

# 위치/힘 제어가 가능한 유성기어 기반의 더블 액츄에이터 유닛

## Double Actuator Unit based on the Planetary Gear Train Capable of Position/Force Control

김 병 상<sup>1</sup>, 박 정 준<sup>1</sup>, 송 재 복<sup>1</sup>, 김 홍 석<sup>2</sup>

Kim Byeong-Sang<sup>1</sup>, Park Jung-Jun<sup>1</sup>, Song Jae-Bok<sup>1</sup>, Kim Hong-Seok<sup>2</sup>

**Abstract** Control of a robot manipulator in contact with the environment is usually conducted by the direct feedback control using a force-torque sensor or the indirect impedance control. In these methods, however, the control algorithms become complicated and the performance of position and force control cannot be improved because of the mechanical properties of the passive components. To cope with such problems, redundant actuation has been used to enhance the performance of position control and force control. In this research, a Double Actuator Unit (DAU) is proposed, with which the force control algorithm can be simplified and can make the robot ensure the safety during the external collision. The DAU is composed of two actuators; one controls the position and the other modulates the joint stiffness. Using this unit, it is possible to independently control the position and stiffness. The DAU based on the planetary gears is investigated in this paper. Performance using the DAU is also verified by various experiments. It is shown that the manipulator using this mechanism provides better safety during the impact with the environment by reducing the joint stiffness appropriately on detecting the collision of a manipulator.

**Keywords** : Double Actuator Unit, Position/Force Control, Collision Safety, Force Estimation

### 1. 서 론

로봇 매니퓰레이터의 운동은 자유공간상에서의 운동과 외부환경과 접촉을 유지한 상태에서의 운동으로 분류할 수 있다. 자유공간에서의 운동은 일반적인 위치제어 기법을 이용하여 구현할 수 있으며, 위치정확도를 높이기 위하여 매니퓰레이터의 관절 및 링크의 강성이 높아야 한다. 그러나 높은 강성은 위치제어를 구현하는 데는 용이하지만, 외부환경과의 접촉이나 충돌이 발생할 때 매니퓰레이터뿐만 아니라 외부환경에도 큰 피해를 줄 수 있다.

외부환경과 접촉을 유지한 상태로 운동할 때, 외부환경에 피해를 주지 않고 안전하게 움직이기 위해서는 정확한 힘제어가 필요하다. 매니퓰레이터의 직접적인 힘제어

는 힘/토크 센서와 같은 능동적인 요소를 말단부 근처에 부착하고, 센서에서 검출되는 신호로 피드백 제어를 수행하여 구현한다. 한편, 힘/토크 센서를 사용하지 않고 선형 스프링과 같이 외력에 비례하여 변형이 발생하는 수동요소를 이용하여 간접적으로 힘제어를 구현하기도 한다<sup>1,2,3</sup>. 그러나 힘/토크 센서를 이용하는 방법은 힘제어를 구현하는 알고리즘이 복잡하고, 센서의 가격이 비싸다는 단점이 있다. 그리고 수동요소를 이용하는 경우에 시스템의 성능은 기계요소로 의해서 결정되는데, 수동요소의 기계적 특성이 정해져 있기 때문에 로봇의 힘제어 성능과 위치제어 성능을 향상시키는 데 한계가 있다.

또한, 최근에는 힘/위치 제어성능뿐만 아니라, 충돌이 발생할 경우 안전성을 향상시키기 위하여 하나의 관절에 두 개의 액츄에이터를 사용하는 여유구동에 관한 연구가 진행되어 왔다. 매니퓰레이터가 작업을 수행하는 중, 기계적 임피던스를 변화시켜 관절의 강성을 제어할 수 있는 가변강성 장치가 Bicchi에 의해서 개발되었다<sup>4,5</sup>. 가변

※ 본 연구는 산업자원부 퍼스널로봇 기반기술 개발 과제 지원으로 수행되었음.

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학과

<sup>2</sup> 한국생산기술연구원

강성 장치는 타이밍 폴리/벨트를 이용하여 두 액추에이터를 각각 주동근과 길항근으로 사용하며, 두 액추에이터의 회전방향과 발생하는 토크로 위치와 강성을 동시에 제어한다. 그리고 Khatib는 고토크-저주파수 특성을 갖는 액추에이터를 베이스에 고정하고, 저토크-고주파수 특성을 갖는 액추에이터를 관절에 병렬로 연결하여 구동하는 분산구동(distributed actuation) 방법으로 매니퓰레이터의 말단점(endpoint)에서 위치제어와 힘제어의 응답 성능을 향상시키고, 충돌에 대한 안전성을 확보하였다<sup>6)</sup>. 그러나 가변강성 장치는 크기 문제로 인하여 로봇 매니퓰레이터에 적용하기 어려우며, 분산구동 방법은 두 액추에이터를 매니퓰레이터에 병렬로 연결해야 하므로 매니퓰레이터의 설계가 복잡하게 되는 단점을 갖는다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 매니퓰레이터의 힘제어를 쉽게 구현하고, 충돌에 대하여 안전성을 확보할 수 있는 더블 액추에이터 유닛(Double Actuator Unit; DAU)을 개발하였다. DAU는 두 개의 액추에이터로 구성되어 있다. 이 중 하나는 위치를 제어하고 다른 하나는 관절의 강성을 제어함으로써 위치와 강성을 독립적으로 제어할 수 있다. DAU는 힘/토크 센서를 사용하지 않고 두 액추에이터에 부착되어 있는 엔코더를 이용하여 관절에서 발생하는 토크를 추정하거나, 링크에 발생하는 충돌을 감지할 수 있다. 그리고 관절의 강성을 변화시킴으로써 안전성을 확보할 수 있다.

본 논문에서는 2자유도를 갖는 유성기어열을 이용하여 DAU를 개발하였다. 그리고 위치추종 실험과 힘추정 실험을 통하여 위치와 강성제어 성능을 살펴보았다. 마지막으로, 관절의 강성을 일정하게 유지시켰을 때와 충격을 감지하여 강성을 능동적으로 변화시켰을 때, DAU를 장착한 링크에 발생하는 충격력을 비교하였다. 이로부터 DAU를 사용할 경우 충격에 대한 안전성을 확보할 수 있음을 검증하였다.

## 2. 더블 액추에이터 유닛

본 연구에서 제안하는 DAU는 유성기어열을 이용하여 위치제어와 강성제어를 독립적으로 구현한다. 2.1절에서는 더블 액추에이터 메커니즘의 개념을 설명하고, 2.2절에서는 유성기어열의 구동원리에 대하여 설명한다. 2.3절에서는 유성기어열 기반의 DAU에 대하여 살펴보고, 2.4절에서는 DAU의 감속비에 대하여 설명한다.

### 2.1. 더블 액추에이터 메커니즘

매니퓰레이터의 위치/힘 제어성능을 향상시키기 위해

서는 위치와 강성을 동시에 제어해야 한다. 그러나 하나의 액추에이터를 이용하여 위치와 강성을 동시에 제어하는 것은 물리적으로 불가능하다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 여유구동(redundant actuation)을 이용할 수 있는데, 여유구동이란 시스템에 필요한 자유도(mobility)보다 많은 수의 액추에이터를 이용하여 로봇을 구동하는 방법을 말한다.

더블 액추에이터 메커니즘은 위에서 설명한 것과 같이 위치/힘 제어성능을 향상시키기 위하여 여유구동을 이용하며, 그림 1과 같은 구조를 갖는다. 더블 액추에이터 메커니즘은 위치를 제어하는 액추에이터(Positioning Actuator; PA)와 강성을 제어하는 액추에이터(Stiffness Modulator; SM)로 구성된다. 그리고 SM의 몸체는 PA출력축에 고정되어 있어서 SM축은 PA의 본체에 대하여 상대운동을 한다. 본 연구에서는 이러한 메커니즘을 매니퓰레이터에 적용하기 위하여 2자유도 특성을 갖는 유성기어열을 이용하였다.

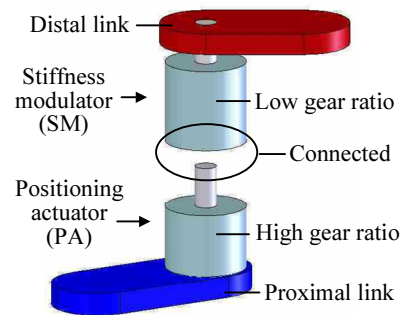


그림 1. 더블 액추에이터 메커니즘

### 2.2. 2자유도를 갖는 유성기어열

입력과 출력이 각각 하나인 단순 기어열과는 달리, 유성기어열(planetary gear trains)은 두 개의 입력을 가질 수 있다. 유성기어열의 구조는 그림 2와 같으며, 바깥쪽에 내접기어인 링기어(ring gear)가 있고, 내접기어와 맞물리는 유성기어(planet gear)들이 배치된다. 그리고 안쪽에 유성기어와 맞물리는 선기어(sun gear)로 구성된다. 그리고 캐리어(carrier)는 유성기어의 축과 선기어의 축을 연결하는 링크이다.

유성기어열은 입력과 출력, 그리고 고정이 되는 기어에 따라서 그림 3과 같이 3가지의 방식으로 분류된다. 그림 3(a)는 유성형(planetary type)으로, 링기어를 고정된 상태에서 선기어와 캐리어를 각각 입력과 출력으로 사용한다. 선기어가 시계 반대방향으로 회전하면(①), 선기어(입력)와 맞물려 있는 유성기어는 시계방향으로 회전한다(②).

이 때, 링기어가 고정되어 있으므로 캐리어(출력)는 시계 반대방향으로 회전한다(③). 그림 3(b)는 캐리어를 고정된 상태에서 선기어와 링기어를 각각 입력과 출력으로 사용하는 스타형(star type)이며, 그림 3(c)는 선기어를 고정된 상태에서 링기어와 캐리어를 각각 입력과 출력으로 사용하는 솔라형(solar type)이다.

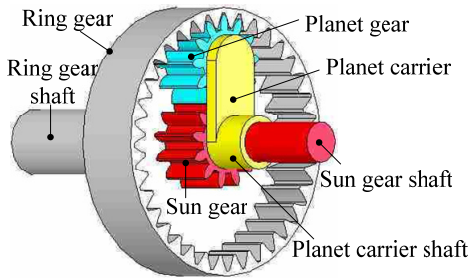


그림 2. 유성기어열

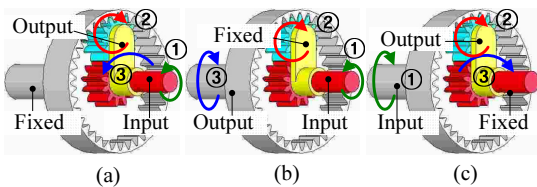


그림 3. 유성기어열의 종류; (a)유성형, (b)스타형, (c) 솔라형

만약, 유성기어열에서 고정하고 있던 기어에 액추에이터를 연결하여 입력으로 사용하면, 유성기어열은 두 개의 입력과 하나의 출력을 갖게 된다. 예를 들어, 유성형에서 선기어와 링기어에 액추에이터를 연결하여 입력으로 사용하면, 이들 입력의 조합으로 출력인 캐리어의 운동이 결정된다.

2.3. 유성기어 기반의 DAU

2자유도를 갖는 유성기어 기반의 더블 액추에이터 유닛(Double Actuator Unit; DAU)을 그림 4(a)와 같이 구성하였다. DAU는 PA, SM, 그리고 유성기어열로 구성된다. DAU에 사용되는 유성기어열은 그림 4(b)에 상세히 나타나 있다.

PA의 축은 선기어와 연결되어 있어서 유성기어열의 입력 중 하나로 사용된다. 그리고 SM의 축은 기어와 연결되어 링기어에 동력을 전달하므로, 유성기어열의 두 번째 입력으로 사용된다. 그리고 캐리어는 DAU의 최종 출력 축으로 사용되며, 이 곳에 머니플레이터의 distal link가 고정된다. 한편, 그림에서 보듯이, PA와 SM의 몸체는 모

두 proximal link에 고정되어 있다. DAU는 PA와 SM을 이용하여 위치와 강성을 독립적으로 제어할 수 있으며, 이에 대한 자세한 원리는 다음 장에서 다루도록 한다.

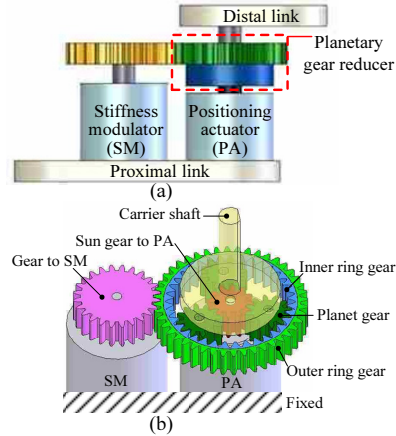


그림 4. DAU; (a) 유성기어열 기반의 DAU, (b) DAU에 사용된 유성기어열

2.4. 유성기어열의 감속비

DAU는 유성기어를 이용하여 두 액추에이터의 동력을 전송하며, 두 액추에이터의 기능이 위치제어와 강성제어로 나누어져 있기 때문에 감속비를 결정하는 데 주의하여야 한다. 위치제어 중 사용하는 유성기어열은 선기어와 캐리어를 각각 입력과 출력으로 사용하고, 이는 2.2절에서 설명한 유성형에 속한다. 이 때, 유성기어열의 감속비  $r_p$ 는 SM을 고정된 상태에서 PA와 캐리어 사이의 속도비로 정의한다.

$$r_p = \frac{\omega_C}{\omega_{PA}} = \frac{N_S}{N_{RI} + N_S} \tag{1}$$

여기서,  $\omega_{PA}$ ,  $\omega_C$ 는 PA의 축과 캐리어의 회전속도이며,  $N_S$ ,  $N_{RI}$ 는 선기어와 내접 링기어에 형성되어 있는 이의 수이다. 정확한 위치제어를 위하여  $r_p$ 는 높은 것이 좋으며, 높은 감속비를 얻기 위하여 여러 단의 유성기어열을 사용할 수 있다. 이 때, 유성기어열의 최종 감속비는 각 단이 갖는 감속비의 곱으로 결정된다. 즉, 4단 유성기어열의 경우, 각 단의 감속비가 5:1, 6:1, 5:1, 6:1이라면 최종 감속비는 900:1이 된다.

강성제어 중 사용하는 유성기어열은 링기어와 캐리어를 각각 입력으로 사용하는 솔라형에 속하며, 이 때 유성기어열의 감속비  $r_{SM}$ 는 PA를 고정된 상태에서 SM과 캐리어 사이의 속도비로 다음과 같이 정의한다.

$$r_{SM} = \frac{\omega_C}{\omega_{SM}} = \frac{N_{RO}}{N_{SMG}} \cdot \left(1 - \frac{1}{r_P}\right) \quad (2)$$

여기서,  $\omega_{SM}$ 은 SM의 회전속도이며,  $N_{SMG}$ 와  $N_{RO}$ 는 SM의 축에 고정되어 있는 기어와 외접 링기어에 형성되어 있는 이의 수이다. 부드러운 강성효과를 얻기 위하여  $r_{SM}$ 은 낮은 것이 좋다.

### 3. DAU를 이용한 위치 / 강성제어

#### 3.1. DAU의 위치제어

자유공간상에서 PA를 제어하여 링크를 그림 5(a)와 같이 목표위치( $\theta_{PA,d}$ )까지 이동한다고 하면, 이 때의 유성기어열의 동작은 그림 5(b)와 같다. PA 축이 반시계 방향으로 회전하면, 이와 연결된 선기어는 반시계 방향(①), 선기어와 맞물려 있는 유성기어들은 시계방향으로 회전한다(②). 이때, SM 축의 회전이 구속되어 있다면, 이와 맞물려 있는 링기어의 회전이 구속되어 2장에서 설명한 것과 같이, 캐리어가 반시계 방향으로 회전한다(③). 따라서 캐리어에 연결되어 있는 링크는 반시계 방향으로 회전하여 목표위치에 도달하게 된다.

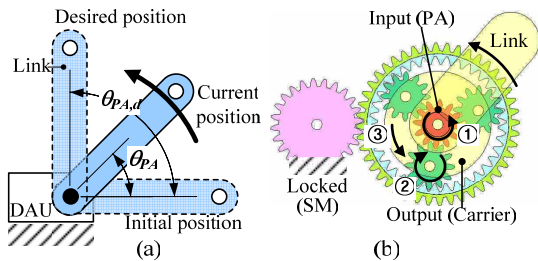


그림 5. DAU를 이용한 위치제어; (a) 링크의 위치제어, (b) 유성기어의 동작

PA의 위치제어는 일반적인 위치제어 기법을 이용하여 구현할 수 있다. 즉, 엔코더를 이용하여 현재위치를 피드백하여, 목표위치( $\theta_{PA,d}$ )와 현재위치( $\theta_{PA}$ ) 사이의 오차가 0이 될 때까지 PID 제어를 통하여 PA의 위치를 조절한다.

#### 3.2. 위치제어 성능 향상을 위한 클러치

머니플레이터는 수행하는 작업에 따라서 큰 힘이 필요하거나, 높은 위치정확도가 필요하다. DAU에 기반한 머니플레이터의 경우, SM의 출력에 의해서 머니플레이터의 부하하중이 결정되며, SM의 최대출력 이상의 하중에 대해서는 위치제어를 수행하지 못한다. 이 때, SM의 회전을 기계적으로 구속하면 부하하중은 PA의 출력에 의해서

결정되며, 머니플레이터의 위치정확도를 향상시킬 수 있지만, 위치와 강성을 동시에 제어할 수는 없다.

그림 6은 기계요소를 이용하여 SM의 회전을 구속하기 위한 클러치 장치이다. 클러치는 소형 액츄에이터, 나사산이 있는 축, 그리고 고정용 기어로 구성된다. 소형 액츄에이터를 구동하면 폴리/벨트를 통하여 고정용 기어(locking gear)로 동력이 전달된다. 이 때, 고정용 기어가 그림 6(a) 및 (b)와 같이 상하로 이동하여 SM축의 회전을 구속한다. 이 구조는 기계적인 방법을 이용하여 큰 제동력을 얻을 수 있으므로 클러치를 소형으로 구현할 수 있다.

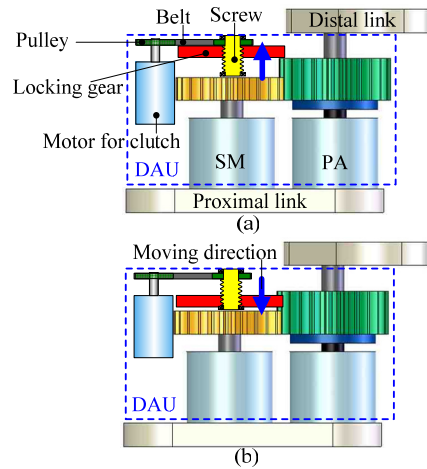


그림 6. SM축의 회전을 구속하기 위한 클러치; (a) 구속하기 전, (b) 구속한 후

#### 3.3. DAU의 강성제어

자유공간상에서 머니플레이터가 그림 7(a)와 같이 링크의 목표위치  $\theta_{PA}$ 에 있는 물체에 일정한 접촉력  $F_C$ 를 가해야 한다고 하면, 머니플레이터의 운동은 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계는 머니플레이터의 위치를 목표위치  $\theta_{PA}$ 까지 이동하는 것이며, 두 번째 단계는 물체에 일정한 접촉력  $F_C$ 를 가하는 단계이다.

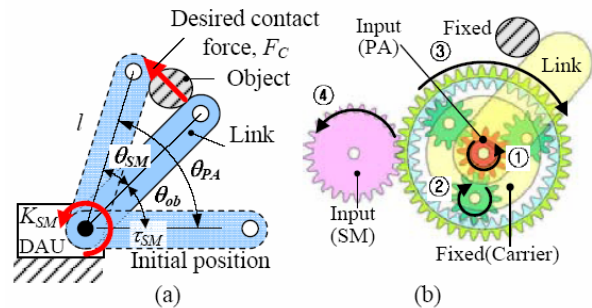


그림 7. DAU를 이용한 강성제어; (a) 링크의 강성제어, (b) 유성기어의 동작

매니플레이터의 위치를 링크의 목표위치  $\theta_{ob}$ 까지 이동하는 것은 3.1절에서 다룬 DAU의 위치제어와 동일하다. 그리고 그림 7(a)와 같이 PA축을 목표위치  $\theta_{pa}$ 까지 회전시키면 매니플레이터는 물체와 부딪히게 되어 링크는 더 이상 회전하지 못한다. 따라서 링크에 연결되어 있는 캐리어의 회전 역시 구속되고, 매니플레이터는 물체에 힘을 가하게 된다. 이 때 매니플레이터의 동작은 그림 7(b)와 같다.

PA축이 반시계 방향으로 회전하면, 이와 연결된 선기어가 반시계 방향(①), 선기어와 맞물려 있는 유성기어들은 시계 방향으로 회전한다(②). 이 때, 캐리어의 회전이 구속되므로 링기어가 시계 방향으로 회전하면서 동력을 전달한다(③). 따라서 링기어는 SM축에 연결되어 있는 기어를 반시계 방향으로 회전시키고, 역구동이 가능한 SM축은 반시계 방향으로 회전하여 회전변위  $\theta_{SM}$ 이 발생한다(④).

$$\theta_{SM} = \theta_{PA} - \theta_{ob} \quad (3)$$

$$\tau_{SM} = F_C \cdot l = K_{SM} \cdot \theta_{SM} \quad (4)$$

여기서, SM에 발생한 회전변위  $\theta_{SM}$ 은 식 (3)과 같이 PA의 목표위치  $\theta_{pa}$ 와 링크의 목표위치  $\theta_{ob}$ 의 차이로 결정된다. 그리고 회전변위  $\theta_{SM}$ 과 사용자가 설정한 강성  $K_{SM}$ 에 의하여 DAU의 출력축에 토크  $\tau_{SM}$ 이 발생하며, 이때 링크의 길이를  $l$ 이라고 하면 매니플레이터가 물체에 가하는 접촉력  $F_C$ 는 식 (4)로부터 구할 수 있다. 또한, SM의 발생 토크  $\tau_{SM}$ 는 다음 식과 같이 SM에 흐르는 전류  $i_{SM}$ 와 SM의 토크상수  $K_{T,SM}$ 의 곱으로 표시된다.

$$\tau_{SM} = F_C \cdot l = K_{T,SM} \cdot i_{SM} \quad (5)$$

이 때, 식 (4)와 (5)으로부터, SM에 회전변위  $\theta_{SM}$ 가 발생하였을 때, 원하는 강성  $K_{SM}$ 을 구현하기 위하여 SM에 흐르는 전류  $i_{SM}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{SM} = \frac{K_{SM} \cdot \theta_{SM}}{K_{T,SM}} \quad (6)$$

따라서 매니플레이터가 물체에 가하는 접촉력은 PA의 위치를 제어하여 SM의 회전변위를 조절하거나, SM에 흐르는 전류를 제어하여 SM의 강성을 조절함으로써 구현할 수 있다.

### 3.4. 강성제어를 통한 안전성 향상

매니플레이터의 강성제어는 충돌에 대한 안전성과 매우 밀접한 관계가 있다. 그리고 충돌에 대한 안전성을 향상시키기 위해서는 매니플레이터의 강성을 상황에 따라 임의로 조절할 수 있어야 하며, 충돌의 발생 유무를 판단하는 것은 무엇보다 중요하다. DAU는 PA와 SM에 연결되어 있는 엔코더를 이용하여 충돌을 판단할 수 있어서 매니플레이터의 안전성을 향상시킬 수 있다.

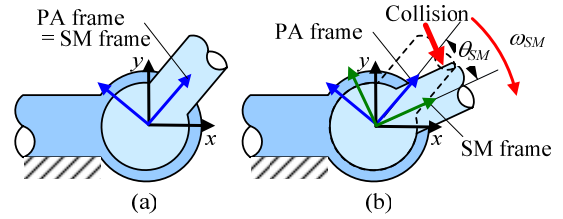


그림 8. PA와 SM좌표계의 변화: (a) 충돌 전, (b) 충돌 후

그림 8은 매니플레이터의 관절에 DAU를 적용한 경우에, PA 및 SM의 축에 각각 설정된 PA좌표계와 SM좌표계를 나타낸 것이다. 충돌이 발생하기 전에는 그림 8(a)와 같이 PA좌표계와 SM좌표계가 일치하지만, 충돌로 인한 외력이 가해지면 그림 8(b)와 같이 역구동성이 있는 SM이 시계방향으로 회전하게 되어 SM좌표계와 PA좌표계가 일치하지 않게 된다. 이 때, SM좌표계의 각속도는 충돌 발생 여부를 판단하는 기준으로 사용할 수 있는데, 다음 식과 같이 SM의 각속도가 설정된 임계각속도보다 크면 충돌이라고 판단한다.

$$\omega_{SM} > \omega_c \quad (7)$$

여기서,  $\omega_{SM}$ 는 SM의 각속도이고,  $\omega_c$ 는 충돌 여부를 판단하는데 사용되는 임계각속도이다. 이 임계각속도는 DAU의 축으로부터 20cm 떨어진 위치에서 충돌이 발생할 때 170deg/s(약 3rad/s)으로 가정하며, 이 속도는 공간에서 움직이는 로봇을 보고 사람이 위협을 느끼는 속도에 해당한다<sup>7,8)</sup>.

식 (7)에 의해서 충돌이 발생하였다고 판단하면 안전성을 확보하기 위하여 관절의 강성  $K_{SM}$ 을 다음 식과 같이 변화시킨다.

$$K_{SM} = K_{SM}^0 - \beta_{vel} \cdot \Delta\omega \quad (8)$$

$K_{SM}^0$ 는 사용자에게 의해서 설정된 초기의 관절강성이고,  $\Delta\omega$ 는 SM의 각속도와 임계 각속도의 차이이며,  $\beta_{vel}$ 는 조

정을 위한 상수이다.

충돌이 발생할 때 강성이 어떻게 변하는지 예를 들어 살펴 보자.  $\omega_c$ 는 170deg/s,  $K_{SM}$ 은 1.5Nm/deg,  $\beta_w$ 는 0.01이라고 가정한다. 만약, 링크에 충돌이 발생하여 링크가 270deg/s으로 회전하였다면, 식 (7)에 따라 SM의 각속도는 임계 각속도보다 크기 때문에 충돌이 발생하였다고 판단한다. 이 때,  $\Delta\omega$ 는 100deg/s이므로, 충돌 후 SM의 강성은 식 (8)에 의해서 0.5Nm/deg가 되며, 낮아진 관절강성은 충돌이 발생하였을 때 안전성을 향상시킨다.

#### 4. DAU의 제작 및 실험

그림 9는 유성기어열 기반 DAU의 시제품이다. 액츄에이터가 모두 감속기 케이스에 고정되어 구조가 안정적이며, 용도에 맞게 유성기어의 감속비를 변경하여 크기를 최적화할 수 있다. DAU 감속기 케이스 크기는 48mm x 61mm x 41mm이며, 20W의 BLDC모터를 2개 사용하였다. PA는 DAU를 구성하는 유성기어열을 이용하여 감속을 하며, 높은 감속비를 얻기 위하여 4단으로 구성하였고, 각 단에서의 감속비는 약 5:1이다. SM은 자체 감속기를 가지고 있으며, 감속기의 축과 링기어 사이에는 약 2:1의 감속비를 갖는 평기어가 연결되어 있다. 따라서 DAU 최종 출력축에서 위치제어를 수행할 때 사용하는 기어열의 감속비는 690:1이며, 강성제어를 수행할 때 사용하는 기어열의 감속비는 103:1이다. 제작한 DAU를 이용하여 위치추종 성능, 힘 추정 성능, 그리고 충돌 안전성에 대한 실험을 수행하였다.

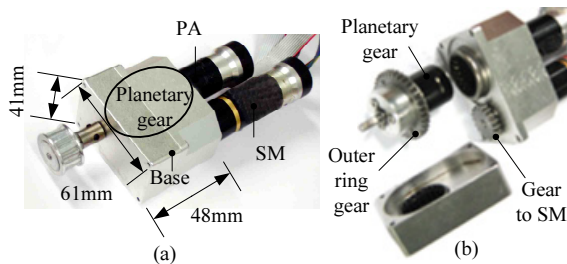


그림 9. 유성기어 기반 DAU의 시제품;  
(a) DAU의 외부 모습, (b) DAU의 내부 구성

##### 4.1. 위치 추종 실험

앞에서 설명한 바와 같이 DAU에 사용한 SM은 역구동이 가능하며, 위치제어와 강성제어를 동시에 구현하는 중 SM에 의해서 위치오차가 발생할 수 있다. 따라서 DAU를 이용하여 정확한 위치제어를 수행하기 위해서는 DAU의 위치추종 성능을 검증하여야 한다.

DAU의 위치추종 성능을 실험하기 위하여 DAU의 출력축으로부터 20cm떨어진 지점에 질량 500g의 추를 장착하였다. 실험은 SM의 강성이 0.15Nm/deg 및 1.5Nm/deg로 설정된 두 경우에 대하여 수행하였다. 그림 10(a)는 목표 값이 90°인 계단함수에 대하여, 그리고 그림 10(b)는 진폭이 90°이며, 주기가 5초인 사인함수에 대하여 응답특성을 각각 보여준다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이, SM의 강성이 낮게 설정되었을 때는 목표위치를 정확히 추종하지 못하여 위치오차가 발생하지만, 강성이 높게 설정되면 정확한 위치추종 성능을 얻을 수 있다. 결론적으로, 대부분의 부하하중에 대하여는 SM의 회전을 구속하지 않더라도 강성을 높게 설정하면, DAU를 이용하여 정확한 위치제어를 수행할 수 있다. 만약, 부하하중이 매우 큰 경우에는 그림 6의 클리치를 사용하여 SM의 회전을 구속하는 것이 바람직하다.

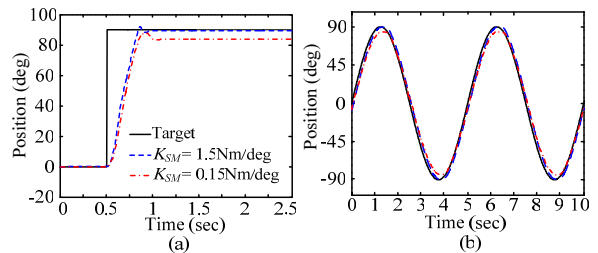


그림 10. 위치 추종성능 실험; (a) 부하 상태에서 계단함수에 대한 응답특성, (b) 위치추종성능 비교

##### 4.2. 힘 추정 실험

힘 추정 실험을 수행하기 위하여 그림 11(a)와 같이 실험장치를 구성하였다. 링크는 기어를 통하여 DAU의 출력축과 연결되고, 링크의 회전 중심으로부터 20cm 떨어진 곳에 힘센서를 부착하였다. 링크에 임의의 강성  $K_l$ 를 설정하고, 링크에 수직인 방향으로 외력을 가하면 회전변위  $\theta_{SM}$ 이 발생한다. 이 때 링크에 가해진 외력은 다음 식에 의하여 추정할 수 있다.

$$\tau_e = F_e l = K_{SM} \cdot \theta_{SM} \quad (9)$$

여기서,  $F_e$ 는 링크에 수직인 방향으로 가해진 외력의 추정 값이며,  $l$ 은 링크의 길이이다. 실험에서 사용한 관절강성은 2Nm/deg로 설정하였다.

링크의 말단점에 임의의 외력을 가할 때, 힘센서를 이용하여 측정된 힘과 엔코더 정보를 이용하여 추정한 힘은 그림 11(b)와 같다. 1초에서 3초 사이에는 힘을 짧은 시간 동안 힘을 가하였고, 3초 이후에는 처음 힘을 가한

방향과 반대 방향으로 일정시간 동안 힘을 가하였다. 힘 센서로 측정된 힘은 엔코더를 이용하여 추정된 힘과 거의 유사하며, 이 결과로부터 DAU를 이용하여 힘센서를 사용하지 않고 힘을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

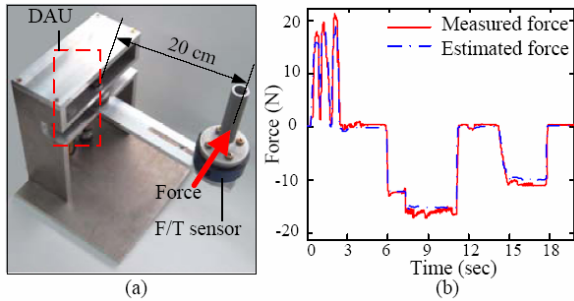


그림 11. 엔코더를 이용한 힘 추정실험;  
(a) 힘 측정 실험 장비, (b) 힘 측정 실험 결과

### 4.3. 충돌 안전 실험

DAU의 충돌 안전성 실험을 하기 위하여 그림 12와 같이 1.5kg의 플라스틱 공을 3m/s의 속도로 링크의 회전중심으로부터 20cm 떨어진 곳에 충돌 시켰다. 그리고 플라스틱 공에 가속도계를 고정하고, 충돌 시 공의 가속도 변화를 측정하였다. 실험은 충돌 시 강성을 일정하게 유지하는 경우와 충돌을 검출하여 강성을 변화시키는 경우에 대하여 수행하였고, 측정된 가속도는 중력 가속도의 정수 배로 나타내었다.

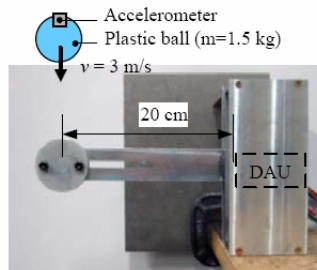


그림 12. 충돌 안전성을 측정하는 실험 장치

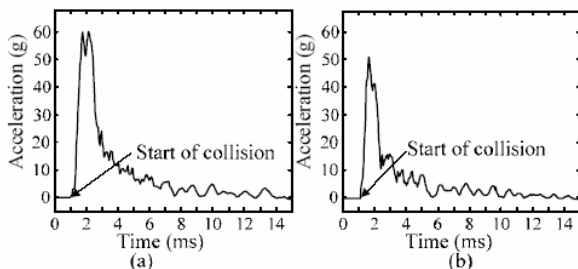


그림 13. SM의 회전을 구속한 경우(실선), 강성이 일정한 경우(파선), 강성이 변하는 경우(1점 쇄선) 발생하는 충격력의 비교

그림 13은 초기강성이 2Nm/deg일 때, 플라스틱 공에서 측정된 가속도를 나타낸 것이다. 그림 13(a)는 강성을 일정하게 유지하는 경우이며, 공의 최대가속도는 60g이다. 그리고 충돌이 발생한 직후 3ms동안 플라스틱 공에 작용한 힘의 평균은 약 420N이다.

그림 13(b)는 강성을 변화시키는 경우이며, 최대가속도는 50g이다. 충돌이 발생한 직후 3ms 동안 플라스틱 공에 작용한 힘의 평균은 약 320N으로, 강성이 일정한 경우보다 100N가량 감소하였다. 위의 실험 결과로부터 충돌이 발생하는 경우, 강성을 변화시켜 충돌에 대응하는 것이 그렇지 않은 경우보다 충격을 줄여주어 보다 안전하다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 DAU를 이용하면 충격으로부터 머니플레이터와 인간의 상호 안전성을 구현할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 1자유도 관절에서 위치제어와 힘제어를 동시에 구현할 수 있으며, 충돌시의 안전성을 향상시킬 수 있는 더블 액츄에이터 유닛(DAU)을 개발하였다. 그리고 다양한 실험을 통하여 DAU의 성능을 검증하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) DAU는 1자유도의 관절에 대하여 위치와 강성을 독립적으로 제어할 수 있다. 힘제어는 동일한 강성 하에서 위치제어 액츄에이터(PA)의 위치를 이동하거나, 또는 강성조절기(SM)의 강성을 조절하여 구현할 수 있다.
- (2) DAU의 내부 클러치를 이용하여 DAU의 부하하중을 최대화하고, 위치제어 정확도를 향상시킬 수 있다.
- (3) DAU는 고가의 힘/토크 센서를 사용하지 않고, 관절에서 발생하는 토크를 추정하여 힘 제어를 구현할 수 있다. 그리고 링크에 충돌이 발생할 경우 충돌을 감지하여 강성을 감소시킴으로써 충돌 안전성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서 개발한 DAU는 휴머노이드 로봇의 손, 다리 등 안정적인 힘제어가 필요한 다양한 분야에 활용이 가능하다.

### 참 고 문 헌

[1] G. A. Pratt, M. M. Williamson, "Series Elastic Actuators," IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 399-406, 1995.  
[2] J. Pratt, P. Dilworth, and G. Pratt, "Virtual model control of a bipedal walking robot", IEEE International Conference on

Robotics and Automation, pp. 193-198, 1997.

[3] G. J. Cham, J. K. Karpick, M. R. Cutkosky, "Stride period adaptation of a biomimetic running hexapod", International Journal of Robotics Research, vol. 23, pp 141-153, 2004.

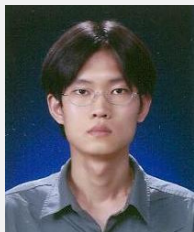
[4] G. Tonietti, R. Schiavi, A. Bicchi, "Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 528-533, 2005.

[5] G. Tonietti, R. Schiavi, A. Bicchi. "Optimal Mechanical/Control Design for Safe and Fast Robotics," Experimental Robotics IX: The 9th International Symposium on Experimental Robotics, volume 21, pp. 311-320, 2006.

[6] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, "A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 249-254, 2004.

[7] R. Ikeura, H. Ootsuka, H. Inooka, "Study on Emotional Evaluation of Robot Motions based on Galvanic Skin Reflex," Human Engineering., Vol. 31, No. 5, pp. 355-358, 1995.

[8] M. Rahimi, W. Karwowski, "Human Perception of Robot Safe Speed and Idle Time," Behavior and Information Technology, Vo. 9, No. 5, pp. 381-389, 1990.



**김 병 상**

2004 고려대학교 기계공학과 (학사)  
 2004~ 현재 고려대학교 기계공학과 석·박사 통합과정



**박 정 준**

2000 고려대학교 기계공학과 (학사)  
 2005 고려대학교 기계공학과 (석사)  
 2005~ 현재 고려대학교 기계공학과 박사과정



**송 재 복**

1983 서울대학교 기계공학과 (학사)  
 1985 서울대학교 기계공학과 (석사)  
 1992 MIT 기계공학과(박사)

1993~현재 고려대학교 기계공학과 교수



**김 홍 석**

1976 서울대학교 전기공학과 (학사)  
 1983 서울대학교 제어계측공학과 (석사)  
 1990 서울대학교 제어계측공학과 (박사)

1991~현재 한국생산기술연구원 로봇기술개발본부 수석연구원