

고속철도 지진감시시스템 운영현황



김 대상 >>
한국철도기술원 궤도토목연구본부
선임연구원

1. 서론

지진 발생 시 고속으로 주행하는 열차는 얼마나 안전하며, 현재 우리의 대비책은 무엇인가? 지진에 대한 고속열차의 탈선에 대한 주행안전성은 어디까지 확보되어 있는 것이며, 만약 탈선이 발생한다면 피해는 어느 정도 수준일 것인가? 이에 대한 답을 구하는 것은 쉽지 않다. 2004년 10월 23일 일본에서 발생한 규모 6.8의 초에츠 지진은 주행 중인 신칸센 고속열차를 탈선시켰다(그림 1). 이 사고로 다행히 인명피해는 발생하지 않았으나, 신칸센 10량 중 6,7호차를 제외한 8량이 탈선하였다. 이 사건은 고속으로 주행하는 경부고속열차의 지진 시 안전성에 대한 경각심을 크게 불러일으켰다. 일반적으로 지진 시 고속으로 주행하는 열차는 1차적으로는 구조물 진동으로, 2차적으로는 구

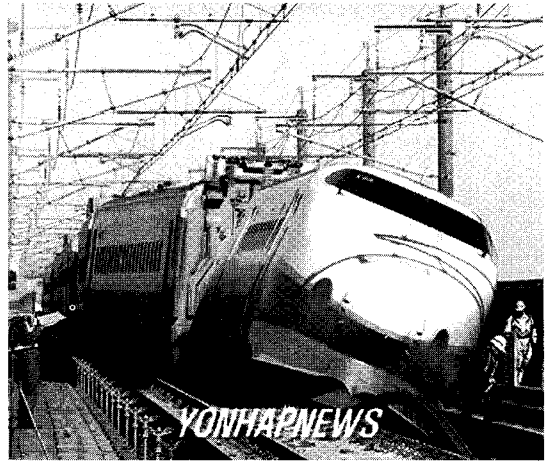


그림 1. 신칸센 탈선

조물 변상 및 붕괴로 피해를 받는다고 알려져 있다.

고속열차의 지진 시 주행안전성을 언급하기 위해서는 검토해야 할 사항이 많으나, 그 중에서 첫번째 검토사항은 국내 지진 환경 하에서 열차가 탈선할 수 있는 정도의 지진이 발생하는가이다. 국내의 경우 1978년 기상청에서 관측을 시작한 이래 규모 4.0 이상의 지진이 30회, 규모 5.0 이상의 지진이 5회 관측된바 있다. 최근 발생한 지진으로는 2007년 1월 20일 강원도 평창군 진부면 일대에서 규모 4.8의 지진이 발

생하였다. 국내의 경우 규모 5.0 이상의 지진이 자주 발생하지는 않으나, 가끔 발생하는 것으로 확인되고 있다. 과거 역사 지진 및 최근 지진관측기록 등에 의하면 진도 5~6 (39~180gal) 수준의 지진은 국내에서도 발생할 수 있다. 따라서 이 정도 규모의 지진이 발생하였을 때, 고속열차의 주행안정성이 확보될 수 있을 것인가가 문제가 된다. 이에 대한 답은 지진 발생 빈도가 높은 일본의 경험을 참조하여 간접적으로 구할 수 있다. 일본의 경험에 의하면, JMA(Japanese Meteorological Agency) 기준으로 진도 5(80~250gal)이상의 지진 시에만 열차 피해가 발생한 것으로 보고되고 있으므로, 우리나라에서 탈선을 발생시킬 수 있는 규모의 지진은 발생할 가능성은 낮으나, 전혀 없다고 말 할 수는 없다. 선로 상을 고속으로 주행하는 열차의 주행안정성을 언급하기 위해서는 이 외에도 구조물 특성에 따른 증폭특성, 지진 시 레일 상을 주행하는 열차의 동역학적 거동(wheel_rail 접촉문제) 등 쉽지 않은 문제가 남아 있다.

국내에서도 고속열차의 지진에 대한 대비책의 일환으로 고속철도 선로 상 노반(교량 및 터널)에 지진감시 시스템을 설치하여 운영하고 있다. 본 기고에서는 국내 지진환경 하에서 고속열차의 지진 대응현황을 살펴보고, 향후 우리가 무엇을 어디까지 준비해야 할 것인지에 대하여 초보적인 수준에서 정리해 보고자 한다.

2. 국내외 고속열차 지진대응 현황

국내 고속선에서 운행 중인 열차(KTX)는 프랑스 고속철도 테제베 기술로 제작되었다. 최근 한국철도기술연구원에서는 한국형 고속열차를 개발하여 시험운행 중에 있다. 이와 같은 이유로 현재 국내에서 적용하고 있는 고속열차의 지진 시 운행기준은 프랑스 기준을 준용하여 사용하고 있다. 따라서 본 절에서는 먼저 프랑스와 우리나라 고속열차의 지진 시 운행기준을 살펴본 후, 지진 발생 빈도가 높고 다양한 기술과 경험을 가진 일본의 지진 대응현황을 살펴보고자 한다.

2.1 프랑스

프랑스의 지진발생 빈도, 규모 등은 우리나라와 비슷한 정도라고 알려져 있다. 프랑스는 상대적으로 지진발생빈도가 높은 지역을 지나는 TGV 지중해선에 지진대응시스템을 설치 운영하고 있다. 지진관측은 선로부터 100m 떨어진 곳에서 10km 간격으로 24개소에서 지표면 가속도를 모니터링하고 있다. <그림 2>와 <그림 3>은 프랑스 지중해선의 지진관측 현황이다. 일정 규모 이상의 지진이 선로변에서 관측되는 경우 일차적으로 중앙통제소에서 운행 중인 고속열차에 경보를 발령하도록 하고 있다. TGV 지중해선에서 지진 경보 발령은 1단계 서행경보와 2단계 정지경보로 나누어 실시하고 있다. 각각에 대한 발령 기준은 다음과 같다.

- 1) 서행경보 40gal (열차속도 170km/h로 감속)
- 2) 정지경보 65gal (열차정지)

2.2 대한민국

우리나라의 경우도 프랑스와 비슷하게 경부고속철도 선로 상에 지진감시시스템을 운영 중에 있다. <그림 4>와 <표 1>은 경부고속철도 선로 상 지진계측 설

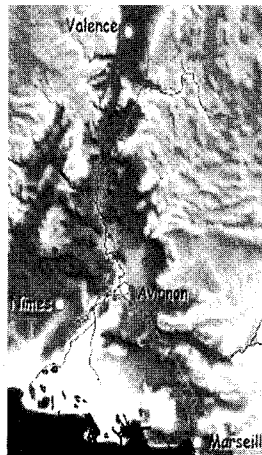


그림 2. 지진가속도계 분포 (프랑스 지중해선)



그림 3. 지진계측소

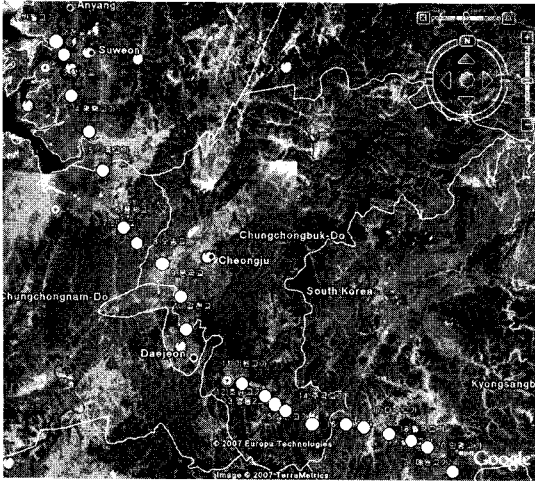


그림 4. 지진가속도계 설치 개소

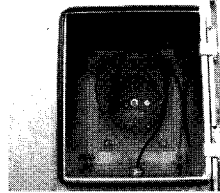


그림 5. 교각 상부 설치 가속도계

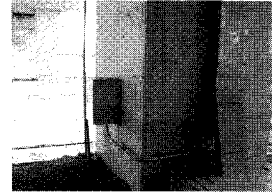


그림 6. 교각설치 가속도계

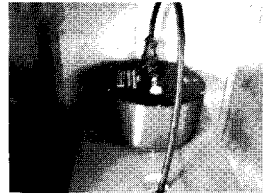


그림 7. 3층 가속도계

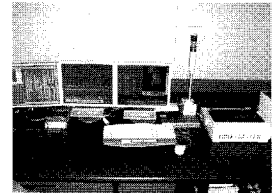


그림 8. 광명역 지진감시센터

비의 설치현황이다. 설치가 완료된 광명~대구 구간의 경우 평균 12.7km의 간격으로 가속도계가 설치되어 있으며, 대구~부산 구간은 향후 설치할 계획이다. 국내의 경우 프랑스와 상이한 점은 가속도계 설치위치이다. 프랑스는 선로변 지표면에서 가속도를 측정하고 있으나, 국내 지진감시시스템은 교각과 교량 상판에 설치된 가속도계를 이용하고 있다. 따라서 예측되는 가속도값은 교량의 구조물 특성이 반영된 값이다(그림 5), <그림 6>, <그림 7>. 이와 같이 가속도계를 교량 상에 설치한 이유는 선로연변에 가속도계 설치 부지확보의 어려움, 상시 기록을 위한 전원 공급의 난이성, 장비도난 및 관리 등에 대한 어려움이 있었기 때문으로 판단된다.

지진 발생 시 운영조치는 광명역 지진감시센터에서 주관하고 있다. <그림 8>은 광명역 지진감시센터 전경으로, 현장 계측 데이터의 실시간 모니터링과 황색 및 적색경보 기능을 갖추고 있다.

표 1. 지진계측설비 설치현황

구분	광명~대구(설치 완료)	대구~부산(설치 예정)
노선연장	266 [km]	131 [km]
설치간격	평균 12.7 [km]	평균 8.2 [km]
설치개소수	21개소	16개소

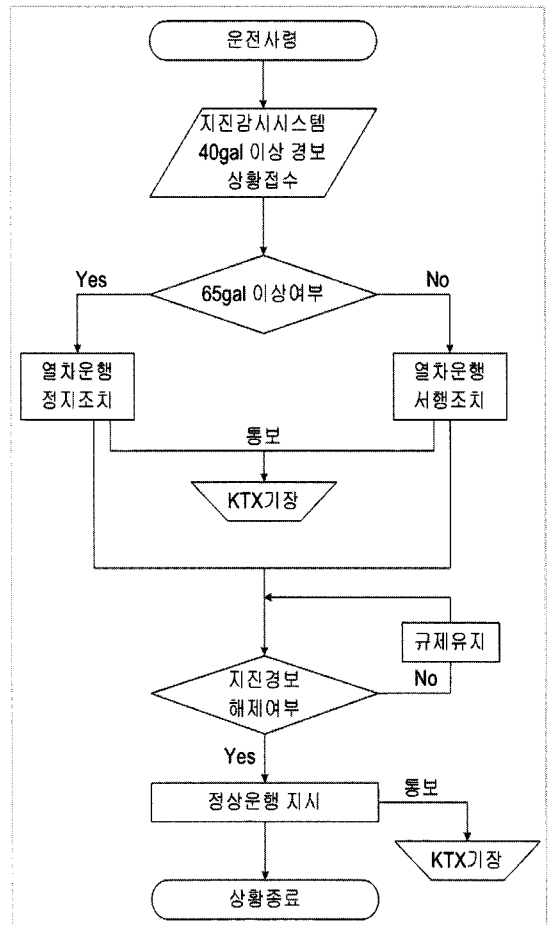


그림 9. 지진 발생 시 조치 흐름도

〈그림 9〉는 지진 발생 시 고속열차의 운행조치 흐름도이다. 운행조치기준 및 내용은 프랑스와 기본적으로 같다. 고속철도 운전관계 규정집(2005.5)에 의하면 지진발생 시 고속열차의 서행및 정지기준은 다음과 같다.

- 1) 지진황색경보(40~65gal미만)
최초열차 90km/h이하로 감속
- 2) 지진적색경보 65gal 이상 (운행정지)

2.3 일본

지진발생 빈도가 높은 일본은 보다 적극적으로 지진대응시스템을 구축하고 있다. 국철의 경우 지진계는 JR 각 사별로 다르나, 약 40~50km 간격으로 설치되어 있다. 가속도계 설치간격은 지반 및 지질조건, 열차의 운행패턴 등에 따라 결정된다. 1995년 효고현 남부 지진 이 후, 열차에 탑재된 무선을 활용하여 운전사령을 통하지 않고 승무원에게 신속 확실하게 지진 정보를 전달하여 열차를 정지시키는 새로운 시스템을 설치하여 운영하고 있다. 이 시스템의 구현으로 30초 이상의 시간을 필요로 하는 운전사령의 구두에 의한 지령 전달이 자동화되어 5초 이내에 지진정보가 운행중인 열차 승무원에게 전달되도록 하고 있다.

우리나라의 고속철에 해당되는 일본 신칸센은 지진 시 열차 운행을 보다 빨리 정지시키기 위하여 전원을 공급하는 변전소의 전원을 자동차단하는 방식을 취하고 있다. 전원의 차단을 위하여 지진예측시스템의 일종인 UrEDAS(Urgent Earthquake Detection and Alarm System)를 사용하고 있다. 〈그림 10〉은 UrEDAS 개념도이다. 유레다스의 기본개념은 먼저 도착하는 P파를 이용하여 피해 발생을 지배하는 S파의 크기를 예측하여 이에 대응하는 것이다. 변전소에 UrEDAS가 설치되어 P파로부터 120gal 이상의 S파가 예상되거나 실제로 관측된 S파가 40gal 이상일 경우 송전을 차단하여 열차를 강제로 정지시킨다. 유레다스를 이용하면 S파 도달 이전에 고속으로 주행하는 열차를 서행 혹은 정지 시킬 수 있어 큰 피해를 예방

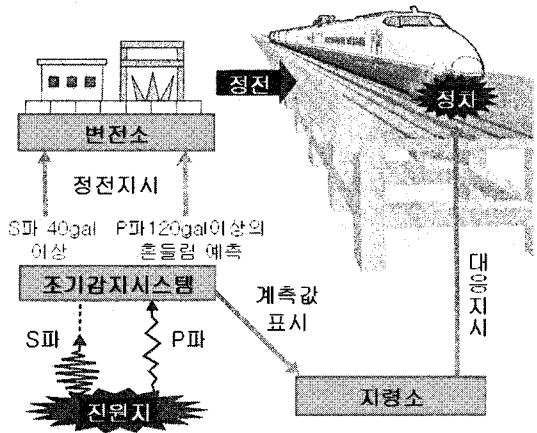


그림 10. UrEDAS 개념도

할 수 있다. 다만, P파와 S파의 시간간격이 짧은 직하형 지진의 경우에는 그 효용성이 낮아진다.

동경~오사카 구간에 지진계는 약 25km간격으로 총25개가 설치되어 있다. 효고현 남부 지진 이후 지진계 설치간격을 10km로 보다 조밀하게 배치하는 계획을 추진 중에 있다. 운행기준의 경우 초기에는 서행 정지 2단계기준을 적용하였으나, 효고현 남부 지진을 계기로 서행운전 개념을 폐지하고 정지 기준만을 적용하고 있다. 이는 짧은 시간에 상황이 종료되는 지진의 특성 상 현장 대응 시 혼선을 최소화하기 위한 것으로 보인다. 앞서 설명한 각국의 운전규제기준을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 각국의 운전규제기준

단위(gal)	국내	일본		프랑스
		국철	신칸센	
서행기준	40	40	-	40
정지기준	65	80	120gal 이상 S파 예상, 40gal 이상 S파 관측 시 송전차단	65
가속도값	지진감시 시스템	지표면 가속도	지표면가속도	지표면 가속도

3. 오대산 지진 시 지진감시시스템 거동

본 절에서는 고속철도 선로 상에 설치되어 있는 지진감시시스템이 최근 발생한 오대산 지진 시 어떻게 거동하였는지에 대하여 간략하게 살펴보고자 한다.

〈그림 11〉은 오대산 지진 발생 시의 진도 분포도이다. 자료에 의하면 경부고속철도는 MMI 진도 2~3에 해당되는 진동을 받았을 것으로 판단된다.

〈그림 12〉는 지진감시시스템 가속도계에 지진파가 최초로 도달한 시간으로, 지진 발생 후 약 25초 이후에 지진파가 도달된 것으로 보인다. 가속도계는 진원으로부터 약 150~200km 반경 원 내에 분포하고 있음을 알 수 있다.

〈그림 13〉은 오대산지진 시 지진감시시스템이 설치된 이원고가의 상판(교각 높이는 지표면으로부터 약 12m)에 설치된 가속도계에서 측정한 수평가속도 성분이다. 교량 상판 EW 성분의 최대진동가속도는 14gal 이었고, 탁월주파수는 2.3 ~ 2.7Hz 범위에 있었다.

초기에 P파가 도달한 후 약 21초 후에 S파가 도달한 것으로 판단된다. 〈그림 14〉는 이원고가의 교각 하부에서 측정한 지진 가속도파형으로 최대진동가속도는 8.7gal이었다. 교각하부와 상판사이의 최대가속도 증폭비는 1.61배였다.

〈그림 15〉는 동일한 가속도계를 이용하여 측정한 열

차 통과 시 가속도 파형이다. 지진파형과 비교하여 형태가 확연히 차이가 날 뿐만 아니라, 진동지속시간도 약 15초로 지진으로 인하여 측정한 가속도 파형과는

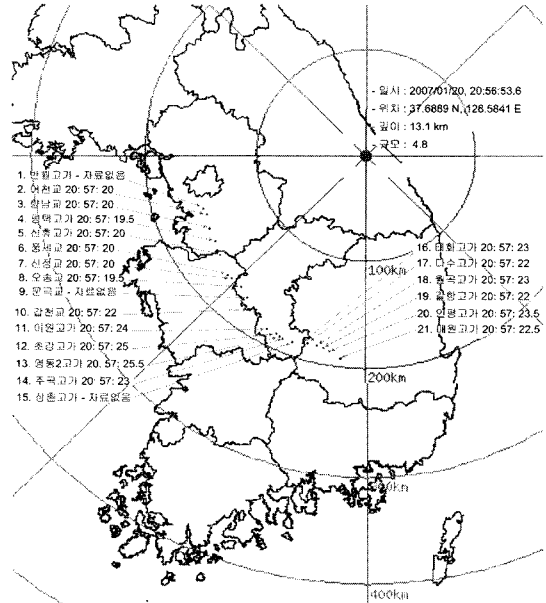


그림 12. 지진파 도달시간

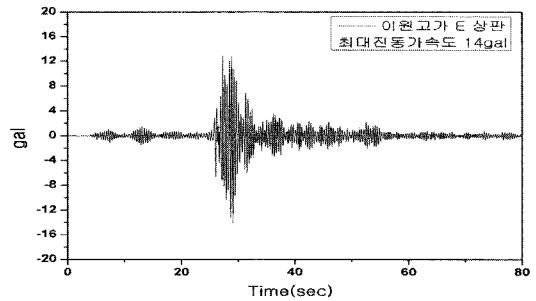


그림 13. 이원고가 지진동가속도(EW)_상판

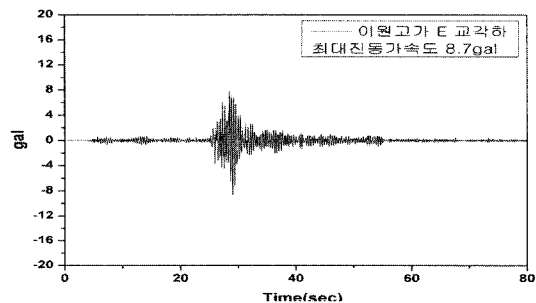


그림 14. 이원고가 지진동가속도(EW)_교각하

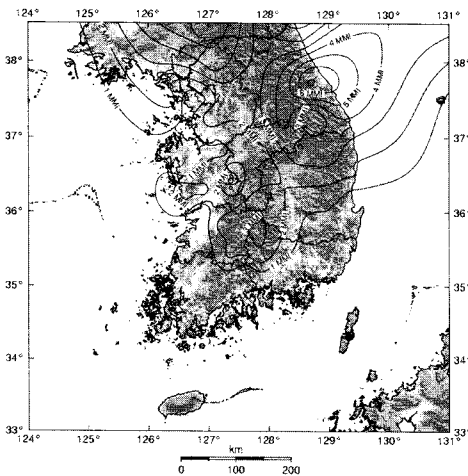


그림 11. 진도 분포도(KIGAM 제공자료)

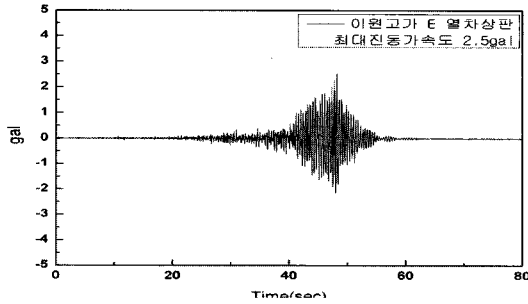


그림 15. 이원고가 열차진동가속도(EW)_상판

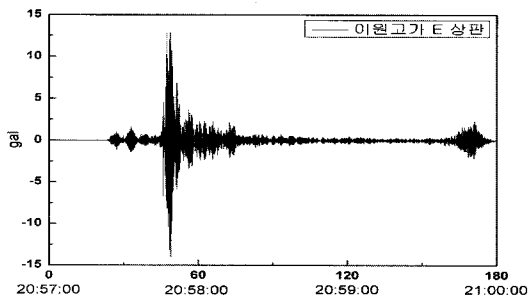


그림 16. 이원고가 지진동_열차진동가속도(EW)_상판

차이가 있었다. 탁월주파수는 2.45Hz로 평가되었다.

〈그림 16〉은 지진파형과 열차진동파형을 3분동안 지속적으로 계측한 결과로, 동일 교각에 약 1분의 시차를 두고 지진에 의한 진동과 열차진동이 지나갔음을 알 수 있다.

4. 결론

본 기고에서는 고속철도 지진감시시스템의 운영현황에 대하여 간략하게 정리해 보았다. 현 단계에서 우리가 준비하고 대응해야 할 문제를 간단하게 정리하면 다음과 같다.

- 1) 국내에서 운영 중인 지진감시시스템은 일본 등에서 운영되고 있는 지진경보시스템과는 그 기

능이 다르다. 지진감시시스템은 일정수준 이상의 지진동이 선로 연변에 도달하였을 때 이를 수동으로 서행 혹은 정지시키는 시스템이다. 상황에 좌우될 것으로 판단되나, 지진 발생 후 운전사령의 서행 혹은 정지명령에서 기관사의 운전조치까지는 어느 정도의 시간이 소요될 것으로 판단된다. 따라서 자동명령체계를 구축한다든가, 서행 정지의 2단계로 구분되어 있는 지진 시 운전조치 내용을 수정 보완하여 대응시간을 최소화할 필요가 있을 것이다.

- 2) 현재 구축된 지진감시시스템의 가속도계 설치 위치가 현재 사용 중인 기준을 준용한 프랑스 등과는 상이하다. 따라서 국내 운행기준을 국내 지진감시시스템 설치 현황에 적합하게 조정할 필요가 있을 것이다.

지진 시 고속열차의 주행안전성을 완벽하게 확보하는 것은 쉽지 않다. 지진경보시스템을 구축하고 있는 일본에서도 직하형 지진 등에 대해서는 탈선사고가 발생하였다. 우리나라의 경우에는 국내 지진환경에 적합한 대응수준을 확보하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

사사

본 기고의 자료 중 일부는 한국지질자원연구원의 자료를 인용하였습니다. 이에 대해 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. 지진계측설비 관리매뉴얼(2006), 한국철도시설공단, 한국지질자원연구원