

# 열병합발전소 배기 덕트 시스템의 소음 진동 저감 Noise and vibration reductions in exhaust duct system of cogeneration power plants

김원현\* · 주원호\*\* · 배종국\*\*  
W.H. Kim, W.H. Joo and J.G. Bae

**Key Words :** Cogeneration power plants(열병합발전소), Exhaust duct(배기 덕트), Heat recovery steam generator(배열 회수보일러), Cavity mode, Baffle plate, Noise(소음), Vibration(진동), Water injection(물 첨가 분사)

## ABSTRACT

Noise and vibration was encountered in exhaust duct system which is connected with a gas turbine and a heat recovery steam generator(HRSG) of a cogeneration power plants. Especially, these problems occurred when water was added to the fuel injection to reduce NOx contents of the exhaust gas. Through the cavity mode analysis and measurements, It was concluded that these problems occurred due to the acoustic resonance between the duct cavity mode and the excitation force induced by turbulent gas flow during water injection. To reduce the noise and vibration, optimal baffle plate to change the cavity mode was installed inside of duct and noise levels of about 8 dB(A) are reduced in duct system. The effects of baffle plate and guide vane to the HRSG or inlet duct vibration were also evaluated and it was verified that there is no relation to the resonance phenomena. So, vibration of inlet duct was easily reduced by the reinforcement of structures.

## 1. 서 론

열병합발전소는 가스터빈(gas turbine : G/T)에서 1 차로 전기를 생산하고 고온의 연소 가스를 이용해 배열회수보일러(heat recovery steam generator : HRSG)로부터 증기를 발생시킨 다음 2 차로 스팀터빈에서 전기를 생산하는 고효율 발전소이다. 가스터빈으로부터 배출되는 고속, 고온의 연소 가스는 Fig. 1 에서 보듯이 배기 덕트 시스템을 통하여 배열회수보일러로 이송되거나 그냥 굴뚝(bypass stack)으로 배출될 수 있다. 이 때 가스터빈에서의 연소 가스에 의한 난류 유동이 가진원이 되어 배기 덕트 공명 모드(cavity mode)와의 공명에 의한 소음 진동 문제가 발생할 수 있으며 특히 배기 가스의 NOx 를 줄이기 위해 연료에 물을 첨가하여 연소시 그 현상이 자주 발생할 수 있다.

가스터빈의 연료로는 diesel, LNG, LSWR(low sulfur wax resin) 등이 사용될 수 있는데 비교적 저급 연료인 diesel 이나 LSWR 은 NOx 의 배출을 줄이기 위해 물 첨가 분사가 불가피 하다. 이 때 연소 조건이 달라지게 되어 그 가진 주파수가 변하게 되는데 배기 덕트의 공명 모드와 이 주파

수가 일치할 경우 진동을 수반한 소음이 발생하게 된다.[1]

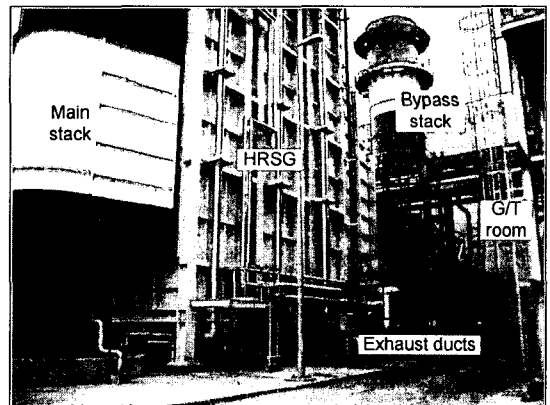


Fig. 1 Layout of cogeneration power plants

대상 열병합발전소의 배기 덕트 시스템은 Fig. 2 에서 보듯이 가스 터빈으로부터 배기 가스가 분출되는 diffuser, bypass stack 또는 HRSG 로의 분기를 결정하는 diverter duct 그리고 HRSG 전 열 관군 전체로 배기 가스를 분포 시키기 위한 inlet duct 로 구성되어 있다. Diverter duct 끝에는 damper 가 설치되어 있어 닫혀 있을 때는 bypass stack 으로 배기 가스가 배출되고 열려 있을 때는 HRSG 로 수송된다. 대상 발전소에는 총 2 기의 가스터빈이 있으며 배출되는 NOx 를 기준치인 60 ppm 으로 낮추기 위해 dieseline 연료에 물을 첨가하여 운전시 2 기의 배기 덕트에서

\* 현대중공업 선박해양연구소 동역학연구실  
E-mail : whkim@hhi.co.kr  
Tel : (052) 230-7404, Fax : (052) 230-5495

\*\* 현대중공업 선박해양연구소 동역학연구실

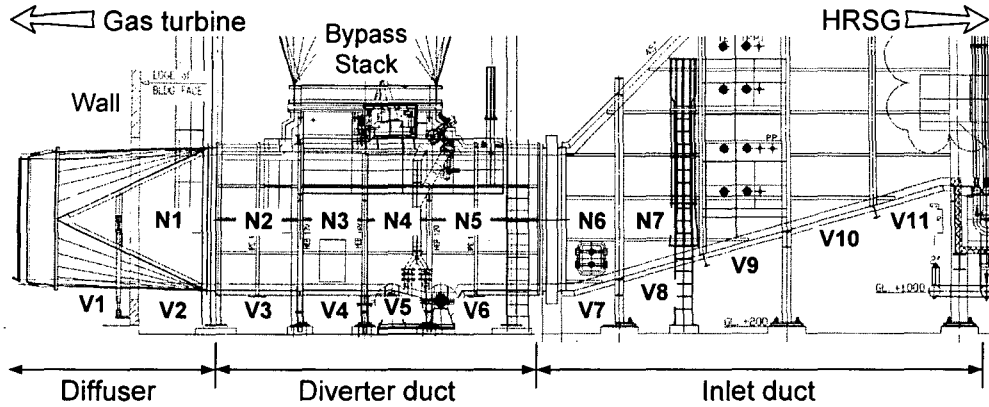


Fig. 2 Arrangement of exhaust duct system  
(N#: location of noise measurement, V#: location of vibration measurement)

동일한 소음 진동 현상이 발생하였고 허용치인 85 dB(A)를 초과하였다. 문제가 되는 주파수 성분은 100 Hz 이며 base load 인 45 MW 에서 주로 발생하였다. 이에 해석과 계측을 통한 소음 진동 발생 원인을 파악하고 이를 줄이기 위한 대책을 강구하였다.

## 2. Cavity mode 해석 및 baffle plate

문제 발생 초기에 있어서, 가스터빈에서의 물체가 분사 연소로 인한 난류 유동이 기진원이 되어 배기 덕트의 기하학적 형상에 의해 결정되는 공명 모드(cavity mode)와의 공명을 의심하였다. 단면이 사각형인 덕트와 같이 비교적 간단한 형상에 대한 공명 주파수는 식 (1)로 쉽게 구할 수 있으나[2] 본 연구에서는 약 500 도의 배기 가스 온도를 고려하여 diffuser 에 대한 cavity mode 해석을 상용 해석 프로그램인 MSC/NASTRAN 으로 수행하였다.

$$\frac{c}{2} \sqrt{\left( \frac{i^2}{L_1^2} + \frac{j^2}{L_2^2} + \frac{k^2}{L_3^2} \right)} \quad i, j, k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Fig. 3 에 해석 결과를 나타내었으며 그림에서 보듯이 문제가 되는 주파수에 근접한 97.1 Hz 에서 강한 소음 및 진동을 유발시킬 수 있는 상하 또는 좌우 방향의 공명 모드가 있음을 확인하였다. 이 해석에서 41.6 mm/s 에 이르는 배기 가스의 유동 속도는 고려되지 않았으며 이를 고려할 경우 100 Hz 에 더욱 근접한 주파수가 얻어질 것으로 예상되었다. 이러한 해석 결과와 당사의 경험[1]

을 바탕으로 대상 배기 덕트에서의 소음 및 진동은 물체가 분사시의 난류 유동으로 인한 기진원과 덕트 공명 모드와의 공명에 의한 소음 진동 현상으로 판단하였다.

공명에 의한 소음 진동을 저감 시키는 방법으로 기진원의 가진 주파수를 변경시키는 방법과 덕트의 cavity mode 를 변경시키는 방법이 있을 수 있다. 이 중 가진 주파수를 변경하기 위해서는 물체가 량을 조절하거나 가스터빈 내의 연소기를 수정하는 방법이 있을 수 있으나 앞에서 언급하였듯이 유해 물질의 배출량 제한이나 가스터빈 성능에 영향을 줄 수 있으므로 그 적용이 거의 불가능하다. 덕트의 공명 모드를 변경시키는 방법으로는 가장 좋은 것이 덕트의 치수(크기)를 수정하는 것이 있을 수 있으나 대상 발전소와 같이 이미 bypass stack 까지 설치된 상태에서는 덕트의 교체가 어려우므로 차선책으로써 baffle plate 를 이용한 덕트의 공명 모드 변경 방법이 제시되었고 최종적으로 적용되었다.

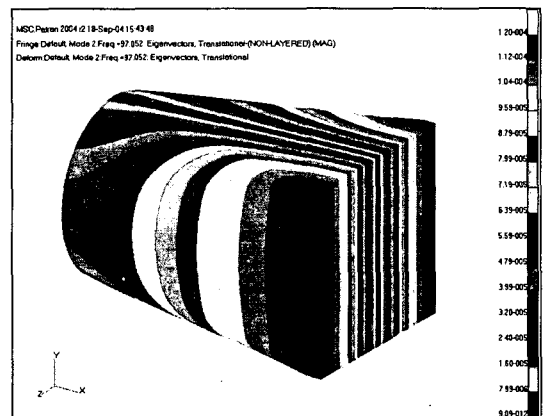


Fig. 3 Cavity mode of diffuser duct (97.1 Hz)

설치된 baffle plate 는 Fig. 4 와 5 에서 보듯이 정상파(standing wave)를 가로질러 대상 공명 모드를 변경시킬 수 있도록 그 단면 형상이 우물 정(井)자이고 diffuser 를 포함하여 diverter duct 끝단 까지 설치하였다.

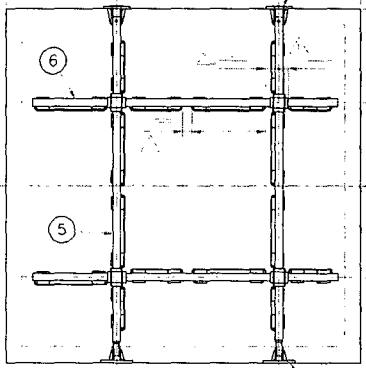


Fig. 4 Section shape of baffle plate

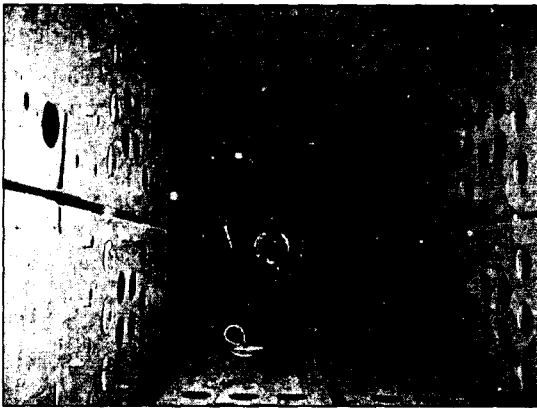


Fig. 5 Actual baffle plate

### 3. 소음 진동 계측

#### 3.1 Baffle plate 효과 검증 계측

설치된 baffle plate 의 소음 진동 저감 효과를 검증하기 위하여 대상 배기 덕트에 대한 계측을 수행하였다. 계측 위치는 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 소음은 덕트 측면과 지면에서 약 1 m 떨어진 곳에서, 진동은 덕트 바닥의 외판에서 주로 계측하였다.

앞에서 언급하였듯이 대상 덕트에서의 소음 진동 현상은 부하 및 물 첨가 분사량에 따라 달라지므로 Table 1 에 정리한 여러 조건(부하, 물 첨가 분사량)에서 계측을 수행하였다.

Table 1 Operation conditions for measurement

Load	Fuel : Water	Nox
45 MW	1 : 0.7	60 ppm
	1 : 0.4	120 ppm
30 MW	1 : 0.6	60 ppm

Fig. 6 과 7 에 각 위치 및 조건에서의 소음 진동 계측 결과를 나타내었다. 그림에서 보듯이 진동의 경우는 bypass stack 바로 밑의 diverter duct V4 위치와 inlet duct 입구부인 V7 위치에서 가장 크게 발생하고 있었다. 또한 45 MW, 120 ppm 조건이나 30 MW, 60 ppm 조건에서는 진동이 크지 않음을 알 수 있다. 즉 진동 현상은 base load 인 45 MW, 그리고 NOx 의 기준량인 60 ppm 을 맞추기 위해 물 첨가 분사를 할 경우에만 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 7 의 소음 계측 결과에서도 동일하게 나타나고 있으며 모든 위치에서 문제가 없을 때보다 약 6 dB(A) 이상 크게 나타나고 있다.

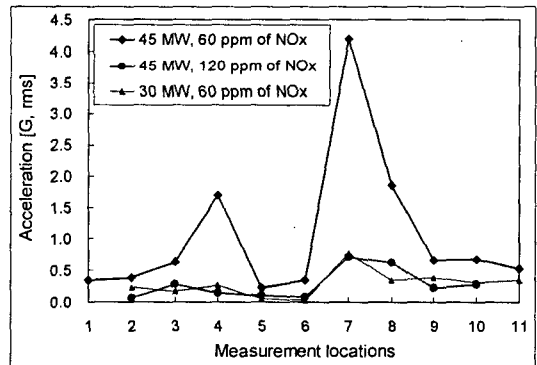


Fig. 6 Results of vibration measurement

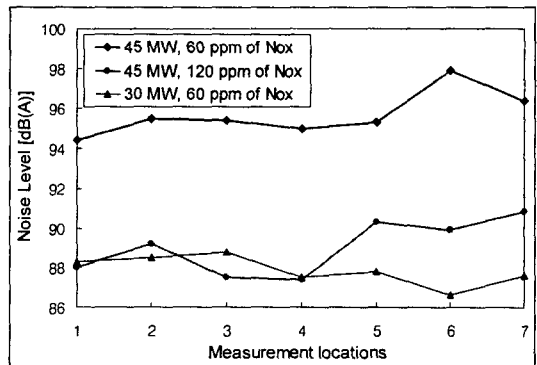


Fig. 7 Results of noise measurement

이러한 소음 진동 현상의 주파수 특성을 파악해

보기 위해 진동이 가장 크게 나타나고 있는 V7 위치에서의 각 조건에 대한 진동 스펙트럼을 Fig. 8 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 문제가 되는 운전 조건에서 진동이 급격하게 증가하며 그 성분은 100 Hz 이다. 이에 반해 30 MW, 60 ppm의 경우는 95 Hz, 45 MW, 120 ppm은 102 Hz로서 지배 주파수가 다를 수 있다.

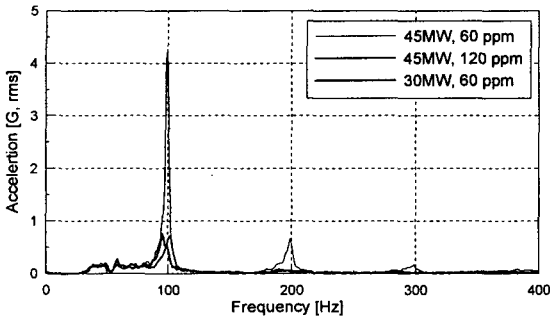
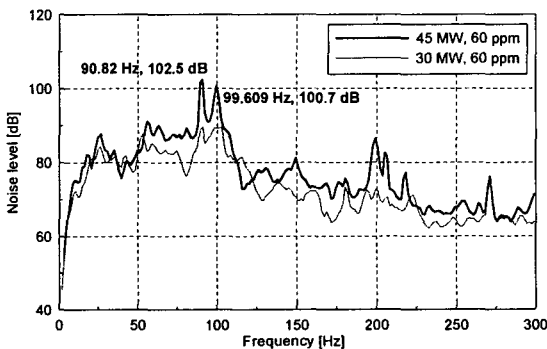
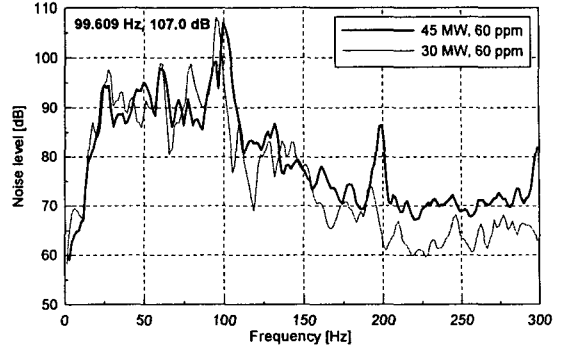


Fig. 8 Vibration spectrum of V7 location

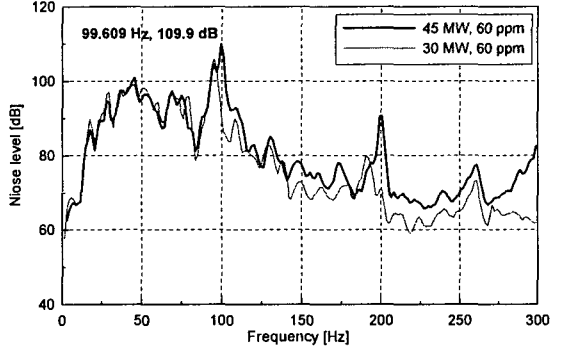
Fig. 9 에는 건물(G/T room) 내의 diffuser 옆, diverter duct 의 N4 위치, 그리고 inlet duct 입구의 N6 위치에서의 협대협(narrow band) 소음 계측 결과를 나타내었다. 문제가 되는 45 MW, 60 ppm 조건을 보면, 건물내 diffuser 에서는 100 dB 이상의 가스터빈 1 차 회전수 성분(5400 rpm, 90 Hz)과 100 Hz 가진 성분이 동시에 나타나고 있으나 90 Hz 성분은 외부 덕트로 전달되지 않음을 알 수 있다. 그러나 100 Hz 성분은 diverter duct 와 inlet duct 로 진행하면서 오히려 더 증폭이 됨을 알 수 있다. 이에 반해 30 MW, 60 ppm 조건에서는 1 차 회전수 성분과 약 95 Hz 에서 102 Hz 까지 넓은 범위의 주파수 성분이 있으나 그 크기가 크지 않고 덕트의 공명 모드와 공명을 일으키지 않고 있다.



(a) Diffuser(inner wall)



(b) Diverter duct(N4)



(c) HRS inlet duct(N6)

Fig. 9 Noise measurement(narrow band)

이상의 계측은 baffle plate 가 이미 설치되어 있는 상태에서 수행한 것인데 결과에서 보듯이 여전히 100 Hz 에서 소음 및 진동이 크게 나타나고 있어 baffle plate 의 설치 효과, 즉 공명 모드의 변경 효과가 거의 나타나지 않는 것으로 보인다. 이에 대한 보다 정확한 분석을 위하여 Table 2 에 baffle plate 를 설치하기 전에 수행된 타 기관의 계측 결과를 당사의 계측 결과와 100 Hz 성분에 대해서만 비교하였다.

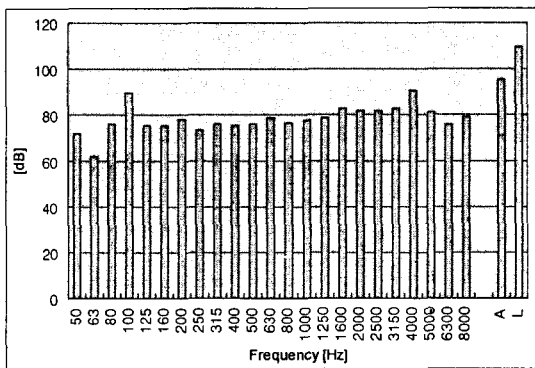
Table 2 Comparison of noise reduction

	기관 1	기관 2	기관 3	HMRI
Load (MW)	48	40	48	45
NOx (ppm)	60	60	60	60
Linear (dB)	115	-	-	107
Octave (dB(A))	-	97.5	83	90
Baffle	X	X	O	O

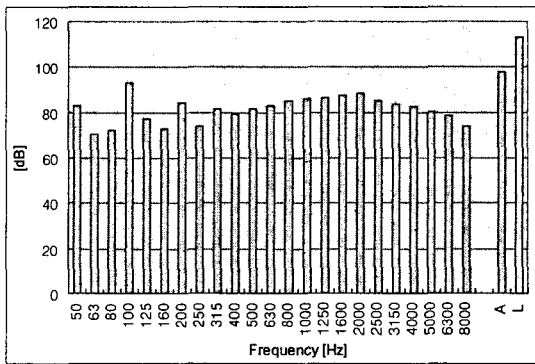
부하에서 약간의 차이는 있지만 결과에서 보듯이 목적으로 한 공명 주파수에서는 소음이 모두

감소하여 baffle plate 의 효과가 있음을 알 수 있다.

그럼에도 불구하고 전체 진동 및 소음의 감소 효과가 잘 나타나지 않는 이유에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 사실을 확인하였다. Fig. 10 에서 보듯이 공명에 의한 소음 현상이 발생하지 않는 건물내 diffuser 에서의 1/3 옥타브 계측 결과와는 달리 inlet duct 에서의 소음 계측 결과에서는 1 kHz 이상의 성분들이 전체적으로 증가하였고 이러한 영향이 전체 소음 수준(overall value) 에는 변화가 없게 하였음을 알 수 있다.



(a) Diffuser(inner wall)



(b) HRSG inlet duct

Fig. 10 Noise measurement(octave band)

이러한 현상의 원인으로는 배기 가스의 흐름을 크게 방해하지 않기 위하여 뚫어놓은 구멍(120 mm), baffle plate 의 끝단, bypass stack 으로의 연소 가스 유동을 원활하게 하기 위해 diverter duct 내에 설치된 guide vane 등이 2 차로 난류 유동을 발생시키는 것으로 판단하였다.

### 3.2 Baffle plate 의 최적 설치

앞에서 언급한 2 차 영향을 제거하고 최적의

baffle plate 설치 조건을 파악하기 위하여 plate 의 구멍을 줄이고(120 mm → 40 mm), 우물 정(井)자의 형태로 설치된 baffle 의 한 면씩을 제거하며 소음 진동 변화를 계측하였다. 또한 guide vane 의 유무에 따른 변화도 계측하였다. Table 3 에 그 계측 조건을 정리하였다.

Table 3 Test for optimal operation condition

Measurement Condition #	Baffle shape	Hole size	Guide vane
#1	#	120 mm	O
#2	井	40 mm	O
#3	┣	40 mm	O
#4	┣	40 mm	X
#5	None	None	X

Fig. 11 에는 동일한 계측 위치에서의 소음을 각 계측 조건에 따라 나타내었다. 결과에서 보듯이 baffle plate 를 모두 제거하였을 때(#5 조건) 소음이 가장 크게 발생하였으며 대상 배기 덕트에서의 소음 진동은 공명현상에 의한 것임을 다시 확인할 수 있었다. 최적 baffle plate 설치 조건으로는 우물 정자인 #1 조건 보다 비대칭 십자형인 #4 조건이 소음 저감 효과가 큼을 알 수 있다. 또한 guide vane 의 제거시 소음 저감 효과가 조금 더 큰 것으로 나타나 최종적으로 guide vane 이 없는 상태에서 비대칭 십자형 baffle plate 를 적용하였다.

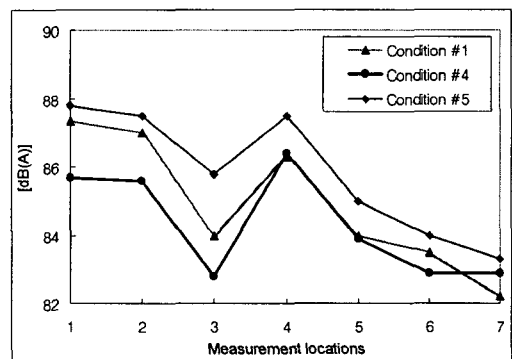


Fig. 11 Effects of noise reduction

참고로 위 계측은 baffle plate 외에 추가로 허용치 이내로의 소음 저감을 위해 diverter duct 주변에 방음용 enclosure 를 설치한 후에 수행된 것이다. 소음 계측은 덕트와 방음벽 사이에서 수행되었으며 위 계측 결과로 볼 때 baffle plate 를

설치하지 않으면 역시 허용치를 초과하는 것을 알 수 있다.

#### 4. Inlet duct 의 진동 저감 방안

HRSG inlet duct 는 Fig. 2 에 보인 바와 같이 diffuser 나 diverter duct 와는 단면 치수가 다르며 Fig. 6 의 진동 계측 결과에서 보듯이 V7 위치 이후에서는 급격하게 감소함을 볼 때 공명에 의한 영향이 적은 것으로 판단하였다. 이러한 결과는 baffle plate 의 최적 설치 조건을 파악하기 위한 여러 조건에서의 계측 결과에서 덕트 내의 baffle plate 나 guide vane 유무가 inlet duct 나 HRSG 의 진동 소음에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것으로부터도 쉽게 얻을 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 inlet duct 에서의 진동은 외판의 보강과 덕트 내의 claddings 에 shim plate 를 보강함으로써 쉽게 저감 시킬 수 있었으며 그 결과를 Fig. 12 에 나타내었다. 동일한 위치인 Fig. 8 의 결과와 비교해 볼 때 약 10% 수준으로 저감 되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 14 에 보인 바와 같이 diverter duct 의 외판 진동도 크게 감소하였음을 알 수 있다.

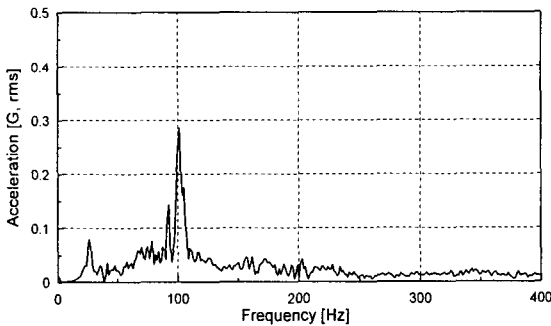


Fig. 12 Vibration spectrum at V7 location (after reinforcement)

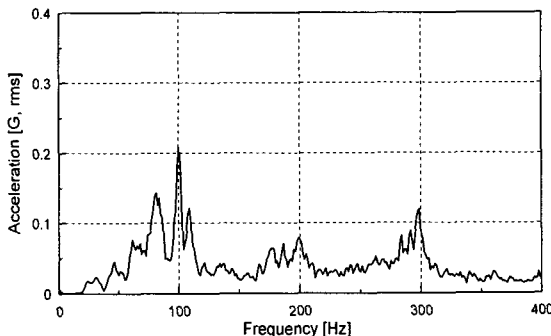


Fig. 13 Vibration spectrum at V4 location (after baffle plate and reinforcement)

#### 5. 결론

열병합발전소 배기 덕트 시스템에서 물 첨가 분사시의 연소 가스 난류 유동에 의한 가진원과 diffuser 및 diverter duct cavity mode 와의 공명에 의한 소음 진동이 발생하였다. 대상 배기 덕트에서의 소음 진동을 저감시키기 위해 덕트의 cavity mode 를 변경시키는 최적의 baffle plate 가 설치되었으며 그 결과로 소음 저감 효과를 얻을 수 있었다. 또한 inlet duct 등에서의 진동은 외판 및 덕트 내부를 보강함으로써 진동 수준을 크게 낮출 수 있었으며 공명에 의한 덕트에서의 진동 소음이 HRSG 의 구조 안전성에는 영향을 미치지 않는다는 것을 계측을 통하여 규명하였다.

#### 참고문헌

- [1] W.H.Kim, J.G.Bae, "The countermeasure for the noise and vibration of combustion turbine exhaust gas duct", Internoise 2000 proceedings, 2000.
- [2] R.D.Blevins, *Formulars for Natural Frequency and Mode Shape*, Van Nostrand Reinhold Co. Inc., 1979.
- [3] J.G.Bae, W.H.Kim, "The noise and vibration measurement of exhaust duct in Sithe CCP", HMRI Technical Report, HMRI-99-09-R174, 1999.
- [4] W.H.Kim, W.H.Joo, "Noise and Vibration Measurements at Coloane-B Power Station, Macau" HMRI Technical Report HMRI-02-12-R350, 2002