https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.5.402

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

유연한 PDMS 재료의 마이크로 프레넬 렌즈의 스트레칭 실험에 관한 연구

이왕훈[a], Truong Van Vu[a], 신부현[a], 이호철[a*]

Study on the Stretching Experiment of Micro Flexible Fresnel Lens of PDMS Material

Wanghun Lee[a], Truong Van Vu[a], Buhyun Shin[a], Hocheol Lee[a*]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 19 May 2021
Revised 8 August 2021
Accepted 31 August 2021

Keywords:
Fresnel lens
Streching mechanism
PDMS
Image formation
Focus control

ABSTRACT

This study proposes an experimental stretching method and its effect using a flexible micro Fresnel lens made from polydimethylsiloxane (PDMS) material with 25 mm diameter, 1mm thickness. The PDMS lens is strained by a four-degree-of-freedom (DOF) stretching device to change the lens's curvature. This stretching device consists of four linear stepping motors, placed concentric symmetry at the center of the PDMS lens. Each motor is operated via an A4988 stepper driver that receives the speed signal from the Arduino UNO controller. The simulation and experimental results are implemented to analyze and validate the performance of the stretched lens. The results indicated an increment of about 8% of the diameter and 12.3% of the imaging change after the stretching process.

1. 서 론

사람을 포함한 대부분의 동물들은 눈 안에 있는 모양근을 이용하여 수정체의 두께를 직접적으로 조절하여 초점을 조절한다.

생존 환경에 적응하기 위해 또는 특정 생존법의 효율을 향상시키기 위해 시력 의존도가 커진 생물들은 특이한 구조의 눈이나 몸의 체격 대비 더욱 큰 눈을 가지게 되었다. 대표적인 예시로 심해 생물들은 어두운 심해 환경에 적응하기 위해 빛을 최대로 받을 수 있도록 매우 크고 형태가 달라진 눈을 가지고 있다[1]. 최근 렌즈의 직경을 기계적으로 조절하여 초점을 조절하거나 렌즈의 배율을 조정하는 실험과 연구가 여러 연구 기관에서 활발하게 진행되는 중이다. 예를 들어 볼록 렌즈를 기존의 유리나 플라스틱이 아닌, 부드럽게 늘어나는 재질로 제작하여 외부 장력을 이용하여 변형을 주고 그 변화를 측정하여 초점 및 배율의 변화를 관찰하거나, 렌즈의 변화량에 따른 빛의 파장을 측정하여 센서로 활용하거나[2-4], 렌즈를 고체 물질이 아닌 유체성 물질을 이용하여 직접 형상을 변형시켜 초점을 조절하는[5,6]방법 등이 있다.

또한 배율을 조정하거나 자성 액체를 이용하여 액체의 표면을 조절하여 렌즈로 활용하기도 한다[7,8]. 전기 신호를 조절하여 액체의 표면장력을 조절하는 전기 습윤 형상을 이용하여 렌즈 형상을 조절하는 등 여러 가지 다양한 이론과 응용 기술들이 있다[9-11].

본 연구에서는 렌즈 초점 조절을 실험하기 위해 실험 대상 렌즈를 프레넬(Fresnel) 렌즈로 선정하였다. 프레넬 렌즈는 구형 렌즈의 형상을 평면화한 렌즈이며[12], 구형 렌즈와 동일한 배율과 초점거리를 가지고 있으면서[13], 부피와 두께를 절약할 수 있는 장점이 있지만 렌즈 표면의 구조가 복잡하여 가공 난이도가 높아 제작하기 힘들고, 비구면 렌즈 혹은 다초점 특수 렌즈와 비슷하게 굴절각도 등 렌즈 설계가 다소 복잡하다[14]. 비슷한 구조로 바이너리

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-1087
E-mail address: hclee@hanbat.ac.kr (Hocheol Lee).

구조의 평면 렌즈가 있다[15,16]. 프레넬 렌즈도 일반 렌즈와 동일한 특성을 가지기 때문에 위에서 서술된 렌즈의 형상을 변형하여 초점과 배율을 조정하는 여러 기술들을 응용하여 적용하는 것이 가능할 것이라고 판단된다[17,18].

부피가 일반적인 구형 렌즈보다 작기 때문에, 더욱 적은 힘으로도 렌즈를 변화시킬 수 있을 것으로 예상된다[19]. 기존 연구에서 바이너리(binary) 구조로 제작된 프레넬 렌즈를 이용한 스트레칭(stretching) 실험을 통하여 스트레칭이 된 렌즈의 초점이 변화하는 것을 입증하였다[20].

렌즈를 스트레칭 하는 방법은 대표적으로 축 방향 하중을 이용하여 전단력을 발생시켜 변형을 만드는 방법과 힘의 직접 전달을 통한 반경 방향의 변형을 발생시키는 방법이 있다[21]. 힘의 직접 전달은 드릴의 척 구조, 상용 로봇 그리퍼, 렌즈 조리개 등 여러 가지 방법으로 구현 가능하다[22].

본 논문에서는 스트레칭 기구를 설계하여 프레넬 렌즈의 지름을 늘려 렌즈의 직접적인 형상 변형으로 인한 렌즈의 초점과 배율의 변화 등 렌즈 성능의 변화를 관찰하였다. 두께가 일정하지 않고 곡선과 직선의 혼합 표면으로 이루어진 프레넬 렌즈의 특성상 렌즈 표면의 접촉점을 줄이고 형상의 원형을 유지하기 위해 스트레칭 방식으로 렌즈에 대해 반경 방향으로 직접 힘을 주어 렌즈의 변형을 만드는 방식을 적용하였다. 본문에서는 스트레칭 기구 제작 과정과 렌즈의 복제 과정과 렌즈의 스트레칭 변형 시뮬레이션 결과 및 실험 방법을 확보하여 스트레칭 기구를 이용한 프레넬 렌즈의 스트레칭의 결상 실험 방법과 가능성을 제시한다.

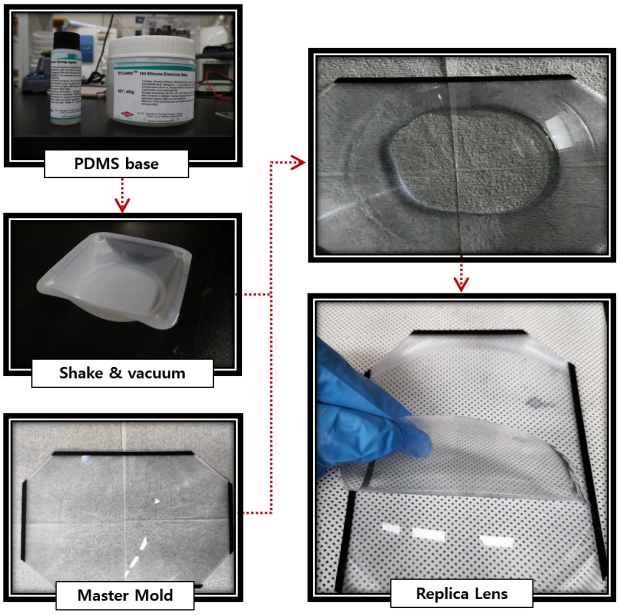
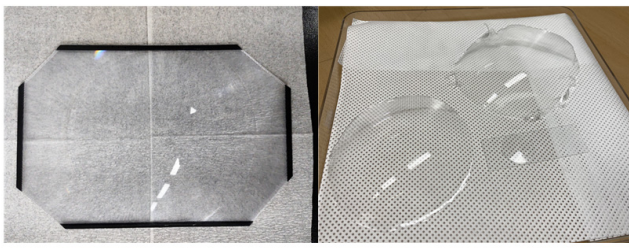


Fig. 1 Replication process of the Fresnel lens



(a) Original lens (Edmund optics #46-393) (b) The replicated PDMS Fresnel lens

Fig. 2 The Fresnel lenses for stretching

2. 본 론

2.1 마이크로 프레넬 렌즈의 제작

복제 프레넬 렌즈의 제조 과정은 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 렌즈를 제작하기 전에 렌즈 형상을 복제하기 위한 고체 프레넬 렌즈 형상이 필요하다. 고체 렌즈의 프레넬 형상 부분에 응고제를 섞은 PDMS 용액을 부은 다음, 납작한 물체를 덮어서 굳혀준다. 납작한 물체를 지지해 주는 받침대의 높이를 조절하면, PDMS로 제작될 복제 프레넬 렌즈의 두께를 조절할 수 있다. PDMS의 응고가 완료되면, 고체 프레넬 렌즈와 받침대를 제거하여 분리해준다.

위 과정으로 완성된 PDMS 복제 프레넬 렌즈는 원본 고체 프레넬 렌즈 형상과 동일한 곡률을 가지고 있으며, 형상부에 직접 재료를 투입하여 복제, 제조하기 때문에 곡률의 방향은 반대로 제작된다. 예를 들어, 볼록 렌즈를 복제하면 오목 렌즈의 형상이, 오목 렌즈를 복제하면 볼록 렌즈 형상을 가진 복제 프레넬 렌즈가 제작된다.

프레넬 렌즈의 원본 형상은 상용 Edmund Optics #46-393 구형 볼록 프레넬 렌즈를 사용하였다. Fig. 2는 렌즈를 복제하기 위해 사용된 실제 상용 제품과 복제 과정을 통하여 제작 완료된 복제 PDMS 프레넬 렌즈의 사진이다.

원본으로 사용된 #46-393 프레넬 렌즈는 볼록 렌즈 형상을 가지고 있기 때문에, 복제된 PDMS 렌즈는 오목 렌즈의 형상을 가지게 된다. 복제된 PDMS 프레넬 렌즈가 오목 렌즈의 곡률을 가지고 있는 것을 Fig. 3에서 확인 가능하다. 제작된 PDMS 렌즈를 이용하여 사물을 관찰하면 실제 눈으로 보는 것보다 사물이 작게 관측된다.

Fig. 3에서 사용된 복제 프레넬 렌즈의 외형의 크기는 렌즈의 외부 지름이 25 mm 이며, 두께는 1 mm 이고, 곡률 높이의 피치는 1 mm 이다.

복제 프레넬 렌즈는 마스터 몰드로 사용된 프레넬 렌즈와 동일하게 피치가 일정하고 렌즈 곡률반경의 높이가 변화한다.

2.2 렌즈 스트레칭 시뮬레이션

PDMS의 탄성 계수는 일반적으로 사용되는 렌즈 제작용 물질

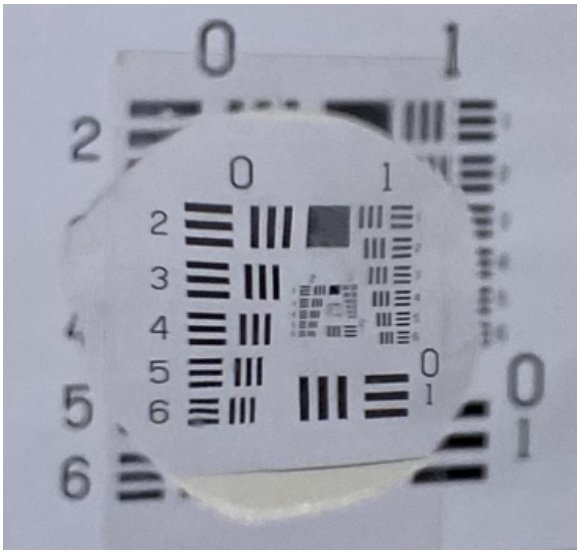


Fig. 3 Imaging performance of the replicated Fresnel lens

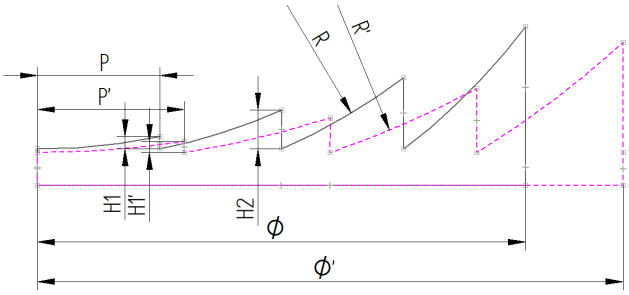


Fig. 4 The profile change of the Fresnel lens with constant pitch by stretch

보다 작다. 그렇기 때문에 PDMS로 제작된 복제 프레넬 렌즈는 외부의 힘에 의해서 변형이 쉽게 일어날 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 PDMS로 제작된 복제 프레넬 렌즈는 원본 고체 형상의 렌즈와 비교하여 적은 외력으로 큰 변형률을 만들 수 있다. 따라서 스트레칭을 통해 렌즈의 직경을 변화시켜 렌즈의 초점과 배율이 얼마나 변화하는가에 대한 실험 및 측정을 하기에 유리하다.

프레넬 렌즈가 변형을 일으킬 때 렌즈의 등가 곡률반경의 변화를 예측하기 위해, 기하학적 형상 해석을 진행하였다. Fig. 4는 변형 전과 변형 후 프레넬 렌즈의 단면 형상이다. 렌즈의 반경 방향 변형은 어느 부분에서든 똑같은 비율로 발생된다고 가정하였다.

여기서 H1, H2는 곡률 부분의 높이, R은 곡률 반경, P는 피치, Φ는 전체 렌즈의 지름이다.

렌즈의 변형 후 지름 Φ′가 늘어날 때, 렌즈 곡률의 피치 P는 늘어날 것이고, 렌즈 곡률 H는 줄어들 것이다. PDMS의 푸아송 비는 약 0.5이므로, 렌즈의 지름이 늘어난 만큼 곡률의 높이 H′와 H의 축소 변형률은 렌즈 지름 Φ과 Φ′의 변형률의 절반이다.

늘어난 곡률 반경 R′에 대하여 식을 정리하면 다음과 같다.

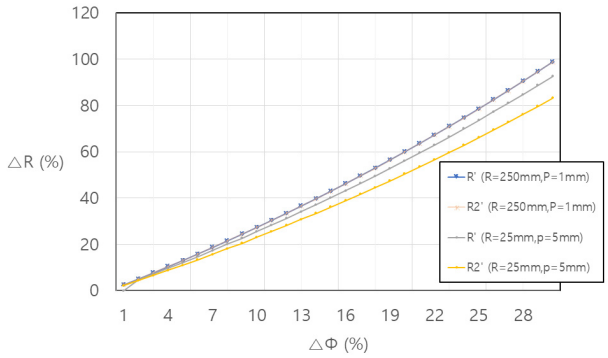


Fig. 5 The change of the radius and diameter of the Fresnel lens by stretch

$$R' = \sqrt{\frac{((1-\nu\epsilon)\triangle h + \frac{(n+1)^2(p(1+\epsilon))^2 - n^2(p(1+\epsilon))^2}{(1-\nu\epsilon)\triangle h})^2}{4} + (np(1+\epsilon))^2} \quad (1)$$

위 식에서 ν은 푸아송 비, ϵ은 변형률이다.

여기서 n은 피치의 번호이다. 예를 들어, 지름 중심에서 첫 번째 피치사이에서 n은 1이고, 첫 번째 피치와 두 번째 피치 사이에서 n은 2이다.

위 식을 이용하여 렌즈의 지름 변형률 대비 곡률 반경의 변형률에 대한 그래프의 예시는 Fig. 5과 같다. 예시에 사용된 두 개의 프레넬 렌즈의 외형은 각각 높이 P는 1 mm, 5 mm, R은 25 mm, 250 mm 이다.

그래프는 선형적으로 치환이 가능한 수준의 2차 곡선 방정식을 그리는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 렌즈의 변형률 10% 이내에서는 렌즈의 곡률 반경의 증가량을 선형으로 치환할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 2번째 프레넬 렌즈의 외형은 실제 실험에 사용된 프레넬 렌즈와 비슷한 형상을 가지고 있으므로 이 그래프의 곡선 양상을 이용하여 스트레칭 후 렌즈의 광학 성능의 변화를 미리 예측할 수 있다.

변형되기 전 프레넬 렌즈의 등가 곡률반경은 동일한 원점을 가지고 있지만 변형된 이후 프레넬 렌즈의 등가 곡률 반경의 원점이 동일하지 않다. 그러므로 프레넬 렌즈의 이상적인 스트레칭으로도 각각 피치의 곡률 반경의 초점 거리가 달라지기 때문에 렌즈로서의 성능은 나빠질 것으로 예상된다. 하지만 렌즈 스트레칭으로 인한 렌즈 지름의 변형률이 크지 않기 때문에 렌즈의 초점거리의 분산의 영향은 미약할 것으로 예상된다.

곡률의 원점의 왜곡을 예측하기 위해 두 번째 피치 R2에 대해서 그래프를 그려 보았다. Fig. 5에서 R이 250 mm이고 피치가 1 mm일 때 첫 번째 피치에서의 곡률과 두 번째 피치에서의 곡률이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

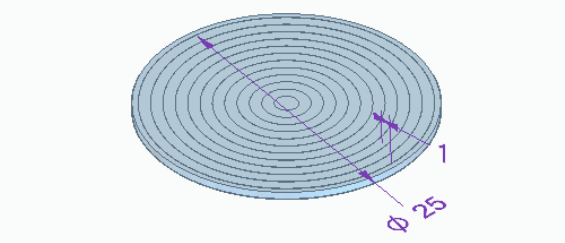


Fig. 6 Modeling of the Fresnel lens of diameter 25 mm

이로 인해 스트레칭으로 인해 곡률 변화로 인한 구형 곡률의 왜곡은 무시할 수 있다고 판단되지만, 곡률 대비 긴 피치를 가지고 있는 프레넬 렌즈의 스트레칭에서는 각각 피치에서의 곡률 변화로 인해 일정한 구형의 형태를 유지하지 못할 것으로 판단된다. R이 25 mm이고 피치가 5 mm인 렌즈에서는 첫 번째 피치의 스트레칭 후 곡률 반경과 두 번째 피치의 스트레칭 후 곡률 반경 사이에 그 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다.

렌즈의 형상을 최대한 유지하기 위해서는 원형에 가까운 외부 힘이 필요하다. 원형에 가깝도록 외부 힘을 가하여 렌즈의 지름을 늘린다면 렌즈의 형상은 원래 형상을 최대한 유지하면서 변형되지만 원형에 가까운 외력을 구현할수록 힘의 작용점이 많이 요구되므로 기구의 제작 난이도가 증가하고 제어가 어려워진다. 렌즈의 형상을 원형에 가깝게 유지하면서, 힘의 작용점을 최소로 하는 것이 적절하다.

최적의 기구의 설계와 제어를 위해서 요구하는 적절한 자유도를 선택하기 위해 해석을 진행하였다. 해석 소프트웨어는 Solid Edge 2021에 내장된 NX Nastran을 사용하였으며, 시뮬레이션에 사용된 복제 렌즈 형상의 모델링은 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 이 모델링은 Fig. 3에서 사용된 복제 프레넬 렌즈와 동일한 외형을 가지고 있다.

Fig. 7은 3 DOF, 4 DOF, 6 DOF, 8 DOF 모델에 대하여 외력 시뮬레이션을 진행한 결과이다. Fig. 7(a)에서의 3 DOF 시뮬레이션 결과에서 렌즈의 중심 부분 형상의 변형률 분포도가 세 방향으로 큰 변형이 생기는 것으로 확인된다. 그러므로 렌즈 중심 부분의 변형률이 일정하지 않고 힘의 작용점 사이로 더욱 더 큰 변형이 나타나므로 렌즈 지름의 변화가 원형을 유지하지 못 할 것으로 판단된다. 다른 시뮬레이션 결과를 비교하면 렌즈의 중심 부분은 힘의 작용점이 많아질수록 변형이 일정해 지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b), (c), (d) 에서 렌즈 중심부의 변형량이 거의 균일한 것을 확인할 수 있지만, (b)에서 렌즈 중심 부분의 변형량 균일도가 원형을 유지하지 못하고 약간 어긋나 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그 차이는 같은 지름 선상에서 10% 내외인 것을 확인할 수 있다. 원형 형상의 왜곡의 크기가 크지 않기 때문에, 실제 렌즈의 역할을 수행하더라도 상의 왜곡이 광학 성능에는 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 판단된다.

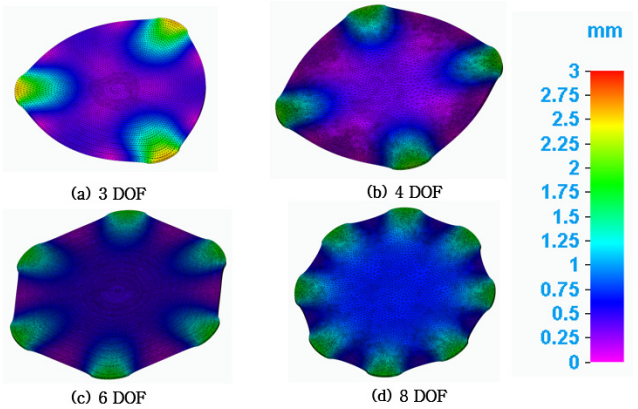


Fig. 7 Simulation of the stretching of the Fresnel lens

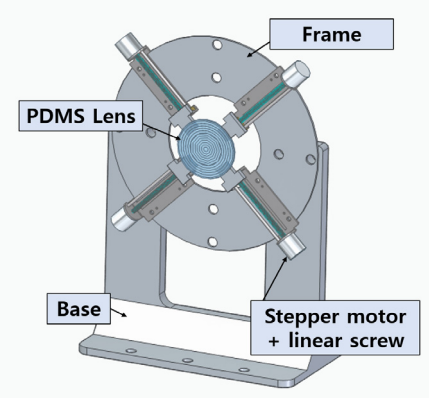
Fig. 7(c), (d) 에서는 힘을 받지 못하는 렌즈 모서리 부분을 제외하고, 렌즈 중심 부분으로 갈수록 변형량이 작아지는 것으로 나타났다. 실제 구형 곡률로 제작된 보통의 프레넬 렌즈에서는 렌즈의 중심을 기준으로 곡률 반경이 점점 커지기 때문에, 스트레칭 시 초점 거리가 거의 변하지 않는 중심 부분은 변형량이 적어도 광학 성능의 변화 또는 상의 왜곡에 미미한 영향을 끼칠 것으로 판단되지만, 곡률 반경이 곡선이 아닌 등가 직선으로 가공되거나, 곡률이 구면이 아닌 비구면의 형태를 가진 프레넬 렌즈의 경우는 변형량이 클수록, 작용점이 많을수록 상의 왜곡이 심해질 것으로 판단된다.

그러므로 이상적인 렌즈의 스트레칭을 위해서는 렌즈에 작용되는 힘의 방향을 조절하여 렌즈의 중심부가 균일한 변형량을 가지도록 외부 기구 설계가 필요하다고 판단된다.

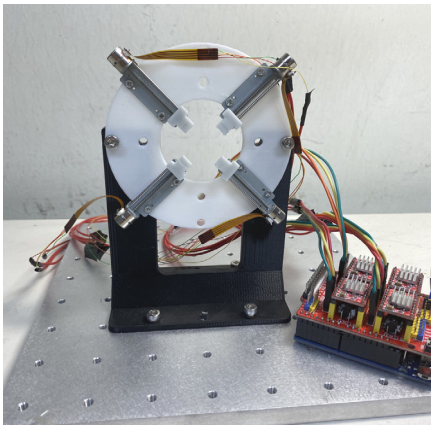
2.3 스트레칭 기구의 제작

기구의 자유도를 줄이면서, 렌즈가 스트레칭 후에도 원형을 유지할 수 있도록 앞서 진행했던 시뮬레이션 결과를 바탕으로 원형 모양의 렌즈를 4방향으로 잡아당기는 4자유도 스트레칭 방식을 선정하여 기구를 설계하였다.

Fig. 8은 스트레칭 기구의 전체 모습이다. 스트레칭을 위한 액추에이터(actuator)로 LS0808-S32 마이크로 스텝 모터와 리니어 스크류 가이드를 채택했다. 스텝 모터의 1스텝당 회전각도는 18°이고, 리니어 스크류의 1회전당 이송거리는 0.3 mm이다. 그러므로 리니어 스텝 모터는 1스텝당 0.015 mm의 이송 거리를 가지게 된다. 4개의 스텝 모터를 제어하기 위해서, 4개의 A4988 스텝 모터 드라이버와 CNC arduino shield, Arduino UNO를 사용하였다. 스텝 모터 드라이버의 하프 스텝 펄스 입력 기능을 사용하면 이송거리를 절반으로 줄일 수 있다. 스텝 모터의 이동 블록과 렌즈를 고정하기 위하여, 스크류 헤드 부분에 렌즈 고정부를 제작하여 부

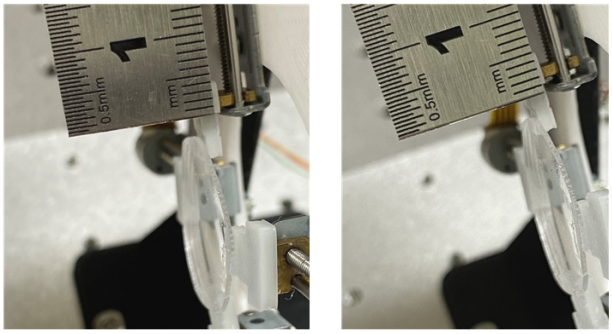


(a) A modeling of the stretching device



(b) The experimental stretching device

Fig. 8 Stretching device for the lenses



(a) Before stretching (b) After stretching

Fig. 9 Stretching tests of the Fresnel lens

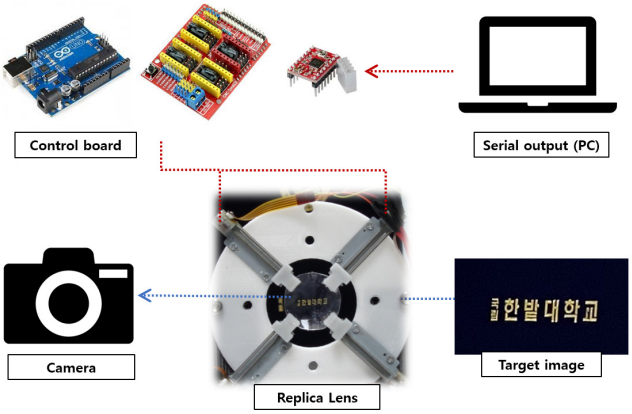


Fig. 10 Experiment setup for the stretching and the image acquisition

착하였다. 렌즈 고정부의 길이는 10 mm 이며, 렌즈를 2.5 mm 만큼 접촉시킨 후 접착제를 이용하여 렌즈를 고정시킨다. 기구를 바닥에 고정시키기 위해 스탠드를 설치하였고, 스탠드를 이용하여 기구를 세워서 가로 방향으로 광학 실험을 진행하거나, 스탠드를 제거하고 공중에서 지지하여 수직 방향으로 실험을 진행 할 수 있다.

수평 방향으로 광학 실험을 진행할 경우, 카메라와 촬영 목표의 일렬 정렬이 간단하고, 거리 조절이 간단하다는 장점이 있다. 하지만 중력 때문에 스트레칭 중 렌즈의 중심 정렬 또는 스트레칭 후 결과에 오차가 발생할 수 있다. 수직 방향 광학 실험은 렌즈의 스트레칭 실험이 원활한 대신, 카메라와 촬영 목표의 일렬 정렬과 거리 조절이 어렵다는 단점이 있다.

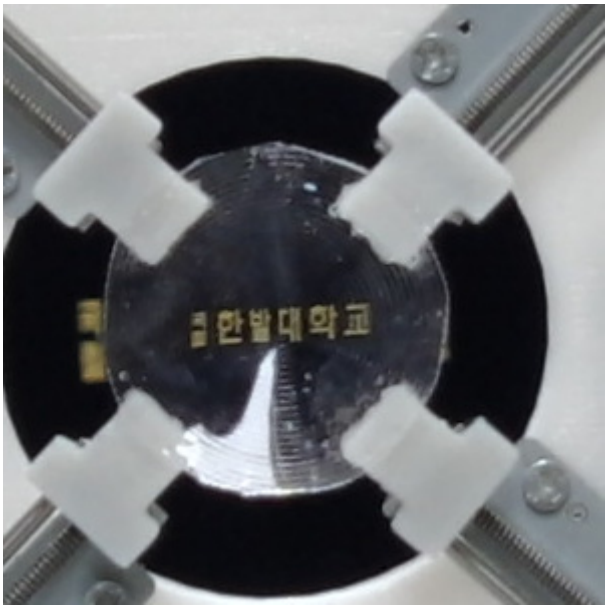
3. 스트레칭 실험 및 결과

3.1 스트레칭 방법 및 결과 분석

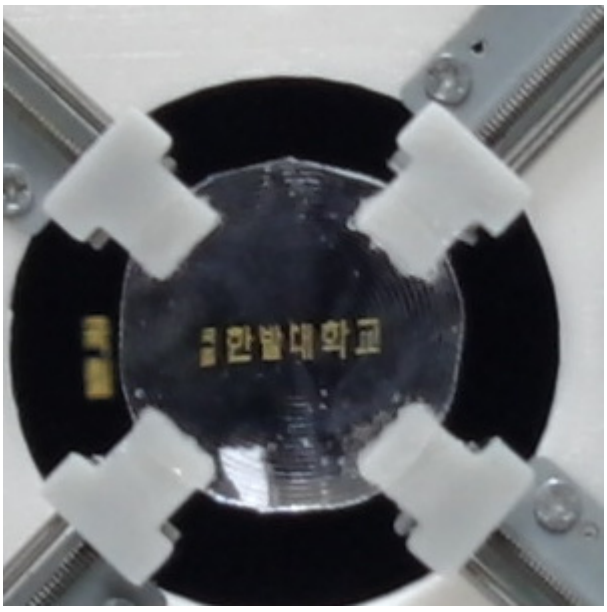
먼저 스트레칭 기구가 원활하게 작동하는지 확인하기 위해, 렌즈 장착 후 스트레칭 기구를 작동시킨 후 변화를 관찰하였다. 결과는 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 스트레칭 기구 작동 시 스크류 헤드 부분의 후퇴 거리를 자로 측정하였더니 약 0.9 mm 정도 뒤로 후퇴한 것을 확인할 수 있다. 렌즈는 4방향으로 0.9 mm 씩 늘어났으므로 전체 지름은 약 1.8 mm 늘어날 것이다. 렌즈의 고정부는 2.5 mm 씩 렌즈를 붙잡고 있으므로 실제 스트레칭의 영향을 받는 렌즈의 지름은 20 mm 이다. 예상되는 렌즈의 전체 변형의 크기는 렌즈 전체 반경의 9% 수준이다.

렌즈의 스트레칭 이후 이미지의 변화를 사진으로 촬영하거나 동영상으로 녹화하기 위해, 촬영용 카메라와 스트레칭 기구, 테스트용 이미지를 수평 일렬로 정렬하였다. 사용된 실험 환경은 Fig. 10과 같다. 카메라를 이용하여 렌즈에 투영된 이미지를 촬영하고 아두이노 보드와 시리얼 신호를 통하여 스트레칭 기구를 작동시켜서 렌즈를 스트레칭 시킨 후 이미지의 변화를 촬영하고 이미지가 변화는 과정을 녹화하였다.

실험을 진행하고 녹화한 동영상과 촬영한 사진을 이용하여 스트레칭 기구를 작동하기 전 이미지와 스트레칭 후 이미지를 획득하고 두 결과를 비교하여 초점, 배율의 변화를 확인하였다.



(a) Image before stretching



(b) Image after stretching

Fig. 11 Stretching image acquisition

3.2 스트레칭의 결상 변화 효과

스트레칭 실험 후 결과로서 Fig. 11(a)는 스트레칭 전 렌즈의 결상 이미지이고, Fig. 11(b)는 스트레칭 이후 렌즈의 결상 이미지다. 카메라를 이용하여 결상 이미지를 촬영하고, 촬영한 사진의 글자 크기의 변화를 스트레칭 전과 스트레칭 후 촬영된 각각의 이미지의 픽셀 크기를 비교하여 타겟(target) 이미지의 변화량에 대한 분석을 정량적으로 분석을 진행하였다.

기존의 단순한 바이너리 렌즈 구조에서 1개의 축방향으로 최대 변형량 15.2% 를 보여준 연구가 있었으나[20], 본 연구의 스트레칭이 된 프레넬 렌즈의 분석 결과 렌즈의 전체 지름은 약 8% 늘어났으며 글자의 가로 길이는 약 3%, 세로의 길이는 약 12% 늘어났다.

오목 렌즈에 수평의 외력이 발생하여 늘어나면서 렌즈의 지름이 증가하게 되고, 프레넬 렌즈의 곡률반경이 커지기 때문에 물체의 축소 비율이 결과적으로 작아지게 되었다. 스트레칭 실험 결과 렌즈의 축소 성능이 하락한 것은 실험 의도와 동일한 결과를 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 프레넬 렌즈의 변형을 이용하여 단일 렌즈로 가변 초점 조절이 가능한 렌즈에 대한 연구를 수행하였다. 지름 증가에 따른 렌즈 곡률 반경의 변화에 대한 기하학적 형상 변화를 수학적으로 추적하였고, 렌즈의 스트레칭이 이상적으로 균일하게 진행된다면 렌즈의 곡률 반경이 변화한다는 것을 증명할 수 있었다. 하지만 실제 스트레칭에서는 프레넬 렌즈의 얇은 부분에 응력 집중이 발생하게 되어, 변형률이 커질수록 광학 성능의 상실을 초래할 수 있을 것으로 추정되었고 30% 의 지름 변형으로서 렌즈 곡률 반경이 약 2배 이상 커진다는 것을 확인하였다. 이는 렌즈의 스트레칭이 과다할 필요가 없다는 것을 의미하고, 약 20% 의 변형량 발생을 목표로 실험을 진행하였다.

시뮬레이션을 통하여 외력에 대한 렌즈의 변형량을 해석하여 이상적인 스트레칭과 비교하여 광학 성능의 변화 또는 초점 중심의 변화 등을 예측하려 하였으나, 프레넬 렌즈의 피치가 매우 작기 때문에 해석을 위한 시간이 많이 소요 되었으며, 프레넬 렌즈의 외력의 방향과 수에 대한 변형량의 편차만을 수행하였다.

해석 데이터를 바탕으로 4방향으로 렌즈를 늘리는 스트레칭 기구를 설계하여 제작하였고, 실제 제작한 복제 PDMS 프레넬 렌즈를 이용하여 실제 스트레칭 실험을 진행하였다.

제작된 스트레칭 기구는 렌즈의 직경을 최대 40 mm으로 늘릴 수 있으나, 응고제의 투입 용량의 오차와 응고 시간의 차이 때문에 실제 사용된 PDMS 용액의 탄성 계수가 이론적인 PDMS 재질의 탄성 계수의 차이로 기구 제작에 사용된 소형 스텝 모터는 토크의 한계 때문에 렌즈의 변형률에 제한이 생겼다. 렌즈와 리니어 스크류를 고정하는 고정부 부분에 미끄럼이 발생하여 리니어 스크류의 실제 변형률과 렌즈의 실제 스트레칭 길이에 미세한 차이가 또한 발생하였다. 향후 연구에서 20% 이상의 스트레칭 실험을 진행하기 위해서는 더욱 강한 토크를 가진 기구의 설계나 복제 렌즈의 재질 변경, 필름두께 축소가 요구된다.

변형 오차가 발생함에도 불구하고, 렌즈의 성능 변화와 초점 거

리가 변화하는 모습을 관찰하는 실험을 성공적으로 수행할 수가 있었다. 실제 실험 결과, 렌즈의 총 지름은 8% 증가하였고, 문자의 크기가 약 12.3% 증가한 것으로 판단되었다. 그러나 문자의 가로와 세로 방향 변형률에는 차이가 발생하였고, 타겟에 미세한 왜곡도 관찰되었다. 이는 렌즈 외력에 따른 변형률의 분포 차이와 중력에 의한 차이에 의해 발생된 것으로 추정된다. 결과적으로 프레넬 렌즈의 수평 반경 증가 만에 따른 렌즈 성능의 변화의 실험을 수행하였고 미세 기구로 렌즈 성능의 변화를 실시간 측정하여 카메라 렌즈 등 여러 방면에서 응용할 수 있도록 추가 연구를 진행할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2020학년도 한밭대학교 교내학술연구비와 한국연구재단 NRF-2019R1A2C1004844 지원을 받았음.

References

[1] Wagner, H., Douglas, R. H., Frank, T. M., Roberts, N. W., Partidge, J. C., 2009, A Novel Vertebrate Eye Using Both Refractive and Reflective Optics, Curr. Biol., 19:2 108-114, https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.11.061.

[2] Wapler, M. C., 2020, Ultra-fast, High-quality and Highly Compact Varifocal Lens with Spherical Aberration Correction and Low Power Consumption, Opt. Express, 28:4 4973-4987, https://doi.org/10.1364/OE.382472.

[3] Wapler, M. C., Lemke, F., Alia, G., Wallrabe, U., 2018, Aspherical High-speed Varifocal Mirror for Miniature Catadioptric Objectives, Opt. Express, 26:5 6090-6102, https://doi.org/10.1364/OE.26.006090.

[4] Guo, J., Zhou, B., Yang, C., Dai, Q., Kong, L., 2019, Stretchable and Upconversion-luminescent Polymeric Optical Sensor for Wearable Multifunctional Sensing, Opt. Lett., 44:23 5747-5750, https://doi.org/10.1364/OL.44.005747.

[5] Kelly, T. L., Naumova, A. F., Loktev, M. Y., Rakhmatulin, M. A., Zayakin, O. A., 2000, Focusing of Astigmatic Laser Diode Beam by Combination of Adaptive Liquid Crystal Lenses, Opt. Commun., 181:4-6 295-301, https://doi.org/10.1016/S0030-4018(00)00795-1.

[6] Fuh, Y. K., Lin, M. X., 2013, Adaptive Optics Correction of a Tunable Fluidic Lens for Ophthalmic Applications, Opt. Commun., 308 100-104, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.05.060.

[7] Zhang, D. Y., Justis, N., Lo, Y. H., 2005, Fluidic Adaptive Zoom Lens with High Zoom Ratio and Widely Tunable Field of View, Opt. Commun., 249:1-3 175-182, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.01.010.

[8] Cheng, H. C., Xu, S., Liu, Y., Levi, S., Wu, S., 2011, Adaptive Mechanical-wetting Lens Actuated by Ferrofluids, Opt. Commun., 284:8 2118-2121, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.12.073.

[9] An, H., Chen, L., Liu, X., Zhao, B., Zhang, H., Wu, Z., 2019, Microfluidic Contact Lenses for Unpowered, Continuous and Non-invasive Intraocular Pressure Monitoring, Sens. Actuator A Phys., 295 177-187, https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.04.050.

[10] Wang, J. H., Zhou, X., Luo, L., Yuan, R. Y., Wang, Q. H., 2019, Tunable Liquid Lens Integrated with Aspheric Surface, Opt. Commun., 445 56-63, https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.03.066.

[11] Lee, J., Park, Y., Chung, S. K., 2019, Multifunctional Liquid Lens for Variable Focus and Aperture, Sens. Actuator A Phys., 287 177-184, https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.01.014.

[12] Davis, A., Kuhnlenz, F., 2011, Optical Design using Fresnel Lenses, Opt. Photon., 2:4 52-55, https://doi.org/10.1002/opph.201190287.

[13] Davis, A., 2009, Raytrace Assisted Analytical Formulation of Fresnel Lens Transmission Efficiency, Proc. SPIE, 7429 7429OD1-12, https://doi.org/10.1117/12.823742.

[14] Kim, S. M., Jeon, E. C., 2020, Design of Aspherical Illumination Lens for Square Distribution of High Uniformity, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 29:5 345-352, https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.5.345.

[15] Lee, W., Hasan, S. H., Lee, H., 2017, A Study on the Visualization Method of the Micro Fresnel Optical Surface, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf., 265.

[16] Benerji, S., Meem, M., Majumder, A., Vasquez, F. G., Sensale-Rodriguez, B., Menon, R., 2019, Imaging with Flat Optics: Metalenses or Diffractive Lenses?, Optica, 6:6 805-810, https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.000805.

[17] Tsui, C. C., Wei, H. C., Chang, W. F., Su, G. D. J., 2012, Design and Fabrication of a Mid-wavelength Infrared Fresnel Lens via Liquid Poly(methyl methacrylate), J. Micromech. Microeng., 22:4 045010, http://doi.org/10.1088/0960-1317/22/4/045010.

[18] Lee, H., Nkuruziza, D., Elsherif, M., Butt, H., 2019, Beam

Characterization of the Fresnel Lens with the Ultra-precision Optics Profile, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf., 16.

[19] Schneider, F., Draheim, J., Muller, C., Wallrabe, U., 2009, Optimization of an Adaptive PDMS-membrane Lens with an Integrated Actuator, Sens. Actuator A Phys., 154:2 316-321, https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.07.006.

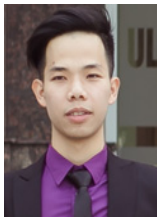
[20] Li, X., Wei, L., Poelma, R., Vollebregt, S., Wei, J., Urbach, H., Sarro, P., Zhang, G., 2016, Stretchable Binary Fresnel Lens for Focus Tuning, Sci. Rep., 6 25348, https://doi.org/10.1038/srep 25348.

[21] Shao, Y., 2014, Design of a New Membrane Stretching Device, Master Thesis, Lehigh University, USA.

[22] Kim, J. H., Park, I. N., 2020, Developement of a Flexible Gripper with Three Pneumatic Actuators, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 29:3 195-201, https://doi.org/10.7735/ksmte.20 20.29.3.195.

Wanghun Lee

Received a BS. from Hanbat National University in 2019. He is currently studying MS. of Mechanical engineering in Hanbat National University. His research interests are bio-inspired robot and legged robot.
E-mail: wh0131_2@naver.com



Truong Vu Van

Recived a BS. from Vietnam National University in 2018. He is currently studying MS. of Mechanical engineering in Hanbat National University. His research interests are optical device and ultra-precision machining.
E-mail: vutruonglt96@gmaill.com

Buhyun Shin

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University. His research interests are electromagnetic actuator, smart actuator and bio-inspired robot.
E-mail: jedidiah@hanbat.ac.kr

Hocheol Lee

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University. His research interests are the optical device design, optics fabrication, ultraprecision machining, and optomechanical engineering.
E-mail: hclee@hanbat.ac.kr