



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

관성 모멘트 감소를 위한  
벨트 하모닉 감속기 개발

Development of Belt Harmonic Reducer for  
Reducing Link Moment of Inertia

2021 년 8 월

서울대학교 대학원

지능정보융합학과

유 승 빈

# 관성 모멘트 감소를 위한 벨트 하모닉 감속기 개발

Development of Belt Harmonic Reducer for  
Reducing Link Moment of Inertia

지도 교수 박재홍

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2021년 7월

서울대학교 대학원  
지능정보융합학과  
유승빈

유승빈의 공학석사 학위논문을 인준함  
2021년 6월

위원장	_____ 권가진 _____
부위원장	_____ 박재홍 _____
위원	_____ 이원중 _____

# 초 록

전기 모터는 빠른 제어 반응성과 상대적으로 용이한 에너지원 관리로 인해 현대 로봇 분야에서 가장 범용적으로 사용되는 액추에이터 중 하나이다. 그러나 높은 회전 속도 대비 부족한 가용 토크 범위 때문에, 대부분의 로봇 설계에서 토크를 증가시키는 감속기와 함께 적용된다. 특히, 큰 감속비와 높은 정밀도라는 장점으로 인해 파동 조화 감속기 일명 하모닉 기어는 여러 가지 로봇 설계에서 자주 사용된다.

그러나 하모닉 기어는 어려운 제조 공정 및 탄성체로 만들어진 동력 전달원 등으로 인하여 두께 제한 등 여러 가지 한계가 존재한다. 한편, 족형 로봇의 경우, 다리의 관성 모멘트가 제어 반응성에 영향을 줄 수 있으므로 각 관절에 모터와 감속기를 포함한 액추에이터를 직접 배치하기 어렵다. 또한, 감속기와 동시에 동력 전달 장치나 4절 링크를 사용하면 전체적인 부피가 커지고 무게가 무거워지는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 체인, 타이밍 벨트 등의 동력 전달 장치로 탄성체를 모사하여 플렉스 스플라인을 대체하는 새로운 감속기를 제안한다. 특히, 벨트 하모닉 감속기의 원리를 사용하여, 동력 축과 관절 축을 분리함과 동시에 고감속비의 액추에이터를 적용할 수 있는 HABA-T(HArmonic Belt Applied Transmission)를 제시하였으며, 위치 추종 성능을 분석하여 관성 모멘트 감소가 필요한 링크에 설계 적용 가능성을 제시하였다.

**주요어** : 감속기 설계, 동력 전달 장치, 관성 모멘트 감소, 위치 추종 성능

**학 번** : 2019-26877

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구의 배경 및 동기 .....	1
제 2 절 연구 동향 .....	5
제 3 절 연구 목표 및 방법 .....	9
제 2 장 체인을 활용한 하모닉 감속기 설계 .....	10
제 1 절 기존 하모닉 감속기의 감속 원리 .....	10
제 2 절 끈 형태의 동력 전달 장치의 감속 원리 .....	11
제 3 절 체인을 활용한 하모닉 감속기 설계 .....	13
제 3 장 관성모멘트 감소를 위한 감속 장치 설계 .....	19
제 1 절 벨트 하모닉 감속기 작동 원리 .....	19
제 2 절 벨트 하모닉 감속기 적용 분야 .....	22
제 3 절 벨트 하모닉 감속기 이론적 한계점 .....	24
제 4 절 한계 극복 방법 .....	26
제 5 절 설계 .....	31
제 4 장 위치 추종 성능 실험 .....	32
제 1 절 실험 개요 및 구성 .....	32
제 2 절 실험 결과 .....	33
제 3 절 고찰 .....	36
제 5 장 결론 .....	37
참고문헌 .....	39
Abstract .....	44

# 표 목차

[표 1] 다관절 족형 로봇의 감속기 타입 .....	10
[표 2] 전체 실험 구성 요소의 사양 .....	20

## 그림 목차

[그림 1] 유성 기어 모델.....	2
[그림 2] 사이클로이드 기어 모델.....	3
[그림 3] ElaCVT-TSA의 내부 구조 .....	6
[그림 4] Ultra-compact IVT의 프로토타입 모델.....	6
[그림 5] 니들 롤러를 사용한 경량 고효율 사이클로이드 기어 ...	7
[그림 6] 일반적인 하모닉 기어의 구성 요소 .....	10
[그림 7] 하모닉 기어의 감속 원리 모식도.....	11
[그림 8] 일반적인 벨트-폴리 동력 전달 장치의 모식도.....	12
[그림 9] 일반적인 하모닉 기어의 치(齒)물림 모사.....	14
[그림 10] 하모닉 기어의 필요 탄성 변형량.....	14
[그림 11] 체인을 사용한 하모닉 기어.....	15
[그림 12] 체인을 사용한 하모닉 기어의 힘 전달 모식도.....	15
[그림 13] 체인을 활용한 하모닉 기어의 동력 추출 방식.....	18
[그림 14] 복렬 체인을 활용하여 출력하는 두 가지 방법.....	18
[그림 15] 하모닉 기어와 제안한 감속 장치의 감속부 비교.....	20
[그림 16] 제안한 감속 장치의 전체 작동 원리.....	20
[그림 17] 벨트를 사용한 하모닉 감속 기구의 힘 전달 모식도.	22
[그림 18] 족형 로봇에서 흔히 사용되는 설계 방식 .....	23

[그림 19] 고감속비와 낮은 관성 모멘트를 달성하는 설계 .....	24
[그림 20] WG의 반경 차이를 과장하여 표현한 모식도.....	25
[그림 21] 이론적 한계를 극복하기 위한 기계적 접근.....	27
[그림 22] 추가 메커니즘 사용시 타이밍 벨트 길이.....	28
[그림 23] 제어 입력 궤도 보상 예시 .....	29
[그림 24] 3d 프린터로 구현한 웨이브 제너레이터 형상 1.....	31
[그림 25] 3d 프린터로 구현한 웨이브 제너레이터 형상 2.....	31
[그림 26] 전체 실험 장치 구성.....	32
[그림 27] 모터와 조인트의 위치 값.....	34
[그림 28] 위치 차이를 표현한 실험 결과 그래프 .....	35
[그림 29] 위치 제어를 하는 실험 결과.....	35

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구의 배경 및 동기

로봇에는 그 필요와 목적에 따라 다양한 형태와 방식의 액추에이터가 사용된다. 그중 전기 모터는 여러 가지 이점으로 인해 가장 범용적으로 사용되는 액추에이터이다. 전기 모터는 일반적으로 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

- 1) 제어 반응속도가 빠르다.
- 2) 회전력, 속도를 쉽게 변화할 수 있다.
- 3) 상위 제어 시스템과 쉽게 연결될 수 있다.
- 4) 에너지원인 전기의 관리, 공급이 상대적으로 용이하다.

그러나, 이러한 전기 모터 역시 한계점을 가지고 있는데 대표적인 특성이 가동 영역이다. 전기 모터는 일반적으로 동일 부피의 액추에이터에서 높은 회전 속도에 비해 가용 토크 범위가 작은 편이다. 액추에이터의 부피와 질량이 커질 때마다 로봇이 스스로 지지해야 되는 자기 하중 및 관성 모멘트가 커진다는 특성을 고려할 때, 모터의 사양 상승은 쉽게 판단할 수 있는 선택만은 아니다. 그러므로, 대부분의 로봇 설계에서는 속도를 감소시켜 토크를 증가시키는 감속기가 함께 적용된다.

로봇에 흔히 사용되는 감속기 종류들은 다음과 같다. 가장 처음 고려할 수 있는 방식은 스피어 기어(Spur gear)이다. 동력 전달 장치 중 기어의 가장 기본적인 형태로서 두 기어의 치(齒)개수 비율에 비례하여 직관적으로 감속 비가 결정된다 [1]. 간단하고 효율이 높다는 장점으로 인해 Robotis 사(社)의 Dynamixel 시리즈 모델에 흔히 사용된다.

두번째로, 유성 기어를 고려할 수 있다. 유성 기어는 스피어 기어(Spur gear)를 활용한 방식의 감속 기구로서, 특수한 배치를 통해 스피어 기어의 단점을 보완한 형태의 감속기이다 [2]. 그림 1와 같이



중심에 있는 선기어(Sun gear)를 중심으로 복수의 피니언 기어(Pinion gear)가 자전과 공전을 동시에 하는 구조를 가진 기어 체계로서 일반 스퍼기어에 비해 감속비가 크고 상대적으로 큰 토크 전달이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 유성 기어는 자동차의 자동 변속기에 이미 흔히 사용되고 있으며, 후술할 하모닉 기어 또는 사이클로이드 기어에 비해 백드라이버블 (Backdrivable)하기 때문에 유연한 제어가 중요한 4족 로봇에서 흔히 사용된다.

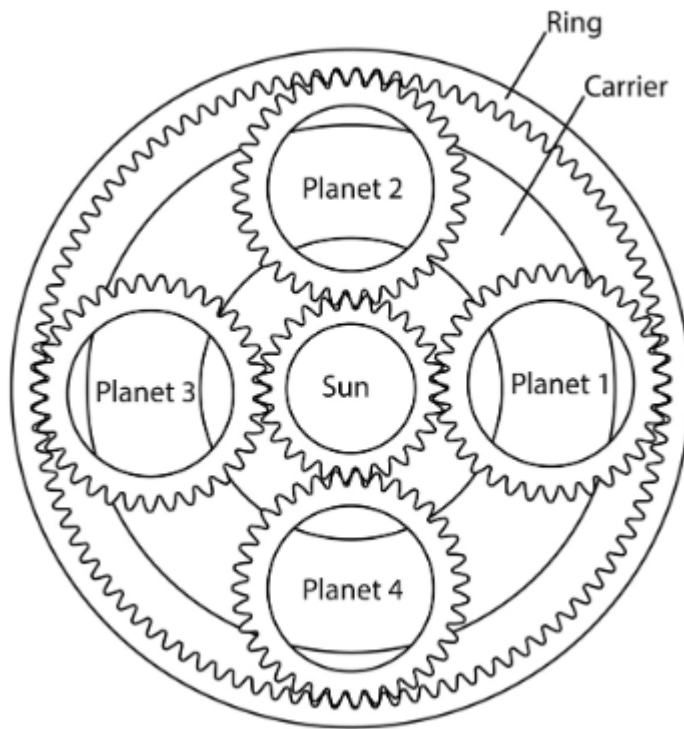


그림 1. 유성 기어 모델 [1]

사이클로이드 기어의 경우, 그림 2와 같이 편심 축을 이용하여 사이클로이드 곡선을 만들어, 사이클로이드 궤도를 따라 움직이며 감속이 되는 독특한 형태의 감속기이다. 중심에서 편심되어 있는 사이클로이드 회전 중심을 따라 회전을 하면서 핀 수와 사이클로이드 판의 스플라인 수 차이에 의해서 감속된다 [3]. 사이클로이드 기어는

유성 기어 및 일반 스퍼 기어에 비해 높은 감속 비라는 큰 장점을 가진다. 이러한 장점으로 인해 로봇 매니플레이터에서 자주 사용된다. 그러나 상용품의 사이클로이드 기어의 경우 무게와 부피가 크기 때문에 족형 로봇에서는 별도의 설계가 필요하다.

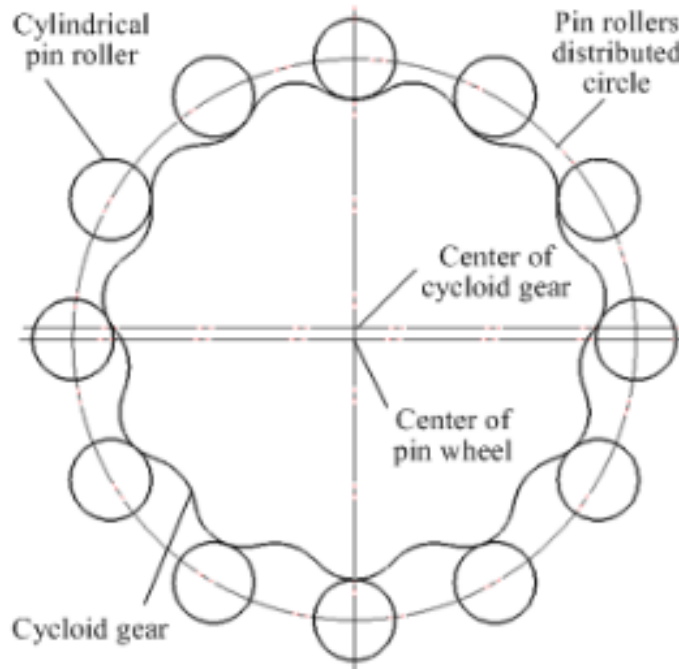


그림 2. 사이클로이드 기어 모델 [2]

마지막으로 하모닉 감속기의 경우, 금속의 탄성체를 이용하여 높은 감속 비를 만들어내는 특수한 형태의 감속기이다. 1959년 Walton의 특허 등록 이후로 오랜 시간 최적화 되어온 하모닉 기어는 작은 부피에 비해 큰 감속 비와 높은 정밀도 때문에 여러 가지 분야에서 널리 사용된다 [4]. 특히 구조적인 특징으로 인해 이론적으로 0에 가까운 백래시를 갖고, 토크 전달 범위가 크기 때문에 로봇 및 항공 분야에서 널리 사용되고 있다 [5].

그러나 이런 장점에도 불구하고 하모닉 기어 역시, 한계점이 존재하는데, 대표적인 문제는 바로 탄성을 갖는 플렉스 스플라인의 설계

및 제조의 어려움이다 [6]. 지속적인 탄성 변형을 반복하며 감속 메커니즘 작동을 진행하는 플렉스 스프라인은 직접적으로 동력이 전달되는 출력 축으로 사용되기 때문에 제조 난이도가 높아 감속기의 원가를 증가시키고, 박형으로 설계하기 어렵다는 단점이 존재한다 [7].

한편, 전기 모터를 사용하는 보행 로봇의 경우 크게 두 가지 접근법으로 설계가 된다. 첫 번째는 높은 토크를 갖는 액추에이터를 사용하는 방식이다. 보행 로봇의 경우 지면에 고정된 0번 축을 기반으로 제어되는 로봇 매니플레이터와는 달리, 흔히 부유 기저(floating base)를 지탱하면서 제어 되는데 배터리, 제어기, 컴퓨터 등의 부품들이 들어가는 몸통의 자중을 지지하기 위하여 각 관절의 액추에이터는 높은 토크가 요구된다. 이 경우, 모터는 높은 감속 비의 감속기와 같이 적용되는 설계가 흔히 적용된다.

두 번째 접근법은 다리의 관성 모멘트를 낮추는 설계이다. 넘어지는 상황을 피하기 위해 다리 말단의 기민한 움직임이 요구되는데, 다리의 관성모멘트는 제어 반응성에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 4절 링크, 벨트-폴리, 체인-스프로킷 등을 사용하여 관절 축과 구동 축을 분리시키는 설계가 널리 사용된다 [8]. 이는 4족 보행 로봇에서 네 개의 다리로 하중이 분산되어 필요 토크가 상대적으로 적기 때문에 유연하고 기민한 제어를 위해 다양하게 사용되곤 한다.

본 연구는 여러 가지 로봇 감속기 중 하모닉 감속기의 단점을 개선하고 특정 분야에서 큰 장점을 갖는 새로운 메커니즘을 제안하고자 한다. 특별히, 동력전달 장치를 활용한 감속기의 설계를 통해 제조 원가를 낮추고 박형 디자인을 달성하고자 한다. 또한, 이를 기반으로 다리의 관절 축과 구동 축을 분리시켜 링크의 관성모멘트를 낮추는 설계를 제안한다. 제안한 메커니즘을 설계 제작하여 작동 가능성을 확인하고, 위치 추종 성능을 분석하여 감속기구로서의 가치를 본다.

## 제 2 절 연구 동향

로봇에서 사용하는 감속 장치들은 각각 필요와 조건에 따라 다른 특성들이 요구된다. 이를 위해 기존 스피어 기어(Spur Gear), 하모닉 기어(Harmonic Gear), 유성 기어(Planetary Gear), 사이클로이드 기어(Cycloidal Gear)들 외에도 다양한 형태의 감속 기구 연구가 진행되고 있다.

Kim은 자동차에서 흔히 사용되는 CVT(Continuously Variable Transmission)를 탄성체로 모사하여, 그림 3과 같이 감속 비를 바꾸는 감속기를 고안하였다 [9]. 줄을 꼬는 방식의 TSA(Twisted String Actuator)에 필연적으로 발생하는 장력을 감속 비 변환 동력으로 사용하여, 자연스럽게 고속-저토크 요구 범위에서는 저 감속 비, 저속-고토크 범위에서는 고감속비가 달성되도록 시스템을 고안하였다. 특히 기존 CVT와 유사하게 접촉 점에 따라 마찰차의 반경이 달라지도록 설계하기 위해 실리콘 엘라스토머를 사용하여 감속 기구를 만들었다. Kernbaum은 IVT(Infinitely Variable Transmission)를 사용하여 그림 4와 같이 새로운 형태의 감속기를 만들었다 [10]. 편심 캠을 활용하여, 감속 메커니즘을 만들고 폴리의 직경을 바꿔서 감속 비를 바꾸는 방식을 제안하였다. Lee et al.은 보행 로봇용 사이클로이드 기어를 만들기 위해, 그림 5와 같이 접촉이 일어나는 모든 부위에 니들 롤러 베어링을 사용하여 효율을 극대화 시켰다 [11]. 이를 통해, 기존 사이클로이드 기어의 효율에 비해 특정 구간에서 거의 두 배에 가까운 효율을 달성하였다.

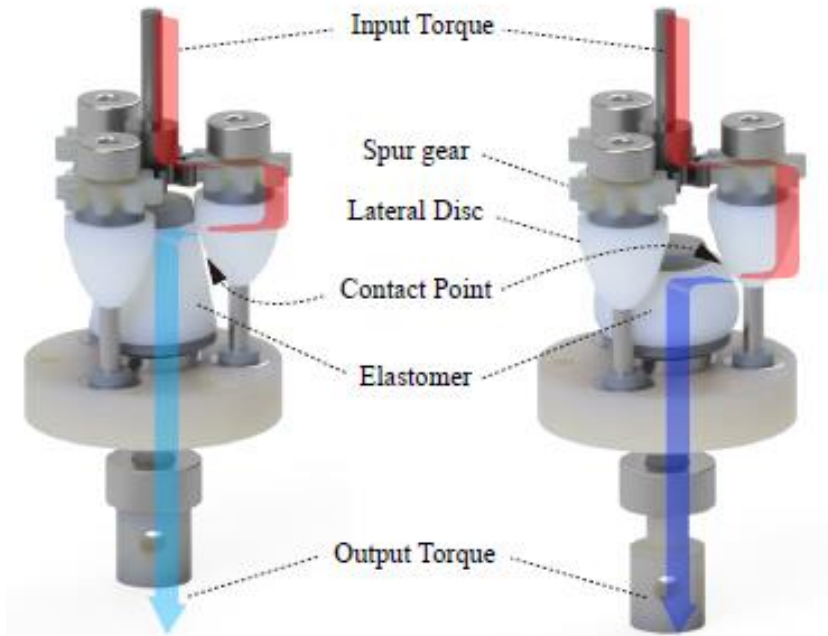


그림 3. ElaCVT-TSA의 내부 구조. 왼쪽 그림은 최고 속도일 시 형상이고 오른쪽 그림은 최고 토크일 때의 형상이다 [3].

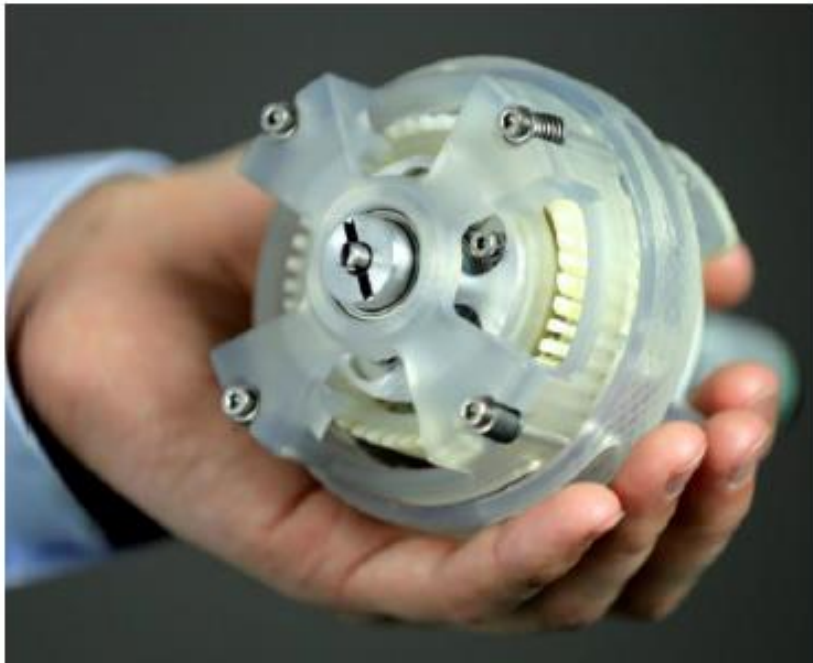


그림 4. Ultra-compact IVT의 프로토타입 모델 [4].



그림 5. 니들 롤러를 사용한 경량 고효율 사이클로이드 기어 [5].

또한, 기존의 감속기 특성을 연구하거나 개선하는 연구도 많이 진행되었다. H. Dong et al.은 하모닉 기어의 플렉스 스플라인의 탄성 변형 특성에 대해 연구하였다 [12]. H.S. oh는 플렉스 스플라인을 두 가지 금속 복합 재료를 사용하여 동적 특성을 개선하는 방법을 제안하였고 S.H. Oh et al.은 이를 개선하였다 [13] [14]. O. Kayabasi와 F. Erzincanli 는 FEM 모델링을 활용하여 플렉스 스플라인의 치(齒) 형태를 최적화하는 연구를 소개하였다 [15]. W. Ostapski의 경우 웨이브 제너레이터에 들어가는 플렉서블 베어링의 변형과 응력을 FEM 모델을 통해 연구하였다 [16]. Maiti는 웨이브 제너레이터 캠 형상을 최적화하는 새로운 하모닉 감속기를 제안하였다 [17]. Pennetri와 P. P. Valentini는 하모닉 기어를 조합할 수 있는 다양한 경우를 범주화하고 이론화하여 다양한 적용 가능성을 제안 하였다 [18].

한편, 전기 모터를 사용한 액추에이터의 완벽한 해답이 아직 존재하지 않는 족형 로봇의 경우 여러 가지 방식의 설계 시도가 진행되고 있다. J. Hwangbo et al.은 4족 보행 로봇에서 Cable-driven actuation을 활용한 방식을 소개하며 다른 감속기들과의 특성을 비교

분석하였다 [19]. 하모닉 기어, SEA(Series Elastic Actuator), 유성기어, 사이클로이드 기어, 벨트-체인, 직동 모터 등의 백래시, 토크 밀도, 토크 투명도, 효율, 비용 등을 비교 분석하였다. S. Seok et al.은 유성 기어를 사용한 MIT cheetah robot의 설계 원리를 소개하였다 [20]. cheetah의 경우, 조인트의 backdrivability를 중요시 여겨 1:5.8의 저감속비 유성기어와 큰 모터를 사용하였다. Wensing은 이러한 backdrivability가 강조된 액추에이터의 proprioceptive 특성을 이용한 cheetah의 제어 원리를 소개하였다 [21]. ETH의 ANYmal의 경우 SEA를 사용한 액추에이터를 사용하지만 하모닉 기어를 통해 토크를 증대시켰다 [22]. Grimminger는 타이밍 벨트와 풀리를 사용한 토크 제어 4족 보행 로봇을 고안하고 open source 로 공유하였다 [23]. 또 다른 형태의 4족 보행 로봇인 titan-xiii의 경우 거미처럼 크롤링 하는 보행의 형태를 갖는데, Kitano는 wire-drive 메카니즘을 통해 다리를 구현하였다[24].

이족 보행 로봇의 경우 4족에 비해 각 관절이 감당해야 하는 토크의 크기가 더 크기 때문에 대부분 고감속 비의 감속기를 사용하는 설계를 적용하였다. 유명한 휴머노이드 로봇 중 하나인 honda의 ASIMO는 harmonic 기어를 사용하여 설계한 반면, Hubo의 경우 유성 기어와 하모닉 기어를 모두 사용하였다[25][26]. 유성 기어는 제어 오차가 작을 필요가 있는 곳에 사용하였으며, 하모닉 기어는 큰 동력이 필요한 주요 관절부에 사용하였다. 하모닉 기어 기준으로 하체에서 감속비는 100:1에서 고관절의 경우 160:1까지의 고감속비도 사용하였다. NASA에서는 특수하게 고안한 비틀림 스프링과 하모닉 기어를 사용한 SEA 모델을 사용하여 Valkyrie를 제작하였다 [27]. 특히 발목에는 리니어 액추에이터 두개를 사용하여 관절을 모사하였다는 특징이 있다. Tsagarakis는 DARPA Robotics Challenge(DRC) Final에 진출하였던 Walk-man의 설계에서 80:1 과 120:1의 하모닉 감속기를 사용하여 토크를 극대화하였음을 저술하였다 [28]. Icub은 23kg, 90cm의 작은 휴머노이드 로봇으로 100:1 감속비의 하모닉 감속기와

BLM 모터를 사용하여 제작하였다 [29]. 뮌헨 공대의 Lohmeier et al.은 2족 보행 휴머노이드 LOLA에서 높은 토크를 위해 하모닉 기어를 기본으로 사용하되, 무릎과 발목의 roll 축과 pitch 축은 볼스크루 기어를 사용하였다 [30]. Toro의 경우 하모닉 기어와 토크센서를 모두 사용한 모듈형 액추에이터를 사용하였다. 기어 감속비는 조인트 별로 100:1에서부터 목 yaw 축과 pitch 축의 경우 225:1까지 사용하였다 [31]. 작고 경제적인 제작 비용에 강점이 있는 NAO의 경우 스피어 기어와 유성기어 조합을 통해 4족 보행 로봇처럼 우수한 backdrivability를 구현하였다 [32].

이름	보행 타입	감속기
Righetti open dog	Quadruped	Timing belt-pulley
ANYmal	Quadruped	Harmonic gear (SEA)
Mini cheetah	Quadruped	Planetary gear
Titan-xiii	Quadruped	Wire-driven mechanism
ASIMO	Biped	Harmonic gear
Hubo	Biped	Harmonic + planetary gear
Tocabi	Biped	Harmonic gear
Valkyrie	Biped	Harmonic gear (SEA)
WALK-MAN	Biped	Harmonic gear (SEA)
iCub	Biped	Harmonic gear
LOLA	Biped	Harmonic gear + Ball screw
Toro	Biped	Harmonic gear
NAO	Biped	Spur + planetary gear

표 1. 다관절 족형 로봇의 감속기 타입



### 제 3 절 연구 목표 및 방법

이 연구에서는 기존 하모닉 감속기를 개선하는 새로운 방식의 감속 장치를 고안 개발하는 것을 목표로 한다. 기존 하모닉 감속기의 여러 가지 한계 중, 제작 원가 절감, 강성 증대 등의 특성을 개선하는 것을 주요 목표로 하며 기존 하모닉 감속기와 유사한 장점을 갖는 감속기를 추구한다.

특별히, 감속 장치의 특성을 파악하여 기존 감속 메커니즘과 비교하여 장단점을 고려하고, 이를 기반으로 필요한 어플리케이션을 제시한다. 제시한 어플리케이션에서 필요한 성능을 충족할 수 있는지에 대한 분석을 고려한다.

이 논문에서는 새로운 감속 기구의 감속 비와 위치 추종 성능을 분석한다. 새로운 감속 기구의 감속 원리에 대하여 설명하고, 실제 설계 예시를 소개한다. 실험 세트를 구성하여 필요한 성능을 정량적으로 분석하고 잠재적 한계에 대해 해법을 제시한다.

## 제 2 장 체인을 활용한 하모닉 감속기 설계

### 제 1 절 기존 하모닉 감속기의 감속 원리

기존 하모닉 감속기의 감속 원리는 다음과 같다. 먼저 하모닉 감속기는 그림 6과 같이 크게 세 가지 주요 부품으로 구성된다. 서클러 스플라인의 경우 완전한 강체의 원형이고, 플렉스 스플라인은 탄성을 갖는 금속으로 내부에 결합되는 웨이브 제너레이터 형상대로 움직인다. 웨이브 제너레이터는 플렉스 스플라인이 서클러 스플라인과 양 끝의 두 지점에서만 만나도록 곡선이 형성되어 있으며, 전동체에 의해 플렉스 스플라인과 웨이브 제너레이터 사이의 마찰은 거의 무시된다.

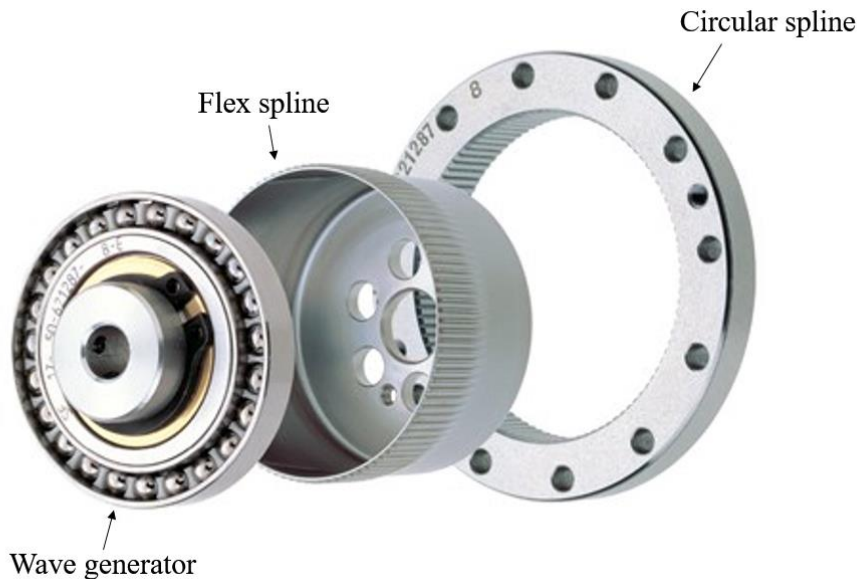


그림 6. 일반적인 하모닉 기어의 구성 요소. 프로파일이 형성되어 있는 베어링 형태의 웨이브 제너레이터, 탄성 변형을 감당할 수 있도록 박형으로 설계된 플렉스 스플라인, 그리고 원형의 강체인 서클러 스플라인으로 구성된다.

그림 7은 각각 모터가 입력 축을 돌림에 따라 웨이브 제너레이터가 회전할 때 하모닉 기어의 형상을 묘사한 그림이다. 파란색으로 묘사된 서클러 스플라인은 완전한 원형을 이룬다. 빨간색으로 표현된 플렉스 스플라인은 웨이브 제너레이터 형상에 의해 서클러 스플라인과 두 점만 접촉되도록 지속적으로 변형된다. 웨이브 제너레이터가 회전함에 따라 그림과 같이 플렉스 스플라인과 서클러 스플라인의 접촉점 역시 회전하게 되는데, 이 때 스플라인의 치(齒) 개수 차에 의해 감속이 이루어진다.

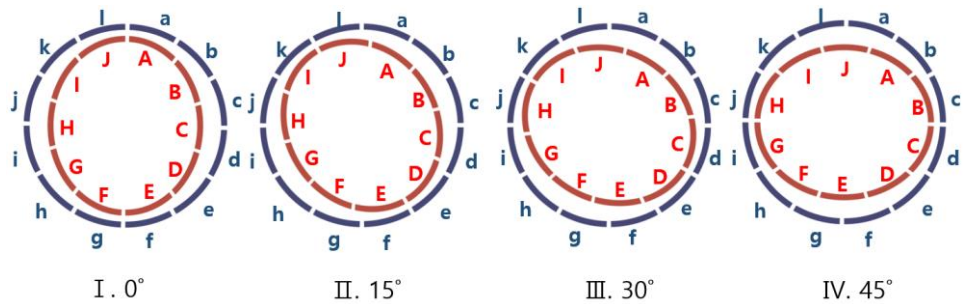


그림 7. 하모닉 기어의 감속 원리 모식도.

## 제 2 절 끈 형태의 동력 전달 장치의 감속 원리

동력 전달 장치는 원래 떨어져 있는 두 곳의 동력을 전달하는 장치를 모두 포함하는 개념이다. 그러므로 마찰차, 기어, 벨트-풀리, 캠-링크, 체인-스프로켓 등이 동력 전달 장치에 포함된다. 이 절에서는 이 중 끈 형태의 기계요소를 이용하는 벨트-풀리 및 체인-스프로켓 구조에 대하여 다룬다. 벨트 혹은 체인 시스템은 여타 다른 동력 전달 장치와는 달리 접촉되지 않는 두 축으로 먼 거리에 동력을 전달하는데, 전달 하는 축과 전달 받는 축 두 축에만 풀리, 스프로켓 등의 기계 요소와 메인 샤프트가 필요하다는 점에서 효율적인 방식이다. 이러한 방식을 사용할 경우 기어들을 순서대로 이어서 만드는 방식에 비해 로봇 링크의 무게와 관성 모멘트를 줄일 수 있으며 제조 원가를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한, 풀리 및 스프로켓의 반경을 입력 축과 출력 축에서 다르게 사용할 시 감속을 통한 토크 증대도 고려할 수 있다.

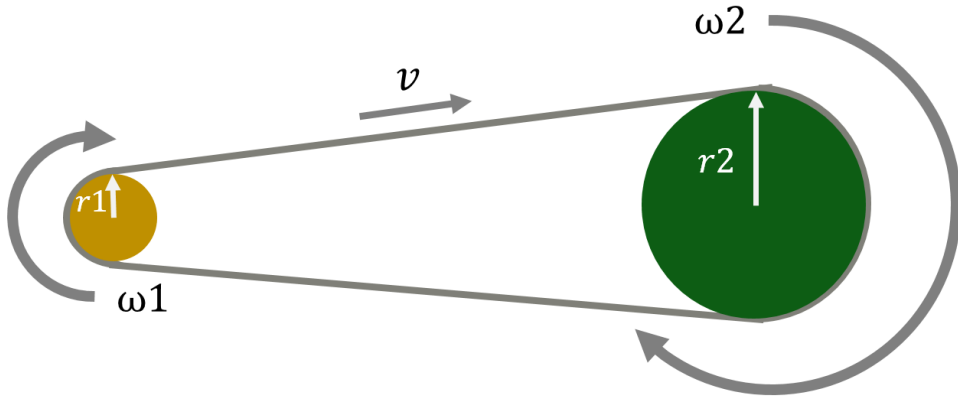


그림 8. 일반적인 벨트-풀리 동력 전달 장치의 모식도. r1에서 입력이 들어올 때 이를 벨트로 전달하여 r2로 출력이 된다. 이 때 감속비는 풀리의 반경 비율이며, 회전 방향은 입출력이 동일하다.

그림 8는 일반적인 벨트 풀리 시스템에 대한 모사이다. 그림 왼쪽에 있는 입력 풀리에 동력이 전달될 시, 이는 벨트의 선속도로 바뀌어, 다시 출력 풀리로 출력 된다. 입력 풀리의 반경을  $r_1$ , 출력 풀리의 반경을  $r_2$ 로 하고, 입력 풀리의 회전속도를  $\omega_1$ , 출력 풀리의 회전 속도를  $\omega_2$  벨트의 선속도를  $v$ 라고 가정할 시, 속도 관계는 다음과 같다.

$$r_1 \omega_1 = v = r_2 \omega_2$$

수식과 같이  $\omega_1$ 으로 입력된 속도는 출력 축에서  $r_1$ 과  $r_2$ 의 비율에 따라  $\omega_2$ 로 감소되어 출력된다. 특히, 두 지점의 거리와는 관계 없이 입력, 출력 축의 풀리 직경 비율에 의해서만 감속비가 형성된다는 장점이 있다. 이는 앞서서도 언급했듯이 효율적이고 가벼운 로봇 링크를 설계하는데 큰 이점이 있기 때문에, 4족 보행 로봇에서 자주 고려되는 설계 방식이다. 단, 이러한 방식 동력 전달 장치로만 토크 증대를 고려할 시, 높은 감속 비를 위해서는 출력 풀리의 크기가 감속 비율만큼 커져야 한다. 따라서 이러한 방식으로는 큰 토크를 내는 설계에는 한계가 있다.

### 제 3 절 체인을 활용한 하모닉 감속기 설계

기존 하모닉 감속기의 플렉스 스플라인의 경우 지속적으로 탄성 변형을 강요받는다. 동시에 플렉스 스플라인은 출력 축과 연결되어 직접적으로 동력을 전달하는 매개체의 역할을 수행한다. 그러므로, 경방향으로 변형을 반복할 수 있는 탄성과 회전 방향으로 정밀도를 높이기 위한 강성이 동시에 요구된다. 또한, 감속 후 증가된 회전 토크를 전달함과 동시에 반복적인 탄성 변형에도 피로 파괴에 의해 손상되지 않을 내구성도 요구된다. 이러한 요구 조건을 모두 만족하기 위하여 플렉스 스플라인의 설계는 하모닉 기어의 높은 설계 난이도와 비싼 제조 원가의 원인이 된다. 그리고, 박형 디자인의 하모닉 감속기를 만들기 어려운 근원적인 문제가 된다.

그림 9는 하모닉 기어 플렉스 스플라인의 필요 탄성 변형 범위를 묘사한 그림이다. 플렉스 스플라인은 그림 9와 같이 90도 위상 차이에서 치(齒)가 맞물려 있거나 스쳐 지나가야 한다. 그 결과 플렉스 스플라인의 탄성 변형은 경방향으로 최소 치(齒) 높이만큼 움직여야 한다. 웨이브 제너레이터의 장반경에서는 치(齒)가 맞물리고, 단반경에서는 스쳐 지나가기 위해서, 그림 10 기준 횡방향으로 치(齒) 높이만큼 탄성 변형이 일어나야 한다. 횡방향 변형 길이가 결정되어 있기 때문에, 감속기 두께가 박형 디자인이 되기 위해서는 필연적으로 변형 각도가 커져야 한다. 이는 플렉스 스플라인의 탄성 변형 각도가 커져야 된다는 뜻이기 때문에 궁극적으로 제조의 난이도를 올리는 원인이 된다. 또한 동시에, 변형 각도가 커지도록 플렉스 스플라인을 박형으로 만들 경우 비틀림 강성이나 토크 전달 범위가 줄어드는 한계가 있다.

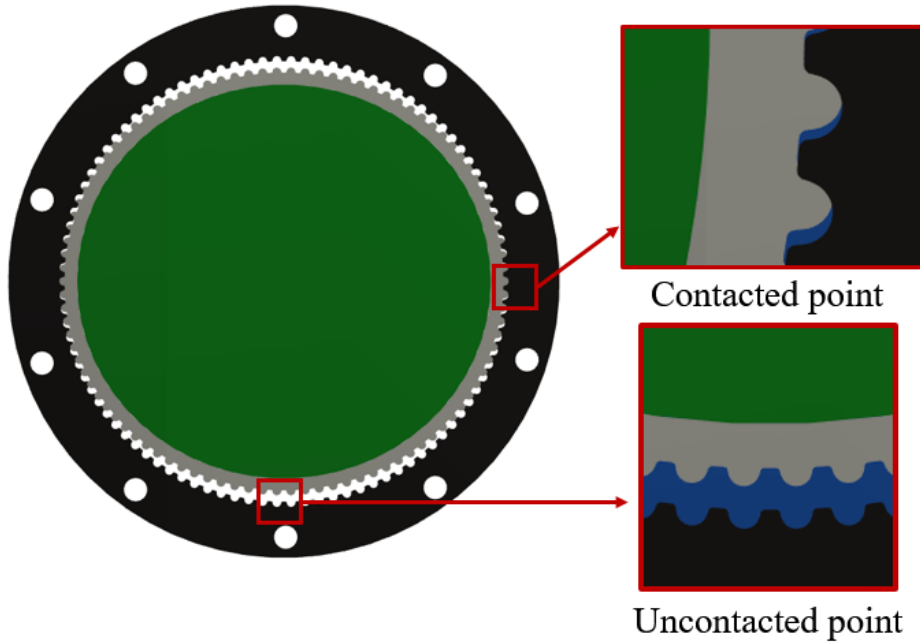


그림 9. 일반적인 하모닉 기어의 치(齒)물림 모사. 그림을 기준으로 횡방향의 양 끝 지점에는 웨이브 제너레이터의 장반경이 플렉스 스플라인을 변형시켜 기어가 서클러 스플라인과 맞물린다. 반면 그림을 기준으로 종방향의 양 끝 지점은 웨이브 제너레이터 단반경이 위치하기 때문에 스플라인 치(齒)가 서클러 스플라인과 물리지 않고 스쳐 지나간다.

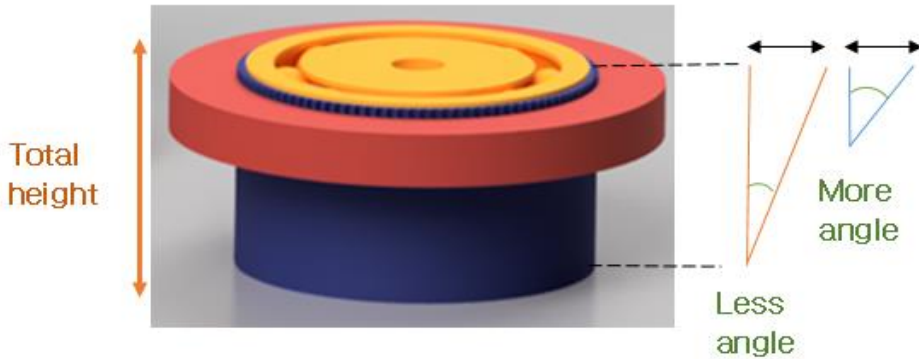


그림 10. 하모닉 기어의 필요 탄성 변형량. 탄성 변형은 웨이브 제너레이터의 장반경과 단반경의 차이만큼 일어나게 되는데 이 차이는 결국 기어 치(齒) 높이와 치(齒)의 피치에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 금속 탄성체의 플렉스 스플라인을 모사하기 위해, 롤러 체인을 사용하여 플렉스 스플라인을 적용한 하모닉 기어를

제안한다. 그림 11는 기존 하모닉 감속기와 같은 원리와 체인을 사용한 하모닉 감속기의 형태이다. 플렉스 스플라인의 치(齒)형 대신에 롤러 체인의 핀이 동력을 전달하게 된다.



그림 11. 체인을 사용한 하모닉 기어. 롤러 체인의 핀이 플렉스 스플라인의 치(齒) 역할을 대신하게 된다. 결과적으로 체인의 핀 개수와 서클러 스플라인의 치(齒) 수 차이에 의해 감속비는 결정된다.

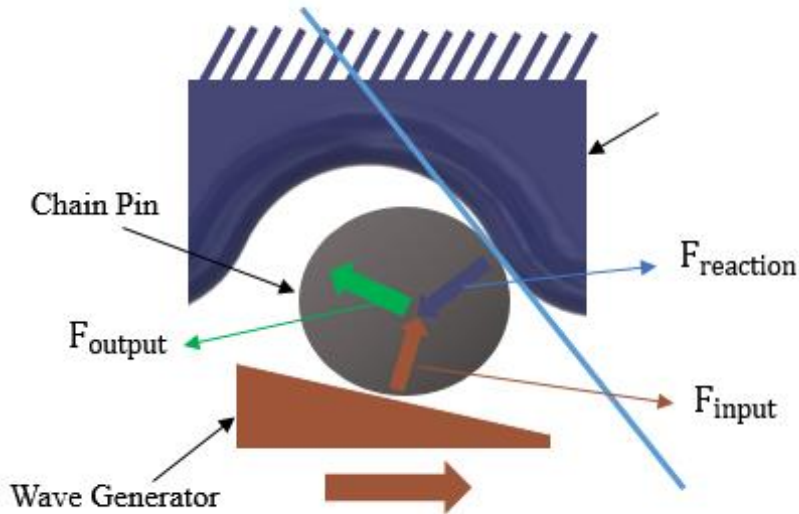


그림 12. 체인을 사용한 하모닉 기어의 힘 전달 모식도.

그림 12는 기어의 동력을 전달하는 핀을 기준으로 역학 관계를 묘사한 그림이다. 전술했듯이 웨이브 제너레이터는 플렉스 스플라인과 서클러 스플라인이 양 끝의 두 지점에서만 만날 수 있도록 타원에

가까운 특수한 곡선의 프로파일로 설계되어 있다. 웨이브 제너레이터의 총 둘레는 서클러 스플라인의 치(齒)의 개수보다 두 개 적은 수의 치(齒)가 정확히 감싸는 정도의 길이로 형성되어 있다. 그림 12에서 묘사된 바와 같이 웨이브 제너레이터의 곡률에 의해 톨러 체인의 핀은 기어의 중심으로부터 바깥 방향으로 밀어내는 힘을 받게 된다. 이 밀어내는 힘을  $F_{input}$  으로 정의할 때 핀과 서클러 스플라인 사이에 접촉점에서  $F_{reaction}$  이라는 반력이 생긴다.  $F_{input}$  과  $F_{reaction}$  의 합력에 의해 체인은  $F_{output}$  방향으로 밀어내게 된다. 즉, 전체 토크는 기어의 핀이 서클러 스플라인과 물려있는 수에  $F_{output}$  을 곱한 크기만큼 출력되게 된다.

다만, 이러한 방식으로 감속기를 설계할 경우, 기존 하모닉 감속기와 달리 순수한 회전 출력이 어렵다. 기존 하모닉 감속기의 플렉스 스플라인은 컵(Cup) 혹은 실크 햇(Silk hat) 형태의 설계를 통해 기어의 치(齒)가 형성되어 있는 탄성체와 동력을 전달하는 강체가 한 부품에 공존하고 있다. 따라서, 탄성 변형을 일으키는 치(齒) 부분에 의해 감속이 이루어지고, 완전한 원형의 강체에 의해 감속된 토크가 순수한 회전 성분으로 출력된다. 이러한 출력에서의 경방향 움직임 성분을 제거하기 위하여 본 연구에서는 복렬 체인을 사용하는 방법을 제안한다.

복렬 체인을 활용할 경우 첫 번째 열에서 하모닉 감속 원리를 활용하여 토크를 증대하고, 두 번째 열에서 감속된 동력을 출력하는 방식으로 사용할 수 있다. 그림 13에서는 복렬 체인을 활용하여 경방향 성분을 제거한 예시를 나타낸다. 그림 13에서 빨간색으로 표현된 웨이브 제너레이터는 경방향 움직임을 만들어 감속을 하고, 복렬 체인은 감속된 동력을 내접하고 있는 출력 기어로 전달한다. 내접하고 있는 출력 기어는 웨이브 제너레이터의 단 반경에 해당하는 크기로 형성되어 체인과 두 점에서만 만난다. 즉, 체인이 서클러 스플라인과 웨이브 제너레이터의 장반경에서 내접하는 형태와 마찬가지로, 출력 기어와 체인은 체인의 단반경에서 내접하는 형태로 치(齒)가 물려 있게 된다.



그 결과, 체인의 첫 번째 열에서 웨이브 제너레이터와 서클러 스플라인 사이에서 하모닉 메커니즘에 의해 감속 되고, 두 번째 열에서 감속된 속도가 출력 기어를 돌려서 감속된 동력이 출력된다. 단, 내접하는 출력 기어는 위에서 서술했듯이, 체인에 단반경에 내접하는 크기로 형성되어야 하기 때문에 최종 감속비가 체인의 첫 번째 열에서 감속된 값에 비해 작아진다는 단점이 존재한다.

그림 14는 복렬 체인을 활용하여 동력을 출력하는 두 가지 출력 방식을 소개한다. 왼쪽 그림은 앞에서 서술한 방식의 내접 기어를 통해 순수 회전 성분을 추출하는 방식이다. 오른쪽 그림은 체인의 외접 기어를 통해 동력을 출력하는 방식인데, 같은 원리의 적용 방식을 외접하는 출력 기어를 사용한다는 차이가 있다. 이 경우, 체인의 첫 번째 열에서 감속된 감속비가 두 번째 출력 열에서도 그대로 출력된다는 장점이 있다. 단 외접 기어를 사용할 시, 전체적인 시스템 결합에서 더 큰 베어링을 필요로 하기 때문에 전체적인 부피가 커질 수 있다는 단점이 존재한다.

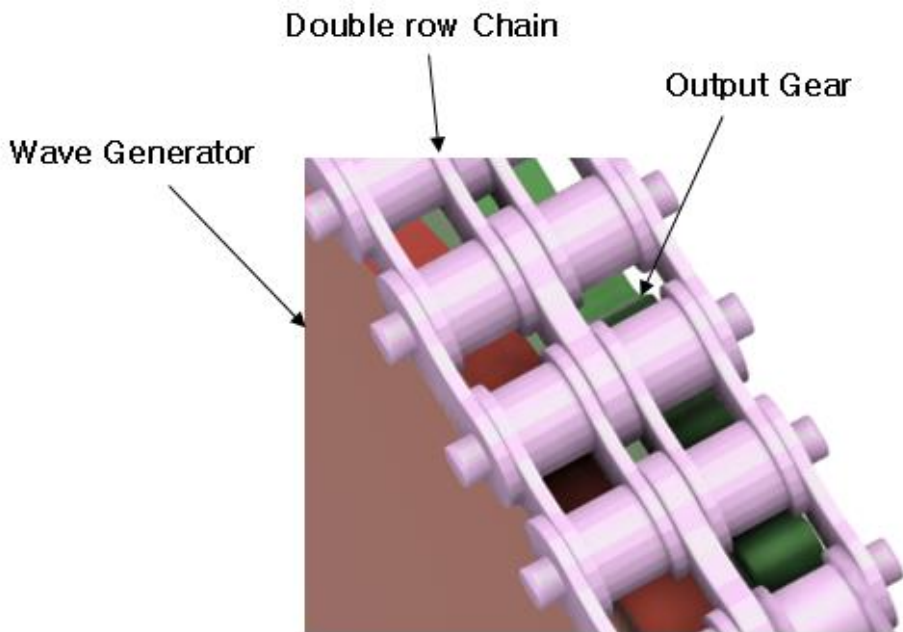
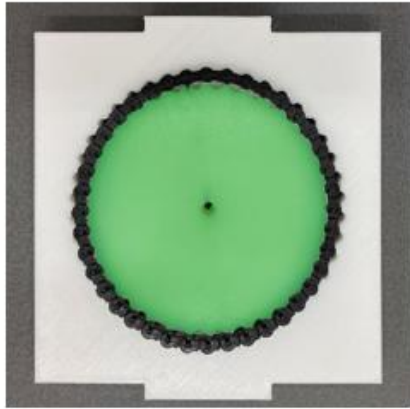
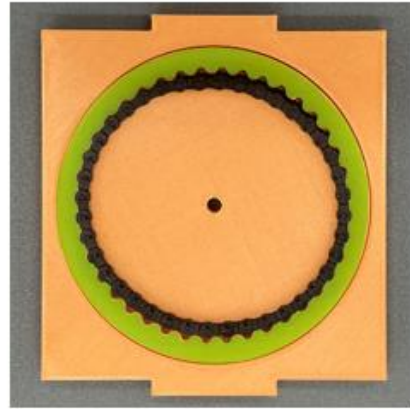


그림 13. 체인을 활용한 하모닉 기어의 동력 추출 방식. 복렬 체인을 활용하여 감속단과 출력단을 복층으로 나누는 방식을 고려할 수 있다.



A. 내접 기어를  
활용한 출력 방식



B. 외접 기어를  
활용한 출력 방식

그림 14. 복렬 체인을 활용하여 출력하는 두 가지 방법

### 제 3 장 관성모멘트 감소를 위한 감속 장치 설계

#### 제 1 절 벨트 하모닉 감속기 작동 원리

기본 하모닉 감속기는 제 2 장에서 서술했듯이, 원형의 서클러 스플라인과 타원의 웨이브 제너레이터에 의해 변형된 플렉스 스플라인 치(齒) 개수 차에 의해 감속 원리가 작동된다. 그리고, 체인을 활용한 하모닉 감속기의 경우 같은 메커니즘에서 플렉스 스플라인만 끈형 동력 전달 장치인 체인으로 대체된다. 체인을 활용한 하모닉 감속기의 경우 하모닉 감속 메커니즘을 위해 만들어지는 경방향 움직임을 제거하기 위해 복렬 체인을 사용하여 동축 감속기를 고려할 수 있었다. 그러나, 동력 축과 출력 축을 동축의 2단으로 쌓지 않고 횡방향으로 분할할 경우 특수한 어플리케이션에서 큰 이점을 가질 수 있다. 본 연구에서는 플렉스

스플라인을 모사하는 타이밍 벨트 길이를 길게 늘려서 동력 축과 출력 축을 분할하는 벨트 하모닉 감속기 HABA-T(HArmonic Belt Applied Transmission)을 소개한다.

그림 15는 기존 하모닉 감속기와 제안한 벨트 하모닉 감속기를 비교한 그림이다. 좌측에 있는 기존 하모닉 감속기와 마찬가지로 우측의 벨트 하모닉 감속기 역시 서큘러 스플라인, 웨이브 제너레이터, 플렉스 스플라인에 해당하는 타이밍 벨트 세 가지 요소로 구성되어 있지만, 반을 자른 형태로 나타난다. 기존 하모닉 감속기 기준으로 모든 위상에서 두 지점만 만나도록 웨이브 제너레이터가 형성되어 있는 것과 달리, 제안된 벨트 하모닉 감속기에서는 웨이브 제너레이터 장 반경이 수평 방향이 되는 0도를 제외하고는 1점만 접촉하게 된다. 접촉 점이 줄어드는 만큼 물림율이 낮아지고 토크 전달 한계는 낮아지지만 대신 다른 이점을 가질 수 있다.

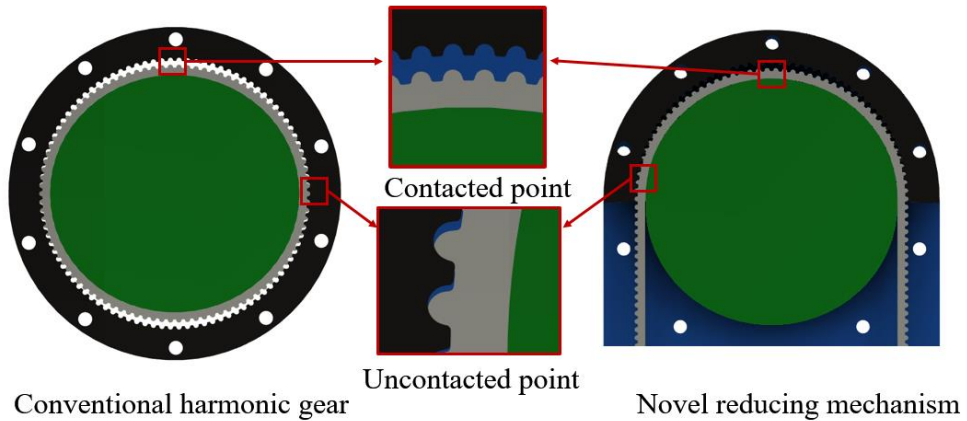


그림 15. 하모닉 기어와 제안한 감속 장치의 감속부 비교. 금속의 플렉스 스플라인이 타이밍 벨트로 대체되며, 기존 기어에 비해 절반의 형상을 가진다.

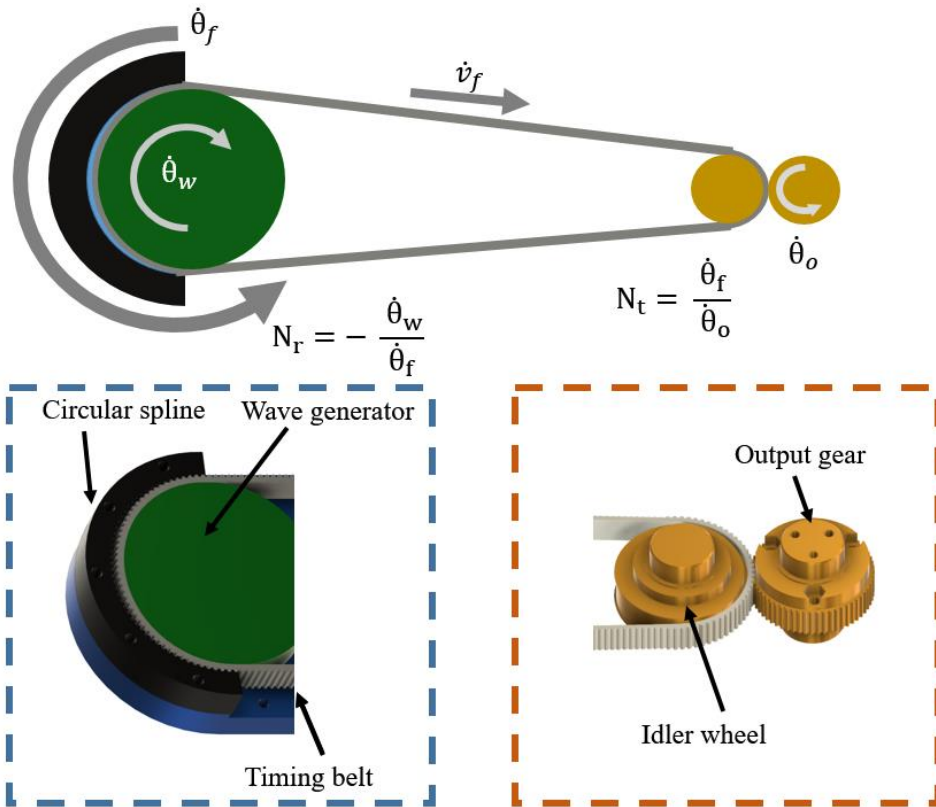


그림 16. 제안한 감속 장치의 전체 작동 원리

그림 16는 제안된 벨트 하모닉 감속기의 전체적인 구성을 보여준다. 왼쪽 끝에 있는 감속 단은 위에서 서술한 바와 같이 1점 접촉이라는 차이 외에는 기존 하모닉 기어와 동일하다. 단, 플렉스 스플라인을 대체하는 타이밍 벨트가 그림 16의 우측으로 길게 빠져나와 기존 벨트 풀리 시스템처럼 동력을 다른 축으로 이동시킨다. 우측 끝에 동력 추출단에서는 벨트의 장력과 위치를 잡아주는 아이들러 휠과 직접적으로 동력을 추출하는 출력 기어 두 파트로 이루어지는데 이를 통해 동력 축과 출력 축이 분할된다.

이 경우 감속 비는 다음과 같다. 1차적으로 감속단에서의 감속 비는 기존 하모닉 기어의 감속 비와 동일하다. 기존 하모닉 감속기의 경우 2점 접촉을 통해 서클러 스플라인 치(齒) 개수 절반의 감속 비를 갖게 되는 만큼 1점 접촉의 벨트 하모닉 기어는

반원 형태의 서클러 스플라인 치(齒) 개수에 비례하여 감속비가 형성된다. 단 특징적으로 감속단에서 감속된 감속 비와 더불어 출력단의 아웃풋 기어의 크기에 따라 감속비가 한번 더 바뀔 수 있다는 특징이 있다. 일반 하모닉 감속기가 일정 비율 미만의 작은 감속비는 달성하기 쉽지 않다는 특징에 비해 벨트 하모닉 기어는 작은 출력 기어를 사용할 경우 낮은 감속비도 가능하다는 점도 특정 어플리케이션에서 큰 이점이 될 수 있다.

이 때 힘 전달 모델은 그림 17과 같다. 그림 17은 T. D. Tuttle이 하모닉 기어의 동적 원리를 모사한 방식을 적용하여 타이밍 벨트를 사용한 본 연구에서 표현한 그림이다 [33]. 곡선으로 형성되어 있는 웨이브 제너레이터는 모든 구간에서 미소한 빗면으로 모사될 수 있다. 빗면에 의해 경방향 즉, 그림에서 수직 방향으로 올라가는 힘을 플렉스 스플라인 역할을 하는 타이밍 벨트에 전해주게 된다. 탄성을 갖는 타이밍 벨트의 경우 치(齒)높이만큼 경방향으로 웨이브 제너레이터 상(phase)에 따라 왕복 운동을 하게 되는데 치(齒)가 서클러 스플라인과 맞물려 이를 밀어내는 방향일 시, 서클러 스플라인은 빗면의 형태로 모사된 치(齒)의 압력각(pressure angle) 방향으로 힘을 받게 된다. 서클러 스플라인은 외부 하우징과 결합되어 고정되어 있는 형태이므로 반력에 의해 타이밍 벨트는 웨이브 제너레이터와 반대방향으로 동력을 전달하게 된다. 즉, 웨이브 제너레이터 회전으로 들어오는 회전 토크는 웨이브 제너레이터의 프로파일에 의해  $F_{input}$  으로 타이밍 벨트에 힘을 전달한다. 기존 하모닉 기어에서 플렉스 스플라인 역할을 하는 타이밍 벨트는  $F_{input}$  에 의해 탄성 변형을 일으키며 경방향으로 움직이게 된다. 그 결과 타이밍 벨트는 치(齒)의 압력각 방향으로 서클러 스플라인을 밀게 되는데 하우징에 고정되어 있는 서클러 스플라인에 의한 반력으로  $F_{output}$  만큼 동력이 추출된다.

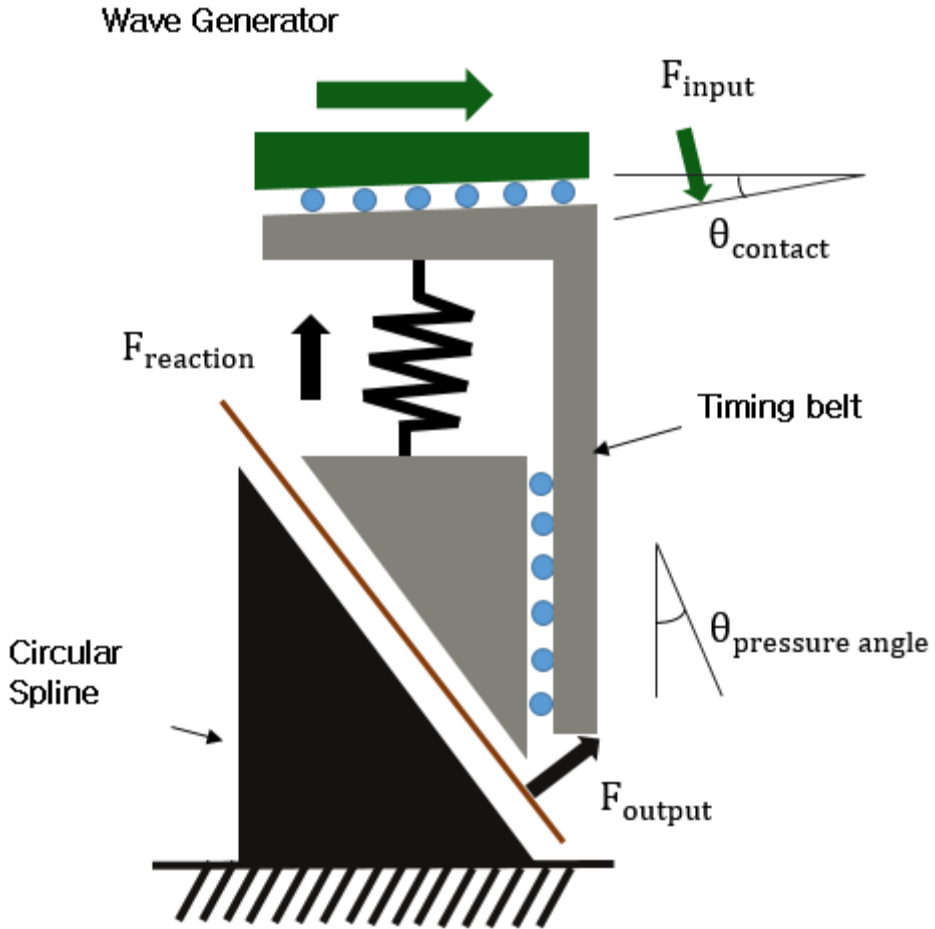


그림 17. 벨트를 사용한 하모닉 감속 기구의 힘 전달 모식도

## 제 2 절 벨트 하모닉 감속기 적용 분야

제안된 벨트 하모닉 감속기가 가장 큰 이점을 가질 수 있는 분야는 족형 로봇의 다리 설계이다. 서론에 언급한 바와 같이 족형 로봇의 디자인은 흔히 두 가지 접근법으로 설계된다. 첫 번째는 무거운 몸통에 의한 자중을 지지하기 위해 높은 토크를 낼 수 있는 액추에이터 설계이다. 특히 이는 다리 수가 많지 않은 이족 보행 로봇에서 흔히 나타나는 특징이며 이를 위해 전기 모터를 사용하는

많은 휴머노이드 로봇에서는 사이클로이드 감속기나 하모닉 감속기를 자주 사용한다. 두 번째는 넘어짐을 방지하기 위해 다리 말단의 기민한 제어와 반응성을 극대화 하는 설계인데, 설계적인 측면에서는 제어 반응성을 올리기 위해 가볍고 관성 모멘트가 작은 설계를 선호한다. 그 결과 관성 모멘트를 줄이기 위해 다리 말단 쪽에 배치되어 있는 조인트 액추에이터를 몸통으로 올리는 설계가 나타나는데, 상대적으로 높은 토크가 덜 필요한 4족 보행 로봇에서 이러한 특징이 많이 나타난다. 그림 18은 조인트 토크를 증대하기 위한 고감속비의 감속기를 사용한 사례와 다리의 관성 감소를 위해 벨트-풀리 시스템을 사용한 사례를 나타낸 그림이다. 하지만 이 두 가지 접근을 한 시스템에서 동시에 만족하기는 쉽지 않다.

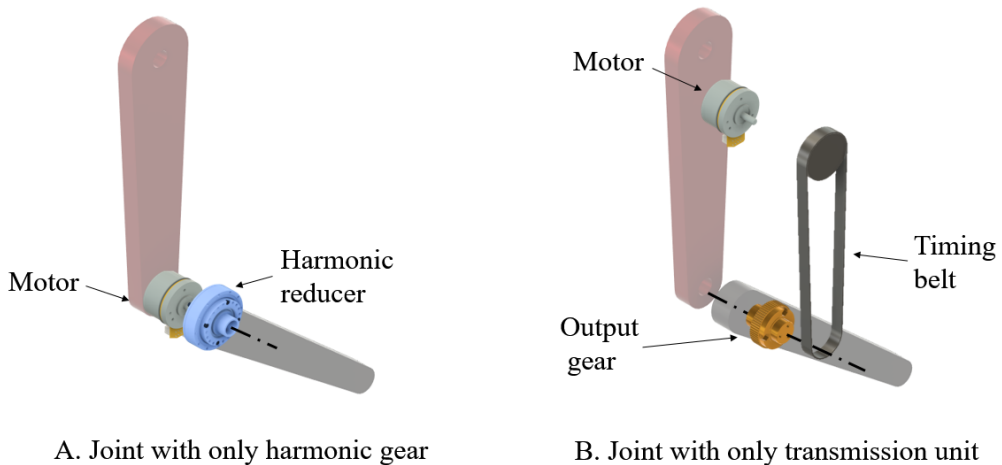


그림 18. 족형 로봇에서 흔히 사용되는 설계 방식. 왼쪽 A는 무거운 몸통을 지지하기 위한 높은 토크를 만들어 내기 위해 관절에 고감속비 기어를 사용하는 방식이다. 반면 오른쪽 B는 다리의 관성 모멘트를 낮춰 말단부를 기민하게 제어하기 위해 동력원인 모터를 몸통에 배치하는 접근이다.

높은 토크와 낮은 관성 모멘트를 동시에 달성하기 위해서 그림 19의 왼쪽 그림 같이 벨트-풀리와 감속기를 둘 다 사용하는 방법이 고려된다. 그러나 이렇게 감속기와 벨트-풀리를 모두 사용할 경우

링크의 부피가 커지고, 무게도 무거워지고 경제적으로도 효율적이지 못한 설계가 될 수 밖에 없다.

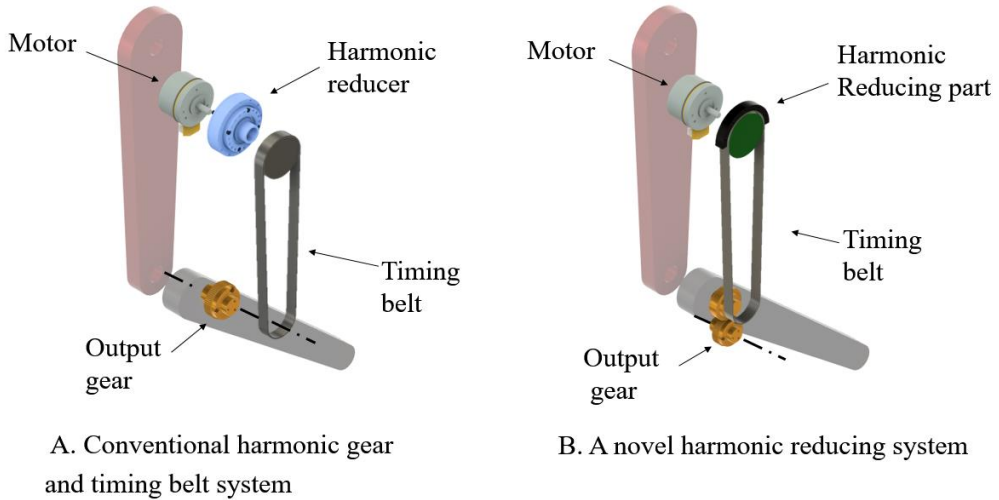


그림 19. 고감속비와 낮은 관성 모멘트를 달성하는 설계. A는 높은 토크를 위한 고감속비 기어와 링크의 낮은 관성 모멘트를 위한 벨트 풀리 시스템을 둘 다 적용한 방식으로 부피가 크고 무거워 진다는 단점이 존재한다. B는 본 연구에서 제안한 벨트를 이용한 하모닉 감속기로 고감속비와 낮은 관성 모멘트를 한 가지 기구로 달성 할 수 있다.

제안된 벨트 하모닉 감속기를 사용할 경우 1단으로도 감속과 동력 전달을 동시에 달성할 수 있기 때문에 높은 토크와 낮은 관성 모멘트의 다리를 설계할 수 있다. 추가적으로 제조가 어렵고 비싼 금속의 플렉스 스플라인 대신에 상용품인 타이밍 벨트를 사용하여 플렉스 스플라인을 모사하기 때문에 제조 원가도 절감되는 효과를 가질 수 있다. 마지막으로 타이밍 벨트의 특성으로 인해 충격에 훨씬 강인한 내구성을 가질 수 있다는 장점도 존재한다.



### 제 3 절 벨트 하모닉 감속기 이론적 한계점

그러나 벨트 하모닉 감속기의 위치 추종 성능은 이론적으로 완벽할 수 없다는 단점이 존재한다. 그림 20은 극단적으로 과장하여 벨트 하모닉 감속기의 감속 원리를 묘사한 그림이다. 위쪽 그림은 웨이브 제너레이터의 장 반경  $a$ 가 수직 방향인 위상, 아래쪽 그림은 웨이브 제너레이터 단 반경  $b$ 가 수직 방향으로 서있는 위상으로 두 페이즈(phase)는 90도 차이가 난다. 치(齒)의 피치가 크고 감속비가 작은 경우 웨이브 제너레이터의 장 반경과 단 반경 길이의 차이는 더 커질 수 밖에 없다. 이는 웨이브 제너레이터 프로파일의 전체 둘레가 서클러 스플라인보다 적은 치(齒) 개수 값으로 종속되기 때문이다.

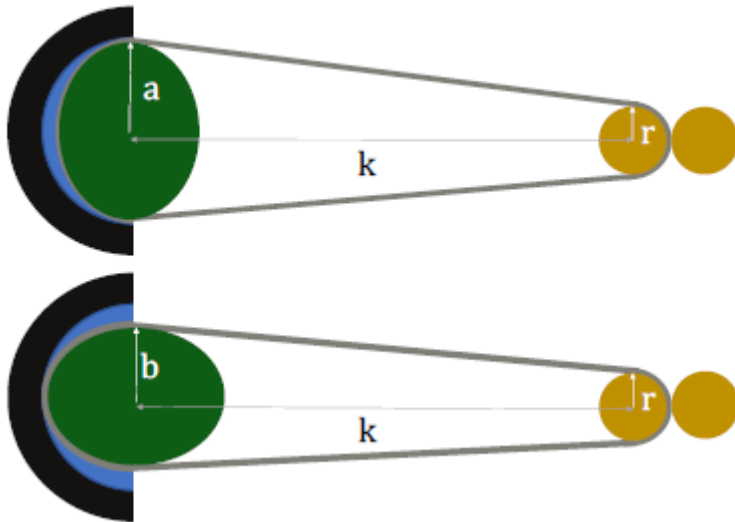


그림 20. WG의 반경 차이를 과장하여 표현한 모식도

제 2장에서 언급했듯이 일반적인 벨트 풀리 시스템의 속도 변화는 다음과 같이 묘사될 수 있다.  $r_1$ 은 입력 풀리의 반지름,  $r_2$ 는 출력 풀리의 반지름  $\omega_1, \omega_2$ 는 각각 입력 출력 각속도를 의미한다.

$$r_1 \omega_1 = v = r_2 \omega_2$$

그러나, 벨트 하모닉 감속 시스템에서는 그림 20와 같이 웨이브 제너레이터 프로파일에 따라 웨이브 제너레이터를 주위의 벨트 길이가 지속적으로 변한다. 즉, 벨트 풀리 시스템의 속도를 나타내는 위 수식의 상수  $r_1$  은 벨트 하모닉 감속기에서 변수로 바뀐다. 입력단에서 웨이브 제너레이터가 한 바퀴 회전함에 따라, 접촉점이 장반경에서 단반경으로 바뀌고 다시 장반경으로 바뀌기 때문에, 반지름은 두 번씩 증가와 감소를 반복하게 된다. 그러나 출력단에서 출력 기어의 반경  $r_2$ 는 상수로 정해져 있기 때문에 이론적으로 위치 추종 값이 미세하게 차이날 수 밖에 없다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{r}_1 \omega_1 = v = \dot{r}_2 \omega_2$$

위 식에서  $\omega_1$ 이 상수로 일정한 속도가 들어가더라도  $\dot{r}_1 \omega_1$ 는  $\dot{r}_1$ 의 변화 량에 의해 일정한 상수가 될 수 없다는 점이다. 이론상 생기는 위치 차이는 정밀 제어에서는 문제가 될 수 있다. 그러나 감속비가 충분히 크고 피치가 작아 웨이브 제너레이터의 장 반경과 단 반경 차이가 작다면 위치 차이 값은 크지 않다. 즉, 4족 보행 로봇 등 미세한 위치 차이가 보행 안정성에 치명적인 영향을 미치지 않는 경우 다른 장점들을 위해 고려할 수 있는 한계이다.

## 제 4 절 한계 극복 방법

위에서 언급한 한계 역시 다양한 방법을 통해서 제거 혹은 완화할 수 있는데 가장 먼저 고려할 수 있는 방법은 추가적인 기계 요소이다. 단, 한계 제거를 위한 추가적인 설계가 원 장점인 간단한 설계와 작은 관성 모멘트라는 이점을 어느 정도 약화시킨다는 단점이 존재한다.

그림 21은 출력 단에서의 위치 차이를 제거할 수 있는 설계를 보여준다. 기존 출력 단에서 원형의 아이들러와 출력 기어만으로 구성되어 있던 것과 비교하여 기둥 형태의 기어들과 웨이브 제너레이터와 직접적으로 연결되는 타이밍 벨트가 하나 더 들어가 있다. 기존 아이들러와는 달리 웨이브 제너레이터의 프로파일과 같은 형상의 아이들러가 사용된다. 아이들러는 웨이브 제너레이터와 직동으로 연결되어 있기 때문에 같은 속도로 회전한다. 단, 아이들러 및 웨이브 제너레이터와 동력을 전달하는 주 타이밍 벨트는 완전한 미끄럼 접촉을 가정한다.

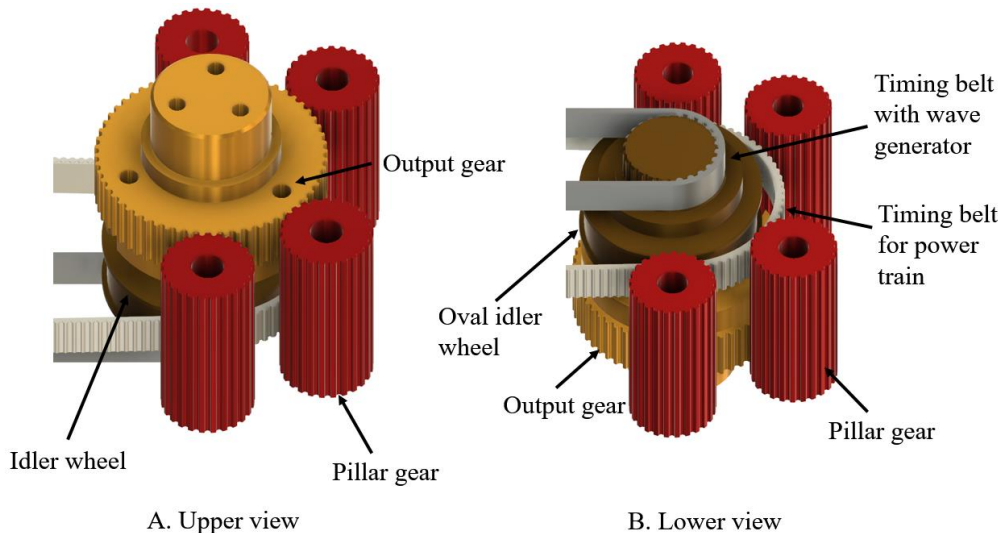


그림 21. 이론적 한계를 극복하기 위한 기계적 접근. 추가적인 기계 요소를 더해 이론적 한계를 극복할 수 있다.

이 경우, 그림 22와 같이 각 위상에서 타이밍 벨트가 감싸는 웨이브 제너레이터의 프로파일 차이가 아웃풋 아이들러의 프로파일에 의해 상쇄된다. 그 결과  $r_1 \omega_1 = v = r_2 \omega_2$ 에서  $r_2$ 역시 변수가 되어  $r_2$ 가  $r_1$ 으로 바뀌게 된다. 이 때  $r_2$ 은  $r_1$ 과 완전히 같은 프로파일과 같은 속도로 회전하기 때문에  $r_2$ 은  $r_1$ 과 같다. 그 결과  $\omega_1$ 은  $\omega_2$ 로 위치나 속도 차이 없어 온전히 추출될 수 있다.

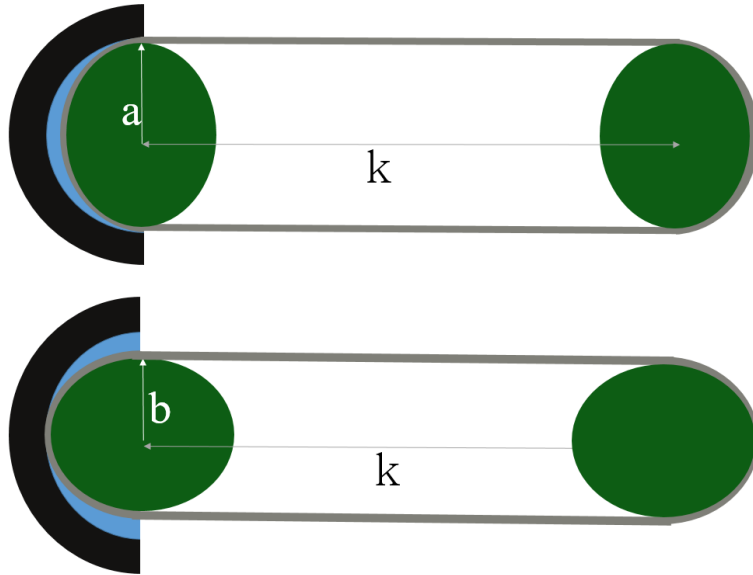


그림 22. 추가 메커니즘 사용시 타이밍 벨트 길이. 웨이브 제너레이터와 동일한 형상의 출력 아이들러를 사용할 시 타이밍 벨트의 둘레 길이 변화를 일정하게 보정할 수 있다.

일정하게 추출되는 벨트의 속도는 앞서 언급한 타원의 아이들러로 추출할 수 있지만, 이 경우 기존 추출 방식처럼 출력 기어 하나를 병행하여 해결하기 힘들다. 왜냐하면 출력 아이들러가 원이 아닐 경우 고정된 기어가 접촉되는 지점과 아닌 지점이 필연적으로 생기기 때문이다. 따라서 작은 직경의 기어들을 여러 개 배치하여 타이밍 벨트와 기어의 물림이 떨어지는 시점을 없애주는 설계가 필연적이다. 작은 전달 기어들을 기둥처럼 수직으로 높게 만들 경우 출력 기어를 아이들러 위에 배치할 수 있다. 이 때 출력 기어의 크기는 프로파일된 아이들러의 장축과 같은 크기로

설계되어야 한다. 이런 방식으로 추가적인 보상 장치를 만들 경우 앞서 언급한 한계가 이론상 완전히 제거된다. 그러나 링크 말단에 기계 요소 부품들이 더 필요하게 되고, 아이들러를 웨이브 제너레이터와 연결하는 타이밍 벨트가 또 필요하다는 점에서 링크의 관성모멘트를 최소화하며 간단한 방식으로 설계할 수 있다는 원래의 장점이 반감되는 한계가 존재한다.

추가적인 기계 장치 외에 제어를 통해 위치 차이를 없애는 방식 또한 고려될 수 있다. 이론상 발생하는 위치 차이는 웨이브 제너레이터 형상에 의해 발생하는 차이이므로 주기적으로 반복되는 오차이다. 웨이브 제너레이터 위치의 장축과 단축의 위치에 따라 발생하는 오차이기 때문에 크기와 주기가 정해져 있으며, 누적되지 않는다. 따라서, 제어 목표 궤적을 웨이브 제너레이터 위상에 의존적으로 진동하는 주기로 보상하면 이 위치 차이를 어느 정도 제거할 수 있을 것이다. 그리고 이 위치 차이는 결국 웨이브 제너레이터의 위상 별 반지름에 의해 결정되기 때문에 보상 궤적 또한 쉽게 만들 수 있다. 그림 23과 같이 접근하여 이러한 오차를 보상할 수 있다. 기존 제어 입력 궤적이 일정한 속도를 유지하는 왼쪽 그림과 같은 궤적이라면 웨이브 제너레이터 장축, 단축의 차이만큼 보상된 궤적을 입력할 경우 이러한 위치 차이는 어느정도 상쇄될 수 있다. 이러한 부분은 추후 연구에서 논의될 예정이다.

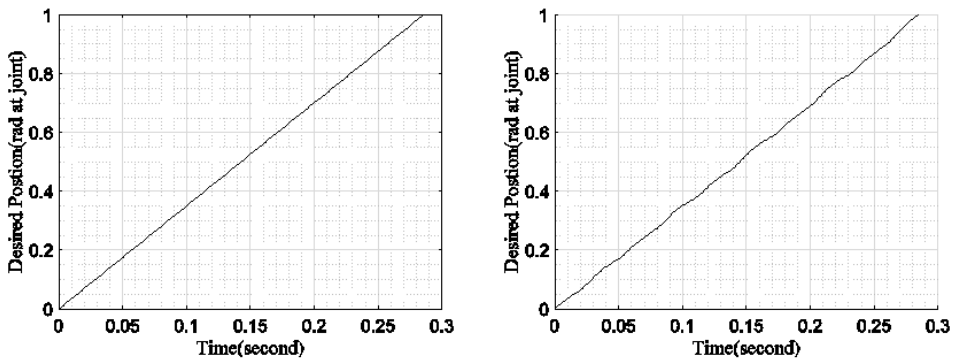


그림 23. 제어 입력 궤도 보상 예시. 왼쪽은 기존의 정속 회전을 위해 일정한 정도의 궤적으로 입력하는 기존 제어. 오른쪽은 웨이브 제너레이터 위상에 맞추어 모터가 증속과 감속을 반복하여 위치 차이를 보상하는 제어 입력 값.

## 제 5 절 설계

양산화를 위해 실제 제품으로 설계할 경우 정밀한 프로파일의 웨이브 제너레이터와 치형을 설계해야 하지만, 본 연구는 경제적이고 간단한 설계를 위해 다음과 같은 방식으로 감속기로서의 타당성을 확인할 수 있다.

첫 번째로 고려해야 할 사항은 스플라인의 치형이다. 일반적인 스피어 기어에서는 인볼류트나 사이클로이드 곡선을 통한 치형이 사용된다. 하모닉 기어의 치형에 대해서는 아직도 다양한 연구들이 진행되고 있지만, 하모닉 드라이브에서 사용하고 있는 치형은 S Tooth design이라는 독자적인 치형이 사용된다. 본 연구에서는 상용품인 타이밍 벨트를 기반으로 설계를 진행하기 때문에 타이밍 벨트 치형과 일치하는 형태의 프로파일을 설계하였다. 타이밍 벨트의 경우 벨트 피치가 작을 수록 같은 부피 대비 기어의 감속비를 극대화할 수 있기 때문에 2GT(피치 2mm) 사이즈를 활용하였다.

두 번째로 고려해야 할 사항은 웨이브 제너레이터 설계이다. 기존 하모닉 기어의 경우 웨이브 제너레이터 베어링의 외륜이 플렉스 스플라인처럼 탄성 변형을 일으킬 수 있어야 하기 때문에 특수한 금속으로 만들어진다. 다만 플렉스 스플라인처럼 정밀한 치(齒)형의 프로파일이 필요한 것은 아니기 때문에 제작 단가는 플렉스 스플라인만큼 비싸지 않다. 이를 모사하여 경방향의 하모닉 움직임을 만드는 웨이브 제너레이터를 만드는 방법은 다음과 같다. 첫 번째는 그림 24와 같이 내륜에 타원의 프로파일을 설계하고 얇은 외륜과 사이에 강구 등의 전동체를 배치하는 방법이다. 단, 이 경우 강구와 내륜, 외륜 사이의 마찰이 기어 성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 윤활 및 정밀한 가공이 중요하다. 다른 방법으로는 그림 25와 같이 작은 베어링 들을 사용하여 프로파일을 만드는 방법을 고려할 수 있다. 베어링 들은 플렉스 스플라인

역할을 하는 타이밍 벨트와의 마찰을 최소화 시켜주고, 동시에 접촉점에서 서클러 스플라인과 맞물리는 역할을 하도록 도와준다.

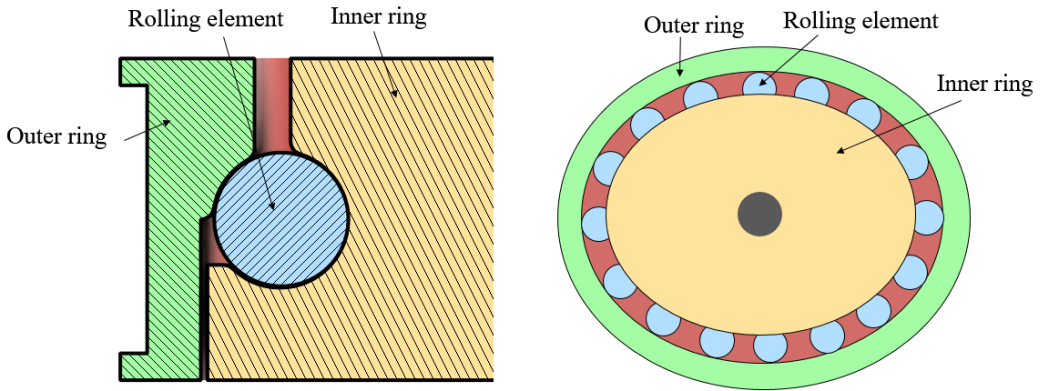


그림 24. 3d 프린터로 구현한 웨이브 제너레이터 형상 1. 외륜의 두께와 플라스틱 재료 탄성을 통해 하모닉 감속 원리를 구현할 수 있다.



그림 25. 3d 프린터로 구현한 웨이브 제너레이터 형상 2. 작은 베어링들의 위치를 바꾸어 베어링에 외접 점들을 기준으로 타원의 프로파일을 구현할 수 있다.

## 제 4 장 위치 추종 성능 실험

### 제 1 절 실험 개요 및 구성

본 실험에서는 제안된 감속 기구가 감속기로서의 역할을 올바르게 수행하는지 확인하는 것을 주 목적으로 한다. 모터에서 들어간 회전이 감속 장치로 전달되어 속도가 감소되는지 확인하고, 감소된 속도가 감속 비와 일치하는지 확인한다. 또한 위치 추종 성능을 확인하여 이론적으로 예측한 위치 차이가 주기적으로 일정하게 나타나는지 확인한다.

이를 위한 실험 장비는 다음과 같이 구성한다. 그림 26은 실험 장비를 나타낸 사진이다. 좌측 감속단에서는 제안한 반원 형태의 서클러 스플라인, 플렉스 스플라인 역할을 하는 타이밍 벨트, 경방향 움직임을 만들며 회전하는 웨이브 제너레이터로 구성되어 있다. 우측의 출력단에서는 타이밍 벨트를 지지하기 위한 출력단의 아이들러, 출력 기어 그리고 링크의 위치를 파악하기 위한 조인트 엔코더로 구성되어 있다.

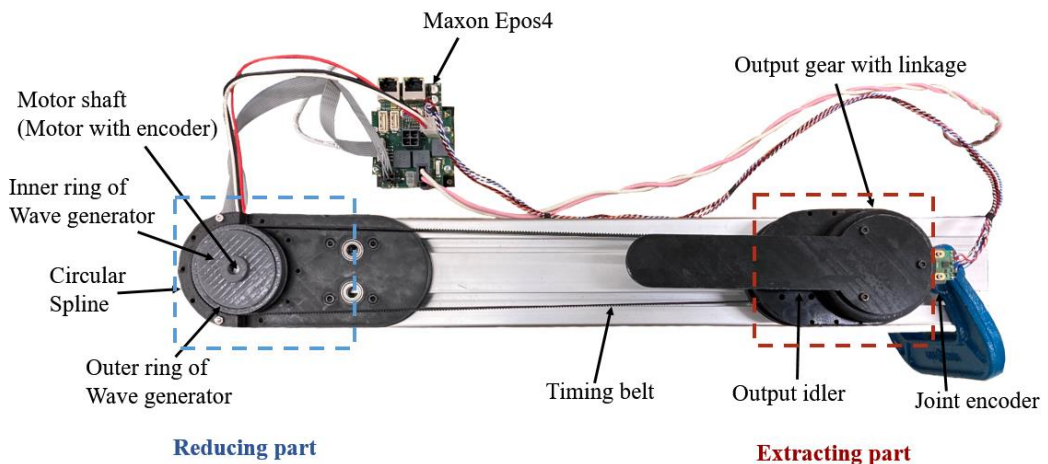


그림 26. 전체 실험 장치 구성. 감속부와 동력 추출부로 나뉜다.



실험 장비들의 사양은 표 2와 같다. 맥슨 모터 사의 100W짜리 EC flat 모터는 동력을 만들어낸다. 모터 컨트롤러는 Maxon EPOS4를 사용하였다. 모터는 32768CPR의 엔코더가 내장되어 있으며, 983040CPR짜리 외부 엔코더와 EPOS4에서 처리된다. 감속비는 감속단에서 49:1로 설계되었지만, 출력단에서 다시 출력기어의 크기로 증속 시키기 때문에 최종적인 감속 비는 29.4:1로 나타난다. 실험은 모터 속도 1000 rpm으로 회전시킨 결과 값을 기준으로 분석하였다. 이는 rad 단위로 104.6 rad/s이다.

Motor	Maxon BLDC EC 60 flat 100W with encoder(32768CPR)
Controller	Maxon EPOS4
Encoder	RLS RLC2IC & MR075E(983040 CPR)
Reduce ratio	29.4:1
Linkage length	430mm

표 2. 전체 실험 구성 요소의 사양

## 제 2 절 실험 결과

그래프 27은 3.5 rad/s로 모터를 등속 회전시킬 때의 위치를 나타낸 값이다. 빨간색 점선은 모터의 엔코더 값을 라디안으로 변환한 값에 감속비를 곱하여 엔코더 좌표계에서 표현된 결과이다. 파란색 실선은 조인트 엔코더의 위치를 라디안으로 변환한 값을 보여준다. 파란색 실선은 빨간색 점선의 값을 추종하는 결과를 확인할 수 있다.

이를 조금 더 미소 변위로 확인하기 위해 두 값의 차이를 정량적으로 빼면 그래프 28과 같은 결과를 확인할 수 있다. 파란색

실선은 조인트 엔코더의 위치 값과 모터 엔코더의 위치 값을 뺀 차이를 나타낸 그래프이다. 두 값의 차이는 주기적으로 진동하는 결과를 확인할 수 있다. 한편 같은 그래프에서 빨간색 실선으로 나타낸 그래프를 통해 3장에서 언급한 위치 차이를 이론적으로 계산한 값을 확인할 수 있다. 완전한 원이 아닌 특수한 형상의 웨이브 제너레이터로 인해 등속의 모터 회전에도 불구하고 조인트의 회전은 웨이브 제너레이터 위치에 따라 일정하지 않은 차이를 갖게 된다. 빨간색 실선은 설계된 모델에서 웨이브 제너레이터 위치에 따른 타이밍 벨트 둘레 길이의 차이를 수치적으로 계산하여 나타낸 결과이다. 빨간색 실선과 파란색 실선을 비교할 때 값의 차이는 미소하게 존재하지만, 주기는 일치한다는 결과를 확인할 수 있다. 또한, 실험에서 모터는 104.6 rad/s로 회전하는데, 주기는 209.2 rad/s로 나타난다. 따라서, 추종 위치 값의 차이는 대부분 필연적으로 생기는 메커니즘에 의한 영향이 대부분이라는 사실을 추론할 수 있다. 그 외의 위치 추종 한계 원인에 대해서는 다음 절에서 서술한다.

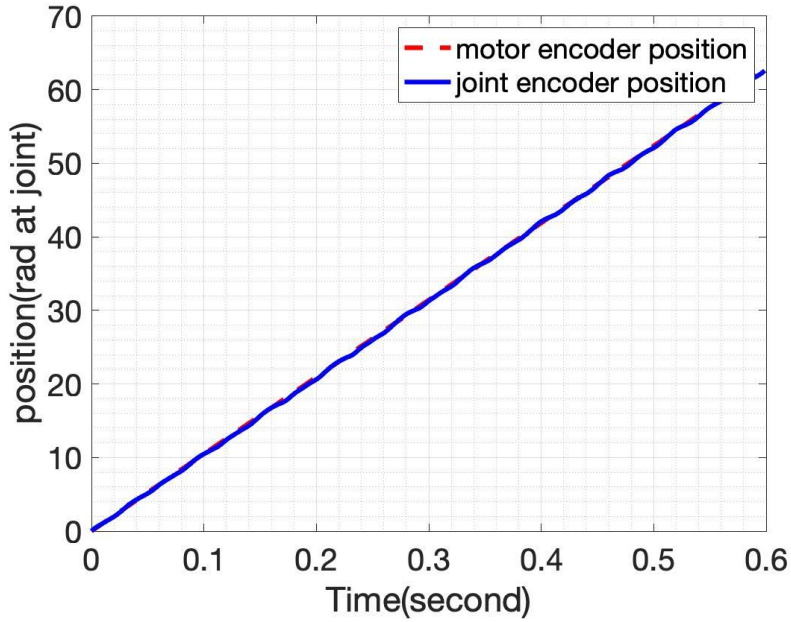


그림 27. 모터와 조인트의 위치 값. Epos4로 두 엔코더 데이터를 받아 추출하여 sync를 맞추는 방식을 사용하였다.

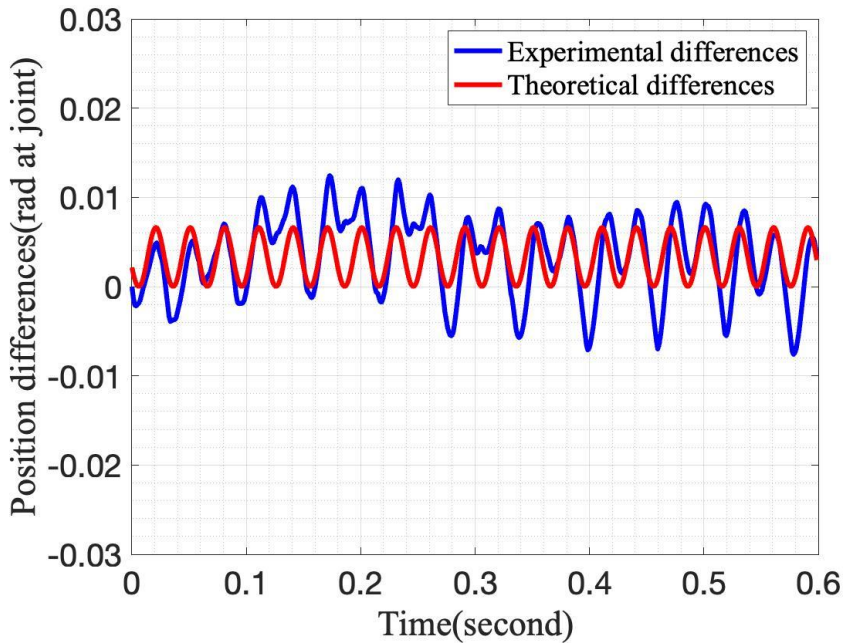
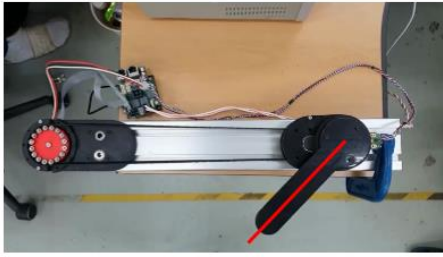
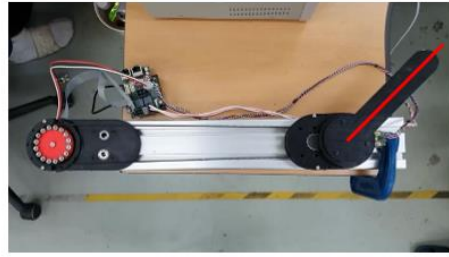


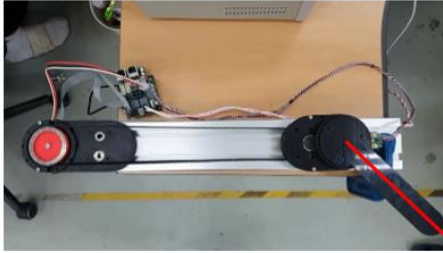
그림 28. 위치 차이를 표현한 실험 결과 그래프. 타이밍 벨트 둘레를 계산하여 나타낸 이론적 위치 차이 값(빨간색)과 실제 실험을 통하여 확인한 조인트와 모터의 위치 차이 값(파란색)이다.



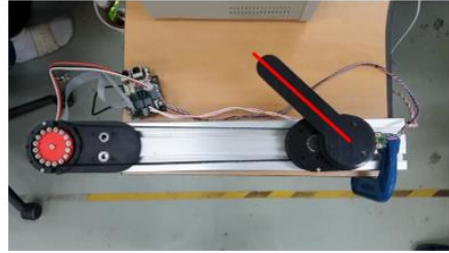
0°



180°



45°



270°

그림 29. 위치 제어를 하는 실험 결과

### 제 3 절 고찰

실험을 통해 의도한 감속비가 올바르게 추출되는 출력단의 위치 값을 확인할 수 있었다. 단, 이론상 고려한 위치 차이 외에도 불규칙한 위치 오차 값들이 존재하는데, 이러한 오차 값의 원인은 다음과 같다.

첫 번째 원인은 제조 오차이다. 동력 전달을 하는 타이밍 벨트 외에 모든 부품은 3d 프린터로 제조되었다. 사용한 PLA 프린터의 제조 공차로 인해 서클러 스플라인의 피치가 정확하게 일치하지 않았으며, 웨이브 제너레이터의 프로파일 역시, 의도한 형상을 정확히 구현해 낼 수 없었다. 또한, 위 실험에서 사용한 웨이브 제너레이터 베어링 또한, 3d 프린터로 제조하였기 때문에, 외륜의 탄성이 의도한 만큼 변형되지 않았으며, 이로 인한 마찰 역시 상당히 크게 나타났다.

두 번째 원인은 설계 상의 문제이다. 첫 번째 프로토타입

모델로서의 감속 장치는 아직 최적화 하지 못한 여러 가지 변수가 남아있다. 대표적으로 웨이브 제너레이터의 형상이 이 문제에 해당한다. 이론상 하모닉 기어를 포함하는 스트레인 기어는 의도한 특정 지점에서만 기어의 치(齒)들이 맞물리도록 설계가 된다. 그리고 특정 지점에서 의도한 물림울만큼의 치(齒)가 맞물리도록 하는 웨이브 제너레이터 프로파일은 해가 하나가 아닐 수 있다. 따라서 추가적인 조건으로 치(齒)의 형상, 압력각, 물림울 등을 모두 고려하여 최적의 웨이브 제너레이터 형상을 만들어 낸다. 본 연구에서는 이러한 부분들이 충분히 고려되지 않았기 때문에 오차 값이 생길 수 있었다.

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 로봇에 사용되는 모터 기반 액추에이터의 감속기를 비교하고 새로운 형태의 감속기를 제안하였다. 흔히 사용되는 여러 감속 장치 중 하모닉 감속기를 기반으로 이를 개량하고 발전시키는 새로운 메커니즘을 제안하였다. 기존 하모닉 감속기는 탄성 변형을 일으키는 플렉스 스플라인을 통해 동력이 전달되어야 하기 때문에 상대적으로 제조가 어렵고 비용이 많이 든다는 한계가 있다. 또한, 기존 하모닉 감속기와 벨트 풀리 시스템을 사용하여 링크의 관성 모멘트를 낮추는 설계를 할 경우 링크 전체의 부피와 질량이 커진다는 단점이 있다.

제안한 벨트를 사용한 감속기를 통해 제조 비용을 줄이고, 탄성 변형 모사를 통해 박형 디자인을 달성할 수 있음을 보였다. 또한 플렉스 스플라인을 벨트로 모사하였기 때문에 벨트의 길이를 늘려 링크 전체를 감속 장치로 만드는 방법을 제안하였다. 이 방법을 사용할 경우 한 단계의 메커니즘을 통해 감속과 동력 전달을 동시에 달성할 수 있기 때문에 필요 토크가 크고, 링크의 관성 모멘트를 줄일 필요가 있는 족형 로봇에서 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 제안한 감속 기구를 직접 설계하고 제작하여 감속 장치로서의 가능성과 계산된 위치 추종 차이 크기 값을 분석하였다. 실험 결과, 계산된 감속비만큼 줄어든 속도로 관절 단의 위치 값을 확인할 수 있었다. 특별히, 웨이브 제너레이터의 프로파일로 인해 생기는 이론적인 위치 차이와 실제 실험 결과를 비교했을 때, 같은 주기로 값이 나타난다는 점을 확인하였다. 이론적인 위치 차이 이상의 차이는 제조 오차에서 비롯된 오차들로 추정하며 이는 추후 금속 가공 설계를 통해 제거할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

이론상 발생하는 위치 오차를 근원적으로 없애는 방법은 두

가지 접근이 고려되고 있다. 첫 번째로, 추가적인 기계 요소를 통해 해결할 수 있다. 웨이브 제너레이터와 같은 형상의 아이들러를 출력단에 추가하고 이를 웨이브 제너레이터와 직동으로 연결하면 타이밍 벨트의 위상 별 길이 차이가 없어진다. 이렇게 출력된 특수 형상의 아이들러를 기어를 통해 따로 추출할 경우 이론적으로 위치 차이 문제가 완벽하게 제거된다. 두 번째 방식은 제어를 통한 해결이다. 이론상 발생하는 위치 차이는 웨이브 제너레이터의 위상에 따라 반복적으로 생기는 오차이다. 그러므로, 그 크기와 주기가 예측이 가능하고, 사전에 위치 차이를 보상할 수 있는 궤적으로 제어 명령을 만들 경우 이러한 위치 오차를 해결할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 두 가지 접근은 추후 연구에서 다루어질 예정이다.

## 참고 문헌

- [1] V. K. Tamminana, A. Kahraman, and S. Vijayakar, “A study of the relationship between the dynamic factors and the dynamic transmission error of spur gear pairs,” *J. Mech. Des.*, 2007.
- [2] C. G. Cooley and R. G. Parker, “A review of planetary and epicyclic gear dynamics and vibrations research,” *Applied Mechanics Reviews*, vol. 66, no. 4, 2014.
- [3] J. Liu, B. Chen, S. Matsumura, C. Li, and H. Houjoh, “Design of a novel cycloid drive with a cycloid–arc gear and analysis of its meshing characteristic,” *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 6, no. 2, pp. 310–322, 2012.
- [4] M. C. Walton, “Strain wave gearing,” Sep. 29 1959, US Patent 2,906,143.
- [5] K. Ueura and R. Slatter, “Development of the harmonic drive gear for space applications,” *European Space Agency–Publications–ESA SP*, vol. 438, pp. 259–264, 1999.
- [6] X. Chen, Y. Liu, J. Xing, S. Lin, and M. Ma, “A novel method based on mechanical analysis for the stretch of the neutral line of the flexspline cup of a harmonic drive,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 76, pp. 1–19, 2014.
- [7] S. Wang, G. Jiang, X. Mei, C. Zou, X. Zhang, and H. Zhang, “A rapid stress calculation method for short flexspline harmonic drive,” *Engineering Computations*, 2019.
- [8] Katz, J. Di Carlo, and S. Kim, “Mini cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control,” in 2019



- International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019, pp. 6295–6301.
- [9] S. Kim, J. Sim, and J. Park, “Elastomeric continuously variable transmission combined with twisted string actuator,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5477–5484, 2020.
- [10] S. Kembraum, M. Kitchell, and M. Crittenden, “An ultra-compact infinitely variable transmission for robotics,” in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2017, pp. 1800–1807.
- [11] K. Lee, S. Hong, and J.-H. Oh, “Development of a lightweight and high-efficiency compact cycloidal reducer for legged robots,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 21, no. 3, pp. 415–425, 2020.
- [12] H. Dong and D. Wang, “Elastic deformation characteristic of the flexspline in harmonic drive,” in *2009 ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots*. IEEE, 2009, pp. 363–369.
- [13] H. S. Oh, K. S. Jeong et al., “Design and manufacture of the composite flexspline of a harmonic drive with adhesive joining,” *Composite structures*, vol. 28, no. 3, pp. 307–314, 1994.
- [14] S. H. Oh, S. H. Chang et al., “Improvement of the dynamic properties of a steel-composite hybrid flexspline of a harmonic drive,” *Composite Structures*, vol. 38, no. 1–4, pp. 251–260, 1997.
- [15] Kayabasi and F. Erzincanli, “Shape optimization of tooth profile of a flexspline for a harmonic drive by finite element

- modelling,” *Materials & design*, vol. 28, no. 2, pp. 441–447, 2007.
- [16] W. Ostapski and I. Mukha, “Stress state analysis of harmonic drive elements by fem,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, pp. 115–123, 2007.
- [17] R. Maiti, “A novel harmonic drive with pure involute tooth gear pair,” *J. Mech. Des.*, vol. 126, no. 1, pp. 178–182, 2004.
- [18] E. Pennestrì and P. P. Valentini, “Kinematics and enumeration of combined harmonic drive gearing,” *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 137, no. 12, p. 11, 2015.
- [19] J. Hwangbo, V. Tsounis, H. Kolvenbach, and M. Hutter, “Cable-driven actuation for highly dynamic robotic systems,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2018, pp. 8543–8550.
- [20] S. Seok, A. Wang, M. Y. Chuah, D. Otten, J. Lang, and S. Kim, “Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT cheetah robot,” in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2013, pp. 3307–3312.
- [21] P. M. Wensing, A. Wang, S. Seok, D. Otten, J. Lang, and S. Kim, “Proprioceptive actuator design in the MIT cheetah: Impact mitigation and high-bandwidth physical interaction for dynamic legged robots,” *IEEE transactions on robotics*, vol. 33, no. 3, pp. 509–522, 2017.
- [22] M. Hutter, C. Gehring, D. Jud, A. Lauber, C. D. Bellicoso, V. Tsounis, J. Hwangbo, K. Bodie, P. Fankhauser, M.

- Bloesch et al., “Anymal—a highly mobile and dynamic quadrupedal robot,” in 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016, pp. 38–44.
- [23] F. Grimmering, A. Meduri, M. Khadiv, J. Viereck, M. Wüthrich, M. Naveau, V. Berenz, S. Heim, F. Widmaier, T. Flayols et al. “An open torque–controlled modular robot architecture for legged locomotion research,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 3650–3657, 2020.
- [24] S. Kitano, S. Hirose, G. Endo, and E. F. Fukushima, “Development of lightweight sprawling–type quadruped robot titan–xiii and its dynamic walking,” in 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013, pp. 6025–6030.
- [25] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, “The development of honda humanoid robot,” in *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*, vol. 2. IEEE, 1998, pp. 1321–1326.
- [26] I.–W. Park, J.–Y. Kim, J. Lee, and J.–H. Oh, “Mechanical design of the humanoid robot platform, hubo,” *Advanced Robotics*, vol. 21, no. 11, pp. 1305–1322, 2007.
- [27] N. A. Radford, P. Strawser, K. Hambuchen, J. S. Mehling, W. K. Verdeyen, A. S. Donnan, J. Holley, J. Sanchez, V. Nguyen, L. Bridgwater et al., “Valkyrie: Nasa’s first bipedal humanoid robot,” *Journal of Field Robotics*, vol. 32, no. 3, pp. 397–419, 2015.
- [28] N. G. Tsagarakis, D. G. Caldwell, F. Negrello, W. Choi, L. Baccelliere, V.–G. Loc, J. Noorden, L. Muratore, A.

- Margan, A. Cardellino et al., “Walk-man: A high-performance humanoid platform for realistic environments,” *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 7, pp. 1225–1259, 2017.
- [29] N. G. Tsagarakis, G. Metta, G. Sandini, D. Vernon, R. Beira, F. Becchi, L. Righetti, J. Santos-Victor, A. J. Ijspeert, M. C. Carrozza et al., “icub: the design and realization of an open humanoid platform for cognitive and neuroscience research,” *Advanced Robotics*, vol. 21, no. 10, pp. 1151–1175, 2007.
- [30] S. Lohmeier, T. Buschmann, H. Ulbrich, and F. Pfeiffer, “Modular joint design for performance enhanced humanoid robot lola,” in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. IEEE*, 2006, pp. 88–93.
- [31] J. Engelsberger, A. Werner, C. Ott, B. Henze, M. A. Roa, G. Garofalo, R. Burger, A. Beyer, O. Eiberger, K. Schmid et al., “Overview of the torque-controlled humanoid robot toro,” in *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. IEEE*, 2014, pp. 916–923.
- [32] D. Gouaillier, V. Hugel, P. Blazevic, C. Kilner, J. Monceaux, P. Lafourcade, B. Marnier, J. Serre, and B. Maisonnier, “Mechatronic design of NAO humanoid,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE*, 2009, pp. 769–774.
- [33] T. D. Tuttle, “Understanding and modeling the behavior of a harmonic drive gear transmission,” Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1992.

Abstract

# Development of Belt Harmonic Reducer for Reducing Link Moment of Inertia

Seungbin You

Department of Intelligence and Information

The Graduate School of

Convergence Science and Technology

Seoul National University

Electric motors are one of the most universally used actuators in the field of modern robots due to their rapid control responsivity and easy energy source management. However, they are applied with a speed reducer that increases the torque in most robot designs due to the insufficient torque range. In particular, harmonic gears are used in various robots due to the advantages of a large reduction ratio and high accuracy.

However, there are various difficulties in manufacturing and the power transmission source as an elastic body such as thickness limitation. On the other hand, in a legged robot, in which the moment of inertia of the leg can affect control responsivity, it is difficult to directly place an actuator including a motor and a reducer in each joint. Also, using a power transmission device or a four-link with the

reducer has the disadvantage that the overall volume is increased and the weight is heavier.

In this paper, a novel reducer that replaces the flex spline with power transmission devices such as chains and timing belts by imitating an elastic body is proposed. In particular, HABA-T (HArmonic Belt Applied Transmission) using a belt harmonic reducing mechanism that can apply an actuator with a high reduction ratio while separating the actuator axis and the joint axis is proposed. And, the feasibility of the novel mechanism for applications that require reducing the moment of inertia was demonstrated by analyzing the position tracking performance.

**Keywords : Reducer design, power transmission, moment of inertia reduction, position tracking performance**

**Student Number : 2019-26877**