

원자력발전소 주증기관의 진동감쇠 연구

°김 연 환*, 김 종 엽*, 이 현*

(A Study on the Vibration Reduction Method for Main Steam Piping in Nuclear Power Plant)

(Yeon-Whan Kim, Jong-Yeob Kim, Hyun Lee)

1. 서론

원자력발전소의 주증기관은 증기발생기와 터빈을 연결하는 주요 계통으로서 여기서 발생하는 배관진동은 주요기기의 연결부, 밸브, 배관지지물과 건물 등에 복합적인 반복하중을 가하여 관련 지지물 및 구조물에 열화현상을 발생시켜 발전소의 안전운전에 심각한 영향을 초래할 가능성을 항상 내포하고 있다. 그럼에도 불구하고 배관진동 대책은 대부분 지지물을 추가로 설치하여 진동준위만 낮추고 있는 실정이다.⁽¹⁻⁸⁾ 따라서 구체적인 배관진동의 예측, 측정 및 평가, 감쇠방안에 이르는 종합적이고 체계적인 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 지지물의 열화현상 및 부분적인 파손으로 진동준위가 높아진 것으로 추정되는 원자력발전소 주증기관의 진동특성 및 요인을 분석하여 진동감쇠 방안을 도출하고 검증함으로써 배관 및 주변 구조물의 건전성을 확보하고 설비의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 이를 위하여 주증기관을 모델링하여 해석하였으며, 발전소의 기동 및 정상운전시의 진동준위를 측정하였다. 또한 발전소의 정지기간중 일부 배관계에 대한 실험적 모우드 해석을 수행하였다. 여러가지 진동감쇠 방안을 검토하여 탄성지지 및 에너지 흡수효과를 동시에 발휘할 수 있는 특수 지지물(WEARTM)을 설치하는 방안을 도출하였으며, 현장에 설치한 후 배관의 진동상태를 확인함으로써 효과적인 방안임을 검증하였다.

2. 주증기관의 모델링 및 해석

2.1 주증기관의 모델링

원자력발전소의 주증기관은 4개의 증기발생기로부터 발생한 258°C, 660psi의 증기를 balance header를 거쳐 고압터빈 입구까지 연결시켜 주는 배관구조물로서 직경 26인치의 탄소강(SA 155)으로 이루어져 있다. 이중에서 balance header에서 고압터빈 입구사이의 4개의 배관중 2번 배관계에 대한 해석모델의 형상 및 경계조건을 그림 1에 나타내었다.

2.2 주증기관 모우드 해석

주증기관의 동특성분석을 위하여 배관해석 전용코드인 PIPEPLUS를 사용하여 모우드 해석을 수행하였으며, 해석시 사용된 가정은 다음과 같다.

- Balance header와 터빈입구 노즐 끝단은 모든 자유도가 구속된 anchor로 가정한다.
 - Snubber는 모우드특성에 영향을 주지 않으며 모든 자유도를 허용한다.
 - Steam chest 지지물은 수직방향의 자유도만 구속한다.
 - Steam chest의 총무게는 18.1 톤이며 병진질량으로만 작용하고 회전 관성력은 무시한다.
- 해석결과는 표 1과 같으며, 복잡한 3차원의 모우드형상을 갖는 주증기관의 동특성 분석에 대한 편의성을 고려하여 배관부위별로 모우드 발생여부에 따라서 정리하였다. 표에서의 주요부

* 전력연구원 수화력발전연구실, 정회원

위는 balance header에서 시작한 “ㄷ” 배관부위, steam chest로 들어가는 수직 배관부위 및 steam chest에서 터빈입구 노즐까지의 배관부위이며 이중 관심대상은 첫번째 부위이며 그 부위에 대한 주 진동모우드는 그림 3-(a)와 같으며 그림 3-(b)은 진동감쇠장치를 설치시의 변경된 진동모우드를 보여준다.

3. 실험 및 고찰

3.1 진동신호 계측 및 분석방법

진동준위의 측정에는 발전소의 기동시 및 정상상태 기동시의 가속도 및 속도, 필요시 변위 등을 측정하였다. 또한 발전소 정지기간중 배관계에 대한 모우드 시험도 아울러 수행하였다.

모든 진동신호들은 현장에서 테이프레코더를 이용하여 2.5kHz 주파수 범위까지 취득하였으며, 가속도계는 고온용 magnetic base 를 이용하여 배관에 직접 부착하였다. 레코더로 부터 출력된 가속도 신호는 HP3565S front end를 통하여 A/D 변환 및 FFT 처리되어 컴퓨터로 입력되며, 입력된 데이터는 I-DEAS TDAS 소프트웨어에 의하여 시간영역 함수 또는 평균화된 auto spectrum, cross spectrum, coherence 함수 등으로 계산된다. 측정시스템의 흐름도는 그림 2와 같다.

3.2 배관계의 모우드 시험

배관계의 동특성을 파악하고 이론해석 모델의 타당성 검증을 위하여 배관계에 대한 모우드 시험을 수행하였다. 가진은 PCB사의 충격해머를 사용하였으며, 신호분석기는 B&K 2032를 사용하였다. 주파수 범위는 400Hz로 하였으며, 가진점을 고정하고 14개 지점에의 주파수응답함수를 구하였다. 모우드 해석 결과 확인된 주증기관의 고유진동수는 표 1과 같으며, 표에서 밑줄친 부분은 least squared complex exponential 알고리즘을 이용하여 진동모우드 형상이 확인된 경우로 그림 4에서 보는 바와 같이 mode indicator function의 값이 0이 되는 곳이 고유진동수에 해당한다. 배관의 ‘ㄷ’ 부위의 x방향의 4.1Hz의 고유진동 모우드는 그림 2-(a)와 비슷한 형태를 갖는다.

3.3 발전소 기동시 진동신호 분석

발전소 기동시 원자로 출력의 증가는 배관계 내

부를 흐르는 수증기의 유속과 직접 비례하기 때문에 유속의 증가에 따른 배관계의 진동주파수 변화 특성을 관찰하기 위하여 저출력 유지구간(20%, 57% 및 70%)에서 압력 및 가속도 변동신호를 측정하였다. 가속도의 측정점은 저출력 유지시간의 제한으로 4곳으로 하였으며, 압력변동 신호는 balance header 증양부와 steam chest valve 전단부에서 측정하였다. 진동레벨은 출력이 증가함에 따라 증기량이 증가하므로 진동이 증가하며, 이 중 70% 출력시 가장 진동준위가 높은 점에 대한 각 방향 가속도 신호의 주파수 분석 결과를 그림 5에 나타내었다.

표 2는 원자로 출력유지 구간별로 서로 다른 측정점에서 공통으로 나타나고 있는 가속도 및 압력 변동 신호의 peak 주파수 성분들을 방향별로 보여주고 있다. balance header 및 steam chest 위치에서 측정된 압력 변동성분은 전 라인에 대하여 출력의 증가에 상관없이 1.8 Hz와 3.7 Hz의 두 주파수에서 peak가 나타나며, 가속도 신호의 경우에는 상기 두 peak 주파수 성분 및 배관의 기본고유진동수(4.0 Hz)와 거의 일치하는 4.2 Hz 성분이 출력의 증가와 관계없이 전 배관에서 동일하게 발생하였다. 그러나 다른 주파수 성분들은 원자로 출력이 증가함에 따라서 측정 위치 및 방향에 따라서 변함을 보여주고 있다. 이것은 내부 유체유동에 의한 배관계의 유체 탄성진동(fluid elastic vibration) 현상의 일반적인 경향이다. 이러한 주파수 성분들은 가진원을 배관 내부의 불규칙한 난류유동이라고 가정하면, 배관의 고유진동수와 상관관계가 있는 것으로 추정된다.

3.4 정상운전시 진동신호 분석

정상운전(100% 출력)의 경우에는 진동주파수 및 진동치를 보다 상세하게 검토하기 위하여 배관계에 대한 가속도신호의 측정점들을 그림 6과 같이 15곳으로 증가하였다. 배관의 “ㄷ” 부위의 한 측정점에 대한 시간영역에서의 속도신호는 그림 7과 같으며, 주요 측정점들에 대한 속도 및 변위 신호의 rms 값 및 최대진폭(zero-to-peak)을 표 3에 나타내었다. 표로부터 배관의 “ㄷ” 부위의 진동준위가 전체적으로 가장 높은 것을 알 수 있으며, 이 결과는 진동속도에 대한 허용기준치와의 비교에 이용된다. 정상운전시 배관에 대한 측정부위별 주요 peak 주파수 성분들은 표 4에 정리되어 있다.

배관계의 가진원을 유체의 난류유동에 의한 broad-band 랜덤가진이라고 가정할 수 있으며, 표로부터 최저 peak 주파수 성분을 살펴보면 전반적으로 4~6Hz에서 나타나며, 이것은 모우드 시험에 의한 기본 주파수성분과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

3.5 이론 해석 모델의 검증

해석모델의 신뢰성을 검증하기 위하여, 해석적으로 구한 고유진동수를 모우드 시험 및 정상상태 출력시 측정된 가속도 신호의 peak 주파수 성분과 비교하였다. 모우드 시험의 경우 발전소 현장의 사정상 불가피하게 채택된 충격해머 가진방법의 사용으로 인하여 저주파수 대역(50 Hz 이하)에서는 배관계의 가진이 불충분하였다. 그러나 정상상태 출력시 배관계의 주 진동원(4~6Hz)은 일반적으로 배관계 내부를 흐르는 유체의 난류유동으로 인한 broad band random 가진에 의해 기인되므로 정상상태 출력시 가속도 응답의 spectrum으로부터 구한 peak 주파수 성분이 고유진동수와 거의 일치되는 것으로 판단되며, 이 값을 해석적으로 구한 고유진동 주파수와 비교함으로써 해석모델을 검증하였다. 표 5에서 해석적으로 구한 고유진동수와 모우드 시험결과와 비교하였다.

4. 진동감쇠 방안

일반적으로 구조물의 진동감소를 위하여 공학적으로 체계화되어 있는 방법으로는 크게 수동적인 방법과 능동적인 방법 두 가지로 나눌 수 있다. 수동적인 방법은 가진원의 변경, 진동 절연, inertia block, 진동흡수재, 감쇠기구 등을 이용하여 가진원 또는 대상구조물의 동특성을 근본적으로 변화시키는 방법이며, 능동적인 방법은 기계적 또는 전자기적 장치를 사용한 feedback control system을 구성하여 진동응답을 원하는 범위 이내로 강제적으로 제한시키는 방법으로서 하드웨어 구성방법에 따라 그 종류가 매우 다양하다. 그러나 능동적인 방법은 feedback control system 구성을 위한 비용의 증가, 독립된 전원제통 및 부가적인 공간의 필요성 등으로 인하여 수동적 방법의 적용이 어려운 특수한 경우에 한하여 적용되어진다.

상기의 여러가지 진동감쇠 방안과 주증기관 배관계의 현장 조사 결과, 설치비용 증가, 독립 전원 및 부가적인 설치공간 등이 필요한 능동적인 방법

의 사용은 불가능할 것으로 판단되어 본 연구에서는 수동적인 방법인 새로운 배관 지지물을 설치하여 진동을 감쇠시킬 방안을 마련하였다.

본 연구에서 설치키로 선정된 WEAR™(Wire Energy Absorbing Rope) restraint는 미국 ENID-INE 사에 의해 snubber의 단점을 해결하기 위하여 개발된 것으로, 탄성지지 및 에너지 흡수효과를 동시에 발휘할 수 있는, 즉 강성과 댐핑을 동시에 증가시켜 주는 새로운 배관지지물로서 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

- 압축 회전 전단 모우드에 대해 모두 적용가능
- 높은 에너지흡수율(댐핑율 최소 10%)
- 고온의 환경에 적용가능 (적용 온도범위 258°C)
- 순간적인 충격하중에 의한 영향 최소화
- 부식에 강함
- 주기적인 정비 보수가 거의 필요 없음

WEAR™의 설치위치는 기본 고유진동 모우드의 모달 변위가 최대로 예상되는 지점인 “c” 부위의 x 방향과 “c” 부위 경계부근의 z 방향 2곳으로 하였다. 계산된 배관의 강성값은 대략 20 kips 이하였으며, WEAR™의 강성은 이보다 큰 값으로 선정하여야 하므로 24 kips로 선정하였다. WEAR™의 presetting 값은 배관계의 열팽창 방향에 따라 인장 또는 압축상태를 감안하여

WEAR™를 설치한 경우에는 기본 고유진동수가 약 1.5배 정도 증가하는 결과를 얻을 수가 있으며, WEAR가 갖는 10 %이상의 댐핑율에 의한 부가적인 효과를 고려할 경우 적절한 진동감쇠 방안이 되는 것으로 판단된다. 기본 고유진동모우드 형상을 토대로 하여 최대 모우드 변위지점에 WEAR™를 설치한 결과, 표 6에서 보는 바와 같이 설치 이전의 경우에 비하여 진동속도치가 약 54% 정도 감소하였다. 또한 진동변위도 크게 줄었다.

WEAR™의 설치후의 배관건전성을 확인하기 위하여 배관응력 해석을 수행하여 지속하중조건(sustained load condition)과 열팽창조건(thermal expansion condition)에 대하여 발생응력이 허용응력을 초과하는지 여부를 검토하였으며, 진동감쇠장치 WEAR™의 설치전후의 고압터빈 노즐에 부과되는 하중을 비교 검토하였다. 그 결과 지속 하중 및 열팽창에 의한 진동감쇠장치 WEAR™의 설치후에 발생하는 최대응력이 표 7과 같이 허용응력 한계내에 있음을 알 수 있었다. 따라서 WEAR™의 설치후의 배관건전성이 확인되었다.

5. 결론

원자력발전소의 주증기관에 대하여 모델링 및 이론해석, 가속도계를 이용한 진동준위의 측정 및 주파수분석, 모우드 시험 등을 통하여 진동원인 및 감쇠방안을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주증기관의 진동원인을 규명하기 위하여 발전소 정비기간 중에 impact 가진을 이용하여 모우드 시험을 수행한 결과 기본고유진동수는 약 4~5 Hz로 나타났으며, 이 값은 배관해석용 프로그램인 PIPEPLUS code를 사용하여 구한 동적해석모델의 해석결과와 잘 일치하였다.
- (2) 정상상태 출력(100%)시 주증기관 및 터빈 floor 그리고 배관 지지물 전반에 걸쳐서 진동가속도 및 속도신호를 분석한 결과, 배관계의 기본고유진동수인 4~5 Hz 성분이 주진동 주파수로 나타났다.
- (3) 탄성지지 및 에너지흡수형 지지물인 WEARTM를 배관의 기본 고유진동모우드의 최대변위 위치에 설치하는 진동감쇠 방안을 평가한 결과 기본고유진동수가 약 1.5배 이상 증가하였으며, WEAR가 갖는 약 10~17 %의 댐핑율에 의한 추가적인 효과를 고려할 경우 적절한 진동감쇠 방안이 되는 것으로 판단되었다.
- (4) 고유진동모우드(4~5 Hz) 형상을 토대로 하여 모우드의 최대변위 지점에 WEARTM를 설치한 결과, 설치 이전의 경우에 비하여 진동속도치가 약 54% 정도 감소하였다. 이로써 다년간의 발전소 현안 문제를 해결할 수 있게 되었다.

참고 문헌

- [1] G. J. Bohm and S. W. Tagart, "Flow Induced Vibration in the Design of Nuclear Components", PVP-Vol. 52, 1981
- [2] T. Wang and Y. S. Sun, "Dynamic Response of Piping System Subject to Flow Acoustic Excitation", Proc. of 1988 ASME/ANS Joint Nuclear Power Conference, South Carolina, 1988
- [3] J. P. Arnold, R. H. Loreck and F. C. Zerrmayr, "How to deal with Inservice Piping Vibrations",
- [4] ANSI/ASME OM3-1982, Requirements for Preoperational and Initial Startup Vibration

Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems
 [5] R. T. Hartlen and W. Jaster, "Main Steam Piping Vibration Driven by Flow-Acoustic Excitation", IAHR/IUTAM Symposium, Karlsruhe, 1979

[6] M. Mikasinovic, "Development Work on Vibration Acceptance Criteria of Piping Systems", 10th SMiRT, 1989

[7] 내부유동을 포함한 분기된 PIPE계의 진동 해석에 관한 연구, 한국 원자력연구소(인하대학교 위탁연구), 1986~1988

[8] T. Wang and Y. S. Sun, "Dynamic Response of Piping System Subject to Flow Acoustic Excitation", Proc. of 1988 ASME /ANS Joint Nuclear Power Conference, South Carolina, 1988

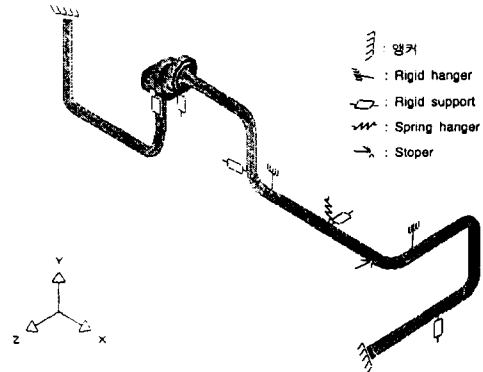


그림 1. 해석모델의 형상 및 경계조건

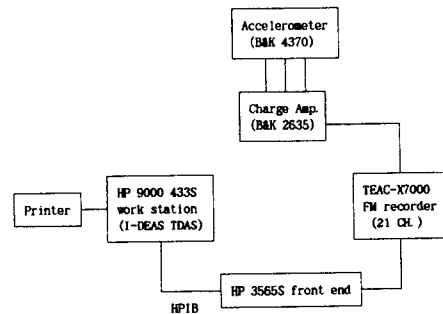
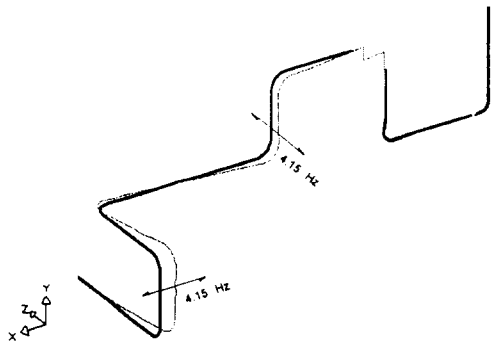
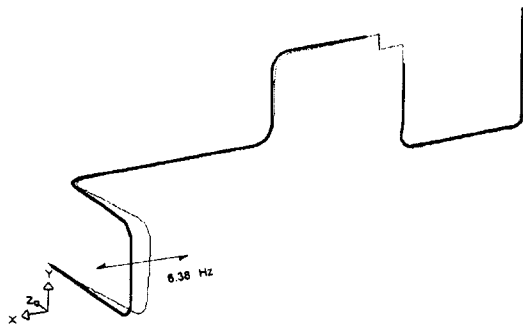


그림 2. 측정시스템의 흐름도



(a) 기존배관계의 주 고유진동모우드



(b) 진동감쇠방안후의 배관계 변경모우드
그림 3. 고유 진동모우드

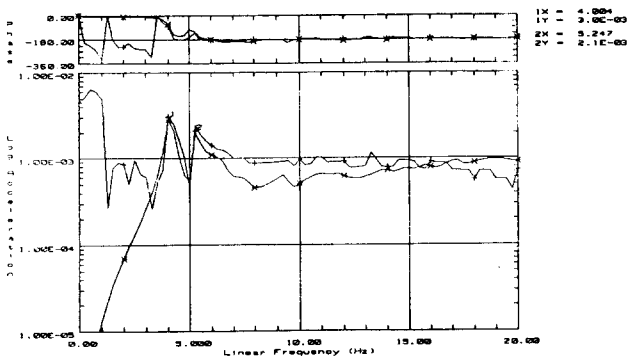


그림 4. 모달시험결과

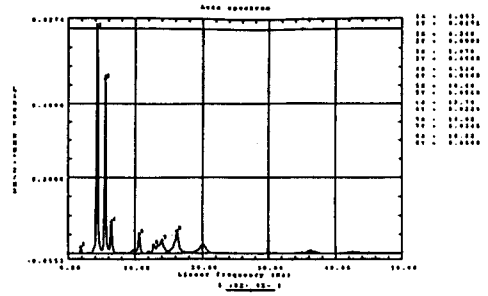


그림 5. 70%부하에서의 주파수 분석결과

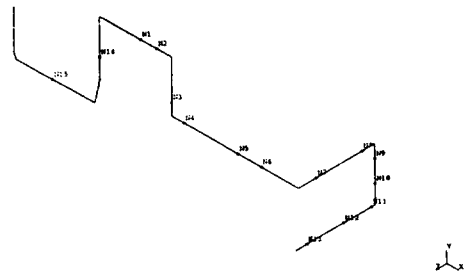


그림 6. 정상운전시 가속도신호 측정점

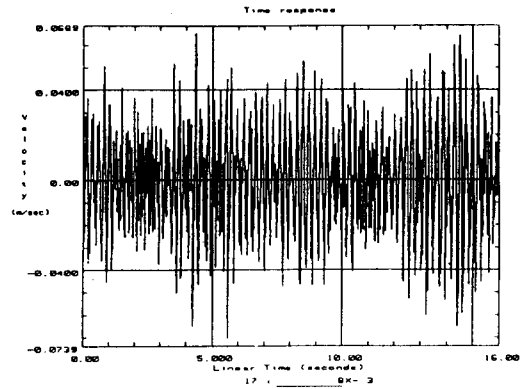


그림 7. 정상운전시 진동속도신호
("C"부위 x방향)

표 1. 주증기관의 고유모우드 (단위:Hz)

Stop 밸부전	해석치			모달시험치		
	X	Y	Z	X	Y	Z
기 존 배 관	2.96	11.56	2.96	4.0	3.5	-
	4.15	-	4.15	5.2	-	5.2
	9.11	-	6.8	38	12	11
WEAR 설치후	3.06	11.99	4.27	-	-	-
	6.38	-	7.34	-	-	-
	9.31	-	-	-	-	-

표 2. 가속도 및 압력 변동 주파수 성분

부하	가속도		압력	
	X 방향		Header	Chest
20%	1.9	10.7	1.9 3.7	1.9 3.7
	3.7	11.2		
	4.2	13.0		
	5.2	16.1		
	5.7	30.0		
57%	1.9	10.7	1.9 3.7	1.9 3.7
	3.7	12.9		
	4.2	16.1		
	5.2	23.1		
	5.5	30.0		
	6.1	36.5		
	8.1	36.9		
	9.7			
70%	1.9	16.1	1.9 3.7	1.9 3.7
	3.7	17.8		
	4.2	23.2		
	5.7	30.0		
	8.0	36.6		
	9.7			
	10.7			
	12.0			

표 3. "C" 부위의 진동 속도 및 변위

측정성분		속도 (cm/sec)		변위 (mm)	
측정위치	방향	r.m.s	peak	r.m.s	peak
N9	X	2.49	9.32	0.88	2.9
	Y	1.6	7.15	0.29	1.9
	Z	1.44	5.34	0.48	1.6
N8	X	2.56	9.63	0.86	2.8
	Y	1.53	8.98	0.22	1.5
	Z	1.93	7.23	0.63	2.0
N6	X	1.28	6.07	0.19	1.1
	Y	1.15	4.89	0.18	0.88
	Z	1.42	5.87	0.43	1.5

표 4. 측정부위별 Peak 주파수 성분
(단위 : Hz)

밸브이후			밸브전 수직			"C"부위		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
4			4		4	4		4
					5.5	6		6
8.5	9	8.5	9	9	9			
10.5	10.5		10.5	10.5		10.5		11.5
12.5			12.5	12.5		13		
	16	16.5	15	15		16		
19.5	20		19.5		19.5	20	20	20
		24			24.5			
27	27			27				
30	30	30	30	30	30			

표 5. 고유진동수 해석결과 검증 (단위; Hz)

번호	정상상태의 주요주파수와의 비교					
	Stop밸브 후		Stop밸브 전		첫번 "C"부위	
	해석	측정	해석	측정	해석	측정
1	0.76					
2	2.69		2.96			
3	3.33		3.33		3.33	
4		4.0	4.15	4.5	4.15	4.0
5			6.80	5.5	6.80	
6	7.380					
7	9.650	10.56				

표 6. WEAR™ 설치전후의 진동 비교
(zero-to-peak, 단위: cm/sec, mm)

측정점	속도	WEAR™	WEAR™	증감율 (%)
		설치전	설치후	
N9	속도	9.32	4.3	-53.9
	변위	2.9	0.67	-76.9
N6	속도	5.87	2.7	-54.0
	변위	1.5	0.48	-68.0

표 7. 진동감쇠장치 WEAR™ 설치전후
배관응력 해석결과 (단위; psi)

응력해석 형태		최대응력(비)	비고
자중해석	설치전	7587 (0.433)	
	설치후	7495 (0.428)	
열팽창해석	설치전	15272 (0.581)	만족
	설치후	15432 (0.588)	