

ETA 및 FTA를 이용한 철도 건널목사고 위험도 평가 모델 개발에 대한 연구

Development of the Risk Assessment Model for Railway Level-Crossing Accidents by Using The ETA and FTA

김민수[†] · 왕종배* · 박찬우* · 조연옥*

Min-su Kim · Jong-Bae Wang · Chan-Woo Park · Yeon-Ok Cho

Abstract In this study, a risk assessment model based on the ETA (Event Tree Analysis) and FTA (Fault Tree Analysis) is developed according to the procedure of hazard analysis and risk assessment in order to estimate the risk quantitatively. The FTA technique is applied to estimate the branch probability (frequency) and the ETA technique is applied to estimate the consequence for each branch path on the ET (Event Tree). A risk assessment model is developed by the combination of those ETA and FTA. In addition, the reliability and the validity of the risk assessment model are verified by comparing the risk estimated through the developed model with the actual equivalent fatality.

Keywords : Railway level-crossing accidents, Risk Assessment, ETA, FTA

요 지 본 연구에서는 철도사고 위험분석 및 위험도 평가절차에 따라 철도건널목사고에 대한 정량적인 위험도평가를 위한 모델을 사건수목 및 고장수목 분석기법을 이용하여 개발하였다. 위험사건이 발생하여 인명피해로 결과하는 과정에서의 영향인자들을 분석하여 사고진전 시나리오를 구성하였으며, 고장수목분석(FTA, Fault Tree Analysis)을 이용하여 시나리오 경로별 발생확률을 산정하고, 사건수목분석(ETA, Event Tree Analysis)을 이용하여 심각도 값을 산정함으로써 이들의 조합으로 위험도를 산정하는 위험도 평가 모델을 제시하였다. 또한 실제발생한 위험도값과 개발모델을 이용하여 산정된 위험도값의 비교를 통하여 개발모델의 신뢰성 및 타당성을 검증하였다.

주 요 어 : 철도 건널목사고, 위험도 평가, 사건수목분석, 고장수목분석

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

철도 건널목사고는 열차와 도로차량이 건널목에서 충돌 또는 접촉하는 충돌사고의 한 형식으로서, 건널목의 설치 구조, 교통특성, 인적요인 등이 복합적으로 작용하여 발생한다[1,2]. 국내 철도건널목 사고의 경우 최근 5년간 매년 평균 36.8건이 발생하여 6.4명의 사망자가 나타나고 있으며, 그 동안 건널목의 입체화, 보안시설의 신설·개량 및 홍보활동 강화 등으로 사고발생 건수 및 사망자의 수가 매년 감소하는 추세를 보이고 있다[3]. 그러나 아직도 철도 건널

목사고는 철도 운전사고의 대부분을 차지하면서 많은 잠재적인 위험요인을 안고 있으며, 만일의 사고발생에 따른 인적·물적 피해 뿐만 아니라 열차지연에 따른 사회적 손실도 크게 나타나고 있다. 또한 철도 건널목사고의 지속적인 안전개선을 위하여 위험분석과 위험도평가를 기반으로 하는 선진 안전관리 시스템 구축에 대한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다[4,5].

본 논문에서는 유럽철도안전지침(RSD), ISO/IEC 및 MIL-Std[6-8] 등 국제표준에서 요구하는 공통안전방법을 따르는 철도사고 위험도 평가 공통절차에 따라 선행 연구되었던 “철도 건널목사고 위험도-발생빈도 평가모델 개발[9]”에 대한 연구 결과를 기반으로 하여 “건널목 간힘”, “경보 중 진입” 그리고 “차단기 우회/돌파” 3가지 형식의 위험사건이 발생하여 결과적인 사고피해 즉, 인명손실을 초래하는 과정에서의 사고진전 시나리오를 사건수

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 철도종합안전기술개발사업단
E-mail : fair0557@hotmail.com

TEL : (031)460-5547 FAX : (031)460-5540

* 정희원, 한국철도기술연구원 철도종합안전기술개발사업단

목(Event Tree)을 이용하여 전개하고, 고장수목(Fault Tree)을 구성하여 사고진전 과정 중에 작용하는 영향인자들의 확인 및 그 고장율(실패율)을 정량적으로 분석한 내용을 제시하고자 한다. 또한 이를 바탕으로 사건수목분석(Event Tree Analysis) 기법을 이용하여 철도 건널목사고의 위험도를 산정하고 이를 실제 발생한 위험도와 비교함으로써 본 연구에서 제시하는 위험도 평가 모델을 검증하고자 한다.

1.2 FTA 및 ETA 기법의 고찰

철도 건널목 시스템의 운영 결과로서 하나 혹은 그 이상의 인명피해가 시스템이나 하부 시스템상에 사망과 관련하여 발생할 수 있는 어떤 결과 유형이 확인되었다면, 그 위험도에 관련된 문제와 정량성을 더욱 상세히 검토하기 위하여 고장수목분석(FTA, Fault Tree Analysis)과 사건수목분석(ETA, Event Tree Analysis) 기법이 유용하며 통용되고 있다[10,11].

고장수목분석(FTA)은 예상치 않은 결과나 정상사건(Top Event)의 가능 원인을 분석하는 기술이다. 게이트(Gate)로 알려진 논리 기호들은 발생하는 고장이나 기본 사건들을 체계화 하는데 사용되며, 정상사건을 일으키는 고장의 조합을 결정하고 정량화하는데 유용하다. 고장수목분석에서 가장 일반적으로 사용되는 게이트는 ‘AND’와 ‘OR’ 게이트로서 ‘AND’게이트는 모든 입력물(Input)의 발생시에만 출력물(Output)의 실패를 가져올 수 있으며, ‘OR’게이트는 어떤 한 부분의 실패만으로도 결과물의 실패를 야기시킬 수 있다. 각각의 기본사건(Basic Event)에 대한 발생가능성을 평가하였다면, 부울대수와 같은 수학 법칙을 사용하여 기본사건의 발생가능성을 각 게이트에 조합하여 정상사건의 발생빈도를 산정하게 된다.

위험도 평가의 맥락에서 사건수목분석(ETA)은 결과의 확인을 위해 사용될 수 있으며, 필요시 특정 위험사건(Initial Event)으로부터 기인할 수 있는 가능한 모든 결과들을 정량화할 수 있는 분석기법이다. 이것은 위험사건이 원치 않는 결과로 진전되는 것을 차단하는 것을 그 목적으로 하는 운영자의 행동이나 시스템 및 부품의 성공과 고장을 고려하여야 한다. 사건수목은 고려되는 운영자의 행동이나 시스템 및 부품의 수가 증가함에 따라 함께 확장될 수 있다. 사건수목이 완전히 전개되었다면, 각 가능 결과의 심각도를 평가 할 수 있다. 발생확률(발생빈도)은 해당 수목의 각 줄기로 할당되며, 이때 사고진전 시나리오에 따라 가능한 각 결과에 대한 위험도와 발생빈도 산정을 위해 위험사건(Initial Event)의 발생빈도와 함께 조합된다.

2. 철도 건널목사고 위험도 평가 모델 개발을 위한 기초 분석

2.1 철도건널목사고 위험사건 정의 및 사고피해 분석

“철도 건널목사고 발생빈도 평가모델 개발[9]”에 대한 연구에서는 철도 건널목사고의 사고발생 특성과 피해심각도 영향인자를 고려하여 철도 건널목사고 위험사건을 다음 3가지 형식의 위험사건으로 정의하고 있다.

- (1) 건널목 간힘 : 도로차량이 열차진입 경보이전에 건널목에 진입하였으나 운전자 부주의나 교통정체 등으로 빠져 나오지 못함. 위험상황의 조기인지로 운전자 탈출/대피 가능성이 높음.
- (2) 경보 중 진입 : 운전자가 교통법규(건널목 통과방법)를 위반하여 열차진입 경보가 울린 이후에 진입. 운전자 탈출/대피 가능성은 보통.
- (3) 차단기 돌파/우회 : 차단기가 내려온 후에 운전자가 고의적으로 차단기를 부수거나 끝단으로 돌아서 진입. 운전자 탈출/대피 가능성이 낮음.

최근 5년간('03-'07년) 한국철도공사 사고조사보고서(KROIS, Korean Railroad Operating Information System) [3]에 등록된 187건의 철도 건널목사고 중 위험도평가에 유효한 184건의 사고에 대한 발생과 피해현황을 위험사건별로 분석하여 Table 1에 제시하였다.

Table 1. The damage status of level crossing accidents('03-'07)

위험사건 - 형식	'03-'07 발생건수		인명피해			사상율(%)			물적 피해 /건	시간 지연 /건	
	누적	평균	死	重	輕	死	重	輕	(천원)	시:분	
건널목 간힘	엔진정지	11	2.2	1	4	2	9.1	36.4	18.2	540	00:15
	보판이탈	13	2.6	0	0	0	0.0	0.0	7.7	5,758	00:25
	출구측차단	9	1.8	0	1	0	0.0	11.1	0.0	435	00:11
	추진/제동부족	3	0.6	0	1	1	0.0	33.3	33.3	2,076	00:12
	한계지장/결립	4	0.8	0	0	0	0.0	0.0	0.0	1,136	00:09
기타	3	0.6	0	0	0	0.0	0.0	0.0	6,271	00:06	
소 계	43	8.6	1	6	3	2.3	14.0	9.3	2,658	00:14	
경보중 진입	위반진입	34	6.8	3	6	10	9.4	18.8	25.0	3,853	00:14
	출구측차단	22	4.4	2	3	13	9.1	18.2	22.7	2,560	00:17
	추진/제동부족	5	1	0	4	16	0.0	80.0	360.0	3,716	00:36
한계지장/결립	4	0.8	0	0	0	0.0	0.0	0	0	00:08	
소 계	65	13	5	13	41	7.9	22.2	49.2	3,146	00:14	
차단기 돌파/우회	돌파진입	23	4.6	4	7	20	18.2	27.3	81.8	8,427	00:25
	우회진입	43	8.6	21	12	15	50.0	30.0	32.5	979	00:13
	출구측차단	2	0.4	1	1	1	50.0	50.0	50.0	3,976	00:16
	추진/제동부족	5	1	0	1	1	0.0	20.0	20.0	768	00:00
한계지장/결립	3	0.6	0	0	1	0.0	0.0	0.0	0	00:16	
소 계	76	15.2	26	21	38	34.7	27.8	45.8	3,283	00:17	
합 계	184	36.8	32	40	82	17.4	22.5	38.2	3,084	00:16	

5년간 184건이 발생하여 사망자 32명, 중상자 40명, 경상자 82명으로 총 154명의 사상자가 발생하여, 사고 1건당 0.84명의 사상자가 발생하였다.

2.2 철도건널목사고 사고진전 시나리오 구성

철도건널목사고에서 위험사건들이 발생하여 사고로 진전되는 전형적인 과정은 Fig. 1과 같으며, 최종 사고결과로는 공중, 여객 및 직원으로 구분되는 3가지 대상에 대한 인명피해로 나타난다. 여기서 운행속도, 제동취급거리, 탑승자 대피, 도로차량의 크기는 철도건널목사고의 인명피해정도를 지배하는 영향인자로서 작용한다[12,13].

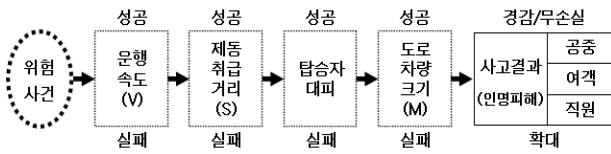


Fig. 1. The develop process of level crossing accidents

2.2.1 열차운행속도와 제동취급거리의 영향

“열차운행속도”와 “제동취급거리”인자들은 열차와 도로차량간의 충돌발생과 충돌규모를 지배하는 핵심영향인자이며, 또한 충돌발생 이전의 운전자 사전대피를 결정하는 인자이다. Fig. 2는 한국철도공사 운영정보시스템(KROIS: Korean Railroad Operating Information System)에 기록된 최근 5년간('03-'07)의 철도건널목사고 187건 중 열차운행속도 및 제동취급거리 정보가 유효한 148건의 사고를 분석하여 열차속도와 제동취급거리(발견거리)에 따른 건널목 충돌사고 발생특성을 보여주고 있다. “열차속도 70km/h 이상”, “제동취급거리 100m 미만”의 영역에서는 총 14건의 사고가 발생하여 2건을 제외한 12건(84.6%)의 사고에서 도로차량 탑승자의 사전대피가 성공적으로 이루어져, 전체 148건의 사고에 대한 사전대피 성공율 33.8%에 비해 그 성공율이 상대적으로 높아 “인명피해가 거의 없는 안전영역”으로 분석되었다.

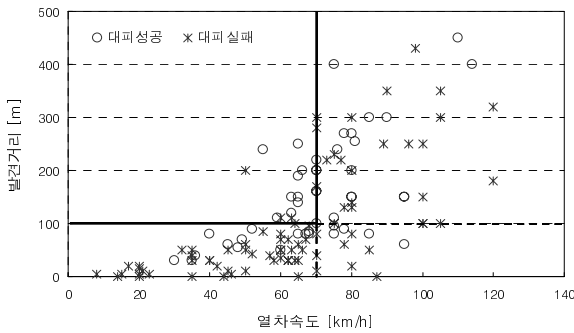


Fig. 2. The relationship between the recognition distance and the train velocity

즉, 70km/h 미만의 속도로 운행하는 열차가 건널목 전방 100m 이상에서 제동취급하여 비상제동이 성공적으로 체결되는 경우 도로차량과의 충돌이 발생하지 않거나 충돌하더라도 충격량이 크게 감소되어 인명피해정도가 감소하게 된다.

2.2.2 도로차량 탑승자의 사전대피

제동 취급(거리)이 미흡한 경우에서 열차와 도로차량의 충돌 발생 이전에 도로차량 운전자가 탈출/대피 시, 열차운행속도와 제동취급거리 및 도로차량 운전자의 상황에 따른 대피시간 확보 및 도로차량 운전자의 신속한 판단 등이 인명피해정도를 지배한다.

2.2.3 열차-도로차량 충돌에너지

철도 건널목에서의 열차와 도로차량의 충돌사고 발생시 열차와 도로차량의 상대적인 중량차이로 인하여 대부분의 충격은 도로차량에 그대로 전달되며, 그 결과 인명피해의 대부분이 도로차량측에서 발생한다. 그러나 일정기준이상의 열차운행속도와 도로차량 크기의 조건에서 철도 건널목사고 발생시에는 여객에 대한 인명피해도 고려하여야 한다.

EU 통합규정인 TSI 4.1.7b의 충돌안전(Passive safety) 규정에서는 Fig. 3과 같은 3가지 충돌사고 시나리오를 제시하고 있으며, 각 시나리오는 운전실이나 전방 객실에서 여객의 사망을 초래할 수 있는 최대가속도 5g까지의 도달 조건들이다[14-16]. 이 중 Scenario 3은 110km/h로 운행하는 열차와 15ton 장애물간의 건널목에서의 충돌사고를 다루고 있다. 본 논문에서는 Scenario 3의 조건과 2.2.1에서의 열차속도 구분 에 대한 연구 내용을 적용하여 열차의 운행속도를 70km/h미만, 70km/h이상~110km/h미만 그리고 110km/h이상 조건을 저속/중속/고속 3가지로 구분하고, 화물 및 탑승자의 중량을 약 5ton으로 감안하여 도로 차량의 공차중량 10ton을 기준으로 소형과 대형 2가지로 구분하여 고속에서의 대형차량과의 접촉에 의한 열차 탑승객 사망 발생가능성과 저속이나 중속에서 도로차량과의 접촉시 열차 탑승객의 부상 발생가능성 두 가지 모두를 고려하고 있다.

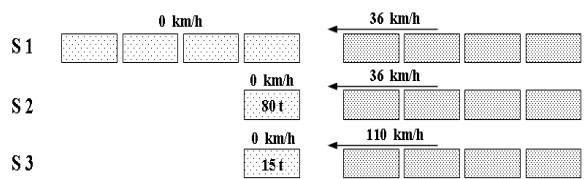


Fig. 3. EU standard accident scenario

2.2.4 사고진전 시나리오 전개 - 사건수목(Event Tree)

Fig. 4는 앞서 설명한 사고로 진전되는 과정에서 사고결과(인명피해)에 영향을 미치는 영향인자들에 대한 분석 내용을 바탕으로 철도 건널목사고 사고진전 시나리오를 사건수목(Event Tree)을 이용하여 전개한 것이다.



Fig. 4. The accident progress scenario of level crossing accidents

“운행속도”를 70km/h와 110km/h를 기준으로 저속/중속/고속 3가지로 구분하여 공중(도로차량 탑승자)과 여객(열차탑승객 및 기관사)에 대한 인명피해를 고려하도록 하였다. 여기서 “제동취급거리”와 “탑승자의 대피” 성공 여부를 공중의 인명피해 발생에 대한 영향인자로 고려하였으며, “도로차량의 크기”는 열차의 운행속도 110km/h 이상에서의 열차와 대형 도로차량의 충돌시 여객의 사망자 발생 여부와 중/저속에서 도로차량과의 충돌시 여객의 부상자 발생여부를 결정짓는 영향인자로서 고려하였다. Fig. 4의 사건수목의 각 분기는 성공(Yes)과 실패(No)로 구분되며, 사고의 진전에 따른 분기확률은 고장수목분석(FTA)을 이용하여 산정하도록 하였다.

3. 사고진전시나리오 분기확률 산정

본 연구에서는 Fig. 4의 사건수목 상단에 위치한 4가지 영향인자들을 각각 고장수목구성을 위한 정상사건(Top Event)으로 정의하고 있다. 정상사건들에 대한 고장률은 현재 국내 철도 건널목사고의 5년간(03-07) 이력자료 분석을 통하여 도출이 가능하나, 그 하부사건(Sub-Event)들에 대한 고장률

을 객관적으로 산출하기에는 그 근거 자료가 충분하지 않아 어려운 것이 현실이다. 이에 본 연구에서는 정상사건에 영향을 미치는 하부사건들을 고장수목을 이용하여 구성하였으며, 사고이력 자료 및 가능한 참고문헌 등을 검토하여 하부사건들의 고장률에 대한 가정값을 도출하였다. 이를 기반으로 고장수목분석(FTA, Fault Tree Analysis)을 수행함으로써 정상사건에 대한 고장률을 정량화하는 모델을 제시하고 있다. 본 연구에서는 고장수목의 구성 및 고장률 산정을 위하여 R-RiskAnalyzer의 R-FTA 모듈[17]을 사용하였다.

3.1 운행속도(70km/h 미만) 초과 분기확률 산정

열차가 운행속도 70km/h 이상으로 운행할 확률을 산정하기 위하여, 정상운행 조건(고속허용)과 제한속도 초과운행 조건(과속운행)으로 구분되는 운행속도 70km/h 이상에 대한 확률을 사고이력 자료로부터 도출하여 고장수목분석을 수행하였으며, 그 내용은 Fig. 5와 같다.

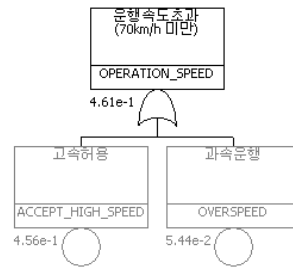


Fig. 5. The FT-diagram of the train velocity(below 70km/h) excess

3.2 제동취급거리(100m 이상) 미급 분기확률 산정

Table 2는 3가지 위험사건(간힘, 진입, 돌파)별로 저속, 중속, 고속으로 구분되는 운행속도조건에서 차단기 우회/돌파 위험사건의 제동취급거리(100m 이상) 미급에 대한 확률 산정을 위해 본 연구에서 제시하는 보조논리이다. 여기서 제동취급거리 미급은 크게 지장발견 실패와 비상제동 실패 두 가지 하부사건에 의해서 발생할 수 있으며, 지장발견 실패는 지장검지실패와 지장인지실패로 구분할 수 있다. 또한 지장검지실패는 다시 자동검지기가 설치된 곳에서의 자동검지기의 고장, 혹은 수동검지기가 설치된 곳에서의 수동조작실패에 의하여 발생한다. 이와 같이 정상사건(Top Event)의 발생에 영향을 미치는 하부사건(Sub Event)들을 파악하고 그 고장률(실패율) 및 설치율을 사고이력 자료 및 가능한 참고문헌 등의 검토를 통하여 산정된 가정값을 Table 2에 제시하였다.

Fig. 6은 저속운행조건에서 차단기 돌파/우회 위험사건의 제동취급거리(100m 이상) 미급에 대한 확률을 Table 2에서 제시한 가정값을 적용하여 고장수목분석(FTA)으로 산정한 사례를 보여주고 있다.

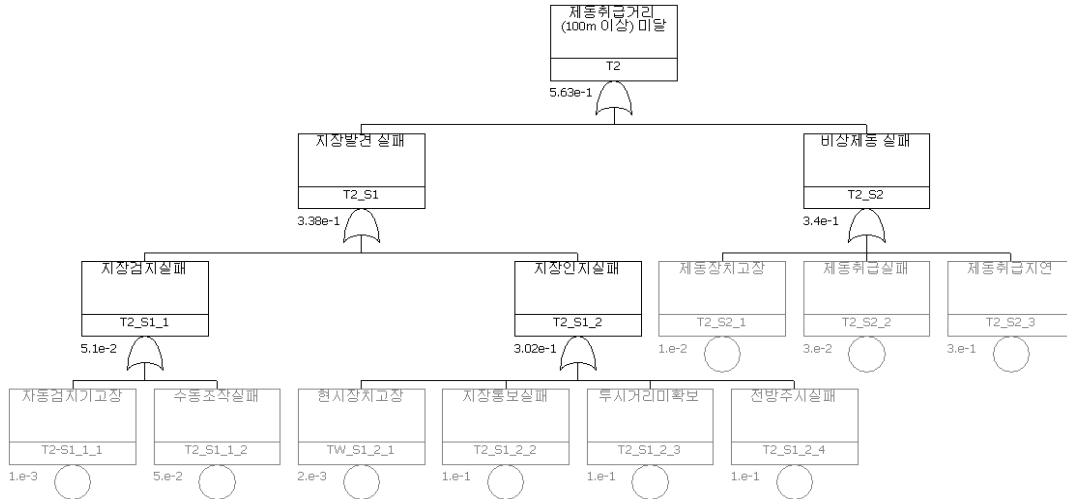


Fig. 6. The example of the FT-diagram for the short braking distance

Table 2. The support logic to estimate the fail rate of the braking distance (over 100m)

TE 1	TE 2	SE 1	SE 2	SE 3	고장율(실패율)			설치율			
					간헐	진입	돌파				
제동 취급 거리 (100m 이상) 미달	지속	지장 발견 실패	지장검지 실패	자동검지기고장	1%	1%	1%	자동검지설치	10%		
				수동조작실패	10%	20%	50%	수동검지설치	10%		
				현시장치고장	1%	1%	1%	지장검지설치	20%		
			지장인지 실패	지장통보실패	20%	30%	50%	최대	20%		
				투시거리미확보	20%	30%	50%	최대	20%		
				전방주시실패	20%	30%	50%	최대	20%		
	비상 제동 실패	제동장치고장	제동취급실패	1%	1%	1%					
			제동취급지연	3%	3%	3%					
			제동취급지연	10%	15%	30%					
			중속	지장 발견 실패	지장검지 실패	자동검지기고장	1%	1%	1%	자동검지설치	10%
						수동조작실패	10%	20%	50%	수동검지설치	10%
						현시장치고장	1%	1%	1%	지장검지설치	20%
지장인지 실패	지장통보실패	25%			40%	60%	최대	20%			
	투시거리미확보	25%			40%	60%	최대	20%			
	전방주시실패	25%			40%	60%	최대	20%			
고속	비상 제동 실패	제동장치고장	제동취급실패	3%	3%	3%					
			제동취급지연	20%	30%	60%					
			고속	지장 발견 실패	지장검지 실패	자동검지기고장	1%	1%	1%	자동검지설치	10%
						수동조작실패	30%	50%	90%	수동검지설치	10%
						현시장치고장	1%	1%	1%	지장검지설치	20%
					지장인지 실패	지장통보실패	30%	50%	90%	최대	20%
투시거리미확보	30%	50%				90%	최대	20%			
전방주시실패	30%	50%				90%	최대	20%			

*TE : Top Event(정상사건), SE : Sub Event(하부사건)

3.3 도로차량 탑승자 탈출 실패 분기확률 산정

Table 3은 위험사건별 운행속도(저속/중속/고속)와 제동 취급거리(100m 이상/미만) 구분에 따른 도로차량 탑승자의 탈출 실패율을 산정하기 위한 보조논리를 보여주고 있다. 여기서 탑승자 탈출 실패는 탑승자의 판단오류, 건널목 관리원 등에 의한 탈출안내실패 그리고 탈출에 필요한 여유 시간 부족 등에 의하여 발생한다. Fig. 7은 차단기돌파/우회

위험사건의 저속운행-제동취급거리 100m 이상 조건에서의 운전자탈출 실패에 대한 확률을 Table 3에 제시된 값을 적용하여 고장수목분석으로 산정한 사례를 보여주고 있다.

Table 3. The support logic to estimate the fail rate of the escape fail

TE 1	TE 2	TE 3	SE	고장율(실패율)					
				간헐	진입	돌파			
저속	제동취급거리 100m이상	탑승자 탈출실패	판단오류	5%	5%	10%			
			탈출안내실패	3%	5%	10%			
			시간부족	5%	10%	15%			
			중속	제동취급거리 100m미만	탑승자 탈출실패	판단오류	5%	5%	10%
						탈출안내실패	3%	5%	10%
						시간부족	10%	30%	40%
중속	제동취급거리 100m이상	탑승자 탈출실패	판단오류	5%	5%	10%			
			탈출안내실패	3%	5%	10%			
			시간부족	10%	30%	40%			
			고속	제동취급거리 100m미만	탑승자 탈출실패	판단오류	5%	10%	15%
						탈출안내실패	5%	10%	15%
						시간부족	30%	50%	65%
고속	제동취급거리 100m이상	탑승자 탈출실패	판단오류	5%	10%	15%			
			탈출안내실패	5%	10%	15%			
			시간부족	30%	50%	70%			

*TE : Top Event(정상사건), SE : Sub Event(하부사건)

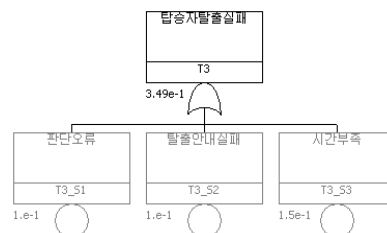


Fig. 7. The example of the FT-diagram for the escape fail

3.4 도로차량 크기(10ton 미만) 초과 분기확률 산정

Fig. 8은 도로차량의 크기가 10ton을 초과할 확률을 초과 허용과 허용한계초과로 구분하고 사고이력자료를 근거로 하여 고장수목분석으로 산정한 것이다.

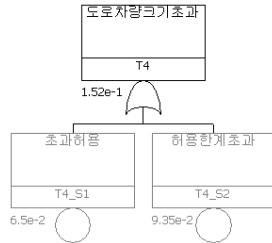


Fig. 8. The FT-diagram for the weight excess of the road vehicle

4. 철도건널목사고 위험도평가모델 구성을 위한 인명피해 산정기준 분석

4.1 공중 및 여객/직원 최대사상인원 산정기준

본 연구에서는 최근 5년간('03-'07) 발생한 철도건널목사고 자료의 분석을 통하여 평균적인 최대사상자 수를 Table 4와 같이 산정하였다.

도로차량의 경우 열차와의 충돌사고 발생시 탑승인원 전체에 대한 인명피해를 고려할 수 있으나, 상대적으로 중량이 큰 열차의 경우 고속운행 중 10ton 이상의 대형 도로차량과의 충돌시 여객 및 기관사의 사망을 고려할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 여객열차의 경우 기관사 1명과 열차진행방향의 첫 번째 객차 1열의 4석 탑승자를 그 피해 대상으로 간주하였으며, 화물열차의 경우 기관사 1명을 피해 대상으로 간주하였다.

Table 4에서와 같이 도로차량의 최대 사상자수는 평균 사상자 수인 1.93명으로 산정하였으며, 열차의 평균 최대 사상자수는 여객열차와 화물열차의 점유율을 고려하여 3.85명으로 산정하였다.

Table 4. The estimation of the maximum number of casualties for the road vehicle and the train

구분	'03-'07년 발생 건수	사고 점유율(%)	최대 사상자수		
			탑승기준(명)	사상자평균(명)	
도로차량	승용차	87	47.3	2	0.95
	승합차	8	4.3	4	0.17
	화물차	60	32.6	1.5	0.49
	버스	1	0.5	20	0.11
	오토바이	28	15.2	1.5	0.23
	합계	184			1.93
열차	여객열차	131	71.0	5명	3.56
	비여객열차	53	29.0	1명	0.29
	합계	184			3.85

4.2 사고상태 구분 및 사상을 산정기준

3가지 형식의 위험사건들을 사고이력자료로서 분석한 결과 '무손실, 경미, 보통, 심각, 재난, 파국'의 6등급으로 사고상태를 구분 함으로써 전체적인 인명피해의 산정에 사고이력자료 분석을 통하여 얻은 실제 인명피해의 값에 근사하게 분석됨을 확인하였으며, 본 연구에서는 철도건널목사고의 사고상태를 Table 5와 같이 구분하여 제시하였다.

Table 5. The classification of accident states and the estimation of casualty percentages

사고 상태		사상율(%)		
		사망	중상	경상
1st	무손실(N)	0	0	0
2nd	경미	0	20	80
3rd	보통	20	30	50
4th	심각	30	30	40
5th	재난	40	30	30
6th	파국	60	30	10

5. 철도건널목사고 위험도 평가모델 사례 검증 및 타당성 검토

위험도는 연간 위험사건의 발생빈도와 초래되는 결과심각도(등가사망자)의 곱으로서 구할 수 있다[10,11,18]. 또한 본 연구에서는 유럽 ERA(European Railway Agency)의 공통안전방법(CSM)[5] 등을 참조하여 사망자 1명=중상자 10명=경상자 100명의 등가사망자(EF, Equivalent Fatality)지수로 환산하여 철도건널목사고에 대한 심각도 및 위험도 값을 산정하였다.

5.1 철도건널목사고 위험도평가모델 사례 검증

철도건널목사고 위험도평가 모델은 고장수목분석 기법을 통하여 산정된 철도건널목사고 사고진전 시나리오 경로별 발생확률(발생빈도)과 사건수목분석기법을 통해 산정된 인명피해도(심각도)를 곱하여 산정하였다.

Fig. 9는 철도건널목사고-차단기 돌파/우회 위험사건을 사건수목분석(ETA) 및 고장수목분석(FTA)을 적용하여 위험도를 산정한 "철도 건널목사고 위험도 평가모델"의 적용사례이다. 여기서 발생확률(발생빈도)값은 차단기 돌파/우회 위험사건의 5년간('03-'07년)의 연평균 사고건수 15.2건을 기준으로 하여 그 발생확률(발생빈도)값을 도출한 것이다.

5.2 철도건널목사고 종합 위험도 평가 및 타당성 검토

본 연구에서 개발한 위험도 평가모델의 타당성을 검토하기 위하여 개발 모델로 산정된 인명피해와 Table 1에 제시

하였던 한국철도공사의 5년간('03-'07년) 사고조사보고서에 등록된 실제 발생한 인명피해를 등가사망 위험도로 환산하여 비교한 결과를 Table 6에 제시하였다. 건널목 간힘 위험사건의 경우 개발모델로 산정한 등가사망환산 연평균 위험도는 0.32명으로 실제 발생한 등가사망환산 위험도인 0.326명과 근사하게 산정되었다.

Initiating Event	운행속도	제동취급거리	운전자	도로차량크기	발생확률 (발생빈도)	사고상태		위험도 등가사망	
	고/중/저	100m 이상	탈출	10ton 미만		공중	여객		
차단기 돌파/우회 15.2건/년	저속 5.39E-01	Y 6.51E-01	Y 8.48E-01	Y 8.48E-01	1.976E+00	무손실	무손실	0.000E+00	
				N 1.52E-01	3.543E-01	무손실	무손실	0.000E+00	
			Y 4.37E-01	Y 8.48E-01	1.060E+00	보통	무손실	4.325E-01	
			N 3.49E-01	N 1.52E-01	1.899E-01	보통	무손실	7.753E-02	
		N 5.63E-01	Y 4.04E-01	Y 8.48E-01	1.580E+00	무손실	경미	3.703E-03	
				N 1.52E-01	2.832E-01	무손실	경미	6.638E-04	
			Y 5.96E-01	Y 8.48E-01	2.331E+00	심각	경미	1.098E+00	
			N 1.52E-01	N 1.52E-01	4.179E-01	심각	경미	1.969E-01	
		중속 4.26E-01	Y 2.18E-01	Y 4.04E-01	Y 8.48E-01	4.835E-01	무손실	경미	1.133E-03
					N 1.52E-01	8.666E-02	무손실	경미	2.031E-04
				Y 5.96E-01	Y 8.48E-01	7.133E-01	심각	경미	2.846E-01
				N 1.52E-01	N 1.52E-01	1.279E-01	심각	경미	5.102E-02
	Y 2.11E-01		Y 8.48E-01	Y 8.48E-01	9.058E-01	무손실	경미	2.123E-03	
				N 1.52E-01	1.624E-01	무손실	경미	3.805E-04	
			Y 7.82E-01	Y 8.48E-01	3.387E+00	재난	경미	2.603E+00	
			N 1.52E-01	N 1.52E-01	6.071E-01	재난	경미	4.665E-01	
	고속 3.51E-02		Y 6.50E-02	Y 8.48E-01	1.970E-03	무손실	경미	4.616E-06	
				N 1.52E-01	3.531E-04	무손실	경미	8.274E-07	
			Y 6.70E-02	Y 8.48E-01	2.833E-02	재난	경미	2.138E-02	
			N 9.35E-01	N 1.52E-01	5.079E-03	재난	경미	3.832E-03	
	합계	Y 1.60E-02	Y 8.48E-01	6.752E-03	무손실	경미	1.582E-05		
			N 1.52E-01	1.210E-03	무손실	보통	2.380E-05		
		Y 9.84E-01	Y 8.48E-01	4.152E-01	파국	경미	4.966E-01		
		N 9.33E-01	N 1.52E-01	7.443E-02	파국	보통	9.029E-02		
합계					15.20E+00			5.830E+00	

Fig. 9. The risk estimation through ETA - "Breaking through and detouring the barrier"

경보중 진입 위험사건의 경우 개발모델로 산정한 등가사망환산 위험도는 1.55명으로 실제 발생한 등가사망환산 위

험도인 1.34명 보다 약간 높게 산정되었다. 차단기 돌파/우회 위험사건의 경우 개발모델로 산정한 등가사망환산 위험도는 5.83명으로 실제 발생한 등가사망환산 위험도인 5.7명 보다는 약간 높게 산정되었다.

위험사건 형식별로 개발모델에 의해 산정된 인명피해와 실제 발생한 인명피해를 등가사망지수(사망1:중상10:경상100)로 환산하여 위험도 평가결과를 비교하였으며, 각각의 위험사건을 종합한 등가사망 위험도는 개발모델에서 7.63명으로 산정되어 실제 발생한 등가사망환산 위험도인 7.36명 보다 근사하게 높게 산정되었다. 이는 실제사고이력에서는 발생하지 않은 여객의 인명피해를 개발모델에서는 고려하고 있기 때문이다. 본 연구에서는 개발된 철도건널목 사고 위험도평가모델을 통하여 산정된 위험도와 실제 발생한 위험도의 비교를 통하여 평가모델의 타당성과 신뢰성을 확보하고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 유럽철도안전지침(RSD)과 ISO/IEC, MIL-Std 등 국제표준규격이 요구하는 국제적인 공통안전 방법을 따르는 철도사고 위험분석 및 위험도평가 절차에 따라 선행되었던 "철도건널목사고 발생빈도 평가모델 개발"에 대한 연구결과를 기반으로 하여, "건널목 간힘", "경보중 진입", "차단기 돌파/우회" 3가지 형식의 위험사건이 결과적인 사고피해 즉 인명손실을 초래하는 과정에서 영향을 주는 인자들을 분석하였으며, 이를 바탕으로 철도 건널목사고 사고진전 시나리오를 개발하였다. 또한 사고진전 시나리오를 골격으로 고장수목분석(FTA) 및 사건수목분석(ETA) 기법을 이용하여 철도 건널목사고의 인명피해에 영

Table 6. The comparison of the estimated risk with the actual equivalent fatality

위험사건 형식		개발모델 인명피해(위험도)				*실제발생 인명피해(위험도)			
		사망	중상	경상	등가	사망	중상	경상	등가
건널목 간힘 (8.6건)	운전자	2.57E-01	4.08E-01	9.53E-01	3.08E-01	2.00E-01	1.20E+00	6.00E-01	3.26E-01
	여객	8.27E-05	8.60E-02	3.44E-01	1.21E-02	0	0	0	0
	합계	2.57E-01	4.94E-01	1.30E+00	3.20E-01	2.00E-01	1.20E+00	6.00E-01	3.26E-01
경보중 진입 (13건)	운전자	1.34E+00	1.61E+00	2.81E+00	1.53E+00	1.00E+00	1.80E+00	3.60E+00	1.22E+00
	여객	1.75E-04	1.42E-01	5.66E-01	2.00E-02	0	8.00E-01	4.60E+00	1.26E-01
	합계	1.34E+00	1.75E+00	3.38E+00	1.55E+00	1.00E+00	2.60E+00	8.20E+00	1.34E+00
차단기 돌파/우회 (15.2건)	공중	5.30E+00	4.52E+00	5.26E+00	5.80E+00	5.20E+00	4.20E+00	6.80E+00	5.69E+00
	여객	1.27E-03	1.95E-01	7.76E-01	2.85E-02	0	0	8.00E-01	8.00E-03
	합계	5.30E+00	4.72E+00	6.03E+00	5.83E+00	5.20E+00	4.20E+00	7.60E+00	5.70E+00
인명피해 총계		6.83E+00	6.92E+00	1.07E+01	7.63E+00	6.40E+00	8.00E+00	1.64E+00	7.36E+00

*실제발생 인명피해(위험도) 출처 : 한국철도공사 사고자료 ('03-'07년), Table 1 참조

향을 주는 인자들을 확인하고 정량적인 위험도평가를 수행할 수 있는 “철도 건설목사고 위험도 평가모델”을 개발하였다. 이를 이용하여 철도 건설목사고 위험사건들에 대한 위험도를 산정함으로써 개발모델의 타당성을 확보하였다. 또한 실제 발생 위험도와 개발모델을 통해 산정된 위험도를 비교하여 개발모델의 신뢰성을 확보하였다.

이후 본 연구에서 적용된 고장수목분석에서 분기확률 산정을 위해 이용된 가정값에 대한 더 많은 연구를 수행하고, 여객, 공중, 직원에 대한 최대사상인원 산정에 이용된 차종별 사고발생건수에서 도로차량 차종별 건설목 통과횟수 등에 대한 자료를 획득하여 해당 발생건수를 정규화함으로써 개발 모델의 신뢰성을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 국내 철도산업에서 체계적인 위험분석과 정량적인 위험도 평가를 통해 합리적이고 실행 가능한 수준으로 위험도를 통제할 수 있는 비용-효율적인 안전대책을 선정하고 위험추적 시스템을 구축하여 지속적인 안전개선을 도모하는 철도시스템 안전관리 선진화에 본 연구가 기여하기를 기대한다.

후 기

본 연구는 국토해양부 지원, 한국건설교통기술평가원 전담, 한국철도기술연구원 주관의 철도종합안전기술개발사업 철도사고 위험도 분석 및 평가체계 구축과제('05-'09년)로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원(2003), “철도건설목 위험요인 분석 및 개량 방안 연구.”
 2. Roman Slovak(2007), “SELCAT - Concept of level crossing safety performance monitoring,” IRSC.
 3. 한국철도공사(2003-2007), “운전사고 및 운전장에 월보.”
 4. 국토해양부(2004), “철도안전법,” 제 7245호.
 5. European Parliament and of the Council(2008), “Safety management in railway, D.2.3:Common safety methods.”
 6. European Parliament and of the Council(2004), “Railway Safety Directive 2004/49/EC”
 7. ISO/IEC Guide 51(1999), “Safety aspect-guidelines for their inclusion in standards”
 8. US DOT(1993), “Military standard : System safety program requirements, MIL-STD-882C/”
 9. 김민수, 왕종배, 박찬우, 최돈범(2009), “철도건설목사고 위험도-발생빈도 평가모델 개발,” 한국안전학회지, 제 24권, 제 3호, pp. 96-101.
 10. Rail Safety and Standard Board(2002), Railway Group Guidance Note GE/GN8561, “Guidance on the preparation of risk assessments within railway safety cases.”
 11. Rail Safety and Standard Board(2009), “Guidance on the preparation and use of company risk assessment profiles for transport operators.”
 12. 한국철도기술연구원(2006-2009), “철도사고 위험도분석 및 평가체계구축.”
 13. 김민수(2009), “철도건설목사고 위험도평가 모델개발에 대한 연구,” 석사학위 논문.
 14. BSI(2005), “Draft EN 15227 railway applications - crashworthiness requirements for railway vehicle bodies.”
 15. European Railway Agency, “Technical specification for interoperability 4.1.7 - Mechanical boundary characteristics for rolling stock (BP15)”.
 16. 국토해양부(2008), “철도차량 안전기준에 관한 지침 제 16조 별표 13.”
 17. 박찬우, 왕종배, 광상록, 박주남, 장승철(2006), “철도 위험도평가 SW 및 사고분석 프로그램 개발에 관한 연구,” 한국안전학회 추계학술대회, pp.148-153.
 18. 박찬우, 왕종배, 조연옥(2009), “철도사상사고 위험도평가를 위한 사고 시나리오 모델 개발에 관한 연구,” 한국안전학회지, 제 24권, 제 3호, pp.79-87.
- 접수일(2009년 8월 17일), 수정일(2009년 9월 10일),
 게재확정일(2009년 11월 12일)