

변수변화에 따른 가변강성 메커니즘의 강성변화 경향성에 관한 연구

함기범¹, 한지호², 전종균¹, 박용재^{*}
¹선문대학교 기계공학과, ²선문대학교 전자공학과

Parametric Study on the tendency of Stiffness Variation using Variable Stiffness Mechanism

KiBeom Ham¹, Jiho Han², JongKyun Jeon¹, YongJai Park^{*}

¹School of Mechanical Engineering, SunMoon University

²Department of Electronic Engineering, SunMoon University

요약 일반적으로 시스템을 강성체로 설계할 경우 시스템의 구조적 안정성을 확보할 수 있으나 유리잔을 잡거나 작은 수술 용 도구로 사용하는 등의 사용용도에 따라 활용성이 제한될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 유연한 재질을 사용하여 강성조절이 가능한 메커니즘에 대한 연구가 다양하게 이루어져 왔다. 기존에 연구했던 강성체와 연성체의 연속구조로 이루어진 모델에 텐던을 삽입한 구조를 이용한 가변강성 메커니즘을 통하여 가변강성 구조체에 대한 가능성을 확인하였다. 그러나 필요로 하는 가변강성을 충족하기 위한 구조체의 설계 변수에 대한 연구가 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 가변강성 메커니즘의 다양한 변수 변화에 따른 강성변화 실험을 통해 강성의 경향성을 파악하고자 하였다. 실험 결과 지름이 클수록 강성은 증가하며 강성의 증가폭 또한 늘어난다. 또한 연성체 길이가 짧을수록 강성이 증가하며 텐던을 당겨 연성체를 압착할 경우 강성값은 비선형적으로 증가하였다. 동일 조건에서 연성체 길이변화에 따른 강성 증가폭과 강성체의 길이 변화에 따른 강성 증가폭을 비교하였을 때 연성체 길이 변화가 강성체 길이 변화 보다 강성값 변화에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 또한, 해석값이 실험값에 비하여 정확성은 낮지만, 가변강성의 경향성을 확인하기 위하여 해석적인 방법을 통한 강성을 예측해보았다. 이러한 변수변화 실험 결과는 필요로 하는 강성값을 충족하는 가변강성 메커니즘 설계에 활용할 수 있을 것이다.

Abstract In general, a system can be stable when it is designed with a rigid material. However, the use of a rigid system can be limited, such as grasping a glass or using a small surgical instrument. To resolve this limitation, a variable stiffness mechanism was developed using a flexible material. Previous research verified the variable stiffness mechanism where flexible segments and rigid segments were connected alternately in series. However, research into the design parameters of the variable stiffness structure is needed to satisfy the desired stiffness. Therefore, a variable stiffness structure was tested by varying the design parameters to confirm the trend of the stiffness variation. When the radius of the structure becomes larger, the stiffness increases. The stiffness increased with decreasing length of the flexible segments. Under the same design parameters, the length of the flexible segments had a greater effect on the stiffness than the length of the rigid segments. In addition, the stiffness was estimated using the pseudo rigid body model and was compared with the experimental results. This parametric study can be used as a design guideline for designing the variable stiffness mechanism to satisfy the desired stiffness.

Keywords : Adaptable Structure, Adjustable Stiffness Mechanism, Parametric Study, Soft Robotics, Variable Stiffness Mechanism

본 논문은 2014년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2014R1A1A2058928).

*Corresponding Author : Yong-jai Park(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-10-3304-2266 email: yjlone@gmail.com

Received March 15, 2016

Revised (1st April 14, 2016, 2nd April 29, 2016)

Accepted June 2, 2016

Published June 30, 2016

1. 서론

기본적으로 구조체를 설계할 때 강성체를 기반으로 설계를 진행한다. 어떠한 시스템을 강성체로 구성할 경우, 그 구조물은 안정성은 확보될 수 있으나, 반대로 사용용도에 따라 위험성이 있을 수도 있다. 예를 들어 강성체로 구성된 로봇 손은 구조적 안정성은 뛰어나지만, 자체의 강성으로 인하여 제어를 정밀하게 하지 못 할 경우 유리잔과 같은 물체를 집을 때 깨지는 문제가 발생할 수 있다. 사람의 경우 어떠한 물체를 집거나 잡을 때 물체의 종류에 따라서 집을 방법을 달리하기도 하고 손에 작용하는 강성을 조절하기도 한다. 사람의 손과 같이 물건을 쉽게 잡기 위하여 유연한 재질을 활용하여 로봇 손을 제작하는 연구도 진행되고 있다[1]. 이러한 연구는 유연한 재질을 활용하여 어떠한 모양의 물체라도 쉽게 잡을 수 있도록 재질의 성질을 활용한 것이 특징이다. 그러나 유연한 재질의 특성상 물체의 질량이 증가하는 경우 잡기 어려워지는 현상이 발생할 수 있다.

복강경 수술에 사용하거나, 수술용 로봇에 사용되는 도구의 경우에도 상황에 따라서 강성을 조절할 수 있는 구조가 필요하다[2]. 내부 장기로 수술용 도구가 들어갈 경우에는 유연한 구조체가 필요하나, 실제 수술을 진행할 경우에는 절단과 같은 움직임 구현하기 위하여 힘이 전달되어야 한다. 또 다른 예로 로봇물고기의 경우 꼬리지느러미가 구동하는 주파수에 따라 꼬리지느러미의 강성을 조절함으로써 로봇의 추력을 증가시킬 수 있다[3]. 따라서 다양한 상황에 사용할 수 있는 구조체를 위한 가변강성 메커니즘이 필요하다.

가변강성 메커니즘에 대한 연구는 다양하게 이루어져 왔다. 기존의 여러 연구들은 주로 마찰력에 의한 힘의 변화를 통해서 강성이 변화하는 방법을 이용하여 구조를 구성하고 있다. 여러 판을 겹친 상태로 진공펌프를 이용하여 판들 간의 압력을 높임으로써 마찰력을 증가시켜 강성을 변화시킨다[4]. 비슷한 연구로 층을 이룬 구조물을 겹치는 정도에 따라 강성을 조절하는 복강경 수술용 도구에 사용할 수 있는 메커니즘을 고안하였다[5]. 또 다른 연구는 비닐 튜브 안에 스티로폼으로 제작된 조각들을 넣고 공기압을 낮춤으로써 스티로폼 사이의 마찰력을 높이는 방법으로 강성을 조절한다[6].

위와 같이 마찰력을 이용하여 강성을 조절하는 메커니즘의 경우 공압을 주로 사용하기 때문에 강성 조절을

위하여 진공펌프와 같은 부가적인 장비가 많이 필요한 문제점이 있다. 또한 정지마찰력을 넘어서는 외력이 작용할 경우 순간적으로 강성이 줄어드는 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 새로운 형태의 가변강성 메커니즘이 필요하였다. 내골격 형태의 구조에서 착안하여 강성체와 연성체를 교대로 배치하여 강성을 변화시킬 수 있는 새로운 가변강성 구조체를 고안하고 이에 대하여 검증하였다[7]. 이러한 연성 재질의 비선형성을 활용하여 강성을 변화시키는 새로운 메커니즘은 강성의 변화를 용이하게 할 수 있는 것을 확인하였으나, 이를 활용하고 필요한 강성에 맞춘 가변강성 메커니즘을 설계하기 위한 설계 변수들에 대한 고찰이 필요하였다.

따라서 본 연구에서는 기존에 진행된 가변강성 메커니즘의 활용성을 높이고 필요한 강성에 맞추어 가변강성 메커니즘을 설계하기 위한 설계 변수 변화에 따른 강성 변화에 대한 연구를 진행하였다. 이를 통하여 가변강성 메커니즘 설계를 위한 기준을 제시하고자 하였으며, 기초적인 시뮬레이션을 통해 제시된 메커니즘의 강성변화에 대한 경향성을 파악할 수 있도록 하였다.

2. 본론

2.1 가변강성메커니즘의 원리

기존 연구에서 주로 사용한 압력을 조절함으로써 마찰력 변화를 통해 강성을 변화시키는 가변강성 메커니즘과 달리 본 메커니즘은 간단한 구조를 가지고 있다. Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 강성체와 연성체가 교대로 되어 있는 형태로 구성된다. 가변강성 메커니즘의 중심으로 텐던이 통과하며, 텐던은 구조체의 한 쪽 끝에 고정한다. 만약 가변강성 구조체를 고정하고 텐던을 고정하지 않은 쪽에서 축 방향으로 당기게 되면 Fig. 1의 강성상태와 같이 연성재질이 압력을 받아 압착이 되는 형태로 변화된다. 이 때 연성재질의 비선형적인 성질에 의하여 강성이 증가하는 현상이 발생한다. 텐던을 당기는 정도에 따라서 강성이 변화하는 현상이 발생하며 이를 이용하여 구조체의 굽힘 강성을 조절할 수 있다.

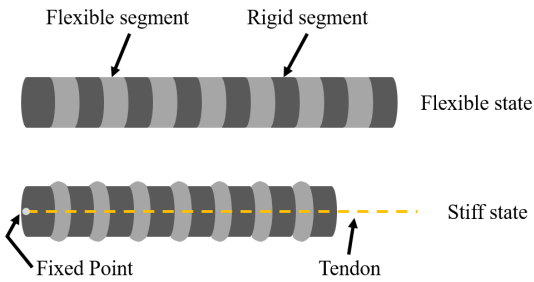


Fig. 1. Concept of a variable stiffness mechanism. The longer structure represents the flexible state and the shorter structure represents the stiff state. The state can be changed by pulling the tendon.

이러한 구조의 가변강성 구조체는 강성체와 연성체의 길이와 지름을 변화시킴으로써 강성을 원하는 강성이 발현될 수 있도록 조절하는 장점을 가지고 있다. 또한 가변강성 메커니즘은 구조체의 크기에 상관없이 적용하는 상황에 따라 유연하게 대응할 수 있다.

2.2 해석 및 실험조건

서론에서 언급한 바와 같이 가변강성 메커니즘에 대한 가능성은 검증되었다. 다만, 가변강성 메커니즘을 제대로 활용하기 위한 설계 변수 변화에 따른 강성 변화에 대한 고찰이 부족한 실정이다. 설계 변수 변화에 대한 강성 변화 추이를 보기 위하여 아래 Table 1과 같이 가변강성 메커니즘의 지름, 연성체 부분의 길이, 강성체 부분의 길이 등 세 가지 설계 변수를 고려하였다. 각각의 크기는 지름 10, 15, 20 mm로 변화를 주었으며, 연성체의 길이 12, 15, 20 mm, 강성체의 길이 20, 23, 25 mm로 구성하였다.

Table 1. Design parameter of the variable stiffness mechanism

Parameter	Value (mm)
Diameter of the mechanism	10, 15, 20
Length of the flexible segment	12, 15, 20
Length of the rigid segment	20, 23, 25

2.3 연성 해석방법

가변강성 메커니즘의 강성변화에 대한 해석값을 구하기 위하여 연성체 메커니즘에 대한 해석 모델을 참고하였다[8]. 일반적으로 연성체의 굽힘 길이를 예측하기

위해서는 고체역학에서 사용하는 이론을 적용하기에는 굽힘 각도가 작아야한다는 가정 때문에 사용에 문제가 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 假강성체 해석방법 (Pseudo Rigid Body Model)은 얇은 플라스틱과 같이 구부러지는 연성구조를 해석하기 위하여 비틀림 스프링을 장착한 모델을 제시하고 있다. 기존의 연성 구조를 강성체와 비틀림 스프링이 연결되어 있는 모델로 변경하여 구조체의 거동을 해석하게 된다. 다만, 본 연구에서 사용하는 연성체의 경우 기본적인 강성을 가진 얇은 플라스틱과 달리 실리콘을 사용하기 때문에 실리콘의 압착에 의한 비선형성이 증가하여 해석 결과에 오차가 발생할 가능성이 크다. 다만, 가변강성 메커니즘의 강성변화에 대한 경향성을 확인하기 위하여 강성의 변화폭이 가장 큰 지름 20 mm의 경우를 기반으로 해석을 진행하였다.

제작한 가변강성 구조체의 단면이 원형으로 이루어져 있고 압축이 되기 때문에 이 상황에서의 굽힘 특징을 확인하기 위하여 Chalboub과 Kelly가 제시한 굽힘 강성 변화 식을 활용하였다[9]. 실린더 형상의 기하조건과 굽힘 강성 변화는 아래의 식(1)과 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(EI)' = (E + 2GS^2)I \tag{1}$$

$$S = \frac{R}{2l} \tag{2}$$

여기서, E 는 연성체의 영계수이며, G 는 전단탄성계수, 형상변수 S 는 힘이 전달되는 면적과 그렇지 않은 면적의 비, I 는 단면 2차 모멘트, R 은 실린더 단면의 반지름 길이, l 은 연성체가 압축된 길이를 나타낸다. 여기서 구한 새로운 굽힘 강성을 Pseudo Rigid Body Model에 적용하여 해석을 진행하였다. 단, 강성체는 완성강성체로 가정하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 연성체를 두 개의 강성체가 하나의 비틀림 스프링으로 연결된 형태로 변형하였다.

외력이 가변강성 메커니즘에 수직으로만 작용한다고 가정하고 해석을 진행하면 식(3)과 같이 좌측 연성체에 대한 강성 K_2 을 구할 수 있다.

$$K_2 = 2.67617 \times \gamma_b \frac{(EI)'}{l} \tag{3}$$

여기서, γ_b 는 외력이 가해지는 부분에 가까운 연성체의 특성 반경 요소(characteristic radius factor)이며, 그 값은 0.8517이다.

그 외의 연성체의 경우 모멘트에 의한 변형만 발생한다고 가정하였다. 이 경우, 발생하는 강성 값 K_1 은 식(4)와 같다.

$$K_1 = 2.0643 \times \gamma_m \frac{(EI)'}{l} \quad (4)$$

여기서 γ_m 은 모멘트가 작용하는 연성체의 특성반경 요소(characteristic radius factor)이며, 그 값은 0.7346이다.

l_1 과 l_2 의 길이는 각각 아래 식과 같다.

$$L_1 = \gamma_m l_f + l_R + (1 - \gamma_b) l_f \quad (5)$$

$$L_2 = \gamma_b l_f + l_R \quad (6)$$

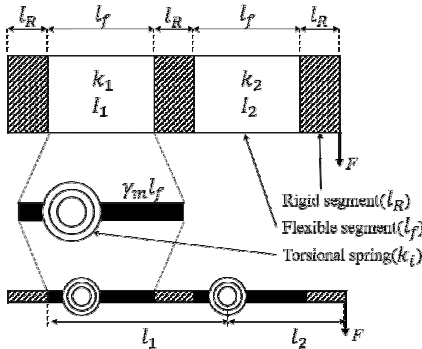


Fig. 2. Pseudo rigid body model of the variable stiffness mechanism.

여기서, l 는 연성체의 길이, l_R 은 강성체의 길이를 나타낸다. 각각 구한 길이를 모멘트 식으로 구성하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_1 \frac{\theta_1}{C_{\theta m}} = K_2 \frac{\theta_2}{C_{\theta b}} + FL_1 \cos \theta_1 \quad (7)$$

$$K_2 \frac{\theta_2}{C_{\theta b}} = FL_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad (8)$$

여기서, θ_1 은 첫 번째 연성체가 Pseudo Rigid Bo-

dy에 의해 구부러지는 각도이며, θ_2 는 두 번째 연성체가 구부러지는 각도이다. 또한, $C_{\theta m}$ 과 $C_{\theta b}$ 는 각각 모멘트가 작용할 때의 각도 계수와 굽힘이 작용할 때의 각도 계수이며, F 는 가변강성 구조에 수직으로 작용하는 외력을 나타낸다.

식 (7)과 (8)을 연립하여 수치해석 방법으로 θ_1 과 θ_2 의 값을 구하면 외력 F 에 대한 가변강성 구조체에 대한 굽힘 길이를 구할 수 있으며 해석 값에 대한 강성 값은 실험에서의 마찬가지로 최소제곱 회귀 수치해석 기법을 이용하여 구하였다. 강성 값은 Table2에서와 같이 model1부터 mode4까지 모든 조건에 대하여 해석을 진행하였다.

2.4 실험방법

2.4.1 실험 시편 제작방법

가변강성 구조체는 각 설계 변수의 경우의 수를 고려하여 각 세 가지 경우씩 27개를 제작하였다. Fig. 3에서와 같이 연성체 두 개와 강성체 세 개를 교대로 배치하여 강성체가 양 끝단에 위치하는 형태로 구성하였다.

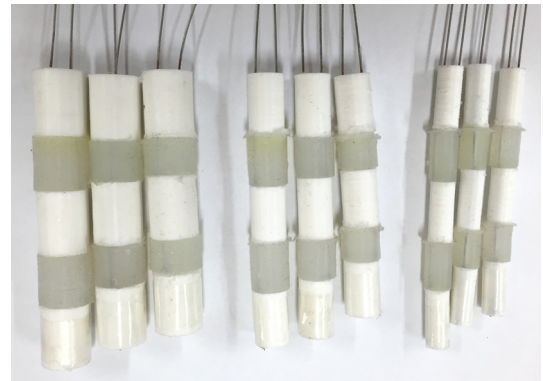


Fig. 3. The fabricated variable stiffness structures

연성체는 Smooth-on社의 EcoFlex0030 실리콘 제품을 이용하여 몰드를 이용하여 제작하였으며, 강성체의 경우 PLA(PolyLactic Acid) 필라멘트를 사용하는 3D프린터로 제작하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 가변강성 메커니즘의 중심을 관통하는 텐던을 당김으로써 강성을 조절할 수 있다. 텐던은 직경 0.8 mm의 강철재질을 사용하였다.

본 연구에서는 당겨지는 텐던의 길이를 일정하게 유

지하여 강성변화의 조건을 설정하였다. Table 2와 같이 텐던을 전혀 당기지 않은 mode1부터 최대 15 mm를 당긴 mode4까지 모두 네 가지 단계로 실험을 하였다. mode1의 경우 강성이 작은 조건이고 mode의 숫자가 올라갈수록 강성이 증가하는 형태이다.

Table 2. Variable stiffness state

State	Pulled length of a tendon
Mode1	0 mm
Mode2	5 mm
Mode3	10 mm
Mode4	15 mm

2.4.2 실험장비

강성값은 기존에 제작한 가변강성 메커니즘을 Fig. 4와 같이 장착하고 무게 추를 장착하여 발생하는 굽힘 길이를 측정하고 이를 수치해석의 최소제곱 회귀법을 활용하여 구하였다. 각 구조체를 장착한 후 Table 2의 조건과 같이 텐던을 당기지 않은 상태 mode1에서 15 mm까지 당긴 mode4까지 4번의 굽힘 길이를 측정하였다.

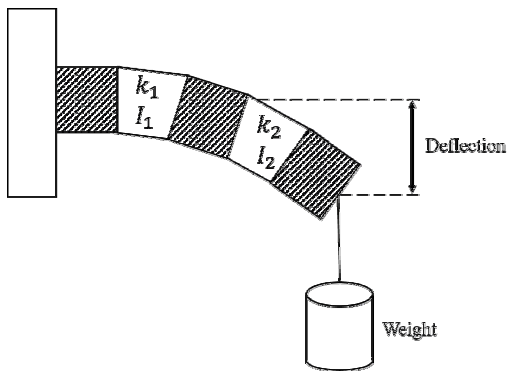


Fig. 4. Stiffness measurement: schematic drawing of experiment

2.5 실험결과 및 분석

앞에서 언급한 실험조건에 맞추어 실험을 실시한 결과와 그 분석에 대한 결과는 아래와 같다.

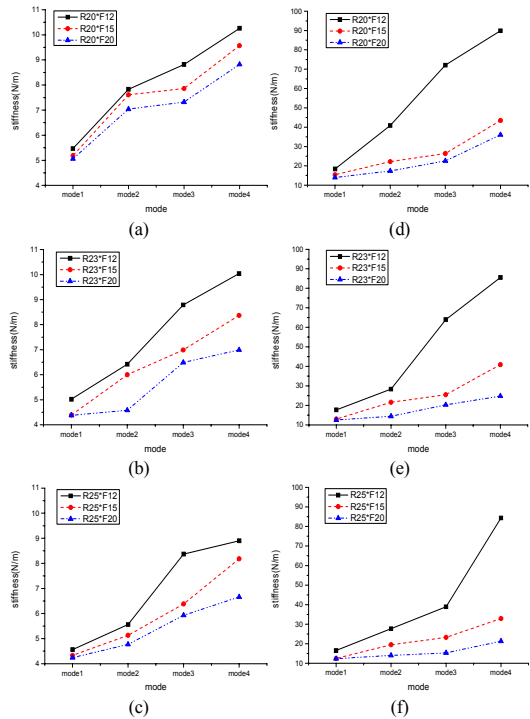


Fig. 5. Experimental results of the variable stiffness structures(Diameter 10 mm and 20 mm). Left graphs show the experimental results of 10 mm in diameter and right graphs show the experimental results of 20 mm in diameter. (a) R20 mm(ϕ 10 mm) (b) R23 mm(ϕ 10 mm) (c) R25 mm(ϕ 10 mm) (d) R20 mm(ϕ 20 mm) (e) R23 mm(ϕ 20 mm) (f) R25 mm(ϕ 20 mm) R: rigid segment, F: flexible segment

Fig. 5는 연성체 길이에 따른 강성변화를 비교하기 위하여 지름이 가장 작은 10 mm와 지름이 가장 큰 20 mm 시편을 동일한 조건에서 실험을 진행한 것을 타나낸다. 실험 조건은 강성체 길이 값이 고정되어 있는 상태에서 연성체 길이를 변경해가며 mode1 부터 mode4 까지 실험을 진행하였다. 지름이 10 mm 인 시편을 실험한 결과 가장 강성변화의 폭이 큰 시편은 R23×F12였다. 여기서 R은 강성체를 뜻하며 또한, 23은 그 길이를 나타낸다. 또한 F는 연성체를 의미한다. 그 중에서 강성이 가장 작은 경우는 mode1로써 강성이 5.02 N/m이었고, 강성이 가장 큰 경우는 mode4 로 강성이 10.04 N/m 이었다. mode1에서 mode4 로 실험을 진행하는 동안 강성값은 2배 증가하였다.

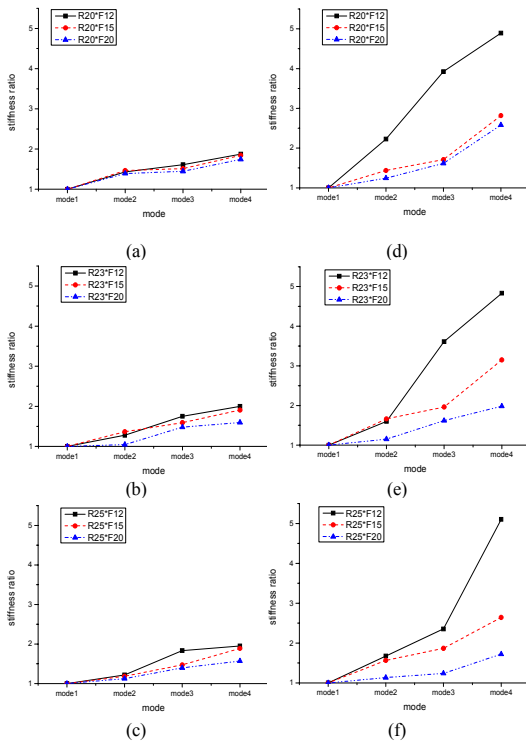


Fig. 6. Stiffness ratio based on mode 1 result of each experiment(Diameter 10 mm and 20 mm). Left graphs show the experimental results of 10 mm in diameter and right graphs show the experimental results of 20 mm in diameter. (a) R20 mm(ϕ 10 mm) (b) R23 mm(ϕ 10 mm) (c) R25 mm(ϕ 10 mm) (d) R20 mm(ϕ 20 mm) (e) R23 mm(ϕ 20 mm) (f) R25 mm(ϕ 20 mm) R: rigid segment, F: flexible segment

또한 지름 20 mm의 실험 결과, 가장 강성변화의 폭이 큰 경우는 R25×F12로 강성이 가장 작았을 경우는 mode1으로 강성값은 16.52 N/m이었고, 강성이 가장 큰 경우는 mode4로 강성이 84.35 N/m 이었다. Fig. 6는 Fig. 5의 실험값을 mode1을 기준으로 비교한 값으로 나타내었다. mode1에서 mode4로 실험을 진행하는 동안 강성은 약 5.1배 증가하였다. 가변강성 구조체의 지름이 10 mm에서 20 mm로 증가하는 동안 강성값은 최소 8.9 N/m 최대 79.62 N/m 증가 하였다. 강성값의 폭 또한 지름이 두 배 증가 할 경우 강성의 증가폭이 약 2.5배 증가 하였다. 위 실험 결과 지름이 같은 실험조건인 경우 연성체의 길이가 짧을수록 강성이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 시편의 지름이 클수록 강성이 증가하며, 강성의 증

가폭 또한 비선형적으로 늘어난다.

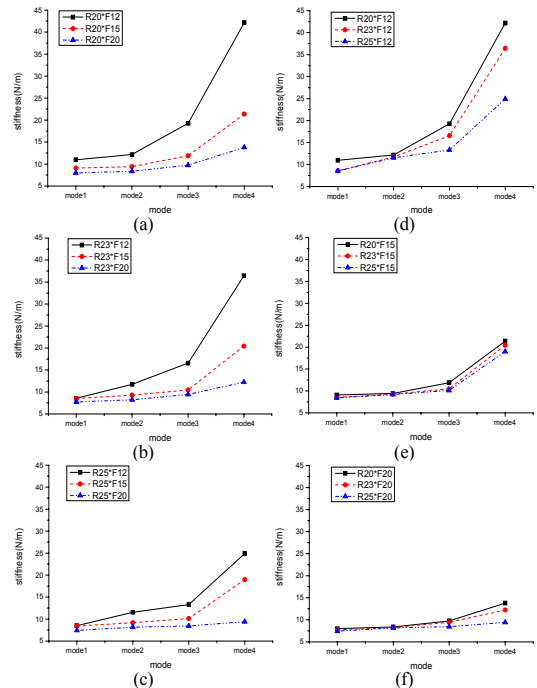


Fig. 7. Experimental results of the variable stiffness structures(Diameter 15 mm). Left graphs show the experimental results when the length of the rigid segments are same. Right graphs show the experimental results when the length of the flexible segments are same. (a) R20 mm (b) R23 mm (c) R25 mm (d) F12 mm (e) F15 mm (f) F20 mm R: rigid segment, F: flexible segment

Fig. 7은 강성체와 연성체가 강성에 미치는 영향을 알아보기 위해 지름을 15 mm로 고정 한 상태에서 mode1부터 mode4까지 실험을 진행하였고, 그 결과를 이용하여 다른 기준의 그래프를 작성하였다. 그래프 (a), (b), (c)는 강성체 길이를 고정한 상태에서 연성체 길이를 변경한 그래프이며, 그래프 (d), (e), (f)는 반대로 연성체 길이가 각각 20 mm, 23 mm, 25 mm로 고정되어 있는 상태에서 강성체 길이를 12 mm, 15 mm, 20 mm로 변경한 그래프이다. 그래프를 비교해보면 왼쪽 그래프들이 오른쪽 그래프들 보다 강성이 증가하는 폭이 큰 것을 볼 수 있다. 강성체 길이를 23 mm로 고정한 그래프 (b)의 결과 값을 비교해보았다. 연성체 길이가 다른 R23×F12와 R23×20의 강성 값 차이를 보면 mode1에서 0.84 N/m, mode4에서 24.22 N/m 차이를 보인다.

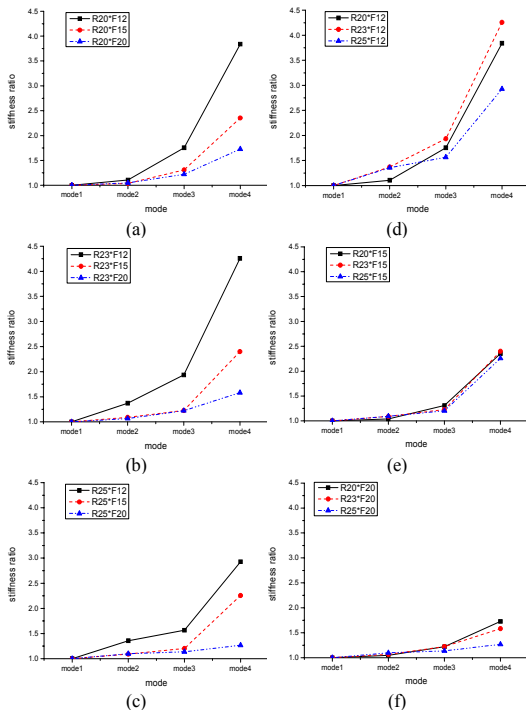


Fig. 8. Stiffness ratio based on mode 1 result of each experiment (Diameter 15 mm). Left graphs show the experimental results when the length of the rigid segments are same. Right graphs show the experimental results when the length of the flexible segments are same. (a) R20 mm (b) R23 mm (c) R25 mm (d) F12 mm (e) F15 mm (f) F20 mm R: rigid segment, F: flexible segment

반면 연성체 길이를 15 mm로 고정한 그래프 (e)의 R20×F15와 R25×F15의 결과 값을 비교해보면 강성 값의 차이가 mode1 에서 0.66 N/m, mode4 에서 3.55 N/m 차이가 생긴다. mode1의 최소값 차이는 0.18 N/m로 미미한 것처럼 보이지만 강성이 증가하는 mode4의 경우를 보면 약 6.8배의 강성변화 차이를 볼 수 있다.

동일 조건에서 Fig.8 그래프 (b)의 R23×F12 시편과 R23×F20 시편의 mode4 비율 보았을 때 강성 비율 차이는 약 2.67 정도 나는 반면, 그래프 (e)의 R20×F15 시편과 R25×F15 시편의 강성 비율 차이는 0.095에 불과하다. 위 실험 결과 강성체 길이 변화에 따른 구조체의 강성 변화가 연성체의 길이에 의한 영향보다 작다는 것을 확인하였다. 결론적으로 지름이 10 mm에서 20 mm으로 2배 증가하면 강성의 변화는 mode1에서 약 4 배 증가하는 경향을 보이며 mode4에서는 약 16배 증가

하는 경향을 보인다. 즉, 텐던에 의한 실리콘 압착이 증가할수록 강성변화율은 증가한다.

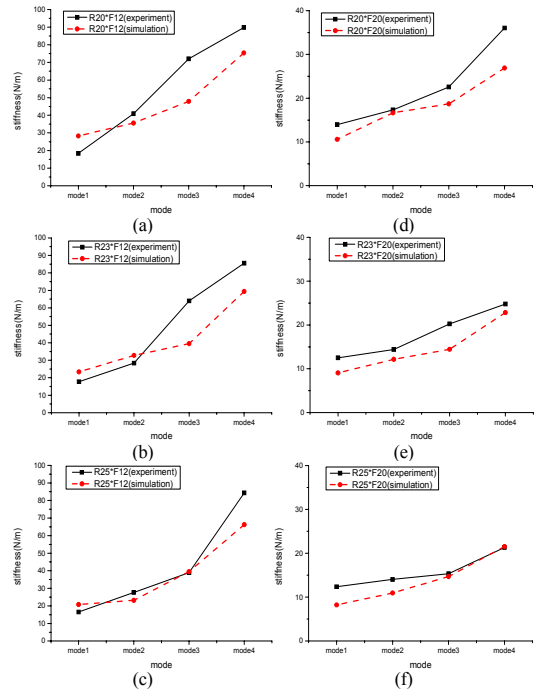


Fig. 9. Comparison between experimental and simulated results (Diameter 20 mm). (a) R20×F12 (b) R23×F12 (c) R25×F12 (d) R20×F20 (e) R23×F20 (f) R25×F20 R: rigid segment, F: flexible segment

Fig. 9는 실험값과 시뮬레이션 값을 비교한 것이다. 앞에서 언급한바와 같이 강성의 변화폭이 가장 큰 지름 20 mm을 비교하였다. 그래프를 보면 강성이 증가한다는 사실은 두 결과 값 모두 같으나, 실험값과 시뮬레이션 결과 값 간 오차가 발생한다는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 크게 두 가지가 있을 수 있다. 첫째, 제작과정에서 생길 수 있는 오차이다. 연성체는 실리콘 제품을 이용하여 몰드를 이용하여 제작하므로 정교하게 작업을 진행해도 실리콘을 혼합하는 과정이나 몰드작업을 하는 동안 실리콘에 의한 오차가 생길 수 있다. 둘째, 해석 방법에 발생할 수 있는 오차이다. 본 연구에서 사용한 연성구조 해석 방법은 유연한 플라스틱과 같이 구부러지는 연성구조를 해석하기 위하여 비틀림 스프링을 장착한 모델을 제시하고 있다. 기존의 연성 구조를 강성체와 비틀림 스프링이 연결되어 있는 모델로 변경하여 구조체의 거동을 해석하게 된다. 다만, 본 연구에서 사용하는 연성체의 경우 기본적인 강성을 가진 얇은 플라스틱과 달리 실리콘을 사

용하기 때문에 실리콘의 압착에 의한 오차가 발생한다. 특히 텐던을 많이 당기면 당길수록 실리콘이 압착되면서 단면의 수직방향으로 밀려나가는 현상이 많이 발생하게 된다. 이러한 비선형적인 현상은 가변강성 구조체의 굽힘을 방해하게 되면서 전체적으로 강성이 증가하는 현상으로 나타나게 된다. 때문에 해석 결과에 오차가 발생할 가능성이 크다. 하지만 실리콘과 같은 연성체의 강성값을 그대로 모델링하기에는 실리콘 자체의 특정한 강성을 구하기 어렵다.

그래서 본 연구에서는 기본적인 강성의 연구결과와의 경향성을 파악하기 위해서 위 연성구조 해석 방법으로 모델링을 진행하였다. 그 결과 전반적으로 강성이 변화하는 경향성을 확인할 수는 있으나, 실리콘을 연성체로 사용한 결과로 실험값과 해석값의 오차가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 또한 본 가변강성 메커니즘은 연성 재질의 비선형성을 이용하기 때문에 강성의 변화가 재질의 특성에 영향을 받을 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 실리콘의 비선형적인 특성이 반영되어 나타난 오차라고 할 수 있다. 따라서 해석적인 방법의 경우 강성의 변화 폭만 확인할 수 있는 수단으로 활용하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

3. 결론

본 연구에서는 변수에 따른 가변강성 메커니즘의 강성변화를 다양한 방법으로 실험하였고 결과를 비교 분석하여 강성변화의 경향성을 파악하였다. 설계자가 필요한 강성에 따라서 맞춤 설계할 시 유용하다. 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 가변강성 구조체의 지름이 커질수록 강성값이 증가하는 경향성이 나타난다.
- 2) 같은 조건에서 연성체의 길이만 변경할 경우 길이가 짧을수록 구조체의 강성은 더 커진다. 또한 텐던 당김으로 실리콘에 압착을 가할수록 그 폭은 증가한다.
- 3) 연성체와 강성체가 강성 변화에 미치는 영향을 비교 분석한 결과 강성체 길이 변화 차이에 의한 강성변화와 연성체 길이 변화 차이에 의한 강성변화가 약 28배 차이를 보이고 있으므로 강성을 변화

시키기 위해서는 연성체 길이 변경이 더 유효하다.

- 4) 해석적인 방법의 경우 오차는 있으나 경향성을 파악하고 필요한 강성을 설계하는데 도움이 될 것이다.

결론적으로 이 실험 결과는 원하는 강성값을 충족하는 가변강성 메커니즘을 구현하기 위한 설계 변수를 선정하는 기준으로 활용할 수 있을 것이다.

References

- [1] A. M. Dollar and R. D. Howe, "The Highly Adaptive SDM Hand: Design and Performance Evaluation," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 5, pp. 585 - 597, Apr. 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0278364909360852>
- [2] M. Zoppi, R. Molfino, and P. Cerveri, "Modular micro robotic instruments for transluminal endoscopic robotic surgery: New perspectives," *IEEE/ASME Int. Conf. on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA)*, pp. 440-445, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/mesa.2010.5551996>
- [3] Y. J. Park, U. S. Jeong, J. S. Lee, S. R. Kwon, H. Y. Kim, and K. J. Cho, "Kinematic Condition for Maximizing the Thrust of a Robotic Fish Using a Compliant Caudal Fin," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 6, pp. 1216 - 1227, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2012.2205490>
- [4] S. Kawamura, T. Yamamoto, D. Ishida, T. Ogata, Y. Nakayama, O. Tabata, and S. Sugiyama, "Development of passive elements with variable mechanical impedance for wearable robots," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 248-253, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/robot.2002.1013369>
- [5] Y. J. Kim, S. Cheng, S. Kim, and K. Iagnemma, "A Novel Layer Jamming Mechanism With Tunable Stiffness Capability for Minimally Invasive Surgery," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 4, pp. 1031-1042, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2013.2256313>
- [6] T. Mitsuda, S. Kuge, M. Wakabayashi, and S. Kawamura, "Haptic displays implemented by controllable passive elements," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 4223-4228, 2002
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/robot.2002.1014417>
- [7] T. M. Huh, Y. J. Park, and K. J. Cho, "Design and analysis of a stiffness adjustable structure using an endoskeleton," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 7, pp. 1255 - 1258, Jul. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-012-0168-2>
- [8] L. Howell, "Compliant mechanisms," Wiley-IEEE, 2001.
- [9] M. S. Chalhoub, and J. M. Kelly, "Effect of bulk compressibility on the stiffness of cylindrical base isolation bearings," *Int. J. of Solids and Structures*, vol.

26, no. 7, pp. 743-760, 1990.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-7683\(90\)90004-F](http://dx.doi.org/10.1016/0020-7683(90)90004-F)

함 기 범(Ki-Beom Ham) [준회원]



- 2015년 8월 : 선문대학교 기계공학과 공학사
- 2015년 9월 ~ 현재 : 선문대학교 일반대학원 기계공학과 재학

<관심분야>
로보틱스, 제어, 메커니즘

박 용 재(Yong-Jai Park) [정회원]



- 2004년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 공학사
- 2013년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 공학박사
- 2003년 12월 ~ 2005년 4월 : 삼성전자 반도체
- 2014년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계ICT융합공학부 교수

<관심분야>
제어, 로보틱스, 메커니즘

한 지 호(Jiho Han) [정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 전기공학부 공학사
- 2004년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학석사
- 2009년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학박사
- 2009년 10월 ~ 2014년 2월 : 삼성전자 책임연구원

• 2014년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 전자공학과 교수

<관심분야>
집적 시스템 설계, 클록 동기화

전 종 균(Kil-Seo Hong) [종신회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1985년 12월 : University of California, Los Angeles (공학석사)
- 1991년 6월 : University of California, Los Angeles (공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계ICT융합공학부 교수

<관심분야>
응용역학, 진동제어