

## 건설진동에 의한 가스배관의 진동예측 프로그램 개발

†정 석 영 · 홍 성 경 · 김 준 호 · 고 재 필  
한국가스공사 연구개발원  
(2001년 4월 17일 접수, 2001년 6월 7일 채택)

### Development of Vibration Prediction Program of Gas Pipeline by Construction Vibration

S. Y. Jeong · S. K. Hong · J. H. Kim and J. P. Koh  
R & D Center, Korea Gas Corporation  
(Received 17 April 2001 ; Accepted 7 June 2001)

#### 요 약

현재 운용중인 가스배관은 다양한 건설진동에 의하여 영향을 받고 있다. 특히 지하철 공사 및 도로공사 시에는 건설장비의 사용, 대형차량의 통행 및 발파 등으로 인해 발생하는 건설진동이 가스관에 큰 영향을 미친다. 매설가스관의 경우는 매설된 위치와 근접한 곳에서 시행되는 발파로 인한 진동영향이 큰 상태이며 노출가스관의 경우는 차량진동에 대하여 가장 크게 영향을 받고 있다. 본 논문에서는 가스배관 주변에서 발생하는 건설진동을 측정, 분석함으로써 건설진동에 의한 가스배관의 진동을 손쉽게 예측할 수 있는 가스관 진동예측 프로그램을 소개하였다.

이 프로그램은 가스관의 진동을 예측하는 소프트웨어로 기존의 신뢰성 분석된 경험식과 유한요소해석을 통한 구조해석 결과를 이용하여 매설 및 노출 가스관에서의 진동치를 현장조건에 따라 예측할 수 있고, 측정된 진동데이터를 데이터베이스화 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 또한 현장에서 발파진동을 측정하여 발파진동추정식을 산정하고, 지발당 허용장약량을 나타내는 그래프를 자동으로 형성할 수 있는 기능을 가지고 있다. 따라서 현장 근무자가 손쉽게 가스관 주변에서 진동을 예측하여 가스관의 안전성을 평가할 수 있다.

**Abstract** - Presently, working gas pipelines are being subjected to the influence of construction vibration. Especially on subway and road construction, gas pipelines are being influenced to construction vibration caused by use of construction equipment, passage of a large-sized vehicle and blasting.

Buried gas pipelines are subjected to the influence of vibration caused by blast in the vicinity of pipeline, exposed gas pipelines are subjected to the influence of vehicle vibration. Therefore, in the study, it is developed to vibration prediction program of gas pipeline by analyzing measured construction vibration. This program is able to predict vibration of gas pipeline according to field conditions by using the results of structural finite element analysis and empirical equation by reliability analysis. And, this program contains the database of construction vibration.

Additionally, this program is able to compute estimated blast vibration equation using measured blast vibration data in the field and to form graph of allowable charging gunpowder per delayed-action with the change of blast velocity. Therefore, field workers are able to predict construction vibration around gas pipeline and estimate safety of gas pipeline.

**Key words:** Vibration Prediction, Blast, Construction Vibration, Vehicle Vibration

## 1. 서 론

현재 운용중인 매설 및 노출가스관은 다양한 건설진동에 노출되어 있는 상태이다. 특히 지하철 공사나 전력구 공사 및 지하매설물 공사 시에는 다양한 건설장비의 사용으로 인해 발생하는 진동이 가스관에 영향을 미치고 있다. 매설가스관의 경우는 매설된 위치와 근접한 곳에서 시행되는 발파로 인한 진동영향이 큰 상태이며 노출가스관의 경우는 차량진동에 대하여 가장 크게 영향을 받고 있다.

이를 위해서는 가스배관이 차량 및 발파진동에 대해 노출되어 있는 위험정도를 정확하게 평가하기 위한 신뢰성 있는 진동 영향평가 분석 기법이 정립되어야 한다. 즉 차량진동, 발파 등으로 인하여 가스관에 진동이 발생할 경우, 진동에 의한 가스관의 영향을 간단하게 평가할 수 있는 방법이 개발되어야 한다. 그러므로, 가스관 주변에서 현장실무자가 간단하게 진동을 예측할 수 있는 진동예측 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 매설 및 노출 가스관에 발생하는 진동을 기존의 경험식을 이용하여 예측하고, 측정된 진동결과를 데이터베이스화 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 그리고 현장에서 발파진동을 측정, 입력하여 발파진동식을 추정하고, 거리에 따른 지발당 허용장약량을 나타내는 그래프를 자동으로 형성함으로써 발파진동에 대한 가스시설물의 안전성을 현장에서 직접 검토할 수 있다. 따라서 현장근무자가 손쉽게 가스관 주변에서 진동을 예측하여 가스관의 안전성을 평가할 수 있다.

## 2. 이론 및 해석방법

### 2.1. 발파진동의 특성

일반적으로 발파에 의해 발생하는 에너지중의 0.5~20%는 탄성과 형태로 균열대 외부의 암반중에 전파되어 가면서 지반진동을 발생시킨다. 이러한 탄성파는 진폭과 주기를 갖는 정현파적인 운동을 하며, 이는 변위(displacement), 진동속도(particle velocity), 진동가속도(particle acceleration), 주파수(frequency) 등으로 표시된다. 발파진동 추정식은 아직 이론적 전개가 완전히 이루어지지 않고 있지만 연구자들은 발

파현상에 관련된 변수의 차원해석과 많은 발파진동의 측정경험을 토대로, 구조물 피해의 기준이 되는 지반의 최대 진동속도를 지발당 장약량과 폭원으로 부터의 거리 등 주요 변수들의 관계를 식 (1)과 같은 경험적인 발파진동식 형태로 제시하고 있다. 여기에서 사용되는 단위인 kine은 진동속도 단위로써 cm/s와 동일하다.

$$V = K (D/W^m)^n = K(SD)^n \quad (1)$$

V : 지반의 진동속도(kine)

D : 발파원으로부터 대상지점까지의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

K : 발파상수

m : 장약지수

n : 감쇠지수

식 (1)에서 거리와 지발당 장약량의 비(D/W<sup>m</sup>)를 환산거리(scaled distance, SD)라고 하며, m값이 1/2이면 사승근 환산거리(square root scaled distance), 1/3이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라고 한다. 본 연구의 경우 장약지수 m은 1/3을 사용할 때 가장 적은 편차로 회귀선에 접근하므로, 이 값을 사용하여 발파진동의 일반식을 유도하고 진동을 예측하였다. 한편, 진동속도와 환산거리는 식 (1)과 같이 비선형적인 관계를 보이며, 여기에 대수를 이용하면 식 (2)와 같은 선형적인 관계로 나타낼 수 있다.

$$\log V = \log K + n \log SD \quad (2)$$

### 2.2. 신뢰성 이론

최근에는 구조물 설계를 위해 사용되는 기존의 허용용력 설계 개념이나 공칭안전율 설계 개념보다 한 단계 더 발전된 설계개념으로 신뢰성이론을 사용한 LRFD(Load and Resistance Factor Design)설계규준이 사용되고 있다. 이는 신뢰성지수( $\beta$ )를 구조물 혹은 구조물의 모든 System에 대해 일정한 값으로 선택함으로써 강도와 하중의 가변성에 상관없이 요구되는 파괴확률을 갖도록 하는 것이다. 이는 설계 시 포함될 수 있는 기존의 불확실량들을 통계적인

추정에 기초한 확률모형 즉, 신뢰성 이론에 의해 신뢰도(Reliability :  $P_r$ ) 또는 신뢰성지수( $\beta$ )를 척도로 하여 해석하기 위함이다. 신뢰성지수( $\beta$ )는 다음과 같이 정의된다.

차량의 통행으로 인한 대표 진동치는 신뢰성지수( $\beta$ )를 3, 1.28, 0을 사용하여 각각 제시하였다. 신뢰성지수( $\beta$ )는 다음과 같이 정의되며, 차량통행으로 인한 진동추정치의 분포는 가우스의 정규분포로 가정하였다. 신뢰성지수 3, 1.28, 0은 각각을 사용하여 제시한 대표진동치를 초과하는 진동치가 발생할 확률이 0.1%, 10%, 50%임을 의미한다. 즉, 신뢰도 99.9%, 90%, 50%를 갖게 된다.  $\beta=0$ 인 경우는 흔히 사용되는 평균값에 해당한다. 본 연구에서 발파진동추정식을 산정하는데 신뢰성이론을 적용하였다.

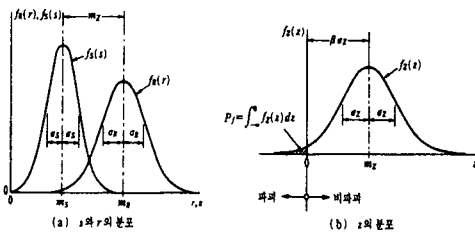


Fig. 1. Reliability index

$$\beta = \frac{m_Z}{\sigma_Z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3)$$

$\beta$  : 신뢰성 지수  
 $m_R, \sigma_S$  : 신뢰도를 확보하기 위한 진동치와 표준편차  
 $m_S, \sigma_R$  : 가스관 및 구조물에서 측정된 진동치의 중앙값과 표준편차

### 2.3. 노출배관의 진동응답 해석 과정

본 연구에서는 차량의 통행으로 인해 가스관에 발생하는 진동 응답을 해석적 방법으로 구하기 위하여 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 사용하였다. 본 연구에서는 NASTRAN과 범용 전후처리(Pre-Post processor) 프로그램인 MSC/PATRAN을 연계하여 진동 응답 해석을 수행하였다. NASTRAN은 본 연구에서 가스관의 진동 응답 해석을 위해 사용하고 있는 과도응답해석(Linear transient response analysis)에서 구조 감쇠를 등가인 점

성감쇠의 방법으로 도입하도록 되어 있다. 과도응답해석에서 구조감쇠를 고려할 수 있는 점이 현재 널리 사용되고 있는 범용 유한요소 프로그램인 SAP2000과 가장 큰 차이점이며, 이로 인해 NASTRAN을 사용한 구조해석 결과가 더 잘 일치하고 있다. 해석 수행 과정은 다음 Fig. 2와 같다.

실제 복공판 위를 주행하는 차량에 의해 노출가스관에 발생하는 진동 응답을 예측할 수 있는 실험차량 하중을 사인파 하중(sine pulse force), 반사인파하중(half-cycle sine pulse force), 삼각파 하중(symmetrical triangular pulse force)의 3가지 형태로 이상화하였다. 실험값과 해석값을 비교해보면 가장 이상적으로 접근하는 파는 삼각파 하중으로 나타났다. 가스관과 가스관지지 구조물은 모두 프레임(frame) 요소로 이상화하였으며, 방진시스템이 설치된 경우 방진 행거(hanger)는 1방향 스프링 요소로 이상화하였다. 그리고 가스관 및 구조물은 차량 하중에 대한 가스관의 신뢰성 있는 진동해석기법을 개발하기 위해 실험 대상을 노출가스관 구조물의 일부만을 모델링하여 구조해석 하였다.

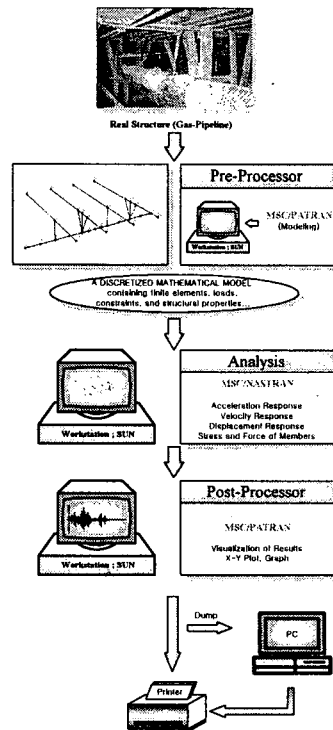


Fig. 2. Procedure of vibration analysis.

### 3. 진동예측 프로그램 설명

#### 3.1. 진동예측 프로그램의 개요

본 프로그램은 Visual Basic 6.0으로 작성되었다. Windows 95, 98, Pentium 급 이상에서 실행된다. 프로그램은 매설가스관의 건설진동 예측, 노출가스관의 차량진동 예측, 자료입력, 진동식추정식 산정 항목으로 구성되어 있다. 매설가스관에서는 발파, 항타, 기타진동(로울러, 브레이커)으로 구성되어 있다. 노출가스관은 노출배관의 구조해석 결과를 데이터베이스화 해서 차량진동에 대한 진동치를 예측할 수 있게 되어 있다. 자료입력 항목은 데이터베이스화 하기 위한 데이터 입력창이다. 그리고 마지막으로 진동추정식 항목은 현장에서 측정된 진동치를 이용하여 발파진동추정식을 산정하고 가스배관에 안전한 허용장약량을 산출하는 기능을 가지고 있다.

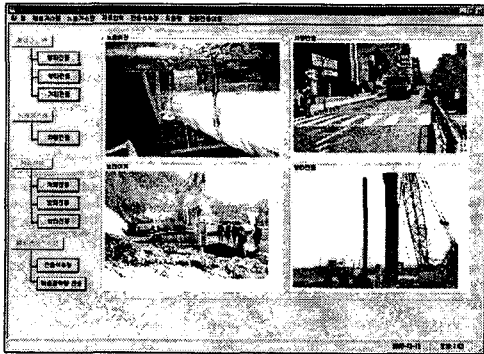


Fig. 3. Main menu window.

#### 3.2. 매설 및 노출 가스관의 건설진동 예측

매설가스관에서는 발파진동과 항타진동, 로울러진동 Form을 가지고 있다. 발파진동의 예를 들어보면, 매설가스관/발파진동을 클릭하면 Fig. 4와 같은 창이 뜬다. 그림에서 왼쪽 입력창에서 발파방식, 현장경험식 종류, 신뢰도를 선택하고, 측정거리 및 지발당 장약량을 입력하고 실행 버튼을 누른다. 그러면 우측상단에 진동예측치가 그래프로 표시된다. 그림에서 우측 네 개의 막대는 가스관 및 가스시설물의 진동기준이고 왼쪽의 파란색 막대가 진동예측치이다. 그러므로 예측된 진동치와 기준치를 비교하여 안전성을 검토할 수 있다. 나머지 기타 건설진동도 마찬가지로 수행하면 된다.

노출가스관/차량진동을 클릭하면 Fig. 5와 같은 Form이 열린다. 여기서, 가스관의 진동치를 예측하려면 다음 순서를 따른다. 가스관 직경을 선택하고 복공판 위 통행차량의 중량, 주행속도, 도로 노면조도를 입력한다. 그리고 흙막이 구조물의 제원을 입력한다. 현재 상태의 진동치와 방진시스템을 적용했을 때의 진동감쇠 정도를 예측할 수 있다. 그러면 우측상단에 현재상태의 진동예측치와 방진시스템을 적용했을 때의 예상결과가 그래프로 표시가 된다.

노출배관의 구조해석은 공사현장이 도심지에 위치한 특성을 고려하여 덤프트럭, 버스, 승합차로 구분하였다. 차량의 주행속도는 복공판이 설치되어 있는 도심지 공사현장 상황을 고려하여 20km/h, 35km/h, 50km/h의 3가지로 구분하였다. 차량하중은 실험값과 비교하여 가장 정확한 해석결과를 보인 삼각파 형태로 하중을 이상화하였다.

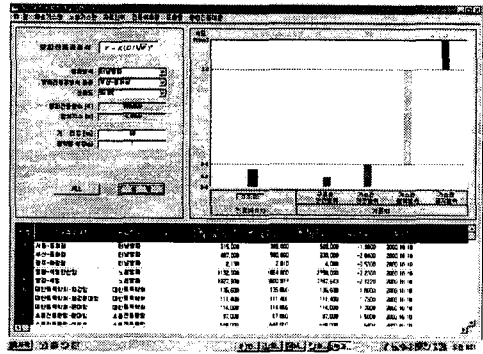


Fig. 4. Prediction of blast vibration.

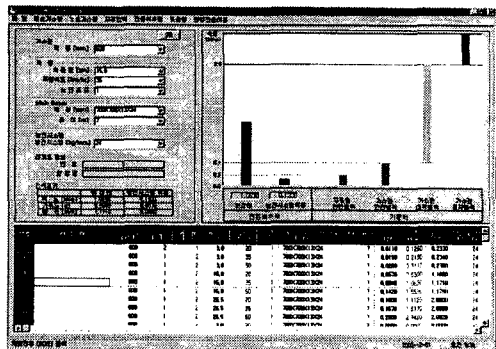


Fig. 5. Prediction of vehicle vibration.

Table 1. Class of hanger.

가스관 종 류	hanger type		hanger 부담할 중량(kgf)
	hanger 용량(kgf)	hanger 스프링 상수(kgf/mm)	
D760(30")	1000	40	620
D660(26")	750	30	540
D600(24")	750	30	490
	600	24	
D500(20")	600	24	400
D200	300	12	110
	150	6	

Table 2. Analysis result of vibration response (D 200).

운용상태	차량하중 (tonf)	주행 속도 (km/hr)	가스관의 진동 응답 속도(kine)
현재상태	26.5 (덤프트럭)	50	3.473
		35	2.433
		20	1.421
	15.0 (버스)	50	1.966
		35	1.377
		20	0.804
3.0 (승합차)	50	0.393	
	35	0.275	
	20	0.161	
방진 hanger (6kgf/mm)	26.5 (덤프트럭)	50	1.569
		35	1.011
		20	0.625
	15.0 (버스)	50	0.888
		35	0.572
		20	0.354
3.0 (승합차)	50	0.178	
	35	0.114	
	20	0.071	
방진 hanger (12kgf/mm)	26.5 (덤프트럭)	50	1.884
		35	1.547
		20	0.875
	15.0 (버스)	50	1.066
		35	0.857
		20	0.497
3.0 (승합차)	50	0.213	
	35	0.175	
	20	0.099	

해석에 고려한 가스관의 직경은 D200, D500, D600, D660, D760 5가지를 고려하였다. 또한 1개의 가스관 직경에 대해 현재 노출되어 운용 중인 상태와 동일한 조건에 대해 방진 시스템이 설치되었을 경우 가스관의 진동 응답을 알

아보기 위하여 방진 hanger를 적용하여 해석을 수행하였다. 방진 시스템에 사용된 방진 hanger의 선택에는 hanger 1개가 부담하게 될 가스관의 중량과 hanger 내부 스프링의 로킹 발생에 대한 사항을 고려하여 결정하였다. 해석은 1개의 가스관에 대해 시설된 상태(방진 시스템이 적용 포함)에 따라 2~3가지, 차량의 종류(하중)에 따른 2~3가지, 차량의 주행 속도 3가지로 구분하여 이를 조합하여 해석을 수행하였다. 해석 대상의 가스관 직경에 따라 사용된 방진 hanger의 용량과 스프링 강성을 다음 Table 1에 정리하였다. 그리고 D200에 대한 진동응답해석 결과를 Table 2에 제시하였다.

### 3.3. 발파진동추정식 산정

발파진동식을 추정하는 데는 미광무극 진동식을 사용하였으며, 신뢰성분석에 의하여 50, 90, 99.9%의 세 가지로 나누어 나타났다. Fig. 6에 현장에서 실측된 진동속도치와 측정거리, 장약량을 입력한 후 실행 버튼을 누르면 신뢰성분석에 의하여 3가지 모드의 발파진동추정식이 산정된다. 그리고 이때 추정된 진동추정식에 의하여 허용장약량 산출 버튼을 누르면 각각의 거리에서 허용기준치에 맞는 허용장약량을 알 수 있는 그래프가 Fig. 7과 같이 나타난다. 계산된 발파진동추정식 및 허용장약량을 이용하여, 가스시설물 주변에서 발생하는 발파진동을 안전하게 제어할 수 있다. 신뢰성이론을 도입하여 제시된 진동기준치에 신뢰도를 부여하여 발파를 실시하게 되므로 가스시설물의 안전성을 확보하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

진동추정식을 산정하는 자세한 방법은 다음과 같다. 대상지역의 발파진동상수(K)와 감쇠지수(n)는 양대수 좌표상에서 환산거리에 대하여 측정된 진동속도를 도시하고, 최소 자승법에 의한 회귀분석을 실시함으로써 구해진다. 회귀분석의 기울기로부터 n값이 구해지며, K값은 환산거리 1일 때의 진동속도에 해당된다. 이렇게 구해진 진동추정식이 우리가 일반적으로 사용하는 50% 진동추정식이다. 여기에 신뢰도에 따라 90, 99.9%의 진동추정식을 구하면 된다. 한편, 효율적이고도 안전한 발파설계를 하기 위해서는 대상지역에 대한 시험발파를 통해 K, n 값을 구해야 한다. 이때 허용진동속도가 주어지면 발파진동식으로부터 발파지점으로부터의 거리와 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 그래프를 작성할 수 있다. 이와 같은 방

법으로 산출된 발파진동추정식의 예를 Table 3에 나타냈다.

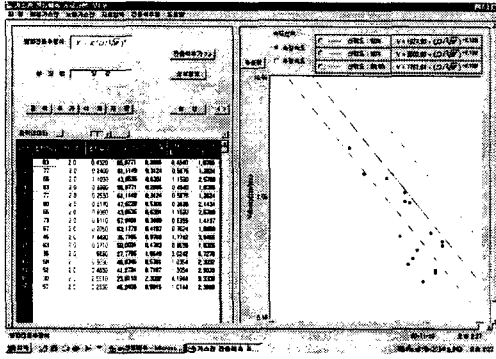


Fig. 6. Results of vibration estimated expression.

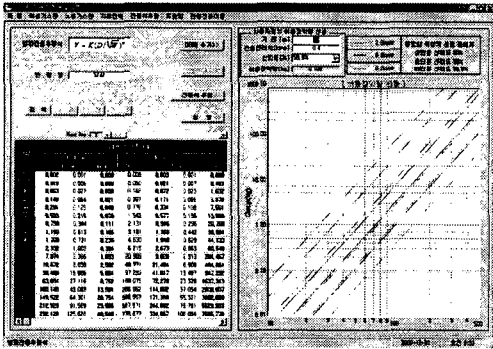


Fig. 7. Graphs of allowable charging with gunpowder.

Table 3. Vibration estimated expression.

신뢰성 지수( $\beta$ )	진동추정식 $V(\text{cm/s})$	신뢰도 (%)	상 태
0	$1926.9(\text{SD})^{-2.12}$	50	극한한계
1.28	$3368.6(\text{SD})^{-2.12}$	90	사용한계
3	$7120.6(\text{SD})^{-2.12}$	99.9	안전성

#### 4. 결 론

수년 동안의 진동측정 및 분석결과를 이용하여 가스관 주변에서 진동치를 쉽게 예측할 수

있는 진동 예측 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 신뢰성 분석된 경험식과 구조해석된 데이터를 이용하여 현장조건에 따라 진동치를 예측할 수 있고, 측정된 진동데이터를 데이터베이스화 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 또한 현장에서 발파진동을 측정하여 발파진동식을 추정하고 지발당 허용장약량을 나타내는 그래프를 자동으로 형성할 수 있는 종합적인 진동 예측 및 분석 프로그램이다. 그러므로 건설진동에 대한 가스관의 위험성 여부를 자체적으로 평가할 수 있기 때문에, 현장 실무자들이 건설진동에 대한 배관의 유지 및 관리에 매우 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. 한국가스공사 연구개발원, 건설진동에 대한 가스관의 설계지침 및 안전성평가 시스템 개발, 2000.11
2. 한국가스공사, 품질/환경 지침서(굴착공사 및 관로관리), 2001.4
3. 홍성경, 김준호, 정석영, 차량하중을 받는 노출 가스배관의 진동 특성 연구, 한국산업안전학회논문집, 1999.10.
4. 박연수, 홍성경 외, 발파진동에 의한 가스관의 안전성평가 연구, 한국소음진동공학회 학술발표회 논문집, 1999.10.
5. (주)대우엔지니어링 기술연구소, 건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구, 1988.4.
6. 박정식, 윤영선, "현대통계학", 다산출판사, 1997.
7. 양형식, 발파진동학, 구미서관, 1995.
8. R.W.Clough, J.Penzien, Dynamics of Structures, Mc Graw-Hill, 1993.
9. C.H.Dowding, Construction Vibrations, Prentice Hall, 1996.
10. M.L. James, G.M. Smith, J.C. Wolford, P.W. Whaley, Vibration of Mechanical and Structural Systems, Harper Collins, 1994.
11. "MSC/NASTRAN User Manual", MacNeal-Schwendler Corp., 1998.