

# 습분 분리 재열기 배수배관의 과도진동과 배관 건전성

°김연환\*, 김희수\*, 배용채\*, 이현\*, 이영신\*\*

## Excess Vibration Phenomena and Soundness of Drain Piping in Moisture Separator Reheat Exchanger

Yeon-Whan Kim, Hee-Soo Kim, Yong-Chae Bae, Hyun Lee, Young-Shin Lee

### Abstract

Pulsations, vibration and stress are the basic dynamic phenomena in power plant piping systems which directly affect system reliability. These phenomena are both acoustical and mechanical in nature and are closely interrelated. It was noticed that thermodynamic parameters were changed after replacing with new type tube bundles of reheat exchanger. It was reported later that the drain piping connecting the new bundle header with the associated drain tank is regularly pulsating at about every 3 second with 13.4Hz and 7.5mm, p-p in amplitude. This amplitude is about 6 times higher than reference level of sound piping. The results of finite element analysis of the pipeline showed that its dominant natural frequency is 13.4Hz. The soundness is predicted whether the bending dynamic stress evaluated exceeds the maximum allowable high cycle fatigue stress or not by the measured amplitude of vibration.

### 1. 서론

배관시스템은 발전 플랜트를 구성하는 복수기, 펌프, 터빈, 보일러를 비롯한 각종 열교환기를 연결시켜 에너지를 전달해 주는 역할을 하며 배관내부를 흐르는 매질은 물 또는 증기이다. 배관에서 발생하는 진동의 주 에너지원이 매질의 유동에 의한 경우는 유체유발진동이라고 하며 배관에서 발생하는 유체유발 진동문제의 원인은 와류, 난류유동, 플러터링, 유체 요동, 캐비테이션, 플러싱, 공명 등 다양하다. 그러한 현상은 복잡하고 불확실한 경향을 내포하고 있어 설계 시에 고려되기보다는 설비의 시운전 또는 기동 시험 시에 현장 근무자에 의하여 발견되고 시정되는 것이 일반적이다.

본 논문에서는 발전소의 계획 예방 정비 기간 중 습분 분리 재열기(moisture separator reheat exchanger)의 열효율 복구를 위하여 노후한 번들(bundle)을 교체한 후 번들 헤더에 연결된 배수배

관에서 발생한 과도한 진동의 원인 규명과 수명평가에 관하여 기술하였다. 유체유발에 의한 과도진동은 배관의 피로수명을 급격히 단축시킨다. 본 배관계는 습분분리재열기의 배수배관으로서 습분분리재열기는 화력보일러의 재열기와 같은 역할을 하여 고압터빈에서 사용된 증기를 고온고압의 증기로 재열하여 중압터빈에서 사용할 수 있는 조건을 만드는 열교환기이다. 셀측으로는 사용된 증기가 흐르고 튜브 번들 내로는 고온고압의 증기가 흘러 에너지를 전달한 후 2상의 유체상태로 번들 헤더에 모인 후 배수배관을 통하여 배수탱크로 드레인된다.

배수배관에서 발생하는 진동의 원인은 2상 유동(two phase flow)현상과 음향(acoustics)공명 현상과 연관성을 갖는다. 2상 유동현상은 물과 증기의 2상의 상태, 유로형상 및 경로에 따라서 영향을 받는 복잡한 유동현상이며 음향공명현상은 배관의 불연속지점에서의 유체의 와류현상 또는 배관의 공명과 연관된 압력요동이 주 원인이 된다.

\* 한전 전력연구원

\*\* 충남대학교

## 2. 진동허용레벨

그림 1은 과도한 진동이 발생된 열교환기의 번들 헤더에 연결된 배수배관의 레이아웃이다. 그림 1 P2 지점의 x방향으로 심한 진동이 발생되었다. 배수배관은 10"std 배관으로서 배수는 온도가 220.3°C, 압력은 23.6 bar이고 유량은 86.5 ton/hr의 2상 유동이다.

그림 1에서의 P1, P2, P3은 선택한 진동 측정 지점을 나타낸다.

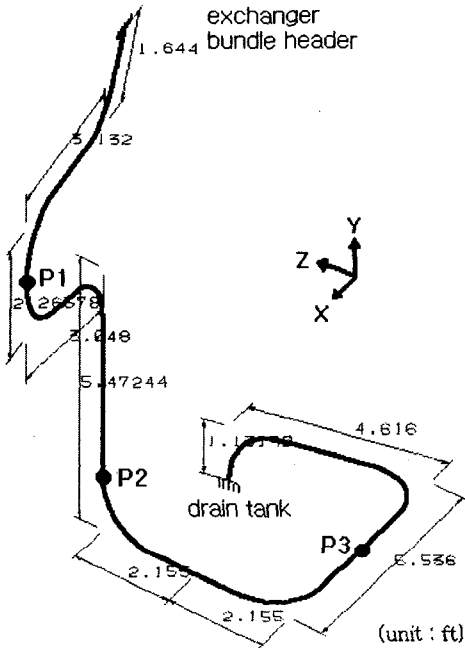


그림 1. 열교환기 번들 헤더에 연결된 배수배관

본 논문의 주요관심사는 과도진동이 발생되는 원인을 규명하고 차기 계획 예방 정비까지 불시정지 없이 유지 될 수 있는지를 판단하는 것으로서, 차기 계획예방 정비시까지 최대한 허용할 수 있는 code상 또는 재질측면의 허용치를 평가하는 데 있다.

### 2.1. 피로수명

발전소에서 운용하는 배관의 진동 평가를 위하여 허용치 산정은 ASME OM Part 3에 규정된 방법에 근거한다. 일반적으로 진동속도를 측정하여 평가하며 허용치를 산정하면 6.3cm/s o-p가 된다. 그러나 과도한 진동의 발생으로 파손의 우려가 있고 불시정지의 가능성에 대한 정확한 피로수명을 예측하기 위해서는 진동변위 기준으로 배관의 건전성을 평가한다.

그림 2는 배관에서 사용되는 저 탄소강의 피로 수명 곡선이며 식(1)은  $10^6$ 사이클 이후의 진동응력 계산식이다.

$$N = \left( \frac{10^{2.05172}}{\sigma_a} \right)^{-0.01938} \text{-----(1)}$$

여기서,  $\sigma_a$ 는 교변응력이다.

저 탄소강의 재질측면의 피로한도는 일반적으로  $10^6$ 사이클에서 86.2 MPa로 알려져 있으나 배관설계에서 사용하는 피로한도는  $10^{11}$ 사이클의 발전소 수명기간을 기준으로 68.9MPa를 적용하고 저탄소강 배관재질에 대한 수명 응력레벨로 고려한다.

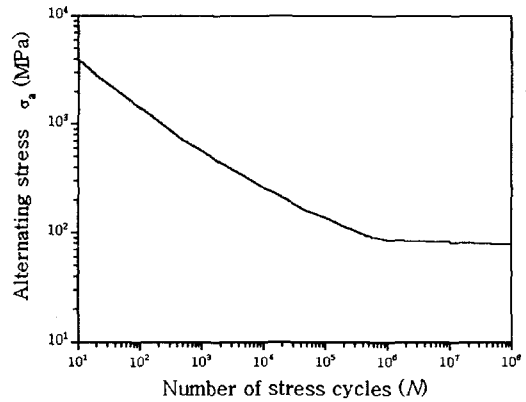


그림 2. 저탄소강 배관재질의 수명곡선

### 2.2. 진동허용 변위

다음의 식(2)는 ASME OM-Part 3 para.5.1.1.5에 근거한 진동허용변위 산정식으로서 보정계수 ( $K=0.017$ )는 그림 1, P2지점의 엘보를 Z밴드형태로 고려하여 구한다. 발전소의 수명기간의 피로응력인 68.9MPa에 해당하는 진동 허용변위는 0.98 mm, p-p으로 계산된다.

$$\delta_{allow} = \frac{S_{el} KL^2}{10000C_2K_2\alpha D_o} \text{----- (2)}$$

여기서,

- $\delta_{allow}$  : 허용진동레벨
- $S_{el}$  : 응력레벨 (psi),  $K$  : 보정계수,
- $L$  : 배관 span,  $D_o$  : 배관외경
- $C_2$  : 2차 응력지수,  $K_2$  : 국부응력지수
- $\alpha$  : 허용응력감소계수

이다.

### 3. 과도진동 현상

#### 3.1. 과도진동의 특징

저압 튜브 번들을 신형으로 교체한 후 열교환기 배수배관에 8초에 3번 정도의 주기로 과도한 요동이 그림 3과 같이 발생하였다. 표 1은 그림 1의 각 지점에서 측정된 진동레벨로서 배관의 피로수명변위 레벨을 모든 지점에서 초과하고 있으며 차기 예방정비시까지 견딜 수 있는 code상의 허용변위까지 초과한다.

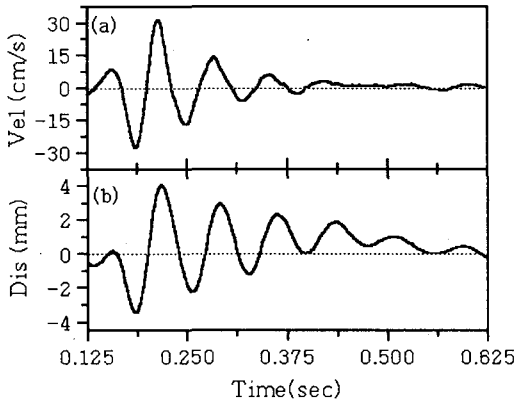


그림 3. 배수배관의 과도진동 파형

표 1. 배수배관의 진동레벨

지점	방향	속도 cm/s, o-p	변위 mm, p-p	주파수 Hz
P1	X	15.0	3.8	13.4
	Y	-	-	-
	Z	1.73	0.9	13.4
P2	X	31.64	7.5	13.4
	Y	-	-	-
	Z	15.13	3.2	13.4
P3	X	-	-	-
	Y	21.58	7.2	13.4
	Z	5.06	1.33	13.4

튜브번들이 교체된 열교환기의 배수배관에서의 최대 진동레벨은 7.5mm p-p로 P2지점에서 나타났고 배수배관 전체의 주 진동 주파수는 13.4Hz로 그림 4와 같다.

배관의 진동 응답은 배관내부의 유체유발에 의한 것으로 13.4Hz를 중심으로 밴드가 넓은 특징을 나타낸다. 이러한 경향은 배관의 고유진동응답에서 나타나는 형태와 유사한 형태이다. 반면, 튜브번들을 교체하지 않은 열교환기 배수배관의 진동은 진동허용치를 모두 만족하였고 교체된 배수배관에

나타나는 진동레벨에 비하여 1/25~1/10정도여서 그림 3과 그림4의 응답은 배관의 공진에 위한 것임을 판단할 수 있다.

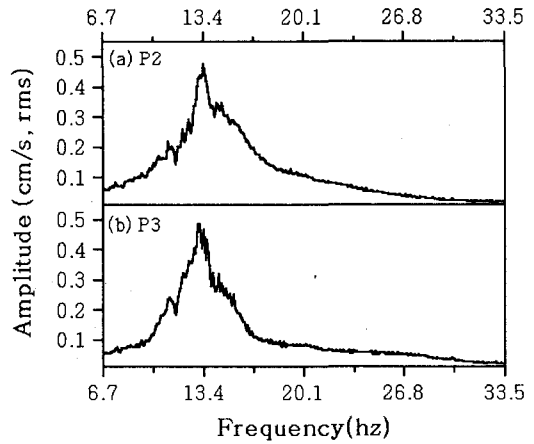


그림 4. 배수배관의 과도진동 응답특성

#### 3.2. 동압 요동과 공명특성 규명

그림 5(a)는 다른 형태의 튜브번들로 교체 후 과도 진동이 목격된 열교환기 배수배관과 연결된 배수탱크의 동압 요동 주파수특성이고 그림5(b)는 기존의 튜브번들로 운전되는 열교환기 배수배관의 유동의 동압 주파수특성으로서 양쪽에서 나타나는 압력요동 경향은 서로 유사하며 후자의 피크레벨이 전자의 요동레벨보다 크게 나타난 반면 전자는 그림 4의 진동응답주파수인 13.4Hz와 매우 가까운 13.6Hz를 나타낸다.

그림 6은 그림 5(b)의 압력요동이 나타나는 배수배관에서의 진동응답을 보여준다.

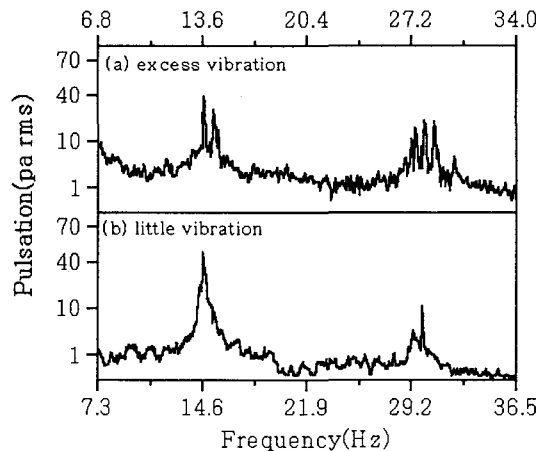


그림 5. 배수탱크의 동압 요동 특성

그림 6(a)의 진폭은 그림 5(a)가 나타나는 배수 배관의 진동응답레벨인 그림 3(a)의 1/25정도로 낮았다. 그림 6(b)의 주파수응답에는 그림 5(b)의 압력요동 주파수인 14.6Hz가 존재하고 16.4Hz의 주파수가 이와 1.8Hz 떨어져 나타난다.

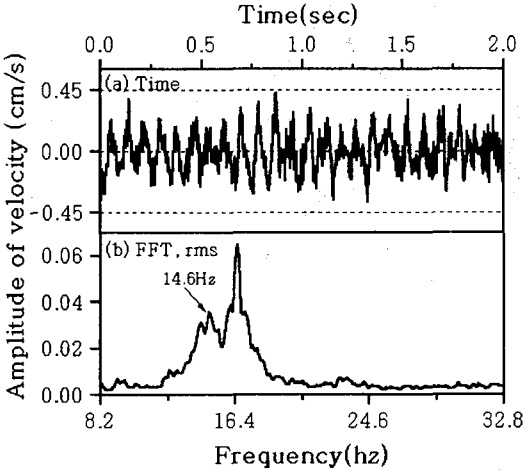


그림 6. 정상적인 배수배관의 진동응답

표 2. 열교환기 저압번들 배수배관의 재원

항목	단위	재원
배관재질		저 탄소강
외경(OD)	inch	10.75
내경(ID)	inch	10.02
두께	inch	0.37
단면적	inch <sup>2</sup>	11.91
배수온도	°C	221.4
배수압력	bar	23.93
물의 밀도	lb/ft <sup>3</sup>	52.349
증기 밀도	lb/ft <sup>3</sup>	0.744
유체 질량	lb/ft	27.45
절연재 질량	lb/ft	4.41
강의 밀도	lb/cu.inch	0.283
강의 질량	lb/ft	40.44

반면, 그림 4는 이와 대조적으로 13.6Hz만이 주된 응답결과로 나타나 번들을 교체한 열교환기의 배수배관은 내부유동의 주파수가 배관의 주 고유진동수에 접근되어 진동이 증폭된 것으로 볼 수 있다. 즉, 튜브번들을 교체함으로써 내부유동의 열역학적 특성이 변경되므로써 배관내부의 음향임피던스가 배관의 공진응답특성에 접근된 것으로 판단할 수 있다.

그림 7은 배수배관의 음향임피던스를 해석한 것이다. 표2의 물성치에 따라서 배관의 내부공간에

채워진 매질의 열역학적 특성과 배수배관의 경계 조건을 고려하면 열교환기의 번들과 배수탱크사이는 음향학적으로 open-to-open조건이 적용된다.

그림에서 원으로 표시된 지점들은 매질이 채워진 배수배관에 대하여 해석된 결과를 음향 임피던스가 가장 낮게 나타나는 주파수들이며 13.6Hz의 고조파 형태로 해석된다. 이는 그림 5(a)에서의 압력요동의 13.6 Hz, 27.2Hz와 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, 열역학적 및 유동특성의 변경으로 배관과 공진되는 것으로 판단된다.

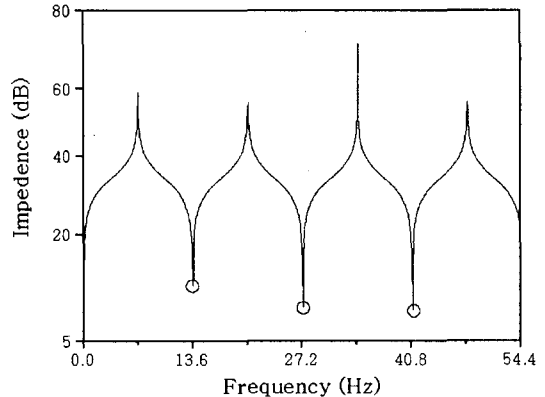


그림 7. 신형 튜브번들과 연결된 배수배관에서의 음향 임피던스 주파수특성

#### 4. 고유진동 응답특성

그림 3에서와 같이 과도진동이 단순히 동압요동 현상에 의한 강제진동이라면 그림 5(b)에서의 동압피크가 더욱 큰 것으로 평가되나 도리어 진동레벨은 1/10수준으로 나타난 것을 비추어 볼 때 음향공명과 관련된 배관의 고유진동응답특성에 영향을 준 것으로 판단할 수 있다. 따라서 그림 3 및 4의 현상이 배관 자체의 고유진동응답특성과 일치하는지를 규명할 필요가 있다.

배수배관의 고유응답특성을 규명하기 위하여 본 연구에서는 가진 실험 대신에 유한요소해석법을 적용하였다. 내부 유체의 부가질량과 배관의 기계적 물성치를 고려하였다. 그림 8은 주파수 응답 해석 결과로서 각 밴드부를  $\zeta=0.02$ , 1N의 힘으로 sine sweep 가진하여 본 응답이다.

그림 8에서 보는 바와 같이 고유진동수가 1차는 8Hz, 2차는 12Hz, 3차는 13.4Hz에 위치하고 있음을 알 수 있다. 그림 5(a)와 그림 7에서의 13.6Hz의 최저의 음향임피던스를 나타내는 공명주파수가 배관

의 고유진동응답특성인 13.4Hz와 일치하는 공진문제로 판명되었다.

그림 9는 해석으로 구한 3차 고유진동 모드로서 진동을 측정한 P2지점에서 가장 큰 진폭을 보여준다.

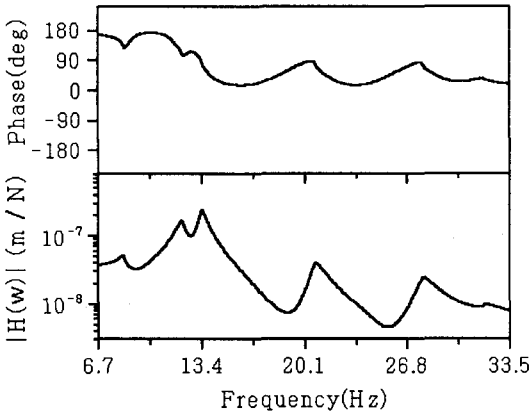


그림 8. 배수배관의 주파수응답해석 결과

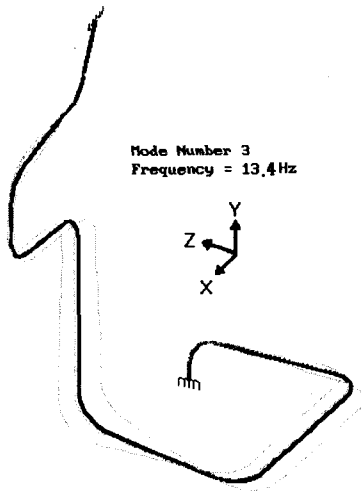


그림 9. 배수배관의 주 진동모드

### 5. 진동건전성 평가

그림 10은 배수 배관계에 적용된 교변 동응력레벨에 대한 허용진동변위이다. 굵은 실선은 식(2)의 모든 보정계수를 고려할 경우이고 작은 실선은 재질측면에서의 허용진동변위를 나타낸다. 그림 10에서 측정된 최대 진동레벨은 code상의 진동허용레벨을 초과하고 있음을 알 수 있다. 대상발전소는 기저부하를 담당하므로 계획예방정비 후 차기 계획예방 정비시까지 15개월이상 연속 운전이 가능해야 한다. 따라서 발전소를 차기 계획 예방정비기간( $5.65 \times 10^8$ 사이클 기준)까지 불시정지 없이 연속

적으로 운전 가능한 응력레벨은 최대 76.2MPa로 code상 1.09mm, p-p의 진동변위내에서 운전되는 것이 바람직하다. 보정계수를 무시한 순수한 재질측면에서는 1mm정도 여유가 있으나 배관내에 재질적 또는 설치시의 결함 등의 가능성이 있고 계통의 사고 등으로 예기치 못한 불시 정지나 재기동 등에 대하여 충분한 여유를 갖는 지 검토가 필요하다.

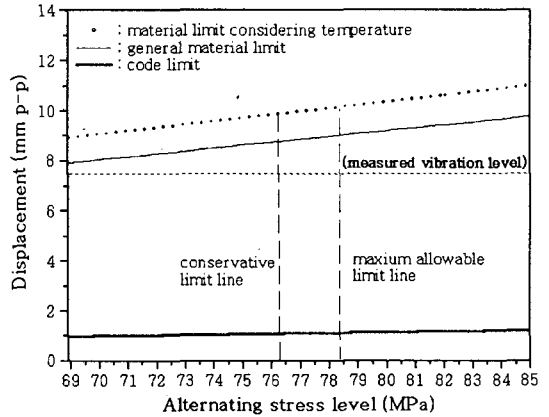


그림 10. 교변 동응력에 대한 허용변위

따라서 상용프로그램을 사용하여 유한요소 해석을 통한 동응력해석을 수행하였다. 그림 11은 측정된 진동레벨 분포와 유사하도록 시뮬레이션하여 각 부위에 나타나는 동응력을 해석한 결과이다.

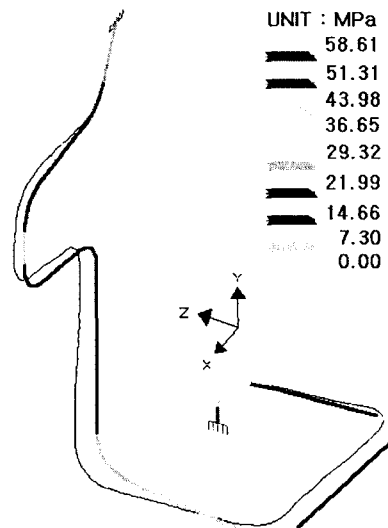


그림 11. 진동변위에 대한 동응력 분포

배수배관에 대하여 측정된 진동변위로 시뮬레

이전한 결과 배수탱크 배관 노즐 근처에서 가장 큰 힘과 모멘트가 발생되었고 반면, 최대 동응력은 튜브번들 헤다쪽 노즐부위에서 가장 큰 레벨을 보였다. 최대 응력은 58.61MPa로 해석되었다. 이 수치에 식(2)의 응력 감소계수  $\alpha$ 를 보정하면 배관에서 예상되는 최대 동응력 레벨은 76.19MPa로 code 상의 허용레벨을 만족한다. 배관의 최대변위 4.0 mm, o-p에 대한 최대 동응력레벨은 40년 기준의 54.8MPa보다는 크나 차기 계획예방정비 기준의 응력레벨인 76.2MPa를 만족하였고 그림 3의 특성이 8초에 3번 정도의 주기로 발생되므로 그것을 근거로 산정할 경우의 응력레벨을 기준으로 볼때 본 배관은 차기 계획예방정비 시기까지 건전성을 유지 할 수 있다.

## 6. 결론

열교환기의 열교환 성능을 향상시키기 위하여 튜브번들을 교체한 후 배수배관에서 발생된 과도 진동 현상은 내부 유체의 열역학적 요인에 의하여 배관내부의 공명특성 변화에 의하여 발생된 현상으로 규명되었다.

내부 유체의 요동특성이 배관의 고유진동수와 매우 근접하므로 차기 계획예방 정비시까지 사고 없이 본 시스템을 유지 여부를 탄소강의 피로수명 곡선을 활용하여 유한요소해석을 수행한 결과, 본 배관계는 건전성을 유지할 것으로 평가되었다.

## 참고문헌

- (1) Yeon-Whan Kim, 1997, "Dynamic Characteristics Study on Vibration of Main Steam Piping for a Power plant", Asia-Pacific Vibration Conference '97, pp687-692
- (2) R. J. Gibert et. al., 1978, "Flow-Induced Vibrations of Piping System (Vibration Sources Mechanical Response of the Pipes), B.N.E.S. Vibrations Nuclear Plant, pp 617~623.
- (3) R. D. Blevins, 1990, Flow-Induced Vibrations, Van Nostrand Reinhold Company
- (4) L. E. Kinsler, 1982, "Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons.
- (5) 김연환, 1995, "원자력발전소 1차 계통 배관 건전성 평가", 한국소음진동학회춘계학술대회 '95, pp 318-321

- (6) 전력연구원, 1996, "발전소배관과도진동연구 최종보고서".
- (7) 김연환, 1996, "발전소의 대형 주증기관의 진동 특성", 한국소음진동학회논문집 제6권 제6호.
- (8) 전력연구원, 1998, "발전소 소음제어 기술 개발 최종보고서".
- (9) 전력연구원, 2000, "고리 2호기 습분분리재열기 배수관 안전성 검토의 최종보고서".