

철도건널목의 사고예측모형 개발에 관한 연구

Development and Application of Accident Prediction Model for Railroad At-Grade Crossings

조성훈* 서선덕**
Cho, Sung Hoon Suh, Sunduck

ABSTRACT

Rail crossings pose special safety concerns for modern railroad operation with faster trains. More than ninety percent of train operation-related accidents occurs on at-grade crossings. Surest countermeasure for this safety hazard is to eliminate at-grade crossings by constructing over/under pass or by closing them. These eliminations usually require substantial amount of investment and/or heavy public protest from those affected by them. Thorough and objective analysis are usually required, and valid accident prediction models are essential to the process. This paper developed an accident prediction model for Korean at-grade crossings. The model utilized many important factors such as guide personnel, highway traffic, train frequency, train sight distance, and number of tracks. Developed model was validated with actual accident data.

1. 서 론

우리나라의 현재 건널목은 1종이 1,651개소, 2종이 20개소, 3종이 105개소로 총 1776개소가 존재한다. 건널목은 철도사고의 주원인이며, 이러한 철길 건널목 사고는 종종 인명 사고를 동반한 대형 사고이기가 쉽다. 1999년 한해만도 95건의 건널목 사고가 일어났는데, 이것은 전체 철도 사고의 16.5%이고, 운전 사고중의 94%에 해당한다. 앞으로 철도가 점점 고속화되고, 안전이 강조되는 상황에서 치사율이 매우 높고 대형사고 일 경우가 많은 건널목 사고는 특별히 관리되어야 한다.

철도 건널목에서의 사고에 대한 가장 확실한 안전대책은 입체교차로 전환하거나 기존의 평면 건널목을 폐쇄하는 것이지만, 이는 재원조달 및 주민 민원등 기타 여건이 불충분할 수가 있고 경제성을 검토하여야 하기 때문에, 기존 건널목의 구조개선사업에 더 많은 연구와 투자가 이루어져야 한다. 이때 건널목 구조개선사업의 우선순위는 단순한 경험적 판단이 아니라 공학적인 검증에 의한 예상되는 사고율과 이를 통계적으로 수치화한 위험도 지수의 순에 의해서 선정되어야 한다. 이러한 작업을 위해서는 평면교차 건널목에서의 사고율을 예측하는 것이 무엇보다도 중요하다.

본 논문에서는 이러한 평면건널목에서의 사고율을 예측하기 위하여 외국과 국내 연구를 살펴보고, 우리나라 실정에 맞는 사고예측모형을 개발하고, 이를 실제 우리나라 건널목에 적용해 보고자 한다.

*비회원 · 한양대학교 교통공학과 석사과정 · 031-400-4033(E-mail : railsystem@korea.com)

**정회원 · 한양대학교 교통공학과 부교수 · 공학박사 · 031-406-6290(E-mail : sunduck@hanyang.ac.kr)

2. 기존연구 검토

평면교차 건널목에 대한 사고예측에 관한 사항은 주로 외국의 연구가 많으며, 우리나라에는 그 사례가 많지 않다. 우선 미국에는 1994년에 발표된 Peabody Dimmick Formula이 있는데, 이는 29개시의 3,453개 지역 교차로에 5년간 사고자료를 기초로 하였으며, Bureau of Public Roads formula를 참조하여 5년간 예상되는 사고의 수를 결정하는데 사용되었다. 식은 다음과 같다.

$$A_5 = 1.28 * \frac{(V^{0.170}) * (T^{0.151})}{(P^{0.171})} + K$$

A_5 = 5년간 기대되는 사고의 수, V = AADT(년평균 일교통량)
 T = 일평균 철도교통량 P = 보호계수
 K = 추가적인 Parameter

또한, New Hampshire Index에서 사용되는 위험도 지표에는 열차속도, 고속도로 속도, 시거, 교차각, 교차폭, 선로의 형태, 표면의 형태, 인구, 버스의 수, 학교버스의 수, 선로의 수, 표면상태, 주위의 교차로, 고속도로의 기능적 등급, 수직정렬, 수평정렬, 위험물질운반 트럭의 수, 승객의 수, 사고의 수와 같은 factor들이 포함되는데, 그 식은 다음과 같다.

$$HI = V * T * P_f$$

HI = 위험도 지표 V = AADT(년평균 일 교통량)
 T = 일 평균 철도교통량

New Hampshire Index는 상황에 따라 다음에 나오는 다른 보호계수(P)값을 사용한다.

자동차단기 : 0.13 또는 0.10, 신호등 : 0.33, 0.20 또는 0.60
 수 신호 : 0.67, 교통 신호(우선권 : 0.50, 경계표지 : 1.00)

NCHRP Report 5에서는 자동차단기일 경우와 그 외의 경우로 구분하여 간단하게 위험도 지표를 교통량과의 관계로 나타내었는데, 그 식은 다음과 같다.

○ 제어장치가 자동차단기일 경우

$$EA = \frac{ADT}{100} [0.0086 + 0.00036(ADT)]$$

○ 모든 다른 교통의 제어장치

$$EA = \frac{ADT}{100} [0.00499 + 0.00036(ADT)]$$

ADT = 평균 일교통량 EA = 일년간 기대되는 사고건수

DOT 사고 예측 모형식(U.S. DOT Accident Prediction Equations)은 FRA에서 건널목의 경제성 평가를 위해 개발한 GradeDec 2000에서 사용되고 있는 예측모형으로서, 3단계로 이루어져 있다. 식(1)은 도로교통량과 철도교통량의 상충정도(EI), 주간의 철도교통량(DT), 열차의 최대속도(MS), 선로수(MT), 교차도

로의 포장상태(HP), 교차도로의 차선수(HL)등에 계수(K)를 감안하여 교통시설에 따른 사고율을 예측하는 모형이며, 식(2)는 앞에서 구한 시설에 따른 사고율을 이용하여 해당 건널목의 과거 사고경향까지 고려한 사고율을 예측하는 모형이다. 여기에 사망사고율인 식(3_1)과 부상사고율인 식(3_2)를 이용하여 해당 건널목의 사망사고와 부상사고를 예측한다.

$$a = K \times EI \times MT \times DT \times HP \times MS \times HT \times HL \quad \text{식(1)}$$

$$A = \frac{T_0}{T_0 + T} (a) + \frac{T}{T_0 + T} \left(\frac{N}{T} \right) \quad \text{식(2)}$$

$$P(FA|A) = \frac{1}{1 + CF \times MS \times TT \times TS \times UR} \quad \text{식(3_1)}$$

$$P(IA|A) = \frac{1 - P(FA|A)}{1 + CI \times MS \times TK \times UR} \quad \text{식(3_2)}$$

반면에 우리나라에는 이러한 구체적인 연구는 없었다. 강승규(1995)는 부산지방철도청 산하 465개소에서 1990년 1월부터 1994년 12월까지 5년동안 발생한 건널목 사고에 대한 사고기록을 건널목 종별로 분류하여 사고와 상관관계를 분석하였다. 안내원의 유무, 도로교통량, 철도교통량, 건널목투시거리, 철도와 도로의 교각, 접속도로의 종단구배, 선로수, 열차의 최고속도, 조명설비를 이용하여 사고예측 모형을 구하였다. 이 모형을 사고유무로 구분하기 위해 이항 로짓모형을 사용하였다. 식(4)는 1종 건널목의 사고확률 모형값이며, 식(5)는 2종 건널목의 사고확률 모형값이다.

$$V_1 = k_0 + k_1F + k_2T + k_3S + k_4A + k_5G + k_6V + k_7N \quad \text{식(4)}$$

$$V_2 = k_0 + k_6V + k_4A + k_3S + k_2T + k_5G + k_1L \quad \text{식(5)}$$

이외에, 현재 철도의 투자분석편람과 관련하여 건널목 입체화 효과의 계량화 과업의 일환으로 구체적인 연구가 진행중에 있으며(철도청, 2001), 본 연구도 그러한 과업의 일부로 진행이 된 것이다.

3. 자료정리 및 사고예측 모형

3.1 자료정리

철도건널목 사고통계는 최근 5년간 발생한 자료를 사용해야 하는데, 이는 5년 이전 자료는 주변상황 및 통제설비의 교체등 건널목 특성이 변하기 때문이다. 본 논문에서는 1996년부터 2000년까지의 전국 1776개 건널목에 대한 자료를 1·2·3종으로 구분하여 정리하였으며, 건널목 사고 추이는 <표 1>과 같다.

철도청의 『보선관계규정집』의 건널목 설치 및 설비기준규정에 의하면 교통관제시설과 안내원의 유무에 따라 1종부터 3종까지 분류하여 관리·운영되고 있다. 1종 건널목은 차단기, 경보기 및 건널목 교통 안전표지를 설치하고 차단기를 주·야간 계속작동 시키거나 또는 건널목 안내원이 근무하는 건널목이고, 2종 건널목은 경보기와 건널목 교통안전 표지판을 설치한 건널목이며, 3종 건널목은 건널목 교통안전표지만 설치하는 건널목을 말한다.

표 1. 건널목 사고추이

(단위 : 건)

구분	연도	'95	'96	'97	'98	'99	5개년 평균	전년대비		
		'99	2000	증감						
사고건수		282	172	116	116	95	156.2	95	75	▽20
건널목수		1,953	1,918	1,912	1,887	1,884	1,910.5	1,884	1,779	▽105
종 목 별	1종	13	95	83	104	90	97.0	90	71	▽19
	2종	158	667	30	9	2	53.2	2	2	-
	3종	11	10	3	3	3	6.0	3	2	▽1
원 인 별	직전횡단	199	117	68	69	55	101.6	55	35	▽20
	차단기돌파	27	16	17	19	19	19.6	19	18	▽1
	자동차고장	5	3	-	4	1	2.6	1	-	▽1
	자동차 운전부주의	50	35	29	22	17	30.6	17	20	▲3
	기 타	1	1	2	2	3	1.8	3	2	▽1
사 상 자	사 망	87	46	42	23	21	43.8	21	9	▽12
	부 상	237	179	107	76	42	128.2	42	42	-
	계	324	225	149	99	63	172.0	63	51	▽12

3.2 사고예측 모형

본 논문에서는 미국의 DOT 사고예측 모형의 절차를 따라 3단계로 구분하였다. 먼저 현재 건널목 시설에 따른 사고예측모형을 만들고, 해당 건널목의 과거 사고추이를 반영한 사고모형을 개발하였다. 그 후 사고 1건당 사망자수와 부상자 수를 구하여 건널목의 사망자와 부상자 수를 예측하였다. 분석한 결과 2종과 3종 건널목에 대한 모형식은 자료가 부족하여 비선형 회귀식으로 유도하기 힘들어 1종 건널목만을 대상으로 사고예측 식을 도출하였다. 모형을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

3.2.1 시설에 따른 사고예측

$$acc = a \times e^{(b \times length)} \times e^{(c \times man)} \times \left(\frac{tvol \times rvol}{1000} \right)^d \times e^{(e \times track)} \quad \text{식(6)}$$

위의 식은 열차투시거리(length), 선로수(track), 안내원 유무(man=0:무, 1:유), 열차통과량*교통량(tvol*rvol)을 변수로 하여 현재 시설에서의 사고를 예측하는 모형으로서, Limdep을 이용하여 비선형 회귀식으로 도출하였다. 선형 회귀식으로는 설명력이 너무 떨어져 사용할 수 없었다. 그 외에 열차속도와 차로수, 교차각등을 변수로 사용하고자 하였으나, 통계적으로 의미가 없어 사용하지 못하였다. 이는 변수들간의 상관관계로 인한 것으로 보이며, 추가적인 검토가 필요한 부분이라 하겠다.

표 2. 파라미터 및 t-value

변수	a	b	c	d	e
파라미터	0.0129	-0.0012	-0.9455	0.1929	0.7073
t-value	3.285	-2.213	-3.760	4.485	7.199

3.2.2 최종 사고예측 모형

시설에 따른 사고예측에 건널목의 과거의 사고 특성을 고려하여 해당 건널목에서 장래 사고가 몇건이 발생할지를 예측하는 모형이다. 가중치에서 0.06은 우리나라의 년 평균 사고감소율을 구한 것으로서, 미국의 DOT식에서는 0.05를 사용한 것과 비교된다.

$$A = \frac{T_0}{T_0 + T}(acc) + \frac{T}{T_0 + T} \left(\frac{N}{T} \right) \quad \text{식(7)}$$

$$T_0 = \text{가중치} \left(T_0 = \frac{1.0}{0.06 + acc} \right)$$

$$\frac{N}{T} = \text{그 교차로에서 } T \text{년 동안 관측된 사고건수} N$$

3.2.3 사망자와 사상자의 발생비율

미국 DOT식에서는 건널목 사고의 치명도를 예측하는 식을 사용하였지만, 우리나라에 적용하여 본 결과 우리의 실정에는 잘 맞지 않아 치명도를 예측하는 식을 개발하기보다는 본 논문에서는 사고 1건당 사상자와 부상자가 발생할 비율을 과거 5년간의 사고 자료로부터 구하였다. 1997년도부터 1999년도까지의 사고자료를 분석한 결과 사고 1건당 사망자수는 0.32명이고, 부상자는 0.82명으로 분석되었다. 물적피해에 대한 자료는 분명하지 않아, 본 논문에서는 제외하였다.

4. 모형의 적용

지금까지 구한 모형식을 이용하여 대전지역 건널목 4개소, 부산지역 건널목 4개소에 적용하여, 모형식이 현실을 잘 반영하는가를 살펴보았으며, 또한 미국의 DOT식과도 비교하여 보았다.

표 3. 입력자료

지역	건널목	열차 투시거리	선로수	포장여부	안내원유무	열차통과량	도로환산교통량	5년간 사고수	기준년도 사고수
대전 지역	성남	60	4	1	1	217	19,868	1	0
	신흥	30	4	1	1	194	11,295	1	1
	관암1	10	2	1	1	191	2,790	0	0
	관암2	220	2	1	1	191	17,245	0	0
부산 지역	개금	70	2	1	1	200	163,819	0	0
	가야	50	2	1	1	200	124,680	2	0
	창입구	40	4	1	1	234	773,660	4	2
	범2	200	5	1	1	461	359,587	1	0

표 4. 적용 결과

지역	건널목	시설에 따른 사고예측(1년)		과거추세를 고려한 최종 사고예측(1년)	
		미국 DOT 예측	본논문 예측	미국 DOT 예측	본논문 예측
대전지역	성남	0.235	0.399	0.214	0.260
	신흥	0.198	0.362	0.199	0.252
	관암 1	0.069	0.069	0.043	0.042
	관암 2	0.120	0.076	0.065	0.045
부산지역	개금	0.133	0.142	0.070	0.070
	가야	0.152	0.137	0.277	0.268
	창입구	0.536	0.839	0.733	0.807
	범 2	0.590	1.385	0.293	0.344

실제 건널목의 자료를 적용시켜 본 결과 현실을 어느 정도 반영하는 것을 알 수 있으며, t-test 결과 t-value가 -0.2126으로 실제 사고수와 모형을 이용한 사고예측이 같다는 귀무가설을 기각하지 못하는 것으로 나타났고, 미국 DOT식과도 비슷한 결과를 보였다. 또한 미국의 모형식에서 고려하지 않은 안내원 유무를 고려할 수 있어, 우리의 현실에 더욱 적합한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 추후연구과제

철도 건널목의 입체화의 가장 중요한 고려사항은 안전이다. 건널목의 사고가 감소추세에 있지만, 일단 발생하게 되면 사망사고로 이어질 확률이 높다. 또한 점점 고속화되는 현실에 비추어 볼 때 안전의 중요성이 더욱 강조된다.

본 논문에서는 안내원 유무, 도로교통량 및 철도교통량, 열차투시거리, 선로수를 활용하여 모형식을 예측하였으며, 그러한 식의 예측력을 검토하였다. 건널목의 사고는 이것들 외에도 조명설비, 중단구배, 열차통과 알림시간, 교차각, 도로에서의 시거와 같은 많은 변수들이 사고에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 향후 연구에서는 이러한 변수에 대해서도 고려하여야 할 것이며, 본고에서 고려하지 못한 치명도 모형까지 개발해야 할 것이다. 비록 모든 변수들을 고려하진 못했지만, 본 고에서 제시한 모형식으로도 건널목의 위험도를 파악하는 데는 큰 문제가 없어 보이며, 좀 더 발전시켜 우리나라 전체 건널목의 위험도를 파악하여 개선사업의 우선순위를 선정하는데 도움이 되었으면 한다.

감사의 글

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다.

참고문헌

1. 강승규(1995) 철도건널목의 사고예측모형 개발에 관한 연구, 대한교통학회지, 제13권, 제2호
2. Federal Highway Administration. "Railroad-Highway Grade Crossing Handbook"
3. Farr, E., and J.Hitz, "Accident Severity Prediction Formula for Rail-Highway Crossings"
4. Federal Highway Administration. "Assessment of Risks for High-Speed Rail Grade Crossings on the Empire Corridor"
5. Federal Highway Administration. "GradeDec 2000 Model Reference"