



## 3D 프린팅으로 가공된 다양한 유연힌지의 실험적 강성 비교

윤지환<sup>a</sup>, 김현태<sup>a</sup>, 전용호<sup>a</sup>, 이문구<sup>a,\*</sup>

### Experimental Stiffness Comparison of Various Types of Flexure Hinges

Ji Hwan Yoon<sup>a</sup>, Hyun Tae Kim<sup>a</sup>, Yong ho Jeon<sup>a</sup>, Moon Gu Lee<sup>a,\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Ajou University

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received	7	September	2024
Revised	4	October	2024
Accepted	7	October	2024

##### Keywords:

Stiffness  
Leaf spring  
Notch hinge  
Cartwheel hinge  
Cross axis hinge

#### ABSTRACT

Flexible hinges are components that connect two pivots and allow linear deformation within the elastic range of the constituent materials. These hinges enable highly accurate positioning and are widely used in high-precision manufacturing industries. The hinges have various types, including leaf, notch, cartwheel, and cross axis. Their characteristics are varied by both the type and the manufacturing method. This study designs and evaluates the rotational stiffness of the various flexible hinges through mathematical modeling, finite element analysis, and experimental testing. The aim of this study is to compare the stiffness of each type to determine the most suitable hinge design for high-precision applications. The cartwheel hinge is suitable if high stiffness is required. However, if a wide range of rotation is preferred, leaf or cross axis hinges are recommended. However, cross axis hinges require careful fabrication. Hence, the comprehensive analysis results provide valuable guidance for selecting appropriate hinge designs.

## 1. 서론

기존의 힌지(hinge)는 두개의 부재(member)를 연결하는 부품으로 2차원적인 상대 회전을 허용하는 연결기구이다. 보통 회전의 중심에 핀이 있고, 이를 중심으로 회전운동을 하게 된다. 핀과 고정 부품 사이에는 약간의 유격이 있다. 반면에, 유연 힌지는 중심점(pivot)에 대한 탄성적 변형으로 인하여 회전운동이 가능하다. 이는 Fig. 1에 나타내었다. 기존의 힌지는 큰 각 운동이 가능하지만, 미끄럼에서 발생하는 마찰과 비선형성이 문제가 된다. 유연 힌지는 회전각도가 작지만 탄성영역 안에서의 운동이라서 선형적이고 예측 가능한 회전운동이 가능하다.

유연 힌지는 탄성범위 내에서는 매우 높은 정밀도의 위치 결정이 가능하므로 초정밀 제어를 요구하는 산업에 널리 사용된다. 또

한 이를 복합적으로 구성하여 운동을 가이드 하거나 변위를 선형적으로 증폭시켜주는 장치에도 사용이 가능하다<sup>[1]</sup>. 대표적으로 초정밀 리니어 스테이지 혹은 레이저 유도장치 등이 있다<sup>[2]</sup>.

유연 힌지는 판 스프링(leaf spring), 노치(notch), 교차축(cross axis), 수레바퀴(cartwheel) 등 다양한 형태로 사용된다. 유연 힌지에 관한 선행연구를 찾아보면 이 중에서 어떤 힌지를 선택하였는지에 대한 근거 제시가 미흡하다<sup>[3, 9-12]</sup>.

유연 힌지는 높은 치수 정밀도를 위하여 일체화된 구조로 가공하는 것이 선호된다. 기존의 방식은 CNC로 정확한 위치에 구멍을 가공하고, 이들 사이로 줄 방전가공(wire electric discharge machining, WEDM)으로 마무리한다. 이 방식은 여러 장점에도 불구하고, 복잡한 형상의 가공이 어렵다. 일체화된 가공을 만족하면서도 복잡한 형상으로 가공하기 위한 대안적인 기법으로써 최근에 3D 프린

\* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2338

E-mail address: moongulee@ajou.ac.kr (Moon Gu Lee).

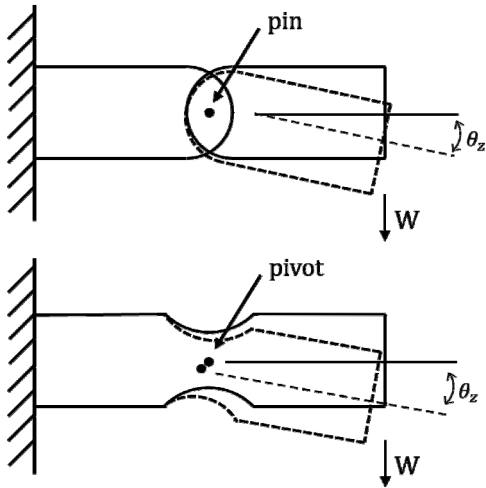


Fig. 1 Conventional hinge (top) vs. Flexure hinge (bottom)

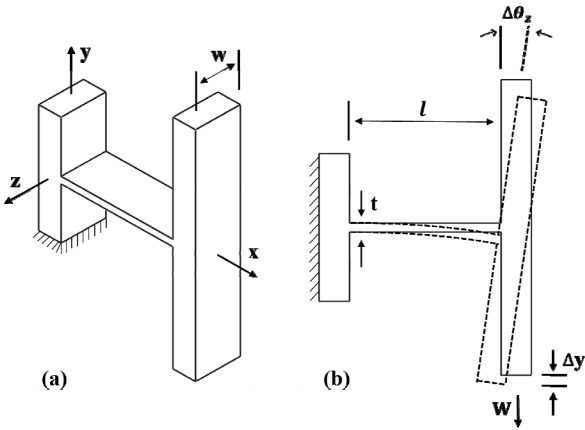


Fig. 2 Leaf spring hinge; (a) 3D model, (b) load and rotation

팅을 적용하고 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 판 스프링, 노치, 교차 축, 수레바퀴 힌지 끝단에 정적 하중을 가하여 중심점에 대한 회전운동이 일어날 때의 강성을 비교한다. 수학적 모델링, 유한요소해석 그리고 실험을 통해 각각의 결과를 비교하여 검증성을 높이고자 하였고, 결과적으로 강성값을 비교하여 어떠한 형상이 유리한지 분석하였다. 이때, 실험적 검증을 위한 힌지 가공방식은 3D 프린팅으로 택하여, 각각의 형상의 유연 힌지를 제작했다. 기존 가공방식(drilling & WEDM)에서는 보이지 않던 오차나 특성도 살펴보려 한다.

## 2. 수학적 모델링

### 2.1 판 스프링(leaf spring) 힌지

Fig. 2는 판 스프링 힌지 해석에 사용한 모델이다. 본 논문에서는 수직하중(W)을 가해 발생하는 회전강성 ( $K_\theta$ )를 구하였다. 이때 힘과 변위의 관계는 식 (1)의 형태로 나타낼 수 있다. 식 (1)에서

변형 ( $X^h$ )과 외력 ( $F^h$ )은 식 (2), (3)을 나타내며 본 논문에서 나타나는 힌지는 식 (1)을 기본으로 계산을 진행하였다<sup>4,6</sup>.

여기서  $C^h$ 는 판 스프링에 사용되는 복합 행렬로 행렬식 (4)와 같다. 이때 E와 G는 균일한 등방성 스프링 재료의 영계수와 전단계수이다.

$$X^h = C^h F^h \quad (1)$$

$$X^h = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T \quad (2)$$

$$F^h = [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T \quad (3)$$

$$C^h = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 & 0 & 0 & c_3 \\ 0 & 0 & c_4 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_5 & 0 & c_7 & 0 \\ 0 & c_3 & 0 & 0 & 0 & c_8 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{l}{Ewt}, \quad C_2 = \frac{4l^3}{Ewt^3} + \frac{l}{Gwt}, \quad C_3 = \frac{6l^2}{Ewt^3}$$

$$C_4 = \frac{4l^3}{Ew^3t} + \frac{l}{Gwt}, \quad C_5 = -\frac{6l^2}{Ew^3t}, \quad C_6 = \frac{l}{Gk_2wt^3}$$

$$C_7 = \frac{12l}{Ew^3t}, \quad C_8 = \frac{12l}{Ewt^3}$$

$$\theta_z = F_y \frac{6l^2}{Ewt^3} + M_z \frac{12l}{Ewt^3} = \left( \frac{18l^3}{Ewt^3} \right) W, \quad K_s = \frac{Ewt^3}{18l^3} \quad (5)$$

따라서, 수직 정적 하중 (W)가 가해질 때,  $\theta_z$  값은 식 (5)와 같다.  $F_y = W$ ,  $M_z = lW$ 임을 이용하였고, 이때의 판 스프링의 강성은  $K_s$ 이다.

### 2.2 노치(notch) 힌지

Fig. 3은 노치 힌지의 그림이다. 노치 힌지는 굴곡의 형태에 따라 다양하게 분류된다. 본 논문에서는 반지름 r이 일정한 원형(circular) 노치 힌지 형태를 사용하였다. 노치 힌지의 변형은 식 (6)을 따라 계산 가능하다. 해당 계산에서는 x, y,  $\theta$ 축에 대한 힘과 변형만을 고려했기에, 복합 행렬  $C^h$ 를 식 (6), (7)과 같이 3×3 행렬로 나타내었다.

$$C^h = \begin{bmatrix} C_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & C_{yy} & C_{y\theta} \\ 0 & C_{\theta y} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

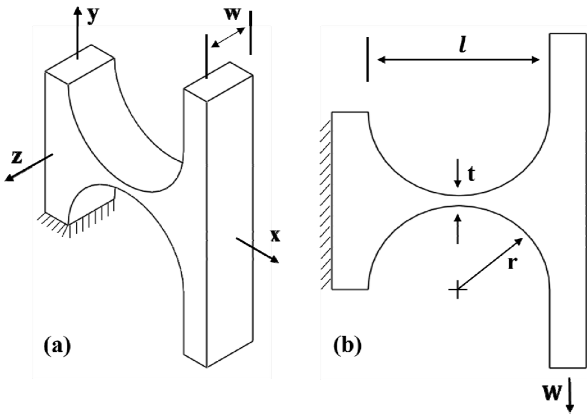


Fig. 3 Notch hinge

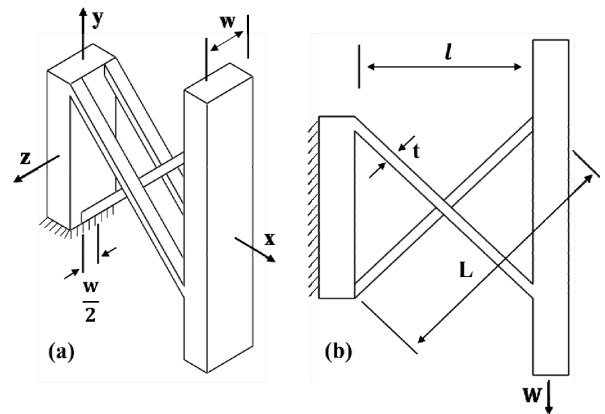


Fig. 5 Cross axis hinge

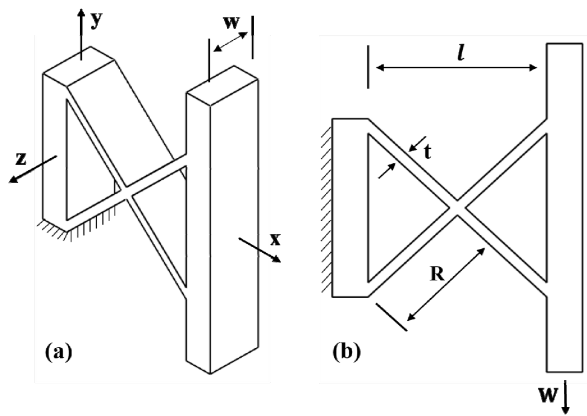


Fig. 4 Cartwheel hinge

$$C^h = \begin{bmatrix} \frac{\pi}{Ew} \sqrt{\frac{r}{t}} - \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9\pi r^{5/2}}{2Ewt^{5/2}} + \frac{3\pi r^{3/2}}{2Ewt^{3/2}} & \frac{9\pi r^{3/2}}{2Ewt^{5/2}} \\ 0 & \frac{9\pi r^{3/2}}{2Ewt^{5/2}} & \frac{9\pi r^{1/2}}{2Ewt^{5/2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 식에서 r은 노치의 반지름이고, t는 노치에서 가장 얇은 부분의 두께이다. 이에 따라, 각 변위는 식 (8), (9)와 같이 계산된다. 판 스프링 힌지의 방식과 같은 과정으로 강성  $K_n$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = C^h \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta \theta = C_{\theta y} F_y + C_{\theta \theta} M_z \quad (9)$$

### 2.3 수레바퀴(cartwheel) 힌지

수레바퀴 힌지는 Fig. 4의 형상으로 4개의 판 스프링이 힌지의

중심점(pivot)에서 모이는 형태로 이루어져 있다. 여기서  $\theta_z$ 는 식 (10)과 같다.

$$\Delta \theta_z = \int \frac{M_z(x)}{EI_z} dx = \frac{d\theta_z}{dF_y} F_y + \frac{d\theta_z}{dM_z} M_z \quad (10)$$

위 식에서  $\frac{d\theta_z}{dF_y}$ 와  $\frac{d\theta_z}{dM_z}$ 는 각각 식 (11), 식 (12)와 같다. 본 논문에서는 수레바퀴 힌지를 단일 판 스프링의 복합체로 인식하여 식을 사용하여 계산을 진행하였다<sup>7)</sup>.

$$\frac{d\theta_z}{dF_y} = \frac{6\sqrt{2}R^2(R^2G + k_1Et^2 + t^2G)}{Et^3b(k_1Et^2 + t^2G + 4R^2G)} \quad (11)$$

$$\frac{d\theta_z}{dM_z} = \frac{12R(R^2G + k_1Et^2 + t^2G)}{Et^3b(k_1Et^2 + t^2G + 4R^2G)} \quad (12)$$

여기서 G는 전단 계수이며, R은 중심 pivot까지의 대각 방향 길이로 Fig. 4에 나타나 있다. 추가적으로  $k_1$ 은 R의 길이를 가지며 두께가 t인 판 스프링 힌지의 y방향 강성으로 식 (4)의  $C_{22}^h$ 에서 구할 수 있다. 식 (10)~(12)와 판 스프링 힌지에서 활용했던 방식을 이용하여 강성  $K_{cw}$ 를 구할 수 있다.

### 2.4 교차 축(cross axis) 힌지

교차 축 힌지는 Fig. 5와 같이 3개의 판 스프링 힌지가 교차되어 있는 형상이다. 힌지 전체의 폭을 w라고 할 때, 중심 빔의 폭은 w/2이고, 양쪽 끝단의 폭은 w/4이다. 교차 축 힌지는 식 (13)의 행렬로 강성을 구할 수 있다. 여기서 행렬의 각 항은 식 (14)와 같다<sup>8)</sup>.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{F_x,x} & 0 & 0 \\ 0 & k_{F_y,y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{M_z,\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{cases} k_{F_x,x} = \frac{Ewt}{L} + \frac{Ewt^3}{L^3} \\ k_{F_y,y} = \frac{Ewt}{L} + \frac{Ewt^3}{L^3} \\ k_{M_z,\theta} = \frac{Ewt^3}{6L} \end{cases} \quad (14)$$

여기서 각 변위는 식 (15)와 같다. 역시 판 스프링 힌지에서 활용한 방식으로 강성  $K_{ca}$ 를 구할 수 있다.

$$\Delta \theta = \frac{1}{k_{M_z,\theta}} M_z \quad (15)$$

이상의 수학적 모델에서 구한 각각의 힌지의 수직력에 대한 각 변형의 강성은 Table 1에 나타내었다. 이때 힌지의 길이  $l$ 은 50 mm이고, 두께는 3 mm이며, 폭은 20 mm이다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 정적 해석

이론적인 강성값과 해석의 결과를 비교하기 위하여 4개의 힌지에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석 도구는 가장 범용으로 사용되는 ANSYS Mechanical이다. 공정한 비교를 위하여 각 모델의 값을 같게 하였다. 물성 중에서 영계수( $E$ )는 3D 프린팅에 사용된 재료인 PLA(poly lactic acid)의 표준값(4,400 MPa)를 사

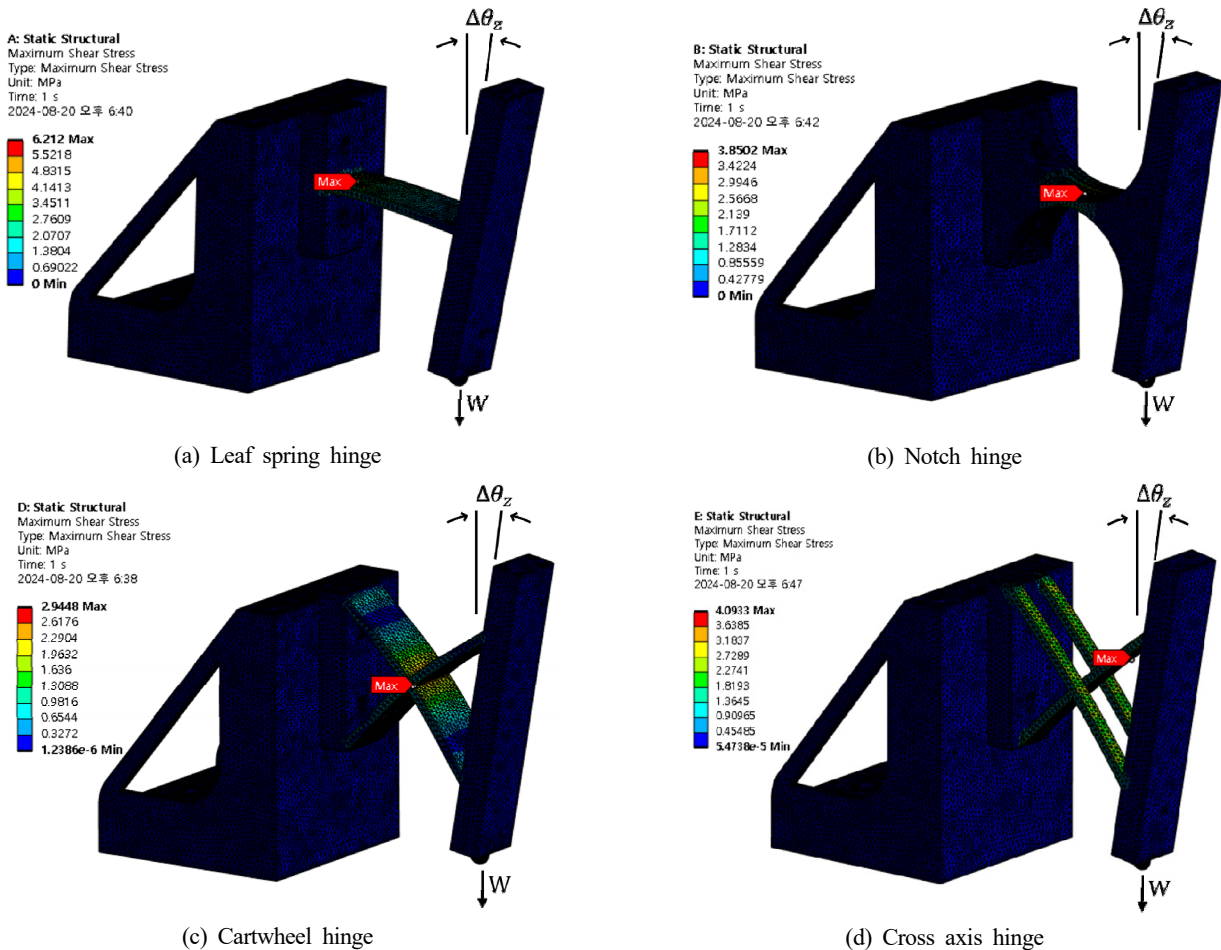


Fig. 6 Analysis results of flexure: (a) leaf spring hinge, (b) notch hinge, (c) cartwheel hinge, (d) cross axis hinge

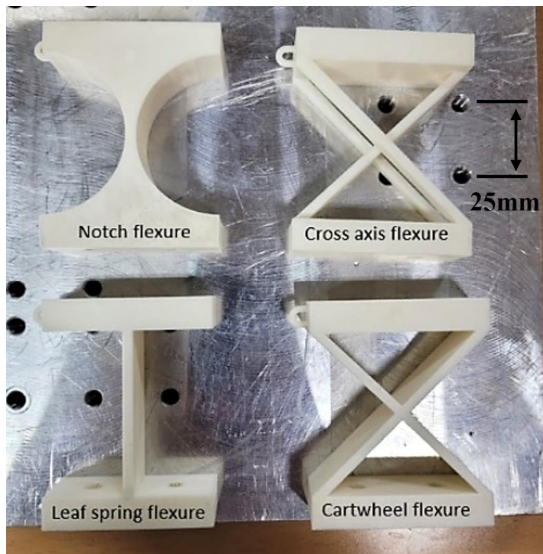


Fig. 7 3D printed hinges

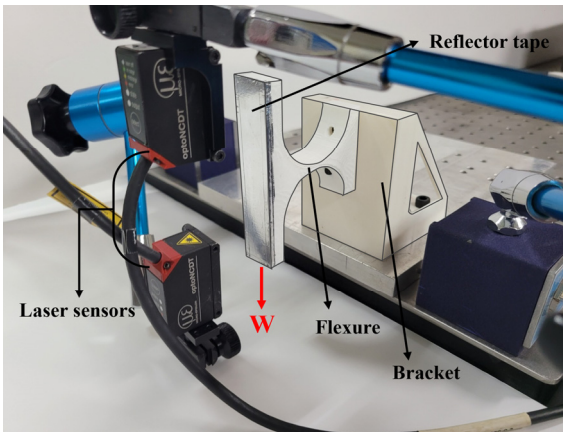


Fig. 8 Experiment setup

용하였다. 각 모델의 왼쪽 고정면을 직사각형의 브라켓(bracket)으로 모델링하여 고정하였고, 1 kgf의  $W$ 값을 하중으로 주었다. 각각의 해석에서 사용된 격자는 사면체 형상이고 요소의 수는 모두 120,000개 이상이다.

각 모델의 최대 응력과 각 변위를 살펴보았을 때, Fig. 6(a) 판스프링 힌지에 가장 큰 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반대로 Fig. 6(c) 수레바퀴 힌지는 나머지 3개의 힌지와 비교했을 때 발생한 응력이 가장 적음을 알 수 있다. 이것은 고정부에서 응력이 판스프링 힌지에서 크게 나타나기 때문이다. 수레바퀴 힌지에서는 교차부에서 응력이 4개의 연결선을 따라 분포되어 나타나 완화되었다.

#### 4. 제작과 실험

##### 4.1 3D 프린팅을 활용한 제작

이 실험에서 사용한 힌지는 3D 프린팅을 통해 제작하였다. 주

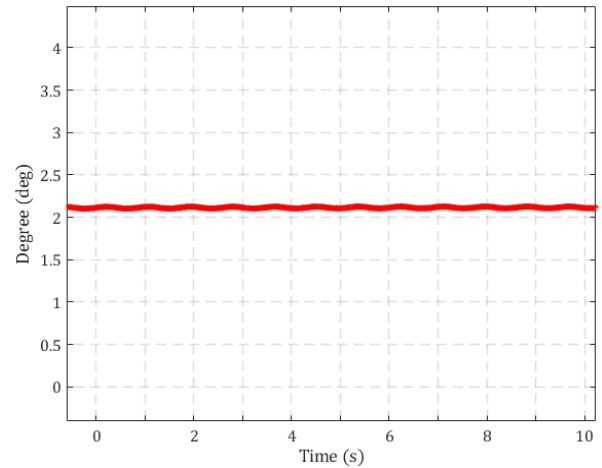


Fig. 9 Experiment results of leaf spring flexure

Table 2 Rotational displacement of hinges

Type	$\theta_z$ (°)	
Leaf spring	2.12	$W = 9.818 \text{ N}$ $E = 4,400 \text{ MPa}$
Notch	0.75	
Cartwheel	0.67	
Cross axis	2.30	

재료인 PLA(poly lactic acid)를 적용하는 방식으로 출력된다. 재료의 영계수는 4,400 MPa의 값을 갖는다. 힌지의 치수는 수학적 계산과 유한요소 해석에서의 치수와 동일하다. Fig. 7은 출력된 힌지의 형상이다. 힌지의 치수를 결정할 때, 일반적인 기구에서 사용하는 유연힌지의 외곽 치수를 고려하였다. 가장 얇은 부분인 3 mm는 3D 프린팅 공정에서 충분한 내부 채움이 가능한 최소 치수로 정한 것이다. 이러한 점을 고려하여 위와 같은 치수를 설정하였다.

이 제조 방식은 FDM(fused deposition modeling) 방식을 활용하는데 한계를 가지고 있다. 미리 결정된 경로를 따라서 PLA가 섬유상 조직을 갖도록 제작되므로 재료의 물성이 이방성을 갖는다. 출력에 사용한 3D 프린터의 노즐 구경은 0.4 mm이고, 채움 밀도는 50% 그리고 60 mm/sec의 조형 속도로 출력하였다<sup>[13]</sup>. 유한요소 해석의 응력이 집중되는 부위에는 섬유상 조직에 정렬하여 장력을 갖도록 제작하였으나 등방성을 가정한 수학적 모델과는 차이가 있을 것이다. 이러한 차이는 힌지 내부를 PLA가 얼마나 채우고 있는지도 영향을 받는다.

##### 4.2 실험 장치 구성

Fig. 8은 실험에 사용된 장치를 나타낸다.  $\theta_z$ 의 측정을 위해 레이저 센서 optoNCDT 1420을 두 개 설치하였다. 추가적으로 dSPACE를 연결해 측정된 두 센서 신호의 차이를 거리로 나누어 각도를 측정했다. 실험에 사용한 힌지와 이를 고정하는 브라켓은 3D 프린팅으로 출력하였다. Fig. 8이 출력된 힌지를 보여준다. 브



Table 3 Comparison of stiffness of each flexure

Type	$K_{\theta}$ (Nm/rad)		
	FEM	Theoretical	Experiment
Leaf spring	3.886(-)	3.332(14.3% ↓)	4.045(4.09% ↑)
Notch	15.324(-)	14.188(7.41% ↓)	13.635(11.0% ↑)
Cartwheel	14.611(-)	14.679(0.47% ↓)	14.045(3.87% ↑)
Cross axis	2.756(-)	2.654(3.70% ↓)	3.722(37.5% ↑)

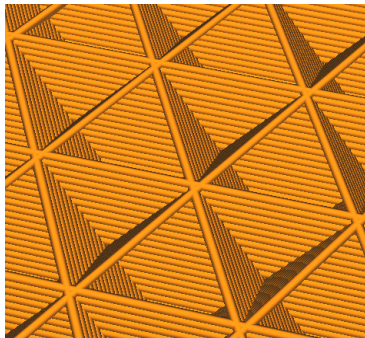


Fig. 10 Infill pattern of flexure

라켓과 힌지를 완전히 결합한 상태에서 바닥면을 수평한 광학 정반에 고정하였다.

### 5. 토론

그래프 Fig. 9는 측정 후 일정 시간이 지나 더 이상의 변형이 측정되지 않을 때의 각도를 나타낸 것이다. 총 5번의 실험을 진행했으며, Fig. 9의 그래프는 그 중 가장 평균값에 가까운 데이터이다. 실험의 결과는 판 스프링 힌지가 2.12°, 노치 힌지가 0.75°, 수레바퀴 힌지가 0.67° 그리고 교차 축 힌지가 2.30°의 회전이 발생했다. 이는 Table 2에 추가하였다. 이 결과값을 바탕으로 강성값을 계산하였다.

실험 강성 값을 이론값과 FEM값과 비교하여 Table 3에 정리하였다. 전체적으로 이론을 통해 구한 값과 FEM을 통해 구한 강성값은 비슷한 경향을 갖는다. 보통 FEM값이 이론 강성값보다 대체로 큰 것을 확인할 수 있다. 실험에서는 FEM 강성값을 참값이라 할 때 큰 오차가 생기는 것도 보인다.

힌지 간의 강성을 비교해보면 노치 힌지와 수레바퀴 힌지의 강성이 거의 유사하며 나머지 두 힌지에 비해 값이 큰 것을 확인할 수 있다. 그 다음은 판 스프링 힌지, 교차 축 힌지의 순서로 강성이 크다. 이 결과를 응력 집중과 강성 값을 동시에 고려하였을 때 신뢰성 있는 제어를 요구하는 상황에서는 가장 응력 집중이 작고 강성이 큰 수레바퀴 힌지가 적합하다. 만약 작은 힘에서 비교적 큰 가동 범위를 요구하는 제어를 한다면 판 스프링 힌지나 교차 축 힌지

중 결정하면 된다. 그러나 하나의 힌지를 특정 지어 유리하다고 할 수 없다. 예를 들어 교차 축 힌지가 유연하고 응력 집중도 작아 유리할 수 있지만, 형태가 매우 특수하므로 판 스프링 형태에 비해 가공비용 측면에서 불리하다. 판 스프링 힌지는 제작은 용이하지만 응력 집중이 문제가 될 수 있다. 따라서 이 두 힌지는 가능한 여건에 따라 적절히 선택해야 한다.

유한요소해석 결과를 참값이라 가정하면 판 스프링 힌지의 강성은 계산에서 -14.26%, 실험에서 +4.09%의 오차를 보인다. 같은 방식으로 노치 힌지는 계산에서 -7.41%, 실험에서 +11.02%이고 수레바퀴 힌지는 계산에서 -0.47%, 실험에서 3.87%다. 마지막으로 교차 축 힌지가 계산에서 -3.70%, 실험에서 +37.5%의 오차가 발생하였다. 교차 축 힌지의 실험값을 제외하고 나머지는 오차범위가 용인한 수준이다.

교차 축 힌지만 큰 오차를 가진 이유에 대해 고찰해보면, 가공과 관련된 문제가 가장 크다고 생각한다. 해당 힌지는 각각의 빔이 교차되는 구조를 가지게 되는데, 이 각각의 빔은 아주 작은 공차 속에서 서로 간섭되지 않아야 정상적인 기능을 할 수 있다. 그러나 일반적인 3D 프린팅 특성상 가공 오차가 발생하고 약간의 가공 오차가 발생할 수 있으므로 적당한 공차를 적용해 모델링을 해야 한다. 이 연구의 제작에서 약간의 유격을 고려했음에도 그 사이에 붕괴 방지를 위한 서포터가 형성되며 불균일한 단면이 형성되었다. 따라서 이러한 영향으로 간섭이 힌지에 영향을 주어 본래 목표한 기술기보다 덜 기울어져 강성의 오차가 크게 나왔다.

### 6. 결론

본 연구에서는 4가지 타입의 힌지를 대상으로 수학적 모델, 유한요소해석, 실험적 방법을 통해 단일 방향에 대한 회전강성을 비교 분석 하였다. 이 과정을 통해 힌지의 강성은 교차 축, 판 스프링, 노치, 수레바퀴 힌지 순서로 높음을 확인할 수 있었다. 교차 축 힌지의 실험적 결과값을 제외한 나머지 강성은 대부분 유사한 값을 얻었다.

그러나 오차가 큰 교차 축 힌지에 대해서는 재실험이 필요하다. 또한 본 실험에서는 3D 프린팅으로 힌지를 제작했지만, 출력 특성상 불균일한 내부 채움성에 따라 강성에 조금씩 영향을 받는 한계를 가지고 있다. Fig. 10은 출력에 사용한 내부 채움 형상이다. 3 mm의 얇은 힌지 내부에서는 사용 가능한 형상은 Zig Zag, Octect, Cubic 이었으며, 3D 프린팅 출력물의 채움 밀도가 100% 이하일 경우 사출 성형 IM(injection molding)방식에 비해 강성이 상대적으로 낮아진다. 특히, 밀도가 낮아질수록 불균일성이 커져 강성이 낮아진다<sup>[14-15]</sup>. 이를 보완하기 위해 사용 가능한 형상 중 가장 강성이

높은 Cubic 구조를 채택하여 설계 성능을 최대한 확보할 수 있도록 하였다<sup>16)</sup>. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 가공물의 내부를 구성하는 각 Cubic에 일정한 방향성을 주지 못했으며, 그 결과 내부에 빈 공간이 존재하는 한계를 가진다.

따라서 재실험을 위해서는 3D 프린팅 공정과 재료의 신중한 선택이 필요하다. 정밀한 공정으로 힌지 부위의 채움 특성이 일정되게 하고 적절한 유격으로 간섭이 최소화되게 해야 한다. 재료 자체가 정밀한 채움이 가능한 것도 사용할 만하다. 이러한 한계에도 불구하고, 여러 형상의 힌지를 비교한 것이 중요하다. 특히 최근 대두되고 있는 3D 프린팅으로 힌지를 제작할 때 고려할 것이 많은 것도 알게 되었다. 이는 향후 정밀한 부품으로 사용되는 각종 힌지의 선택과 가공에 중요한 가이드가 될 것이다.

## 후 기

이 연구는 대한민국 정부가 지원하는 한국연구재단 연구비의 지원을 받아서 수행되었다. (No. RS-2024-00346883)

## References

- [1] Ryu, J. W., Lee, S.-Q., Gweon, D.-G., Moon, K. S., 1999, Inverse Kinematic Modeling of a Coupled Flexure Hinge Mechanism, *Mechatronics*, 9:6 657-674, [https://doi.org/10.1016/S0957-4158\(99\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(99)00006-9).
- [2] Zhou, Q., Ben-Tzvi, P., Fan, D., 2009, Design and Analysis of a Fast Steering Mirror for Precision Laser Beams Steering, *Sensors & Transducers*, 5 104-118.
- [3] Zhu, Z., Zhou, X., Wang, R., Liu, Q., 2015, A Simple Compliance Modeling Method for Flexure Hinges, *Science China Technological Sciences*, 58 56-63, <https://doi.org/10.1007/s11431-014-5667-1>.
- [4] Koseki, Y., Tanikawa, T., Koyachi, N., Arai, T., 2000, Kinematic Analysis of Translational 3-DOF Micro Parallel Mechanism Using Matrix Method, *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)*, 786-792, <https://doi.org/10.1109/IROS.2000.894700>.
- [5] Ma, H.-W., Yao, S.-M., Wang, L.-Q., Zhong, Z., 2006, Analysis of the Displacement Amplification Ratio of Bridge-type Flexure Hinge, *Sens. Actuator A-Phys.*, 132:2 730-736, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.12.028>.
- [6] Cai, K., Tian, Y., Wang, F., Zhang, D., Shirinzadeh, B., 2016, Development of a Piezo-driven 3-DOF Stage with T-shape Flexible Hinge Mechanism, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, 37 125-138, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.07.004>.
- [7] Kang, D., Gweon, D., 2013, Analysis and Design of a Cartwheel-type Flexure Hinge, *Precis. Eng.*, 37:1 33-43, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.005>.
- [8] Tielen, V., Bellouard, Y., 2014, Three-Dimensional Glass Monolithic Micro-Flexure Fabricated by Femtosecond Laser Exposure and Chemical Etching, *Micromachines*, 5:3 697-710, <https://doi.org/10.3390/mi5030697>.
- [9] Choi, K. B., 2005, Dynamics of a Compliant Mechanism based on Flexure Hinges, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C-J. Eng. Mech. Eng. Sci.*, 219:2 225-235, <https://doi.org/10.1243/095440605X8478>.
- [10] Kim, Y.-S., Kim, J.-I., Kim, I.-S., 2010, Modeling and Motion Control of the Precision Positioning Stage with Flexible Hinge Mechanism, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, 9:6 51-58.
- [11] Lobontiu, N., Garcia, E., Hardau, M., Bal, N., 2004, Stiffness Characterization of Corner-filletted Flexure Hinges, *Rev. Sci. Instrum.*, 75:11 4896-4905, <https://doi.org/10.1063/1.1806999>.
- [12] Ling, M., Song, D., Zhang, X., He, X., Li, H., Wu, M., Cao, L., Lu, S., 2022, Analysis and Design of Spatial Compliant Mechanisms using a 3-D Dynamic Stiffness Model, *Mech. Mach. Theory*, 168 104581, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104581>.
- [13] University of Cambridge, n.d., viewed 20 November 2024, Properties of FDM Prints, <[https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/add\\_manuf/fdm.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/add_manuf/fdm.php)>.
- [14] Komal, U. K., Kasaudhan, B. K., Singh, I., 2021, Comparative Performance Analysis of Polylactic Acid Parts Fabricated by 3D Printing and Injection Molding, *J. Mater. Eng. Perform.*, 30 6522-6528, <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05889-9>.
- [15] Verdejo de Toro, E., Coello Sobrino, J., Martínez Martínez, A., Miguel Eguía, V., Ayllón Pérez, J., 2020, Investigation of a Short Carbon Fibre-Reinforced Polyamide and Comparison of Two Manufacturing Processes: Fused Deposition Modelling (FDM) and Polymer Injection Moulding (PIM), *Materials*, 13:3 672, <https://doi.org/10.3390/ma13030672>.
- [16] Na, D. H., Kim, S. G., 2022, A Study on Tensile Strength According to Various Output Conditions of PLA+ Materials Using 3D Printing, *Trans. Mater. Process.*, 31:2 89-95, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2022.31.2.89>.

	<p><b>Ji Hwan Yoon</b> Graduate Student in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Precision Design and Drone Technology. E-mail: yky2313@ajou.ac.kr</p>
	<p><b>Hyun Tae Kim</b> Graduate Student in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Precision Design and Control. E-mail: whyshop@ajou.ac.kr</p>
	<p><b>Yong ho Jeon</b> Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests are Developing Novel Manufacturing Processes using Heat and Vibration and their Effects of Processes on the Material Characteristics. E-mail: princaps@ajou.ac.kr</p>
	<p><b>Moon Gu Lee</b> Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Design of Precision System and Medical Devices. E-mail: moongulee@ajou.ac.kr</p>