

철도종합방재시스템 구축 현황 및 개발사례

신 민 호 (한국철도기술연구원 기획조정실 실장 수석연구원)

김 현 기 (한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 주임연구원)

1. 서언

지진, 태풍, 홍수, 가뭄, 해일, 화재, 전염병 등에 의한 피해인 자연 또는 인위 재해는 토목기술자 입장에서 「방어가능 재해」와 「불가항력적 재해」의 두 가지로 나눌 수 있다. 일반적으로 재해는 태풍·지진과 같이 직접적으로 재해를 유발시키는 1차 원인과 전염병 등과 같이 1차 원인이후 간접적으로 재해를 유발시키는 2차 원인이 있으며, 피해유발의 정도에 따라 추가적인 재해를 유발시키는 확대요인 그리고 발생한 재해에 대처하거나 재해를 미연에 방지하고자 하는 방재 대책으로 구성된다. 한편 재해의 특징으로는 급격성, 광역성, 동시성, 예측불가능성이 있으며, 이에 부가하여 우연성, 국지다발성, 반복성 및 역사성이 있다. 또한 재해발생 지역에 있어서는 적절한 방재 대책을 시행하게 되므로 면역성도 있는 것이 재해의 특징이라 할 수 있다.

국내에서 자주 발생하는 대표적인 재해 원인으로 는 장마와 태풍을 들 수 있는데 이와 같은 장마 및 태풍은 매년 6월에서 8월 사이에 우리나라를 관통하면서 연평균 약 248억원의 막대한 피해를 유발시킨다. 최근 9년동안의 철도청 피해복구비는 약 2,233억원으로 집계되고 있으며, 특히 2002년 장마와 태풍 루사(RUSA), 또 2003년 태풍 매미(MAEMI)는 사상유례 없는 강우와 강풍을 동반하며 도로·철도·농경지·가옥 등 국내 전 기반시설에 대하여 막대한 피해를 입혔다. 철도의 경우 2년간의 태풍 피해로 총 168개소의 피해지역이 발생하였으며, 이로 인한 복구비용

만도 약 2,063억원 정도를 추정하고 있다.

이에 본 고에서는 장마, 태풍 등으로 인한 국내 교통망의 핵심인 철도가 받은 자연재해 현황 분석, 철도청과 한국철도기술연구원의 재해 최소화를 위한 노력, 철도종합방재시스템 구축 현황 파악, 그리고 지금까지 개발된 각종 방재시스템 개발 사례의 재조명을 통하여 자연재해 발생의 억제를 위해 추진하고 있는 다각적인 노력에 대하여 기술키로 한다.

2. 철도 자연재해현황

최근 9년간 철도에서 발생한 자연재해로 인한 철도 재해건수 및 피해액을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 재해건수는 1998년도에 319건으로 가장 많은 것을 알 수 있는데, 이는 당시 국지성 호우에 의해 경기북부 일원에 호우가 집중되었기 때문이다. 그러나 피해액 규모면에서는 소규모 재해가 많아 피해복구액이 적게 산정되었다. 2002년과 2003년의 경우 총 재해건수는 각기 91건(태풍 루사 피해 48건)과 77건(태풍 매미 피해)로 집계되었지만, 대형 태풍에 의한 피해가 극심하여 재해건수에 비해 피해복구액이 급격하게 증가한 것을 알 수 있다. 이와 같은 태풍은 전국적인 노선에 걸쳐 발생하고 있으며 열차운행 불통과 같은 막대한 피해를 동반하게 되며 급격한 하천수위 증가 및 외부로부터 유입된 토석류 등에 의해 교각 전도, 노반 유실과 산사태 등의 다양한 피해가 발생하고 있다. 태풍 루사의 경우 발생한 노선별 철도피해

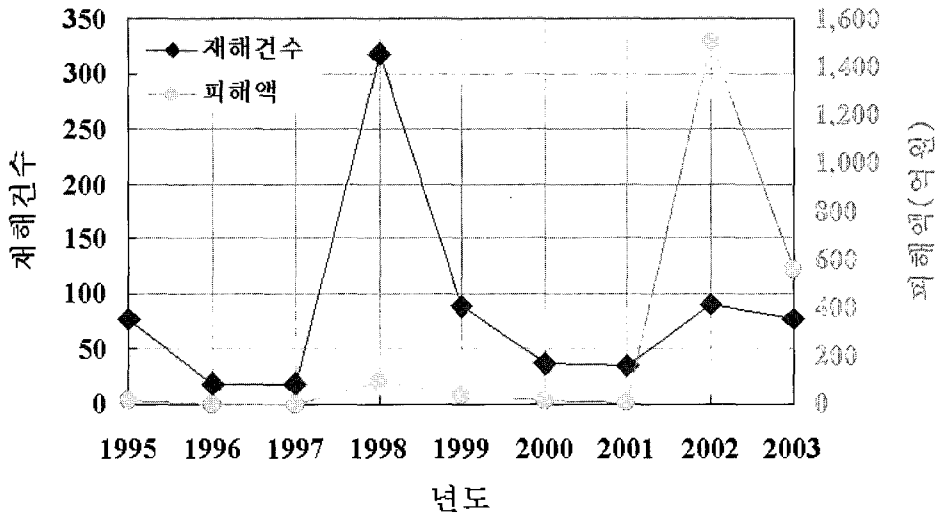


그림 1. 최근 8년간 철도 자연재해건수 및 피해액 분포

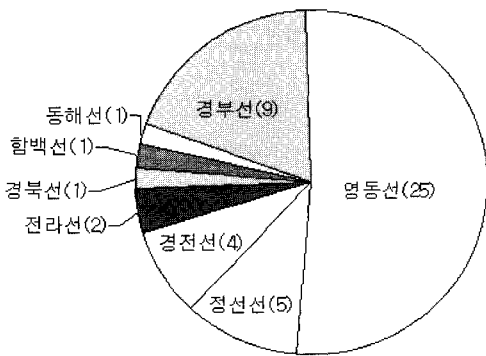


그림 2. 노선별 철도피해현황

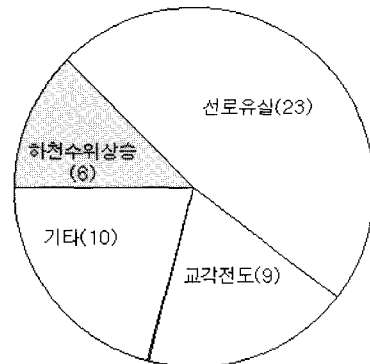


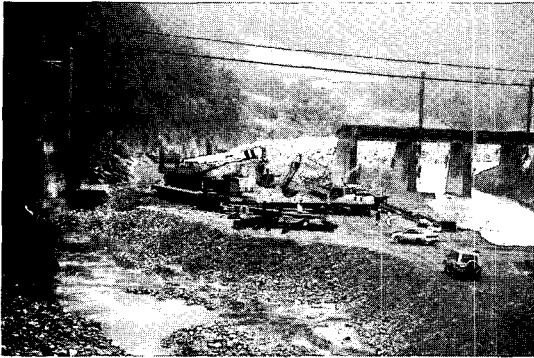
그림 3. 피해유형별 철도피해현황

현황을 그림으로 나타내면 그림 2와 같다.

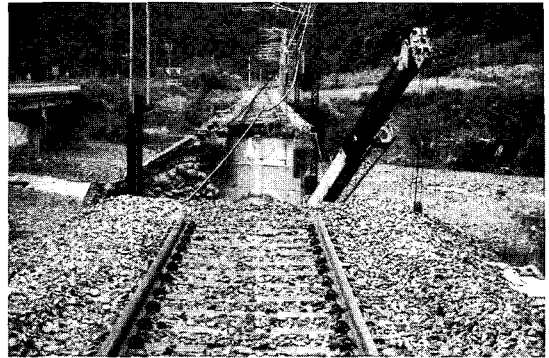
또한 그림 3은 피해유형별 철도피해현황을 보인 것으로 하천수위상승 6개소, 선로유실 23개소, 교각전도 9개소, 기타 10개소이며 철도재해 비율은 선로유실, 교각전도, 하천수위상승, 기타의 순으로 많이 발생된 것을 알 수 있다. 그림 4는 대표적인 피해유형별 복구현장 사례를 보여준다.

국내 철도재해의 대부분은 여러 가지 자연재해 원

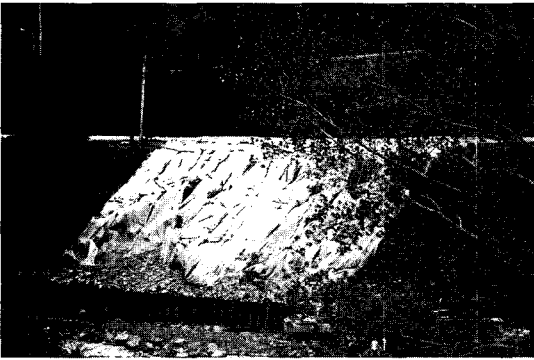
인 가운데 태풍에 의한 홍수재해와 국지성 호우가 많은 부분을 차지하고 있으며, 폭풍에 의한 피해도 종종 동반되고 있다. 그동안 운영처에서는 지속적인 재해 감소노력으로 재해발생건수를 대폭 줄여 왔지만 최근 들어 발생한 인간의 힘으로는 감당키 어려운 자연재해에 대해서는 그 피해가 최소화될 수 있도록 보다 선진화된 재해 예방 및 대처 방법이 강구되어야 할 것이다.



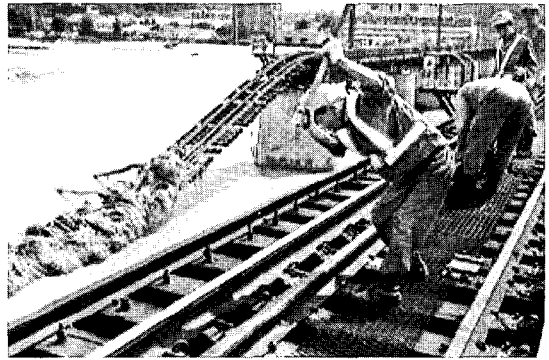
(a) 교각붕괴(영동선)



(b) 교대배면붕괴(영동선)



(c) 노반유실(영동선)



(d) 교각 붕괴(김천시 경호강교)

그림 4. 계단모형 실험

3. 재해예방을 위한 노력

3.1 철도청 방재 추진현황

철도청에서는 년차별 방재집행계획을 수립하고 있

으며, 중점 추진방향으로는 지진까지 대비한 시설물의 관리 강화를 포함한 예방위주의 방재행정, 방재업무의 효율적인 운영 및 통제기능 강화 및 철도 각 분야별 총력 대응태세 구축에 의한 방재체제의 확립, 재해우려개소 예방작업의 적극적인 추진 및 교육훈련

표 1. 재해예방시설개량사업 추진 현황

단위 : 백만원

구 분	총 대 상		2003예산		2004예산(안)		2005이후
	금 액	내 용	금 액	내 용	금 액	내 용	
계	688,748	362개소	11,450	18개소	15,000	24개소	1,302개소
교량확장	385,517	72개소	7,485	4개소	10,000	4개소	57개소
교량기초보강	90,140	204개소	485	1개소	3,000	10개소	185개소
하수설치	10,319	126개소	700	5개소	500	5개소	109개소
산사태방지	38,042	66개소	590	3개소	1,000	2개소	59개소
옹벽설치	119,624	615개소	2,190	5개소	500	3개소	604개소
노반보강	45,106	279개소	-	-	-	-	279개소

으로 사전 예방사업의 적극 추진, 재해발생시 신속한 열차방호 및 시설물 응급복구를 포함하고 있다. 수해 우려개소에 대한 시설물을 개량하여 자연재해를 사전에 예방함과 동시에 1998년도 이후 매년 반복되는 수해피해를 근본적으로 대처 및 해소하기 위해 2001년부터 재해예방시설개량사업을 신설하여 추진하고 있다(표 1 참조).

세부적인 내용으로는 i) 년차별 계획 수립에 의한 별도사업으로 추진, ii) 우수단면 부족 및 병목화된 교량의 확장, iii) 상습침수, 궤도매몰, 독붕과 우려개소에 하수 및 옹벽 설치, iv) 낙석우려개소에 대한 피암터널 및 낙석방호철책 설치, v) 교각기초세굴 및 하상세굴개소 교량 기초보강 등으로 구성되어 있다.

또한 재해관리 단계별 종합 대책으로는 방재체제 정비·재해위험지구 및 시설점검/정비와 장비·재료 확보, 교육 및 훈련을 포함하는 '예방 및 준비단계', 재해대책본부 운용 및 재해발생시 신속한 대응으로 피해를 최소화할 수 있는 '대응단계', 피해지역에 대한 항구복구 실시 및 피해원인조사 및 피드백 기능 강화를 수용한 '수습 및 복구단계'의 3단계로 나누어 종합적이며, 신속한 대책이 가능토록 하고 있다.

3.2 철도재해예방을 위한 연구추진현황

한국철도기술연구원에서는 '종합안전진단기법 및 방재시스템에 관한 연구(1995)'를 통해 국내·외 방재시스템의 현황조사를 바탕으로 한 방재시스템 구축계획 및 운영 방안에 대한 기초적인 검토를 실시하였으며, 이를 기반으로 1999년 9월부터 2003년 9월까지 건교부 건설기반혁신기술개발사업인 '철도시설물 안정성강화기술 개발'을 통하여 선로연면의 토공사면의 강우시 안정성 확보방안, 낙석우려개소 평가기법·검지시스템 개발 및 반사면 현장조사에 의한 효율적 유지관리방안 등에 대한 재해방지와 예·검지 시스템을 개발하였다. 또한 2001년 7월부터 2002년 7월까지 1년간 '강우시 선로 및 사면 방재를 위한 강우자동경보장치 개발' 기업공동연구를 통해 연구원 자체사

업으로 추진하여 강우량계 장치를 포함한 실시간 강우정보 운영 Proto-type 시스템을 성공적으로 개발하였고, 이를 현장에 적용하는 등 개발된 기술적용을 위한 다각적인 시도를 해 오고 있다. 그리고 건교부 국가교통핵심기술개발사업 중과제인 'Safe Rail System 기술개발' 과제의 세부과제인 '첨단 철도기상재해 감시 및 운행제어장치 개발' 과제를 2003년 6월부터 수행중이며, 이를 통해 철도교량 홍수위 감시장치, 홍수시 철도교량 통과를 위한 열차운전규제 기준 등을 개발할 예정이다.

철도청에서는 환경적 변화와 시대적인 재해예방을 위한 요구로 다양한 연구사업을 추진하고 있다. 먼저 '강우자동경보시스템 구축 및 철도강우방재시스템 구축 용역(2330. 12~2004. 11)'을 발주하여 전노선에 강우자동경보시스템을 구축함과 동시에 강우에 의해 발생할 수 있는 여러 가지 재해를 최소화하기 위한 강우방재시스템의 로드맵 등을 포함하여 철도종합방재시스템 구축을 위한 자체 계획안을 수립하고 있다. 또한 '철도절개면 안정성 평가 및 대책방안 연구(2003. 12~2004. 12)'에서 전노선에 걸쳐 재해우려 절개면으로 분류된 모든 개소에 대한 현장조사를 실시하고 이중에서 위험개소로 분류된 개소를 정밀조사 및 분석함에 의한 안정성 평가를 실시하고 이를 근거로 최적 대책방안을 제안하고자 용역을 추진하고 있다.

4. 철도방재시스템 개발 현황

최근 자연재해에 의한 철도피해의 원인을 분석해보면 다음과 같다. 즉, ① 지형 특성상 계곡을 따라 건설된 철도 특성, ② 태풍에 의한 집중호우(기상관측 이후 최대기록)로 인한 하천증수, ③ 공용년수 증가에 의한 철도구조물 노후화, ④ 하천증수를 대비한 하천수리시설에 대한 유지관리 부족, ⑤ 과도한 하천증수로 인한 교각 하부의 세굴 가능성 (구조물 안정성 검사 및 설계시 확률강우년도의 증대 필요), ⑥ 산간 및 하천인근 지역의 철도노반으로의 토석류 유입 등이다.

철도의 안전운행을 확보함과 동시에 자연재해의 영향을 최소화하기 위해서는 시간(time), 위치(location), 종류(type)의 예측이 가능해야 한다. 그러나 자연현상은 인간이 고도의 기술을 가지고 있어도 정확히 예측하기 어려운 것이 현실이다. 이에 철도청 및 한국철도기술연구원에서는 철도시설의 유지보수·보강, 열차운전규제기준 설정, 재해 예·검지시스템 구축의 3가지 방법으로 대처함으로써 열차의 연속적인 운행과 절대안전을 이루는데 노력을 집중하고 있다.

4.1 철도시설의 보수·보강

국내 철도영업선의 대다수 노선은 시공된 지 수 십년이 경과된 것이 많으며 따라서 철도시설 각 부분이 자연외력에 대해 충분한 내구성을 갖지 못하는 것이 현실이다. 이와 같은 재해우려 위험시설에 대해서는 합리적인 투자 및 조사우선순위를 통해 보수·보강할 개소를 먼저 선정하고 최적의 보수·보강 기술을 적용, 시공되어야 하지만 아직까지 국내 철도분야에 있어서는 모든 철도구조물에 대해 각각의 특성을 반영한 표준화된 평가법 그리고 철도시설별 조사 및 투자우선순위 선정법이 정립되어 있지 않아 그 보수, 보강이 체계화되어 있지 않다. 현재 이와 같은 부분이 정립되어 있는 분야는 선로연변 사면 및 낙석에 대한 부분이지만 각종 토구조물(암거 등 지하구조물 포함), 교량, 터널, 선로구축물 등 미비한 분야에 대한 지속적인 예산지원 및 연구개발 투자가 필요하다. 이와 더불어 건교부, 시설안전공단 등에서 제시한 안전진단기준에 의해 일률적으로 적용되는 모든 구조물의 안전진단에 대해서도 철도의 경우, 열차의 진동특성에 의해 구조물에 전해지는 외력이 달라지므로 이를 충분히 고려할 수 있는 철도구조물 안전진단기준도 재정립되어야 한다.

4.2 열차의 운전규제

열차운전규제는 타 교통수단과 다르게 대량운송체

계인 철도의 안전을 보다 확고히 하기 위해 열차안전에 위협을 줄 수 있는 한계우량, 한계풍속, 한계강설량 등을 설정하여 돌발적인 악천후 및 기상상황변화에 적극적으로 대처하기 위한 기술적, 정책적 기반을 말한다.

강우 등과 같은 자연외력에 대해 열차 또는 철도시설의 재해 가능성(탈선 또는 붕괴)이 크다고 판단되면, 운행중인 열차는 감속하거나 운행을 중지한다. 강우에 대해 열차의 감속과 운행 중지를 나타내기 위해서는 누적우량, 시간우량, 연속우량, 한계우량, 실효우량 등의 여러 가지 강우지표가 활용되고 있다.

한국철도기술연구원에서는 2000년에서 2001년까지 2개년 동안 강우시 열차의 안전확보를 위한 경계우량으로 일본철도종합연구소에서 연구된 바 있는 통계적인 해석 방법 즉, 수량하 I류 해석에 의해 국지성 호우가 많이 발생하는 경기북부지역에 대하여 경계우량을 정의하였다. 또한 선로연변 지형·지질학적 특성을 고려하기 위해 일본, 호주, 인도, 홍콩 그리고 국내의 타 분야에서 제안되어 사용되고 있는 점검양식을 분석한 후 철도고유의 특성에 적합한 노반 및 사면점검양식을 제안하였다.

그림 5는 경춘선에 적용된 경계우량을 이용한 열차운전규제 기준을 보여준다.

한편 경계우량을 이용한 열차의 운전규제기준은 통계적인 방법에 기초하기 때문에 정확한 정보를 갖

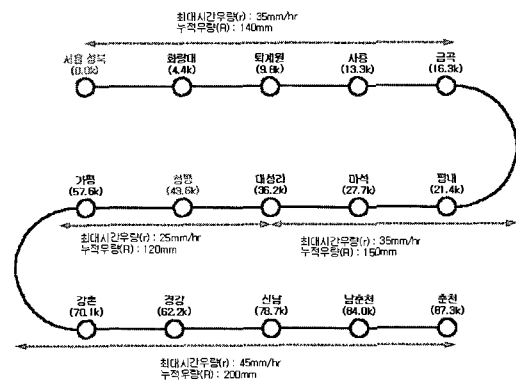


그림 5. 강우시 열차운전규제기준(경춘선의 예)

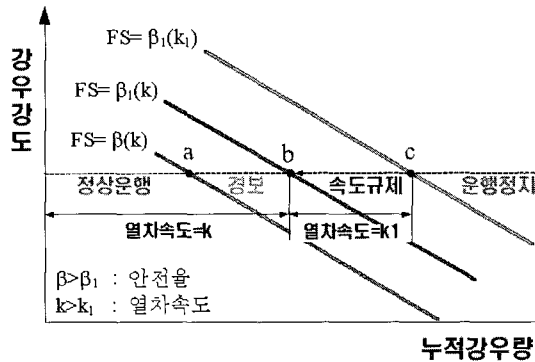


그림 6. 불포화도 이론에 근거한 열차운전규제기준 모식도

는 다수의 자료가 확보되어야만 유효하므로 제한된 정보를 갖는 지역 또는 경부선과 같이 여러 지역을 지나는 노선의 경우에는 적용하는데 어려움이 있다. 따라서 2002년 한국철도기술연구원에서는 이와 같은 점을 보완하기 위해 불포화도질역학 이론에 근거하여 토질의 함수특성과 강우침투의 상관관계를 규명하고, 수치해석을 이용한 철도성토사면의 안정성 해석으로 공학적 기반을 갖는 강우시 열차운전규제기준의 설정을 위한 타당성을 검증하고 있다(그림 6 참조).

4.3 재해 예·검지시스템

열차운행을 저해할 상황이 발생하면 특정 시스템에 의해 열차의 운영을 중지하거나 재해 방지 또는

최소화를 위해 위험조건을 신속하게 파악하고 검지하여 열차의 안전을 확보할 필요가 있다. 하지만 이와 같은 특정시스템의 설치, 계측, 관찰에는 많은 인력과 비용이 소요되므로 제한된 지역에만 설치되어 운용되어진다.

① 철도시설물에 대한 예·검지시스템

철도시설물의 이상유무를 파악하기 위한 예·검지시스템이 모뎀, 인터넷망 등을 이용하여 지속적으로 개발되고 있으며, 재해우려 구조물의 경시변화에 따른 거동을 실시간으로 파악하여 운행중인 열차의 안전을 확보하고자 노력하고 있다. 다음 그림 7에서 그림 11까지는 각종 실시간 감시시스템의 예를 보인 것이다.

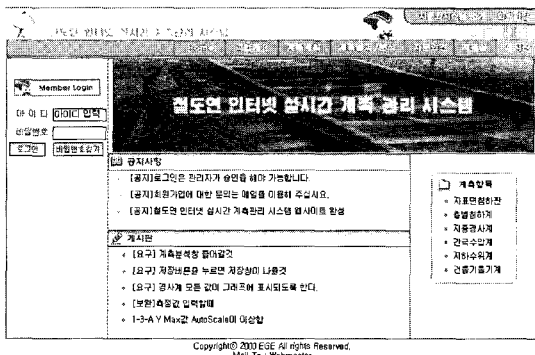


그림 7. 인터넷을 통한 실시간 계측관리시스템

측정항목	측정값	단위	측정일자	측정시간
1	0.000	mm	2002-09-18	14:17
2	0.000	mm	2002-09-18	14:17
3	0.000	mm	2002-09-18	14:17
4	0.000	mm	2002-09-18	14:17
5	0.000	mm	2002-09-18	14:17
6	0.000	mm	2002-09-18	14:17
7	0.000	mm	2002-09-18	14:17
8	0.000	mm	2002-09-18	14:17
9	0.000	mm	2002-09-18	14:17
10	0.000	mm	2002-09-18	14:17
11	0.000	mm	2002-09-18	14:17
12	0.000	mm	2002-09-18	14:17
13	0.000	mm	2002-09-18	14:17
14	0.000	mm	2002-09-18	14:17
15	0.000	mm	2002-09-18	14:17
16	0.000	mm	2002-09-18	14:17
17	0.000	mm	2002-09-18	14:17
18	0.000	mm	2002-09-18	14:17
19	0.000	mm	2002-09-18	14:17
20	0.000	mm	2002-09-18	14:17

그림 8. 인터넷 데이터 입력창

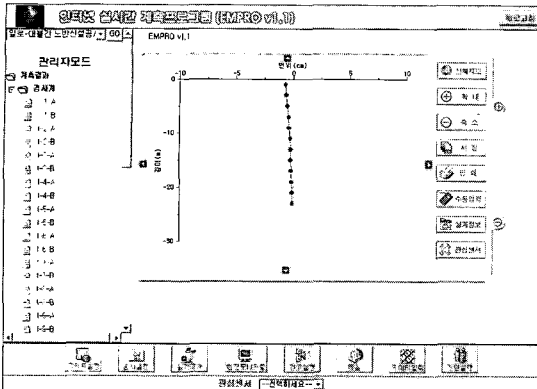


그림 9. 경사계 실시간 계속화면

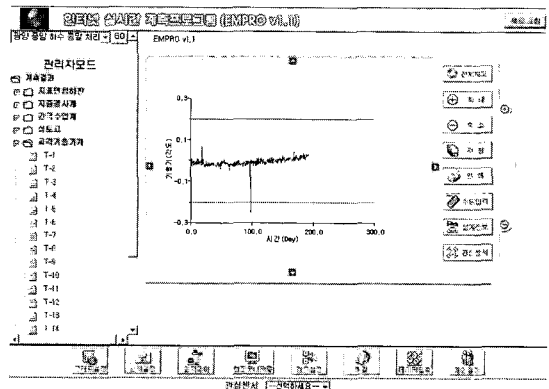


그림 10. 교각기울기 실시간 계속화면

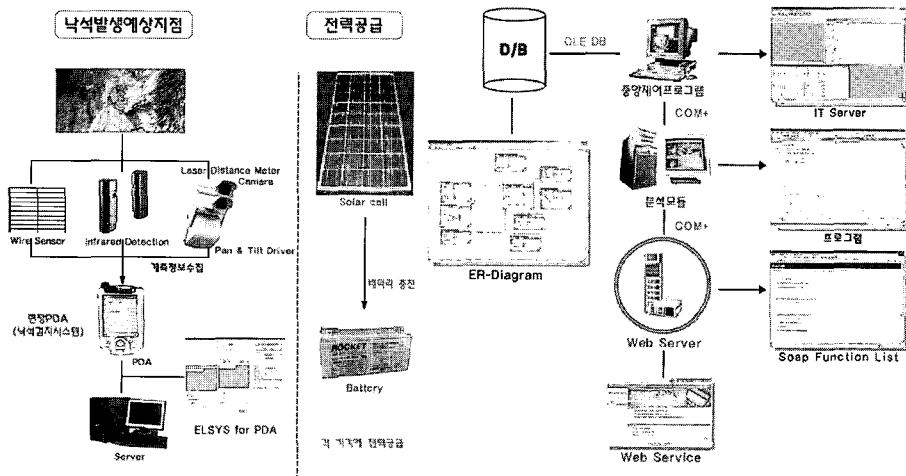


그림 11. 낙석감지시스템 구성 및 Web 기반 프로그램

② 강우자동경보시스템

강우자동경보시스템은 앞서 기술한 경계우량 설정 등의 강우시 열차운전규제기준과 연계되어 운영되어야 하며, 강우계, 데이터로거, 데이터 전송장치(모뎀, RS235통신망, NIC 등) 그리고 데이터 처리장치(서버운영) 등으로 구성된다. 또한 구성요건은 기본적으로 강우에 대한 경계우량, 웹기반의 인터넷망을 이용한 서비스, 관리 및 운영주체별 콘텐츠 제공, 강우 개시 및 종료에 따른 자동감지·기록체계 그리고 정확, 신속, 효율적인 강우량 정보의 제공이 이루어져야 한다.

한국철도기술연구원에서는 관련 연구를 통해 국내 지형 및 기후특성에 알맞은 시스템과 경계우량 설정을 목표로 인터넷과 연계한 강우정보의 자동입력 및 정보시스템에 대한 연구를 진행하고 있다. 지금까지 개발된 강우자동경보시스템을 간략히 살펴보면, 본 시스템은 경계우량 설정을 통한 열차운전규제 및 경보발생 등의 기능을 기본적으로 제공하고 있으며, 전국의 기상상황, 지역별 기상상황, 시설관리사무소별 기상상황 및 기타 일선조직용 기상상황이 목적별로 제시되어 기관별 목적에 맞는 기상상황을 파악할 수 있으며, 추후 기상청 자료 및 기타기관의 기상예측

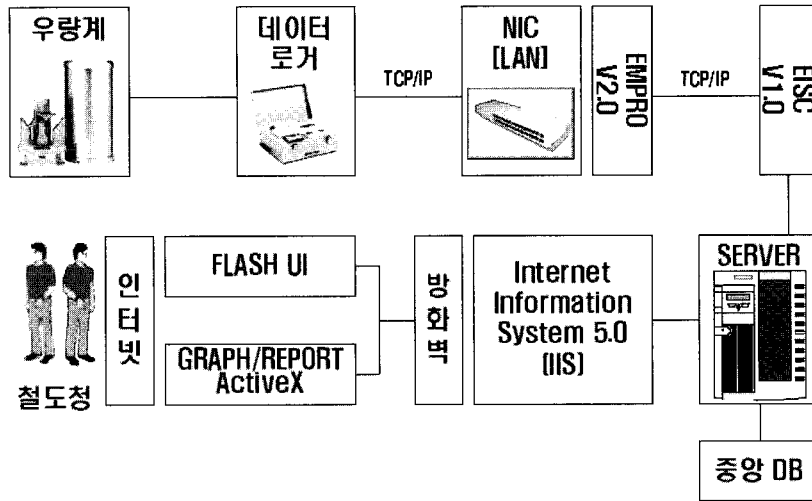


그림 12. 강우자동경보시스템 개요도

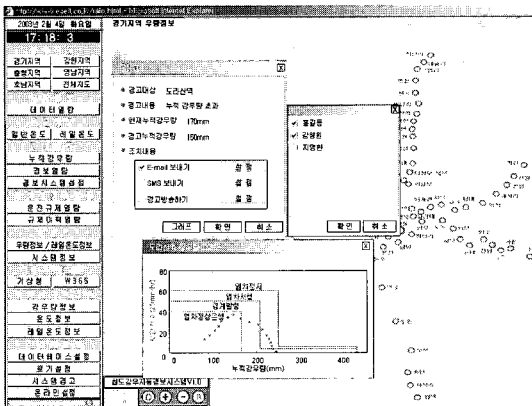


그림 13. 강우량정보의 인터넷 서비스

자료와의 호환 등에 의해 기상변화 예측기법도 포함함으로써 효과적인 규제가 이루어질 수 있다.

그림 12는 강우자동경보시스템의 개요를 보인 것이며, 그림 13은 인터넷서비스와 단문서서비스의 예를 보인 것이다.

또한 하절기 철도의 주요 피해로 기온상승에 따른 레일온도의 증가가 있으며, 레일온도의 급격한 증가는 레일의 장출을 발생시킨다. 이와 같은 레일 장출의 문제를 미연에 확인하고 대처하기 위한 시스템을 상기 강우자동경보시스템에 포함하여 기온상승에 의

한 레일의 장출을 예측함과 동시에 장출에 대한 열차안전확보를 위한 노력도 진행되고 있다(그림 14 참조).

4. 결론

본 고에서는 철도에서 발생한 최근 9년간의 재해 현황을 분석하고, 이를 계기로 철도청에서 추진한 재해최소화사업 계획과 연구추진현황을 재조명하였으며, 철도종합방재시스템 구축을 위해 현재까지 개발된 다양한 사례를 살펴보고자 하였다. 최근 몇 년간의 자연재해는 토목기술자에게 새삼 자연의 위대함을 느끼게 한 기간으로 기억될 것이며 자연재해 최소화를 위한 책임을 통감한 시기라고 할 수 있을 것이다.

철도자연재해발생을 최소화하며, 장마·태풍과 같은 대규모 재해에 효과적으로 대처하기 위해서는 다음과 같은 선행연구가 조속히 이루어져야 한다.

첫째, 재해 발생시 신속한 상황파악 및 재해복구를 위해 관·학·연 각 기관별 재해대처 공조체제가 이루어져야 한다.

둘째, 하천증수시 철도교량 및 제방안성성 확보를

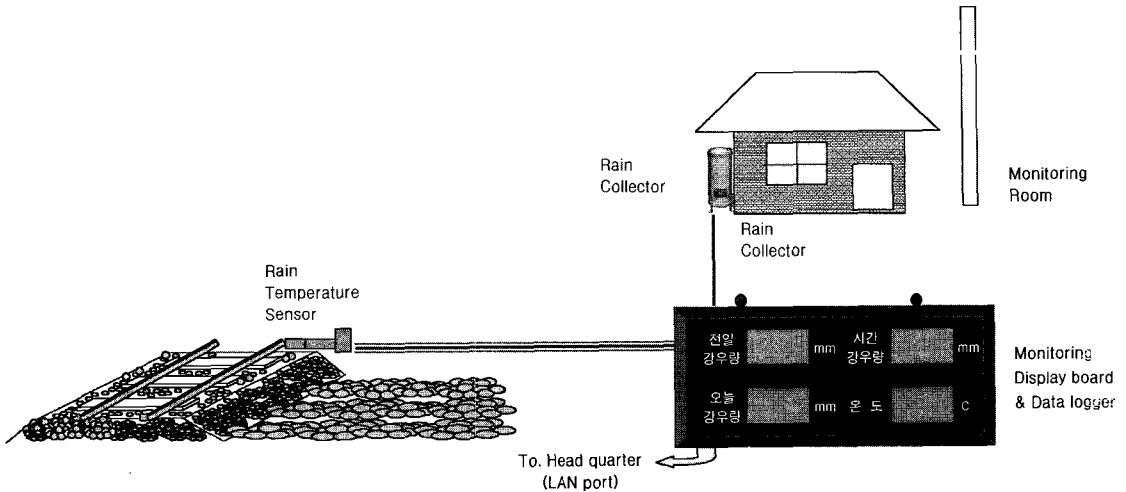


그림 14. 레일 중심온도 측정시스템

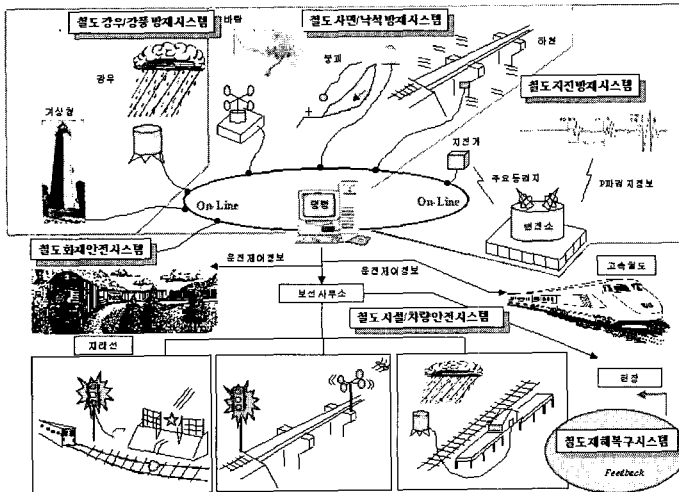


그림 15. 지능형 철도종합방재시스템 모식도

위한 유지관리 및 진단기준이 강화되어야 한다. 이를 위해서는 강우시 열차안전확보를 위한 열차운전규제 기준의 조속한 시행과 재해발생 또는 우려시 주행중인 열차로 신속한 정보전달을 위한 신호 및 통신체계 구축 그리고 교량하부구조 세굴방지 및 예·검지를 위한 실시간 감시시스템 구축이 필요하다.

셋째, 정부차원의 과감한 연구개발투자로 각종 재해 방지를 위한 요소기술 및 응용기술 개발을 통해

철도 안전방재 분야에 대한 철도교통 핵심기술을 조속히 확보하고, 철도방재를 종합적으로 관리할 수 있는 철도 종합방재시스템의 개발 그리고 더 나아가 재해우려 시설물에 대한 자동감시 및 무인계측을 위한 계측기기 및 센서의 국산화 개발이 절실히 요구된다.

선진화된 재해예방체계는 인공위성 및 무선계측시스템을 이용한 예·검지를 완전자동화하고, 재해에 대한 복구 지원을 시스템 내부에서 지능적으로 판단, 그 대안 또는 처리방안을 제시하는 지능형 방재시스템인 지능형 철도 방재시스템의 구축 및 운영을 가능케 할 것이며, 이는 사면, 교량, 터널 등의 철도구조물과 철도차량, 철도신호시스템 등의 안전확보를 위한 철도강우/강풍방재시스템, 철도사면/낙석방재시스템, 철도지진방재시스템, 철도화재안전시스템, 철도시설 안전시스템, 철도차량안전시스템과 재해발생시 원활하고 신속한 복구지원을 위한 재해복구지원시스템으로 구성되어 철도이용객 및 화물운송의 절대안전을 책임지게 될 것이다(그림 15 참조).