

# 대구경 반사경 광학성능 측정을 위한 간섭계 지지구조물의 진동저감 설계

Vibration Suppression Design on the Instrument Supporting Structure for the Optical Performance Measurement

김홍배\* · 임종민 · 양호순<sup>o</sup>

Hong-Bae Kim, Jong-Min Lim, Ho-Soon Yang

**Key Words** : Seismic Mass, Mirror Fabrication, Interometric Test, Optical Performance, Vibration Response

## ABSTRACT

Fabrication of large scaled mirror for the telescope application is the most challenging technology in recent year. Sophisticate technologies and know-how in fabrication and measurement are required to overcome the technological obstacles. KRISS(Korea Research Institute for Standards and Science) is now developing a large scaled mirror fabrication facility and KARI(Korea Aerospace Research Institute) is supporting the development. High precision interferometric test is required during the grinding and polishing of mirror to identify the surface profile precisely. The required fabrication accuracy of the mirror surface profile is  $\lambda/50$  rms( $\sim 10$  nm for visible wave length). Thus the measurement accuracy should be far less than 10 nm. To get this requirement, it is necessary to provide vibration free environment for the interferometer system and mirror under test. Thus the vibration responses on the mirror supporting table due to external vibration should be minimized by using a special isolation system. And the responses on the top of the tower, which hold the interferometer during test, should be minimized simultaneously. In this paper, we propose the concept design of vibration suppression system for the KRISS mirror fabrication facility.

### 기호설명

$F_t$ : Transmitted force	$c$ : Damping constant
$k$ : Stiffness	$f_n$ : Natural frequency
$\delta$ : Relative displacement	$\zeta$ : Damping ratio
$\sigma_s$ : Static deflection	$\lambda$ : Wave length

과정을 반복적으로 수행한다. 지상 및 우주용 대구경 망원경의 일반적인 가공형상 오차는 약  $\lambda/50$  rms이하로서, 가시광선 영역의 경우, 약 10 nm rms 이하의 고정도를 요구하며, 이러한 가공 정밀도를 만족하기 위해서는 10 nm peak 이하의 측정 정밀도가 요구된다. 그러나 가공 및 측정

## 1. 서론

최근 국내에서 대구경 반사경에 대한 수요가 급증함에 따라 반사경소재의 절삭 및 반사면에 대한 가공에 대한 자동화 설비의 구축이 요구되고 있다. 이에 따라 한국 표준연구원은 최근 대구경 반사경 제작시설을 구축중이다[그림 1]. 반사경의 제작과정은 그림 2와 같이 간섭계를 사용하여 가공대상물의 3차원 형상을 정밀 측정된 후 이를 기준형상과 비교하고, 형상오차가 발생시 연마기를 사용하여 보정하는

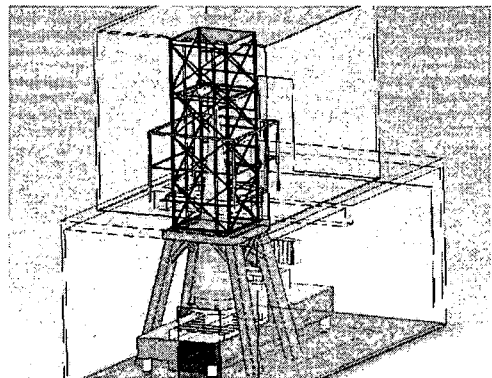


그림 1. 대구경 반사경 제작시설 개념도

\* 한국항공우주연구원 책임연구원  
E-mail : hbkim@kari.re.kr  
Tel : (042) 860-2335, Fax : (042) 860-2234

<sup>o</sup> 한국표준과학연구원 선임연구원

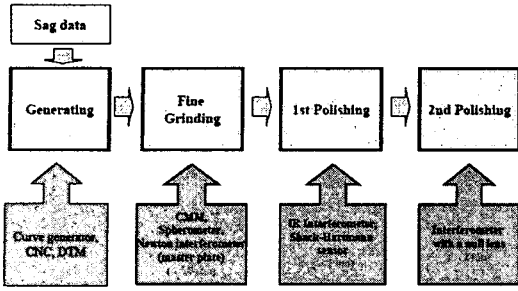


그림 2. 반사경의 제작과정

장비가 설치되는 장소는 공조기 및 주변 장비등의 가진원에 따라 진동환경에 노출되며, 측정 요구조건을 만족하기 매우 어렵다. 따라서 측정 대상물인 반사경은 물론 측정에 사용되는 간섭계를 지지하는 탑형상의 대형 구조물의 진동 크기를 줄이는 노력이 반드시 요구된다. 진동을 줄이기 위하여 미러를 지지하는 구조물 및 간섭계 지지탑은 절연 장치가 부착된 대형 방진대 위에 설치되며, 필요할 경우, 제진재의 부착 및 동흡진기등을 사용하여 간섭계와 반사경의 상대운동을 최소화하는 노력이 필요하다.

## 2. 방진장치 요구조건

### 2.1 광학측정장치 형상 및 측정 요구조건

비구면 반사경에 대한 형상측정은 그림 3과 같이 간섭계로부터 구면파를 생성하고, Null lens 또는 CGH를 사용하여 측정하고자하는 대상물에 정반사(Retro-reflection)가 이루어 지도록 파형을 보정한다. 간섭계내의 기준파형과 대상물로부터 반사되어 온 파형과의 차를 비교하여 형상측정이 이루어지고, 이를 이용하여 기준 형상과 일치하도록 반사경의 표면을 반복적으로 가공한다. 가공하고자하는 반사경의 최대

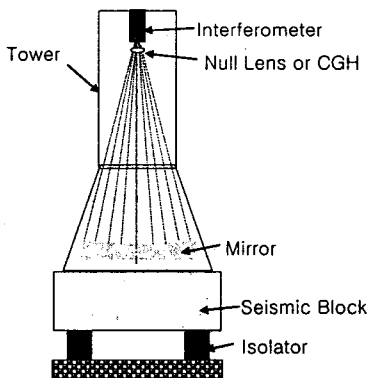


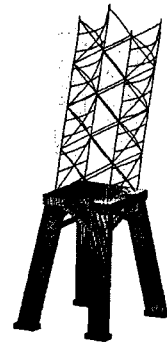
그림 3. 반사경 3차원 형상측정

직경은 약 1m이고 곡률반경은 5 m이므로 간섭계를 설치하는 지지탑의 높이는 약 7 m가 요구된다. 그림 3의 형상에서 보듯이 외부의 진동가진을 차단하지 않을 경우, 탑의 상단에 설치된 간섭계와 반사경의 상대운동이 발생하며, 이는 측정 파면의 위상차로 인하여 측정오차를 유발시킨다. 광해석을 통하여 계산한 결과 측정에 의한 파면 오차가  $\lambda/100$  rms를 만족하기 위해서는 광축선상의 상대운동으로 인한 파면의 위상차가 1%이내 이어야 하므로 10 nm peak 이내이어야 한다. 반면 광축과 직각인 횡방향의 경우, 측정 대상 반사경의 형상등에 따라 달라진다. 일반적으로 망원경의 주경은 다음과 같이 포물선 형태를 취한다.

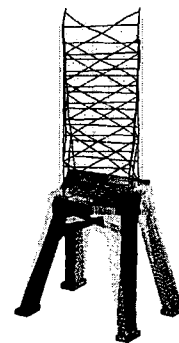
$$y = \frac{1}{4f} x^2 \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 초점거리이며,  $x$ 는 반사경 중심으로부터의 반경방향 거리,  $y$ 는 이에 따른 반사경의 면 형상을 나타낸다. 간섭계가 반사경 반경방향으로의 운동에 의한 반사면의 변화는 다음과 같이 미분을 취하여 구한다.

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = y' = \frac{1}{2f} x \quad (2)$$

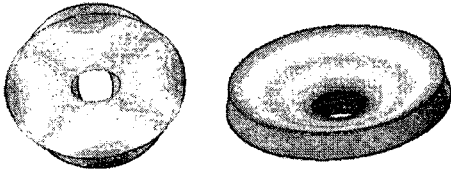


횡방향 모드 22.3 Hz



비틀림 모드 46.8 Hz

(a) 간섭계 지지탑의 모드



Fundamental mode 360 Hz      Second mode: 566 Hz  
(b) 일반적인 대구경 반사경의 모드

그림 4. 모드해석결과

식(2)에 따라 반사경의 최대변화는 최외각인 반지름위치에서 발생하며, 이에 따른 위상오차는 다음과 같다.

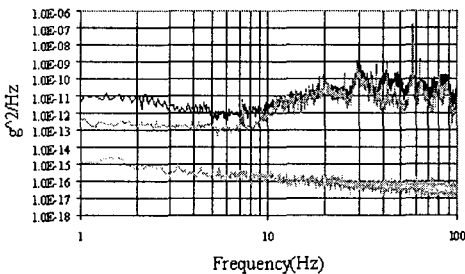
$$\frac{\Delta y}{\lambda} = \frac{D}{4f} \cdot \Delta x = \frac{1}{4F\#} \cdot \Delta x \quad (3)$$

식(3)에 따르면, 횡방향의 상대운동으로 인한 위상차는 광축 선상의 상대운동과 달리 반사경의 형상(F#)에 따라 달라진다. 일반적인 반사경의 F#는 1~2정도이므로, 위상차를 1% 이내로 유지하기 위해서는 횡방향의 상대운동도 40~80 nm 이내이어야 한다.

지지탑이 방진대에 강건하게 고정되어있다고 가정하고, 탑의 모드해석을 100 Hz까지 수행한 결과 공진 주파수 및 모드 형상은 그림 4와 같다. 1, 2차 모드는 22 Hz부근의 횡 방향 모드이며, 3차 모드는 46 Hz부근의 비틀림 모드이며, 광축방향의 모드는 100 Hz내에 존재하지 않는다. 반사경은 측정 및 가공 중 whiffle tree형상(soft supporting)의 고정 장치에 설치된다. Whiffle tree의 강성과 반사경의 질량에 의한 강제 모드는 약 20 Hz이상으로 설계되며, 반사경자체의 flexible mode는 그림 4와 같이 약 300 Hz이상으로 강건하게 제작된다.

## 2.2 지반진동 환경

가공시설이 설치될 부지에서의 지반진동을 측정한 결과는 그림 5와 같다.



--- Working    ..... Non-working    - · - Background noise  
그림 5. 설치 장소내 진동레벨

지반 진동에 가장 큰 영향을 주는 인자는 시설내의 공조장치, 크레인 작동, 주변 시험장비 및 시설주변의 차량주행으로 인한 가진으로, 본 측정에서는 시설을 유지하기 위하여 기본적으로 작동하여야 하는 공조장치만으로 인한 지반진동(Non-working)과 이외에 크레인작동, 주변 시험장비 및 차량주행을 고려한 지반진동(Working)을 각각 측정하였다. 진동레벨을 비교 시, Working 조건하의 레벨이 상대적으로 큰값을 나타내고 있으며, 60Hz부근을 제외할 경우, 약  $10^{-9} g^2/Hz$  이하이다. 60 Hz 부근의 피크는 공조장치의 모터 및 주변의 변압기등에 의한 영향인 것으로 판단되며, 향후 가진원을 찾아내어 방진처리하거나, 광학 측정 시 작동을 중지시킬 예정이다.

## 3. 방진장치 설계

### 3.1 진동절연장치의 구성

지반진동을 차단하기 위하여, 그림 6과 같이 설비 하부에 방진대와 isolator로 구성된 진동 절연장치를 설치할 예정이다. 지반진동으로 인한 반사경과 지지탑사이의 상대변위에 대한 관계를 유도하기 위하여, 방진장치는 그림 6과 같은 단순 진동계로 모델링이 가능하다.<sup>(1),(2)</sup>

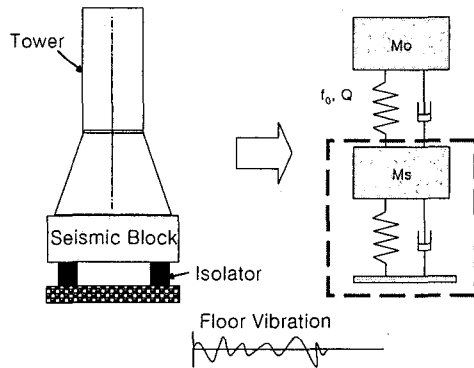


그림 6. 단순 진동계 모델링

방진장치의 성능은 일반적으로 진동전달률(transmissibility)로 표현할 수 있다.<sup>(2)</sup> 그림 6에서 seismic mass 하부의 일차 진동계만을 고려할 때, 진동전달률은 식(4)와 같이 표현이 된다.

$$T = \frac{F_t}{F_o} = \sqrt{\frac{1 + \left(2\zeta \frac{f_d}{f_n}\right)^2}{\left(1 - \frac{f_d^2}{f_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f_d}{f_n}\right)^2}} \quad (4)$$

식(4)에 나타나듯이 진동전달률은 방진장치의 고유진동수와 damping에 의해 결정이 된다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\sigma_s}} \quad (5)$$

식(5)에서 보듯이 방진장치의 고유진동수는 static deflection의 함수로서, 낮은 고유진동수를 얻기 위해서는 매우 큰 static deflection을 가져야 한다.

콘크리트 블록과 결합된 pneumatic isolator로 구성된 방진장치의 수직방향 고유진동수는 0.8 Hz, 수평방향으로는 2.0 Hz의 고유진동수를 갖도록 설계되었다. 또한 방진장치의 damping rate는 12 dB/octave이다.<sup>(3)</sup>

상기 조건에 따라 진동전달률은 계산하면 그림 7과 같으나, 방진대의 flexible mode등의 영향을 고려하여, 20 Hz이상의 대역에서는 감쇠율을 약 0.01로 간주하는 것이 일반적이다. 그림 8은 방진대 상면 즉 지지탑에 가해지는 진동레벨로서, 이 레벨값을 기준으로 하여, 지지탑의 변위를 계산한다.

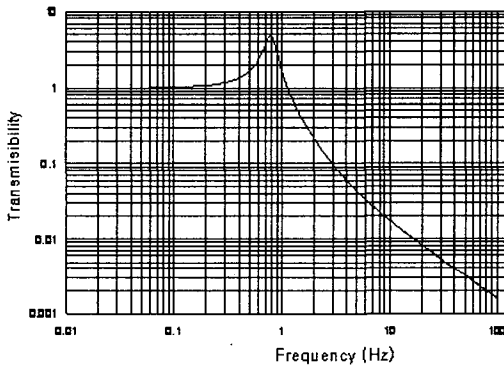


그림 7. 방진장치의 진동전달율 곡선

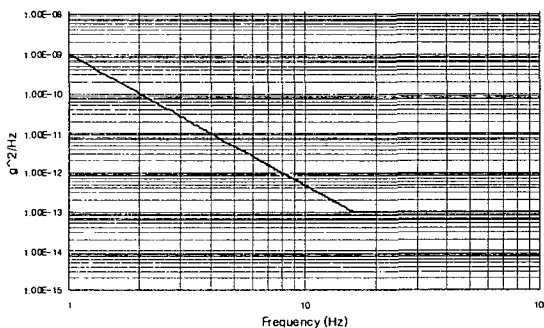


그림 8 방진대 상면의 진동레벨

### 3.2 간섭계 지지탑의 응답 분석

지지탑 하단의 가진레벨과 지지탑의 동적 특성을 이용하여, 지지탑과 반사경사이의 최대 상대 변위는 다음과 같이

Miles Equation을 이용하여 구할 수 있다.

$$\delta_{Re_{max}} = \frac{6}{4\pi^2 f_n^2} \sqrt{\frac{\pi}{2} Q Y_{APSD}(f_n) f_n} \quad (6)$$

여기서 Q는 증폭비를 나타내며, 철 구조물의 미소진동의 경우, 약 20 ~ 50정도이다.  $f_n$ 은 지지탑의 고유진동수로 1차 횡방향 모드와 근사한 20 Hz를 취한다.  $Y_{APSD}(f_n)$ 은 고유진동수에서의 입력 파워스펙트럼 값으로 그림 8을 참조하여 20 Hz에 해당하는  $10^{-13} g^2/Hz$ 값을 취한다. 식(6)을 이용하여 계산할 경우, 지지탑의 상대변위는 증폭비에 따라 약 30 ~ 40 nm정도로, 상대변위 요구조건인 40 ~ 80 nm와 매우 가까운 값을 나타내고 있다. 외란들에 대하여 더욱 강건한 측정환경을 유지하기 위해서는 다음과 같은 방법을 고려하여야 할 것이다.

- i) 지지탑에 전달되는 진동레벨을 감소
- ii) 지지탑 구조물의 고유진동수를 증가
- iii) 제진재료 또는 동 흡진기등을 사용하여 구조물의 증폭비를 감소

위의 3항목은 동적 변위에 동시에 기여를 하므로, 3개의 후보항목들을 적절히 혼합하여 적용하는 것도 가능한 방법일 것이다.

## 4. 결 론

대구경 반사경의 개발을 위한 제작시설의 진동절연에 대한 개념 설계를 수행하였다. 지상 및 우주용 망원경에 사용되는 대구경 반사경에 대한 제작의 경우, 요구되는 광학성능을 만족하기 위해서는 10 nm rms이하의 고정도 제작이 이루어져야 한다. 이러한 제작을 수행하기 위해서는 이보다 정밀한 측정이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 방진특성과 측정장치와의 연계해석을 통하여 광학성능 측정의 타당성 및 향후 개선방향등에 대한 검토를 수행하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이상훈, 김홍배의. 2005, "위성광학탐재체 개발을 위한 나노급 방진장치 개념 설계", 한국소음진동학회 춘계학술대회 논문집, pp.949-952
- (2) Crede, Charles E. and Ruzicka Jerome E., 1988, Shock and Vibration Handbook,
- (3) Greenbelt, MD. "Vibration Isolation System for use in a Large Thermal-Vacuum Test Facility", FABREEKA International Inc.