수평가진 시스템의 열 특성 및 모멘트 성능 검증

은희광*, 임종민**, 문상무***, 문남진****, 이동우*****, 최석원******

Verification of Thermal Characteristics and Overturning Moment for Lateral Vibration System

Hee-Kwang Eun*, Jong-Min Im**, Sang-Moo Moon***, Nam-Jin Moon****, Dong-Woo Lee*****, Seok-Weon Choi******

Abstract

Shaker system is used to simulate the vibration from the launch environment The vibration tests are performed in the vertical and lateral direction. For the lateral vibration test, the slip table system is used with shaker system. For the latest large satellite, vibration test adaptor is made of the steel. But slip table of lateral vibration is made of magnesium, so there is big difference of thermal expansion ratio between slip table and vibration test adaptor. This paper encompasses the following items; verification process of thermal characteristics and overturning moment and a solution for lateral vibration test with steel vibration test adaptor.

초 록

발사환경 시 작용하는 진동 환경을 지상에서 구현하기 위해 가진 시스템을 이용하고 있다. 진동시험은 수직, 수평 방향에 대해 수행되며, 수평방향 시험의 경우 슬립테이블 시스템과 연계하여 시험을 수행하게 된다. 최근 개발 중인 대형 위성의 경우, 위성과 진동 시험기 사이의 연결 구조물의 하중 및 동적 설계 요구 조건을 만족하기 위하여 수평가진 시스템과 열 특성이 매우 다른 스틸 소재를 이용하여 제작하였다. 본 연구에서는 수평가진 시스템과 열팽창 계수가 다른 소재를 이용하는 대형 구조물의 열 특성 및 모멘트 검증 과정과 발생한 문제점을 개선하고자 적용한 안을 제시하고자 한다.

키워드 : 열팽창 계수 (thermal expansion ratio), 열평형 (thermal equilibrium), 슬립테이블 (Slip table), 무게중심 (center of gravity), 베어링 (bearing)

접수일(2008년12월17일), 수정일(1차 : 2009년 9월 16일, 2차 : 2009년 10월 8일, 게재 확정일 : 2009년 11월 1일)

* 우주환경시험팀/hkeun@kari.re.kr
** 우주환경시험팀/acoust@kari.re.kr
*** 우주환경시험팀/smmoon@kari.re.kr
**** 우주환경시험팀/njmoon@kari.re.kr
***** 우주환경시험팀/dwlee@kari.re.kr
****** 우주환경시험팀/schoi@kari.re.kr

1. 서 론

위성 및 발사체 구조물의 경우 발사 환경 시 작용하는 진동 하중에 위한 구조물의 건전성 평가가 필수 요소이다. 지상에서 진동하중을 모사하기 위해서는 전자기 가진장치를 이용하게 되며, 수직 방향 및 수평방향의 운동을 위해 특별하게 설계된 구조물에 연결하게 된다.

특히 수평 방향의 진동시험을 위해서는 베어링과 슬립플레이트로 구성된 슬립테이블 시스템에 가진장치를 연결하게 된다. 슬립 플레이트는 대상물을 설치하기 위한 구조이므로 구조적 강성과 더불어 경량화가 필수적으로 요구되며 이를 위하여 통상 마그네슘과 알루미늄 소재가 널리 사용되고 있다. 그리고 대상물의 수직하중을 지지하면서 가진 방향의 마찰력을 최소화하기 위하여 유압 베어링 시스템을 사용하게 된다. 특히 유압 베어링의 유막 두께는 0.07 ~ 0.15mm이며 1/10의 허용공차를 가진 상태에서 동작해야 한다. 대상물의 소재가 스틸과 같이 열팽창 계수가 슬립테이블의 소재와 다른 경우 열 특성의 차이로 인하여 베어링 시스템의 성능에 문제를 일으킬 수 있기에 열 특성 검증 과정은 중요하다. 또한 대상물의 무게중심이 슬립테이블에서 대단히 높은 경우에는 진동 시험 시 발생되는 모멘트 지지 성능이 요구된다. 본 논문에서는 수평가진 시스템의 열 특성 및 주요 성능인 모멘트 지지성능에 대한 검증 과정을 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 슬립 테이블의 구성

슬립테이블은 진동가진 시스템과 결합되어 시험 대상체의 하중을 지지하는 동시에 진동을 부가하는 하중전달용 베어링 시스템이다. 진동 시험시 시험 대상체에 작용하는 하중의 영향에 의해 바닥면에서 오버터닝 모멘트 등의 부수적인 하중이 발생하게 된다. 슬립테이블의 역할은 이러한 모멘트(overturing or yawing moment)를 지지하는 동시에 시험 대상체의 가진 축 방향으로 원활히 움직이도록 한다. 그림 1은 전형적인 슬립테이블 및 가진기의 구성을 나타낸다.

슬립 테이블은 방진대(reaction mass), 베이스(granite block), 베어링 및 오일공급 시스템 등으로 구성된 전체 시스템을 의미하며 슬립 플레이트는 가진기와 결합되어 움직이는 하중 전달용 플레이트를 의미한다.

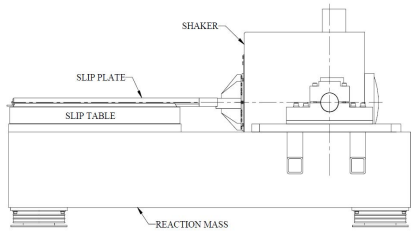


그림 1. 가진기 및 슬립테이블 시스템

방진대는 슬립 플레이트가 시험 대상물에 의해 발생하는 오버터닝 모멘트 및 다른 축방향의 하중을 지지하기위해 방진대의 질량 및 회전관성을 이용하기 때문에 전체 시스템의 동적특성 결정에 있어 중요한 역할을 한다.

2.2 슬립 테이블 특성 및 종류

슬립테이블은 진행 방향으로는 마찰이 없도록 구성되어야 하며 동시에 강성이 크게 설계되어야 한다. 즉 가진 시스템의 추력이 시험 대상체를 가진하는데 사용될 수 있게 최소한의 마찰력과 가벼운 슬립플레이트를 가지도록 설계되어야 한다. 또한 균일한 동특성(dynamic response)를 가질 수 있게 설계되어 시험 대상체가 주파수 영역에서 균일한 가진력에 의해 가진될 수 있도록 구성되어야 한다. 이와 더불어 슬립 테이블은 큰 시험 대상물의 하중 및 모멘트 지지능력을 갖추어 시험 시 슬랩(slap)현상에 의한 원치 않는 충격이 시험 대상체에 발생하지 않는 특성을 가져야 한다. 이와 같은 특성을 구현하기 위한 슬립테이블의 구성으로는 크게 오일 필름/화강암 블록

테이블 방식과 베어링/오일 필름/화강암 블록 테이블 방식이 존재한다.

오일 필름/화강암 블럭 테이블 방식의 슬립테이블은 매끄러운 화강암과 마그네슘 또는 알루미늄 슬립 플레이트로 구성되며 사이에 오일 필름이 존재한다. 이러한 시스템은 구성이 단순하고 저렴하나 횡 방향 움직임 및 하중 지지 능력이 떨어져 대형 시험체 또는 높은 진동 수준의 시험에는 부적합한 단점이 존재한다.

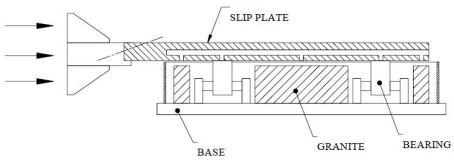


그림 2. 유압 베어링 타입의 슬립테이블

유압 베어링 테이블은 그림 2와 같이 오일 필름/화강암 블록 테이블 방식에 추가적으로 화강암을 가공하여 유압 베어링을 설치하게 된다. 베어링은 베이스 플레이트에 설치되며 슬립 플레이트는 베어링의 움직이는 요소에 연결된다. 이러한 구조를 통해 베어링은 슬립 플레이트를 지지하는 동시에 상하방향의 움직임(pitch motion)을 제어하고 이와 동시에 횡방향의 구속을 부가하여 횡방향 움직임(yaw motion)을 제어하게 된다. 이러한 방식은 높은 모멘트 지지 능력 및 하중 지지 능력으로 인해 대형 구조물의 시험을 위한 슬립 테이블에 많이 이용된다.[1]

그림 3. T-film 타입 슬립테이블 [2]

사용되는 베어링 종류에 의해 3,000 psi의 고압용 유압펌프를 사용하는 저널베어링 타입과 600 psi의 저압용 유압펌프를 사용하는 티필름(T-film) 베어링 타입이 있다. 티필름 베어링 타입은 슬립테이블 내부를 베어링으로 채우는 방식을 적용하는 구조로 시험대상체의 하중 지지능력 및 모멘트 성능은 좋으나 구축에 고비용이 소요된다. 그림 3은 T-fim 베어링을 적용한 슬립테이블의 내부를 나타낸다. 저널베어링 타입은 적은 수의 저널 베어링을 이용하는 방식으로 상대적으로 저비용으로 시스템을 구축할 수 있으나 대형 구조물 또는 고하중의 모멘트가 발생하는 시험에는 적용한계가 있다. 또한 저널베어링 타입의 경우 슬립테이블 내부에 작용하는 유압의 압력이 상대적으로 높기 때문에 많은 열이 슬립테이블에 부가되어 온도가 높은 특성이 있다.

현재 항공우주연구원 우주환경시험팀에 설치된 슬립테이블은 그림 4의 저널베어링 타입으로 총 12개의 베어링이 설치되어 있으며 슬립 플레이트는 2.1m x 2.1m로 중량 경량화를 위해 마그네슘으로 제작되었다.

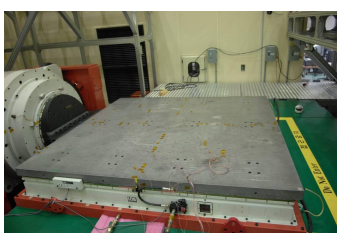
그림 4. 저널베어링 타입의 슬립테이블

2.3 수평가진 시스템 열특성 검증 과정

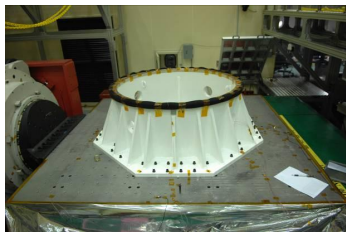
대형 수평가진 시스템에 필수적인 슬립테이블은 유압 베어링을 이용하여 수직 하중을 지지하며 수평 방향의 마찰계수를 최소 상태로 유지한다. 유압 베어링에 공급되는 오일은 고압 조건에

서 작동함으로 인해서 작동 초기 대비해서 열평형 상태의 온도가 높으며, 이 때의 평형 온도는 유압 베어링 시스템 종류, 슬립테이블 및 시험 대상물의 열특성, 외기 온도 등에 의해서 결정된다. 슬립테이블은 통상 중량 최소화를 위하여 마그네슘이나 알루미늄 계열의 소재가 사용되고 있다. 따라서 대상물 또는 고정을 위한 구조물은 이와 동일한 소재를 사용하는 것이 일반적이며 이런 경우에는 슬립테이블과 대상물 경계면의 열변형 차이가 없어서 볼트 등을 이용한 기계적 체결 과정에서 유압베어링에 변형을 발생시키지 않는다. 그러나 대상물의 특수한 조건 등에 의하여 스틸 등과 같이 열팽창 계수가 매우 다른 소재가 사용될 수 있다. 이런 경우에는 기계적 체결 과정에서 열변형 차이에 의하여 유압베어링과 슬립테이블 경계면에 변형을 발생시킬 수 있다. 이로 인해서 마찰 계수의 상승이나 stick-slip 등과 같은 현상이 생겨서 전체 가진 시스템의 제어를 불가능하게 할 수도 있다. 따라서 스틸 등과 같은 재료를 슬립테이블 경계면에 사용 시에는 열평형 상태를 이루기 위한 과정 및 확인 방법을 고찰하여야 하며 열평형을 확인한 후에 기계 요소를 이용한 체결을 실시하여야 한다. 또한 가진기 작동 중에도 온도 변화를 확인하여 시험 중에 열평형 변화 여부의 확인이 필요하다. 본 논문에서 마그네슘 슬립테이블에 steel 대상물 고정 구조물 사용을 위하여 아래와 같은 단계로 그림 5와 같이 열특성 검증을 실시하였다.

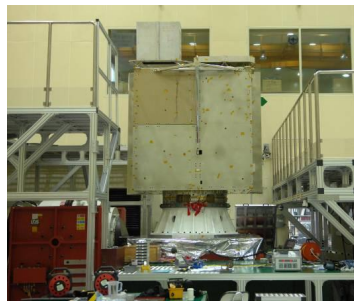
- 1단계 : 슬립테이블 만의 열평형 과정 확인
- 2단계 : 슬립테이블에 대상물 고정물 설치 상태의 열평형 과정 확인
- 3단계 : 고정물 상단에 대상물 설치 상태의 열평형 과정 확인



(a) 1단계



(b) 2단계 (스틸 고정물: 약 1000kg)



(c) 3단계 (위성 구조 모델 : 약 1400kg)

그림 5. 열특성 검증 단계 별 구성

1단계의 열특성 검증을 위하여 16개의 T-type 열전대를 슬립테이블 상면에, 4개를 주위에 외기 온도 측정을 위하여 그림 6과 같이 설치하였다. 시험실에 외기는 섭씨 23도로 제어를 하였다. 가진기와 연결부를 분리하고 외기가 제어되는 상태에서 유압베어링용 펌프를 가동시키며 열전대의 신호를 계측하였다. 열평형 조건은 위성의 열평형 조건과 동일한 시간당 온도 변화 0.125도 미만이며 16개의 측정점 모두에서 이 조건을 만족할 때 열평형을 이루었다고 판단하였다.[3]

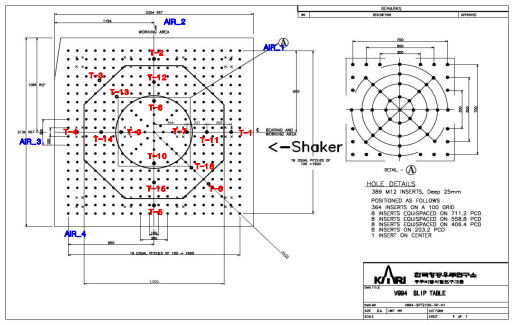


그림 6. 1단계 열전대 설치 위치

유압 펌프의 가동 시작부터 평형 시까지의 온도 변화는 그림 7과 같다. 평형에 도달하는데 약 20시간이 걸렸으며, 슬립테이블의 온도는 섭씨 33 ~ 40도로 분포하였다. 평형 상태에서 슬립테이블 전체의 온도 분포를 관찰하기 위하여 적외선 카메라를 이용하여 온도 분포를 그림 8과 같이 측정하였다. 중앙의 밝게 보이는 부위가 중앙에 설치된 고정식 유압베어링 설치 위치와 동일함을 확인할 수 있었다.

열평형 조건에서 실제 대상물의 가진 요구 조건으로 가진기를 이용하여 가진을 실시하였다. 이 때의 온도 변화는 그림 9와 같으며, 최대 0.3도의 변화를 보였으며, 이러한 결과는 마그네슘의 열팽창 계수를 고려할 때 변형으로 인한 유압베어링의 영향이 없는 정도의 온도 변화임을 판단할 수 있었다.[4]

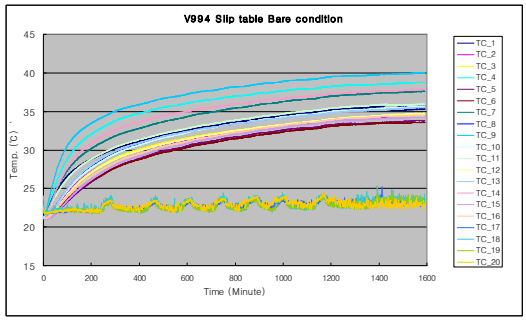


그림 7. 1단계 열평형 과정 측정 결과

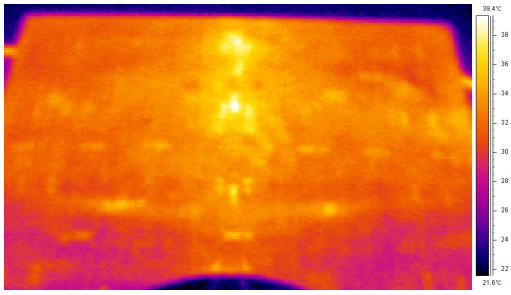


그림 8. 1단계 적외선 카메라 측정 결과

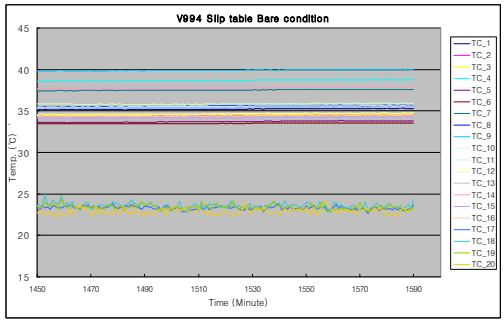


그림 9. 1단계 가진 중 열 변화 측정 결과

2단계에서는 초기 상태에서 스틸로 가공된 고정물을 슬립테이블 위에 올려놓고 동일하게 열평형 상태까지 온도 변화를 측정하였다. 유압 펌프 작동 시작부터 약 24시간 후에 평형에 도달하였다. 슬립테이블 평형 온도는 섭씨 34~ 40도로 1단계와 유사하였다. 고정물의 하단부에 그림 10과 같이 설치한 열전대는 섭씨 33 ~ 37도로 분포하였다. 평형 상태에서 가진 시험을 위해서는 볼트 체결이 필요하며 이 과정을 위해서 슬립테이블과 고정물 사이의 간격을 측정하였다. 이것은 초기의 0.03mm/m의 편평도 요구조건을 만족하게 고정물을 제작하여도 스틸과 마그네슘의 열변형 특성의 차이로 간격이 발생하기 때문이다. 간격을 측정하고 그림 10과 같이 10mm 폭의 shim을 볼트 체결 부 양쪽에 삽입하였다. Shimming 후 볼트를 체결하였다. 그러나 볼트 체결 후 슬립테이블의 진행 방향 마찰력이 급격히 증가하였다. 볼트 체결 전 7kgf에서 체결 후 30kgf 이상으로 증가하였다. 슬립테이블 제조 업체의 매뉴얼 상 25kgf 미만의 마찰력 규제 조건을 만족하지 못하였다.[5] 이러한 문제는 열변형 차이로 인한 간격을 제한적인 shimm만으로는 해결할 수 없으며, 따라서 볼트 체결 과정에서 shimm으로 채워지지 못한 간격으로 인해서 마그네슘 슬립플레이트의 변형이 발생하여 유압베어링의 작동을 악화시켰음을 유추할 수 있다.

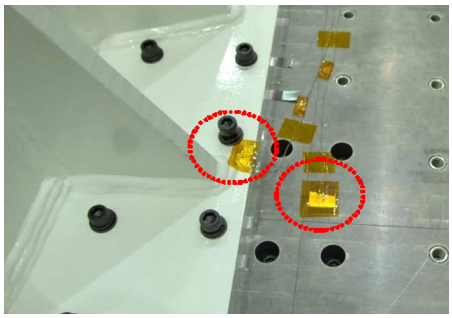


그림 10. 고정물과 슬립테이블 열전대 설치

이 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 마그네슘과 열팽창 계수가 유사한 알루미늄 인터페이스를 제안하고자 한다. 스틸 고정물과 마그네슘 슬립테이블 사이에 45mm 두께의 알루미늄 인터페이스를 그림 11과 같이 삽입하였다. 이 조건에서 2단계와 동일한 과정을 열평형 시험을 실시하였으며 먼저 알루미늄 인터페이스를 설치하고 열평형을 이루는데 약 20시간이 소요되었고, 그 이후 shimming을 실시하였다. 그 이후 고정물 설치 후 열평형까지 약 8시간이 소요되었으며, 또 다시 shimming을 실시하였다. 최종 상태에서 슬립테이블의 마찰력이 약 12kgf 로 요구조건을 만족하였다. 이 상태에서 실시한 가진 시험에서 약 0.2도의 온도 변화가 있었으며, 마찰력 변화도 발생하지 않았다.

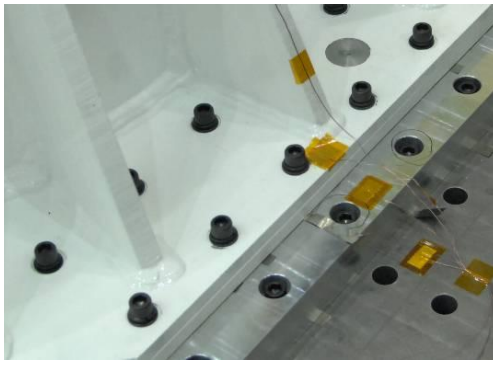


그림 11. 알루미늄 인터페이스 설치

3단계에서 대상물인 위성 구조물을 그림 12와 같이 설치하였다. 설치 후 가진을 실시하였으며, 그림 13과 같이 0.1도 미만의 온도 변화를 보였다.

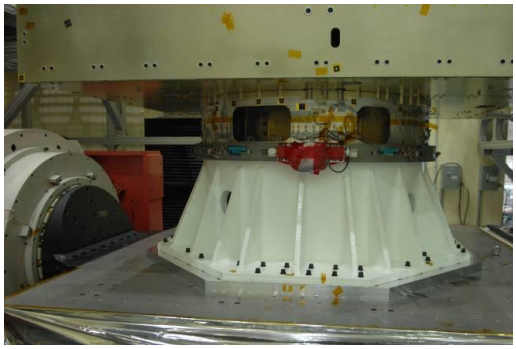


그림 12. 3단계 설치 (알루미늄 인터페이스 포함)

이러한 3단계의 과정을 통하여 열팽창 계수가 다른 대상물의 수평 가진 시험 타당성 여부를 판단할 수 있었으며, 스틸과 같은 대상물의 경우에는 적절한 인터페이스를 삽입함으로써 문제점을 해결할 수 있음을 알 수 있었다.[6]

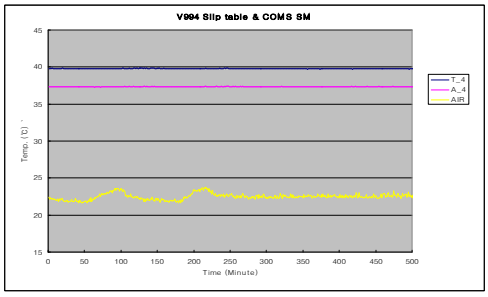


그림 13. 3단계 가진 중 열 변화 측정 결과

2.4 슬립테이블의 모멘트 특성 계산

슬립테이블 시스템에 작용하는 하중과 발생되는 모멘트의 계산을 위해서는 다음과 같은 가정들이 선행되어야 한다.

1) 시험 대상물은 강체 특성을 가진다.
2) 슬립테이블은 강성이 강하여 변화가 없고 균일한 응답특성을 가진다.

이러한 가정은 상대적으로 고주파 영역에서는 문제가 있으나 위성 등의 진동시험을 위한 저주파 영역에서는 유효하다.

그림 14는 슬립테이블에 시험 대상체가 장착되어 하중이 부가되었을 경우를 나타낸다. 가진기의 가진력(F)과 대상체의 질량특성(CG)에 의해 모멘트가 슬립 플레이트 상면에 작용하게 되고, 발생된 모멘트를 슬립테이블에 장착된 베어링들이(Fb) 지지하도록 되어있다.

슬립테이블 시스템의 모멘트 능력 계산을 위해서는 베어링의 하중지지 특성과 시험대상체와 관련된 베어링의 분포가 고려되어야 한다. 그림 15는 시험을 위한 진동시험치구 및 슬립테이블 베어링의 분포를 나타낸다.

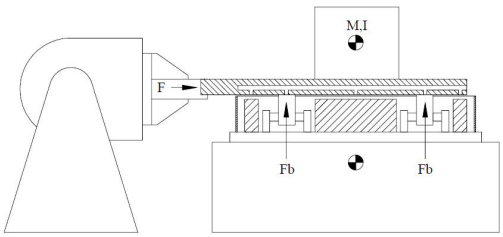


그림 14. 슬립테이블에 작용하는 하중의 분포

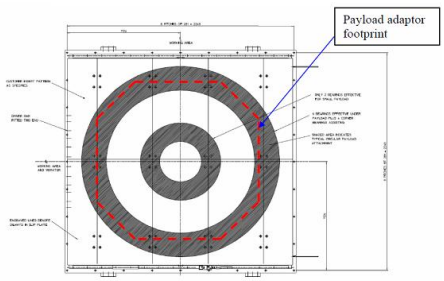


그림 15. 시험 치구 및 베어링의 배치

시험에 의해 검증된 단일 베어링의 최대 하중지지 능력은 66.72kN이며 그림 16의 음영된 부분은 시험대상체에 의해 발생하는 하중에 작용하는 베어링을 나타낸다.

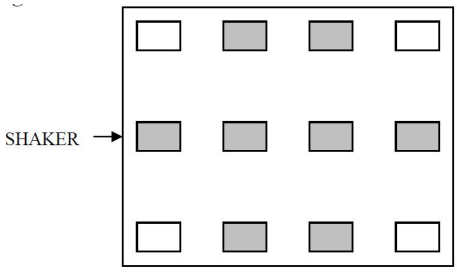


그림 16. 하중을 지지하는 베어링의 분포

운동방향 모멘트(pich moment)의 경우, 그림 17과 같이 하중이 분포한다고 가정하고, 아래 식을 이용여 계산할 수 있다. 베어링 시스템만을 고려하였을 경우, 최대 146.7 kMm의 모멘트를 지지할 수 있다.

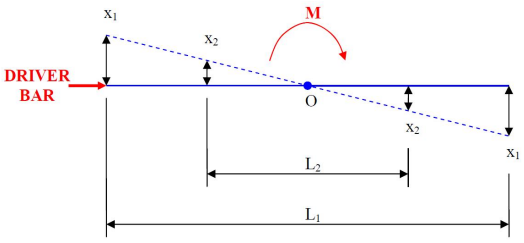


그림 17. 슬립테이블 작용 하중 다이어그램

$$PM_B = \frac{B_{FD}}{L_1}[R_1 L_1^2 + R_2 L_2^2]$$

$$PM_B = \frac{66.72}{1.65}[1 \times 1.65^2 + 3 \times 0.55^2]$$

$$PM_B = 146.7\,(kNm)$$

베어링 시스템 이외에도 그림 18과 같이 슬립테이블 오일 필름에 의한 하중 지지 성능을 고려하면 슬립테이블은 최대 214 kNm의 모멘트를 지지할 수 있다.

$(96.52kNm^{-2}: Oil\,film\,pressure)$

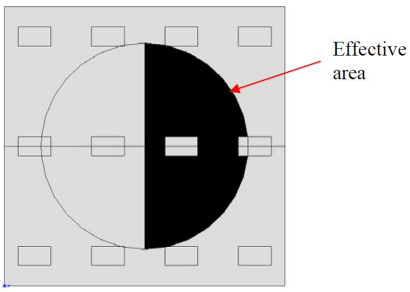


그림 18. 오일 필름의 유효영역

$$PM_{oil} = \left(\frac{1.55}{2}\right) \times (96.52 kNm^{-2}) \times \left[\frac{\pi \times (0.755)^2}{2} - (0.18 \times 0.246)\right]$$

$$PM_{oil} = 67.3\,(kNm)$$

$$PM_{Total} = 146.7 + 67.3 = 214\,(kNm)$$

2.5 수평가진 시스템 모멘트 검증 과정

수평가진 시스템의 모멘트에 대한 이론적인 계산 과정을 앞 절에서 수행하였다. 본 절에서는 실제 대상물에 작용하는 최대 하중 발생 조건의 시험을 통한 검증 과정을 설명하고자 한다.

대상물의 환경 시험 조건 중 최대 가진 조건을 기준으로 1.82g(0-p), 9Hz quasi-static 시험 조건으로 결정하였다. 이 조건을 20회 연속하여 실시하였으며, 결과는 그림 19와 같다.

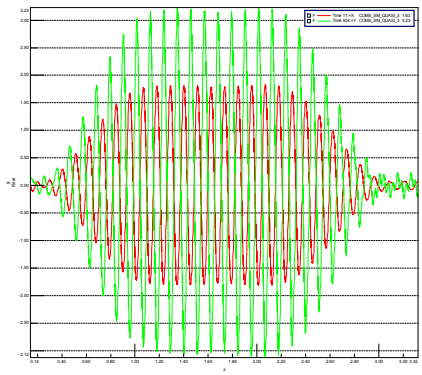


그림 19. Quasi-static test 결과

시험 전 후로 슬립테이블의 온도 및 마찰력 변화 없음을 확인하였으며, 이를 통하여 수평가진 시스템의 모멘트 성능을 검증하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 수평가진 시스템의 구성에 대한 소개와 열팽창 계수가 매우 다른 소재를 사용한 대상물을 시험하기 위한 검증 과정을 제시하였다. 열팽창 계수가 다른 대상물의 시험을 위하여는 먼저 수평가진 시스템의 열평형을 이루기 위한 조건을 확인하고 가진 시험 중의 온도 변화량의 확인이 필요하였다. 본 논문의 수평가진 시스템은 열평형을 이루기 위하여 약 20시간의 유압펌프 작동이 필요하였으며, 가진 시험 중에는 0.3도 미만의 온도 변화를 보였다. 또한 열변형 차이를 최소화하기 위하여 알루미늄 인터페이스를 적용하는 안을 제시하였고, 이를 통하여 효과적으로 열 특성 검증을 수행하였다. 그리고 모멘트 성능을 이론적으로 계산하고 또한 대상물의 환경 조건 중 최대 가진 조건을 quasi-static test를 통해서 구현하여 수평가진 시스템의 모멘트 성능을 검증하였다.

참 고 문 헌

1. TEAM Corporation, "Technical Analysis of TEAM T-Film Slip Table," Technical Note.
2. Pierre Touzelet, Otto Brunner, Alexandre Popovitch, "A New Large Slip Table to Vibrate Ariane 5 Payloads". ESA Report, v.467, 2001. pp.319-326.
3. David G. Gilmore, "Spacecraft Thermal Control Handbook," pp.715.
4. Donal R. Askeland, "The Science and Engineering of Materials," PWS Publishing Company, 3rd Edition, pp.393.
5. LING DYNAMIC SYSTEMS, "System Manual

V994 Vibration Test Systems", Manual Number 805421, Edition 1, Amendment No.11.
6. 임종민, 문상무, 은희광, “ 수평가진 시스템의 열특성 검증”, 한국우주과학회, 2009년 춘계학술대회.