

합정용 탄성마운트 개발 및 장비시스템의 최적 방진/내충격 설계 시스템 개발

Development of the rubber mounts for naval shipboard application and the optimal shock/vibration isolation design system for equipments

김병현*, 정정훈*, 정종안*,곽정석**, 배종우***, 김정수***

ByungHyun Kim*, JungHoon Chung*, JongAhn Chung*, JungSuk Kwak**, JongWoo Bae***, JungSoo Kim***

Key Words : Resilient Mount, Shock/Vibration Isolation, Optimum Isolation

1. 서론

합정을 비롯한 각종 군용 수송기계에 탑재되는 장비시스템은 진동 및 충격에 의한 가혹한 환경에서도 충분한 기능성과 내구성을 가져야 하며, 이를 위해 탄성마운트(resilient mount)에 의한 대상 장비시스템의 진동/충격 isolation이 매우 효과적인 한 방법이다. 특히, 최근의 냉전 종식에 따른 국방비 절감차원에서 미국을 비롯한 선진 외국의 경우 엄격한 방진/내충격 설계에 의해 고가로 제작되는 군용 장비시스템을 진동/충격 isolation을 통해 상업용 기성 (commercial off-the-shelf) 장비시스템으로 대체하려는 노력이 더욱 증가되고 있는 추세이다.

한국기계(연)에서는 과학기술부 국가지정연구실사업으로 수행된 “제진장치를 활용한 제진설계 기술 개발” 프로젝트를 통해 진동, 충격, 지진 및 풍하중에 대한 다양한 제진장치 설계 및 이를 적용한 대형구조물 및 장비시스템의 최적 제진 설계기술을 개발하였다. 본 프로젝트의 일환으로 합정 장비시스템의 진동/충격 isolation에 사용할 수 있는 탄성마운트를 개발하였다. 개발된 탄성마운트들은 정격하중에서 6~7Hz의 공칭(nominal) 축 방향 고유진동수를 가지는 고무마운트들로서 방진/내충격 성능뿐만 아니라 피

로 내구성 및 내환경 성능도 합정용으로 사용하는데 요구되는 미국해군 사양을 모두 만족한다.

또한, 탄성마운트를 사용한 장비시스템의 정적/동적특성 해석, 탄성마운트를 사용한 최적 방진/내충격 설계에 필요한 프로그램들을 개발하여, 이들 프로그램들을 연계하여 탄성마운트를 사용하여 최적 방진/내충격 설계를 할 수 있는 시스템을 구축하였다.

본 논문에서는 개발된 탄성마운트와 최적설계 시스템을 요약 소개한다.

2. 합정용 탄성마운트 개발

민수분야인 자동차, 상선, 철도차량 등의 진동저감을 위해 국내에서 개발된 방진 탄성마운트의 사용이 보편화되어 있지만 합정, 전차, 우주발사체 등에 탑재되는 국산 기계/전기/전자 장비시스템들의 경우에는 내충격, 방진 및 소음저감이라는 특수 요구성능을 만족하기 위해 거의 대부분 외국의 탄성마운트 제품을 사용하고 있다. 또한, 민수분야의 탄성마운트에 비해 훨씬 고가의 외국 탄성마운트를 수입하는 데 있어서도 많은 시간과 노력이 요구된다. 뿐만 아니라 합정용 장비시스템의 대표적인 탄성마운트인 미국해군 표준 탄성마운트의 경우에는 외국산 제품을 수입하는 데 있어서 비용과 시간뿐만 아니라 미국 국방성의 재가를 위해 국내의 관련 군사정보까지도 제출해야하는 실정이다. 그러나 군

* 한국기계연구원 구조연구부

** (주)수퍼센추리

*** 한국신발피혁연구소

수 및 우주산업 분야에 활용될 수 있는 탄성마운트는 민수분야의 탄성마운트에 비해 연구개발 초기투자비용이 훨씬 높지만 시장규모는 상대적으로 작기 때문에 국내의 탄성마운트 제작사들이 이러한 특수용도의 탄성마운트 개발에 엄두를 내지 못하고 있다. 따라서 엄격한 방진/내충격 성능을 만족해야 하는 특수용도의 탄성마운트를 국내에서 독자적으로 설계·제작할 수 있는 기술 개발이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 이러한 국내의 어려움을 극복하기 위한 일환으로서 수입대체의 필요성이 절실하고, 향후 국내에서의 활용도와 개발성공에 따른 기술적 파급효과가 매우 클 것으로 판단된 미국해군의 표준 탄성마운트 5종(6E100, 6E150, 7E450, 6E900 및 6E2000)을 시제 개발대상 품목으로 택하였다. 동일 외국산 제품에 대한 Reverse Engineering을 통해 3종(6E100, 6E150, 7E450)에 대해서는 모든 해군 요구사항을 만족하는 시제품 개발을 완료하였다. 해군 요구사항을 일부 만족하지 못하고 있는 2종(6E900 및 6E2000)에 대해서는 현재 수정·보완 중에 있다. 개발대상 탄성마운트는 Table 1과 같다.

Table 1 The developed Rubber mounts

Type	6E100	6E150	7E450	6E900	6E2000
Load range(kg)	23-45	45-68	45-204	182-408	317-907
Natural freq. at rated load(Hz)	6.0	6.0	7.0	6.0	6.0

시제 개발과정을 통해 합정 장비시스템용 방진/내충격 탄성마운트의 재질 및 완제품에 대한 기계적 성능 및 내환경 성능을 평가하기 위한 시험 절차 및 방법을 확립하였으며, 한국기계연구원과 한국신발피혁연구소가 보유한 설비 및 계측시스템을 이용하여 시험평가 시스템을 구축하고 시험을 수행하였다.

개발 완료한 3종의 탄성마운트의 고무배합 설계결과는 Table 2 및 Table 3과 같다. 이들 탄성고무의 기계적 특성치 실험결과는 Table 4에 정리하였다. 6E100, 6E150의 탄성고무는 천연고무를 기재로 하고 있으므로 내유/내오존 피복제를 사용하여야 한다. 따라서 내유/내오존 피복제를 개발하였으며, 피복제의 특성치는 Table 5와 같다. 이들 탄성고무와 피복제에 대한 특성은 미국해군 규격인 MIL-M-17508F의 모든 요구사항

을 만족하고 있다.

개발 고무재료를 사용하여 탄성마운트 완제품을 제작하였으며 MIL-M-17508F에서 규정하는 공진주파수시험, 정격하중에서의 변위시험, 고무와 금속 접촉 성능시험, 축방향 강도시험, 반경방향 강도시험, Drift test, 피로시험을 수행하여 해군 요구사항을 만족함을 확인하였다. Fig. 1은 6E100에 대한 대표적인 시험결과 예를 보여주고 있다.

Table 2 Final rubber formulations of the prototype of 6E100 and 6E150 mounts

Materials	6E100	6E150
SVR 3L	100	100
ZnO	5	5
St/A	2	2
3P	2	2
HAF	-	30
SRF	20	-
P 3	10	12
S	2	2
DM	1	1
TS	0.15	0.15

Table 2 Final rubber formulations of the prototype of 7E450 mount

Materials	7E450
M-40	30
DCR-36	70
SRF	15
DOP	7
BROWN SAAB	5

Table 3 Mechanical properties of the prototype mounts

Property	Unit	Prototype Mounts		
		6E100	6E150	7E450
Specific gravity	g/cc	1.02	1.02	1.31
Hardness	Shore A	39	45	47
Tensile strength	kgf/cm ²	210	250	180
Elongation	%	620	675	700
Tensile strength after aging(90°C, 46 hrs)	kgf/cm ²	173	240	190
Elongation after aging(90°C, 46 hrs)	%	520	570	750
Compression set@90°C, 46 hrs	%	29	31	15
Cold compression set @-1°C×94 hrs	%	1	1	1
Volume change in oil after aging(70°C, 70hrs)	%	-	-	10

Table 4 Mechanical properties of the developed coating material

Property	Developed coating
For dried film -Min. Tensile strength (kg/cm ²) -Min. Elongation at Break(%)	145 480
For coated test specimens -Max. Volume Change after immersion in oil at 70°C for 70 hours(%) -Adhesion of Coating · Before immersion in oil · After immersion in oil at 70°C -Ozone Resistance after 1week at 40°C in air containing 100pphm ozone -Flexibility of Coating after Flexing for 6 Cycles to 100% elongation	4.8 No Failures No Failures No Cracks No Cracks
For coated mount -Min. Film thickness on rubber element as measured on coated metal(cm)	0.013

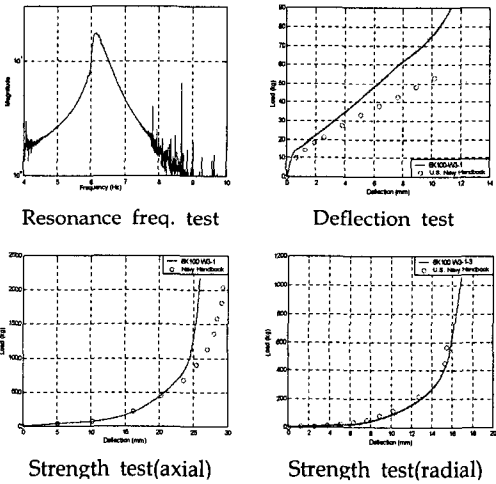


Fig. 1 Typical test results for the prototype 6E100

3. 최적 방진/내충격 설계시스템 개발

가혹한 외부 진동 및 충격 환경으로부터 장비시스템을 보호하기 위해서 또는 장비시스템의 자체진동으로 인해 외부에 전달되는 진동을 최소화하기 위해서 탄성마운트를 사용하여 진동기진력과 충격하중을 절연(isolation)하는 방법이 매우 효과적인 방법이다. 그러나 적절하지 못한 탄성마운트를 선정하게 되면 진동 기진력과 충격하중을 저감하는 대신에 오히려 증폭시켜서

장비시스템에 불리한 결과를 초래할 수 있다. 따라서 최적의 방진/내충격 성능을 갖는 탄성마운트의 최적설계 기술과 이들 탄성마운트에 의해 지지된 장비시스템의 동특성을 정확히 예측할 수 있는 해석 기술이 요구된다.

본 연구에서는 탄성지지 장비시스템의 정/동특성 해석 프로그램 "NLDA-REMSYS", 방진/내충격 탄성마운트의 최적설계 프로그램 "OPT-REMSYS", 탄성마운트 특성자료를 효율적으로 D/B화하고 관리할 수 있는 프로그램 "MOUNTDB" 및 D/B를 개발하였다. 이들 프로그램을 연계 활용하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 장비시스템의 방진/내충격 최적설계를 수행할 수 있는 시스템을 구축하였다.

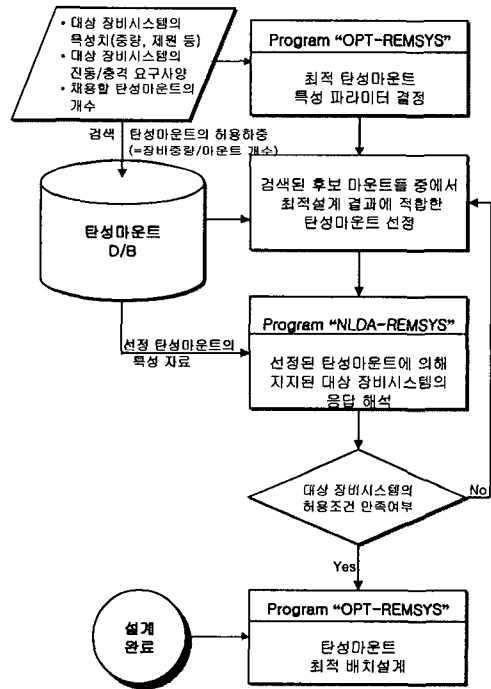


Fig. 2 Schematic diagram of optimum design systems for the shock/vibration isolation of equipment system

3.1 탄성지지 장비시스템 정/동특성 해석 프로그램 "NLDA-REMSYS"

이 프로그램은 탄성마운트를 사용하여 탄성지지된 장비시스템에 대한 정적해석, 고유/강제 진

동해석 및 충격응답 해석을 수행할 수 있는 프로그램이다. 프로그램 개발에 있어서는 수치해석을 위한 다양한 함수, 해석결과의 가시화를 위한 편리한 기능 등을 제공하는 미국 Mathworks사의 MATLAB를 사용하였으며, 사용자 편의성을 증대시키고자 그래픽 사용자 인터페이스 기능을 구현하였다. 프로그램의 주요 기능 및 특징은 다음과 같다.

- * 각종 선형 및 비선형 하중-변위 특성을 갖는 탄성마운트 고려 가능 : 현재 사용되고 있는 Elastomeric, Wire Rope 유형의 각종 선형 및 비선형 탄성마운트뿐만 아니라 충격에 의한 과도한 변위가 발생하지 않도록 설치되는 Shock Stopper까지도 고려할 수 있음
- * 다양한 하중 조건 고려가능 : 탄성지지 장비시스템의 진동 및 충격 응답해석뿐만 아니라 정적해석도 수행할 수 있으며 특히, 프로그램의 활용요구가 많은 함정용 장비시스템을 위해 해군 관련 규격 또는 사양에서 규정하는 각종 정적하중, 진동기진력 및 충격하중을 고려할 수 있음

정적 해석

- o 자중(dead weight)
- o 함정용 장비시스템을 위한 특수하중
 - 선박 하중분포의 불균일에 따른 경사조건(trim, heeling)에 의한 하중
 - 파랑하중(wave load)-하중계수 도입
 - 황천(rough sea) 시 선체운동(pitching, rolling)에 의한 하중(선체 운동주기가 장비시스템의 고유주기에 비해 훨씬 크기 때문에 정적 하중으로 가정할 수 있음)

진동 해석

- o 미소 진폭을 가정하기 때문에 비선형 탄성마운트의 경우에도 선형으로 가정하여 고유진동 해석과 조화 기진력 및 스펙트럼 형태로 주어지는 진동기진력에 대한 강제진동 해석을 수행할 수 있음

충격 해석

- o Idealized Pulse(Half Sine, Rectangular, Triangular, Saw Tooth 등)
- o 임의의 시간이력을 갖는 충격하중
- o 독일해군의 함정 내충격 강화 사양인 BV043-1985에서 규정하는 충격하중(Double Triangular or Double Half-Sine

Pulse)

- o 미국해군의 장비시스템에 대한 충격시험 사양인 MIL-S-901D에서 규정하는 중간중량 충격시험기에 의한 충격하중(본 연구를 통하여 실험적으로 규명된 중간중량 충격시험기의 하중특성을 이용함)

3.2 방진/내충격 탄성마운트의 최적설계 프로그램 "OPT-REMSYS"

지금까지 대부분의 방진/내충격 탄성마운트의 최적설계에 대한 연구는 진동 또는 충격 각각의 하중에 대한 탄성마운트의 최적 설계문제를 다루어 왔다. 그러나 많은 경우 하나의 하중관점에서 최적 설계된 탄성마운트는 다른 하중측면에서는 오히려 불리한 결과를 초래할 수 있기 때문에 이들 하중을 동시에 효과적으로 제어할 수 있는 탄성마운트의 최적설계 기술 개발이 요구된다. 또한, 지금까지 탄성마운트의 최적설계에 있어서는 설계변수로 탄성마운트의 특성 파라미터만을 고려해 왔으나, 최적 배치설계를 통해 동일한 특성을 갖는 탄성마운트에 대해서도 성능을 향상시킬 수 있기 때문에 이에 대한 연구도 절실히 요구된다.

본 연구에서는 지지부 진동 및 충격하중을 동시에 고려한 장비시스템 방진/내충격 탄성마운트의 최적 특성 및 배치 설계 기술을 개발하였다. 이를 토대로 프로그램 "OPT-REMSYS"를 개발하였다. 탄성마운트의 특성 및 배치를 동시에 고려한 최적 설계기술을 개발하는 것이 이론적으로는 가능하지만, 실제 관점에서 보면 최적의 방진/내충격 성능을 갖는 탄성마운트의 특성 파라미터를 먼저 결정하고, 추가의 성능 향상을 위한 최적의 배치설계를 수행하는 2단계(two phase) 최적설계 방법이 더 적합하다고 판단되어 본 연구에서는 Fig. 3에 보인 절차에 따른 2단계 최적설계 방법을 채택하였다. 1단계 최적설계 단계인 탄성마운트의 최적 특성설계에서는 현재 구속 최적화 문제의 가장 효율적인 방법의 하나로 알려져 있는 Sequential Quadratic Programing(SQP) 최적화 기법을 사용하였으며, 1단계 최적설계 단계인 최적 배치설계에서는 탄성마운트 설치좌표를 이산설계변수(discrete design variables)로 취급하고 이산화 구속 최적화 문제에 가장 효율적인 방법의 하나로 알려져

있는 Simulated Annealing(SA) 최적화 기법을 사용하였다. 프로그램 개발에 있어서는 SQP 최적화 기법은 MATLAB의 Optimization Toolbox에서 제공하는 'fmincon' 함수를 사용하여 구현하였으며, SA 최적화 기법은 본 연구에서 직접 개발하였다.

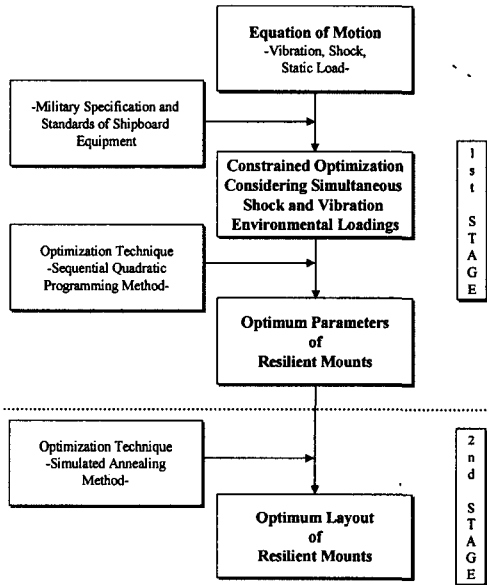


Fig. 3 Two phase optimum design method of resilient mounts for shock & vibration isolation of equipment system

3.3 탄성마운트 특성자료 D/B 관리프로그램 "MOUNTDB" 및 탄성마운트 D/B

현재 사용되고 있는 장비시스템의 방진/내충격을 위한 탄성마운트들의 특성자료 대부분은 탄성마운트 제작사들에 의해 카탈로그 형태로만 제공되기 때문에 이를 통해 선정한 탄성마운트들이 요구하는 방진/내충격 성능을 만족하는 지를 확인하기가 매우 어려운 실정이다. 또한, 제작사들 각각이 서로 다른 형식으로 제공하는 카탈로그 형태의 정보만으로는 최적의 탄성마운트의 선정에 있어서 가장 중요한 평가항목의 하나인 제품들 간의 성능을 비교하기가 매우 어렵다. 따라서 각종 탄성마운트의 특성자료를 통일된 구조를 갖는 자료로 D/B화하고, 구축된 D/B를 효과적으로 관리할 수 있는 관리프로그램과 이들 프로그램을 탄성마운트의 방진/내충격 성능

을 평가할 수 있는 탄성지지 장비시스템의 동특성 해석 프로그램과 연계함으로써 최적의 방진/내충격 성능을 갖는 탄성마운트를 선정할 수 있는 프로그램이 필요하다.

본 연구에서는 탄성마운트 특성자료를 효율적으로 D/B화하고 관리할 수 있는 프로그램 "MOUNTDB"를 개발하였다. 미국의 Barry Controls 사, Enidine 사와 같은 세계적으로 우수한 탄성마운트 제작사에서 제공하는 제품 카탈로그와 이들 제작사에서 제안하는 방진/내충격 탄성마운트의 선정을 위한 통상의 절차를 고려하여 탄성마운트 특성자료들의 D/B 구축을 위한 입력항목들을 아래와 같이 결정하고 D/B 구조를 설계하였다.

- 제작사
- 제품모델 명
- 유형(Elastomeric, Wire-rope 등)
- 외형 및 설치 관련 도면 또는 사진
- 탄성마운트 중량
- 탄성마운트 재질
- 감쇠비
- 공진시 전달율
- Dynamic Factor for Vibration & Extreme Loading
- 하중-진동수 곡선 자료
- 하중-변위 곡선 자료
- 활용분야, 사용 환경조건, 기타 사항을 기록할 수 있는 메모필드

설계된 탄성마운트 특성자료 D/B 구조에 따라 ODBC(open data base connectivity) 기술을 이용하여 마이크로소프트사의 데이터베이스 시스템인 "ACCESS"와 연동되도록 개발하였으며, Visual Studio .Net 2003과 C/C++ 프로그래밍 언어를 사용하였다.

개발된 프로그램 "MOUNTDB"를 이용하여 합정용 장비시스템의 방진/내충격을 위해 현재 가장 널리 사용되고 있는 탄성마운트의 대표적인 2가지 유형(Elastomeric & Wire-rope), 총 288종의 탄성마운트에 대한 특성자료 D/B를 구축하였다. D/B 구축을 위한 특성자료는 탄성마운트 제작사(미국의 Barry Controls사, Enidine사)의 카탈로그와 미국 해군의 표준 탄성마운트(Navy Mount) Handbook의 자료를 활용하였다.

3. 결 론

본 연구를 통하여 미국해군 표준 탄성마운트인 6E100, 6E150, 7E450 3종에 대한 시제품이 성공적으로 개발되었으며, 6E900 및 6E2000 2종에 대해서도 조만간 개발이 완료될 예정이다. 이들 탄성마운트들은 최대 가용 정격하중(upper rated load)에서 6~7Hz의 공칭 축방향 고유진동수를 가지는 고무마운트들로서 합정용 공조시스템, 펌프 등 각종 기계류의 방진/내충격 설계에 직접 활용이 가능하며, 내구성(피로) 및 내환경(내온, 내유, 내오존 및 방식) 성능도 모두 미국해군 규격을 만족하고 있다. 개발된 탄성마운트 시제품에 대한 설계·제작기술을 산업체에 이전하여 한국형 구축함에 탑재예정인 각종 공조시스템의 방진/내충격 탄성마운트로 상용화할 계획이다. 이를 통해 그 동안 외국산 동일제품을 수입하는데 있어서 비용과 시간 측면뿐만 아니라 미국 국방성의 재가를 위해 국내의 관련 군사정보까지도 제출해야하는 등 국내 합정용 장비시스템 제작사가 겪고 있던 어려움을 해결하는 데 많은 기여를 할 수 있을 것이다. 미국해군 표준 탄성마운트의 국산화 개발은 외국산 동일제품의 수입을 대체한다는 의의보다는 국산화 개발과정에서 획득한 기술 노하우를 활용하여 국산 장비시스템의 고부가가치화 및 군수분야에 있어서 상용 장비시스템의 적극적인 활용을 통한 국방비를 절감하는 등 경제적으로 큰 파급효과를 창출할 수 있다는 사실에 더 큰 의의가 있다고 판단된다.

본 연구를 통하여 개발된 최적설계 시스템은 합정을 비롯한 우주발사체, 전차 등에 탑재되어 가혹한 진동/충격 환경 하에서 운용되는 각종 장비시스템의 방진/내충격을 위해 최적의 성능을 갖는 탄성마운트 설계를 위한 핵심도구로서 많은 활용과 이를 통해 국내 군수 및 우주산업 분야의 장비제작사들이 안고 있는 가장 시급히 해결해야 할 애로사항인 장비시스템의 방진/내충격 기술문제를 해결하는 데 크게 기여할 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 프로그램 "NLDA-REMSYS"는 각종 장비시스템 특히, 합정용 장비시스템의 방진/내충격 성능평가 및 파랑중 구조안전성 평가에 많은 활용이 기대되며, 프로그램 "MOUNTDB"를 이용하여 구축된

D/B에 더 많은 탄성마운트 특성자료를 추가함으로써 장비시스템의 방진/내충격 설계를 위한 최적의 탄성마운트를 손쉽게 선정할 수 있으리라 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원 하에 국가지정 연구실사업으로 수행한 "제진장치를 활용한 제진 설계기술 개발"과제의 일환으로서 수행되었다.

참고문헌

1. MIL-M-17508F(SH)-Military Specification, "Mounts, Resilient : Types 6E100, 6E150, 7E450, 6E900, 6E2000, 5E3500, 6E100BB, 6E150BB, 7E450BB, and 6E900BB," 1990. 12. 12.
2. MIL-M-17185A(Ships), "Mounts, Resilient: General Specifications and Tested for (Shipboard Application)," 1956.
3. The MathWorks Inc., *MATLAB User's Guide, Optimization Toolbox*, The Mathworks Inc. 1999.
4. 정정훈, 김병현, 양용진, "구조합성법을 이용한 비선형 탄성마운트지지 구조물의 효율적인 동적 응답 해석", 한국소음진동공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp.287-290
5. 박주현, 정정훈, 김기화, 조대승, 김병현, "충격/진동 절연을 위한 탄성마운트의 최적 배치설계", 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp.755-760