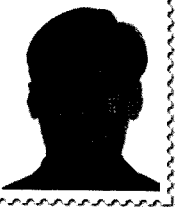
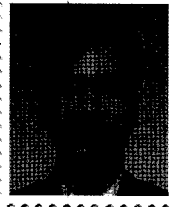


원전부지지진감시



최 호 선
한국원자력안전기술원 구조부지실
선임연구원
hoseon@kins.re.kr



최 상 현
한국철도대학 철도시설토목과
부교수
schoi86@nate.com

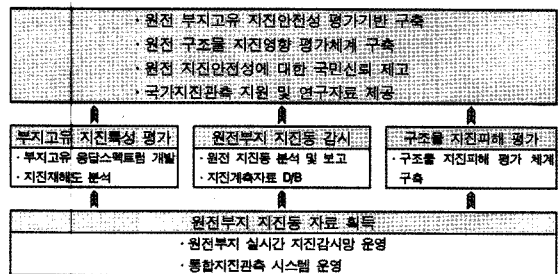
1. 개요

국내 원자력발전소의 부지 및 주요 건물에는 안전심사 지침 3.7.4, USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission) Regulatory Guide 1.12 등 관련규정에 따라 지진감시설비를 설치하여 큰 지진이 발생할 경우 안전하게 원자로를 정지할 수 있도록 대비하고 있다. 이러한 지진감시설비와는 별도로 발전소 인근 지역에서 발생할 수 있는 작은 지진까지도 상시 감시하기 위하여 각 원전부지 및 주변지역에 지진관측소가 설치되어 운영되고 있다.

원전부지 지진감시는, 1995년 일본의 고베 지진과 1996년 중국의 운남성 지진 등 한반도 인접 국가에서 대규모 피해지진의 발생으로 인해 지진에 대한 사회적 관심이 증대되었고, 국내에서도 1996년 영월 지진 및 1997년

경주 지진 등 중규모 지진이 발생함에 따라 지진에 대한 국민적인 불안감이 가중되자 정부차원에서 지진에 대한 안전대책을 수립하기 위한 대책의 일환으로 시작되었다.

원전부지 지진감시는 국내 4개 원전부지 내에 설치한 지진관측소를 통해 부지 인근에서 발생한 지진의 영향을 상시 관측하여 데이터베이스를 구축하고 이로부터 원전부지 고유 지진특성 평가기반을 구축하며, 원전 안전관련 구조물의 지진피해 평가 절차를 개발하는데 목적이 있다(그림 1 참조).



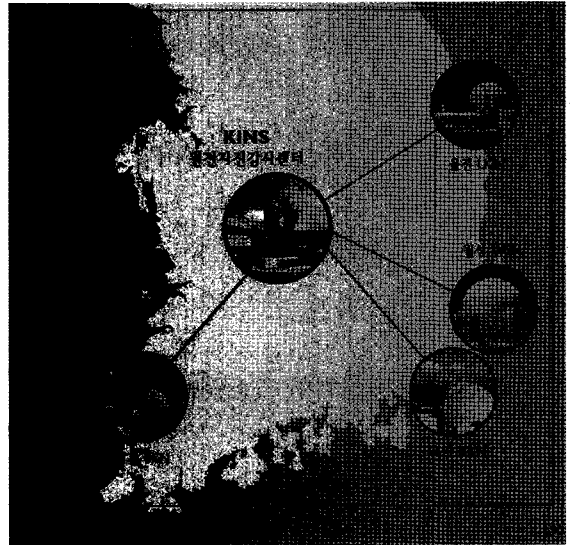
〈그림 1〉 원전부지 지진감시의 추진전략

2. 원전부지 지진감시망의 구성

2.1 지진관측소의 개요

국내 지진관측소는 기상청, 지질자원연구원, 전력연구원, 원자력안전기술원을 포함한 4개 기관을 중심으로 운영되고 있다. 기상청은 지진재해에 대응하기 위하여 신속한 대국민 지진발생 통보를 주목적으로 전국적인 지진관측을 수행하고 있으며, 지질자원연구원은 한반도 주변에서 일어나는 지진의 특성을 연구하여 지진위험도를 분석하고 인공발파와 자연지진을 구별하는 등 순수 지진학 분야의 연구를 위해 지진관측을 수행하고 있다. 전력연구원 및 원자력안전기술원은 원전부지를 중심으로 지진을 관측하고 있다. 전력연구원의 경우 고리에 4개소, 월성에 5개소, 영광에 2개소 및 울진에 2개소를 포함한 총 13개소에서, 원자력안전기술원의 경우 원전부지 각 1개소씩 총 4개소에 관측소를 설치 운영하고 있다. 지진연구에 대한 상호 협력 및 정보 공유를 위해 각 기관이 보유하고 있는 지진관측망의 지진자료는 통합지진관측망을 통해 실시간으로 공유되고 있다.

원자력안전기술원의 지진관측소는 1998년부터 구축을 시작하여 2001년 지진감시센터를 개소 이후 본격적인 지진감시를 시작하였다. 그림 2는 원자력안전기술원의 지진감시망의 구성도이고, 표 1은 지진관측소가 설치된 부지에 대한 정보이다. 지진감시망은 각 원전부지에 설치된 지진관측소(그림 3(a))와 원자력안전기술원 본원에 설치된 지진감시센터(그림 3(b))로 구성되어 있으며, 각 지진관측소는 지진동을 감지하기 위한 센서(가속도계 및 속도계)와 이를 기록하기 위한 기록계(그림 4), 그리고 기록된 자료를 지진감시센터로 전송하기 위한 통신장비 등으로 구성되어 있다. 자료전송선은 2002년부터 전용회선을 사용함으로써 원전부지 지진동에 대한 실시간 감시를 가능하게 하였다.



〈그림 2〉 원자력안전기술원 지진감시망 구성도

〔표-1〕 지진관측소 정보

관측소	위도(°N)	경도(°E)	암종	풍화도
고리	35.33	129.30	안산암	신선
영광	35.40	126.42	안산암	신선
울진	37.08	129.38	규암	신선
월성	35.72	129.47	산성맥암	중간풍화

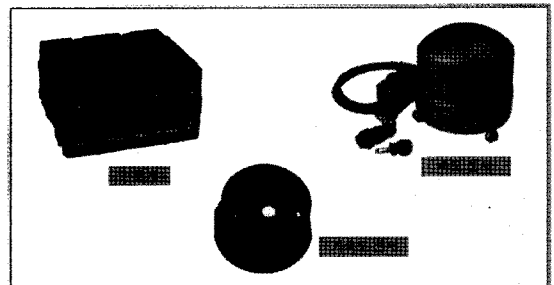


(a) 지진관측소(울진)



(b) 지진감시센터

〈그림 3〉 원전부지 지진관측소 및 지진감시센터



〈그림 4〉 지진감시를 위한 센서 및 기록계

2.2 가속도계

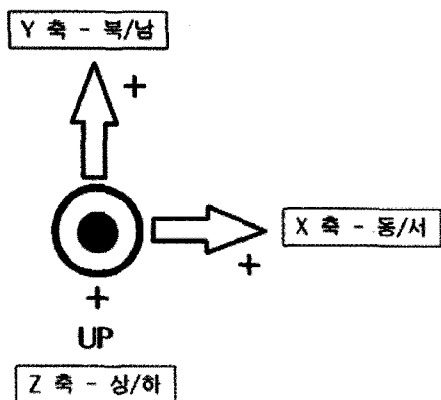
지진 발생시 원전 안전관련 구조물의 지진영향 평가를 위해 필요한 입력자료는 가속도 계측자료이다. 공학적인 의미를 갖는 가속도 계측자료는 또한 원전 지진안전성 평가

의 기반이 되는 지진동 감쇄식 및 부지고유 응답스펙트럼 개발에도 활용된다. 원전부지에 설치된 가속도계는 Kinemetrics사의 EpiSensor ES-T 모델이다. 가속도계는 지진에 의한 입력가속도를 전압으로 출력하는데, 이 모델은 입력가속도의 최대입력 범위와 출력전압을 다양하게 선택할 수 있다. 우리나라의 지진활동 수준에서 0.2g를 초과하는 지진이 발생할 확률은 크지 않으므로 가속도계의 최대입력 범위를 ±0.5g로 설정하였고, 출력전압은 기록계의 신호입력 전압과 동일한 ±20V differential로 설정하였다. 0.5g의 지반가속도에 대하여 20V의 전압을 출력하므로 설치된 가속도계의 민감도는 40V/g이다.

가속도 계측자료에는 가속도계의 응답특성이 내재되어 있다. 따라서 순수한 가속도 지진동을 얻기 위해서는 가속도계의 응답특성을 제거해야 한다. EpiSensor ES-T 모델의 해석적 응답특성, 즉 모델 전달함수(transfer function)는 다음과 같이 표현된다.

$$T(s)=V(s)/A(s)=(k_1 \times k_2)/[(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)(s-p_4)]$$

여기에서 T(s)는 전달함수, s는 Laplace 변환 변수, $k_1=2.46 \times 10^{13}$, $k_2=40V/g$, $p_1=-981+1009i$, $p_2=-981-1009i$, $p_3=-3290+1263i$, $p_4=-3290-1263i$, V(s)는 출력 전압의 Laplace 변환, A(s)는 입력 가속도의 Laplace 변환을 나타낸다.



(그림 5) EpiSensor의 3축(X, Y, Z) 방향 설정에 대한 개념도

EpiSensor의 3축 방향은 우수좌표계를 따르며, X=channel 1, Y=channel 2, Z=channel 3로 설정되어 있다. 지진관측소에 EpiSensor를 설치할 때 X축의 양의 방향을 동쪽으로, Y축의 양의 방향을 북쪽으로, 그리고 Z축의 양의 방향을 위쪽으로 설정하였으므로 3축의 방향에 대한 정의는 그림 5와 같다.

2.3 속도계

가속도계는 강진동을 감지할 목적으로 설계된 센서로 내진설계 매개변수 산출에 중요한 자료를 제공한다. 그러나 속도계는 진앙지 결정, 단층면해의 분석, 전파 특성 등의 지진연구를 위해서 지진파의 정확한 위상 측정이 필요하기 때문에 그 용도나 활용 분야에 있어서 가속도계와 차별화된다. 속도계는 사용하는 주파수 대역에 따라서 단주기, 장주기 그리고 광대역 속도계로 구분할 수가 있는데, 광대역 속도계의 경우 단주기 및 장주기 속도계의 주파수 대역을 포괄하고 있기 때문에 지진연구 목적에 적합하다. 원전부지에 설치되어 있는 속도계는 Streckeisen사의 STS-2 모델로 광대역 속도계이다.

가속도계와 마찬가지로 속도 계측자료에는 속도계의 응답특성이 내재되어 있다. 따라서 순수한 속도 지진동을 얻기 위해서는 속도계의 응답특성을 제거해야 한다. STS-2 모델의 해석적 응답특성, 즉 모델 전달함수(transfer function)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T(f)=G/[1-2ih(f_c/f)-(f_c/f)^2]$$

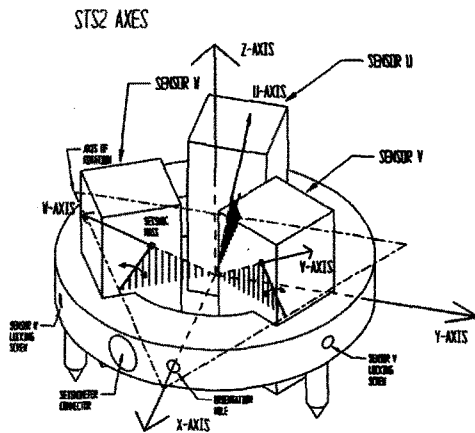
여기에서 T(f)는 전달함수, f는 주파수, $G=2 \times 750V^2/sec/m$, $f_c=0.00833Hz$, $h=0.707$ 이다. 이 함수는 간략식으로 표현된 것이며, 1Hz 이하의 저주파수 영역에서 활용할 수 있다. 1~10Hz 대역에서 진폭은 ±1.5% 오차 범위에서 평탄하고 위상 변형에 의한 군속도 지연시간은 거의 일정하다. 10Hz 이상 영역에서는 약 70Hz 근처에서 최대 진폭이 발생한다.

STS-2가 설치될 X(양의 방향이 동쪽), Y(양의 방향이 북쪽), Z(양의 방향이 위쪽) 방향은 센서 내에 배치된 seismic mass의 3축 방향 U, V, W 방향(그림 6)과 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$X = -(2/3)^{1/2}U + (1/6)^{1/2}V + (1/6)^{1/2}W$$

$$Y = (1/2)^{1/2}V - (1/2)^{1/2}U$$

$$Z = (1/3)^{1/2}U + (1/3)^{1/2}V + (1/3)^{1/2}W$$



(그림 6) STS-2의 seismic mass의 3축(U, V, W) 방향과 설치시 3축(X, Y, Z) 방향

2.4 기록계

센서를 통해 감지된 속도나 가속도 지진동은 기록계에 디지털 자료로 기록된다. 원전부지에 설치된 기록계는 Quanterra사의 Q4128 기록계이다. Q4128 기록계는 초광대역 자료취득 시스템으로서 1000Hz까지 샘플링이 가능한 4채널 24비트 디지털라이저(원전부지 지진관측소의 경우 8채널), 내부 타임 베이스와 GPS를 이용한 정확한 시간 측정, TCP/IP를 이용한 지진감시센터와 지진관측소 간의 자료전송, 모토롤라사의 68030 CPU와 OS9의 운영체제 등의 특성을 가지고 있다. 기록계 본체의 구동에 필요한 전력(전압 12V DC, 전류 2A)을 공급하는 A/D 어댑터는 외장형이다.

Q4128 기록계에는 24 bit A/D board가 2개 장착되어 있다. A/D board는 센서에서 계측된 전압신호를 수치화하는 장비이다. A/D board의 샘플링은 샘플링 속도는

32,000Hz 이지만 실제 출력되는 자료는 1,000Hz이며 이로부터 500, 400, 250, 200, 125, 100, 50, 20, 10 및 1Hz 자료를 선택적으로 취득할 수 있다.

n비트의 디지털라이저가 나타낼 수 있는 숫자의 범위(count)는 $\pm 2^{n-1}-1$ 이므로 24비트인 Q4128 기록계가 표현할 수 있는 숫자의 범위는 ± 8388607 이다. A/D Board에 입력되는 전압의 범위가 $\pm 20V$ 이므로 A/D board의 민감도는 $419430 \text{count/V} (=8388607 \text{count} \div 20V)$ 이다. A/D board를 통하여 수치로 변환될 수 있는 최소 전압, 즉 해상도는 민감도의 역수로서 $2.384 \mu V/\text{count}$ 이다. 즉, 입력전압 $+2.384 \mu V$ 는 숫자 +1로 변환되며 절대값이 이보다 작은 전압은 0으로 표현된다.

2.5 계기보정 및 해상도

지진계 센서 및 A/D board는 모두 일종의 필터이므로 Laplace 영역에서 이들로부터의 출력은 입력에 전달함수를 곱한 것과 같다. 지진동, 센서 출력, A/D board 출력의 Laplace 변환을 각각 A(s), V(s), D(s)로 표기하고 센서 및 A/D Board 전달함수를 T(s) 및 B(s)로 표기하면, 지진계 센서 출력 전압은 입력 지진동과 센서 전달함수의 곱이므로 다음과 같다.

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

센서의 출력은 다시 A/D board의 입력이 되므로 A/D board의 출력은 센서 출력과 A/D board 전달함수의 곱이다.

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

지진계에 계측된 값으로부터 지진동을 복원하는 과정을 계기보정이라고 하며, 이는 지금까지 기술된 과정의 역과정이다.

원전부지 지진감시에서 취득되는 자료 중 샘플 주파수

가 가장 높은 자료는 1초에 100개의 샘플링을 하므로 Nyquist 주파수는 50Hz이다. 원전부지에 설치된 가속도계의 전달함수를 보면 0~50Hz의 범위에서 진폭스펙트럼의 변화가 거의 없으므로 0Hz의 진폭스펙트럼 값을 근사적으로 적용할 수 있다. Q4128 기록계 해상도는 2.384μV/count이고, EpiSensor의 민감도는 40V/g이므로, 1count에 해당하는 지반가속도는 다음과 같이 계산된다.

$$1\text{count}=2.384\mu\text{V}/[40\text{V/g}]=5.96\times 10^{-8}\text{g}$$

이는 원전부지에 설치된 지진관측장비는 이론적으로 최소 5.96×10⁻⁸g의 지진동까지 감지할 수 있다는 것을 의미한다.

3. 지진평가 및 대응

원자력안전기술원의 지진감시센터에서는 각 관측소의 전원 및 지진계의 이상 유무에 대한 원격점검과 필요시 지진계 운영 파라미터의 조정작업 등이 수행되나, 가장 중요한 작업은 각 관측소에서 계측된 지진자료를 취합하여 분석한 후 이를 지진자료로서 저장 및 관리하는 것이다. 자료처리의 첫 단계는 관측된 지진동이 자연지진에 의한 것인지, 아니면 발파나 기계진동 등에 의한 인공적 소음인지를 판별하는 작업이다. 자연지진으로 판별될 경우 기상청 및 지질자원연구원의 지진자료를 참조하여 지진의 발생 위치 및 규모를 결정한 후 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)의 수준에 따라 표 2와 같이 대응한다. 대응 후 측정된 자료는 여러 가지 보정을 거쳐 하나의 지진동 자료로 데이터베이스화 되며, 향후 응답스펙트럼 및 지진동 감쇄 개발과 원전 구조물 지진피해 평가절차 개발에 활용된다.

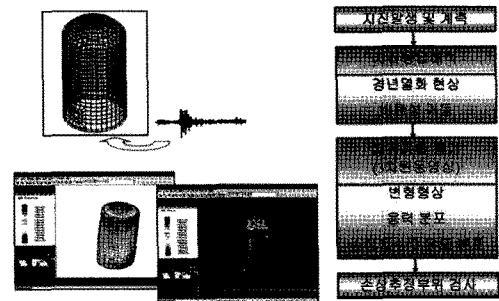
현재 지진감시센터에는 지진관측소의 지진동 계측 기록을 이용하여 원자로 격납건물의 안전성을 평가하고, 원자로 격납건물 외벽의 지진거동을 3차원 동영상으로 나타

낼 수 있는 전산시스템이 구축되어 있다. 그림 7은 전산시스템의 개요도이다. 지진관측소에서 지진이 계측되면 지진응답해석을 통하여 격납건물의 가속도, 변위, 응력, 및 변형도 계산을 통하여 손상지수를 계산하고 부위별 손상 정도를 예측할 수 있다.

[표-2] 원전부지 최대지반가속도(PGA) 수준별 대응 절차

단계	PGA	주체	대응내용	비고
0	PGA<0.001g	원자력안전기술원	• 지진감시 보고	
I	0.001g≤PGA<0.01g	원자력안전기술원	• 실시간 지진감시/통지	참고사항
II	0.01g≤PGA<0.1g	원자력안전기술원	• 실시간 지진감시/통지 • 지진감시보고	참고사항 경보발령
		한국수력원자력	• MCR 경보 확인 • 스펙트럼 분석	
III	0.1g≤PGA	교과부	• 현장점검 지휘	운전정지 현장점검
		원자력안전기술원	• 실시간 지진감시/통지 • 지진감시보고 • 구조물 지진피해 평가 및 예측분석 • 현장점검 계획수립 및 시행	
		한국수력원자력	• 운전정지 후 현장점검 • 후속조치 수행	

□ 원자로 격납건물 지진피해평가 전산시스템 구축 흐름도



한국수력원자력

(그림 7) 원자로 격납건물 지진피해평가 전산시스템 구축 흐름도

기타 활동으로 지진감시센터 홈페이지 (<http://emc.kins.re.kr>) 운영을 통해 국내 및 해외 대규모 지진계측자료, 유감지진 보고 자료 등을 공개하고 있으며, 지진감시센터 방문객들에게 원전부지 지진관측망의 역할, 주요 업무 및 설치 장비 등에 대한 안내를 하고 있다. 아울러 지진관측기관 간의 정보 교류를 위하여 매년 공동 지진워크숍을 기상청/기상연구소와 공동으로 개최하여 지진관측, 분석 및 대응에 대한 국내의 최신 현황을 의하고, 지진 및 지진공학 분야의 연구성과를 발표하고 있

으며, 이를 통해 산학연간 정보교류 및 협력체계를 강화하고 있다.

4. 결론

전술한 바와 같이 원전에 설치된 지진감시설비와 별도로 원자력안전기술원은 원전부지에 대하여 지진관측소를 설치하고 작은 지진이래도 놓치지 않고 대응할 수 있는 체계를 구축하였으며, 기상청 등 다른 기관의 지진관측소의 공조를 통하여 원전부지 지진감시를 공고하게 하고 있다. 원자력안전기술원은 이러한 일련의 활동을 통하여 국내 원전부지 지진안전성 확보에 대한 대국민 신뢰도 증대를 위하여 노력하고 있다.

1. 노명현 "원전부지 지진감시." 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 1999, pp.18-24.

참고문헌

2. 박세문, 김종학. "국내원자력발전소의 지진안전성 확보현황." 한국방재학회지, Vol.8, No.2, 2008, pp.25-34.
3. 한국원자력안전기술원 지진감시센터 홈페이지. <http://emc.kins.re.kr>
4. 한국원자력안전기술원. "원전 등 원자력시설 설계기준 초과 지진에 대한 대응방안 연구." KINS/GR-392, 2008.
5. 한국원자력안전기술원. "경수로형 원전 안전심사지침 3.7.4(지진계측설비)."
6. USNRC Regulatory Guide 1.12. "Nuclear Power Plant Instrumentation for Earthquakes."

