

높은 곡률 각을 가지는 도관 내부의 줄 꼬임 구동에 대한 진동 효과

Effect of Vibration on Twisted String Actuation Inside Conduit at High Curvature Angles

이 동 휘¹ · 이고르 가포노브² · 유지 환[†]

Donghyee Lee¹, Igor Gaponov², Jee-Hwan Ryu[†]

Abstract: This paper studies an effect of vibration on twisted string actuation inside conduit at high curvature angles. In our previous work, we have mentioned that twisted string actuators can be used to transmit power even at significant curvature angles of the conduit. However, several undesirable effects, namely pull-back, hysteresis, and chattering, were present during actuation due to friction between strings and the internal sheath of the conduit. This paper reports the results of experimental study on effects of vibration on twisted string actuation inside curved conduits. We have demonstrated that applying vibration generated near natural frequency of the system during the stages of twisting and untwisting cycles helped reduce pull-back and hysteresis and increase string contraction. In case when sheath was deflected by 180° under a constant load of 3 kg, we were able to achieve over 40% decrease in pull-back and 30% decrease in hysteresis, compared with no vibration case.

Keywords: Twisted Strings, Tendon/Wire Mechanism, Vibration, Friction

1. 서 론

오래전부터 인류는 동력을 전달하기 위한 방법으로 줄을 이용해 왔다. 이러한 줄 꼬임 구동기(TSA: twisted string actuators)는 저가이며 가볍고, 기계적으로 간단한 특성으로 인해 기존의 변속기 시스템에 대한 새로운 대안이 될 수 있다^[1]. TSA의 기본 작동원리는 매우 간단하다. 꼬임이 발생할 때 줄이 수축되어 상대적으로 낮은 토크에 대해 큰 견인력을 발생시키며 줄이 마치 비선형 기어와 같은 역할을 한다. 이러한 TSA의 독특한 이점으로 인해 이동 로봇^[2], 외골격^[3,4] 및 로봇 손^[5]을 포함하여 현대 엔지니어링 및 로봇 공학의 다양한 분야에서 많은 응용 사례가 있다.

TSA의 가장 중요한 장점 중 하나는 기계적 유연성이다. 이 점을 최대한 활용하기 위해서는 줄에 편향된 각을 적용해야 한다. 그러나 이 과정에서 환경과의 접촉으로 인해 줄의 마찰 및 마모가 발생할 수 있다. 따라서 채택 가능한 방법으로는 Bowden 케이블의 유형과 같이 유연한 도관 내부에 줄을 넣는 것이다. 그러나 곡률이 특정 각 이상으로 편향되는 경우, 꼬인 줄의 거동은 기존의 수학적 모델에서 크게 벗어나기 시작한다. 일반적으로 편향된 도관과 접촉하는 줄 꼬임을 설명하는 정확한 모델을 제안하는 것은 상당히 복잡하다. 따라서 잠재적으로 부정적인 영향이 구동하는 동안 발생할 수 있으며 이를 완화하기 위해 줄에 작용하는 마찰을 최소화하는 것이 바람직하다.

이전의 연구들에서 마찰에 의한 현상을 언급한 바가 있다. Palli et al.^[6]는 길이에 따라 여러 지점에서 환경과 접촉하여 줄 꼬임을 설명하는 수학적 모델을 제안했다. 이 모델은 줄의 거동을 비교적 잘 설명할 수 있지만 저자는 마찰 효과를 완화하는 방법을 다루지 않았다. Suthar et al.^[7]는 연속된 도관 내부의 줄 꼬임 전파에 관한 사전 연구를 보고했다. 여기서는 줄이 곡률이 있는 연속된 도관 내부에서 꼬인 경우 마찰로 인한 부정적인 현상 즉, pull-back 및 hysteresis가 나타나고 이러한 현

Received : Jun. 15. 2019; Revised : Jul. 18. 2019; Accepted : Jul. 23. 2019

※ This paper was supported by the Education and Research Promotion Program of KOREATECH in 2017, and by the NRF Korea grant (MSIP) (No. NRF-2016R1E1A1A02921594).

1. MS Student, School of Mechanical Engineering, KOREATECH, Cheonan-si, Korea (wffjt22@koreatech.ac.kr)

2. Professor, School of Mechanical Engineering, KOREATECH, Cheonan-si, Korea (igor@koreatech.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, Korea (jhryu@kaist.ac.kr)

상을 완화하는 방법을 필요하는 것이 입증되었다. 다른 한편, 마찰에 대한 진동의 영향에 대한 연구⁸⁻¹⁰가 있었다. 또한, Kuribayashi et al.¹¹은 마이크로 진동이 케이블과 도관 사이의 마찰력을 줄일 수 있는 방법을 설명했다. 그러나 도관 내부의 줄 꼬임에 대한 진동의 영향과 관련된 연구는 진행된 바가 아직까지 없었다. 따라서 우리는 곡선 도관 내에서 줄 꼬임에 대한 거동을 조사하고 모델링하려는 주제에 대한 이전 연구와는 달리 진동을 통해 마찰로 인한 부정적인 영향을 완화하고자 한다.

본 논문에서는 도관과 꼬인 줄 사이의 마찰을 줄이기 위해 진동을 사용하는 것에 대한 가능성을 조사를 했다. 우리는 두 가지 편향 각(90° 및 180°)에 대해 진동이 있거나 없는 TSA의 거동을 실험적으로 비교했다. 또한 다양한 진동 매개 변수(주파수, 진원 위치, 하중)가 줄 꼬임 전파에 미치는 영향을 평가하였다. 사전 연구의 결과를 토대로 공진주파수를 조사하고 실험적으로 테스트 한 결과, pull-back 현상이 40% 감소하고 hysteresis의 감소 및 액추에이터의 손실된 스트로크가 최대 80% 복구되는 것을 확인하였다.

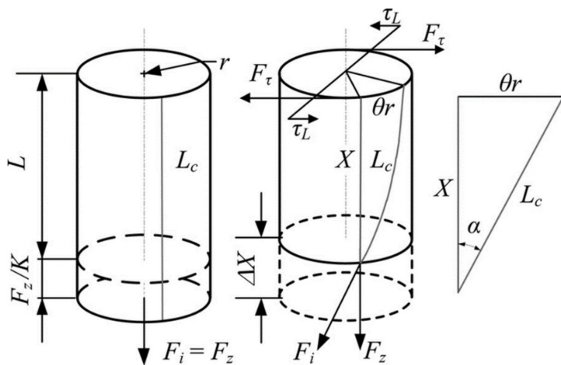
2. 이론적 배경

2.1 TSA의 기구학적 모델

본 절에서는 TSA의 일반적인 수학적 모델에 대해 설명한다. 이 수학적 모델은 케이블의 극소 부분이 균일하게 꼬여 나 선형 구조를 형성한다고 가정하여 파생된다¹²⁻¹⁴. 꼬인 줄의 단면을 도식적으로 표현한 것이 [Fig. 1]이다.

모델을 유도하기 위해, 하중이 적용된 줄의 길이와 그 반지름을 각각 L_c 및 r 로 가정하고, 줄이 모터에 의해 θ 의 각도로 줄이 꼬일 때, 수축되는 길이(ΔX)를 다음과 같이 기하학적 나선 모델에서 구할 수 있다.

$$X = \sqrt{L_c^2 - \theta^2 r^2} \quad (1)$$



[Fig. 1] Geometric scheme of TSA^[13]

꼬임 각(θ)과 선형 수축 길이(ΔX)사이의 관계는 다음과 같다.

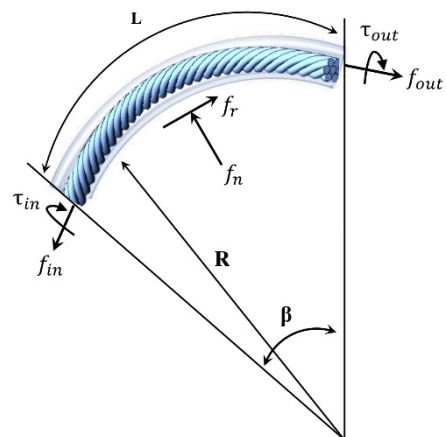
$$\Delta X = L_c - \sqrt{L_c^2 - \theta^2 r^2} \quad (2)$$

위의 수학적 모델은 마찰 계수가 낮은 도관 및 곡률에 대해 수축되는 줄의 길이(ΔX)를 예측하는 데 사용할 수 있다. 그러나, 실제 실험조건에서는 마찰로 인해 모델과 의 오차가 발생하여 도관의 편향 각이 90°를 초과하는 줄 꼬임 동작에는 적합하지 않음이 입증되었다.

2.2 편향된 도관과 꼬인 줄 사이의 마찰력 관계

특정 곡률을 가진 도관 내부에서 꼬인 줄의 거동에 대해 더 잘 이해하기 위해 [Fig. 2]가 도입되었다. 우리는 길이 L 의 도관이 일정한 곡률 반경 R 을 갖는 경로를 따라 각도 β 에 의해 편향된다고 가정한다. 줄이 도관 내부에서 꼬이고 수축하면 (f_{in} 에 해당하는 방향으로), 마찰력(f_r)은 그 방향으로의 수축 및 줄 꼬임 전파를 저항한다. 마찰은 각 반력(f_n)에 의해 결정된다. 이 모델은 이전의 예비 연구⁷에서 사용되었는데, 이는 도관 내부의 줄 꼬임 전파가 방해되었음을 보여준다. Suthar et al.⁷는 또한 곡률이 큰 도관 내부에서 꼬임이 발생할 때, 다음과 같은 부정적 현상을 강조했다.

- **Hysteresis:** 다른 모든 동력 전달 메커니즘의 공학적 한계와 마찬가지로 줄 꼬임 거동은 100%의 효율을 낼 수 없기에 일정량의 hysteresis가 발생한다. 스트레이트한 줄 꼬임의 경우, 비교적 작은 hysteresis가 발생하지만 도관의 곡률이 커질수록 그 양은 증가하게 되며, 마찰로 인해 모터가 방향을 전환하는 영역에서 'dead zone'이 나타난다.



[Fig. 2] Friction force diagram of twisted string inside conduit

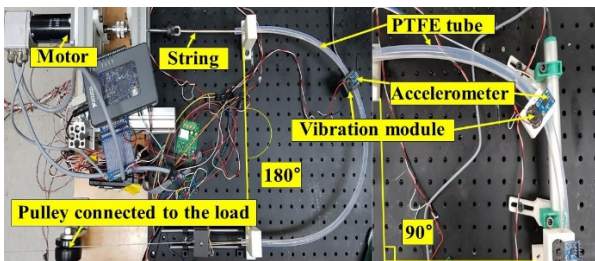
· Pull-back: 새로운 줄 꼬임 사이클이 시작될 때, 부하가 의도치 않게 반대 방향으로 반동하는 현상을 의미한다. 이는 초기 꼬임이 이전의 꼬임 사이클 동안 반대 방향으로 감겨진 모터 쪽 줄을 풀어 버리기 때문이다. 부하가 반동 하기 시작하는 지점부터 다시 모터 쪽으로 움직일 때까지의 변위의 크기를 ‘pull-back’이라고 한다. Pull-back의 크기는 마찰이 증가될수록 줄이 원활하게 풀리는 것을 방해하므로 더 높은 곡률에서 증가된다.

따라서, 본 연구에서는 진동을 통해서 꼬인 줄과 도관 사이의 마찰로 인한 부정적 영향을 완화하는데 목적을 두었다. 다음 절에서는 이 연구에서 사용된 실험 장치 및 절차에 대해 설명한다.

3. 실험 장치 및 절차

3.1 실험 장치

곡률이 있는 도관을 통한 줄 꼬임의 입출력 특성에 대한 진동의 영향을 연구하기 위해 [Fig. 3]과 같은 실험 장치를 사용하여 실험을 진행 하였다. 500-CPT encoder가 장착된 EC 모터(Maxon 45, 250 W), 3 채널, 라인 드라이버 RS 442 (HEDL-9140)는 프로파일 프레임에 견고하게 장착된다. 실험에 사용된 도관인 PTFE 튜브는 내경이 10 mm이고 두께가 1 mm이고 길이는 500 mm이다. 또한 직경 1 mm, 길이 500 mm의 한 쌍의 Dyneema 줄을 모터에 부착하고 도관을 통해 다른 쪽의 하중에 연결하였다. 실험 중에는 1 kg에서 5 kg 사이의 일정한 하중이 줄에 작용한다. 도관의 처짐 각도는 0°에서 180° 변화가 될 수 있으며, 일정한 곡률 반경은 220 mm로 설정되었다. 해당 곡률 반경을 설정한 이유는, 줄과 도관의 길이에 의해 설정된 값으로, 이 이상의 곡률 반경을 적용 시, 도관의 형상이 파괴되는 현상이 발생하여, 해당 곡률 반경을 설정하



[Fig. 3] Experimental setup (left: 180°, right: 90°): A EC motor is used to twist the string inside a conduit, with vibration motor and accelerometer attached to it. The other end of the string attached to payload through a pulley

였다. 또한 Suthar et al.^[7]에서, 도관의 곡률이 증가할 수록 마찰에 의한 부정적 영향인 pull-back과 hysteresis의 영향이 증가 되는 경향을 보고하였다. 특히 높은 편향 각(90°와 180°)에서 부정적 영향이 악화 되었으므로, 본 연구에서, 우리는 90°와 180°의 두 가지 고정 값을 선택하여 실험을 진행하고자 한다. 진동 모터(MB2025-1268V, 6880 rpm)는 도관의 곡선 부분에 설치되었고, 진동 주파수와 진폭 측정을 위해 진동 모터 옆에 가속도계(ADXL335 - GY61)를 부착하였다. 선형 증분 엔코더 (HEDS - 9740)는 줄의 수축 거리 측정을 위해 하중 측에 설치되었다. 추가적으로, TSA의 초기 slack을 방지하기 위해서 줄에 사전 장력이 적용되었다.

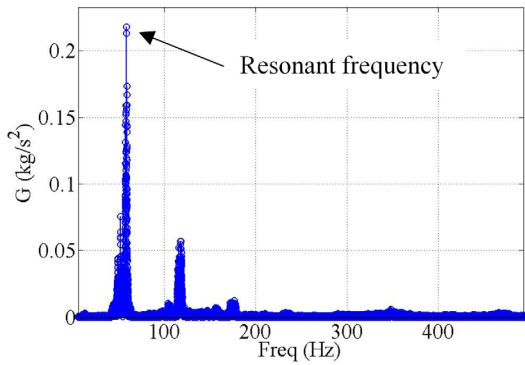
위의 제안된 단계에 따라서 줄의 꼬임은 모터 쪽으로 일정한 하중을 끌어 당기는 수축을 발생시킨다. 제어 시스템은 모든 실험 동안 모터가 0.5 Hz의 정현파 입력 궤도를 따르는 것을 확인했다.

3.2 실험 준비 및 절차

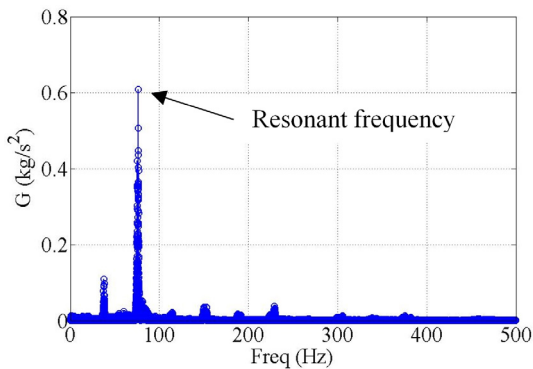
곡선 도관 내에서의 꼬임 전파에 대한 진동 효과를 평가하기 위해 2가지 다른 곡률 각과 다양한 하중 가중치, 다른 진동 주파수 및 트리거 모드에 대한 줄 꼬임의 입력-출력 위치 관계를 연구했다. 결과 분석을 위해 이들 모두는 진동이 없는 TSA 거동과 비교되었다.

마찰을 최소화하기 위해서는 줄과 도관의 적절한 재질을 선택하는 것이 중요하다. 일부 연구에 따르면 초 고 분자량 폴리에틸렌(UHMW - PE)과 폴리 테트라 플루오르 에틸렌 (PTFE)재료의 조합은 가장 낮은 마찰 계수(0.04 - 0.06)^[15]를 가진다. 본 연구에서는 Dyneema (polymer - polyethylenefiber로 만든 소재)와 자체 윤활성, 극도로 낮은 마찰 계수로 인해 PTFE로 만들어진 도관을 선정하였다. 또한 PTFE의 경우, 다른 재질에 비해 상대적으로 낮은 주파수에서도 진동이 잘 전도되는 점과 진동을 적용하면 진폭이 증가함에 따라 마찰 계수가 감소하므로 적절한 조건을 적용하면 마찰의 부정적인 영향을 완화하는데 도움이 될 수 있다^[16].

도관에서의 진동 효과를 극대화하기 위해 마찰이 꼬임에 가장 큰 영향을 줄 것으로 예상되는 편향된 도관의 중간 부분에 진동 모터와 가속도계를 설치하였다. 각각의 실험 전, 시스템의 공진 주파수를 결정하기 위해 예비 시험을 수행했다. 이 시험에서, 줄은 2 kg 및 3 kg의 일정한 하중 하에서 각각 90°와 180°편향된 도관 내부에서 줄이 꼬이는 동안, 도관의 진동 진폭을 측정하면서 500 Hz까지 주파수 범위를 발생시켰다. 데이터 수집 후, 우리는 공진 주파수를 조사하기 위해 FFT (fast fourier transform)을 수행하여 [Fig. 4]와 [Fig. 5]와 같이 FFT를 수행하였다.



[Fig. 4] Frequency response of sheath under 90° deflection and 2-kg payload. Resonant frequency is found to be 56 Hz



[Fig. 5] Frequency response of sheath under 180° deflection and 3-kg payload. Resonant frequency is found to be 77 Hz

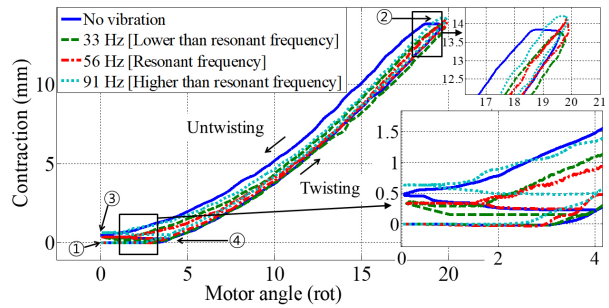
[Table 1] Resonant frequency for different curvature and loads

Curvature	Load	Resonant frequency
90°	1 kg	33 Hz
	2 kg	56 Hz
	3 kg	76 Hz
180°	1 kg	42 Hz
	2 kg	64 Hz
	3 kg	77 Hz

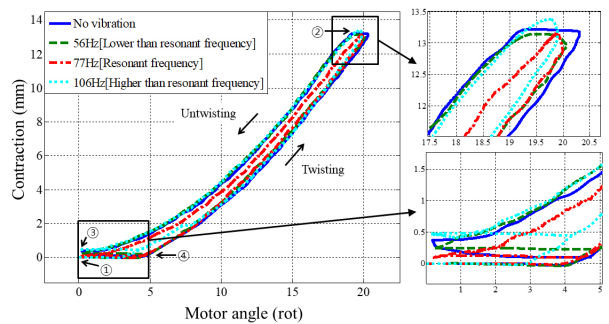
고유 진동수의 결과는 [Table 1]에 요약되어 있다. [Table 1]에 따르면, 공진 주파수는 외부 하중의 변화에 민감하지만 곡률의 변화에 대한 의존성은 적음을 알 수 있다.

4. 실험적 평가

본 실험은 진동이 편향된 TSA의 입출력 위치 특성에 미치는 영향을 검증하기 위한 것이다. 이를 위해 줄이 꼬일 때와 풀릴 때 모두 진동이 켜져 있는 동안 TSA의 입력(모터 각도) 및 출력(줄의 수축) 위치를 측정했다. 동일한 실험을 세 가지 주파수 값(고유 진동수, 고유 진동수보다 높거나 낮은 진동수)로



[Fig. 6] Effect of vibration at different frequencies on twisted string under 90° deflection and 2-kg payload



[Fig. 7] Effect of vibration at different frequencies on twisted string under 90° deflection and 3-kg payload

반복했다. 실험에서, 줄은 일정한 하중(2, 3 kg)에서 고정된 양만큼 반복적으로 꼬임과 풀림을 진행했고, 그 결과에 따른 입출력 위치 그래프(곡률 각도가 90°인 경우)는 [Fig. 6], [Fig. 7]에서 나타낸다. 첫번째 사이클이 완료된 후 모든 후속 사례에서 줄의 동작은 특정 양의 히스테리시스 있는 안정된 limit cycle로 수렴된다. 이 limit cycle을 표현하는 모든 곡선은 5개의 전체 사이클에 기초한 평균 데이터이다.

측정된 입출력 위치 그래프는 [Fig. 6], [Fig. 7]에 보인 바와 같다. 도관 내부에서 꼬일 때 줄은 다음과 같이 동작한다.

- 점 1-2: 첫 번째 사이클 동안 모터에서 부하 쪽으로 연결된 도관을 따라 줄 꼬임이 시작되고 부하가 움직이기 시작한다. 점 1은 TSA의 초기 꼬임이 시작되는 지점인 반면, 점 2는 최대 수축 상태를 나타낸다.
- 점 2-3: 이 구간은 TSA가 완전히 풀린 주기에 해당한다. 꼬임이 점 3에서 멈추면 기존의 마찰로 인하여 하중 측의 도관 내부에 일정한 양의 꼬임이 남아 있게 된다. 이 때문에 모터 쪽의 줄 꼬임이 반대 방향으로 꼬인 상태가 유지되므로, 부하가 원래 위치로 돌아가지 않는다.
- Limit cycle 3-4-2: 첫 번째 사이클 후에 꼬인 줄의 거동은 안정된 limit cycle로 수렴하게 된다. 또한 점 3과 4사이에서

pull-back이 발생하며, 이는 모터가 줄을 회전함에도 불구하고, 부하 측에서 원치 않은 반동 동작을 의미한다. 그 후 수축 곡선은 첫번째 주기를 반복하게 된다.

2절에서 간략히 언급했듯이, 이전 주기 이후의 줄에서 역방향 꼬임이 존재하기 때문에 pull-back 현상이 발생한다. Pull-back의 크기가 크면, [Fig. 6], [Fig. 7]의 점3과 4의 높이의 차이는 예상되는 수축 대신 줄의 인장을 야기하기 때문에 바람직하지 못하며, 따라서 이 영역에서는 액추에이터의 제어가 어렵다. 또한, 점 3은 가능한 한 점 1에 가깝게 내려가야 한다. 그 이유는 이들 사이의 수직 거리가 마찰로 인한 꼬인 줄의 유효 스트로크 손실에 해당되기 때문이다. 여기서의 스트로크는 부하의 동작으로 표현가능하다.

[Fig. 6], [Fig. 7]에서 진동의 적용이 TSA의 특성에 상당히 큰 영향을 미쳤다는 것을 확인할 수 있다. 첫번째로, 공진 주파수 주변의 진동으로 pull-back(약 30~40%감소)과 손실 스트로크를 줄이는데 도움이 되었다. 두번째는 진동을 가한 경우 줄이 진동이 없는 경우보다 더 수축되었다. 그러나 꼬임이 시작된 직후(점 2)에 진동이 있는 경우 수축이 잠깐 증가(약 1~2 mm) 했으므로 우리는 잠정적으로 ‘overshoot’이라 명명하였다. 이 현상은 진동이 없는 실험에서는 관찰이 되지 않았으며, 이는 마찰을 감소시키기 위한 진동이 부하 단에 영향을 준 것으로 판단할 수 있다. 해당하는 영역은 줄이 완전히 꼬이는 단계에서 발생하여, 진동이 부하를 당기는 쪽(줄이 꼬이는 방향)으로 도움을 준 것으로 판단하였다. 마지막으로, 진동은 줄이 동작하는 동안 히스테리시스를 상당히 크게 감소(약 30%)시키는데 도움이 되었다.

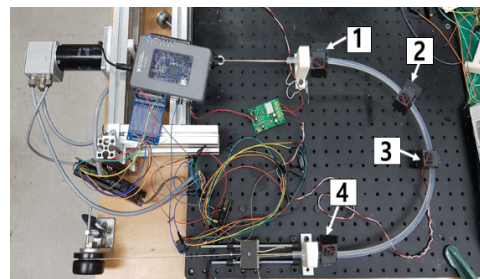
[Table 2] Decrease in pull-back and lost stroke with vibration

Load	Frequency	Pull-back	Stoke loss
1 kg	Low : 20 Hz	5%	- 17%
	Resonant : 33 Hz	26%	- 33%
	High : 91 Hz	9.7%	+ 22%
2 kg	Low : 33 Hz	20%	- 28%
	Resonant : 56 Hz	30%	- 34%
	High : 91 Hz	15%	+ 28%
3 kg	Low : 56 Hz	28%	- 34%
	Resonant : 77 Hz	40%	- 73%
	High : 106 Hz	30%	+ 30%
4 kg	Low : 56 Hz	26%	- 32%
	Resonant : 106 Hz	40%	- 64%
	High : 140 Hz	33%	- 45%
5 kg	Low : 56 Hz	15%	- 33%
	Resonant : 110 Hz	32%	- 80%
	High : 140 Hz	20%	- 43%

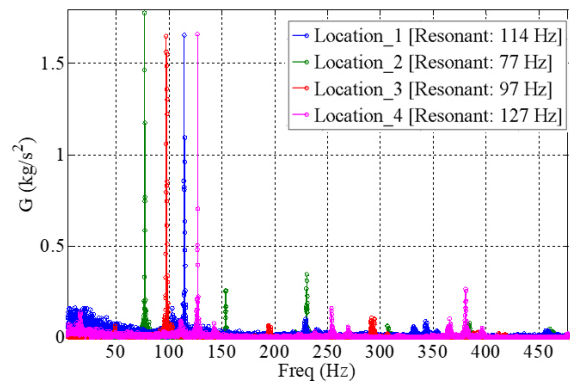
우리는 다른 하중 조건에서 동일한 경향을 관찰하기 위해 같은 실험을 반복했다. 실험 결과는 [Table 2]에 요약되어 있다. ‘Stroke loss’ 열의 음수 부호는 값의 감소(긍정적 효과)에 해당되며, 반대의 경우 부정적 효과를 의미한다. 이 데이터로부터, 꼬인 줄이 있는 도관에 진동을 가하는 것은 TSA의 작동에 긍정적인 영향을 미칠 수 있는데, 그 이유는 진동이 줄과 도관 사이의 마찰계수를

효과적으로 감소시키기 때문이다. 시스템의 자연(공진)주파수에 가까운 주파수로 진동을 생성하는 것이 가장 두드러진 영향을 미치는 것으로 보이며 TSA의 동작 동안 지속적인 진동을 가하면 pull-back이 20-40%감소하고 손실 스트로크는 최대 70-80%감소한다.

다음으로는 진동 모듈의 위치에 따른 응답 특성을 조사하기 위한 실험을 진행하였다. 이전에 진행된 실험의 경우, 편향된 도관에서 줄이 완전히 꼬였을 때 도관과의 마찰로 인해 꼬임의 전파가 끊기는 지점, 즉 도관과 꼬인 줄 사이의 마찰이 가장 클 것으로 예상되는 위치에 진동 모듈을 설치하였다. 하지만 다른 위치에 진동 모듈을 설치했을 때 대한 진동의 영향에 대한 검증이 되지 않았기 때문에, 실험을 통한 조사가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 180°로 편향된 도관을 [Fig. 8]과 같이 4개의 지점을 나누어 각 지점에 진동 모듈을 설치하였을 때 줄 꼬임 구동기의 응답 특성을 확인하고자 한다.



[Fig. 8] Experimental setup of vibration at different vibration module location under 180° deflection angle and 3-kg payload



[Fig. 9] Resonant frequency of vibration at different vibration module location under 180° deflection angle and 3-kg payload

본 실험에 앞서, 이전 실험에서 보고된 공진주파수 대역에서의 진동이 가장 효과적인 경향을 보였으므로 각 지점에 위치한 진동 모듈의 공진 주파수를 조사하는 사전 실험을 진행하였다. 결과는 [Fig. 9]와 같다.

각 위치에 따른 공진 주파수는 비슷한 경향의 진폭(1.6~1.7G)를 보였으며, 이를 통해서 해당하는 진동은 서로 비슷한 진동 효과를 보일 것으로 판단하였다. 다음 실험에서는 조사된 각 지점의 공진주파수에 해당하는 진동을 적용하여 도관 내의 줄 꼬임에 대한 입출력 위치 특성을 조사한다.

[Fig. 10], [Fig. 11]과 같이 각각 Location_1 과 Location_4에서의 공진 주파수에 해당하는 진동을 적용했을 때 얻은 줄 꼬임 위치 응답 특성을 조사하였다. 실험 결과는 Limit cycle에 도달한 상태에서의 5회의 사이클을 진동이 없는 실험과 비교하였다. 흥미로운 사실은 pull-back은 각 모듈의 위치에 해당하는 공진 주파수에서 이전 실험과 같이 비슷한 감소량(약 30~40%)을 보였다는 점이다. 이 밖의 다른 위치에서도 동일한 경향을 보였다. 따라서 pull-back 감소량은 위치에 제약없이 각 지점에 해당하는 공진주파수 인가했을 때 효과적임을 확인하였다.

반면, ②에서 최대 수축 길이의 증가(Stroke gain: 진동이 없는 실험대비 증가된 수직 길이)와 Hysteresis의 감소량(Dead Zone: 진동이 없는 실험대비 감소된 수평 길이)는 각 모듈의 위치에 따라 다른 경향성을 보였다. 각 위치에 따른 진동 효과는

[Table 3] Effect of vibration at different location

	Pullback	Hysteresis	Stroke gain	Resonant
Location_1	-40%	-43%	+14%	114 Hz
Location_2	-41%	-25%	+5%	77 Hz
Location_3	-43%	-18.4%	+17%	97 Hz
Location_4	-47%	-40%	+14%	127 Hz

[Table 3]에 정리되어 있으며, Pull-back과 Hysteresis의 경우 '-' 부호는 감소량(감정)을 의미하며, Stroke gain은 '+' 부호는 증가량(감정)을 의미한다.

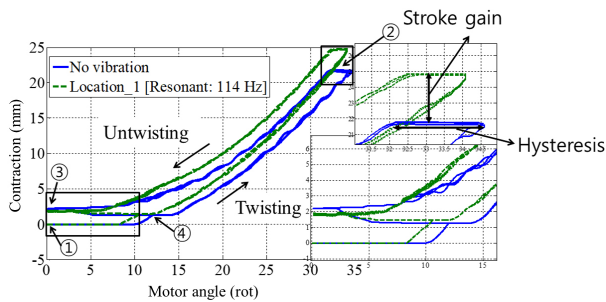
[Table 3]의 결과를 보았을 때 pull-back은 비슷한 감소량(약 30~40%)을 보였으며 위치에 따른 유의미한 차이를 보이지 않았다. Hysteresis의 경우 Location_1에서 높은 감소량을 보였다. Stroke gain은 Location_2를 제외한 나머지 위치에서 13%~17%의 증가량을 보였다. 따라서 모든 영향을 고려해볼 때 최적의 진동 모듈의 위치는 Location_4(부하에 가까운 위치)로 선정할 수 있다. 이는 진동 모듈의 설치에 용이한 효과가 있지만 가장 높은 공진 주파수의 진동이 필요하다는 점에서 소음 및 진동 모터의 에너지 효율을 고려해 볼 때 단점이 될 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

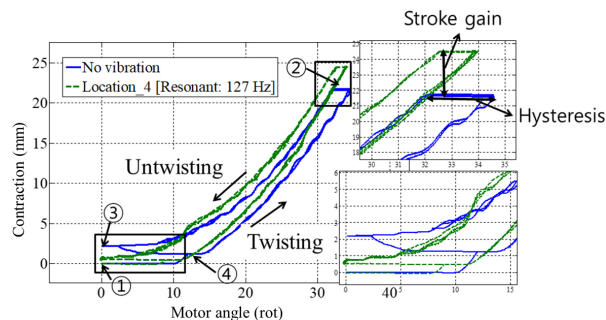
본 논문은 진동이 상당한 굴곡 각에서 도관 내부의 줄 꼬임 거동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구 결과를 제공한다. 도관의 굴곡된 영역에 대한 공진 주파수에서의 진동의 적용은 pull-back과 hysteresis의 상당한 감소를 보였다. 또한 더 높거나 낮은 주파수에서 발생하는 진동의 영향은 마찰을 줄이는데 효과적이지 못하다는 것이 발견되었고, pull-back은 진동의 위치에 관계없이 해당하는 위치의 공진주파수에 대한 진동은 비슷한 경향을 보였다. 하지만, hysteresis 및 stroke gain은 진동 모듈의 위치에 따라 다른 경향을 보였다. 결과적으로, 부하에 가장 가깝게 진동 모듈 설치하는 것이 최적의 위치이며, 진동을 사용하면 마찰 감소로 인해 꼬인 줄의 바람직하지 않은 거동을 최소화함으로써 보다 효과적으로 유연한 TSA를 사용할 수 있다. 이는 TSA의 활용 가능한 어플리케이션 영역을 확장시키는 효과를 기대할 수 있다.

허나, 도관에 진동 모터를 추가로 설치하면 공학적 문제가 발생할 수 있으며 저 주파수의 진동이 발생하고 크기가 작은 경우에도 진동으로 인해 웨어러블 어플리케이션에 적용될 때, 착용자에게 불편함을 느끼게 할 수 있다.

또한, 'overshoot' 과 같은 의도하지 않은 현상은 향후 구동기의 제어에 문제를 야기할 수 있다. 이러한 현상은 줄이 꼬일 때 발생하는 현상으로, 향후 진동 패턴에 따른 on/off식의 진동 패턴 연구를 통해 해결할 예정이다. 또한 웨어러블 기기에 적



[Fig. 10] Effect of vibration at different module Location_1 on twisted string under 180° deflection and 3-kg payload



[Fig. 11] Effect of vibration at different module Location_4 on twisted string under 180° deflection and 3-kg payload

합하며 진동 모터에 최적화된 액추에이터를 개발할 것이며, 추가적으로 도관에 윤활을 적용하여 내부 마찰을 더욱 줄임으로써, 진동 전달 효율을 높이고 소음을 줄여 사용자의 불편함을 최소화 할 것이다.

References

- [1] P. E. Garcia, T. P. Low, H. Prahlad, D. Aukes, S. Kim, and R. D. Kornbluh, "Twisted string actuator systems," *U.S. Patent No. US9272425B2*, Mar., 1, 2016.
- [2] I.-W. Park and V. SunSpiral, "Impedance controlled twisted string actuators for tensegrity robots," *2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014)*, pp. 1331-1338, Seoul, South Korea, 2014.
- [3] I. Gaponov, D. Popov, S. J. Lee, and J.-H. Ryu, "Auxilio: a portable cable-driven exosuit for upper extremity assistance," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 73-84, Feb., 2017.
- [4] R. Shisheie, L. Jiang, L. E. Banta, and M. Cheng, "Design and fabrication of an assistive device for arm rehabilitation using twisted string system," *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 255-260, Madison, WI, USA, 2013.
- [5] S. H. Jeong, K.-S. Kim, and S. Kim, "Designing anthropomorphic robot hand with active dual-mode twisted string actuation mechanism and tiny tension sensors," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 1571-1578, Jul., 2017.
- [6] G. Palli, M. Hosseini, and C. Melchiorri, "Twisted string actuation with sliding surfaces," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 260-265, Daejeon, South Korea, 2016.
- [7] B. Suthar, M. Usman, H. Seong, I. Gaponov, and J.-H. Ryu, "Preliminary study of twisted string actuation through a conduit toward soft and wearable actuation," *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2260-2265, Brisbane, QLD, Australia, 2018.
- [8] W. Littmann, H. Storck, and J. Wallaschek, "Reduction of friction using piezoelectrically excited ultrasonic vibrations," *International Society for Optics and Photonics, Smart Structures and Materials, Damping and Isolation*, vol. 4331, pp. 302-312, 2001.
- [9] W. W. Tworzydło and E. Becker, "Influence of forced vibrations on the static coefficient of friction-numerical modeling," *Wear*, vol. 143, no. 1, pp. 175-196, Mar., 1991
- [10] H. D. Fridman and P. Levesque, "Reduction of static friction by sonic vibrations," *Journal of applied physics*, vol. 30, no. 10, pp. 1572-1575, 1959.
- [11] K. Kuribayashi, S. Shimizu, K. Yuasa, T. Taniguchi, and Y. Ikeda, "Friction force reduction of conduit guided wire by vibration," *1994 5th International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1994*, Nagoya, Japan, DOI: 10.1109/ISMMHS.1994.512922.
- [12] G. Palli, G. Borghesan, and C. Melchiorri, "Modeling, identification, and control of tendon-based actuation systems," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 2, pp. 277-290, Apr., 2012.
- [13] I. Gaponov, D. Popov, and J.-H. Ryu, "Twisted string actuation systems: A study of the mathematical model and a comparison of twisted strings," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1331-1342, 2014.
- [14] J. Park, K.-S. Kim, and S. Kim, "Experimental Verification of Variable Radius Model and Stiffness Model for Twisted String Actuators (TSAs)," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 12 no. 4, pp. 419-424, Dec., 2017.
- [15] V. Quaglini and P. Dubini, "Friction of polymers sliding on smooth surfaces," *Advances in Tribology*, vol. 2011, Article ID 178943, pp. 1-8, 2011.
- [16] M. A. Chowdhury and Md. M. Helali, "The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials," *Tribology International*, vol. 41, no. 4, pp. 307-314, Apr., 2008.



이 동 휘

2017 한국기술교육대학교 기계공학과(공학사)
2012~현재 한국기술교육대학교 기계공학과 석사과정

관심분야: Rehabilitation robotics, Biorobotics, Human-machine interaction, Twisted string actuators



Igor Gaponov

2011 한국기술교육대학교 기계공학과(공학박사)
2012~현재 한국기술교육대학교 기계공학부 교수로 재직 중

관심분야: Teleoperation, Biorobotics, Human-machine interaction, Twisted string actuators



유 지 환

2002 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
2012~2019 한국기술교육대학교 기계공학부 교수
2019~현재 카이스트 건설 및 환경공학과 교수

관심분야: Haptics, Teleoperation, Autonomous Vehicle, Twisted string actuators