만:0, 2.5m이상:1)
 X₆=터널구간의 터널높이(m)
 X₇=터널구간의 설계속도(100kph:0, 120kph:1)
 X₈=터널 진출입 전후 주야간상태(주간:0, 야간:1)

특히, 터널연장으로 군집화된 모형은 터널연장이 1km미만 즉, 터널구간이 짧을 경우 운전자는 터널 주행과 동시에 터널높이가 낮을수록 심리적·공간적 압박감으로 인해 교통사고발생확률이 높아지

만 터널연장이 1km이상 즉 터널구간이 길어질수록 운전자는 터널구간 주위환경에 익숙해지면서 터널 높이에 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. 그리고 종속변수가 ln(건/백만대km)인 경우, 독립변수인 연평균일교통량의 계수부호가 음(-)으로 기존연구 결과와 동일하게 도출되는 것으로 분석되었다.

<표 14>는 터널연장이 1km미만과 ln(건/km)의 모형을 제외하고 개발된 모형들이 정규성을 따르는 것을 보여주고 있다.

<표 14> 군집별 K-S 및 S-W 검정통계량
<Table 14> Test Statistic of K-S and S-W by Group

구분		Kolmogorov-Smirnova	Shapiro-Wilk
터널연장	1km 미만	건	-
		ln(건/km)	0.005
		ln(건/백만대km)	0.200*
1km 이상	건	-	-
		ln(건/km)	0.059
		ln(건/백만대km)	0.200*
설계속도	1km 미만	건	-
		ln(건/km)	0.200*
		ln(건/백만대km)	0.711
100kph 이상	건	-	-
		ln(건/km)	0.200*
		ln(건/백만대km)	0.216

주 1 : 해당검정통계량은 유의확률임
 주 2 : *은 참인 유의확률의 하한값임

본 연구에서는 터널구간의 교통사고와 교통사고 영향요인과의 상관분석을 통해 터널연장과 설계속도별 교통사고예측모형을 개발하였다. 하지만 모형의 활용성과 신뢰성을 고려하여 해당군집별 하나의 모형을 선정하여 대표성을 부여하고자 한다.

선정방법은 모형의 R², F값 등 검정통계량 수준과 다중공선성, 잔차분석 등 모형검증 및 예측을 통한 신뢰성 확보여부, 터널만의 기하구조 성격과 교통사고특성 반영여부 등 종합적으로 검토하였다.

종합적으로 검토한 결과, 군집항목은 터널연장으로 선정하였으며 종속변수는 ln(건/백만대km)로 선정하였다. 이들 모형은 R²가 각각 0.440, 0.326이며 F값은 28.271, 22.254로 모형의 검정통계량 수준이

비교적 높지는 않지만 모형검증결과 신뢰성이 확보된 모형일 뿐만 아니라 모형예측결과에서 설계속도 모형보다 우수하였다. 또한 터널연장은 설계속도에 비해 터널성격을 대표적으로 보여줄 수 있는 군집항목이다.

〈표 15〉 교통사고예측모형 선정
(Table 15) Development of Accident Forecasting Models

구분		교통사고예측모형
터널연장	1km 미만	$\ln(Y) = -0.786 - 3.059E-5(X_1) - 0.162(X_6)$
	1km 이상	$\ln(Y) = -2.874 - 2.308E-5(X_1)$

주 : Y =터널구간의 교통사고(건/백만대km)
 X₁ =터널구간을 통과하는 연평균일교통량(AADT:대/일)
 X₆ =터널구간의 터널높이(m)

V. 결 론

본 연구는 전국 고속도로 터널구간을 대상으로 교통사고자료를 수집, 분석하여 교통사고 예측모형을 개발하였고 개발된 모형에 대한 통계적 검증을 수행하여 모형의 신뢰성 및 정확성을 높이고자 하였다.

교통사고 발생현황을 토대로 터널구간과 본선구간의 상호비교를 통한 사고원인별, 사고유형별 교통사고특성을 분석하였다.

교통사고예측모형은 터널구간 교통사고에 영향을 미치는 교통 및 도로조건 등 교통사고영향요인을 토대로 로그회귀분석을 수행하여 개발하였다.

교통사고예측모형의 독립변수는 연평균일교통량, 종단구배, 평면선형, 터널연장, 측방여유폭, 터널높이, 설계속도, 교통사고발생시 터널 진입전(진출후) 주야간 상태 총 8가지 변수를 선정하였다. 또한 모형의 종속변수는 건, ln(건/km), ln(건/백만대km)로 다양하게 적용하였으며 추정된 모형을 비교 검토하여 활용성과 신뢰성을 확보하는 가장 합리적인 모형을 최종 교통사고예측모형으로 선정하였다.

최종적으로 선정된 교통사고예측모형은 터널연장으로 군집화하여 추정된 모형이며, 종속변수가 ln(건/백만대km)로 결정되었다.

본 연구에서는 다년간 고속도로 터널구간의 교통사고자료를 이용하여 교통사고특성을 분석하고 통계적 유의성을 확보한 터널구간 교통사고예측모형을 개발하였다는 점에 큰 의의가 있다.

하지만 교통사고는 교통조건, 도로 및 환경조건, 운전자 조건 등 복합적인 상호작용으로 발생하는데 본 연구에서 개발한 모형은 자료수집의 어려움으로 인하여 운전자 행태 및 심리 등 운전자의 특성 고려에 대한 부분과 교통사고가 발생한 터널구간의 조명수준, 터널구간에 설치된 교통안전시설물의 영향 등을 반영하지 못하였고 교통사고 심각도에 따른 가중치를 고려하지 못한 한계를 가진다.

또한, 본 연구에서 개발한 다중선형회귀모형외에 비선형회귀모형, 가산자료모형 등 다양한 모형을 추정하여 다중선형회귀모형과 비교분석함으로써 좀 더 신뢰성있고 유의성이 높은 모형개발을 위한 노력이 향후에도 지속적으로 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 진교남, “고속도로 교통사고의 원인 및 특성규명과 안전대책에 관한 연구”, *대한교통학회지*, 제1권, 제1호, pp.120-130, September 1983.
- [2] 강정규, 임강원, “우리나라 고속도로의 기하구조특성과 교통사고율과의 상관관계에 관한 연구”, *대한교통학회지*, 제3권, 제1호, pp.3-21, June 1985.
- [3] 백승걸, 장현호, 강정규, “교통량과 통행길이를 고려한 고속도로 교통사고 예측 연구”, *대한교통학회지*, 제23권, 제2호, pp.95-105, April 2005.
- [4] 이주환, “우리나라 고속도로 교통사고 특성분석 및 모형개발”, *동국대학교 토목공학과 석사논문*, February 1997.
- [5] 강민욱, 도철웅, 손봉수, “고속도로 평면선형상 사고빈도분포 추정을 통한 음이향회귀모형 개발(기하구조요인을 중심으로)”, *대한교통학회지*, 제20권, 제7호, pp.197-204, December 2002.

- [6] 강정규, “고속도로 선형조건별 교통사고 위험도 평가모형 개발(호남고속도로를 중심으로)”, *대한교통학회지*, 제20권, 제4호, pp.163-175, August 2002.
- [7] 이수범, 김정현, 홍다희, 유창남, “도로등급 및 특성에 따른 교통사고예측모형개발”, *대한토목학회논문집*, 제23권, 제4호, pp.495-504, July 2003.
- [8] C. V. Zegeer, J. Hummer, D. Reinfurt, L. Herf and W. Hunter, “Safety Effects of Cross-section Design for Two-Lane Roads”, *Federal Highway Administration*, FHWA-RD-87-008, 1986.
- [9] 박효신, “고속도로 인터체인지 연결로에서의 교통사고 예측모형 개발”, *연세대학교 도시공학과 석사논문*, December 2006.
- [10] 김희경, “고속도로 분기점 형태별 교통사고 예측모형 개발에 관한 연구”, *한양대학교 SOC투자 및 개발학 전공 석사논문*, August 2009.
- [11] 하태준, 박찬모, 오재철, “고속도로 진출램프부근의 교통사고예측모형 개발에 관한 연구”, *대한토목학회 학술발표회*, November 2002.
- [12] 윤병조, “고속도로 트럼펫형 IC 연결로 유형별 교통사고 예측모형 개발”, *대한토목학회논문집*, 제27권, 제1호, pp.81-87, January 2007.
- [13] 노창균, 박중서, 손봉수, “고속도로 연결로의 교통사고 추정모형 연구”, *대한교통학회지*, 제26권, 제4호, pp.29-40, August 2008.
- [14] 한국도로공사, “*고속도로 교통사고 통계*”, 2004-2009.
- [15] 국토해양부, “*교량 및 터널현황 조사*”, pp. 1479-1522, August 2010.
- [16] J. F. O’ Hanlon and G. R. Kelly, “Comparison of performance and physiological changes between drivers who perform well and poorly during prolonged vehicular operation, In R. R. Mackie (Ed.)”, *Operational performance and physiological correlates*, pp.87-109, 1977.

저자소개



박 주 환 (Park, Ju-Hwan)

2012년 2월 ~ 현재 : 경기개발연구원 연구원
 2010년 3월 ~ 2012년 2월 : 전남대학교 일반대학원 교통물류학과 석사
 2003년 3월 ~ 2010년 2월 : 전남대학교 교통물류시스템공학부 교통공학전공 학사



김 상 구 (Kim, Sang-Gu)

2002년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 물류교통학전공 부교수
 1994년 9월 ~ 2002년 2월 : 한국도로공사 도로연구소 책임연구원
 1992년 2월 ~ 1994년 9월 : 서울대학교 공학연구소 연구원
 1992년 3월 ~ 1997년 2월 : 서울대학교 일반대학원 도시공학과 교통전공 박사
 1988년 3월 ~ 1992년 2월 : 서울대학교 일반대학원 도시공학과 교통전공 석사
 1984년 3월 ~ 1988년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 도시공학전공 학사