

준 경험법을 이용한 유체내부 온도계의 동적 특성에 관한 연구

°김강부*, 이홍기*

A Study on the Dynamic Characteristics of Thermowell by Flow fluid using Semi-Empirical Method

Kang-Boo. KIM*, Hong-Gi. LEE*

ABSTRACT

It has tried to predict dynamic response and establish answering about global or local dynamic problem in structures using experimental and analysis method. One of such a try, it be proposed Semi-Empirical Method that reduce error element of input information about dynamic analysis using dynamic experimental study and measurement data in the basis of real-structure. In this paper, the dynamic response problem about piping system that be set-up THERMOWELL produce flow fluid dynamic force using Semi-Empirical Method

1. 서론

유체에 접촉되어 있는 각종 구조물과 기계 등이 주위 유체의 유동으로 말미암아 진동을 하게 되는 경우를 유동유기진동(Flow-induced Vibration) 이라고 한다. 이에 관한 예는 산업분야에서 흔히 찾아 볼 수 있으며, 대표적인 것으로는 바람에 의해 유기되는 공장의 긴 굴뚝이나 교량의 진동, 조류 및 파도에 의한 석유시추 및 생산관들의 와류유기진동(Vortex-induced Vibration), 원자력 발전소 열교환기내 관군의 진동, 비행기 날개의 플러터(flutter) 문제 등을 들 수 있다. 이러한, 유동유기진동은 유선형이 아닌 통통한 단면을 갖는 구조물의 주위에서 유체가 박리현상을 보임에 따라 수반되는 것이 대부분이며, 주위 유체의 유동에 의해 유기된 구조물의 진동은 다시 유체력의 방향과 크기에 영향을 주는 피드백기구(Feedback Mechanism)

을 갖고 있기 때문에 기계적인 기진원에 의해 발생하는 진동에 비하여 발생 메카니즘과 나타나는 진동현상이 매우 복잡 다양하다. 그러므로, 고속 유체가 흐르는 관내에 설치된 동적 시스템의 복잡한 유체진동에 대한 해석적인 단순화 문제와 공학적인 적용 가능성에서 구조설계 엔지니어들에게 늘 관심분야의 하나로 자리잡고 있다. 이것은 본질적으로 유체진동문제를 전적으로 유체력이 아닌 단순한 구조적인 진동 문제로 환원하여 적용하려는 문제에서 시작된다.

본 논문에서는 공학적인 측면에서 이러한 가능성을 확인할 수 있는 하나의 사례로 현장에서 취득한 진동 측정 자료를 시스템의 동적해석에 적용하는 '준 경험적 방법(Semi-Empirical Method)'이라는 방법론을 활용함으로써 신뢰성 있는 진동예측과 대책을 유체에 관한 어떠한 정보도 사용하지 않고 전적으로 구조적인 동적해석 차원에서 SDM, FRS을 수행할 수 있다는 전제하에서 적용하였다. 또한, 구조손상예측에서 구조변경에 따른 진동예

*. RMS TECHNOLOGY CO., LTD.
<http://www.rmstech.co.kr> (rmstech@rmstech.co.kr)

측에 이르는 과정을 실측과 실험 및 해석을 통하여 검증하므로써 단순한 구조적인 진동 문제 차원에서 진동예측 및 대책에 대한 접근을 시도하였다.

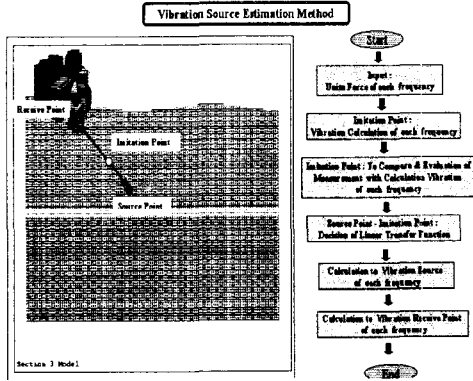


그림 1. Semi-empirical Method를 이용한 진동원 추정

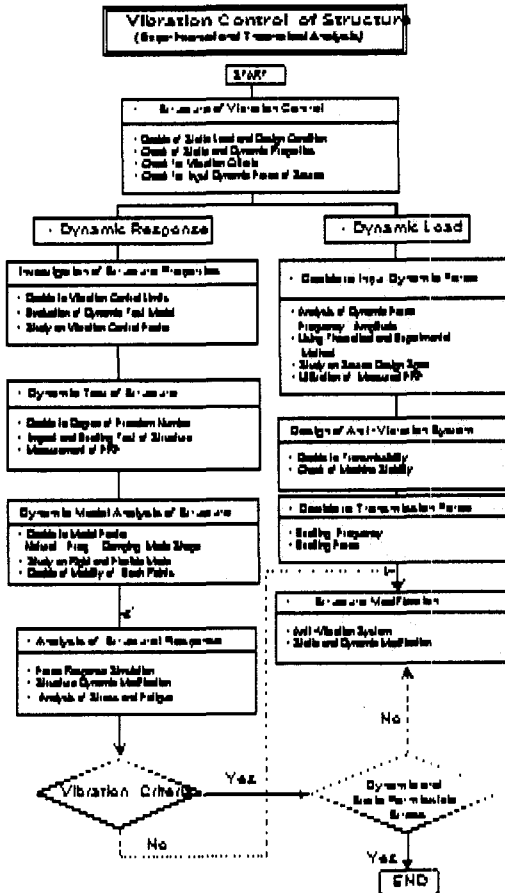


그림 2. Semi-empirical Method를 이용한 진동제어 절차서

2. 진동허용규제치의 결정

고압, 고속 배관상에 설치된 초산 Reactor내 그림 3과 같이 설치된 온도계시스템(Thermowell)의 손상으로 초산이 외부로 누설 되었다.

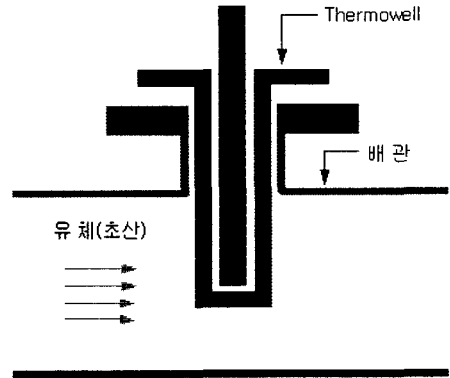


그림 3. 온도계시스템(Thermowell)의 설치 형상

정밀 검사 결과 Thermowell은 절단되어 배관에서 이탈되어 있었으며, 그림 4와 같이 Cover는 원판과 원통을 연결하는 용접부위가 원주 방향으로 1/3 정도 절단되어 있었다. 또한 Thermowell 절단면은 시차에 의해 발생한 흔적이 있었다. 소재의 표면이 부식이나 침식의 흔적 없이 절단된 것으로 보아 진동에 의한 피로가 직접적인 원인으로 예상하였다.

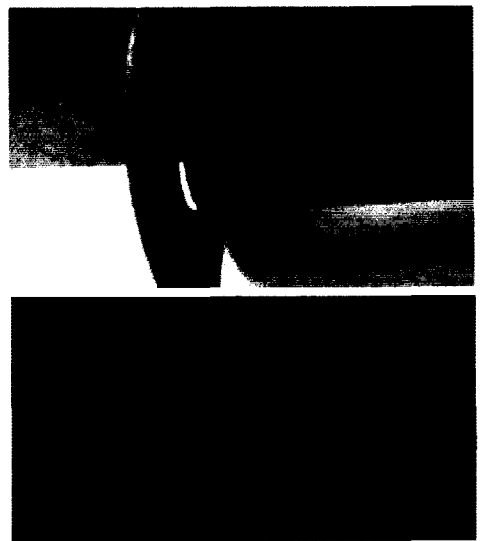


그림 4. 유동유기진동으로 인해 파손된 Thermowell

Thermowell의 손상을 규명하기 위해서는 명확한 판단 기준의 설정이 필요하다. 일반적으로 피로파괴는 10Hz 이하의 반복적인 변형에 대하여 수 백만의 사이클에 노출될 경우에 발생하는 파괴를 의미한다. 그리고 정적허용용력의 20% 이상의 하중을 받을 경우에 발생하는 것으로 알려져 있다.

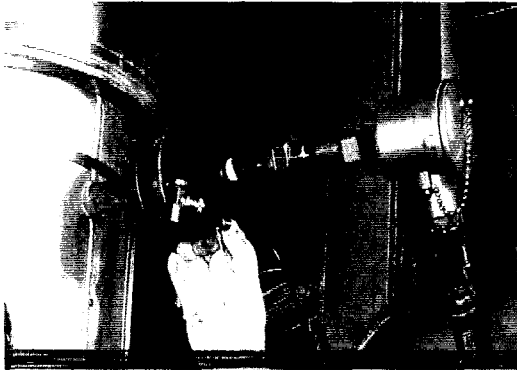


그림 5. 온도시스템(Thermowell)의 외부 및 진동측정 사진

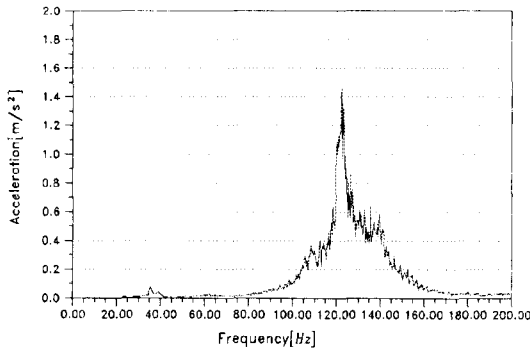


그림 6. 온도계시스템 상부 진동 주파수분석데이터
(146gal, 4.8 μ m(p-p, 122Hz))

현장계측을 통하여 Thermowell의 주 진동은 Thermowell의 1차 모드와 관련된 120Hz에서 정적허용하중의 1% 이하 상태이기 때문에 대변형 저 주파수에서 발생하는 피로파괴를 기준을 적용하기에는 부적합하다. 본 연구에서는 Thermowell의 동적 시스템이 배관과 유사하고 고주파의 특성을 잘 나타내고 있는 배관의 파괴 기준을 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다. 진동허용규제치는 "Controlling The Effects of

Pulsation and Fluid Transients In Piping System(Rev. 1-6/92) 5.11, Pipeline Compressor Research Council" 배관 진동규제치를 판단의 기준으로 설정하였다.

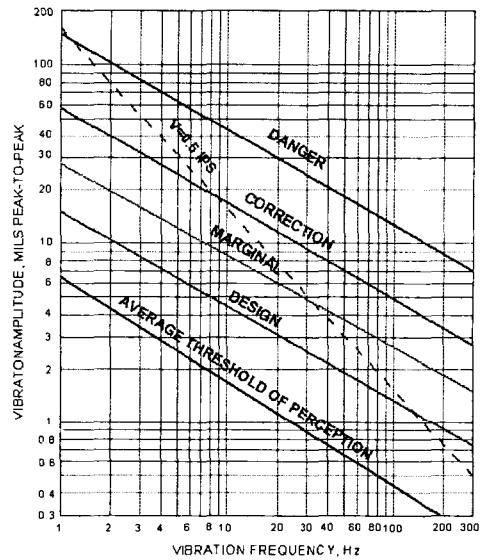


그림 7. Controlling The Effects of Pulsation and Fluid Transients In Piping System(Rev. 1-6/92) 5.11, Pipeline Compressor Research Council

표 1. Standardized piping vibration Criteria

진동허용규제치		
Danger: 380 μ m [120Hz, p-p]	Correction : 126 μ m [120Hz, p-p]	Design : 40 μ m [120Hz, p-p]

3. 온도시스템(Thermowell) 동특성 해석

현재 사용중인 온도계 시스템에 대한 동적 특성과 대책에 따른 시스템의 구조를 변경(길이 변경) 후 동특성 영향성을 평가하였다. 해석에는 범용 유한요소해석프로그램인 ANSYS 5.5를 이용하여 수행하였으며, 해석 모델은 전체 구조물에서 동적 모델링 부위를 선정하고 경계부는 대칭조건을 사용하였다. 그리고, 원활한 동적 해석 수행을 위해 2차원 및 3차원 해석을 병행하였으며, 외부조건에 의해 구조물에 영향을 미치지 않는 부위는 생략하였다.

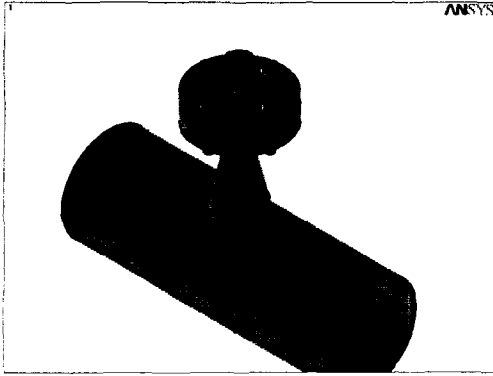


그림 8. 온도계시스템(Thermowell) 해석 모델

3.1 가진력 추정

유체 내부의 유동으로 기인하는 진동원을 순수한 해석을 통하여 얻는 문제는 기술적으로 많은 어려움을 가지고 있다. 따라서, 이러한 데이터들의 신뢰성을 확보하기 위하여 현장 진동추정/분석 데이터와 배관 및 Thermowell로 이루어진 시스템의 동적 해석을 활용하여 진동원의 가진력을 구조적인 동적시스템으로 환원하여 추정하였다.

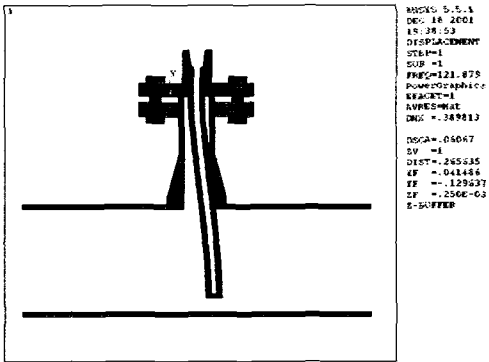


그림 9. 온도계시스템(Thermowell)의 1차 모드(122Hz)

구조물의 모빌리티(Mobility)는 구조물에 힘을 가하면서 구조물의 진동응답을 측정하고 그 진동응답과 가한 힘의 비로부터 구하게 된다. 이로부터 구조물의 모빌리티를 알고 있을 경우 가진력을 알면 진동응답을 구할 수 있고 진동응답을 알면 임의 가진력을 구할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 해석모델을 통하여 Thermowell 끝단(N0035)에서 Flange 나사 위(N1842) 사이의 모빌리티를 산출하였으며, 실 계측된 Flange 나사 위

의 진동치와 비교하였다. 이를 통하여 Thermowell 끝단에서의 동하중 41.6N으로 예측하였다.

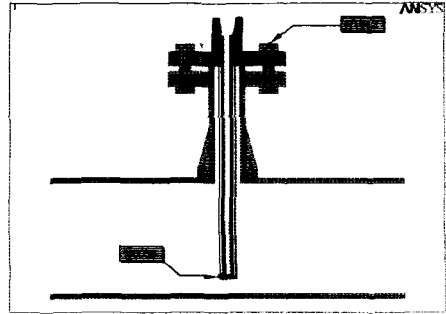


그림 10. 해석모델에 대한 가진점 및 응답점

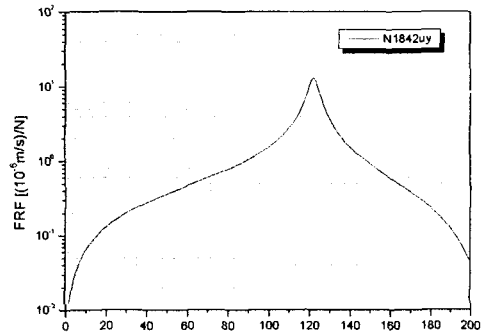


그림 11. 주파수별 전달함수 그래프

3.2 Thermowell 끝단 진동응답 (현황분석)

해석을 통하여 추정된 진동원의 가진력을 이용하여 현재 온도계시스템의 Thermowell 끝단에서 발생하는 예상 진동 응답은 266 μ m[122Hz,p-p]로 나타났으며, 최대 응력 부위는 234 \times 10⁴ Pa로 나타났습니다.

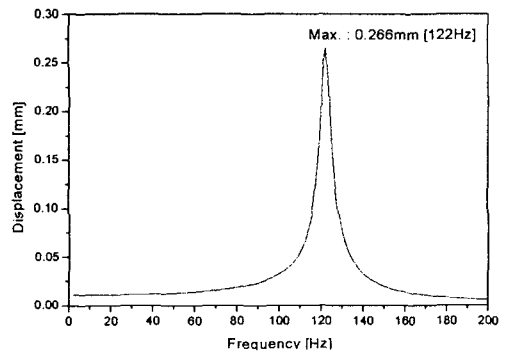


그림 12. Thermowell 끝단부의 진동변위응답 (현황분석)

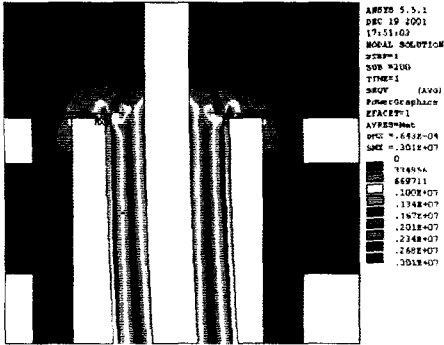


그림 13. 유체력에 의한 온도계시스템의 최대응력

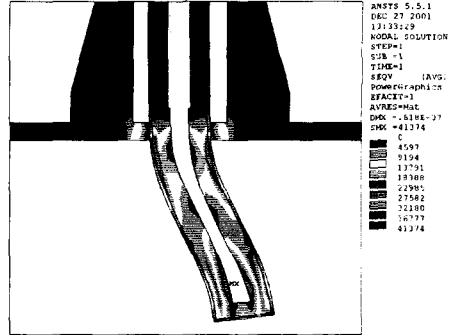


그림 16. 구조변경에 따른 온도계시스템의 응력부위

3.2 온도계시스템(Thermowell) 구조변형 해석

온도계시스템의 원활한 설치를 위한 진동저감 방안으로 Thermowell의 길이를 변화시키는 진동저감대책을 적용하였다.

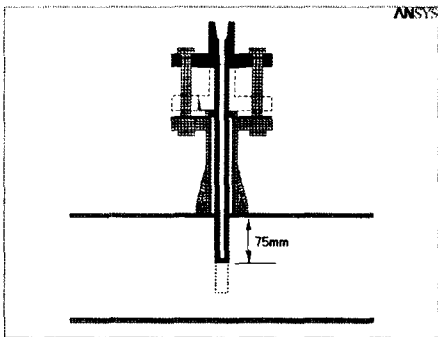


그림 14. 온도계시스템 진동 저감 방안

진동저감 방안 적용에 따른 유체력으로 발생하는 Thermowell 끝단부의 예상 진동응답은 21.3 μ m [616Hz,p-p]로 나타났으며, 최대 응력 부위는 982 $\times 10^3$ Pa로 나타났다.

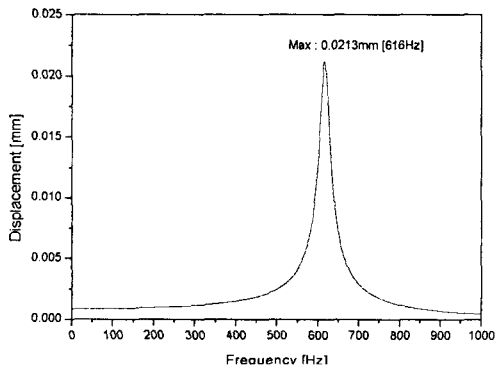


그림 15. 진동저감방안에 따른 Thermowell 끝단 예상 진동응답

표2 와 같이 저감방안 적용 전/후의 Thermowell 끝단부에서의 진동변위 예상치를 비교해 보면 대책 방안 적용 후 약 10배가 감소한 것으로 나타났다.

표 2. Thermowell 끝단 진동응답 해석 결과

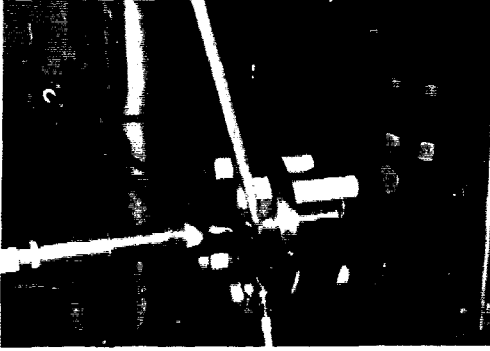
구분	Thermowell 끝단 진동응답			최대응력 (Pa)
	Peak Frequency	변위 (μ m)	속도 (mm/s)	
대책 전	122 Hz	266	202	234×10^4
대책 후	616 Hz	21.3	82.2	982×10^3

4. 진동저감방안 현장 적용 전/후 결과비교

온도계시스템에 대한 진동저감 방안을 현장에 적용한 후 계측을 실시하였다. 계측 지점은 온도계시스템의 외부 플랜지 나사 부위이며 저감 방안 적용 전/후 동일 위치에서 실시하였다.



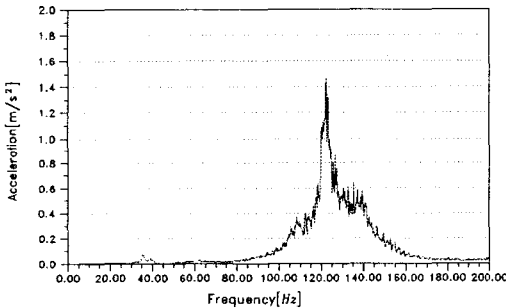
(1) 저감방안 적용 전



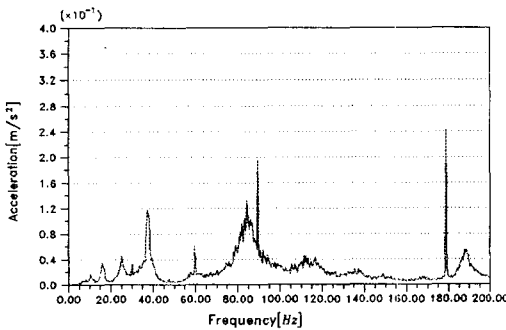
(1) 저감방안 적용 전

그림 17. 온도계시스템에 대한 저감방안적용 전/후 모습

그림 18은 온도계시스템에 대한 진동 저감방안을 현장에 적용 전/후 측정된 데이터이다. 동일한 측정 위치에 대하여 진동응답은 저감방안 적용 후 약 10배가 감소하였다. 또한, Thermowell의 1차 모드인 120Hz에서 진동응답은 현저히 저감되고, 85Hz에서 최대진동응답이 나타났다.



(1) 저감 방안 적용 전 [146gal, 4.8 μ m(p-p, 122Hz)]



(2) 저감 방안 적용 전 [13gal, 0.9 μ m(p-p, 85Hz)]

그림 18. 온도계시스템에 저감방안 적용 전/후 외부 진동 계측 그래프

5. 고찰 및 결론

진동원이 되고 있는 유체 내부의 유동으로 기인하는 진동원을 순수한 해석을 통하여 얻는 문제는 기술적으로 많은 어려움을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 데이터들의 신뢰성을 확보하기 위하여 현장 진동측정/분석 데이터와 배관 및 Thermowell로 이루어진 시스템의 동적 해석을 활용하여 진동원의 가진력을 구조적인 동적시스템으로 환원하여 추정하였다. 이러한 가진력 데이터는 구조의 동적 변경과 재 설계를 위해서는 반드시 필요한 데이터이다. 또한, 진동 응답 추정의 신뢰성을 확보하고 진전시키기 위해서는 실험과 해석을 접목시키는 '준 경험적 방법(semi-empirical method)'을 기반으로 하는 동적 해석의 체계화된 절차서 확립과 수많은 요소에 경험식과 실험 및 측정데이터의 확보와 지속적인 수정/보완이 필요할 것이다.

참고문헌

- (1) 김석홍, 김준호, 이흥기, 전달함수법을 이용한 장비 가진력과 바닥 진동응답의 예측, 한국소음진동공학회지, 제2권, 제4호, pp. 273~282, 1992.
- (2) 이흥기, 박해동, 백재호, Semi-Empirical Method를 이용한 구조물의 동적 응답 예측에 관한 연구, 한국소음진동공학회, '99 추계학술대회 논문집 pp.896~901, 1999.
- (3) 이흥기, 백재호, 김강부, 원영재, 준 경험적 방법을 이용한 충격성 진동에 대한 구조물의 동적 응답의 예측, 한국소음진동공학회, '2000 춘계학술대회 논문집 pp. 1945~1950, 2000.
- (4) RMS 테크놀러지(주), 2000, "H-전자산업(주) 격자보와 체진대의 동적 특성 분석, 평가 및 진동저감대책", RMS테크놀러지(주) 기술용역보고서
- (5) Eugene. A, Avallone, "Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers", The odore Baumeister III, Fatigue
- (6) Jens Trampe Broch, 1984, "Mechanical Vibration and Shock Measurement"
- (7) Swanson Analysis System Inc., "Ansys Dynamic User's Guide for Revision 5.0," 1993.