

고압급수가열기 배수계통 배관계 고진동 해소방안 연구

Vibration Reducing Method for High Pressure Feedwater Heater Drain Piping System

이옥륜[†] · 이준신* · 김상복** · 홍순범** · 신용우**

Wook-Ryun Lee, Jun-Shin Lee, Sang_Bok Kim, Soon_Bup Hong and Yong-Woo Shin

Key Words : 고압급수가열기(High pressure feedwater heater), 허용진동속도(Allowable velocity), 공진(Resonance), 진동속도(Vibration velocity)

ABSTRACT

The 120 meters high pressure feedwater heater drain piping in nuclear power plant had been suffered by excessive vibration from the beginning of power generation. As time goes by, the piping vibration was beyond the allowable limit and an appropriate countermeasure was required to prevent the fatigue failure of the pipeline from the abnormal vibration. In this study, the vibrational characteristics of high pressure feedwater heater drain piping and the countermeasure for abnormal vibration were investigated. Among the several vibration reduction methods, the piping layout changed by making the smooth pipeline was applied to the high pressure feedwater heater drain piping in nuclear power plant. Applying the countermeasure, the vibration level was found to reduce over 54 percents and was satisfied under the allowable velocity at the full-power operation condition.

1. 서 론

배관계통의 건전성을 저해하는 여러 가지 요인 중에 배관 내/외부에서 발생하는 진동에 기인된 요인이 많은 부분을 차지한다. 배관내의 유동은 배관의 굴곡부, 밸브 및 오리피스 등에 의한 유동 불안정과 펌프와 같은 회전기계에 의한 맥동 발생 등에 의해 매우 복잡하다. 이러한 유동은 배관 자체는 물론 배관 지지 구조물 및 기계장치를 가진하여 과다진동을 유발시키는 원인이 된다. 이러한 과다진동들은 배관재료의 피로 및 균열발생을 촉진시키며 내부결함 성장을 가속화시켜 결과적으로 배관을 파손시킬 수도 있으며, 충격력을 유발하여 배관을 순간적으로 과단에 이르게도 한다. 또한 심한 소음을 유발시킴으로써 근무자와 발전소 주변 환경에 지대한 영향을 끼치게 된다. 따라서 유동과 결부된 진동 저감은 매우 중요한 기술이며 발생기구, 전달과정 및 제

어 방법들은 원자력발전소의 안전운전을 위해 반드시 확보해야할 기술이다. 따라서 본 연구를 통해 기존의 진동저감 기술들을 충분히 응용하여 원자력발전소에 적합한 배관 진동저감 기술을 개발하고 그 결과를 현장에 적용하고자 한다.

배관의 진동저감을 이루기 위해서는 2가지 방법을 생각할 수 있다. 첫 번째는 배관의 동특성을 변경하여 진동을 저감하는 방법이며, 두 번째는 배관을 가진하는 힘 자체를 줄이는 방법이다. 첫 번째 방법은 배관에 지지장치 등을 부착시켜 진동을 억제/흡수하는 것으로서 이제까지의 배관 진동저감은 대부분 이 방법을 사용하여 이루어졌다. 두 번째 방법은 배관의 형상을 부드럽게 변경하여 유동에 의해 발생하는 배관의 반력을 최소화함으로써 궁극적으로 배관의 진동을 저감시키는 것이다. 이와 같은 배관형상 변경방법은 배관의 가진력 자체를 줄이는 방법이기 때문에 배관계 전체의 진동 레벨이 저감되는 장점이 있으며, 고가의 배관지지장치를 줄일 수 있어 매우 경제적이라 할 수 있다. 반면, 형상변경에 의한 배관의 진동저감정도를 예측하기 위해서는 배관내의 파동장(wave field)과 배관의 진동장(vibration field)을 동시에 고려해야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 두 장(field)을 동시에 해석할 수 있는 방법론을 개발하여 배관계의 형상변경에 따른 진동저감 정도를 정확히 예측할 수 있게 되었다.

본 연구는 원자력발전소 배관건전성 확보를 위한 기술개

† 한국전력연구원 원자력발전연구소
E-mail : maerong@kepri.re.kr
Tel : (042) 865-5663, Fax : (042) 865-5604

* 한국전력연구원 원자력발전연구소

** 한국수력원자력주식회사

발의 한 일환으로 진행된 것으로서 유체유발진동과 관련된 기술에 관한 것이다. 기술적용 대상은 12" 배관인 원자력 터빈 고압급수가열기(HP Heater) 배수배관으로서 1개 라인 길이가 약 120m정도 되며, 고압급수가열기로부터 나와서 탈기기(Deaerator)로 들어가는 것이다. 배관에는 오리피스와 각종 밸브, 지지물 및 밴드 등으로 구성된 복잡한 구조로써 발전 초기부터 이상거동이 지속적으로 발생되고 있었다. 또한 이 이상거동으로 인한 배관계에 위치한 각종 밸브들의 건전성에도 영향을 끼치고 있는 실정이었다. 따라서 발전소에서는 해결방안으로 배관의 지지물을 통한 진동저감 대책을 고려하였으나, 지지물의 건전성 평가 및 지속적인 점검을 통한 관리가 필요하고, 지지물의 피로누적이 심화될 경우 발전소 운전 및 안전성에 영향을 미칠 우려가 있어 근본적인 대책수립이 요망되는 실정이었다. 본 연구개발에서는 배관계 진동저감 기술 확보는 물론 발전소의 장기 현안문제로 대두되어 있는 고압급수가열기 배수계통 배관 이상거동의 원인을 명확히 하고 해결책을 제시 적용함으로써 발전소 운전성 향상에 이바지 하는데 있다.

2. 고압급수가열기 배수계통 배관의 진동저감

배관의 진동저감을 위해서는 일반적으로 해당배관의 진동건전성을 평가하여 지감목표량을 설정하고 그 목표량에 적절한 진동저감 대책을 세우게 된다. 이와 같은 절차에 따라 본장에서는 고압급수가열기 배수계통 배관에 대한 건전성평가 후 진동저감 목표량을 설정하고 진동저감대책 수립하여 그 내용을 현장에 적용하는 순으로 연구내용을 기술하기로 한다.

관련 원자력발전소는 그림 1과 같이 고압급수가열기(HP Heater)에서 탈기기(Deaerator)로 가는 배관을 나타낸다. 이 배관은 통상 A,B의 2개 라인으로 구성되며, 5A Heater, 5B Heater에서 발생하는 수분을 탈기기로 배수하여 재공급한다.

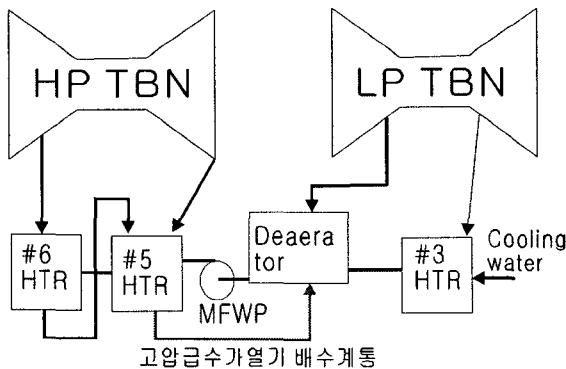


그림 1. 해당 발전소 관련계통 개략도

2.1 배관 건전성 평가

배관계통의 진동허용기준은 ASME OM-S/G-1997 Part 3인 “원자력발전소 배관계통의 가동전 및 초기 시운전 진동 시험에 관한 기준”을 따른다. 이 기준에 따르면 고압급수가열기 배수계통 배관은 VMG (Vibration Monitoring Group) 2의 ASME/ANSI B31 배관에 해당되며 건전성 평가 기준은 정상상태(Steady-state)의 허용진동변위 (Allowable deflection limit) 또는 허용진동속도(Allowable peak velocity)로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 해당 배관의 건전성 평가 기준으로 허용진동속도를 선정하였다. 전체 배관은 12" seamless pipe(SCH. STD)이고, 배관의 재질은 ASTM-A106-GR.B로 구성되어 있다.

진동평가를 위하여 배관을 따라 여러 점에서 진동속도를 측정하고 그 중 최대진동속도를 구했다. 진동은 가속도계(B&K 4384)를 사용하여 x-, y-, z-방향에 대해 측정하였으며, 이를 진동증폭기(B&K NEXUS amplifier)에서 한번 적분하여 진동속도를 얻었다. 동적신호분석기(B&K Pulse)를 사용하여 진동신호에 대한 주파수분석 및 충격응답 특성 등의 진동분석을 수행하였다. ASME OM-S/G-1997 Part 3 기준에 따르면 배관계통의 건전성을 유지하기 위해서는 측정된 최대 진동속도가 다음 식으로 계산되는 허용진동속도보다 작아야 한다.

$$V_{allowable} = \frac{C_1 C_4}{C_2 C_3} \frac{3.64 \times 10^{-3} S_a}{C_2 K_2 \alpha} \quad (inch/sec : 0-p) \quad (1)$$

여기서, 식 (1)의 각 변수에 해당하는 고압급수가열기 배수계통 배관의 값들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 탈기기(Deaerator) 부근에 위치한 valve 부위를 제외하고 모두 straight beam이기 때문에 valve 부위를 제외하면 C_1 은 1.0의 값을 가진다. Valve 부위는 보수적으로 중량비가 5배 정도로 하면 C_1 은 0.26정도의 값을 가진다.
- ASME B31인 경우 $C_2 K_2$ 는 응력집중계수 $2i$ 로 다음 표와 같은 값을 갖는다.

표 1. 고압급수가열기 배수계통 배관 응력집중계수 계산치

D_0	t	r	R	$h = \frac{tR}{r^2}$	$2i = \frac{1.8}{h^{2/3}}$
12"	0.375"	5.8125"	18"	0.80	2.09

- $C_3 = (1.0 + \frac{W_f}{W} + \frac{W_{ins}}{W})^{1/2} = 1.42$ 를 갖는다.
- 여러 부분에서 곡관이 나타나므로 C_4 는 equal leg Z-band의 값인 0.74를 사용하기로 한다.
- 대부분 공진주파수로 진동하고 있으나 여유를 보수적으로

주기 위해 C_5 는 2.0의 값을 사용하기로 한다 .

- ASME BPV Code, SectionIII Fig.1-9.2.2에 의거하여 가장 보수적인 S_A 는 13,600 psi 이며, $S_{el} = 0.8 S_A = 10,880\text{psi}$ 가 된다.

- ASME BPV Code, SectionIII Fig.1-9.2.2에 의거하여 α 는 1.0의 값을 갖는다.

식 (1)에 해당하는 계수들을 대입하면 허용진동속도는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$V_{allowable} = \frac{C_1(C_4 = 0.74)}{(C_3 = 1.42)(C_5 = 2)} \cdot \frac{3.64 \times 10^{-3}(S_{el} = 10,880)}{(C_2 K_2 = 2.09)(\alpha = 1.0)} \times 2.54 = 12.54 C_1 \text{ (cm/sec : 0-p)} \quad (2)$$

여기서, C_1 은 valve 부위는 0.26의 값을 가지며 그 외의 부위는 1.0의 값을 가지기 때문에, valve 부위는 진동허용치가 3.26 cm/sec 이하게 되며 이 외의 부위에서의 진동허용치는 12.54 cm/sec 이하게 된다.

진동 측정 및 진동 충격실험을 위한 측정위치 선정은 그림 2에서 보듯이 크게 3개의 지역으로 나뉘며, 육안검사, 현장측정 여건 및 발전소의 설비개선 여건을 고려하였다. 먼저 A, B지역은 육안점검을 통해 큰 이상이 없었으나, C 지역에서 큰 진동이 관측되었다. 이 지역은 위치상 가장 높은 곳에 위치하고, 배관형상도 복잡하며 중요밸브들이 조합되어 있는 곳으로 주요 7개소를 선택하여 3축으로 측정하였으며, 그 지점들을 그림 3과 같다. 또한 측정점들에서의 각 방향의 진동측정 결과는 표 2와 같다. 좌표 설정은 그림 3에 표시된 바와 같이 유체가 흐르는 축 방향을 z-방향으로, 연직 방향을 y-방향으로 하고 right-hand rule에 따라 x-방향을 정하였다. 표 2는 고압급수가열기 배수계통 배관 각 측정점에서의 진동 측정치와 허용치를 비교한 결과로서 진동측정치는 x-, y-, z-방향의 3방향에 대한 진동레벨의 벡터합을 취한 결과이다. 이 결과를 보면 대부분의 위치에서 진동치가 허용치 이내로써 별문제는 없으나, 각 호기에서 일부 밸브 부위에서의 진동이 허용치를 초과하여 반드시 개선이 필요함을 알 수 있다.

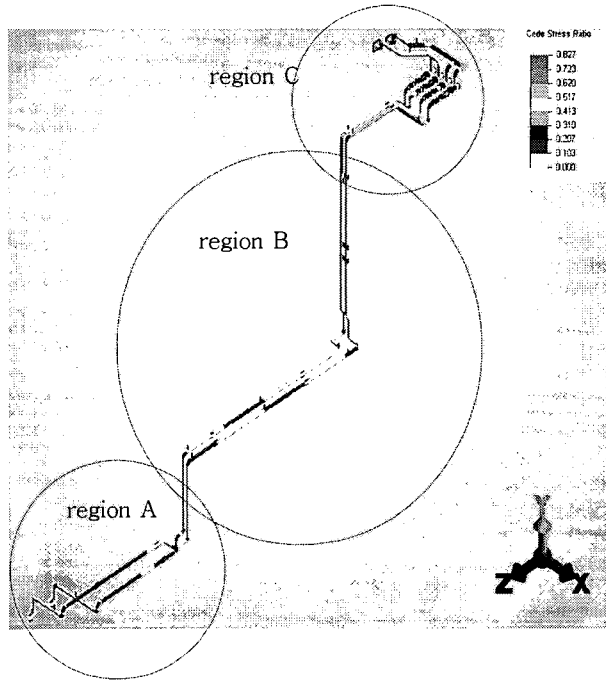


그림 2. 고압급수가열기 배수계통 배관도

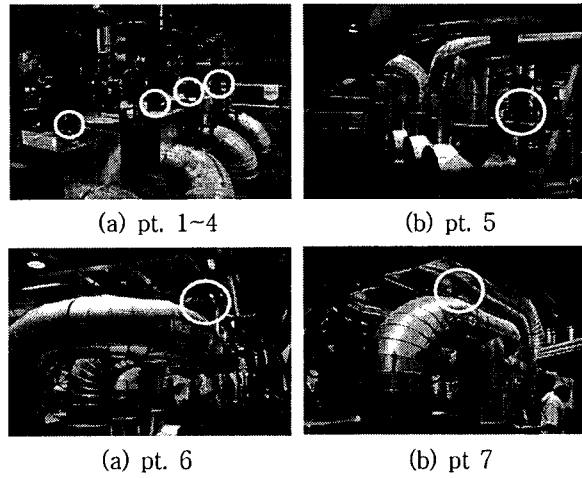


그림 3. 고압급수가열기 배수계통 배관 측정점

표 2. 고압급수가열기 배수계통 배관의 각 측정점에서 진동 측정치와 허용치와의 비교 (cm/sec, 0-p)

측정점	진동측정치			진동허용치
	A호기	B호기	C호기	
pt.1	1.613	2.867	2.621	3.26
pt.2	2.966	3.054	3.868	3.26
pt.3	2.327	1.905	1.815	3.26
pt.4	2.581	4.119	2.617	3.26
pt.5	2.154	2.365	2.436	3.26
pt.6	4.129	7.639	2.743	3.26
pt.7	8.623	4.504	4.900	3.26

2.2 진동 저감 대책

상기 서술된 진동허용속도를 초과하는 배관부위의 진동저감을 이루기 위해서는 2가지 방법을 생각할 수 있다. 첫 번째는 배관의 동특성을 변경하여 진동을 저감하는 방법이며, 두 번째는 배관을 가진하는 힘 자체를 줄이는 방법이다. 첫 번째 방법은 배관에 지지장치 등을 부착시켜 진동을 억제/흡수하는 것으로서 이제까지의 배관 진동저감은 대부분 이 방법을 사용하여 이루어졌다. 두 번째 방법은 배관의 형상을 부드럽게 변경하여 유동에 의해 발생하는 배관의 반력을 최소화함으로써 궁극적으로 배관의 진동을 저감시키는 것이다. 본 연구에서는 고압급수가열기 배수계통 배관의 진동저감을 위해 두 번째 방법론을 주로 검토/적용하였다. 이를 위해 현장사정을 충분히 고려하여 진동저감을 위한 배관 형상 변경사항들을 고찰하였다.

진동허용기준을 초과하는 부위에 공진주파수를 높이고 배관가진력을 줄이기 위해 현장설치조건을 고려하여 마련된 개선책은 그림 3과 같다. 이 때 공진주파수를 높이기 위해 restraint (guide)를 추가하였으며, 배관가진력을 감소시키기 위해 배관의 곡면 부위를 최대한 줄이고 충분한 굴곡을 주어서 가진력을 감소시켰다.

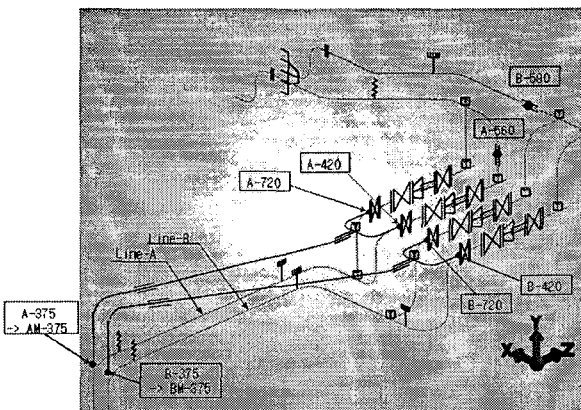
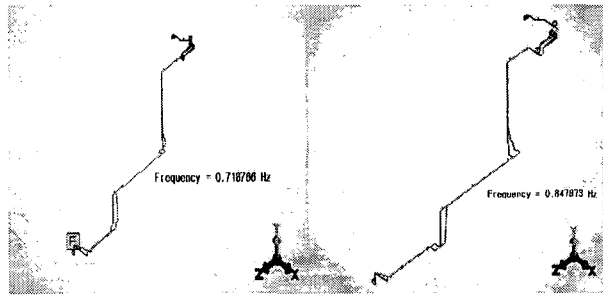


그림 4. 고압급수가열기 배수계통 배관 개선도

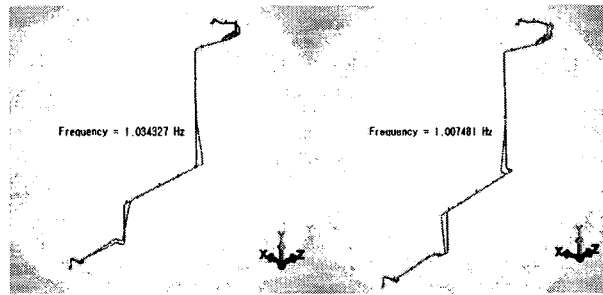
고압급수가열기 배수계통 배관에 진동저감 대책이 적용되었을 때의 진동 모드해석을 통해 고유진동수는 진동저감 개선책에 의해 상당히 상승함을 표 3을 통해 알 수 있다. 또한, 그림 7, 8의 응력해석 (열응력, dead weight)의 결과를 보면 배관 응력치는 대책 전/후 모두 허용응력을 만족하는 결과를 보여준다.



(a) A Line

(b) B Line

그림 5. 고압급수가열기 배수계통 배관 조치전 고유진동수



(a) A Line

(b) B Line

그림 6. 고압급수가열기 배수계통 배관 조치후 고유진동수

표 3. 고압급수가열기 배수계통 배관 진동저감 대책 전/후의 고유진동수 변화 (Hz)

	대책 전		대책 후	
	1차모드	2차모드	1차모드	2차모드
A Line	0.71	1.21	1.03	1.16
B Line	0.84	1.26	1.01	1.63

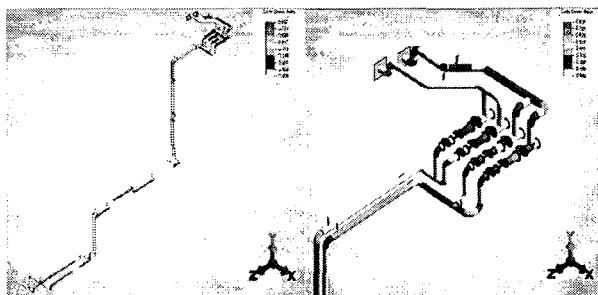


그림 7. 고압급수가열기 배수계통 배관 조치전 열응력 분포

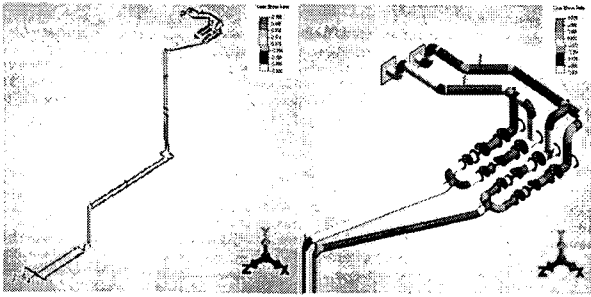


그림 8. 고압급수가열기 배수계통 배관 조치후 열응력 분포

고압급수가열기 배수계통 배관 변경사항들에 의해 진동저감효과가 어떻게 나타나는지를 배관의 강성보강 측면과 가진력 저감 측면으로 나누어 간단히 서술한다. 배관내의 압력파의 파장보다 엘보우의 길이가 매우 작은 경우 그림 9와 같은 합력 F_r 이 가진력으로 작용하게 된다. 배관내의 압력 맥동을 계속하게 되면 엘보우 등에 의해 배관에 가해지는 진동가진력을 계산할 수 있게 된다. 진동가진력은 θ 가 90도 일 때 최대가 되며 θ 가 줄어들수록 반력이 점점 작아진다. 엘보우 개수가 많아질수록 새로운 가진력들이 배관에 추가되기 때문에 배관의 가진 형태는 매우 복잡하게 되며 배관 진동량도 커지게 된다. 따라서 배관의 설치형태를 최대한 직선부재로 간략화 하는 것은 가진력을 줄이는 관점에서 매우 중요한 사안이다.

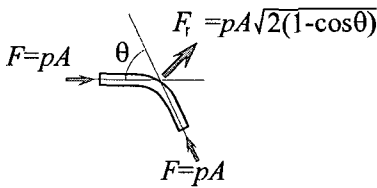


그림 9. Elbow 부위의 힘의 관계

배관에 강성이 보강되어 공진주파수가 높아졌을 때의 배관 진동저감의 효과를 간단히 설명하기 위하여 다음 식과 같은 1차원 진동계의 가진력의 절대치 $|F|$ 와 진동량의 절대치 $|V|$ 의 관계를 이용하고자 한다.

$$|V| = \frac{1}{\sqrt{(K/\omega - M\omega)^2 + c^2}} |F| \approx \frac{|F|}{c} \quad (3)$$

여기서 M은 계의 질량을, K는 계의 강성을, c는 감쇠치를 각각 의미한다.

고압급수가열기 배수계통 배관은 모터 또는 펌프 등과 같이 특정주파수를 발생하는 강제가진력에 의한 진동계가 아니라 유체유동 자체에 의해 자발적으로 진동하는 진동계이기 때문에 배관의 자체 공진 모드에 의해 흔들리게 된다.

이 경우 $K/\omega - M\omega \approx 0$ 인 관계가 되기 때문에 진동량은 식 (3)과 같이 가진력과 감쇠치에 의해 지배하게 된다. 대부분의 진동계의 감쇠치는 주파수가 높아질수록 커지는 속성이 있기 때문에 공진주파수가 높아진다고 하는 것은 같은 가진력 상태인 경우에 진동량을 저감하는 효과를 발생시킨다.

고압급수가열기 배수계통 배관의 진동현상은 배관내의 압력파에 의해 배관의 굴곡부에서 가진력이 발생하고 이 가진력에 의해 배수관에 과다진동이 발생하는 것으로 정리할 수 있다.

2.3 현장 적용

발전소의 정비기간에 맞추어 B호기의 배관에 진동저감 조치를 실시하였다. 표 4는 고압급수가열기 배수계통 배관의 진동저감 조치 전후 비교한 것으로 평균 54%의 진동저감을 가져왔으며, 모든 곳에서 식(1)에서 나타난 진동허용치 이하로 만족한다. 그림 10에서 pt.1 지점의 진동저감 조치 전/후의 신호분석 결과를 보면, 조치 후에 10Hz 이하의 저주파수 성분이 완전히 사라짐으로써 결과적으로 전체 진동이 저감되는 것으로 설명할 수 있다.

표 4. 진동저감 조치 전후의 진동속도(cm/sec, 0-p)

측정점	진동측정치			진동허용치
	조치 전	조치 후	저감율(%)	
pt.1	2.867	1.285	55.2	3.26
pt.2	3.054	1.343	57.0	3.26
pt.3	1.905	1.341	40.6	3.26
pt.4	4.119	1.541	62.6	3.26
pt.5	2.365	1.436	39.3	3.26
pt.6	7.639	1.796	76.5	3.26
pt.7	4.504	2.321	48.5	3.26

이상을 정리하면 진동저감 조치에 의해 고압급수가열기 배수계통 배관은 진동이 현격하게 저감되었으며, 조치전과 비교하면 진동이 거의 사라진 것과 같은 효과를 보여주고 있다.

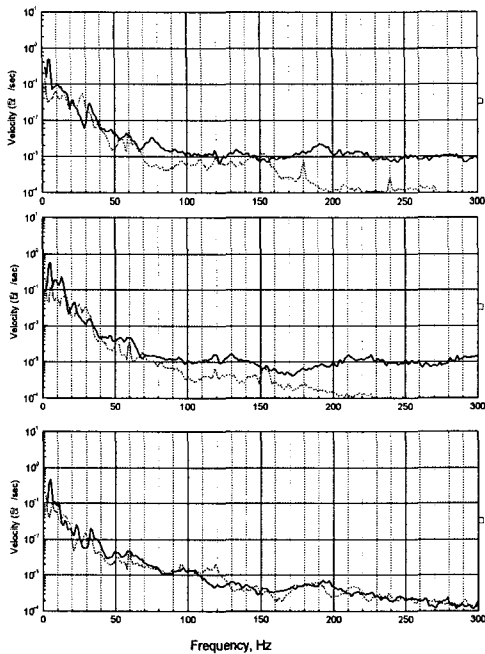


그림 10. pt.1 진동신호 — : 조치전;: 조치후
(위로부터 x-, y-, z-방향의 진동분석 결과)

4. 결론

“고압급수가열기 배수계통 배관계 고진동 해소방안 연구” 결과를 종합해 다음과 같다.

- (1) 해당발전소 고압급수가열기 배수계통 배관은 가동 초기부터 진동이 심하여 현장에서 여러 가지 진동저감조치를 취했으나 여전히 진동치가 최대 8.6cm (7.6cm)로 높아 배수관 건전성 확보 차원에서 본 연구가 추진되게 되었다.
- (2) 본 연구에서는 고압급수가열기 배수계통 배관계의 진동저감을 위해 이제까지 주로 사용했던 배관지지장치의 추가/변경 등의 방법보다 배관계의 형상을 변경하는 방법으로 배관계 진동원 자체인 유동 불안정을 해소시키는 방안을 연구하여 그 결과를 현장에 적용하도록 권고하였다.
- (3) 현장에서는 본 연구에서 권고한 사항을 2006년 2월 정기 예방정비 기간중 현장에 적용하였으며, 예방정비 후 100% 운전중인 현재 진동측정결과 진동치가 최대 7.6cm/sec 였던 배관계가 2.3 cm/sec 이하로 대폭 저감되어 진동에 대한 배관의 건전성이 확보되었다고 평가할 수 있다. 그리고 계속해서 B, D호기에도 적용할 예정이다.
- (4) 본 연구에서 추진된 진동저감 방법론은 타 배관계에 확대 적용함으로써 배관계의 진동저감에 상당한 기여를 하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) ASME OM-S/G-1997, Part 3, Requirements for Pre-operational and Initial Startup Vibration Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems.
- (2) ASME BPV Code, 1995 Section III, Division 1, Appendix 1, "Design Stress Intensity Values, Allowable Stress, Material Properties, and Design Fatigue Curves"
- (3) ASME B31.1-2001, "Power Piping"
- (4) “배관지지설계”, 機電硏究社, 1974.
- (5) KEPRI, 2006, "중수로 기기냉각수 배관계의 유동유발진동에 의한 손상대책 개발 (중간보고서)"
- (6) KEPRI, 2001, "고리2호기 습분분리재열기 배수관 안전성 검토 (최종보고서)", TM99NS01.S2000.599