Check for updates

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 33(5) : 496~508, 2023
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2023.33.5.496

한국소음진동공학회논문집 제 33 권 제 5호, pp. 496~508, 2023
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

우주비행체 진동시험을 위한 신규 대형 수직 가진 시스템 설계

Design of Large Vertical Vibration Shaker System for Spacecraft Vibration Test

임 종 민† · 우 성 현* · 은 희 광* · 전 종 협*

Jong-Min Im†, Sung-Hyun Woo*, Hee-Kwang Eun* and Jong-Hyub Jun*

(Received April 21, 2023 ; Revised June 19, 2023 ; Accepted July 6, 2023)

Key Words : Launch Environment(발사환경), Vertical Vibration Shaker(수직 진동 가진기), Seismic Mass(제진 블록), Head Expander(헤드 익스펜더), Hydraulic Guidance System(유압 가이던스 시스템), Vibration Analysis(진동해석)

ABSTRACT

During the launch process, the launch vehicle and satellite are affected by transient dynamic loads such as engine ignition, wind gusts, and quasi-static loads. Vibration tests are performed using a vibration facility to demonstrate that the spacecraft structure can withstand the loads of the launch environment. Especially in vertical vibration tests, as the spacecraft is larger and heavier, it has a higher center of gravity at the mounting surface. This configuration generates high overturning moments resulting in unwanted cross-axis motion. To perform the successful test by preventing over-test or under-test, it is essential to control excessive cross-axis movement. Hence, Korea Aerospace Research Institute (KARI) developed a triple shaker system with a guided head expander design and has performed successful tests for satellites since 2008. With the novel test requirements from the launch vehicle and satellite, KARI planned to upgrade the vertical vibration system. Here, the configuration of a novel vertical vibration shaker system is introduced to satisfy the requirements. Design factors for elements composing the shaker system, such as seismic mass, head expander, hydraulic supply unit, and safety control units, are described. Finally, the dynamic characteristics are predicted by applying the new shaker system's finite element model.

1. 서 론

발사체 및 위성 등 우주비행체는 지상에서 발사 되어 설정된 우주 궤도에 도착하기까지 발사체 추진부의 연소 및 음속의 수배에 이르는 속도로 비행함에 따른 공기 역학적 환경에 의해 극심한 진동, 소음과 같은 발사환경(launch environment)에 노출된다. 발사체 접합부를 통한 하중은 준 정적 하중, 저주파 과도 진동 및 랜덤 진동을 유발하며 소음은 음향 진동을 유발하게 된다[1]. 이러한 발사과정 중 야기되는 하중들은 때때로 위성체 및 탑재체의 기능을 저하 또는 마비시키는 경우가 있다. 이에따라 우주비행체의 설계 및 제작 과정에서 발사환경에 대한 고려가 필요하며 제작된 시스템에 대하여 발사 이전에 적절한 시험 과정을 통해 설계 및 제작에 대한 검증을 수행하는

† Corresponding Author ; Member, KARI, Researcher
E-mail : acoust@kari.re.kr
* Member, KARI, Researcher

‡ Recommended by Editor Seongmin Chang
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

것이 필수적이다[2,3].

우주비행체에 대한 진동 특성 검증은 전자기식 진동 가진기(electro-dynamic vibration shaker)를 적용하여 수행하게 된다[4]. 특히 대형 구조물에 대한 수직 방향의 진동시험의 경우 진동 가진기 위에 헤드익스펜더(head-expander)라는 확장형 인터페이스 구조물을 추가적으로 설치하여 진동시험을 수행하게 된다. 이러한 가진기와 인터페이스 구조물의 동특성으로 인하여 가진주파수 이내에서 불필요한 횡방향(cross-axis) 가진이 발생하게 되며, 시험 대상체가 대형화될수록 횡방향 가진이 발생하는 주파수가 낮아져서 대상체의 고유진동수와 가깝게 되어 제어가 더욱 더 어렵게 된다. 경우에 따라서는 원치 않는 횡방향 가진이 본래의 수직방향보다 더 크게 발생하게 되고 과도시험(over-test)으로 인하여 시험 시제를 손상시키거나, 수직방향의 입력을 제한하여 과소시험(under-test)을 유발해 충분한 진동 환경 검증을 방해하게 된다[5].

한국항공우주연구원에서는 대형화된 위성 시스템의 안정적인 진동환경 시험 수행을 위하여 수직방향 진동시험에 특화된 수직 가진 시스템을 2008년에 구축하여 국내 개발 정지궤도 위성인 천리안 1호에 적용하였다[6]. 구축된 3병렬 가진시스템(triple shaker system)은 Fig. 1과 같이 3대의 진동 가진기, 지름 3 m의 인터페이스를 가지는 헤드익스펜더 및 유압 가이던스(guidance) 시스템으로 구성되어 있다.

2013년부터 신규로 개발 예정인 누리호 발사체 및 신규 개발 위성의 진동시험 요구조건을 대상으로 시설측면에서 시험 수행 가능성에 대한 검토를 하였다. 검토결과, 신규 우주비행체의 개발을 위한 진동 시험 시설에 대한 요구조건을 만족시키기 위해서는 기존 건물의 높이 증가, 운용 크레인의 용량 부족 해결 및 진동 가진 시스템의 성능개선 등이 요구되었다. 이와 같은 주요 문제점들을 해결하기 위하여 기존 진동 시험동과 연결된 신규 진동 시험동 건설 및 대형 수직/수평 가진 시스템의 구축을 추진하였다.

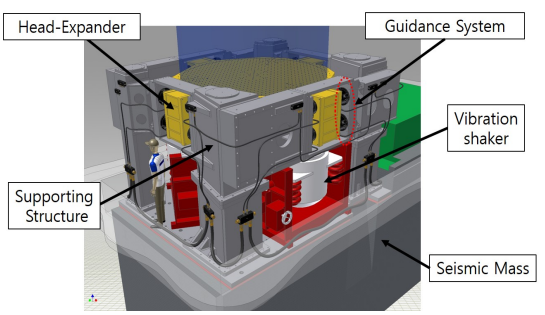


Fig. 1 Configuration of triple shaker system

이 논문에서는 대형 수직 가진 시스템의 구축 과정에서 가진 시스템 요소의 구성 방안 및 이에 따른 설계를 소개하고자 한다.

2. 대형 수직 가진 시스템 구성 방안

2.1 대형 수직 가진 시스템 설계 요구조건

신규 대형 수직 가진 시스템 설계를 위한 주요 요구조건은 시험 대상체의 크기, 시험 대상체의 최대 중량 및 시험 대상체에 따른 진동시험 요구조건으로 Table 1과 같다.

첫 번째 요구조건으로는 최대 직경 3.5 m, 높이 8 m의 대형 발사체 구조체가 설치되어 진동시험을 수행할 수 있도록 관련 인터페이스를 제공해야 한다. 두 번째 요구조건은 발사체 시험 대상체의 중량 및 성능에 관련된 것으로 최대 6 t의 시제를 3.5 g의 가속도 레벨로 진동시험을 수행할 수 있도록 구성되어야 한다.

세 번째 요구조건은 위성의 준정적 하중시험(quasi-static load test)을 위한 사양이다. 위성체가 발사시 받는 하중요인 중 발사체의 선형 가속 및 구조물의 전달 진동은 복합적으로 작용하여 위성체의 정적 강도에 영향을 주게 된다. 이에 대한 안전성을 검증하는 것이 준정적 하중시험이다. 정적 강도 검증을 위

Table 1 Test facility requirement

	Requirement	
Size of specimen	Ø3.5 m × 8 m	
Excitation range	5 Hz ~ 100 Hz	
Max overturning moment	200 kNm	
Test item #1	6 t	3.5 g
Test item #2	1.6 t	10 g @ 17 Hz
Test item #3	3.6 t	7.45 g @ 11.45 Hz
Cross-axis response 5 Hz ~ 100 Hz	< 20 % @ bare table	
Homogeneity 5 Hz ~ 100 Hz	10 % @ bare table	

해 사용되는 시험장치로는 유압방식의 정적 시험장비와 전자기식 가진 장비를 이용한 방식이 사용된다. 전자기식 방식의 경우 실제 비행 상황과 가장 유사한 환경을 부과할 수 있는 장점이 있으나 가진기의 추력 제한으로 인하여 일반적으로 1 t 이하의 중형급 위성에만 사용 가능하다. 신규 시스템으로 1.6 t급 저궤도 위성의 경우 최대 +/−10 g, 3.6 t급 정지궤도 위성의 경우 최대 +/−7.45 g로 Fig. 2와 같은 형상의 제어 프로파일을 구현하여 준정적(quasi-static) 시험을 수행하고자 한다. Fig. 3은 기존 시험시설의 성능과 신규 가진시설의 요구조건을 비교한 것을 나타낸다.

2.2 대형 수직 가진 시스템 형상

수직 가진 시스템의 전체적인 구성 및 연결 요소는 Fig. 4와 같다. 동일한 위상(phase)으로 가진력을 발생시켜주는 진동 가진기(vibration shaker), 위상 제어기(phase control unit), 다수의 가진기들을 하나로 연결시켜주는 동시에 대형 시험체를 설치할 수 있도록 관련 인터페이스를 제공해 주는 헤드익스펜더(H/E: head expander), 진동시험 과정에서 발생하는 횡방향 움직임 및 모멘트 하중(cross-axis moment)을 제어해 주는 유압 가이던스 시스템(guidance system), 가이던스 시스템이 설치가 되는 하중지지 구조물(load supporting structure) 및 제진 블록(seismic mass)으로

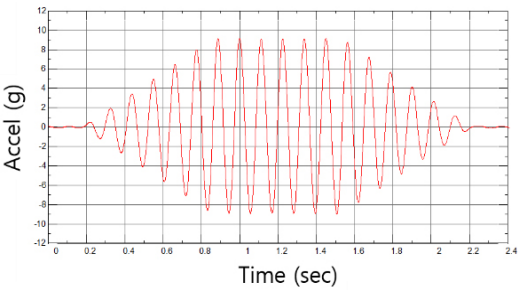


Fig. 2 Sine-burst test profile

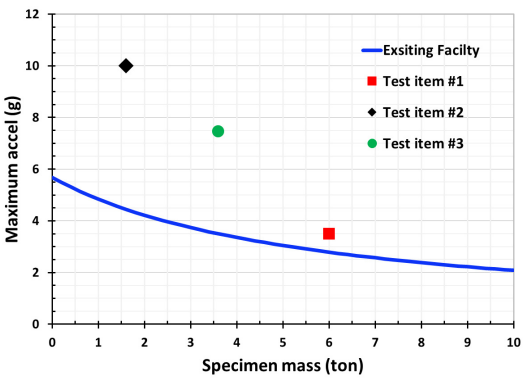


Fig. 3 Comparison of new facility requirement with the capability of existing test facility

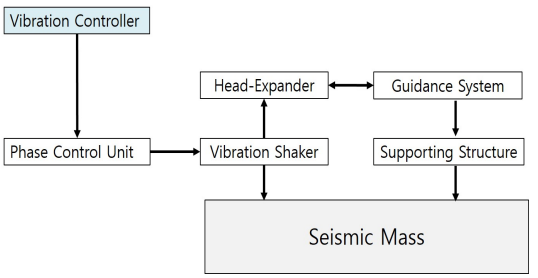
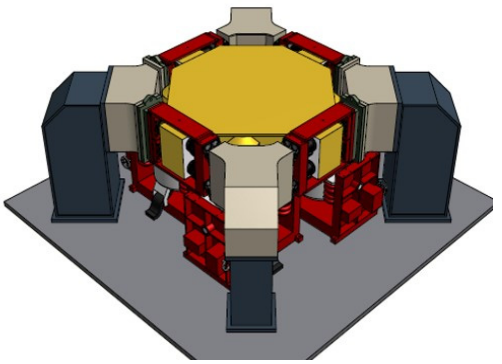
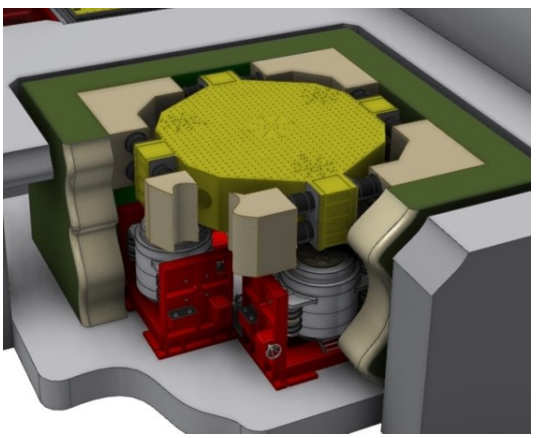


Fig. 4 Configuration of vertical vibration system



(a) Design (A)



(b) Design (B)

Fig. 5 Preliminary designs for vertical shaker system

구성된다.

대형 수직 가진 시스템은 진동 가진기와 제진 블록의 연결방식에 따라 크게 3가지 유형으로 구분되는데, 개선된 시스템의 구축을 위해 Fig. 5와 같이 2가지 형상에 대한 검토를 수행하였다.

설계안 (A)의 형상은 횡방향 모멘트 제어를 위해 필수적인 가이던스 시스템과 측면에 강성이 확보된 지지 구조물로 구성된다. 또한 이 구조물은 모멘트 하중 전달 경로 제공을 위해 하부의 제진 블럭과 결합되는 설계안이다. 설계안 (B)의 형상은 내부 공간에 가진기 시스템의 주요 구성요소가 설치되는 동시에 가이던스 시스템의 작용 하중을 전달할 수 있도록 특수한 형상을 가진 제진 블록을 구현한 설계안이다. 설계안 (A) 형상은 제진 블록 제작 및 구축에 용이하나, 가진기 유지보수를 위한 헤드익스펜더 제거 및 유지보수 후 재 설치시 가이던스 시스템을 정렬하는데 어려움이 존재하는 단점이 있다. (B)형은 특수한 형태의 제진 블록 제작 및 초기 설치과정에서 어려움이 있으나, 충분한 강성으로 가이던스 시스템을 지지할 수 있고 초기 설치 이후에는 유지보수가 상대적으로 용이하다. 또한 지하에 가진 시스템을 설치함으로써 지상에서 용이하게 시험 대상체에 접근할 수 있는 장점이 있다.

신규로 구축 예정인 수직 가진 시스템은 고압 누기 시험을 위한 특수한 형태의 시험동 건설과 동시에 진행되기에 지하에 전체 시스템을 설치할 수 있는 설계안 (B)를 기본 설계 형상으로 선택하였다.

2.3 헤드익스펜더 제작 소재 선정

대형화된 시험 대상체의 수직방향 진동시험을 수행하기 위해서는 진동 가진기 상부(armature of shaker)에 헤드익스펜더를 설치하여 운용하는 것이 일반적이다. 대형 수직 가진 시스템에서 헤드익스펜더는 다수의 가진기들을 서로 연결하고 대형 시험 대상체가 설치될 수 있도록 인터페이스를 제공한다. 또한 가이던스 시스템과 연결되어 진동시험시 작용하는 횡방향 모멘트 하중을 지지하는 역할을 수행하는 중요 구조물이다.

시험대상체가 설치되어 함께 진동 하중을 받게 되는 구조물이기에 일차적으로는 주요 진동시험 주파수 5 Hz ~ 100 Hz 범위에서 구조적 공진이 발생되지 않도록 설계되는 것이 요구된다. 또한 헤드익스펜더의 무게가 증가할수록 제한된 진동 가진기 추력(excitation force) 대비 최대로 가진할 수 있는 가속도 레벨이 낮아지기 때문에 강성을 최대한 보장하는 동시에 무게를 최소화할 수 있도록 헤드익스펜더의 최적 설계가 요구된다.

헤드익스펜더는 경량화를 위해 일반적으로 알루미늄 또는 마그네슘 소재가 널리 사용된다.

소재에 따른 경량화 및 이에 따른 고유진동수 특성 파악을 위하여 Fig. 6과 같이 기존에 구축된 수직 가진 시스템의 헤드익스펜더 유한요소모델을 이용하여 Fig. 7과 같이 모드 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 물질의 특성은 Table 2와 같으며, 마그네슘 소재의 경우 알루미늄 소재에 비해 약 30 %의 무게 감소에도 불구하고 Table 3과 같이 1차 고유진동수 측면에서는 유사한 특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

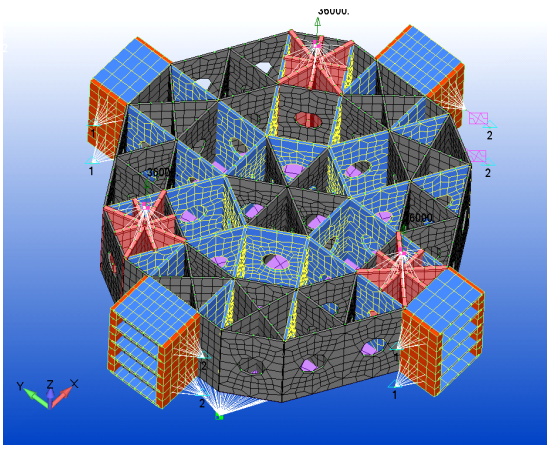


Fig. 6 Head-expander F.E model of triple shaker

Table 2 Material property of Al and Mg

Material	Density [kg/m^3]	Young modulus [GPa]	Fatigue strength [MPa]
Al	2700	70	~ 100
Mg	1740	45	~ 73

Table 3 H/E 1st bending mode due to material

Material	1st mode [Hz]	Weight
Al	123.8	5.2 t
Mg	120.4	3.5 t

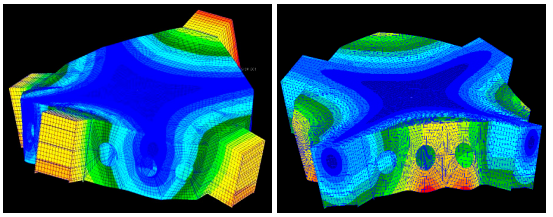


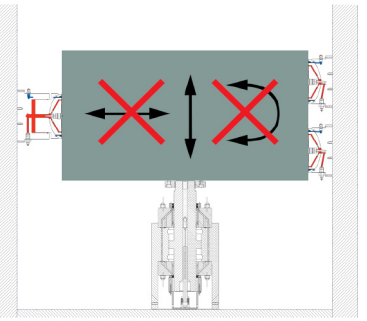
Fig. 7 1st and 2nd mode shapes of head expander

알루미늄 소재에 비해 마그네슘은 높은 재료비와 용접의 난이도로 인하여 제작에 많은 어려움이 있다. 그러나 헤드익스펜더의 경량화를 통하여 진동시험 과정에서 시험 대상체와 결합된 전체 이동 질량(moving mass)을 최소화함으로써 위성의 준정적 시험과 같은 높은 레벨의 진동시험을 수행할 수 있는 장점이 있다. 요구되는 성능을 구현하기 위하여 신규 헤드익스펜더는 제작의 어려움에도 불구하고 기존 3병렬 가진시스템과 달리 마그네슘 소재를 적용하기로 하였다.

2.4 유압 가이던스 시스템 선정

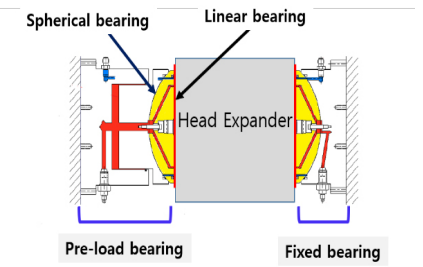
시험 대상체가 대형화될수록 무게 중심이 가진 장비 상면으로부터 높이 위치하게 되며 이로 인하여 진동시험 과정에서 굽힘 하중(overturning moment) 및 횡방향 하중(cross-axis load)이 발생하게 된다. 또한 시험 대상체가 헤드익스펜더와 기계적으로 결합되는 시험 형상(coupled structure configuration)으로 인하여 실제 시험 대상체의 형상과 달리 시험 주파수 대역안에서 여러 개의 구조적 공진 특성을 가지게 되는 현상이 발생하게 된다[5]. 이러한 상황에서 진동시험 시 수직방향의 움직임이 원활하게 이루어질 수 있도록 가이드 하는 동시에 시험 대상체의 거동에 의해 유발되는 과도한 횡방향 하중으로부터 가진시스템을 안전하게 보호하기 위하여 Fig. 8(a)와 같이 유압 가이던스 시스템(hydraulic guidance system)이 적용된다. Fig. 8(b)는 헤드익스펜더의 가이던스 시스템으로 널리 사용되는 TEAM 사의 패드 베어링을 나타낸다[7].

가이던스 시스템에 사용되는 패드 베어링은 Fig. 8(c)와 같이 고정형(fixed-bearing)과 프리 로드형(pre-load bearing)으로 구성된다. 고정형 베어링은 헤드익스펜더의 상하 운동을 유지시키는 접합면(linear bearing)과 헤드익스펜더와 패드 베어링의 자동 정렬을 위한 구형 베어링 유압면(spherical bearing)으로 구성되어



(a) Function of guidance system

(b) TEAM pad-bearing



(c) Configuration of pad-bearing

Fig. 8 Guidance system with pad bearing

3개의 회전 자유도와 2개의 변위 자유도를 가지게 된다. 프리 로드 베어링은 고정형 베어링에 실린더형 구조가 결합된 베어링이다. 고정형 패드 베어링이 압축력만을 지지할 수 있는 구조이기 때문에 헤드익스펜더에 한쪽 면에 고정형이 설치되고 반대쪽 면에 설치된 프리 로드 베어링에서 유압을 이용하여 실린더에 프리 로드(pre-load)를 가해줌으로써 시스템이 작동하도록 유지시켜준다.

기존에 구축되었던 수직 가진시스템의 경우, 높은 굽힘하중 요구조건의 만족 및 운용과정에서 온도변화에 따른 헤드익스펜더의 열팽창으로 인한 패드 베어링 시스템의 유막 손상을 방지를 위하여 Fig. 9와 같

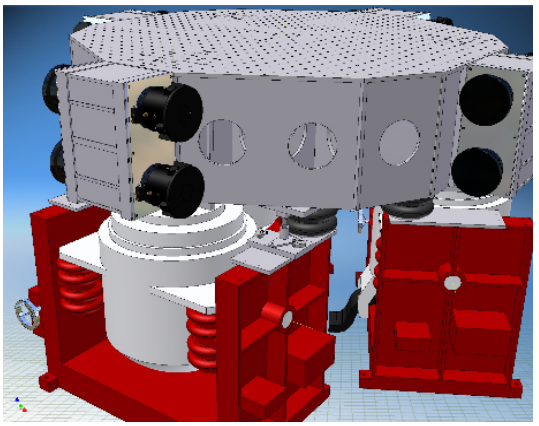


Fig. 9 Configuration of guidance system in previous vertical shaker system

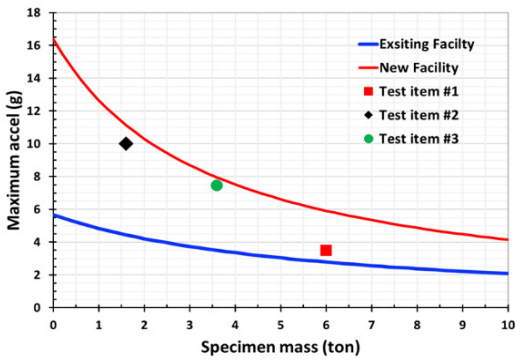


Fig. 10 Test facility capacity with new shaker system

이 원주형 가이던스 시스템이 적용되었다. 신규 시스템의 경우도 동일한 방식으로 헤드익스펜더 주변으로 총 16개의 유압베어링을 재활용하여 유압 가이던스 시스템을 구성하기로 하였다.

2.5 진동 가진기 선정 및 배치

기존에 구축되어 운영중인 수직 가진 시스템은 시스템 설치 공간의 제약으로 인하여 160 kN 추력을 가지는 가진기 3대를 배치하여 총 480 kN의 추력을 가지도록 구축되었다. 신규로 요구되는 시험 요구조건을 만족하기 위해서는 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 보다 높은 추력의 가진 시스템이 요구되는 것을 알 수 있다. 상용화된 가진기의 경우 160 kN과 280 kN 급이 존재하며 추력 향상을 위해서는 160 kN 가진기 4대를 적용하거나 280 kN 가진기 3대 또는 4대를

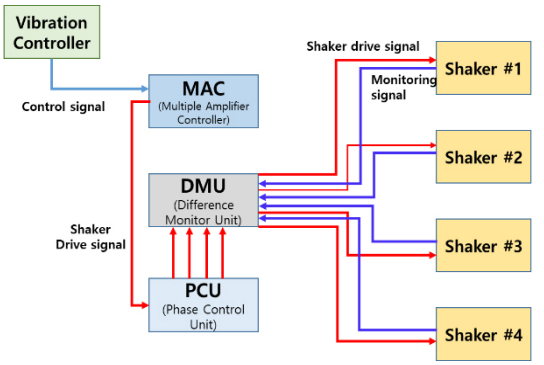


Fig. 11 Configuration of phase control system

적용해야 한다. 280 kN 가진기를 적용한 시스템의 경우 추력 향상 측면에서는 유리하나 가진기 자체의 형상이 크다. 이로 인하여 가진기들을 연결해 주는 헤드익스펜더의 크기 또한 상대적으로 매우 커져서 동적특성이 저하되는 측면이 있다. 이러한 점을 고려하여 신규 수직 가진 시스템에서는 동일모델 가진기 1대를 추가하여 총 4대의 가진기들이 640 kN의 추력을 가지도록 구성하기로 하였다. Fig. 10은 4대의 160 kN 가진기와 마그네슘으로 경량화된 헤드익스펜더를 적용시 시설구축 요구사양의 만족 여부를 보여준다.

수직 가진 시스템은 높은 출력을 발생시키기 위하여 헤드익스펜더에 4대의 독립된 가진기들을 연결하여 운용하게 된다. 따라서 추력을 발생시키는 진동 가진기들이 최대한 동일한 위상과 진폭으로 진동할 수 있도록 동기화하고 모니터링 하는 시스템이 요구된다. 동일한 모델의 가진기일지라도 가진기의 기계적 조립/정렬 상태 및 전기적인 파워 앰프의 특성으로 인하여 미세한 차이가 발생하게 되기 때문이다. Fig. 11은 기존에 적용된 위상 제어 시스템의 구성을 보여준다.

위상 제어 유닛(phase control unit)은 하나의 진동 제어신호를 서로 다른 가진기에서의 상대적인 진폭과 위상 차이를 보정하여 4개의 가진 신호로 나눠서 제공한다. 모니터링 유닛(difference monitoring unit)은 진동시험 과정에서 가진기를 구동시키는 전류를 모니터링하여 문제 발생시 시스템을 중단시키는 안전장치이다. 기존 시스템에 적용된 위상 제어 시스템이 최대 4대의 가진기를 구동할 수 있기에 재활용하여 신규 구축 시스템에 적용하기로 하였다.

3. 대형 수직 가진 시스템 설계

신규 수직 가진 시스템의 설계를 위하여 프랑스의 SEREME 사와 협업을 수행하였다. 4대의 가진기들이 콘크리트 방진 구조물에 포함되는 구조로 ESA의 ESTEC과 동일한 구성을 가지도록 Fig. 12와 같이 설계하였다[8].

3.1 제진 블록(Seismic mass)의 설계

제진 블록은 고출력 가진 시스템의 필수설비로서 진동시험시 가진기 추력으로 인해 발생되는 반작용 힘이 인접건물 또는 연계 장비로 전달되는 것을 차단하는 구조물이다. 일반적으로 가진기 시스템의 가진력을 견디어 낼 수 있도록 충분한 강성 및 무게를 지니는 콘크리트 블록과 이를 지반 또는 건물로부터 분리시키는 제진(isolation) 시스템으로 구성된다.

추가적으로 수직 가진 시스템용 제진 블럭은 가이던스 시스템 설치를 위한 인터페이스 제공 및 하중 전달 경로의 역할을 동시에 수행해야 한다. 특히 제진 블록은 가이던스 시스템으로 인하여 최대 200 kNm의 모멘트 하중이 작용하고, 각각의 유압 베어링은 약 370 kN의 압축력을 발생시키기 때문에 유압 베어링을 강하게 지지할 수 있도록 관련 인터페이스 부분이 설계되어야 한다.

Fig. 13은 설계된 제진 블록을 보여준다. 제진 블록은 크게 진동 가진기와 제진 시스템이 설치되는 하부구조, 가이던스 시스템이 설치되는 상부구조, 상부구조에서 발생되는 하중을 전달하는 연결 구조로 구성되어 있다.

제진 블록의 지지를 위한 제진 시스템의 경우 에어 스프링 방식(pneumatic isolator) 또는 고체 스프링 방식(spring & damper isolation system)을 이용하는 방안이 고려되었다. 에어 스프링의 경우 공급되는 공기의 압력을 조정하여 능동적으로 스프링 계수를 조절할 수 있는 장점이 있으나, 수직 가진 시스템의 경우 시험시제가 장비 중앙에 설치되어 무게 중심의 이동이 없는 측면과 유지보수의 수월성을 고려하여 고체 스프링 타입의 제진 시스템을 적용하였다. 설계된 제진 블록은 7.3 m × 7.3 m × 4 m의 크기를 가지며 하부 외곽에 20개의 스프링과 4개의 댐퍼로 지지되며 총 중량은 약 300 t에 달한다.

진동시험이 5 Hz ~ 100 Hz 대역에서 수행되기에 제진 블록의 강체 모드가 2 Hz 이내로 존재하도록 제진 블록의 형상 및 방진 스프링의 사양이 설계되었다. Fig. 14는 제진 블록의 고유 모드를 나타낸다.

3.2 헤드익스펜더 설계

가진 시스템의 성능을 최대로 구현하기 위해서는 헤드익스펜더의 경량화 작업이 수행되어야 한다. 이와 동시에 진동시험 과정에서 작용하는 하중을 구조적으로 견디기 위해 강도 확보가 필요하며, 고유 모드를 150 Hz 이상으로 갖게 하여 진동시험에 영향을

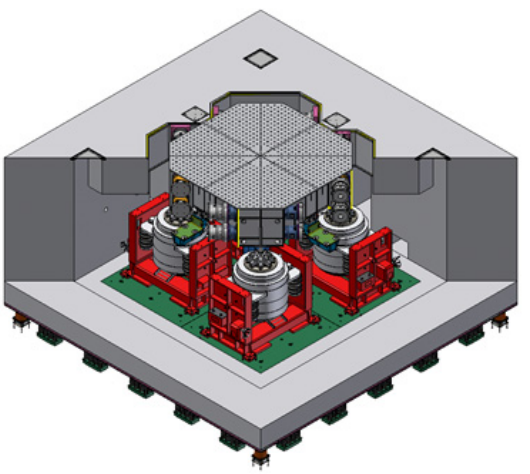


Fig. 12 Design of vertical shaker system

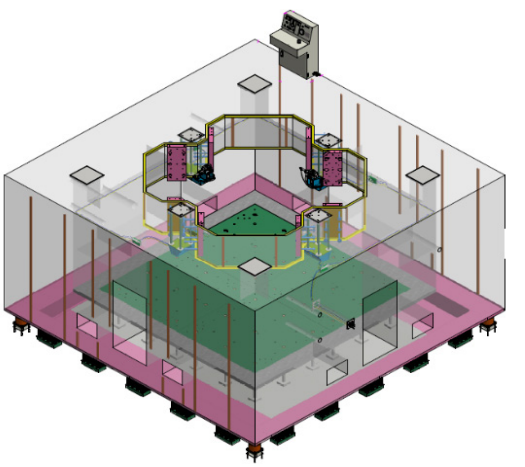


Fig. 13 Configuration of seismic mass

최소화하기 위하여 강성 확보가 필수적이다. 이를 위하여 마그네슘 소재를 적용하여 경량화를 수행하였으며 사각 격자를 가진 유사 벌집구조(honeycomb structure)를 적용하여 헤드익스펜더를 설계하였다.

강성 확보를 통한 헤드익스펜더 1차 모드의 고유진동수를 상승시키기 위하여 Fig. 15와 같이 내부에 추가적인 보강 구조를 적용하여 설계를 수행하였다.

유한요소모델에 의해 예측된 헤드익스펜더의 첫 번째 모드는 Fig. 16과 같이 171 Hz로 주된 진동시험 주파수 영역인 100 Hz 이상에 존재하는 것을 확인할 수 있다.

헤드익스펜더 주위에는 횡방향 하중 제어를 위하여 Fig. 17과 같이 유압 가이던스 시스템이 설치되어 있다. 이로 인하여 16개의 유압 베어링들이 헤드익스펜더 측면(sliding plate)에 370 kN의 정하중을 부가하게 된다. 이때 유압 베어링과 헤드익스펜더 측면에는 100 μm의 유막이 형성되는데, 베어링의 정하중에 의해 헤드익스펜더 측면 인터페이스부의 변형이 유막을 파괴시키지 않도록 설계되어야 한다. 유압 베어링 작용에 의한 헤드익스펜더 측면의 구조적 변형량을 예측하기 위하여 Fig. 18과 같이 측면 구조를 대상으로 국부적인 유한요소모델을 구성하였다. 한쪽면에는 베어링에 의한 압축력을 작용시켰으며 반대측은 변위 고정조건을 부과하여 구조해석을 수행하였다. 해석 수행결과 헤드익스펜더 측면의 변형량은 Fig. 19와 같은 분포를 갖는다. 접촉면 중앙부에서 수직 및 수평축으로 위치에 따른 변형량은 Fig. 19의 그래프와

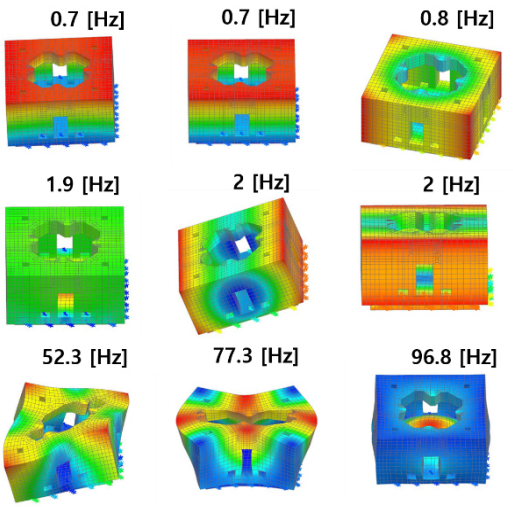


Fig. 14 Mode shapes of seismic mass

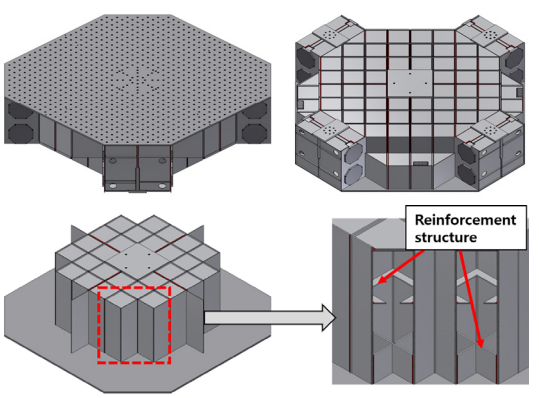


Fig. 15 Design of head expander

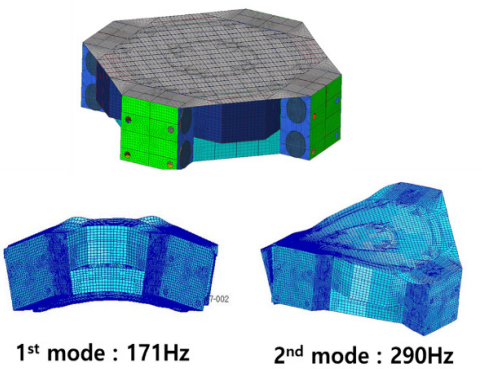


Fig. 16 Modal analysis of H/E

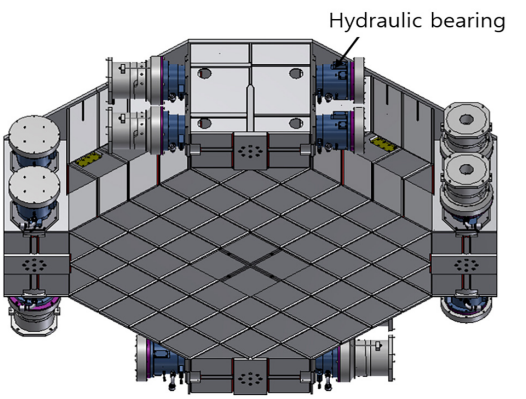


Fig. 17 Location of hydraulic bearings on H/E

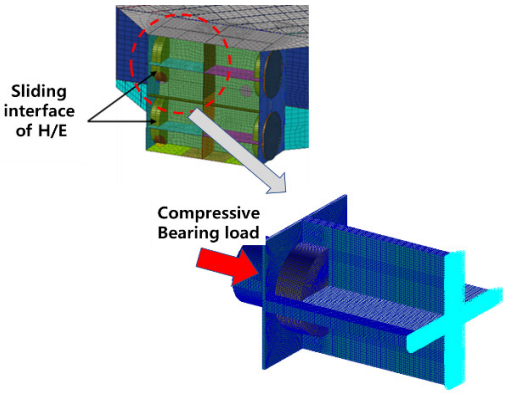


Fig. 18 F.E. model of bearing and sliding plate of H/E

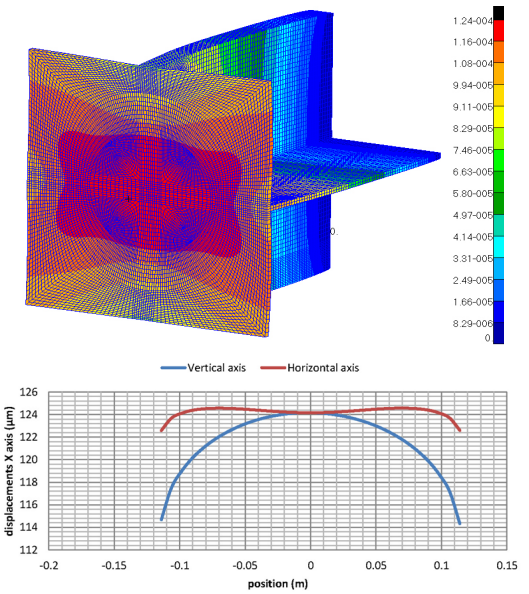


Fig. 19 Structural deformation of sliding plate

같다. 위치에 따른 상대적인 변형량이 최대 13 μm이내로 베어링이 정상적으로 작동할 수 있음을 예측할 수 있다.

헤드익스펜더는 진동시험 과정에서 진동 가진기로부터 전달되는 최대 수직하중(640 kN)과 최대 모멘트 하중(200 kNm)이 동시에 작용 시 구조적으로 손상이 없도록 설계되어야 한다. 이를 위해 하중해석을 수행하여 헤드익스펜더 구조물의 응력의 분포를 예측하였다. 최대 응력은 유압 베어링과 접촉되는 헤드익스펜더 측면 부분으로 최대 25 MPa이 작용하는 것을 Fig. 20과

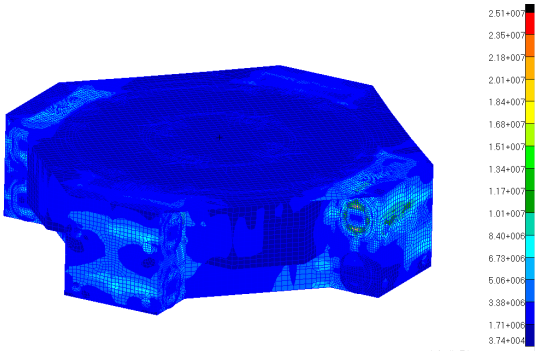


Fig. 20 Maximum von-mises stress of H/E

같이 확인할 수 있다. 최대 하중조건에서 헤드익스펜더에 작용하는 최대 응력은 25 Mpa으로 마그네슘의 항복강도(yield stress, 120 Mpa)을 고려하면 4.8의 안전율을 가지고 있다.

3.3 베어링용 유압 공급 시스템 설계

가이던스 시스템에 적용된 16개의 유압 베어링을 운용하기 위해서는 210 bar의 압력으로 각각의 베어링에 동일한 오일을 공급해 주는 유압 공급 시스템의 설계 및 적용이 필요하다. 이를 위하여 Fig. 21과 같이 4개의 분배기(split manifold) 설계하여 1개의 분배기가 4개의 베어링들에 대한 오일 공급 및 회수를 담당하도록 하였다. 공급라인에는 유량계를 설치하여 각각의 분배기에 공급되는 유량을 모니터링 하도록 구성하였다. 진동시험 과정에서 베어링 내부를 순환하는 오일의 온도 제어를 위해 수냉식 냉각장치를 오일 공급 펌프에 장착하였으며, 원활한 오일의 회수를 위해서 스캐빈지 펌프와 경사를 가지는 오일라인을 설계하였다.

3.4 정하중 보정 시스템 설계

각각의 진동 가진기가 지지 가능한 정하중은 최대 2 t이며 따라서 4대의 가진기들이 지지할 수 있는 정하중은 최대 8 t이다. 헤드익스펜더의 중량과 최대 10 t의 시험 대상체를 적용하여 진동시험을 수행하기 위해서는 진동 가진기의 정하중 지지능력을 초과하는 무게에 대해서 추가적인 하중 보조 시스템이 적용되어야 한다. 이를 위해 Fig. 22와 같이 헤드익스펜더 중앙에서 필요한 정하중을 보조해 주는 정하중 보정 시스템을 설계하였다. 1개의 기둥과 4개의 에어백

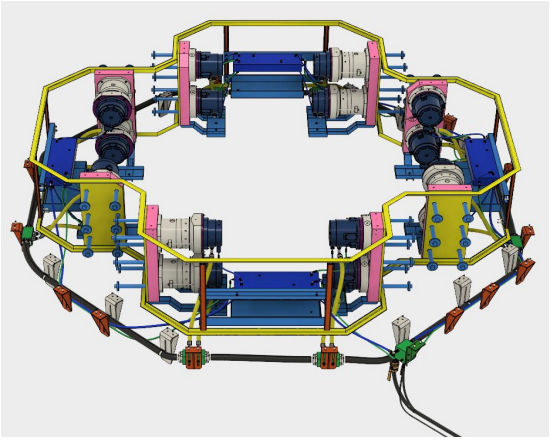


Fig. 21 Design of oil supply system for bearings

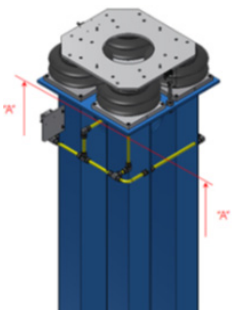


Fig. 22 Configuration of static load compensator

(air-bag)으로 구성되어 시험 대상체의 무게에 따라 공압을 조절함으로써 가진기 시스템이 운용될 수 있도록 보조적인 역할을 수행한다. 또한 위치 센서를 부착하여 헤드익스펜더의 위치정보를 제공하는 동시에 및 설정 범위로 초과하여 헤드익스펜더가 작동 시 제어 시스템에 시험 중단신호를 송부하여 시스템을 보호하도록 설계 하였다.

3.5 안전 제어 시스템 설계

진동환경 시험은 발사과정에서 우주비행체에 작용하는 극한 진동환경을 부가하는 지상시험이기 때문에 안전한 시험이 수행될 수 있도록 시스템을 구현하는 것이 최우선이다. 수직 가진 시스템은 성능의 구현을 위해 여러 구성품들을 조합하여 운영하기 때문에 중앙에서 통합하여 모니터링 및 제어를 수행하는 보조 시스템의 설계 및 적용이 필수적이다. 이를 위하여

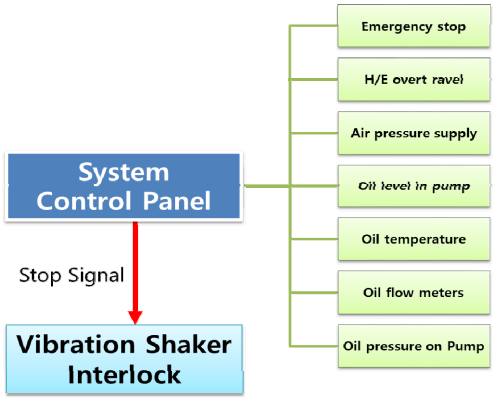


Fig. 23 Safety control logic of shaker system

PLC(programmable logic controller) 적용하여 안전 로직(safety logic)에 따라 작동되도록 제어패널을 설계하였다. 안전 로직은 Fig. 23과 같이 시험 모드에 따른 헤드익스펜더의 위치 확인, 각종 밸브 작동을 위한 에어 공급라인의 압력 모니터링, 유압펌프의 오일 레벨, 온도, 작동 전류 및 압력 모니터링, 베어링에 공급되는 오일 유량 모니터링을 수행한다. 설정 범위 초과시 시스템 제어 패널에 알람 신호를 생성하는 동시에 진동가진기 앰프 시스템으로 중단신호를 보내 가진기가 작동하지 않도록 함으로써 가진 시스템 및 시험 시제의 안전을 확보하도록 설계하였다.

4. 유한요소 해석을 통한 시스템 동특성 예측

4.1 수직 가진 시스템 단독의 동특성 예측

설계된 수직 가진 시스템의 동적 특성을 파악하기 위하여 Fig. 24와 같이 가진기 시스템의 주요 구성 요소를 반영하여 유한요소모델을 구성하였다. 유한요소 해석모델은 총 131 508개의 요소와 126 316개의 절점으로 이루어지며 총 무게는 330 t이다. 방진대 지지를 위한 제진 시스템은 스프링 요소로 나타내었으며 가진기는 절점과 강체(RBE2) 요소를 이용하여 표현하였다. 가이던스 시스템과 헤드익스펜더 사이의 유막 경계조건은 육면체 요소를 이용하여 오일 필름에 의한 영향을 표현하였다. 관련 모델의 구성 및 해석은 Simcenter 3D와 Nastran을 이용하여 수행하였다.

모드 해석결과, 방진대 시스템에 의한 강체 모드들은

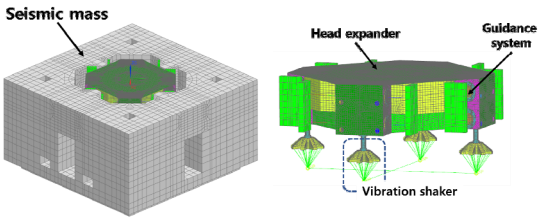


Fig. 24 F.E. model for vertical shaker system

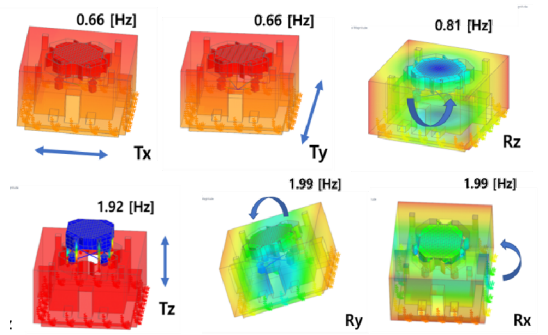


Fig. 25 Rigid modes of shaker system

Fig. 25와 같이 2 Hz 미만에 분포하는 것으로 나타났다.

진동시험 관점에서 주요한 특성은 헤드익스펜더의 강체 모드(rigid mode)와 유연 모드(flexible mode)의 주파수이다. Fig. 26의 해석결과 회전 방향 강체 모드는 51.7 Hz에 위치하는 것으로 나타났으며, 헤드익스펜더의 구조에 의한 첫 번째 유연 모드는 수직방향으로 변형하는 형태로 178.4 Hz에 발생하는 것으로 예측되었다. 추가적인 굽힘 모드는 182 Hz, 280 Hz에 존재하는 것으로 예측되었다.

위성 및 발사체의 진동시험은 시험대상체와 헤드익스펜더 체결면 주위의 여러 지점들에서 가속도 레벨의 평균값 제어(average control) 또는 최대값 제어(maximum control)를 통해 수행된다.

먼저 진동 가진기가 1 g의 가속도 레벨로 작동할 때, 헤드익스펜더 상면 중심에서 반경 1 m, 90° 간격에 위치한 4지점에서 응답해석 결과는 Fig. 27과 같다. 헤드익스펜더의 첫 번째 고유 모드에서 응답이 증폭되는 것을 확인할 수 있다. 해석 모델의 구조적 대칭성으로 인하여 강체 모드는 가진되지 않아 응답특성에서는 나타나지 않는 것으로 보인다.

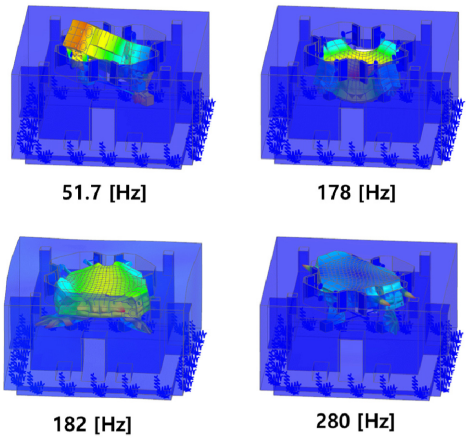


Fig. 26 Main modes of head-expander

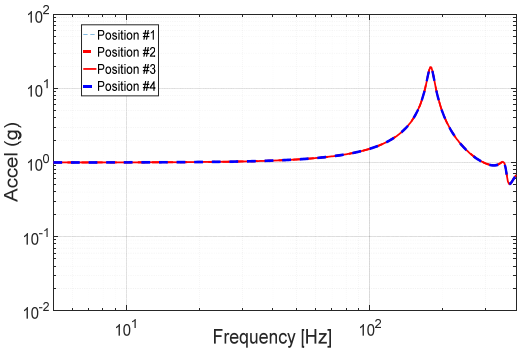


Fig. 27 Response of head-expander top positions

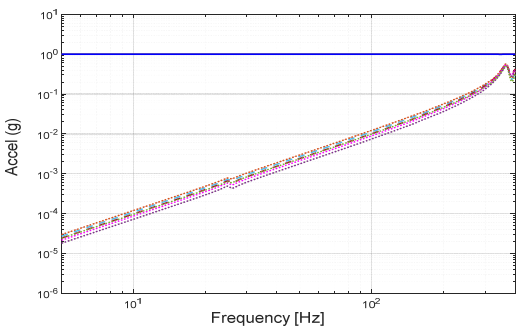


Fig. 28 Vertical excitation and horizontal cross-axis motion at shaker control points

Fig. 28은 평균 제어(average control)방식을 적용하여 수직방향 진동시험 수행 시, 가진 시스템 제어점들에서의 가진 방향 제어응답 및 횡방향(cross-axis)

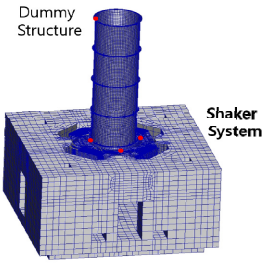
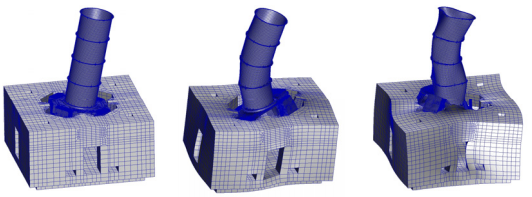


Fig. 29 F.E model for shaker system



(a) 8 Hz (b) 96 Hz (c) 140 Hz

Fig. 30 Main modes for shaker & dummy structure

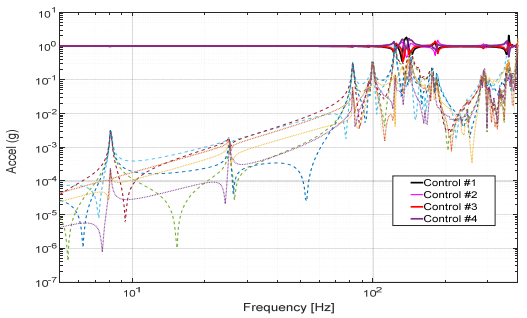


Fig. 31 Vertical excitation and horizontal cross-axis motion at shaker control points

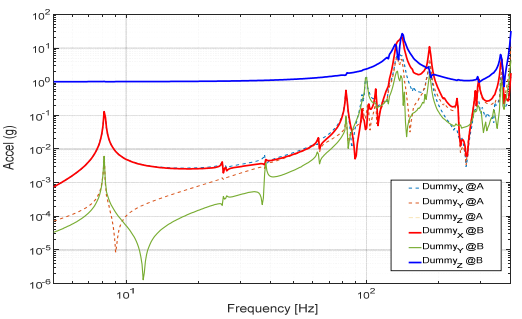


Fig. 32 Response of dummy structure

응답특성을 나타낸다. 300 Hz 대역까지 횡방향 응답에 의한 간섭(cross-talk)이 10 %이내로 관련 요구조건을 만족하는 것으로 예측된다.

4.2 시험 대상체와 결합된 동특성 예측

최종적으로는 구축된 가진 시스템에 시험 대상체가 설치되어 진동시험이 수행된다. 시험대상체와 결합된 가진 시스템의 진동특성을 분석하기 위하여 Fig. 29와 같이 무게 10.2 t, 지름 2 m, 높이 6 m의 원통형 구조물(dummy structure)을 결합한 유한요소 모델을 구성하였다.

모드해석 결과, 더미 구조와 연성된 가진 시스템의 주요 모드는 Fig. 30과 같다. 원통형 구조물의 영향에 의해 51.7 Hz에 존재하는 좌우 흔듦 모드가 8 Hz로 내려가는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 31은 평균 제어(average control)방식으로 1 g 가속도 레벨로 수직방향 진동시험 수행시, 가진 시스템의 제어지점에서 제어응답 및 횡방향 응답특성을 나타낸다. 8 Hz에 존재하는 강체 모드에 의한 영향은 낮은 수준으로 예측되나, 원통형 구조 자체에 의해 발생되는 모드들에 의해서는 특정 주파수 영역에서는 간섭현상이 높게 작용하는 것을 예측하여 볼 수 있다.

Fig. 32는 원통형 구조물 상부의 응답 수준을 나타낸다. 특히 140 Hz 대역의 경우 원통형 구조물의 공진특성으로 인하여 수직방향의 가진 레벨만큼 횡 방향의 입력이 대상체에 부가될 수 있음을 예측할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 대형 수직 가진 시스템 구축을 위한 설계 및 응답특성 예측을 수행하였다. 대형화되어가는 우주비행체의 안정적인 수직방향의 진동시험을 위해서는 횡방향의 움직임과 회전성분의 제어가 필수적이다. 이를 위하여 유압 가이던스 시스템, 대형 헤드익스펜더, 가진기 및 제진 블록으로 구성된 대형 수직 가진 시스템을 설계하였다. 헤드익스펜더는 경량화를 위하여 마그네슘으로 설계되었으며, 작용되는 하중조건에서의 구조적 안전성 여부를 판단하기 위한 관련 해석들이 수행되었다. 마지막으로 가진 시스템의 구성요소들을 반영한 유한요소모델을 통해 설계 요구

조건의 만족 여부 및 응답 특성을 예측하였다.

이 연구는 대형 진동가진 시스템 설계 단계에서 고려해야 할 구성요소 및 기술적인 사항을 제시하고 있어 관련 시험장비의 설계 단계에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

(1) Kim, H.-B., Moon, S.-M. and Woo, S.-H., 1997, Launch Environmental Test for Satellite, Journal of KSNVE, Vol. 7, No. 5, pp. 717~724.

(2) Yoon, D. and Kwon, S.-C., 2020, Validation of Structural Safety on Electro-optical Payload under Launch Environment, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 6, pp. 597~607.

(3) Kim, K.-W., Kim, S.-W., Lim, J.-H., Kim, C.-H. and Hwang, D., 2010, Notching Analysis for Sinusoidal Vibration Test for LEO EO Satellite, Proceedings of KSNVE Annual Spring Conference, pp. 550~551.

(4) Kim, H.-B. and Moon, S.-M., 1998, Launch Environmental Test for KOMPSAT PFM, Proceedings of KSNVE Annual Spring Conference, pp. 122~129.

(5) Lund, D. and Crawford, R., 2010, Novel Guided Head Expander Design Uses Close Coupled Inertial Masses and Hydrostatic Bearings to Minimize Cross-axis Motion, Journal of the IEST, Vol. 53, No. 1, pp. 69~82.

(6) Im, J.-M., Moon, S.-M., Eun, H.-K., Choi, S.-W. and Choi, J.-M., 2008, Design of Large Multi-Electromagnetic Shaking System, Aerospace Engineering and Technology, Vol. 7, No. 2, pp. 76~81.

(7) TEAM Corporation, 2008, Manual on Pad Bearing Model 410-10XA and 410-XAP. http://teamcorporation.com

(8) Touzelet, P., Popovitch, A. and Piret, G., 2007, The ESTEC New Quad Head Expander, Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes, pp. 12~14.

Jong-Min Im received B.S. degree in mechanical engineering from Yon-Sei University in 1997. He received M.S. degree in mechanical engineering from KAIST in 1999. He is currently a principal researcher and director of Satellite Integration and Test Center of KARI. His research interests include vibration, acoustic and shock test in satellite and launch vehicle.

Sung-Hyun Woo received B.S., M.S and Ph.D in aerospace engineering from KAIST in 1995, 1997 and 2014 respectively. He is currently a principal researcher and executive director of Satellite Research Directorate of KARI. His research interests include launch environment tests and overall Assembly Integration and Test of satellites.

Hee-Kwang Eun received B.S. degree in mechanical engineering from POSTECH in 1999. He received M.S. degree in mechanical engineering from KAIST in 2001 and Ph.D. degree in Aerospace Engineering from KAIST in 2022. He is currently a principal researcher and task leader of Satellite Integration and Test Center of KARI. His research interests include vibration, acoustic test in satellite and launch vehicle.

Jong-Hyub Jun received B.S. degree in mechanical engineering from POSTECH in 2003. He received M.S. degree in mechanical engineering from POSTECH in 2005. He is currently a senior researcher of Satellite Integration and Test Center of KARI. His research interests include vibration, acoustic and shock test in satellite and launch vehicle.