

횡단면 분석기법을 적용한 고속도로 기하구조 안전성 평가

서임기* · 최종태** · 박제진*** · 박신형****

Seo, Im-ki*, Choi, Jong-Tae**, Park, Je-Jin***, Park, Shin-Hyong****

The Safety Evaluation of Expressway Geometries by Cross-sectional Analysis Techniques

ABSTRACT

The representative design elements of the road geometric structure are longitudinal slope, horizontal curve radius, super elevation, and transition curve. According to the function of a road, the design standards of these elements is applied by diverse combinations of them. This study divided expressway into homogeneous segments based on longitudinal slope and horizontal curve radius. And then, data required for analysis were matched to each segment, and the safety performance function was built by using the established data. crash modification factors which can explain traffic accident exposure rate were calculated. When the threshold value of horizontal curve radius $R=1,000$ m was set to 1.0, the crash modification factors at $R=300$ m was calculated as 1.33, which means that the accident exposure rate is increased by 33%. When the threshold value of the longitudinal slope 0% was set to 1.0, the crash modification factors demonstrated that the accident exposure rate decreases on the upward slope and the accident exposure rate increases on the downward slope. The results of this study can be used as basic information in the design of expressway geometries during the improvement or the construction of expressways.

Key words : Road Geometry, Radius of curve, Vertical grade, Safety Performance Function, Crash Modification Factor

초 록

도로 기하구조를 구성하는 설계요소에는 대표적으로 종단경사, 평면곡선반경, 편경사, 완화곡선 등이 있다. 이러한 도로 기하구조의 설계요소들은 도로의 기능별로 설계기준이 제시되어 있으며, 설계기준의 범위 안에서 다양한 조합을 통해 설계된다. 본 연구에서는 다양한 조합을 통해 건설된 고속도로를 종단경사와 평면곡선반경을 기준으로 동질구간으로 분할한 후 분석에 필요한 자료를 매칭하였으며, 구축된 자료를 활용하여 종단경사와 평면곡선반경에 대한 안전성능함수를 구축하고, 교통사고 노출률을 설명할 수 있는 사고수정계수를 산출하였다. 평면곡선반경 $R=1,000$ m를 기준(1.0)으로 설정한 후 산출한 $R=300$ m의 사고수정계수는 1.33으로 사고노출률이 33% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 종단경사 0%를 기준(1.0)으로 설정한 후 오르막 경사와 내리막 경사에 대한 사고수정계수를 산출한 결과, 오르막 경사에서는 사고노출률이 감소하고 내리막 경사에서는 사고노출률이 증가함을 확인하였다. 본 연구의 결과는 향후 고속도로의 신설 및 개량 노선의 사업시행 전 선형설계 시 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

검색어 : 도로기하구조, 평면곡선반경, 종단경사, 안전성능함수, 사고수정계수

* 정희원 · 한국도로공사 도로교통연구원 박사후연구원, 공학박사 (Korea Expressway Corporation · seoimki79@ex.co.kr)

** 한국도로공사 도로교통연구원 연구원, 공학석사 (Korea Expressway Corporation · chtwslove@ex.co.kr)

*** 정희원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, 공학박사

(Corresponding Author · Korea Expressway Corporation · jjpark@ex.co.kr)

**** 정희원 · 계명대학교 교통공학과 조교수, 공학박사 (University of Keimyung · shpark@kmu.ac.kr)

Received June 24, 2014/ revised July 28, 2014/ accepted February 17, 2015

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라의 고속도로는 2012년 기준으로 35개 노선, 총 연장 4,044km¹⁾에 달하고 있다. 고속도로의 양적 증가는 사람 및 물류의 이동을 극대화 시키고 있지만, 교통사고는 2012년 기준 3,550건이 발생하고 371명이 사망한 것으로 집계되어 천 건 당 사망률은 104.6명인 것으로 분석되었다. 이는 우리나라 일반도로 천 건 당 사망률(24.1명)의 약 5배에 달하는 수치로 교통사고 사망자를 줄이기 위한 도로관리청의 적극적인 개선대책이 수립되어야 함을 시사하고 있다.

최근 들어 교통분야의 패러다임이 도로의 건설 및 확장 등 양적인 성장에서 안전성 및 쾌적성 확보 등 질적인 성장으로 초점이 맞춰지고 있다. 2008년 국정과제로 ‘교통사고 사망자 절반 줄이기’가 채택되었고, 이에 발맞춰 한국도로공사에서도 교통사고 예방을 위해 운전자 의식개선 활동, 도로 및 교통 안전시설물을 설치하는 등의 노력을 기울이고 있다. 또한 예비타당성 조사와 도로교통안전진단 제도를 통해 안전한 도로환경을 조성하고 교통사고를 예방하고자 힘쓰고 있다.

예비타당성 조사는 주행거리(억대-km) 또는 수송실적(억인-km) 별 교통사고 발생 비율과 교통사고 비용의 원단위를 이용하여 교통사고 비용 산정 후, 사업 시행 전·후의 교통사고 비용 절감편익을 산정한다. 도로교통안전진단은 일정 규모 이상의 도로를 설치할 경우 의무적으로 실시하는 일반 도로교통안전진단과 교통사고 발생원인과 관련해 교통시설의 진단이 필요하고 인정되는 때 시행되는 특별 도로교통안전진단으로 구성된다. 하지만 예비타당성 조사의 경우 교통사고 발생률을 원단위로 산출하여 이를 단순히 총 주행거리로 곱하는 방식으로 편익을 산출하기 때문에 교통사고의 발생원인인 도로 기하구조, 도로운영, 인적요인 등의 제반 요인에 대한 고려가 불가능하다. 또한 예비타당성 조사는 도로 계획단계에서, 도로교통안전진단은 대부분 초기 실시설계 단계 중에 시행됨에 따라 도로선형설계, 도로시설물 형태의 결정이나 근본적인 대책수립에 한계가 있다.

미국에서 도로안전성 평가와 관련된 다수의 연구결과를 바탕으로 2010년 발간한 HSM (Highway Safety Manual 1st Edition)에서는 도로유형별 안전성능수치 및 사고수정계수 등의 평가지표를 제시하고 있으며, 전체적인 도로의 안전성을 평가할 수 있는 체계를 제공하고 있다.

본 연구에서는 앞서 기술한 예비타당성 조사와 도로교통안전진단의 한계점을 극복할 수 있는 객관적이고, 정량화된 고속도로 기하구조 관련 안전성능수치를 이용한 사고수정계수를 개발하였

Table 1. Study Scopes

Division	Scope
Temporal	<ul style="list-style-type: none"> ■ Expressway accident data : 2001 ~ 2010 ■ Expressway volume data : 2001 ~ 2010
Spatial	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gyeongbu, Yeongdong, Seohaean, Jungbunaeruk, Honam, Namhae
Geometry	<ul style="list-style-type: none"> ■ Vertical grade ■ Radius of curve

다. 안전성능수치는 고속도로 전 구간의 공통 변수인 구간길이, 교통량, 사고발생년도 더미를 설명변수로 한 모형을 구축하였다. 구축된 모형을 토대로 도로선형 조건에 따른 교통사고 위험도를 제시함으로써, 우리나라 고속도로 실정에 맞는 기하구조 안전성 평가가 가능할 것으로 기대된다.

1.2 연구의 범위 및 방법

사고수정계수는 도로의 안전성을 예측하거나 평가하는 지표로서, 특정 지점에서의 사고건수를 예측하거나 여러 조건에 따른 안전시스템의 효율성을 평가하는데 이용된다. 전자의 경우 교통운영 또는 기하구조에 따른 사고의 위험도 및 노출을 보정하는 계수로써 활용된다.

본 연구에서는 고속도로 교통사고, 교통량(AADT), 기하구조 설계요소 자료의 구득가능성을 고려한 시간적·공간적 범위를 Table 1과 같이 설정하였다. 고속도로 교통사고 및 교통량 자료는 2001~2010년까지의 자료를 구득하였고, 기하구조 자료는 고속도로 특성상 최종적으로 선형개량이 이루어진 최근의 기하구조 자료(고속도로 설계도서)를 기반으로 분석자료를 구축하였다. 또한, 교통사고 자료는 평균으로의 회귀(Regression To the Mean) 편의를 최소화할 수 있도록 최근자료를 기반으로 한 3~5년 이상의 자료를 사용하였다.

민자고속도로를 포함하는 우리나라 고속도로 총 40개 노선(재정 고속도로 28개 노선, 민자고속도로 12개 노선) 중 주요 6개 노선을 공간적 범위로 설정하여 분석하였으며, 사고수정계수는 고속도로 기하구조 설계요인 중 대표성을 가진 종단경사와 평면곡선반경으로 한정하여 개발하였다.

본 연구의 주요 내용은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 미국 HSM의 기하구조 사고수정계수에 대한 고찰과 더불어 국내 적용의 한계점을 도출하고, 차별성을 제시하였다.

둘째, 기하구조의 구성요소인 종단선형과 평면곡선반경을 기준으로 동질구간을 분할 후 교통량, 교통사고 등 분석에 필요한 설명변수 자료를 매칭하였다.

셋째, 종단경사의 사고수정계수는 평면곡선반경이 무한대(∞)인 구간에서의 안전성능수치를 개발한 후, 기본그룹의 기대사고건수

1) KOSIS National Statistics Portal(<http://kosis.kr>)

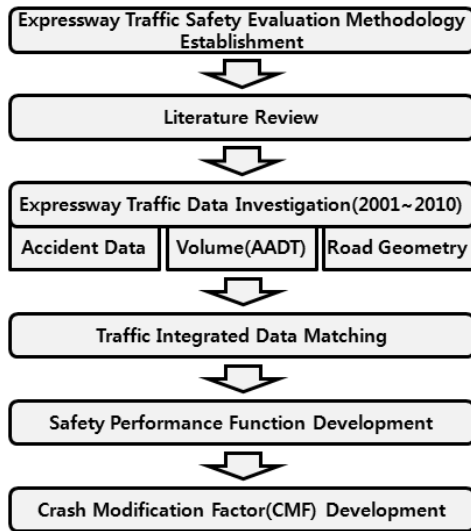


Fig. 1. Flow Chart

Table 2. Crash Modification Factor by Lane Width(HSM)

Treatment	Rural Two Lane Roads	Undivided Rural Multi-Lane Roads	Divided Rural Multi-Lane Roads
9ft or less	1.50	1.38	1.25
10ft	1.30	1.23	1.15
11ft	1.05	1.04	1.03
12ft or more	1.00	1.00	1.00

Note) AADT of 2,000 or more

를 활용한 종단경사의 변화에 따른 교통사고 노출률을 산출하였다. 넷째, 평면곡선반경의 사고수정계수는 종단경사가 0%인 구간에서의 안전성능합수를 개발한 후, 기본그룹의 기대사고건수를 활용하여 평면곡선반경의 변화에 따른 교통사고 노출률을 산출하였다.

2. 기존 연구문헌 고찰

2.1 HSM의 기하구조 사고수정계수 고찰

2010년 미국도로교통공무원협회 AASHTO에서는 교통안전과 관련한 기존 연구결과를 집대성하여 HSM (Highway Safety Manual 1st Edition)을 발간하였다. HSM에서 제시하는 도로 기하구조의 안전성평가는 지방부 도로를 대상으로 수행된 결과이며, 주요 내용은 다음과 같다.

2.1.1 차로폭 사고수정계수

차로폭 사고수정계수는 지방부 2차로 도로, 지방부 비분리형 다차로 도로, 지방부 분리형 다차로 도로에 대한 사고수정계수를

Table 3. Crash Modification Factor by Shoulder Pavement Type (HSM)

Shoulder width (ft)	Paved	Gravel	Composite	Turf
1ft	1.00	1.00	1.01	1.01
2ft	1.00	1.01	1.02	1.03
3ft	1.00	1.01	1.02	1.04
4ft	1.00	1.01	1.03	1.05
6ft	1.00	1.02	1.04	1.08
8ft	1.00	1.02	1.06	1.11
10ft	1.00	1.03	1.07	1.14

Note 1) Road type : Rural two-lane roads

2) Base Condition : Paved shoulder

제공하고 있으며, 고속도로에 대한 사고수정계수는 제시하지 않고 있다. 지방부 도로에서의 차로폭 보정계수는 12ft를 기본상태(Base condition) 1로 고정시키고, 차로 폭의 감소(9ft, 10ft, 11ft)에 따른 사고수정계수를 제시하였다. 차로폭에 따른 사고수정계수는 차로폭이 감소할수록 교통사고가 발생할 확률이 높은 것으로 나타났다.

2.1.2 길어깨폭 사고수정계수

길어깨폭 사고수정계수는 도로 및 길어깨 형태에 따른 세 가지를 제시하였다. 첫 번째, 지방부 2차로 도로의 길어깨폭 사고수정계수는 6ft를 기본상태(1.00)로 설정하고, 0ft 1.50, 2ft 1.30, 4ft 1.15, 8ft 이상 0.87로 길어깨폭이 작아질수록 교통사고 발생확률이 높은 것으로 나타났다. 두 번째, 포장된 우측 길어깨폭 8ft (1.00)를 기본 상태로 설정하고 6ft (1.04), 4ft (1.09), 2ft (1.13), 0ft (1.18)로 축소하였을 때 축소폭이 클수록 교통사고 발생확률이 높은 것으로 나타났다. 그리고 마지막으로 세 번째, 지방부 2차로도로에 대하여 길어깨폭(1ft, 2ft, 3ft, 4ft, 6ft, 8ft, 10ft) 및 유형(Paved, Gravel, Composit, Turf) 변화에 따라 사고수정계수를 제시하고 있다.

2.1.3 측면경사 사고수정계수

측면경사 사고수정계수는 지방부 분리형 다차로 도로에 대하여 종단(Vertical)과 평면(Horizontal)의 비율이 1V: 7H 또는 평탄한 측면경사를 기본조건으로 설정하여 1V: 6H, 1V: 5H, 1V: 4H, 1V: 2H 또는 급경사에 대한 사고수정계수를 제시하고 있다.

2.1.4 평면곡선 사고수정계수

평면곡선 사고수정계수는 지방부 2차로 도로에 대하여 평면곡선의 반지름, 곡선장, 나선형 전환곡선의 유무에 대한 수식을 통해 사고수정계수를 제공하고 있다.

Table 4. Crash Modification Factor by Sideslopes (HSM)

Treatment	Setting (Road type)	Traffic Volume	Accident Type (Severity)	AMF
1V:7H or Flatter	Rural (Multi-Lane Highway)	Unspecified	All types (Unspecified)	1.00
1V:6H				1.05
1V:5H				1.09
1V:4H				1.12
1V:2H or Steeper				1.18

Table 5. Crash Modification Factor by Superelevation (HSM)

Treatment	Setting (Road type)	Traffic Volume	Accident Type (Severity)	AMF
Improve SV < 0.01	Rural two lane roads	Unspecified	All types (All severities)	1.00
Improve 0.01 ≤ SV < 0.02				=1.00+6 (SV-0.01)
Improve SV > 0.02				=1.06+3 (SV-0.02)

$$CMF = \frac{(1.55 \times L_c) + \left(\frac{80.2}{R}\right) - (0.012 \times S)}{(1.55 \times L_c)} \quad (1)$$

- L_c : 나선형 전환곡선을 포함하는 곡선장
- R : 곡선구배 반지름(Radius of curve)
- S : 나선형 전환곡선 설치 1, 미설치 0

제시된 Eq. (1)에서는 평면곡선 반지름과 곡선장이 길수록, 그리고 나선형 전환곡선이 설치되었을 경우에 사고발생 확률은 감소하는 경향을 보이고 있다.

2.1.5 편경사 사고수정계수

편경사 사고수정계수는 지방부 2차로 도로를 대상으로 분석을 수행하였으며, 편경사의 차이(Superelevation Variance)가 0.01 (1%) 이하인 상태를 기본조건으로 설정하여 사고수정계수를 제시하고 있다.

2.1.6 종단경사 사고수정계수

종단경사의 사고수정계수는 통행속도 55mph인 12ft 차로폭과 평면곡선반경이 무한대(∞)인 직선구간을 대상으로 하였다. 또한, 대상구간의 교통량은 원시자료를 활용하였으며, 사고유형은 차량 단속사고와 전체사고로 분류하고 사고심각도는 고려하지 않은 상

Table 6. Crash Modification Factor by Vertical Grade (HSM)

Treatment	Setting (Road type)	Traffic Volume	Accident Type (Severity)	CMF	Std. Error
Increase vertical grade by 1%	Rural two lane roads	Unspecified	Single-vehicle run-off-road accident (All severities)	1.04	0.02
			All types (All severities)	1.02	N/A

Table 7. Crash Reduction Factors on California State Highways

Treatment	Sample		ARF (%), 1-ARF)	
	Improved	Unimproved	Regression analysis	Empirical Bayes
Curve Correction	4	96	44	47
Superelevation Correction	8	5	36	33
Shoulder Widening	2	17	87	86
Rumble-Strip installation	2	3	18	19
Wet Pavement	5	39	28	32

태에서 사고수정계수를 산출하였다. 종단경사가 0%인 상태를 기본 조건으로 한 사고수정계수를 산출한 결과, 종단경사가 1% 증가할 때마다 차량단속사고 만을 고려할 경우에는 4%, 전체사고를 고려할 경우에는 2%의 사고발생률이 증가하는 것으로 분석되었다.

2.2 기존 연구문헌 고찰

횡단면 분석기법을 적용한 기하구조의 안전성평가는 도로 설계 요소(종단선형, 평면곡선반경 등), 교통사고, 교통량 등을 통합한 자료를 기반으로 분석된다. 국내 교통사고 분석을 위한 도로교통공단의 통합DB (TAAS)는 2010년에 구축되어 횡단면 분석기법을 적용한 안전성 평가는 아직 이루어지지 않고 있어 본 연구에서는 국외 문헌을 중점적으로 고찰하고자 한다.

Hanley et al. (2000)는 1985~1995년 미국 캘리포니아주 고속도로 자료를 바탕으로 1988~1992년에 시행된 5가지 안전조치에 대한 사고수정계수 개발연구를 수행하였다. 시행된 안전조치는 곡선부 선형조정, 종단경사조정, 요철포장, 길어깨 확장 등 도로 기하구조 및 안전시설이 개선된 구간에 대해서 선형 회귀식을 이용하여 안전성능함수를 구축하고 경험적 베이지안 방법에 의한 사고수정계수를 개발하였다.

Kay Fitzpatrick et al. (2010)는 텍사스주를 대상으로 진출입로

Table 8. Crash Modification Factor in Texas

Treatment	Accident Modification Factor
Horizontal Curve	$AMF_{HC} = e^{0.0831(DC)}$
Ramp Density	$AMF_{DD} = e^{0.0152(1.61DD - \Delta)}$

밀도의 영향이 직선구간에 비해 곡선구간에서 다르게 적용되는지를 확인하였다. 텍사스주 지방부 4차로 고속도로를 대상으로 5년간(1997~2001년)의 진입로 및 구간 교통사고 건수 자료를 바탕으로 분석을 실시하였고, 진입로 밀도, 차로폭, 길어깨폭, 중앙분리대 유형, 경사도 등을 독립변수로 하는 음이항 회귀모형을 구축하였다.

Jurewicz and Pyta (2013)는 빅토리아의 연속된 지방부 도로 2,900km 구간에 대하여 접속되는 도로의 폭, 노면상태, 길어깨 폭, 차로 폭, 평면선형, 종단경사, 연평균일교통량 자료를 통합하였다. 일방향 60m 구간 당 도로 외 구간 좌회전 사망사고 건수를 예측하기 위해 음이항 로그선형모형(Negative binomial log-linear model)을 개발하였다.

$$ROR_{2L} = e^{\beta_0 + \beta_1 AADT_{one} + \beta_2 Radius + \beta_3 Grade + \beta_4 TLSS + \beta_5 CZ + \epsilon} \quad (2)$$

여기서, ROR_{2L} : 60m 일방향 구간 좌회전 사망사고에 대한 ROR

- $AADT_{one}$: 일방향 연평균교통량
- $TLSS$: 차로+포장된 길어깨폭
- CZ : 접도구역 폭
- ϵ : 음이항모형으로 설명되지 않는 오차항

Elvik (2013)은 곡선반경의 사고수정계수에 대한 메타분석(meta analysis)을 실시하였다. 독일, 영국, 뉴질랜드, 노르웨이, 포르투갈, 스웨덴, 미국의 연구를 종합하였는데, 사고수정계수는 대부분 곡선 반경 1,000m를 기본구간(1.0)으로 설정하였으며, 최소곡선반경 50~100m까지 사고수정계수를 개발하였다. 한편 스웨덴의 경우, 3,500m를 기본구간으로 설정하였으며, 최소곡선반경 300m까지 사고수정계수를 개발하여 제시하였다.

2.3 기존 연구의 시사점

미국의 HSM에서는 기하구조의 형태가 다양한 지방부 도로를 대상으로 사고수정계수를 제시하였으며, 도로기하구조 및 안전시설에 대한 평가 요소로 차로 폭, 길어깨 폭, 평면선형, 편경사, 종단경사, 측면경사 총 6개의 사고수정계수를 제시하고 있다. 하지만, 대부분 지방부 다차로 도로인 단속류를 대상으로 한 연구가 수행되었으며, 연속류 기반의 고속도로에 대한 연구는 미흡한 것으로 확인되었다. 또한, 국내에서도 도로기하구조, 교통량, 교통사고

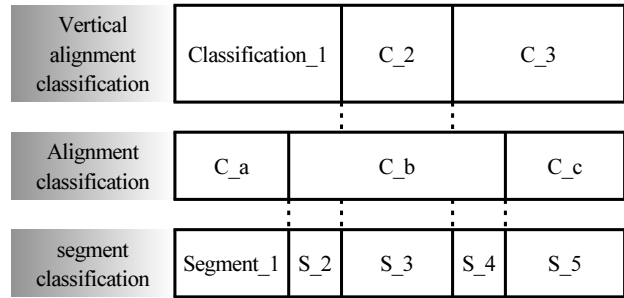


Fig. 2. Classification Methodologies of Segment

교통안전시설물과 관련된 교통안전성 통합DB가 미구축되어 도로 기하구조에 대한 효과평가 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 주요 6개 노선을 대상으로 도로 기하구조의 설계요소인 평면곡선 반경과 종단경사에 따른 사고수정계수를 산출하고자 한다. 평면곡선반경 및 종단경사의 사고수정계수는 평면 곡선반경이 직선구간에서의 종단경사 변화, 평지구간에서의 평면 곡선반경의 변화에 대해서 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 고속도로 설계 전 도로안전성 평가와 더불어 공용 중인 고속도로의 안전성 평가 시 활용이 가능할 것으로 판단된다.

3. 고속도로 교통이력자료 분석 방법론 정립

3.1 동질구간 분할 및 자료매칭

도로기하구조의 사고수정계수를 개발하기 위해서는 도로구간 중 동일한 성질을 가진 구간을 분할하여 비교하게 된다. 사고수정계수의 개발과 구간분할 기준은 거의 동일하게 움직인다. 예를 들어 종단경사와 평면곡선반경에 대한 사고수정계수를 개발한다면 두 성질 모두 구간분할의 기준이 된다. 또한 일반적으로 사고발생에 영향을 미치는 요인들 역시 구간분할의 기준으로 설정된다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 노선별 기하구조, 교통량, 교통사고 자료를 활용하여 하나의 입력자료 형태로 구성하도록 구간을 분할하고 자료를 매칭하였다. 즉, 해당 단위구간의 이정을 기준으로 해당 구간에 포함되는 기하구조 요소 및 교통량, 교통사고 발생건수 등을 매칭하는 방법으로 자료를 구축하였다.

자료구축 시 각 노선(방향 고려)을 동질구간별로 구분하고 각각의 ID를 부여함으로써 안전성능함수(SPF) 및 사고수정계수(CMF) 도출시 사고 자료와의 상호 참조가 가능하도록 설계하였으며, 향후 추가분석 및 업데이트의 용이성을 고려하였다.

고속도로 기하구조의 사고수정계수를 산출하기 위해서는 기하구조 외 제반 요소들과 사고발생 간의 상호 연관성 및 간섭을 최소화하기 위해 교통안전시설물이 설치된 구간을 모두 분석구간에서 제외하였다.

고속도로의 기하구조 특성은 종단선형, 평면선형, 편경사, 완화

Table 9. Grouping of Vertical Grade and Radius of Curve

Vertical grade	Radius of curve
1% Interval (+7%~7%)	200m Interval (300m~3,500m)

곡선 등 다양한 선형 조합으로 설계되므로 아직까지 분할기준에 대한 정립이 이루어지지 않은 실정이다. 도로의 기하구조에 대해 어떻게 구간을 구분하느냐에 따라 모형식의 형태 및 결과가 달라지기 때문에 적절한 구간 분할단위를 정립하는 방안이 필요하다. 본 연구에서는 종단선형 및 평면선형에 대한 사고수정계수 산출을 목표로 하기 때문에 2가지 요인을 세분화 하였으며, 그룹화 기준은 Table 9와 같이 정하였다.

3.2 사고수정계수 산정 방법론 정립

일반화선형모형(Generalized linear model)은 연도별 사고건수 추정 모형을 구축하는 일반적인 방법으로 종속변수에 연결함수(Link function)를 취하여 선형함수로 추정하는 방식을 의미한다.

일반적으로, 동일한 지점에 대해 일정한 시간간격을 두고 관측 자료를 얻게 되면, 한 시점에서 얻은 자료가 바로 이전에 얻어진 자료와 유사한 경향을 보이게 되는데, 이를 시간 상관성(Temporal correlation)이라 한다. 예를 들어, 매 달마다 사고자료를 얻는다면, 구간이 지니고 있는 밝혀지지 않은 영향으로 인해 관측 자료들은 시간 상관성을 갖는다. 이러한 시간 상관성은 통계적 관점에서, 회귀모형의 추정량의 정확도에 부정적 영향을 줌으로써 올바른 모형 추정에 방해가 된다. 자료의 시간 상관성을 반영하지 않으면, 표준오차가 실제보다 과소 추정되며, 따라서 검정통계량이 커지게 되어 유의하지 않은 변수가 유의하게 산출되는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법이 일반화추정방정식(GEE: Generalized estimating equations)이며, 이는 공분산구조(Covariance structure)를 고려하여 회귀모형을 추정하는 일반화선형모형(GLM)의 확장된 형태라고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 연평균일교통량(AADT, Annual average daily traffic)과 구간길이를 모수로 한 종단경사와 평면곡선 반경에 대해서 안전성능함수를 개발하고자 한다. 먼저, 종단경사에 따른 사고수정계수는 곡선반경이 없는 직선부를 대상으로 종단경사 그룹별 안전성능함수를 개발한다. 그리고 곡선반경에 따른 사고수정계수는 종단경사가 0%인 평지부를 대상으로 곡선반경 그룹별 안전성능함수를 Eq. (3)을 활용하여 구축하였다.

$$Y = \exp(\alpha + \beta_1 \times AADT - \beta_2 \times RC \text{ or } VG) \quad (3)$$

$$N_{predicted} = AADT^{\beta_1} \cdot Length^{\beta_2} \cdot \exp(\alpha) \quad (4)$$

여기서, α, β_1, β_2 : 회귀모수

종속변수(Dependent variable)로는 등급별 사고심각도가 모두 합산된 전체 사고건수가 반영되며, 독립변수(Independent variable)로는 자연로그로 계산된 교통량(AADT)과 구간길이가 적용된다. 음이항 회귀식은 최대우도법(Maximum likelihood estimate)을 기반으로 각각의 계수들이 추정되며, 통계적 유의성을 검토하기 위해 t-test 및 pseudo Mcfadden's R^2 값이 비교·분석된다. 그리고 개발된 안전성능함수의 설명변수 중 종단경사를 제외한 설명변수는 통제된다는 가정 하에 그룹별 교통사고 예측건수를 산출한다. 종단경사의 변화에 따른 사고수정계수(CMF)는 Eq. (5)와 같이 비교그룹의 기대사고건수에 기본그룹의 기대사고건수를 나눈 비율이다. 따라서 종단경사의 기본그룹과 비교그룹을 비교하여 기본그룹에 비해 어느 정도 교통사고가 발생하고, 감소하는지를 정량적인 수치로 해석하는 분석방법론이다.

$$CMF = \frac{\sum N_{predicted, group A}}{\sum N_{predicted, base group}} \quad (5)$$

4. 기하구조 사고수정계수 개발

4.1 곡선반경의 사고수정계수 개발

평면선형의 과다한 직선 및 작은 곡선반경은 운전자들이 속도를 선택하는데 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 일반적으로 평면선형은 직선과 원곡선으로 구분할 수 있으며, 원곡선은 굽은 형태에 따라 좌곡선, 우곡선으로 구분할 수 있다. 고속도로는 100~110km/h의 속도로 주행하는 고규격화된 도로로 안전성을 고려한 본선부의 최소곡선반경은 340m 이상으로 설치하도록 제한하고 있다. 또한, 원곡선은 주행차량이 원활한 곡선주행을 위해 곡선 설치 전에 완화곡선을 설치하여 자연스럽게 원곡선에 진입할 수 있도록 설치하는 곡선으로 정의하고 있다. 하지만, 곡선반경이 설계속도 대비 일정 크기 이상일 경우에는 완화곡선을 설치하지 않아도 차량이 원곡선을 주행하는데 영향을 받지 않는데, 고속도로에서 완화곡선을 설치하지 않아도 되는 곡선반경은 설계속도 120km/h일 때인 3,000m에 해당한다. 따라서 본 연구에서는 Elvik (2013)의 선형 연구와 유사한 3,500m 미만의 곡선반경을 가진 구간을 대상으로 200m 단위로 평균사고건수를 산출하였다.

곡선반경에 따른 영향력을 살펴보기 위해 종단경사가 $\pm 1\%$ 인 구간을 전제조건으로 모형을 구축하였다. 음이항 회귀분석결과 AADT의 계수는 99% 신뢰수준에서 '0.00000991'로 추정되었다. 곡선반경에 대한 평균사고건수 변화를 확인한 결과, Table 10과 같이 3,500~3,300m 구간을 기준으로 보았을 때 특정한 패턴을 보이지 않지만, 1,000m 미만에서는 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 우리나라 고속도로의 곡선반경 사고수정계

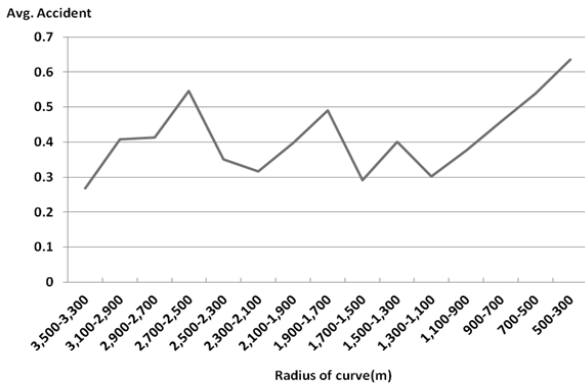


Fig. 3. Average Accident Change by Radius of Curve

Table 10. Average Accident by Radius of Curve

Radius of curve	Sample	Avg. Accident*	Relative proportion (Standard 3,500m)
3,500-3,300	260	0.268	1
3,300-3,100	0	-	-
3,100-2,900	1,250	0.408	1.52
2,900-2,700	120	0.414	1.54
2,700-2,500	120	0.546	2.04
2,500-2,300	560	0.35	1.31
2,300-2,100	170	0.316	1.18
2,100-1,900	1,270	0.397	1.48
1,900-1,700	260	0.491	1.83
1,700-1,500	380	0.292	1.09
1,500-1,300	1,070	0.400	1.49
1,300-1,100	640	0.303	1.13
1,100-900	2,010	0.376	1.40
900-700	1,620	0.459	1.71
700-500	1,350	0.539	2.01
500-300	280	0.635	2.37

* : Annual average of accident/km = exp (0.00000991×AADT)

수는 1,000~300m 구간을 대상으로 개발하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다.

기하구조 사고수정계수는 안전성능함수를 추정하여 교통안전시설물의 계수값을 이용하여 구할 수 있다. 이 방법은 계수값의 통계적 유의성을 확인할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 일반화선형모형(GLM)보다는 표준오차를 정확하게 추정할 수 있는 일반화추정방정식(GEE)을 이용하여 개발된다.

본 연구에서는 다른 요인을 통제하기 위해 통제요인과 함께 안전성능함수를 추정하였다. 구간길이의 경우 유의성이 확보되지

Table 11. SPF on Radius of Curve using GEE

Parameter	Factor	Z	P> z
Constant terms	0.971	10.83	Less than 0.001
Radius of curve	-0.000407	-4.23	Less than 0.001
AADT	7.95E-06	6.79	Less than 0.001
2004	-0.190	-3.57	Less than 0.001
2005	-0.305	-6.28	Less than 0.001
2006	-0.297	-6.09	Less than 0.001
2007	-0.371	-8.05	Less than 0.001
2008	-0.382	-8.44	Less than 0.001
2009	-0.377	-8.27	Less than 0.001
2010	-0.440	-10.13	Less than 0.001

않기 때문에 연평균사고건수/km를 종속변수로 설정하여 분석하였다. 시간에 따른 추세(Time trend)의 영향력 역시 통제를 목적으로 연도별 더미(Dummy)변수를 활용하였다. 일반화추정방정식(GEE)으로 추정된 결과를 Table 11과 같이 나타내었으며, 모든 설명변수가 신뢰수준이 99% 이상에서 유의한 것으로 분석되었다.

곡선반경에 따른 사고예측식은 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있으며, AADT는 정(+)의 부호로 교통량이 많을수록 교통사고빈도가 높은 것으로 분석되었다. 또한, 곡선반경은 부(-)의 부호로 곡선반경이 작을수록 교통사고가 더 높게 발생하고 있으며, 연도별 더미변수는 모두 부(-)의 부호조건을 가지는 것으로 나타났다. 이는 교통사고가 시간의 변화에 따라서 감소하고 있어, 연도별 추세를 잘 반영하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y = \exp(0.971 + 0.00000795 \cdot AADT - 0.000407 \cdot RC \\
 - 0.190 \cdot 2004\text{년 Dummy} - 0.305 \cdot 2005\text{년 Dummy} \\
 - 0.297 \cdot 2006\text{년 Dummy} - 0.371 \cdot 2007\text{년 Dummy} \\
 - 0.382 \cdot 2008\text{년 Dummy} - 0.377 \cdot 2009\text{년 Dummy} \\
 - 0.440 \cdot 2010\text{년 Dummy})
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, Y : 연도별 예측사고건수(건/년)

AADT : 연평균일교통량(대/일)

RC : 곡선반경(m)

연도별 Dummy : 해당 연도이면 1, 아니면 0

곡선반경에 따른 안전성능함수를 구축한 결과를 토대로 사고수정계수를 산출하였다. 단, 순수한 곡선반경의 사고수정계수 산출을 위해 AADT와 연도별 더미변수는 항상 같다는 가정 하에 곡선반경 변수만을 고려한 상대적사고건수를 Eq. (7)로 산출하였다.

Table 12. Crash Modification Factor by Radius of Curve

Radius of curve (m)	1,000	900~999	800~899	700~499	600~699	500~599	400~499	300~399
Relative number of accidents	0.666	0.693	0.722	0.752	0.783	0.816	0.850	0.885
CMF	1.00	1.04	1.08	1.13	1.18	1.23	1.28	1.33

$$\text{상대적 사고건수} = \exp(-0.000407 \times RC) \quad (7)$$

Eq. (7)로 산출된 상대적 사고건수 중 곡선반경 1,000m를 기본 그룹의 기대사고건수로 설정하고, Eq. (8)을 이용하여 사고수정계수를 산정하였다.

$$CMF = \frac{\sum N_{\text{predicted, group A}}}{\sum N_{\text{predicted, base group}}} \quad (8)$$

Eq. (8)에 의한 산출된 곡선반경의 사고수정계수를 Table 12에 제시하였다. 즉, 곡선반경 300~399m 범위의 도로는 1,000m의 곡선반경으로 설계된 도로보다 33% 정도 높게 교통사고가 발생하는 위험한 도로라고 설명할 수 있다.

4.2 종단경사 사고수정계수 개발

종단경사가 실제 교통사고 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 다른 요인들을 통제된 상태에서 종단경사에 따른 사고 건수의 변화를 살펴보았다. 고속도로의 종단경사별 평균사고 건수를 비교하기 위하여 곡선반경이 무한대(∞)인 구간만을 이용하여 km당 연평균사고 건수를 예측하였다. 종단경사에 의한 평균사고 건수 변화를 살펴보면, 오르막과 내리막 모두 5% 이상에서는 샘플사이즈가 매우 작으며 어떤 패턴을 유추하기 어려운 경향을 보이고 있다. 그리고 오르막과 내리막 5% 미만인 경우, 오르막 급경사에서 내리막 급경사 구간으로 갈수록 평균사고 건수가 증가하는 패턴을 보이고 있다. 이는 고속도로 특성상 내리막이 심해질수록 과속을 하기 쉽다는 특성으로 설명될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 +5~5%를 대상으로 안전성능함수를 추정하였다.

종단경사에 따른 안전성능함수를 추정하기 위해 종속변수를 km당 사고건수로 설정하고, 설명변수를 AADT와 종단경사, 시간에 따른 추세(Time trend) 효과를 배제하기 위하여 연도별 더미변수를 사용하여 일반화추정방정식(GEE)으로 추정하였다.

Table 14를 살펴보면, AADT의 설명변수가 유의수준 0.195로 신뢰수준 90%에서 유의하지 않은 것으로 분석되어 공학적 판단에서의 설명력이 저하되는 것으로 판단된다. 따라서 연도별 교통사고를 더미화 하지 않고, 일반변수화 한 모형을 구축하였다.

따라서 종단경사에 따른 유의미한 안전성능함수를 구축하기

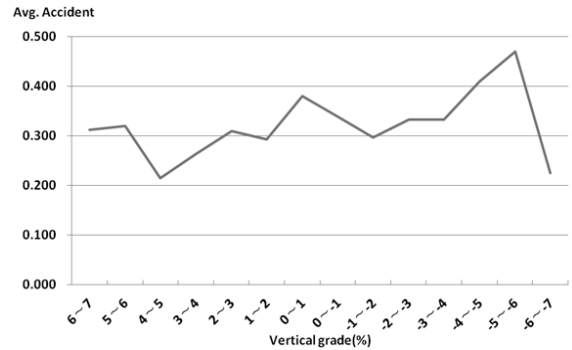


Fig. 4. Average Accident Change by Vertical Grade

Table 13. Average Accident by Vertical Grade

Vertical grade (%)	Sample	Avg. Accident*	Relative proportion (Standard 3,500m)
6~7	90	0.312	0.82
5~6	90	0.319	0.84
4~5	180	0.215	0.57
3~4	390	0.263	0.69
2~3	1,970	0.310	0.81
1~2	2,010	0.293	0.77
0~1	3,210	0.380	1.00
0~-1	3,180	0.339	0.89
-1~-2	2,210	0.296	0.78
-2~-3	1,800	0.332	0.87
-3~-4	360	0.333	0.88
-4~-5	270	0.409	1.08
-5~-6	20	0.470	1.24
-6~-7	70	0.225	0.59

* : Annual average of accident/km = exp (0.000134×AADT)

위해 시간에 따른 추세를 더미변수로 반영하지 않고 일반 변수로 적용하여 모형을 구축하였다. 그 결과, Table 15와 같이 종단경사, AADT, 연도별 사고 요인이 신뢰수준 90%에서 유의한 것으로 분석되어 본 모형을 이용한 사고수정계수를 추정하였다.

$$Y = \exp(80.108 - 0.00976 \cdot VG + 0.0000106 \cdot AADT - 0.0398 \cdot Year) \quad (9)$$

여기서, Y : 연도별 예측사고건수(건/년)
 $AADT$: 연평균 일 교통량(대/일)
 VG : 종단경사(%)
 $Year$: 1(2001년), 2(2002년), 3(2003년), 4(2004년),
 5(2005년), 6(2006년), 7(2007년), 8(2008년), 9(2009년), 10(2010년)

종단경사에 따른 안전성능함수를 구축한 결과를 토대로 사고수정계수를 산출하였다. 단, 순수한 종단경사의 사고수정계수 산출을 위해 $AADT$ 와 연도변수는 항상 같다는 가정 하에 종단경사 변수만을 고려한 상대적사고건수를 Eq. (10)과 같이 산출하였다.

$$\text{상대적 사고건수} = \exp(-0.00976 \times RC) \quad (10)$$

Eq. (10)으로 산출된 상대적 사고건수 중 종단경사가 0%일 때 기본그룹의 기대사고건수로 설정하고, Eq. (11)을 이용하여 사고수정계수를 산정하였다.

$$CMF = \frac{\sum N_{predicted, group A}}{\sum N_{predicted, base group}} \quad (11)$$

Eq. (11)에 의해 산출된 종단경사의 사고수정계수를 Table 16에 제시하였다. 즉, 종단경사 0%를 기준으로 교통사고의 증감을 평가하였을 경우에 오르막 구간은 교통사고가 감소하고, 내리막 구간에서는 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 내리막 경사에서 주행속도를 높이는데 보다 용이하며, 차량 제동의 어려움으로 교통사고가 많이 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구는 고속도로의 기하구조 설계요소와 교통사고와의 상관성을 규명하는 연구의 일환으로 수행되었다. 고속도로의 설계요소 중 길어깨 및 도로 폭은 설계기준에 의거하여 설치되고 있어 사고수정계수를 산출하는데 어려움이 따른다. 따라서 운전자의 시거와 차량의 주행속도에 영향을 미치는 종단경사 및 평면선형에 대한 사고수정계수를 개발하여 상대적 교통사고 발생률을 제시하고자 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 우리나라 고속도로를 대표하는 주요 6개 노선을 대상으로 기하구조, $AADT$, 교통사고 자료를 통합하여 동질한 구간단위로 자료를 통합하였다.

둘째, 종단경사가 0%인 구간만을 대상으로 평면곡선반경, $AADT$, 연도별 교통사고 더미변수를 고려한 안전성능함수를 개발한 결과, 모든 설명변수가 신뢰수준 99%에서 유의한 것으로 분석되었다.

셋째, 안전성능함수 모형을 이용하여 상대적 평면곡선반경에 따른 상대적 사고건수를 예측하고, 평면곡선반경 1,000m를 기준으로 한 사고성능함수를 구축한 결과, 곡선반경이 작을수록 교통사고율은 높아지고 있음을 확인하였다.

넷째, 평면곡선반경이 무한대인 직선구간만을 대상으로 종단경사, $AADT$, 연도별 교통사고변수를 고려한 안전성능함수를 구축한 결과, 모든 설명변수가 신뢰수준 90%에서 유의한 것으로 분석되었다.

다섯째, 종단경사 0%를 기준으로 오르막 경사와 내리막 경사 1% 단위로 사고수정계수를 분석한 결과, 오르막 경사에서는 교통사고가 감소하는 한편, 내리막 경사에서는 교통사고가 증가하고 있음을 확인하였다.

Table 14. SPF on Vertical Grade using GEE

Parameter	Generalized estimating equations (GEE)		
	Factor	Z	P> z
Vertical grade	0.283	18.12	Less than 0.001
AADT	-0.00484	-1.3	0.195
2005 years	0.0000134	20.06	Less than 0.001
2006 years	-0.095	-4.51	Less than 0.001
2007 years	-0.157	-8.15	Less than 0.001
2008 years	-0.174	-9.25	Less than 0.001
2009 years	-0.217	-12.35	Less than 0.001
2010 years	-0.199	-10.92	Less than 0.001

Table 15. Estimation Results of Generalized Estimating Equations

Parameter	Generalized estimating equations (GEE)		
	Factor	Z	P> z
Constant terms	80.108	15.14	Less than 0.001
Vertical grade	-0.00976	-1.71	0.087
AADT	0.0000106	17.13	Less than 0.001
Years	-0.0398	-15.09	Less than 0.001

Table 16. The developed Crash Modification Factor by Vertical Grade

Vertical grade(%)	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
Relative number of accidents	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05
CMF	0.95	0.06	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05

본 연구를 종합해 보면, 고속도로는 설계속도가 높은 고 규격화된 도로로 평면곡선반경이 작을수록 핸들을 과대하게 조작해야 하는 어려움 존재하여 교통사고가 많이 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 종단경사는 오르막 경사보다 내리막 경사에서 교통사고발생 건수가 높게 나타나 차량의 주행속도 및 제동 상의 어려움이 문제 등으로 해석할 수 있다. 본 연구 결과는 향후 고속도로의 신설 및 개량 노선의 사업시행 전 선형설계 시 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

References

- American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) (2010). *Highway safety manual*.
- Elvik, R. (2013). "International transferability of accident modification functions for horizontal curves." *2nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Hanley, K. A., Gibby, R. and Ferrara, T. (2000). "Analysis of accident-reduction factors on california state highways." *Transportation Research Record*, No. 1717, pp. 37-45.
- Korea Development Institute (KDI) (2008). *Road and rail feasibility study standard part of the business research guidelines modified and supplemented (5th Edition)* (in Korean).
- Korea Expressway Corporation (2002). *A study on road safety audit for freeway* (in Korean).
- Korea Transport Institute (KDI) (2001). *Improvement of road safety evaluation scheme* (in Korean).
- Korea Transport Institute (KDI) (2004). *An introductory study for developing the korean interactive highway safety design model* (in Korean).
- Park, B. J. and Lord, D. (2010). "Evaluating the effects of freeway design elements on safety." *Transportation Research Board*, Vol. 2195, pp. 58-69.