

이동 최소제곱 근사법을 이용한 파면오차 계산 알고리즘

연정흠[†] · 강금실 · 윤형식

한국항공우주연구원 해양기상탑재체그룹

④ 305-333 대전광역시 유성구 어은동 45번지

(2006년 5월 26일 받음, 2006년 8월 14일 수정본 받음)

광학계의 파면오차는 광학계의 성능을 나타내는 주요 지표이며, 광학면의 변형에 의해 발생한다. 광기계의 개발에 있어서 주요 하중조건에서 발생하는 파면오차 양은 중요 규격으로 설정되고 관리되어 진다. 광학면의 변형은 유한요소해석 등의 발달과 더불어 정확한 수준까지 계산할 수 있게 되었다. 유한요소해석 결과로부터 파면오차를 계산하기 위해서는 광학면에서의 변형량을 근사하고 분석해야 한다. 이를 위해 추가적인 격자나 요소망으로 결과를 변화하여 근사하는 방법이 사용되고 있으나, 격자 구성의 번거로움과 변환으로 인한 오차 발생 소지를 가지고 있다. 본 연구에서는 추가적인 격자의 구성없이 절점 정보만으로 효과적인 근사를 할 수 있는 이동 최소제곱 근사법을 사용하여 변형량을 근사하고 파면오차를 계산하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 효용성을 보이기 위하여 해양탑재체 스캔 미러의 자중에 의한 파면오차를 계산하였고, 기존의 방법과 비교 분석하였다.

주제어 : Wavefront error, Moving least-squares, Zernike polynomial, Scan mirror

I. 서 론

광학계의 파면오차(WFE; Wave-Front Error)는 광학계의 성능을 나타내는 중요한 지표로 활용 된다. 또한, 광기계의 개발에 있어서 환경하중 (environmental load), 운영 조건(operational condition) 등에 의해 발생하는 파면오차 양은 중요 규격 (specification)으로 설정되어 관리되어진다.

파면오차는 광학계를 거치고 난 후의 파면(real wavefront)과 이상적인 파면(ideal wavefront) 사이의 차이로, 주로 광학면의 변형에 의해 발생하게 된다. 파면오차를 기술하는 방법으로는 최대의 편차량으로 기술하는 피크-밸리값과 파면오차의 분포량을 광학면에서 평균적으로 기술하는 제곱평균근호값(RMS value)이 있다. 이 두 값은 일반적으로 비례하는 상관관계를 가지고 있지만, 국부적인 파면오차 보다 광학면에서 평균적인 파면오차가 공학적으로 더 중요한 의미를 갖고 있기 때문에 일반적으로 제곱평균근호값을 사용한다.^[1]

과거에는 광학면의 변형 및 이에 의한 파면오차의 계산에 경험과 이론에 의해 얻어진 스케일링 법칙(scaling law)을 활용하였다.^[2,3] 스케일링 법칙은 광학계 개발에 유용하게 활용되기는 하지만, 내재적인 오차를 가지고 있고 새로운 종류의 광학계에 적용하는데는 한계를 가지고 있다. 유한요소법과 같은 수치해석법의 발달로 광학면의 변형을 정확한 수준까지 예측 가능해 지면서, 이를 활용한 파면오차 계산에 관한 연구가 수행되었다. Genberg^[4]는 광학면의 각 유한요소 절점에 가중치를 주어 최소제곱법으로 파면오차를 계산하는 방법을 제안하였다. 이와 같이 파면오차를 축출해 내기 위해서

는 새로운 근사화 과정이 필요하게 된다. 유한요소 형상함수를 이용한 근사방법^[5]과 사격형 격자구조를 이용한 근사방법^[6]에 관한 연구가 진행되었다. 이와같이 추가적인 격자를 사용하여 근사하게 되면, 격자 구성의 번거로움 뿐 아니라 변환으로 인한 오차 발생 소지를 가지고 있다.

본 연구에서는 광학면에 새로운 격자의 구성없이 손쉽고 정확하게 근사할 수 있는 이동 최소제곱(MLS; Moving Least-Squares) 근사법을 이용한 파면오차 계산을 제안하였다. 이동 최소제곱 근사법은 Lancaster 와 Salkauskas^[7]에 의해 곡면 근사를 위해 제안된 방법이었으나, 미분방정식의 변수근사,^[8] 구조물의 변위 근사^[9] 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 이동 최소제곱 근사법으로 광학면의 변형을 근사하고 이를 이용하여 파면오차를 계산하는 방법을 제안하였다. 또한 적용 예제를 통하여 방법의 유용성을 살펴보았다.

II. 파면오차의 개요

광학계의 파면오차는 광경로차(OPD; Optical Path Difference)로 부터 발생하며, 거울의 경우는 거울 광학면의 변형에 의해 기인한다.

거울면의 광경로차는 다음과 같다.

$$OPD = 2\Delta z \quad (2.1)$$

여기서 Δz 는 거울면의 수직방향 변위를 나타낸다.

광경로차의 효과적으로 표현하기 위하여 제르니케(Zernike) 다항식을 사용한다. 제르니케 다항식은 단위 원에서 서로 직교하는 함수로 각 항이 광학적 의미를 가지고 있다. 특히, 저차항

[†]E-mail: yeon.jheum@gmail.com

들은 자이델 수차(Seidel aberration)의 의미를 가지고 있다. 광경로차를 제르니케 다항식으로 분해하면 다음과 같다.

$$OPD = C_0 Z_0(x) + C_1 Z_1(x) + C_2 Z_2(x) + C_3 Z_3(x) + C_4 Z_4(x) + \dots \quad (2.2)$$

여기서 $Z_i(x)$ 는 각 차수의 제르니케 다항식을 나타내며, C_i 는 그에 해당하는 계수를 나타낸다.

각 항 중 일부를 단위 원에서 (x, y) 좌표계로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Z_0(x, y) &= 1 \\ Z_1(x, y) &= x \\ Z_2(x, y) &= y \\ Z_3(x, y) &= 2x^2 + 2y^2 - 1 \\ Z_4(x, y) &= x^2 + y^2 \\ Z_5(x, y) &= 2xy \\ Z_6(x, y) &= 2xy^3 + 3xy^2 - 2x \\ Z_7(x, y) &= 2xy^3 + 3xy^2 - 2y \end{aligned} \quad (2.3)$$

Z_0 는 균일한 변화를 나타내므로 피스톤(piston) 항이라고 부른다. Z_1 은 x 방향으로 기울어지는 양을 나타내며 x -틸트(x-tilt)라고 부르고 Z_2 는 y -틸트(y-tilt)라고 부른다. Z_3 은 촛점 거리의 변화를 나타내며 디포커스(defocus)라고 부르고, Z_4, Z_5 는 비점수차(astigmatism), Z_6, Z_7 는 코마수차(coma)를 나타낸다. 각 항들의 그림과 추가적인 항들은 참고문헌^[10]을 참조할 수 있다.

파면오차의 제곱평균근호값은 다음과 같이 정의된다.

$$WFE_S = \left[\frac{\int_{\Omega_s} (OPD)^2 d\Omega}{\int_{\Omega_s} d\Omega} \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

여기서 Ω_s 는 OPD가 계산되어지는 광학면을 의미하며 주로 단위원이 사용된다.

III. 파면오차의 계산

광경로차는 광학면의 변형으로부터 발생하는데, 일반적인 상용 유한요소해석 프로그램으로 정확한 수준까지 구할 수 있다. 그러나 파면오차를 계산하기 위해서는 (2.4)식과 같이 광경로차를 적분해야 하는데, 정확한 값을 얻기 위해서는 광경로차의 올바른 근사가 필요하다. 유한요소해석의 결과로 광학면 각 절점에서의 광경로차를 알 수 있는데, 이로부터 광학면 전체에서의 광경로차를 근사해야 한다.

추가적인 격자를 사용하게 근사하게 되면, 격자 구성의 번거로움 뿐 아니라 변환으로 인한 오차 발생 소지를 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 절점의 정보만 가

지고 정확한 근사를 하는 방법이 필요하게 된다. 본 연구에서는 이동 최소제곱 근사법을 이용하여 이러한 문제를 해결하려 한다.

3.1. 이동 최소제곱 근사법

어떤 함수의 근사치를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u^h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m p_i(\mathbf{x}) a_i(\mathbf{x}) = \mathbf{p}^T(\mathbf{x}) \mathbf{a}(\mathbf{x}) \quad (3.1)$$

여기에서 $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ 는 다항식 기저 벡터이고 $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ 는 계수 벡터이다. 또한 m 은 다항식 기저의 개수를 나타낸다. 가령 2차원 문제에서 2차 함수까지의 다항식을 고려하는 경우,

$$\mathbf{p}^T(\mathbf{x}) = [p_i(\mathbf{x})] = [1, x, y, x^2, xy, y^2] \quad (3.2)$$

$$\mathbf{a}^T(\mathbf{x}) = [a_i] = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6] \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} u^h(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^6 p_i(\mathbf{x}) a_i(\mathbf{x}) = \mathbf{p}^T(\mathbf{x}) \mathbf{a}(\mathbf{x}) \\ &= a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 + a_5 xy + a_6 y^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

와 같이 나타내어 진다. 그런 후에 이 근사함수와 원래 주어진 절점값의 차이를 제곱한 양이 최소가 된다는 조건을 부여하여 계수 벡터를 결정하면 이 근사함수를 계산할 수 있다. (3.1)식에 의한 근사화는 함수를 재생하는 영역 전체에 대한 일괄적인 근사화(global approximation) 과정인데 Lancaster 와 Salkauskas^[7]는 보다 정확한 근사함수를 계산하기 위해 국부적인 관점으로 접근하는 방법(local approximation)을 제안하여 이동최소제곱 근사라고 불렀다. 이 방법에 의하면 위의 근사식은 아래와 같이 바꿔 표현된다.

$$u^h(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j) = \sum_{i=1}^m p_i(\mathbf{x}_j) a_i(\mathbf{x}) = \mathbf{p}^T(\mathbf{x}_j) \mathbf{a}(\mathbf{x}) \quad (3.5)$$

여기에서 \mathbf{x}_j 는 특정한 절점의 위치를 의미한다. 즉, 계산하고자 하는 위치(\mathbf{x})뿐만 아니라 특정한 절점의 위치(\mathbf{x}_j)도 근사함수를 결정하는 요소로서 작용하게 된다(그림 3.1). 이로부터 미지수인 계수 벡터 $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ 를 찾는 법은 다음과 같다. 먼저 J번째 절점값 u_j 와 그 절점에 대응하는 근사함수 값 $u^h(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j)$ 의 차이를 제곱하고 여기에 가중함수를 곱한 후, 전체 절점에 대하여 합을 취하여 나온 합수를 I 라고 하자. 그러면 I 는 아래와 같이 표현된다.

$$I = \sum_j W_j(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j) [u^h(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j) - u_j]^2 \quad (3.6)$$

$$= \sum_j W_j(\mathbf{x}) \left[\sum_i^m p_i(\mathbf{x}_j) a_i(\mathbf{x}) - u_j \right]^2$$

여기에서 가중함수 $W_j(\mathbf{x})$ 는 이 표현식에 국소적 성질을 제공하고 있다. I 라는 양이 최소가 되는 조건을 찾음으로써

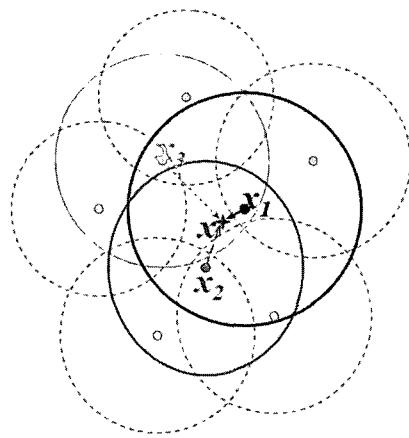


Fig. 3.1 Moving least-squares approximation and influence domain.

계수 벡터 $a(x)$ 를 결정할 수 있다. $a(x)$ 를 결정하기 전에 위의 I 에 대한 표현식을 아래와 같이 행렬식으로 바꿀 수 있다.

$$I = (\mathbf{P}a - u)^T \mathbf{W}(x) (\mathbf{P}a - u) \quad (3.7)$$

여기에서 a 는 앞에서 언급한 계수 벡터이고 u 는 절점값들로 이루어진 벡터로서

$$u^T = [u_1, u_2, \dots, u_{NP}] \quad (3.8)$$

이다. 또한 \mathbf{P} 와 $\mathbf{W}(x)$ 는

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1(x_1) & p_2(x_1) & \cdots & p_{NP}(x_1) \\ p_1(x_2) & p_2(x_2) & \cdots & p_{NP}(x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_1(x_{NP}) & p_2(x_{NP}) & \cdots & p_{NP}(x_{NP}) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{W}(x) = \begin{bmatrix} W_1(x) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_2(x) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & W_{NP}(x) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

로 정의되는 행렬들이다. $a(x)$ 를 찾는 조건인 I 의 최소 조건을 다음과 같다.

$$\frac{\partial I}{\partial a} = \mathbf{A}(x)a(x) - \mathbf{B}(x)u = 0 \quad (3.11)$$

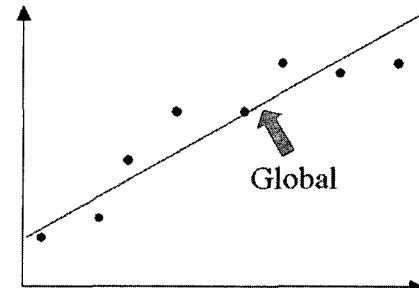
여기에서 $\mathbf{A}(x)$ 는 앞 절에서 도입한 모멘트 행렬로서

$$\mathbf{A}(x) = \mathbf{P}^T \mathbf{W}(x) \mathbf{P} \quad (3.12)$$

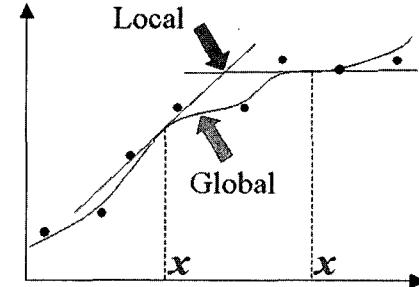
으로 쓸 수 있으며 $\mathbf{B}(x)$ 는

$$\mathbf{B}(x) = \mathbf{P}^T \mathbf{W}(x) \quad (3.13)$$

과 같이 정해지는 행렬이다. 따라서 위의 최소 조건을 만족하는 계수벡터의 형태는 다음과 같다.



(a) Least-squares approximation

(b) Moving least-squares approximation
Fig. 3.2 Comparison between LS and MLS approximations.

$$a(x) = \mathbf{A}^{-1}(x)\mathbf{B}(x)u \quad (3.14)$$

그러므로 이를 (3.5)식에 대입하면

$$u^h(x) = \mathbf{P}^T(x)a(x) = \mathbf{P}^T(x)\mathbf{A}^{-1}(x)\mathbf{B}(x)u \quad (3.15)$$

이고 이를 다시 쓰면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$u^h(x) = \sum_J \mathbf{P}^T(x)\mathbf{A}^{-1}(x)\mathbf{B}_J(x)u_J \quad (3.16)$$

이 때 $\mathbf{B}_J(x)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{B}_J(x) = W_J(x)\mathbf{P}(x_J) \quad (3.17)$$

결론적으로 무효소 근사의 형상함수는 다음과 같다.

$$u^h(x) = \sum_J \Phi_J(x)u_J \text{ where } J = 1, \dots, NP \quad (3.18)$$

$$\Phi_J(x) = \mathbf{P}^T(x)\mathbf{A}^{-1}(x)\mathbf{B}_J(x) \quad (3.19)$$

$$\mathbf{A}(x) = \mathbf{P}(x_J)\mathbf{W}(x)\mathbf{P}^T(x_J) \quad (3.20)$$

$$\mathbf{B}_J(x) = W_J(x)\mathbf{P}(x_J) \quad (3.21)$$

그림 3.2는 최소제곱 근사화와 이동최소제곱 근사화의 차이를 보여준다. 이동 최소제곱 근사화에서의 일괄적인 근사화는 각 영역안의 위치에서의 국부적인 근사화의 합집합으로 이루어짐을 보여준다. 그리고 이 방법이 내삽을 하는 근사화가 아님을 볼 수 있다.

이동최소제곱 근사법에서 근사하려는 함수가 기저벡터의 어느 기저함수와 같은 경우에

$$u(\mathbf{x}) = p_i(\mathbf{x}) \quad (3.22)$$

$$a_i(\mathbf{x}) = 1, \quad a_j(\mathbf{x}) = 0, \quad (j \neq i) \quad (3.23)$$

이면 식(3.6)의 I 는 영이 된다. I 는 항상 영 이상의 값을 갖기 때문에

$$a_i(\mathbf{x}) = 1, \quad a_j(\mathbf{x}) = 0, \quad (j \neq i)$$

는 I 를 최소화 시킨다. 그러므로 근사함수는 다음과 같다.

$$u^h(\mathbf{x}) = \mathbf{p}^T(\mathbf{x}) \mathbf{a}(\mathbf{x}) = p_i(\mathbf{x}) = u(\mathbf{x}) \quad (3.24)$$

즉, 이동최소제곱 근사법으로 기저함수를 정확히 근사할 수 있다.

파면오차의 근사는 광학면에서 수행되기 때문에 2차원 근사이다. 이때 선형함수까지 정확히 근사하기 위해서는 다음과 같은 기저함수가 필요하다.

$$\mathbf{p}^T(\mathbf{x}) = [1, x, y] \quad (3.25)$$

3.2. 파면오차의 계산

이동 최소제곱 근사법을 이용하여 광경로차를 나타내면 다음과 같다.

$$OPD(\mathbf{x}) = \sum_J^{NP} \Phi_J(\mathbf{x}) (2\Delta z_J) \quad (3.26)$$

여기서 $\Phi_J(\mathbf{x})$ 는 절점 J 에 대한 이동 최소제곱 근사의 형상함수를 나타내고, Δz_J 는 절점에서의 변위, NP 는 총 절점의 개수를 나타낸다.

단위 원에 대하여 파면오차를 계산하면 (2.4)식에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$WFE_{RMS} = \left[\frac{1}{\pi} \int_{\Omega_s} (OPD)^2 d\Omega \right]^{1/2} \quad (3.27)$$

$$= \left[\frac{4}{\pi} \int_{\Omega_s} \sum_J^{NP} \Phi_J^2(\mathbf{x}) \Delta Z_J^2 d\Omega \right]^{1/2}$$

특정 항을 제외한 파면오차는 광경로차에서 그 항을 제하고 적분하면 구할 수 있다. 예를 들어 피스톤항을 제외한 파면오차는 다음과 같다.

$$WFE_{RMS} = \left[\frac{1}{\pi} \int_{\Omega_s} (OPD - C_0 Z_0)^2 d\Omega \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

이 적분식은 가우스 구적법(Gauss quadrature)을 이용하여 수치적으로 구할 수 있다. 가우스 구적법은 적분식을 적분점에서의 함수값과 가중치의 합으로 나타내는 수치적분법이다. 일반적으로 함수 $f(\mathbf{x})$ 의 적분은 다음과 같이 나타난다.

$$\int_{\Omega} f(\mathbf{x}) d\Omega = \sum_{i=1}^{nq} f(\mathbf{x}_i) w_i \quad (3.29)$$

여기서 \mathbf{x}_i 는 적분점의 위치, w_i 는 적분점에서의 가중치, nq 는 적분점의 개수를 나타낸다. 단위 원에 대한 적분점과 가중치는 참고문헌^[11]에서 찾을 수 있다. 파면오차의 계산식을 정리하면 다음과 같다.

$$WFE_{RMS} = \left[\frac{4}{\pi} \sum_l^{nq} \sum_J^{NP} \Phi_J^2(\mathbf{x}_l) \Delta z_J^2 \right]^{1/2} \quad (3.30)$$

IV. 해석 예제

본 연구에서는 제안된 방법의 타당성을 확인하기 위하여 해양탑재체 스캔 미러에 대해 파면오차 해석을 수행하였으며, 이 결과를 상용 광학 해석프로그램인 CODE-V를 이용한 방법의 결과와 비교하였다. 이 방법은 광학면을 외접하는 사각형 영역의 격자구조를 사용한다. 유한요소법으로 구한 광학면의 변위를 이용하여 각 격자에서의 광경로차로 변화시킨 후, CODE-V를 이용하여 변환된 광경로차로부터 파면오차를 계산하게 된다. 이 방법은 EADS Astrium사 등에서 실제 우주용 광학계의 파면오차 계산에 활용되고 있는 방법^[6]으로 해석 결과의 정확성을 보이기 위한 비교대상으로 사용되었다.

4.1. 해양탑재체 스캔 미러

해양탑재체(GOCE; Geostationary Ocean Color Imager)는 2008년말 발사예정인 통신해양기상 위성의 주요 탑재체로 한반도 영안의 해색을 관찰할 예정이다. 스캔 미러는 해양탑재체의 광학부를 이루는 주요 부품중 하나이며, 한반도 연안을 스캔하는데 사용된다.

스캔 미러는 직경이 220mm인 평면 거울이며 SiC(Silicon Carbide)로 이루어져 있다. 대략적인 형상은 그림 4.1과 같다. 미러의 뒷면은 경량화를 위하여 보강 격자구조로 되어 있고 3개의 다리모양의 후미구조를 가지고 있다.

파면오차를 유발시키는 하중조건으로는 x방향으로 1g, y방향으로 1g, z 방향으로 1g의 가속도를 갖는 3가지 경우를 고려하였다.

3.2. 해석 결과

스캔 미러의 광학면 변형해석을 하기위한 유한요소모델은 그림 4.2와 같다. 광학면의 정밀한 변형을 계산하기 위하여, 2차원 근사를 하는 사면체 솔리드 요소인 CTETRA10을 사용하였다.^[12]

x방향으로 1g의 가속도가 작용할 때의 변형형상은 그림 4.3과 같다. 이 변형 형상으로부터 광학면의 변형을 축출하여, 본 논문에서 제안한 이동 최소제곱 근사 알고리즘으로 파면오차를 계산하였고, 계산 결과를 CODE-V를 이용하여 계산한 결과와 비교하였다.

각 하중 경우에 대한 해석결과는 표 4.1과 같다. 이 표의 각 항은 다음과 같은 의미를 갖는다.

ALL : 모든 파면오차에 대한 RMS값

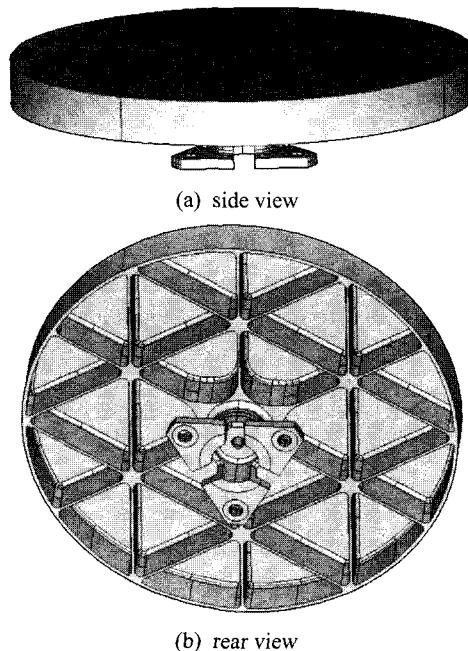


Fig. 4.1 GOCI scan mirror.

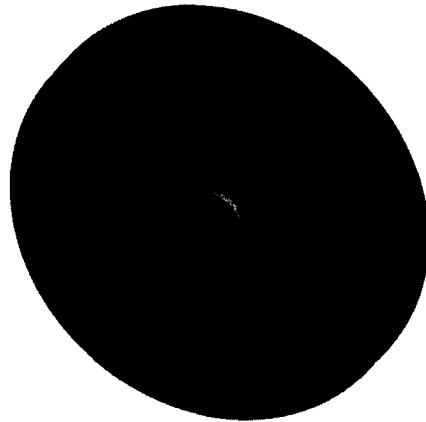


Fig. 4.2 FEM model of scan mirror.

w/o 0 : 피스톤항을 제외한 파면오차의 RMS값

w/o 0,1: 피스톤항과 x-틸트항을 제외한

파면오차의 RMS값

w/o 0,1,2: 피스톤항과 x-틸트, y-틸트항을 제외한

파면오차의 RMS값

해석결과가 CODE-V를 이용해 얻은 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 제안된 방법이 타당한 결과를 준다는 것을 의미한다. 또한 제안된 방법은 파면오차를 구하기 위한 부가적인 격자구성과 같은 처리과정이 단축되는 장점을 가지고 있다.

x방향으로 하중이 작용할 때는 x-틸트항이 커서 Z_1 항을 제거했을 때 파면오차가 줄어들고, y방향으로 하중이 작용할 때는 y-틸트항이 커서 Z_2 항을 제거했을 때 파면오차가 줄어든다. z방향으로 하중이 작용할 때는 x, y-틸트항이 작은 것

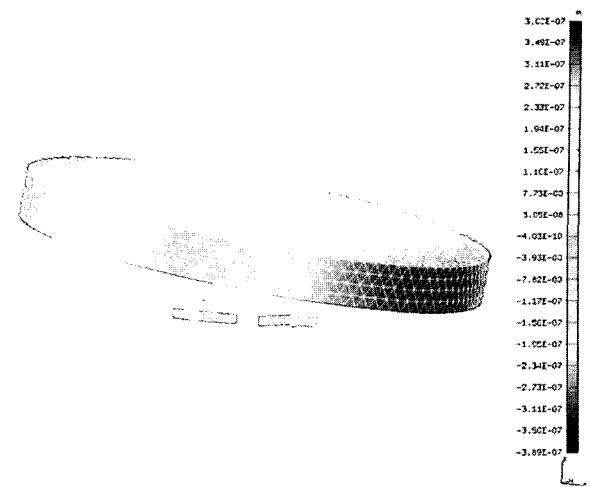


Fig. 4.3 Displacement map under x-direction 1G. (unit: m)

Table 4.1 WFE calculation results of 1G influence with MLS approximation

case		MLS Approx. (RMS)	CODE-V (RMS)
1G - X	ALL	389.3 nm	389.3 nm
	w/o 0	389.3 nm	389.3 nm
	w/o 0,1	0.858 nm	0.9 nm
	w/o 0,1,2	0.845 nm	0.8 nm
1G - Y	ALL	389.3 nm	389.2 nm
	w/o 0	389.3 nm	389.2 nm
	w/o 0,1	389.3 nm	389.2 nm
	w/o 0,1,2	0.843 nm	0.8 nm
1G - Z	ALL	84.94 nm	84.9 nm
	w/o 0	23.82 nm	23.8 nm
	w/o 0,1	23.82 nm	23.8 nm
	w/o 0,1,2	23.82 nm	23.8 nm

을 알 수 있다. 이는 물리적인 의미에서 타당한 결과임을 보여준다.

그림 4.4는 x방향으로 1g의 가속도를 갖는 경우의 파면오차를 나타낸 것이다. x-틸트항을 제거하였을 때 파면오차가 급격히 줄어드는 것을 그림으로 확인할 수 있다.

V. 결 론

우주용 광기계의 경우 경량화 요구조건 때문에 보강재 또는 별집구조 등의 사용으로 구조적으로 복잡해지고 있다. 이러한 광기계의 정밀한 파면오차 해석을 위해서는 불규칙한 배열의 유한요소 사용이 필수적이고 이 결과의 효과적인 근사가 필요하다.

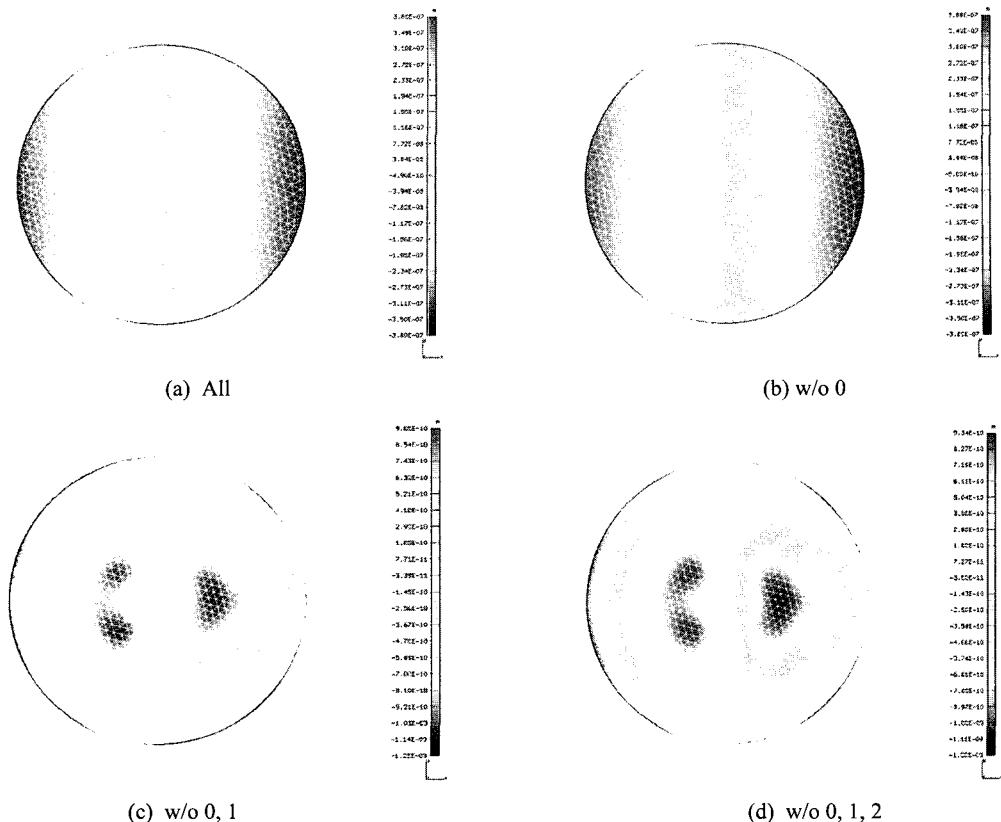


Fig. 4.4 WFE under x-direction 1G. (unit : m)

본 연구에서는 이동 최소제곱 근사법을 이용한 파면오차 계산 방법에 대하여 기술하였다. 이동 최소제곱 근사법은 별도의 격자를 만들 필요없이, 유한요소의 절점 정보만 가지고 광학면의 변형을 효과적으로 근사할 수 있다. 근사된 광경로 차를 광학면에서 적분하여 파면오차를 계산하였다. 정확한 수치적분을 위해 가우스 구적법을 사용하였다. 제안된 방법을 해양탑재체 스캔 미러에 적용하였고, 해석결과의 유용성을 보였다.

참고문헌

- [1] R.E. Fischer and B. Tadic-Galeb, *Optical System Design* (McGraw-Hill, New York, USA, 2000), pp. 49-59.
- [2] T.M. Valente and D. Vukobratovich, "A comparison of the merits of open-back, symmetric sandwich, and contoured back mirrors as light-weighted optics," Proc. of SPIE, vol. 1167, pp. 20-36, 1989.
- [3] M.K. Cho and R.M. Richard, "Structural and optical properties for typical solid mirror shapes," Proc. of SPIE, vol. 1303, pp. 78-95, 1990.
- [4] V.L. Genberg, "Optical surface evaluation," Proc. of SPIE, vol. 0450, pp. 81-87, 1983.
- [5] K.-S. Park, S.-Y. Chang and S.-K. Youn, "Topology

optimization of the primary mirror of a multi-spectral camera," Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 25, pp. 46-53, 2003.

- [6] GOCI Mirror Analysis Report (EADS Astrium, COMS-TN-00111-DP-T-ASTR, 2006).
- [7] P. Lancaster and K. Salkauskas, "Surfaces generated by moving least-squares methods," Mathematics of Computation, vol. 37, pp. 141-158, 1981.
- [8] T. Belytschko, Y.Y. Lu and L. Gu, "Element-free Galerkin method," International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 37, pp. 229-256, 1994.
- [9] J.-H. Yeon and S.-K. Youn, "Meshfree analysis of softening elastoplastic solids using variational multiscale method," International Journal of Solids and Structures, vol. 42, pp. 4030-4057, 2005.
- [10] R.J. Noll, "Zernike polynomials and atmospheric turbulence," Journal of the Optical Society of America, Vol. 66, pp. 207-211, 1976.
- [11] L. Daruis, P. Gonzalez-Vera and F. Marcellan, "Gaussian quadrature formulae on the unit circle," Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 140, pp. 159-183, 2002.
- [12] MSC.NASTRAN 2001 User's Manual (MSC Software, 2002), pp. 727-729.

Wave-Front Error Reconstruction Algorithm Using Moving Least-Squares ApproximationJeoung-Heum Yeon, Gumsil Kang, and Heong Sik Youn[†]*Payload Department, COMS Program Office, Korea Aerospace Research Institute**45 Eoeun-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-333, KOREA*[†]*E-mail: yeon.jheum@gmail.com*

(Received May 26, 2006, Revised manuscript August 14, 2006)

Wave-front error(WFE) is the main parameter that determines the optical performance of the opto-mechanical system. In the development of opto-mechanics, WFE due to the main loading conditions are set to the important specifications. The deformation of the optical surface can be exactly calculated thanks to the evolution of numerical methods such as the finite element method(FEM). To calculate WFE from the deformation results of FEM, another approximation of the optical surface deformation is required. It needs to construct additional grid or element mesh. To construct additional mesh is troublesome and leads to transformation error. In this work, the moving least-squares approximation is used to reconstruct wave front error. It has the advantage of accurate approximation with only nodal data. There is no need to construct additional mesh for approximation. The proposed method is applied to the examples of GOCI scan mirror in various loading conditions. The validity is demonstrated through examples.

OCIS code : 200.4880, 220.4830.