韓國精密工學會 '95年度 秋季學術大會論文集 pp.515~518

면외변위 측정을 위한 홀로그래픽 간섭계의 민감도벡터의 오차해석

Analysis on the error of sensitivity vector of holographic interferometer for measuring out-of-plane displacement.

문 상 준* · 강 영 준 · 백 성 훈 · 김 철 중

Moon, Sang-Joon* · Kang, Young-June · Baik, Sung-Hoon · Kim, Cheol-Jung

(전북대학교 대학원) (전북대학교) (한국원자력연구소) (한국원자력연구소)

ABSTRACT

Holographic interferometry is a useful whole-field nondestructive tesing method for measuring deformations and vibrations of engineering structure. A diverging beam is used as a light source int the most of holographic interferometer practically. For a relatively small object the optical arrangement using a collimated light source has no difficulty in use technically, but for a large object it is difficult to use a collimated beam. In this study we calculate the error of measured displacement from the sensitivity vector dominated by the geometry of optical arrangement for holographic interferometer and show the result obtained with 2-D plots. A Plane surface and a cylindrical surface were chosen as objects to be calculated and computer analysis was carried out for the cases of a diverging beam and a collimated one.

1. 서 론

물체 표면에서 발생된 변위의 전역적인 측정이 가능한 광학적 도구인 홀로그래픽 간섭법은 기계 구조물의 변형 및 진동의 측정에 매우 유용하며 비파괴 검사의 한 방법이 되고 있다. 실용적인 형태로 홀로그래픽 간섭계를 구성시 많은 경우 점광원, 즉 발산빔을 이용하고 있다. 물체가 작은 경우에는 시준빔을 사용하는 광학계의 구성이 큰 문제가 되지 않지만 홀로그래픽 간섭법의 적용 대상의 크기가 커지면서 시준빔을 사용하지 못하고 발산빔을 사용해야만 하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 배경과 더불어 본 연구에서는 면외변위측정을 위한 홀로그래픽 간섭계의 광학적 구조에 지배되는 민감도벡터[1]에 의하여 발생되는 검출변위의 오차를 계산하고, 그 결과를 2차원으로 도시하여 보았다. 그리고 가상적인 측정 대상으로 평면과 원통면을 선정하고 각각의 경우에 있어 발산빔과 시준빔을 적용시킨 경우의 결과를 비교하여 보았다.

2. 원 리

본 연구에서 사용한 홀로그래픽 간섭법은 물체의 표면에 변형의 결과에 해당하는 간섭무늬가 일정한 변위마다의 등고선의 형태로서 관측되는 방법이다. 실시간 홀로그래픽 간섭법의 원리는 다음과 같다.

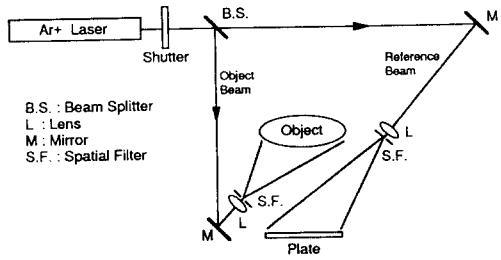


Fig.1 Optical Setup for Holographic Interferometry

Fig.1과 같은 구성을 지니는 광학계에서 물체가 변형되기 전 한번의 노출을 주고 현상 과정을 거쳐 제작된 홀로그램을 제작이 되었던 원래의 위치에 정확히 일치시킨다. 그리고 물체빔과 기준빔을 동시에 조사시킨다. 만일 이 물체에 변형이 일어나게 되면 변형된 물체의 파면(wavefront)이 홀로그램에 의하여 재생된 파면과 간섭을 일으키게 되어 실시간으로 그 물체의 변형을 나타내는 간섭무늬를 만들어 낸다. 즉 홀로그램에 기록된 물체의 상과 실제의 물체의 상이 간섭을 일으키게 되는 방법이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

물체가 변형하기 전의 상을 기록한 홀로그램을 표현하면 다음과 같다.

$$I(x,y)=|R(x,y)+S(x,y)|^2 \qquad (1)$$

위의 식(1)에서 S는 변형을 가하기 전의 물체빔을 의미하고, R은 기준빔 그리고 I는 사진건판에서의 빛의 강도이다.

$$t(x,y)=t_0+\beta TI(x,y) \qquad (2)$$

t(x,y)는 노출과 현상 과정을 거쳐 제작된 홀로그램의 진폭투과율로서 실시간 간섭법에서는 변형이 되기 전의 물체의 상이 기록된 홀로그램을 의미한다. 여기서 β는 사진건판의 노출특성에 따르는 상수이고, t_0는 노출이 없는 필름을 현상했을 경우의 진폭투과율에 해당하는 상수이며 T는 노출시간이다. 제작된 홀로그램을 노출이 되었던 원래의 위치에 고정시키고 물체빔과 기준빔이 홀로그램에 조사되도록 하면, 변형이 되는 물체로부터 반사되는 빛인 물체빔 S'과 기준빔 R이 사진건판을 투과한다. 그리고 이때 형성되는 파면은 u(x,y)이다.

$$u(x,y)=[\ S'(x,y)+R(x,y)]\ t(x,y) \qquad (3)$$

위의 식(3)에 의하여, 원래의 기록된 물체의 상과 실제 놓여있는 물체의 상이 간섭무늬를 형성하게 되고 이를 관찰 대상이 되는 간섭무늬의 항에 대하여 정리하면 식(4)와 같다.

$$u'(x,y)=\beta TR^2S(x,y)+(t_0+\beta TR^2)S'(x,y) \qquad (4)$$

최종적인 빛의 강도분포는 다음과 같다. 즉 간섭무늬의 명암은 코사인함수형태의 진폭으로 나타나게 된다.

$$\begin{aligned}I'(x,y) &= |S(x,y)|^2\{\beta^2T^2R^4+(t_0+\beta TR^2)^2 \\ &\quad +2\beta TR^2(t_0+\beta TR^2)\cos[\ \phi'(x,y)-\phi(x,y)]\ \}\end{aligned} \qquad (5)$$

식(5)에 의하여 코사인함수의 진폭을 가지는 간섭무늬의 형태로 가시화 되는 변위의 방향은 광학계 구성시 물체빔의 조사각도와 거리, 관측위치 그리고 광원의 종류에 따라 달라지게 되는데 이 변위의 방향을 표시하는 벡터가 바로 민감도벡터가 된다. 광학계의 구성형태에 의존하는 민감도벡터는 다음과 같이 결정된다.[2)]

Fig.2에서 S는 광원의 위치이고 O는 관측점이다. 이때 변형에 의하여 물체의 한점 P가 P'로 이동되었을 경우 광경로는 SP+PO에서 SP'+P'O로 변화된다. SP, SP',그리고 SO를 각각 벡터 $\overrightarrow{A_1}$, $\overrightarrow{A_2}$ 그리고 $\overrightarrow{A_3}$로 나타내면 PO와 P'O는 $\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_1}$, $\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_2}$로 표현할 수 있다. 그리고 단위벡터 $\overrightarrow{U_1}$, $\overrightarrow{U_2}$, $\overrightarrow{U_3}$, $\overrightarrow{U_4}$를 도입하여 각각 $\overrightarrow{A_1}$, $\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_1}$, $\overrightarrow{A_2}$, $\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_2}$에 내적하면 SP, SP', PO, P'O의 길이를 나타낼 수 있다. 광경로 SPO와 SP'O의 위상을 각각 ϕ_1, ϕ_2라 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda}(|\overline{SP}|+|\overline{PO}|) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}[\ \overrightarrow{U_1}\cdot\overrightarrow{A_1}+\overrightarrow{U_2}\cdot(\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_1})]\end{aligned} \qquad (6)$$

$$\begin{aligned}\phi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda}(|\overline{SP'}|+|\overline{P'O}|) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}[\ \overrightarrow{U_3}\cdot\overrightarrow{A_2}+\overrightarrow{U_4}\cdot(\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_2})] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}[\ (\overrightarrow{U_1}+\Delta\overrightarrow{U_1})\cdot\overrightarrow{A_2}+ \\ &\qquad (\overrightarrow{U_2}+\Delta\overrightarrow{U_2})\cdot(\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_2})]\end{aligned} \qquad (7)$$

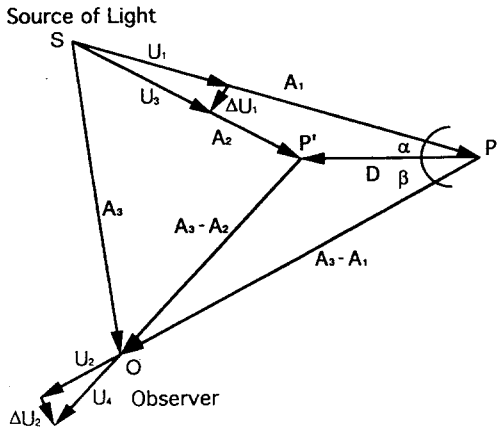


Fig.2 Determination of Sensitivity Vector

여기서 λ는 가간섭광원으로 사용된 레이저의 파장을 나타낸다. 광경로가 물체의 변형으로 인하여 SPO에서 SP'O로 변경되었을 경우의 위상차 $\phi_1-\phi_2$를 δ라 하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}\delta &= \phi_1-\phi_2 \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}[\ (\overrightarrow{U_1}-\overrightarrow{U_2})\cdot(\overrightarrow{A_1}-\overrightarrow{A_2})- \\ &\quad \Delta\overrightarrow{U_1}\cdot\overrightarrow{A_2}-\Delta\overrightarrow{U_2}\cdot(\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_2})]\end{aligned} \qquad (8)$$

이때 물체의 변위가 아주 작다면 $\Delta\overrightarrow{U_1}\cdot\overrightarrow{A_2}=0$, 그리고 $\Delta\overrightarrow{U_2}\cdot(\overrightarrow{A_3}-\overrightarrow{A_2})=0$이라 놓을 수 있으므로 식(8)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{2\pi}{\lambda}[\ (\overrightarrow{U_1}-\overrightarrow{U_2})\cdot(\overrightarrow{A_1}-\overrightarrow{A_2})] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}(\overrightarrow{U_1}-\overrightarrow{U_2})\cdot\overrightarrow{D}\end{aligned} \qquad (9)$$

여기서 $\vec{D}$는 변위벡터를 의미하고, $\vec{U_1}-\vec{U_2}$는 민감도벡터로서 검출되는 변위의 방향을 의미한다. 변위는 2π의 위상차에 의한 간섭무늬의 갯수로써 결정이 되므로 δ를 $2\pi n$이라 놓으면 간섭무늬 갯수에 대한 변위가 다음과 같은 식으로 정리된다. 여기서 n은 간섭무늬의 차수를 의미한다.

$$n\lambda = (\vec{U_1}-\vec{U_2})\cdot\vec{D} \qquad (n=0,1,2,\ldots) \tag{10}$$

식(10)은 3차원 공간상의 벡터로 표현된 식이므로 해를 구하기 위해서는 3개의 식이 필요하게 되지만 광학계를 구성할 때 α와 β를 0° 로하고, 측정하려는 변위를 PO의 방향과 일치시켜 면외(out-of-plane)변위, 즉 관측 방향과 평행한 변위에 대해 민감한 광학계를 구성한다면 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} d &= n\lambda/(\cos\alpha+\cos\beta) \\ &= n\lambda/(1+1) \\ &= n\lambda/2 \qquad (n=0,1,2,\ldots) \end{aligned} \tag{11}$$

식(11)는 일반적으로 면외변위를 측정하는 광학계에서 얻을 수 있는 간섭무늬의 차수로부터 대략적으로 발생된 변위를 계산할 수 있는 수식이다. 실제 광학계는 관측점의 제한과 발산빔의 영향에 의한 오차를 필연적으로 내포하게 된다. 이러한 오차를 각각 평판과 원통형에서의 오차 분포로서 살펴보고, 시준빔과 발산빔의 차이를 비교하여 본다.

Fig.3과 같은 평판의 경우 오차의 계산은 다음과 같이 이루어진다.

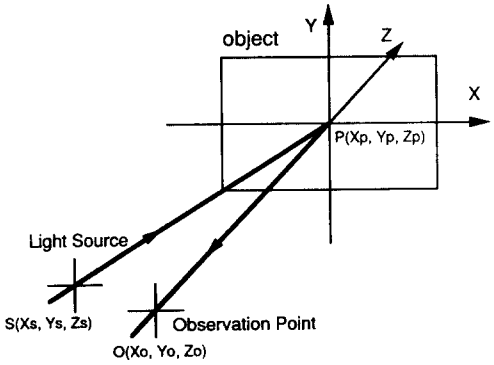


Fig.3 Optical Arrangement for Plane Surface

Fig.3의 평판에서의 한 점 P가 Z축방향에 평행한 일정 크기의 변위 ΔZ_1가 발생함에 따라 Fig. 2에서와 같이 P'로 이동하였다고 가정하자. 물체가 변형이 되기 전의 광경로를 PL이라 하고 변형이 된 후의 광경로를 PL'라 하면 광경로차 d_{opl}은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{opl} &= PL - PL' \\ &= (|\overline{SP}|+|\overline{PO}|)-(|\overline{SP'}|+|\overline{P'O}|) \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 $|\overline{SP}|$, $|\overline{PO}|$, $|\overline{SP'}|$, $|\overline{P'O}|$는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$|\overline{SP}| = \sqrt{(X_p-X_s)^2+(Y_p-Y_s)^2+(Z_p-Z_s)^2} \tag{13}$$

$$|\overline{PO}| = \sqrt{(X_p-X_o)^2+(Y_p-Y_o)^2+(Z_p-Z_o)^2} \tag{14}$$

$$|\overline{SP'}| = \sqrt{(X_p-X_s)^2+(Y_p-Y_s)^2+(Z_p-\Delta Z_1-Z_s)^2} \tag{15}$$

$$|\overline{P'O}| = \sqrt{(X_p-X_o)^2+(Y_p-Y_o)^2+(Z_p-\Delta Z_1-Z_o)^2} \tag{16}$$

발생된 변위 ΔZ_1에 대한 홀로그래픽 간섭계로써 구해진 변위 d_{opl}의 오차는 다음과 같다.

$$error = |(\Delta Z_1 - d_{opl})/\Delta Z_1| \tag{17}$$

Fig.4와 같은 원통면에서의 변형을 고려하면, 평면에서와 달리 관찰면의 기하학적인 구조에 의한 영향이 고려되어야 한다.

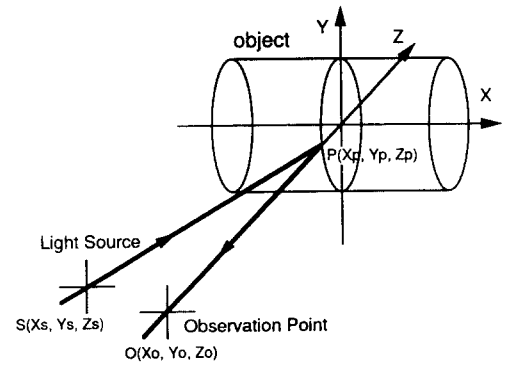


Fig.4 Optical Arrangement for Cylindrical Surface

관찰의 대상이 되는 한 점의 Z축상의 위치는 Y축에 따라 변하게 된다. 원통면의 반지름을 r이라 하고 Y축을 따라 변하게 되는 Z축상의 상대적인 변위를 ΔZ_2라 하면 ΔZ_2는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta Z_2 = \sqrt{r^2 - Y_p^2} \tag{18}$$

그리고 $|\overline{SP}|$, $|\overline{PO}|$, $|\overline{SP'}|$, $|\overline{P'O}|$는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$|\overline{SP}| = \sqrt{(X_p-X_s)^2+(Y_p-Y_s)^2+(Z_p-\Delta Z_2-Z_s)^2} \tag{19}$$

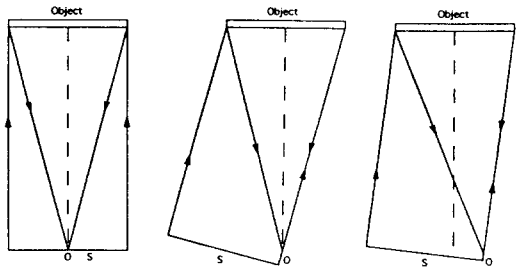
$$|\overline{PO}| = \sqrt{(X_p - X_o)^2 + (Y_p - Y_o)^2 + (Z_p - \Delta Z_2 - Z_o)^2} \quad (20)$$

$$|\overline{SP'}| = \sqrt{(X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2 + (Z_p - \Delta Z_1 - \Delta Z_2 - Z_s)^2} \quad (21)$$

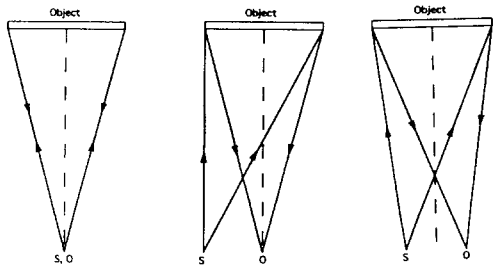
$$|\overline{P'O}| = \sqrt{(X_p - X_o)^2 + (Y_p - Y_o)^2 + (Z_p - \Delta Z_1 - \Delta Z_2 - Z_o)^2} \quad (22)$$

식(19),(20),(21),(22)를 식(12)에 대입하고 그 결과를 식(17)에 적용하면 원통면에서의 오차를 계산할 수 있다.

발산빔과 시준빔의 차이를 계산해보기 위하여 광학계의 구성을 다음의 Fig.5, 6과 같이 정하였다.



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

Fig.6 Optical Arrangement using Diverging Beam

Fig.5(a)와 Fig.6(a)는 광원의 위치와 관측점의 위치가 동일한 경우의 광학계를 나타낸다. Fig.5(b)와 Fig.6(b)의 경우에는 관측점과 물체의 중심이 Z축상에 존재하고 있고 광원의 위치는 실제 구성되는 광학계의 경우에서처럼 관측점의 좌측에 위치시킨 구성이다. Fig.5(c)와 Fig.6(c)는 관측점과 광원의 중간 위치와 물체의 중심을 일치시킨 형태의 광학계를 나타낸다. 본 연구에서는 평판의 경우 시준빔과 발산빔의 조건에 대하여 오차 분포를 계산하였으며 원통면의 경우에는 발산빔에 대해서만 그 결과를 살펴보았다. 민감도벡터에 의한 오차 분포를 계산하기 위하여 Fig.7과 같이 실제 구성된 광학계를 기준으로 Table 1과 같은 조건을 입력하고 컴퓨터를 이용하여 결과를 계산하였다.

Table 1. Specification of Optical Arrangement

Distance	1.2 m
Incident Angle	7°
Object Width	0.3 m

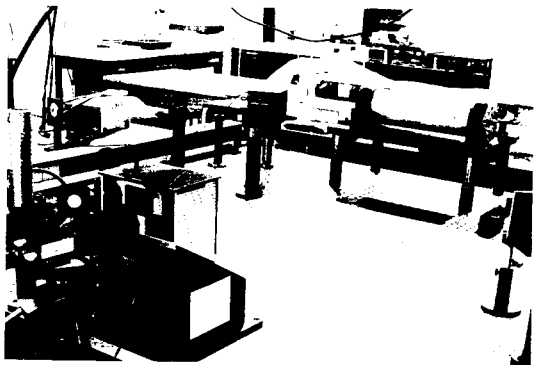
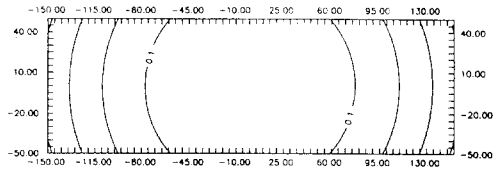
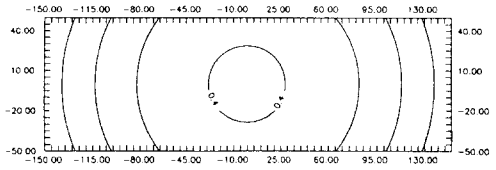


Fig.7 Photograph of Optical Arrangement

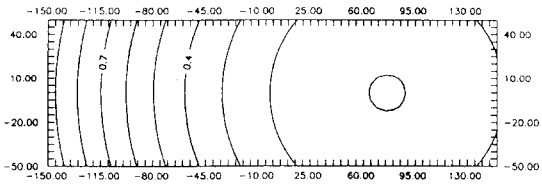
3. 결 과



(a) Case 1 : Fig.5(a)

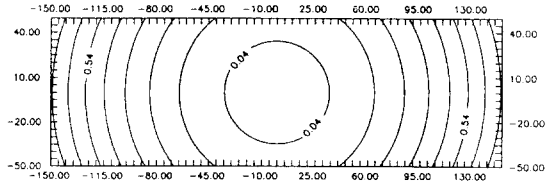


(b) Case 2 : Fig.5(b)

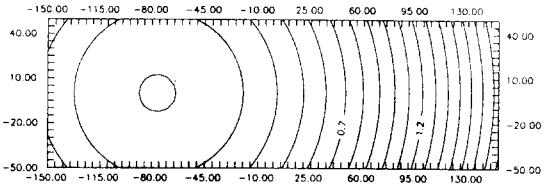


(c) Case 3 : Fig.5(c)

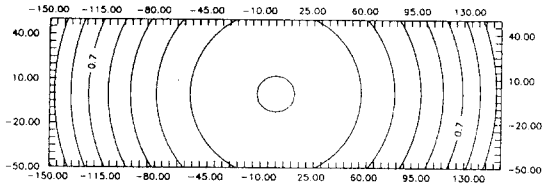
Fig.8 Plane Surface, Collimated Beam



(a) Case 1 : Fig.6(a)

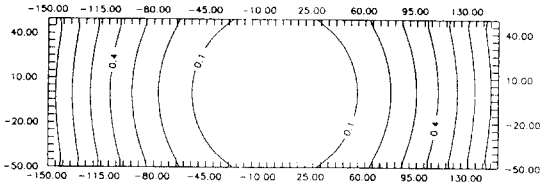


(b) Case 2 : Fig.6(b)

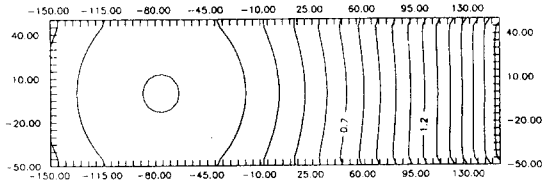


(c) Case 3 : Fig.6(c)

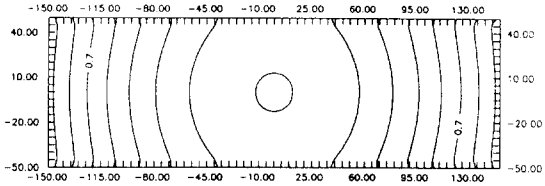
Fig.9 Plane Surface, Diverging Beam



(a) Case 1 : Fig.6(a)



(b) Case 2 : Fig.6(b)



(c) Case 3 : Fig.6(c)

Fig.10 Cylindrical Surface, Diverging Beam

Fig.8(a)는 Fig.5(a)와 같이 구성된 광학계에서 평판을 대상으로 한 오차 분포이다. 시준빔을 사용하더라도 관측점이 세한되어 있으므로 오차는 필연적으로 수반된다. 계산된 모든 조건 중 가장 오차가 적은 결과로서 오차 분포는 좌우가 대칭적이고 최대 오차는 0.37%정도이다. Fig.8(b)는 Fig.5(b)의 광학계에서의 결과이다. 오차의 분포는 대칭적이고 최대 오차는 0.75%정도임을 알 수 있다. Fig.8(c)는 Fig.5(c)의 결과로서 오차 분포는 대칭적이지 않은 형태를 보이고 있고 최대 오차는 좌단에서 0.95%정도이다. Fig.9(a)는 Fig.6(a)의 결과로서 발산빔을 광원으로 사용하고 있으며 오차 분포는 대칭적이고 최대 오차는 0.75%정도이다. Fig.9(b)는 Fig.6(b)의 결과로서 일반적으로 많이 구성되는 광학계에서의 오차분포이다. 오차 분포는 대칭적이지 않고 최대 오차는 우단에서 1.86%정도이다. Fig.9(c)는 Fig.6(c)와 같은 구성으로 광원과 관측점사이로 물체의 중심을 맞춘 경우의 오차 분포로서 좌우가 대칭적이고 최대 오차는 0.85%정도이다. Fig.10(a),(b),(c)는 Fig.9(a),(b),(c)와 동일한 광학계이지만 측정 대상이 원통면이다. 오차의 분포와 최대 오차는 평면에 대한 결과와 비슷한 정도이며, 평면과의 차이점은 상단과 하단에서 오차의 분포 양상이 다르다는 점이다. 이는 원통면의 기하학적 형상으로 인한 차이임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 홀로그래픽 간섭계가 면외변위를 측정하기 위한 형태로 구성되었을 때 민감도벡터에 의하여 내포하게 되는 오차를 계산하여 보았다. 시준빔을 사용하는 경우는 발산빔을 사용하는 경우보다 오차가 적은 결과를 보였고 실용적으로 구성할 수 있는 Fig.5(b)의 광학계의 경우 최대 오차는 약 0.75%정도 였다. 발산빔을 사용하는 경우는 시준빔을 사용하는 경우보다 더 큰 오차를 지니고 있었으며 일반적으로 구성하는 형태인 Fig.6(b)의 광학계에서는 1.86%정도의 최대 오차를 보였는데, 이를 보완한 광학계의 형태인 Fig.6(c)의 경우에는 좌우의 오차 분포가 이동되어 대칭이 되는 관계로

0.85%정도의 최대 오차를 보이게 되었다. 따라서 발산빔을 사용하는 정밀한 면외변위측정을 위한 홀로그래픽 간섭계 구성시 Fig.6(c)의 형태로 구성하는 것이 오차를 줄여 주는 방법이 될 수 있음을 알 수 있었다. 본 해석의 대상이 되었던 형태의 광학계는 실용상 오차의 보정이 필요 없는 정도의 수준인 1.86%정도의 최대 오차를 지니는 것으로 판정되었으며, 본 연구에서 사용된 절차를 이용하여 검사대상의 크기와 광학계의 구성 형태에 대하여 오차의 분포를 계산할 수 있으며 필요에 따라 결과를 보정해 줄 수 있는 도구로서 이용 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 홍석경, 백성훈, 조재완, 김철중, "ESPI 입사광의 기하구조에 따른 Sensitivity Vector 분석", 한국광학회지 제5권 제3호, pp.379-385, 1994

2. 강영준, 문상준, "홀로그래픽 간섭법을 이용한 미소변형 측정법", 한국정밀공학회지 제12권 제9호, pp.52-58, 1995