

모드해석을 이용한 플루가스 냉각기의 진동 저감 방법에 관한 연구

A Study on the Vibration Reduction of Flue Gas Cooler Using Modal Analysis

이부윤¹, 김원진^{1,✉}
Boo Youn Lee¹ and Won Jin Kim^{2,✉}

¹ 계명대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung Univ.)
✉ Corresponding author: wjkim@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5265

Manuscript received: 2011.8.26 / Revised: 2012.2.6 / Accepted: 2012.3.12

In this work, vibration characteristics of a flue gas cooler(FGC) for a heavy oil upgrading are experimentally analyzed and an effective method is proposed to reduce the vibration level. Firstly, the vibration under the operation condition of the FGC is measured and analyzed to identify the generation phenomena of vibration. And the displacement of the outer wall of the FGC is also analyzed to identify dominant frequencies of vibration. Secondly, an effective design to reduce the vibration is suggested by using the modal analysis. Consequently an improved design of the FGC gas cooler, which has lower vibration level, is obtained and then verified through the analysis and test.

Key Words: Modal Analysis (모드해석), Flue Gas Cooler (플루가스 냉각기), Natural Frequency (고유진동수)

1. 서론

기계 구조물의 진동은 수명 및 안전성과 직접적으로 연관되므로 구조물의 진동을 저감시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 구조물 또는 기계요소가 외력에 의해 가진되는 경우에 공진이 발생할 수 있으며, 이는 구조물에 치명적인 영향을 미치게 된다. 또한 대형 구조물에서 발생하는 진동은 수명 및 내구성을 단축시키고, 작업자들에게 불안감을 줄 수 있다. 기계 구조물 중에서 증질유 분해시설의 가스 냉각기(FGC : flue gas cooler)는 지속적으로 가동되며, 가스 냉각기 내부에는 운전조건에 따라 일정한 유속으로 플루가스가 흐른다. 이때, 배관뭉침 사이를 통과하여 흐르는 플루가스는 마찰과 유속에 의하여 와류가 발생하게 되고, 이 진동은 배관을 통하여 전체 구조

물을 가진한다. 이러한 계의 진동을 제어하는 방법으로는 주로 감쇠재료의 사용으로 진동을 제어하는 방법이 일반화되어 있다. 그러나 감쇠재료를 사용하여 진동을 제어하는 경우에는 계의 특성이나 규모 등에 따라 많은 제약 요소가 따른다. 특히 구조물의 규모가 커지거나 복잡해지면 제어 위치 선정에도 어려움이 따르며 그 효과도 기대하기 어렵다. 두 번째 방법으로 기계 구조물의 설계를 변경하는 것으로 구조물의 고유진동수를 피해서 가진하는 방법과 계의 특성을 조절하여 고유진동수를 제어하는 방법이 있다. 일반적으로 구조물의 특성상 가진력을 변경하는 것이 어려운 경우가 많다. 그러나 구조물의 강성 및 질량을 제어할 경우에는 고유진동수의 변화를 가져올 수 있으며, 가진력과 고유진동수의 회피를 통하여 진동 저감 효과를 얻을 수 있다. 구조물의 설계변경을 위하여

첫 단계로 구조물의 동특성을 분석하는 것이며, 가장 보편적으로 계의 동특성을 분석하는 방법은 모드해석을 이용하는 것이다.

진동을 측정하여 진동 원인을 규명하고, 모드 해석을 통하여 구조물의 진동을 저감시킨 연구 사례로는 발전소에서 운전되고 있는 디젤 엔진에서 발생된 고진동의 원인 분석과 대책 수립을 위한 시험 및 해석, 대책 수립과 진동 저감 효과에 대한 연구¹가 있다. 또한 국내 양수발전소에 설치된 펌프-터빈 런너(runner)에 대한 모드해석을 수행하여 진동특성을 조사한 연구²가 있으며, 당진 화력발전소의 3, 4 호기에 설치된 800 kV 가스절연차단기(GIS)의 모드해석을 실시하고, 그 결과를 이용하여 내진에 대한 과도응답특성을 확인한 연구³도 있다.

본 연구에서는 정유사의 반응기 1 대와 재생기 2 대로 구성되어 있는 중질유 분해시설의 가스 냉각기를 대상으로 운전 중에 발생하는 진동을 저감시키기 위한 개선안을 제안하고, 이에 대한 검증 을 하였다. 먼저 진동 발생 현상을 분석하기 위하여 플루가스 냉각기 외벽의 진동을 측정하고, 주파수 분석을 통하여 주요 주파수 성분을 규명하였다. 또한 모드해석을 사용하여 구조물의 동특성을 분석하였으며, 이 결과를 바탕으로 진동의 취약부를 규명하고, 기존 구조물에서 진동을 저감시키기 위한 설계 개선안을 제시하였다. 마지막으로 개선안에 대한 모드해석을 수행하였으며, 이를 검증하기 위하여 개선된 모델의 진동을 측정하여 진동 저감 성능을 평가하였다.

2. 플루가스 냉각기의 진동 현상 분석

중질유 분해시설의 가동 중에 플루가스 냉각기에서 발생하는 진동현상을 분석하기 위하여 외벽의 진동을 측정하고, 주파수 분석을 통하여 주요 주파수 성분을 규명하였다. 진동 측정위치는 Fig. 1 과 같이 냉각기 전면과 후면의 4 개 지점에서 외벽의 수직방향으로 가속도계를 부착하여 가속도 신호를 측정하였다. 이때 주파수 범위는 0~1,000 Hz, 주파수 분해능(frequency resolution)은 0.16 Hz 로 설정하였다. 대형 구조물인 냉각기의 안정성을 평가하기 위하여 진동변위를 대상으로 평가하였다. 진동변위 분석을 위하여 측정위치에 따른 가속도 신호를 변위 신호로 변환하였으며, 측정결과는 Fig. 2 와 같이 진동변위의 스펙트럼(spectrum)으로 나타 내었다.

결과를 보면, 30 Hz 이하의 저주파수 성분이 우세한 것을 알 수 있다. Table 1 은 각 측정위치에서 변위레벨의 순위에 따른 주파수 성분을 정리한 것이다. 전/후면의 외벽에서 동일하게 입구관(inlet duct) 하단(전면 2 번, 후면 1 번 위치)의 진동변위가 상대적으로 크게 발생하며, 모든 측정위치에서 6.5, 10.2~10.9, 11.8 Hz 의 진동주파수가 주요 성분으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Dominant frequency components and displacement levels on the front and rear side walls

Measurement Point	Dominant Frequency [Hz]	Displacement Level [μ m]	Overall Level (≤ 100 Hz) [μ m]	
Front side wall	1	10.94	8.07	22.00
		11.41	6.88	
		11.88	4.72	
	2	6.56	19.61	54.70
		6.25	19.17	
		11.88	7.75	
	3	6.56	12.89	33.14
		10.16	5.07	
		11.88	5.02	
	4	12.03	3.41	12.03
		6.56	1.95	
		6.25	1.87	
Rear side wall	1	11.25	20.33	49.44
		10.16	9.12	
		6.56	8.28	
	2	11.25	11.06	32.65
		12.03	8.31	
		10.16	6.35	
	3	6.56	9.14	29.16
		10.16	5.82	
		11.41	6.02	
	4	11.72	9.03	27.92
		11.09	8.06	
		10.16	5.50	

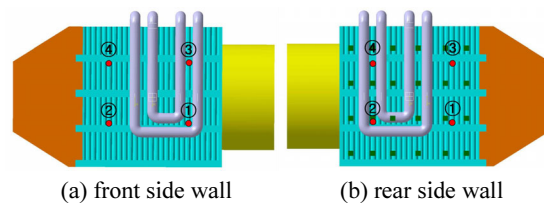


Fig. 1 Measurement points of the FGC

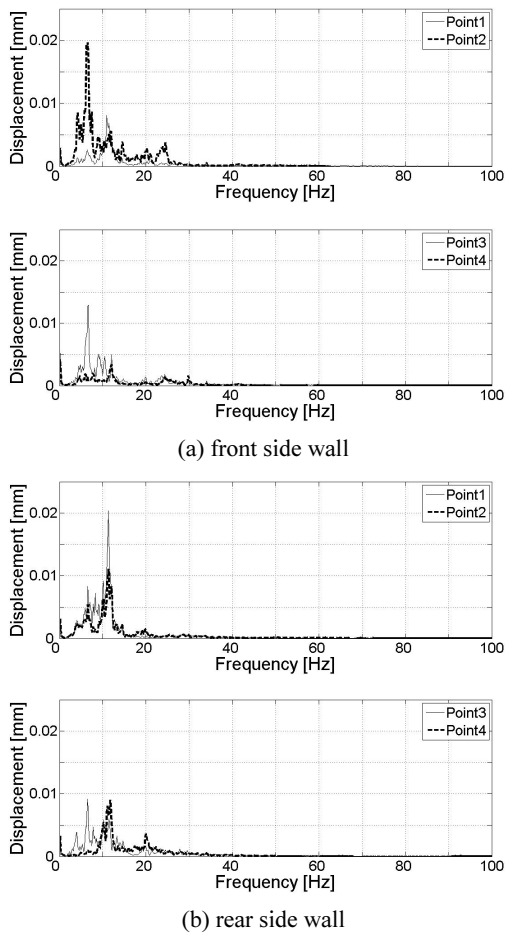


Fig. 2 Displacement levels of the FGC on the outer walls

3. 플루가스 냉각기의 모드해석

3.1 기존 설계의 모드해석

3.1.1 유한요소 모델링

기존 설계안에 대한 모드해석을 통하여 플루가스 냉각기의 동특성을 규명하고, 앞 절의 진동 측정결과와 연계하여 해석결과를 분석한다. 이를 바탕으로 진동저감에 효과적인 설계 개선안을 제시하고자 한다. 진동 모드해석은 범용 유한요소해석 프로그램(ANSYS)으로 수행하였다.

Fig. 3 은 냉각기 전체 구조의 유한요소 모델과 각 부분의 세부 명칭을 나타낸다. 냉각기 전체 구조를 구성하는 벽과 입구관, 복사 챔버(radiant chamber), 과열기 배관(superheater tubes), 증기발생기 배관(steam generator tubes), 지지대(supporter), 벽스테인(buckstay)를 포함한 보강 부재 등을 유한요

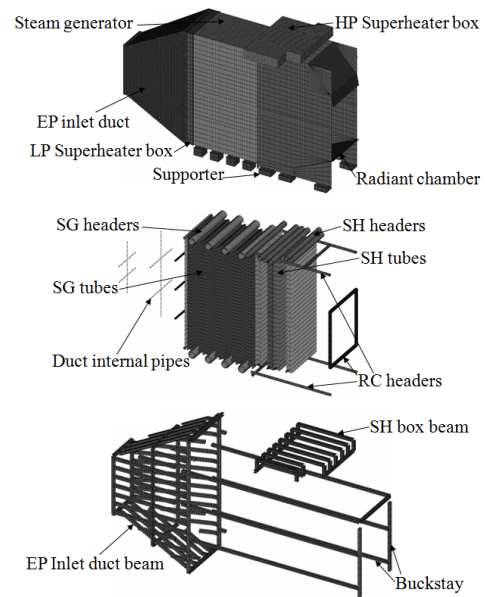


Fig. 3 Finite element model of the original FGC

소로 모델링하였다. 휘관(finned-tube)으로 이루어진 복사 챔버, 증기발생기 벽면 배관과 강관으로 구성된 입구관, 과열기 덮개 등은 4 절점 선형 쉘 요소(shell element)를 사용하였다. 그리고 외부의 철골구조물인 입구관의 지지대, 벽스테인, 과열기 덮개의 지지대 등은 2 절점 선형 보 요소(beam element)를 사용하였으며, 과열기와 증기발생기의 배관 및 헤더(header), 복사 챔버의 헤더 등은 2 절점 선형 파이프 요소(pipe element)로 모델링하였다.

플루가스 냉각기의 운전 조건(operating condition)에서 배관 및 헤더의 질량을 고려하기 위하여 등가밀도(equivalent density)의 계산이 필요하다. 증기 드럼(steam drum)에서 냉각기 헤더로 연결되는 파이프는 무게를 계산하여 해당 절점에 무게를 분배하였다. 전체 유한요소 모델의 절점 개수는 102,935 개이고, 요소 개수는 98,304 개이다. 각 부분의 물성치는 ASME Code⁴에서 규정한 물성치를 적용하고, 복사 챔버와 증기 발생기의 벽면 배관을 쉘요소로 모델링하기 위하여 직교 이방성(orthotropic) 재료의 물성치와 등가두께를 계산하였다. 계산된 탄성계수(Young's modulus)와 전단 탄성계수(shear modulus)은 해당 요소에 국부 좌표계를 설정하여 적용하였다.

유한요소로 모델링된 각 부분들은 실제 조건을 고려하여 경계조건을 부여하였다. 과열기 배관과

증기발생기 배관 등은 지면으로부터 수직으로 4.85 m, 7.45 m, 10.05 m 위치에 배관 묶음(bundle)을 고정하는 방진장치(anti-vibration device)가 설치되어 있고, 과열기 헤더의 경우에는 복사 챔버의 상부 측면에 위치한 헤더와 결합되어 있다. 이 위치의 절점들은 변위 자유도를 선형 연계시키는 방식으로 각 부분들을 결합하였다. 그리고 가스 냉각기가 설치되는 지지대의 하단부는 바닥에 볼트로 체결되므로 지지대의 가장 아래 부분의 모든 절점들의 자유도를 모두 구속하였다.

3.1.2 해석 결과

모드해석을 수행하여 냉각기의 동적 특성인 고유진동수와 모드형상을 분석하였다. 모드해석의 주파수 범위는 0~35 Hz 로 설정하고, 블록 란초스 방법⁵(Block Lanczos method)을 이용하여 모드를 추출하였다. Table 2 에는 냉각기의 고유진동수와 모드

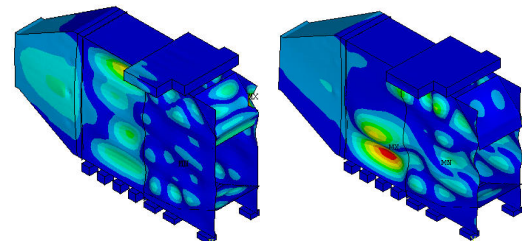
Table 2 Modal analysis results of the original model

Natural Freq. (Hz)	Mode Shape
0.99	Bending of FGC side wall & LP SH
1.07	Bending of FGC side wall
2.01	Bending of EP inlet duct and LP SH
2.21	Bending of FGC side wall
2.69	Bending of RC bottom & SH3 tubes
2.74	Bending of RC top & SH1,SH2 tubes
3.01	Bending of RC side wall & SH1 tubes
3.23	Bending of RC side wall & SH2 tubes
6.09	Bending of HP SH box
7.01	Bending of SG side wall
7.46	Local deformation FGC side wall
7.68	Bending of HP SH box
8.65	Local deformation of RC and FGC side wall
8.81	Local deformation of RC and FGC side wall
8.90	Local deformation of FGC side wall & rigid rotation of whole tubes in gas flow direction
11.50	Local deformation of FGC side wall & bending of lower parts of SH tubes
14.13	Bending of SH box
16.73	Bending of EP inlet duct
23.96	Local deformation of HP SH box, Translation in vertical direction & bending of SH tubes

형상을 나타내었으며, Table 3 에는 진동변위의 주요 주파수 성분에 대한 측정 및 해석 결과의 진동 변위를 비교하여 나타내었다. 해석결과를 보면, Fig. 4(a)에서 7.01 Hz 의 모드형상은 진동변위의 주요 주파수 성분인 6.5 Hz 의 진동 발생위치와 비교하여 유사한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 4(b)에서 8.9 Hz 의 모드형상은 진동변위 분석에서 10.2, 10.9 Hz 주파수 성분의 발생위치와 동일하게 전체적으로 냉각기 벽 면에서 굽힘 모드가 발생하고, 내부의 모든 배관들이 가스의 유동 방향으로 진동하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3 Comparison of the displacement levels of test and analysis for dominant frequency components

Measurement Point		Test	Analysis	Test	Analysis
		6.5 Hz [μ m]	7.01 Hz [mm]	10.2, 10.9 Hz [μ m]	8.09 Hz [mm]
Front side wall	1	2.6	0.12	8.07	0.20
	2	19.61	0.35	4.07	0.22
	3	12.89	0.16	5.07	0.19
	4	1.95	0.08	0.56	0.28
Rear side wall	1	8.28	0.35	9.12	0.22
	2	5.43	0.12	6.35	0.20
	3	9.14	0.16	5.82	0.19
	4	1.07	0.08	5.50	0.30



(a) 7.01 Hz (b) 8.90 Hz
Fig. 4 Mode shapes of the original model

3.2 개선 설계의 모드해석

3.2.1 유한요소 모델링

플루가스 냉각기에서 발생하는 진동을 저감시키기 위하여 먼저 냉각기의 외벽에 수직 벽스테인을 설치하면 벽면 중앙부의 휨을 저감시킬 수 있다. 이를 통하여 진동변위의 주요 주파수인 6.5 Hz 성분의 저감 효과를 얻을 수 있다. 그리고 11.8 Hz

성분의 진동이 상대적으로 크게 발생하는 입구관의 외벽을 보강하였다. 기존의 방진장치는 배관 사이의 충격을 방지하는 역할만 하고, 배관 묶음의 전체 진동을 구속하는 역할을 하지 못하였다. 따라서 방진장치를 외벽 또는 내부 지지대 등과 체결하여 배관 묶음의 전체 진동을 저감시켰다. 또한 기존 과열기 구조를 3 모듈(module)에서 블록 타입(block type)의 4 모듈 구조로 변경하고, 과열기 배관의 재질을 변경하였다. Fig. 5 는 가스 냉각기에 수직 벽스테이를 보강한 유한요소 모델이다. 개선안의 유한요소 모델에서는 수직과 수평의 벽스테이가 교차되는 부분을 핀 조인트(pin joint) 조건으로 가정하여 변위를 선형 연계시키는 방식으로 해석을 수행하였다. 물성치는 기존 설계의 값을 적용하였다.

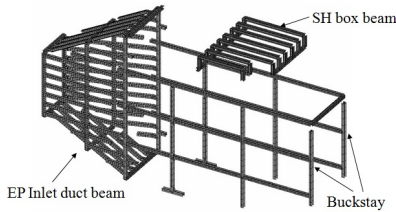


Fig. 5 Finite element model of the improved FGC

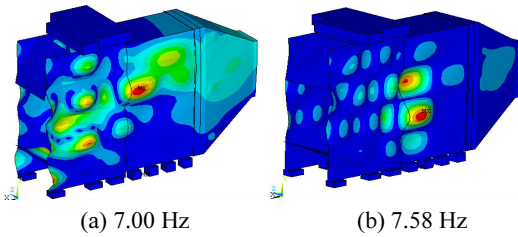


Fig. 6 Mode shapes of the improved model

3.2.2 해석 결과

기존 냉각기 양측 벽면의 진동변위 주요 주파수인 6.5 Hz 와 개선안의 해석 결과인 7.01 Hz 에서의 모드형상과 진동 발생위치가 상대적으로 유사하다는 결론이 나왔다. 이를 보완하기 위하여 수직 벽스테이를 추가하여 모드해석을 수행하였다. 주파수 범위 0~35 Hz 에서 모드해석을 수행하고, 설계 개선모델의 해석결과를 Table 4 에 정리하였다. Fig. 6 과 같이 냉각기의 외벽 보강에 의하여 외벽 중앙부에서 발생하는 국부 진동 모드는 7.58(9.56, 9.63) Hz 이고, 입구관의 벽면에서 발생하는 국부 진동 모드는 7.0(7.5) Hz 이다. 이때 배관들은 가스의 유동 방향으로 진동하지 않으며, 좌우 방향의

모드만 존재한다. 따라서 기존설계에서 발생하는 6.5 Hz 근방에서 양측 벽면의 중앙부 진동 모드는 개선안에서는 존재하지 않는다. 국부적으로 냉각기의 외벽에서 진동 모드가 존재하지만, 외벽 보강으로 인하여 9.7~14.0 Hz 사이에는 진동 모드가 존재하지 않는 것으로 나타났다.

Table 4 Modal analysis results of the improved model

Natural Freq. (Hz)	Mode Shape
1.54	Bending of FGC side wall & LP SH
1.78	Bending of FGC side wall
2.01	Bending of EP inlet duct and LP SH
2.75	Bending of RC top & SH1,SH2 tubes
6.10	Bending of HP SH box
7.00	Local deformation of EP inlet duct
7.01	Local deformation of RC side wall
7.51	Local deformation of EP inlet duct
7.58	Local deformation FGC side wall
8.24	Local deformation of RC side wall
9.24	Local deformation FGC side wall & bending of SH tubes
9.28	Bending of HP SH box & bending of SH tubes
9.56	Local deformation FGC side wall
9.63	Local deformation FGC side wall
14.46	Local deformation of FGC side wall & bending of SH tubes
16.56	Local deformation of FGC side wall & bending of SH tubes
16.69	Bending of EP inlet duct
18.29	Bending of EP inlet duct & bending of SH tubes
24.23	Local deformation of FGC side wall & Bending of SH box

4. 개선 설계에 대한 성능 평가

개선된 냉각기의 진동저감 성능을 확인하기 위한 평가 실험은 2 장에서의 진동분석 실험과 동일한 방법으로 실시하였다. Fig. 7 은 개선된 냉각기 외벽의 진동변위의 스펙트럼을 기존과 비교하여 나타내었다. 측정결과를 보면, 모든 외벽에서 기존과 동일하게 30 Hz 이하 주파수영역의 성분들이 우세하며, 기존과 비교하여 전체적으로 진동레벨

이 상당히 감소한 것을 확인할 수 있다.

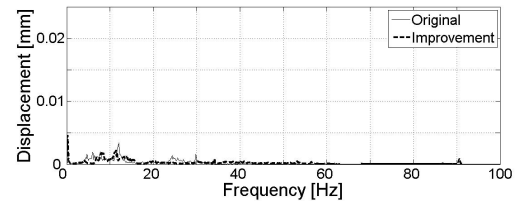
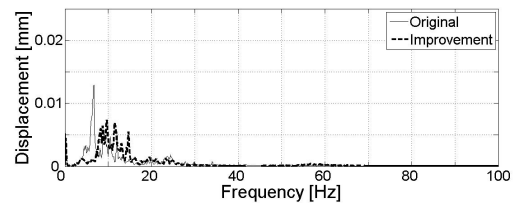
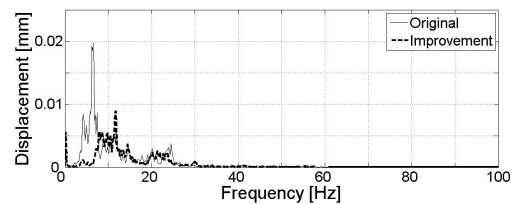
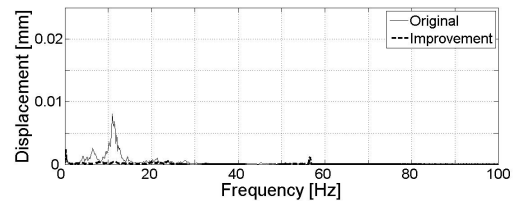
Table 5 와 6 은 냉각기 외벽의 각 측정위치에서 변위레벨의 크기에 따른 주파수 성분 및 전체 진동레벨을 정리한 것이다. 개선된 냉각기 진동변위의 주요 주파수 성분은 모든 외벽에서 동일하게 8.8, 10.5, 14.5 Hz 로 나타났다. 그리고 진동변위의 주요 성분을 포함하는 100 Hz 이하 주파수영역에서 전체 변위레벨(overall displacement level)을 비교해보면, 개선된 냉각기의 진동변위는 각각 3.36~28.75 μm 수준으로 기존의 12.13~54.7 μm 와 비교하여 개선 후에 전체적으로 변위레벨이 상당량 감소한 것을 확인할 수 있다. 특히 전면의 배출관(1 번 측정위치) 부분에서 개선된 냉각기의 진동레벨 저감율은 약 85 % 수준으로 가장 크게 나타났다.

Table 5 Dominant frequency components and displacement levels on the front and rear side walls

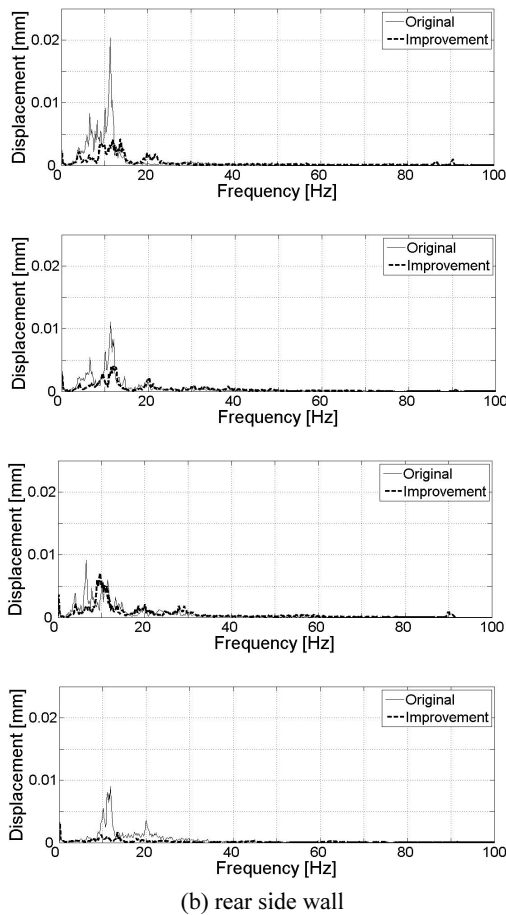
Measurement Point	Dominant Frequency [Hz]	Displacement Level [μm]	Overall Level ($\leq 100\text{Hz}$) [μm]	
Front side wall	1	10.80	0.48	3.36
		20.00	0.45	
		9.53	0.43	
	2	14.70	9.80	28.75
		10.90	8.16	
		13.40	7.62	
	3	14.40	6.20	26.30
		10.50	6.01	
		8.91	5.28	
	4	10.30	1.95	9.19
13.40		1.61		
8.75		1.23		
Rear side wall	1	13.10	3.80	16.20
		9.60	2.80	
		10.80	2.65	
	2	9.06	4.77	17.20
		12.20	3.15	
		14.50	2.10	
	3	11.00	5.78	19.60
		10.30	5.10	
		8.91	3.75	
	4	14.50	0.85	5.98
		10.50	0.74	
		22.20	0.73	

Table 6 Comparison of the overall displacement levels and reduction ratios

Measurement Position	Overall Level ($\leq 100\text{Hz}$)		Reduction Ratio [%]	
	Original FGC [μm]	Improved FGC [μm]		
Front side wall	1	22.00	3.36	84.73
	2	54.70	28.75	47.44
	3	33.14	26.30	20.64
	4	12.13	9.19	24.24
Rear side wall	1	49.44	16.20	67.23
	2	32.65	17.20	47.32
	3	29.16	19.60	32.78
	4	27.92	5.98	78.58



(a) front side wall



(b) rear side wall

Fig. 7 Comparison of the original and improved design for displacement levels

5. 결론

본 연구에서는 중질유 분해시설의 플루가스 냉각기에서 발생하는 진동을 저감하기 위하여 진동 변위를 분석하고, 모드해석을 통하여 기존설계에 대한 개선설계 안을 도출하였다. 그리고 개선모델을 적용한 상태에서 진동변위를 분석하므로 개선 효과를 검증하였다. 개선된 냉각기의 진동은 기존과 비교하여 전체적으로 진동레벨이 상당량 감소한 것을 확인할 수 있었다. 개선된 냉각기의 모든 측정위치에서 진동 저감율은 약 21~85 % 수준으로 크게 나타났다. 개선된 가스 냉각기의 진동변위는 기존과 동일하게 30 Hz 이하의 저주파수 영역의 성분들이 우세하였다. 또한 구조 보강으로 인하여 개선 냉각기의 진동변위의 주요 주파수 성분은

8.9, 10.9, 14.4 Hz 로 기존의 6.5, 10.2, 11.8 Hz 와 비교하여 고주파영역으로 이동한 것을 확인할 수 있었다. 모드해석을 이용하여 대형 구조물의 진동저감 설계 개선안을 수립하는 과정에서 유용한 정보를 도출하고, 보강을 통하여 구조물의 고유진동수를 변경하므로 상당량의 진동을 저감할 수 있었다.

참고문헌

1. Bae, Y. C., Kim, H. S., Lee, W. R., Lee, D. Y., and Kim, B. S., "Vibration Analysis and Reduction for Large-scale Diesel Engines," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 35, No. 10, pp. 1047-1052, 2011.
2. Ryu, S. J. and Ha, H. C., "Modal Analysis and Testing of a High Head Pump/Turbine Runner," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 8, No. 6, pp. 1062-1068, 1998.
3. Shin, I. H., Song, W. P., and Kweon, K. Y., "The Normal Mode Analysis of 800kV Gas Insulated Switchgear(GIS) for the Dangjin Thermal Plant," Proceedings of KIEE Annual Summer Conference, pp. 363-365, 1999.
4. ASME, "ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II Part D," 2007.
5. ANSYS Inc., "ANSYS User's Manual," 2010.