

발전소 주증기 배관 소음 발생 원인 규명 Identification of Noise Source from Main Steam Line in Power Plant

손석만 · 이준신 · 이선기 · 이육륜 · 이상국

M. S. Sohn · W. R. Lee · S. K. Lee · J. S. Lee and S. K. Lee

Key Words : MSIV(주증기관 차단밸브), Strouhal No.(스트롤 수), Resonance(공명)

Abstract : In heavy nuclear power plant, high energy through main steam line is provided to turbine that generate the electric power. Since plant had generated power, high noise has been occurred. Noise make equipments and work environment worse. For finding out the location and the cause of making noise, noise was measured along main steam line at open/close test of Main Steam Isolation Valve (MSIV hereafter). As the result, it was identified that the vortex shedding in the cavity of MSIV is main noise source. The profile change of MSIV seat ring was proposed as the method of noise reduction. After filletting MSIV seat ring, the noise level reduced 10~20dB compared before the change of profile.

1. 서 론

중수로형 원자력 발전소의 주증기 배관은 증기발생기에서 터빈까지의 배관으로 고에너지를 가지고 있어 건전성 확보가 매우 중요한 배관이다. 초기 중수로형 원자력 발전소는 주증기 배관에서의 과대 진동 현상을 보여 많은 피로 파괴의 문제점을 내포하고 있었다. 이 때문에 후기에 지어진 중수로형 원자력 발전소에서는 주증기 배관의 진동 저감 설계를 실시하여 진동을 초기에 비해 상당히 많이 저감시켰으나, 주증기 배관에 balancing header와 주증기 배관 차단밸브(main steam isolation valve : 이하 MSIV)를 추가하여 예기치 않은 과다 소음을 배출하는 문제를 야기시켰다. 특히 일부 주증기 배관은 외부에 노출된 채로 설치되어 소음측면에서 매우 취약한 구조를 가지며, 이로 인해 예상치 않은 소음 레벨이 주증기 배관 전체에 나타나고 있었다. 전파된 소음이 주변 사무실 및 환경 소음에 지대한 영향을 끼치고 있어 소음저감 방안을 제시해야만 되는 형편이었다. 이에 전력연구원에서는 소음발생 원인해소를 위해 제작/공급사와 공동으로 원인을 규명하고자 주증기 배관을 따라 소음을 측정하고 MSIV 개도(opening) 시험과 발전기 출력별 시험을 실시하여 주증기 배관의 소음원을 규

명하고, 이에 대한 소음 저감 대책을 실시하였다.

시험 결과, 이중 MSIV부에서 소음이 크게 나타났으며 이는 MSIV부가 유동 단면적 변화가 급격하게 변화하는 구조로 되어있어 밸브 공동(cavity)에서의 유동 단면적 변화에 의한 것임을 확인할 수 있었다. 이 공동은 문제되는 소음 주파수 영역대의 불안정 유동을 생성시킨다. 또한, 축방향 및 단면방향의 음향모드가 이 유동 불안정성을 증폭 또는 감소시키는 데 중요한 역할을 하게 된다. 실제 맥동원은 아닐지라도 음향모드의 영향은 공동에서의 유동특성을 상당 부분 지배한다. 예를 들면 공동에 의해 발생된 맥동이 특정 주파수에서 선택적으로 증폭된다. 이 현상은 밸브 목 부분이 원주 방향으로 치수가 균일하지 않기 때문에 매우 복잡하다. 이 복잡성과 민감성으로 인해 계의 음향장을 변경하여 소음을 저감하는 기술적용은 상당한 모험이 수반된다. 다시 말해 음향장을 변경하면 유동 불안정과 소음이 다른 형태로 발생할 수 있기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 음원의 특성을 변화시켜 소음을 저감코저 밸브 시트링에 대해 모따기를 실시하여 전반적인 소음 레벨을 10~20dB정도 줄일 수 있었다.

2. 이 론

소음원의 기본적인 특성은 주파수가 유속에 비례하며 주 대상체의 크기에 반비례하는 속성을 가진다.

접수일 : 2003년 3월 12일
손석만(책임저자) : 한전 전력연구원 원자력연구실
E-mail : bborng@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5525
이준신, 이선기, 이육륜, 이상국 : 한전 전력연구원

이때 비례계수를 Strouhal 수라고 부르며, 이 값은 불안정 유동장의 물리적 특성 파악에 효과적으로 사용된다. 따라서 주기적 불안정 유동의 주파수 f_s 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_s = S_t \cdot V/D$$

Strouhal수 S_t 를 이용하면 다양한 주파수 영역의 유동 현상들을 한 식으로 표현할 수 있는 효과가 있다. 예를 들면, 같은 Strouhal 수라도 높은 속도와 작은 크기의 물체는 고주파소음 영역이지만 낮은 속도에 큰 물체는 저주파수의 소음 영역에 속한다.

일반적인 배관계에 있어서 여러 배관 요소에 의한 난류 스펙트럼의 Strouhal는 0.2에서 0.4까지의 범위에 Fig. 1과 같이 집중되어 있다. 본 주증기배관의 경우, 유속이 35m/s이며 내경이 0.63m이기 때문에 난류에 의한 스펙트럼 중심주파수는 10~20Hz 사이에 형성된다. 결국 150 또는 200Hz와 같은 수 옥타브 위의 맥동 크기는 매우 작게 된다. 따라서, 주증기배관의 소음 지배주파수가 500Hz임을 감안할 때, 배관내의 평균 유동은 소음 문제의 주 요소는 아닐 것으로 판단된다.

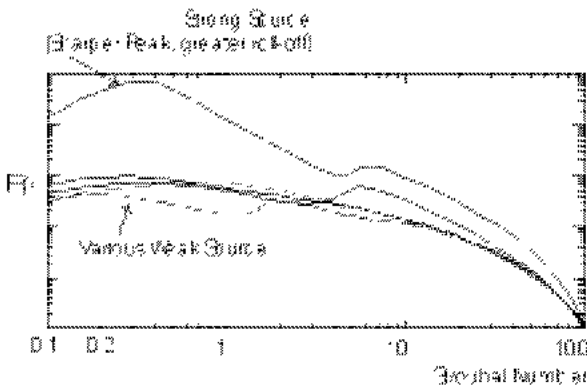


Fig. 1 Typical spectrum of turbulence flow in pipe

게이트 밸브에서 Strouhal수는 공동의 길이를 기초로 하여 구할 수 있으며, 이 값은 길이와 깊이의 비에 의해 어느 정도 변화하게 된다. 덧붙여 공동에서는 고차수의 유동 불안정이 존재한다. Fig. 2에서 보듯이 Strouhal수는 공동 길이와 밀접한 관계를 가지며 그 값은 0.5 ~ 1.0 범위의 값을 가짐을 알 수 있다. 게이트 밸브로 돌아가서 속도가 82.4m/s이고 공동의 길이가 0.185m이면, 500Hz 맥동 중심주파수가 되기 위해 Strouhal수는 1.12가 되어야 한다. 밸브 밀면의 경우, 디스크 정지바의 형태가 두 개의 공동으로 나누어져 공동 길이가 72.5mm로 되므로 Strouhal

수는 500Hz에 대하여 0.44가 된다. 이 값은 Fig. 2의 Strouhal수 범위에 맞는 값이기 때문에 밸브 공동이 소음원으로 추정된다.

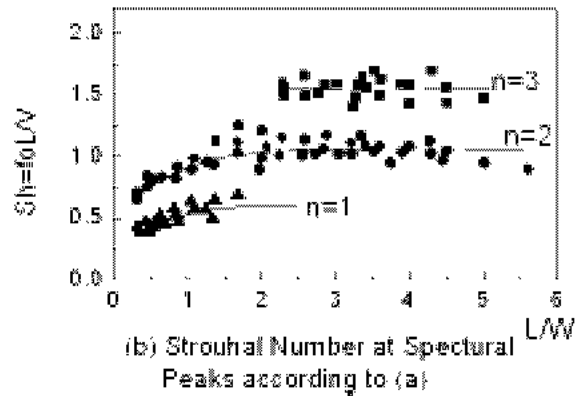
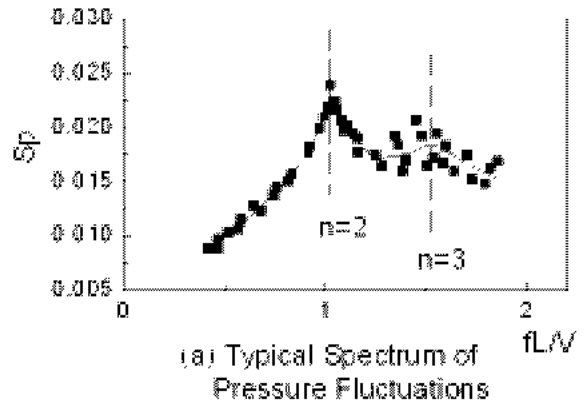


Fig. 2 Range of strouhal number for cavity flow

3. 소음원 규명

3.1 전파 소음의 주 내용

외부에 배치된 주증기배관을 따라 Fig. 3과 같은 지점에서 소음을 조사하였다. 소음의 지배주파수는 Fig. 5 (a)와 같이 모든 배관이 500Hz보다 약간 작은 480에서 490Hz 주파수에서 가장 큰 반응을 나타내는 것을 감지할 수 있었다.

Table 1 Sound pressure level according to location (dBA)

Location	1	2	3	4	5	6
sound pressure level	89	88	92	82	89	85
Location	7	8	9	10	11	
sound pressure level	95	96	97	85	91	

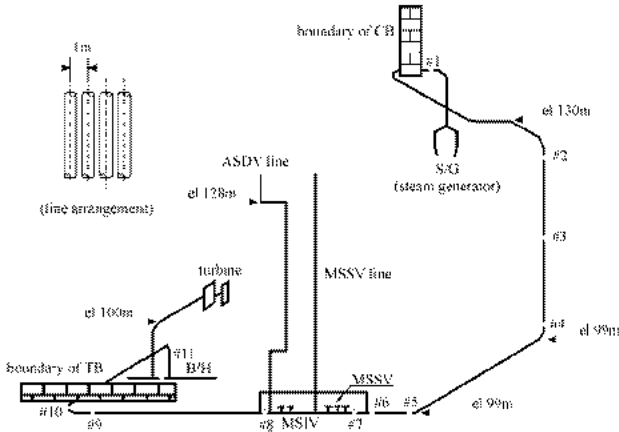


Fig. 3 Location of noise level measurement

Table 3의 측정지점별 소음레벨의 보면 MSIV와 MSSV(Main Steam Stop Valve)의 부근에서 최대점이 나타나고 있는데 이 결과는 부분 최대점이 tower의 중간지점에서 발생하는 것으로 유한한길이를 가지는 선 음원의 중심효과로 판단된다.

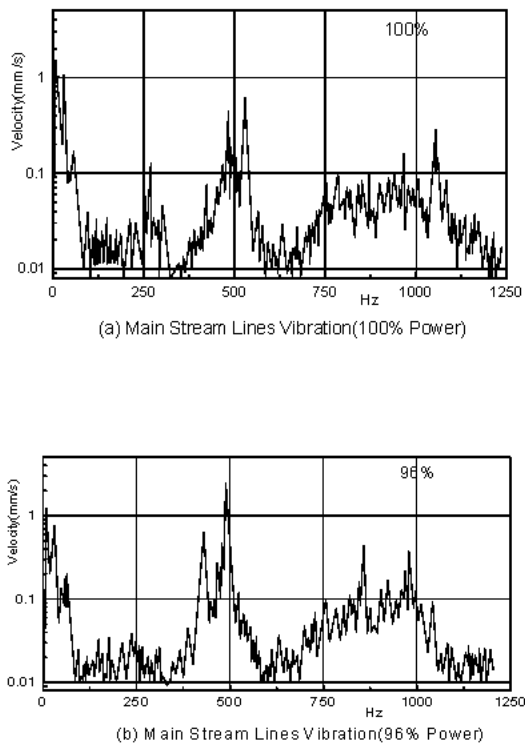


Fig. 4 Main frequency change of vibration according to power change (100%→96%) in main steam line #3

3.2 유동 변화에 따른 소음/진동 주파수 변화
유속 변화에 따른 주파수 변화를 관찰하기 위하여

출력 감발 실험이 수행되었다. 특별히, 유동에 종속적인 소음원으로 추정되는 주파수 부근을 관찰하였다. Fig. 4에서 보이듯이 측정 데이터는 예상과 일치하였다. 출력을 100%에서 96%로 줄였을 때, line 3의 거동을 보면 500Hz 이상 성분(523Hz)이 사라지고 500Hz 이하 성분(490Hz)이 크기 측면에서 크게 증폭되었음을 알 수 있었다. 그림 5를 보면, 100%에서 500Hz 부근에 형성된 가진력들이 80%에서 390Hz 근방으로 떨어져 있음을 알 수 있는데, 이는 소음 주파수가 유속과 대략적으로 비례하는 것과 일치하는 사항이다.

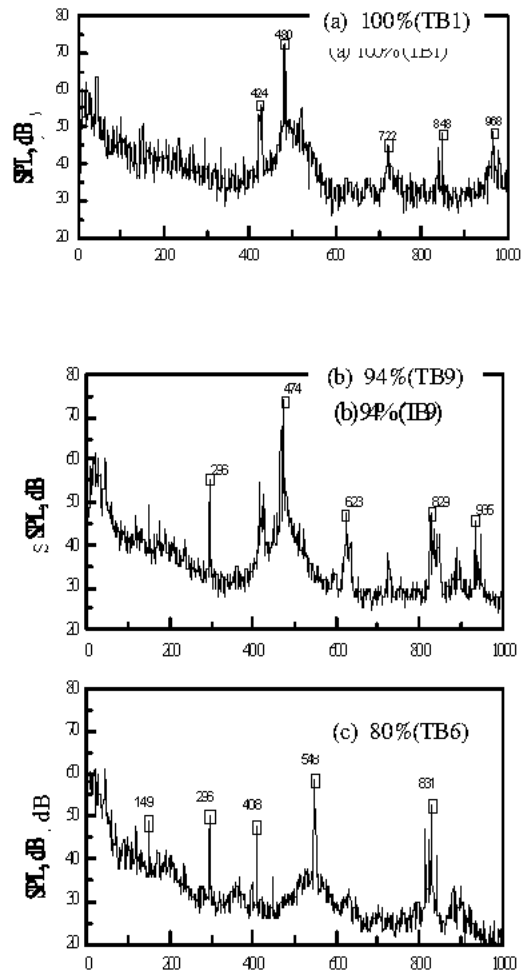
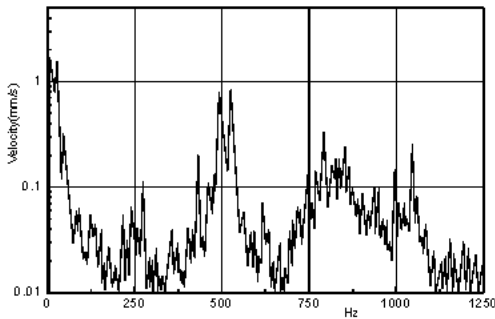


Fig. 5 Main frequency change of noise according to power

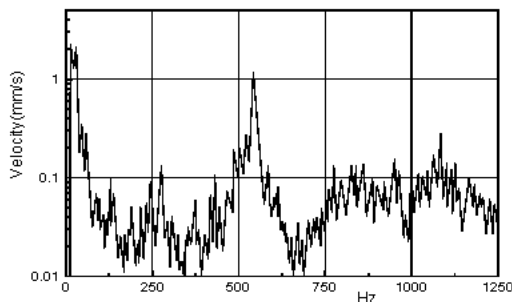
3.3 MSIV 개도 시험

MSIV 개도 시험에서는 2번 배관의 MSIV 디스크를 약 5.6cm 밀어서 하강시켜 유로를 방해하였으며, 이 결과 2번 배관의 진동에 급격한 변화가 분명하게 관찰되었다. 특히 정상적인 상태에서 이 배관에 발생

되었던 주 진동수(491Hz, 523Hz)가 거의 사라진 반면 새로운 주파수가 매우 높은 주파수(542Hz)에서 발생되었다.(Fig. 6 참조) 이 새로운 주파수는 100% 출력 조건에서 다른 배관에서 전혀 나타나지 않았던 것이다. 또한, MSIV가 없고 주증기 배관의 크기와 배치가 같은 초기 증수로형의 소음을 비교하면 초기 증수로형에서 소음이 500Hz근방에 피크가 존재하지 않으므로 정상적인 유동은 순음을 유발하지 않음을 알 수 있다. 이 시험 결과는 MSIV가 소음원임을 밝혀주는 것이다.



(a) MSIV fully opened



(b) MSIV disk 5.6cm down

Fig. 6 Vibration change of main steam line #2 according MSIV opening

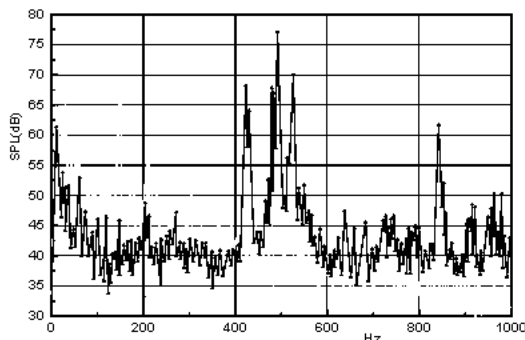


Fig. 7 Comparison of noise spectrum with other similar nuclear power plant

3.4 MSIV 공동에서 음원 특징

이상적인 이론적 해석에 의하면 순음성 소음이란 유속의 변화에 따라 변하는 단일 지배주파수라고 할 수 있다. 그러나 실제 상황에서는 이렇게 간단하지 않으며 단순한 형상일지라도 많은 모드가 동시에 발생되며 모드 사이에 점프가 불규칙적 또는 유동변화와 관련되어 발생된다. 이 효과들은 축방향과 단면방향 음향장 모드와 같은 배관 음향장과 강하게 연관되어 있다. 왜냐하면 음향모드는 음원인 유동불안정 주파수 및 크기를 결정하기 때문이다.

본 문제의 경우 공동 형상 때문에 좀 더 복잡하다. 먼저 디스크 정지바가 밸브 바닥에 존재한다는 점이다. 이 점의 효과는 전체 공동의 거동을 바꿔놓거나 또는 주 공동을 두 개의 작은 공동으로(깊이가 점차 변하여 끝에서 0이 되는) 나누는 것이다. 또한 밸브 몸체의 옆면과 위쪽면을 향하는 공동과 깊이가 변한다.

밸브 디스크가 움직이고 완전히 열려 안착되는 경로는 밸브몸체 윗쪽으로 사각지대를 일부 생성시킨다. 이것은 국부적인 관단면 음장에 영향을 준다.

언급한 바와 같이 축방향 음장과의 연성이 또한 있을 것이다. 이러한 정황으로 몸체 끝의 배관 내경이 크게 파인 부분이 중요한 역할을 할 것이다. 말하자면, 그점들에서 주기적인 유동 불안정에 대한 어떤 경향들은 공동의 유동 불안정 기구와 반을 할 것이다. 이 깊이는 약 1.5m 떨어져있다. 이것은 500Hz 음의 파장과 딱 맞는 것이다. 따라서 내경 스텝에서의 불안정 유동은 배관계의 축방향 음장모드에 또한 영향을 줄 것이다.

정리하면, 주어진 유동에서 MSIV의 음원의 상세한 거동은 음장에 의해서 매우 복잡하게 형성될 것이다. 이와 같은 이유로 음장을 수정하여 반응을 저감하는 것을 시도하는 것은 다른 특정 모드에서 소음이 재발생할 수 있는 소지가 많아 매우 위험하다.

4. 소음 저감 조치사항 및 결과

4.1 조치사항

소음을 저감하기 위해서는 음원의 특성을 바꾸거나 투과음을 저감하는 것이다. 배관을 통하여 전달되거나 또는 배관 외부로 퍼져나가는 투과음을 저감하는 것은 3.4절에서 언급했듯이 기술적으로 민감하고 위험성이 있다.

따라서, 음원의 특성을 바꾸기 위해 와류 형성을 억제하는 것이 필요하다. 주기적인 유동 불안정(예를 들면 공동에서의 주기적인 와류 형성)을 저감 또는 없애기 위한 개조 방법은 시트링의 profile을 가공하는 것이다.

현장 사정을 고려하여 MSIV 시트링의 모따기를 실시하여 급격한 단면적 변화를 어느 정도 줄였다. Fig. 8은 소음저감을 위해 조치한 MSIV 시트링의 형태를 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 MSIV모식도를 보여주고 있으며, Fig. 8(b) MSIV의 변경사항인 유동 인입부의 밸브 시트를 축방향으로 15° 모따기한 내용을 상세하게 보여준다. 밸브 시트의 원주방향으로 동일하게 모따기를 하였으며, Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 점선부위에 대한 상세도이다.

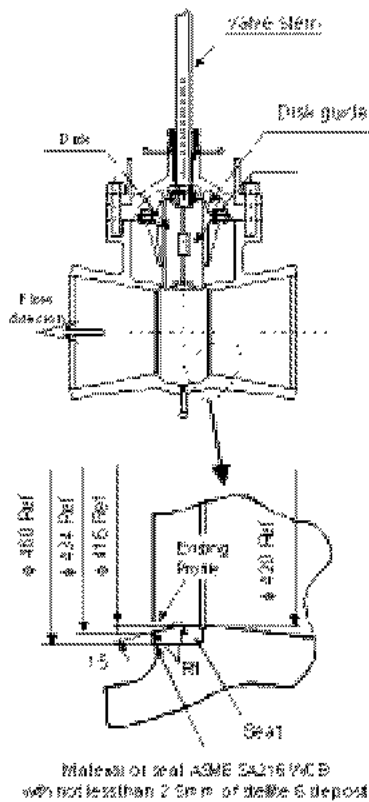


Fig. 8 Noise reduction design in MSIV

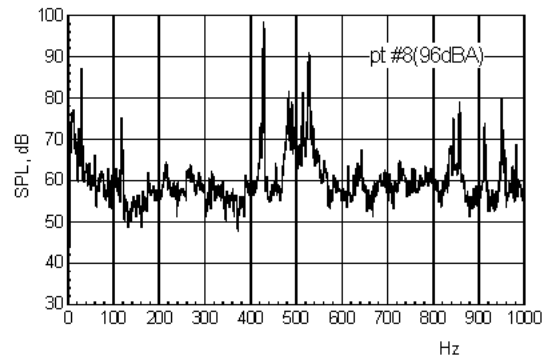
4.2 결과

표 2는 소음저감 대책사항에 대한 적용결과를 정리한 것으로 2호기의 경우 조치 전/후를 비교하면 소음 레벨이 10~20dB정도 저감되었음을 알 수 있다. 그림 9의 주파수 분석 결과들을 보면 400~600Hz 사이의 소음주파수 성분이 조치후에 사라졌음을 관찰할 수 있다. 이는 MSIV 시트링의 모따기에 의해 소음원의 크기가 현저히 작아짐으로서 생긴 현상으로 판단할

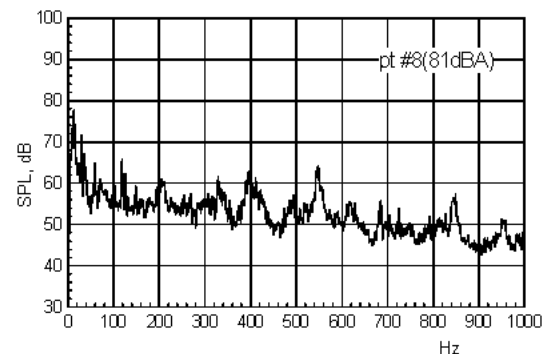
수 있으며, 소음저감이 성공적으로 이루어졌음을 의미한다.

Table 2 Comparison of noise level after noise reduction

Location	sound pressure Level (dBA)	
	Before	After
1	89	-
2	88	70.5
3	92	75
4	82	73
5	89	67
6	85	75
7	95	81
8	96	81
9	87	78
10	85	76
11	91	85



(a) before change of noise reduction design



(b) after change of noise reduction design

Fig. 9 Analysis result of noise at MSIV intallation location

5. 결 론

이상의 중수로형 원자력 발전소의 주증기배관의 소음 조사 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 소음원은 MSIV의 공동이며 밸브공동에서 주기적인 유동 불안정 주파수는 직접적으로는 아니지만 음향장의 영향을 받는다.

소음저감의 효과적인 방법은 MSIV에서 소음을 발생시키는 소음원 부위를 직접 조치하는게 좋다.

소음 저감방안으로 실시한 시트링의 모따기로 주증기 배관의 소음이 전반적으로 10~20dB 정도의 소음저감이 되어 소음저감 대책이 적정한 것으로 판명되었다.

본 연구에서 주증기 배관의 소음해소를 위해 투입된 기술들은 매우 중요한 의미를 가지며 비슷한 유형의 현장문제 해결에 중요한 역할을 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. D. Rockwell and C. Knisely, 1979, "The Organized Nature of Flow Impingement Upon a Corner," J. Fluid Mech. Vol. 93, pp. 413~432.
2. R. R. Clements, 1973, "An Inviscid Model of Two-dimensional Vortex Shedding", J. Fluid Mech. Vol. 57, pp. 321~336.
3. A. T. Conlisk and D. Veley, 1985, "The Generation of Noise in Impinging Vortex Motion Past a Step", Phys. Fluids. Vol. 28 pp. 3004~3016.
4. M. R. Dhanak and R. Gundlapalli, 1992, "Flow Noise due to Interaction between an Eddy and a Forward Facing Step", International Symposium on Flow-Induced Vibration and Noise, pp. 11~22.
5. 김태룡, 이준신, 이선기, 1999, "고리 3호기 MSIV room의 고진동/소음 현상 원인 규명", 한전 전력연구원 TM99NS01P1999.138
6. 유기완, 이준신, 김범년, 김태룡, 1999, "모따기된 전향계단에 부딪치는 와류에 의한 유동소음", 1999년도 한국소음진동학회 추계학술대회 발표논문, pp. 101~122.
7. R. T. Hartlen and E. W. Barth, 1997, "Noise

from Main Steam Line Preliminary Report covering Key Findings", Plant Equipment Dynamics.