

대형 멀티 전자기 가진 시스템의 구성 및 설계

Configuration and Design of the Large Multi-Electromagnetic Shaking System

우성현* · 김홍배** · 문상무** · 김영기** · 임종민***

Sung-Hyun Woo, Hong-Bae Kim, Sang-Mu Moon, YoungKey Kim, Jong-Min Im

Key Words : MVTS(Multi-Vibration Test System, 멀티 전자기 가진 시스템), KARI(Korea Aerospace Research Institute, 한국항공우주연구원), SITC(Satellite Integration and Test Center, 위성시험동), KSLV(국산 위성발사체), Head Expander(헤드 익스펜더), Seismic Block(제진 블록), Load Compensation System(정하중 지지 시스템), Guidance System(가이드 시스템), Line-E-Air System(공압 제진 시스템), Overturning Moment(횡 모우멘트), PCU(위상 콘트롤 장치)

ABSTRACT

The vibration test system of SITC(Satellite Integration and Test Center) at KARI(Korea Aerospace Research Institute) has been used successfully for the environmental tests of a majority of Korean space programs, such as KOMPSAT, KoreaSat, KITSAT, STSAT and KSR program since 1996. To meet the recent needs of large size test facility available for the vibrational tests of the huge launch vehicles and tele-communication satellites which will be developed in the near future, KARI undertook to construct the large size multi-electromagnetic shaking system with $3 \times 3\text{m}$ 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. And to avoid the tremendous cost and effort to furnish the seismic block with large size and weight, it will adopt a Lin-E-Air type configuration with which the seismic block is less severe than a Solid-Trunion type. In addition, to fulfill the strong requirement of high overturning moment, the additional guidance system including a central bearing system on a central support and several pad bearings around the head expander body is now considered.

This paper describes the configuration and the design parameters of the multi-shaking system which is under development by KARI's engineers.

1. 서 론

한국항공우주연구원(KARI)에 위치한 위성시험동(SITC)은 위성체 및 각종 우주구조물의 개발을 위한 국내 유일의 복합 환경시험 시설로서 1996년 설립 이후 다목적 실용위성, 통신위성, 과학위성, 과학로켓 개발 사업 등 국내 대다수의 우주개발 사업을 위한 중추 시설로서 활용되어왔다. 이 중 발사체의 발사과정에서 발생하는 극심한 진동환경에 대하여 위성체 및 탑재물의 내강성을 검증하는 발사환경



Fig. 1 Launch Environmental Test Hall of SITC, KARI

시험시설(Fig. 1)에는 현재, 위성체 부품 레벨의 시험을 담당하는 80kN급의 중형 전자기 가진기(V964)와 조립이 완료된 위성 시스템의 환경시험을 담당하는 280kN급의 대형 전자기 가진기(V994)가 설치 및 운용되고 있다. 특히 대형 전자기 가진기의 경우, 접합 면적이 큰 시험 대상물의

* 한국항공우주연구원 선임연구원
E-mail : mach@kari.re.kr
Tel : (042) 800-2381, Fax : (042) 800-2234
** 한국항공우주연구원 선임연구원
*** 한국항공우주연구원 연구원

설치를 위하여 직경 2.0m의 헤드 익스펜더(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 초대형, 고추력 전자기 가진 시스템의 요구에 의하여 한국항공우주연구원은 직경 3.0m, 최대 중량 8 ton급의 시험이 가능한 진동 시험 시스템을 개발 중에 있으며, 이를 위해 현재는 전자기 가진기 3대와 직경 3m의 헤드 익스펜더로 구성된 총 추력 480kN의 수직형 멀티 가진 시스템(Multi-Vibration Test System, MVTS)을 개발 중에 있다. 또한 추후 기존의 슬립 테이블 시스템을 3m × 3m로 확장하여 대형 구조물의 수평 진동 시험에 활용할 예정이다.

본 논문에서는 현재 한국항공우주연구원이 개발 중인 대형 멀티 전자기 가진 시스템의 설계 인수 및 개념 설계 결과 선정된 초기 구성 안에 대하여 설명하고자 한다.

2. 멀티 가진 시스템의 사양

개발될 멀티 가진 시스템의 사양은 아리안 5(ARIANE 5) 로켓의 최대 탑재 제한을 기준으로 Table 1과 같이 선정하였다.

Table 1 The Specifications of KARI's MVTS

사양	제한	
Max. Test Load	8tons	
Max. IF Diameter	3m	
Max. Thrust	≥ 300kN on the working surface of the head expander	
Max. Overturning Moment	≥ 300kNm on the working surface of the head expander	
Max. Displacement (Continuous)	> 38mm(pk-to-pk)	
Max. Velocity (Continuous)	> 2m/s	
Cross Talk	5 to 500Hz	< 15%
	500 to 1kHz	< 20%
Low Frequency Capability	12 Hz	10g
	20 Hz	25g
Table Surface Flatness	0.05mm/m	
Controllable Acceleration	< 0.1g	

이 중 'Low Frequency Capability'는 위성체의 준정적 하중 시험(Quasi-Static Load Test)의 수행 가능 여부를 판단하는 주요한 설계 요구조건으로 저주파, 고출력에서의 시스템의 특성을 점검하는 기준이 된다.

초기 시스템 구성 단계에서는 국내의 시장에 다수의 납품적 및 사용 이력을 보유하고 있는 80kN, 160kN, 280kN급의

전자기 가진기를 선정하여 Table 1과 같이 세가지 후보안을 고려하였다.

Table 2 Possible Configuration of MVTS

시스템 구성	장점	단점
Quad. System of 80kN EM Shaker	* 저비용 * 헤드 익스펜더 면의 균일한 응답특성 * 기존 장비와의 호환성	* 작은 최대추력: 320kN * 작은 최대진폭: 38mm(pk-to-pk) * 헤드 익스펜더 형상 선정의 제약 * 4채널 위상 콘트롤 * 가진기 사이의 작은 여유 공간
Triple System of 160 kN EM Shaker	* 충분한 가진력: 480kN * 비교적 균일한 응답 특성 * 다양한 형태의 시스템 구성이 가능 * Central Bearing 설치 용이 * 원형 헤드 익스펜더의 설치 용이	* 기존 장비와의 낮은 호환성
Dual System of 280kN EM Shaker	* 높은 최대추력: 560kN * 높은 최대변위: 50.8mm(pk-to-pk) * 기존 장비와의 호환성	* 균일한 응답 특성을 얻기가 어려움 * 시스템 전체 높이가 최대 * 고비용

이 가운데 시스템 요구사항 및 설치 환경 조건을 고려하여 3개의 160kN급 전자기 가진기를 사용한 트리플(triple) 시스템을 최종안으로 선정하였으며, 진동 콘트롤 시스템은 기존 시스템에 멀티 콘트롤 콘솔을 추가하여 사용하도록 하였다.

3. 멀티 가진 시스템의 구성

3.1 제진 블록(Seismic Block) 및 전자기 가진기의 구성

제진 블록은 고출력 전자기 가진 시스템의 필수 설비로서 전자기 가진기의 가진으로 인해 발생하는 반작용 힘의, 건물 또는 연계 장비로의 전달을 차단하는 설비이며, 일반적으로 가진기의 가진력을 견디어 낼 수 있는 충분한 강성 및 무게의 콘트리트 블록과 이를 지반 및 건물로부터 분리시키는 2~5 Hz 고유진동수를 갖는 공압 제진 시스템(Air Isolation System)으로 구성되어진다. 이러한 제진 블록의 설계 시 고려하여야 할 중요한 요소 중 하나는 전자기 가진기의 체결 형태이며, 이에 따라 멀티 가진기 시스템의 구성은 지상 직립 타입(Stand Alone Type), 강축 고정 타입(Solid Trunnion Type), 공압 제진 타입(Lin-E-Air Type)의 세가지로 분류되어진다.

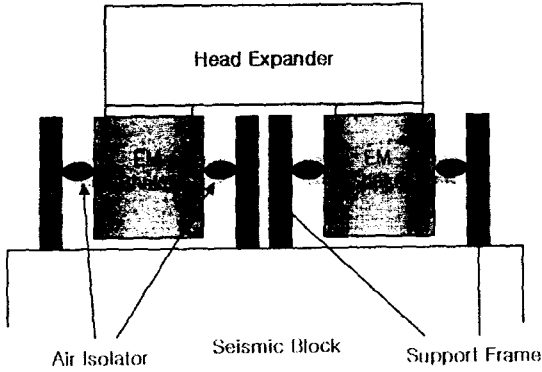


Fig. 2 Stand Alone Type of Multi-Vibration System

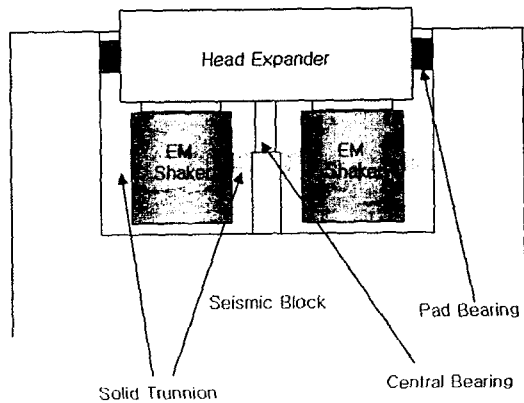


Fig. 3 Solid Trunnion Type of Multi-Vibration System

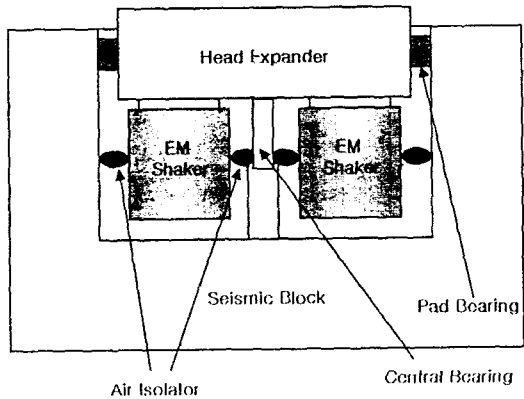


Fig. 4 Lin-E-Air Type of Multi-Vibration System

Fig. 2에서 보인 바와 같이 지상 직립 형태의 경우는 가진기의 설치 및 고정을 위하여 일반적으로 가진기와 함께 납품되어지는 고정 프레임(support frame)을 사용하는 경우로서 가진기의 설치 및 제진 블록의 제작이 용이한 반면, 시스템 전체 높이가 증가하여 테스트 결과 같이 높이가 제한된 공간에서는 시험 수행 시 사용 가능한 운용 높이(hook

height)가 줄어들게 된다. 또한 이 타입의 경우 고정 프레임의 강성이 충분하지 않아 35 Hz 근방에 회전 모드(swing mode)가 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이를 보완하기 위해 추가적인 고정 프레임을 설치하기도 하지만 충분한 강성을 얻기는 매우 힘들다. 이런 이유로 최근의 멀티 가진 시스템은 최대 횡 모멘트(overtuning moment)를 극대화하고 시스템 전체의 높이를 줄이기 위하여 전자기 가진기를 제진 블록에 파묻는 형태의 강축 고정 타입이나 공압 제진 타입의 구성이 널리 사용되고 있다. 이 중 강축 고정 타입의 경우는 전자기 가진기 자체의 몸체 제진 시스템(Body Isolation System)을 사용하지 않고 가진기 몸체를 강축을 통하여 제진 블록에 직접 연결하는 방식으로 이 경우 제진 블록과 가진기는 강제 운동을 하게 되어 진동 콘트롤이 용이하며, 고출력 상태에서도 상대적으로 큰 횡 모멘트를 지지할 수 있다. 하지만 이 타입의 단점은 가진기의 추력이 그대로 제진 블록에 전달됨으로 인해 원하는 제진 특성을 얻기 위해서는 추력의 8 ~ 10배에 해당되는 무게의 제진 블록이 필요함으로, 500 kN급에 멀티 가진 시스템의 경우 최대 500 ton급의 제진 블록이 요구된다. 공압 제진 타입의 경우는 가진기 몸체를 자체 공압 제진 시스템을 통하여 제진 블록과 연결하는 형태로 저주파 대역에서 횡 모멘트 지지 특성이 떨어지지만, 가진기의 출력에 의한 반작용을 몸체 제진 시스템이 일차적으로 감쇠시킴으로 제진 블록의 무게 및 부피를 크게 줄일 수 있다. 한국항공우주연구원은 Fig. 5와 같이 기존의 전자기 가진 시스템을 위하여 400 ton 급의 제진 블록을 이미 보유하고 있으며, 새롭게 제작될 멀티 가진 시스템을 위하여 기존의 제진 블록을 수정하여 공압 제진 타입의 시스템을 설치하는 방안을 검토 중에 있다.



Fig. 5 The Seismic Block of SITC

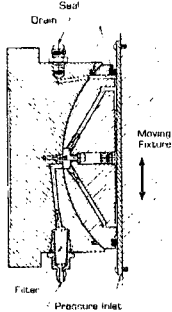
3.2 헤드 익스펜더(Head Expander)

현재 상용화되고 있는 헤드 익스펜더는 일반적으로 알루미늄 또는 마그네슘으로 제작되어지는데 알루미늄의 경우 제작 비용이 적게 드는 반면, 마그네슘에 비해 비중이 1.5배 높아 같은 체적에서 전체 중량이 증가하여 궁극적으로는 전체 시스템의 출력 가속도를 감소시키며, 고주파 대역에서의

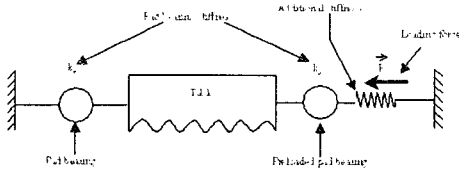
낮은 댐핑 특성으로 인해 진동 콘트롤에 어려움이 있다. 이로 인해 본 시스템의 경우 마그네슘 헤드 익스펜더를 채택하였으며, 헤드 익스펜더의 상면에는 시험 대상물의 설치를 위한 적당한 패턴의 스테인레스 스틸(stainless steel) 인서트를 설치하도록 하였다.

3.3 가이드 시스템(Guidance System)

요구되는 형모멘트 지지 특성을 만족시키기 위해서는 가진기 자체의 지지 특성만으로는 부족하며 추가적인 가이드 시스템의 설치가 요구되어진다. 멀티 가진 시스템에 사용되는 가이드 시스템은 크게 측면 베어링(Peripheral Bearing)과 중앙 베어링(Central Bearing)으로 나누어진다. Fig. 6 (a)은 헤드 익스펜더의 측면 가이드 시스템으로 널리 사용되는 패드 베어링(Bearing)을 나타낸다. 패드 베어링은 헤드 익스펜더의 상하 운동을 유지시키는 접합면과 헤드 익스펜더와 패드의 자동 정렬을 위한 구형 베어링(Spherical Bearing) 면의 두개의 유막(hydrostatic surface)으로 구성되어, 하나의 패드 베어링은 3개의 회전 자유도와 2개의 변위 자유도를 가지게 된다. 또한 패드 베어링은 압축력만을 지지할 수 있으므로 Fig. 6 (b)과 같이 헤드 익스펜더에 한 쌍이 양쪽 면에 설치되고 한쪽 베어링에서 유압을 이용하여 전하중(pre-load)를 가해줌으로써 시스템을 유지시켜준다.



(a) Section View of Pad Bearing



(b) Schematic of Pad Bearing

Fig. 6 Pad Bearing System

로 구성된 전형적인 중앙 베어링 시스템을 나타낸다. 이상적으로 작동되는 중앙 베어링 시스템은 상면 헤드 익스펜더의 X, Y 방향의 회전 및 병진 운동을 구속하며, Z방향으로만의 자유도를 부여하게 된다.

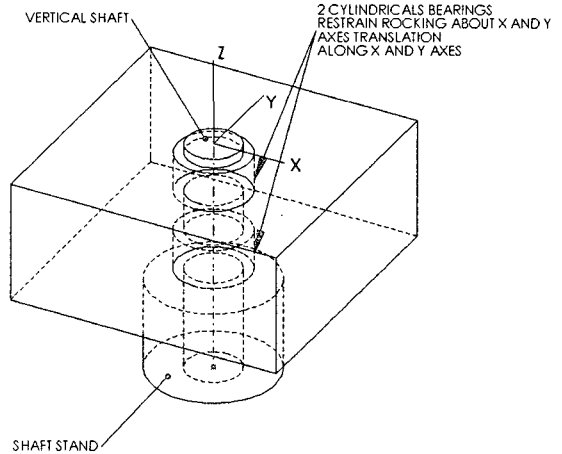


Fig. 7 Central Bearing System

3.4 위상 콘트롤 장치(Phase Control Unit)

위상 콘트롤 장치(PCU)는 증폭기(amplifier)와 가진기 사이에 설치되어 있는 전류계(current transformer)로부터 획득된 신호를 피드백(feed-back) 콘트롤하여 각 가진기에 인가되는 전류의 위상 및 크기의 차이를 소멸시켜, 한개 이상의 가진기가 동일한 추력을 발생시키도록 하는 장치로서, 멀티 가진 콘트롤의 근간을 이루는 주요 장치이다. Fig. 8은 널리 사용되고 있는 4채널 위상 콘트롤 장치의 회로 구성을 나타내며, 이러한 위상 콘트롤 장치는 동일 위상으로 움직이는 멀티 가진 시스템 외에, 가진 신호의 위상을 역전시킴으로써 밀고 당김 모드(push-pull mode)의 가진 시스템에도 사용되어질 수 있다.

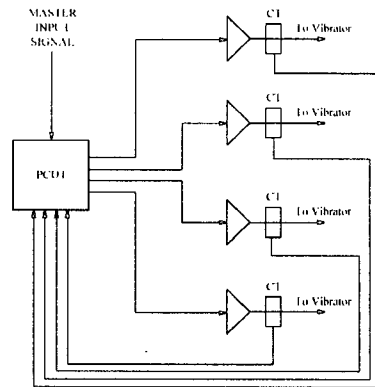


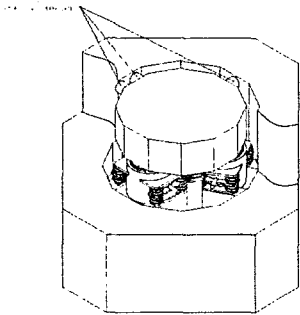
Fig. 8 Block Diagram Showing Current Feedbacks

Fig. 7은 두개의 실린더 형 베어링과 이를 연결하는 강축으

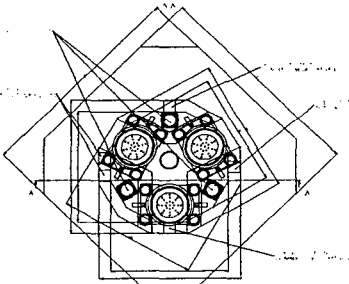
3.4 정하중 지지 시스템(Load Compensation System)

헤드 익스펜더 시스템이 지지하여야 할 최대 정하중은 다음 식(1)에 의하여 계산되어진다.

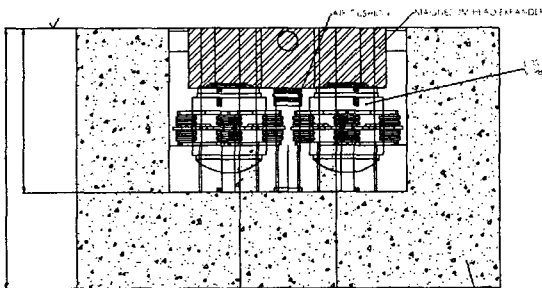
$$\begin{aligned}
 \text{최대 정하중} &= \text{최대 시험 하중}(8\text{tons}) \\
 &+ \text{헤드 익스펜더 몸체 무게}(2.7\text{tons}) \\
 &+ 3 \times \text{가진기 구동부 무게}(130 \text{ kg}) \\
 &\cong 11\text{tons} \quad (1)
 \end{aligned}$$



(a) Iso-view



(b) Top-view



(c) Section-View

Fig. 9 System Configuration of the proposed MVTs

일반적인 멀티 가진 시스템의 정하중 지지 시스템은, 지지 구조물과 상면에 설치되는 공압 제진 시스템으로 구성되어지며, 본 시스템에는 120° 간격으로 떨어진 3개의 하중 지지 시스템을 고려하였다.

개별 가진기가 지지할 수 있는 정하중은 최대 2ton 정도로, 총 6ton을 지지할 수 있으므로 5ton의 추가 하중을 지지할 수 있는 별도의 하중 지지 시스템의 설치가 요구되어진다.

3.5 시스템의 구성

상기의 설계 조건을 고려하여 Fig. 9와 같이 최대 체적 3.6(L) × 3.6(W) × 4(H)m의 480kN급 멀티 가진 시스템을 구성하였다. 이후 상세 설계를 통하여 장비의 유지 및 수리를 위한 작업 공간 및 통로, 배관구, 오일 유출로부터 청정 환경을 보호하기 위한 덮개 등이 추가적으로 고려될 예정이다.

4. 결 론

한국항공우주연구원은 추후 개발 예정인 대형 위성체 및 발사체의 환경시험을 위하여 약 500kN의 추력과 지름 3m 이상의 접합면을 제공하는 멀티 가진 시스템의 개발을 추진 중에 있으며, 현재 시스템의 최종 요구사항을 고려하여 대략적인 개념 설계를 완료하였다. 이후 각 서브 시스템에 대한 상세 설계에 앞서, 주요 서브 시스템인 헤드 익스펜더와 제진 블록의 동특성 및 거동 예측을 위한 해석 작업을 수행할 예정이며, 그 결과는 추후 시스템의 상세설계에 반영될 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) J. W. Sills Jr., and C. R. Voorhees, A Combined Testing Approach for Aerospace Hardware.
- (2) A. Launay, 2003, "Multi-Vibration Shaker Upgrading Project", Intespace.
- (3) 우성현, 2003, "SITC Vibration Test System Expansion Plan", 한국항공우주연구원.
- (4) 김홍배, 2002, "Test Facilities & Methodologies", 한국항공우주연구원