

지진감시설비의 과도진동에 대한 원인 분석

주광호, 전규식, 이종림
한국전력공사 전력연구원

요 약

원자력발전소의 지진에 대한 절대안전성을 확보하기 위하여 설치된 지진감시설비망에 과도진동이 유발되는 사례가 자주 발생하여, 이에 대한 원인을 분석하고 대책을 강구하는 연구를 수행하였다. 현재 울진1,2호기 배관상에 설치되어 있는 가속도계 및 응답스펙트럼기록기에 작업자의 실수로 인한 인위적인 충격이나 배관진동에 의해 과도한 진동이 발생할 수 있다는 개연성을 밝혀 내고 이러한 지진감시설비의 개선 및 적합한 설치장소에 대하여 의견을 제시할 수 있는 계기를 마련하였다.

1. 서 론

원자력발전소의 내진설계가 아무리 정확하게 이루어졌다고 하더라도 설계지진을 능가하는 크기의 지진이 발생할 가능성을 전혀 배제할 수는 없고, 또한 원전시설물의 지진시 거동이 계산과정과 완전히 동일할 수도 없다. 그러므로 원전의 절대안전성을 확보하기 위해서는 실제의 원전 설비에 충분한 지진계측장치를 설치하여 원전의 가동기간 중에 발생하는 지진의 응답을 정확히 계측하고 이를 분석한 후 필요한 후속 조치를 취할 필요가 있다. 그러나 피해를 초래할 정도의 지진에서는 계측기 전원의 단락을 예상할 수 있으므로 전원의 공급 없이 작동할 수 있는 보조적인 지진감시설비의 설치가 의무화되어 있다. 즉 완벽한 시간이력을 기록하는 지진계를 보조하는 수단으로써 전원을 필요로 하지 않는 기계식 지진계를 사용하고 있으나, 이러한 기계식 가속도계 및 응답스펙트럼기록기가 과도진동을 기록하고 있어 그 원인을 분석하게 되었다.

2. 응답스펙트럼기록기의 원리

일반적으로 응답스펙트럼이란 주파수에 대한 응답을 기계적으로 측정하는 것이 아니라 지진과 같은 파형의 시간이력에서 유도된 주파수에 관한 정보에 불과하다. 이러한 시간이력을 계측하고 저장하기 위해서는 외부전원을 필요로 하나, 지진시에 전원의 공급이 차단되는 경우에 대비하여 보조적인 수단으로서 전원공급을 필요로 하지 않는 지진감시설비를 설치하도록 규정되어 있으며, 원자력발전소에 설치된 응답스펙트럼기록이란 외부전원을 필요로 하지 않는 기계식 기록기이다. 울진1,2호기에 설치된 기계식 응답스펙트럼기록기는 각각 다른 고유주파수를 갖는 감쇠값 2%의 일질점계가 16개 부착되어 있어 외부에서 진동이 입력되면, 각각의 고유주파수가 다른 일질점계는 외력에 따라 각각의 반응을 나타내고, 일질점계에 연결된 금속침이 고정된 금속판을 긁어 외력에 반응한 최대변위의 크기를 나타낸다.

2.1 감도치의 결정

일질점계의 변위응답의 크기는 질점계의 고유주기를 결정하는 질점계의 강성에 의해 결정된다. 즉, $F = k \times x$ 라는 Hooke의 법칙과 일질점계의 고유주기인 $T = 2\pi \sqrt{m/k}$ 에 하중항으로 지구중력인 $F = mg$ 를 적용하면, 지구중력으로 움직인 질점계의 정적변위는 $x = g/(f^2 4\pi^2)$ 로 표현된다. 이러한 관계식을 적용하면 지구중력이라는 하중에서 고유주파수가 1.0Hz인 일질점계의 한쪽 진폭의 크기는 약 25.0cm가 되므로 적어도 50.0cm 이상의 크기를 갖는 금속판을 준비하여야 하며, 고유주파수가 32.0Hz인 경우에는 한쪽 진폭이 불과 0.024cm밖에 되지 않으므로 실제 기록을 판독하는데 어려움이 있다. 그러므로 실제의 응답스펙트럼기록기에서는 변위기록의 크기를 조절하는 지렛대가 내장되어 중력하에서 모든 질점계가 거의 일정한 변위를 나타내게 고안되어 있다. 표-1에서는 각 질점계에 기계적으로 내장된 것으로 판단되는 지렛대의 크기를 이론적으로 계산한 결과를 나타낸다.

표-1 응답스펙트럼기록기의 감도치 계산

응답스펙트럼기록기의 고유주파수 (Hz)	Acceleration Sensitivity			중력에 의한 정적변형량(cm) ⁽²⁾ $g / (4\pi^2 f^2)$	지렛대의 비율 (2) ÷ (1)
	(g/in)	(g/cm)	(cm/g) ⁽¹⁾		
No.01 (1.00)	5.00	1.96	0.50	24.82 (cm)	49.64
No.02 (1.26)	5.00	1.96	0.50	15.64 (cm)	31.28
No.03 (1.59)	5.00	1.96	0.50	9.819 (cm)	19.64
No.04 (2.00)	5.00	1.96	0.50	6.206 (cm)	12.41
No.05 (2.52)	5.00	1.96	0.50	3.909 (cm)	7.818
No.06 (3.17)	5.00	1.96	0.50	2.470 (cm)	4.940
No.07 (4.00)	5.00	1.96	0.50	1.551 (cm)	3.102
No.08 (5.04)	5.00	1.96	0.50	0.977 (cm)	1.954
No.09 (6.35)	5.00	1.96	0.50	0.616 (cm)	1.232
No.10 (8.00)	4.00	1.57	0.65	0.388 (cm)	0.597
No.11 (10.1)	6.00	2.36	0.42	0.243 (cm)	0.579
No.12 (12.7)	10.0	3.94	0.25	0.154 (cm)	0.616
No.13 (16.0)	10.0	3.94	0.25	0.0970 (cm)	0.388
No.14 (20.2)	14.0	5.51	0.18	0.0608 (cm)	0.337
No.15 (25.4)	7.00	2.75	0.36	0.0385 (cm)	0.107
No.16 (32.0)	10.0	3.94	0.25	0.0242 (cm)	0.097

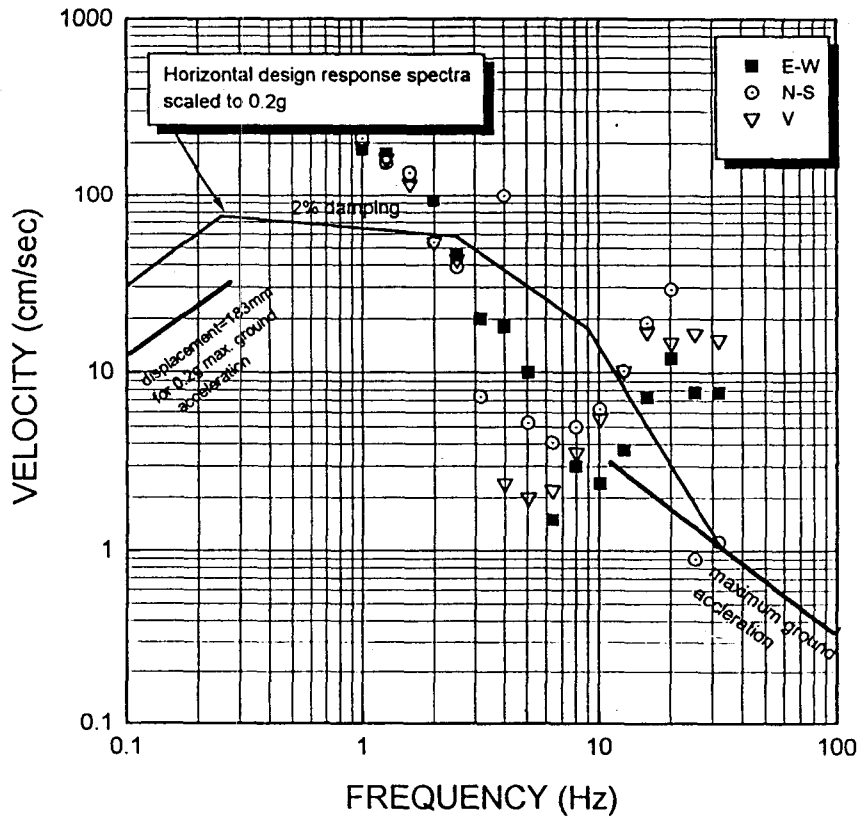
3. 과도진동 발생현황

지진감시설비 중에서 외부전원을 필요로 하지 않는 침두가속도기록계 및 응답스펙트럼기록기는 안전계통의 중요한 배관상에 설치하도록 관련코드 및 규정에서 요구하고 있으며, 이러한 배관상에 설치된 기록기들은 정기점검시 과도한 진동이 기록되고 있는 경우가 많다. 특히 취수구 구조물 내부의 배관상에 설치된 응답스펙트럼기록기는 표-2와 같은 과도한 계측기록을 나타내고 있다. 표-2의 과도진동기록의 타당성을 검토하기 위하여 그림-1과 같이 원자력발전소의 설계시 사용되는 수평방향의 설계응답스펙트럼과 계측된 진동크기를 세방향 대수좌표인 Tripartite 그래프로 나타내었다. 그림-1에서 알 수 있는 것처럼 응답스펙트럼기록기에서 계측된 결과가 지진동 및 구조물의 진동 특성상 큰 응답을 갖게 되는 탁월주파수영역에서는 적은 값을 나타내고 있으며 구조물의 탁월주파수영역이 아닌 저주파수영역에서 큰 값을 갖는 특이한 현상을 하고 있다. 특히 1.0Hz~2.0Hz 및 10.0Hz 이상의 주파수영역에서는 세방향 성분의 계측치가 설계응답스펙트럼을 초과하는 값을 나타내고 있다.

표-2 취수구 배관 위에서의 계측기록값

기록기 번호(Hz)	동 / 서 (854)			남 / 북 (855)			수 직		
	실측치 (inch)	가속도 (g)	감 도	실측치 (inch)	가속도 (g)	감 도	실측치 (inch)	가속도 (g)	감 도
01 (1.00)	0.225	1.190	5.288	0.255	1.23	4.8	0.2675	1.36	5.08
02 (1.26)	0.275	1.400	5.09	0.263	1.32	5.0	0.25	1.25	5.0
03 (1.59)	0.263	1.340	5.09	0.245	1.2	4.9	0.275	1.397	5.08
04 (2.00)	0.238	1.210	5.08	0.138	0.69	5.0	0.1375	0.69	5.02
05 (2.52)	0.145	0.725	5.0	0.0125	0.06	4.8	0.1225	0.625	5.1
06 (3.17)	0.08	0.408	5.1	0.0	0.0	-	0.03	0.15	5.0
07 (4.00)	0.09	0.450	5.0	0.0125	0.0625	5.0	0.0525	2.57	48.95
08 (5.04)	0.063	0.324	5.14	0.0125	0.063	5.04	0.0325	0.17	5.23
09 (6.35)	0.0125	0.060	4.8	0.0175	0.088	5.03	0.0325	0.168	5.16
10 (8.00)	0.038	0.152	4.0	0.045	0.185	4.11	0.0625	0.258	4.13
11 (10.1)	0.025	0.151	6.04	0.055	0.36	6.5	0.065	0.41	6.3
12 (12.7)	0.03	0.303	10.1	0.0825	0.84	10.2	0.0825	0.83	10.06
13 (16.0)	0.075	0.750	10.0	0.17	1.73	10.2	0.2	1.93	9.65
14 (20.2)	0.103	1.560	15.2	0.12	1.9	15.8	0.255	3.78	14.8
15 (25.4)	0.175	1.270	7.26	0.325	2.68	8.25	0.0175	0.139	7.94
16 (32.0)	0.125	1.600	12.8	0.245	3.14	12.8	0.02	0.23	11.5

그림-1 설계응답스펙트럼과 과도진동의 비교



4. 간이실험에 의한 검증시험

응답스펙트럼기록기에 의한 응답스펙트럼의 타당성을 검토하기 위하여 책상을 임시의 진동대로 사용하여 진동실험을 수행하였다. 즉 응답스펙트럼기록기를 책상 위에 설치하고 책상을 두사람의 인력으로 흔드는 방법으로 입력운동을 작용시켰다. 책상에 의한 입력운동의 시간이력은 한국전력공사 전력연구원 내진기술팀에서 보유하고 있는 B&K사 제품인 압전형가속도계(8318형 및 4370형)를 응답스펙트럼기록기에 수평방향 및 수직방향으로 부착하여 계측하였다. 두 종류의 가속도계에 의한 기록파형이 거의 유사하게 기록되었으므로 가속도계의 특성에 의한 영향은 무시할 수 있을 정도로 입력운동은 정확하게 측정되었다고 판단되었다. 그리고 입력운동의 주파수 특성에 의한 영향을 검토하기 위하여 장주기성분이 탁월한 입력운동과 단주기성분이 탁월한 입력운동을 작용시켰다. 이러한 입력운동에 의한 이론적인 변위응답스펙트럼과 응답스펙트럼기록기에서 실측된 변위응답의 결과를 비교하기 위하여 표-1에서 결정한 감도값을 실측치에 반영하여 양자를 비교하였다. 그림-2는 책상을 가진대로 이용하여 수평방향으로 가진한 경우에 대하여 파형에 의한 변위응답스펙트럼과 응답스펙트럼기록기에 의한 실측치를 비교한 결과를 나타낸다. 그림-2에서 알 수 있는 것처럼 감도값 2%에 대한 응답스펙트럼과 ◆표로 표시한 응답스펙트럼기록기에 의한 실측치를 비교하면 장주기영역에서는 실측치가 계산치 보다 수십배 크게 나타나고 있다. 이는 장주기 성분의 입력이 없는 상태에서도 응답스펙트럼기록기는 장주기영역에서 상당히 큰 응답을 나타내고 있으며, 이는 과도진동이 발생하고 있는 실제의 문제와 동일한 경향을 갖는다. 또한 비교적 장주기 성분의 입력을 강하게 작용시킨 그림-3의 경우에도 유사한 결과를 나타낸다. 이러한 사실로부터 응답스펙트럼기록기는 장주기영역에서 과민한 응답을 나타내는 것으로 판단하였으나, 간단한 원리로 구성된 응답스펙트럼기록기의 모순점도 발견할 수 없으므로 책상을 이용한 입력운동에도 문제점이 있다고 판단하고, 추가적으로 진동대를 이용한 실험을 수행하였다.

그림-2 수평방향 책상가진에 의한 변위응답스펙트럼(실험-1)

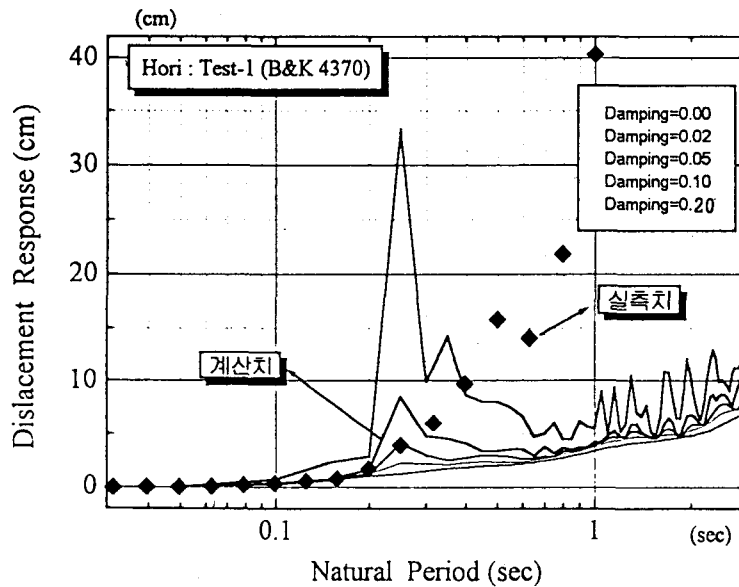
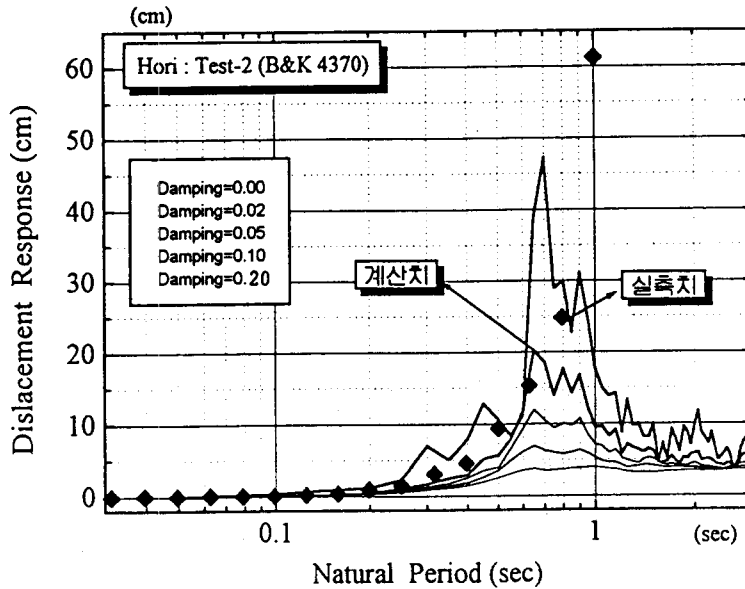


그림-3 수평방향 책상가진에 의한 변위응답스펙트럼(실험-2)



5. 진동대를 이용한 검증시험

전항에서 설명한 간이실험에서는 응답스펙트럼기록기에 의한 실측치와 압전형가속도계로 계측한 파형을 수학적으로 구한 응답스펙트럼은 전자에 의한 실측치가 월등히 큰 값을 나타내었다. 이러한 결과의 원인은 실험의 절차를 간단히 하기 위하여 책상 위에 응답스펙트럼기록기를 설치하고 인력으로 책상을 흔드는 방법으로는 예상치 못한 충격력이 응답스펙트럼기록기에 작용했을 가능성과, 완벽한 수평력을 작용하지 못한 관계로 미소한 회전력이 응답스펙트럼에 작용하는 등 실험적인 오차를 생각할 수 있다. 이러한 입력값에 대한 불확실성의 개연성을 소거하기 위하여 표준값으로 검증되어 있는 한국기계연구소의 진동대를 사용하여 정현파실험과 지진파실험을 수행하였다.

5.1 정현파 가진

응답스펙트럼기록기는 총16개의 질점계를 갖고 있으므로 각 질점계의 고유진동수에 해당하는 정현파를 가력하여 응답스펙트럼기록기의 성능을 점검하기로 하고, 가력진동수로 작성하기 쉬운 정수배의 진동수인 1.0Hz, 2.0Hz, 4.0Hz, 8.0Hz, 16.0Hz에 대해서 수직방향 및 수평방향으로 정현파가력을 실시하였다. 그리고 진동대에 의한 정현파의 가속도값을 응답스펙트럼기록기에 의한 변위기록의 크기와 비교하기 위하여, 정현파의 가속도값에 응답스펙트럼기록기의 감도값 및 정적하중에 대한 동적하중의 배율을 곱하여 환산하였다. 즉 표-3에서 처럼 각 주파수별 정현파가력에서 입력된 가속도값⁽¹⁾을 응답스펙트럼기록기의 감도값⁽²⁾으로 곱하고, 감쇠값 2%에서의 정적하중에 대한 동적하중의 동적배율($1/2\xi$)인 25배를 곱하면, 무한히 계속되는 정현파하중을 받는 일질점계의 변위응답을 이론적으로 계산한 값이 된다. 이와 같이 계산된 계산치를 응답스펙트럼기록기에 의한 관측치와 비교하면 계산치가 관측치의 약 1.5배정도 크게 나타나고 있다. 이러한 이유로서는 응답스펙트럼기록기의 응답변위를 기록하는 금속판의 마찰력으로 인하여 관측치가 적게 나타날 가능

성과 금속판에 기록된 변위의 흔적을 판독하는 과정에서 최대변위를 나타내는 횡수가 적은 관계로 흔적이 희미하게 나타나므로 실제의 길이보다 적게 판독할 가능성도 있다. 이러한 정황으로 판단할 때 계산치가 관측치를 초과할 오차의 가능성이 많으므로 진동대 실험에 의한 응답스펙트럼 기록기는 정상적으로 작동한 것으로 판단되었다.

표-3 정현파 수평가진 (한쪽 진폭)

가력 주파수 (Hz)	가력크기 ⁽¹⁾ (g)	정적감도치 ⁽²⁾ (mm/g)	계산치(mm) ⁽³⁾ (1)×(3)×등적배율	관측치 ⁽⁴⁾ (mm)	관측치에 대한 계산치의 비율 (3)÷(4)
1.0 Hz	0.0609	5.0	7.61	5.75	1.32
2.0 Hz	0.0635	5.0	7.94	5.25	1.51
4.0 Hz	0.0652	5.0	8.15	4.75	1.71
8.0 Hz	0.0645	6.5	10.48	7.0	1.50

5.2 지진파 가진

전항에서는 정현파에 의한 응답스펙트럼기록기의 특성을 검토하였으나 응답스펙트럼기록기란 실제지진파에 의한 응답스펙트럼을 기록하는 것이 목적으로 지진파로서 가장 널리 알려진 El-Centro지진파를 입력하여 응답스펙트럼기록기와 입력파형에 의한 응답스펙트럼을 비교 검토하였다. 그림-4는 수평방향으로 가력한 지진파의 입력파형에 의한 변위응답스펙트럼을 실선으로 나타내고, 응답스펙트럼기록기의 지렛대에 의한 감도값을 고려하여 지렛대가 없을 경우로 환산된 실측치를 ◆표로 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 양자는 잘 일치하고 있으며 이러한 경향은 그림-5와 같이 수직방향에 대해서도 동일하다. 이와 같이 정상적으로 입력하중을 작용할 수 있는 진동대 실험에서는, 인력으로 책상을 흔드는 것과 같은 비정상적인 입력하중에서 발생한 장주기영역에서의 과도진동이 발생하지 않았다는 사실로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

그림-4 El-Centro 지진파의 변위응답스펙트럼 (수평방향)

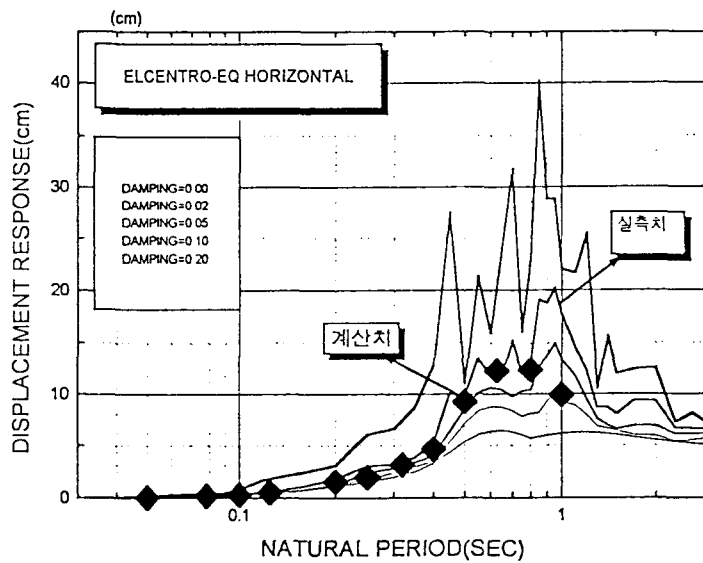
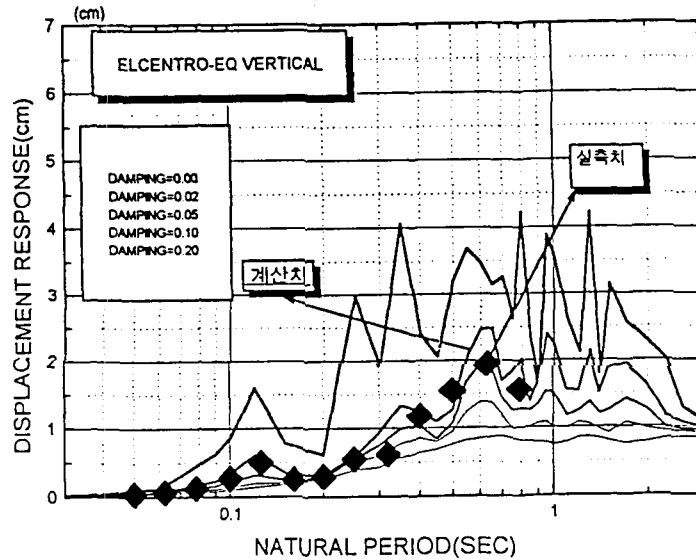


그림-5 El-Centro 지진파의 변위응답스펙트럼 (수직방향)



6. 결론

원자력발전소 지진감시설비중에서 배관상에 설치된 응답스펙트럼기록기에서 발생한 과도진동의 원인을 파악하기 위하여 실시한 계측기기 검증시험의 결과를 정리하고 해결방안을 요약하면 다음과 같다.

1. 응답스펙트럼기록기에서 계측된 저주파수영역(1.0Hz)에서 약 1.2g라는 응답가속도값이 지진에 의한 것이라고 가정하면, 근세기 지구에서 발생한 강진중의 하나인 El-Centro지진파의 약 4배가 되는 지진에너지가 구조물에 입력된 것과 유사한 물리량에 해당하며, 이러한 과도진동은 응답스펙트럼기록기의 부근에서 발생한 충격력으로 설명하지 않고서는 물리적으로 있을 수 없는 현상이다.
2. 대형진동대를 이용한 정현파 및 지진파 가진실험에 의하면, 응답스펙트럼기록기에 특별한 오동작이 없다는 사실이 입증되었다. 단 오차의 범위가 크기는 50%를 초과하고 있으므로 계측결과를 신뢰할 수 있는 범위는 넘어서고 있다고 판단된다.
3. 책상을 이용한 인력 가력시험에서 얻은 결과에 의하면 응답스펙트럼기록기에 의한 실측치가 입력파형에 의한 계산치 보다 저주파수영역에서 현격히 크게 나타나고 있으며, 이는 책상을 흔드는 과정에서 발생하는 충격력을 기계식으로 작동하는 응답스펙트럼기록기는 민감하게 반응하였으나, 디지털 방식으로 기록하는 압전형가속도계에서는 충격력을 감지하지 못한 것으로 판단된다.
4. 기계식으로 작동하는 응답스펙트럼기록기는 배관의 진동이나 작업자의 실수에 기인하는 충격력에 의해 저주파수영역에서 민감하게 반응하는 경향이 있으므로 잘 고정된 콘트리트 바닥면으로 이전할 필요가 있으며, 전자설비의 급격한 발달을 고려하면 보조적인 의미로 설치되고 있는 이러한 지진감시설비는 새로운 장비로 교체되어야 한다.

【참고문헌】

1. 울진1,2호기 지진감시설비 보안을 위한 연구 최종보고서, 한국전력공사 전력연구원, 1995.11
2. 最新建築學 シリーズ9, 最新 耐震構造解析, 柴田明德著, 森北出版株式会社
3. 地震動のスペクトル解析入門, 大崎順彦著, 鹿島出版會