

원전 복수계통 열교환기의 이음 원인 분석

Abnormal Sound from Heat Exchanger of Condensate Water System at Nuclear Power Plant

이 준 신* · 이 옥 룬* · 김 태 룡†
Jun-Shin Lee, Wook-Ryun Lee and Tae-Ryong Kim

(Received May 19, 2016 ; Revised June 2, 2016 ; Accepted June 2, 2016)

Key Words : Abnormal Sound(이음), Loose Part Monitoring(금속파편감시), Noise Signal Analysis(소음신호분석), Impulse Signal Analysis(충격신호분석)

ABSTRACT

Abnormal sound was heard from a heat exchanger of condensate water system in a nuclear power plant, which was identified as impact sound of a loose part later. Nuclear power plants are normally equipped with loose part monitoring system for primary water system, but not for secondary water system. The abnormal sound was analyzed by using the impact signal-processing methodology based on the Hertz theory. The predicted results for impact location and size of the loose part showed good agreement with those of the actual loose part found during the overhaul period in the plant. So, this analysis methodology for the impact signal will be widely utilized for the primary and secondary side of the nuclear power plant.

1. 서 론

원전에서는 기계적 손상 또는 부식 등에 의해 각종 기기의 부품이 이완, 이탈 또는 파손되어 금속파편 형태로 배관을 통해 돌아다닐 수가 있다. 또한, 금속파편은 정비 시에 작업자의 부주의 등에 의해 외부로부터 유입될 수도 있다. 금속파편은 그 속성상 열교환기의 세관을 겨우 통과할 정도 혹은 그보다 클 경우 열교환기 입구에 머무를 가능성이 가장 크다. 이와 같이 유동장벽에 가로막힌 금속파편은 유체의 흐름에 따라 간헐적으로 배관의 특정부위를 타격하여 이음을 발생하게 된다. 금속파편에 의한 타격은 그 에너지가 작을 경우에는 큰 문제를 야기

시키지 않지만 클 경우에는 배관계를 손상시키기 충분하다. 따라서 금속파편에 의한 기기손상 영향 평가 방법론 및 감시시스템 구축에 대한 많은 고찰 및 연구가 진행되어 왔다^(1,2).

배관계의 금속파편과 관련하여 안전을 최우선시하는 원전의 일차계통은 금속파편 감시시스템(LPMS, loose part monitoring system)을 운용하고 있으며⁽³⁻⁵⁾, 이 감시시스템을 통해 파편의 위치 및 크기 등을 판별하여 기기의 건전성을 확보하고 있다. 금속파편은 일차계통에서 많이 발생하며 이차계통의 발생빈도는 일차계통에 비해 적은 편이다. 하지만 안전계통에서 벗어나는 배관계의 경우, 특별한 감시시스템이 없을 뿐 더러 현장관계자들이 접하지 않은 현상이기 때문에 정확한 판단에 의해 조치가 이루어지기가 매우

† Corresponding Author; Member, Department of Nuclear Power Plants Eng., KEPCO International Nuclear Graduate School
E-mail : tr.kim@kings.ac.kr

* Member, KEPCO Research Institute

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

어려운 실정이다.

이 논문에서는 이차계통인 복수계통의 콘덴서 후단 스팀배출기의 열교환부에서 발생한 이음발생 현상을 통해 금속파편에 대한 평가 및 조치방법론을 기술한다. 이음 분석은 기존 일차계통 금속파편 감시시스템에 주로 사용되는 분석기법을 사용하였다. 본 예시를 통해 이차계통에서도 금속파편에 의해 이음이 발생할 수 있으며 엄밀한 분석에 의해 문제를 해결할 수 있다는 것을 보여주는 것이 논문의 목적이라 할 수 있다.

해당 배관계는 정격 출력 중에 불규칙한 이음이 발생하였으며, 이는 다른 호기에서는 감지되지 않는 이상음이기 때문에 이에 대한 정확한 원인 규명이 필요하였다. 분석결과에 따라 열교환기 내부 부품의 파손으로 인한 이음으로 판명될 경우 발전소를 정지해야 하는 실정이었다.

2. 금속파편 신호분석 이론

2.1 Hertz의 충격이론

금속파편에 의한 충격신호는 일반적으로 Fig. 1과 같은 파형을 가진다. 이때 초기 반파에 해당하는 접촉시간 t_c 는 충격물질의 질량, 크기(반경) 및 초기속도와 관계가 있으며 반파 이후 파형의 주파수 f_c 는 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$f_c = \frac{1.6}{2t_c} \tag{1}$$

여기서 1.6은 평판 충돌 시 가속도 충격신호 파형의 주파수계수이며, $1/(2t_c)$ 는 Hertz 이론상의 주파수이다.

금속파편 신호분석 이론은 Hertz의 충격이론을 기초로 충격위치 및 충격질량 평가이론으로 기술할 수

있다. 무한평판에서의 강구 충돌 시의 강구의 질량 및 에너지에 따른 접촉 시간과 변위에 관한 Hertz의 충격이론은 금속파편 신호 분석에 대한 이론적 근거가 된다. 탄성이 있는 무한 평판에 강구가 충돌할 때 평판의 최대변형 변위 D_{max} 와 접촉시간 t_c 는 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$D_{max} = k_h (m V_0^2)^{0.4} R^{-0.2} \tag{2}$$

$$t_c = \frac{2.94 D_{max}}{V_0} \tag{3}$$

$$k_h = \left[\frac{15}{16} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{0.4} \tag{4}$$

여기서, m 은 강구의 질량, V_0 는 강구의 초기 속도, R 은 강구의 반경, ν_i , E_i 는 강구(1) 및 평판(2)의 Poisson 비와 탄성계수이다.

2.2 충격위치 평가법

충격위치 평가법에는 삼각법과 원 교차법이 있다. 삼각법에 의해 충격위치를 평가하기 위해서는 적어도 3개 이상의 센서 신호가 필요하다. 충격신호의 각 센서도달 지연시간과 전파속도를 이용하여 충격위치를 추정한다. 원 교차법은 센서 신호가 2개일 때 사용하며 서로 다른 두 개의 대칭 및 비대칭 모드의 파에 대한 전파속도가 다른 점을 이용한다.

2.3 충격질량 평가법

여기에는 충격물질 접촉시간(contact time)과 질량 평가 선도(map)를 이용하는 두 가지 방법이 있다. 충격물질 접촉시간에 의한 질량평가는 충격신호의 접촉시간 충격위치에서의 유속으로부터 충격속도를 가정하여 질량을 산출한다. 질량평가선도를 이용한 평가는 신호감쇠효과를 고려하여 충격위치에서의 최대 가속도를 계산하고 충격신호의 주파수 분석으로 주 주파수(dominant frequency)를 확인한 후 질량평가 선도에서 충격질량 및 충격속도를 평가한다.

3. 복수계통 이음발생 원인규명

3.1 측정개요

Fig. 2는 복수계통 콘덴서 후단 스팀배출기의 열교환부의 개념도를 나타내고 있으며, 열교환부를 통

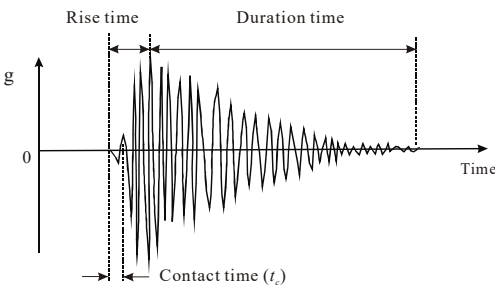


Fig. 1 Impact signal pattern

해 Table 1에 정리된 바와 같은 사양으로 해수(sea water)와 증기(steam)가 열교환을 하게 된다.

정격출력 운전 중인 한 원자력발전소의 복수기 진공 계통의 콘덴서 후단 스팀 배출기 열교환부에서는 비정상적인 이음이 발생되었다. 이는 다른 호기에서는 감지되지 않는 이상음으로 정상운전에 지장을 줄 가능성도 있으므로 이에 대한 정확한 원인 규명이 필요하였다. 분석결과에 따라 열교환기 내부 부품의 이탈로 인한 이음으로 판명될 경우 발전소를 정지해야 하는 상황일 수도 있기 때문이다.

이 검토에서는 발생 주기가 불규칙적인 이음에 대해 일정 위치에서의 진동 신호의 분석 결과를 토대로 이음의 특성이 기계적 원인에 의한 것인지 아니면 열-유체적 원인에 의한 것인지를 판단하고 그에 대한 대처방안을 마련하고자 하였다.

측정은 1회에 4지점의 가속도 신호를 동시에 측정하였으며, 측정기기는 Table 2와 같다.

총 4회의 측정을 수행하였으며, 각 측정 회별 가속도계 위치는 Fig. 3과 같다. 측정의 목적은 측정

위치별 가속도 레벨을 비교하여 이음 발생 위치와 이음의 원인이 금속파편인 경우 크기를 파악하기 위함이다. 예를 들면, 세트 1은 입구단 탱크(inlet tank)와 출구단 탱크(outlet tank)의 진동레벨을 상호 비교하기 위한 가속계의 위치 배열이다. 이때, 실험 세트 1, 2와 3과 같이 각 탱크에 대해 두 곳을 측정할 경우는 Fig. 3에서 보이듯이 탱크 경계점과 탱크 중앙부의 위치에서 측정을 행하였다. 반면, 실험세트 4에서는 입구단 탱크를 길이방향으로 4등분한 지점에서 측정을 수행하였다.

3.2 측정결과 분석 및 고찰

(1) 측정 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 각 회별 측정 위치에서의 진동 신호 시간 이력이다. 이 결과들은 시간에 따라 일정

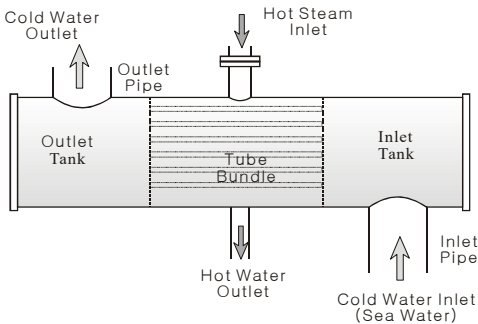


Fig. 2 Schematic view of heat exchanger

Table 1 Specification of heat exchanger

Descriptions	Sea water (cold side)	Steam (hot side)
Pressure[kg/cm ²]	33	1.1
Temperature[°C]	33.2	103
Flowrate	0.94[m ³ /sec]	0.04[kg/sec]

Table 2 Specification of measuring devices

Descriptions	Model	Manufacturer
Accelerometer	Type 4384	B&K
4Ch. FFT Analyzer	Harmonie®	01dB-stell
Software	dBFA32®	01dB-stell

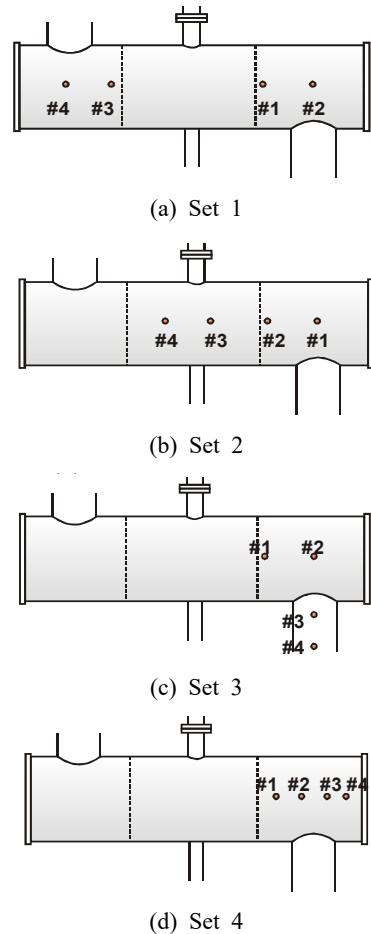


Fig. 3 Accelerometer positions for each measuring set

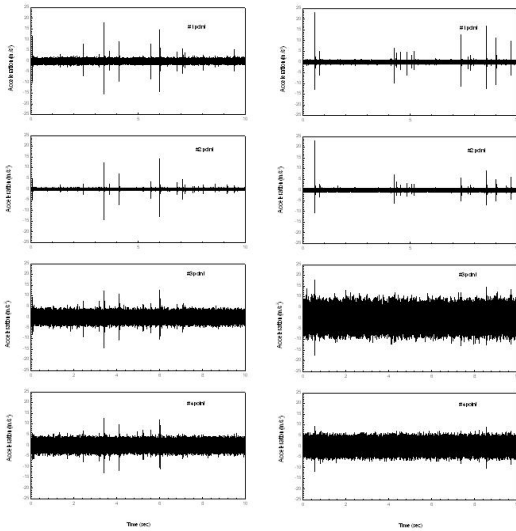


Fig. 4 Vibratory signals at measuring set 1 & set 2

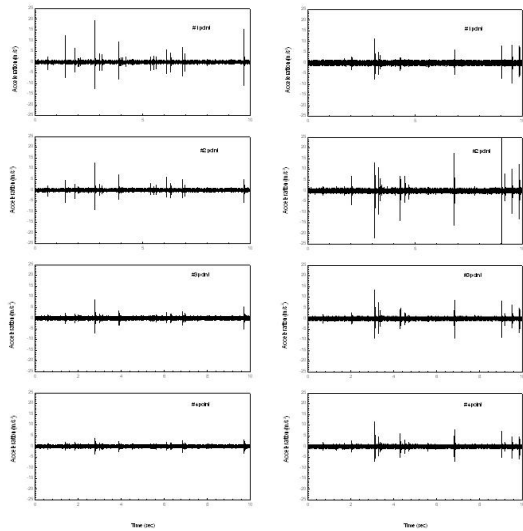


Fig. 5 Vibratory signals at measuring set 3 & set 4

한 레벨을 가지는 배경진동(background vibration)에 순간적으로 진동크기가 변하는 충격진동이 더해진 형태를 가진다. 이 충격진동들이 배관 외부로 방사하면서 이음형태의 소리를 발생하게 된다.

- 측정세트 1의 결과를 보면 입구단 탱크의 가속도 크기가 출구단 탱크보다 월등히 큰 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 열교환부 이음 유발원은 출구단 탱크 근방이 아니라는 것을 확인할 수 있다. 또한 복수(해수) 튜브로 흐르는 유동에 의해 배경진동

이 튜브 다발(tube bundle) 출구 쪽에 강하게 나타남을 알 수 있다.

- 측정세트 2의 결과는 열교환부 이음 유발원이 입구단 탱크 근방이라는 것을 확인하기 위해 열교환부 튜브다발 위치와 입구단 탱크 위치의 진동측정 결과를 비교한 것이다. 입구단으로부터 거리가 멀어질수록 가속도 레벨이 작아지는 현상으로부터 튜브다발 위치가 이음원이 아님을 확인할 수 있다.

- 측정세트 3의 결과는 입구단 탱크와 입구단 배관 (inlet pipe)에서의 가속도 레벨을 비교한 것으로 측정세트 2의 결과와 같이 입구단으로부터 거리가 멀어질수록 가속도 레벨이 작아지는 현상을 보이고 있다.

- 측정세트 1, 2 및 3의 결과를 종합하면 입구단 탱크 안에 이음원이 있음을 확인할 수 있으며, 입구단 탱크 어느 위치에서 이음이 발생하는지를 측정세트 4를 통해 알 수 있다.

- 측정세트 4의 결과에서 보면 #2 위치에서 가장 큰 가속도레벨이 나타나며, #2 위치로부터 멀리 멀어질수록 진동 크기가 점점 작아짐을 알 수 있었다. 또한, 계측을 반복수행하여도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과로부터 #2 위치에 이음원이 존재하는 것으로 판단할 수 있었다.

(2) 측정결과 고찰

이상의 측정결과 분석을 통해 측정세트 4의 #2 위치에 이음원이 존재함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 이음원 발생 기구를 다음 두 가지로 추론할 수 있다. 첫 번째는 차가운 해수가 뜨거운 스팀과 만나 기포가 생기면서 유체공동화(cavitation)가 발생하는 것이다. 하지만 복수의 압력이 기포가 발생할 정도로 압력이 낮지 않기 때문에 유체공동화 현상은 발생할 수 없을 것으로 판단된다. 만약 유체공동화 현상이 발생된다면 고온 스팀과 저온 해수가 접하는 튜브다발에서 발생할 확률이 높기 때문에 측정세트 4의 위치 #1에서 가속도 레벨이 가장 커야 하나 #2에서 레벨이 가장 큰 것이 이를 뒷받침하고 있다.

두 번째로는 열교환부 튜브보다 큰 이물질이 복수 유동에 따라 입구단 탱크를 타격하는 추론이다. Fig. 6의 유동형태 개념도에서와 같이 입구단 배관을 통과한 복수는 탱크 안에서 튜브방향으로 굴절되기 때문에 이물질이 존재한다면 측정세트 4의 위치

#2에서 입구단 탱크를 타격할 가능성이 가장 높다. 또한 입구단 탱크를 타격한 이물질은 유동 방향에 따라 튜브를 차례로 때리고 탱크 하부로 하강할 것이며, 다시 상승 유동을 만나 계속하여 탱크 상부와 튜브 다발을 가격하게 된다. 이 추론은 상당한 가능성을 가지고 있으며 실제 측정결과에서도 열교환부통을 타격하는 큰 피크와 튜브다발을 가격하는 작은 피크들이 측정결과에 나타나 있다.

(3) 배관내 이물질에 대한 안전성 검토

이 절에서는 측정결과를 토대로 콘덴서 후단 스팀 배출기의 열교환부를 타격하는 이물질이 크기 및 배관건전성을 검토하기로 한다. 먼저, 복수의 유량은 $0.94 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 18"의 입구단 배관을 통해 흐르는 유속은 약 6 m/s (19.7 ft/s)가 된다. 이 유체가 열교환부통으로 진입하게 되면 면적 팽창에 의해 6 m/s 이하의 유속을 가질 것으로 예상된다.

Fig. 7은 충격신호에 대한 측정세트 4의 위치 #2에서 계측한 진동신호를 확대한 것으로 피크가 약 3 g ($1 \text{ g} = 9.8 \text{ m/s}^2$) 정도이며, 충격 시 주파수가 약

8 kHz 정도의 값을 가짐을 계측값을 통해 확인할 수 있었다. 이 가속도 크기 및 충격주파수를 증기발생기의 충격안전성을 검토할 때 주로 사용되는 금속구의 충격신호선도에 대입하면 충격속도 및 이물질의 크기를 산출할 수 있다. 이 결과에 따르면 이물질을 금속구로 가정했을 때, 직경이 약 1.56 cm (~16 g) 정도의 구형 이물질이 충격속도 1.52 m/s 로 열교환부통을 가격하는 것으로 판단할 수 있다. 이를 충격에너지로 환산하면 다음과 같다.

$$E = mv^2/2 = 0.018 \text{ J} \tag{5}$$

일반적으로 5J 이상의 충격에너지 발생 시 증기발생기의 손상이 우려되는 것에 비교하면 열교환부의 충격에 의한 손상은 미미할 것으로 예상되었다.

(4) 배관내 이물질 검출

Fig. 8은 대상원전의 정기 예방정비 기간 중에 복수기 진공 계통에서 검출한 금속파편의 사진이다.

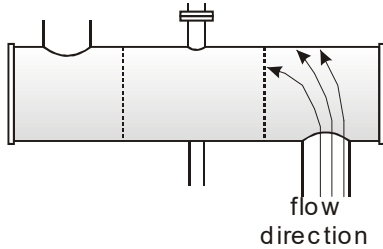


Fig. 6 Flow pattern in heat exchanger

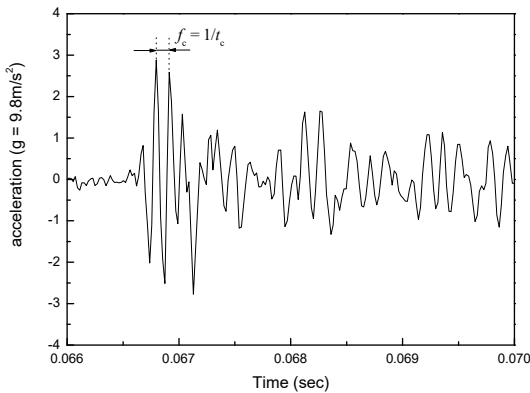


Fig. 7 Detail view for impulse signal



(a) Loose parts



(b) Inlet of tube

Fig. 8 Loose parts at the inlet of heat exchanger tube

금속파편은 2개의 파편으로 구성되어 있었으며 작은 파편은 그 크기가 작아 입구단 튜브에 삽입된 상태에서 검출되었다. 큰 파편은 예측한 바와 같이 16 g 정도의 질량을 가지고 있었으나 구형이 아닌 외경이 약 1" 정도의 ring 형태의 금속으로 나타났다. 이 금속파편이 유동에 따라 튜브 입구단을 타격하였으며, 그 결과로 Fig. 8(b)의 사진과 같이 타격부위(색이 바랜 부위)가 선명하게 보이게 되었다.

이 이물질은 복수펌프 저압측의 베어링 냉각수 공급라인의 부품으로 확인되었다. 큰 파편은 예측대로 16 g 정도의 질량을 가지고 있어 충격신호의 신호분석기법의 정확도를 확인할 수 있었다.

3. 결 론

금속파편 충격신호의 신호분석기법을 이용하여 원전 복수기 진공 계통의 이음 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 스팀 배출기로부터 발생하는 이음은 16 g 정도의 금속 이물질이 열교환부 통을 약 1.52 m/s로 타격하면서 발생하는 것으로 판단되었다.

(2) 이 타격에너지는 분석결과 손상 한계인 5J 보다 매우 작기 때문에 시스템 손상에 미치는 정도는 매우 미미할 것으로 평가되었으나, 이물질을 그대로 방치해두면 예기치 못한 문제가 발생할 수도 있기 때문에 정기예방정비 기간에 제거할 것을 권고하였다.

(3) 정기 예방정비 기간 중에 복수기 진공 계통에서 이물질을 검출하였으며, 이물질의 타격위치와 질량 등이 예측한 결과와 잘 일치하여 금속파편 충격신호의 분석기법의 정확성을 확인할 수 있었다.

References

- (1) Shi, L., Mayo, C. W. and Doster, J. M., 1999, Reactor Loose Part Activity, Progress in Nuclear Energy, Vol. 34. No. 3, pp. 283~298.
- (2) Shi, L., Mayo, C. W. and Doster, J. M., 1999, Loose Part Damage, Progress in Nuclear Energy, Vol. 34. No. 3, pp. 231~261.
- (3) Choi, Y. C., Park, J. H., Yoon, D. B and Park, K. B., 2006, Loose Part Mass Estimation Using Time-Frequency Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 872~878.
- (4) Park, J. H., 2007, Loose Part Monitoring in Reactor Coolant Pressure Boundary Using Time-Frequency Analysis Method, Journal of KSNVE, Vol. 17, No. 1, pp. 22~29.
- (5) Park, J. H., Yoon, D. B. and Shin, S. H., 2012, Integrated NSSS Integrity Monitoring, Journal of KSNVE, Vol. 22, No. 2, pp. 20~27.
- (6) Mayo, C. W., 1999, Loose Part Mass and Energy Estimation, Progress in Nuclear Energy, Vol. 34. No. 3, pp. 263~282.



Tae-Ryong Kim received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Seoul National University in 1975, the M.S. degree from KAIST in 1977, and the Ph.D. degree from University of Wisconsin - Madison in 1986. He is now a professor at KEPCO International Nuclear Graduate School (KINGS). His current fields of interest include noise and vibration, structural integrity, aging management.