

안전성 평가를 위한 철도시스템의 위험도 분석 방법 고찰

정의진*, 김양모**

*한국철도기술연구원, **충남대학교

A Study on the Risk Assessment Method in the Safety of Railway System

Eui-Jin, Joung*, Yang-Mo, Kim**

*KRRI(Korea Railroad Research Institute), **Chungnam National University

Abstract - The safety of the present railway system has been established through a lot of experience from the railway accident. But nowadays scientific safety assessment methods are exactly required to improve the safety of railway system. In this study, we focused on the methodology of probabilistic risk assessment, which has been developed mainly in the field of nuclear power industry, and considered the process to adopt this method to railway system in order to establish a scientific and comprehensive way of safety assessment.

1. 서론

철도시스템은 안전, 정확, 신속을 모토로 운영되는 시스템으로 특히 안전성에 가장 큰 비중을 두고 있다. 지금까지 철도시스템의 안전성 확보는 경험에 의하여 이루어진 것이 사실이며, 마땅히 안전성을 평가하는 방법이 없었기 때문에 사용실적이 있는 시스템 위주로 시스템을 구성하여야만 하는 어려움이 있었다.

이를 개선하고 철도시스템의 안전성을 확보하기 위하여 체계적인 접근방법에 대한 연구가 각기 철도 선진국에서 행해지고 있다. 국내에서도 이에 발맞추어 철도시스템의 안전성을 확보하기 위한 안전성 인증 체계에 대하여 연구가 이루어지고 있는 상황이다. 그림 1은 현재 제안중인 철도시스템의 안전성 인증체계를 나타낸 것이다.

제안한 안전성 인증체계에서는 프로젝트 관리자가 안전성 작업을 수행하고 각 단계마다 안전성 평가 그룹, 안전성 평가 위원회 및 독립 안전성 평가 기관이 검사 및 평가를 하고, 승인을 받는 형식으로 이루어져 있으며, 여기에서 안전성 평가 그룹, 안전성 평가 위원회, 독립 안전성 평가 기관은 서로 독립적으로 활동하며, 외부의 간섭을 받지 않도록 되어 있다.

본 안전성 인증체계에서 가장 중요하면서 먼저 선행되어야 할 작업은 현재의 국내 철도시스템의 안전성 확보 정도를 명확히 파악하는 것이다. 현재 철도시스템의 안전성 확보 정도를 정확히 파악하고 부족한 부분은 보완하고 앞으로의 정책 결정의 지표로 삼는 것은 대단히 중요한 일이다.

이를 위해 본 논문에서는 철도시스템의 안전성을 과학적, 종합적으로 평가해서 안전성 확보를 위한 정책결정에 도움을 주기 위한 철도시스템에 맞춘 위험도 평가 방법에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 위험도 평가의 목적 및 기준

2.1 위험도 평가의 목적

원래 위험도 평가는 주로 건설하려고 하는 대상시스템이 전체적으로 충분히 안전할지 어떤지를 사전에 평가하기 위한 방법으로 개발되어 왔다. 즉 대상 시스템의 총 위험도가 사회의 수용한도 내에 있는지의 여부를 정량적으로 검토하는 것이 위험도 평가의 목적이었다.

그러나, 기존 철도시스템은 이미 존재하여 운행하고 있고, 하루 250여 만 명의 승객이 이용하고 있다는 것을 보아도 철도시스템의 위험도 평가가 중요한 것은 말하지 않아도 알 수 있다. 위험도 평가를 응용하는 목적은 시스템의 어느 부분에 어떠한 위험이 잠재하고 있는지를 정량적으로 파악함으로써 어떠한 사고가 어느 정도 중대한지를 정량적으로 파악하고 안전성 확보 대책의 의사결정에 도움을 주고자 하는 것이다.

2.2 안전 기준

철도여행객들이 가장 기피하는 것은 사고로 사망하는 것이며, 사망사고의 발생은 철도영업당국에게는 매우 중대한 타격을 준다. 따라서 안전 기준 관점에서 모든 위험도를 "인명의 손실"이라는 척도로서 고려할 수 있다.

3. 위험도 평가 방법

그림 2는 철도시스템의 위험도 평가방법에 대하여 나타낸 것이다. 다음에 철도시스템의 특징에 따라서 순서적으로 살펴보고자 한다.

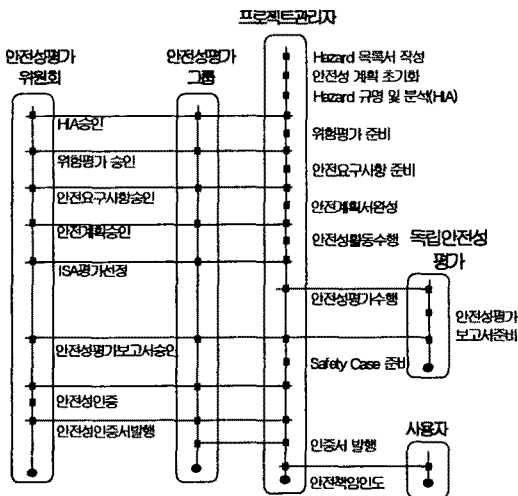


그림 1. 철도시스템의 안전성 인증체계

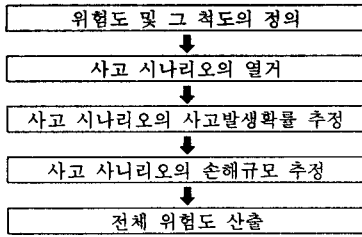


그림 2. 위험도 평가의 일반적인 순서

3.1 위험도 및 위험도 평가 척도의 정의

본 안전성 평가 방법에서는 위험도를 다음과 같이 정의한다. "위험도란 위해(危害) 사상에 따라 발생하는, 단위시간당 손해규모의 상정 값이다."

손해에 대해서는 앞에서 언급한 바와 같이 인명의 손실을 가장 중대한 손실로 생각하고 있으므로, 본 위험도 평가에서는 "손해=인명의 손실"로 생각하고자 한다. 그런데 인명의 손실을 손해로 생각할 경우, 그 양을 어떠한 단위로 평가하여야 하는지는 생각해 보아야 한다. 즉, 가장 기본적인 단위량으로서 "사망자 수"를 들 수 있지만, 지금까지의 경험에 의하면, 사회가 인지하는 사고의 중대함과 사망자 수는 반드시 단순한 비례관계에 있다고는 말할 수 없기 때문이다. 따라서 본 위험도 평가에서는 손해의 양을 "사망자 수" 및 "사망사고 건수"의 두 척도로 고려하기로 하였다.

이렇게 해서 본 위험도 평가에 있어서는 위험도를 "1년 당 사망자 수" 및 "1년 당 사망사고 건수"라고 정의하였다.

3.2 사고 시나리오의 열거

사고 시나리오란 "어떠한 원인으로 어떠한 사고가 일어나고 그 결과는 어떻게 되는가"라고 하는 일련의 사항으로, 위험도 평가에서는 생각할 수 있는 사고 시나리오를 세세하게 열거할 필요가 있다.

그런데 철도사고의 경우에서는 사고원인이 같더라도 사고가 어디에서 어떻게 발생하였는가에 따라 결과가 크게 달라진다는 어려움이 있다. 예를 들어 승객의 사망이 보는 관점에서 보면, 원래 열차에 어느 정도의 인원이 승차하고 있었는가가 사고 결과를 크게 좌우한다. 만일 사고의 원인에서 결과까지 모든 조합으로 시나리오를 열거하고자 한다면 그 수는 매우 방대해지게 된다.

그래서 사고시나리오를 원인측과 발생 환경측의 두 가지로 나누고 그것들을 전복과 충돌이라는 두 개의 사상만으로 링크해서 양자를 독립적으로 생각하는 방법을 생각할 수 있다. 즉, 중대한 철도사고의 발생에 관하여 아래의 두 가지 사항을 가정하고 사고시나리오의 구조를 단순화하였다.

- 승객의 생명에 위험을 미칠 수 있는 사고의 대부분은 열차의 전복 또는 충돌을 동반한다.
- 일단 전복 또는 충돌이 발생하면 그에 따른 사고의 규모는 그 발생원인에 관계없이 발생환경에 의존한다.

이것으로 사고 시나리오의 조합을 현실적으로 줄일 수 있고, 어느 원인에 의해서 사고가 발생하는 확률과 어느 환경조건 하에서 사고가 발생하는 경우의 손해규모를 독립적으로 추정할 수가 있기 때문에, 위험도 추정작업을 용이하게 할 수 있다.

표 1은 철도 신호시스템의 위험도 평가에서 고려한 사고 일람으로, 고려한 사고의 대부분은 열차의 전복이나 충돌을 경유해서 열차상의 인명에 위험을 미치는 것을 나타낸 것이다. 철도시스템에 있어서 열차의 전복이나 충돌 등 열차 사고를 일으킬 수 있는 요인을 철도 신호시스템의 관점에서 한정하여 살펴본 것이다.

표 1. 본 위험도 평가에서 고려한 사고 원인

No.	대분류	소분류	
1	자동차의 충돌	제1종 전널목	
2		장해물검지장치가 있음	
3		장해물검지장치가 없음	
4		제3종 전널목	
5		제1종 전널목	장해물검지장치가 있음
6			장해물검지장치가 없음
7			제3종 전널목
8		무차단 (제1종 전널목)	대형자동차
9			
10	병행도로로부터 자동차 진입		
11	고선도로 교량으로부터 자동차 전락		
12	신호모진	지하철	
13		복선(AF)	
14		복선(DC-bias)	
15	국철	복선(Impulse)	
16		단선(Impulse)	
17	대용폐색에서의 인적 미스	폐색확인 미스	
18		복선	
19		진로확인 미스	
20	신호보안장치 불량	단선	
21		신호기의 착오	
22		현시	
23	불량	장내신호기	
24		출발신호기	
25		폐색신호기	
		분기기 도중전환	
		ATS 불량	
		ATC 불량	

3.3 사고 시나리오의 사고 발생확률 추정

위험도 평가에 있어서 사고 발생 확률을 추정하는데 가장 많이 사용되는 방법은 FTA(Fault Tree Analysis)나 ETA(Event Tree Analysis) 등 트리 형해석이다. 그러나, 철도에서는 사고의 인과 관계를 체계적으로 기술하는 것이 어렵기 때문에 그동안의 많은 사고 경험과 사고데이터를 이용하는 방법을 고려할 수 있다.

3.3.1 운전사고 데이터베이스

각 사고 시나리오에 의한 사고 발생 확률을 산출하기 위한 데이터 원으로서 일정시간 이상의 열차 지연 등을 포함한 사건 자료를 이용할 수 있다.

표 2. 사고와 사건의 분류

운전사고	열차충돌 : 다른 열차와의 충돌	
	열차탈선	열차화재
사고	진널목장해사고	
	인체장해사고	
보고되는 현상	물손사고	
	내부원인에 의한 것으로 사원의 과실을 동반하는 것 (열차의 지연, 운휴를 발생시킨 모든 것, 그 외 특히 중대하다고 인정되는 것)	
사건	내부원인에 의한 것으로 사원의 과실을 동반하지 않는 것 (10분 이상 열차지연 또는 운휴를 발생시키는 것 모두)	
	자연재해를 포함하는 외부원인에 의한 것 (10분 이상 열차지연 또는 운휴를 발생시키는 것 모두)	
	자살, 본인의 과실로 인한 사상	

3.3.2 서브 시스템의 분할

데이터베이스에서 사고 데이터를 얻었으면 어느 사고 시나리오에 있어서 사고의 평균적인 발생확률은 사고건수를 사고와 관계하는 트라이얼 회수로 나누어서 구할 수가 있다.

$$\text{발생확률} = \frac{\text{사고건수}}{\text{트라이얼 횟수}} \quad (1)$$

예를 들어 신호 모진에 기인하는 열차 충돌사고의 평균 발생확률은 어느 기간에 발생한 같은 종류의 충돌 사고 건수를 같은 기간 중에 열차 신호기를 통과하는 횟수(트라이얼 회수)로 나누어서 얻을 수 있다.

그러나, 이렇게 해서 얻어진 값은 평균적인 사고 발생률을 나타내는 것에 지나지 않으며, 각 선구의 특징 등을 반영하고 있지 않기 때문에, 그대로 위험도 평가에 이용하는 것은 의미가 없다. 이 값만으로 다른 종류의

열차제어시스템의 안전성을 비교하는 것은 어려우며, 새로운 장치가 도입된 경우의 안전성 개선효과를 평가하기도 어렵다.

의미있는 분석을 가능하기 하기 위해서 사고의 발생 확률에 큰 영향을 미친다고 여겨지는 속성에 따라 전체를 몇 개의 서브시스템으로 분류하는 방법을 생각할 수 있다. 그림 3은 선로형태, 신호장치, 열차제어장치의 속성에 따라 4 종류의 서브시스템으로 분류한 예를 나타낸 것이다.

철도 신호시스템			
지하철		국철	
복선		복선	단선
AF 케도회로	DC Bias 케도회로	임펄스 케도회로	임펄스 케도회로
ATC	ATS	ATS	ATS

그림 3. 서브 시스템으로의 분류

서브시스템으로 분류한 후에는 각 서브시스템에 있어서 사고 발생 확률을 다음 식으로 구할 수가 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{서브시스템 1에 있어서 사고발생확률} = \\
 & \frac{\text{서브시스템 1에 있어서 사고건수}}{\text{서브시스템 1에 있어서 트라이얼의 회수}} \\
 & \quad \vdots \\
 & \text{서브시스템 } n\text{에 있어서 사고발생확률} = \\
 & \frac{\text{서브시스템 } n\text{에 있어서 사고건수}}{\text{서브시스템 } n\text{에 있어서 트라이얼의 회수}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

식 (2)에서는 각 서브시스템마다에 사고 발생 확률이 계산되기 때문에, 위험도 평가의 정도가 높아지는 동시에, 서브시스템간의 비교에 의해 의미있는 분석을 행할 수 있다.

서브시스템의 분류에 이용되는 속성은 고려하고 있는 사고의 발생 확률에 영향을 크게 미치는 것으로 나누어야 할 필요가 있다.

3.3.3 사고데이터가 없는 경우의 평가

사고데이터를 이용해서 사고 발생 확률을 산출할 때의 문제점은 사고데이터가 없는 사고 시나리오가 존재할 수 있다는 것이다. 이 문제는 시나리오를 서브시스템으로 분류할 경우에 보다 현저해지는데 시스템을 미세하게 분할함에 따라 트라이얼의 회수가 적어지기 때문이다.

이러한 서브시스템에 대하여 사고의 경험이 없다고 해서 사고 발생 확률을 제로로 놓는 것은 사고가 앞으로도 절대로 발생하지 않을 것이라고는 말할 수 없기 때문에 논리적으로 어긋난다.

따라서 본 위험도 평가에서는 어떤 원인에 의한 사고 경험이 없더라도, 대부분의 경우 같은 원인에 의한 사건은 발생할 수 있는데 착안하여 그 데이터를 위험도 평가의 평가에 이용하는 방안에 대하여 생각하였다.

3.3.4 사건 데이터로 사고 발생 확률 산출

사건은 사고는 아니기 때문에, 이들 데이터를 사용해서 사고 발생 확률을 구할 경우, 사건 데이터를 어떻게 사고 발생 확률 계산에 반영시킬 것인가를 생각할 필요가 있다.

그림 4는 사건을 이용한 사고발생 확률 산출방법을 나타낸 것이다.

이 방법은 사고와 사건을 더한 전체 사고 잠재성이 실제로 사고가 발생한 건수와 같다는 가정에 기초를 두고 있다.

	사 상			
	발생한 사고		발생한 사건	
	고	중	저	극저
충돌·전복 사고 가능성	고	중	저	극저
가중계수	k	$10^{-1}k$	$10^{-2}k$	$10^{-3}k$
분류된 사상 수	$n_{\text{고}}$	$n_{\text{중}}$	$n_{\text{저}}$	$n_{\text{극저}}$
잠재 사고의 총합	$= k \cdot n_{\text{고}} + 10^{-1}k \cdot n_{\text{중}} + 10^{-2}k \cdot n_{\text{저}} + 10^{-3}k \cdot n_{\text{극저}}$			

실제로 발생한 사고건수

↓ 가중계수 결정 후

사상이 발생하였다는 조건 하에서 사고가 발생하는 확률은 시스템 전체

$$P_{\text{all}}(\text{사고/사상}) = \frac{\text{사고 잠재의 총합}}{\text{발생한 사상건수}} = \frac{\text{실제로 발생한 사고건수}}{\text{발생한 사상건수}}$$

각각의 서브시스템

$$P_{\text{ms}}(\text{사고/사상}) = \frac{\text{서브시스템 내의 사고 잠재총합}}{\text{서브시스템 내에서 발생한 사상건수}}$$

그림 4. 사건으로부터 사고의 발생 확률을 구하는 순서

그림 4에서 잠재적 사고의 총합이 실제로 발생한 사고건수와 같아지도록 k 를 결정해서 가중치를 결정한다.

3.4 사고 시나리오의 손해규모 평가

이번 위험도 평가방법에서는 사고 시나리오를 원인분과 발생환경부분으로 분류해서 각각을 독립적이라고 생각하였기 때문에, 여기에서의 작업은 원인과는 관계없이 종류별 상황, 환경에 있어서 충돌·전복사고가 발생한 경우의 손해규모를 추정한다.

또한 지금까지는 충돌과 전복이 각각의 독립된 사상이라고 가정하였으나, 복선 이상의 선로에서 전복사고가 발생한 경우 동시 발생 사고가 발생할 가능성이 있기 때문에, 이 사항도 고려할 필요가 있다.

3.5 위험도 산출

위험도 평가의 최후단계는 각 사고시나리오에 의한 위험도를 산출하는 것으로, 얻어진 사고발생 확률과 손해규모의 곱을 계산하여 얻을 수 있다.

4. 결론

이번 연구에서는 지금까지 원자력 발전의 안전 진단 분야에서 개발되어오던 위험도 평가 방법을 철도시스템의 안전성 평가에 응용하여, 철도의 안전성을 더욱 향상시키기 위한 방안에 대하여 살펴보았다. 이 방법을 이용하여 경험에 의존하던 불확실한 안전성 평가가 과학적이고 종합적으로 이루어질 계기를 갖기를 바라며, 그 결과로 안전 대책에 대한 의사결정에 유용하게 이용하게 되기를 바란다. 앞으로는 실제로 다양한 경우에 대하여 본 안전성 평가 방법을 적용하여 철도시스템의 안전성 평가에 일조하고자 하는 바램이다.

[참 고 문 헌]

- [1] International Electrotechnical Commission, IEC61508, Functional safety of electrical /electronic/programmable electronic safety-related system.
- [2] CENELEC EN50126, Railway application The specification and demonstration of dependability, reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)