

철도안전관리에 위험도개념 적용을 위한 기반 요건에 대한 연구

Basic Requirements for the Application of Risk Concept on Railway Safety Improvements

과상록* 조연옥* 홍용기* 왕종배*
Kwak, Sang-Log Cho, Yun-Ok Hong, Yong-ki Wang, Jong-Bae

ABSTRACT

In railway system, the first step of safety managements is the identification of current safety level. Among many safety indexes, risk concept is the prevailing and most effective one in many developed countries for the safety management. But many requirements such as, accident classification rule, risk levels or broadly acceptable regions, safety cost benefit analysis, VPF, equivalent fatality and failure database are needed for the application of risk concept in railway.

Basic requirements for the application of risk concept on railway safety improvements are derived in this study.

1. 서론

대구저하철 화재사고를 계기로 철도터널의 화재는 물론 탈선 및 충돌과 같은 중대사고 예방과 피해저감을 위한 많은 연구가 진행되고 있다[1~3]. 철도안전성을 향상시켜 사고피해를 저감하기 위해서는 철도안전에 대한 현황 파악 및 구체적인 목표설정이 필요하다. 현재 국내의 철도산업에서는 철도안전의 목표설정을 위해 “년간 사고발생 건수”, “열차운행 100만-km당 사고건수”와 같이 발생빈도에 초점을 둔 지표와 “년간 사망자수”, “사고피해액”, “운행지장”과 같이 사고피해에 초점을 둔 지표류 혼합하여 사용하고 있다[4]. 이러한 지표류를 활용하는 궁극적인 목적은 과거의 정보를 효율적으로 활용하여 미래의 위험을 보다 정확히 예측하고 적절히 대응하기 위함이다.

철도는 선로, 신호, 차량 등이 유기적으로 연결된 복합시스템으로 설계, 제작은 물론 운영전반에 걸친 체계적인 안전관리활동이 요구된다. 이를 위해 선진 철도 운영국에서는 시스템 안전관리 계획(System Safety Plan, SSP)을 수립하여 위험원(Hazard)분석과 위험도(Risk) 평가를 통해 안전에 대한 정량적인 목표를 설정하고, 이를 달성하기 위해 체계화된 절차에 따라 안전관리활동을 수행하고 있다. 정량적인 안전목표의 수단으로 특정기간동안 관심의 대상이 되는 사고의 발생빈도(발생확률)와 사고발생결과(피해심각도)의 곱으로 정의되는 위험도 개념을 활용하고 있다.

본 연구에서는 선진 철도 운영국에서 철도안전관리를 위해 사용중인 위험도 개념을 국내 철도에 도입하기 위한 기초연구를 수행하였으며, 위험도 개념을 국내에 적용시 예상되는 문제점과 이의 해결을 위한 요건을 제시하였다.

* 한국철도기술연구원, 정회원

2. 위험도 개념 적용 현황

2.1 국내 위험도 개념 적용현황

위험도 개념은 철도안전관리분야 외에 우주, 항공, 원자력, 가스, 대형선박 등 다양한 산업분야에 적용 중이다. 국내의 원자력분야의 경우 위험도기반의 가동중 검사(Risk Based Inspection 혹은 Risk Based In-Service Inspection)를 통하여 효율적으로 원자력발전소 배관의 안전성을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행된다. 이는 시스템 전체의 위험도를 유지하면서 효율적으로 가동중검사를 수행하기 위한 연구로, 가스배관 혹은 송유시설(국외의 경우)과 같은 지하매설물에 대해서도 유사한 연구가 진행 중이다.[5] 이외에 유조선과 같은 대형선박의 설계시에 위험도기반의 안전설계 혹은 안전규제 연구가 진행 중이며, 이는 대형선박이 해상에서 조난시 인접국가의 해상에 많은 피해를 주는 문제로 인해 일부국가에서 자국영토를 출입하는 선박에 대한 규제를 수행하고 있어 이의 요건을 충족시키기 위한 연구가 진행 중이다.

발생확률이 극히 낮은 원자력의 노심용융, 냉각재순설 등과 같은 원자력분야의 중대사고연구의 경우 광범위한 조건에 걸친 많은 자료와 모델링 기법이 요구되고 실험이나 검증이 어려워 위험도 개념을 활용하고 있다. 이는 국내 철도의 중대사고 분야에 적용할 경우 중대사고가 반복되는 경우에 적용이 가능하다. 예로서 터널내에서 열차회개, 탈선 및 충돌이 복합적으로 발생하는 사고사나 리오의 구성에 효과적이다.

2.2 국외 철도시스템의 위험도 개념 적용현황

철도 안전확보를 위해 위험도 개념을 적용중인 국가의 대표적인 예로는 영국이 있으며, 영국철도 규제법인 "Railway Regulations 2000"에는 철도안전과 관련된 기관에서는 위험도평가를 수행하도록 의무화하고 있다. 위험도 평가결과는 Safety Case 작성에 포함되며 이를 국가기관인 보건안전국(HSE)에 제출하여 승인받도록 하고 있다.[6] 미국, 캐나다, 호주, 스위스, 독일, 네덜란드, 노르웨이 등 많은 국가에서도 위험도를 활용한 철도시스템의 안전관리가 이루어지고 있다. 최근에는 원자력배관의 위험도기반 가동중 검사와 동일한 개념으로 위험도에 기반한 선로결합 검사연구가 미국, 아시아, 아프리카의 일부 국가간에 공동연구로 진행되고 있다.[7]

3. 위험도 개념을 적용을 위한 요건분석

위험도 개념을 철도안전 목표수립에 적용하기 위해서는 기술적 기반 외에 몇 사회적 기반까지 포함하는 다양한 요건이 필요하다. 진찰에서 언급된 각 국가의 안전관리현황분석을 통해 도출된 요건과 이의 국내에 적용을 위한 필요사항을 다음에 요약하였다.

3.1 위험원(Hazard) 관리

시스템 안전관리의 설계단계에서 수행하는 예비위험분석(Preliminary Hazard Analysis, PHA)는 광범위한 정성적 분석으로 관리대상 위험원 선정을 위한 위험일지의 작성 및 관리가 필요하다. 철도는 변화하는 시스템으로 수명주기 동안 열차운행환경 및 사회환경의 변화에 따라 설계시 고려되지 않았던 테러, 방화와 같은 새로운 위험원이 도출되거나 과거의 위험원이 소멸되는 경우가 발생한다. 이를 위험도 평가항목의 도출에 반영하기 위해서는 위험일지(Hazard Log)의 정기적인 관리 혹은 넓은 의미의 위험원관리가 요구된다.

3.2 사고분류 및 사고분석을 위한 DB 구축

현재 국내에서 사용중인 철도청의 "사고보고 및 수습처리규정" 및 기타 규정에 포함된 사고분

류체계는 상호 중복되어 위험평가에 활용하기 위해서는 재분류가 요구된다[8]. 과거의 사고분석 자료 및 PHA 자료를 통해 상호 중복성 없는 사고분류체계를 구축하여야 위험도 평가시 효과적으로 활용될 수 있다. 과거의 사고분석 자료는 사고예방 방지에 활용되며, PHA 자료는 환경변화 등으로 인해 과거에 발생되지 않은 사고를 예측하는데 활용될 수 있다. 다양한 분류가 가능하며 영국의 철도 안전목표 수립시 사용되는 SRM(Safety Risk Model)의 분류의 예를 표 1에, 위험도가 높은 20개 항목의 위험도를 표 2에 나타내었다[9].

표. 1 사고분류에 따른 위험도(년간 등가사망자 기준)

순	사고 분류	위험도
1	열차사고(Train Accidents)	17.5
2	운행사고(불법침입 제외)	63.1
3	비운행사고(불법침입 제외)	63.8
4	불법침입	62.0
계	(등가 사망)	206.4

표. 2 철도사고의 위험도 순위항목 및 등가사망자 수(상위 20개)

순	내용	등가사망(명)
1	Passenger train collision with road vehicle on level crossing	3.9
2	Derailment of passenger trains	3.2
3	Collision between two passenger trains(other train in station)	2.7
4	Abnormal dynamic force(ex. abnormal deceleration)	2.4
5	Derailment of freight trains on passenger lines	1.2
6	Collision between non-passenger train and passenger train	1.1
7	Collision of train with object on line	0.8
8	Non-passenger train collision with road vehicle on level crossing	0.5
9	Collision with buffer stop	0.5
10	Derailment of freight trains on freight only lines	0.4
11	Fire on passenger train	0.3
12	Derailment of ECS & Parcels trains on passenger line	0.2
13	Collision between two passenger trains in station	0.2
14	Fire on freight train	0.2
15	Explosion on freight train	0.1
16	Collision between two passenger trains(without TPWS)	0.1
17	Structural collapse at station	0.1
18	Fire on passenger train at station	0.1
19	Train crashed by structural or large object	0.1
20	Explosion on passenger train	0.1

위의 내용은 2002년의 위험도평가 내용과 큰 차이를 보이고 있으며, 국내의 상황과도 차이가 있을 수 있어 이들 연구내용의 직접적인 적용은 용이하지 않다[9].

3.3 사고 빈도 및 사고심각도 결정

사고분류체계에 따라 구분된 사고의 빈도와 피해시 심각도를 결정하여야 한다. 사고빈도나 심각도는 발생가능성이나 피해경도에 따라 몇 개의 단계로 구분하는 방법과 대상 구조물의 수명기간, 과거 10년 혹은 특정기간에 따른 값으로 표현하는 방법이 있다. 사고빈도는 FTA(Fault Tree Analysis)의 기법을 활용하여 결정할 수 있으며, 사고피해 심각도는 ETA(Event Tree Analysis)의 기법을 활용할 수 있다. 위험도를 활용한 안전목표의 설정에: 연간 등가사망자수와 같이 기간에 따른 발생빈도가 사용되며, 과거 사고이력이 체계적으로 관리된 경우 구조물 혹은 시설이나 차량의 수명기간 동안의 자료를 활용할 수 있다.

철도 중대사고의 경우 발생빈도가 낮아 사고사례에서 심각도를 결정하기는 용이하지 않다. 이러한 경우 기기와 고장율, 위험요인 분석 등을 통해 결정하거나 확률론적 평가를 통하여 결정할 수 있다. 사고빈도가 낮은 철도 화재, 충돌, 탈선과 같은 중대사고에 대한 사고피해예측은 사고시나리오에 기반하여 구축하여야 하며, 이때 많은 평가의 입력변수들이 불확실성을 포함하고 있다. 이들 불확실성은 위험도 예측 모델에 반영이 되어야 위험도를 활용한 안전목표의 설정이 가능하다. 사고빈도 및 심각도 자료는 예측된 값과 기간이 경과하여 확인된 위험도값을 서로 비교하여 위험도 모델을 수정하여야 효율적인 위험도 예측이 가능하다.

3.4 위험도 수준의 구분 및 허용 위험도의 결정

ALARP(As Low As Reasonably Practicable) 기준의 적용시에는 심각도의 단계만 요구되고 있으나 위험도를 활용한 정량적 목표수립에는 연간 사망자수와 같이 정량적인 값이 요구된다. 원자력 산업이나 대형선박산업의 경우 사고 시나리오에 기초하여 시나리오별 사고피해를 정량적으로 예측하고 있으나, 국내 철도산업에는 사고심각도 단계분류도 미흡한 실정이다. 예측된 위험도가 허용위험도를 넘는 경우 안전대책의 수립을 통한 위험도 저감활동을 수행하며, 허용위험도 보다 예측된 위험도가 낮은 경우 추가적인 안전대책의 수립이 요구되지 않는다고 할 수 있다. 그러나 허용위험도에 대한 국민적인 공감대의 형성이 되어 있지 않아, 연구결과를 통해 연간 10^{-6} (영국의 기준)의 등가사망자와 같이 결정된 경우 이의 직접적인 적용이 용이하지 않다. 표 3에는 영국에서 사용중인 허용위험도에 대한 값을 나타내었다.

표. 3 Network Rail의 허용위험도

위험도 대상	허용위험도의 상한값	일반적인 허용위험도의 상한값
철도 종사자	1/1,000	1/1,000,000
철도 승객	1/10,000	
일반 대중	1/10,000	

위의 기준은 보수적인 조건을 사용하여 도출된 것으로, 승객의 경우 한달에 한번 여행하는 승객을 기준으로 하지 않고, 철도를 이용하여 출퇴근하는 승객을 기준으로 한 수치임

3.5 등가사망 기준의 제시

현재 국내의 철도사고시 분류기준은 철도청의 “안전보건관리규정”에 따르면 사망은 사고후 72

시간 이내의 사망자, 중상은 3주 이상의 치료 혹은 신체부위의 절단, 경상은 4일 이상 3주 이하의 치료를 요하는 사고자로 규정되어 있다[10]. 위험도를 활용한 안전목표 설정시 사망, 중상, 경상에 대해 개별적으로 수립하기 보다는 중상자 및 경상자를 사망자로 환산하여 설정하는 기법이 효율적이다. 이들 기준은 국가별, 운영사별로 상이하며, 국내에서는 아직 환산에대한 구체적 기준이 없는 실정므로 이에 대한 기준이 제시되어야 위험도를 활용한 안전목표의 설정이 가능하다. 표. 4에 운영사별로 사용중인 등가사망자 환산기준을 나타내었다.

표. 4 운영기관별 중상자 및 경상자의 등가사망자 환산지수

운영기관	중상자수	경상자수
A	10	200
B	10	N.A.
C	14.3	200
D	10	100
E	10	100
F	9.1	100

3.6 피해가치의 환산 및 사고예방비용(Value for Preventing Fatality, VPF)의 산출

철도사고의 피해는 대상에 인적, 물적, 환경피해 및 철도 이미지 실추 혹은 시간지연과 같은 간접피해 등으로 구분할 수 있다. 위에서 언급한 등가사망기준과 같이 물적, 환경적, 인적 사고피해를 화폐가치로 환산하여 고려하는 기준에 대한 정립이 필요하다. 영국의 경우 인적피해를 보다 세분화하여 승객의 사망, 직원의 사망, 일반 대중의 사망으로 환산하는 보다 세부적인 기준을 보유하고 있으며, 매년 이들 환산값을 결정하여 안전목표 설정에 반영하고 있다. 참고로 영국의 교통분야의 사고예방비용은 정부 정책에서 산출된 값(136만 파운드, 약 28억원)과 Network Rail에서 Risk 관리를 위해 사용하는 값(381만 파운드, 약 89억원)이 있다. 이들 값은 2004년과 2005년의 값이며, 매년 변경되어 반영된다.

3.7 안전개선 투자비용의 자료

위험도가 높은 안전관리 대상의 경우 사고 시나리오에 따른 다양한 안전대책의 수립이 가능하다. 안전대책에 따라 소요되는 비용과 기간, 피해예방효과가 각각 상이하여 이들 수치의 직접적인 비교가 용이하지 않다. 따라서 위험도저감 및 안전대책의 수행에 요구되는 투자비용과 안전개선 투자의 효과를 정량화하는 안전개선 투자비용의 산출이 요구된다.

3.8 위험도 예측 모델 관리

철도시스템의 위험도평가 영향인자들은 많은 불확실성을 포함하고 있어, 위험도평가 결과의 신뢰성이 저하될 수 있다. 위험도 평가를 지속적으로 수행할 경우 수정된 시스템에 대해 예측된 위험도와 위험도 저감을 위한 안전시스템의 설치후 확인된 위험도의 비교를 통한 검증은 수행한다 면 위험도 예측 모델의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 현재 영국의 RSSB(Rail Safety and Standard Borad)에서는 과거 Railtrack에서 개발된 위험도평가 모델에 대한 유지/보수 작업을 진행중이다. RSSB에서 예측된 위험도값과 기간이 경과하여 확인된 위험도 값을 비교한 결과 예측된 위험도 값이 10~20% 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 위험도 모델의 구성시 불확실한 모델에 대해 보수적 자료를 사용한 이유 때문이다. 표. 2에 나타난 주요 위험사건은 탈선, 충돌, 화재로 나

타났으며, 위험도 모델 수립시 사회적으로 큰 관심을 갖는 사항이 사고의 피해나 빈도에 상관없이 포함된다.

4. 결론

본 연구에서는 위험도 개념을 활용한 철도안전관리를 위해 국내의 위험도 개념의 활용현황 분석을 수행하였으며, 국내의 철도안전에 위험도 개념 적용을 위해 다음의 요건을 도출하였다.

- ① 위험원 혹은 위험일지의 관리, ②사고분류 및 DB 구축, ③사고빈도 및 심각도 결정 기준, ④허용 위험도의 결정, ⑤등가사망자 환산기준 설정, ⑥피해가치의 환산, ⑦안전개선투자 비용 산출, ⑧위험도 모델의 구성

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2003), "철도사고방지 및 안전확보를 위한 핵심기술개발 연구"
2. 건설교통부, 한국건설교통기술평가원(2003년), "장대터널 화염방재 기술 및 환기공조시스템 개발",
3. 박상록, 왕종배, 홍선호(2003), "철도안전관리 개선을 위한 확률론적 위험도평가 방안 연구", 한국철도학회지 특별기고, 2003년 2월, 제 6권 4호, pp. 11-18
4. 철도청(2003), "종합안전대책 세부 추진계획"
5. USNRC(1998), "An approach for using probabilistic risk assessment in risk-Informed Designs on plant specific changes to the licensing basis", reg. guide 1.174
6. Network Rail(2004), "Network Rail's Railway Safety Case, version 6"
7. Kalay, S(2003), "An international cooperative research approach to rail defect risk management", proc. of WCRR 2003, U.K. pp. 699-707
8. 철도청(2003), "철도청 사고보고 및 수습처리규정"
9. Railtrack(2001), Profile of Safety Risk on Railtrack PLC-Controlled Infrastructure", Railway Safety Issue, SP-RSK-3.1.3.11
10. 철도청(2003), "철도청 안전보건관리규정"