

원자력 발전소 1차계통 배관 건전성 평가

이 현*, 김 연 환*

(The Verification Test for the Primary Piping System of Nuclear Power Plant)

(Hyun Lee, Yearn Hwan Kim)

1. 서 론

원자력 발전소의 안전성 보장 및 신뢰성 향상을 위하여 시운전 단계에서 원자력 발전소내 안전등급에 해당하는 배관계통의 상태 확인을 위하여 각종시험을 하도록 되어있다. 특히 새로운 설계개념, 크기 또는 용량을 갖는 원자로 모델에 대해서는 필수적으로 건전성 평가를 하게 되어있다.

이를 위해 발전소 건설기간에 시행하는 고온 기능시험 중에 원자로 주변 주요 시스템인 원자로 냉각재 루프 계통에 대한 건전성 확인을 위해 압전형 고온 가속도 센서를 이용하여 정상운전상태의 진동을 측정하여 시스템 진동거동을 규명하였다.

배관시스템의 일상운전상태는 유체의 흐름과 기기운전이 일정한 정상상태와 펌프의 기동 또는 정지 및 밸브의 급격한 개폐 등으로 발생하는 과도상태로 나눌 수 있다. 따라서 두 가지 상태의 진동을 측정해야 한다. 배관계통은 정상운전 상태로 설계수명을 유지할 수 있어야 하므로 정상진동이 최소화 되어야 한다.

진동 평가기준은 배관계통의 응력 (S/N 커브) 곡선을 참조하여 설계수명내에 손상이 일어나지 않도록 재료의 허용응력을 산정하고 이를 진동변위로 환산하여 정한 것이며 이 값에 측정 데이터를 비교하여 1차계통 배관의 건전성을 확인하였다.

2. 측정 시스템

최대진동이 예상되는 측정위치 및 방향을 Fig. 1과 같이 설정하여 31개 압전형 고온 가속도 센서를 지그를 만들어 배관에 설치하였다.

* 한국전력 기술연구원

진동측정 흐름도는 Fig.2와 같으며 녹음시 신호의 유효성을 확인하기 위해 오실로스코프와 FFT 분석기로 파형을 확인후 신호를 취득하였다.

3. 데이터 취득

정상상태 배관진동은 일반적으로 200Hz 이하 주파수 성분으로 나타나기 때문에 ASME에서는 200Hz 까지 분석하도록 명시되어 있다. 따라서 정상상태 및 과도상태의 진동을 정밀하게 분석하기 위하여 테이프 레코더의 녹음속도를 2.4cm/sec로 설정하여 주파수응답이 600Hz 까지 양호한 신호가 되도록 했다..

본시험에 사용한 테이프 레코더는 TEAC-7000 시리즈이며 가능한 채널수가 21개로, 모든 측정신호를 수용할 수 없어 A(21채널), B(20채널) 그룹으로 나누어 진동데이터를 취득하였다. 정상상태의 신호 변화 상태를 규명하기 위하여 20분간 녹음하였으며, 과도상태에 대해서는 펌프 정지, 기동전에 1분간, 그후 5분간 녹음하였다.

4. 데이터 처리 및 평가

현장에서 얻은 데이터 량이 방대하여 실험실에서 데이터 감소, 분석 및 평가를 실시하였다.

4.1 정상상태의 진동

원자로 냉각펌프가 운전하는 경우의 정상상태 데이터는 동적신호 분석기의 시간파형, 파워 스펙트럼 밀도(Power Spectrum Density), 주파수 스펙트럼의 기능을 이용하여 데이터를 처리하였다. 이때 분석 주파수 범위를 0-200Hz로 설정하여 데이터를 분석하였으나 100-200Hz 사이에는 의미있는 진동데이터가 나타나지 않아서 0-100Hz 까지 선택, 분석하였다. Line 분해능은 800line 그리고 에버리징(Averaging)은

100번하여 신호 대 잡음비 및 파워 스펙트럼 밀도에 대한 통계 신뢰도를 향상시켰으며 데이터의 손실을 최소화 하고자 Hanning 윈도우 기법을 사용하였다.

배관계통은 랜덤신호가 주류이나, 인근 회전 기기로부터 회전속도의 1배, 2배……에 해당하는 주파수 성분(deterministic frequencies)이 포함될 수 있다.

이들 주파수 성분들이 포함된 overall 진폭치를 구하기 위하여 확률론적 접근 방법을 이용한다. 주파수 분석기로 Fig. 3-(a)와 같이 PSD(Power Spectrum Density)를 얻은 후 Modal 주파수와 Deterministic 주파수로 구분하고, Deterministic 주파수는 회전속도와 동기하는 Sine 파형이므로 다음과 같이 단순히 적분하여 구한다.

$$D_{o-p} = \frac{gCA_{o-p}}{(2\pi f_c)^2} (mils) \quad (1)$$

여기서

A_{o-p} = 진폭이 피크가 되는 중심주파수에서의 가속도 진폭

f_c = 진폭치가 최대가 되는 중심주파수

g = 중력가속도 (980 cm/sec^2)

C = Inch 단위를 Mil 단위로 변환하는 변수

이다. 배관계통의 구조물특성인 Modal 주파수 경우, 각각의 Modal 주파수 대역내에 있는 모든 성분을 적분하여 면적을 구한후 변위 실효치를 다음의 방법으로 구한다.

$$\sigma = \frac{gCA_{RMS}}{(2\pi f_c)^2} (mils) \quad (2)$$

여기서

σ = Mil 단위의 변위진폭 실효치 (RMS)

A_{RMS} = g 단위 가속도 진폭 실효치 (RMS)

f_c = 진폭치가 최대가 되는 중심주파수

g = 중력가속도 (980 cm/sec^2)

C = Inch 단위를 Mil 단위로 변환하는 변수

이다. 진동의 교변용력을 평가하기 위하여 실효치의 가속도 신호를 zero-to-peak의 변위로 나타내기위해 통계학적 기법을 사용하여 검토하여야 한다.(Fig. 3-(b)) 랜덤신호는 주기적인 신호가 아니므로 정

량적으로 평가하려면 정상상태의 각 측정점에서 얻은 데이터의 확률밀도와 누적 확률분포 곡선을 구하여 진동데이터가 신뢰성을 가질 확률이 99% 이상되는 구간을 찾아야 한다.

보통 확률분포가 정규분포를 가질경우 3σ 변위를 넘는 확률은 1% 미만이다. 이를 확인하기 위해 진동데이터 분석 및 시험에 다양한 기능을 갖는 SDRC(Structural Dynamic Research Coporation)의 I-DEAS 소프트웨어를 이용하여 실측한 가속도 데이터를 시간에 대한 변위데이터로 변환시킨 후 확률밀도 및 누적확률 분포를 얻었다.

정상상태에서 측정된 진동데이터에 대한 확률분포를 구하여 그 형태가 정규분포인지를 확인하면 된다. Fig.4는 RCS Loop 계통의 진동특성에 대한 확률 분포이고 Fig.5는 이때의 시간파형을 보여주고 있다.

이들 그림으로 부터 정규분포 형태임을 알 수 있다. 따라서 예상되는 최대 변위치를 얻기 위하여 (2)식에서 구한값에 3을 곱하여 각 측정점에서의 변위치를 구하였다.

4.2. 과도상태 진동

과도상태의 진동은 지속시간이 매우 짧아 정상상태와 같이 평균화하지 않고 가속도 시간파형 신호를 이중 적분기를 통해 변위 파형신호로 바꾸어서 나타나는 최대 진폭을 읽으면 된다. 따라서 정상상태 데이터 평가시와는 달리, 시간파형 신호의 최대진폭을 포착하여 평가하였다. 이 방법은 주파수영역에서의 이중적분에 의한 방법보다 보수적이기 때문에 더 엄격한 평가기법이라고 사료된다.

5. 데이터 평가기법

CLASS I 배관계통에 대한 진동시험 자료분석은 ANSI/ASME OM-3, 1989년 판의 SECTION 5.1.1의 변위 분석방법을 (Displacement Method) 이용하여 행한다.

이 분석방법은 단순보로 모델링하는 기법으로 시험 배관계통의 배관에 대해서 적용한다. 이경우 단순보의 한쪽끝은 고정되었다고 가정하고 또 다른 끝은 계통의 상태조건에 따라 결정되며, 이에 따라 형상계수 K , 단순보의 유효길이 L 이 결정되며, 이 단순화된 작은 배관들은 1차 고유주파수에서 진동하고 있다고 가정하며, 동시에 단순보와 전체

시험 배관계통에 발생하는 최대응력이 같은 위치에서 발생한다고 가정하여, 최대 허용 변위를 산출시 이 응력을 이용한다.

허용응력은 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Fig 9.2의 곡선 "C"와 시험배관의 재질에 따라 좌우된다. 예를 들어 스테인레스강 배관의 경우, "C"의 10^{11} Cycle에서의 교번응력(Alternate Stress)은 13.6 KSI (Kib/in²)이며, 여기에 인자 1.3을 나누어 주면 10.5 KSI가 된다. 이 값이 허용응력이다. 탄소강의 배관일 경우, 곡선 "C"에서 교번응력 값이 12.5 KSI가 되며, 여기에 인자 0.8/1.3을 나누면 7.69 KSI가 된다.

CLASS 1 배관계통중에서 시험배관의 재질은 모두 스테인레스 강 배관으로서 허용응력값이 10.5 KSI이다. 여기서, 최대 허용변위 값은 다음과 같이 구한다.

$$\delta_{all} = K \frac{L^2}{D_o C_2 K_2} \frac{S_{all}}{10} \quad (3)$$

여기서

δ_{all} : 최대허용 변위값 (o-p)

K : 형상계수

L : 단순보의 유효길이

D_o : 시험배관의 외경

$C_2 K_2$: 단순보에서 발생하는 최대 굽힘 응력지수

S_{all} : 허용응력

10 : ANSI/ASME OM-3에서 직접 K값을 사용하기 위해 주어지는 상수

이다. 따라서 여러 측정위치에 대한 최대 허용변위값을 (3)식으로부터 구하여, 측정 변위값이 최대 허용변위값 이내인지를 확인하면 된다.

6. 결 론

원자력 발전소 1차 계통 냉각재 배관계통을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 정상상태 및 과도상태의 모든 진동측정치는 재료의 내구한계치 이내에 있었으며 상당히 여유치를 갖고 있다.

나. 과도상태 진동치는 펌프를 가동하는 경우 인근 배관계통이 다른

배관계통보다 2-3배 높게 나타났으나 정지하는 경우 특이하게 증가하는 경향은 없다.

다. 본 연구에서 얻은 데이터는 향후 진동데이터에 대한 베이스 라인 자료로 활용할 수 있다.

References

1. A.J.Ayoub, 1979, "Vibration of Nuclear Power Plant Primary Coolant System Piping During Normal Operation", ASME Publication
2. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Division I, ASME, NewYork 1983
3. B.E.Olsen, N.R.Singleton, and G.J.Bohn, 1973, "Determination of the Dynamic Characteristics of a Pressurizer Water Reactor Primary Loop", 2nd International Conference on Pressure Vessel Technology, San Antonio, Texas, pp.437-455
4. 한국전력공사, 1986, "배관 및 배관지지대 확인 시험 보고서", Vol.I
5. Pullman Power Products, 1956, "Design of Piping Systems", John Wiley & Sons

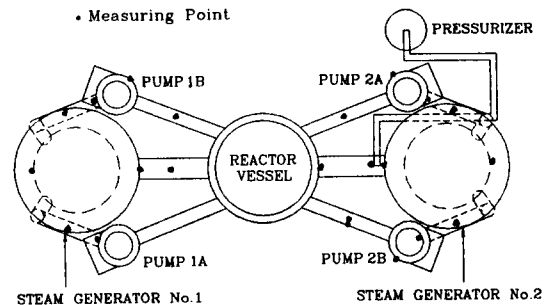


Fig.1 진동 측정 위치

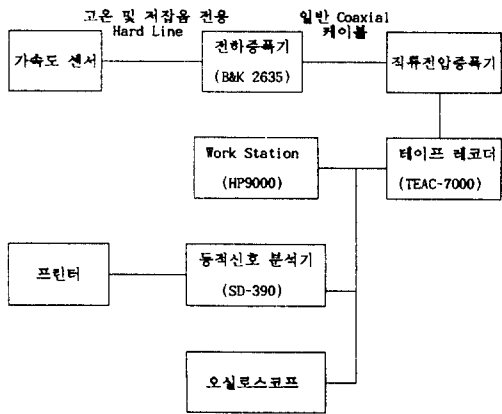


Fig. 2 진동 측정 흐름도

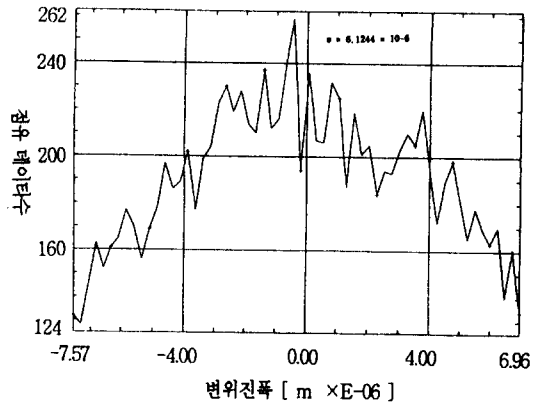


Fig. 4 RCS Loop계통 진동에 대한 확률 분포도

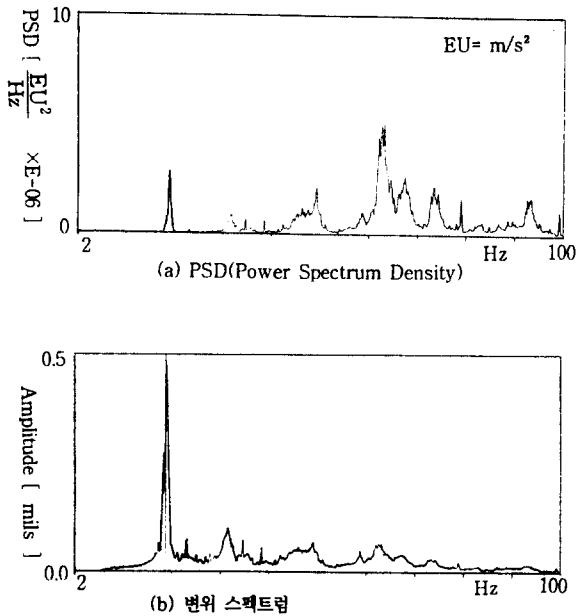


Fig. 3 측정점의 PSD 및 변위 스펙트럼

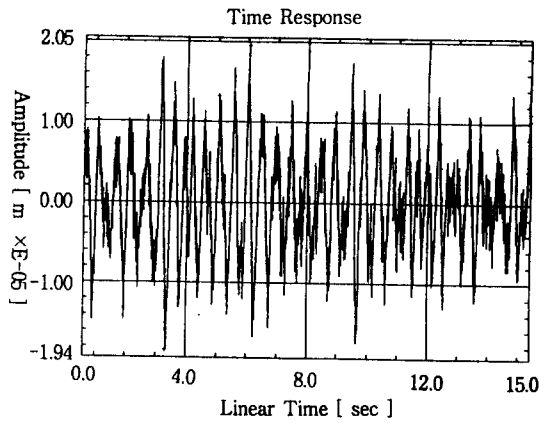


Fig. 5 RCS Loop계통의 변위시간과형 진동특성