

# 발전소 대형 수배관계의 충격성 이상 과도진동의 특성 고찰 사례 Examination on Shock Vibration of Feed-Water Recirculation piping in Power Site

김연환†, 양경현, 배시연, 조종현

Yeon-Whan Kim, Gyeong-Hyeon Yang, Si-Yeon Bae, Jae-Myeong Yu, Jong-Hyeon Jo

Key Words : Feed-water recirculation piping(급수재순환배관), Isolation valve(절연밸브), Steam(스팀), Leakage(누수), Non-periodic shock pulsation (충격성 맥동), Natural response (고유응답), Resonance avoidance(공진회피)

## ABSTRACT

Leak problem with large pressure drop occurs non-periodic shock pulsation due to the deterioration of an isolation valve in feed-water recirculation piping system. This paper discusses on the shock vibration and noise occurred due to the effect of acoustical shock pulsations by degradation of the isolation valve in a power site.

## 1. 서 론

배관을 흐르는 유체유동은 배관진동을 유발하고 유지케 하는 에너지원이다. 주변기로부터의 전달력에 의한 강제진동뿐 아니라 유동 유체의 광대역 요동이 배관의 내부음장을 기진하는 음향 공명 맥동압과 엘보, 밸브, 헤더 등의 불연속 지점에서 발생하는 와류(vertex shedding)는 배관의 유체 유발 진동원이다. 발전소의 수배관계의 재순환계통은 발전소 기동 모드에서 급수펌프 후단 배관계에서 전단배관계의 탈기 탱크 또는 복수기로 회수하며 정상 운전모드에서는 절연밸브를 통하여 유동을 차단한다. 유체배관계의 진동은 배관계 내부를 흐르면서 발생하는 난류 및 와류와 뿐 아니라 수격과 같이 비주기적인 충격성 변동력이 가진력으로 작동할 수 있다.

본 논문은 발전소의 기동모드에서 급수 배관계에서 복수기로 재순환하여 급수의 질을 조절하며 발전소 정상운전 중 급수의 재순환을 절연밸브(isolation valve)가 차단하나 발전소 정상 운전 중 절연밸브가 손상되어 후단배관에서 충격성 음향진동이 발생하여 그 특성을 고찰하고 및 대책에 관한 것이다.

## 2. 재순환 배관계의 충격성 음향소음 현상

### 2.1 재순환 배관의 구조 검토

복수기는 랭킨사이클에서 저압터빈의 출구측에 위치하는 설비로써 700mmHg 이상의 진공도를 만들어 효율을 극대화하는 역할을 한다. Fig 1은 급수계통(Feed-Water system)에서 복수기(Condenser)로 재순환시키는 배관계의 레이아웃이다. 급수 재순환 배관계의 절연밸브 전·후단 배관은 16" sch120이고 재질은 A106 Gr B 으로서 밸브의 후단 측에는 오리피스가 위치한다.

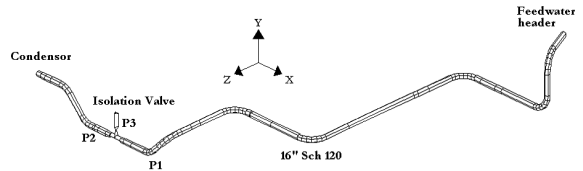


Fig 1. Layout of feed-water recirculation piping system with isolation valve of globe type

Fig 2의 절연밸브는 발전소 계통 병입 조건에서는 유동을 차단하는 글로브형 밸브이며 밸브에서 복수기쪽은 유동이 없는 일정 진공도를 갖는 상태이며 급수쪽 배관은 압력 134.6kg/cm<sup>2</sup>, 온도 225℃인 재순환 급수로 채워져 있다.

어느 시점부터 갑작스럽게 밸브의 트림부 또는 시트부의 밀착력이 저하되어 높은 차압 조건에서 누수 되면서 복수기 측 배관에서 Fig 3과 같이 충격성 음향진동 현상이 특히 수직방향에서 높게 발생하였다.

† 교신저자; 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : ywkim@kepri.re.kr  
Tel : (042) 865-7556, Fax : (042) 865-7501



Fig 2. View of feed-water recirculation piping isolation valve

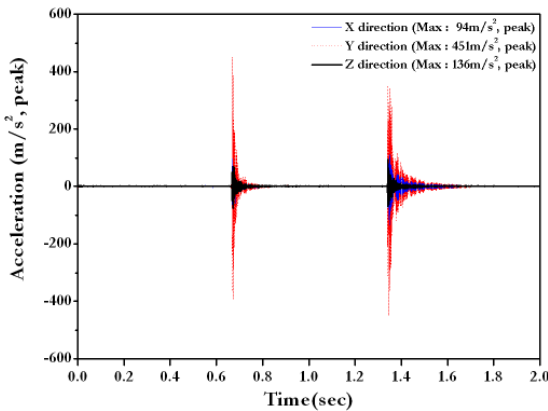


Fig 3. Waves of acceleration shock vibration of piping system

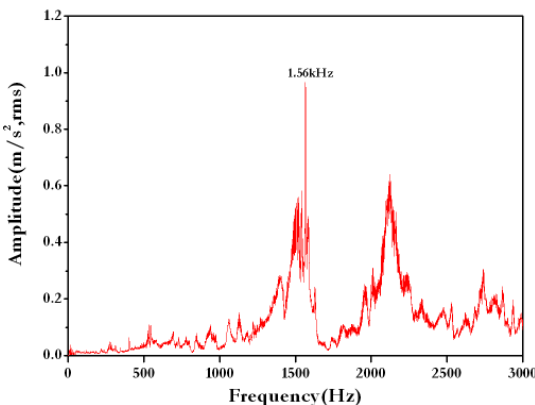


Fig 4. Spectrum of acceleration shock vibration of piping system

진동센서를 사용하여 Fig1의 배관의 충격성 진동은

$>450\text{m/s}^2$ , peak으로써 반복하는 충격성 소음과 같이 절연밸브 후단배관에서 강하게 발생하였다. 충격성 가속도 진동의 주성분은 Fig4와 같이 1.56kHz 피크 성분이 발생하였고 소음 스펙트럼에서도 1.50kHz 소음과 함께 1.56kHz 성분 소음이 나타나며 평균소음도는 86dB이었다.

## 2.2 배관계의 진동 건전성 평가

충격성 음향진동의 배관속도 최대값은 Fig 5와 같이  $\sim 44.5\text{mm/s}$ , peak으로써 ASME OM-part 3 코드의 "5.1.2"항에 근거한 진동속도의 허용치 ( $<80\text{mm/s}$ , peak)를 만족하였다.

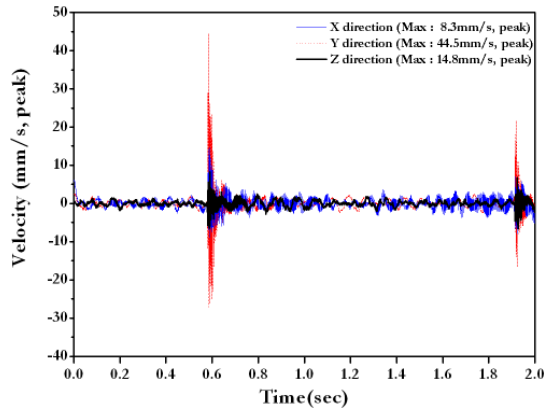


Fig 5. Plots of velocity vibration spectrums of piping system supplying condensate water

## 3. 배관계의 충격성 고진동의 메커니즘

### 3.1 충격성 가진원에 대한 현상적 검토

배관내의 음향모드와 배관구조를 가진하는 대표적인 가진원인 난류와 와류 등과 다르게 충격성 햄머링이 고주파수 진동의 가진 원으로 작동하였다. 복수기측인 밸브후단의 오리피스끝단은 진공상태이며 차압에 의하여 매우 빠른 유동이 형성되고 높은 차압으로 증기 상태로 부피가 증폭되는 플래싱 현상과 다시 물로 바뀌는 과정 속에서 증기와 물이 공존하며 증기가 국부적으로 깨어지면서 배관을 가격하는 현상으로 배관에서는 고주파의 충격성 음향진동이 발생되어 배관구조를 통하여 진동과 함께 전파되며 방사하는 특성을 보인다.

### 3.2 배관내의 충격성 압력 맥동 분석

복수기측 배관내에서 Fig 1의 차단 밸브 후단배관에서 충격성 맥동압을 시험하였다. Fig 6은 차단밸브 후단배관에서 충격성 맥동인 비주기 피크압을 시험한 맥동 파형이다, Fig 7은 Fig 6의 맥동 피크파의 스펙트럼으로써  $<500\text{Hz}$  영역과 별개로 1.50kHz  $\sim 1.9\text{kHz}$  및 3.2kHz  $\sim 3.5\text{kHz}$ 에서 에너지가 강한 피크들이 집중된 영역이다.

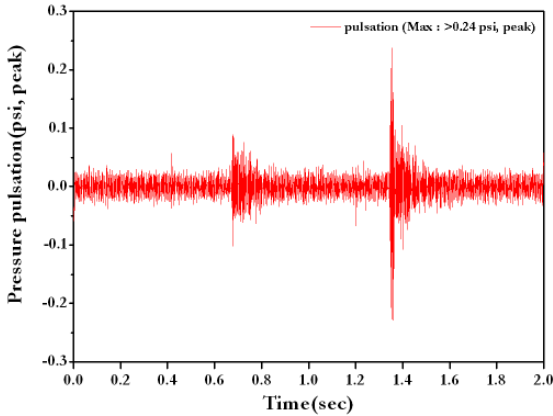


Fig 6. Plots of pressure pulsation waves obtained by pressure sensor

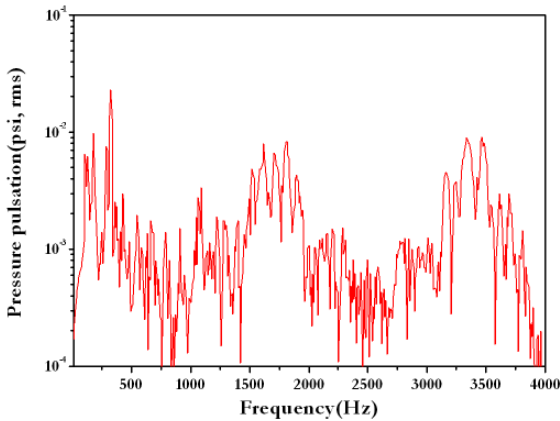


Fig 7. Plots of pressure pulsation spectrums obtained by pressure sensor

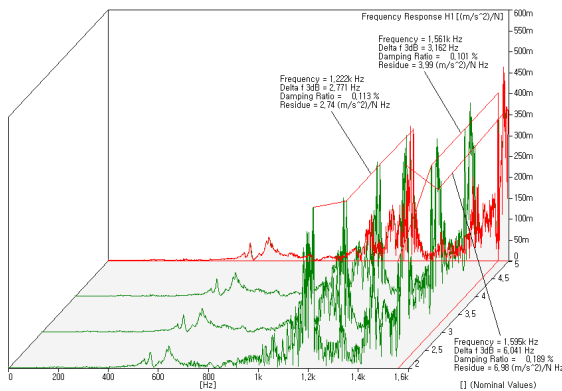


Fig 8. Natural frequency response spectrum obtained through impulse hammer test on feed-water recirculation downstream pipe of isolation valve

고주파수영역은 내부의 음향모드들 중 고차모드들이 충격

력에 대한 응답 특성으로서 배관의 내부음장이 가진된 것으로 분석된다. 특히, Fig 8과 같이 절연밸브의 후단배관의 수직방향 고유진동응답 스펙트럼에서 Fig4의 진동가속도 스펙트럼의 주피크성분과 일치하는 1.56kHz의 고유진동주파수가 수직방향에서 나타나 Fig 7의 1.50kHz ~1.9kHz의 강한 맥동에너지 피크들에 의하여 증폭하는 배관의 고유진동특성으로서 1.56kHz가 맥동피크가 된다.

#### 4. 절연밸브의 누수 원인 규명 시험 및 대책

##### 4.1 손상 절연밸브의 충격성 진동응답

Fig 9는 충격성 진동이 발생할 때의 손상이 발생한 절연밸브 스템에 대한 진동 스펙트럼으로써 누수로 유동 방향(X방향)과 함께 수직방향(Y방향)에서 405.5Hz의 피크 성분이 발생한 반면 누수가 없는 밸브 시스템에서는 수직방향에서만 나타나 밸브의 스템이 일상 절연조건에서 상하로 흔들리는 상태로 나타난다.

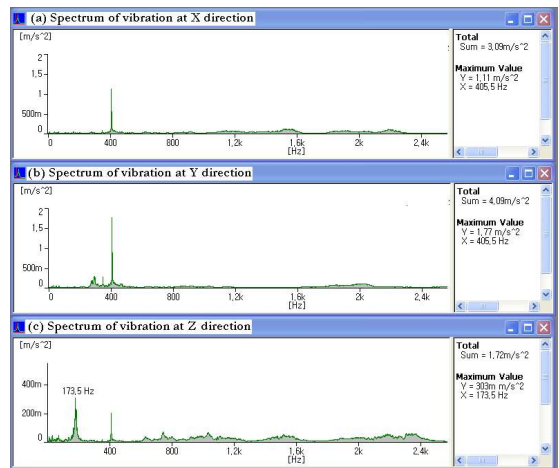


Fig 9. Shock acceleration spectrum of the valve stem

##### 4.2 손상 절연밸브의 고유진동수 응답

Table1 및 Fig 10은 스템의 수직방향에 대한 고유진동수 응답 스펙트럼으로써 Fig 9의 405.5Hz와 공진영역에 위치하는 401.5Hz의 고유진동주파수가 분석된다.

Table 1. Natural frequency response for steam system of damaged isolation valve

| 단위            | 고유진동응답 |       |       |
|---------------|--------|-------|-------|
|               | 1차     | 2차    | 3차    |
| Damping ratio | 1.05%  | 2.44% | 1.69% |
| 주파수 (Hz)      | 401.5  | 645.0 | 1.51k |

즉 절연밸브의 누수는 401.5Hz에서 수직방향으로 스템 고유진동수가 존재하며 Fig 9의 응답 주파수인 405.5Hz(또는 가진원)과 4Hz이내로 접근하여 절연밸브는 차단된 조건에서도 심한 상하운동을 반복하면서 차단력을 상실한 것이다.

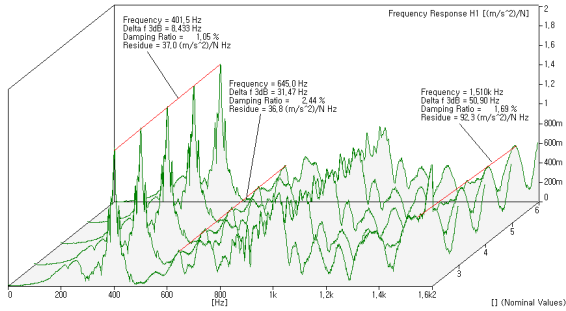


Fig 10. Frequency response spectrums for steam system of damaged isolation valve through impulse hammer test

### 4.3 절연밸브의 손상회피 대책

Table 2와 Fig 11은 절연밸브 스템에 질량을 추가하는 대책에 따른 스템의 보완된 고유진동수를 시험한 결과이다.

Fig 12(a)은 손상된 절연밸브의 스템의 모습으로서 Fig 12(b)의 질량이 추가된 클램프로 변경함으로써 밸브 스템의 고유진동수는 기존보다 14Hz이상 변경하는 효과를 얻어 405.5Hz의 가진원과 충분한 이격효과를 나타낸다.

Table 2. Natural frequency response for mass added clamp steam system of isolation valve

| 단위            | 고유진동응답 |       |       |
|---------------|--------|-------|-------|
|               | 1차     | 2차    | 3차    |
| Damping ratio | 3.94%  | 1.07% | 1.26% |
| 주파수 (Hz)      | 387.0  | 731.5 | 1.56k |

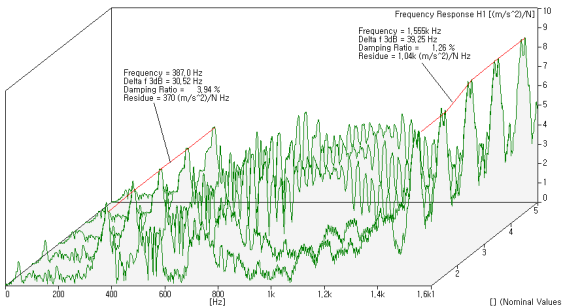


Fig 11. Frequency response spectrums for Mass added steam system of isolation valve through impulse hammer test



(a) Clamp of damaged steam



(b) Mass added clamp of modified steam

Fig 12. Views of resonance avoidance measures for damaged isolation valve

## 5. 결 론

본 논문은 발전소 정상 운전 중 급수의 재순환을 차단하는 절연밸브(isolation valve)가 손상되어 후단배관에서 충격성 음향진동이 발생하여 충격성 음향진동의 메커니즘에 관한 규명 및 대책 사례이다.

- 손상된 절연밸브는 스템이 밀착치 못하여 재순환 급수가 글로브밸브에서 차압에 의하여 증기로 변환 상태로 오리피스통을 통하여 복수기 측으로 진행되는 액화 과정에서 증기가 깨지면서 비주기적으로 배관을 가열함으로써 최대 진동 가속도는  $451\text{m/s}^2$ , peak으로 정상조건 보다 높은 충격성 진동이 발생한다..

- 최대 진동은 수직방향에서 발생하였으며 진동의 주성분은  $1.50\text{kHz}\sim 1.60\text{kHz}$ 에서 피크 성분으로서 충격성 소음 및 진동은 증기가 깨어질 때  $1.45\text{kHz}\sim 1.95\text{kHz}$ 에서 강한 충격력이 발생하며 절연밸브 배관계의  $1.50\text{kHz}\sim 1.60\text{kHz}$  영역의 고유진동수를 강화시켜 충격성 진동 및 소음으로 나타난다.

- 손상 절연밸브의 누수는 밸브 스템의 밀착 차단 성능이 약화됨으로써 발생한 것으로 스템의 401.5Hz 수직방향 고유진동모드가 405.5Hz의 가진원에 의하여 연성되어 시간이 지나면서 반복되는 진동으로 고장이 진행되어 스템의 공진을 회피하고자 클램프의 질량을 추가하는 대책이 효과적이다.

### 참고문헌

- (1) W. W. von Nimitz, 1975, "Low Frequency Vibrations at Centrifugal Plants", Proceedings of the Fourth Turbomachinery Symposium, Turbomachinery Laboratory, Texas A & M University, College Station, Texas, pp. 47-54.
- (2) 황철호, 박종범, 2005, "유동가진 공명기 내부의 음압제어" 한국소음진동공학회 추계학술대회논문지, pp.196 ~ 197.
- (3) M. P. Paidoussis, 1987, "Flow-Induced Instabilities of Cylindrical Structures", Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 40, pp. 163-174.