

이중 곡률 셸 모양의 소프트 회전 액추에이터 변형에 대한 수식적 접근

Analytical Approach to Deformation of a Soft Rotary Actuator with Double Curvature Shell Shape

이영민¹·최혁렬²·구자춘[†]

Young min Lee¹, Hyouk ryeol Choi², Ja choon Koo[†]

Abstract: In this paper, we considered the deformation shape of the soft rotation actuator as a double curvature shell and proceeded with the analytical development. Since the response of the hyperelastic material has a large nonlinear deformation, the analytical approach is very complicated and the solution cannot be easily obtained. It is assumed that the behavior of the flexible body, which is a superelastic material, takes the form of a double curvature shell, and the formulas for calculating the deformation are simplified. In this process, equilibrium equations in the related coordinate system representing a double curvature shell were derived. In addition, assuming a thin shell, the stress component in the thickness direction was ignored, and the equation was developed by adding the assumption of free rotation without load. In order to verify the analytically calculated value in this way, an experiment was conducted and the results were compared.

Keywords: Double Curvature Shell, Soft Actuator, Hyperelasticity

1. 서론

최근 들어서, 소프트 로봇에 대한 폭 넓은 연구가 다양한 분야에서 진행되고 있다. 소프트 로봇에 대비되는 강체 로봇은 그 정밀성과 정확도가 뛰어나 현재 산업 전반의 분야에서 사용되어 제품들을 양산하는데 큰 도움이 되고 있다. 반면, 소프트 로봇은 강체 로봇에 비해 상대적으로 인간과 상호작용하는데 용이하므로 실생활에서 사용될 수 있는 로봇의 형태로 각광을 받고 있다. 특히, 부드러운 물체인 농작물 등을 파지하기 위해서 다양한 소프트 그리퍼들이 연구 중이고, 웨어러블 로봇과 같이 사람이 직접 착용하여 사용될 수 있는 소프트 로봇

의 형태에 대한 연구가 활발하다¹⁻⁴.

이러한 소프트 로봇의 한 종류라고 볼 수 있는 소프트 액추에이터는 현재 그 작동에 의해 발생하는 변형의 종류에 따라 굽힘(bending)과 팽창(extension), 수축(contraction), 꼬임 및 회전(twisting, or rotating) 액추에이터로 분류될 수 있다. 이중 굽힘 액추에이터는 소프트 그리퍼와 관련하여 소프트 액추에이터 분야에서 가장 활발하게 연구되고 있는 대상이다^{5,6}. 팽창 및 수축 액추에이터로 가장 대표되는 액추에이터는 인공근육(Pneumatic Artificial Muscle, PAM)으로 액추에이터의 무게에 비해 큰 힘을 낼 수 있는 것이 특징이다. 반면 꼬임 및 회전에 관해서는 상대적으로 적은 연구들이 진행되고 있지만, 현재 회전 액추에이터인 전기 모터가 가장 빈번하게 사용되고 있는 것을 감안한다면 회전 액추에이터에 대해 더 많은 연구가 진행될 필요가 있다^{7,8}.

반면, 현재 소프트 액추에이터에 대한 다양한 작동 방식들이 제시되었지만, 액추에이터 변형의 수치적인 계산이나 변형의 제어에 관한 연구는 상대적으로 초기 단계이므로 활발한 연구가 요구된다. 그러나, 이러한 유연 복합체는 초탄성 거동을 따르는 유연체 때문에 응력이 변형률에 선형적으로 비례하

Received : Dec. 30. 2021; Revised : Jan. 15. 2022; Accepted : Jan. 20. 2022

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2020R1A4A1018227)

1. PhD Student, Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (zxcvfgb@skku.edu)

2. Professor, Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (choihyoukryeol@gmail.com)

† Associate Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (jckoo@skku.edu)

지 않는다. 따라서 초탄성 물질의 변형에 대한 표현에서는 응력과 변형률이 선형의 관계를 맺는 기존의 Hooke's law 대신에, Neo-hookean, Yeoh 모델 등 변형 에너지 기반의 비선형 관계식이 주로 사용된다.

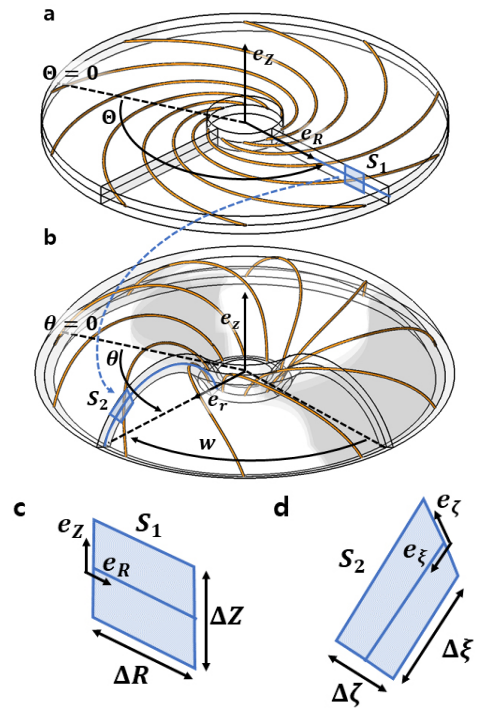
이 논문에서는 회전 소프트 액추에이터의 수치적 변형에 관한 연구를 진행하였다. 변형률과 응력의 관계는 Neo-hookean 모델을 사용하였으며, 수식 전개 편의성을 위해 액추에이터의 중간면이 이중 곡률의 셸 형태를 가진다고 가정하였다. 2.1장에서 소프트 액추에이터가 변형하는 형태에 대한 설명과 그 형태를 표현하는 좌표계의 기술, 그 좌표계에서의 평형 방정식을 기술한다. 2.2장에서 초 탄성체 모델을 사용하여 응력 관계식을 설정하고, 경계 조건에 관한 서술을 진행한다. 2.3장에서 주어진 조건과 식들을 연립하여 주어진 형태를 수치적 계산하는 과정을 기술한다. 3장에서 계산한 식을 검증하기 위한 실험 진행에 관한 서술을 하고, 4장에서 실험과 수식 해에 대한 비교 및 분석을 진행한다.

2. 수식적 접근

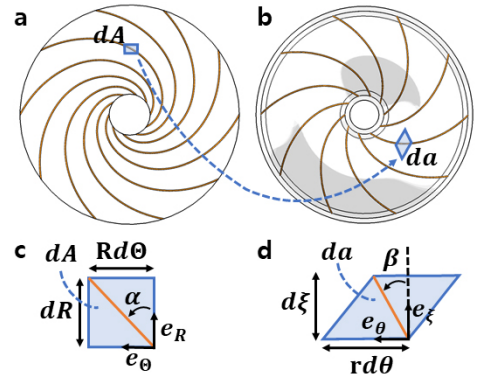
2.1 액추에이터 변형 형상 및 좌표계

2.1.1 액추에이터 변형 원리와 형태 기술

액추에이터를 측면과 윗면에서 관측할 때, 공압을 가하기 전과 후의 액추에이터 형상은 [Fig. 1(a-b)]에 표현된 바와 같다. 파란색으로 표시된 유연체의 중간면에 지정된 경로를 따라 유연체보다 상대적으로 강성이 높은 실이 위치한다. 실의 강성이 유연체의 강성보다 매우 크므로, 실의 접선 방향으로 유연체가 거의 변형하지 않는다고 할 수 있으므로 실은 유연체의 변형 제한 요소로 작용한다. [Fig. 2(c)]와 같이, 단위 유연체 면적에 실의 각도가 지름 방향에 대해서 α 만큼 기울어진 채 배치가 되어 있다고 가정한다. 아무런 제약 조건이 없다면 유연체는 사방으로 등방성 팽창을 하겠지만, 실의 강성 때문에 실이 배치된 방향으로 팽창하지 못한다. 따라서 단위 유연체는 변형 시 비등방성 변형을 하며, [Fig. 2(b)]와 같이 지름 방향에 대해 β 의 각도를 가지며 전단 변형을 나타내게 된다. 결국, 실의 비등방성 배치로 인해 등방적 특징의 공압에 의해 유연체가 변형되면서 유연체의 바깥쪽 원주가 안쪽 원주에 대해 상대적으로 회전하는 움직임을 [Fig. 1(a-b)]와 같이 낼 수 있다. 따라서, 변형 전 θ 에 위치한 요소 S_1 의 요소가 변형 후 θ 에 위치한 요소 S_2 으로 이동하여 w 만큼의 회전이 발생한다. 여기서 스칼라 w 는 음수의 값을 갖기 때문에 θ 의 방향과 다르게 표기되었다.



[Fig. 1] (a-b) Undeformed and deformed configuration of suggested soft rotary actuator with related coordinate systems (R, Θ, Z) and (r, θ, z) . (c-d) The segments S_1, S_2 of the undeformed and deformed configuration is described in coordinates (R, Θ, Z) and (ξ, θ, ζ) , where ξ denotes the length of the meridian direction and ζ does that of the thickness direction



[Fig. 2] (a-b) Figures describing undeformed and deformed actuator in top view. (c-d) The associated infinitesimal area normal to mid-surface with related coordinates (R, Θ, Z) and (ξ, θ, ζ) . α, β are the direction of fiber in undeformed and deformed configurations with respect to R and ξ

2.1.2 이중 곡률 셸의 좌표계 기술

유연체의 회전을 수식적으로 기술하기 위해서는 유연체의 형태를 수식적으로 표현하여 관련 식을 풀 수 있어야 한다. 유연체는 [Fig. 1(a-b)]에서 보이는 것처럼 두께가 일정한 고리 모양의 판에서 곡률을 가지며 변형하게 된다. 변형 전의

유연체를 적절하게 표시할 수 있는 좌표계는 원통 좌표계로, $(Q^1, Q^2, Q^3) = (R, \theta, Z)$ 를 독립 변수로 설정하였다. 변형 후에는 중간 면의 곡선을 따르는 길이인 ξ 를 기반으로 회전량을 나타내는 θ 와 유연체의 두께 방향의 길이 ζ 를 사용하여 좌표계 $(q^1, q^2, q^3) = (\xi, \theta, \zeta)$ 로 변형 후의 형상을 수학적으로 기술할 수 있다. 여기서 유연체가 변형 때문에 회전하는 크기 w 는 다음 식 (1)으로 표현된다.

$$w = \theta - \Theta \quad (1)$$

변형 전과 변형 후의 요소를 비교한 [Fig. 1(c-d)]와, 식 (1)을 참고하여 변형 간 수직적 연관을 짓는 변형 텐서 (deformation tensor), \mathbf{F} , 는 다음 식 (2)와 같이 구해진다⁸⁾.

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \xi_R & 0 & 0 \\ rw_R & \frac{r}{R} & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{where } \xi_R = \frac{\partial \xi}{\partial R}, w_R = \frac{\partial w}{\partial R}, \zeta_Z = \frac{\partial \zeta}{\partial Z}.$$

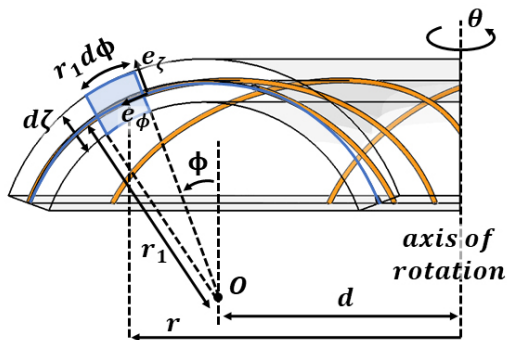
변형 후의 유연체의 중간 면이 이중 곡률 셸의 형상을 띠고 가정하면, [Fig. 3]과 같은 좌표계를 설정할 수 있다.

따라서, 중간 면의 곡선을 따르는 길이인 ξ 를 이중 곡률의 회전축으로부터 d 만큼 떨어진 원점 O 으로부터 반지름 r_1 과 각도 ϕ 를 사용하여 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$d\xi = r_1 d\phi \quad (3)$$

또한, 회전축으로부터 미소요소까지의 거리 r 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r = d + r_1 \sin \phi. \quad (4)$$



[Fig. 3] The mid plane (blue line) of elastomer described in double curvature shell shape and related parameters with corresponding segment

2.1.3 유연체의 변형에 따른 실 각도 변형

위 식 (2)으로 유연체의 변형 전과 후의 관계를 밝혀내었으므로, 유연체에 부착되어 방향이 변형되는 실의 형상도 특징지를 수 있다. [Fig. 2(c-d)]로부터 변형 전과 후의 실의 방향 벡터는

$$M = \cos \alpha \mathbf{e}_R + \sin \alpha \mathbf{e}_\theta \quad (5a)$$

$$m = \cos \beta \mathbf{e}_\phi + \sin \beta \mathbf{e}_\theta. \quad (5b)$$

따라서, 다음 식 (6)이 성립한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{m} = \mathbf{F}\mathbf{M} &= \begin{pmatrix} r_1 \phi_R & 0 & 0 \\ rw_R & r/R & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= r_1 \phi_R \cos \alpha \mathbf{e}_\phi + (rw_R \cos \alpha + r/R \sin \alpha) \mathbf{e}_\theta \\ &= \cos \beta \mathbf{e}_\phi + \sin \beta \mathbf{e}_\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 각 성분의 값이 같아야 하므로 변형 후의 실의 각도는 다음 조건식 (7-9)을 만족한다.

$$\cos \beta = r_1 \phi_R \quad (7)$$

$$\sin \beta = (rw_R \cos \alpha + \frac{r}{R} \sin \alpha) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{m} \cdot \mathbf{m} &= \cos^2 \beta + \sin^2 \beta \\ &= (r_1 \phi_R \cos \alpha)^2 + (rw_R \cos \alpha + \frac{r}{R} \sin \alpha)^2 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

2.1.4 이중 곡률 셸 좌표계에서의 평형 방정식

이중 곡률 셸을 표현하기 위한 좌표계에서 평형 방정식은 해당 좌표계에서의 평형 방정식을 유도하기 위한 계량 텐서(metric tensor), \mathbf{g} ,와 Christoffel, Γ , 값은 다음과 같다⁹⁾. 여기서 벡터 \mathbf{e}_i 는 이중 곡률 셸 위의 임의의 점에 대한 위치 벡터 $\mathbf{r} = q^i \mathbf{e}_i$ 로 표현되는 변수 $(q^1, q^2, q^3) = (\phi, \theta, \zeta)$ 의 단위 벡터이다.

$$\mathbf{g} = [g_{ij}] = [\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j] = \begin{pmatrix} (r_1)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (r)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\Gamma_{13}^1 = \Gamma_{31}^1 = r_1^{-1} \quad (11a)$$

$$\Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = \frac{r_1}{r} \cos \phi \quad (11b)$$

$$\Gamma_{11}^3 = -r_1 \quad (11c)$$

$$\Gamma_{22}^1 = -\frac{r}{r_1} \cos \phi \quad (11d)$$

$$\Gamma_{23}^2 = \Gamma_{32}^2 = \frac{1}{r} \sin \phi \quad (11e)$$

$$\Gamma_{22}^3 = -r \sin \phi. \quad (11f)$$

또한, 관성항과 체적힘을 무시한 응력 평형 방정식의 각 성분은 아래 식 (12)와 같이 나타난다⁹⁾.

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial q^j} (\sqrt{g} \sigma^{ij}) + \Gamma_{mn}^j \sigma^{mn} = 0 \quad (12)$$

where $\sqrt{g} = \sqrt{\det(\mathbf{g})}$.

위 식 (11)에 명시된 Christoffel 값을 평형 방정식 (12)에 대입하면 각 성분에 대한 평형 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{r_1} \frac{\partial \sigma^{\phi\phi}}{\partial \phi} + \frac{\cos \phi}{r} (\sigma^{\phi\phi} - \sigma^{\theta\theta}) = 0 \quad (13a)$$

$$\frac{1}{r_1} \frac{\partial \sigma^{\phi\theta}}{\partial \phi} + \frac{2}{r} \cos \phi \sigma^{\phi\theta} = \frac{\partial}{\partial \phi} (r^2 \sigma^{\phi\theta}) = 0 \quad (13b)$$

$$\frac{\partial \sigma^{\zeta\zeta}}{\partial \zeta} - \frac{1}{r_1} \sigma^{\phi\phi} - \frac{\sin \phi}{r} \sigma^{\theta\theta} + \frac{r + r_1 \sin \phi}{rr_1} \sigma^{\zeta\zeta} = 0. \quad (13c)$$

2.2 응력

2.2.1 유연체와 실의 응력

유연체와 실이 결합하여 있는 복합체의 응력은 유연체에 의한 응력과 실에 의한 응력으로 구별할 수 있다. 통상적으로 유연체인 초 탄성체의 거동을 표현하는 모델은 비선형성을 나타낼 수 있는 모델을 사용한다. 그 예시로, Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh 등 에너지 기반의 비선형 모델을 사용한다. 변형 텐서의 함수로 나타내어지는 각 모델이 표현하는 변형 에너지 밀도 함수(strain energy density function), $W(\mathbf{F})$ 으로부터 비압축성 물질의 코시 응력(Cauchy stress), σ , 는 아래 식 (14)로 나타내어진다.

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \mathbf{F}} \mathbf{F}^T - p_h \mathbf{I}. \quad (14)$$

여기서 p_h 는 비압축성 조건으로 발생하는 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)이다. 이 논문에서는 표현 방식이 간단하지만, 일정 범위 내에서 유연체 거동의 비선형성을 잘 나타낼 수 있는 Neo-Hookean 모델을 사용한다. 비압축성 물질의 Neo-hookean 모델의 변형 에너지 밀도 함수 $W_e(\mathbf{F})$ 는 아래 식 (15)으로 나타난다.

$$W_e(\mathbf{F}) = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3). \quad (15)$$

여기서 μ 는 물성치를 나타내는 상수이고, I_1 는 주 변형률(principal stretches), λ_i , 에 대한 함수로 변형 텐서의 첫 번째 불

변량이며, $I_1 = \lambda^2 + \lambda^2 + \lambda^2$ 이다. 또한, 실을 포함하고 있고, 특정 방향으로 늘어나지 않는 특징을 반영하기 위해 실의 에너지 함수, W_f , 를 고려한다. W_f 는 불변량 I_4 의 함수이며, $I_4 = \mathbf{m} \cdot \mathbf{m} = 1$ 이다. 따라서 유연체와 실에 의한 응력은 에너지 밀도 함수의 합인 $W = W_e + W_f$ 와 식 (14)로부터 다음 식 (16)으로 계산된다⁸⁾.

$$\sigma = -p_h \mathbf{I} + \mu \mathbf{B} + 2W_f' \mathbf{m} \otimes \mathbf{m} \quad (16a)$$

$$\sigma_{\phi\phi} = -p_h + \mu (r_1 \phi_R)^2 + 2W_f' \cos^2 \beta \quad (16b)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -p_h + \mu (rg_R)^2 + (r/R)^2 + 2W_f' \sin^2 \beta \quad (16c)$$

$$\sigma_{\phi\theta} = \mu (r_1 \phi_R r g_R) + 2W_f' \sin \beta \cos \beta \quad (16d)$$

$$\sigma_{\zeta\zeta} = -p_h + \mu \zeta_Z^2 \quad (16e)$$

2.2.2 액추에이터의 경계 조건

액추에이터의 제작에서, 유연체의 내측 원주와 외측 원주를 고정하게 된다. [Fig. 4]에서 보여지는 것처럼 유연체를 측면도에서 바라볼 때, 유연체의 중간 면 중 내측 원주와 만나는 점을 P_i , 외측 원주와 만나는 점을 P_f 로 설정한다. 변형 전과 변형 후의 점 P_i 와 P_f 는 좌표계에서 높이 방향과 지름 방향으로 이동하지 않기 때문에 P_i 의 변형 후 반지름 r_i 와 높이 h_i 는, 변형 전의 반지름 R_i 와 높이 H_i 와 같다. 같은 방식으로 점 P_f 에도 적용할 수 있으므로, 유연체 요소의 반지름에 대해 서술한 식 (4)에 의해 다음 식 (17)이 성립한다.

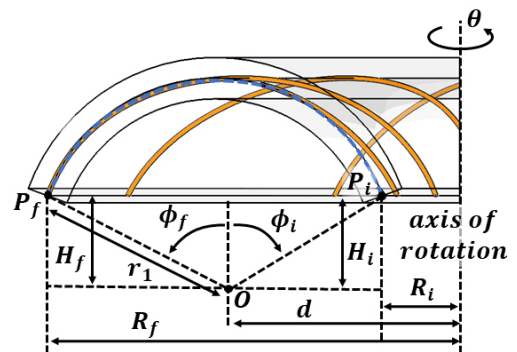
$$r_i = R_i = d + r_1 \sin \phi_i \quad (17a)$$

$$r_f = R_f = d + r_1 \sin \phi_f \quad (17b)$$

$$h_i = H_i = r_1 \cos \phi_i = h_f = H_f = r_1 \cos \phi_f \quad (17c)$$

where ϕ denotes the angle of point P in coordinate (ϕ, θ, ζ) .

[Fig. 4]에서 ϕ_i 는 음수의 값을 가지므로 양수의 값을 가지는



[Fig. 4] Figure describing the boundary condition of a double curvature shell

ϕ_f 의 방향과는 다르게 그려졌다. 식 (17c)로부터 $\phi_f = -\phi_i = \phi_0$ 인 ϕ_0 을 설정할 수 있으며, 다음 식 (18)이 만족한다.

$$d = \frac{1}{2}(R_i + R_f) \quad (18a)$$

$$r_1 \sin \phi_0 = \frac{1}{2}(R_f - R_i) \quad (18b)$$

2.3 평형 방정식 대입과 풀이

이 논문에서 액추에이터의 형상을 푸는 과정에서 위 평형 방정식에 더하여 몇 가지 가정 및 설정을 추가하였다. 우선, 액추에이터의 출력단에 하중이 없다는 가정을 하였다. 또한, 셀로 이루어진 구조체에 쓰이는 가정인, 유연체 두께 방향의 응력은 다른 응력 성분 값보다 매우 작다고 가정하며, 두께 방향에 일정한 비율로 응력이 증가한다고 가정한다. 그리고 두께 방향의 변형률은 일정하여, 유연체의 변형 후의 두께를 h 라 하면 $\zeta_z = h/H$ 이다. 위 가정에 의해 다음 식 (19)이 만족한다.

$$2W_f' = -\frac{\mu r_1 \phi_R r g_R}{\cos \beta \sin \beta} \quad (19)$$

$$p_h = \mu \zeta_z^2 = \mu (h/H)^2 \quad (20)$$

또한, 세 번째 가정에 의해 식 (13c)은 다음과 같이 표현된다. 여기서 p_a 는 유연체의 밀면에 작용하는 압력의 크기이며, 반지름보다 유연체의 두께가 매우 작다면 다음 식 (21)과 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{p_a}{h} - \frac{1}{r_1} \sigma^{\phi\phi} - \frac{\sin \phi}{r} \sigma^{\theta\theta} + \frac{r+r_1 \sin \phi}{rr_1} \sigma^{\zeta\zeta} &= 0 \quad (21) \\ \approx \frac{p_a}{h} - \frac{1}{r_1} \sigma^{\phi\phi} - \frac{\sin \phi}{r} \sigma^{\theta\theta} \\ \Leftrightarrow \frac{1}{r_1} \sigma^{\phi\phi} + \frac{\sin \phi}{r} \sigma^{\theta\theta} &= \frac{p_a}{h} \end{aligned}$$

또한, 비압축성 유연체라는 가정에 의해 아래 식 (22)이 성립한다.

$$\det(\mathbf{F}) = r_1 \phi_R \frac{rh}{RH} = 1 \quad (22)$$

여기서 풀이의 용이함을 위해 다음 치환을 진행하였다.

$$x = r_1 \phi_R, y = r g_R, \lambda_r = r/R, \lambda_h = h/H$$

식 (2, 7, 8, 22)을 위 변수로 치환하고 R에 대해 미분하고 정리하면,

$$\frac{\partial \lambda_r}{\partial R} = \frac{x \cos \phi - \lambda_r}{R} \quad (23)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial R} = -\frac{\cos \alpha}{\sin \beta} \frac{\partial x}{\partial R} \quad (24)$$

$$\frac{\partial y}{\partial R} = -\cot \beta \frac{\partial x}{\partial R} - \tan \alpha \frac{\partial \lambda}{\partial R} \quad (25)$$

$$\frac{\partial \lambda_h}{\partial R} = \lambda_h \left(-\frac{1}{x} \frac{\partial x}{\partial R} - \frac{1}{\lambda_r} \frac{\partial \lambda_r}{\partial R} \right). \quad (26)$$

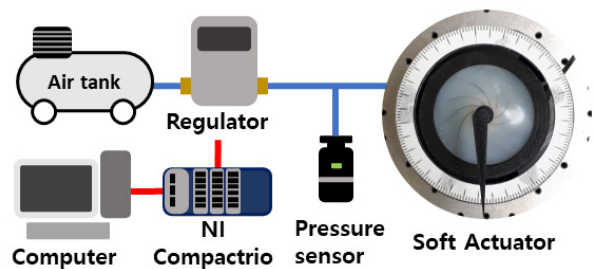
위 식 (23-26)을 평형 방정식 (13a)에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial R} &= \left[\frac{\cos \phi}{\mu} (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\phi\phi}) - \left(\frac{2\lambda_h^2}{\lambda_r} + x \cot \beta \tan \alpha \right) \right. \\ &\quad \left. \frac{x \cos \phi - \lambda_r}{R} \right] / (2x - y \cot \beta + 2\lambda_r \lambda_h^3 + \\ &\quad x \cot^2 \beta - \frac{xy \cos \alpha}{\sin^3 \beta}). \end{aligned} \quad (27)$$

따라서 식 (23-27)을 활용하여 $r = R = R_i$ 에서 $r = R = R_f$ 까지 수치 적분하여 형상을 계산할 수 있다. 이렇게 구해진 값들을 식 (21)에 대입하면 해당 형상이 되기 위한 압력 p_a 를 구할 수 있다.

3. 실험

계산 값을 검증하기 위한 실험 구성은 아래 [Fig. 5]와 같이 구성하였다. 소프트 액추에이터 지정한 공압을 입력하기 위한 공압 레귤레이터는 SMC ITV0050-2ML을 사용하고, 24V의 직류 전원을 공급하기 위해 DP30-03CF와 UP-3005D를 사용하였다. 유연체 내부에 가해지는 압력을 측정하기 위한 압력



[Fig. 5] Figures showing the amount of rotation according to the pneumatic pressure of an actuator with design parameter $\alpha = 43.18$ degree. 0, 5.4, 7.2, 9, 10.8, 12.6 kPa in the order of (a-d)

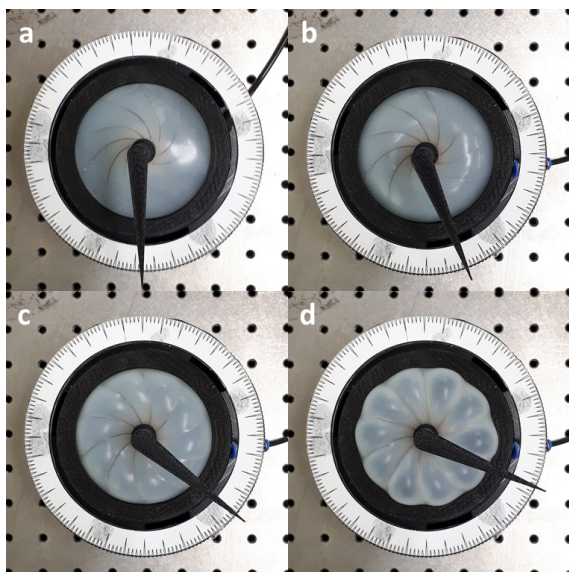
[Table 1] Dimension and properties of manufactured actuators

Radius	Inner	7.5 mm
	Outer	40 mm
Thickness		4 mm
Material	Elastomer	Ecoflex 0030
	Fiber	Dyneema
	modulus, μ	22.081 KPa ^[10]

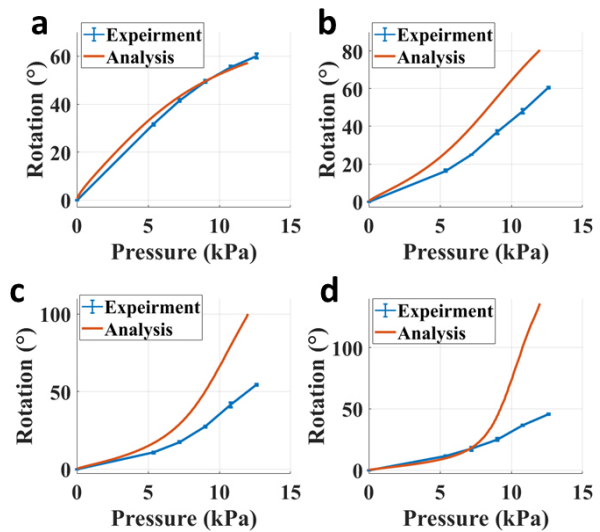
센서는 SDE5-V1-NF-Q6E-V-M8를 사용하고, 레귤레이터의 공급 값 입력과 센서값 취득 장비로는 cRio-9024와 NI 9264, 9205 모듈을 사용하였다. 실험은 각기 다른 α 값을 가지는 네 가지 액추에이터를 제작하고, 5.4, 7.2, 9.0, 10.8, 12.6 kPa의 압력을 세 번 반복하여 가압하고, 소프트 액추에이터의 회전량은 [Fig. 5]에 나타난 바와 같이 유연체의 내측 샤프트에 부착한, 3D 프린터로 출력한 각도기로 측정하였다. α 값은 43.18, 61.95, 70.44, 75.08 degree로 설정하였다. 액추에이터의 크기와 재질에 대한 정보는 아래 [Table 1]에 정리하였다.

4. 결 과

아래 그림 [Fig. 6]에서 나타난 바와 같이, 각 압력에 대해 회전 액추에이터의 회전을 3D 프린터로 출력한 각도기로 측정하는 실험을 진행하였다. 실험으로 취득한 데이터와 수치 적분하여 얻은 수식 데이터를 [Fig. 7]에 정리하였다. 세 번의 실험



[Fig. 6] Figures showing the amount of rotation according to the pneumatic pressure of an actuator with design parameter $\alpha=43.18$ degree. 0, 5.4, 7.2, 9, 10.8, 12.6 kPa in the order of (a-d)



[Fig. 7] Graph comparing rotation values obtained from experiments and analytic approach. In the order of a-d, the values of the parameter α are 43.18, 61.95, 70.44, 75.08 degree

험을 통해 얻은 실험 데이터는 에러 바를 사용하여 과란 실선으로 그렸으며, 수식 데이터는 빨간 실선으로 표현하였다. [Fig. 7(a-d)]는 순서대로 $\alpha=43.18, 61.95, 70.44, 75.08$ degree인 모델에 대한 데이터이다. 첫 번째 모델의 실험 데이터와 수식 데이터가 오차가 가장 적고, α 가 커질수록, 압력이 커질수록 실험 데이터와 수식 데이터의 오차가 커지는 경향을 보였다. $\alpha=43.18$ degree인 모델의 경우, 5 kPa과 10.8 kPa에서의 오차가 10.49%, 1/05%로 상당히 정확했던 반면 $\alpha=61.95, 70.44, 75.08$ degree 모델의 경우 같은 압력에서 순서대로 52.39, 47.125, 56.40, 90.37, 17.64, 172.5%에 달하는 큰 오차를 보였다. 따라서 $\alpha=43.18$ degree 모델에서 액추에이터의 형상이 이중 곡률 셸의 형태를 띤다고 가정하는 것은 타당한 가정이라고 할 수 있다. 그러나, 다른 α 값들에 대해서는 상당히 낮은 압력인 5.4 kPa에서도 평균적으로 42.14%에 달하는 오차가 발생하기 때문에 제안 모델이 제한적이다. 이러한 오차에 대한 원인은 다음 세 가지를 들 수 있다.

첫 번째로, α 가 작을수록 변형 형상이 이중 곡률 셸과 유사하여 회전 값이 더욱 정확할 수 있다. 액추에이터 모델에서 유연체의 형상을 이중 곡률 셸로 근사하였지만, 실제 액추에이터 거동은 정확한 이중 곡률 셸이 아니기 때문이다. 상대적으로 낮은 압력에서는 네 가지 모델 모두 비슷한 경향성을 보이거나 압력과 변형률이 점차 커짐에 따라 오차가 증가하는 것을 근거로 들 수 있다. 두 번째로, 압력이 커질수록 오차가 늘어나는 경향은 유연체 모델을 상대적으로 간단한 Neo-Hookean 모델을 사용함에 수반되는 결과일 수 있다. Neo-hookean 모델은 유연체를 표현하는 초탄성 모델 중 파라미터를 가장 적게 사

용하고 그 표현이 간단하다. 따라서 20%의 변형률까지는 높은 정확도를 보여주지만, 그 이상에서는 실제 거동을 정확하게 추정하지 못하는 단점이 있으므로, 초 탄성체 모델의 선택에 따른 오차일 수 있다. 세 번째로, 액추에이터 모델링을 진행할 때 실의 배치가 모든 단위 유연체에 할당되어 있다고 가정하였다. 그러나 실제 제작에 있어 제작상의 한계로 배치할 수 있는 실의 한계가 존재한다. 따라서 [Fig. 7]에 나타난 것과 같이 높아지는 압력에서 실이 위치할 근방의 유연체 거동과 실이 위치하지 않은 곳의 유연체 거동이 다르기 때문에 회전 값에 차이가 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 실이 위치하지 않은 곳의 유연체는 실에 의한 변형의 제한이 없으므로 회전에 기여하는 바가 없다. 따라서 수직적 데이터가 실험 데이터보다 큰 경향성이 설명된다.

5. 결 론

이 논문에서는 유연체의 변형 형상을 이중 곡률 셸로 가정하였다. 이중 곡률 셸의 구조에서의 평형 방정식을 유도하였으며, 유연체를 Neo-Hookean 초탄성체 모델을 사용하여 얻은 응력 식을 평형 방정식과 연립하여 회전 값을 얻었다. 이를 검증하기 위해 서로 다른 네 가지의 α 의 액추에이터를 제작하여 비교 분석하였다. $\alpha=43.18$ degree인 모델에서는 수직 데이터와 실험 데이터의 오차가 적었으나, α 가 증가하고 압력이 증가함에 따라 오차가 커지는 경향성을 보였다. 따라서, 이중 곡률 셸은 상대적으로 적은 회전이 발생하는 모델의 거동은 적절하게 설명할 수 있으나 더 많은 변형률을 수반하는 모델의 거동은 표현할 수 없다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해서는 다음 두 가지를 고려해볼 수 있다. 첫 번째로, 유연체의 형상을 보다 정확하게 기술할 수 있는, 이중 곡률 셸이 아닌 다른 형태를 가정하는 것이다. 두 번째로, 변형 시 이중 곡률 셸의 형상을 띄도록 액추에이터의 디자인 파라미터를 변화시키는 것이다. α 값이 변함에 따라 실험 데이터와 수직 데이터 간의 오차가 변화되었다는 것에 착안하여, α 를 상수가 아닌 R 에 대한 함수로 설정하여 이중 곡률 형상을 띄도록 디자인할 수 있다면 실험과 수직 데이터 간의 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea, "Soft robotic grippers," *Advanced Materials*, vol. 30, no. 29, 2018, DOI: 10.1002/adma.201707035.
- [2] Y. Li, Y. Chen, Y. Yang, and Y. Wei, "Passive Particle Jamming and Its Stiffening of Soft Robotic Grippers," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 2, pp. 446-455, 2017, DOI: 10.1109/tro.2016.2636899.
- [3] H. K. Yap, H. Y. Ng, and C.-H. Yeow, "High-Force Soft Printable Pneumatics for Soft Robotic Applications," *Soft Robotics*, vol. 3, no. 3, pp. 144-158, 2016, DOI: 10.1089/soro.2016.0030.
- [4] Z. Q. Tang, H. L. Heung, K. Y. Tong, and Z. Li, "Model-based online learning and adaptive control for a "human-wearable soft robot" integrated system," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 40, no. 1, pp. 256-276, 2019, DOI: 10.1177/0278364919873379.
- [5] P. Polygerinos, Z. Wang, J. T. B. Overvelde, K. C. Galloway, R. J. Wood, K. Bertoldi, and C. J. Walsh, "Modeling of Soft Fiber-Reinforced Bending Actuators," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 3, pp. 778-789, 2015, DOI: 10.1109/TRO.2015.2428504.
- [6] Z. Wang, P. Polygerinos, J. T. B. Overvelde, K. C. Galloway, K. Bertoldi, and C. J. Walsh, "Interaction Forces of Soft Fiber Reinforced Bending Actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 2, pp. 717-727, 2017, DOI: 10.1109/TMECH.2016.2638468.
- [7] X. Gong, K. Yang, J. Xie, Y. Wang, P. Kulkarni, A. S. Hobbs, and A. D. Mazzeo, "Rotary Actuators Based on Pneumatically Driven Elastomeric Structures," *Advanced Materials*, vol. 28, no. 34, pp. 7533-7538, 2016, DOI: 10.1002/adma.201600660.
- [8] Y. M. Lee, H. J. Lee, H. Moon, H. R. Choi, and J. C. Koo, "Analytical modeling for design and performance evaluations of a new low aspect ratio soft rotary pneumatic actuator," *Smart Materials and Structures*, vol. 29, no. 12, 2020, DOI: 10.1088/1361-665X/abbf5.
- [9] L. Lebedev, M. Cloud, and V. Eremeyev, "Tensor analysis with applications in mechanics," *World Scientific Publishing Co Pte Ltd*, 2010, DOI: 10.1142/7826.
- [10] J. Sparks, N. A. Vavalle, K. E. Kasting, B. Long, M. L. Tanaka, P. A. Sanger, K. Schnell, and T. A. Conner-Kerr, "Use of Silicone Materials to Simulate Tissue Biomechanics as Related to Deep Tissue Injury," *Advances in Skin & Wound Care*, vol. 28, no. 2, pp. 59-68, 2015, DOI: 10.1097/01.asw.0000460127.47415.6e.



이 영 민

2017 성균관대학교 기계공학과(학사)
2017~현재 성균관대학교 기계공학과
(석박사 통합과정)

관심분야: Soft actuator, Nonlinear modeling, Nonlinear control



구 자 춘

1989 한양대학교 기계공학과(공학사)
1992 Mechanical Engineering University of
Texas at Austin(공학석사)
1997 Mechanical Engineering University of
Texas at Austin(공학 박사)
1997~2001 IBM 연구원
2001~ 성균관대학교 기계공학부 교수

관심분야: Robotic Mechanism Design, Human Machine
Interactions, Actuators, Sensors, Control of Dynamic system



최 혁 렬

1984 서울대학교 기계공학과 졸업
1986 한국과학기술연구원 석사
1994 포항공대 기계공학과 박사
1986~1989 LG Electronics 정보기술연구소
연구원
1993~1995 일본 교토대학 객원연구원
1995~현재 성균관대학교 기계공학부 교수

관심분야: Soft robotics, Field robotics, Dexterous hand, Quadruped
robots, Tactile interface, and Artificial muscle actuator