

전기철도 전철전력설비의 위험도 평가 기반 안전관리에 관한 연구

논문
58-5-14

A Risk Assessment Approach to Safety Management of Electric Railway Facilities

장윤석* · 최규형†
(Yoon-Suk Jang · Kyu-Hyoung Choi)

Abstract - Power supply system of electric railway has a diversity of safety problems since it should supply high electric power to the trains moving high speed with a lot of passengers on board. This paper provides a risk assessment approach to safety management of the electric railway facilities. Construction of database from field accident information, risk assessment and management of the risk are carried out systematically to ensure the safety. The risk assessment includes hazard identification, cause analysis by FTA(Fault Tree Analysis), consequence analysis by EVA(Event Tree Analysis), and loss analysis. In terms of the severity and the probability of the accidents deduced by these analyses, the risk of the accidents is assessed by using a risk matrix designed for electric railway facilities. Based on the risk assessment, possible risk mitigation options are identified and evaluated by analyzing their impact on the risk reduction and their cost benefit ratio. The long-term safety of the electric railway facilities can be ensured by renewal of the risk assessment and the risk mitigation option analysis with continuous accident database update. The proposed approach is applied to the electric railway facilities of Korean railway based on the accident data from 2002 to 2008.

Key Words : Electric Railway Facilities, Risk Assessment, Safety Management, Risk Matrix.

1. 서 론

철도는 수송단위가 매우 큰 공공교통수단으로서, 사고가 발생할 경우 대형재난으로 확대될 수 있는 위험성이 높기 때문에 안전에 대한 대비가 무엇보다 중요하다. 이와 같이 높은 안전성이 요구되는 대규모 시스템의 안전성을 확보하는 방법으로, 사고 위험도에 대한 적절한 평가 및 위험도 제어를 통하여 체계적으로 안전을 관리하는 기법이 적용되고 있다[1-3]. 여기에서 사고(Accident)는 인명 사상이나 경제적 손실 및 환경 오염 등 계획되어 있지 않은 피해를 초래하는 사건이고, 위험원(Hazard)은 잠재적으로 사고를 유발할 수 있는 조건이나 상황이며, 위험도(Risk)란 사고의 발생 가능성과 사고의 심각도를 동시에 고려하는 복합개념이라고 정의된다[4]. 위험도 평가 기반의 안전관리라는 것은, 잠재되어 있는 위험원을 체계적으로 파악하여 위험도라는 정량화된 개념으로 평가함과 동시에, 전체 시스템의 위험도를 허용 가능한 수준으로 낮추고 이를 지속적으로 관리하는 것으로 정의할 수 있다[5-7].

전기철도는 수송력 증대, 에너지 이용 효율성 및 환경친화성 등에서 많은 장점을 갖고 있어 최근 도입이 확대되고 있으며, 이에 따라 한국철도의 전철화율이 2010년까지 70%

이상으로 확대될 계획으로 있다. 전기철도에서 전철전력설비는 선로를 따라 가선된 전차선과 송변전설비 등으로 구성되며, 열차 주행 에너지를 공급하여 열차를 운행시키기 위한 전기철도의 핵심설비이다. 전철전력설비는, 다수의 승객을 태운 채 고속으로 주행하는 열차에 대전력을 공급해야 하며, 승강장과 같이 이동 인구가 많은 구역에서 고전압, 대전류를 취급해야 하고, 열차가 운행되고 있는 상태에서 유지보수 및 공사가 이루어지는 경우가 많아 안전 관리에 있어서 특별한 주의가 요구된다. 철도전기분야중에서 특히 신호제어시스템에 대해서는, 시스템 결함에 대한 안전 무결성(Safety Integrity Level) 확보를 통하여 안전 관리를 실시하는 것이 보편화되어 있고 국제규격도 제정되어 있다[8-10]. 그러나, 전철전력설비에 대해서는 기술적인 측면에서의 정성적인 안전성 분석에 대한 연구가 주로 수행되고 있는 상황으로, 정량적인 위험도 평가에 의한 체계적인 안전 관리에 대한 연구는 국내외적으로 아직까지 발표되어 있지 않다[11].

본고에서는 이상과 같은 전철전력설비에 대하여, 사고발생 사례로부터 데이터베이스를 구축하여 사고 분석을 수행하고, 위험도를 정량적으로 평가하며, 위험도 감소대책의 도출 및 적용에 따른 영향 분석을 체계적으로 수행하는 안전관리 시스템을 제안하였다[12]. 위험도 평가는 위험원 도출, 사고 원인 분석, 결과 분석 및 손실 분석을 통하여 사고 발생확률 및 심각도를 산정하고 위험도 행렬을 이용하여 정량적으로 평가하였다. 또한, 위험도 평가 결과로부터 위험도 감소대책을 도출하고, 대책 적용에 따른 영향분석 및 경제성 분석을 통하여 적정성 여부를 평가하였다. 제안시스템의 적용사례로서, 한국철도의 전철전력분야에서 발생하였던 사고

* 정 회 원 : 교통안전공단 철도안전본부 대리
† 교신저자, 정회원 : 서울산업대학 철도전기신호공학과
조교수 · 공박
접수일자 : 2009년 4월 2일
최종완료 : 2009년 4월 28일

데이터베이스를 이용하여 위험도를 평가하고, 이를 효과적으로 감소시키기 위한 대책을 검토하였다.

2. 전철전력설비 사고분석

전기철도에서 전철전력설비는 한국전력으로부터 전력을 공급받아 철도차량에 적합한 전력으로 변성하는 송전 및 변전설비, 전차선을 통하여 철도차량에 전력을 공급하기 위한 급전설비, 그리고 역사 및 각종 기기용 전력을 공급하기 위한 배전설비 등으로 구성된다. 전기철도에서 차량은 고속으로 주행하는 이동 부하의 성격을 가지고 있으며, 전철전력설비는 전차선과 차량의 집전장치와의 접촉(摺動)을 통해서 전력을 공급하기 위한 특수 구조로 되어 있어 일반 전기설비에 비해 사고발생 개연성이 높고 사고 형태도 다양하게 나타나고 있다.

전철전력설비의 위험도를 분석하기 위한 기초자료로써, 2002년도에서 2008년도까지 6년 동안 한국철도의 전철화 구간에서 발생하였던 사고를 수집하여 구축한 데이터베이스를 분석하였다. 사고 데이터베이스는 표 1에 보이는 것처럼, 발생연도, 사고일시, 발생장소, 원인, 개황, 결과, 내부 또는 외부 요인 여부 등으로 구성되어 있다[13].

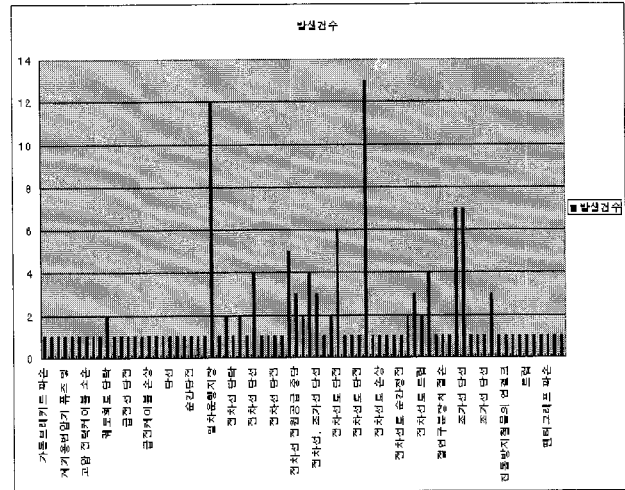


그림 1 사고 유형별 통계
Fig. 1 Statistics of accidents patterns

그림 1은 6년 동안의 사고데이터를 발생 형태별로 정리한 것으로, 전차선 및 조가선 손상으로 인한 사고발생의 비중이 높다는 것을 알 수 있다. 그림 2는 연도별 발생건수를 고속철도, 일반철도 및 전철 별로 구분하여 정리한 것으로서, 2004년 4월 1일에 경부고속철도가 개통한 이후 2004년도와 2005년도에 걸쳐 사고가 많이 발생한 것으로 나타났다.

표 1 전철전력설비 사고 데이터베이스 사례

Table 1 An example of accident database of electric railway facilities

	A	B	C	D	E	F	G
1	No	사고일시	발생장소	원인	개황	결과	내부 또는 외부요인 여부
1	1	2008. 3. 21 10:39경	중앙선 국수역구내	공사부주의(포크레인)	'08. 3. 21, 10:38경 한국철도시설공단에서 시공중인 중앙선 덕소~원주간 복선전철화 관련 선로변 포크레인의 작업 중 국수역구내 가공 지선을 단선시키면서 조가선과 접촉, 중앙선 국수88~별덕89간 전차선로 단선	전차선로 단선	외부
2	2	2008. 3. 29 13:11경	고속선 등안별 급전소	이물질 (까치집)	'07. 03. 29, 13:11경 경부고속선 전차선이 단선(결선변전소~신등안급전소간)되어, 등안별 급전소 인출기소(반)의 외부이물질(까치집)을 제거하고 정상급전할 경우임.	전차선로 단선	외부
3	3	2008. 4. 10 09:27경	충북선 내수역구내	이물질 (까치집)	08. 4. 10, 09:27경 오송89~충청88간 상, 하선 전차선로 단선 발생, 전차선로 시립급전 후 단선구간 축소(09:29, 오근정89~내수89 하선) 하고 원상 확인결과 내수역구내 전철주 28-9호 부근 선상중의 까치집 나뭇가지가 전차선과 접촉	전차선로 단선	외부
4	4	2008. 4. 16 16:42경	충북선 청주~오근정	이물질 (과선교철근)	08. 4. 16, 16:32경 청주89~오근정89간 정상과선교 하부의 철근이 수하되어 급전교 조가선과 접촉되면서 조가선 단선, 단선된 조가선을 철차운행에 지장 없도록 임시 복구하는 동안 철차운행에 지장을 주 양의 사고 임	조가선 단선 철차지연유형	외부
5	5	2008. 4. 16 18:33경	경원선 횡령리역	공사부주의 (크레인)	08. 4. 16, 18:30분경 경원선 횡령리역구내 8-9번사이에 민자역사 공사용 크레인이 접촉되어 트립(전차선로 손상)	전차선로 손상	외부
6	6	2008. 04. 25 13:37경	경인선 오류동역 #8번선 (하2선)	이물질 (물방이)	'08. 04. 25, 13:37경 경인선 오류동역 #8선에 설치된 물방이가 수하되어 급전선 #8가공동 등지선과 접촉되어 구로88~부기89가 전차선로 단선되어 철차운행 지장.	전차선로 단선 철차지연유형	외부
7							

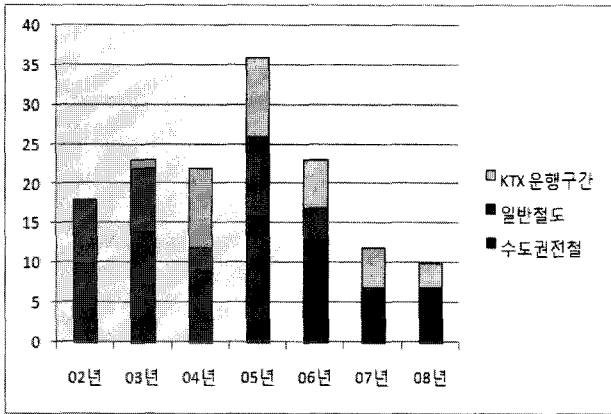


그림 2 연도별/구간별 사고발생 통계
Fig. 2 Statistics of accidents by year and by block of track

표 2 계절별 사고 통계

Table 2 Statistics of seasonal accidents

구분	사고종류	계	봄 (3월~4월)	여름 (5월~8월)	가을 (9월~10월)	겨울 (11월~2월)
내부요인	합계	146	37	55	15	39
	계	53	9	20	7	17
	시공불량	9	1	4	1	3
	기기불량	34	6	12	5	11
	보수불량	6	1	3	1	1
기타	4	1	1	0	2	
외부요인	합계	93	28	35	8	22
	이물질 접촉	50	14	19	5	12
	공사 부주의	20	5	8	1	6
	철도차량 접촉	7	3	1	1	2
	기타 (낙뢰 등)	16	6	7	1	2

표 2는 사고를 계절별, 내부/외부 요인별로 구분한 것이다. 사고를 계절별로 분류하여 보면, 겨울에 비해 여름철에 사고 발생 빈도가 높은 것으로 나타났다. 또한, 사고를 내부요인에 의한 것과 외부요인에 의한 것으로 나누어 보면, 내부요인으로는 기기 불량, 외부요인으로는 이물질 접촉이 주요 발생 원인으로 작용하고 있다. 기기 불량은 전차선 급구류, 절연구분장치 및 계기용 변성기 등의 불량이 주종을 이루고 있으며, 이물질 접촉으로는 전차선이나 조가선, 급전선 등에 조류가 접촉하거나, 작업 부주의 등 인적 오류(human error)에 의한 금속체의 접촉 등이 대부분이었다.

3. 전철전력설비 위험도 평가 기반 안전관리시스템

설비나 시스템의 신뢰도 및 안전성을 향상시키기 위하여, 고장데이터를 체계적으로 수집하고 사고정보를 분석하여 적절한 대책을 실시하고 그 결과를 지속적으로 모니터링하여

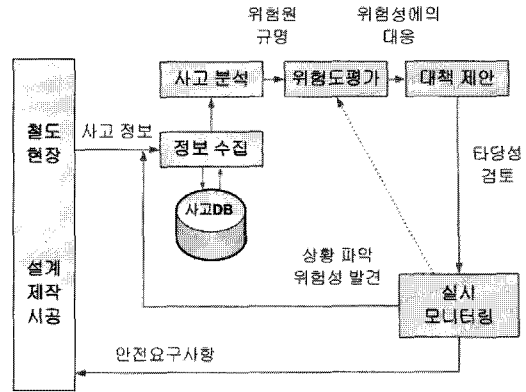


그림 3 위험도 평가 기반 안전 관리 시스템 구성
Fig. 3 Configuration of safety management system based on risk assessment

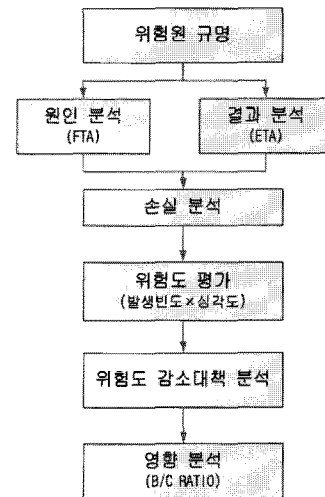


그림 4 위험도 평가 절차
Fig. 4 Risk assessment procedures

다시 반영시키는 일련의 과정을 반복하는 기법이 권장되고 있다[14]. 여기서, 사고정보의 수집은 위험도 추정 및 관리의 건전성에 매우 큰 영향을 미치므로, 정보 수집 활동의 건전성 확보에 특히 주의를 기울일 필요가 있다. 전철전력설비의 경우, 전철 구간별로 전담 조직에서 유지보수를 수행하고 있어, 비교적 용이하게 사고정보를 수집하고 분석할 수 있다.

전철전력설비의 위험도 평가 기반 안전관리시스템의 구성을 그림 3에 보인다. 철도현장에서의 사고 정보를 수집하여 데이터베이스를 구축하고, 이를 이용해서 위험도를 평가하며, 적절한 위험도 감소 대책을 실시하고 그 결과를 모니터링하여 상황을 파악함과 동시에 새로운 위험성 발견시 이를 다시 피드백함으로써 위험도를 적정 수준으로 관리하도록 한다. 장기적인 관점에서 시간 경과에 따라 전철전력설비의 사고 발생 양상이 변화될 수 있으므로, 사고 데이터베이스가 경신되면 위험도 평가도 경신하여 지속적으로 위험도를 제어함으로써 안전 관리를 확보하도록 한다. 또한, 여기서 도출된 위험도 평가 및 감소 대책 수행 결과를 안전요구사항

으로 제시하여, 설계 및 제작, 시공 단계에 반영하도록 함으로써, 설비의 수명주기(life cycle) 전체 단계에 걸쳐 안전성 관리를 수행하도록 한다.

위험도 평가에서, 위험도는 사고의 심각도와 발생빈도를 조합한 것으로써, 사고 확률과 사고 결과라는 두 가지 요소로 구성되어 있다. 위험도를 체계적으로 평가하기 위해서 그림 4에 보이는 절차를 걸쳐 분석을 수행하도록 한다 [15-18]. 사고분석을 통한 위험원 도출을 출발점으로 하여, FTA(Fault Tree Analysis)에 의한 원인분석과 ETA(Event Tree Analysis)에 의한 결과분석 및 정량적인 손실분석을 통하여 사고 발생빈도와 심각도를 산정한 후, 이로부터 위험도를 평가한다. 또한, 위험도를 경감시키기 위한 위험도 감소대책을 도출하고, 대책 적용에 따른 영향분석 및 경제성 분석을 수행하여 적절한 대책을 제시함으로써 위험도를 적정 수준으로 관리할 수 있도록 하였다. 구체적인 분석 기법은 다음 장에서 사례분석과 함께 제시한다.

4. 전철전력설비 위험도 평가 및 감소대책

앞서 구축한 2002년도에서 2008년도까지의 6년 동안의 전철전력설비 사고 데이터 및 사고 분석 결과를 이용하여, 다음과 같이 위험도를 평가하고, 위험도 감소대책을 검토하였다.

4.1 위험원 도출(Hazard Identification)

위험원은 잠재적으로 사고를 유발할 수 있는 조건이나 상황을 정의한 것으로서 위험도 평가를 위한 기초 자료로 사용된다. 그림 1과 표 1 및 표 2에 보인 전철전력설비의 사고분석 결과를 토대로, 예비 위험성 분석(Preliminary Hazard Analysis)과 체크 리스트(check list) 분석을 통하여 전철전력분야에서 중점적으로 관리하여야 할 위험원을 표 3과 같이 도출하였다.

4.2 원인 분석(Causal Analysis)

원인분석의 목적은 위험원을 초래할 수 있는 원인요인의 조합이나 배열을 결정하기 위함이다. 원인분석 기법으로는 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)과 FTA(Fault Tree Analysis)가 있으며, FMEA는 원인에서 결과로 진행되는 상황식 절차로서 결과가 모두 위험원이 되지는 않고, FTA는 결과에서 원인으로 진행되는 하향식 절차로서 안전성 분석에 사용되는 경우 결과는 보통 위험원으로 한정된다. 이상과 같이 FTA에서는 위험원을 발생시킬 수 있는 원인의 조합이나 배열을 고려해 볼 수 있다는 측면에서, 그림 5에 보이는 것처럼 FTA 기법을 이용하여 원인을 분석하였다. “조가선 단선”으로 “전차선로 단선”이 발생한 결과에 대해서, “공사부주의”, “까치집 나뭇가지가 조가선과 접촉”, “조류(부엉이 등)가 조가선과 접촉”이 원인으로 분석되었으며, “까치집 나뭇가지가 조가선과 접촉”의 원인으로서, “인출설비, 역구내 등의 빔개소”에 “까치집 형성”이 원인으로 분석된 것을 보이고 있다.

표 3 전철전력설비 위험원

Table 3 Hazards of electric railway facilities

위험원(Hazard)	원인	결과
H1 : 선로변 작업현장에서의 공사부주의	교육부족 위험표지 미비	• 가공지선, 조가선, 전차선 및 급전케이블 단선 • 전차선로 단선
H2 : 인출설비, 역구내 등 빔(Beam) 개소의 조류동지	조류	• 가공지선, 조가선, 전차선 및 급전케이블 단선 • 전차선로 단선
H3 : 승강장에 설치된 물받이의 접촉	점검소홀	• 전차선로 단선
H4 : 터널개소에서의 조류접촉	조류	• 조가선 단선
H5 : 선로변 지장수목의 접촉	점검소홀	• 전차선로 단선
H6 : 각종 기기설비 고장	기기불량	• 전차선 전원공급 중단
H7 : 각종 금구류의 고장	시공불량	• 전차선 전원공급 중단

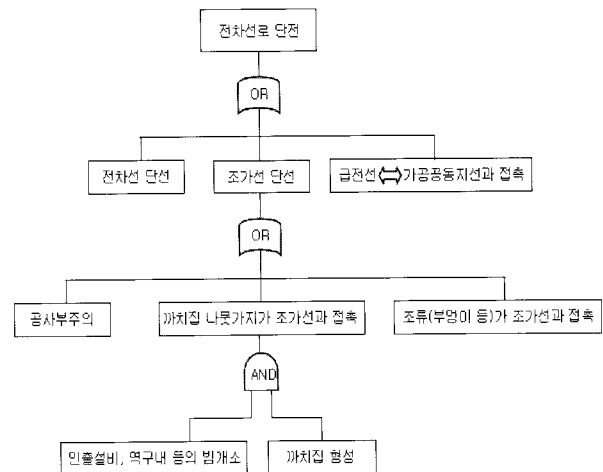


그림 5 FTA 분석

Fig. 5 Fault tree analysis(FTA)

4.3 결과 분석(Consequence Analysis)

결과분석의 목적은 규명된 위험원으로부터 발생하는 중간 상황과 최종결과의 심각도를 예측하기 위한 것이다. ETA(Event Tree Analysis) 기법은 위험한 사건의 발생에 따라 특정한 결과물을 초래하는 사건들의 조합 혹은 흐름을 모델링하는 것으로서 결과분석에 적합한 기법이다.

전철전력설비의 사고분석 결과를 토대로 ETA기법을 활용하여 결과분석을 수행한 결과를 그림 6에 보인다. 전철전력설비에서 “전차선 단선” 사고의 결과로는 “열차 운행 지장”, “시설물 피해”, “차량 파손 및 인명 피해” 등으로 분석되었다.

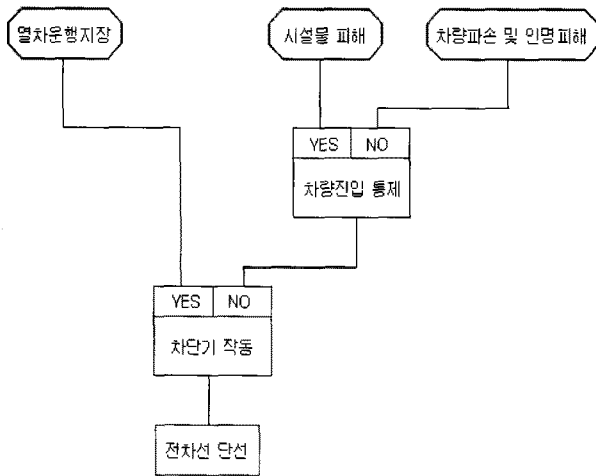


그림 6 ETA 분석
Fig. 6 Event tree analysis(ETA)

4.4 손실 분석(Loss Analysis)

손실분석은 결과분석에서 규명된 각각의 결과와 관련된 손실 규모를 판단하기 위한 것이다. 여기서, 손실이란 인간에게 피해를 주는 안전손실과 환경에 대한 손해 및 상업적 손실이 포함된다. 상업적 손실으로는 서비스에 혼란 야기, 차량/기반시설/장비 손상, 제품 및 재료손실, 클레임 및 잠재적 벌금, 프리미엄 인상 및 기타 간접손실 등이 포함된다.

전철전력분야에서 2002년에서 2008년까지 발생한 사고 중에서 인명 피해는 없었던 것으로 보고되어 분석에서 제외하였으며, 연간발생건수 0.3건 이상이 되는 사고에 대해 시설 및 장비 손상에 대한 손실분석을 수행한 결과를 표 4에 보인다. “조가선 단선”사고가 사고당 단위손실이 16,000,000원이고 연간발생건수가 4건으로서 연간손실이 64,000,000원으로 산정되어 가장 높게 나타났다. 여기서, 전차선은 Cu 110 [mm²], 조가선은 Bz 65[mm²], 급전선은 ACSR 288[mm²]를 기준으로 하였고, 재료비는 2008년 11월 물가정보를 적용하였으며, 노무비는 2008년도 하반기 노임단가를 적용하여, 각각의 사고당 단위 손실을 다음과 같이 산출하였다.

(1) 전차선 단선

$$10,839,466\text{원(재료비)}+6,207,354\text{원(노무비)}+184,863\text{원(경비)} = 27,231,683\text{원}$$

(2) 조가선 단선

$$12,913,056\text{원(재료비)}+2,842,162\text{원(노무비)}+83,093\text{원(경비)} = 15,838,311\text{원}$$

(3) 급전선 단선

$$6,507,900\text{원(재료비)}+3,880,206\text{원(노무비)}+116,406\text{원(경비)} = 10,504,512\text{원}$$

(4) 조가선 소손

$$63,600\text{원(재료비)}+232,127\text{원(노무비)}+5,581\text{원(경비)} = 301,308\text{원}$$

이상의 손실분석에서, 서비스 혼란 비용과 클레임, 벌금 및 기타 간접손실 등은 수집된 근거 자료가 미비하여 산출에서 제외하였는데, 이들에 대한 정확한 분석을 위해서는 열

표 4 손실분석 결과

Table 4 Results of Loss Analysis

사고	위험원	단위 손실 [백만원]	연간 발생 건수	연간 손실 [백만원]
A1 : 조가선 단선	H2 : 인출설비, 역구내 등 빔(Beam) 개소의 조류동지 H4 : 터널개소에 서의 조류접촉	16.0	4	64.0
A2 : 전차선 단선	H5 : 선로변 지장수목의 접촉	27.0	2	54.0
A3 : 전차선/조가선 단선	H1 : 선로변 작업현장에서의 공사부주의	43.0	1	43.0
A4 : 조가선 소손	H3 : 승강장에 설치된 물받이의 접촉	0.3	0.5	0.15
A5 : 급전선 단선	H5 : 선로변 지장수목의 접촉	11.0	0.3	3.3

차운행중단 시간 및 클레임 처리 등 기타 간접손실에 대한 정보를 포함하여 사고 데이터베이스를 구축하도록 보완할 필요가 있다.

4.5 위험도 평가

위험도(risk)는 사고 발생 빈도(frequency)과 사고결과의 심각도(severity)라는 두 가지 요소로 구성되어 있으며, 다음 식과 같이 나타낸다. 여기서, 사고 발생빈도는 발생확률로 나타낼 수도 있다.

$$\text{위험도} = \text{사고의 발생 빈도} \times \text{심각도} \quad (1)$$

일반적으로 대규모 사고의 경우 사고발생 건수가 매우 작고 파급효과도 매우 크므로, 사고 발생 빈도 및 심각도를 정량적으로 평가하기 어려운 경우가 대부분이다. 이에 따라, 발생빈도와 심각도를 등급으로 분류하고 리스크 매트릭스를 이용하여 위험도를 평가하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다[19-21]. 전철전력설비의 위험도를 평가하기 위하여, 표 5에 보이는 것처럼, 발생빈도와 심각도를 각각 5등급으로 나누어 평가하는 리스크 매트릭스를 제안하였다. 여기서, 발생빈도 등급은 미국방 규격 등에서와 같이 위험성 평가에서 보편적으로 사용되고 있는 5등급 분류를 사용하였고, 심각도 등급은 캐나다 철도에서 심각도 평가기준으로 활용하고 있는 시설 손실 규모를 참조하여 5단계로 등급을 구분하였다. 심각도 등급1은 백만원 이하, 등급2는 백만원 초과, 등급3은 천만원 초과, 등급4는 5천만원 초과, 그리고 등급5는 1억원 초과와 시설피해규모를 나타낸다[22-23].

리스크 매트릭스에서 위험도 수준을 어느 정도까지 허용할 지에 대해서는 가장 심각도가 높은 사고에 대해서 발생빈도가 가장 낮아야 한다는 기본 원칙과 함께, 사회적, 정책

적인 측면 등 다양한 측면을 고려할 필요가 있다[21-22]. 이에 따라, 국제규격 및 다른 시스템의 위험도 평가에서의 적용사례와 한국철도의 안전업무분야 종사자들의 자문을 걸쳐 전철전력설비의 위험도 허용 기준을 결정하였다. 표 5의 리스크 매트릭스에서 짙은 색으로 표시된 영역이 허용가능한(tolerable) 리스크 수준을 나타낸다. 또한, 허용가능 영역의 상단 부분은 허용불가능(intolerable) 영역이고, 하단 부분은 무시가능한(negligible) 영역을 나타낸다.

앞서 제시한 원인분석, 결과분석 및 손실분석의 결과로부터, 전철전력설비의 각 사고유형에 대해 발생빈도와 심각도 등급을 산정하고, 표 5의 리스크 매트릭스로부터 위험도를 산정한 결과를 표 6에 보인다. “조가선 단선”과 “전차선 단선” 사고의 위험도가 16등급으로써 허용불가능 영역에 속하는 것으로 나타났으므로, 위험도를 감소시키기 위한 별도의 대책이 필요하다는 것을 알 수 있다. 또한, “조가선/전차선 단선”은 12등급으로써 허용가능영역에 속하기는 하나 위험도가 비교적 높은 것으로 평가되었다. 그 외에, “조가선 소손”과 “급전선 단선”은 무시가능한 영역에 속하는 것으로 평가되었다.

4.6 위험도 감소 대책 및 영향 분석

위험도 감소 대책은 위험원의 발생률을 감소시킬 수 있거나 그 결과를 억제하기 위한 것으로써, 위험원 제거, 위험원 확률감소, 사고 확률감소, 사고의 심각도 감소 순으로 우선순위를 정할 수 있다. 가능한 모든 경우 위험원은 제거되어야 한다. 그러나 위험원을 제거할 수 없다면 리스크 감소를 위한 최우선 방법은 위험원 발생의 빈도를 줄이거나 사고의 심각도를 줄이는 것이다.

전철전력설비의 위험도 감소 대책은 위험원 도출 결과와 사고 원인 분석 및 결과 분석, 손실 분석 결과로부터 다음과 같이 도출되었다.

(1) 조류등지로 인한 장애·사고 예방을 위하여 조류등지 서식방지 기구를 설치하거나 조류등지 서식이 불가능하도록 구조물 형태 보완

(2) 전차선로 급전부 1m 이내 설치된 조류 등지는 발견 즉시 제거

(3) 작업(공사)시 안전요원 상시 배치

(4) 안전상 필요한 장소에는 위험표지를 설치

(5) 시공관리감독 철저

(6) 유지보수 점검 철저히 시행

(7) 종사자 교육훈련

각 사고 유형에 대하여, 위험도 감소 대책을 실시하였을 때의 영향을 분석한 결과를 표 7에 보인다. 이중에서, 위험등급이 높고 손실규모가 큰 사고 및 위험원에 대해 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) “조가선 단선”사고의 위험원(인출설비, 역구내 등의 빔(Beam) 개소, 터널개소)에 대해서, 위험도 감소 대책(조류등지 서식방지기구 및 절연방호관 설치)을 실시함으로써, 발생빈도를 4등급(Monthly to Yearly)에서 3등급(1 to 10 yearly)으로 경감시킬 수 있다면 위험도는 16등급에서 12등급으로 낮아져서 허용가능한 수준으로 관리할 수 있다.

표 5 위험도 행렬 및 허용 기준

Table 5 Risk matrix and acceptability criteria

발생빈도	심각도	5	4	3	2	1
		Very Serious	Serious	Considerable	Marginal	Minor
5	Daily to monthly	25	20	15	10	5
4	Monthly to yearly	20	16	12	8	4
3	1 to 10 yearly	15	12	9	6	3
2	10 to 100 yearly	10	8	6	4	2
1	Less than 100 yearly	5	4	3	2	1

표 6 위험도 평가 결과

Table 6 Results of Risk assessment

사고	위험원	연간 손실 [백만원]	심각도	발생 빈도	위험도 등급
A1 : 조가선 단선	H2 : 인출설비, 역구내 등 빔(Beam) 개소의 조류등지 H4 : 터널개소에서의 조류접촉	64.0	4	4	16
A2 : 전차선 단선	H5 : 선로변 지장수목의 접촉	54.0	4	4	16
A3 : 전차선/조가선 단선	H1 : 선로변 작업현장에서의 공사부주의	43.0	3	4	12
A4 : 조가선 소손	H3 : 승강장에 설치된 물받이의 접촉	0.15	1	3	3
A5 : 급전선 단선	H5 : 선로변 지장수목의 접촉	3.3	2	3	6

위험도 감소 대책을 실시하기 위하여 소요되는 투자비용은, 조류등지 서식방지 기구가 개소당 120,000원이고 절연방호관 설치가 개소당 340,000원으로 조사되었다. 조류등지 서식방지 기구와 절연방호관을 각각 100개소 설치할 경우 투자비용이 56,000,000원 소요되므로, 이 위험원에 의해 발생하는 연간 손실이 64,000,000원에 달하는 점을 감안하면 경제적 타당성이 있다고 분석된다.

(2) “전차선 단선”사고의 위험원(선로변 지장수목)에 대해서, 위험도 감소대책(순회점검 철저 및 교육훈련 강화)을 실시함으로써 발생빈도를 1등급 낮출 수 있다면, 위험도가 16등급에서 12등급으로 낮아져 허용가능 수준으로 떨어진다.

표 7 위험도 감소대책 영향 분석

Table 7 Risk mitigation option analysis

사고	위험원	연간손실 [백만원]	위험도 감소대책	심각도	발생 빈도	위험 등급	비고
A1 : 조가선 단선	H2 : 인출설비, 역구내 등 빔 (Beam) 개소의 조류등지 H4 : 터널개소에서 조류접촉	64.0	• 조류등지 서식방지기구 설치 • 절연방호판 설치	4	3	12	4등급 개선
A2 : 전차선 단선	H5 : 선로변 지장수목의 접촉	54.0	• 순회점검 철저 • 교육훈련 강화	4	3	12	4등급 개선
A3 : 전차선/조가 선 단선	H1 : 선로변 작업현장에서의 공사부주의	43.0	• 위험표지 설치 • 안전요원 상시 배치 • 교육훈련 강화	3	3	9	3등급 개선
A4 : 조가선 소손	H3 : 승강장에 설치된 물받이 의 접촉	0.15	• 순회점검 철저 • 교육훈련 강화	1	2	2	1등급 개선
A5 : 급전선 단선	H5 : 선로변 지장수목의 접촉	3.3	• 순회점검 철저 • 교육훈련 강화	2	2	4	2등급 개선

순회점검업무는 유지보수원의 본연의 업무이므로 기존 유지보수인력 규모를 유지한 채로 업무 강화를 통해 실현될 수 있으며, 교육훈련도 관리감독자 업무의 일환으로 강화될 수 있으므로, 별도의 비용투자 없이 54,000,000원에 달하는 연간손실을 경감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

(3) “전차선/조가선 단선”사고의 위험원(선로변 작업현장)에 대해서, 위험도 감소대책(위험표지 설치, 안전요원 상시 배치, 교육훈련 강화)을 실시함으로써 발생빈도를 1등급 낮출 수 있다면, 위험도가 12등급에서 9등급으로 낮아진다. 위험도 감소 대책을 실시하기 위하여 소요되는 투자비용은, 위험표지 설치 비용이 개소당 100,000원에 불과하고, 연간손실비용이 43,000,000원에 달한다는 점을 감안할 때 비용-편익비가 높은 것으로 평가된다.

5. 결 론

전기철도 전철전력설비에서 사고에 대한 위험도를 정량적으로 평가하고, 이를 바탕으로 위험도를 적정수준으로 경감시켜 안전을 확보하기 기법을 제안하였다. 또한, 제안 기법을 적용하여, 전철전력설비의 위험도 평가를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

2002년도에서 2008년도까지의 6년간 한국철도에서의 전철 전력분야 사고 데이터베이스를 분석한 결과, 전차선 및 조가선 손상으로 인한 사고 발생의 비중이 높고, 조류 및 수목 등의 이물질 접촉이 주요 발생 원인으로 지적되었다. 또한 손실분석을 수행한 결과, 전차선 단선 사고 및 조가선 단선 사고의 손실규모가 크게 나타났으며, 사고의 발생빈도와 심각도를 분석하여 위험도를 평가한 결과 전차선 단선 사고 및 조가선 단선 사고의 위험도가 허용가능한 수준을 초과하는 것으로 나타났다.

이들 사고에 대한 위험도를 감소하기 위한 대책으로는, 조류등지 서식방지 기구를 설치하거나 조류등지 서식이 불가능하도록 구조물 형태를 보완하고, 전차선로 급전부 1m 이내 설치된 조류등지는 발견즉시 제거하며, 작업시 안전요원 상시 배치, 안전상 필요한 장소에는 위험표지 설치, 순회

점검 및 교육훈련 강화 등이 제시되었다. 이상의 대책을 수행하면, 전차선 및 조가선 단선 사고의 위험도를 허용가능한 수준으로 감소시킬 수 있을 것으로 기대되며, 경제성 분석 결과도 양호하여 실천 가능성이 높은 것으로 제시되었다.

이상과 같은 위험도 기반의 안전 관리 시스템을 도입하면, 전철전력설비의 안전성을 크게 향상시켜 철도의 안전 운행에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 사고 데이터가 추가되거나 사고 양상이 변동될 경우, 사고 데이터베이스를 경신하여 위험도를 재평가하고 대책을 재수립하도록 함으로써 지속적으로 위험도를 평가·관리하도록 하고, 위험원 도출 및 위험도 평가 결과를 안전요구사항으로 제시하여 설계, 제작 및 시공 단계에 반영시키도록 함으로써 설비의 수명주기 전단계에 걸쳐 체계적인 안전 관리를 수행하도록 체제를 구축하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

- [1] D. Elms, "Rail safety", Reliability Engineering and Systems Safety, vol. 74, 2004, pp.291-297.
- [2] N. P. Hoj, W. Kroger, "Risk analyses of transportation on road and railway from a European Perspective", Safety Science, vol. 40, pp. 337-357, 2002.
- [3] H. Fukuda, "A Study on Incident Analysis Method for Railway Safety Management", Quarterly Report of RTRI, vol. 43, no.2, 2002, pp.83-86.
- [4] IEC 62278, "Railway Applications - Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety(RAMS)", IEC, 2002.
- [5] L. J. Wain "Risk Assessment and comparisons :an Introduction", Science, Vol. 236, pp. 267-270, 1987.
- [6] A. G. Hessami, "Risk Management: A Systems Paradigm", Systems Engineering, vol.2, pp.156-167, 1999.
- [7] W.F.Kenney, "Process Risk Management Systems",

VCH Publishers, NJ, 1993.

[8] IEC Standard, "IEC 61508 1-7 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems", Geneva, 2000.

[9] F. Guenab, J. L. Boulanger, W. Schon, "Safety of Railway Control System : A Preliminary Risk Analysis Approach", IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 2008.

[10] J. Beugin, "A SIL Quantification Approach based on an Operating Situation Model for Safety Evaluation in Complex Guided Transportation Systems", Reliability Engineering and System Safety, vol. 92, pp.1686-1700, 2007.

[11] K. D. Pham, R. S. Thomas, W. E. Stinger, "Operational and Safety Considerations in Designing a Light Rail DC Traction Electrification System", Proceedings of 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference, April 22-24, Chicago USA, 2003.

[12] 장윤석, 최규형, "위험도 평가 기반의 전철/전력분야 안전확보방안에 관한 연구", 2008년도 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.275-280, 2008.

[13] 한국철도공사, "전철전력분야 장애 개황", 한국철도공사, 2002-2008.

[14] MIL-STD-2155, "Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System", USA Department of Defense, 1985.

[15] D. Vose, "Risk analysis : a quantitative guide", 2nd ed., Wiley, NY, 2000.

[16] Lloyd's Register, ESM(Engineering Safety Management), 2008.

[17] Railtrack Yellow Book Issue 4, "Engineering Safety Management : Fundamentals and Guidance, Issue 3, Railtrack, 2007.

[18] M.H.C.Everdij, H.A.P.Blom and B.Kirwan, "Developent of a structured database of safety methods", 8th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management(PSAM8), New Orleans, USA, May 2006.

[19] S. Gunderson, "A Review of Organizational Factors and Maturity Measures for System Safety Analysis", Systems Engineering", Vol. 8, pp. 234-244, 2005.

[20] N. B. Johansen, S. Sorenson, C. Jacobson, O. F. Adeler, A. Breinholt, "Risk Assessment of Sewer Systems", NOVATECH Session 4.3, pp. 925-932, 2007.

[21] US Department of Defense, "MIL-STD-882D Standard Practice for System Safety", Washington DC, 2000.

[22] H. Zerkani, R. N. Dulomo, V. Ho, "Bechmarking of the Risk Management Indices of the Railway Industry", 6th International Conference on

Probabilistic Safety Assessment and Management(PSAM6), San Juan USA, 23-28 June 2002.

[23] D. Diamantidis, F. Zuccarelli, A. Westhauser, "Safety of Long Railway Tunnels", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 67, pp. 135-145, 2000.

저 자 소 개



장 윤 석 (張 倫 錫)

1972년 6월 15일생. 2004년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2009년 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 졸업(공석). 2006년~현재 교통안전공단 철도안전본부 대리

Tel : 031-362-3642

Fax : 031-362-3639

E-mail : cys0615@ts2020.kr



최 규 형 (崔 圭 亨)

1959년 1월 31일생. 1981년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1982년 홋카이도(北海道)대학 전기공학전공 박사과정 졸업(공학박사). 2005년~현재 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 조교수.

Tel : 02-970-6873

Fax : 02-979-6873

E-mail : khchoi@snut.ac.kr