

# 원전부지 지진감시

1999. 3. 19

노 명 현

한국원자력안전기술원

# 원전부지 지진감시

## Earthquake Motoring at Nuclear Power Plant Sites

노명현\*  
Noh, Myunghyun

---

### ABSTRACT

The provision against earthquakes and aseismic design of nuclear power plants (NPPs) in Korea are composed of four stages: site-selection, design, construction, and operation stages. Since regulatory criteria are strictly applied in each stage, the NPPs in Korea are believed to have a sufficient safety against maximum potential earthquakes. However, it has been recognized that those regulatory criteria borrowed from U.S. should be replaced by Korea-specific ones by using earthquake data obtained from earthquake observation at and around NPP sites. Also, the government made a plan after the Yongwol and the Kyongju earthquakes that the regulatory body operates an independent earthquake network in order to reinforce the earthquake preparedness of NPPs. In compliance with the government's plan, this project is aiming at deployment of an earthquake motoring network composed of four seismic stations at NPP sites to record earthquake ground motions at NPP sites, to derive attenuation formulas of various ground motions and site-specific response spectra, and to develop structural integrity assesment program.

---

### 1. 서 론

국내 원전의 지진 대비체계는 부지선정 단계, 설계 단계, 건설 및 운영 단계의 4단계로 구분되며 각 단계별 규제기준의 엄격한 적용으로, 예상되는 최대 잠재지진에 대한 안전성이 확보되어 있다. 그러나 국내의 현행 설계지진 관련 규제기준은 많은 부분 미국의 기준을 준용하고 있어 원전부지 지역에서 지진계측을 통한, 원전부지 고유의 지진특성 평가기준 개발이 요구되어 왔다. 또한 영월 및 경주 지진 발생 이후 정부에서는 원전지진안전대책 강화의 일환으로 규제 전문기관에서 독립적으로 지진을 관측하도록 지시한 바 있다.

이를 위하여 4개 원전부지를 중심으로 공학적 의미를 갖는 지진자료를 계측하고 이로부터 원전 지진안전성 평가의 기반이 되는 지진동 감쇄식 및 부지고유 응답스펙트럼을 개발하며, 강진 발생시 지진 계측자료를 이용 신속히 구조물의 피해를 평가할 수 있는 구조건전성 피해 평가 및 예측체계를 구축하기 위한 종합계획이 수립되었다

---

\* 한국원자력안전기술원, 정회원

이에 따라 한국원자력안전기술원(이하 '기술원'이라 함)은 국내 4개 원전부지(고리, 영광, 울진, 월성)와 기술원을 연계하는 원전부지 지진관측망 구축을 시작하였으며, 1998년에 고리 및 월성 지진관측소와 기술원의 지진관측센터 구축을 완료했다. 영광 및 울진 관측소 설치와 원전 구조물 지진피해 평가 및 예측체계 구축은 향후 연차적으로 수행할 계획이다.

## 2. 원전부지 지진관측망의 구성

### 2.1 관측소 개요

원전부지 지진관측망을 구성하는 지진관측소는 4개 원전부지(고리, 영광, 울진, 월성) 내에 위치한다. 각 지진관측소에는 지진계 센서(FBA EpiSensor)와 기록계(Q4128)가 설치되며, 현재 고리 및 월성 지진관측소의 구축이 완료된 상태이다. 고리 및 월성 관측소의 지진계 센서 설치지점 정보는 표 1과 같다.

표 1. 관측소 정보

관측소	좌 표			지 질	풍 화 도
	위도(N)	경도(E)	고도(m)		
고 리	35° 20'	129° 18'	-	안 산 암	신 선
월 성	35° 43'	129° 43'	-	산성맥암	중간풍화

### 2.1 지진계 센서

FBA EpiSensor 센서는 지진가속도를 계측하는 가속도 센서로서 최대입력 범위는  $\pm 4g$ ,  $\pm 2g$ ,  $\pm 1g$ ,  $\pm 0.5g$  및  $\pm 0.25g$  중에서 선택할 수 있으며, 출력전압은  $\pm 2.5V$ ,  $\pm 10V$  Single-ended 또는  $\pm 5V$ ,  $\pm 20V$  Differential 중에서 선택할 수 있다. 우리나라의 지진 활동 수준에서 0.2g를 초과하는 지진이 발생할 확률은 극히 작으므로 센서의 최대입력 범위를  $\pm 0.5g$ 로 설정하였으며, 출력전압은 기록계의 신호입력 전압과 동일한  $\pm 20V$  Differential로 설정하였다.

FBA EpiSensor 센서는 0.5g의 지반가속도에 대하여  $\pm 20V$ 의 전압을 출력하므로 센서의 민감도는 40 V/g이다. 그러나 이는 DC(0 Hz) 성분에 대한 응답특성이며 실제 응답특성은 주파수에 따라 변한다. EpiSensor의 해석적 응답특성, 즉 모델 전달함수(Transfer Function)  $T(s)$ 는 다음과 같이 2쌍의 Pole로 표현될 수 있다.

$$T(s) = \frac{V(s)}{A(s)}$$

$$= \frac{k_1 * k_2}{(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)(s - p_4)}$$

$s$  : Laplace 변환 변수

$$k_1 = 2.46 \times 10^{13}, \quad k_2 = 40 \text{ V/g}$$

$$p_1 = -981 + 1009i \text{ (Pole 1)}, \quad p_2 = -981 - 1009i \text{ (Pole 2)}$$

$$p_3 = -3290 + 1263i \text{ (Pole 3)}, \quad p_4 = -3290 - 1263i \text{ (Pole 4)}$$

$V(s)$  : 출력 전압의 Laplace 변환,  $A(s)$  : 입력 가속도의 Laplace 변환

Fourier 영역에서 작업을 할 경우에는 Laplace 변환 변수  $s$ 를  $i2\pi f(=i\omega)$ 로 치환하면 된다. 상수  $k_1$ 는 4개의 Pole의 곱과 같으므로 주파수 0 Hz에서 모델 전달함수의 값  $T(0)$ 는  $k_2$  (=40 V/g)이다. 상수  $k_2$ 는 센서의 민감도로서 입력 가속도 범위(= 0.5g)에 대한 출력 전압 (= 20V)의 비이다.

모델 전달함수는 실험을 통하여 구해진 응답특성으로부터 개발된 최적 응답특성으로서 실제 응답특성과는 약간의 차이가 있다. 모델 전달함수의 진폭과 실제 응답 진폭간의 차이는 0 - 200 Hz 주파수 범위에서  $\pm 0.5$  dB이며, 모델 전달함수의 위상과 실제 응답 위상간의 차이는 0 - 100 Hz 주파수 범위에서  $\pm 2.5^\circ$  이고 0 - 200 Hz 주파수 범위에서는  $\pm 5^\circ$  이다.

EpiSensor의 3축 방향은 우수좌표계(Right-Handed Coordinate System)를 따르며, X=channel 1, Y=channel 2, Z=channel 3로 설정되어 있다. 지진관측소에 EpiSensor를 설치할 때 X 축의 양의 방향을 동쪽으로, Y 축의 양의 방향을 북쪽으로, 그리고 Z 축의 양의 방향을 위쪽으로 설정하였으므로 3축의 방향에 대한 정의는 그림 1과 같다.

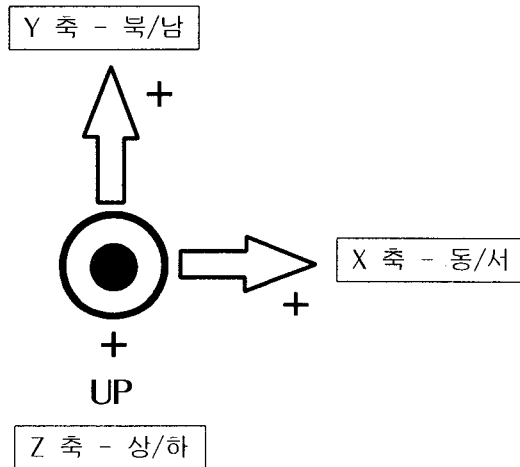


그림 1. EpiSensor의 3축(X, Y, Z) 방향 설정에 대한 개념도

## 2.2 기록계

Q4128 기록계는 초광대역(Very Broad Band; VBB) 자료취득 시스템으로서 Sampling Timebase가 내장된 3 ~ 8 채널(원전부지 지진관측소의 경우 8 채널)의 고해상 디지털패키지, 68030 컴퓨터를 이용한 자료처리 및 기록장치, 실시간(Real Time) 운전시스템, 그리고 OS9/68000으로 구성되어 있다. 기록계 본체의 구동에 필요한 전력(전압 12V DC, 전류 2A)을 공급하는 A/D 어댑터는 외장형이다.

디지털패키지에는 2개의 24 bit A/D Board가 장착되어 있으며 각 A/D Board는 4개의 채널이 연결될 수 있다. 통상적으로 한 쪽 A/D Board에는 Streckeisens, AG, STS-1/VBB 또는 STS-2와 같은 광대역 센서가 연결되며, 다른 한 쪽 A/D Board에는 강진계(가속도계)나 단주기 센서와 같은 보조 센서가 연결되어 사용된다. 현재 원전부지 지진관측망에 설치된 기록계의 경우 가속도계(FBA ES-T)만이 연결되어 있으며 향후 보다 정밀한 지진관측을 위하여 광대역 센서를 추가로 설치할 계획이다.

기록계의 시간 표기에 사용되는 시간신호는 인공위성에서 송신되는 GMT (Greenwich Mean Time)이므로 우리 나라 시간으로 환산할 때에는 9 시간을 더해주면 된다. 시간신호와 함께 설치지점의 위도, 경도 및 고도가 GPS 안테나를 통하여 수신되나 고도의 정확도는 상대적으로 높지 않다.

Q4128 기록계에는 24 bit A/D Board가 2개 장착되어 있다. A/D Board는 지진계 센서에서 계측된 전압신호를 수치화 하는 장비이다. A/D Board의 샘플링 속도는 32,000 Hz이므로 Nyquist 주파수는 16,000 Hz이다. 그러나 16,000 Hz 이상의 주파수 성분에 의하여 발생하는 에일리어싱(Aliasing) 효과를 방지하기 위하여 전압신호가 A/D Board에 입력되기 전에 Nyquist 주파수의 1/2인 8,000 Hz 이상의 주파수 성분을 제거하는 아날로그 고주파 제거필터(High-Cut Filter)를 적용하므로 A/D Board를 통하여 수치화 된 신호에는 8,000 Hz 이상의 신호에 대한 정보가 수록되어 있지 않다. 샘플링 속도가 32,000 Hz이지만 실제 출력되는 자료는 1,000 Hz이며 이로부터 500, 400, 250, 200, 125, 100, 50, 20, 10 및 1 Hz 자료를 선택적으로 취득할 수 있다. 이상을 요약하면 그림 2와 같다. 아래의 그림에서 마지막 출력 자료에는 현재 원전부지 지진관측망에서 취득되는 자료만을 나타내었다.

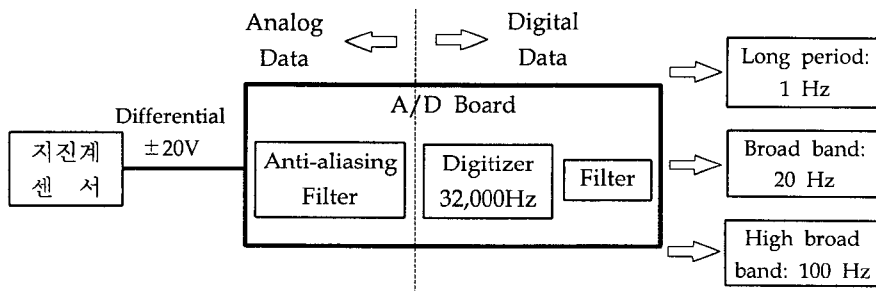


그림 2. 신호처리 절차

$n$  bit의 디지털라이저가 나타낼 수 있는 숫자(Digital Count 또는 Count)의 범위는  $\pm 2^{n-1}-1$ 이므로 24 bit로 구성된 디지털라이저가 표현할 수 있는 숫자의 범위는  $\pm 8388607$  Count이다. A/D Board에 입력되는 전압의 범위가  $\pm 20V$ 이므로 A/D Board의 민감도(Sensitivity)는  $419430 \text{ Count/V} (=8388607 \text{ Count} \div 20V)$ 이다. A/D Board를 통하여 수치로 변환될 수 있는 최소 전압, 즉 해상도는 민감도의 역수로서  $2.384 \mu V$ 이다. (해상도란 용어 대신에 Least Signification Bit의 약자인 LSB를 사용하기도 한다.) 즉, 입력전압  $+2.384 \mu V$ 는 숫자 +1로 변환되며 절대값이 이보다 작은 전압은 0으로 표현된다.

### 2.3 계기보정 및 해상도

지진계 센서 및 A/D Board는 모두 일종의 필터이므로 Laplace 영역에서 이들로부터의 출력은 입력에 전달함수를 곱과 같다. 지면가속도, 센서 출력전압, A/D Board 출력 값의 Laplace 변환을 각각  $A(s)$ ,  $V(s)$ ,  $D(s)$ 로 표기하고 센서 및 A/D Board의 전달함수를  $T(s)$  및  $B(s)$ 로 표기하면, 지진계 센서 출력 전압은 입력 지면가속도와 센서 전달함수의 곱이므로 다음과 같다.

$$V(s) = T(s) \times A(s)$$

$V(s)$ 의 단위는 Volt이며 지진계 센서의 전달함수  $T(s)$ 는 전술한 바와 같다. 센서의 출력은 다시 A/D Board의 입력이 되므로 A/D Board의 출력은 센서 출력과 A/D Board 전달함수의 곱이다.

$$\begin{aligned} D(s) &= B(s) \times V(s) \\ &= B(s) \times T(s) \times A(s) \end{aligned}$$

$D(s)$ 의 단위는 (Digital) count이며  $B(s)$ 는 A/D Board의 전달함수로서  $B(s) = 419430 \text{ count/V}$ 이다.

지진계에 계측된 값으로부터 지면가속도를 복원하는 과정을 계기보정(Instrumental Correction)이라고 하며, 이는 지금까지 기술된 과정의 역과정이다.

$$A(s) = \frac{D(s)}{B(s) \times T(s)}$$

위에서 계산된 지면가속도  $A(s)$ 는 아직 Laplace 영역에서의 값이다. 전술한 바와 같이 지진계 센서의 전달함수는 상수가 아니라 주파수에 대한 함수이므로 실제 지면가속도를 구하기 위해서는  $A(s)$ 에 대한 Laplace 역변환(Inverse Laplace Transform) 계산을 수행해야 한다. 그러나 Laplace 역변환은 별도의 프로그램을 통하여 계산되므로 어느 정도의 시간이 소요된다. 그러므로 전송된 지진자료로부터 즉시 최대 지면가속도를 추정하기 위해서는 다소 부정확하더라도 간략히 계산할 수 있는 방법이 필요하다.

원전부지 지진관측망에서 취득되는 자료 중 샘플 주파수가 가장 높은 자료는 High Broad Band로서 1초에 100개의 샘플을 하므로 Nyquist 주파수가 50 Hz이다. EpiSensor의 진폭 스펙트럼으로부터 0 ~ 50 Hz까지의 응답스펙트럼은 거의 변화가 없으므로 0 Hz의 진폭 응답스펙트럼 값을 근사적으로 전 구간에 적용할 수 있다. 1 count는  $2.384 \mu\text{V}$ 이고 주파수 0 Hz에서 지진계 센서의 전달함수는 40 V/g이므로, 1 count에 해당하는 지면가속도, 즉 전체 지진계의 해상도는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} A(0) \mid_{\text{to 1 count}} &= \frac{2.384 \mu\text{V/count}}{40 \text{ V/g}} \\ &= 5.96 \times 10^{-8} \text{ g} \end{aligned}$$

1 g는  $980 \text{ gal}(\text{cm}/\text{sec}^2)$ 이므로 1 count는 0.0584 mgal에 해당된다. 역으로 1 gal은 17,120 count에 해당된다.

### 3. 지진자료의 관리

#### 3.1 지진자료 전송

기술원의 지진관측센터와 각 지진관측소 사이의 자료전송은 모뎀을 통하여 이루어진다. 이를 위하여 기술원의 지진관측센터, 고리 및 월성 지진관측소에 각 3회선으로 총 9회선의 전화선을 개설하였다. 지진자료의 전송은 기본적으로 TCP/IP Ethernet 통신을 이용하여 이

루어지며 Ethernet에 통신장애가 발생할 경우 Serial 통신으로 대체된다. 평상시에 Serial 통신은 지진관측소 전원공급장치의 점검에 이용된다. 원전부지 지진관측망의 Ethernet 통신망은 하나의 독립된 LAN(Local Area Network)으로서 통상적인 공중망과 분리되어 있으므로 기술원의 지진관측센터를 통하지 않고는 접속할 수 없다. 따라서 외부에서 지진관측망에 접속하기 위하여는 Serial 통신을 이용해야 한다.

기술원의 지진관측센터에 설치된 3개의 전화회선 중 2회선은 고리 및 월성 지진관측소에 설치된 Router와의 Ethernet 통신 전용이다. 나머지 1회선은 Serial 통신용으로서 평소에는 지진관측소 전원공급장치의 점검 및 원격제어에 사용되며, Ethernet 통신에 장애가 발생한 경우에는 Ethernet 통신을 대체한다. Serial 통신용 전화회선은 어느 한 지진관측소의 특정 장비에 고정된 것이 아니고 원하는 장비에 선택적으로 연결되어 사용되므로, 1회에 1 곳에만 접속할 수 있다.

각 현장의 지진관측소에 설치된 3개의 전화회선 중 1개는 Ethernet 통신에 사용되며 나머지 2개의 전화회선은 Serial 통신에 사용된다. Ethernet 통신용 전화회선은 지진관측소의 지진계실에 설치된 Router에 연결된다. 지진관측센터에서 지진관측소의 Router에 접속하면 Router는 Q4128 기록계의 TCP/IP Ethernet 포트에 접속할 수 있도록 해준다. 한편, 기록계에는 Ethernet 포트 외에도 별도의 Serial 포트를 제공하므로 이곳에 1개의 전화회선이 연결된다. 나머지 1개의 전화회선은 전원공급장치의 Serial 포트에 연결되어 장치의 점검 및 원격제어에 사용된다.

### 3.2 지진자료의 형식

Q4128 기록계의 작동 및 자료처리는 기록계에 내장된 운영 소프트웨어 Multi-Shear에 의하여 제어되며, Multi-Shear는 SEED 양식에 따라 지진자료를 작성한다. SEED는 Standard for the Exchange of Earthquake Data의 약자로서 수치 지진자료(Digital Seismological Data)의 효율적인 교환을 위하여 국제적으로 제안된 지진자료 기록양식이다.

SEED 양식은 기본적으로 헤더(Header)와 자료(Data)로 구성되나 자료의 크기를 줄이기 위하여 헤더를 생략한 Mini-SEED 양식도 있다. 원전부지 지진관측망의 현장 지진관측소에서 기술원의 지진관측센터로 전송되는 지진자료의 양식은 Mini-SEED이다.

SEED 양식에 따라 작성된 자료는 그 특성에 따라 SEED 양식에서 정한 규칙에 따라 분류되며, 이 분류명을 SEED 명(Name)이라고 한다. SEED 명은 BGZ, HGE, BHV 등과 같이 3개의 알파벳으로 나타내며 첫 번째 문자는 샘플링 속도 및 지진계 센서의 주파수 대역을 나타내며, 두 번째 문자는 지진계 센서의 종류, 세 번째 문자는 센서의 축방향을 나타낸다.

현재 원전부지 지진관측망에서는 표 2와 같이 3가지 형태의 9성분 자료가 각 지진관측소에서 계속되고 있다.

표 2. 원전부지 지진관측망으로부터 계속되는 지진자료

SEED 명	자 료 설 명
HGZ, HGN, HGE	High broad band, Accelerometer, 100 Hz
BGZ, BGN, BGE	Broad band, Accelerometer, 20 Hz
LGZ, LGN, LGE	Long period, Accelerometer, 1 Hz

자료취합 및 분석에는 기술원의 지진관측센터에 설치된 프로그램 PCDRS/W386이 주로 이용되며, Netscape나 Explorer와 같은 Internet Web Browser를 이용한 자료전송도 가능하다. 현재 지진자료의 분석체계는 완전하게 구축되지 않았으나 1999년 1월 24일에 강원도 태백 지역에서 발생한 지진 및 1999년 2월 24일 인천 앞바다에서 발생한 지진을 계측함으로써 원전부지 지진관측망이 정상적으로 설치·작동됨이 확인되었다.

향후 원전부지 지진관측망을 통하여 계측되는 지진자료는 국내 지진 유관기관의 지진자료와 함께 하나의 데이터 베이스로 축적되어 서두에 기술된 사업목표의 수행에 활용된다. 이 밖에 학문적으로는 지진발생기구(Earthquake Mechanism) 분석, 지구조 응력(Tectonic Stress) 분석 등에도 활용될 수 있으며, 정부 및 기술원의 원전 지진안전성 확보 노력에 대한 대외적인 홍보자료로도 활용될 수 있다.