

&lt; 학술논문 &gt;

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.1.065>ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

### 3 차원 프린팅으로 제작된 개인맞춤형 안경테의 유한요소해석

이지은\* · 임영은\* · 박 근†

\* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

## Finite Element Analysis of a Customized Eyeglass Frame Fabricated by 3D Printing

Ji-Eun Lee\*, Young-Eun Im\* and Keun Park†

\* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received August 19, 2015 ; Revised November 6, 2015 ; Accepted November 16, 2015)

**Key Words:** 3D Printing(3 차원 프린팅), Customized Product(개인맞춤형 제품), Finite Element Analysis(유한요소해석), Orthotropic Anisotropy(직교이방성)

**초록:** 최근 개방형 소스 기반의 저가 3 차원 프린터의 출현에 의해 3 차원 프린팅에 대한 관심이 고조되고 있다. 3 차원 프린팅은 기존 제조업의 진입장벽을 낮추고 유연성을 높일 것으로 기대되며, 저비용으로 개인맞춤형 제품의 제작이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 뱀 모양을 형상화한 비대칭 형상의 독특한 안경테를 설계하였고, 사용자의 안면 특성을 반영하여 개인맞춤형으로 설계하였다. 또한 3 차원 프린팅으로 제작된 안경테의 구조적 안전성을 평가하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 이때 적층방향별 인장시험을 통해 확보한 직교이방성 물성을 반영하였다. 해석을 통해 가장 안전성이 높게 평가된 적층 방향으로 프린팅을 수행하였고, 제작된 안경테는 조립과정에서 파손 없이 조립됨을 확인하였다.

**Abstract:** In recent years, 3D printing has received increasing attention due to releases of low-cost 3D printers based on open-source platform. 3D printing is expected to reduce the barrier to entry in the traditional manufacturing processes by increasing flexibility and creating an advantage to manufacture customized products at low costs. In this study, a unique eyeglass frame was designed to have a snake shape, which has an asymmetric geometry unlike traditional frames. The eyeglass frame was designed in a customized manner by reflecting dimensional characteristics of a customer's face. Finite element analysis was performed to investigate the structural safety of the 3D printed frames during the assembly process. The analysis also considered the effect of anisotropic material properties as determined by tensile tests. The eyeglass frame was then printed using the customized sizes and the best building process. The eyeglass frame was successfully assembled with lenses and without structural failure during its assembly procedure.

#### 1. 서 론

최근 3차원 프린팅(3D printing)에 대한 관심이 전세계적으로 고조되고 있다. 3차원 프린팅은 적층 공정(Layer-by-layer deposition)에 기반하여 입체 형상을 제작하는 공정으로 과거에는 쾌속 조형(Rapid prototyping)이라는 명칭으로 불렸으나, 최근 적용분야가 시작(Prototyping)에서 벗어나 다양한 용도의 제품 제작에 활용됨으로써 3차원 프린팅,

혹은 부가 가공(Additive manufacturing)으로 명명된다.<sup>(1)</sup> 3차원 프린팅은 다품종 소량생산에 적합한 기술로 소비자의 다양한 요구를 반영할 수 있으며, 소량 생산의 경우 기존의 생산방식보다 적은 비용으로 제작이 가능한 장점이 있다.<sup>(2)</sup> 이러한 장점을 활용하여 의료보조기기 및 인체보형물,<sup>(3,4)</sup> 전자부품,<sup>(5,6)</sup> 기능성 금형,<sup>(7)</sup> 의류 및 스포츠용품<sup>(8)</sup> 등의 분야에서 소비자의 요구를 최대한 반영한 맞춤형 제품 개발에 활용되고 있다.

3차원 프린팅 조형품을 실제 기능성 제품으로 사용하기 위해서는 제작품의 강도와 강성 등의 기계적 물성이 보장되어야 한다. 그러나 3차원 프린

† Corresponding Author, [kpark@seoultech.ac.kr](mailto:kpark@seoultech.ac.kr)

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

팅 조형품은 적층공정상의 특성으로 인해 이방성(Anisotropy)을 보이며, 특히 평면방향 물성에 비해 두께방향 물성이 저하되는 특성을 보이는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 이러한 물성저하는 프린팅 방식과 소재, 장비에 따라 다소 차이가 있으며, 다양한 장비와 소재에 대한 방향별 물성특성에 대한 연구가 수행되었다. Ahn 등은 필라멘트 압출형(Fused Deposition Modeling; FDM) 3차원 프린팅 제품의 이방성에 관한 연구를 수행하였으며,<sup>(10)</sup> Caulfield 등은 선택적 분말소결형(Selective Laser Sintering; SLS) 3차원 프린팅 제품의 적층조건에 따른 물성변화에 관한 연구를 수행하였다.<sup>(11)</sup> Quintana 등은 레이저 광중합형(Stereo-lithography Apparatus; SLA) 3차원 프린팅 제품의 적층방향에 따른 인장강도 변화를 고찰하였으며,<sup>(12)</sup> Park 등은 재료분사형(Material Jetting; MJ) 3차원 프린팅 제품의 방향별 인장강도 특성을 고찰하고, 이를 반영한 유한요소해석을 수행하였다.<sup>(13)</sup>

본 연구에서는 재료분사형 3차원 프린터를 사용하여 개인맞춤형 안경테를 제작하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 뱀 모양을 형상화한 디자인의 안경테를 설계하고, 착용자 안면의 주요 치수를 매개변수로 정의하여 맞춤형 설계가 가능하도록 하였다. 또한 3차원 프린팅으로 제작된 안경테의 구조적 안정성을 고찰하기 위해 유한요소해석을 실시하였으며, 이때 3차원 프린팅 제작품의 이방성을 고려하기 위해 적층방향별 인장시험을 실시하여 방향별 물성의 차이를 반영하였다. 또한 해석결과를 반영하여 구조적 안전성을 향상시키기 위한 적층방향을 설정하고, 이를 토대로 3차원 프린팅을 실시하여 개인맞춤형 안경테를 제작하였다.

## 2. 개인맞춤형 안경테의 형상설계

### 2.1 뱀 모양을 형상화한 패션안경테 디자인

최신 유행이 변화하며 패션용품에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이러한 추세와 더불어 기존에 시력교정용으로 사용되는 안경도 개성이 가미된 패션용품으로서의 역할이 부여되고 있다. 본 연구자의 선행연구에서 다양한 동물의 모양을 형상화한 패션안경테를 제안하였으며,<sup>(14)</sup> 본 연구에서는 이중 뱀 모양을 형상화한 비대칭 안경테를 대상으로 연구를 진행하였다.

Fig. 1(a)에 뱀 모양을 형상화한 패션안경테의 개념설계안을 도시하였다. 안경테의 한쪽 끝부분은 머리, 다른쪽 끝부분은 꼬리가 되도록 형상화하였

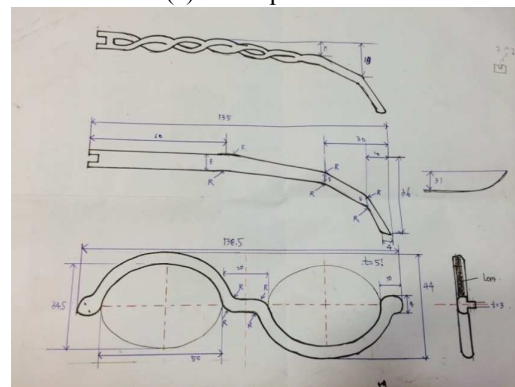
으며, 렌즈가 조립되는 중앙부가 뱀의 몸통이 되도록 설계하였다. 따라서 안경테의 좌측과 우측이 대칭형태인 기존의 폐쇄형(Closed type) 안경테와 차별화되는 개방형(Open type) 비대칭 구조를 갖는 것이 특징이다. Fig. 1(b)에 타원형 렌즈를 적용한 상세설계안을 도시하였으며, 이를 토대로 뱀 표면의 무늬를 적용한 패션안경테의 가상 일러스트레이션을 Fig. 1(c)에 도시하였다.

### 2.2 안면치수를 고려한 개인맞춤형 안경테 설계

Fig. 2에 Fig. 1의 설계안을 기초로 설계된 안경테의 3차원 형상을 도시하였다. 안경테의 3차원 설계는 Pro/Engineer Wildfire 5.0<sup>®</sup>을 사용하여 수행하였다. 안경테의 테두리(Rim) 부분은 렌즈와의 조립을 위해 렌즈의 곡률에 맞춰 설계하였으며,



(a) Concept sketch



(b) Detailed sketch



(c) Illustration with texture of snake skin

Fig. 1 Design procedure of a fashion glass frame<sup>(14)</sup>

렌즈의 두께에 맞춰 홈(Groove)을 생성하였다. 비대칭 안경테의 디자인 컨셉을 유지하기 위해 다리부(Temple)도 비대칭으로 설계하였으며, 테두리와 조립시 나사체결이 필요 없는 힌지 구조로 설계하였다. 한편 안경 착용시 안경이 흘러내리는 단점을 보완하기 위해 일반적으로 코받침부(Nose-pad)를 사용하는데, 본 연구에서는 별도의 코받침부를 사용하지 않고 대신에 양측 테두리 사이를 연결하는 연결부(Bridge)의 곡률반경을 사용자의 코 형상에 맞춰 설계하도록 단순화하였다.

상기 기본설계를 바탕으로 개인맞춤형 안경테 설계를 위한 설계변수(Design parameter)를 Fig. 3 과 같이 정의하였다. 테두리부의 주요 설계변수를 살펴보면 안면 길이( $L$ ), 연결부 길이( $c$ ), 렌즈 중심거리( $d$ ), 연결부 곡률반경( $R$ ) 등이 있으며, 상기 설계변수는 착용자의 안면부 치수를 측정하여 맞춤형으로 적용할 수 있다. 안경 렌즈는 타원형으로 설계하였으며, 장축 길이( $2a$ )와 단축 길이( $2b$ )는 사용자의 기호에 맞춰 변경할 수 있도록 하였다. 상기 설계변수는 Pro/Engineer Wildfire 5.0<sup>®</sup>의 매개변수 설계기능(Parametric design)을 사용하여 해당 매개변수를 변경하면 자동으로 3 차원 설계가 변경될 수 있도록 하였다.

상기 매개변수를 토대로 6 명의 성인 남녀의 안

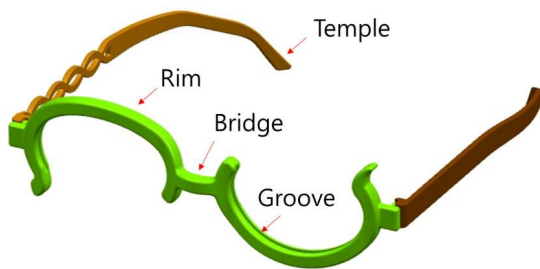


Fig. 2 Three-dimensional view of the designed glass frame with a snake shape

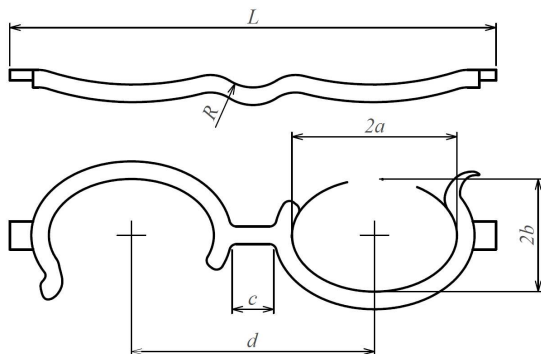


Fig. 3 Dimensional parameters of the customized frame

면치수를 측정하여 Table 1 에 비교하였다. 대부분의 치수가 남성이 여성보다 크게 나타나기는 했으나, 항목에 따라 일부 예외가 발견되기도 하였다(3, 4 번). 또한 안면 길이가 더 길더라도 타 치수는 작게 나타나는 경우(5, 6 번)도 발생하여 크기를 일괄적으로 키우거나 줄이는 형태로는 개인의 안면형상을 고려하는데 한계가 있어 개인맞춤형 설계의 필요성을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 이중 3 번 치수를 기준으로 안경테를 제작하였다.

### 3. 3 차원 프린팅 시작품의 이방성 고찰

#### 3.1 3 차원 프린터 및 소재 특성

본 연구에서는 재료분사형 3 차원 프린터인 Connex2<sup>®</sup> (Stratasys 社, 미국) 장비를 사용하여 제작하였다. Connex2<sup>®</sup>는 다수개의 미세노즐을 통해 분사된 광경화성 수지를 UV 를 조사해 경화시켜 제품을 조형하는 방식을 사용하고 있다. 노즐이 장착된 헤드가 수평방향으로 이동되며 수지를 분사하고, 이송이 완료되면 헤드의 폭만큼 평면 내에서 수직 이동하여 원하는 단면의 형상에 대해 수지를 분사하여 경화시켜준다. 이때 경화는 두께 16~20  $\mu\text{m}$  의 범위 내에서 이루어진다.

시편 제작에 사용된 재료는 ABS 계열의 광경화성 수지인 Fullcure<sup>®</sup>835 로 Table 2 에 기계적 물성을 요약하였다. 또한 기존 재료와의 비교를 위해 안경테 재료로 널리 사용되는 Arkema 사 Rilsan<sup>®</sup> AMN D Rilsan<sup>®</sup> (PA12 계열), EMS-Grivory 사의 Grivory<sup>®</sup> TR 90 (PA12 계열) 재료의 물성을 함께 비교하였다.

Table 1 Measured parameters for various dimensions

No.	Gender	$L$ (mm)	$c$ (mm)	$d$ (mm)
1	Female	135	13	57
2	Female	143	13	58
3	Female	147	14	58
4	Male	146	15	64
5	Male	148	17	65
6	Male	153	16	64

Table 2 Comparison of mechanical properties

Material	E (GPa)	$S_Y$ (MPa)	$e_Y$ (%)
Rilsan <sup>®</sup> AMN D	1.45	42.0	8.0
Grivory <sup>®</sup> TR90	1.60	60.0	6.0
Fullcure <sup>®</sup> 835	2.45	58.5	-

상기 결과로부터 프린팅 재료인 Fullcure<sup>®</sup>835 가 기존의 안경테 재료에 비해 탄성계수(Elastic modulus, E)와 인장강도(Tensile strength, S<sub>Y</sub>)는 비슷한 수준임을 알 수 있다. 항복 연신율(elongation at break, e<sub>Y</sub>)은 제시되지 않아 상대적인 비교는 어려웠으며, 대신 해당 재료의 과단 연신율(elongation at break)은 14%로 확인되었다. 그러나 상기 결과는 재료의 적층 특성을 고려하지 않은 것으로, 두께방향의 적층을 통해 제작된 시험편의 경우 방향에 따른 물성의 차이가 있을 것으로 예상된다.

3.2 직교이방성 고찰을 위한 인장시험

Fullcure<sup>®</sup>835 수지를 사용하여 적층된 조형품의 방향에 따른 기계적 물성의 차이를 확인하기 위하여 방향별 인장시험을 실시하였다. 인장시험편은 ASTM D638 기준에 따라 Fig. 4 와 같이 설계하여 제작하였다. 3 차원 프린팅 조형조건은 이동속도 400 mm/s, 노즐온도 70 °C, 작업대 온도 30 °C, 적층두께는 0.016 mm 로 설정하였고, Fig. 5 와 같이 X, Y, Z 세가지 방향으로 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편을 사용하여 인장시험을 실시하였으며, 조건별로 3 회의 실험을 수행하였다.

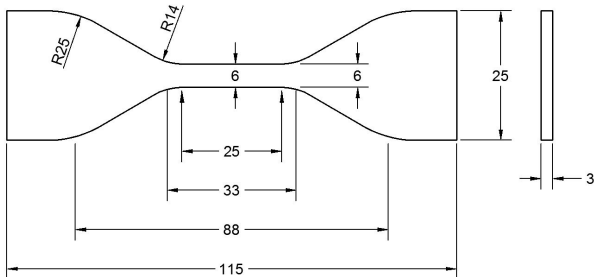


Fig. 4 Dimensions of the tensile test specimen

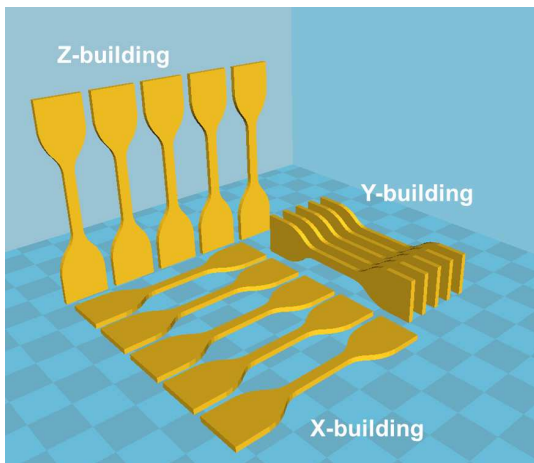


Fig. 5 Building directions of the tensile test specimens

Table 3 에 시험편의 적층 방향에 따른 탄성계수 및 인장강도, 과단연신율을 비교하였다. 탄성계수는 X, Y, Z 방향의 순서로 나타났으며, 각각의 경우에서 10% 이하의 편차를 보였다. 인장강도의 경우 X, Y 방향의 강도가 54 MPa 내외로 유사하게 측정된 반면, Z 방향의 강도가 28 MPa 로 X, Y 방향에 비해 약 1/2 정도로 낮게 측정되었다. 연신율 역시 Z 방향의 경우(2.179%)가 X, Y 방향에 비해 약 1/3 이하로 낮게 나타나 적층에 의한 두께방향의 기계적 물성이 현저히 저하된 것으로 판단된다. 특히 X, Y 방향의 경우 인장시험시 인장강도에 도달한 이후 응력이 감소되며 변형이 지속되다 과단이 발생하는 연성과파괴(Ductile fracture) 특성을 보이는 반면 Z 방향의 경우 임계연신율 도달시 적층부의 분리가 발생하는 취성과파괴(Brittle fracture) 특성을 보여 제품설계시 주의가 요구된다.

4.3 3차원 프린팅 안경테의 유한요소해석

4.1 조형방향에 따른 유한요소해석 조건

3.2 절에서 기술한 바와 같이 3 차원 프린팅 제품은 방향별로 상이한 물성을 보이며, 특히 적층 방향의 물성이 크게 저하된다. 따라서 프린팅 조형물을 완성품으로 사용하기 위해서는 방향별 물성을 고려한 응력의 분포를 예측하고, 이를 토대로 방향별 안전성을 고찰해야 한다. 본 연구에서는 비대칭 안경테의 구조적 안정성을 고찰하기 위해 조형물의 직교이방성을 고려한 유한요소해석을 수행하였다.

비대칭 안경테는 개방형으로 설계되었기 때문에 렌즈를 고정시키기 위한 언더컷(Under-cut) 형태의 돌출부가 필요하며, 렌즈 삽입을 위해서는 돌출부의 탄성변형을 통해 공간을 마련해주어야 한다. Fig. 6 에 비대칭 안경테의 렌즈 삽입 과정을 도식화하였으며, 해석시 대칭성을 고려하여 1/2 로 단순화하여 해석을 수행하였다. 이때 타원형 렌즈 삽입을 위한 돌출부 끝단의 수평방향 변위량(X 방향, 편측 3 mm)을 변위경계조건으로 부여하여 유한요소해석

Table 3 Comparison of mechanical properties according to the printing direction

Direction	X	Y	Z
Elastic modulus (GPa)	2.613	2.448	2.272
Tensile strength (MPa)	53.66	54.57	28.39
Elongation at break (%)	8.587	7.328	2.179



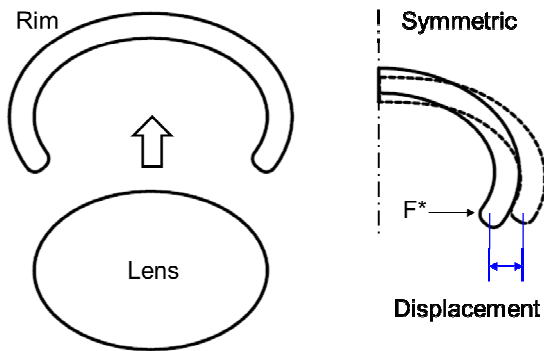


Fig. 6 Displacement boundary condition considering lens assembly into the designed eyeglass frame

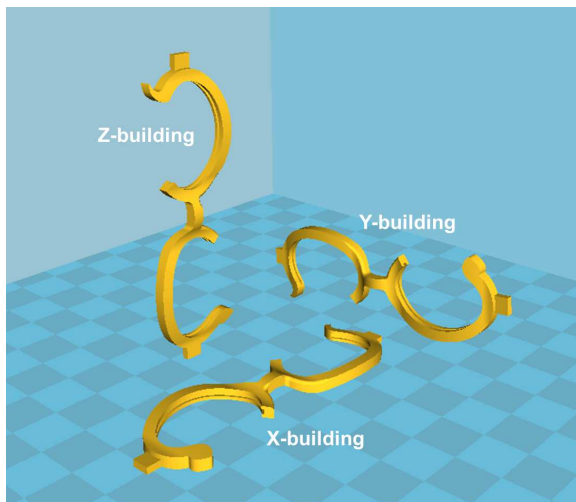


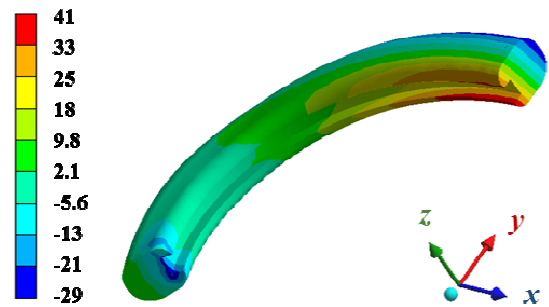
Fig. 7 Building directions of the designed glass frame

을 수행하였고, 해당 변위 발생시의 유효하중( $F^*$ )과 응력 상태를 관찰하였다. 유한요소해석은 ANSYS Multiphysics™ 를 사용하였다.

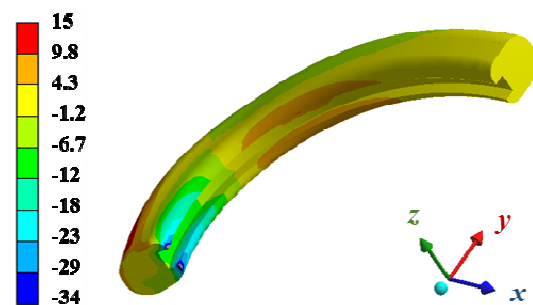
해석시 3 차원 프린팅 제품의 이방성을 고려하기 위해 Table 3 에 제시한 방향별 탄성계수를 사용하여 직교이방성(Orthotropic anisotropy) 물성을 적용하였다. 또한 안경테의 3 차원 프린팅시 조형 방향에 따른 제품의 안전성을 고찰하기 위해 Fig. 7 에 도시한 바와 같이 3 가지 조형방향(X, Y, Z 방향)으로 조형을 실시한 것으로 가정하고, 방향별 물성을 부여하여 해석을 수행하였다.

#### 4.2 조형방향에 따른 유한요소해석 결과

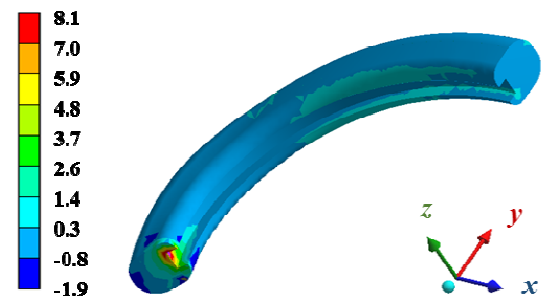
Fig. 8 에 X 방향으로 조형된 안경테의 방향별 수직응력 분포를 도시하였다. 이때 응력이 집중되는 끝단에서의 단면내 응력분포를 고찰하기 위해 해당 부위에서 단면을 절단하여 응력분포를 도시하였다. X 방향의 응력분포(Fig. 8(a) 참조)를 보면



(a) X-directional normal stress



(b) Y-directional normal stress



(c) Z-directional normal stress

Fig. 8 Comparison of normal stress distributions for the X-directionally printed frame (unit: MPa)

대칭면의 하단에 인장응력, 상단에 압축응력이 분포되는 전형적인 굽힘(Bending) 형태의 변형을 보이며, 최대응력이 40.65 MPa 에 해당하는 것으로 나타났다. Y 방향의 경우(Fig. 8(b) 참조) 돌출부 끝단의 변위로 인해 최대 34.38 MPa 의 압축응력이 발생함을 알 수 있으며, Z 방향의 경우(Fig. 8(c) 참조)는 돌출부 끝단에서 국부적으로 응력이 증가하는 하나(최대 8.13 MPa) 전체적으로 낮은 응력 분포를 보임을 알 수 있다.

마찬가지 방법으로 Y 방향과 Z 방향 조형의 경우에 대해 유한요소해석을 수행하였고, 해석결과로부터 얻어진 방향별 최대응력의 절대치를 Table 4 에 요약하였다. 일반적으로 연성 등방성 재료의 구조적 안전성을 고찰하기 위해서는 von-Mises 등

가응력을 사용하나, 본 연구에서는 3 차원 프린팅 제품의 직교이방성, 특히 가장 취약한 두께방향(Z 방향)에서 취성 파괴 특성을 보이는 점을 감안하여 방향별 최대수직응력을 기반으로 제품의 안전성을 평가하였다. 이를 위해 방향별 최대수직응력과 인장강도를 사용하여 식 (1)과 같이 방향별 안전계수( $\lambda_i$ )를 정의하였다.<sup>(13)</sup>

$$\lambda_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{|\sigma_i|_{\max}}, \quad (i = x, y, z) \quad (1)$$

여기서 아래첨자  $i$  는 방향( $x, y, z$ )을 의미하며,  $\bar{\sigma}_i$  는 Table 3 에 기술된 방향별 인장강도를 의미한다. 즉, 유한요소해석으로부터 예측된 방향별 최대수직응력값과 해당 방향에서의 인장강도와의 상대적인 비율로 방향별 안전계수를 정의하였고, 이를 토대로 제품의 방향별 안전성을 평가하였다.

Table 4 에 안경테의 조형방향에 따른 유효하중(Equivalent force), 방향별 최대응력과 안전계수 결과를 요약하였다. 유효하중의 경우 전반적으로 30 N 정도의 크기로 발생함을 알 수 있다. 응력분포를 살펴보면 X 방향 조형의 경우 X 방향의 응력이 최대로 나와 안전계수가 1.32 로 가장 낮게 나타난 반면 인장강도가 가장 낮은 Z 방향의 최대응력은 8.13 MPa 로 X 방향 최대응력(40.65 MPa)의 1/5 수준으로 나타나 가장 높은 안전계수를 보였다. 반면 Z 방향 조형의 경우 Z 방향의 최대응력이 43.58 MPa 로 크게 발생하였고, 결과적으로 해당 방향의 인장강도(28.39 MPa)를 훨씬 초과하여 안전계수가 0.65 로 낮게 나타남을 알 수 있다.

각각 1.32, 1.16, 0.65 로 나타나 X-방향 조형의 경우가 가장 안전한 것으로 나타났다. 상기 결과를 반영하여 X-방향으로 제품을 배열한 상태에서

3 차원 프린팅을 실시하였다. Fig. 9(a)에 X 방향으로 조형된 안경테의 테두리 부분을 도시하였으며, 제작된 테두리에 안경렌즈를 조립한 형상을 Fig. 9(b)에 도시하였다. 안경렌즈 조립시 테두리를 벌려 렌즈를 삽입하는 과정에서 소성변형이나 파단이 발생하지 않아 유한요소해석 결과에서 예측한 바와 같이 안정적으로 조립됨을 확인하였다.

Fig. 10 에 사용자 맞춤형으로 개발된 안경테를 착용한 모습을 사진으로 도시하였다. 안면의 치수에 맞춤형으로 설계가 된 덕분에 별도의 코받침부 없이도 안경이 흘러내리지 않고 안정적으로 착용됨을 확인할 수 있었으며, 기존의 안경 디자인과 차별화되는 독특한 디자인을 채택함으로써 개인맞춤형 패션용품 제작에 3 차원 프린팅이 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 독특한 디자인의 개인맞춤형 안경테를 설계하고 3 차원 프린팅을 사용하여 제작

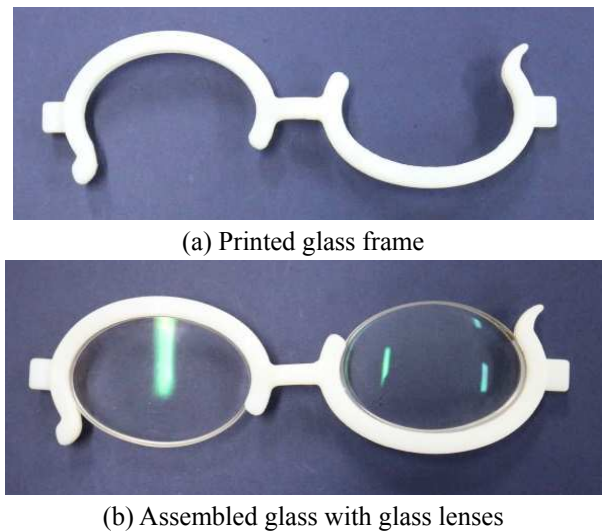


Fig. 9 Fabrication of the snake-shaped eyeglass frame

Table 4 Comparison of the maximum stress components and the corresponding safety factors for each building directions of the printed frame

Building direction		X	Y	Z
Equivalent force(N)		28.05	31.63	28.76
Maximum stress (MPa)	$ \sigma_x $	40.65	46.21	44.53
	$ \sigma_y $	34.38	33.82	10.44
	$ \sigma_z $	8.13	6.69	43.58
Safety factor	$\lambda_x$	1.32	1.16	1.21
	$\lambda_y$	1.59	1.61	5.23
	$\lambda_z$	3.49	4.24	0.65

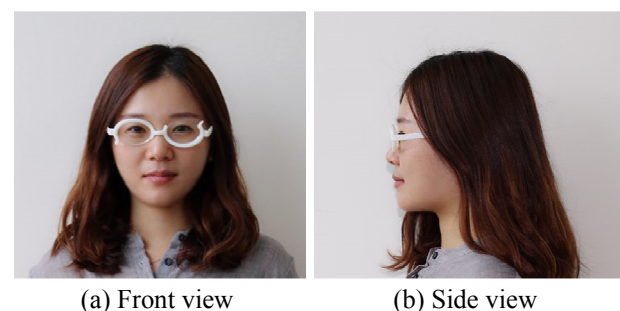


Fig. 10 Wearing of the customized eyeglass frame

하기 위한 연구를 수행하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 뱀 모양을 형상화한 개방형 비대칭 패션안경테를 설계하고, 주요 치수를 매개변수로 정의하여 착용자 안면의 치수를 고려한 맞춤형 설계가 가능하도록 하였다. 6 명의 사용자를 대상으로 상기 매개변수 길이를 측정된 결과 최대 18 mm 의 차이가 발생하는 등 개인차가 발생하며 그 분포 또한 불규칙적임을 확인하였다.

(2) 재료분사형 3 차원 프린팅 제작품의 방향별 물성 차이를 고려하기 위해 적층방향별로 인장시편을 제작하여 인장시험을 실시하였고, 두께방향의 강도는 1/2 이하, 연신율은 1/3 이하로 감소함을 확인하였다.

(3) 다양한 조형방향으로 프린팅된 안경테의 직교이방성을 고려하여 유한요소해석을 실시하였으며, 해석결과를 반영하여 가장 안전계수가 높게 나타난 X 방향으로 조형방향을 결정하였다.

(4) 해석결과를 반영하여 개인맞춤형 안경테의 3 차원 프린팅을 실시하였고(X 방향 조형), 제작된 안경테의 렌즈 조립과정에서 파손이나 소성변형이 발생하지 않음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 미래창조과학부 여대학(원)생 공학연구팀제 사업으로 한국연구재단과 한국여성과학기술인지원센터의 지원을 받아 수행되었으며, 패션안경테 디자인 과정에 도움을 준 서울과학기술대학교 디자인학과의 김수영 학생과 용화여고의 유혜림, 진민희 학생, 해성여고의 공원정, 배하영 학생에게 감사드립니다.

## 참고문헌

(References)

- (1) Ahn, D. G. and Yang, D. Y., 2005, "Principle of Rapid Prototyping and Its Trends," *J. KSPE*, Vol. 22, No. 10, pp. 7~16.
- (2) Campbell, I., Bourell, D. and Gibson, I., 2012, "Additive Manufacturing: Rapid Prototyping Comes of Age," *Rapid Prototyping J.*, Vol. 18, No. 4, pp. 255~258.
- (3) Park, S. H., Park, J. H., Lee, H. J. and Lee, N. K., 2014, "Current Status of Biomedical Applications Using 3D Printing Technology," *J. KSPE*, Vol. 31, No. 12, pp. 1067~1076.
- (4) Park, J. H., Jang, J. and Cho, D. W., 2014, "Three-Dimensional Printed 3D Structure for Tissue Engineering," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 10, pp. 817~829.
- (5) Vatani, M., Lu, Y., Lee, K. S., Kim, H. C. and Choi, J. W., 2013, "Direct-Write Stretchable Sensors Using Single-Walled Carbon Nanotube/Polymer Matrix," *J. Electro. Packag.*, Vol. 135, No. 1, 011009.
- (6) Oh, S. T., Jang, S. H., Lee, I. H., Kim, H. C. and Cho, H. Y., 2014, "3-Dimensional Circuit Device Fabrication for Improved Design Freedom Based on the Additive Manufacturing," *J. KSPE*, Vol. 31, No. 12, pp. 1077~1083.
- (7) Ahn, D. G., 2011, "Applications of Laser Assisted Metal Rapid Tooling Process to Manufacture of Molding & Forming Tools—State of the Art," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 12, No. 5, pp. 925~938.
- (8) Kim, J. H. and Jung, E. C., 2015, "Modeling Process Development for Customized Woman Midsole Design Based-on 3d Printing Technology," *J. Kor. Soc. Design Forum*, Vol. 46, pp. 267~277.
- (9) Pilipovic, A., Raos, P. and Sercer, M., 2009, "Experimental Analysis of Properties of Materials for Rapid Prototyping," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 40, pp. 105~115.
- (10) Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P. K., 2002, "Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS," *Rapid Prototyping J.*, Vol. 8, No. 4, 248~257.
- (11) Caulfield, B., McHugh, P. E. and Lohfeld, S., 2007, "Dependence of Mechanical Properties of Polyamide Components on Build Parameters in the SLS Process," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 182, No. 1, pp. 477~488.
- (12) Quintana, R., Choi, J. W., Puebla, K. and Wicker, R., 2010, "Effects of Build Orientation on Tensile Strength for Stereolithography-Manufactured ASTM D-638 Type I Specimens," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 46, No. 1-4, pp. 201~215.
- (13) Park, K., Kim, Y. S. and Park, D. Y., 2008, "Investigation into Directional Properties of Rapid Prototypes and Its Application to FE Analysis Considering Anisotropy," *J of KSPE*, Vol. 25, No. 11, pp.126~133.
- (14) Lee, J. E., Lim, Y. E., Kim, S. Y., Yu, H. R., Jin, M. H., Kong, W. J., Bae, H. Y. and Park, K., 2014, "Development of Personalized Glasses Using 3D Printing with Evaluation of Assembly Characteristics," *Proc. KSME Fall Conf.*, Gwangju, Korea.