

## 대형 멀티 전자기 가진 시스템 설계

임종민\*, 문상무\*\*, 은희광\*\*\*, 최석원\*\*\*\*, 최준민\*\*\*\*\*

## Design of Large Multi-Electromagnetic Shaking System

Jong-Min Im\*, Sang-Moo Moon\*\*, Hee-Kwang Eun\*\*\*, Seok-Weon Choi\*\*\*\*, Joon-Min Choi\*\*\*\*\*

### Abstract

The vibration test system of satellite environment test dept. has been used successfully for the vibration tests of a majority of Korean space programs. To meet the recent needs of large size test facility available for the vibrational tests of the huge launch vehicles and satellites, KARI have developed the large size multi-electromagnetic shaking system with 3 × 3m head expander system. The new system will consist of three electromagnetic shakers which has 160 kN thrust force individually, and be able to sustain up to 8 tons test load and 300 kNm overturning moment. This paper describes the design components in the development process of multi-excitation shaker system.

### 초 록

우주환경시험팀에서는 발사환경 시 진동 시험을 위해 진동 테스트 장비를 운영 중에 있으며 이를 이용하여 여러 위성 프로그램의 환경시험을 성공적으로 수행하였다. 발사체 및 대형위성의 진동시험을 위한 대형 전자기 시스템의 요구를 충족시키기 위해, 직경 3m급 헤드익스펜더를 가진 대형 멀티 전자기 가진 시스템을 개발하고 있다. 개발 시스템은 160 kN의 추력을 가진 3대의 가진 시스템으로 구성되어 있으며 최대 8톤급 시험체의 진동시험과 300 kNm의 횡 하중 지지할 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서는 대형 멀티 전자기 가진 시스템 개발 과정에서 요구되는 각 요소의 설계에 대한 연구 결과를 소개하고자 한다.

키워드 : 가진기(shaker), 진동환경 시험(vibration test), 제진 블록(seismic block), 헤드익스펜더(head expander), 가이드 시스템(guidance system)

### 1. 서 론

발사체의 발사과정에서 발생하는 극심한 진동 환경에 대하여 위성체 및 탑재물의 내강성을 검

증하는 발사환경 시험시설에는 현재, 위성체 부품 레벨의 시험을 담당하는 80kN급의 중형 진동 가진기(V964)와 조립이 완료된 위성 시스템의 환경시험을 담당하는 280kN급의 단일형 대형 전자

접수일(2007년12월14일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

\* 우주환경시험팀/acoust@kari.re.kr

\*\* 우주환경시험팀/smoon@kari.re.kr

\*\*\* 우주환경시험팀/hkeun@kari.re.kr

\*\*\*\* 우주환경시험팀/schoi@kari.re.kr

\*\*\*\*\* 우주환경시험팀/jmchoi@kari.re.kr

기 가진기(V994)가 설치되어 운용되고 있다. 특히 단일형 대형 전자기 가진기의 경우, 접합 면적이 큰 시험 대상물의 설치를 위하여 직경 2.0m의 헤드익스펜더(head-expander)와 2m × 2m의 슬립 테이블(slip table)과의 연계가 가능하다. 그러나 차기 위성체 및 발사체 구조물의 대형화 및 중량화로 인하여 최근 대두되고 있는 초 대형, 고추력 전자기 가진 시스템의 요구에 의하여 한국항공우주연구원은 직경 3.0m, 중량 8 ton 급 시험체의 진동시험이 가능한 대형 가진장치를 개발 중에 있으며, 현재까지 전자기 가진기 3대와 직경 3m의 헤드 익스펜더로 구성된 총 추력 480 kN의 대형 가진 시스템에 대한 설계를 완료하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 대형 멀티 가진 시스템의 설계 사양

초기 시스템 구성 단계에서는 국내외 시장에 다수의 납품 실적 및 사용 이력을 보유하고 있는 80kN, 160kN, 280kN급의 전자기 가진기를 활용하여 세 가지 후보 안을 선정하였으며, 시스템 요구사항 및 설치 환경 조건을 고려하여 3개의 160kN급 가진기로 구성된 트리플(triple) 시스템을 최종안으로 결정하였다. 개발된 대형 멀티 가진 시스템의 사양은 아리안 5 (ARIANE 5) 로켓의 최대 탑재 재원을 기준으로 표 1과 같이 선정하였다.

표 1 가진 시스템의 설계 사양

Test Object	Max. Weight	5 ton
	Max. IF Diameter	3m
Thrust		> 450kN
Num. of Shaker		3
Max. Overturning Moment		> 300 HN·m
Max. Displacement(Continuous)		> 30 mm(pk-to-pk)
Working Area of Head Expander		> 3 X 3 m
First Resonance Frequency(with 8000 kg load)		> 200 Hz
Cross Talk	5 ~ 500 Hz	< 15 %
	500 ~ 1000 Hz	< 20 %
Table Surface Flatness		< 0.05 mm/m
Low Frequency Capabilities	12 Hz	10 g
	20 Hz	25 g
Background Noise Level		< 0.05 g <sub>Peak</sub>
Controllable Acceleration through Overall Bandwidth		< 0.1 g

### 2.2 멀티 가진 시스템의 주요 구성

대형 멀티 가진 시스템은 크게 동일한 위상으로 가진력을 발생시켜주는 가진기 및 위상제어 시스템, 3대의 가진기를 하나로 연결시켜주는 헤드익스펜더, 시험 시 발생하는 횡 하중을 상쇄시켜 주는 가이드스 시스템, 가이드스 시스템을 지지해 주는 지지 구조물 및 가진 시스템이 설치되는 제진 블록으로 구성된다.

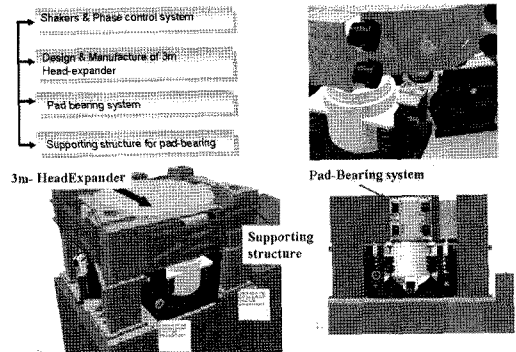


그림 1. 대형 멀티 가진 시스템의 구성

### 2.3 제진 블록(Seismic Block)

제진 블록은 고출력 가진 시스템의 필수 설비로서 가진기의 진동으로 인해 발생하는 반작용 힘이 건물 또는 연계 장비로의 전달되는 것을 차단하는 설비이며, 일반적으로 가진기 시스템의 가진력을 견디어 낼 수 있도록 충분한 강성 및 무게를 지니는 콘크리트 블록과 이를 지반 또는 건물로부터 분리시키는 제진(isolation) 시스템으로 구성된다. 제진 블록과 가진기의 연계 방식에 따라 일반적인 멀티 가진 시스템은 그림 2와 같이 세 가지 종류로 구분되어 질 수 있다. (b)와 (c)의 형태는 거대한 크기의 제진 블록을 수용할 만한 충분한 공간을 확보할 수 있는 경우 채택 가능하며 특히 (b)의 경우는 전자기 가진기 자체의 몸체 제진 시스템을 사용하지 않고 가진기를 강축을 통하여 제진 블록에 직접 연결하는 방식으로 이 경우 제진블록과 가진기는 강제 운동을 하게 되어 진동 콘트롤이 용이하며, 고추력 상태에서 상대적으로 큰 횡 모멘트를 지지할 수 있

다. 하지만 이 타입의 단점은 가진기의 추력이 그대로 제진 블록에 전달됨으로 인해 원하는 제진 특성을 얻기 위해서는 추력의 8 ~ 10배에 해당되는 무게의 제진 블록이 필요하다.

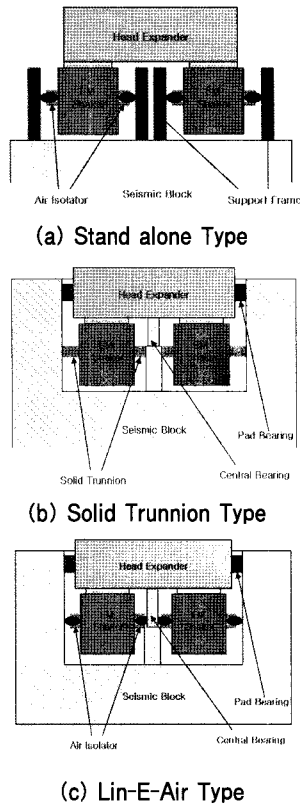


그림 2. 제진블록과 가진기의 구성 유형

(a)의 경우 가진기의 설치 및 고정을 위하여 일반적으로 가진기와 함께 납품되어지는 고정 프레임을 사용하는 경우로서 가진기의 설치 및 제진블록의 제작이 용이한 반면, 고정 프레임이 충분한 강성을 제공하지 못하는 경우 오버터닝 모멘트(over-turning moment) 지지 능력에 크게 제약 받는 단점이 있다. 본 개발 과제에서는 (a) 형태의 구성안을 채택하되 가진기 주위로 추가적인 가이드 시스템 및 지지 구조물을 구축하여 시스템 오버터닝 모멘트 요구조건을 충족시키도록 하였다.

## 2.4 헤드익스펜더(Head Expander)

현재 상용화되고 있는 헤드익스펜더는 일반적으로 알루미늄 또는 마그네슘으로 제작되어지는데 마그네슘의 경우 시스템 전체 중량을 줄일 수 있고, 고주파 대역에서의 낮은 댐핑 특성 갖는 장점이 있으나 높은 재료비와 제작성의 단점이 있다. 본 가진 시스템에서는 경제성 및 제작성을 고려하여 알루미늄 헤드익스펜더를 채택하였다.

헤드익스펜더는 3대의 독립된 가진기를 하나의 가진 시스템으로 연결하는 인터페이스인 동시에 시험 대상물이 장착되는 부분이다. 따라서 헤드익스펜더의 경우 최대 무게의 시험체를 대상으로, 요구되는 시험 주파수 범위 안에서 공진이 발생하지 않도록 설계하는 것이 요구된다. 강성의 최대한 보장하는 동시에 무게를 최소화하도록 설계하는 것이 요구된다.

이를 위해 그림 3과 같이 최적화 과정을 통해 설계된 헤드익스펜더를 대상으로 그림 4와 같이 유한 요소 해석을 통해 고유 진동수 및 구조물에 작용하는 하중을 예측하는 작업을 수행하였다.



그림 3. 헤드익스펜더의 유한요소 모델



그림 4. 헤드익스펜더의 정적/동적 해석 결과

위의 과정을 통해 주파수 특성 및 경량화에 대한 설계요구조건을 만족시키는 형상이 결정되면, 전체적인 시스템 차원에서 주파수에 따른 응답 특성 예측작업이 요구된다. 이는 시험 대상체

를 설치하여 진동시험을 수행할 경우에 대해 예측을 수행함으로써 제작 이전에 설계된 시스템의 특성이 설계요구조건을 만족하는지 여부를 선행적으로 검증하기 위해서이다. 이를 위해 무게 중심이 헤드익스펜더 상면으로부터 3 m에 위치해 있고 무게가 8 ton인 시험 대상체에 대한 응답특성 예측작업을 수행하였다.

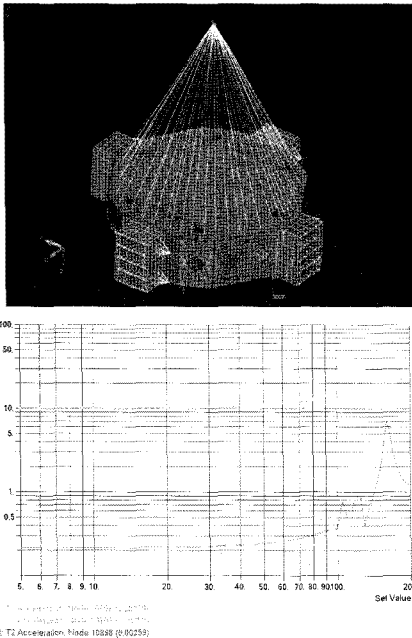
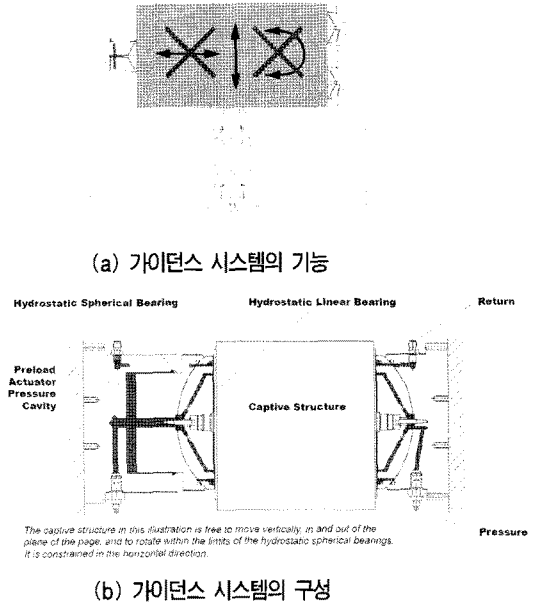


그림 5. 가진 시스템의 진동 응답 예측 결과

## 2.5 가이드نس 시스템(Guidance System)

요구되는 횡모멘트 지지 특성을 만족시키기 위해서는 가진기 자체의 지지 특성만으로는 부족하며 추가적인 가이드نس 시스템의 설치가 요구된다. 그림 6 (a)은 헤드익스펜더의 측면 가이드نس 시스템으로 널리 사용되는 패드 베어링을 나타낸다. 패드 베어링은 헤드익스펜더의 상하 운동을 유지시키는 접합면과 헤드익스펜더와 패드의 자동 정렬을 위한 구형 베어링면의 두개의 유막으로 구성되어, 하나의 패드 베어링은 3개의 회전 자유도와 2개의 변위 자유도를 가지게 된다. 또한 패드 베어링은 압축력만을 지지할 수 있으므

로 그림 6 (b)과 같이 헤드익스펜더에 한 쌍이 양쪽 면에 설치되고 한쪽 베어링에서 유압을 이용하여 전 하중(pre-load)를 가해줌으로써 시스템을 유지시켜준다.



(a) 가이드نس 시스템의 기능

(b) 가이드نس 시스템의 구성

그림 6. 가이드نس 시스템의 기능 및 구성

그림 7은 본 시스템에 적용된 가이드نس 시스템의 구성을 나타낸다. 8개의 패드 베어링으로 구성되어 있으며, 진동 시험시 발생할 수 있는 헤드익스펜더의 열팽창에 의한 영향을 최소화하기 위해 측면에 장착되어 있다. 이를 위해 헤드익스펜더 또한 가이드نس 시스템 설치를 위해 측면이 돌출되어 있는 형상을 가지도록 설계되었다.

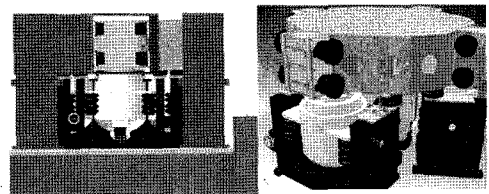


그림 7. 가이드نس 시스템의 구성

## 2.6 지지구조물(Supporting Structure)

지지구조물은 가이던스 시스템이 설치되는 곳으로 구조물의 강성이 크게 요구된다. 지지구조물의 강성이 보장되지 않으면 가진기에 연결된 헤드익스펜더와 지지구조물에 부착된 가이던스 시스템의 상호작용에 의해 전체 가진 시스템의 공진 주파수가 예상치 못한 낮은 주파수에서 발생하게 된다. 이는 시스템의 성능에 큰 문제를 발생시킬 수 있다. 또한 지지 구조물은 가이던스 시스템으로 전달된 하중을 제진 블록으로 전달하는 경로의 역할을 하기 때문에 최대한으로 강성을 가지도록 설계되어야 한다. 그림 8은 구조물의 강성을 부여하기 위해 설계 변경된 지지 구조물을 나타낸다. 최종 설계된 구조물의 특성 파악 및 무게의 최소화를 위해 그림 9와 같이 응답해석을 수행하였으며, 이 결과에 의해 구조물의 무게를 최소화 하도록 소재의 두께를 결정하는 작업을 수행하였다. 그림 10은 최종적으로 설계된 지지 구조물의 형상을 나타낸다.

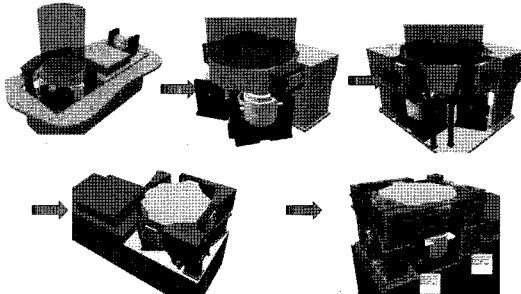
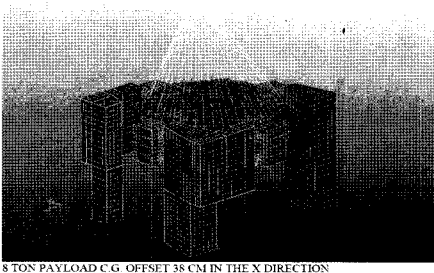


그림 8. 지지구조물의 설계 변경 과정



8 TON PAYLOAD C.G. OFFSET 38 CM IN THE X DIRECTION

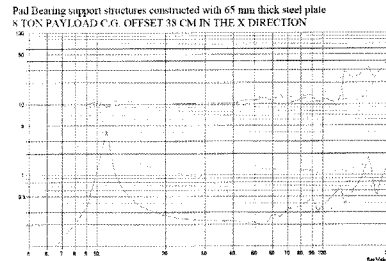
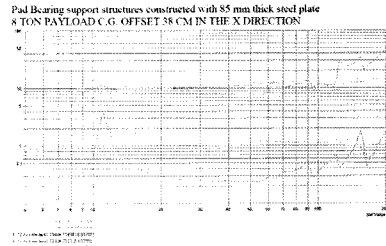


그림 9. 지지구조물 설계요소 변화에 따른 응답변화 예측

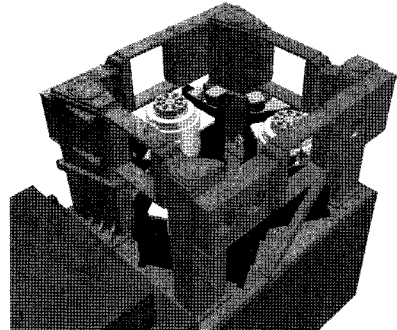


그림 10. 최종 설계된 지지구조물의 형상

## 2.7 가진기 위상 제어장치(PCU)

위상 제어장치(phase control unit)는 증폭기와 가진기 사이에 설치되어 전류계로부터 획득된 신호를 되먹임(feed-back) 컨트롤하여 각 가진기에 인가되는 전류의 위상 및 크기의 차이를 소멸시켜 한 개 이상의 가진기가 동일한 추력을 발생시키는 장치이다. 그림 11은 널리 사용되고 있는 4 채널 위상제어장치의 회로 구성을 나타내며, 이러한 위상제어장치는 동일 위상으로 움직이는 멀티가진 시스템 외에, 가진 신호의 위상을 역전시킴으로써 밀고 당김 모드의 가진 시스템에도 사용되어 질 수 있다.

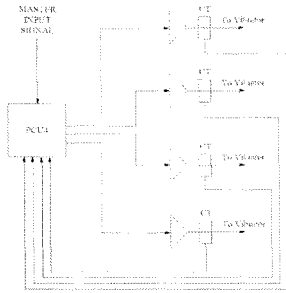


그림 11. 위성 제어장치의 구성도

## 2.8 하중지지 장치(Load Support System)

대형 멀티 가진 시스템의 경우 시험 대상체 및 헤드익스펜더의 중량으로 인하여 보조적인 하중지지 장치의 설계 및 제작이 추가로 요청된다. 이를 위하여 최대 10톤을 지지 할 수 있도록 하중 지지 장치를 설계하였다. 하중지지 장치는 그림 12와 같이 에어백 타입으로 총 6개가 가진기의 측면 구조물과 헤드익스펜더에 연결되어 설치되어 있으며 시험대상체의 중량을 고려하여 공기압을 조절하는 방식을 택하고 있다. 이외에도 본 시스템은 구조물의 설치 및 비 구동 시 시스템의 안정성을 확보하기 위하여 그림 13과 같이 잠금장치(locking device) 및 모니터링 시스템을 가지고 있다.

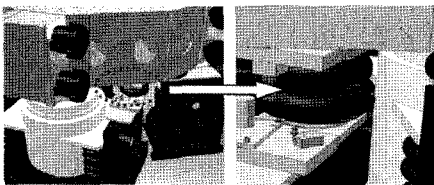


그림 12. 하중지지 장치의 구성



• Locking Device :  
가진 시스템을 구동 하지 않을 경우 Head-Expander (5 ton)를 지지해 주는 안전 장치



그림 13. 가진기 시스템 보호를 위한 안전장치

## 3. 결 론

대형 위성 및 구조물의 진동시험을 위한 대형 멀티 전자기 가진 시스템의 설계를 수행하였다. 단일 가진 시험기와는 달리 3대의 가진 시스템을 통합하여 구축하는 멀티 가진 시스템은 제진 블럭의 설계, 가진 장치의 동기화 시스템, 대형 헤드익스펜더의 설계, 가이던스 시스템 및 가진기 지지구조물의 설계가 통합되어 구축되어진다. 현재 설계 완료된 가진 시스템의 형상은 그림 14와 같으며, 제작 및 설치 중에 있다.

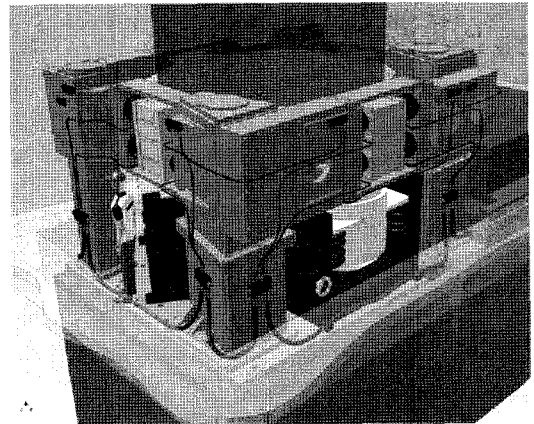


그림 14. 대형 멀티 가진 시스템의 최종 설계안

## 참 고 문 헌

1. 우성현, 김홍배, 문상무, 김영기, 임종민 “대형 멀티 전자기 시스템 구성 및 설계”, 한국소음진동공학회 2004년 춘계학술발표대회논문집, 2004, pp.618-622
2. 문상무, 임종민, 은희광 “대형 가진 시스템의 설계 및 응답예측”, 한국우주과학회 2007년 추계학술대회, 제16권, 제2호, 2007, p22