

위험도 평가 시 사고 시나리오의 위험요인 전개 절차 수립 연구

김시연*, 엔드하르타 알폰수스 주란토, 김종운
네모시스 주식회사

Study on the Hazard Development Procedures for Accident Scenarios for Risk Assessment

See Yeon Kim*, Alfonsus Julanto Endharta, Jong Woon Kim
Nemosys Corporation

요약 위험도 평가는 위험요인 분석, 위험도 산정, 안전대책 수립으로 구성된다. 위험도 산정 시 사고 시나리오는 위험요인의 존재, 위험사건의 발생 및 결과적인 피해 발생에 이르는 사고 진전과정을 논리적으로 전개하여 구성한 시나리오로 정의된 위험사건에 대한 정량적인 위험도 평가 기반을 제공한다. 본 연구에서는 위험도 평가를 위한 ETA(Event Tree Analysis)를 활용한 사고 시나리오의 위험사건의 위험요인 전개 시 발생확률 및 심각도를 산정할 수 있는 절차를 수립하기 위한 연구를 수행하였다. ETA를 활용한 사고 시나리오 작성에 관한 연구현황을 파악하였으며 기존 연구의 한계를 보완할 수 있도록 위험요인 전개 시 사고자료가 불충분하여도 FTA(Fault Tree Analysis) 등을 활용한 발생확률 및 심각도 도출을 위한 절차를 제시하였다. 제동 성능 이상으로 인한 탈선사고를 사고 시나리오 전개 절차를 설명하기 위한 예시로 제시하였다. 절차에 따라 분석한 결과 제동 성능 이상으로 인한 탈선사고의 심각도는(사상자 수) 6명으로 도출되었다. 탈선사고의 위험사건별 심각도를 도출하여 이에 대한 타당성 검토 수행하였고 그 결과 본 연구의 타당성을 입증하였다. 본 연구에서 제시한 절차는 철도 외에 타 분야에서도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Risk assessment consists of hazard analysis, risk assessment, and safety measures establishment. While calculating risk, an accident scenario is constructed by logically developing the accident's progress from the existence of a hazard, the occurrence of dangerous events, and consequential damage. The accident scenario provides a basis for quantitative risk assessment of risky events defined as scenarios. This study is conducted to establish a procedure for estimating the probability and severity of a hazard in an accident scenario using the ETA (Event Tree Analysis) of risk assessment. As the first step in the present research, the current status of the research has been identified. Next, while developing hazard that can overcome the limitations of the existing research, even if accident data are insufficient, it is possible to derive the probability and severity using the FTA (Fault Tree Analysis), etc. A derailment accident is presented as an example. As a result of the analysis based on the procedure, the severity (number of casualties) of derailment accidents due to abnormal braking performance was found to be six persons. A feasibility study was conducted and as a result, the validity of this research was verified. It is judged that the procedure presented in this study can be applied to fields other than railways as well.

Keywords : Accident Scenario, Risk Assessment, Risk Analysis, ETA, Risk Evaluation

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 21RTRP-B148873-04)

*Corresponding Author : See-Yeon Kim(Nemosys Corp.)

email: sykim@nemosys.kr

Received August 2, 2021

Accepted October 1, 2021

Revised September 6, 2021

Published October 31, 2021

1. 서론

철도안전을 확보하기 위하여 제정된 ‘철도안전법’에 따라 철도 운전자 등은 철도 운영 또는 철도시설을 관리하려는 경우에는 철도 및 철도시설의 안전관리에 관한 안전관리체계를 갖추어 국토교통부 장관의 승인을 받도록 규정하고 있다[1]. 앞서 언급한 안전관리체계에는 위험관리가 포함되어야 하며 ‘철도안전관리체계 기술기준’에 따라 위험관리를 위하여 위험도 평가 및 관리를 수행하여야 한다[2].

위험도 평가를 준비하고 수행하는데 필요한 내용을 작성한 ‘철도사고 위험도 분석 및 평가체계구축’에서 위험도 평가는 위험요인 분석, 위험도 산정, 안전대책 수립으로 구성되며, 위험도 산정 시 사고 시나리오는 위험요인의 존재, 위험사건의 발생 및 결과적인 피해 발생에 이르는 사고 진전과정을 논리적으로 전개하여 구성한 시나리오로 정의된 위험사건에 대한 정량적인 위험도 평가 기반을 제공한다고 정의하고 있다[3].

위험도 평가와 관련하여 기존의 연구들은 주로 충돌/탈선사고 시나리오 전개 시 위험요인에 대한 분석과 사상사고의 시나리오 전개 시 발생확률 산정이었다. Park은 충돌, 탈선사고 시나리오 전개 시 사고사례 분석을 통해 두 개의 사고 시나리오 전개 시 공통으로 고려해야 할 위험요인을 도출하는 연구를 수행하였다[4]. 또한, Park은 충돌, 탈선사고의 위험사건 별로 분류를 하고 이와 관련된 원인 분석을 수행하였다[5]. 그리고 Choi는 철도차량 설비의 장애가 위험사건에 미치는 영향을 포함할 수 있도록 위험사건과 원인을 분류하고 분석하여 충돌/탈선사고의 위험도 평가모델을 개발하는 연구를 수행하였다[6]. Choi는 인명피해를 초래하는 영향인자를 검토하여 충돌과 관련한 사고 시나리오 전개 시 위험요인을 도출하는 연구를 수행하는 등 위험사건과 사고 시나리오와 관련된 연구를 수행하였다[7]. Park은 승객, 공중 및 직원의 철도 사상사고를 대상으로 위험도 평가모델을 개발하고 사고자료를 기반으로 FTA를 활용한 정량적인 위험도 평가를 수행하였다[8]. 또한, Kim은 철도 건널목 사고에 대한 정략적인 위험도 평가를 위한 모델을 FTA와 ETA를 이용하여 개발하고 위험요인의 발생확률을 사고 사례를 활용하여 산정하는 등 사고자료를 활용한 발생확률 산정과 관련된 연구가 수행되었다[9].

사고자료를 활용하여 발생확률을 산정할 경우 사고 시나리오의 위험요인 전개 시 객관적인 관점에서 심각도 산정이 가능하지만, 이는 사고자료가 충분할 때만 적용

할 수 있다. 사고 시나리오 전개 시 위험요인의 발생확률 산정에 따라 심각도가 달라지고 이는 해당 사고의 안전대책 수립에 영향을 줄 수 있어 위험도 산정 시 사고 시나리오의 전개 시 발생확률 및 심각도 산정은 중요하다.

본 연구에서는 위험도 산정에서 사고 시나리오의 위험요인 전개 시 도출한 위험요인의 사고자료가 충분치 않더라도 발생확률을 산정하는 방법과 심각도 도출을 위한 전개 절차를 제시하였으며 세부 내용은 본문에 수록하였다.

본 논문은 2절에서는 위험도 평가 절차에 관해 설명하고, 3절에서는 사고 시나리오 작성 시 활용되는 ETA에 관해 설명하고 사고 시나리오의 위험요인 전개 절차를 제시하였다. 4절에서는 사례를 들어 사고 시나리오의 위험요인 전개 절차에 따라 전개한 방법에 관해 설명하고 있으며 5절에서는 결과에 대한 타당성 검토를 수행하였으며 6절에서는 결론과 향후 연구 방향을 제시하였다.

2. 위험도 평가 절차

연구내용 설명에 앞서 ‘철도사고 위험도 분석 및 평가체계 구축’을 참고하여 위험도 평가 절차와 사고 시나리오 전개 시점 및 역할에 대한 이해를 돕기 위해 설명을 작성하였다[3].

위험도 평가는 위험요인을 분석하고 해당 위험요인에 의한 철도사고 및 장애 등의 발생 가능성과 심각도를 평가한 후 예방대책을 수립·시행하는 일련의 과정이다. 위험도 평가 절차는 위험요인 분석(Hazard analysis), 위

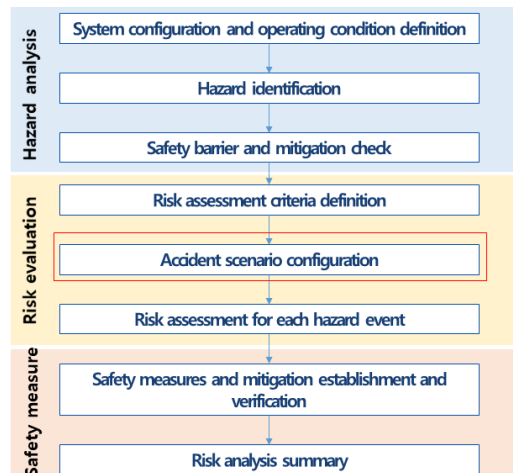


Fig. 1. Risk assessment procedure

험도 평가(Risk evaluation), 안전대책 도출(Establishing safety measure)로 구성되며 위험도 평가 절차는 다음의 Fig. 1과 같이 전개하며 절차별 설명은 아래와 같다.

위험요인 분석(Hazard analysis)

- 시스템 구성과 운영조건의 확인(System configuration and operating condition definition)
대상 시스템의 구성과 기능, 운영환경 등을 확인하여 안전에 잠재적으로 영향을 미칠 수 있는 요소를 파악
- 위험요인 확인(Hazard identification)
대상 시스템의 구성과 운영조건을 고려하여 철도사고를 곧바로 초래할 수 있는 위험사건과 위험요인을 확인 및 정의
- 안전방벽 확인(Safety barrier and mitigation check)
위험사건의 발생과 위험사건의 사고 진전과정에서 작용하는 안전방벽의 존재와 실패 상황 확인

위험도 평가(Risk evaluation)

- 위험도 평가 기준 정의(Risk assessment criteria definition)
대상 시스템의 운영, 관리 과정에서 발생하는 철도사고의 발생 빈도와 결과 심각도(통상 등가 사망자)의 위험도 평가 기준 정의
- 사고 시나리오 정의(Accident scenario configuration)
대상 시스템의 철도사고를 초래할 수 있는 위험사건과 위험요인을 토대로 위험사건의 발생과 사고

진전과정을 논리적으로 연결하여 작성

- 위험사건별 위험도 평가(Risk assessment for each hazard event)
개별 위험사건의 연간 피해 심각도(등가 사망)와 발생 빈도의 산정 결과를 바탕으로 위험도 평가수행 안전대책 도출(Establishing safety measure)
- 안전대책 수립 및 검증(Safety measures and mitigation establishment and verification)
현재의 위험도를 제어할 수 있는 대책 수립 및 검증
- 위험도 분석 결과 종합(Risk analysis summary)
위험요인 분석, 위험도 산정, 안전대책 도출 결과를 종합

3. ETA 및 사고 시나리오 전개 절차

3.1 ETA 항목 설명

ETA는 사상나무 분석이라고 불리며 발생 가능한 사고로 이어지는 프로세스와 이벤트를 평가하는데 사용되는 분석 기법으로 사고 시나리오 전개 시 사용된다. 사고 시나리오는 “위험요인의 존재, 위험사건의 발생 및 결과적인 피해 발생에 이르는 사고 진전과정을 논리적으로 전개하여 구성한 시나리오”로 아래의 Fig. 2와 같은 항목으로 구성된다.

Fig. 2의 항목에 대한 설명은 아래의 Table 1에 기술하였다.

Table 1. Description of accident scenario items

Category	Description
Hazard event	The event that may affect the severity of an accident, such as damage to life and property due to a hazard.
Hazard	The incomplete condition or action that can cause an accident, such as human factors, technical defects, external environmental conditions, etc.
Occurrence situation of hazard	Whether or not a hazard occurs (Y/N) and the occurrence of a hazardous event (speed interval, etc.).
Probability	The probability that the risk factor occur.
Severity ratio	The relative degree of hazardous event severity, in scale of 100 where 100 is the most serious case in the event of an accident.
Severity	The presentation of the number of casualties to the extent of casualties, property damage, or time loss that may occur due to an accident.
Occurrence ratio	The occurrence probability for each scenario.
Weighted severity	The severity (number of casualties) when the hazardous event occurs according to the considered scenario.
Total occurrence ratio	The probability of the scenario occurrence, which is sum of all occurrence ratio.
Hazard event severity	The number of casualties in case of a hazardous event.
Maximum equivalent fatality	An indicator of the severity of casualties, which refers to the scale of casualties combined with the number of fatalities, serious injuries, and minor injuries using appropriate conversion factors.

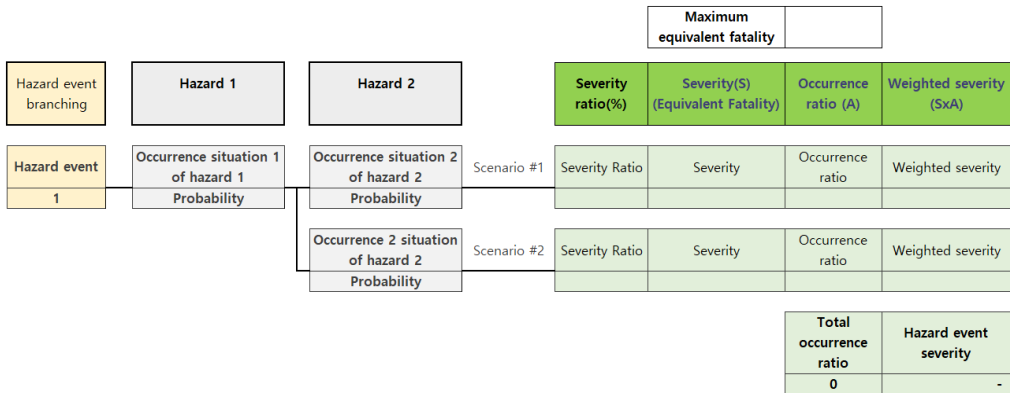


Fig. 2. Items of accident scenario

3.2 사고 시나리오 전개 절차

앞서 설명한 ETA를 활용한 사고 시나리오의 전개 절차는 아래 Fig. 3과 같다.

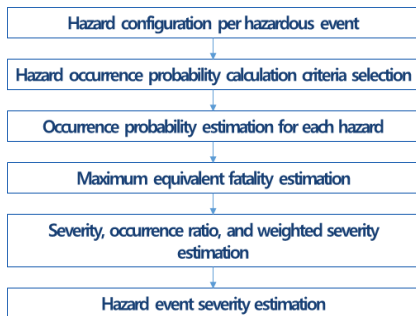


Fig. 3. Procedures for accident scenario

3.3 철도 사고의 종류 및 사례

사고는 “인명, 재산 또는 환경에 해로운 결과를 가져오는 원하지 않은 예상하지 못한 사건”을 말하며, 철도사고는 화재사고, 충돌사고, 탈선사고, 건널목사고, 사상사고 등으로 구분한다. 철도사고별 위험사건 분류는 ‘철도사고 위험도 분석 및 평가체계구축’[3]의 철도사고 종류별 위험사건-위험요인-기여요인 분류체계와 분석대상 차량과 관련된 철도사고 및 장애 통계자료를 분석하여 도출하였으며 Table 2와 같다. (분석대상 차량은 도시철도 차량이며 최대 운영 속도는 80km/h, 최대 설계속도는 100km/h)

본 논문에서는 철도사고를 철도차량에서 발생하는 사고로 한정하며 건널목사고는 철도차량에서 발생하는 사고가 아닌 철도시설물에서 발생하는 사고이기 때문에 철

도사고별 위험사건 분류에서 제외하였다. 철도차량의 사고 중 탈선사고의 발생 빈도는 높지 않지만, 발생 시 운행지연을 초래하며 심한 경우 탈선 후 차량의 전복, 사상자를 발생시킬 수 있어서 사고 시나리오 전개 절차의 적용사례로 선정하였다.

4. 사고 시나리오 전개 사례 소개

4.1 위험사건별 위험요인 구성(Hazard configuration per hazardous event)

사고의 위험사건별 위험요인을 구성한다. 사례로 보일 위험사건은 ‘제동성능 이상에 의한 탈선(Derailment caused by abnormal braking performance)’이다.

제동성능 이상에 의한 탈선의 위험요인은 ‘철도사고 위험도 분석 및 평가체계구축’의 열차탈선사고 심각도 및 위험도 평가지표를 참고하여 도출하였다[3]. 도출한 위험요인은 아래의 Table 3에 작성하였다.

Table 2. Hazard selection

Hazardous event	Hazard
Derailment due to abnormal braking performance	Automatic overspeed detection
	Manual overspeed detection
	Automatic braking action
	Manual braking action
	Train operation speed
	Speed when derailment occurs
	Speed on derailment
	Derailment or rollover occurrence
	Collision with adjacent structures

Table 3. Classification of hazard event by rail accident

Rail accident	Classification of hazard event	
	Main category	Subcategory
Fire	Illegal activities	Arson
		Fire due to mistake (e.g.: smoking inside train car)
	Fire in machinery fault	Train fire due to overheating of machinery
	Fire due to electrical equipment fault	Train fire due to overheating of electrical equipment
	External fire spread	Fire spread from fire occurs in train station
Fire spread from fire occurrence on the track		
Collision	Collision due to abnormal braking performance	Collision due to braking and air supply system failure
	Collision due to signaling device failure	Collision due to driver compartment signal device failure
		Collision due to TCMS failure
	Collision with obstacles	Collision with an obstacle on the track
		Collision with external obstacles (e.g.: trees, buildings)
	Collision due to driving error	Collision due to signal violation
		Collision due to overspeeding
		Collision due to driver compartment device misplacement
	Collision due to train stop and train protection from the approaching train	Collision due to pantograph failure
		Collision due to propulsion system failure
Collision due to train separation and train sudden rolling	Collision due to parking brake system failure	
	Collision due to coupler failure	
Derailment	Derailment due to bogie system failure	Derailment due to bogie system failure
	Derailment due to abnormal braking performance	Derailment due to braking and air supply system failure
	Derailment due to signaling device failure	Derailment due to driver compartment signal device failure
		Derailment due to TCMS failure
	Derailment due to obstacles	Derailment due to an obstacle on the track
		Derailment due to external obstacles (e.g.: trees, buildings)
	Derailment due to driving error	Derailment due to signal violation
Derailment due to overspeeding		
Derailment due to driver compartment device misplacement		
Derailment due to track defects	Derailment due to track defects	
Casualty accident	Passenger falling when getting on and off	Due to height difference between train and station platform
		Due to slippery flooring
	Passenger trapped between the train door	Trapped between the train door
	Passenger falling off the train	Fall inside the train car
		Fall on the gangway
	Passenger trapped between train and platform	Trapped due to space between the PSD and the train platform
Electric shock	Electric shock to passenger	
	Electric shock to employee technician)	

4.2 위험요인의 발생확률 산정을 위한 기준 도출
(Hazard occurrence probability calculation criteria selection)

위험요인을 도출한 이후 위험요인의 발생확률 산정을 위한 기준을 도출한다. 분석대상에서 발생할 수 있는 위험요인의 발생확률 산정을 위한 기준은 다음과 같다.

- 위험사건별 발생 빈도를 활용한 평가 방법(FTA, Fault Tree Analysis) 등 데이터에 근거한 발생확

률 산정

- 기존의 경험, 사례를 이용한 발생확률 산정
- 전문가 자문회의를 통한 발생확률 산정

복합적인 상황을 고려한 전문적인 판단이 요구되는 위험요인은 전문가 자문회의를 통하여 발생확률을 산정한다. 위험요인별 발생확률 산정 기준에 따라 산정한 결과는 아래의 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Probability determination basis of hazard

Hazard	Probability determination basis			
Automatic overspeed detection	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In case of overspeed compared to the reference speed due to a fault in the brake system, the cab signal device automatically detects overspeed ▪ At this time, the probability of failing in automatic overspeed detection is 10⁻⁸ (SIL4 standard) as the failure probability of the cab signal device, but conservatively, in the case of 0.01 %, it is assumed that overspeed detection is impossible. 			
Manual overspeed detection	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Driver manually detects overspeed in case of overspeed relative to reference speed due to faulty braking system ▪ When automatic detection is successful: No need for manual detection ▪ When automatic detection fails: Although a driver is on board, the probability of manually detecting abnormalities in braking performance is extremely rare, so we conservatively assume 0% 			
Automatic braking action	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In case of automatic detection of overspeed compared to the reference speed, automatic braking is performed by fastening emergency braking. ▪ In case of automatic detection: If emergency braking is not possible, 28.1444 % of cases are caused by a faulty brake system, so conservatively, in 30 % of cases, it is assumed that emergency braking is impossible, and with a 70 % probability, automatic Braking fastening possible ▪ In case of automatic detection failure: automatic braking cannot be engaged 			
Manual braking action	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In case of overspeed compared to the reference speed, the driver manually detects and performs brake fastening. ▪ Manual brake fastening is impossible because manual detection is impossible. 			
Train operation speed	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Driving speed is classified according to the following ratio according to the driving speed profile. - 0 ≤ ≤25 : 9.10 % - 25 < ≤60 : 45.04 % - 60 < ≤80 : 45.86 % 			
Speed when derailment occurs	<ul style="list-style-type: none"> ▪ If braking is successful, it is assumed that the vehicle derails at a speed of 25 km/h or less. ▪ If all brakes are unsuccessful, it is calculated as derailing at the same speed while driving. 			
Speed on derailment	<ul style="list-style-type: none"> ▪ The probability of each section of derailment speed is calculated by adding up the cases applicable through the preceding events. 			
Derailment or rollover occurrence	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Whether or not to overturn after derailment when derailed at the corresponding derailment speed depends on the results of the advisory meeting 			
	Derailment speed	Derailment probability	Rollover probability	
	0 -25 km/h	100 %	0 %	
	25 -60 km/h	81.25 %	18.75 %	
Collision with adjacent structures	<ul style="list-style-type: none"> ▪ For the analysis target, it is assumed that there are adjacent structures in about 40.39 % of the section excluding the ground section, and collision is possible only when there are adjacent structures. ▪ According to the results of the advisory meeting 			
	Derailment speed	Derailment/ rollover	Collision N	Collision Y
	0 -25 km/h	Derailment	78.80 %	21.2 %
		Rollover	59.61 %	40.39 %
	25 -60 km/h	Derailment	59.61 %	40.39 %
		Rollover	59.61 %	40.39 %
	60 -80 km/h	Derailment	59.61 %	40.39 %
		Rollover	59.61 %	40.39 %

4.3 위험요인의 발생상황별 발생확률 산정 (Occurrence probability estimation for each hazard)

앞서 결정한 발생확률 산정 기준에 따라 위험요인별 발생확률을 산정한다. 발생확률 산정 시 데이터를 활용한 방법에 대한 설명은 아래에 기술하였다.

- Automatic speed detection: 기준속도 대비 과속 발생 시 자동 검지는 차상신호장치가 하므로 자동 검지에 실패할 확률은 차상신호장치의 고장확률인 10-8(SIL4 수준)이나, 0.01 %의 경우에는 과속 검지가 불가능한 것으로 산정

- Automatic braking action: 기준속도 대비 과속 발생 시 비상제동을 체결. 비상제동 체결이 불가능하여 탈선이 발생할 확률은 FTA 분석 시 도출한 확률을 사용하여 도출하였으며 수식은 Eq. (1)과 같음
- $$p(\text{자동 제동 체결 불가}) = \frac{p(\text{비상 제동 기능 실패})}{p(\text{제동 성능 이상에 의한 충돌})} \quad (1)$$

산정 결과 28.1444 %가 도출되었으며 보수적으로 30 %의 경우에 불가능한 것으로 함

- Speed of operation: 운행 속도는 운행 속도 프로파일에 따라 운행 속도 구간별로 발생확률 산정 기준의 경험, 사례를 활용해야 하는 경우 자료조사, 통계자료, 분석대상 차량의 종사자를 활용했으며, 전문가 자문이 필요한 경우 해당 분야 전문가를 조성하여 자문을 통해 값을 산정하였다.

4.4 최대 등가 사망자 수 산정(Maximum equivalent fatality estimation)

최대 등가 사망자 수 선정은 국/내외에서 발생한 철도 차량 충돌/탈선 사고사례를 조사 및 분석하여 도출한다. 사고 선정 기준은 '2000년 1월 1일 이후 발생한 국내/국외 사고를 기준으로 사고 당시 속도가 분석대상 차량의 설계 최고속도 이하'이다. 선정된 사고의 등가 사망자 수를 산출하고 분석대상의 탑승객 수로 환산하여 그 중 최댓값을 탈선사고의 최대 등가 사망자 수로 선정한다. 등가 사망자 수 산출 식과 환산 식은 다음 Eq. (2), (3) 와 같다.

$$\text{등가사망자수} = \text{사망자수} + \frac{\text{중상자수}}{10} + \frac{\text{경상자수}}{200} \quad (2)$$

$$\text{분석대상 탑승객 환산 등가 사망자 수} = \text{등가사망자수} \times \left(\frac{\text{분석대상 탑승객 수}}{\text{사고시 탑승객 수}} \right) \quad (3)$$

최대 등가 사망자 수는 40.0명으로 도출되었다.

4.5 심각도, 발생비율, 가중심각도 산정(Severity, occurrence ratio, and weighted severity estimation)

앞서 도출한 발생확률과 최대 등가 사망자 수를 토대로 심각도, 발생비율, 가중심각도를 산정한다. 각각의 값의 산출 식은 다음 Eq. (4), (5), (6) 와 같다.

$$\text{심각도} : \text{최대등가사망자수} \times (\text{심각성비율}/100) \quad (4)$$

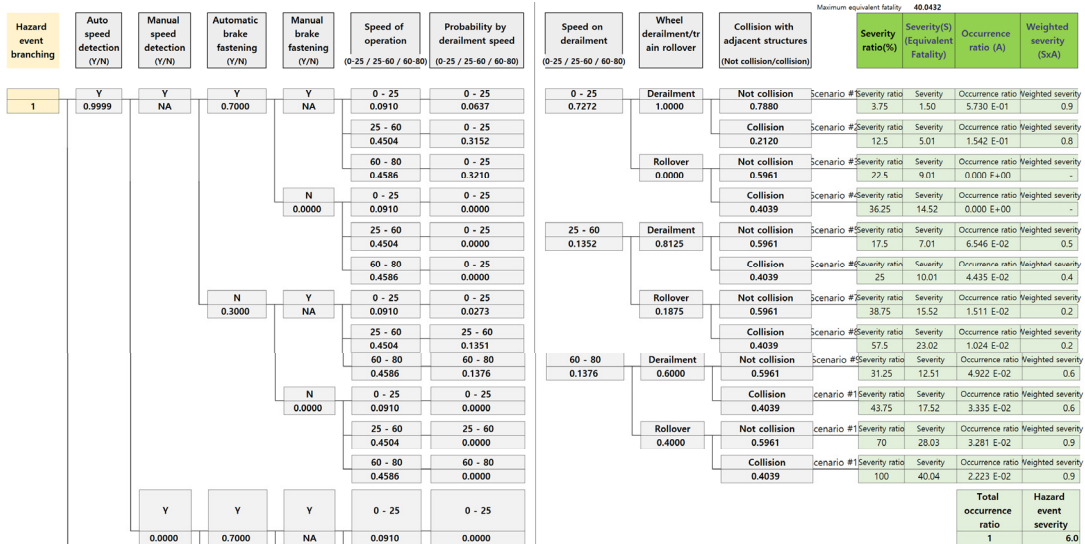


Fig. 4. ETA results

발생비율: \prod 위험요인의 발생확률 (5)

가중심각도: 심각도 \times 발생비율 (6)

4.6 위험사건 심각도 산정(Hazard event severity estimation)

시나리오의 가중심각도를 합하여 위험사건의 심각도를 산출하였고, 6명으로 도출되었다. 사고 시나리오 전개 절차에 따라 수행한 결과를 ETA로 나타내었고 위의 그림 Fig. 4와 같다.

5. 타당성 검토

타당성 검토 수행을 위해 본 연구에서 제시한 절차에 따라 탈선사고의 위험사건 모두 사고 시나리오를 전개하여 심각도를 도출하고 탈선사고의 위험사건의 심각도의 (사상자 수) 합을 도출하였다. 기준에 따라 선정된 사고 사례의 환산한 등가 사망자 수와 위험사건의 심각도의 합과 비교하여 타당성 검토를 수행하였다. 사고사례의 정확한 발생원인을 알 수 없으므로 개별 위험사건의 심각도와 비교하는 것이 아니라 탈선사고의 모든 위험사건 심각도의 합과 비교하였다.

본 연구에서 제시하는 절차에 따라 탈선사고의 위험사건별 심각도를 산정하였고 결과는 아래 Table 5와 같다. (궤도결함에 의한 탈선(Derailment due to track defects)은 차량 문제가 아닌 궤도 문제로 심각도 산정에서 제외하였다.)

Table 5. Severity results by hazard event

Hazard event	Severity result
Derailment due to bogie system failure	16.5
Derailment due to abnormal braking performance	6.0
Derailment due to signaling device failure	2.2
Derailment due to obstacles	13.9
Derailment due to driving error	2.2
Total	40.8

타당성 검토 시 활용한 사고자료는 4.4절에서 최대 등가 사망자 수 선정 때 사용한 사고사례 중 분석대상의 최대 운영 속도(80 km/h)와 근접한 속도에서 발생한 사고를 선택하였다. 사고사례는 아래의 Table 6에 작성하였으며 선택한 사례는 ‘스페인 발렌시아’에서 발생한 탈선 사고’이다.

Table 6. Derailment accident cases

Location	Year	Passengers	Casualty			EF	Speed	Converted value
			F	M	m			
Spain Valencia	2006	420	43	12	35	44.4	80km/h	40.0
South Korea Busan	2012	474	-	47	154	5.5	37km/h	4.4
South Korea Seoul	2014	1,000	-	22	455	4.5	15km/h	1.7
Russia Moscow	2014	426	24	42	160	29	70km/h	25.8

*F: Fatality
M: Major injuries
m: Minor injuries
EF:Equivalent Fatality

스페인 발렌시아에서 실제 발생한 사고의 심각도는 40.0명이고 탈선사고의 심각도 합은 40.8명으로 0.8명(2%) 차이가 발생하여 본 연구가 타당한 것임을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서 제시하는 사고 시나리오 작성 절차는 위험요인 전개 시 위험요인의 발생확률 산정과 심각도 도출 시 적용할 수 있는 방법을 제공한다. 사고 시나리오 전개 시 활용되는 ETA의 항목에 관해 설명하였으며 사고 시나리오의 위험요인 전개 절차를 제시하였다. 철도 사고별 위험사건을 소개하고 분석대상의 위험사건을 중한 가치를 앞에서 제시한 사고 시나리오의 위험요인 전개 절차에 따라 전개하여 사고 시나리오의 결과인 심각도를 도출하였다. 제시한 사고 시나리오 전개 절차에 따라 ‘제동성능 이상에 의한 탈선’의 사고 시나리오 전개 결과 위험사건의 심각도 즉, 제동성능 이상에 의한 탈선 발생 시 사상자 수는 6.0명인 것으로 도출되었다. 본 연구에서 제시한 절차에 대해 타당성 검증을 수행하였으며 0.8명의 차이로 본 연구가 타당함을 입증하였다.

사고 시나리오 작성 절차에 관한 연구는 탈선사고 외에도 철도차량의 다른 사고 시나리오 전개 시에도 적용할 수 있고 철도차량뿐만 아니라 무인항공기 시스템과 같은 타 시스템에서도 적용 가능할 것으로 판단된다. 사고 시나리오의 위험요인의 발생확률 산정 방법에 따라 발생비율이 달라지기 때문에 발생확률 산정 기준은 중요하다. 본 연구에서는 복합적인 상황을 고려해야 하는 위험요인은 전문가 자문회의를 통해 발생확률을 산정하였

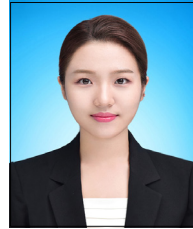
지만, 이는 전문가의 주관적인 견해가 반영되어 객관적일 수 없다. 추후 복합적인 상황을 고려해야 하는 위험요인의 발생확률 산정에 관한 체계 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] MOLIT, "Railroad Safety Act", 2020, 17746, Article 7.
- [2] MOLIT, "Railway safety management system technical standards", 2017, 2017-945, Chapter 2, Chapter 1.
- [3] KRRI, KAERI, Kyunghee University, Daegu University, Ajou University, Railroad Accident Risk Analysis and Evaluation System Establishment-Annex 2: Railroad System Risk Assessment Manual, p179, MOLIT, KAIA, 2011
- [4] C.W Park, J.N Park, J. B Wang, S.L Kwak, K.J Choi, "Development of accident scenarios for train collision/derailment risk assessment", Proceedings of the KSR Conference, The Korean Society For Railway, Korea, pp. 55-60, May 2006.
- [5] J.N Park, J. B Wang, C.W Park, S.L Kwak, "Hazardous Events and Causes for Train Collision and Derailment", Proceedings of the KSR Conference, The Korean Society For Railway, Korea, pp. 12-17, May 2007.
- [6] D.B Choi, J. B Wang, S.L Kwak, C.W Park, M.S Kim, "Development of the Risk Assessment Model for Train Collision and Derailment", Proceedings of the KSR Conference, The Korean Society For Railway, Korea, pp. 1505-1510, June 2008.
- [7] S.P Choi, M.S Kong, J.E Oh, W.I Myung, "A Study on the Development of the Collision Event Scenarios for Rolling Stock", Proceedings of the KSR Conference, The Korean Society For Railway, Korea, pp. 223-224, Oct. 2018.
- [8] C.W Park, J. B Wang, M.S Kim, D.B Choi, S.L Kwak, "Development of Risk Assessment Models for Railway Casualty Accidents", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 12, No. 2, pp. 190-198, April 2009.
- [9] M.S Kim, J. B Wang, C.W Park, Y.O Cho, "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, Dec. 2009.

김 시 연(Kim-See Yeon)

[정회원]



- 2019년 1월 ~ 현재 : 네모시스 주식회사 연구원

<관심분야>

철도, RAMS

엔드하르타 알폰수스 주란토

(Endharta Alfonsus Julanto)

[정회원]



- 2011년 2월 : Sepuluh Nopember Institute of Technology 통계학 석사
- 2016년 2월 : 부산대학교 산업공학박사(신뢰성공학)
- 2016년 3월 ~ 2017년 2월 : 부산대학교 연구원
- 2017년 3월 ~ 2019년 2월 : 포항공과대학 연구교수
- 2019년 3월 ~ 현재 : 네모시스 주식회사 책임연구원

<관심분야>

철도, RAMS

김 종 운 (Kim-Jong Woon)

[정회원]



- 1997년 2월 : 부산대학교 산업공학석사(신뢰성공학)
- 2003년 2월 : 부산대학교 산업공학박사(신뢰성공학)
- 2003년 4월 ~ 2005년 12월 : 현대로템 과장
- 2005년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2016년 2월 ~ 현재 : 네모시스 주식회사 대표

<관심분야>

철도, RAMS