

# 자연재해에 대한 위험분석 및 경감대책



| 김 유 호 |  
(주)에이알텍  
대표이사

## 1. 서론

철도에서 시스템을 설계하고 평가하는 전반적 목표는 위험요소를 제거하거나, 그것이 불가능하다면 위험요소의 발생 확률을 매우 낮게 설계하여 위험성을 최소화하는 것이다. 즉, 위험도 제로(Zero risk)를 달성하기는 어렵지만, 위험조건으로의 노출시간을 최소화하여 위험성을 줄여야 한다. 특히 자연재해에 의한 철도교통의 안전 위험요인은 인간의 힘으로 제어할 수 없는 부분이기 때문에 오직 그 징후 또는 현상을 미리 감지하여 그 위험을 피하거나 감소시키는 방법뿐이다. 자연재해에 대한 위험성 분석은 기존 철도사고사례 자료를 통하여 개인적 위험(Individual risk) 기준과 사회적 위험(Societal risk) 기준에 따라 정량적 위험도 분석 방법으로 수행된다. 개인적 위험이란 철도 위험시설 주변에서 개인을 사상할 수 있는 확률로 나타난 것을 말한다. 사회적 위험이란 “규정된 위험을 인식함에 따라, 어느 주어진 모집단의 규정된 해악(害惡)레벨로 인한, 고통을 받는 수많은 사람과 빈도 사이의 관계”라고 정의된다. 결국 자연재해가 발생하면 개인적 위험과 사회적 위험을 최소화하기 위해 철도시설물에 대해 잠재적인 위험 원인, 가능한 시나리오, 사건발생 가능성, 사고영향, 사고발생확률, 피해정도 등을 세부적으로 분석하여 경감대책을 세워야 한다. 자연재해에 대한 피해를 최소화하고 사전에 재해를 인지하여 회피하기 위한 방법으로 철도운영기관에서 단독으로 검지시스템을 구축하는 것보다는 국가재해예방

관계기관으로부터 관련 정보를 입수하여 적절한 대응하는 것이 효과적이다.

## 2. 위험분석 기준

### 2.1 허용 위험도 기준

허용 가능 위험도를 결정하기 위해서 GAMAB (Globalement Au Moins Aussi Bon ; globally at least as good), MEM(Minimum Endogenous Mortality), ALARP(As Low As Reasonable Practicable) 등과 같은 여러 가지 원칙들을 사용할 수 있다. 허용 위험도 기준은 해당 위험도가 불균등하게 분포되지 않도록 보장하고 특정 집단이나 개인이 해당 프로젝트로 이익을 보는 평균 시민에 비해 훨씬 높은 위험도를 가지지 않도록 보장하는 것이다.

#### 2.1.1 GAMAB 원칙

정량적인 안전 목표가 없는 프랑스, 노르웨이는 GAMAB 원칙을 명시적으로 적용하고 있다. GAMAB이란 “전반적으로 최소한 동등한”으로 번역되며, “철도에서 어떤 기술적 또는 운영상의 변경에 따른 해당 시스템의 안전은 적어도 변경 이전보다 동등 이상이어야 한다.”는 것이다. 이러한 가정은 통상 사고자료보다는 기술적 고려사항에 기반을 둔다.

#### 2.1.2 MEM 원칙

독일에서 MEM은 “최소한의 내부원인에 의한 사망위

험도”를 줄인 말이며, 내부원인 사망 위험도는 질병이나 자연사와 같은 자연적 원인에서 초래된다. 이때 내부원인 사망 위험도의 최저 수준은 14~15세의 연령대에서 ‘ $R_m = 2 \times 10^{-4}$  사망자/인 · 년’으로 제시하고 있다. MEM 원칙은 ‘어떤 개인을 위험하게 만드는 수많은 상이한 시스템이 병행되어 있는 경우 각각의 단일 시스템은 전체 위험도의 5% 이상을 기여하지 않아야 한다.’는 것을 가정한다.

2.1.3 ALARP 원칙

ALARP은 영국, 호주, 네덜란드 등에서 적용한다. 산정된 위험도가 최대 한계(허용불가 영역) 이상이고, 더 이상의 제어대책을 해당 위험도에 도입할 수 없다면 정말로 허용 불가능한 것이다. 반대로 산정된 위험도가 통상 허용 가능한 영역 이하이면, 위험도는 일반적으로 사소한 수준이며 적절히 통제되는 것으로 간주된다. 중간 영역은 허용 가능한 영역 또는 ALARP 영역이다. 이 영역의 위험도는 사람들이 이익을 보장하기 위하여 준비하는 활동에서 초래되는 전형적인 위험도이다. ALARP 원칙을 적용한 허용 위험도 수준 판단 사례를 보면, 영국 철도위원회는 1990년대 초반 철도 활동으로 영향을 받는 3개 집단에 대해 다음과 같은 연간 사망 위험도 허용기준을 결정했다.

- 1) 연간 직원 10,000명당 1명의 사망자
- 2) 연간 여객 100,000명당 1명의 사망자
- 3) 인구 1백만명 당 1명의 사망자

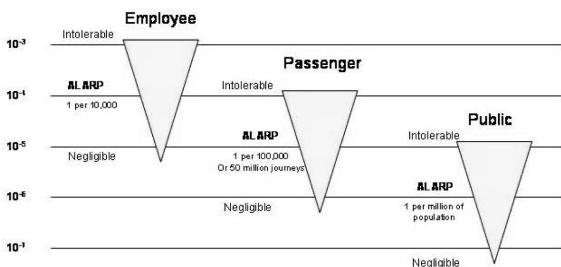


그림 1. 영국철도의 개인(사망)위험도 허용범위

3. 위험분석 방법

위험지역, 개인 또는 철도직원의 재해위험은 위험원(Hazard)과 취약성(Vulnerability) 2가지 인자에 따라 자연재해에 대한 위험도를 산출할 수 있으며 자연재해 위험도는 위험원과 취약성을 곱으로 표현된다.

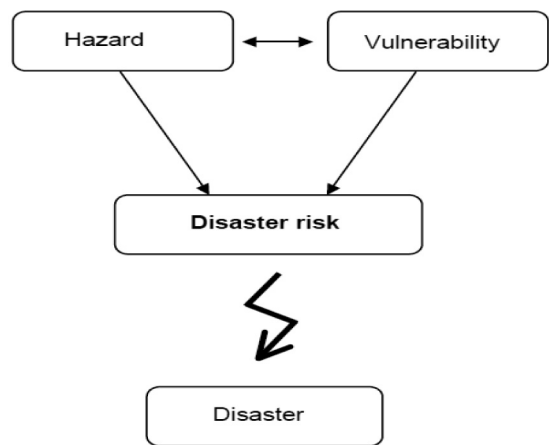


그림 2. 자연재해 위험도의 구성 성분

3.1 자연재해 위험원

자연재해의 위험원은 일정 수준으로 악영향이 발생할 가능성이 있는 극단적 자연재해이다. 실제 자연재해(Real natural hazard)와 사회적 자연재해(Social-natural hazard)간의 차이를 도출할 필요가 있다. 엄밀한 자연현상으로는 사람들이 자연현상과 관련하여 영향을 끼치지 않는 않지만, 극단적 자연재해와 자연에 대한 인간의 개입이 결부되면 사회적 자연재해가 유도되어 악화될 수 있다. 위험원은 지리적 위치에 따라 위험의 강도(Intensity)와 역사적 발생확률(Probability)이 다르게 나타난다.

3.2 취약성

취약성이란 자연재해의 악영향으로부터 개인이나 시설물을 보호할 수 있는 수단이나 능력이 부족하지만, 그 영향으로부터 빠르게 복구될 수 있다는 의미이다. 주요 취약요인들을 요약하면 다음과 같다.

3.2.1 정치-제도적 인자(Political -institutional factors)

- 1) 국가의 관련규정이 부족하고, 위험원에 적합하지 않거나 구현되지 않고 있다.
- 2) 재난위험 관리 및 대비 시 이용 가능한 인력 및 재정 자원이 불충분하다.
- 3) 적절히 또는 명확하게 역할이 할당되지 않고, 책임 기관간의 조정이 부족하다.
- 4) 지속적인 재해위험 관리와 효율적 방재 대책에 대한 정치·문화적 인식이 부족하다.

3.2.2 경제적 인자(Economic factors)

- 1) 재난위험 관리에 대한 정부의 재정 자원이 불충분하거나 재해 대처에 효율적인 메커니즘이 존재함에도 불구하고, 일반적인 가난이 국민 대부분의 자립력을 제한한다.
- 2) 가난은 사람들이 점점 더(강둑 및 가파른 경사면, 계곡 또는 골짜기, 또는 화산의 비탈면 같은) 위험 지역에 정착하도록 강요한다.

3.2.3 사회적 인자(Sociocultural factors)

- 1) 인과관계 매트릭스에 관한 빈약한 교육 및 불충분한 지식으로 인해, 사람들이 변화하는 환경에 적절히 대처하지 못할 수 있다.
- 2) '자연재해는 피할 수 없다'는 믿음의 결과로 운명론이 널리 만연해 있다.
- 3) 대중은 더욱 높은 수준의 일반 복지를 모색하는 과정에서 경쟁적 이익을 협상하기 위해 상호 지원 체계를 자체적으로 조직할 준비가 되지 않을 수 있다.

4. 위험분석 사례

4.1 전 세계 기상에 따른 위험도

그림3, 그림4, 그림5는 자연재해에 대한 전 세계 위험 분석보고서에서 강풍, 폭우, 지진에 대한 각 나라의 사망률 및 경제적 손실 관련성과 위험도의 분포를 나타낸 것이다. 색깔이 없는 곳은 위험을 나타내지 못할 정도의 작은 수치

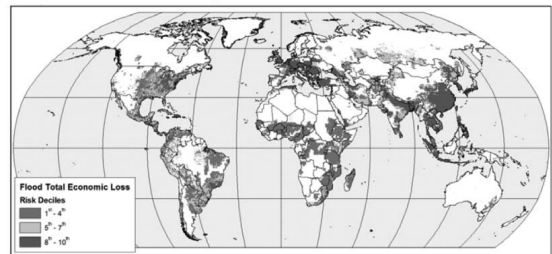
◎ 총경제적 손실[Total economic loss]



한반도의 경우, 지진에 의한 총 경제적 손실은 매우 낮음.

그림 3. 지진의 위험도에 대한 세계적 분포

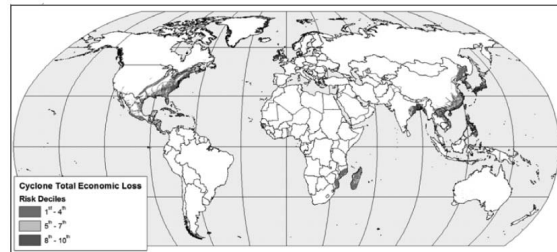
◎ 총 경제적 손실[Total economic loss]



한반도의 경우, 폭우에 의한 총 경제적 손실은 매우 높음.

그림 4. 폭우의 위험도에 대한 세계적 분포

◎ 총 경제적 손실[Total economic loss]



한반도의 경우, 강풍에 의한 총 경제적 손실은 높은 편임.

그림 5. 강풍의 위험도에 대한 세계적 분포

임을 뜻한다. 지진은 일본의 경우 위험한 수치를 나타내는 것에 반하여, 우리나라는 위험도출에 없는 것으로 나타나고 있다. 강풍은 노란색 수치로서 5th~7th을 나타내고 있고, 폭우는 빨간색 수치로 8th~10th로 매우 위험한 수치를 나타내고 있다.

4.2 위험분석 평가

위험도 평가 시 자연재해에 대한 심각도는 철도사고 사례를 통해 등가사망(EF: Equivalent Fatality) 위험도로 환산

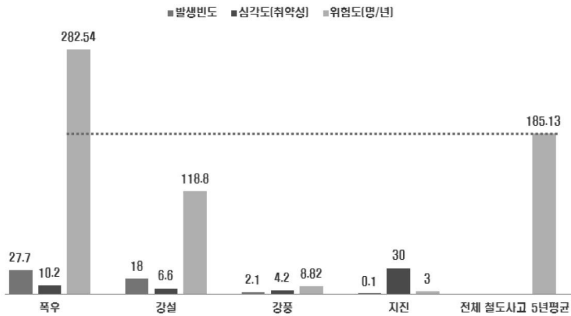


그림 6. 자연재해 위험도 평가

(사망1: 중상10: 경상100)하여 비교한 결과를 그림 6과 같이 심각도는 지진의 피해가 30으로 가장 크게 나타났고, 발생 빈도가 높은 폭우가 10.2로 두 번째로 높다. 자연재해의 위험성을 비교하기 위해 2003년부터 5년간의 철도사고 이력을 기반으로 철도사고 위험도 평가모델을 적용하여 선정한 여객, 공중 및 직원에 대한 등가사망위험도는 5년 평균에 비해 폭우의 위험도가 더 높고, 강설 또한 높은 수치를 나타낸다.

## 5. 위험경감 대책

자연재해에 의한 철도선로의 위험 확인 및 대책은 그림 7과 같은 절차를 통해 수행된다. 즉 위험을 감지하여 안전대책을 수립하여도 미처 대처하지 못한 위험에 의한 사고는 비상상태와 사건(Incident)으로 분류하고 각각에 대하여 대응할 수 있도록 한다.

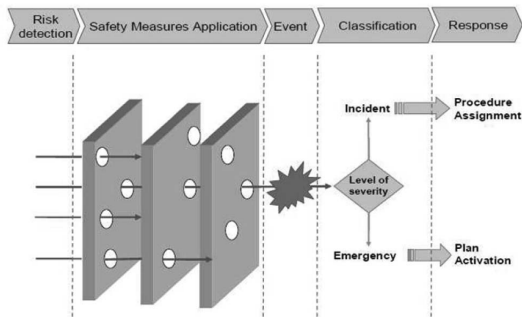


그림 7. 위험 확인 및 대책 절차

### 5.1 국가통합지휘무선망구축

국가통합지휘무선통신망 기술은 VHF, UHF, 주파수공용 무선 통신 시스템 (TRS, Terrestrial Trunked Radio System)을 거쳐 협대역 및 준광대역 디지털지상무선통신 기술로 진화되어 왔으며, 철도분야에서는 TETRA를 많이 사용하고 있는데 TETRA란 TERrestrial Trunked RADIO System의 약자로서, 유럽통신표준화기구(ETSI, European Telecommunication Standards Institute)에서 진행중인 프로젝트의 명칭이자 시스템의 명칭이다. 국가철도망 구축계획 (2006~2015)에 의해 따르면 열차운행속도를 180km/h ~200km/h이상으로 향상시켜 대도시간을 2~3시간 이내 이동함으로써 속도경쟁력을 향상시키고 있다. 이에 따라 자연재해의 위험성도 가중된다고 보며 자연재해 발생 시 빠르고 정확한 재난 상황의 전파와 열차의 안전운행을 위하여 국가통합지휘무선통신망에 대한 활용의 필요성이 절대적으로 대두되고 있다.

### 5.2 자연재해 요소별 예방대책

#### 5.2.1 지진

##### 1) 구조물보강

일본의 경우, 한신~아와지(Hanshin~Awaji)대지진 이후, 토카이도 신칸센 노선 전체에 대한 내진 진단결과에 따라, 고가궤도 교각에 대한 내진 보강을 완료하였다. 우리나라의 경우, 2002년 철도청이 일반철도 시설물에 대한 내진성능 평가 결과 교량 327개와 터널 61개 등 총 388곳의 보강이 필요한 것으로 지적됐다. 한국철도시설공단이 2006년 7월부터 2008년 4월까지 콘



그림 8. 대만 고속철도 지진방지방용 Viaduct

크리트 시설물(328개)에 대해 실시한 내진성능 상세평가에서도 교량 262개와 터널 25개 등 287곳의 성능보강이 시급한 것으로 확인된 바 있다. 교량의 성능보강은 교각 위 구조물을 받치는 ‘교자장치’를 내진 설계된 제품으로 교체 또는 교각을 강화하여 지진의 피해를 예방하고 있다.

2) 지진조기경보체계 강화

일본의 동해여객철도에서 운영되고 있는 TERRA-S는 S파(횡파, Longitudinal wave)보다 빠르게 이동하는 P파(종파, Transverse wave)를 먼저 감지하고, 지진의 크기 및 진앙거리를 판별하기 위해 실시간으로 이를 모니터링하고 계산한다. 이 시스템은 경보를 발령하기 전에 피해의 정도를 추정한다. 큰 규모의 지진을 감지한 경우, 모든 열차를 안전하게 정지시키기 위해 전차선 전원을 즉시 차단한다.

토카이도 신칸센(Tokaido Shinkansen)에는 총 21개의 감지지점을 설정하여 운영하고 있다. 우리나라의 기상청은 지진속보 체계 고도화 일환으로 2015년부터 현업에 적용할 수 있는 조기경보시스템 개발을 진행 중에 있다. 2020년에는 조기경보체계가 확립되어 지진관측 후 10초 이내에 경보를 발령할 수 있도록 하며, 관측망 내부에서 발생한 지진의 경우 진앙 위치 오차는 5km 이내, 규모 오차는 ±0.5 이내를 목표로 하고 있다.

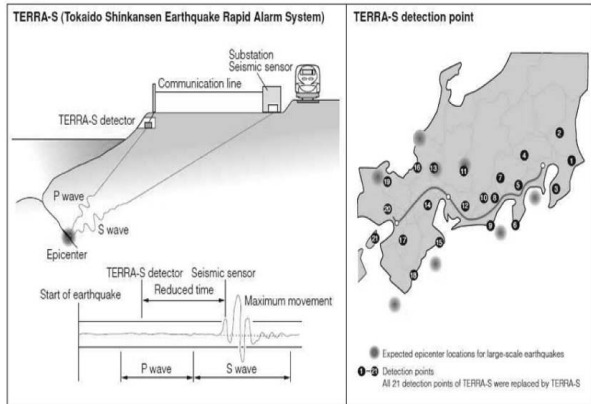


그림 9. TERRA-S신칸센 지진경보시스템

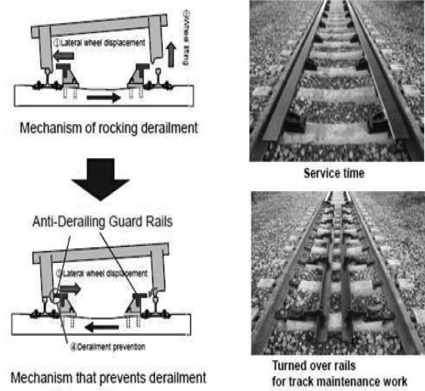


그림 10. 탈선 방지카드와 탈선 예방대책

3) 열차탈선대책

일본의 동해여객철도에서는 2009년 10월 이후, 토카이도 신칸센의 새로운 지진대책으로서 탈선방지대책을 구현하였다. 지진 발생시간 동안에 열차 탈선사고를 방지하기 위해서는 강한 진동을 겪을 것으로 예상되는 구간과 열차가 고속으로 통과하는 분기기 바로 직전의 구간에 레일과 평행하도록 레일 내부에 “탈선방지카드(Derailment prevention guards)”를 설치하였다.

5.2.2 폭우

1) 물리적대책

경부고속철도의 기상검측설비는 관제실에서 1단계구간(광명~대구) 11개소, 2단계구간(대구~부산) 5개소 총 16개소에 설치되어 풍향, 풍속, 폭우, 강설을 실시간으로 열차의 운전을 규제하고 있다.



그림 11. 강우 대비 콘크리트격자 프레임

일본의 경우, 기존선 및 신칸센 전 구간에서 '강우자동 경보시스템'을 활용중이며, 이 시스템은 강우량의 자동입력 및 경계우량과의 비교분석에 의한 폭우 시 열차안전 확보 및 수해발생 예·경보가 가능하다. 폭우에 대비하여 비탈면을 완만하게 시공해야 하며, 선로에 토사, 낙석 및 유수 등이 유입되지 않도록 예방조치를 취해야 한다. 그림 11은 JR 동일본 철도에서 강우에 대비해 구축한 구조물이다.

2) 운전규제

폭우에 대한 경부고속철도 운전규제는 일일 연속 강우량이 150mm 이상이고 시간당 강우량이 60mm 이상이거나, 고가 및 교량구간의 시간당 강우량이 70mm 이상 시, 열차의 운행을 중지하고 시설물 점검 후 정상으로 판단 시 단계적으로 속도를 향상하게 되어 있다. JR 서일본 철도에서는 전체 구간을 갑 구간, 병 구간, S구간으로 강우량에 대한 운전 기준을 규정하고 있다. 갑 구간에서는 열차의 규제없이 경비(경계)만 하고, 병 구간에서는 45mm부터 열차의 서행운전을 시행하며, 특별히 폭우에 취약한 구간을 S구간으로 설정하여 35mm부터 서행운전을 시행하게 되어 있다.

5.2.3 강풍

1) 물리적대책

철도차량의 주행안전성으로 문제가 되는 것은 탈선과 전복이다. 전복의 경우, 곡선통과형태(속도, 캔트, 슬랙) 및 측풍에서 기인한다. 탈선은 차륜과 레일 간에서 일어나는 현상으로 크게 분류하면, 타고 오르는 탈선과 미끄러져 오르는 탈선, 튀어 오르는 탈선으로 분류된다. 선로변의 풍

량 상황을 빠짐없이 파악하기 위해서는 먼저 측정장치를 짧은 간격으로 많이 배열해 두는 것이 바람직하다. 경부고속철도의 강풍 검지는 기상검측설비에 포함되어 있으며 1단계구간(광명~대구) 11개소, 2단계구간(대구~부산) 5개소 총 16개소에 설치되어 있다. 일본의 경우, 2008년까지 기존선에는 543개소, 신칸센에는 149개소 총 692개소에 풍속계가 설치되어 운행하고 있다.

2) 운전규제

강풍에 대한 경부고속철도 운전규제는 풍속 45m/sec 이상일 경우 열차 운행 보류 또는 중지, 풍속 30m/sec 이상 40m/sec 미만일 경우에는 단순경보와 함께 170km/h 이하로 속도를 규제하고, 풍속 40m/sec 이상 45m/sec 미만일 경우에는 위험경보를 발령하며, 동시에 90km/h 이하로 속도를 규제한다. 일본은 바람의 영향이 큰 지역에 대해 선로변에 풍속계를 설치하여 풍속이 위험 수준에 달하면 열차 운행 시 차량 운행 제어장치를 사용하여 순간 풍속이 25m/sec 이상 시 조기경보 체계로 열차를 멈추게 하는 것이다.

5.2.4 강설

1) 물리적대책

경부고속철도의 강설검지는 기상검측설비에 포함되어 있으며 경기도 화성, 경북 김천 및 고무에 설치되어 있는 기상검측설비 내에 포함되어 있다.

우리나라 기존선이 고속화(180km/h~230km/h)로 인해 강설에 대한 대비책 강구가 요구되고 있다. 강설시 철도 피해를 자연현상과 관련하여 정리하면 다음과 같으며 이들에



그림 12. 교량의 방풍펜스



그림 13. 스페인 고속철도 강설검지기



그림 14. 용설장치

대한 안전대책이 요구된다.

- 강설: 분기기 전환불능, 도중 정지, 지연, 구조물 파손
- 적설: 분기기 전환불능, 도중 정지, 지연, 제설 불능
- 착설: 가선절단, 팬터그래프 하강, 차량 파손

#### 2) 운전규제

강설에 대한 경부고속철도 운전규제는 레일면이 눈에 덮여 보이지 않을 때에는 30km/h 이하로 운전을 규제하며, 구간 내 적설량이 21cm 이상일 때는 130km/h 이하, 적설량이 14cm 이상 21cm 미만일 때는 170km/h 이하, 적설량이 7cm 이상 14cm 미만일 때는 230km/h 이하로 운전을 규제하고 있다.

도카이도 신간선의 경우 강설 21cm 이상 25cm 미만일 경우 160km/h 이하로 운전을 규제하고, 25cm 이상 35cm 미만은 110km/h 이하 그리고 35cm 이상에서는 열차 운행을 억제하고 있다.

## 6. 결론

- 1) 강풍으로부터 열차의 안전을 확보하려면 강풍의 위험이 있다고 판단되는 교량과 지역에 풍속계를 설치

하여 신속한 경보체계를 구축하여야 하며, 경량전철과 같이 축중이 가벼운 차량에 대해서는 원천적으로 방풍벽을 설치하여 열차가 속도의 규제없이 주행할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

- 2) 폭우에 대비하기 위해서는 비탈면을 완만하게 시공해야 하며, 선로에 토사, 낙석 및 유수 등이 유입되지 않도록 예방조치를 취해야 한다.
- 3) 강설 시 착설로 인한 피해를 예방할 수 있는 설비의 보강이 필요하며, 신호장애를 최소화하기 위해 분기기의 침단부분에 용설장치를 확대 설치하는 방안도 필요하다.
- 4) 지진에 대한 열차의 안전을 확보하기 위해서는 지진감시시스템의 도입이 필요하겠으나 우리나라의 지리적, 역사적 통계지표를 고려할 때 선로변에 지진감시시스템을 설치하는 것보다 국가통합지휘무선통신망을 적극 활용해 조기경보체계를 활성화할 필요가 있다.

자연재해가 철도 인프라에 손상을 끼치는 것은 피할 수 없지만, 적합한 사전 대책을 통해 피해를 최소화할 수 있다. 그러기 위해서는 정부와 철도운영기관이 선진국 수준의 철도 안전에 대한 투자가 지속적으로 이루어져야 할 것이다. ☺

### ♣ 참고 문헌

1. V.M. Trbojevic, "Risk criteria in EU", Risk Support Limited, London, U.K.
2. Institute of Chemical Engineering, Nomenclature for hazard and risk assessment in the process industries, 1985.
3. Natural Disaster Hotspots : A Global Risk Analysis, 2005
4. 고속철도운전취급규정, 한국철도공사, 2008
5. 왕중배, 전한준, 이원순, 임승수, 고속철도 안전관리 현황과 운행안전 대책, 한국철도기술연구원, 2001