

[기술보고]

단층감시시스템 기술현황 분석

이현우*

한국원자력안전기술원 규제총괄실

[Technical Report]

Technical Trend Analysis of a Fault Monitoring System

Hyunwoo Lee*

Regulatory Management Department, Korea Institute of Nuclear Safety

이 연구는 신월성 원자력발전소 1,2호기(이하 신월성원전) 운영과 함께 국내 원자력관련 이용시설 부지(이하 원자력부지)에 처음 도입될 단층감시시스템의 설치 운영에 필요한 안전요건(즉, 규제 요건, 지침 및 기술기준)을 제공할 목적으로 국내외 단층감시시스템과 그와 유사한 측지시스템의 구축 사례를 수집, 분석하였으며, 단층감시시스템 구축 시 기본적으로 고려하여야 할 기술 사항들을 제시하였다. 단층감시시스템 구축 시 고려해야 할 사항들로는 1) 부지고유특성의 이해(잡음 특성 포함), 2) 감시대상에 맞는 설비/설계 선택, 3) 백업시스템 구축, 4) 정례화된 검·교정체제를 통한 계측자료의 품질과 신뢰성 확보, 5) 투명한 운영체계의 정보공개 정책, 6) 장기적으로 안정적인 운영기반 등이 제안되었다.

주요어 : 단층감시시스템, 원자력부지, 안전요건

To provide regulatory standards and technical guides that are likely to be required for the Fault Monitoring System (FMS), soon to be installed and operated at the Shin-Wolsong NPP #1, 2 site, technical trend analysis was performed for currently operating geodetic and/or earthquake monitoring systems and activities worldwide, resulting in the identification of several items of concern regarding the design, installation, and operation of FMS at Korean sites. The items are as follows: 1) characterization of site-specific properties (including local noise), 2) selection of measuring instruments/design of appropriate sensitivity for the tectonic behavior of the target, 3) data/electricity backup system, 4) cross-checking and/or cross-referencing system to enhance data quality and credibility, 5) transparent data operation and open-to-the-public policy, and 6) long-term operation in a stable environment.

Key words : Fault Monitoring System, Nuclear Site, Safety Regulation

서론

강한 지진동과 지표변형을 수반한 니가타추에즈 앞바다 지진(M6.8, '07.7.16)은 당시 그 실체가 정확히 알려지지 않은 지하의 활성단층에서 발생하였으며, 이는 Kashiwazki Kariwa 원전(이하 K-K원전)을 포함하여 이 지역의 교통망, 상수도, 전력 등 사회 기반시설에 상당한 영향을 주었다(한국원자력안전기술원, 2008; IAEA, 2008). 진앙지와 인접한 지역에서는 산사태, 도로단절, 축대붕괴, 지반침하 등의 다양한 형태의 직간접적인 지표변형이 발생하였다.

니가타추에즈 앞바다 지진으로 인한 화재와 방사능오염 물질 유출 등으로 사회적인 관심의 초점이 되었던 K-K원전에서는 당시의 설계지진동을 상당부분 상회한 것으로 평가되어 일본은 물론이고 국제원자력사회에 커다란 파장을 불러일으켰으며, 지진의 원인이 되었던 활성단층은 해저 및 지하에 발달하는 단층으로서 그 실체가 아직 명확히 규명되지 않은 상태였다(IAEA, 2008).

한반도는 판구조론 적으로 유라시아판(Eurasia Plate)내부에 속하며, 가장 인접한 판경계부로 부터는 약 1,000 km 떨어져 있어 상대적으로 안정적인 지역에 속하는 것으로

*Corresponding author: heanu@kins.re.kr

알려져 있다(한국원자력안전기술원, 2006). 지진계측 자료를 보더라도 규모 3 이상의 지진은 연평균 약 10회 정도로서 지진학적으로도 조용한 지역에 속한다(기상청, 2006; 한국원자력안전기술원, 2007a, 2007b, 2008). 그러나 한반도 남동부 지역을 중심으로 수행되어온 최근의 연구결과를 보면, 한반도는 제3기 중기부터 제 4기 중 후반부 까지 활발한 지각운동이 있었던 것으로 나타났다(Kyung and Okada, 1995; 한국자원연구소, 1998; 이봉주 외, 1999; 장태우, 2001; 한국원자력안전기술원, 2006). 또한, 일부 학자들은 역사기록이나 고지진학적 증거자료에 대한 분석을 통하여 자료의 불확실성은 있으나, 경주 지역에서 상대적으로 활발한 지진활동의 시기가 있었던 것으로 평가한 바 있다(Kyung and Okada, 1995; 이봉주 외, 1999; 장태우, 2001).

최근까지 밝혀진 제4기 단층은 그 형성 시기가 상대적으로 젊은 신기 지구조분지에 해당하는 한반도 남동부지역에 집중적으로 분포하며 그 숫자는 약 50여 곳에 이르는데, 이들 제 4기 단층들의 운동특성에 대해서는 계속해서 연구가 진행 중에 있다(한국자원연구소, 1998; 한국원자력안전기술원, 2006). 원자력발전소 부지의 경우, 주변에 활동성단층이 존재할 경우, 현행 위치기준은 해당 단층에 의해 발생 가능한 지진동과 지표단층작용에 의한 안전성 영향을 평가한 후, 원전의 안전성에 영향을 미치지 않음을 입증토록 요구하고 있다(예, NARA, 1997). 한편, 신월성원전 건설허가를 위한 부지특성조사에서 해당 원전부지는 지표단층작용의 영향권 밖에 위치하는 것으로 평가되었으나, 건설허가 심사 과정에서 자연현상의 불확실성 등

을 감안하여 사업자인 한국수력원자력주식회사(이하 한수원)가 신월성원전의 운영기간동안 부지지역에 대하여 지표단층작용을 상시 감시토록 결정되었다(과학기술부, 2007). 이 논문에서는 국내 도입배경을 포함하여 단층감시시스템의 소개, 국내의 단층감시시스템 구축현황, 단층감시시스템의 주요 구성요소, 국내 원자력부지에 적용될 단층감시시스템 구축 시 기본적으로 필요한 기술적, 사회적 고려 사항들이 제시되었다.

단층감시시스템 구축현황

개요

단층감시시스템(Fault Monitoring System, 이하 FMS)에 대해 통용되는 별도의 정의는 없으나, “현재 지속/단속적 움직임이 관측 되거나 가까운 장래에 움직임이 예상되는 단층(또는 단층대)의 변형을 계속하기 위하여 대상 단층과 주변지역에 설치하여 하나의 체계적인 네트워크로 연결한 감시장비 일체와 절차화 된 일련의 운영활동”으로 정리될 수 있다. FMS는 그 역할에 따라 크게 계측부와 분석처리부 그리고 이들을 연결시켜주는 통신부로 나눌 수 있다. 흔히 알려진 계측기로는 creepmeters, dilatimeters, gravimeters, magnetometers, pore-pressure transducers, seismometers, strainmeters, tiltmeters, water-level monitors 등이 있으며, 인공위성이나 먼 우주의 광원을 이용한 GPS, InSAR, SRL, VLBI 등도 활발히 사용되고 있는 측지시스템(Geodetic Monitoring System)이다(Fig. 1).

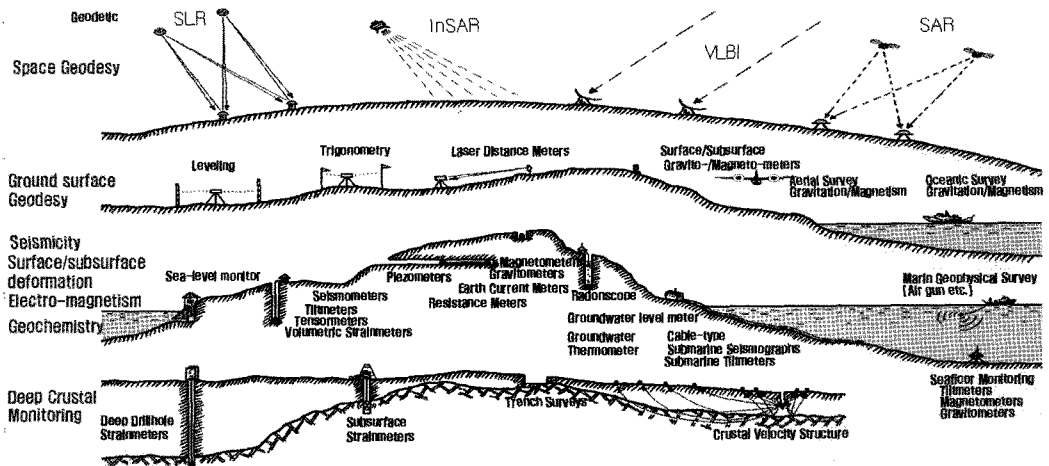


Fig. 1. Schematic diagram showing an example of fault/earthquake monitoring activities, adopted from the Web site of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), Japan (http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/part1.html; Fig. 8. 7 of BOSAI, 2007).

국내 FMS 구축현황

국내에서는 한국천문연구원 이 광역적인 지각운동연구를 목적으로 GPS 감시망을 운영하고 있는 정도이나, 특정 단층에 대한 감시 목적으로 FMS를 운영하고 있는 사례는 아직 없다. 다만, 국내의 대규모 시설물에 대해서는 터널 계측, 댐 계측, 대규모 사면지역 계측, 흙막이 공사 계측, 호안제체 침하/변위 계측 및 터널, 대형사면절개지 등에서 불안정한 암반거동 또는 대규모 시설물(댐 등)의 변형을 감시할 목적으로 시설물 변형감시시스템을 설치 운영하고 있다. 여기에 사용되고 있는 계측기기 종류로는 간극수압계, 각 변위계, 변형률계, 내공변위 측정기, 침하계, 토압계, 광섬유센서 변형측정계(원자력연구소 KURT에 적용) 등이 있다(예, 김경수 외, 2009). 그러나 이들 측정기기는 감시 대상의 변형율이 지체구조운동에 비해 상당히 크므로 정밀도가 단층감시시스템에 사용되는 기기보다 낮아 지구조운동을 관측하는 FMS에 이들 기기를 직접 적용하기는 적절치 않을 수 있으며, 지구조운동의 속도가 상대적으로 느린 한반도에서는 더욱 그러할 것이다(한국지질자원연구원, 2006; 한국원자력안전기술원, 2008).

한수원은 신월성원전 건설허가 후속이행사항 수행의 일환으로 부지주변 지역에 상시단층감시시스템을 설치 중에 있다(한국수력원자력주식회사, 2010). 한국방사성폐기물공단은 경주 방사성폐기물 처분장(이하 경주방폐장) 부지감시의 일환으로 지표단층감시시스템 설치 운영 실시계획을 수립 중에 있다(한국수력원자력주식회사, 2008; 한국방사성폐기물관리공단, 2010). 한국원자력안전기술원은 단층감시시스템을 설치하는 원자력사업자에 제공할 안전규제지침과 표준 절차를 제공하기 위하여 원자력중장기연구사업의 일환으로 지표변형영향범위 설정기준과 지표변형감시대응절차를 수립하는 연구를 수행 중에 있다(한국원자력안전기술원, 2007a).

해외 FMS 구축현황

단층운동, 지진, 화산활동 등 활발한 지각운동에 기인한 자연재해의 피해가 큰 미국서부, 일본 등은 이들 재해에 대한 사전 대비를 목적으로 이미 60년대 초반부터 다양한 종류의 FMS를 갖추어 운영해 오고 있다. 이들은 국제적으로도 여러 기관 및 단체들과 함께 다양한 목적의 측지연구를 수행해 오고 있으며, 관련 자료를 웹사이트를 통하여 공유를 하고 있다(이현우, 2007). 미국 지질조사소(USGS), 네바다 측지연구소(NGL), 일본 지질조사소(GSD), 일본 국립방재연구소(NIED) 등이 측지관련 연구기관의 대

표적인 예이며, EARTHSCOPE (<http://www.earthscope.org>), SOPAC (<http://www.sopac.org>), BARD (<http://www.ncedc.org/bard>), UNAVCO (<http://www.unavco.org>), IVS (<http://ivscc.gsfc.nasa.gov>) 등이 미국 등에 기반을 두고 활발한 활동을 하고 있는 비영리의 국제공동 측지연구 네트워크의 좋은 예이다(Johnston et al., 1992; Hart et al., 1999; 한국원자력안전기술원, 2008; GSTM Technologies, 2011). 이들이 운영하는 인터넷 웹사이트에는 실시간 관측정보 뿐만 아니라, 2차, 3차 분석/가공된 해석자료, 기타 연구분석 자료 등 다양한 정보가 공유된다(이현우, 2007). 지진이 잦은 일본의 경우, 일본 지진예보 협의체(Coordinating Committee for Earthquake Prediction, CCEP)라는 일종의 컨소시엄을 통하여 정기적인 운영회의시나 주요 지구조운동 발생 시에 기관별 관측결과를 공유하여 상호 비교 검증해 오고 있는데, 예를 들자면, 2007년 니가타후에즈 앞바다 지진(M6.7, 2007.7.16) 발생 후 열린 174차 회의에서 일본 기상청, 일본 국립방재연구소, 일본 지질조사소 등을 포함한 회원기관들이 해당 지진 발생 전후에 기록된 측지 분석자료를 교환하고 발생메커니즘과 지진원이 된 지구조에 관하여 의견을 교환하였다(CCEP, 2007).

원자력분야의 경우, 국제원자력에너지기구(International Atomic Energy Agency, 이하 IAEA)를 포함하여 원자력안전관련 규제기관의 원자력시설부지 위치기준은 지구조운동에 의한 영향을 고려하여 지구조원(즉, 지구조단층, 지진원 등)으로부터 충분히 먼 곳에 부지를 두거나 부지의 안전성을 입증하도록 요구한다(원자력안전전문심사회, 1978; NSC, 1981; IAEA, 1991; 국가핵안전국·국가지진국, 1994, 1995; NARA, 1997, 한국원자력안전기술원, 2006; 이현우 외, 2007). 이러한 이유로, 대부분의 원자력시설에는 지구조원으로부터 충분한 이격거리와 내진설계가 적용되는 한편, 자연현상의 불확실성 등을 고려하여 해당 시설의 운영기간동안 지구가 보내오는 지각신호를 상시로 감시하여 그에 따른 즉각적인 안전조치를 할 수 있도록 비상대응조치가 절차화 되어있다. 지구조원 상시감시의 일환으로 국내 원전을 포함하여 대부분의 원자력시설에서 채택되고 있는 것이 지진감시망이다. 대표적인 예로, 지진과 지구조단층운동이 상대적으로 빈번한 미국 서부 연안 지역에 원전운영을 포함한 전력 생산-공급 시설을 보유하고 있는 Pacific Gas and Energy (이하 PG&E)사는 규모 1의 지진까지 기록이 가능한 정밀한 지진감시망을 산안드레이스단층 주변 지역에 설치/운영하고 있으며, 단층변위감시를 위한 독자적인 설비는 갖추고 있지 않으나 USGS 등의 FMS와 실시간 자료공유 등의 방법으로 사

업지역에 대한 상호보완적이고 통합적인 지구조운동 감시체계를 운영하고 있다(이현우, 2007).

단층감시시스템의 주요 구성요소

FMS를 운영하고 있는 여러 기관과 단체들 중에서 가장 다양한 설비와 체계적인 관리 시스템을 보유하고 있는 USGS를 예로 하여 현재 운영 중인 FMS의 구성요소를 구체적으로 조사해 보았다. USGS의 단층감시활동은 크게 본부와 지역관측소의 활동으로 나눌 수 있는데, 본부에서는 'Earth Hazard Program'을 통하여 'Real-time Fault/Volcano Monitoring' 시스템을 구축하여 60년대부터 지금까지 체계적이고 지속적으로 FMS를 운영해 오고 있다(USGS, 2011).

본부에서는 웹사이트를 통하여 감시 대상 지역의 지질, 지진 및 지체구조적 특성에 관한 기본 자료는 물론이고, 기기 설치위치 및 기기사양, 실시간 관측자료, 기간별 분석자료 등을 공유 받을 수 있도록 서비스를 제공하고 있다(USGS, 2011). 또한, 여기서는 계측기에서 수신되는 신호들이 일련의 필터링을 거쳐 자동적으로 관측 자료가 갱신되게 되어있어 실시간 계측자료를 신속하게 얻어 볼 수 있다. USGS는 캘리포니아 지역의 단층대를 따라 총 5개 지역 관측소를 설치하고(Fig. 2), 전체 자료를 분석 처리하는 작업은 5개 지역 중 San Francisco Bay 지역에 속해 있는 Menlo Park 본부의 전문가들에 의해 중앙운영시스

템을 기반으로 유지/관리된다. USGS의 지역 관측소는 캘리포니아 주의 San Francisco Bay Area, San Juan Bautista, Long Valley, Parkfield, Southern California 등의 5개 지역이며(Fig. 2), 각 관측소 별로 관리자를 두고 있다. 이들 지역에서 USGS는 실시간 계측을 기본으로 하여, creepmeters, dilatometers, magnetometers, pore-pressure transducers, seismometers, strainmeters, tensometers, tiltmeters, water-level monitors, GPS 등으로 이루어진 FMS를 운영하고 있다(Fig. 2).

FMS는 기능적인 측면을 놓고 본다면 전체 시스템을 크게 '계측부', '통신부', 그리고 '분석처리부'로 삼분할 수 있는데, USGS에서 운영하고 있는 시스템을 중심으로 정리하면 다음과 같다.

계측부(계측기기 및 측지시스템)

계측부는 관심 대상인 단층과 주변지역에 기기를 직접 설치/운영하는 계측방법과 인공위성이나 먼 우주의 광원 등의 절대좌표를 이용하여 시간에 따른 상대적 변화를 측량하는 상대적으로 넓은 지역에 대한 측지법(Geodetic Monitoring)이 있다. 전자에는 앞서 언급한 creepmeters, strainmeters 등의 현장설치 계측장비가 있으며, 후자에는 가장 대표적인 것이 일상에도 흔히 사용되고 있는 GPS 측지망이고, 이 밖에도 레이저를 이용한 InSAR, SRL 등과, 설치/운영의 비용이 많이 들어 아직은 제한적으로 사용되는 케이사를 이용한 VLBI 등이 있다(한국원자력안

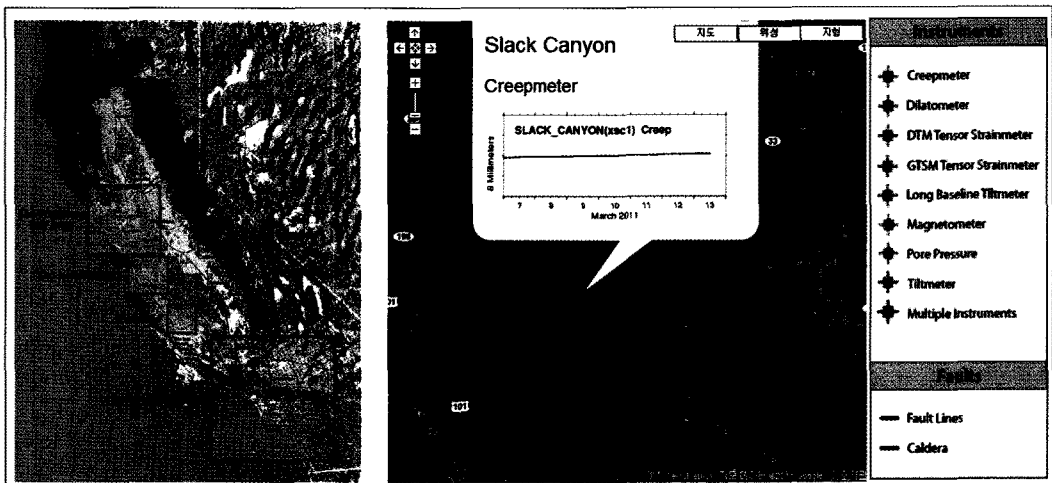


Fig. 2. Example of a Web-based interactive Crustal Deformation Data Service provided by the U.S. Geological Survey (USGS) via the Internet. The map on the left shows the five regions in which the USGS currently operates FMS along the San Andreas Fault. The SAT image on the right shows the locations of monitoring instruments in the Parkfield region. Plots for the most recent 7 days for each instrument can be obtained by clicking on the symbol (USGS, 2011).

전기기술원, 2008).

현재 단층에 의한 지표변형 감시에 사용되고 있는 이들 변형계측기와 측지시스템들의 측량 오차 범위는 가장 정밀한 VLBI의 경우 수 천 km 당 1mm 이내이며, strainmeters, creepmeters 등의 현장설치 계측장비가 약 천 km 당 1mm 정도이고, 초기 모델인 EDM의 경우는 약 10km 당 1mm 정도의 오차를 보인다. 가장 흔히 사용되는 GPS의 경우는 수 mm/year 정도의 변위를 감지할 수 있을 정도로 정밀도는 떨어지지만, 지표상에서의 평면적인 변형분포를 파악하는 기반정보로 많이 사용된다. 측지용 레이저 인공위성을 사용한 InSAR의 경우도 GPS와 유사한 목적으로 사용되는 기술이다. 미국, 일본 등은 수십 년간의 FMS 운영을 통하여 측량의 정밀도를 높이는 노력을 계속해 왔는데, Strainmeters의 경우 상대적으로 추가적인 비용은 발생하나, 정밀도를 높이기 위하여 수십에서 수 백 m 깊이의 시추공을 뚫어 그 속에 영구 장착하는 추세에 있다. 또한, 측량의 정밀도를 높이고 자료의 신뢰도 검증을 위하여 동일 지역에 대해 다양한 계측 시스템을 설치 운영하면서 상호보완 검증을 하거나, 인접한 광역 네트워크와 연계하여 정밀도를 상당 수준으로 끌어올린 것으로 평가되고 있다(Fig. 3; 한국원자력안전기술원, 2008).

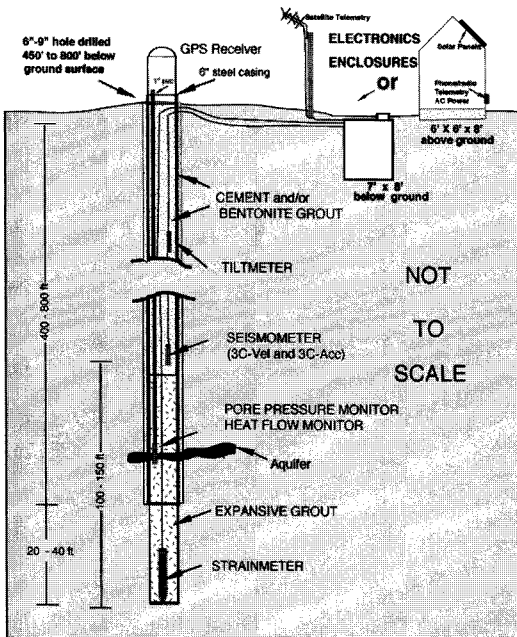


Fig. 3. Schematic diagram showing the standard borehole installation of various types of monitoring equipment (Korea Institute of Nuclear Safety, 2008).

실용성과 경제성의 측면이 고려되어 실용화된 시스템은 GPS 네트워크를 기반으로 하면서 주요 단층지점에 대해서는 비교적 정밀한 strainmeters, creepmeters 등을 설치하여 함께 운용하는 상호보완적인 복합시스템이다. InSAR의 경우도 비용이 높지 않고, 정밀도 향상 등으로 인하여 최근 여타 측지자료에 대한 검증 및 독자적인 지표변형 관측도구로서 활발히 사용되고 있다. 정밀도가 우수한 VLBI의 경우는 설치 및 운영비용이 비싸서 세계적으로도 제한적으로 사용되고 있다. 국내에서는 한국천문연구원 이 서울, 울산, 제주에 설치된 VLBI 설비를 이용한 지표변형 측지 연구를 수행 중에 있다(곽영희 외, 2006).

통신부(자료수집 및 전송)

계측기에서 수신되는 계측신호는 각 지역 관측소 별로 설치된 계측자료 저장기에 보내져 자동 저장된 후 여러 가지 방법의 전송수단을 통해 중앙본부로 보내진다(Fig. 4). USGS의 경우를 예를 들면, Parkfield에서 모아진 계측자료들은 전화선(60년대 사용 시작), 전파망통신(70년대), 위성송수신(70년대~80년대 초), T1(2000년대) 등의 다양한 경로를 통해 Menlo Park의 중앙본부와 기타 유관 기관에 보내진다(Fig. 4). 여기서 현재 이들 5가지의 자료전송시스템을 함께 운영하면서, 유사시 상호보완이 가능한 대체송수신 시스템을 확보하고 있다는 점을 주목할 필요가 있다(한국원자력안전기술원, 2008).

분석처리부(계측자료의 수집, 분석 및 저장)

USGS FMS의 경우 계측은 자동 실시간으로 이루어지며, 10분 간격으로 계측신호를 취득(sampling)하며, 설정치(즉 baseline)를 기준으로 이상신호가 발생하면 자체적인

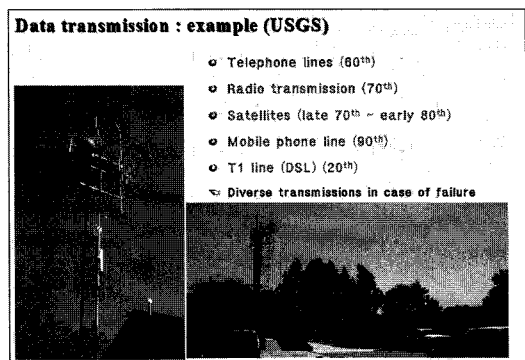


Fig. 4. Example of various methods of data transmission used by the USGS FMS in the case of power/data transmission failure (Lee, 2007).

분석회의를 열어 원인을 파악한 후 필요한 조치를 취한다(이현우, 2007). 2차 분석, 보정 등을 제외한 대부분의 자료는 프로그램화된 자동 프로세서를 거쳐 저장되며, 웹사이트에는 매일 자료가 갱신되도록 설계되어있다. 이러한 모든 1, 2차 자료들은 DB용 워크스태이션에 자동 축적되며, 개인 컴퓨터에서 원하는 자료를 불러오거나 분석프로그램을 이용하여 주제별 그래프를 작성할 수 있도록 되어있다(이현우, 2007). 이상 신호, 지역적인 잡음신호 등에 대해서는 인접한 지점에 설치된 다른 종류의 감시 장비로부터 측정된 신호와 상호비교 분석하며, 이미 개발되어 상용되고 있는 신호 처리/분석 프로그램을 통해 자동적으로 지역적인 잡음을 제거하거나 분석회의를 통하여 처리방향을 결정한다(이현우, 2007). 또한 다른 기관이나 단체의 측정/해석 자료를 정기적으로 비교분석하여 자료 검증하는 절차가 있다. 계측 자료는 실시간 자료(자동 프로세스 후)와 2차 분석자료(가공자료)의 형태로 USGS 홈페이지에서 일반인을 대상으로 제공되고 있으며, 회원 기관에도 동일한 자료가 제공된다(Fig. 2).

FMS 설계, 설치, 운영에 관한 고려사항

국내외, 특히 미국의 USGS를 중심으로 한, FMS 구축 사례에 대한 조사와 분석을 통하여 국내 원자력시설 부지에 FMS를 설치하고 운영할 때 고려되어야 할 사항들을 도출하였다.

감시대상의 특성화와 그에 따른 장비/설계 선택

FMS의 국내 적용 시에는 특히 계측장비의 정밀도 확보와 잡음특성 파악/제거가 선결과제인데, 이에 대한 가장 큰 이유는 해외에서 개발되어 운영 중에 있는 FMS들은 계측대상이 지구조적으로 활발한 곳에 위치하고 mm/yr급 이상의 평균 이동 특성을 갖는데 반해, 국내의 지각운동(단층 포함)은 그보다 적어도 10~100배 이상 느리기 때문이다(한국원자력안전기술원, 2008). 바꾸어 말하자면, 한반도와 같은 상대적으로 안정적인 지역에서는 지각운동이 보내는 신호에 비해 그 밖의 부지 고유특성 신호(조석, 기온변화, 생활소음 등)가 상대적으로 클 수 있다는 것이다. 이를 극복하기 위해서는 우선 설치 대상에 대한 기하학적, 구조지질학적, 지구조적 특성을 정밀 조사/분석을 통하여 충분히 파악한 후, 해당 부지의 운동특성에 부합하는 정밀도의 계측기기를 선정하여 최적의 위치와 간격으로 네트워킹을 설계하여 계측오차를 최소화하는 것이 중요하며, 지속적이고 장기간의 운영을 통하여 안정적인 계측신

호를 축적 할 수 있도록 해야 할 것이다.

다음으로는, 감시대상의 고유특성 파악만큼이나 계측의 정밀도 확보에 있어서 중요한 요소가 단층운동으로부터 기인한 신호를 제외한 모든 신호, 즉 잡음(Noise)을 파악하여 특성화(또는 정량화)하고 제거하는 것이다. FMS 설치지역의 지구조운동이 보내는 신호 이외에 계측기로 수신되는 부지 고유특성에 기인한 신호 즉 geoid, 조석, 지하수특성, 기온, 강우 등을 특성화 하여 계측기에 기록되는 원시 자료로부터 분리/제거(filtering)하여야 한다. 이러한 신호의 분리/제거를 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며(Hart et al., 1999; Blewitt and Lavallee, 2002; Hill and Blewitt, 2006; Amiri-Simkooei et al., 2007) 상용화된 컴퓨터 프로그램 모듈들이 USGS를 포함한 기존의 FMS 운영기관에서 개발되어 사용되고 있으며, 이들 중 다수가 프리웨어(freeware)로 제공되고 있다(USGS, 2011).

마지막으로, 계측장비의 설치위치 선정과 시공방법도 불필요한 생활 잡음을 최소화하고, 지각신호의 수신율을 높이는데 중요한 역할을 한다. 기기 설치 시 최대한 신선한 기반암에 설치하도록 하며, 토양층이 두껍게 발달하는 지역의 경우는 토양층의 두께에 따라 10m~300m 등 다양한 설치심도가 적용되어야 한다. 지반특성에 따라 다르지만 설치 심도가 깊을수록 우수한 응답(response)을 기록하며, 최소 10m 이상의 시추공 내에 설치하여야 적어도 생활 소음(교통, 공사 등)을 상당히 줄일 수 있다. 기기 설치 시 지반과 기기의 밀착여부도 중요하므로, 그라우트(grout)물질의 특성파악을 위한 충분한 시험이 필수적이며, 그라우트물질의 팽창률이 커야 설치 후 안정적으로 장착이 되는데, 그렇지 않은 경우 지반운동이외의 잡음을 많이 기록하게 되며, 심한 경우 재설치가 불가피하다(이현우, 2007). 그 밖에 사람 눈에 띄지 않거나 침입을 방지할 수 있는 지점을 확보하는 것도 중요하다. 기타 FMS 계측기기의 설치에 관해서 설치 매뉴얼이 작성, 공개되어있다(예, UNAVCO, 2004).

지진에 대비한 FMS 설계와 장치

계측장비, 지역 관측소, 통신장비, 중앙본부설비 등의 시설물은 기본적으로 특정 규모 이상의 지진이나 지표변형에도 최소한의 영향 하에 정상적인 성능을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. USGS의 예를 들면, 중앙본부의 관련 시설물은 기본적으로 규모 6정도의 지진에 대한 내진설계가 적용되었으며, 지역 관측소도 그와 유사한 정도로 설계되었다. 실제, Parkfield 지역의 경우, 이 지역에서 규모 6의 지진이 발생하였으며 일부 기기들에 대하여 약간의

교정만 필요하였을 정도로 지진에 대한 설계와 대응체제가 유지되고 있다.

USGS의 FMS 운영 시 가장 빈번하게 발생하는 사고가 바로 전기공급과 관련된 것이었다. 이는 주로 전기선의 파손, 공급 장치의 고장 등이 주요 원인인데, 안정적인 자료 취득을 위하여 계속기기와 지역관측소에는 2주간은 외부의 전원공급이 없어도 작동이 가능토록 자체 전기공급 장치(배터리, 태양열 발전 등)가 설치되어 있다(이현우, 2007). 설비에 대한 정기적인 점검과 이상 신호 또는 중규모 이상의 지진 발생시 수시로 운전상태 등을 점검하여, 필요시 검·교정을 한다.

장기적 안정성과 신뢰성 있는 운영환경

계측기로부터 수신되는 신호에 대한 검·교정시스템을 구축하여 자료의 정밀성과 신뢰성을 높여야 한다. 이를 위해서 운영 초기에는 상호 비교검토가 가능하도록 다양한 부지특성인자를 위한 계측장비를 다수의 지점에 설치/운영하는 것이 중요한데, 이는 동일계의 부지 내에서는 부지 특성인자들(지중응력, 지하수위(압), 지표이동 등)은 일반적으로 서로 유기적으로 반응하는 경향이 있기 때문이다. 또한 기존의 광역 감시망과의 연계, 계측자료 공유, 독자적 분석, 기관 상호검증 등을 통한 계측자료의 신뢰성을 높이는 것이 필요하다. 이러한 일련의 과정을 통하여 더 이상 효용성이 없거나 중복성을 갖는 계측기기는 시스템으로부터 제거하고, 추가로 필요한 계측기는 보완해 나가면서 장기적으로는 운영과정에서 최적화된 시스템을 구축해 나가는 것이 필요하다. FMS의 지속적이고 안정적인 운영 기반 확보를 위해서는 안정적인 시스템 운영개발에 필요한 예산이 보장되고, 계측자료에 대한 교차분석과 다른 시스템과의 연계 등을 통한 관련 운영기관간의 협의회를 구성 하는 등의 조치가 필요할 것이다. 특히 원자력부지에 설치되는 FMS의 경우, 원자력안전은 국민적 관심사이므로, 부지 주변에서의 단층이나 지진활동의 이상 징후가 발생하면 즉시 국민들도 알 수 있도록 정보공개가 절차화 되어야 하는데, 계측 자료에 대한 인위적 변형의 최소화, 자료 자동처리 및 실시간 자료공개 체계 구축 등을 통하여 계측자료 및 계측활동에 대한 투명성과 신뢰성을 확보 하는 것이 중요하다.

일본 서해안의 니가타후에즈 앞바다 지진(M6.8, '07.7.16)의 경우와 같이 해외에 큰 재해지진이 발생할 때면 국내 원자력시설의 지진안전성에 대한 의문이 항상 꼬리표처럼 제기되어왔는데, 이는 한반도에서도 지진활동이 활발했었음을 보여주는 역사지진기록이나 고지진학적 증

거가 있기 때문일 것이다(한국원자력안전기술원, 2006). 다만 이러한 증거들 역시, 자료의 부족, 조사여건의 미비, 자연현상의 불확실성 등의 이유로 ‘한반도의 지진 안전성’을 항상 논란거리로만 여겨온 경향이 없지 않다. 신뢰성에 관한 문제 때문일 것이다. 국내에 FMS를 도입하여 운영할 경우, 앞에서 논의한 여러 가지 현안들을 잘 해결해 나가지 않으면 이 역시 논란을 가중시키는 결과만 초래할 수 있다. 이를 극복하기 위해서는 안정적인고 지속적인 운영 시스템(인력, 예산 등) 확보, 유관 기관 간 협의체 운영을 통한 계측자료/활동의 검·교정 기능 활성화, 정보공개를 통한 운영의 투명성을 확보하는 등 통계적으로 의미 있고 사회적으로 수용 가능한 부지고유 특성 값(예, baseline)을 찾아가는 것이 중요할 것이다.

결 론

이상과 같이 국내 원자력시설 부지의 지질, 지진 및 지체구조적 환경에 맞는 FMS 도입을 위하여 국내외의 측지 및 지진관측망의 운영사례를 고찰해 보았으며, 이를 통하여 도출된 설계, 시공 및 운영 단계에서 고려되어야 할 사항들을 다음과 같이 제안하고자 한다.

첫째, 설치 대상에 대한 기하학적, 구조지질학적 그리고 운동역학적 특성을 충분히 파악하여 최적의 위치와 간격으로 네트워크를 설계해야 계측오차를 최소화할 수 있다. 그리고 이를 위해서는 감시 대상 단층만을 대상으로 하는 것 보다는 대상 단층을 포함한 주변 지역의 지형, 지질, 지진 및 지체구조적 특성에 대한 충분한 이해가 선행되어야 한다.

둘째, 해외에서 개발되어 운영 중에 있는 FMS는 계측 대상이 지구구조적으로 활발한 곳에 위치하고 mm/yr 이상의 평균 이동 특성을 갖는데 반해 알려진 국내의 지각 운동(단층 포함)은 그보다 적어도 10~100배정도는 느리다. 이러한 점을 고려할 때 최대한 감시대상 단층과 설치 지역에 적용가능한 정밀도의 계측장비를 확보하는 것이 중요하다.

셋째, 지각이 보내는 신호와 계기를 설치할 부지가 갖는 고유의 잡음을 구분할 수 있어야 한다. 부지고유의 잡음은 지역의 지구조석, 기후변화, 생활소음 등에 의해 생성되며, 이들에 대한 정확한 패턴과 발생특성을 이해하여 그 영향을 제거하지 못할 경우, 해석이 불가능한 신호를 얻게 되어 계측의 신뢰도에 대한 근본적인 논란이 생길 수 있다.

넷째, 계측기로부터 수신되는 신호에 대한 검·교정

시스템을 구축하여 자료의 정밀성과 신뢰성을 높여야 한다. 이를 위해서는 한두 가지의 계측기를 몇몇 지점에 설치하여 운영하기 보다는 상호 검교정이 가능하도록 운영 초기에는 다양한 계측장비를 다수의 지점에 설치/운영하는 한편, 기존의 광역 감시망과의 연계, 계측자료 공유·독자적 분석·기관 상호검증 등을 통하여 운영 과정에서 더 이상 효율성이 없거나 중복성을 갖는 계측기에 대해서는 시스템에서 제거하고, 추가로 필요한 계측기는 보완해 나가면서 운영과정에서 최적화된 시스템을 구축해 나가는 것이 필요하다.

다섯째, 사고, 고장 등으로 인한 계측 자료의 손실을 방지하고 상시 감시기능을 유지하여야 하며, 이를 위해서는 계측자료의 송수신 방식을 다원화 하여야 하며, 중앙 처리시스템에 대해서는 미러 시스템(mirror system)이나 그와 유사한 기능을 확보하는 한편, 비상시 전원공급/자료백업 시스템 등을 지역 관측소와 중앙처리본부에 갖추어 두어야 한다.

여섯째, 원자력관련 시설의 안전성은 국민적 관심사이므로 부지 주변에서의 단층이나 지진활동의 이상 징후가 발생하면 즉시 국민들도 알 수 있어야 하며, 계측 자료에 대한 인위적 변형의 최소화, 계측된 자료의 자동처리 및 실시간 자료공개 체계 구축 등을 통하여 계측자료 및 계측활동에 대한 투명성과 신뢰성을 확보하여야 한다.

일곱째, FMS의 운영을 위한 절차가 필요하다. 상시 운영과 비상시(이상신호발생, 계기 고장 등) 대응에 관한 명료하고 구체적인 절차서가 준비되어야 한다. 이러한 절차서는 시스템 설계 시 개발하여 시운전 과정에서 수정/보완되며, 실제 시스템의 운영과정에서도 계속해서 개선·최적화 되어야 한다. 최대한 개인의 판단을 요구하지 않으면서, 신호와 현상에 따라 단계별로 수행해 나갈 수 있어야 한다.

마지막으로, FMS의 지속적이고 안정적인 운영 기반 확보가 중요하다. 이를 위해서는 장기적인 측면에서 안정적 인 시스템 운영개발 기금이 보장되고, 원자력관련 시설부지에 대한 FMS 상시운영기구나 기관이 있어야 하며, 계측자료에 대한 교차분석, 다른 시스템과의 연계를 통한 관련 운영기관간의 협의회를 구성 하는 등의 조치가 필요할 것이다.

감사의 글

이 연구는 교육과학기술부의 원자력기술개발사업, “원전부지 설계지진 및 지표변형평가 최적화 규제기술개발” 과제로 수행되었음을 밝히며(교과부 M20702070001-

08M0207-00110), 꼼꼼한 검토와 지적을 통하여 이 논문의 완성도를 높여주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌

- 과학기술부, 2007, 신월성원전 1,2호기 건설허가, 원자력 안전과-1545(2007.6.4).
- 박영희, Sasao, T., 조정호, 김두환, 2006, 우주측지 VLBI를 이용한 한반도 지구판 운동 예비 연구, 한국 우주과학회지, 23(4), 345-354.
- 국가핵안전국·국가지진국, 1994, 핵발전소 부지선택중의 지진문제(1994년 수정), 핵안전 규범, HAF 0101(1), 26p. (중국어)
- 국가핵안전국·국가지진국, 1995, 핵발전소 공사건설 항목 가행성 연구 : 지진사업 내용과 심도규정 시행, 24p. (중국어)
- 기상청, 2006, 지진연보(2005), 기상청, 134p.
- 김경수, 배대석, 고용권, 김중렬, 2009, KURT 미소진동 모니터링, 지질공학, 19(2), 139-144.
- 원자로안전전문심사회, 1978, 원자력발전소의 지질, 지반에 관한 안전심사 지침, 3p. (일본어)
- 이봉주, 류충렬, 최위찬, 1999, 경주시 양남면 일대의 제4기 단층, 지질학회지, 35, 1-14.
- 이현우, 2007, Fault Monitoring System 설치 및 운영관련 기술교류를 위한 해외파견결과, 한국원자력안전기술원, KINS/DR-1844, 26p.
- 이현우, 현창현, 최호선, 2007, 해외 원자력이용시설부지 단층/지진관련 요건 제·개 정방향 분석 및 국내 적용성 고찰, 한국원자력안전기술원, KINS/RR-558, 105p.
- 장태우, 2001, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 지구조 운동. 지질학회지, 37, 431-444.
- 통상산업성 자원에너지청, 1995, 원자력발전소의 내진안전성, 18p. (일본어)
- 한국방사성폐기물관리공단, 2010, 중저준위 방사성폐기물 처분시설 부지단층 상시감시시스템 구축안, 한국방사성폐기물관리공단, 9p.
- 한국수력원자력주식회사, 2008, 중·저준위 방사성폐기물 처분시설 안전성분석보고서: 2.3(부지감시 및 조사 계획), 한국수력원자력주식회사, 49p.
- 한국수력원자력주식회사, 2010, 신월성1,2호기 건설허가 이행사항 조치현황: 읍전단층 상시감시시스템 구축, 한국수력원자력주식회사, 9p.
- 한국원자력안전기술원, 2006, 원전부지 지진안전성 평가기반 기술개발: 활성단층 평가기반 및 DB구축 연구, 한국원자력안전기술원, KINS/GR-333, 631p.
- 한국원자력안전기술원, 2007a, 신규 원전부지 지질/지분분야 현안 해결방안 수립 연구: 규제현안 해결방안 수립 연구, 한국원자력안전기술원, KINS/GR-357, 341p.
- 한국원자력안전기술원, 2007b, 원전부지지진 감시, KINS/ER-029, 7, 180p.
- 한국원자력안전기술원, 2008, 원전 등 원자력시설 설계 기준 초과지진에 대한 대응방안 연구, KINS/GR-392, 한국원자력안전기술원, 339p.
- 한국자원연구소, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서. 한국자원연구소, 한국전력공사, 1694p.
- 한국지질자원연구원, 2006, 원전부지 지진안전성 평가기반

- 기술개발: 원전부지 인근지역의 신기단층 조사연구, 한국원자력안전기술원, KINS/GR-334, 800p.
- Amiri-Simkooei, A.R., Tiberius, C.C.J.M. and Teunissen, P.J.G., 2007, Assessment of noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research*, 112(B07413), 1-19.
- Blewitt, G. and Lavallee, D., 2002, Effect of annual signals on geodetic velocity, *Journal of Geophysical Research*, 107(B7), ETG9, 1-11.
- BOSAI, 2007, Basic Knowledge of Earthquake, http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/part1.html, accessed October 15th. (In Japanese)
- CCEP, 2007, The Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007, Abstract of the 174th meeting of CCEP, 2007. 8. 20, http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/ENGLISH/index174_e.html, 27p.
- GTSM Technologies, 2011, GTSM Technologies: Tensor Strain for NSF's PBO, http://www.gtsmtechnologies.com/index_files/Page658.htm, accessed March 10.
- Hart, R.H.G., Gladwin, M.T., Gwyther, R.G., Agnew, D.C. and Wyatt, F.K., 1996, Tidal calibration of borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity, *Journal of Geophysical Research*, 101(B11), 25, 553-25,571.
- Hill, E.M. and Blewitt, G., 2006, Testing for fault activity at Yucca Mountain, Nevada, using independent GPS results from the BARGEN network, *Geophysical Research Letters*, 33, L14302, doi:10.1029/2006GL026140, 1-5.
- IAEA, 1991, Safety Series: Earthquake and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting, Safety Series No. 50-SG-S1, Rev. 1, International Atomic Energy Agency, Vienna, 60p.
- IAEA, 2008, Follow-up IAEA Mission in relation to the findings and lessons learned from the 16 July 2007 earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP "The Niigataken Chuetsu-oki earthquake", Misson Report, 1(67p) and 2(164p).
- Johnston, M.J.S., Myren, D.G., Mueller, R.J., Linde, A.T. and Gladwin, M.T., 1992, A focused earthquake prediction experiment on the southern Hayward fault: Detection array and expected strains and displacements during fault rupture, in Borchardt, Glenn, and others, eds., *Proceedings of the Second Conference on Earthquake Hazards in the Eastern San Francisco Bay Area: California Department of Conservation, Division of Mines and Geology Special Publication 113*, p.197-206.
- Kyung, J.B. and Okada, A., 1995, Liquefaction phenomena due to the occurrences of great earthquake: Some cases in central Japan and Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 237-250.
- NARA, 1997, Code of Federal Regulation 10, Energy: Part 100 - Reactor Site Criteria, the Office of the Federal Register National Archives and Records Administration, U.S.A., 472-487.
- NSC, 1981, Regulatory Guide for Aseismic Design of Nuclear Power Facilities (revised edition), Nuclear Safety Commission, Japan, 26p.
- UNAVCO, 2004, Critical Design of PBO Borehole Strainmeter Network, UNAVCO, 72p.
- USGS, 2011, Crustal Deformation Data, <http://earthquake.usgs.gov/monitoring/deformation/data/>, accessed March 13th.
- USNRC, 1997, Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide 1.165, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 44p.
- Young, R. and Norby, L., 2009, Geological Monitoring, *The Geological Society of America*, 303p.

2011년 3월 14일 원고접수, 2011년 3월 21일 게재승인

이현우

한국원자력안전기술원 규제총괄실
608-737, 대전광역시 유성구 과학로 34
Tel: 042-868-0576
Fax: 042-868-0523
E-mail: heanu@kins.re.kr