

ESPI를 이용한 안경용 렌즈의 열변형 측정

Thermal Deformation Measurement Spherical Glasses Lens Using ESPI

김경석*, 장호섭**, 김현민***, 양승필****†

Koung-Suk Kim*, Ho-Sub Jang**, Hyun-Min Kim*** and Seung-Pill Yang****†

초 록 안경용 구면 렌즈는 굴절력에 따라 (+)디옵터와 (-)디옵터 렌즈로 구분할 수 있다. 렌즈에 가해지는 외부 열원에 의해서 생기는 열변형은 디옵터의 종류에 따라 다르게 나타난다. 본 논문에서는 빛의 간섭성을 이용하여 물체의 변형을 비접촉으로 정확하게 측정할 수 있는 전자처리 스페클법을 이용하여 렌즈에 발생하는 열변형을 정량적으로 측정하였다. 외부 열원에 의한 온도 분포의 측정은 실시간 비접촉으로 온도를 측정할 수 있는 적외선 열화상 카메라를 사용하였다. 실험은 총 14종의 플라스틱 상용 안경 렌즈를 대상으로 수행하였다. 동일한 온도차에서 (+)디옵터 렌즈의 경우에는 디옵터의 증가에 따라서 열변형량이 증가하였다. 반면에 (-)디옵터 렌즈는 디옵터의 증가와 관계없이 열변형량이 거의 선형적이었다. 또한 동일한 디옵터에서 (+)디옵터 렌즈의 열변형량이 (-)디옵터 렌즈의 열변형량 보다 작았다. 따라서 본 논문에서는 렌즈에 열이 가해지는 경우 렌즈의 열변형량을 정량적으로 측정할 수 있음을 확인하였다.

주요용어: ESPI, 위상지도, 열변형, 안경용 구면렌즈

Abstract The spherical glasses lenses are typically classified into two groups such as (+) diopter lens and (-) diopter lens by the refractive power index. The thermal deformation of a lens is occurred by external heat source and is changed respected to the diopter of a lens. In this paper, the thermal deformation of spherical glasses lenses were quantitatively measured by using ESPI (electronic speckle pattern interferometry) which has an advantage that the non-contact, non-destructive and precise deformation measurement is available due to the coherency characteristic. The temperature changes were measured by IR camera. It makes experiments over 14 types of the plastic glasses lenses. From the results, it was confirmed that the larger diopter lens showed the less thermal deformation in case of the (+) diopter lens. On the other hand, the thermal deformation of the (-) diopter lens was measured with uniform pattern when the same temperature changes were applied. Also, it was found that the thermal deformation of the (+) diopter lens is less than that of the (-) diopter lens. Therefore, it is expected that when the thermal deformation is occurred to the various types of the lens, the variation of the focal length caused by the thermal distortion of a lens would be measured quantitatively.

Keywords: ESPI, Phase Map, Thermal Deformation, Spherical Glasses Lens

1. 서 론

일반적으로 열에 의한 변형을 측정하는 계측 방법은 다양한 방법들이 제시되어 있다[1,2]. 재료의

열변형 측정에는 스트레인게이지, 모아레기법 등이 주로 이용되고 있다. 그러나 스트레인게이지법은 온도, 변형량, 피로, 환경 등에 의해 사용이 제한적이다. 또한 모아레기법은 측정 대상체의 표면에 격

자를 그려 넣어야 하는 등의 사전적 준비가 필요하며 온도가 높아지면 격자가 산화되는 문제점이 있다. 최근에는 이러한 변형측정 기법들의 한계를 극복하기 위해 스페클 기법과 같은 광학적 측정법을 주로 이용하고 있다.

스페클 기법은 비접촉, 비파괴적인 변형 및 결함의 정량화가 가능하다. 특히 전자처리 스페클간섭법(electronic speckle pattern interferometry: ESPI)은 3000°C 이상의 초고온 가열 환경에서도 적용 가능성이 확인되었으며, 전단간섭계 또한 고온에서 열에 의한 변형 측정이 가능하였다[3].

본 연구에서는 ESPI의 면외 변형을 이용하여 (+), (-)구면렌즈에 대하여 외부의 온도변화에 대한 열변형을 정량적으로 측정하고 디오퍼에 따른 상관관계를 파악하고자 하였으며, 또한 대상물의 형상에 따른 온도분포를 분석하고자 한다.

2. 원리 및 이론

ESPI는 광원인 레이저의 우수한 성질인 집속성과 가간섭성을 이용하여 광학 간섭계를 구성하여 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)을 합성시킴으로서 물체의 변위량에 따라 발생하는 간섭 줄무늬를 해석하는 방법이다[4].

레이저의 우수한 가간섭성으로 인하여 대상물의 표면이 레이저의 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 레이저가 조사될 경우 물체 표면에서 난반사가 일어나고, 이 난반사된 빛들이 서로 겹치면서 간섭 현상이 발생한다. 이때 물체의 표면에 검고 흰 반점과 같은 형상이 형성되는데 이것을 스페클이라고 한다. 이러한 스페클은 물체의 표면에서의 휘도 분포를 나타내며, 물체의 변위에 대한 중요한 위상정보를 갖게 된다. 그 위상은 CCD 카메라와 화상처리장치를 통해 변위 정보로 바뀌게 된다.

Fig. 1은 면외변위 측정을 위한 ESPI 간섭계를 나타내고 있다. 광원으로부터 나온 빛은 빔분할기 (beam splitter) B.S.1에 의해서 CCD 카메라에 직접 입사되는 참조빔과 대상체에 조사되어 반사된 빔이 CCD 카메라에 입사되는 물체빔으로 각각 나누어진다. 두 개의 빔은 카메라 앞에서 간섭을 일으키고 간섭된 이미지가 CCD 수광소자에 결상된다. 식(1)은 CCD 카메라의 수광소자에 기록되는 변형 전(I_{before})과 변형 후(I_{after}) 간섭이미지의 밝기분포이다.

$$I_{before} = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos \phi \quad (1)$$

$$I_{after} = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi + \Delta\phi)$$

여기서 I_R 과 I_O 는 참조 빔과 물체 빔의 강도이며, ϕ 는 물체빔과 참조빔의 초기위상, $\Delta\phi$ 는 물체의 변형에 의해 발생한 위상변화이다.

ESPI에서는 밝기분포를 감산처리 함으로써 식(2)를 얻게 된다[5,6].

$$I = I_{after} - I_{before} = 2\sqrt{I_R I_O} [\cos(\phi + \Delta\phi) - \cos \phi] \quad (2)$$

ESPI의 면외변형 측정 원리는 확산된 물체빔이 대상체에 조사될 때 임의의 변형이 대상체에 발생하면, 대상체의 임의의 한 점은 변형에 의해 다른 한 점으로 이동하게 되고, 이때 발생하는 물체빔의 광 경로차는 식 (3)으로 나타낼 수 있으며, 이를 다시 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o + n_s) d \quad (3)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\theta_o + \cos\theta_s) d \quad (4)$$

$\Delta\phi$ 는 변형에 의한 위상변화이고, λ 는 레이저의 파장, n_o 는 조사방향벡터, n_s 는 관측방향벡터, d 는 레이저가 조사된 대상물의 임의의 점에서의 변형, θ_o 는 대상물의 표면과 물체빔의 조사방향이 이루는 입사각, θ_s 는 대상물의 표면과 관측방향이 이루는 관측각 이다.

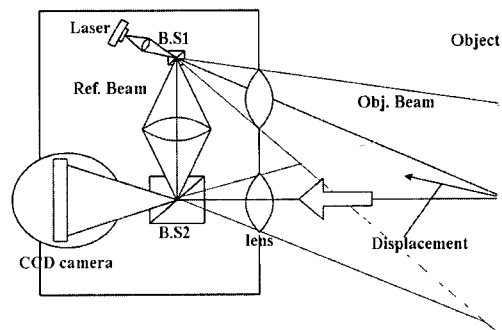


Fig. 1 Interferometer for out-of-plane displacement measurement

관측방향이 대상물의 표면과 수직하다고 하면, $\cos\theta_s = 1$ 이 되므로, 식 (4)는 식 (5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(1 + \cos\theta_o)d \quad (5)$$

따라서 식 (5)를 이용하면 대상물에 발생한 변형을 구할 수 있다.

3. 시험장치 및 시험편

본 연구에서는 독일 Ettemeyer사의 3D-ESPI 상용 시스템(Q-300)을 이용하였으며, 최대 출력이 2 W, 파장이 532 nm인 Coherent사의 Nd:YAG 레이저(Verdi)와, 분해능이 0.02°C인 Cedic사의 상용 열화상 카메라(JADE J550M)를 사용하였다. 또한 대상물에 열을 전도시키기 위해서 열관로를 Fig. 2와 같이 제작하였으며, 열원은 300°C까지 가열 가능한 Bosch사의 가열기(GHG 630 DCE Heat gun)를 사용하였다.

대상물의 정확한 고정을 위해 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 치그 A를 제작하고 지그에 고정용 홀더 B를 이용하여 렌즈를 고정하였으며, C부분을 광학 정반에 고정시켰다. 실험대상 렌즈는 H사의 굴절률 1.5인 상용 렌즈로 하였으며, 재질은 플라스틱이다. Table 1에 실험대상 렌즈의 종류를 나타냈으며, 직경은 70 mm로 모두 같다. Fig. 4는 렌즈

의 종류별 형상을 보여준다.

외부의 열원에 따른 정확한 열변형을 측정하기 위해서 열원을 렌즈의 후면에 배치하였으며, 전체적인 시스템의 구성도는 Fig. 5와 같다.

총 14종의 렌즈에 대하여 열원을 이용하여 각각의 대상물을 27°C까지 가열 후 대상물의 중앙부의 온도가 26.50°C와 26.70°C로 각각 냉각될 때 열변형량을 측정 하였다. 이때의 온도 변화는 상용 열화상 카메라를 이용하여 실시간으로 측정 하였으며, 대상물의 종류에 따른 온도 변화 또한 측정하였다. 본 실험에 있어서 가열전 대상물의 온도는 22°C, 실온의 온도는 23°C의 일정한 조건에서 모든 실험이 진행되었다.

Table 1 Specification of glasses lens

Diopter	T(mm)	Diopter	T(mm)
+3.50	5.8	-0.50	2
+3.00	5.1	-1.00	2
+2.50	4.5	-1.50	2
+2.00	4.2	-2.00	2
+1.50	3.5	-2.50	2
+1.00	3.1	-3.00	2
+0.50	2.4	-4.00	2

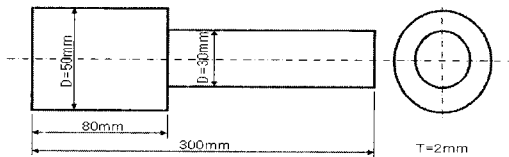


Fig. 2 Heat pipe

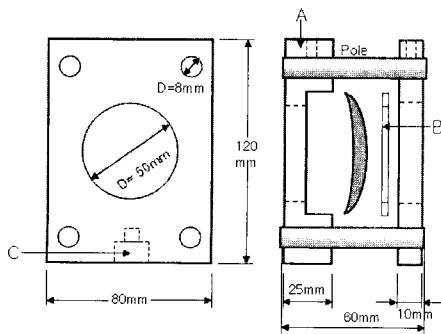


Fig. 3 Jig & fixture

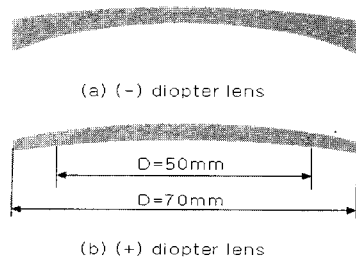


Fig. 4 Lens shape

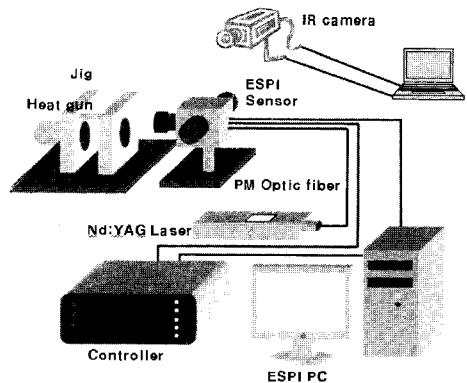


Fig. 5 Thermal deformation measuring system using ESPI and IR camera

4. 실험결과 및 고찰

4.1. (+) Lens

Table 2에 나타난 위상지도는 Table 1의 (+)디옵터 렌즈들의 중앙부가 초기온도 27°C에서 26.7°C로 냉각되었을 때의 온도변화에 의한 결과이다. Table 2의 위상지도에서 중앙부에 대한 가로 방향의 프로파일을 구하여 (+) 렌즈의 열변형량은 Fig. 6에 나타냈다.

Table 3에 나타난 위상지도는 Table 1의 (+)디옵터 렌즈들의 중앙부가 초기온도 27°C에서 26.5°C로 변화되었을 때의 온도변화에 의한 열변형의 결과이다.

Table 3의 위상지도에서 중앙부에 대한 가로 방향의 프로파일을 구하여 (+) 렌즈의 열변형량을 표현하면 Fig. 7과 같다.

이상의 실험에서 냉각시에 중앙부의 온도변화가 0.3°C 일 경우에는 디옵터의 증가에 따라서 열변형

Table 2 Phase map related to diopter of (+) lens when $\Delta t=0.3^\circ\text{C}$

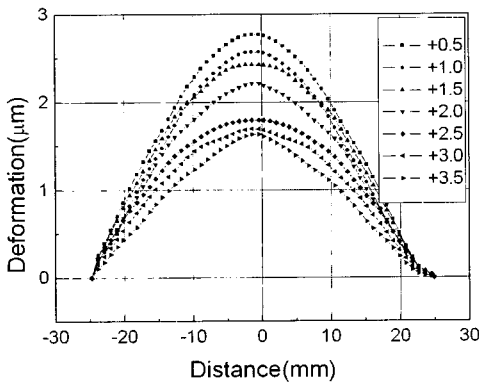
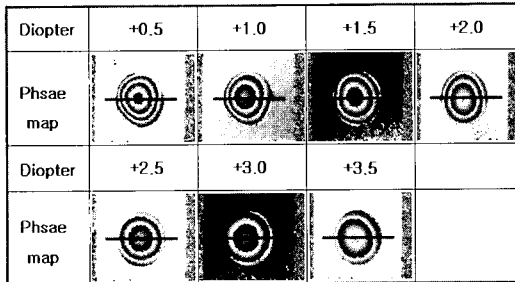


Fig. 6 Deformation distribution of (+) diopter lens when $\Delta t=0.3^\circ\text{C}$

량이 감소하였다. 이는 디옵터 증가에 따른 중앙부 두께의 증가에 의한 것이다. 이와 마찬가지로 냉각에 의한 중앙부의 온도변화가 0.5°C 일 경우도 두께에 따른 열변형량이 감소한다.

Fig. 8은 중앙부 온도 변화에 따른 최대열변형량을 표시한 것이며, 디옵터의 증가에 따라서 열변형량이 비례적으로 감소함을 확인할 수 있었다.

Table 3 Phase map related to diopter of (+) lens when $\Delta t=0.5^\circ\text{C}$

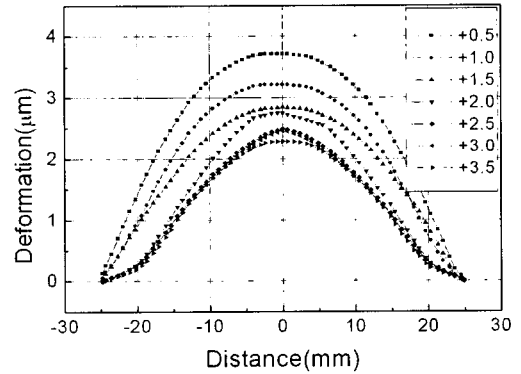
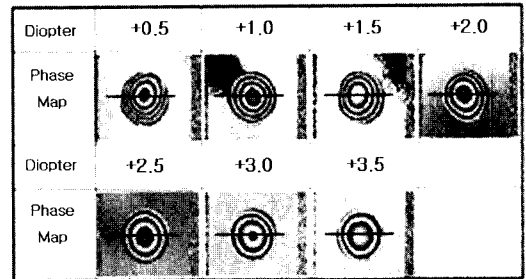


Fig. 7 Deformation distribution of (+) diopter lens when $\Delta t=0.5^\circ\text{C}$

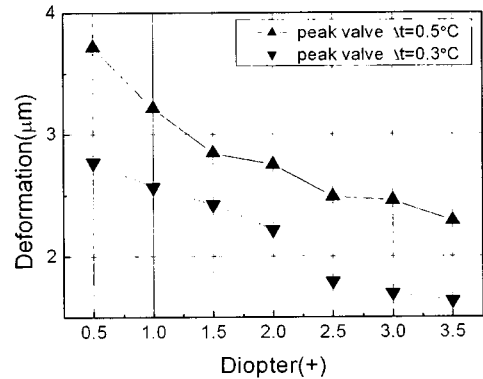


Fig. 8 Deformation comparison, between maximum values of (+) diopter lens according to Δt

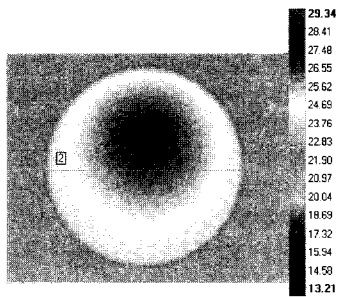
Fig. 9는 대상물의 중앙부의 온도가 27°C에서 26.5°C로 냉각될 때의 온도 분포를 보여준다. 이와 같은 온도의 분포는 열변형량의 그래프와 유사하다. 또한 중앙부가 두껍기 때문에 주위의 온도와 비교하면 쉽게 냉각되지 않는 것을 알 수 있었다.

4.2. (-) Lens

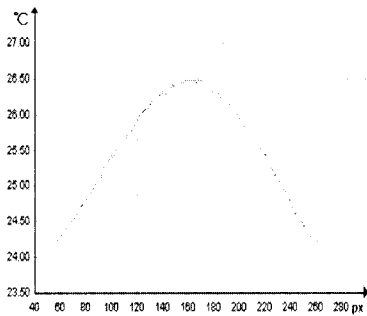
Table 4에 나타난 위상지도는 Table 1에 나타난 (-)디옵터 렌즈들의 중앙부가 초기온도 27°C에서 26.7°C로 냉각되었을 때의 온도변화에 의한 열변형의 결과이다.

Table 4의 위상지도에서 중앙부에 대한 가로 방향의 프로파일을 구하여 (-) 렌즈의 열변형량을 표현하면 Fig. 10 과 같다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 (-)디옵터 렌즈의 경우 외부에서 가열시 냉각에 의해 온도변화가 일어나며, 전체적인 열변형은 디옵터에 의한 영향을 매우 적게 받는다. 이와 같은 사실은 중앙부의 두께가 일정하기 때문에 열변형의 차이가 상대적으로 작기 때문이다.



(a)



(b)

Fig. 9 Temperature change of (+) diopter lens (a) temperature change image, (b) temperature change profile along the center line

Table 5에 나타난 위상지도(phase map)는 Table 1에 나타난 (-)디옵터 렌즈중앙부의 초기온도가 27°C에서 26.7°C로 냉각되었을 때의 온도변화에 의한 결과이다.

Table 5의 위상지도에 중앙부에 대한 가로 방향의 프로파일을 구하여 (-) 렌즈의 열변형량을 표현하면 Fig. 11과 같다.

Fig. 10과 유사하게 Fig. 11에서는 디옵터의 변화에 따른 렌즈의 열변형의 분포가 일정하게 나타났다.

Table 4 Phase map related to diopter of (-) lens when $\Delta t=0.3^\circ\text{C}$

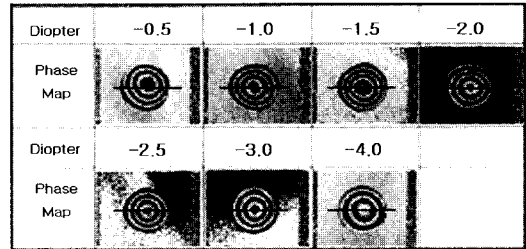


Table 5 Phase map related to diopter of (-) lens when $\Delta t=0.3^\circ\text{C}$

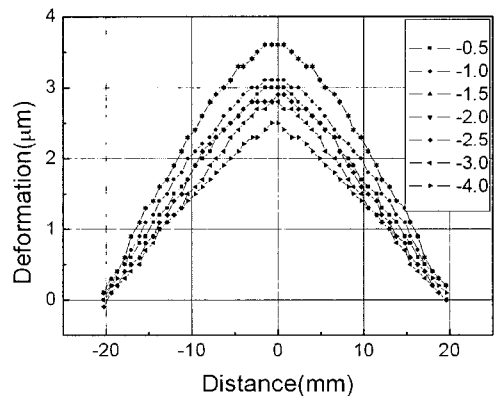
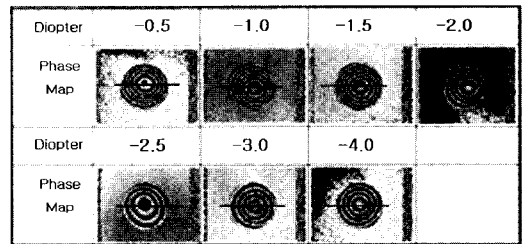


Fig. 10 Deformation distribution of (-) diopter lens when $\Delta t=0.3^\circ\text{C}$

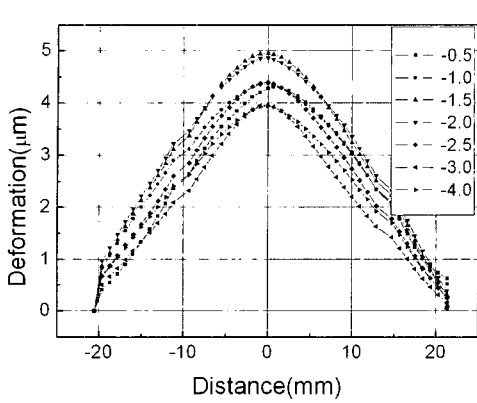


Fig. 11 Deformation distribution of (-) diopter lens when $\Delta t=0.5^\circ\text{C}$

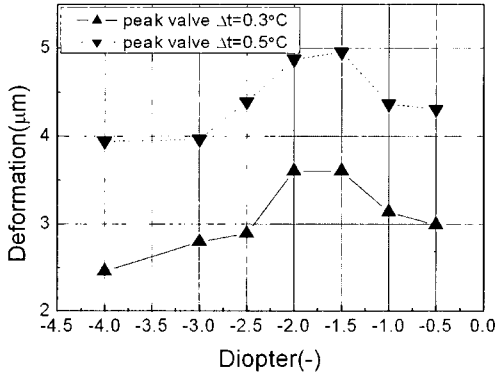


Fig. 12 Deformation comparison, between maximum values of (-) diopter lens according to Δt

이는 대체적으로 중앙부가 얇은 (-)디옵터 렌즈의 경우에는 외부의 변화에 민감하고 냉각속도가 (+)디옵터 렌즈보다 빠르기 때문에 디옵터 차이에도 불구하고 각각 렌즈의 열변형량이 비교적 동일하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 12로부터 디옵터의 증가에 따라 열변형량은 거의 일정하다. 이와 같은 결과로부터 (-)디옵터 렌즈의 경우 디옵터의 변화에 따른 렌즈 중앙부 두께의 변화가 없기 때문에 디옵터 변화에 따른 열변형량의 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 렌즈의 중앙부가 27°C에서 26.5°C로 냉각될 때, (-)디옵터 렌즈의 온도 분포를 보여주며, 냉각시간은 (+)디옵터 렌즈에 비하여 냉각 속도가 1.9배 빠르고, 중앙부가 급속하게 냉각되는 것을 확인하였다.

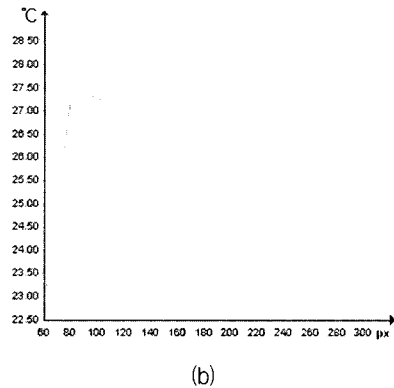
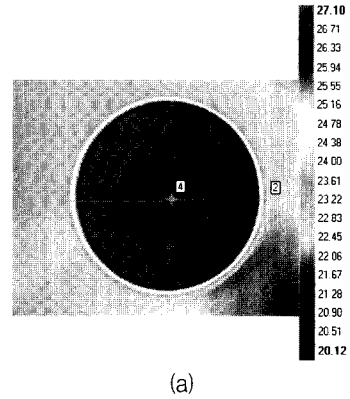


Fig. 13 Temperature change of (-) diopter lens (a) temperature change image, (b) temperature change profile along the center line

5. 결론

본 연구에서는 H사의 플라스틱 안경 렌즈를 $\pm 0.50\text{D}$ 씩 증가시킨 총 14종의 렌즈에 대해 외부 열이 가해졌을 경우의 열변형량과 온도 분포를 비교 분석했다. (+)렌즈의 경우에는 디옵터의 증가에 따른 열변형률이 감소함을 알 수 있었다. 이는 디옵터에 따른 중앙부의 두께 차이 때문이다. 반면에 (-)렌즈의 경우 렌즈의 가장자리 부분에 비해 중앙부가 두께가 상대적으로 얇기 때문에 렌즈의 중앙부가 취약하다. 따라서 (+)렌즈와 동일한 온도차에도 불구하고 열변형량이 컸다. 또한 디옵터의 변화에 따른 (-)렌즈의 중앙부의 두께 차이가 없기 때문에 최대 열변형량이 디옵터 별로 차이가 없었다. 그리고 (-)렌즈가 (+)렌즈 보다 냉각속도가 1.9배 빠르게 측정 되었으며 이는 렌즈 중앙부의 두께가 냉각 속도에 미치는 영향이 크다는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다.

이와 같은 실험 결과를 통해 원시용 렌즈가 근시용 렌즈에 비해 열에 의한 영향을 적게 받는 것을 확인 하였으며, 렌즈의 온도변화와 그에 따른 열변형의 정량적 측정이 가능하다는 것을 확인하였다. 또한 렌즈의 위치에 따른 정확한 두께와 구면의 데이터가 확보 된다면, 각 위치에서 온도변화가 발생할 경우 각각의 위치에 따른 온도변화에 의한 열변형량을 알 수 있을 것이다.

향후 관련 연구를 추가적으로 수행하여 정량적인 데이터베이스를 구축한다면, 외부에서 가해지는 열에 의한 렌즈의 상대적 변형량을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 특수한 렌즈의 경우에도 열에 의한 거동을 측정할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2007년도 과학재단의 방사선 사업 과제의 연구비 지원에 의해서 연구되었음.

참고문헌

[1] W. Steinchen and L. Yang, "Digital shearography for quantifying heat flow rate,"

Digital Shearography, pp. 245-261, (2003)
 [2] O. J. Lokberg, "Electronic speckle pattern interferometry physics in technology," Vol. 11, pp. 16-22, (1980)
 [3] O. J. Malmo and G. A. Slettemoen, "Interferometric testing very high temperature by TV holography(ESPI)", Experimental Mechanics, Sept., pp. 315-321, (1987)
 [4] Henri A. Vrcoman and Ad A. M. Mass., "Image processing algorithm for the analysis of phase-shifted speckle interference patternv," Applied Optics, Vol. 30, pp. 1636-1641, (1991)
 [5] Jones. R and C. Wykes, "Holographic and speckle interferometry: A discussion of the theory, parctice and application of the techniques," 2nd Edition, Cambridge University Press, pp. 166-173, (1989)
 [6] K. Creath, "Phase-shifting speckle interferometry," Applied Optics, Vol. 24, pp. 3053, (1985)