대구경 광학계 설계 및 광기구 설계 연구

본 자료는 한국광학회 광기술분과(위원장 홍경희)에서 개최한 워크샵 내용중 대구경 광학설계 및 광기구설계연구(김현규/국방과학연구소) 내용중 일부를 발췌한 것이다.

지난 3월15일, 유성 경하장호텔에서 개최된 한국광학회 광기술분과 워크샵에서는 △γF엑시머레이저 광학계용 박막설계(김종수, 김도훈, 이각현, 정해빈, 이종현, 유형준/한국전자통신연구소) △박막두께의 반사식 제어방식에 의한 제2고조파 녹색 레이저용 고반사 다층막코팅(박영준, 박정호, 마동준, 황영모, 이상학, 김응호/삼성종합기술원) △Zoom Lens Design Using Lens Modules(박성찬/LG전자영상미디어연) △Optical Lithography Simulation(손정우, 이정묵/서울대학교) △Prism Type 90만 화소용 LCD-Projector의 개요(정진호, 이종진/현대전자, 김구철, 박태경/개풍광학) △Hologram 소자를 이용한 광 Pick-up 설계(최양오, 최환문, 오재견, 최영석/대우전자 VCR연) △대구경 광학계 설계 및 광기구 설계연구(김현구/국방광학연구소) △Reflective Multilayer Coating for Far-Ultraviolet Self Filtering Imaging Instrument(박정호/삼성종합기술원) 등의 논문이 발표되었다.

—편집자 주—

글 : 김현규/국방과학연구소

대구경 광학계로서 가장 기본이 되고 널리 쓰이는 2 반사경 형태의 망원경 광학계에 대한 초기 설계시 유용하게 활용할 수 있도록 Seidel 수차식을 전개하였다.

광기구설계(Optomechanical Design) 기법을 이용하여 망원경 주경(Primary Mirror)의 경량화를 시도하였으며, 주경의 정적 구조해석을 통해 주경면의 변형을 최소화하는 과정을 알아보고, 주경의 동적 구조해석의 한 예로서 로켓발사시 발생하는 난진동의 영향을 최소화하는 지지시스템(Support System) 설계방법을 기술하였다. 이러한 기법은 우주망원경 또는 고분해능 망원경 설계시 필수적으로 적용해야 할 기법으로 알려져 있다.

1. 서 론

망원경은 굴절식과 반사식 망원경으로 구분할 수 있는데, 굴절식 망원경의 경우 구경이 커지면 무겁고 제작이 어려워진다. 그러므로 굴절식 망원경의 구경은 대개 0.3m 이내로 제한하여 사용한다. 반면에 반사식 망원경은 구경이 큰 경우에도 제작이 용이하고, 색수차가 없으므로 사용파장에 무관하여 파장폭이 넓을 경우에 적절한 망원경 광학계이다.

여기에서는 반사식 망원경 설계에 대하여 기술하고자 한다. 특히 반사식 망원경 중에서도 가장 널리 쓰이는 2 반사경 망원경에 대한 광학계 설계용 프로그램 작성시 활용할 수 있는 Seidel 수차식을 가우스괄호를 이용하여 전개하고, 구면수차와 코마를 제거한 2 반사

광학계에 대한 해를 구하는 방법을 기술하였다. 이 수차식을 이용하면 2 반사경을 가지는 여러가지 형태의 망원경 광학계에 대한 Seidel 수차를 최소화할 수 있기 때문에 망원경 광학계 초기설계시 유용하게 활용할 수 있다.

대표적인 대구경 광학계로서 천체망원경의 개발은 지상용 천체망원경 개발로 시작되었으나, 지상에서 별을 관측하는 경우에 대기층에 의한 광학성능 저하를 피할 수 없기 때문에 망원경을 우주공간에 올려서 별을 관측하기 시작하였으며, 이것이 바로 우주망원경(Space Telescope)이다. 우주망원경은 지상에서 우주공간으로 로켓이 발사될 때 발생하는 하중을 견뎌야 하며, 우주공간의 극한온도에서 제 성능을 발휘해야 한다. 이러한 문제는 망원경의 주경(Primary Mirror)에 아주 민감하게 작용하여 망원경의 분해능에 직접적인 영향을 준다. 이를 해결하기 위해 주경을 초경량화하고, 로켓 발사시 주경이 파괴되지 않도록 견고하면서 동시에 유연한 지지시스템(Support System)을 설계해야 한다. 실제로 우주망원경 설계시 고려해야 할 중요한 요소는 로켓 발사시 망원경의 주경에 작용하는 하중에 의해 주경에 영구적인 변형이 일어나지 않도록 주경을 지지하고 극저온시 주경면의 변형을 방지할 수 있는 지지시스템을 설계하는 것이다.

광기구설계(Optomechanical Design) 기법을 이용하여 망원경 주경(Primary Mirror)을 경량화하는 방법을 알아보고, 주경의 외형구조에 따른 경량화를 시도하였다. 그리고 주경의 정적 구조해석을 통해 주경면의 변형에 따른 광학성능을 계산해 보았다. 또한 주경의 동적 구조해석의 한 예로서 로켓 발사시 발생하는 난진동에 의한 영향에 적응하는 지지시스템 설계방법을 기술했다. 이는 우주망원경 또는 고분해능을 갖는 망원경 설계시 필수적으로 적용해야할 기법으로 알려져 있다.

2. 반사 망원경 광학계 설계

2.1 사용기호 설명

앞으로 사용될 기호들에 대한 설명은 다음과 같다.

P_j ; j번째 면의 conic constant

$K_j=c_j(n_j-n_{j-1})$

$P_j=-(ecentricity)^2$

h_j ; j번째 면의 입사고

$u_j=h_j/l'_j$; j번째 면과 j+1번째 면사이의 근축각

$I_j=(c_jh_j-u_{j-1})$; j번째 면의 입사각

$I'_j=(c_jh_j-u_j)$; j번째 면의 굴절각

$A_j=n_{j-1}I_j=n_jI'_j$; 굴절불변량

(Snell의 법칙)

여기서 n은 굴절율이고, c는 곡률반경이다.

2.2 가우스괄호를 이용한 Seidel 수차식의 전개

일반적인 근축광선 추적식은 다음과 같다 ;

$h_j=h_{j-1}-d_{j-1}u_{j-1}$

$\quad =h_{j-1}-(d_{j-1}/n_{j-1})(n_{j-1}u_{j-1})$

$n_ju_j=n_{j-1}u_{j-1}+h_jK_j$

$K_j=c_j(n_j-n_{j-1})$; 굴절능

근축광선추적식에 사용되는 기호는 다음과 같다.

k ; 광학면의 갯수

d_0 ; 물체점에서 제 1 면까지의 거리

u_0 ; 제 1 면에 입사하는 광선의 근축각

그리고 근축광선 추적식을 가우스괄호를 이용하여 표현하면 다음과 같다 ;

$h_0=0$

$n_0u_0=n_0u_0$

$h_1=-n_0u_0[d_0/n_0]$

$n_1u_1=n_0u_0[d_0/n_0,\ -K_1]$

$h_2=-n_0u_0[d_0/n_0,\ -K_1,\ d_1/n_1]$

$n_2u_2=n_0u_0[d_0/n_0,\ -K_1,\ d_1/n_1,\ -K_2]$

$\vdots$

$h_j=-n_0u_0[d_0/n_0,\ -K_1,\ d_1/n_1,\ \cdots,\ -K_{j-1},\ d_{j-1}/n_{j-1}]$

$n_ju_j=n_0u_0[d_0/n_0,\ -K_1,\ d_1/n_1,\ \cdots,\ -K_{j-1},\ d_{j-1}/n_{j-1},\ -K_j]$

이 때 j〉1이다.

배율

$M=\eta'_k/\eta_0=n_0u_0/n_ku_k$

$M=1/[d_0/n_0,\ -K,\ d_1/n_1,\ \cdots,\ d_{k-1}/n_{k-1},\ -K]$

초점거리

$f=-1/[-K_1,\ d_1/n_1,\ \cdots,\ d_{k-1}/n_{k-1},\ -K_k]$

후초점거리

$BFL=[-K_1,\ d_1/n_1,\ \cdots,\ d_{k-1}/n_{k-1}]/[-K_1,\ d_1/n_1,\ \cdots,\ d_{k-1}/n_{k-1},\ -K]$

Seidel 수차식은 다음과 같이 표현된다 ;

· 구면수차

$S_1=\Sigma_j A_j^2 h_j \Delta(u/n)_j$

· 코마

$S_2=\Sigma_j A_j B_j h_j \Delta(u/n)_j$

· 비점수차

$S_3=\Sigma_j B_j^2 h_j \Delta(u/n)_j$

· Petzval 상면만곡

$S_4=H^2 \Sigma_j P_j$

이 때 H는 Lagrangian invariant이고,

$\Sigma_j P_j=-\Sigma_j c_j \Delta(1/n)_j$

이다.

· 왜곡수차

$S_5=\Sigma_j (B_j/A_j)[H^2P_j+B_j^2 h_j \Delta(u/n)_j]$

· Lagrangian invariant

$H \equiv nu\eta=n'u'\eta'$

j번째 면에 원추면을 두면 각 Seidel 수차의 변화는 다음과 같다.

$\Delta S_1=P_j c_j^3 h_j^4 \Delta(n)_j$

$\Delta S_2=P_j c_j^3 h_j^3 \overline{h_j}\ \Delta(n)_j$

$\Delta S_3=P_j c_j^3 h_j^2 (\overline{h_j})^2 \Delta(n)_j$

$\Delta S_4=0$

$\Delta S_5=P_j c_j^3 h_j (\overline{h_j})^3 \Delta(n)_j$

2.3.2 반사경 망원경 광학계를 위한 Seidel 수차식

축상광선은 $u_0=0$의 조건을 가지므로

$h_1=h,\ u_0=0$

$h_2=h_1-d_1u_1$
$=h[-2c_1,\ d_1]$

이 되고, 같은 방법으로

$h_3=h[-2c_1,\ d_1]-d_2h[-2c_1,\ d_1,\ 2c_2]=0$

를 얻을 수 있고, 여기서

$$d_2=\frac{[-2c_1,\ d_1]}{[-2c_1,\ d_1,\ 2c_2]}$$

를 얻는다. 그리고

$n_1u_1=-2c_1h$

$n_2u_2=h[-2c_1,\ d_1,\ 2c_2]$

를 얻는다. 또한

$\Delta(u/n)_1=u_1/n_1-u_0/n_0$
$=-2hc_1$

이 되고

$\Delta(u/n)_2=2hc_2[-2c_1,\ d_1]$

가 된다. 그리고

$A_1=n_1(c_1h_1-u_1)=hc_1$

$A_2=h[2c_1,\ -d_1,\ -c_2]$

가 된다. 그리고 Lagrangian Invariant는

$H=n_2u_2\eta'=n_2u_2\overline{h_3}$
$=\beta h\{[d_1][-2c_1,\ d_1,\ 2c_2]-[-2c_1,\ d_1][2c_2,\ d_1]\}$

이 된다.

제1면에 stop이 있을 경우에 $\overline{h_1}=0$, $n_0\overline{u_0}=\beta$의 조건을 가진다. 고로

$\overline{h_2}=\overline{h}-(d_1/n_1)(n_1u_1)=\beta[d_1]$

$\overline{h_3}=\beta\{[d_1]-[2c_2,\ d_1]\cdot[-2c_1,\ d_1]/[-2c_1,\ d_1,\ 2c_2]\}$

그리고

$n_2\overline{u_2}=n_1\overline{u_1}+\overline{h_2}K_2$
$=\beta[2c_2,\ d_1]$

이 된다. 그리고 A_j와 대응되는 B_j를 생각하면

$B_j=n_j(c_j\overline{h_j}-\overline{u_j})$

이 되고,

$B_1=n_1(c_1\overline{h_1}-u_1)=-n_1\overline{u_1}$
$=-\beta$

같은 방법으로

$B_2=-\beta[c_2,\ d_1]$

를 얻는다.

Seidel 수차계수를 가우스괄호로 다시 표현하면 그 결과는 다음과 같다 :

구면수차

$S_1=-2h^4\{c_1^3-c_2[2c_1,\ -d_1,\ -c_2]^2\cdot[-2c_1,\ d_1]^2\}$

코마

$S_2=2h^3\beta\{c_1^2-c_2[c_2,\ d_1]\cdot[-2c_1,\ d_1]^2[2c_1,\ -d_1,\ -c_2]\}$

비점수차

$S_3=-2h^3\beta^2\{c_1-c_2[c_2,\ d_1]^2\cdot[-2c_1,\ d_1]^2\}$

Petzval 상면만곡

$S_4=H^2(c_1-c_2)$

왜곡수차

$$S_5=-\frac{2\beta}{h}(H^2+h^2\beta^2)-\frac{2\beta[c_2,\ d_1]}{h[2c_1,\ -d_1,\ -c_2]}\cdot(c_2H^2-c_2h^2\beta^2[c_2,\ d_1]^2[-2c_1,\ d_1]^2)$$

같은 방법으로 원추면에 의한 수차보정항을 구할 수 있다.

$\Delta S_1=-2h^4(p_1c_1^3-p_2c_2^3$

$$[-2c_1, d_1]^4)$$

$$\Delta S_2 = 2h^3\beta P_2 c_2^3 [d_1] [-2c_1, d_1]^3$$

$$\Delta S_3 = 2h^2\beta^2 P_2 c_2^3 [d_1]^2 [-2c_1, d_1]^2$$

$$\Delta S_4 = 0$$

$$\Delta S_5 = 2h^3\beta^3 P_2 c_2^3 [d_1]^3 [-2c_1, d_1]$$

2.4 구면수차와 코마가 제거된 2 반사경 망원경 설계

원추면에 의한 수차보정항이 포함된 구면수차는 다음과 같이 표현된다 :

$$S'_1 = S_1 + \Delta S_1 = 2h^4\beta(c_1^3 + c_2[2c_1, -d_1, -c_2]^2 \cdot [-2c_1, d_1]^2 - P_1c_1^3 + P_2c_2^3[-2c_1, d_1]^4)$$

또한 원추면에 의한 수차보정항이 포함된 코마는 다음과 같다 :

$$S'_2 = S_2 + \Delta S_2 = -2h^3\beta(c_1^2 + c_2[c_2, d_1][-2c_1, d_1]^2 \cdot [2c_1, -d_1, -c_2] - P_2c_2^3 \cdot [d_1][-2c_1, d_1]^3)$$

여기서 구면수차와 코마가 제거된 해는 $S'_1 = S'_2 = 0$를 만족해야 한다. 윗 식에서 미지수는 c_1, d_1, c_2, P_1 및 P_2로 5개이고, 방정식은 2개임으로 3개의 미지수를 적당한 값을 입력하여 나머지 2개의 미지수에 대한 값을 2개의 방정식을 이용하여 찾는다. 이 것을 풀기 위해서 FORTRAN 프로그램을 이용한다면, 먼저 $c_1 = -1$로 정하고 c_2와 d_1값을 DO LOOP을 통해 바꿔가면서 P_1과 P_2를 구하면 아주 쉽게 해결된다. 윗 식을 간단히 표현하기 위해 각각의 가우스괄호를 다음과 같이 둔다.

$$g_{12} = [-2c_1, d_1]$$

$$g_{22} = [c_2, d_1]$$

$$g_{31} = [2c_1, -d_1, -c_2]$$

$$g_{32} = [-2c_1, d_1, 2c_2]$$

그러면 구면수차와 코마가 제거된 두개의 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$c_1^3 + c_2 g_{31}^2 g_{21}^2 - P_1 c_1^3 + P_2 c_2^3 g_{21}^4 = 0$$

$$c_1^2 + c_2 g_{22} g_{21}^2 g_{31} - P_2 c_2^3 d_1 g_{21}^3 = 0$$

둘째 식에서 c_1, c_2 및 d_1를 알면 P_2를 구할 수 있고, 이 P_2를 이용하여 첫째 식에서 P_1을 구할 수 있다. 그리고 제 2면에서 초점까지의 거리는 d_2로 주어진다 :

$$d_2 = \frac{[-2c_1, d_1]}{[-2c_1, d_1, 2c_2]} = g_{21}/g_{32}$$

지금까지 주어진 수차식을 이용하여 2 반사경 망원경에 대한 광학계설계 프로그램을 FORTRAN 언어를 사용하여 작성할 수 있으며, 이 프로그램을 이용하면 구면수차와 코마가 완전히 제거된 해를 무수히 많이 얻을 수 있다. 그러나 그 해가 물리적으로 받아들일 수 있는 것이어야 하고, 망원경 규격과 제작성을 고려하여 그 결과중 일부를 선택하면 된다. 그리고 얻어진 결과들을 CODE V 등의 상용 광학계 설계 프로그램을 이용해 필요한 광학성능을 조사하여 사용하고자 하는 광학계 시스템에 가장 적합한 해를 선택할 수 있다. 현재까지 알려진 바로는 2 구면반사경을 이용한 망원경의 경우 Ritchey Chretien Telescope가 가장 적합한 것으로 나타났다. 즉 원추상수가 −1보다 작은 값을 갖는 경우로서 두 반사경면이 모두 Hyperbolic 면을 갖는 망원경이 된다.

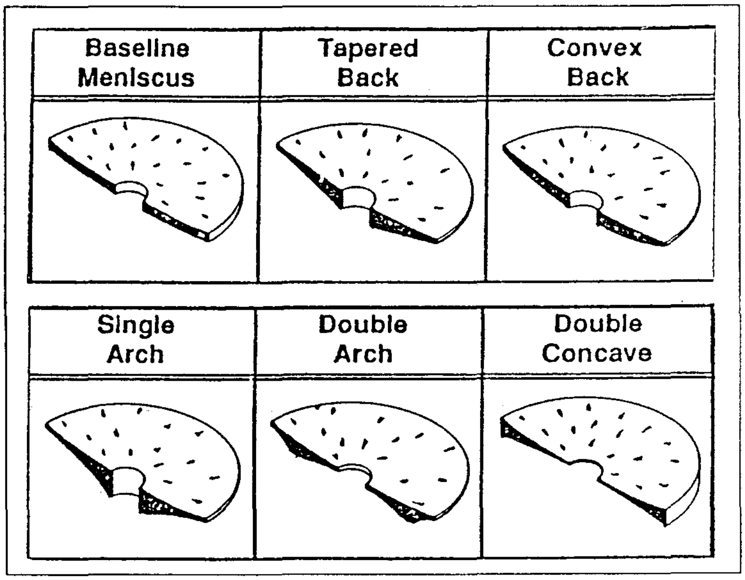
3. 주경의 구조해석

3.1 주경의 경량화를 위한 설계

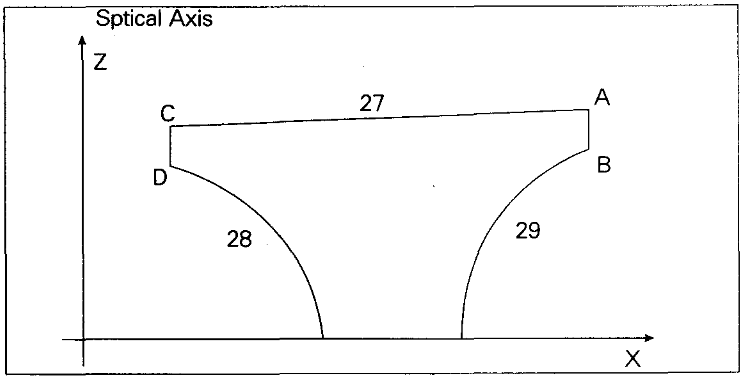
2 반사경 망원경에서 주경의 무게는 전체 망원경의 상당부분을 차지하고 있으며, 이를 경량화하는 것은 망원경 전체의 무게를 줄이는데 크게 기여하고 있다. 그러므로 이 부분에 대한 연구는 망원경 광학계 구조설계를 위한 필수분야임에 틀림없다.

망원경 주경을 경량화하는 방법은 반사면과 뒷면 사이에 공간을 두거나 가벼운 물질을 채워넣는 방법이 있으며, 주경의 무게를 줄이는 다른 방법으로서 그림 1에서 보는 바와 같이 뒷면의 기하학적인 모양을 single arch나 double arch로 만들어서 사용한다. 물론 이 두가지 방법을 병행할 수도 있다.

여기에서는 주경의 경량화에



(그림 1) Various contoured back mirror shapes



(그림 2) Double arch primary mirror

대한 한 예로서 뒷면의 모양을 double arch 형태로 설계하는 과정을 보이고자 한다. 대개 반사경의 재질은 열팽창계수(α)가 아주 작은($\alpha \simeq 10^{-6}/°F$) 것을 주로 사용하고, 재질이 선정되면 주경의 기하학적인 모양을 최적화하여 무게를 줄인다.

직경이 0.5m이고 f-number가 2.5이며, central hole을 가지는 반사경을 경량화하는 방법으로 반사경의 뒷면이 double arch 형태를 취하는 경우에 대해 계산하고자 한다. 이 반사경의 곡률반경은 $\rho = 2D \cdot$ f-number로 표현되므로 $\rho =$ 2.5(m)임을 알 수 있다. 그리고 rule of thumb에 의한 반사경의 두께는 D/8임으로 대략 0.06m가 된다. 이 경우 X축상의 지지점의 위치는 참고문헌 1에 의하면 $\gamma_0/R=0.6$이 최적이다. 여기서 γ_0는 반사경 중심에서 지지점까지의 거리이고 R은 반사경의 반경이다. 고로 X축 방향의 지지점의 위치는 $0.25 \times 0.6 = 0.15$(m)가 된다. 또한 land는 R/4로서 대략 0.062m가 된다. 그리고 그림 2의 곡선 27, 28 및 29의 방정식을 참고문헌 1에 의해 개발된 프로그램을 사용하여 구하면 다음과 같다.

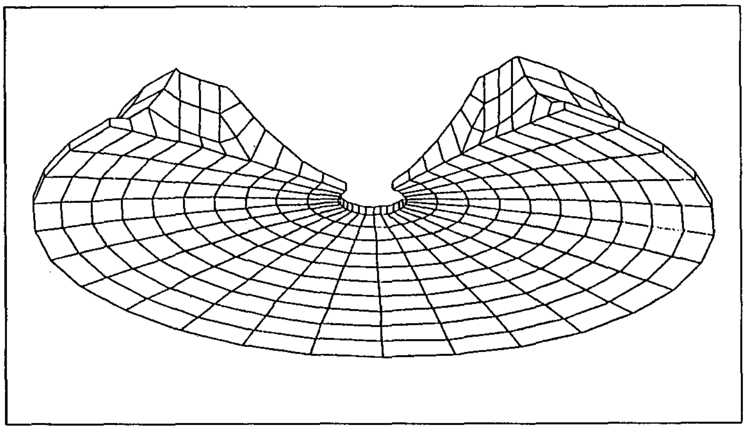
27 $z(x) = 254.7469 - \sqrt{250^2 - x^2}$

28 $z(x) = \frac{1}{0.8615}\sqrt{11.9 - x}$

29 $z(x) = \frac{1}{0.5472}\sqrt{x - 18.1}$

윗식에 사용한 단위는 cm이다. 이 결과에 의한 반사경 모양에 대한 유한요소모형은 그림 3과 같다. 이 결과에 의하면 meniscus형태의 반사경을 그대로 사용하는 것에 비해서 약 25% 정도 무게를 줄일 수 있다. 그리고 주경의 반사면과 뒷면 사이에 공간을 두는 방법과 반사경 뒷면의 기하학적인 모양을 최적화하는 방법을 병행할 경우에는 주경의 무게를 50% 이상 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.

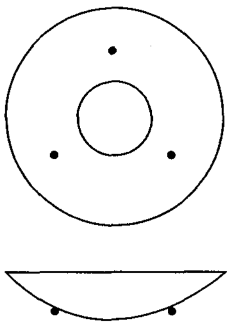
3.2 주경의 정적 구조해석



(그림 3) Finite element model of the double arch primary mirror

(표 1) Optical performance vs. support ratio

Support Ratio (r/R_o)	RMS Wavefront error(waves)	Radius of Spot 50% energy(arcsec)
0.4	0.436	0.868
0.5	0.490	0.626
0.6	0.672	0.731
0.7	1.047	1.132
0.8	1.335	1.402



THREE POINT SUPPORT

(그림 4) Support position of a mirror

주경의 외형구조는 앞절에서 행한 방법으로 결정된다. 이러한 주경을 망원경으로 조립하여 사용하기 위해서는 지지시스템이 필요하며, 이 지지시스템이 그림 4와 같은 위치에 놓여 있다고 가정한다. 그러면 반사경의 자중에 의해 반사경 면이 변형될 것이라고 유추할 수 있으며, 이러한 변형은 당연히 망원경의 광학성능에 영향을 미치게 된다. 그래서 만약 고분해능 망원경을 요구하거나, 광학계설계시 얻은 광학성능에 최대한 가까운 제작 및 조립을 원한다면 지지점의 위치가 광학성능에 어떠한 영향을 미치는지 조사해 볼 필요가 있다.

이러한 해석의 절차는 i) 주경의 재질, 반경 및 두께를 결정하고, ii) 구조해석을 위해 유한요소모형을 만들고, iii) 유한요소모형 계산 프로그램을 이용하여 반사경면의 변형을 계산하고, iv) 이 변형이 광학성능에 미치는 영향을 FRINGE 프로그램(아리조나대학에서 개발하였음)을 이용하여 분석한다. v) 지지점의 위치를 바꿔가면서 iii)항과 iv)항을 반복한다. vi) 구해진 결과들을 분석하여 최적위치를 결정한다.

이러한 과정을 한 예를 가지고 설명하고자 한다. 주경의 재질은 Zerodur를 택하기로 하고, 직경이 1m이고, 곡률반경이 5.4m인 반사경을 분석하여 보자. 먼저 반사경의 유한요소 모형을 plate model로 계산을 시도하였으며, 유한요소 프로그램으로써 ANSYS를 사용했다. 그 광학성능에 대한 결과는 RMS 파면오차와 스팟의 크기로서 표 1에 주어져 있다. 그 결과에 의하면 지지점의 위치는 반사경의 가장자리에서 중심쪽으로 갈수록 광학성능이 좋게 나타남을 알 수 있다.

3.3 주경의 동적 구조해석

주경의 동적 구조해석은 망원경을 우주공간으로 올리기위해 망원경을 탑재한 로켓이 발사될 때 발생하는 난진동(random vibration)이 반사경과 지지시스템에 작용할 때 그 변형이 탄성한계 내에 있는지

를 조사할 때 필요하다. 그러기 위해서는 반사경과 지지시스템을 결합한 상태의 유한요소모형을 세워야 하고, 그 모형을 가지고 구조해석 프로그램을 이용하여 분석해야 한다. 그리고 로켓이 발사될 때 발생되는 난진동의 특성곡선을 알아야 하는데, 주로 Power Spectral Density Function(PSDF)으로 표현된다. 반사경과 지지시스템의 고유진동수를 구하고, 주어진 PSDF에 의한 영향을 계산해야 한다. 이것은 실제로 구조설계시에는 주어진 PSD (Power Spectral Density) 곡선을 Displacement Response Spectrum(DRS)으로 변환하여 그 데이타를 입력한다. 이를 변환하는 식은

$$\delta_\gamma = \sqrt{\frac{PSD(f)}{(4\pi f)^3 \xi}}$$

이고, 여기서

δ_γ=Root Mean Square displacement

PSD(f) = Value of the PSDF at frequency equal to f

f=natural frequency of single degree of freedom system subjected to base exitation

ξ=critical damping ratio =0.004.

이다. 이러한 동적 구조해석 방법은 망원경은 탑재하는 탑재체에 따라 PSDF가 다르므로, 배 또는 비행기에 탑재하는 경우에도 적용할 수 있다.

4. 결 론

2 반사경 광학계의 초기설계를 위한 Seidel 수차식을 전개하여, 구면수차 및 코마가 제거된 해를 구하는 방법을 알아 보았다.

반사망원경 주경 뒷면의 기하학적인 모양을 최적화하여 주경의 무게를 줄이는 방법을 알아 보았으며, 주경의 정적 구조해석을 통해 주경면의 변화에 따른 광학성능을 계산하는 과정을 살펴 보았다. 그리고 주경의 동적 구조해석의 한 예로서 로켓발사시 발생하는 난진동의 영향에 의한 반사경과 지지시스템의 변형을 계산하는 방법을 약술하였다.

지금까지 기술한 내용은 우주망원경, 지상용 천체망원경, 고공정찰용 E-O, LIDAR, High-Power 레이저 및 해저통신용 레이저 등의 광학계 및 그 구조설계시에 적용 가능하다.