

위험도기반의 철도안전관리체계 구성을 위한 연구

곽상록 · 왕종배 · 조연옥

한국철도기술연구원 안전기술연구팀

1. 서 론

철도는 차량, 궤도, 전기, 신호 및 운영이 복합된 시스템으로 체계적인 안전관리를 위해서는 다양한 전문지식이 요구된다. 철도와 같은 복합시스템의 안전관리를 위해 선진 철도운영국, 원자력 및 항공산업등에서는 시스템안전관리 계획(System Safety Plan)을 활용중이다. 이를 위해서는 위험원 분석, 위험도 평가 및 안전개선 투자효과를 활용한 정량적 목표 수립이 필요하다.¹⁾ 그러나 국내의 철도산업에서는 “년간 사고발생 건수 혹은 피해자수”, “열차운행 100만-km당 사고건수 혹은 피해자수” 등과 같은 건수 위주의 단순 통계지표를 안전목표로 활용하고 있다. 철도사고율이 낮은 많은 철도운영국들은 위험도에 기반한 안전관리를 수행하고있으나, 국내는 위험도 개념의 안전관리 연구가 아직 적용되지 않고 있다. 위험도 기반의 안전관리는 국가별 열차운행 특성이 반영되어 있어 국내에 직접적인 적용이 어려운 실정으로 본 연구에서는 국내 실정에 맞는 위험도 기반의 안전관리체계 구성을 위해 필요한 기반사항에 대한 연구를 수행하였다. 또한 국내외 위험도 개념 적용사례를 분석하여 국내의 철도산업의 안전관리체계 구성에 위험도 개념 적용시 문제해결을 위한 요건을 제시하였다.

2. 위험도 개념의 적용현황

위험도 개념은 국방, 항공, 원자력, 가스공급, 대형선박 등 다양한 산업분야에서 적용중이다. 원자력분야의 경우 위험도기반의 가동중 검사(Risk Based Inspection 혹은 Risk Based In-Service Inspection)를 통하여 보다 효율적으로 원자력발전소 배관의 안전성을 확보하기 위해 국제적 많은 연구가 진행중다. 이는 배관 전체의 파손에 대한 위험도는 유지하면서 보다 효율적으로 가동중검사를 수행하기 위한 방법으로, 가스배관 혹은 송유시설과 같은 지하매설물에 대해서도 유사한 연구가 진행중이다.²⁾ 이외에 유조선과 같은 대형선박의 설계시에 위험도기반의 안전설계 혹은 안전규제 관점의 연구가 진행중이다. 이는 대형선박의 해상조난시 인접국가 해상환경에 많은 피해를 주는 문제로 인해 일부국가에서 자국영토를 출입하는 선박에 대한 규제를 수행하고 있어 이들 규제요건을 충족시키기 위한 목적이다. 발생확률이 극히 낮은 원자력발전소내 원자로의 노심용융사고, 냉각재손실 사고 등과 같은 원자력분야의 중대사고연구의 경우 광범위한 조건에 걸친 많은 자료와 모델링 기법이 요구되며 실험이나 검증이 어려운 경우도 위

험도 개념이 적용되고 있다. 철도 분야에는 발생확률은 낮지만 피해가 큰 충돌, 탈선, 터널내 화재와 같은 중대사고 분야에 적용할 수 있다.

철도 안전규제/관리에도 위험도 개념이 적용중이며, 영국의 경우 영국철도 규제법인 “Railway Regulations 2000”에는 철도안전확보를 위해 위험도평가를 의무적으로 수행하도록 하고 있다.³⁾ 위험도 평가결과는 안전관리계획에 반영되며 이를 국가기관인 보건안전국(HSE)에 제출하여 승인받도록 하고 있다.⁴⁾ 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 선로결함 검사연구가 미국, 아시아, 아프리카의 일부 국가간에 공동연구로 진행되고 있다.⁵⁾

3. 위험도 기반의 안전관리를 위한 기반요건 분석

위험도 개념을 철도안전관리에 활용하기 위해서는 기술적 기반 외에 사회적 기반까지 포함하는 다양한 요건이 필요하다. 전월에 언급된 각 국가의 안전관리현황 분석에서도 출된 요건과 이의 국내 적용을 위한 요건을 다음에 요약하였다.

3.1 예비위험분석(Preliminary Hazard Analysis, PHA)의 수행

설계 및 개념과 관련된 초기단계의 예비위험분석은 물론 중요 영역, 기준, 위험부품, 인터페이스, 환경, 운영, 유지, 비상절차에 대한 분석을 수행하여 위험원을 도출하며, 도출된 위험원의 저감을 위한 활동 및 추적성 확보를 위해 위험일지를 생성하게 된다. 또한 기존에 발생된 사고의 재발 방지를 위해 시스템의 수명기간 혹은 전체 운행과 관련된 사고 및 장애자료를 PHA 수행 내용과 결합하여 위험원 관리에 활용한다.

3.2 사고분류 및 사고분석을 위한 DB 구축

현재 국내에서 사용중인 철도청의 “사고보고 및 수습처리규정” 및 기타 규정에 포함된 사고분류체계는 상호 중복되어 위험평가에 활용하기 위해서는 재분류가 요구된다.⁶⁾ 과거의 사고분석 자료 및 PHA 자료를 통해 상호 중복성 없는 사고분류체계를 구축하여야 위험도 평가시 효과적으로 활용될 수 있다. 과거의 사고분석 자료는 사고재발 방지에 활용되며, PHA 자료는 환경변화 등으로 인해 과거에 발생되지 않은 사고를 예측하는데 활용될 수 있다. 사고에 대한 다양한 분류가 가능하며, 이론적인 분류외에 건널목사고 혹은 불법침입과 특정 유형의 사고가 빈발하는 경우 이들 사고의 중점적인 관리를 위해 분류를 수정할 수 있다. 영국의 경우 사고를 크게 ①열차사고, ②운행사고, ③비운행사고, ④불법침입으로 구분하고 있으며, 발생빈도가 높거나 사고발생시 큰 피해가 예상되는 14개의 중점관리 항목을 선정하여 특별관리중이다. 또한 연간 1,000건 이상 발생하는 국내의 사고 및 장애와 관련된 자료의 효율적 분석을 위해서는 제시된

사고분류체계에 따라 구성된 DB의 활용이 필요하다.

3.3 사고 빈도 및 사고심각도 결정

사고분류체계에 따라 구분된 위험도 항목별 사고의 빈도와 피해시 심각도를 결정하여 안전개선 투자의 우선순위 선정에 활용이 가능하다. 사고빈도나 심각도는 발생가능성이나 피해정도에 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 설정에는 연간 등가사망자수와 같이 기간에 따른 발생빈도가 사용되며, 과거 사고이력이 체계적으로 관리된 경우 구조물 혹은 시설이나 차량의 수명기간 동안의 자료를 활용할 수 있다. 철도 중대사고와 같이 발생빈도가 낮고 발생시 다양한 분석이 가능한 경우는 기기별 고장율, 위험요인 분석 등을 통해 결정하거나 확률론적 평가를 통하여 결정할 수 있다.⁷⁾

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.⁸⁾ 원자력 산업이나 대형선박산업의 경우 사고 시나리오에 기초하여 시나리오별 사고피해를 정량적으로 예측하고 있으나, 국내 철도산업에는 사고심각도 단계분류도 결정되지 않은 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. 영국에서 사용중인 허용위험도의 상한값은 철도종사자에 대해 10^{-3} , 철도승객 및 일반대중에 대해 10^{-4} 이며, 하한값은 모두 10^{-6} 이다. 이러한 기준들은 보수적인 조건을 사용하여 도출된 것으로, 승객의 경우 한달에 한번 여행하는 승객을 기준으로 하지 않고, 철도를 이용하여 출퇴근하는 승객을 기준으로 한 수치이다. 원자력산업과 비교할 때 철도의 경우 국제적으로 사고가 비교적 자주 발생하여 허용위험도 결정이 유리하다고 할 수 있으나, 아직 연구가 미흡한 실정이다.

3.5 등가사망 및 피해가치 환산 기준의 제시

안전관리의 목표 설정시 사망, 중상, 경상에 대해 개별적으로 수립하기 보다는 중상자 및 경상자를 사망자로 환산하여 설정하는 기법이 효율적일 수 있다. 이들 수치를 환산하는 기준은 국가별, 운영사별로 상이하며, 국내에서는 아직 환산에 대한 구체적 기준이 없는 실정이다. 많은 운영기관들이 10명의 중상자를 1명의 등가사망자로, 100명에서 200명의 경상자를 1명의 등가사망자로 환산하여 안전목표 및 성과를 관리하고 있다.

철도사고의 피해는 대상에 따라 인적, 물적, 환경피해 및 철도 이미지 실추 혹은 시 간지연과 같은 간접피해 등 다양하게 분류할 수 있다. 산업안전에서 언급하는 하인리히(Heinrich) 혹은 시몽(Simonds)이 제안한 “재해손실비용”의 추정과 유사한 개념이나 철도안전관리 관점에서는 인적피해에 초점을 두고 있다.⁹⁾ 영국의 경우 인적피해를 보다 세분화하여 승객의 사망, 직원의 사망, 일반 대중의 사망으로 환산하는 보다 세부적인 기준을 보유하고 있다. 국가에서 매년 인적피해로 인한 비용을 공고하고 있으며, 2004년과 2005년의 기준은 136만 파운드(약 28억원)이다. 그러나 영국의 Network Rail은 자체적으로 381만 파운드(약 80억원)를 설정하여 사용하고 있다.

3.6 안전개선 투자비용의 자료

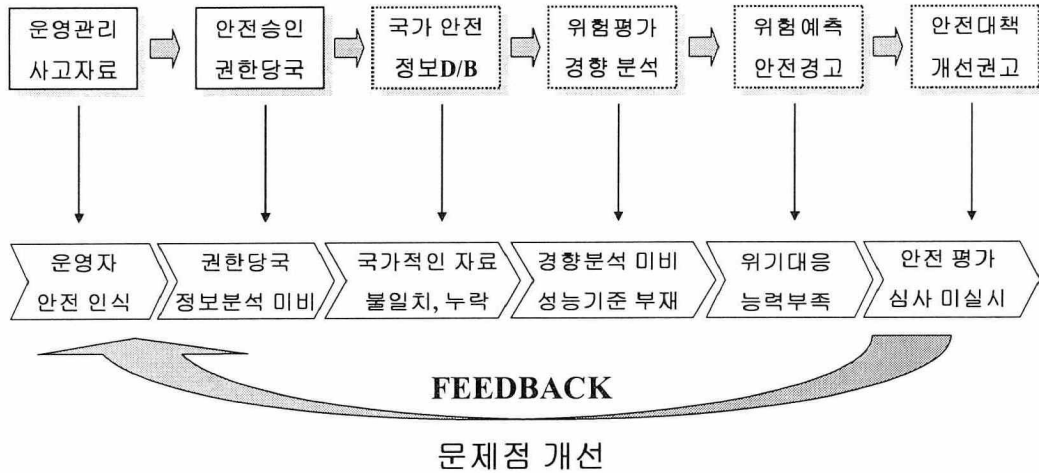
위험도가 높은 사고에 대해서는 다양한 시나리오 분석을 통해 안전대책의 수립이 가능하다. 안전대책에 따라 소요되는 비용과 기간, 피해예방효과가 각각 상이하어 이들 수치의 직접적인 비교가 용이하지 않다. 따라서 위험도저감 및 안전대책의 수행에 요구되는 투자비용과 안전개선 투자의 효과를 정량화하는 안전개선 투자비용의 산출이 요구된다. 또한 안전에 대한 투자비용에 대한 명확한 기준과 투명한 관리가 추가적으로 필요하다고 할 수 있다.

3.7 위험도 예측 모델의 구성 및 관리

철도시스템의 위험도평가 영향인자들은 많은 불확실성을 포함하고 있어, 위험도평가 결과의 신뢰성이 저하될 수 있다. 또한 일부 항목에 대해서는 자료가 부족하여 많은 가정이 포함될 수 있다. 위험도 평가를 지속적으로 수행할 경우 자료의 추가적인 확보나 수정될 시스템에 대해 예측된 위험도와 위험도 저감을 위한 안전시스템의 설치후 확인된 위험도의 비교를 통한 검증은 수행한다면 위험도 예측 모델의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 모델의 구성 및 지속적인 관리는 위험도 예측모델 외에 전절에서 기술한 많은 내용에도 해당된다고 할 수 있다.¹⁰⁾

4. 위험도 기반의 안전관리 모델

위험도 기반의 안전관리모델은 철도사고율이 낮은 철도운영국의 현황을 분석하여 도출한 모델로 요약하면 그림 1과 같다. 위험도 기반의 선진안전관리체계의 특징은 ① 시스템엔지니어링 개념을 활용한 안전관리, ② 전수명주기(설계-제작-시험-운행-유지보수)별 안전관리, ③ 사고원인별 위험도 예측 및 위험저감방안 마련, ④ 정기적인 위험도 평가와 시스템 도입/변경시 위험도 평가수행, ⑤ 활용가능한 모든 사고/장애자료의 활용(안전관리정보지원시스템), ⑥ 전문가 경험의 문서화 및 체계적 반영(사고시나리오, 인적요인분석), ⑦ 정량적인 안전개선 효과 및 안전투자 우선순위 결정이 있다.



5. 결론

본 연구에서는 위험도 기반의 철도안전관리를 위해 국내외 위험도 개념의 활용현황 분석을 수행하였으며, 국내외 철도안전에 위험도 개념 적용을 위한 안전관리 모델을 제시하였다.

- ① 예비위험분석을 통한 위험원의 관리 및 국내 환경에 적합한 위험도 모델의 구성
- ② 사고 빈도 및 사고심각도 결정등 위험도 평가를 위한 사고분류 및 DB 구축
- ③ 위험도 수준의 구분 및 허용 위험도의 결정
- ④ 등가사망 및 피해가치 환산 기준의 제시
- ⑤ 안전개선 투자비용의 자료
- ⑥ 위험도 예측 모델의 구성 및 관리

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, "철도사고방지 및 안전확보를 위한 핵심기술개발 연구", 2003
2. USNRC, "An approach for using probabilistic risk assessment in risk-Informed Designs on plant specific changes to the licensing basis", reg. guide 1.174, 1998
3. Health & Safety Executive, "Railway Regulations 2000", 2000
4. Network Rail, "Network Rail's Railway Safety Case, version 6", 2004
5. Kalay, S, "An international cooperative research approach to rail defect risk management", proc. of WCRR 2003, U.K. pp. 699-707, 2003
6. 철도청, "철도청 사고보고 및 수습처리규정", 2003
7. 곽상록, 왕종배, 홍선호, "철도안전관리 개선을 위한 확률론적 위험도평가 방안 연

- 구”, 한국철도학회지 특별기고, 2003년 2월, 제 6권 4호, pp. 11-18
8. U.S. DOT, Federal Transit Administration, "Hazard Analysis Guidelines for Transit Projects" DOT-FTA-MA-26-5005-00-01, Final Report, Jan. 2000
 9. 동화출판사, "최신 안전공학개론", 2002
 10. Railtrack, Profile of Safety Risk on Railtrack PLC-Controlled Infrastructure", Railway Safety Issue, SP-RSK-3.1.3.11, 2001