2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

습분분리재열기 배수관 진동저감방안

Vibration Reduction Method for Discharge line of Moisture Separator Reheater

이준신, 손석만, 김태룡

한국전력공사 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

이 광우, 정석규
한국전력공사 고리원자력본부

요 약

고리 2호기 습분분리 재열기 3“ 배수관은 길이 약 84m로써 발전 초기부터 이상거동이 지속적으로 발생되어 왔다. 발전소에서는 1993년도에 임시 대책으로써 배관구속을 실시하였으나 여전히 배관진동 허용한도를 넘는 이상거동이 계속되고 있어, 배관의 피로파괴를 방지할 대책수립이 시급한 실정이었다. 본 연구는 습분분리 재열기 배수관 이상거동의 원인을 규명하여 그 해결책을 제시하고 적용함으로써 발전소 운전성 향상에 이바지 하고자 시행되었다. 연구결과 배관의 형상을 부드럽게 함으로써 유동유발력을 저감하여 궁극적으로 배수관 진동을 저감하는 방법론을 현장에 적용하여 100% 운전시 진동속도가 17cm/sec인 배관을 1.0cm/sec로 저감시킬 수 있었다.

Abstract

The 84m discharge line of moisture separator reheater(MSR) in Kori-2 had been suffered by excessive vibration from the beginning of power generation. In 1993, a complementary measure was taken to reduce the vibration level by adding several supports in the MSR pipeline. However, 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 MSR pipeline and the countermeasure for abnormal vibration was investigated. Among the several vibration reduction methods, piping layout change by smoothing the pipeline was applied to the MSR pipeline in Kori-2. Applying the countermeasure, the vibration level was found to dramatically reduce from 17cm/sec to 1.0cm/sec at the full-power operation condition.

1. 서론

배관계통의 건전성을 저해하는 여러 가지 요인 중에 배관 내/외부에서 발생되는 진동에 기인된 요인이 많은 부분을 차지한다. 배관내의 유동은 배관의 굴곡부, 밸브 및 오리피스 등에 의한 유동 불안정, 펌프와 같은 회전기계에 의한 맥동 등에 의해 매우 복잡하며, 이러한 유동은 배관 자체부품은 물론 배관 지지 구조물 및 기계장치를 가진하여 과다 진동을 유발시키는 원인이 된다. 이러한 과다진동들은 배관재료의 피로 및 균열발생을 촉진시키며 내부결함 성장을 가속화시켜 결과적으로 배관을 파손시킬 수도 있으며, 충격력을 유발하여 배관을 순간적으로 파단에 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 제어 방법들은 원전의 안전운전을 위해 반드시 확보해야할 기술이다. 본 과제는 이와 같은 이유로 시행되었으며, 본 연구를 통해 기존의 진동저감 기술들을 충분히 응용하여 원전에 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 발생되는 배관의 반력을 최소화함으로서 궁극적으로 배관의 진동을 저감시키는 것이다. 이와 같은 배관형상 변경방법은 배관의 가진력 자체를 줄이는 방법이기 때문에 배관계 전체의 진동레벨이 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 기술개발의 한 일환으로 진행된 것으로서 유체유발진동과 관련된 기술에 관한 것이다. 기술적용 대상 배관계는 3“ Vent Line인 고리 2호기 습분분리 재열기(MSR) 배수관으로서 총 길이가 약 84m로써 상류에 열교환기, 배관에는 오리피스와 각종 밸브 및 밴드 등으로 구성된 복잡한 구조로써 발전 초기부터 이상거동이 지속적으로 발생한 바 있다. 발전소에서는 1993년도에 진동저감 대책으로써 배관에 구속점을 추가하였으나 여전히 주파수 4.5Hz 성분의 과다진동이 계속되고 있으며, 이에 의한 피로누적이 심화될 경우 발전소 운전 및 안전성에 영향을 미칠 우려가 있어 대책수립이 요망되는 실정이다. 본 연구개발에서는 배관계 진동저감 기술 확보는 물론 발전소의 장기 현안문제로 대두되어 있는 습분분리 재열기 배수관 이상거동의 원인을 명확히 하고 해결책을 제시 적용함으로써 발전소 운전성 향상에 이바지 하는데 있다.

2. MSR 배수관의 진동저감

배관의 진동저감을 위해서는 일반적으로 해당배관의 진동건전성을 평가하여 저감목표량을 설정하고 그 목표량에 적절한 진동저감 대책을 세우게 된다. 이와 같은 절차에 따라 본장에서는 MSR 배수관에 대한 건전성평가 후 진동저감 목표량을 설정하고 진동저감대책 수립하여 그 내용을 현장에 적

용하는 순으로 연구내용을 기술하기로 한다.

고리 2호기는 그림 1과 같이 터빈 양측면에 2대의 MSR (Moisture Separator Reheater)이 위치하고 있으며 각 MSR에는 고압측과 저압측에 각각 1개씩의 배수관이 있다. MSR A,B의 고압측 배수관은 6A Heater, 6B Heater, “B" Condenser와 연결되어 있으며, 저압측 배수관에는 5A Heater, 5B Heater, “A" Condenser가 그림과 같이 연결되어 있다. 편의상 배수관 line들은 그림 1.에 표시된 것과 같이 부르기로 한다. 예를 들면, MSR A의 저압측 배수관은 LP_A line으로 표시한다. MSR 배수관 진동은 LP_A line에서 주로 문제가 되기 때문에 본 연구에서는 LP_A만을 심도 있게 다루기로 한다.

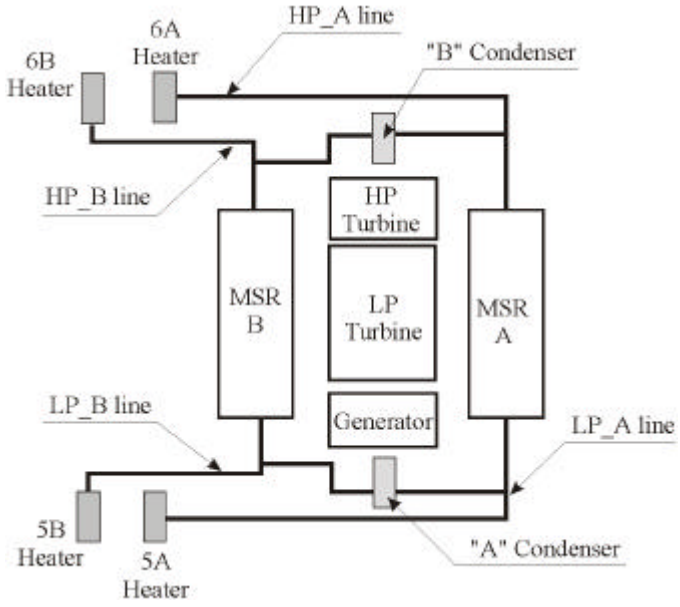


그림 1. 고리 2호기 습분분리재열기 배수관 배치도

2.1 배관 건전성 평가

배관계통의 진동허용기준은 ANSI/ASME OM-1987 Part 3인 “원자력발전소 배관계통의 가동전 및 초기 시운전 진동시험에 관한 기준”을 따른다. 이 기준에 따르면 MSR 배수관은 VMG(Vibration Monitoring Group) 2의 ASME Class 2,3 또는 ANSI31 배관에 해당되어 건전성 평가 기준은 허용진동변위(Allowable deflection limit) 또는 허용진동속도(Allowable velocity)로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 MSR 배수관계의 건전성 평가 기준으로 허용진동속도를 선정하였다. 각 배관은 3” seamless pipe(SCH. 40)이고, 배관의 재질은 MSR 부근은 SA-312-TP304이고 나머지 부분은 ASTM-A106-GR-B로 구성되고 있다.

진동평가를 위하여 배관을 따라 여러 점에서 진동속도를 측정하고 그 중 최대진동속도를 구했다. 진동은 고온용 가속도계(B&K 4381)를 사용하여 x-, y-, z-방향에 대해 측정하였으며, 이를 전하증폭기(B&K NEXUS amplifier)에서 한번 적분하여 진동속도를 얻었다. 동적신호분석기(DI2200)를 사

용하여 진동신호에 대한 주파수분석 및 충격응답 특성 등의 진동분석을 수행하였다. ASME/ANSI[3] 기준에 따르면 배관계통의 건전성을 유지하기 위해서는 측정된 최대 진동속도가 다음 식으로 계산되는 허용진동속도보다 작아야 한다.

$$V_{allowable} = \frac{C_1 C_4}{C_3 C_5} \frac{3.64 \times 10^{-3} S_{el}}{C_2 K_2 \alpha} \ (inch/\sec : 0-p) \tag{1}$$

여기서, 식 (1)의 각 변수에 해당하는 MSR 배수관의 값들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- Heater 부근에 위치한 valve 부위를 제외하고 모두 straight beam이기 때문에 valve 부위를 제외하면 C_1은 1.0의 값을 가진다. Valve 부위는 중량비가 거의 2배 정도이기 때문에 C_1은 0.5 정도의 값을 가진다.
- 굴곡부는 butt wedding으로 되어 있기 때문에 응력집중계수 $C_2 K_2$ = 2i는 다음 표와 같은 값을 갖는다.

표 1. MSR 배수관 응력집중계수 계산치

D_0 (배관외경)	t (배관두께)	r (배관단면 평균반경)	R (배관의 곡률반경)	$h = \frac{tR}{r^2}$	$2i$ (응력 집중계수)
3.5"	0.22"	1.64"	3.5“	1.14	1.64

- C_3는 보수적인 값인 1.5를 취하기로 한다.
- 대부분 직선 부재가 아니므로 C_4는 equal leg Z-band의 값인 0.74를 사용하기로 한다.
- 대부분 공진주파수로 진동하고 있으나 여유를 보수적으로 주기 위해 C_5는 2.0의 값을 사용하기로 한다.
- ASME Code Fig. I-9.1에 의거하여 S_A는 12,500 psi 이며, S_{el} = 10,000psi가 된다.
- ASME Code Fig. I-9.1에 의거하여 α는 1.3의 값을 갖는다.

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

$$\begin{aligned} V_{allowable} &= \frac{C_1(C_4 = 0.74)}{(C_3 = 1.5)(C_5 = 2)} \frac{3.64 \times 10^{-3}(S_{el} = 10{,}000)}{(C_2 K_2 = 1.64)(\alpha = 1.3)} \times 2.54 \\ &= 10.7 C_1 \ (cm/\sec : 0-p) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, C_1은 valve 부위는 0.5의 값을 가지며 그 외의 부위는 1.0의 값을 가지기 때문에, valve 부위는 진동허용치가 5.3 cm/sec 이하가 되며 이 외의 부위에서의 진동허용치는 10.7 cm/sec 이하가 된다.

진동 측정 및 진동 충격실험 지점들을 그림 2에 표기하였으며, 측정점들에서의 각 방향의 진동측정 결과는 표 1.과 같다. 좌표 설정은 그림 2에 표시된 바와 같이 원통형 MSR의 축 방향을 z-방향

으로, 연직 방향을 y-방향으로 하고 right-hand rule에 따라 x-방향을 정하였다. 표 1은 MSR 배수관 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, 배관 elbow 부위인 LP_A5 지점에서의 진동이 허용치를 70%나 초과하여 반드시 개선이 필요함을 알 수 있다.

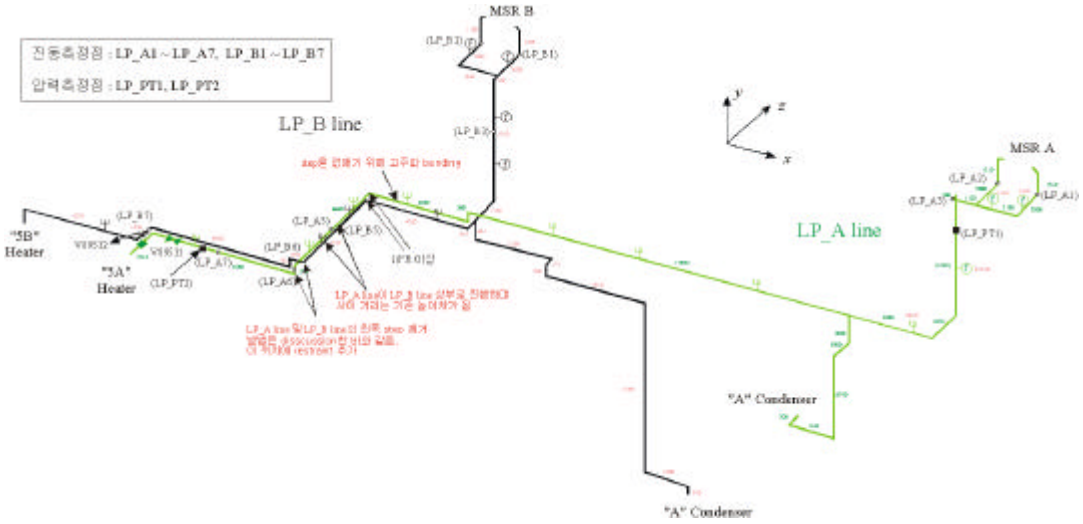


그림 2. 고리 2호기 습분분리재열기 배수관 LP side line 입체도

표 1. MSR 배수관(저압측) 각 측정점에서의
진동 측정치와 허용치와의 비교 (단위: cm/sec, 0-p)

측정점	진동 측정치	진동 허용치	비고	측정점	진동 측정치	진동 허용치	비고
LP_A1	1.7	10.7	-	LP_B1	2.0	10.7	-
LP_A2	1.5	10.7	-	LP_B2	2.0	10.7	-
LP_A3	1.5	10.7	-	LP_B3	1.3	10.7	-
LP_A4	1.5	10.7	-	LP_B4	4.3	10.7	-
LP_A5	17.0	10.7	개선필요	LP_B5	3.7	10.7	-
LP_A6	7.0	10.7	-	LP_B6	5.0	10.7	

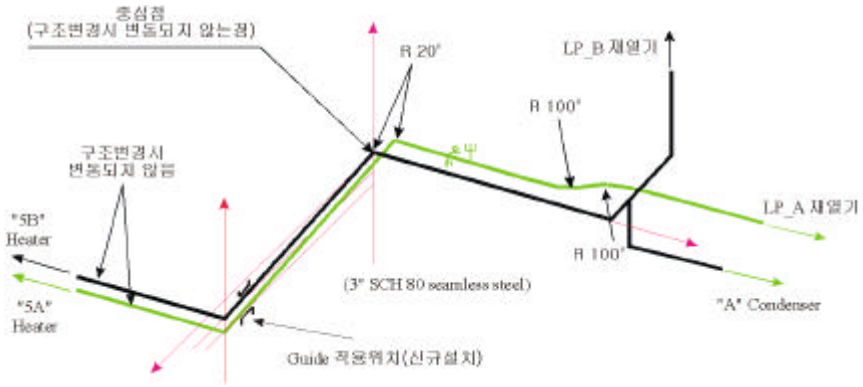
2.2 진동저감대책

상기 서술된 진동허용속도를 초과하는 배관부위인 LP_A5의 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 발생되는 배관의 반력을 최소화함으로서 궁극적으로 배관의 진동을 저감시키는 것이다. 본 연구에서는 MSR 배수관계의 진동저감을 위해 두 번째 방법론을 주로 검토/적용하였다. 이를 위해 현장사정을 충분히 고려하여 진동저감을 위한 배관 형상 변경사항들을 고찰하였다.

LP_B 배관은 전반적으로 진동치가 허용치 이하이지만 배관의 유동상태에 따라 진동치가 급변할 수 있기 때문에 진동저감 방안을 LP_A 배관과 동시에 검토하기로 한다.

진동허용기준을 초과하는 부위에 공진주파수를 높이고 배관가진력을 줄이기 위해 현장설치조건을 고려하여 마련된 개선책은 그림 3과 같다. LP_A 배관의 경우, 공진주파수를 높이기 위해 restraint (guide)를 추가하였으며, 배관가진력을 감소시키기 위해 배관의 elbow부에 충분한 굴곡을 주어 step 등에 의한 가진력을 감소시켰다.

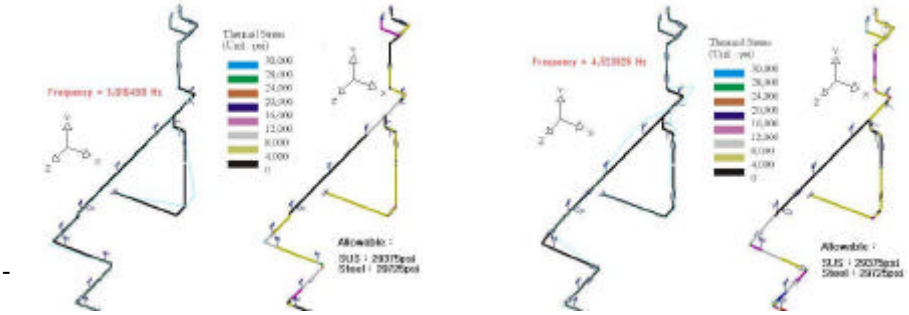


±x림 3. LP line 배관 개선도

LP 배관에 진동저감 대책이 적용되었을 때의 진동 모드해석을 통해 고유진동수는 진동저감 개선책에 의해 상당히 상승함을 표 3.을 통해 알 수 있다. 또한, 그림 4의 응력해석 (열응력, dead weight)의 결과를 보면 배관 응력치는 대책 전/후 모두 허용응력을 만족하는 결과를 보여준다.

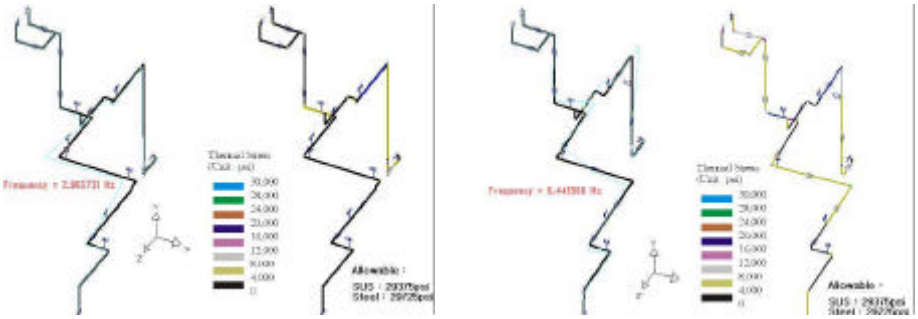
표 3. MSR 배수관 진동저감 대책
전/후의 고유진동수 변화 (Hz)

	대책 전	대책 후
LP_A	3.01	4.52
LP_B	2.96	6.44



<조치전> <조치후>

그림 4(a) LP_A line의 조치전/후의 진동모드 및 열응력 분포



<조치전> <조치후>

그림 4(b). LP_B line의 조치전/후의 진동모드 및 열응력 분포

MSR 배수관 변경사항들에 의해 진동저감효과가 어떻게 나타나는지를 배관의 강성보강 측면과 가진력 저감 측면으로 나누어 간단히 서술한다.

배관내의 압력파의 파장보다 엘보우의 길이가 매우 작은 경우 그림 5와 같은 합력 F_r이 가진력으로 작용하게 된다. 배관내의 압력 맥동을 계측하게 되면 엘보우 등에 의해 배관에 가해지는 진동가진력을 계산할 수 있게 된다. 진동가진력은 θ가 90도 일 때 최대가 되며 θ가 줄어들수록 반력이 점점 작아진다. 엘보우 갯수가 많아질수록 새로운 가진력들이 배관에 추가되기 때문에 배관의 가진형태는 매우 복잡하게 되며 배관 진동량도 커지게 된다. 따라서 배관의 설치형태를 최대한 직선부재로 간략화 하는 것은 가진력을 줄이는 관점에서 매우 중요한 사안이다.

MSR 배수관의 경우 LP_A와 LP_B line의 교차점의 step부를 그림 6과 같이 곡률을 3"에서 100"로 키워 θ가 줄어들도록 개선하면 반력은 12배 정도 적어지며 이에 상당하는 모멘트는 6배 정도 작아지게 된다. 여기에다 곡률 반경을 키우는 것은 곡률부의 길이가 길어지는 것이고 이 길이에 상당하는 파동압력의 변동이 곡률부에 생기기 것이기 때문에 배관 반력은 줄어들게 된다. 다시 말해 엘

보우 부의 곡률반경을 키우는 것 자체만으로도 배관 가진력을 줄이는 효과를 주게 된다. 따라서 본 연구에서는 그림 6과 같이 엘보우 부의 곡률반경을 100"로 변경하는 것으로 하였다.

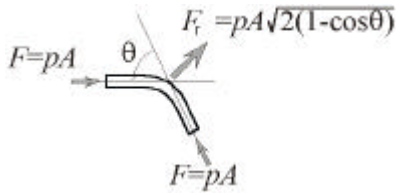


그림 5.. Elbow 부위의 힘의 관계

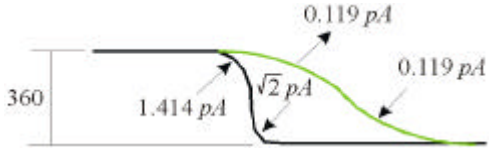


그림 6. 배관 step부의 곡률변화에 따른 가진력 비교

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

$$|V| = \frac{1}{\sqrt{(K/\omega - M\omega)^2 + c^2}} |F| \approx \frac{|F|}{c} \qquad (4)$$

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

MSR 배수관은 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 (4)와 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.

그림 7은 저압측의 MSR 배수관에 각 2개씩의 압력센서를 설치하여 측정한 결과로서 주파수 분석 결과를 보면 LP side의 경우 10Hz 이하의 주파수가 진동을 주도하고 있음을 알 수 있다. 표 3에 정리된 바와 같이 MSR 배수관 진동저감 대책 전/후의 고유진동수 변화량을 알고 있기 때문에 식 (4)에서의 가진력 |F|를 알게되면 배관의 강성보강에 의한 진동저감 효과를 예측할 수 있다.

여기서, |F|는 배수관내 압력에 비례하기 때문에 그림 7의 MSR 배수관 동적 압력측정 결과 그래프에서 해당 주파수의 압력크기를 읽으면 대책 전/후의 진동저감량을 예측할 수 있다. 예를 들어 LP_A5 부위의 경우, 그림 7에서 3.01Hz와 4.52Hz에 상당하는 압력치를 읽으면 -23dB와 -29dB로서 두 주파수 사이의 차가 압력으로 2배인 6dB 임을 알 수 있다. 즉 LP_A5점은 50% 진동저감이 있을 것으로 예측할 수 있다. 표 4는 이와 같은 방법으로 각 부위의 진동저감율을 예측한 것으로서 배관의 고유진동수를 높인 것만으로 진동허용치를 초과하는 배관 부위에서 허용진동치를 만족시킬 수 있음

을 보여준다.

표 4. MSR 배수관 진동저감 조치에 따른
고유진동수 변화시의 진동저감 예측

	대책 전 (Hz)	대책 후 (Hz)	진동 저감율(%)	진동예측치(cm/s)
LP_A	3.01	4.52	50	8.33 (LP_A5)
LP_B	2.96	6.44	75	1.25 (LP_B6)

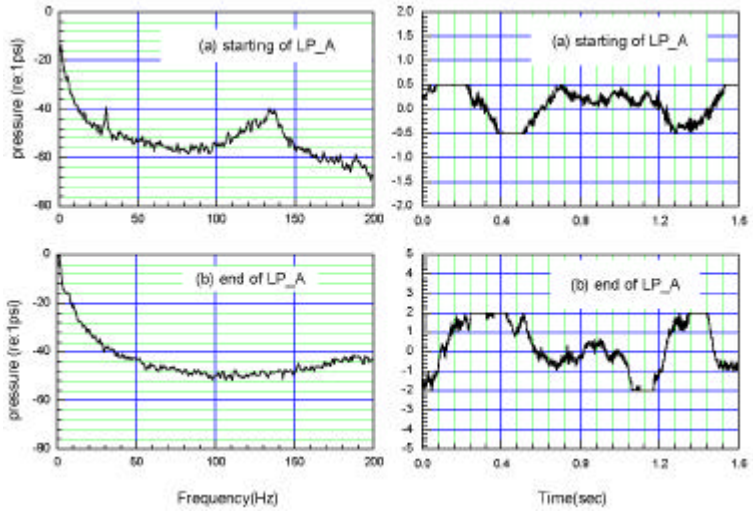


그림 7. MSR 배수관 동적 압력측정 결과

MSR 배수관의 진동현상은 배관내의 압력파에 의해 배관의 굴곡부에서 가진력이 발생하고 이 가진력에 의해 배수관에 과다진동이 발생하는 것으로 정리할 수 있다. 배수관 굴곡부에서의 가진력은 배관내의 압력파 계측결과(그림 7)를 활용하여 산출하며, 이를 입력으로 MSR 배수관의 강제진동 해석을 행하면 진동저감 조치 후의 배수관 각 지점의 진동저감을 예측할 수 있다. 표 5는 MSR 배수관 진동저감 조치에 따른 진동저감 예측치를 표시한 것으로 2.2에서 설명한 배관의 가진력 저감 및 배관의 강성보강 효과에 의해 배관의 진동치가 현격히 줄어들게 되는 것으로 설명할 수 있다.

표 5. MSR 배수관 진동저감 조치에 따른
진동저감 예측치(단위 : cm/sec, 0-p)

	대책전 진동측정치	대책후 진동예측치
LP_A5	17.0	3.2
LP_B6	5.0	1.7

2.3. 현장적용

표 6은 진동저감 조치에 따른 MSR 배수관의 진동저감 예측치 및 실측치를 비교한 것으로 대책 후의 예측치와 실측치를 비교해 보면 2배 정도의 오차가 발생함을 알 수 있다. 이는 진동저감 예측시 배수관 굴곡부에서의 가진력을 진동저감 조치전의 압력파 계측결과를 사용하였기 때문으로 판단된다. 그 이유는 진동저감이 이루어지면 배관내의 압력파도 저감되기 때문이다. 그림 8의 LP_A5지점의 진동저감 조치 전/후의 신호분석 결과를 보면, 조치 후에 20Hz 이하의 저주파수 성분이 완전히 사라짐으로써 결과적으로 전체 진동이 저감되는 것으로 설명할 수 있다.

표 6. MSR 배수관 진동저감 조치에 따른
진동저감 예측치 및 실측치(단위 : cm/sec, 0-p)

	대책전 진동측정치	대책후 진동예측치	대책후 진동실측치
LP_A5	17.0	3.2	0.93
LP_B6	5.0	1.7	0.73

이상을 정리하면 진동저감 조치에 의해 MSR LP_side 배수관계는 진동이 현격하게 저감되었으며, 조치전과 비교하면 진동이 거의 사라진 것과 같은 효과를 보여주고 있다.

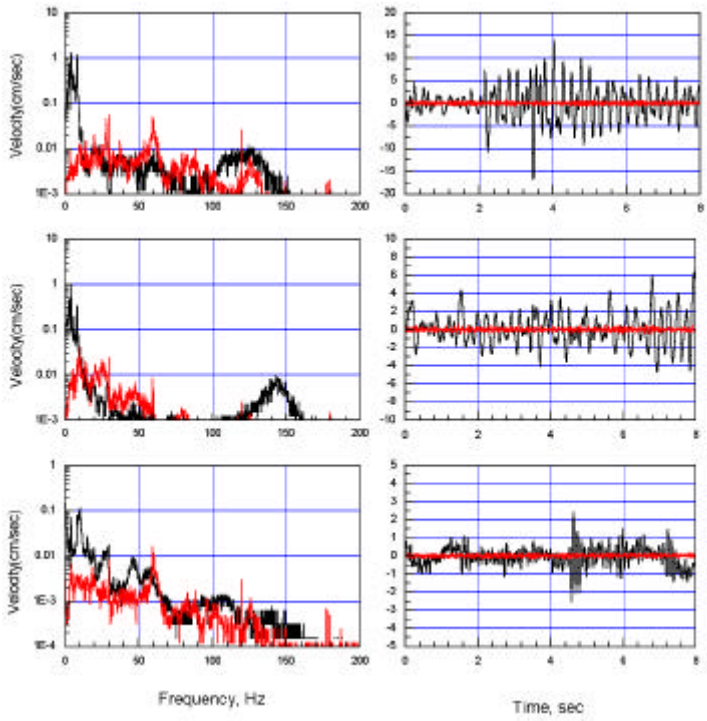


그림 8. (LP_A5) ____ : 조치전; ____: 조치후
(위로부터 x-, y-, z-방향의 진동분석 결과)

3. 결론

"습분분리재열기 배수관 진동저감방안" 연구결과를 종합해 다음과 같다.

(1) 고리 2호기 MSR 배수관은 가동 초기부터 진동이 매우 심해 현장에서 여러가지 진동저감조치를 취했으나 여전히 진동치가 최대 20cm(17cm/sec)로 높아 배수관 건전성 확보 차원에서 본 연구가 추진되게 되었다.

(2) 본 연구에서는 MSR 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 2000년 5월 정기 예방정비 기간중 현장에 적용하였으며, 예방정비 후 100% 운전중인 현재 진동측정결과 진동치가 최대 17cm/sec 였던 배관계가 1.0cm/sec 이하로 대폭 저감되어 진동이 사라졌다고 평가할 수 있다.

(4) 본 연구에서 추진된 진동저감 방법론은 타 배관계에 확대 적용함으로서 배관계의 진동저감에 상당한 기여를 하리라 기대된다.

참고문헌

1. KAERI, "KMRR 원자로구조물 및 일차냉각계통 배관의 진동시험", KAERI/RR-1417/94, 1994.
2. KINS, "원전배관 건전성 평가기술개발", KINS/AR-149, 1992.
3. ASME/ANSI OM-1987, Part 3, Requirements for Pre-operational and Initial Startup Vibration Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems, 1987.
4. "배관지지설계", 機電硏究社, 1974.
5. KEPRI, "월성원자력 2호기 주증기배관 소음평가보고서", TM96GS03.D97. 1111, 1997.
6. KEPRI, "월성원자력 2,3호기 MSIV 소음저감 조치 후 평가보고서", TM96GS01.S1999.275, 1999.
7. KEPRI, "고리 3호기 MSIV room의 고 진동/소음 현상 원인규명", TM99NS01.P1999.138, 1999.
8. KEPRI, "고리 1호기 보조냉각계통의 역지밸브 채터링 해소방안 연구", TMS01.S2000.21, 2000.