

# 복층 볼 배열 구조를 갖는 마찰식 감속기

## Friction Reducer with a Multi-Layer Ball Array Structure

김기쁨<sup>1</sup> · 신희찬<sup>1</sup> · 송재복<sup>†</sup>

Gi-Ppeum Kim<sup>1</sup>, Hee-Chan Shin<sup>1</sup>, Jae-Bok Song<sup>†</sup>

**Abstract:** This research focuses on reducers, vital components in service robots, with a special emphasis on friction reducers designed for use in environments where interaction with humans is essential. For service robots to effectively perform advanced tasks, it is crucial to have reducers that offer high precision, high reduction ratios, and strong resistance to impacts. To meet these requirements, our study introduces a new design methodology and proposes a friction reducer featuring a multi-layer ball array structure. Compared to traditional gearbox-based reducers, the friction reducer developed in this study demonstrates a higher reduction ratio and improved shock absorption. The performance of this newly proposed reducer has been verified through experimental analysis. It was confirmed that by minimizing drive losses, the system has high backdrivability, delivering a torque of 15 Nm. Additionally, it was observed that the system showed an immediate response without backlash to fine input vibrations.

**Keywords:** Robot Reducer, Friction Drive, Impact Stability, Backdrivability

### 1. 서론

서비스 로봇은 가정과 의료를 비롯한 다양한 분야에서 그 중요성이 부각되면서, 기존 산업용 로봇에 비해 더욱 복잡하고 다양한 작업 수행 능력이 요구되고 있다. 이러한 서비스 로봇의 효율적인 동작을 위해서는 고도의 정밀성을 요구하는 액추에이터 시스템이 필수적이다. 감속기는 로봇 액추에이터의 핵심 구성 요소로서, 높은 정밀성과 효율을 실현하는 동시에 기존의 다관절 로봇 감속기가 갖는 고성능이지만 무거운 무게, 크기, 고가의 단점과 충격 저항성의 결여라는 한계를 극복해야 할 필요성이 대두되었다. 또한, 외부 충격 감지를 위해 토크 센서와 같은 추가 부품이 요구되어 로봇의 복잡성을 증가시키고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 안전성과 다기능성을 겸비한 새로운 형태의 감속기 개발이 요구되고 있다. 서비스 로봇이 인

간과 밀접하게 작업하는 환경을 고려할 때, 충격 흡수 능력을 갖춘 감속기의 개발은 로봇의 안전성 향상에 중요한 역할을 할 것이다. 슬립을 통한 충격 흡수가 가능한 마찰 동력 방식은 여러 곳에 적용되었다. 기존의 마찰식 자전거 변속기인 NUVINCI는 무단 변속 기능과 함께 토크 전달 능력을 입증하였지만<sup>[1]</sup>, 3:1 이하의 낮은 감속비와 과도한 크기 및 무게가 단점으로 작용하였다. 반면에, 100:1 이상의 높은 감속비를 가지는 IM SYSTEMS의 Archimedes Drive는 높은 토크와 효율을 제공하였지만, 원통형 롤러를 사용한 마찰식 감속기로서<sup>[2]</sup>, 복잡하고 정밀한 가공을 요구하고 크기 측면에서 하모닉 드라이브보다 2배나 큰 구조적 한계를 가지고 있었다.

본 연구는 서비스 로봇에 적합한 마찰식 감속기를 개발하는 것을 목표로 한다. 구체적으로, 높은 감속비와 고효율을 유지하며, 제로 백래시의 성능을 보이고, 충격을 흡수하는 안전성을 갖추어야 한다. 본 연구에서는 볼의 복층 배열을 활용하여 감속을 이루는 새로운 형태의 마찰식 감속기를 제안한다. 복층 배열된 볼은 공전과 자전을 동시에 수행하며 상쇄되는 움직임으로 감속을 생성하고, 마찰을 통한 토크 전달을 가능하게 한다. 이로 인해 기존 마찰식 감속기에 비해 경량화와 소형화를 실현하며, 사람과의 충돌 시 슬립을 통해 충격을 흡수할 수 있으며, 정렬 유지 장치가 필요 없어 마찰과 백래시를 최소화한다.

Received : Nov. 22. 2023; Revised : Jan. 31. 2024; Accepted : Feb. 27. 2024

\* This research was supported by the MOTIE under the Industrial Foundation Technology Development Program supervised by the KEIT (No. 20014923).

1. Graduate Student, Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (sungnae0602, dennnis112@korea.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (jbsong@korea.ac.kr)

본 연구는 서비스 로봇의 안전성과 효율성을 증진시키기 위한 중요한 단계로, 복층 볼 배열 마찰식 감속기의 설계부터 성능 검증까지의 전 과정을 체계적으로 분석하고 평가함으로써, 로봇 공학 분야에 새로운 기술적 진보를 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 제안한 감속기의 구조 및 상세한 설계에 대해서 설명하고, 3절에서는 실제 제작 및 실험을 통하여 성능을 확인하였다. 마지막으로, 4절에서 결론을 도출하였다.

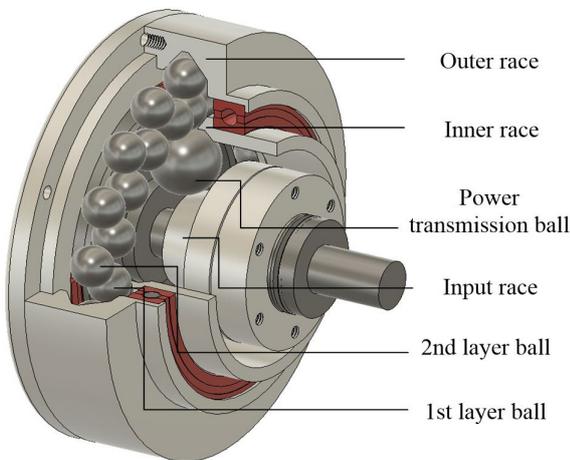
## 2. 감속기 구조

일반적으로 감속기는 입력(input), 고정자(stator), 출력(output), 그리고 감속 장치로 구성되며, 이 중 감속 장치는 입력부터 출력까지 동력을 전달하면서 속도를 줄이는 역할을 한다. 전통적인 유성 기어 감속기<sup>[3]</sup>, 하모닉 감속기<sup>[4]</sup>, 사이클로이드 감속기<sup>[5]</sup>, RV 감속기<sup>[6]</sup>와 같은 장치들은 기어 치형을 가진 회전체들을 통해 서로 다른 회전체의 기어 이가 맞물리며 동력을 전달한다<sup>[7]</sup>. 이러한 기어 이는 정수 개수로 한정되어 있어, 맞물리는 회전체들의 기어 잇수 차이를 통해 감속이 이루어진다.

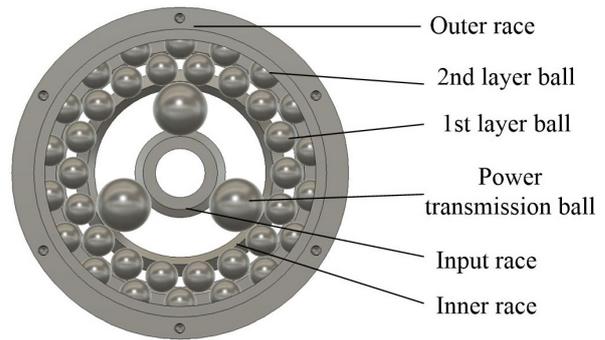
본 연구에서 제안된 마찰식 감속기는 기존의 기어 치형을 사용하지 않는 새로운 방식으로 설계되었다. [Fig. 1]과 같이 입력 레이스, 외측 레이스, 내측 레이스, 1층 볼과 2층 볼, 동력 전달 볼로 구성되어 있다.

### 2.1 감속기 설계

[Fig. 2]에서 보듯이, 설계한 감속기는 동일한 수의 볼이 중심 회전축을 기준으로 원대칭 구조로 1층과 2층에 위치한다. 1층 볼과 2층 볼은 서로 다른 층의 이웃한 볼 두 개와 접촉한다. 1층 볼은 하나의 볼에 대하여 내측 레이스와 두 개의 접촉점을 가지도록 한다. 2층 볼은 하나의 볼에 대하여 외측 레이스와 두 개의 접촉점을 가지도록 한다. 이로 인해 1층 볼과 2층 볼은 공간상의 4점에서 접촉되며, 구속된 궤도로 운동한다. 동력 전달 볼과 접촉하는 1층 볼은 내측 레이스와 한 개의 접촉점을 가진다. 감속기의 단면에서 본 볼과 내측 레이스, 볼과 외측 레이스의 접면은 중심 회전축에 대하여 기울어지도록 설계되고, 볼과 접촉하는 두 점은 중심 회전축에 대하여 같은 거리로 설계한다. 동력 전달 볼은 이웃한 1층 볼 2개와 접촉하며 1층 볼 군보다 중심 회전축에 가깝게 위치한다. 입력 레이스는 동력 전달 볼 군과 접촉하며 접촉점이 동력 전달 볼의 중심보다 중심 회전축에 가깝게 위치한다. 내측 레이스와 외측 레이스, 입력 레이스는 베어링을 통해 지지되며, 고정자로 고정되지 않는다면 동일한 중심 회전축에 대하여 회전한다.



[Fig. 1] 3D modeling for friction reducer

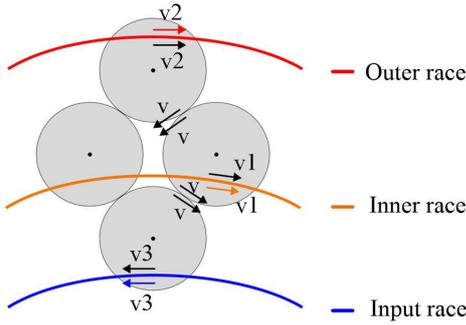


[Fig. 2] Geometry of multi-layer ball reducer

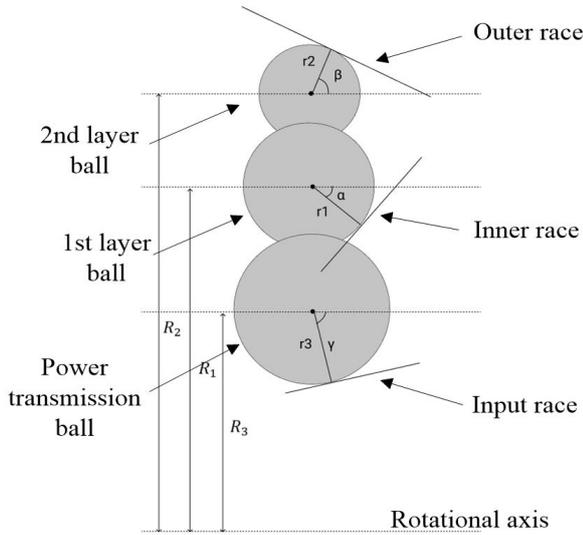
동력 전달 볼은 이웃한 1층 볼 2개와 접촉하며 1층 볼 군보다 중심 회전축에 가깝게 위치한다. 입력 레이스는 동력 전달 볼 군과 접촉하며 접촉점이 동력 전달 볼의 중심보다 중심 회전축에 가깝게 위치한다. 내측 레이스와 외측 레이스, 입력 레이스는 베어링을 통해 지지되며, 고정자로 고정되지 않는다면 동일한 중심 회전축에 대하여 회전한다.

### 2.2 감속기의 작동 원리

제안된 감속기는 구성 요소들 간 모든 접촉점들이 미끄러지지 않는다면 구름 운동하며, 마찰력을 통해 동력을 전달하므로 접촉하는 두 구성 요소의 접촉점에서의 선속도는 동일하다. 각 레이스와 볼의 상대 각속도를 통해 입력 각속도에 대해 감속된 출력 각속도를 구할 수 있으므로, 감속비 산정식을 도출해낼 수 있다. 상대 각속도의 계산을 위해 모든 볼의 중심점이 고정되어 있다고 가정하면, 감속기 측면에서 본 접촉점들의 선속도는 [Fig. 3]과 같이 나타난다. 입력 레이스의 반시계 방향 회전에 대하여 연속된 볼의 구름 운동을 통해 볼과 접촉된 레이스의 회전 방향이 결정된다. 1층 볼 중심보다 내측으로 내측 레이스를 접촉시키고, 2층 볼 중심보다 외측으로 외측 레이스를 접촉시켜 내측 레이스와 외측 레이스의 동일한 시계 방향 회전 운동을 생성한다. 동일 방향으로 회전하는 내측 레이스와 외측 레이스의 회전 속도 차이를 줄일수록 내측 레이스를 고정자로 정지시켰을 때 외측 레이스가 매우 느린 속도로 감속기 출력 속도를 가진다.



[Fig. 3] Velocity and direction at the contact point



[Fig. 4] Cross-section of the reducer

중심 회전축으로부터의 거리를 기준으로 감속기의 단면도를 도시하면, 구성 요소들이 [Fig. 4]와 같이 배치된다. 볼과 볼의 접촉점에서의 속도가  $v$ 일 때 속도와 각속도의 관계는  $w = v/r$ 이므로 볼과 레이스의 접촉점에서의 선속도는 볼의 회전축으로부터 거리에 비례한다. 접촉점에서의 선속도와 중심 회전축으로부터 거리를 통해 각 레이스의 각속도를 구하면 다음과 같다.

$$w_{\text{inner race}} = \frac{v \sin \alpha}{R_1 - r_1 \sin \alpha} \quad (1)$$

$$w_{\text{outer race}} = \frac{v \sin \beta}{R_2 - r_2 \sin \beta} \quad (2)$$

$$w_{\text{input race}} = -\frac{v \sin \gamma}{R_3 - r_3 \sin \gamma} \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 내측 및 외측 레이스 각도이며, 나머지 변수들은 [Fig. 4]에 나타나 있다. 식 (1), (2), (3)에서 내측 레이스 회전 방향에 대하여 동일 방향으로 회전하는 외측 레이스는 양의 부호, 반대 방향으로 회전하는 입력 레이스는 음의 부호로

표현된다. 상대 각속도에 대하여 내측 레이스를 고정자로 하여 회전을 정지시키면, 각 레이스의 각속도와 감속비는 다음과 같이 계산된다.

$$w_{\text{inner race}} = 0 \quad (4)$$

$$w_{\text{outer race}} = \frac{v \sin \beta}{R_2 - r_2 \sin \beta} - \frac{v \sin \alpha}{R_1 - r_1 \sin \alpha} \quad (5)$$

$$w_{\text{input race}} = -\frac{v \sin \gamma}{R_3 - r_3 \sin \gamma} - \frac{v \sin \alpha}{R_1 - r_1 \sin \alpha} \quad (6)$$

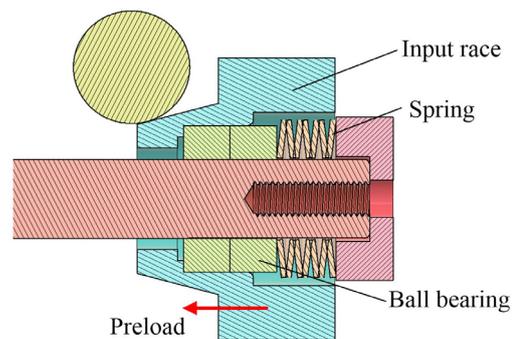
$$\rho = \frac{-\frac{\sin \gamma}{R_3 - r_3 \sin \gamma} - \frac{\sin \alpha}{R_1 - r_1 \sin \alpha}}{\frac{\sin \beta}{R_2 - r_2 \sin \beta} - \frac{\sin \alpha}{R_1 - r_1 \sin \alpha}} \quad (7)$$

여기서  $\rho$ 은 감속비를 나타낸다. 식 (7)에서 분모에 해당하는 값이 0에 가까울수록 감속비가 커지게 된다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 조절하여 목표하는 고감속비를 얻을 수 있다.

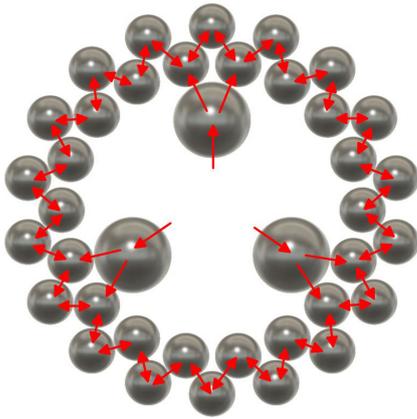
### 2.3 예압 인가 장치 설계

마찰식 감속기의 동력 전달은 마찰력에 의해 이루어진다. 마찰력은 수직 항력에 의해 발생하므로 모든 접촉점에서 수직 항력을 생성하여야 감속기가 토크를 전달할 수 있다. 수직 항력 생성을 위해 감속기는 스프링을 사용한 예압 장치를 사용한다.

제한된 감속기의 예압 인가 장치는 모든 구성 요소마다 각각 예압을 가하지 않고 입력 레이스에만 예압을 가하는 것이 특징이다. [Fig. 5]와 같이 입력 레이스와 내측 레이스 사이에 위치한 베어링의 내륜과 내측 레이스에 지지되도록 스프링을 구성하였다. 압축시킨 스프링의 탄성력이 베어링 내륜을 통해 입력 레이스에 전달되어 예압을 생성한다. 접촉점에서의 수직 항력이 클수록 감속기가 전달할 수 있는 토크가 커지므로, 스프링의 압축 길이를 조절함으로써 감속기의 출력 토크를 설정할 수 있다.



[Fig. 5] Structure of preload device



[Fig. 6] Direction of preload transmission between balls

### 2.4 연쇄 예압 인가 원리

마찰식 감속기는 구성 요소 간 접촉점 중 가장 마찰력이 작은 접촉점에서 먼저 슬립이 발생하므로 모든 접촉점에 예압을 가하여 적절한 수직 항력을 생성하여야 한다. 제안된 감속기는 연쇄 예압 구조를 통해 하나의 예압 장치로 모든 동력 전달에 관여하는 구성 요소에 예압이 전달된다. [Fig. 6]에서 입력 레이스에 예압을 인가하면 동력 전달 볼을 통해 1층 볼에 예압이 전달되고, 내측 레이스와 2층 볼, 외측 레이스까지 예압이 전달된다. 1층 볼과 2층 볼은 내측 레이스와 외측 레이스로 둘러싸인 한정된 공간 내에서 구속된 궤도로 운동하고, 1층 볼과 2층 볼 사이에 전달되는 예압은 원주 방향으로 한 바퀴 돌아 동력 전달 볼과 접촉한 1층 볼에 다시 예압을 전달하므로, 전달된 예압이 외부로 빠져나가는 손실 없이 감속기 내부 접촉점들의 마찰력으로 전환된다.

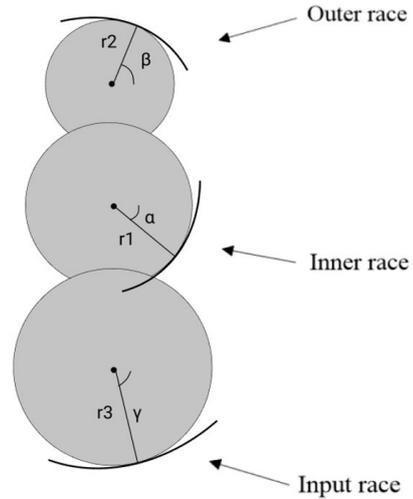
### 2.5 Hertzian contact pressure

제안된 감속기는 구성 요소 간 접촉점의 마찰력을 통해 동력을 전달하는데, 마찰력을 생성하는 수직 항력의 최대값은 구성 요소의 소재 및 형태 등에 의해서 결정된다. Hertz theory<sup>[8]</sup>에 의거한 접촉점에서의 최대 수직 항력은 최대 접촉 압력에 비례하고, 최대 접촉 압력은 다음과 같다.

$$p_{max} = \sqrt{\frac{E F}{R L}} \quad (8)$$

where  $\frac{1}{E} = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}$ ;  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

여기서  $R_i$ 와  $E_i$ 는 각각  $i$ 번째 구성 요소의 곡률 및 영 계수 (Young's modulus)이며,  $F/L$ 은 접촉 시에 작용하는 단위 길이 당 힘을 나타낸다. 볼과 레이스 사이의 낮은 수직 항력을 증가



[Fig. 7] Cross-section of the curved race

시키기 위해 레이스의 단면을 직선형에서 곡선형으로 변경하였다[Fig. 7]. 단면의 곡률을 접촉한 볼과 유사하도록 조절하여 전달할 수 있는 토크를 증가시켰다.

## 3. 제작 및 실험

### 3.1 감속기 제작

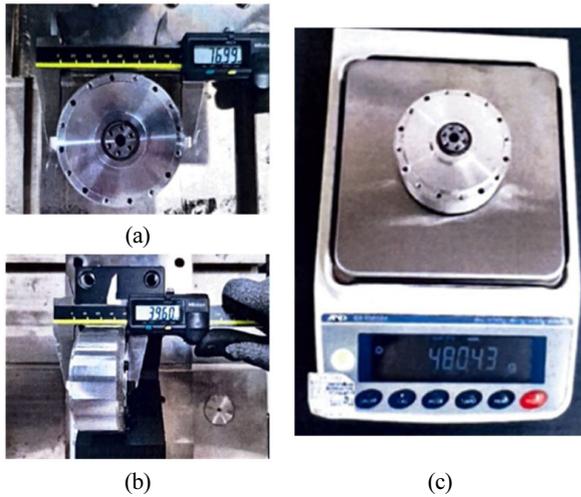
베어링에 사용되는 SUJ2 볼과 CNC 가공을 통해 제작한 부품들을 조립하여 감속기를 제작하였다. 감속기의 1층 볼, 2층 볼, 동력 전달 볼의 배치를 위해 3D 프린터로 제작한 조립 지그를 활용하였다. [Fig. 8]과 같이 조립 지그를 활용하여 내측 레이스와 외측 레이스에 볼을 위치시키고, 조립 지그를 제거한 후 입력 레이스와 예압 인가 장치를 장착하였다.

### 3.2 치수 및 무게 측정

감속기는 동력을 전달하는 부품의 특성상 특정 출력 토크에 서크기와무게가 한정되어 있다. 하모닉 드라이브 SHF-17-50-2SH의 스펙은 정격 출력 토크 16 Nm, 감속비 50:1일 때 무게 630 g,



[Fig. 8] Reducer assembly process: (a) ball arrangement by jig, and (b) assembled reducer

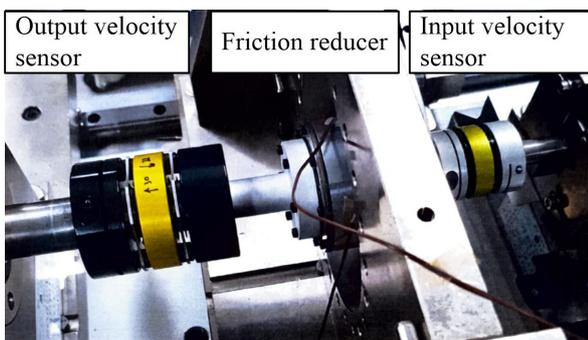


[Fig. 9] Measurement of (a) diameter, (b) thickness, and (c) weight

직경 80 mm, 두께 56.5 mm이다. 원통형 롤러를 사용하는 마찰식 감속기인 Archimedes drive는 동일 출력에서 두께가 60 mm에 달한다. 제안된 감속기는 여러 개의 볼이 동시에 토크를 전달하므로, 소형화 및 경량화가 가능하였다. [Fig. 9]는 실제로 측정된 감속기의 치수 및 무게를 나타낸다. 감속기의 외경은 76.99 mm, 두께는 39.60 mm, 무게는 480.43 g으로 측정되었다.

### 3.3 감속비 실험

제안된 감속기는 식 (7)에 따라 50:1의 감속비로 설계하였다. 내측 레이스를 고정시키고 입력 레이스를 회전시켜 출력에 해당하는 외측 레이스 1회전에 필요한 입력 레이스 회전 수를 측정하였다. 입력 레이스 50회전당 외측 레이스가 1회전하여 설계 목표치인 50:1의 감속비로 작동하는 것을 확인하였다. 보다 정확한 결과를 확인하기 위하여, 감속비 측정 시험을 20회 실시한 결과, 평균값은 50.2:1이고 표준 편차는 0.0169로 나타났다[Fig. 10].



[Fig. 10] Experimental setup of reducer ratio testing

### 3.4 역구동성 실험

산업용 로봇의 감속기는 높은 정확도와 강성 위주로 설계되어 구동 손실에 의해 역구동성이 상대적으로 낮아지는 경향이 있다. 특히, 높은 감속비의 감속기일수록 역구동에 큰 토크가 필요하다. 역구동성은 감속기의 성능을 판단하는 지표 중 하나이다. 본 연구에서 제안된 감속기는 50:1의 높은 감속비를 가지지만 구동 손실을 최소화하도록 기어 치형이 없는 마찰 방식을 적용하여 역구동성이 우수하였다.

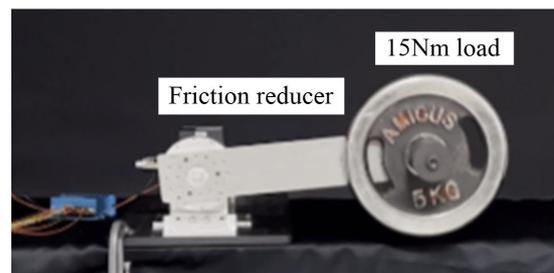
역구동성 실험을 위해 입력 레이스와 동력 전달 볼을 제외한 상태로 내측 레이스를 고정시키고, 출력에 해당하는 외측 레이스를 강제로 회전시켰다. 2 Nm의 역구동 토크에 대하여 1층 볼과 2층 볼이 강제 회전하는 내측 레이스의 역 방향으로 공전하며 역구동이 잘 발생함을 확인하였다. 동일 감속비와 출력 토크를 가지는 하모닉 드라이브는 5 Nm의 토크에서 역구동되었다. 동력 전달 볼과 입력 레이스 장착 시에 외측 레이스 1회전당 입력 레이스가 50.2회전을 하며, 감속비에 해당하는 만큼 가속되어 역구동함을 확인하였다.

### 3.5 전달 토크 실험

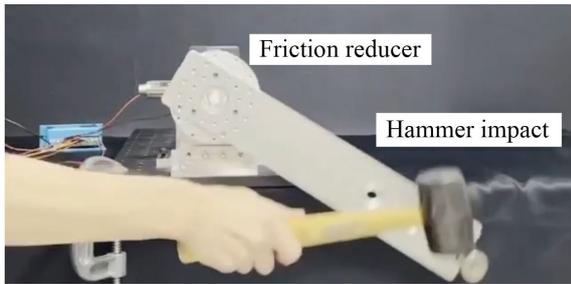
감속기의 전달 토크 실험을 위하여 감속기에 링크를 장착하였다. 감속기 중심 회전축으로부터 30 cm 거리에 해당하는 위치에 5 kg 원판을 장착하여 최대 15 Nm의 토크가 감속기에 가해지도록 하였다[Fig. 11]. 입력 레이스에 모터를 연결하여 입력을 구동시켰으며, 링크가 바닥을 향하여 토크가 0 Nm인 시점부터 실험을 진행하였다. 링크가 회전할수록 증가하는 토크에 대하여 15 Nm의 토크를 전달하는 것을 확인하였다. 20 Nm의 부하를 가했을 때 링크의 위치가 바닥을 향할 때를 기준으로 65도에서 미끄러진 것을 통해 구름마찰을 유지할 수 있는 부하의 범위가 0 Nm ~ 18 Nm임을 확인했다.

### 3.6 충격 흡수 실험

마찰식 감속기는 동력 전달 과정에서 외부 충격을 받았을



[Fig. 11] Shape of output torque testing equipment

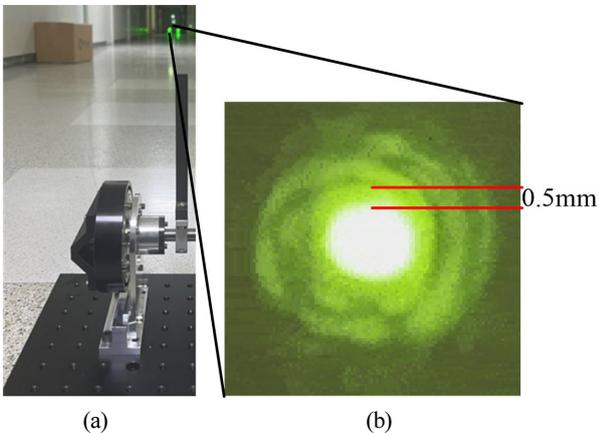


[Fig. 12] Shape of impact stability testing equipment

때, 특유의 순응성을 통해 슬립 현상을 일으키며, 이를 통해 감속기 자체의 고장을 방지한다. 또한, 이러한 슬립 현상은 충격을 가한 물체에 대한 반작용 힘의 감소로 이어지며, 결과적으로 가한 충격이 흡수된다. 이는 별도의 장치나 토크 센서 없이 사람이 충돌하였을 때 충격 흡수가 이루어져 안전하므로 인간과의 상호 작용이 중요한 환경에 적합하다. 이를 실험하기 위해 전달 토크 실험과 동일한 실험 장치에서 5 kg 원판을 제거하고, 입력 레이스가 동일한 토크로 회전하도록 하였다. 감속기 중심 회전축으로부터 30 cm 거리에 해당하는 곳을 망치로 쳤을 때 감속기의 파손 없이 순간적인 슬립이 발생한 후 다시 정상적으로 구동되는 것을 확인하였다[Fig. 12].

### 3.7 제어 정밀도 실험

벽면과 50 m 떨어진 지점에 감속기를 위치시키고 감속기 출력에 레이저를 부착하여 벽면에서 출력 회전 각도를 측정할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다. 입력 레이스에 긴 막대기를 장착하여 미세한 입력 진동에 대한 레이저의 움직임을 관찰하였다. 백래시 없이 즉각적인 반응을 보였고, [Fig. 13]과 같이 50 m 거리에서 왕복 0.5 mm의 레이저 움직임을 확인하였는데, 이는 2 arcsec에 해당하는 각도이다.



[Fig. 13] (a) Experimental result of control accuracy testing, and (b) output vibration

## 4. 결론

본 연구에서는 기존의 기어 치형을 사용하지 않고 볼을 복층으로 배열하여 접촉점의 마찰력을 통하여 동력을 전달하는 마찰식 감속기를 제안하였다. 제안된 감속기는 복층 볼의 자전과 공전의 상쇄된 움직임을 통해 감속이 이루어지고 하나의 예압 장치로 모든 접촉점에 예압이 가해지도록 설계되었다. 감속기의 여러 성능 지표 확인 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제안된 감속기는 복층 볼에 접촉한 레이스의 각도 변경을 통해 낮은 감속비부터 높은 감속비까지 쉽게 설계가 가능하였고, 기존 정밀 감속기와 유사한 수준의 소형화 치수와 무게를 달성하였다.
- 2) 기어 치형이 없는 마찰 방식이 적용되어 구동 손실을 최소화하여 높은 역구동성을 확인하였다.
- 3) 15 Nm의 토크를 전달할 수 있었으며, 큰 외부 충격에 대하여 슬립 현상을 통해 충격을 흡수함으로써, 감속기 고장을 방지하고, 충격을 가한 물체에 대한 반작용 힘을 감소하였다.
- 4) 미세한 입력 진동에 대하여 출력이 백래시 없이 즉각적으로 반응하였고, 2 arcsec에 해당하는 진동을 전달하였다.

## References

- [1] J. Carter and D. Miller, "The Design and Analysis of an Alternative Traction drive CVT," *SAE Technical Paper*, 2003, DOI: 10.4271/2003-01-0970.
- [2] Y. Jiang, G. Wang, Q. Luo, and S. Zou, "Asymmetric loading multi-roller planetary traction drive: Modeling and performance analysis," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 170, 104697, Apr., 2022, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104697.
- [3] H. Y. Lee, H. T. Yeo, and K. Heo, "A study on design of Reduction Gear with Double Reduction Planetary Gears," *Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 177-181, Oct., 2006, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01471575>.
- [4] T. Trang, T. Pham, Q. Yin, Q. Wang, Y. Hu, and W. Li, "Design Harmonic Drive for Application in Robot Joint," *2022 International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE)*, Xi'an, China, pp. 106-113, 2022, DOI: 10.1109/ICMEE56406.2022.10093325.
- [5] B. Borislavov, I. Borisov, and V. Panchev, "Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer : Cycloid Stage, Geometry, Element Analyses," M.S. thesis, Linnaeus Univ., Växjö, Sweden, 2012, [Online], <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:532489/FULLTEXT01.pdf>.
- [6] J. H. Lee, D.-S. Kim, J.-J. Lee, S. H. Kim, and K.-M. Kim, "Study on Accelerated Life Test of RV Reducer for Manufacturing Robot," *Transactions of the Korean Society of*

*Mechanical Engineers*, vol. 46, no. 5, pp. 471-478, May, 2022, DOI: 10.3795/KSME-A.2022.46.5.471.

- [7] D. I. Park, "Development Trends of Precision Reducers for Collaborative Robots," *Journal of the KSME*, vol. 60, no. 10, pp. 32-37, Oct., 2020, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10475767>.
- [8] I. N. Sneddon, "The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile," *International Journal of Engineering Science*, vol. 3, no. 1, pp. 47-57, May, 1965, DOI: 10.1016/0020-7225(65)90019-4.



**김기범**

2022 고려대학교 기계공학부(공학사)  
2022~현재 고려대학교 기계공학과 석사과정

관심분야: Collaborative robots, Robot reducer



**신희찬**

2022 고려대학교 기계공학부(공학사)  
2022~현재 고려대학교 기계공학과 석사과정

관심분야: Collaborative robots, Robot reducer, Robotic Gripper



**송재복**

1983 서울대학교 기계공학과(공학사)  
1985 서울대학교 대학원 기계공설계학과(공학석사)  
1992 MIT 기계공학과(공학박사)  
1993~현재 고려대학교 공과대학 기계공학부 교수

관심분야: Collaborative robots, Design and control of robotic system, AI-based robot applications