



(19) 대한민국 지식재산청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2025년11월12일
(11) 등록번호 10-2885402
(24) 등록일자 2025년11월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

F03G 7/06 (2006.01)

(52) CPC특허분류

F03G 7/06143 (2021.08)

F05B 2280/5006 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2023-0049953

(22) 출원일자 2023년04월17일

심사청구일자 2023년04월17일

(65) 공개번호 10-2024-0153722

(43) 공개일자 2024년10월24일

(56) 선행기술조사문헌

JP2011117452 A*

JP60071187 A*

KR1020080101144 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

국립한밭대학교 산학협력단

대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)

(72) 발명자

전상민

대전광역시 서구 만년로 25 강변아파트 110동
1304호

김영식

세종특별자치시 달빛로 80 가재마을12단지 1208
호 2302호

(74) 대리인

특허법인도담

전체 청구항 수 : 총 8 항

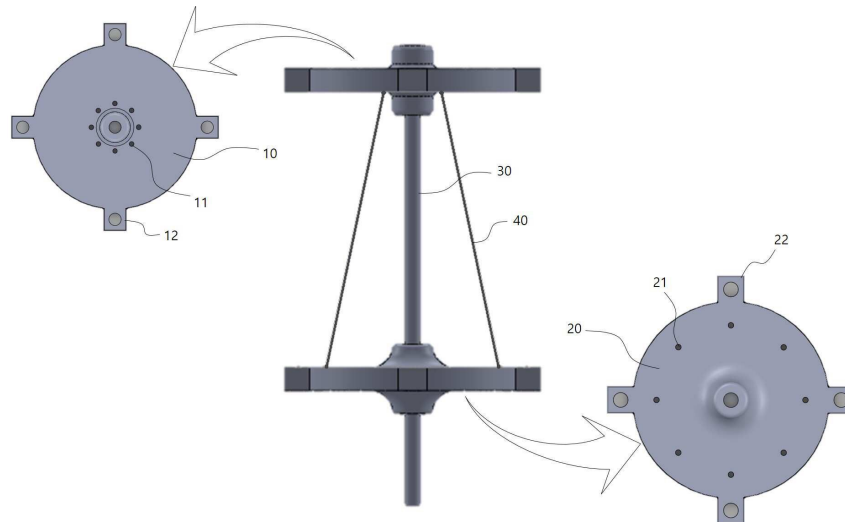
심사관 : 김희영

(54) 발명의 명칭 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터

(57) 요약

본 발명은, 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는, SMA 줄기(40)가 중심축(30)을 기준으로 감긴 후에 복원되면서 구동판(10)을 회전시키면서 동시에 고정판(20)으로부터 밀어내므로, 동력 전달 대상에 회전 및 선형 동력을 제공할 수 있는 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터에 관한 것이다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711185668
과제번호	2022R1A2C1011462
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	(유형1-1)중견연구
연구과제명	자연에서 영감을 받은 형상기억소재 기반 멀티 스마트 액추에이터 및 인공근육 번들
시스템 설계와 로봇 응용 연구	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	한밭대학교
연구기간	2022.03.01 ~ 2027.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

관형으로서 동력 전달 대상과 일면이 접하고, 회전 가능하게 준비되는 구동판(10);

상기 구동판(10)의 중심에 결합되어 타측으로 연장되며 상기 구동판(10)의 회전시 함께 회전되는 중심축(30);

상기 중심축(30)이 회전 및 슬라이딩 가능하게 관통되며 상기 구동판(10)과 이격되는 고정판(20);

서로 이격되어 상기 구동판(10)과 상기 고정판(20) 사이를 잇는 복수의 SMA(Shape memory alloy: 형상기억합금) 줄기(40);

를 포함하고,

상기 SMA 줄기(40)는, SMA 와이어를 상기 구동판(10)과 상기 고정판(20)에 고정시켜 형성하며,

상기 구동판(10)이 외력에 의해 회전되면 상기 SMA 줄기(40)가 상기 중심축(30)을 기준으로 나선형으로 변형되며 상기 구동판(10)과 상기 고정판(20) 사이 이격 거리가 감소되고, 상기 SMA 줄기(40)에 전류가 인가되면 상기 SMA 줄기(40)가 상기 외력의 반대 방향으로 상기 구동판(10)을 회전시키며 상기 구동판(10)과 상기 고정판(20) 사이 이격 거리를 증가시키고,

N: SMA 줄기(40)의 수

α : 구동판(10)의 회전 각도($^{\circ}$:degree)

S: SMA 줄기(40)의 길이

r_s : SMA 줄기(40)의 반경

r_c : 중심축(30)의 반경

Θ : SMA 줄기(40)와 고정판(20)이 이루는 내각($^{\circ}$:degree)

r_f : 고정판(20)의 중심으로부터 고정축 와이어 홀(21)까지의 거리

r_m : 구동판(10)의 중심으로부터 구동축 와이어 홀(11)까지의 거리

(모든 길이에 대한 단위는 mm)

라 할 때,

r_s 와 r_c 의 합을 r 이라 하면,

상기 구동판(10)의 최대 회전 각도 $\alpha_{\max}$ 는,

$$\alpha_{\max} = \frac{\pi r S - (r_f + r_m) \sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 r_s^2}}{r \sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 r_s^2}} \times \frac{180}{\pi}$$

인 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 SMA 줄기(40)는, 상기 SMA 와이어가 실리콘 튜브에 삽입되어 형성되는 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 SMA 와이어의 직경은 0.26mm보다 크고 0.51mm 보다 작으며, 상기 실리콘 튜브의 직경은 1mm인 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 SMA 줄기(40)의 수는 3개 이상인 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 SMA 줄기(40)와 상기 고정판(20)이 상기 중심축(30) 방향으로 형성하는 각도 θ 는 $35^\circ < \theta < 90^\circ$ 인 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터.

청구항 6

삭제

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 구동판(10)의 회전수를 Z라 하면,

$$Z = \alpha \times \frac{1}{360} + 0.5$$

인 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 중심축(30)의 반경 r_c 가 최소값으로 가정되고, 상기 SMA 줄기(40)의 반경 r_s 가 $0.38\text{mm} < r_s < 0.505\text{mm}$ 이며, 상기 SMA 줄기(40)가 상기 중심축(30)에 접하도록 상기 구동판(10)에 결합된 경우, 상기 구동판(10)의 최대 회전 각도 $\alpha_{\max}$ 는,

$$\left(s \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{\cos \theta}{r} \right) - 2 \right) \frac{180}{\pi} < \alpha_{\max} < \left(s \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{\cos \theta}{r} \right) - 2 \right) \frac{180}{\pi}$$

인 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 중심축(30)의 반경 r_c 가 최소값으로 가정되고, 상기 SMA 줄기(40)의 반경 r_s 가 $0.38\text{mm} < r_s < 0.505\text{mm}$ 이며, 상기 SMA 줄기(40)가 상기 중심축(30)에 접하도록 상기 구동판(10)에 결합된 경우, 상기 구동판(10)의 최대 회전수 $Z_{\max}$ 는,

$$\frac{S}{2\pi} \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{\cos\theta}{r} \right) - \frac{1}{\pi} + 0.5 < Z_{\max} < \frac{S}{2\pi} \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{\cos\theta}{r} \right) - \frac{1}{\pi} + 0.5$$

이며, $Z_{\max}$ 가 2 이상이라 가정하면, 상기 SMA 줄기(40)의 수 N , 상기 SMA 줄기(40)의 길이 S , 상기 SMA 줄기(40)와 상기 고정판(20)이 이루는 내각 θ 사이의 관계식은

$$r \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{3\pi+2}{S} \right) < \cos\theta < r \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{3\pi+2}{S} \right)$$

인 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는, SMA 줄기가 중심축을 기준으로 감긴 후에 복원되면서 구동판을 회전시키면서 동시에 고정판으로부터 밀어내므로, 동력 전달 대상에 회전 및 선형 동력을 제공할 수 있는 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 액추에이터는 에너지를 사용하여 기계적인 일을 하는 장치를 뜻하며, 최근 휴대용 전자 장치에 내장된 초소형 카메라에서 포커싱이나 줌 기능에 사용되는 구동 체계나 곤충 로봇 등과 같은 생명체 모방형 로봇에서 로봇의 동작을 위한 구동 체계 등 소형 기기 분야에서 형상기억합금(Shape memory alloy, SMA)을 이용한 액추에이터가 사용되고 있다.

[0004] SMA 액추에이터는 SMA를 와이어나 코일 형태로 감아 사용하며, 중량 대비 큰 힘과 스트로크를 얻을 수 있는 장점이 있고, 이를 통해 다양한 기계적 움직임을 구현할 수 있는 액추에이터의 개발이 이루어지고 있다.

[0005] 다양한 기계적 움직임이라 함은 회전과 직선 운동을 함께 해야 하는 움직임도 그 대상이 되며, 직선 움직임을 하는 액추에이터의 구동축상에 회전 움직임을 하는 액추에이터를 고정하여 이러한 복합적 움직임이 가능하도록 구성할 수도 있으나, SMA 액추에이터가 사용되어야 할 정도의 협소한 공간 제약이 있는 곳에서 액추에이터 2개를 조합하여 2가지 복합적 움직임을 수행하는 것은 효율성이 떨어지는 문제가 있었다.

[0006] 따라서, 회전 및 직선 운동의 복합적 움직임이 요구되는 곳에 적용 가능한 액추에이터의 개발이 필요로 하게 되었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 한국공개특허공보 제10-2023-0032733호 (2023.03.07)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 상술한 문제를 해결하기 위하여 안출된 본 발명은, SMA 줄기(40)가 중심축(30)을 기준으로 감긴 후에 복원되면서 구동판(10)을 회전시키면서 동시에 고정판(20)으로부터 밀어내므로, 동력 전달 대상에 회전 및 선형 동력을 제공할 수 있는 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터를 제공하는데 그 목적이 있다.

[0010] 또한, 본 발명은, SMA 와이어가 실리콘 튜브에 삽입되어 SMA 줄기(40)를 형성하므로, 전류 인가시 빠르게 가열되고 이에 따라 신속한 구동이 가능한 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터를 제공하는데 그 목적이 있다.

[0011] 또한, 본 발명은, SMA 줄기(40)의 갯수와 길이, SMA 줄기(40)와 고정판(20)이 이루는 각도 등에 의한 구동판(10)의 최대 회전량을 수식을 통해 계산할 수 있으므로, 액추에이터의 설계시 시행착오를 최소화할 수 있는 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터를 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0013] 본 발명은, 판형으로서 동력 전달 대상과 일면이 접하고, 회전 가능하게 준비되는 구동판(10); 상기 구동판(10)의 중심에 결합되어 타측으로 연장되며 상기 구동판(10)의 회전시 함께 회전되는 중심축(30); 상기 중심축(30)이 회전 및 슬라이딩 가능하게 관통되며 상기 구동판(10)과 이격되는 고정판(20); 서로 이격되어 상기 구동판(10)과 상기 고정판(20) 사이를 잇는 복수의 SMA(Shape memory alloy: 형상기억합금) 줄기;를 포함하고, 상기 SMA 줄기(40)는, SMA 와이어를 상기 구동판(10)과 상기 고정판(20)에 고정시켜 형성하며, 상기 구동판(10)이 외력에 의해 회전되면 상기 SMA 줄기(40)가 상기 중심축(30)을 기준으로 나선형으로 변형되며 상기 구동판(10)과 상기 고정판(20) 사이 이격 거리가 감소되고, 상기 SMA 줄기(40)에 전류가 인가되면 상기 SMA 줄기(40)가 상기 외력의 반대 방향으로 상기 구동판(10)을 회전시키며 상기 구동판(10)과 상기 고정판(20) 사이 이격 거리를 증가시킨다.

[0014] 또한, 본 발명의 상기 SMA 줄기(40)는, 상기 SMA 와이어가 실리콘 튜브에 삽입되어 형성된다.

[0015] 또한, 본 발명의 상기 SMA 와이어의 직경은 0.26mm보다 크고 0.51mm 보다 작으며, 상기 실리콘 튜브의 직경은 1mm이다.

[0016] 또한, 본 발명의 상기 SMA 줄기(40)의 수는 3개 이상이다.

[0017] 또한, 본 발명의 상기 SMA 줄기(40)와 상기 고정판(20)이 상기 중심축(30) 방향으로 형성하는 각도 θ 는 $35^\circ < \theta < 90^\circ$ 이다.

[0018] 또한, 본 발명은, N: SMA 줄기(40)의 수, α : 구동판(10)의 회전 각도($^\circ$:degree), S: SMA 줄기(40)의 길이, r_s : SMA 줄기(40)의 반경, r_c : 중심축(30)의 반경, θ : SMA 줄기(40)와 고정판(20)이 이루는 내각($^\circ$:degree), r_f : 고정판(20)의 중심으로부터 고정축 와이어 홀(21)까지의 거리, r_m : 구동판(10)의 중심으로부터 구동축 와이어 홀(11)까지의 거리라 할 때, r_s 와 r_c 의 합을 r이라 하면, 상기 구동판(10)의 최대 회전 각도 $\alpha_{\max}$ 는,

$$\alpha_{\max} = \frac{\pi r S - (r_f + r_m) \sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 r_s^2}}{r \sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 r_s^2}} \times \frac{180}{\pi} \text{ 이다.}$$

[0020] 또한, 본 발명의 상기 구동판(10)의 회전수를 Z라 하면,

$$Z = \alpha \times \frac{1}{360} + 0.5 \text{ 이다.}$$

[0022] 또한, 본 발명의 상기 중심축(30)의 반경 r_c 가 최소값으로 가정되고, 상기 SMA 줄기(40)의 반경 r_s 가 $0.38\text{mm} < r_s < 0.505\text{mm}$ 이며, 상기 SMA 줄기(40)가 상기 중심축(30)에 접하도록 상기 구동판(10)에 결합된 경우, 상기 구동판(10)의 최대 회전 각도 $\alpha_{\max}$ 는,

$$\left(s \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{\cos \theta}{r} \right) - 2 \right) \frac{180}{\pi} < \alpha_{\max} < \left(s \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{\cos \theta}{r} \right) - 2 \right) \frac{180}{\pi} \text{ 이다.}$$

[0024] 또한, 본 발명의 상기 중심축(30)의 반경 r_c 가 최소값으로 가정되고, 상기 SMA 줄기(40)의 반경 r_s 가 $0.38\text{mm} < r_s < 0.505\text{mm}$ 이며, 상기 SMA 줄기(40)가 상기 중심축(30)에 접하도록 상기 구동판(10)에 결합된 경우, 상기 구동판(10)의 최대 회전수 $Z_{\max}$ 는,

[0025]
$$\frac{S}{2\pi} \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{\cos\theta}{r} \right) - \frac{1}{\pi} + 0.5 < Z_{\max} < \frac{S}{2\pi} \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{\cos\theta}{r} \right) - \frac{1}{\pi} + 0.5$$

[0026] 이며, $Z_{\max} \geq 2$ 라 가정하면, 상기 SMA 줄기(40)의 수 N, 상기 SMA 줄기(40)의 길이 S, 상기 SMA 줄기(40)와 상기 고정판(20)이 이루는 내각 θ 사이의 관계식은

[0027]
$$r \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{3\pi+2}{S} \right) < \cos\theta < r \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{3\pi+2}{S} \right)$$
 이다.

발명의 효과

[0029] 본 발명은, SMA 줄기(40)가 중심축(30)을 기준으로 감긴 후에 복원되면서 구동판(10)을 회전시키면서 동시에 고정판(20)으로부터 밀어내므로, 동력 전달 대상에 회전 및 선형 동력을 제공할 수 있는 효과가 있다.

[0030] 또한, 본 발명은, SMA 와이어가 실리콘 튜브에 삽입되어 SMA 줄기(40)를 형성하므로, 전류 인가시 빠르게 가열되고 이에 따라 신속한 구동이 가능한 효과가 있다.

[0031] 또한, 본 발명은, SMA 줄기(40)의 갯수와 길이, SMA 줄기(40)와 고정판(20)이 이루는 각도 등에 의한 구동판(10)의 최대 회전량을 수식을 통해 계산할 수 있으므로, 액추에이터의 설계시 시행착오를 최소화할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0033] 도1은 본 발명의 실시예에 따른 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터의 정면도.

도2는 본 발명의 실시예에 따른 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터의 중심축(30)의 최소 반경을 구하기 위한 예시도.

도3은 본 발명의 실시예에 따른 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터의 SMA 줄기(40)의 고정 위치에 대응한 파라미터들을 도시한 예시도.

도4는 본 발명의 실시예에 따른 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터의 구동판(10)의 최대 회전각을 구하기 위한 수식 설명도.

도5는 도4의 수식을 보충 설명하기 위한 예시도.

도6은 본 발명의 실시예에 따른 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터의 SMA 줄기(40)의 수별로 SMA 줄기(40)와 고정판(20)의 각도 대비 구동판(10)의 최대 회전수를 도시한 그래프.

도7은 본 발명의 실시예에 따른 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터의 SMA 줄기(40)와 고정판(20)의 각도에 따른 SMA 줄기(40)의 감김 특성을 실험한 실험 결과 사진.

도8은 본 발명의 실시예에 따른 회전 및 직선 운동형 형상기억합금 액추에이터의 SMA 줄기(40)의 길이별로 SMA 줄기(40)와 고정판(20)의 각도 대비 구동판(10)의 최대 회전수를 도시한 그래프.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0034] 이하에서, 본 발명의 실시예에 대하여 첨부한 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

[0036] 본 발명은, 도1 내지 도8에 도시된 바와 같이, 판형으로서 동력 전달 대상과 일면이 접하고 회전 가능하게 준비되는 구동판(10)과, 구동판(10)의 중심에 결합되어 타측으로 연장되며 구동판(10)의 회전시 함께 회전되는 중심축(30)과, 중심축(30)이 회전 및 슬라이딩 가능하게 관통되며 구동판(10)과 이격되는 고정판(20)과, 서로 이격되어 구동판(10)과 고정판(20) 사이를 잇는 복수의 SMA(Shape memory alloy: 형상기억합금) 줄기(40)를 포함하여 구성된다.

[0038] 구동판(10)은, 동력 전달 대상에 직접 동력을 전달하는 역할을 하며, 이를 위하여 판형으로 형성되고 중심에 중심축(30)이 결합되어 중심축(30)과 함께 회전된다. 이러한 구동판(10)에는 SMA(Shape memory alloy: 형상기억합금) 와이어를 관통시켜 고정하기 위한 구동축 와이어 홀(11)이 복수 형성되어 있다.

[0039] 구동판(10)은 외주면으로부터 방사상 외측으로 사각 형상의 구동축 돌기(12)가 돌출되는데, 이는 액추에이터를

제작할 때, 그리고 액추에이터를 최대로 감고 잠시 고정시킬 때 외부의 홀더에 고정시키기 위한 용도이다. 이러한 구동축 돌기(12)는 구동판(10)으로부터 탈착 가능하게 구성될수도 있고 구동판(10)과 일체로 구성될수도 있으며, 구동판(10)의 직경이 45mm라 할 때 가로 세로 6mm의 사각형 비율로 형성되는 것이 바람직하나 이를 한정하는 것은 아니다.

[0040] 구동판(10)의 중심에는 중심축(30)이 연결되어 구동판(10)의 타측으로 연장되며, 구동판(10)과 중심축(30)은 견고하게 고정된 상태로서 구동판(10)이 회전 및 슬라이딩될 때 중심축(30) 역시 회전 및 슬라이딩된다.

[0041] 이러한 구동판(10)의 중심으로부터 설정거리에는 구동축 와이어 홀(11)이 복수 형성된다. 구동축 와이어 홀(11)은 SMA 와이어가 구동판(10)을 관통하여 통과될 수 있도록 한다. SMA 와이어가 하나의 구동축 와이어 홀(11)을 통해 구동판(10)의 타측으로부터 일측으로 관통된 후 다시 인접한 다른 구동축 와이어 홀(11)을 통해 구동판(10)의 일측으로부터 타측으로 관통되는 식으로 구동판(10)의 타측, 즉, 구동판(10)과 고정판(20)의 사이에 SMA 와이어를 복수 위치시킬 수 있게 되고, 이러한 구동판(10)과 고정판(20) 사이에 위치한 SMA 와이어에 실리콘 튜브가 씌워진 형태가 SMA 줄기(40)가 된다. 구동축 와이어 홀(11)은 실리콘 튜브에 삽입된 SMA 와이어가 통과할 수 있어야 하므로 실리콘 튜브의 직경보다 크게 형성되며, 실리콘 튜브가 1mm의 직경을 갖을 때 구동축 와이어 홀(11)은 1.3mm의 직경을 갖는 것이 바람직하다. 그러나, 이러한 구동축 와이어 홀(11)의 직경은 실리콘 튜브의 직경에 따라 가변적으로 선택될 수 있음은 물론이다.

[0042] 일례에서, 구동축 와이어 홀(11)은 구동판(10)의 중심으로부터 6.5mm의 거리에 위치될 수 있는데, 이는 하술할 고정축 와이어 홀(21)이 고정판(20)의 중심으로부터 17.08mm 거리에 위치되고 구동판(10)과 고정판(20) 사이 이격 거리가 60mm인 경우를 상정한 것으로서, 이 경우 SMA 줄기(40)는 고정판(20)에 대하여 80도의 내각을 형성한다. 이러한 구동축 와이어 홀(11)의 중심으로부터의 거리, 고정축 와이어 홀(21)의 중심으로부터의 거리, 구동판(10)과 고정판(20)의 이격 거리 등은 SMA 줄기(40)가 전류 인가시 얼마만큼 구동판(10)을 강하게 회전시키며 밀어낼 수 있는지의 여부로서 결정되며, 이들간의 관계식은 하기에서 더욱 상세히 설명하기로 한다.

[0044] 중심축(30)은, 구동판(10)이 회전되며 슬라이딩될 때 이를 지지하여 이탈되지 않도록 하는 역할을 하며, 이를 위하여 구동판(10)의 중심에 결합되어 구동판(10)의 타측으로 연장된다. 중심축(30)은 고정판(20)의 중심에 회전 및 슬라이딩 가능한 상태로 관통되며 구동판(10)의 움직임에 따라 회전되면서 고정판(20)을 중심으로 슬라이딩되므로, 회전축의 역할과 함께 일종의 리니어 가이드 역할을 병행한다.

[0045] 또한, 중심축(30)은 구동판(10)이 회전되면서 SMA 줄기(40)가 감길 때 SMA 줄기(40)가 균일하게 감길 수 있도록 하는 기준점 역할을 하며, SMA 줄기(40)의 직경과 중심축(30)의 직경에 따라 SMA 줄기(40)가 감길 수 있는 양이 결정되는데, 이들의 상관관계에 대한 식은 하기에서 상세히 설명하기로 한다.

[0047] 고정판(20)은, 중심축(30)이 회전 및 슬라이딩 가능하게 장착되도록 하는 역할을 하며, 구동판(10)이 회전될 때 고정판(20)의 위치가 고정됨으로써 SMA 줄기(40)가 중심축(30)에 감길 수 있도록 하는 역할을 한다. 이를 위하여 고정판(20)은 구동판(10)과 이격되어 구비되며 SMA 와이어를 관통시켜 고정하기 위한 고정축 와이어 홀(21)이 복수 형성된다.

[0048] 고정판(20)은 외주연으로부터 방사상 외측으로 사각 형상의 고정축 돌기(22)가 돌출되는데, 이는 액추에이터를 제작할 때, 그리고 액추에이터를 최대로 감을 때 외부의 홀더에 고정시키기 위한 용도이다. 이러한 고정축 돌기(22)는 고정판(20)으로부터 탈착 가능하게 구성될수도 있고 고정판(20)과 일체로 구성될수도 있으며, 고정판(20)의 직경이 45mm라 할 때 가로 세로 6mm의 사각형 비율로 형성되는 것이 바람직하나 이를 한정하는 것은 아니다.

[0049] 고정판(20)의 중심에는 중심축(30)이 회전 및 슬라이딩 가능하게 관통되며, 구동판(10)이 회전되며 SMA 줄기(40)가 중심축(30)에 감길 때에는 구동판(10)과 고정판(20) 사이의 이격 거리가 감소되면서 중심축(30)이 고정판(20)의 타측으로 더욱 돌출되고, SMA 줄기(40)에 전류가 인가되어 SMA 줄기(40)가 구동판(10)을 회전시키며 밀어낼 때에는 구동판(10)과 고정판(20) 사이의 이격 거리가 증가되면서 중심축(30)이 고정판(20)으로부터 돌출된 길이가 감소하게 된다.

[0050] 이러한 고정판(20)의 중심으로부터 설정거리에는 고정축 와이어 홀(21)이 복수 형성된다. 고정축 와이어 홀(21)은 SMA 와이어가 고정판(20)을 관통하여 통과될 수 있도록 한다. SMA 와이어가 하나의 고정축 와이어 홀(21)을 통해 고정판(20)의 일측으로부터 타측으로 관통된 후 다시 인접한 다른 고정축 와이어 홀(21)을 통해 고정판(20)의 타측으로부터 일측으로 관통되는 식으로 고정판(20)의 일측, 즉, 고정판(20)과 구동판(10)의 사이에 SMA 와이어를 복수 위치시킬 수 있게 되고, 이러한 고정판(20)과 구동판(10) 사이에 위치한 SMA 와이어에 실리콘 튜

브가 씌워진 형태가 SMA 줄기(40)가 된다.

- [0051] 이 과정을 더욱 상세히 설명하면, SMA 와이어가 최초 고정판(20)의 타측으로부터 일측으로 고정판(20)을 관통한 후 구동판(10)의 일측으로부터 타측으로 구동판(10)을 관통한다. 그리고 나서 SMA 와이어가 구동판(10)의 일측에서 직전에 통과한 구동측 와이어 홀(11)의 가장 인접한 구동측 와이어 홀(11)을 통해 구동판(10)의 타측으로 구동판(10)을 관통한 후, 고정판(20)의 일측에서 직전에 통과한 고정측 와이어 홀(21)의 진행 방향에 위치한 가장 인접한 고정측 와이어 홀(21)을 통해 고정판(20)의 타측으로 고정판(20)을 관통한다. 이후 이 과정을 반복 수행하면 모든 고정측 와이어 홀(21)과 구동측 와이어 홀(11)에 SMA 와이어가 통과되며, 고정측 와이어 홀(21) 각각의 위치가 중심으로부터 등각 및 동일 거리에 위치되고 구동측 와이어 홀(11) 각각의 위치가 중심으로부터 등각 및 동일 거리에 위치된다면, 구동판(10)과 고정판(20) 사이에 위치된 실리콘 튜브와, 실리콘 튜브에 삽입된 SMA 와이어, 즉, SMA 줄기(40)들은 서로 동일한 간격과 동일한 길이를 형성하게 된다. 그리고, 구동판(10)은 회전되며 선형으로 이동되는 구성이고 고정판(20)은 위치가 고정된 구성이므로, SMA 와이어의 시작과 끝은 전류를 용이하게 인가시킬 수 있도록 고정판(20)의 타단으로부터 시작되어 고정판(20)의 타단에서 끝나는 것이 바람직하며, 이를 위하여 고정측 와이어 홀(21)과 구동측 와이어 홀(11)은 동일한 갯수로 짝수 개로 형성되는 것이 바람직하다.
- [0052] 한편, 고정측 와이어 홀(21)은 구동측 와이어 홀(11)과 마찬가지로 실리콘 튜브에 삽입된 SMA 와이어가 통과할 수 있어야 하므로, 실리콘 튜브의 직경보다 크게 형성되며, 실리콘 튜브가 1mm의 직경을 갖을 때 고정측 와이어 홀(21)은 1.3mm의 직경을 갖는 것이 바람직하다. 그러나, 고정측 와이어 홀(21)의 직경은 실리콘 튜브의 직경에 따라 가변적으로 선택될 수 있음은 물론이다.
- [0053] 상기 구동판(10)의 설명에 활용된 예에서, 구동측 와이어 홀(11)은 구동판(10)의 중심으로부터 6.5mm의 거리에 위치되고 구동판(10)과 고정판(20) 사이 이격 거리가 60mm이며, SMA 줄기(40)가 고정판(20)과 이루는 내각이 80도라 할 때, 고정측 와이어 홀(21)이 고정판(20)의 중심으로부터 17.08mm의 거리에 위치되는 것을 예시하였는데, 이들간의 관계식은 하기에서 상세히 설명하기로 한다.
- [0055] SMA 줄기(40)는, SMA 와이어가 실리콘 튜브에 삽입된 형태로서 구동판(10)과 고정판(20) 사이에 위치된다. SMA 와이어는 온도 상승시 원래의 형태로 복원되는 특성을 갖는데, 이러한 SMA 와이어가 외력에 의해 변형된 후 전류를 인가하게 되면 자체 발열되면서 형태가 복원된다.
- [0056] 구동판(10)이 외력에 의해 회전되면 SMA 줄기(40)가 중심축(30)에 감기게 되고, SMA 줄기(40)가 구동판(10)을 고정판(20)으로부터 이격 지지하고 있기 때문에 SMA 줄기(40)가 중심축(30)에 감기면 감긴 횟수에 비례하여 구동판(10)과 고정판(20) 사이 거리가 감소된다. 이후 SMA 줄기(40)에 전류가 인가되면 SMA 줄기(40)는 발열되면서 원래의 형태로 복원하려는 힘을 발생시키게 되고, 이 과정에서 구동판(10)을 외력이 가해진 반대 방향으로 회전시키면서 고정판(20)으로부터 밀어내게 된다. 이러한 SMA 줄기(40)의 외력에 의한 변형과 전류의 인가에 의한 회복을 하는 것을 통해 본발명 액추에이터의 회전 및 선형 구동이 이루어지게 된다.
- [0058] 아래에서는 본발명 액추에이터의 각부의 크기, 형성 각도, 회전수 등의 관계에 대해 수식을 통해 상세히 설명하기로 한다.
- [0059] 본 발명에서 변수로 활용되는 각부의 변수는 다음과 같다.
- [0060] N: SMA 줄기(40)의 수
- [0061] α : 구동판(10)의 회전 각도($^{\circ}$:degree)
- [0062] Z: 구동판(10)의 회전수
- [0063] S: SMA 줄기(40)의 길이
- [0064] D_s : SMA 줄기(40)의 직경
- [0065] r_s : SMA 줄기(40)의 반경
- [0066] D_c : 중심축(30)의 직경
- [0067] r_c : 중심축(30)의 반경
- [0068] θ : SMA 줄기(40)와 고정판(20)이 이루는 내각($^{\circ}$:degree)

- [0069] H: 구동판(10)과 고정판(20)의 이격 거리
- [0070] r_f : 고정판(20)의 중심으로부터 고정축 와이어 홀(21)까지의 거리
- [0071] r_m : 구동판(10)의 중심으로부터 구동축 와이어 홀(11)까지의 거리
- [0072] (모든 길이에 대한 단위는 mm)
- [0074] 우선, D_s (SMA 줄기(40)의 두께)의 경우 SMA 와이어의 직경이 0.51mm를 넘는 경우 SMA 와이어 자체의 탄성으로 인해 구동판(10)의 회전시 SMA 와이어가 잘 감기지 않고, SMA 와이어가 0.26mm인 경우에는 SMA 와이어 자체의 강도가 낮아 구동판(10)을 고정판(20)으로부터 지지할 때 구동판(10) 자체의 무게에 의해서도 변형되는 문제가 있다. 따라서, SMA 와이어 자체의 직경은 0.26mm보다 크고 0.51mm 미만인, 바람직하게는 0.4mm인 것이 타당하며, 이에 따라 실리콘 튜브는 0.4mm의 SMA 와이어를 삽입할 수 있으면서, SMA 와이어가 중심축(30)에 감긴 상태에서 전류가 인가되었을 때 절연이 파괴되지 않는 정도인 1mm의 직경과 0.5mm의 내경을 갖는 실리콘 튜브가 바람직하다. 따라서, D_s 는 다음과 같이 지정할 수 있다.

수학식 1

- [0075] $0.76mm < D_s < 1.01mm$
- [0076] 그러나 이는 소형 액추에이터일 때 D_s 가 커질수록 액추에이터를 감기 힘들고, 액추에이터의 감은수인 Z값이 비례적으로 줄어들기 때문에 한정된 값이며, 구동판(10)과 고정판(20)의 직경이 상기 예시인 45mm를 수 배 초과하는 더 큰 액추에이터를 설계하거나, 액추에이터의 회전 토크보다 액추에이터 자체의 버티는 힘이 더 크게 요구되는 설계의 경우에는 D_s 값이 상기 수학식1의 범위를 벗어날 수 있다.
- [0077] 다음으로, 중심축(30)의 직경 D_c 의 경우, 도2를 참조하면, SMA 줄기(40) 여러 개를 중심축(30) 없이 회전시켜 감았을 경우를 상정하면, SMA 줄기(40)들 자체의 직경에 따른 빈 공간이 발생되고, 이는 아래와 같이 원에 내접하는 정다각형에 관한 공식을 이용하여 정리할 수 있다.
- [0078] 도2의 경우에, 정다각형의 꼭지점의 갯수를 n , 한 변의 길이를 a 라 하면, $\phi = 360/n$ 이고, $a = 2r_s \sin(\phi/2) = 2r_s \sin(180/n)$ 이 된다.
- [0079] 이때, a 는 두 SMA 줄기(40)의 중심점 사이 거리이므로 $a = 2r_s$ 이며, $r = r_c + r_s$ 이므로, 이를 r_c 에 대한 식으로 다시 쓰면, $r_c = r - r_s$ 가 되는데, $a = 2r_s \sin(180/n)$, 즉, $r = a/2 \sin(180/n)$ 이므로, 식을 정리하면, 다음과 같다.

수학식 2

- [0080]
$$r_c = \frac{r_s}{\sin(\frac{180}{N})} - r_s$$
- [0081] 즉, SMA 줄기(40) 여러 개를 중심축(30) 없이 회전시켜 감았을 경우에 발생하는 공백의 최소치를 중심축(30)의 최소 요구치라 할 때, 중심축(30)의 최소 직경 D_c 는 반경 r_c 의 2배이고, SMA 줄기(40)의 직경 D_s 는 반경 r_s 의 두 배이며, $0.76mm < D_s < 1.01mm$ 로 상기에서 지정하였으므로, 위 식을 중심축(30)의 최소 직경에 대한 식으로 바꿔 쓰면 다음과 같다.

수학식 3

$$D_c \geq \frac{0.76}{\sin(\frac{180}{N})} - 1$$

[0082]

[0084]

다음으로, 본 발명의 SMA 줄기(40)는 도3에 도시된 바와 같이, 고정판(20)에 결합된 위치보다 구동판(10)에 결합된 위치가 더 중심축(30) 방향으로 치우쳐진 형태로서, 고정판(20)과 SMA 줄기(40)가 형성하는 각도가 중심축(30) 방향으로 예각을 형성한다. 이때의 SMA 줄기(40)의 길이 S는 다음과 같은 식을 따른다.

수학식 4

$$r_f r_m = S \times \cos \theta$$

[0085]

[0087]

그리고, 도4를 참조하면, SMA 줄기(40) 하나가 중심축(30)을 한바퀴 감았을 때, 중심축(30)에 밀착된 SMA 줄기(40)의 단면 길이는 $2r_s$ 가 된다. 즉, 하나의 SMA 줄기(40)가 중심축(30)을 한바퀴씩 감을 때마다 SMA 줄기(40)의 직경 하나만큼씩의 SMA 단면 길이가 중심축(30)에 누적되는 것이다. 만일 SMA 줄기(40)가 2개라면 $2*2r_s$ 가 되고, SMA 줄기(40)가 N개일 때에는 $N*2r_s$ 가 되는 것이다. 이때, 구동판(10) 및 고정판(20)으로부터 중심축(30)에 이르는 거리만큼의 SMA 와이어는 중심축(30)에 감길 수 없고, 중심축(30)에 감길 수 없는 SMA 줄기(40)의 회전량은 $r_f + r_m$ 만큼의 회전량이고 이를 중심축(30)에 감았을 경우를 상정한 SMA 줄기(40)의 단면 길이는 $2\pi r$ 을 밀변으로 하고 $2Nr_s$ 를 수직변으로 하는 삼각형과의 닮은꼴정리를 통해 $Nr_s(r_f + r_m) / \pi r$ 임을 알 수 있다.

[0088]

이를 통해, 중심축(30)에 최대로 SMA 줄기(40)를 감았을 때의 회전량 $\alpha_{\max}$ 를 구하기 위해, 도4의 빗변, 즉, SMA 줄기(40)의 길이인 S와, S에 대한 밀변 $\alpha_{\max}(r_f + r_m)$ 대비, 도4의 가장 작은 삼각형인 $2\pi r$ 을 밀변으로 하는 삼각형의 빗변 $\sqrt{(4\pi^2 r^2 + 4N^2 r_s^2)}$ 을 닮은꼴 정리를 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

수학식 5

$$2\pi r : \sqrt{4\pi^2 r^2 + 4N^2 r_s^2} = \alpha_{\max} r : (r_f + r_m) : S$$

[0089]

[0090]

이를 다시 $\alpha_{\max}$ 에 대한 식으로 정리하고, 라디안값인 $\alpha_{\max}$ 를 각도(degree)로 변환시켜주기 위하여 $180/\pi$ 를 곱해주면 최종적으로 다음과 같은 식이 된다.

수학식 6

$$\alpha_{\max} = \frac{\pi r S - (r_f + r_m) \sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 r_s^2}}{r \sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 r_s^2}} \times \frac{180}{\pi}$$

[0091]

[0092]

위 식을 사용하게 되면, 도5와 같이 여유 길이가 남게 되는데, 강제로 구동판(10)을 돌리면 회전수를 조금 더 늘릴 수 있지만, SMA 줄기(40) 자체의 탄성으로 인해 일정량 다시 되풀이게 되며, 풀리지 않는다 하더라도 SMA 줄기(40)가 도면과 같이 구부러져 예상 움직임과 다르게 나타날 수 있다. 따라서, 위 수학식6의 $\alpha_{\max}$ 는 액추에이터가 안정적으로 구동되는 최적의 상태일 때의 최대 감은 수로 해석되는 것이 바람직할 것이다.

[0093]

또한, 결과적으로 액추에이터를 몇 번 감았는지에 대한 수를 Z라 할 때, Z를 알기 위한 식은 다음과 같다.

수학식 7

$$Z = \alpha \times \frac{1}{360} + 0.5$$

[0094]

[0095] 위 수식에서 0.5를 더하는 이유는, 수학식5와 6을 만들기 위한 액추에이터의 초기 조건이 액추에이터를 반바퀴 회전시켜 SMA 줄기(40)가 X자가 되었을 때이므로, α 로부터 산출된 회전수에 0.5를 더해주어야 올바른 Z값이 되기 때문이다.

[0097] 이렇게 구한 수학식1 내지 수학식7을 모아 정리하면서, 수식 간략화를 위하여 중심축(30)의 직경을 최소값으로 정의한다는 가정하에, 구동판(10)에 결합된 SMA 줄기(40)가 중심축(30)에 접하도록 최대로 내측으로 결합된 경우를 가정하면 $r = r_c + r_s = r_m$ 이 되고, 이에 따라 수학식4에 의해 $r_f = \cos \theta + r_m = \cos \theta + r$ 이 되며, r_s 는 수학식1에서 $0.38\text{mm} < r_s < 0.505\text{mm}$ 의 값으로 지정했으므로($D_s = r_s * 2$) 이를 토대로 수학식6과 수학식7을 각각 수학식8과 수학식9로 다시 쓰면 다음과 같다.

수학식 8

$$\left(s \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{\cos \theta}{r} \right) - 2 \right) \frac{180}{\pi} < \alpha_{\max} < \left(s \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{\cos \theta}{r} \right) - 2 \right) \frac{180}{\pi}$$

[0098]

수학식 9

$$\frac{S}{2\pi} \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{\cos \theta}{r} \right) - \frac{1}{\pi} + 0.5 < Z_{\max} < \frac{S}{2\pi} \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{\cos \theta}{r} \right) - \frac{1}{\pi} + 0.5$$

[0099]

[0101] 상기와 같이 수식을 간략화한 경우, 수학식3에 의하면 N이 결정됨에 따라 r또한 고정되므로, N을 고정한다 하였을 때 수학식8과 수학식9에서의 변수는 S, θ , $Z_{\max}$ 가 된다.

[0102] 따라서, 하기에서는 N(SMA 줄기(40)의 수), S(SMA 줄기(40)의 길이), θ (SMA 줄기(40)가 고정판(20)과 이루는 내각), $Z_{\max}$ (구동판(10)의 최대 회전수)를 가장 높은 효율의 범위로 결정하는 과정을 설명한다.

[0103] 우선, SMA 줄기(40)의 갯수는 본발명 액추에이터를 수직하게 세워서 구동하는 상태를 생각해보면, 적어도 3 지점에서 구동판(10)을 지지하여야 구동판(10)이 기울지 않고 지지됨은 자명하다. 따라서, $N \geq 3$ 이 된다.

[0104] 다음으로, SMA 와이어는 그 특성상 변형과 복원을 반복할수록 복원되는 능력이 감소되는데, 이러한 이유로 본발명 액추에이터는 구동판(10)의 회전수가 2회전보다 적을 시 지속력이 저하될 것으로 판단하여 최대 회전수가 2 이상인 것으로 한정한다. 따라서, $Z_{\max} \geq 2$ 가 된다. 물론, SMA 와이어를 0.4mm보다 두꺼운 종류로 사용하는 경우 힘과 지속력은 개선될 수 있으나, 전술한 바와 같이 SMA 와이어 자체의 탄성력으로 인하여 액추에이터로서의 동작에 탄성 영역이라는 변수가 발생하고, 강성 역시 높아지기 때문에 회전량을 늘리기 어렵다는 문제가 있다.

[0105] 도6은 S값을 50mm로 고정한 상태에서 여러 N값에 대하여 θ 값에 따른 Z값의 변화를 도시한 그래프이다. 도6을 통해 알 수 있는 것은 N값, 즉, SMA 줄기(40)의 수가 많아질수록 구동판(10)의 최대 회전수, 즉, Z값이 감소한다는 것이며 이는 직관적으로 자명한 사실이다. 도6에서 주목할 점은 모든 N값에 대하여 그래프의 각도가 35도 이상이어야 회전이 가능한 것으로 나타난 것이며, N의 최소값인 $N=3$ 인 경우에 θ 의 최소값은 35도로 나타났다. 따라서, $\theta > 35^\circ$ 가 된다.

[0106] 고정판(20)과 SMA 줄기(40)의 내각인 θ 는 90도의 경우에 도7a와 같이 SMA 줄기(40)가 무질서하게 감기는 현상이 실험 도중 목격되었다. θ 가 90도 미만인 경우에는 도7b와 같이 구동판(10)과 가까운 부분에서부터 순차적으로 SMA 줄기(40)가 감기게 되었으며, 따라서 $35^\circ < \theta < 90^\circ$ 가 된다.

[0107] 도8은 N=3으로 고정된 상태에서 S값을 50, 100, 200으로 가변한 경우의 그래프이다. 도8을 참조하면 S값이 증가하여도 35도보다 아래의 각도에서 회전된 경우가 없는 것으로 나타났으므로, S값은 θ 값의 범위에 영향을 주지 않는다.

[0108] 마지막으로, 수학적식9를 상기에서 한정된 $Z \geq 2$ 를 적용하여 θ 와 S에 대한 관계식으로 변환하면 다음과 같다.

수학적식 10

$$r \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.505^2}} - \frac{3\pi+2}{S} \right) < \cos\theta < r \left(\frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 r^2 + N^2 0.38^2}} - \frac{3\pi+2}{S} \right)$$

[0111] 한편, 도6을 참조하면, 모든 N값에 대하여 θ 값이 증가할수록 Z값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 말은 즉 r_m 이 r보다 클수록 Z값이 증가하고, 구동판(10)을 더 많이 돌릴 수 있다는 것은 SMA 줄기(40)에 전류를 인가하였을 때 복원되는 양, 즉, 액추에이터가 동력 전달 대상에 가할 수 있는 힘의 양이 증가한다는 것이다. 그러나, θ 이 90도에 가까워질수록 도7과 같이 SMA 줄기(40)가 무질서하게 감기게 되고, 이에 따라 실제 계산된 Z값보다 더 적은 Z값이 적용된다.

[0112] 이때, 수학적식8 내지 수학적식10은 수식의 간략화를 위하여 r_m 값이 최소화된 수치, 즉 $r_m = r = r_c + r_s$ 인 것을 가정하였으므로, 위 수식을 이용하여 N값에 대한 S값을 선정된 후 요구되는 토크에 따라 r_m 값을 조정하여 액추에이터를 설계할 수 있게 된다.

[0114] 상술한 구성으로 이루어진 본 발명은, SMA 줄기(40)가 중심축(30)을 기준으로 감긴 후에 복원되면서 구동판(10)을 회전시키면서 동시에 고정판(20)으로부터 밀어내므로, 동력 전달 대상에 회전 및 선형 동력을 제공할 수 있는 효과가 있다.

[0115] 또한, 본 발명은, SMA 와이어가 실리콘 튜브에 삽입되어 SMA 줄기(40)를 형성하므로, 전류 인가시 빠르게 가열되고 이에 따라 신속한 구동이 가능한 효과가 있다.

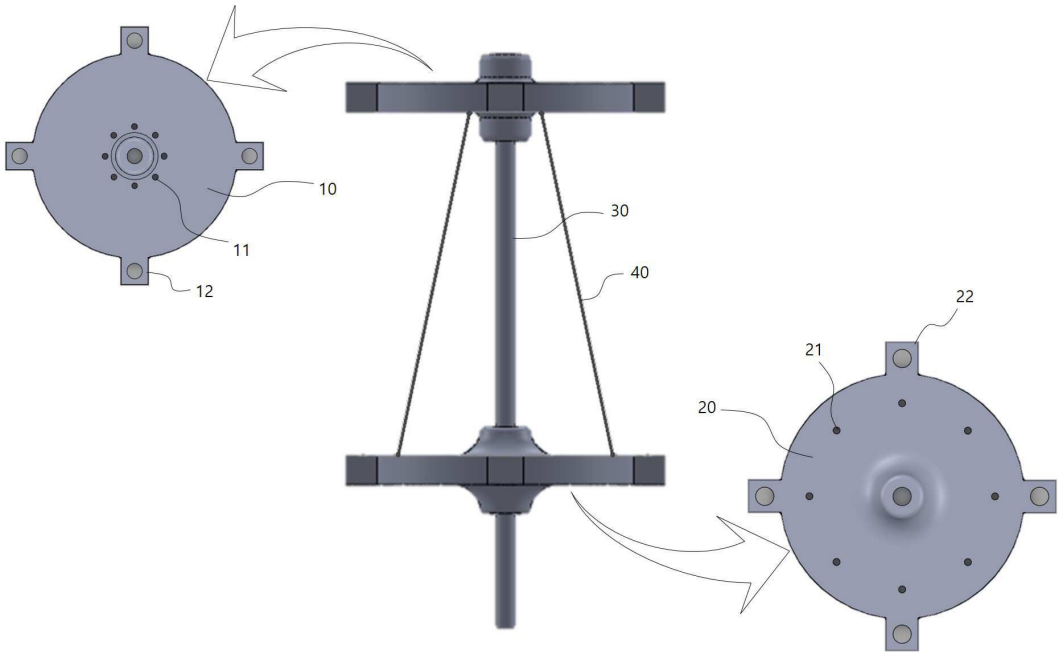
[0116] 또한, 본 발명은, SMA 줄기(40)의 갯수와 길이, SMA 줄기(40)와 고정판(20)이 이루는 각도 등에 의한 구동판(10)의 최대 회전량을 수식을 통해 계산할 수 있으므로, 액추에이터의 설계시 시행착오를 최소화할 수 있는 효과가 있다.

부호의 설명

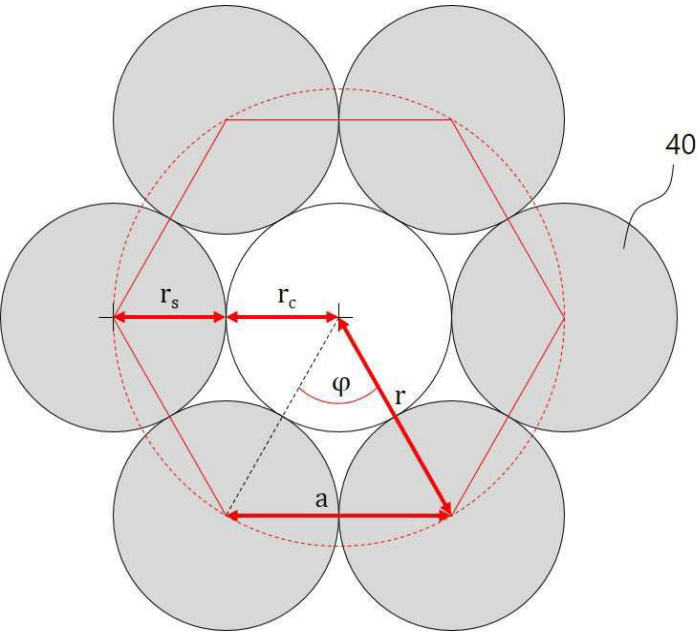
- | | | |
|--------|-------------|----------------|
| [0118] | 10 : 구동판 | 11 : 구동축 와이어 홀 |
| | 12 : 구동축 돌기 | |
| | 20 : 고정판 | 21 : 고정축 와이어 홀 |
| | 22 : 고정축 돌기 | |
| | 30 : 중심축 | |
| | 40 : SMA 줄기 | |

도면

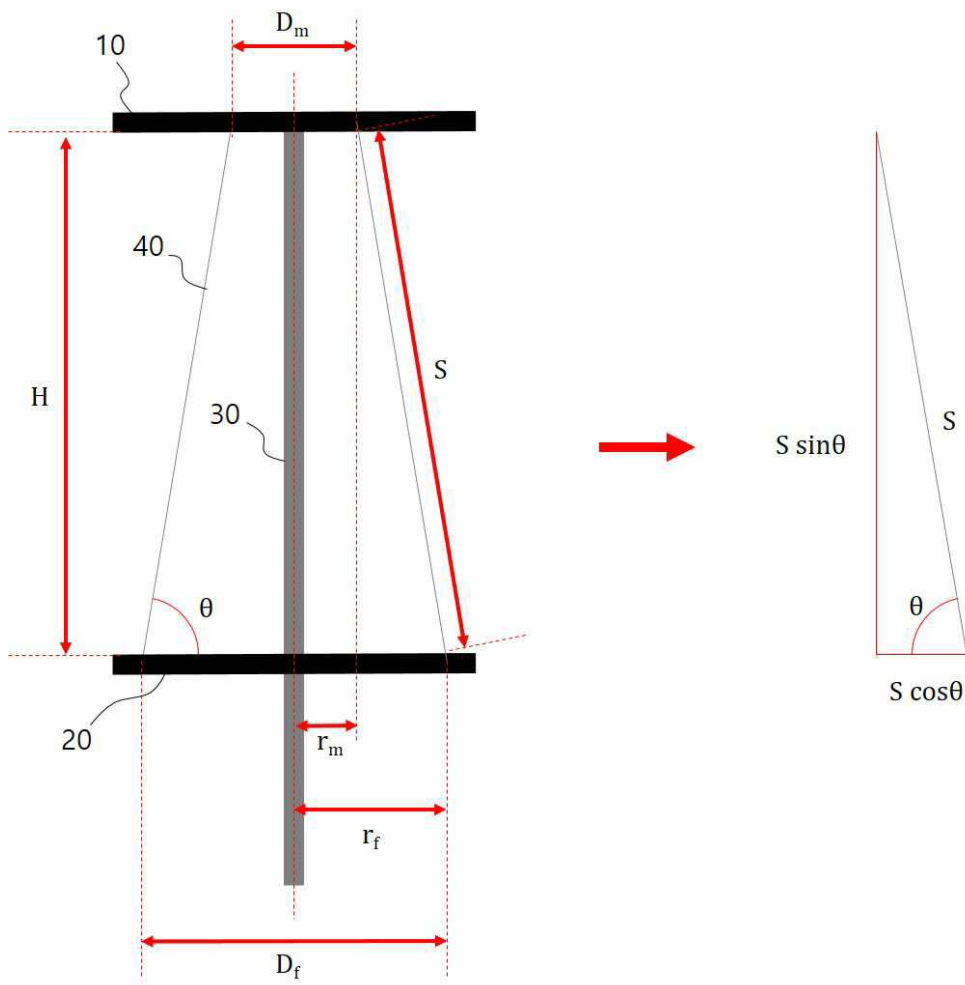
도면1



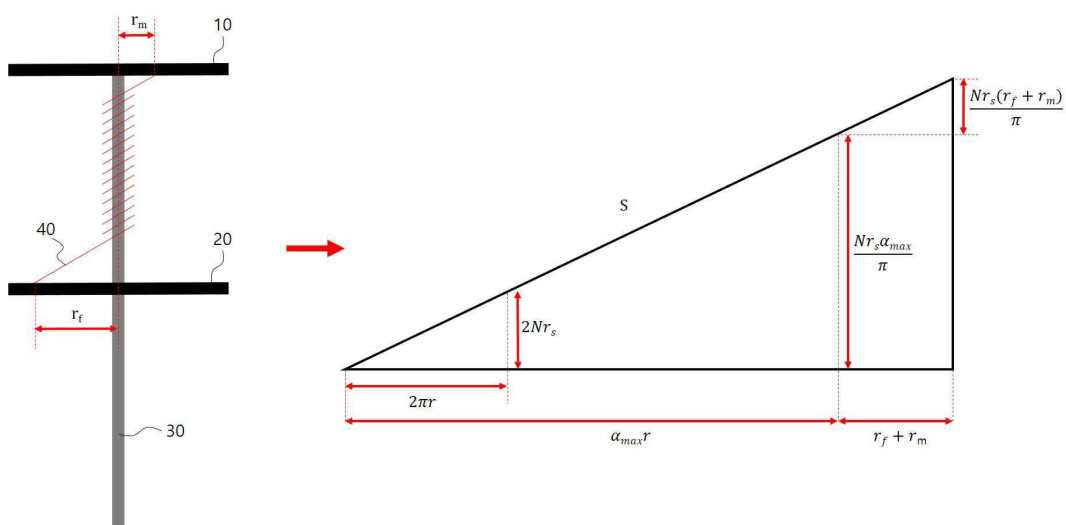
도면2



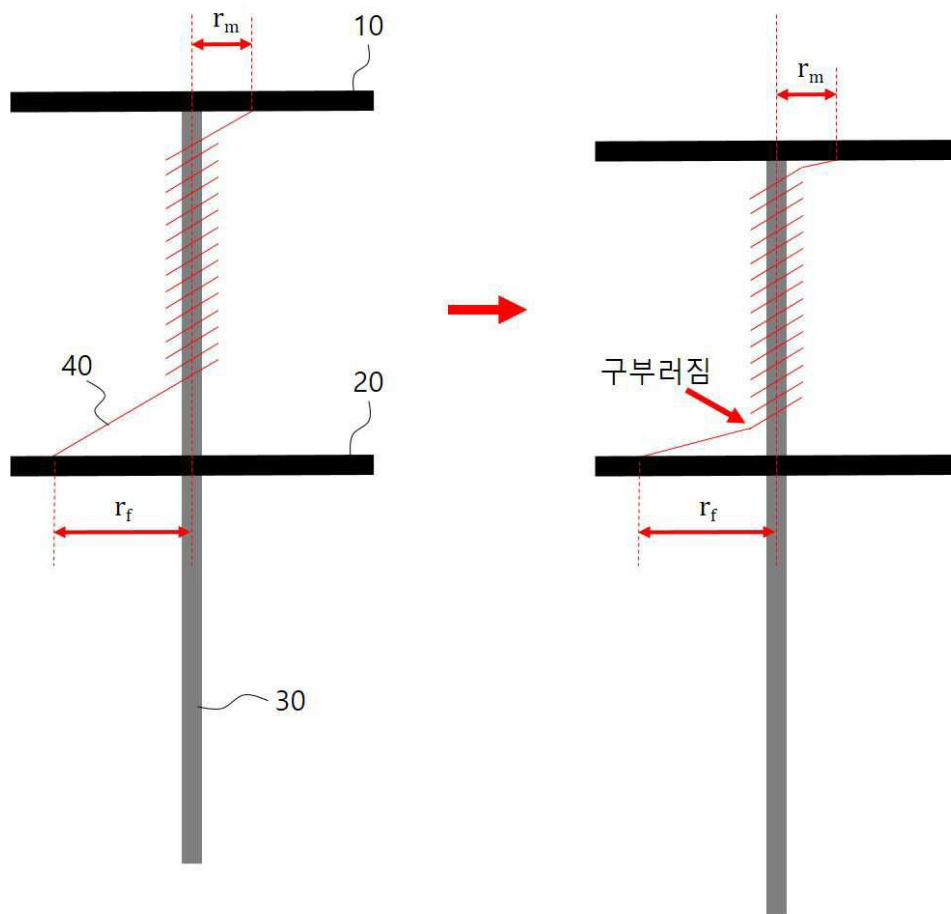
도면3



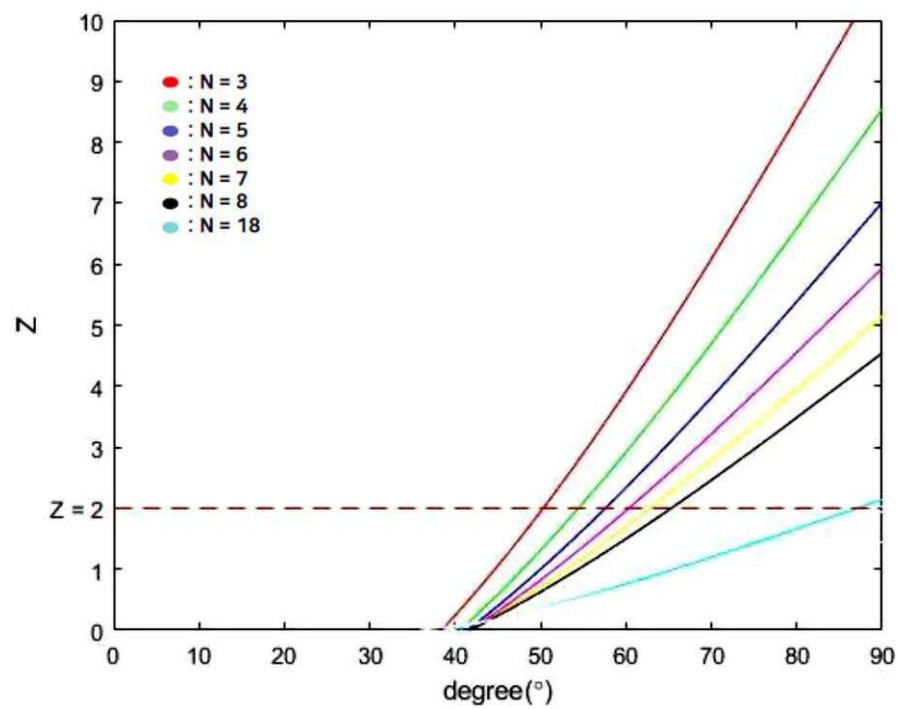
도면4



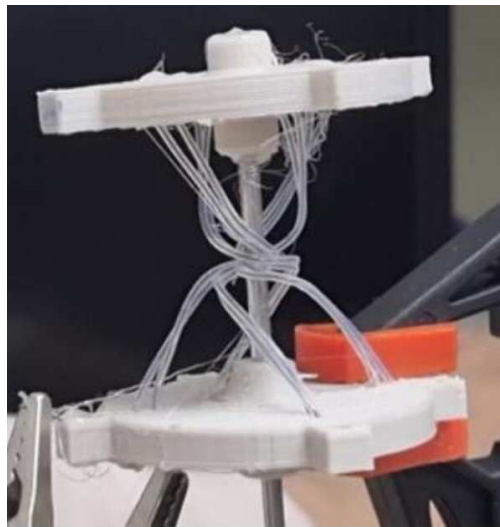
도면5



도면6

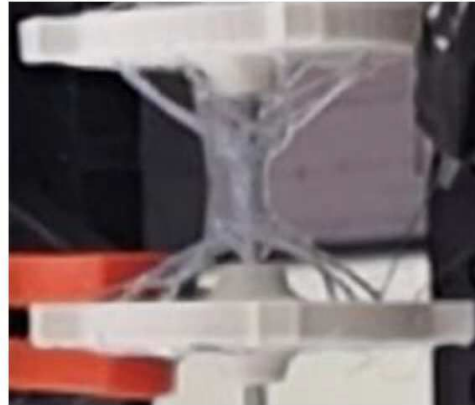


도면7



$\theta = 90^\circ$

<a>



$\theta < 90^\circ$

도면8

