

고속도로 영업소 구간 안전성능함수 개발

이태현¹ · 광호찬² · 김동규³ · 고승영^{3*}

¹ 서울연구원 교통시스템연구실, ² 한국철도기술연구원 교통체계분석연구팀, ³ 서울대학교 건설환경공학부

Development of a Safety Performance Function for Expressway Tollgates

LEE, Taehun¹ · KWAK, Ho-Chan² · KIM, Dong-Kyu³ · KHO, Seung-Young^{3*}

¹ Department of Transportation Systems Research, The Seoul Institute, Seoul 137-071, Korea

² Transportation Systems Research Team, Korea Railroad Research Institute, Gyeonggi 437-757, Korea

³ Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

Abstract

Crashes that occur at tollgates have different characteristics compared to those of the mainline on expressways in terms of crash cause, crash type, and vehicle type. Due to this fact, the safety performance function (SPF) focused on the expressway tollgates, apart from the mainline, should be developed. The aim of this study is, therefore, to identify the influential factors and develop a SPF for crashes at tollgates. Firstly, we established independent variables affecting crashes at tollgates through literature review and descriptive statistical analysis. Based on these variables, two negative binomial regression models with different form of independent variables were developed and goodness-of-fits of each model were compared. According to the results, the number of crashes increases i) as AADT, Hi-pass rate, and heavy vehicle rate increase, ii) as average lane width decreases, iii) on the mainline tollgate type. The safety performance function developed in this study could be applied to select hot-spots for expressway tollgates.

고속도로 영업소에서 발생하는 교통사고는 사고발생 원인, 사고 유형, 사고 차종 측면에서 본선 구간 교통사고와 다른 특성을 보이므로, 본선 구간과는 별도로 고속도로 영업소에 초점을 맞춘 안전성능함수의 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 고속도로 영업소의 교통사고 발생건수에 유의한 영향을 미치는 요인들을 규명하고, 이를 기반으로 사고예측을 위한 안전성능함수를 개발하고자 한다. 기존 문헌 및 사고 특성 분석을 통해 고속도로 영업소에서 발생하는 사고에 영향을 미치는 설명변수들을 설정하였으며, 설명변수의 형태에 따라 사고 예측을 위한 두 개의 음이항 회귀모형을 구축하여 모형 간 설명력 비교를 통해 고속도로 영업소에 대한 최종 안전성능함수를 제시하였다. 모형 구축 결과 AADT, 하이패스차로비율, 중차량 혼입률이 증가할수록, 평균 차로폭이 감소할수록, 그리고 본선형 영업소 유형에서 사고 건수가 증가하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 제시된 안전성능함수는 고속도로 영업소 사고다발지점 선정을 위한 근거로 활용될 수 있을 것이다.

Keywords

crash factors, crash prediction, negative binomial regression analysis, safety performance function, tollgate
사고 요인, 사고 예측, 음이항 회귀분석, 안전성능함수, 영업소

* : Corresponding Author
sykho@snu.ac.kr, Phone: +82-02-880-1447, Fax: +82-02-873-2684

Received 20 August 2014, Accepted 8 December 2014

서론

1. 연구의 배경 및 목적

고속도로에서 발생하는 교통사고는 차량의 높은 주행 속도로 인해 사고심각도가 여타 도로에 비해 높고, 2차 사고로 인한 피해 역시 사회적으로 상당한 문제를 야기할 수 있다. 이에 따라 고속도로의 안전성을 증진시키기 위한 도로안전 개선사업이 이루어지고 있으나, 예산 제약으로 인해 보다 효율적인 사업 시행이 필요하다. Hauer(1995)는 안전성능함수(safety performance function)를 교통사고에 영향을 미칠 수 있는 도로의 기하구조, 교통류 특성, 그리고 기타 주변 환경 등을 독립 변수로 하여 해당 도로 구간의 단위 시간당 예측되는 사고 빈도를 추정하는 사고예측모형이라 정의하였다. 이는 도로안전 개선사업의 우선순위를 정하는 기준으로 사용될 수 있으며 교통사고에 영향을 미치는 요인에 대한 규명을 통해 도로안전 개선에 대한 방향을 제시할 수 있어, 교통안전 분야에서 다양한 연구가 진행 중이다.

고속도로의 안전성능함수 개발과 관련된 기존의 연구들은 대부분 고속도로 본선 구간에 초점을 맞추었다. 이러한 연구에서는 고속도로 본선 구간의 사고 발생에 영향을 미치는 요인들을 활용하여 고속도로 본선 구간의 사고건수를 예측하였다. 그러나 고속도로는 본선 구간 뿐 아니라 차량의 진출입이 이루어지는 램프 구간, 요금 징수가 이루어지는 영업소 구간 등 다양한 구간으로 이루어져 있으며, 이러한 본선 외 구간에서 발생하는 교통사고에 대한 연구는 상대적으로 많이 이루어지지 않았다. 특히 영업소 구간은 전체 고속도로 연장 대비 극히 짧은 구간임에도 불구하고, 영업소 교통사고 건수는 전체 고속도로 교통사고 중 9.7%(2007-2010년 기준)를 차지하여 상대적으로 많은 교통사고가 발생한다. 또한 본선 구간 대비 비교적 한정된 지점에서 반복적으로 교통사고가 발생하기 때문에 안전성 개선사업을 통한 기대 효과가 클 것으로 예상된다. 이와 더불어 사고 원인, 유형, 원인차종 등 사고의 특성 측면에서도 본선 구간과 차이를 보일 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 고속도로 영업소 구간에서 사고 발생에 영향을 미치는 요인을 규명하고, 이를 기반으로 사고 빈도를 예측하기 위한 안전성능함수를 개발하고자 한다.

2. 연구의 내용

본 연구에서는 고속도로 영업소 구간의 안전성능함수 구축을 위해 영업소 구간의 사고특성 규명, 설명변수 설정, 모형 구축 및 비교·분석 등을 실시한다.

II장에서는 고속도로 영업소 구간의 안전과 관련된 기존 연구들을 검토하고 기존 연구와 대비되는 본 연구의 차별성을 제시한다.

III장에서는 본 연구에서 사용되는 분석 자료에 대한 설명 및 기초통계 분석결과를 제시한다. 또한 기존 연구 및 본 연구에서의 분석결과를 바탕으로 영업소 구간에서 발생하는 교통사고에 영향을 미칠 수 있는 요인에 대한 후보 변수들을 설정한다.

IV장에서는 본 연구에서 구축된 고속도로 영업소 구간에 대한 안전성능함수 결과를 제시한다. 본 연구에서는 설명변수의 적용 형태에 따라 서로 다른 두 가지 모형을 개발하였으며, 각 모형의 설명력 비교를 통해 고속도로 영업소 구간에 대한 최적의 안전성능함수를 제시한다.

V장에서는 본 연구의 결론을 요약하고 향후 연구에 대해 기술하였다.

기존 연구 고찰

전통적인 고속도로 안전성능함수들은 대부분 본선 구간을 중심으로 개발되었으며, 안전성능함수의 정확도 개선을 위해 다양한 독립변수들을 이용하였다. Mun et al.(2012)은 교통류 특성을 나타내는 교통량, 버스 및 트럭 비율 등의 변수와 IC/JCT 구간 내 유출입 연결로 수, 곡선구간 수와 같은 기하구조 요인들을 설명변수로 설정한 사고예측모형을 개발하였다. Park(2014)의 연구에서는 고속도로 기하구조가 교통사고에 미치는 영향을 분석하기 위해, 기존의 통합된 형태의 기하구조 자료를 이용하는 방식이 아닌 기하구조별 세부변수를 설정하여 모형의 설명력을 개선하였다.

고속도로 영업소의 경우, 영업소에서 발생하는 교통사고에 영향을 미치는 일부 요인들에 대한 연구와 하이패스 차로 설계기준에 관한 연구가 수행된 바 있다. Yoo et al.(2010)은 고속도로 본선형 영업소에서 하이패스 차량과 일반차량 간 상대속도에 의한 사고 위험성을 정량적으로 비교 분석하였다. 분석 결과, 차량 간 높은 상대속도차로 인해 하이패스차량과 일반차량 간 합류가 하

이패스차량 간 합류보다 사고위험이 더 높음을 밝혔다. Oh et al.(1999)은 고속도로 시설물 구간의 교통혼잡도(V/C)와 사고율의 관계를 분석하였다. 분석 결과, 영업소 구간의 사고율이 V/C 전 범위에 걸쳐 본선구간, 터널구간보다 상대적으로 높게 나타났으며, V/C가 0.57일 때 영업소 구간의 사고율이 가장 낮은 것으로 분석되었다.

또한 고속도로 영업소 중 하이패스차로의 사고 감소를 위한 적정 설계 기준을 제시한 연구들도 존재하였다. Choi and Choi(2007)는 고속도로 본선형 영업소의 교통사고 감소를 위한 적정 하이패스 구간 길이 산정공식을 제시하였다. 이 연구에서는 하이패스차량 운전자의 부주의로 인한 사고 예방을 위해 설치되어야 하는 적정 노면 갈매기 표시 구간 길이를 제시하였다. Lee et al. (2013)은 영업소를 크게 본선형과 IC형으로 구분하고 영업소 주변 기하구조에 따라 세부 유형을 분류하여 상충분석을 통한 하이패스 차로배치 기준을 정립하였다.

이와 같이 고속도로 영업소 구간의 안전성 개선을 위한 기존 연구들이 존재하긴 하나, 교통류 특성과 관련된 일부 요인들에 의한 안전도 평가 및 하이패스 차로 설계 기준에 대한 연구가 주를 이루고 있기 때문에 고속도로 영업소 구간의 사고 빈도수 예측을 위한 본 연구와는 그 목적이 다르다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 영업소 구간의 사고 발생에 영향을 미치는 보다 다양한 요인들을 고려하여 사고 요인과 사고 빈도수간의 정량적 관계를 파악하기 위한 안전성능함수를 개발하고자 한다.

분석 자료 설정

1. 분석 자료의 개요

본 연구에서는 안전성능함수 구축을 위해 한국도로공사에서 운영하는 고속도로 노선에 대한 교통사고 자료, 시설물 자료, 영업소 교통량 자료를 분석 자료로 이용하였다. 분석의 시간적 범위는 모든 심각도(A-D급)의 사고에 대해 기록이 이루어진 2007년부터 2010년 간 4년으로 설정하여 통일성 있는 자료를 구축하였다. 공간적 범위는 국내 고속도로 6개 노선(경부선, 영동선, 서해안선, 중부내륙선, 호남선, 남해선)의 영업소 중 분석 기간 내 영업이 이루어진 영업소들로 한정하였으며, 이들 중 교통량 및 시설물 정보의 구득이 불가능한 영업소는 분석 대상에서 제외하였다. 그 결과 6개 노선의 150개 영

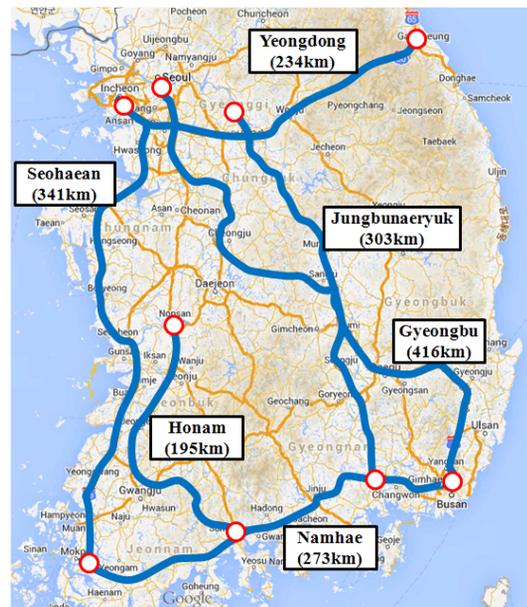


Figure 1. Scope of study (6 Lines of Korean Expressways)

Table 1. Summary of data

Content	Detail
Study Period	2007-2010 (4 Years)
Study Area	6 Expressway Lines (Gyeongbu, Yeongdong, Seohaean, Jungbunaeryuk, Honam, Namhae)
Number of Tollgates	150
Total Crashes for 4 Years	2,000

Table 2. Statistics of tollgate crashes on each line

Line	Number of Tollgates	AADT per Tollgate	Tollgate Crashes	Average Crashes per Tollgate
Gyeongbu	35	34,102	151.5	4.3
Yeongdong	22	24,818	83.3	3.8
Namhae	25	16,128	102.5	4.1
Seohaean	27	16,113	96.0	3.6
Honam	20	9,511	41.3	2.1
Jungbunaeryuk	21	5,897	25.5	1.2

note: Figures indicate averages on research period.

업소를 대상으로 4년 간 집계된 2,000건의 영업소 사고 자료가 본 연구의 분석 자료로 선정되었다.

Table 2는 분석기간 4년 동안의 노선별 연평균 영업소의 통과교통량 및 사고 통계량을 나타낸다. 영업소 당 평균 AADT는 경부선(34,102대/일), 영동선(24,818

대/일), 남해선(16,128대/일) 순으로 높게 나타났으며, 영업소 당 연평균 사고건수는 경부선(4.3건), 남해선(4.1건), 영동선(3.8건) 순으로 높게 나타났다. 이상의 분석 결과를 기반으로, 영업소 및 본선 구간의 사고 자료 비교를 통해 영업소 사고 특성을 규명하도록 한다.

2. 영업소 구간 사고 특성

영업소 사고 특성을 규명하기 위한 기초통계분석에는 동일 기간, 동일 노선을 대상으로 집계된 18,210건의 본선 구간 사고 자료를 대조군으로 이용하였다. 사고 유형, 사고 원인, 사고 원인 차종, 영업소 유형별 특성에 대해 기초통계분석을 진행하였으며, 본 분석 결과와 기존 연구 검토를 후보 변수 설정의 근거로 이용하였다.

Table 3과 같이 영업소와 본선 구간의 사고 유형을 분석한 결과, 차-시설의 사고 비율(77.6%)이 본선 구간(47.5%) 대비 1.5배 이상 높게 나타났다. 반면 영업소 구간의 차량 단독 사고 비율(11.1%), 차-차 사고 비율(7.3%), 기타 비율(4.0%)은 본선 구간 대비 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

영업소와 본선 구간의 사고 원인 분석 결과, 영업소 사고 중 주시태만으로 인한 사고의 비율(31.5%)이 본선 구간(11.4%) 대비 약 3배 가까이 높은 것으로 나타났다(Table 4). 이러한 분석 결과들은 운전자의 부주의

와 실수를 유발할 수 있는 영업소 시설물들의 구조적 특성들로 인한 것으로 판단되며, 시설물 개량을 통한 영업소 사고 감소 효과가 높을 것으로 예상된다.

영업소와 본선 구간의 사고 원인 차종의 구성비를 분석한 결과, Table 5와 같이 본선 구간 사고 중 화물, 트레일러 및 특수차량의 비율은 26.7%인데 반해, 고속도로 영업소의 경우는 50.9%로 상대적으로 높게 나타났다. 반면 승용차 사고의 비율은 영업소에서 34.8%, 본선 구간에서 64.5%로 나타나, 영업소 구간에서 중차량들이 사고 발생에 취약한 것으로 나타났다. 이는 중차량이 상대적으로 차체가 크기 때문에 영업소 부스 통과 시 시설물과의 충돌에 취약한 것으로 판단된다.

Table 6은 영업소 유형에 따른 통계치를 보여준다. 영업소 당 평균 부스 수는 본선형이 20.7개, IC형이 7.1개로 분석되었으며, 영업소 당 평균 AADT는 본선형 영업소에서 85,934(대/일), IC형 영업소에서 14,470(대/일)으로 나타났다. 영업소 당 평균 사고건수도 본선형 영업소에서 16.6건, IC형 영업소에서 2.4건으로 분석되어, 본선형 영업소가 IC형 영업소에 비해 많은 부스수와 높은 AADT를 가지며 사고 건수 역시 많은 것으로 나타났다. 또한 영업소의 백만 대 당 사고건수 평균을 비교한 결과 본선형이 243.5건, IC형이 216.3건으로 분석되어, 단위 교통량 당 사고 발생 건수가 IC형보다 본선형 영업소에서 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

Table 3. Number of crashes for each crash type

Crash Type	Tollgate		Mainline	
	Number of Crashes	Rate(%)	Number of Crashes	Rate(%)
Total	2,000	100.0	18,210	100.0
Vehicle-Facility	1,552	77.6	8,642	47.5
Vehicle Only	222	11.1	3,470	19.0
Vehicle-Vehicle	146	7.3	3,662	20.1
Others	80	4.0	2,436	13.4

Table 4. Crash cause on tollgate and mainline

Crash Cause	Tollgate		Mainline	
	Number of Crashes	Rate(%)	Number of Crashes	Rate(%)
Total	2,000	100.0	18,210	100.0
Negligence	630	31.5	2,079	11.4
Speeding	135	6.8	3,529	19.4
Obstacles	31	1.5	2,962	16.3
Drowsy Driving	89	4.5	2,932	16.1
Overhanding	204	10.2	2,661	14.6
Others	911	45.5	4,047	22.2

Table 5. Number of crashes for each vehicle type

Vehicle Type	Tollgate		Mainline	
	Number of Crashes	Rate(%)	Number of Crashes	Rate(%)
Total	2,000	100.0	18,210	100.0
Compact Car	695	34.8	11,750	64.5
Van	263	13.1	1,442	7.9
Truck, Trailer, and Special Vehicle	1,018	50.9	4,856	26.7
Others	6	0.3	36	0.2
Blank	18	0.9	126	0.7

Table 6. Characteristics of each tollgate type

Characteristic	Mainline-Type Tollgate	IC-Type Tollgate
Number of Booths per Tollgate	20.7	7.1
AADT per Tollgate	85,934	14,470
Crashes per Tollgate	16.6	2.4
Crashes per AADT per Tollgate (Crashes/Million Veh.)	243.5	216.3

Table 7. Results of correlation analysis

	AADT	Number of Booth	Hi-Pass Rate(%)	Avg. Lane Width(m)	Heavy Vehicle Rate(%)	Tollgate Type (Dummy)
AADT	1.0000	-	-	-	-	-
Number of Booth	0.9241**	1.0000	-	-	-	-
Hi-Pass Rate(%)	-0.2059**	-0.3506**	1.0000	-	-	-
Avg. Lane Width(m)	-0.2711**	-0.3077**	0.2105**	1.0000	-	-
Heavy Vehicle Rate(%)	-0.1180**	-0.0649	-0.0596	0.0646	1.0000	-
Tollgate Type(Dummy)	0.6266**	0.6741**	-0.0526	-0.0990*	-0.0420	1.0000

* : p < 0.1

** : p < 0.05

3. 독립변수 설정

본 연구에서는 선행 연구 검토와 고속도로 사고 자료의 통계분석 결과를 기반으로, 안전성능함수 구축을 위한 후보 변수들을 선정하였다. 그 결과, 고속도로 각 영업소의 연도별 사고 건수를 종속변수로, 영업소 연평균 일교통량(AADT), 하이패스차로비율(%), 평균 차로 폭, 중차량 혼입률(%), 부스 수, 요금소 유형(본선형/IC형)을 후보 독립변수로 선정하였다.

각 영업소별 AADT(연평균일교통량)는 요금소 안전성능함수의 노출변수(exposure variable)로 설정되었으며, 다른 독립변수들보다 사고 건수와도 상대적으로 높은 상관관계를 보였다. AADT는 고속도로 교통량 자료를 통해 추출된 요금소의 연도별 통과교통량을 일일 교통량으로 환산한 값을 이용하였다.

하이패스차량의 경우, 앞선 기존 연구의 결과와 같이 일반차량과의 높은 상대속도차로 인해 합류 과정에서 사고 위험도가 높다. 또한 하이패스차로는 일반적으로 타 차로에 비해 차량의 통과속도가 높아 불안정하게 부스를 통과하기 때문에 상대적으로 사고 발생에 취약하다. Ding and Xiang (2004)의 연구에 따르면, 하이패스차로의 이용은 높은 사고 건수, 사고율뿐만 아니라 사고의 심각도에도 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 이에 본 연구에서는 전체 부스 중 하이패스 차로가 차지하는 비율(하이패스차로수/전체차로수×100(%))을 모형의 독립변수로 설정하였다.

앞선 기초통계분석 결과, 본선 구간 대비 영업소 구간에서의 차대시설 사고 비율이 높음을 밝혔다. 이러한 사고들은 대부분 틀게이트 부스를 통과하는 과정에서 부주의 또는 핸들 과대조작 등으로 인한 사고들이다. 따라서

본 연구에서는 이러한 유형의 사고 발생이 부스의 폭과도 상관관계를 가질 것으로 판단하여 개별 영업소의 평균 차로 폭을 독립변수로 설정하였다.

앞서 영업소 사고 원인 차량의 구성비 분석 결과, 본선 구간 대비 영업소 구간에서의 화물, 트레일러, 특수차량의 사고 비율이 높음을 밝혔다. Ding and Xiang (2004)의 연구에 따르면, 대형트럭의 경우 영업소 상류부에서 사고위험성이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다. 이에 본 연구에서는 한국도로공사의 고속도로 운행차종 구분에 따라 영업소의 통과교통량 중 승용차를 제외한 2-6종을 중차량으로 구분하였으며, 전체 통과교통량 중 중차량 혼입률(중차량교통량/전체교통량×100(%))이 높은 영업소일수록 발생사고 건수가 많을 것으로 판단하고 이를 독립변수로 설정하였다.

일반적으로 고속도로 영업소의 부스 수는 통과 교통량과 밀접한 상관관계를 가지며, 따라서 사고 건수와도 높은 상관관계를 갖는다. 또한 영업소 부스 수의 증가는 상류부에서 접근하는 차량 운전자의 혼란을 가중시켜 사고 발생에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 부스 수를 고속도로 영업소 안전성능함수의 독립변수로 설정하였다. 그러나 교통량과 부스 수는 높은 상관성이 존재할 것으로 예상되므로 변수 간 다중공선성을 검토할 필요가 있다.

Sze et al.(2008)의 연구에 따르면, 본선형 영업소는 교통 및 구조적 특성들로 인해 IC형 영업소보다 사고의 위험성이 높다. Lee et al.(2013)의 연구에서도, 본선형 영업소는 본선 구간에 설치되기 때문에 차량들의 접근속도가 높고 많은 교통량 처리를 위해 상류부의 차로 수보다 많은 수의 부스가 설치되는 것이 일반적이라 언급하고 있다. 이러한 특성은 운전자들로 하여금 차로

Table 8. Independent variables for model

Independent Variable	Details
AADT(veh/day)	$\frac{\text{Yearly Traffic on Tollgate}}{365}$
Hi-Pass Rate(%)	$\frac{\text{Number of Hi-Pass Lanes}}{\text{Total Number of Lanes}} \times 100(\%)$
Avg. Lane Width(m)	$\frac{\sum (\text{Lane Width})}{\text{Number of Lanes}}$
Heavy Vehicle Rate(%)	$\frac{\text{Heavy Traffic Volume}}{\text{Total Traffic Volume}} \times 100(\%)$
Tollgate Type (Dummy)	<i>Mainline Type</i> = 1, <i>IC Type</i> = 0

변경과 혼란을 가중시키며, 결과적으로 본선형 영업소의 사고율을 증가시킨다. 이와 같은 영업소 유형별 특성은 앞서 제시된 통계분석 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 기존 연구 결과 및 통계 분석 결과를 기반으로, 본 연구에서는 영업소 유형을 본선형과 IC형으로 구분되는 더미 변수(본선형=1, IC형=0)로 설정하였다.

본 연구에서는 피어슨 상관분석을 통해 독립변수 간 상관성을 확인하여 통계적으로 유의한 사고 요인들을 모형의 독립변수로 결정하였다. 피어슨 상관분석 결과, AADT와 버스 수 간 상관성이 0.9241로 가장 높게 나타났다. Hayes(2005)의 연구에 따르면, 변수 간 상관성이 0.7이상인 경우 강한 상관관계가 존재함을 의미한다. 이에 따라, 변수 간 다중공선성으로 인한 모형 추정 오류를 방지하기 위해 버스 수를 제외한 AADT, 하이패스차로비율(%), 평균차로폭(m), 중차량혼입률(%), 영업소 유형 더미(본선형/IC형)를 설명변수로 설정하였다.

분석 결과

1. 모형 구축

안전성능함수의 개발을 위해서는 사고 자료의 특성을 고려한 모형의 형태 결정이 우선적으로 이루어져야 한다. 고속도로에서 발생하는 교통사고는 충돌과 비 충돌로 구분되는 하나의 사건으로서 베르누이 시행으로 볼 수 있다. 또한 교통사고는 매우 드물게 일어나는 사건으로, 사고건수의 분포는 비 충돌에 비해 충돌의 확률을 현저히 낮게 가정하는 포아송 분포에 근사한다.

Miaou et al.(1994)은 고속도로 교통사고 관련 자

Table 9. Independent variables of each model

Model	Independent Variables
Model 1	AADT, Hi-Pass Rate, Avg. Lane Width, Heavy Veh Rate, Tollgate Type
Model 2	ln(AADT), ln(Hi-Pass Rate), Avg. Lane Width, Heavy Veh Rate, Tollgate Type

료는 1) 인적요인을 포함한 많은 영향 요인들에 대한 자료 구득의 어려움, 2) AADT 혹은 트럭 비율 등과 같이 주로 표본 추출을 통해 집계되는 자료들의 표집오차, 3) 자료 구득 기간 동안의 조사 지점의 도로환경 및 교통조건 변화로 인한 변동 등과 같은 원인으로 인해 사고 자료가 과분산성을 띄게 된다고 밝혔다.

Fox(1997)의 연구에 따르면 집계된 가산 자료의 경우 분산이 평균보다 빠르게 증가하는 과분산성을 보이고, 이로 인해 포아송 분포의 적용이 부적합하다. 따라서 과분산된 가산 자료를 다루기 위해서는 최대우도법 기반의 음이항 모형을 이용하는 것이 적합하다. 이와 같은 이론적 기반을 토대로 본 연구에서는 음이항 회귀분석을 이용한 고속도로 영업소 안전성능함수를 구축하였다.

본 연구에서는 설명변수의 형태에 따라 구별되는 두 모형을 구축하고, 각 모형의 설명력 비교를 통해 고속도로 영업소 사고 예측을 위한 최종 모형을 제시한다.

Brimley et al.(2012)의 연구에서는 독립변수들과 사고건수와의 관계를 보다 잘 설명하기 위한 방법으로 로그 변환된 변수를 이용하여 모형을 구축하였으며, 그 결과 모형의 설명력 및 파라미터의 통계적 유의성이 개선된 것으로 분석되었다. 이에 따라 본 연구에서도 로그 변환하지 않은 모형(모형1)과 AADT와 하이패스차로비율만을 로그 변환한 모형(모형2)으로 구분하여 모형을 구축하였다. 다른 변수들의 경우 로그 변환 시 직관에 모순되는 부호가 도출되거나 통계적 유의성을 확보하지 않아 비교 모형 군에서 제외하였다. 본 연구에서 구축한 모형들의 기본 형태는 식(1)과 같다.

• Model Form

$$Y = e^{(\alpha + \beta_1 \text{var}_1 + \beta_2 \text{var}_2 + \beta_3 \text{var}_3 + \dots)} \quad (1)$$

where,

Y : Expected Number of Crashes

α : Constant

β_i : Regression Coefficients of Parameter

var_i : Independent Variables

2. 모형 구축 결과

모형 구축 결과, 모형 1의 추정된 모든 파라미터는 신뢰수준 95%에서 통계적으로 유의한 것으로 분석되었고, 모형 2의 경우 하이패스차로비율(%)은 신뢰수준 90%에서, 나머지 모든 변수들은 신뢰수준 95%에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

모형 1, 2의 파라미터 추정 결과에 따르면, AADT는 영업소 사고 건수와 양(+)의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 이는 AADT, 즉 노출빈도가 높은 영업소에서 사고 건수 역시 높게 나타남을 의미한다.

하이패스차로비율의 파라미터는 모형 1에서 부호가 음(-)인 것으로 분석되었으나, 모형 2에서는 부호가 양(+)으로 나타났다. 앞서 검토된 Ding and Xiang (2004)의 연구 결과 중 하이패스차로의 이용은 사고 건수, 사고율, 심각도 등을 증가시킨다는 분석 결과를 기반으로 판단할 때, 양(+)의 부호를 갖는 모형 2가 올바르게 추정된 결과로 볼 수 있다.

평균 차로폭은 사고 건수와 음(-)의 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다. 이는 평균 차로폭이 넓을수록 영업소 구간을 지나는 차량들의 사고 위험도가 낮아지고, 평균 차로폭이 좁을수록 사고 위험도가 증가하는 것으로 해석될 수 있다.

중차량 혼입률 역시 비율이 늘어남에 따라 사고건수가 증가하는 것으로 분석되었으며, 이는 앞서 제시된 기초통계분석 결과와 부합하는 결과이다. 즉, 통과 교통량 중 중차량 혼입률이 높은 영업소일수록 사고 발생에 취약한 것으로 해석될 수 있다.

영업소 유형의 경우, 본선형 영업소가 IC형 영업소보다 높은 사고건수를 야기하는 것으로 나타났다. 이는 앞

선 기초통계분석과 기존 연구 검토 사항과 부합하는 결과로, 본선형 영업소일수록 IC형 영업소 대비 사고 위험도가 높은 것으로 해석이 가능하다.

본 연구에서는 모형의 설명력 비교를 위해 McFadden's Pseudo R²를 이용하였다. McFadden (1976)의 연구에 따르면, 일반 회귀분석에서의 R²와 같이 최대우도법을 통해 구축된 모형에서는 McFadden's Pseudo R²를 이용하여 모형의 설명력을 비교할 수 있으며, 식(2)를 통해 계산이 가능하다.

• McFadden's Pseudo R²

$$\rho^2 = 1 - \frac{L}{L_0} \quad (2)$$

where,

ρ^2 : Pseudo R²

L : Log-Likelihood considering Variables

L_0 : Log-Likelihood not considering Variables

Pseudo R²는 0과 1 사이의 값을 가지며, 높은 값을 가질수록 모형의 설명력이 높음을 의미한다. 위 식에서 L 은 모형의 독립변수들을 고려했을 때의 로그우도함수(log-likelihood function) 값이고, L_0 는 모든 독립변수들이 0일 때의 로그우도함수 값을 의미한다.

모형의 설명력 비교를 위해 각 모형의 Pseudo R²를 비교한 결과, 모형 1이 0.1199, 모형 2가 0.1693인 것으로 나타나 모형 2가 상대적으로 종속변수에 대한 설명력이 높은 것으로 분석되었다.

이상으로 본 연구에서는 파라미터 추정 결과 및 Pseudo R²를 이용한 두 모형의 설명력 비교·분석을 통

Table 10. Model estimation results

Independent Variable	Model 1			Independent Variable	Model 2		
	Coefficient	Standard Error	p-value		Coefficient	Standard Error	p-value
Constant	6.828258	1.136668	0.000	Constant	-3.663326	1.294623	0.005
AADT	0.000017	0.000002	0.000	ln(AADT)	0.706036	0.044457	0.000
Hi-Pass Rate	-0.008028	0.002741	0.003	ln(Hi-Pass Rate)	0.058967	0.030984	0.057
Avg. Lane Width	-2.021571	0.345259	0.000	Avg. Lane Width	-0.819352	0.325054	0.012
Heavy Vehicle Rate	0.026120	0.008027	0.001	Heavy Vehicle Rate	0.020817	0.007137	0.004
Tollgate Type	0.820989	0.164524	0.000	Tollgate Type	0.624829	0.133400	0.000
McFadden's Pseudo R ²		0.1199		McFadden's Pseudo R ²		0.1693	

해 모형 2가 모형 1보다 모형의 설명력 및 계수 추정 결과의 측면에서 우수하다는 분석 결과를 얻었다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 모형 2를 국내 고속도로 영업소 안전성능함수에 가장 적합한 최종 모형으로 제시한다.

결론 및 향후 연구

본 연구에서는 고속도로 영업소 안전성 개선사업 시 사고다발지점 선정의 근거로 이용될 수 있는 사고 건수의 예측을 위해, 국내 고속도로 6개 노선의 영업소 150소를 대상으로 2007-2010년까지 4년 동안 구득된 2,000건의 사고 자료들을 이용하여 안전성능함수를 개발하였다.

기존 연구 및 기초통계분석 결과를 기반으로 독립변수 형태에 따라 구분되는 두 모형을 구축하였으며, 모형간 설명력 및 파라미터 추정 결과 비교를 통해 영업소 안전성능함수에 적합한 최종 모형을 제시하였다.

모형 구축 결과 영업소의 AADT, 하이패스차로비율, 중차량 혼입률이 증가함에 따라 사고건수 역시 증가하는 것으로 나타났으며, 평균 차로폭은 좁아질수록 사고건수가 증가하는 것으로 나타났다. 영업소 유형의 경우, 본선형 영업소의 사고건수가 IC형 영업소보다 상대적으로 높은 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제시된 고속도로 영업소 안전성능함수는 고속도로 안전성 개선사업 시 사고다발지점 선정의 근거로서 이용될 수 있다. 또한 영업소의 시설물 정보 및 TCS 교통량 자료를 통해 쉽게 구득 가능한 변수들을 이용하여 구축되었다는 점에서 향후 안전성 개선을 위한 기존 영업소의 보수와 새로운 영업소 설치 시 모형의 활용도가 높을 것으로 예상된다.

본 연구의 분석 결과를 바탕으로 교통량이 많은 본선형 영업소의 경우 주시태만으로 인한 사고 예방을 위해 시선유도봉 및 노면 표시, 적정 차로변경 구간 길이 확보 등의 안전 개선 대책을 수립할 수 있을 것이다. 하이패스 차로의 비율이 높은 영업소의 경우, 높은 통과속도로 인한 사고 발생이 빈번한 점을 감안하여 과속단속카메라 또는 럼블스트립과 같은 감속 유도를 위한 안전시설물들의 설치를 고려할 수 있다. 또한 영업소 주변 지역의 특성으로 인해 중차량 비율이 지속적으로 높은 영업소의 경우, 중차량 전용 차로의 운영 및 차로폭 확장 등을 통해 안전성 개선을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

전술하였듯이 고속도로 영업소의 안전성 개선을 위해

다양한 안전시설물들이 이용될 수 있다. 안전시설물의 사고 저감 효과는 본 연구에서 고려된 사고 요인 외에도 개별 영업소의 교통류 특성, 기하구조 특성 등 다양한 요인들에 따라 달라질 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 본 연구에서 자료 구득의 한계로 고려하지 못한 사고 발생 요인들과 고속도로 안전시설물의 영향력을 반영한 안전성능함수의 개발을 통해 고속도로 영업소 안전시설물의 안전성 개선 효과를 정량적으로 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Integrated Research Institute of Construction and Environmental Engineering at Seoul National University and the Korea Expressway Corporation.

REFERENCES

- Brimley B. K., Saito M., Schultz G. G. (2012), Calibration of Highway Safety Manual Safety Performance Function, *Transp. Res. Rec.*, 2279, Transportation Research Board, 82-89.
- Choi Y. H., Choi K. C. (2007), A Study on the Proper Distance of Tubular Markers for Hi-Pass, *J. Korea Institute Intell. Transp. Syst.*, 6(3), Korea Institute of Intelligent Transport Systems, 67-76.
- Ding J. L., Fan Y. J., Xiang Q. (2004), The Impact of ETC System on Safety Performance of Toll Collection Plazas, *Transportation College, Southeast University, Nanjing, PRC 210096*, P. R. China.
- Fox J. (1997), *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models*, Sage Publications, London, U.K.
- Hauer E. (1995), On Exposure and Accident Rate, *Traffic Engineering & Control*, 36(3), Transportation Research Board, 134-138.
- Hayes A. F. (2005), *Statistical Methods for Communication Science*, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, New Jersey.
- Lee S. B., Lim J. B., Joo S. K. (2013), A Study on the Method of Highway Hi-pass Lane Arrangement and Operation, *J. Korean Soc. Transp.*, 31(6), Korean

- Society of Transportation, 22-33.
- McFadden D. L. (1976), The Theory and Practice of Disaggregate Demand Forecasting for Various Modes of Urban Transportation, Washington Dept. of Transportation, Washington, D.C.
- Miaou S. P. (1994), The Relationship Between Truck Accidents and Geometric Design of Road Sections: Poisson Versus Negative Binomial Regressions, *Accid. Anal. & Prev.*, 26(4), Pergamon Press, 471-482.
- Mun S. R., Lee Y. I., Lee S. B. (2012), Developing a Traffic Accident Prediction Model for Freeways, *J. Korean Soc. Transp.*, 30(2), Korean Society of Transportation, 101-116.
- Oh C., Chang J. N., Chang M. S. (1999), Relationship Between V/C and Accident Rate for Freeway Facility Sections (Focused on Shingal-Ansan Freeway), *J. Korean Soc. Transp.*, 17(2), Korean Society of Transportation, 21-27.
- Park M. H. (2014), A Study on Marginal Effect of Geometric Structure on Freeway Accident Frequencies, *J. Korean Soc. Transp.*, 32(1), Korean Society of Transportation, 73-81.
- Sze N. N., Wong S. C., Chan W. F. (2008), Traffic Crashes at Toll Plazas in Hong Kong, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 161(2), 71-76.
- Yoo B. S., Lee S. B., Park W. Y., Park J. T. (2010), Safety Improvement of Installation of “HI-pass” System at Expressway Toll Gate, *J. Korean Soc. Transp.*, 28(4), Korean Society of Transportation, 7-18.

☞ 주 작성자 : 이태현

☞ 교신저자 : 고승영

☞ 논문투고일 : 2014. 8. 20

☞ 논문심사일 : 2014. 11. 6 (1차)
2014. 12. 8 (2차)

☞ 심사판정일 : 2014. 12. 8

☞ 반론접수기한 : 2015. 6. 30

☞ 3인 익명 심사필

☞ 1인 abstract 교정필