고장 수목 분석을 이용한 철도 차량 일탈 사고 원인 연구

A Study on Cause Analysis of Derailment Accident Using Failure Tree Analysis

임재훈* · 최영진** · 이경용*** · 장영익**** · 임남형***** · 공정식*****

Lim, Jaehoon* · Choi, Youngjin** · Lee, Kyungyong*** · Jang, Youngik**** · Lim, Namhyoung*****,
and Kong, Jungsik*****

Abstract

While there has been a growing interest in the large-scale disaster, the demand in safety is also increased. In addition, because of the importance of the railway industry, the expansion of railway industry are steadily on an upward trend, such as the expansion of new railways and speed up of conventional railways; however, the derailment is constantly reported. Therefore, this study explains the case of derailment in both Korea and other countries and analyze the probability of occurrence for derailment using Failure Tree Analysis.

Key words : Railroad Accident, Derailment, Fault Tree Analysis, Safety Disaster Mitigation

요 지

최근 대형 재난 재해 사고에 대한 관심이 증대하면서, 사회적으로 안전에 대한 요구치가 증가하고 있다. 동시에 국내외 철도 산업의 중요성이 커지는 경향으로 인해, 신규노선 확대 및 기존노선의 고속화 등의 철도 산업의 확대가 이루어지고 있는 추세이지만, 철도 차량 일탈 사고는 꾸준히 발생하고 있다. 본 연구에서는 국내외 철도 차량 일탈 사고 사례를 조사하고, 사고 고장 수목도 작성을 통하여, 철도 차량 일탈 사고의 원인별 발생 확률에 대하여 분석을 수행하였다.

핵심용어 : 철도사고, 탈선사고, 결함수목도, 안전방재

1. 서 론

1.1 연구의 배경과 목적

최근 에너지의 효율적인 사용에 대한 관심이 부각되면서, 철도 교통과 철도 안전에 대한 관심 또한 증가하고 있다. 일반적으로 철도사고는 발생 빈도는 낮지만 그 피해의 정도

가 여타 다른 사고보다 큰 재난사고로 발전할 가능성이 높기 때문에, 정부차원의 정책 수립 및 연구단체의 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

국토교통부에서 발표한 제3차 철도안전종합계획에 따르면, 최근 국내 철도사고는 신규노선 확대 및 기존노선의 고속화 등의 철도산업 확대에 따라 일반철도의 사고와 장애

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: limccy@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정

Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정

Master Course, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

****고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정

Master Course, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

*****정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

*****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3323, Fax: +82-2-3290-5999, E-mail: jskong@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

는 감소하고 있으나 고속철도와 도시철도는 운행거리의 증가 등으로 인하여 사고와 장애가 정체인 추세에 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 하지만, 교통안전공단이 발표한 자료에 따르면 국내 탈선사고는 2011년부터 2016년까지 연평균 4.7건씩 꾸준히 발생하고 있어(Korea Transportation Safety Authority, 2016) 철도 탈선 사고에 대한 사회적 불안감이 높아지고 있는 실정이다.

해외의 경우, 유럽연합에서는 지난 2014년까지 RSSB(Rail Safety and Standards Board)를 비롯한 유럽 전역의 20개 기관의 공동 연구단체인 D-RAIL Consortium을 구성하여 열차 탈선 사고에 대한 연구를 진행하였으며(D-RAIL, 2011~2014), 미국 또한 Illinois University 및 7개 대학의 공동연구단체인 NU-Rail Center(The National University Rail Center)를 비롯한 여러 연구단체에서 열차 사고 및 탈선사고 등에 대한 연구(Liu, X. et al., 2013)를 진행 하였다.

하지만, 해외의 경우 철도를 이용한 화물 수송의 비중이 높고, 운행속도, 지리적 조건 등의 운영환경과 사고 분류 체계 등이 국내와 차이하기 때문에 연구에 대한 결과를 국내 실정에 맞게 반영하기에 어려움이 발생한다.

국내의 경우, 철도기술연구원에서 전반적인 열차 사고에 대하여, 사고 원인 및 인적 피해 양상에 대하여 연구가 진행되었다(KRRI, 2011). 하지만, 이는 인적 피해 정도에 대한 접근에 그쳐 사고 발생 시 일어나는 사회 경제적 피해에 대한 부분은 다소 미비한 실정이다. 또한, 교통안전공단은 매년 철도사고의 발생현황 및 통계분석과 안전성능보고서, 5년 단위의 철도 사고 및 안전성능 분석 보고서(Korea Transportation Safety Authority, 2016)를 통하여, 전체 철도사고의 운영기관, 노선, 지역 등의 구분에 따른 열차 사고의 빈도 및 주요 위험사건과 같은 광범위한 통계자료를 제공하고 있으나, 철도사고의 각 종류 별 위험사건에 대한 접근은 따로 고려하지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는, 이러한 기존 연구를 보완하기 위하여, 최근 국내외 탈선사고 사례를 조사하였다. 또한, 탈선사고의 고장 수목 분석(FTA, Fault Tree Analysis)을 수행하고, 주요 위험 요인 및 세부 위험요인별 발생확률을 확인하였다. 본 연구의 결과는 추후 사회·경제적 피해를 고려한 철도 차량 일탈 사고 등급화 연구에 적용될 예정이다.

2. 철도 차량 일탈 사고 분석

2.1 국내외 철도 차량 일탈 사고 사례분석

본 장에서는 국내외 철도 차량 일탈 사고 사례를 분석하였다. 철도 차량 일탈 사고는 철도 차량이 탈선 이후 궤도 영역 외로 과도하게 벗어나는 것을 의미한다. 본 연구는 철도 차량 일탈 사고의 원인에 대하여 분석하기 위해, 국내외 탈선사고의 사례를 수집 및 조사하고, 이를 바탕으로 사고 고장 수목 분석(FTA, Fault Tree Analysis)을 진행하였다. 그리고 최종적으로 주요 원인이 되는 위험사건의 발생 확률을 산정하였다.

2.1.1 해외 철도 차량 일탈 사고 사례분석

해외 철도 차량 일탈 사고 분석을 위하여 미국, 영국, 유럽, 호주, 일본의 사고사례를 각국의 관련 기관에서 발행한 탈선사고의 간략 보고서 및 상세 보고서 등의 수집을 통하여 분석을 수행하였다.

미국의 경우, 미국 연방 철도국(FRA, Federal Railroad Administration)이 철도 사고의 데이터의 수집 및 보존을 위하여 안전처(Office of Safety Analysis) 웹사이트를 통해 공개하고 있는 사고 DB를 통하여 16년 동안(2001년-2016년) 발생한 탈선사고 중 화물열차 사고를 제외한 여객열차 사고 총 615건의 사고 데이터를 수집, 분석하였다.

영국은 철도사고 발생시, 안전보건청(HSE, Health and Safety Executive), 철도안전표준위원회(RSSB, Rail Safety and Standards Board), 철도사고조사위원회(RAIB, Rail Accident Investigation Branch)에서 철도 사고에 대한 조사보고서를 발행하며, 27년간(2001년-2016년) 발생한 145건의 사고 보고서 데이터를 수집, 분석하였다. 유럽의 경우, 각국의 철도사고조사위원회에서 조사된 결과를 유럽연합 내 철도위원회(European Railway Agency)를 통해 취합하여 유럽 철도 사고 정보 DB 사이트(ERAIL, European Railway Accident Information Links)를 통하여 공개하고 있다. 이를 통하여 총 13년간(2004년-2016년) 발생한 탈선사고 사례 중 화물 열차 사고사례를 제외한 여객열차 사고사례에 대한 총 249건의 사고보고서 데이터를 수집 분석하였다.

호주의 경우, 호주교통안전국(ATSB, Australian Transport Safety Bureau)에서 16년간(2001년-2016년) 발행한 총 69건의 탈선 사고 보고서 데이터를, 일본의 경우, 일본 교통안전국(Japan Transport Safety Board)에서 9년간(2007년-2015년) 발행한 총 38건의 사고 보고서 데이터를 수집 분석하였다.

미국의 경우, 철도 사고 발생의 주요 원인을 운영 상 결함, 기계적/전기적 결함, 시설물 결함, 신호 및 통신체계 결함, 기타결함의 5가지 주요 원인으로 나누어 분류하고 있으며, 각각의 주요 분류 체계 별 상세 원인에 대하여 추가적인 분류체계를 가지고 있는 것을 확인하였다. 영국과 유럽, 호주 또한 세부적인 위험사건 선정에 대하여 약간의 차이가 존재하나, 대체적으로 전체 사고 발생의 원인에 대하여 4-5 가지 주요원인으로 우선 분류하고, 분류 체계 별 상세 원인에 대하여 추가적인 요인을 선정하여 철도 사고의 원인에 대한 판단을 수행하는 것으로 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 각국의 철도 탈선사고 사례를 인적 결함, 기계 전기적 결함, 시설 결함, 신호 및 통신체계 결함, 기타 결함으로 사고의 주요 원인을 분류하여, 각각의 원인별 발생빈도를 Fig. 1과 같이 확인하였다. 모든 국가에서 대체적으로 비슷한 경향성을 보였으나, 일본의 경우, 지진 및 폭설, 폭풍 등과 같은 자연재해에 의한 탈선사고가 주된 원인으로 확인되어 경향성이 다르게 보임을 확인할 수 있었다.

(a) USA (2001~2016)

(b) UK (1990~2016)

(c) European Unites (2004~2016)

(d) Australia (2001~2016), Japan (2007~2015)

Fig. 1. The Number of Derailments by Major Causes

2.1.2 국내 철도 차량 일탈 사고 사례분석

국내에서는 철도 탈선 사고의 발생 시 항공·철도사고 조사에 관한 법률 제2조 제1항 제6호에 따라 국토교통부 산하 항공철도사고조사위원회의 조사가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 2006년부터 2015년까지 발생한 총 56건의 탈선사고보고서를 수집, 분석하였다.

Fig. 2. The Number of Derailments by Major Causes [ARAIB, Korea]

국내의 경우 탈선사고의 한국철도공사에서 정한 위험사건목록 표준코드(Korail, 2010)에 따라, 진로구성결함, 운전취급결함, 선로결함, 장애물, 주행 장치 결함, 하중분포불량, 기타 탈선 등으로 세부적인 위험사건을 포함한 주요 위험사건으로 분류하지만, 해외의 탈선사고 원인 분류체계보다 체계적 분류가 미흡하다고 판단, 본 연구에서는, 앞서 해외 사례 분석에서 사용된 5가지 주요 원인별 탈선사고의 발생빈도를 Fig. 2와 같이 확인하였으며, 국내의 경우, 시설

정비 불량, 차량 정비 불량, 신호제어 불량 등의 인적결함의 빈도가 상대적으로 다른 국가에 비해 높은 것으로 확인되어진다.

2.2 사고 원인 및 발생 확률 분석

2.1에서 조사한 바와 같이 사고 원인은 크게 시설 결함, 전기적·기계적 결함, 신호 및 통신체계 결함, 인적 결함, 기타 결함으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 이를 각각 시설 결함, 차량 결함, 신호 결함, 인적 결함, 기타 결함으로 재설정하고 각각의 결함 항목에 대하여 고장 수목 분석(Fault Tree Analysis)을 수행, 각각의 결함 항목에 대한 세부 원인을 선정하고, 발생 확률을 산정하였다.

2.2.1 고장 수목 분석(FTA, Fault Tree Analysis)

고장 수목 분석 기법(FTA, Fault Tree Analysis)은 어떠한 사고가 발생하였을 때, 사고에 대한 가능 원인을 분석하는 일반적인 기법이다. 이는 특정한 사고의 발생에 대하여 관여하는 사건(Event)들에 대하여, 먼저 주요사건(Top Event)에 대하여 정의하고, 주요 사건에 인과관계를 가지는 중간 사건(Intermediate Event)이나 기본사건(Basic Event)의 사이에서 게이트라고 불리는 논리 연산자를 이용하여 분석하는 연역적 사고방식의 분석기법이다. 일반적으로 사용되는 게이트로는, 하위의 모든 사건(Input)이 동시에 발생 할 경우에만 상위의 사건(Output)의 발생이 가능한 AND Gate와, 하위 사건 중 하나만 발생하더라도 상위 사건이 발생하는 OR Gate가 있으며, 기본사건의 발생가능성을 각 게이트에 조합

하여 주요사건에 대한 발생빈도를 산정하게 된다(Korean Standard, 2003; Kim et al., 2009).

2.2.2 고장 수목도(Fault tree) 작성

D-Rail Project의 일환으로 DNV(Det Norske Veritas)에서는 화물열차의 탈선사고 원인을 파악하고 리스크 모델을 수립하기 위하여 시설 결함, 차량 결함, 인적 결함에 대하여 고장 수목 분석을 수행하였다(DNV, 2011). 하지만, 이는 화물 열차의 탈선사고에 국한되어 있으며, 앞서 2.1절에서 확인한 주요 결함인 신호결함 부분이 인적결함으로 포함되어져 있어 정확한 파악이 어렵다.

따라서 본 연구에서는, 고장 수목도 작성을 위하여, 철도차량 일탈 사고를 주요사건(Top Event)으로 선정하고, 사고 사례 분석을 통하여 얻어진 주요 사고 원인 분류인 시설 결함, 차량 결함, 신호 결함, 인적 결함을 중간사건(Intermediate Event)으로 Fig. 3과 같이 정의하였다. 이때 기타 결함의 경우, 선로 난입(차량 등), 기후에 의한 재난, 충돌에 의한 탈선 등의 여러 요인이 존재하지만, 국내에서는 발생빈도가 낮거나, 여타 다른 결함요인 항목에 포함되는 경우가 많기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않기로 하였다. 또한, 모든 중간사건 및 기본사건(Basic Event)들은 하나만 발생하더라도 상위 사건의 주요 원인으로 작용할 수 있기 때문에, OR Gate를 사용하였다.

Fig. 3. Intermediate Events of Accident by Derailment

인적 결함의 경우, 시설 정비 불량, 차량 정비 불량, 운전 불량, 신호제어 불량, 외부 인적 오류로 나눌 수 있다. 하지만, 시설 정비 불량과 차량 정비 불량, 신호제어 불량의 경우 각각 시설 결함과 차량 결함, 신호 결함의 기본 사건이 되는 일부 항목의 원인이 되기 때문에, 본 연구에서는 운전 불량과 외부 인적 오류를, 각각 인적결함의 중간사건과 기본사건으로 선정하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. 이때, 인적 오류 항목에서 제외된 항목들은 오류로 인한 결과를 추후 2.2.3절에서 각 항목의 발생 확률에 포함시키는 방식으로 분석을 수행하여 반영하였다.

시설 결함의 경우, 분기기부 결함, 노반부 결함, 레일결함, 기타 시설 결함으로 분류할 수 있었으며, 각 결함 항목에 대하여 기본사건을 Fig. 5와 같이 선정하였다.

신호 결함의 경우, 신호 및 전달 체계 오류, 폐색 장치 오류, 신호 장비 결함으로 선정하고 기본사건을 Fig. 6과 같이 선정하였다.

차량 결함의 경우, 동력차 결함, 객차 결함, 차량 연결부 결함으로 분류하며, 동력차 결함과 객차 결함의 경우, 각각 대차 결함, 차륜·차축 결함, 차량부 결함으로 중간사건을 선정하고, 각각의 중간사건 별 기본사건을 Fig. 7과 같이 선정하였다.

이렇게 구성된 철도차량 탈선사고의 고장 수목도 전체는 Fig. 8과 같다.

Fig. 4. Basic Events of Human Factor

Fig. 5. Basic Events of Structural Failure

Fig. 6. Basic Events of Signal Error

Fig. 7. Basic Events of Rolling Stock

2.2.3 국내외 철도 차량 일탈 사고 원인 비교 분석

기본사고 발생 확률의 신뢰도 확보를 위하여, 많은 정량적 사례가 필요하지만, 철도 차량 일탈 사고는 발생 사례의 빈도가 크지 않다. 따라서 본 절에서는 2.2에서 수집한 철도 탈선사고 사례와 2.2.2에서 구성한 고장 수목(Fault Tree)을 이용하여, 국내외 미국, 영국, 유럽의 철도 차량 일탈 사고에 대한 고장 수목 분석(Fault Tree Analysis)을 수행하고 각 기본사건과 중간사건의 확률을 산정, 비교하였다.

본 연구에서 기본사건들은 각각의 해당 상위 중간사건에 대하여 Fig. 9와 같이 OR Gate의 논리 연산자로 연결되어 있으며, Eq. (1)을 통해 계산할 수 있다.

Fig. 9. A Basic Model of OR Gate

$$P = 1 - (1 - P_A) \times (1 - P_B) \quad (1)$$

P : Occurrence probability of Intermediate Event

P_A, P_B : Occurrence probability of Basic Event

Fig. 8. Fault Tree of Accident by Derailment

국내 선로 결함의 확률 산정을 예로 들면, 기본사건인 정렬 불량, 레일 체결구 불량, 기타 결함이 각각 0.1965, 0.0179, 0.0357의 확률을 가진다. 각각의 기본사건(Basic Event)의 확률은 Eq. (1)을 이용하여 중간사건(Intermediate

Event)인 궤도 결함에 대한 확률은 0.2390으로 산정된다. 이와 동일한 방식으로 철도 차량 일탈 사고의 기본사건과 중간사건의 발생확률을 Table 1과 같이 산정하였다.

Table 1. Probability of Occurrence Using Fault Tree Analysis about Derailment Accidents

Cause main categories (Intermediate Event)			Cause (Basic event)		Probability of occurrence							
					Korea (ARAIB)		USA (FRA)		UK (HRA, RSSB, RAIB)		EU (ERAIL)	
Structural Failure	Roadbed Failure		Roadbed failure	0.0179	0.0529	0.0098	0.0098	0.1241	0.1241	0.0562	0.0752	
			Sleeper failure	0.0357		-		-		0.0201		
	Turnout Failure		Turnout failure	0.0357	0.0702	0.1886	0.1939	0.0621	0.0621	0.0361	0.1407	
			Improperly installed switch stand	0.0357		0.0065		-		0.1084		
	Track Failure		Track irregularity	0.1964	0.2390	0.1415	0.2804	0.0483	0.3004	0.4739	0.6348	
			Rail damage	-		0.0569		0.2276		0.2369		
			Rail fastener failure	0.0179		0.0309		-		0.0361		
			Other failure	0.0357		0.0829		0.0483		0.0562		
	Other Facility Failure		Other Facility failure	0.0179	0.0179	0.0098	0.0098	0.0276	0.0276	0.0361	0.0361	
Rolling Stock Failure	Tractive Unit	Bogie Failure	Connection failure	0.0179	0.0354	-	0.0016	-	0.0621	-	0.0040	
			Frame & Bearing failure	0.0179		0.0016		0.0621		0.0040		
			Wheel & Axle Failure	Axle failure		0.0179		0.2137		0.0098		0.0369
		Wheel failure		0.0536	0.0130	0.0138	0.0361					
		flange failure		0.0179	0.0049	-	-					
		Bearing failure		0.1071	0.0049	0.0069	0.0201					
		Break failure		0.0179	-	0.0759	0.0120					
		Other factor		0.0179	0.0049	0.0276	0.0040					
		Body Failure		Motor Failure	0.0179	0.0705	0.0016		0.0292	0.0069	0.0480	
			Body Frame Failure	-	-		-	0.0040				
			Other factor	0.0536	0.0276		0.0414	-				
		Wagon Unit	Bogie Failure	Connection failure	0.0179	0.0354	-	0.0016	-	0.0621	-	0.0040
				Frame & Bearing failure	0.0179		0.0016		0.0621		0.0040	
			Wheel & Axle Failure	Axle failure	0.0357	0.2733	0.0033	0.0194	0.0276	0.1375	0.0281	0.1113
				Wheel failure	0.1250		0.0065		0.0138		0.0361	
				flange failure	0.0179		0.0065		-		0.0161	
				Bearing failure	0.1071		0.0016		0.0069		0.0201	
				Break failure	0.0179		-		0.0621		0.0120	
	Other factor			-	0.0016		0.0345		0.0040			
	Body Failure		Body Frame Failure	-	0.0714	0.0130	0.0323	-	0.0621	0.0040	0.0040	
			Other factor	0.0714		0.0195		0.0621		-		
	Train Connection Failure		Train Connection Failure	-	-	-	-	0.0345	0.0345	-	-	
Signal Error			Signal & Communication error	0.1250	0.2310	0.1870	0.2224	0.2345	0.2974	0.2691	0.3462	
			Block system error	0.0714		0.0309		0.0759		0.0562		
			Signal device defect	0.0536		0.0130		0.0069		0.0522		
Human Factor	Train operation Error	Inappropriate or Immature	Insufficient training	0.0357	0.0529	0.0488	0.0488	0.0690	0.0690	0.0602	0.0678	
			Relocation of working place	0.0179		-		-		0.0080		
		Inattentive Behavior	PTSD	-	0.2809	-	0.0553	-	0.1760	-	0.0476	
			Overwork	0.0179		-		0.0207		0.0241		
			Other causes	0.2679		0.0553		0.1586		0.0241		
		Other Human Factor		Other factor	-	-	0.0033	0.0033	0.0414	0.0414	-	-
	Other Human Factor		Other Human Factor	-	-	0.0390	0.0390	0.0414	0.0414	-	-	
Other causes			Other causes	0.0179	0.0179	0.0927	0.0927	0.1241	0.1241	0.0442	0.0442	

발생확률 산정 결과, 국내 철도 차량 일탈 사고의 중간사고(Intermediate Event)는 ‘1순위 - 부주의에 의한 운전오류’, ‘2순위 - 차륜·차축 결함’, ‘3순위 - 궤도 결함’ 순으로 확인 가능하였다. 하지만 미국, 영국, 유럽의 경우 모두 ‘1순위 - 궤도 결함’, ‘2순위 - 신호 결함’ 순이며, 3순위의 경우 미국과 유럽은 ‘분기기 결함’, 영국은 ‘부주의에 의한 운전 오류’로 확인할 수 있었다.

시설 결함의 경우, 모든 국가에서 궤도 결함에 의한 철도 차량 일탈 사고 발생 확률이 가장 높게 나타났으며, 그중 궤도 틀림(Basic Event)에 대한 발생 확률의 경우, 영국(0.0483)을 제외한 한국(0.1964), 미국(0.1415), 유럽(0.4739)에서 가장 비교적 높은 수치를 보이며, 분기기 결함(Intermediate Event)에 대한 발생 확률은 영국(0.0621), 한국(0.0702), 미국(0.1939), 유럽(0.1407)으로 대체적으로 높은 수치를 보였다.

차량결함의 경우 분석 해당 국가 모두가 전반적으로 고른 분포를 보이며, 국내의 경우, 차륜, 차축의 베어링 결함(Basic Event)과 화차의 차륜 결함(Basic Event)이 각각 0.1071과 0.1250의 확률로 비교적 높게 산정되었다.

신호결함의 경우, 신호 및 통신, 관제 결함이 한국(0.1250), 미국(0.1870), 영국(0.2345), 유럽(0.2691) 모두 높은 확률로 산정되었다.

인적 결함의 경우, 유럽을 제외한 모든 국가에서 부주의에 의한 운행 결함(Intermediate Event)이 미숙으로 인한 운행 결함(Intermediate Event)보다 발생확률이 높게 나타났다.

3. 결론 및 향후 과제

본 연구는 철도 차량 일탈 사고 위험도 등급화 연구에서 위험요인 분석을 목적으로 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 철도 차량 일탈 사고에 대하여 주요 원인을 시설 결함, 전기적·기계적 결함, 신호 및 통신체계 결함, 인적 결함, 기타 결함으로 선정하고, 국내외 철도 차량 일탈 사고의 원인을 분류하였다. 국내 탈선사례('06~'15년) 56건, 미국 여객열차 탈선사례('01~'16년) 615건, 영국 탈선사례('90~'16년) 145건, 유럽 탈선 사례('04~'16년) 249건, 호주 탈선 사례('01~'16년) 69건, 일본 탈선 사례('07~'16년) 38건에 대하여 분석한 결과, 시설 결함과 인적 오류가 전체 사고원인의 약 72% 이상을 차지하고 있는 것을 확인하였다.
- (2) 국내외 탈선사고 사례 및 원인 분석을 토대로 철도 차량 일탈 사고 고장 수목 분석을 수행하였으며, 이를 토대로 국내 및 해외의 탈선사고 원인별 발생확률을 산정하였다. 국내의 발생 확률 비교 결과, 공통적으로 비슷한 경향성을 보이나, 국내의 경우, 시설 결함 영역의 궤도 선형 틀림(0.1964)과 차량 결함 영역의 차축,

차륜의 베어링 결함(0.1071), 화차의 차륜 결함(0.1250), 신호 결함 영역에서의 신호, 통신 및 관제 결함(0.1250), 인적 오류 영역에서의 부주의로 인한 운전오류(0.2809)에 의한 철도 차량 일탈 사고 발생 확률이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 사례분석 결과, 국내 탈선사고에서 인적 결함이 전체원인의 약 52%로 해외 사례 조사를 통해 확인한 인적 결함의 비중에 비해 매우 크며, 발생 확률 산정을 위한 고장 수목 분석에서, 인적 오류 중 시설 정비 불량, 차량 정비 불량, 신호제어 오류를, 시설 결함, 차량 결함, 신호 결함으로 재분류하여 분석을 수행하였기 때문으로 판단된다.

본 연구를 통해 얻어진 사고 원인 별 발생확률을 통하여 확인한 철도 차량 일탈 사고의 주요 원인들은, 주요 원인별 사건 진행 확률 및 사고 피해 정도에 관한 추가적인 연구를 통하여, 향후 사회·경제적 영향을 고려한 철도 차량 일탈 사고 위험도 등급화 및 방호 대책 수립을 위한 연구에 이용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 철도기술연구사업의 연구비지원(17RTRP-B122273-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Aviation and Railway Accident Investigation Board (2016) *Railway Accident Casebook*.
- DNV (2011) *Assessment of Freight Train Derailment Risk Reduction Measures*.
- D-RAIL Consortium (2013) *D3.1 Derailment Causes, Impact and Prevention Assessment*.
- D-RAIL Consortium (2013) *D3.2 Analysis Mitigation Derailment-assessment Commercial Impact*.
- D-RAIL Consortium (2013) *D3.3 Guidelines on Derailment Analysis and Prevention*.
- Ericson, C.A. (2005) *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. Wiley Interscience.
- Kim, M.S., Wang, J.B., Park, C.W., and Cho, Y.O. (2009) Development of the Risk Assessment Model for Railway Level-Crossing Accidents by Using The ETA and FTA. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 12, No. 6, pp. 936-943.
- Korail (2010) *Standard Risk Categories of Derailment Accidents*.
- Korea Transportation Safety Authority (2014) *Report of Railroad Accidents*.

Korea Transportation Safety Authority (2016) *Railroad Accident & Safety Performance Report*.

Korea Transportation Safety Authority (2016) *Status & Statistical Analysis of Railway Accidents in 2016*.

Korean Standard (2003) *Fault Tree Analysis, KS A IEC 61025*.

KRRI (2010) *Risk Analysis and Development of Evaluation System about Railroad Accident*. Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement.

Liu, X., Saat, M.R., Qin, X., and Barkan, C.P.L. (2013) Analysis of U.S. Freight-Train Derailment Severity using Zero-Truncated Negative Binomial Regression and Quantile Regression. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 59, pp. 87-93.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Railroad Accident List*.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *The*

3rd Railroad Safety Plan (2016-2020).

Park, C.W., Pack, J.N., Cho, Y.O., and Wang, J.B. (2005) Development of Hazard List for Railway Accidents/ Incidents through Identification of Risk Sources. *Proceedings of 2015 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 13-18.

Park, C.W., Wang, J.B., and Cho, Y.O. (2009) Development of Accident Scenario Models for the Risk Assessment of Railway Casualty Accidents. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 24, No. 3, pp. 79-87.

Received	December 29, 2017
Revised	January 2, 2018
Accepted	January 12, 2018