

## 직렬 탄성 액츄에이터 기반의 로봇 손가락의 힘 제어

# Force Control of Robot Fingers using Series Elastic Actuators

이 승 업, 김 병 상, 송 재 복\*, 채 수 원  
(Seung-Yup Lee<sup>1</sup>, Byeong-Sang Kim<sup>1</sup>, Jae-Bok Song<sup>1</sup>, and Soo-Won Chae<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Korea University

**Abstract:** Robot hands capable of grasping or handling various objects are important for service robots to effectively aid humans. In particular, controlling a contact force and providing a compliant motion are essential when the hand is in contact with objects. Many dexterous robot hands equipped with force/torque sensors have been developed to perform force control, but they suffer from the complexity of control and high cost. In this paper, a low-cost robot hand based on SEA (Series Elastic Actuator), which is composed of compression spring, stretch sensor, and wire, is proposed. The grasping force can be estimated by measuring the compression length of spring, which would allow the hand to perform force control. A series of experimentations are carried out to verify the performance of force control of the proposed robot hand, and it is shown that it can successfully control the contact force without any additional force/torque sensors.

**Keywords:** SEA (Series Elastic Actuator), robot hand

### I. 서론

최근 다양한 작업을 수행하는 서비스 로봇의 개발 및 보급이 확대되면서 다양한 물체를 안정적으로 파지할 수 있는 로봇 핸드의 필요성이 증대되고 있다. 이와 같은 서비스 로봇용 로봇 핸드는 다양한 형상 및 재질의 물체를 안정적으로 파지할 수 있어야 하므로 로봇 핸드와 파지 대상 물체 사이에 발생하는 접촉력을 감지하고 이에 적절히 대응할 수 있는 힘 제어 기능이 필수적이다. 따라서 파지 작업 시 로봇 핸드와 물체 사이의 접촉 안정성을 향상하기 위한 유연관절 손가락의 개발도 활발히 진행 중이다.

현재까지 개발된 대부분의 힘 제어용 로봇 핸드는 안정된 접촉작업을 위하여 독일의 DLR-Hand II, 일본의 TWENDY-ONE 핸드와 같이 손가락 말단에 설치된 소형 6축 힘/토크 센서를 사용하여 외력을 측정한다[1,2]. 그러나 이와 같은 센서신호 기반의 능동 힘 제어는 안정적인 접촉운동을 구현하기 위한 복잡한 제어 알고리즘이 필요하고 모터와 센서의 응답특성 및 통신속도의 한계로 인하여 파지속도가 증가함에 따라 제공할 수 있는 최소 강성의 크기에 제약을 받는다는 단점이 있다. 즉, 저속 파지 시에는 힘 제어를 통하여 낮은 강성을 구현하는 것이 가능하다. 그러나 파지속도가 증가할수록 구현할 수 있는 강성은 로봇 핸드의 기구 강성으로 수렴하므로, 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 스프링과 같은 탄성체를 이용하여 직접적인 강성 효과를 구현하는 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 또한, 힘/토크 센서 사용 시 센서 삽입 및 배선을 위한 추가적인 공간이 필요하므로 컴팩트한

로봇 손가락 설계가 어렵고, 센서 및 증폭기 개발에 많은 비용이 소요된다.

본 연구에서는 스프링을 사용하여 직접적으로 강성효과를 구현할 수 있는 SEA (Series Elastic Actuator) 기반의 3자유도 로봇 핸드를 개발함으로써 고비용의 소형 6축 힘/토크 센서 없이도 물체 파지 시에 안정적인 접촉작업이 가능하도록 하였다. 개발된 로봇 핸드는 SEA 메커니즘에 사용되는 스프링 변위를 측정함으로써 로봇 손가락에 인가되는 외력을 추정할 수 있으므로, 기존의 로봇 핸드에 비해 저렴한 비용과 간단한 구조로 힘 제어 시스템을 구현할 수 있다. 스프링을 통한 유연관절 손가락을 구현함으로써 로봇 핸드의 물체 파지 시 접촉 안정성을 향상시킬 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II 장에서는 SEA 기반 로봇 손가락에 대하여 설명하고, III 장에서는 앞서 설명한 SEA 기반 로봇 손가락을 이용하여 작업을 수행하는 로봇 핸드를 다룬다. 그리고 IV 장에서는 로봇 핸드를 이용한 힘 제어 실험과 파지 실험의 결과를 제시하며 마지막으로 V 장에서 결론을 도출한다.

### II. SEA 기반의 로봇 손가락 설계

본 연구에서는 스프링 및 와이어 기반의 SEA 메커니즘을 구현함으로써 로봇 핸드에 인가되는 외력을 추정하고 안정된 접촉작업이 가능하도록 하였다[4]. 본 장에서는 SEA 메커니즘에 대하여 소개하고 이를 적용한 로봇 손가락의 설계 방법 및 구동원리에 대하여 설명한다.

#### 1. SEA (Series Elastic Actuator)

그림 1의 SEA 메커니즘은 구동부(actuator)와 출력부(output link)를 직결하는 대신에 스프링과 같은 탄성체로 연결하고, 그 변위를 측정함으로써 외력을 측정할 수 있다. 구동부가 이동할 때 출력부에 외력이 작용하지 않으면 스프링에 변형이 발생하지 않는다. 그러나 만약 외력  $F$  가 출력부에 작용

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 7. 2., 수정: 2012. 7. 27., 채택확정: 2012. 9. 24.

이승업, 김병상, 송재복, 채수원: 고려대학교 기계공학부

(gomdol2004@korea.ac.kr/lovidia@korea.ac.kr/jbsong@korea.ac.kr/swchae@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 한국연구재단의 선도연구센터 사업(No. 2012-0000792) 및 지식경제부 융복합형 로봇인력양성사업(NIPA-2012-H1502-12-1002)의 지원을 받아 수행되었음.

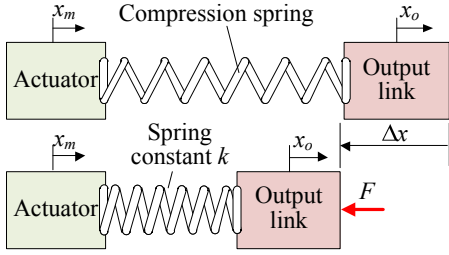


그림 1. SEA의 구동 원리.

Fig. 1. Concept of SEA.

한다면 스프링이  $\Delta x$ 만큼 압축되므로, 스프링 강성  $k$ 와의 관계  $F = k\Delta x$ 에 의하여 외력을 계산할 수 있다. 그러므로 구동부와 출력부 사이의 상대 위치를 능동적으로 제어하여 외력의 크기를 조절할 수 있다. 또한, 장착된 스프링에 의해서 유연성이 부여됨으로써 접촉 힘 제어 시에 안정성을 향상시킬 수 있다[5].

2. SEA 메커니즘 기반의 로봇 손가락 구현

본 연구에서는 외력 측정이 가능한 로봇 손가락의 설계를 위하여, 그림 2와 같이 압축 스프링과 스프링 압축을 위한 스프링 블록 및 와이어로 구성된 SEA 메커니즘을 구현하였다. 또한, 길이에 따라 저항이 달라지는 스트레치 센서(stretch sensor)를 사용하여 스프링 변위  $\Delta x$ 를 측정함으로써 출력부에 인가되는 외력  $F$ 를 추정할 수 있도록 하였다.

앞에서 제시된 SEA 메커니즘을 기반으로 그림 3과 같이 고정된 링크 0과 길이  $l_1, l_2$ 의 링크 1, 2로 구성된 1자유도 로봇 손가락을 개발하였다. 링크 1, 2의 관절을 구성하는 부분에는 반경  $r$ 의 원판이 고정된다. 본 설계에서는 큰 감속비를 얻기 위하여 웜 기어를 사용하여 SEA 메커니즘을 구현하였으며, SEA의 출력부와 손가락의 관절 1을 와이어 1로 연결함으로써 손가락을 구동시킨다. 또한, 링크 0에 고정되어 있는 원판과 링크 2의 원판을 와이어 2로 연결하여 관절 1과 2는 서로 연동하여 회전한다. 각 손가락 관절은 초기각도  $\alpha_1, \alpha_2$ 로부터 와이어 1이 당겨지는 길이에 따라 각도  $q_1, q_2$ 만큼 움직여 말단의 위치  $p_x, p_y$ (초기 위치  $p_{x0}, p_{y0}$ )를 결정하게 된다. 만약 손가락 구동 시 외력이 인가되지 않는다면 와이어 1은 감속된 모터의 회전수에 비례하여 풀리에 감긴다. 그러나 외력 인가 시에는 SEA 메커니즘에 의하여 추가적인 변위가 발생하게 되고, 스트레치 센서를 통하여 측정된 변위를 바탕으로 외력을 추정할 수 있다[6].

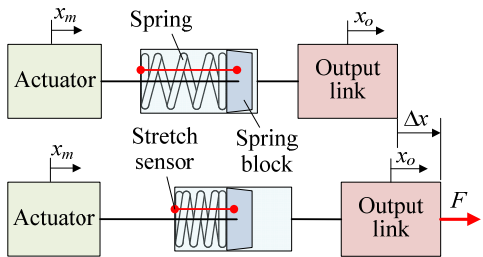


그림 2. 압축 스프링과 스트레치 센서를 이용한 SEA 메커니즘.

Fig. 2. SEA mechanism using compression spring and stretch sensor.

3. 기구학적 해석

그림 3의 손가락에서 링크 1이 미소 각도  $\delta q_1$ 만큼 회전할 때, 말단점의 위치  $(p_x, p_y)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_x &= l_1 \cos(\alpha_1 + \delta q_1) + l_2 \cos(\alpha_2 + \delta q_1 + \delta q_2) \\ p_y &= l_1 \sin(\alpha_1 + \delta q_1) + l_2 \sin(\alpha_2 + \delta q_1 + \delta q_2) \end{aligned} \quad (1)$$

이 때, 관절 1, 2를 구성하는 원판의 반경이  $r$ 로 동일하므로 각 관절의 미소 회전각  $\delta q_1$ 과  $\delta q_2$ 는 서로 동일하다. 이 메커니즘에서는 구동부와 링크가 와이어로 연결되어 있으므로, 와이어에 발생하는 인장력을 능동적으로 조절함으로써 손가락 말단에 수직 방향으로 작용하는 힘을 제어할 수 있다. 가상 일  $\delta W$ , 힘  $F$ , 미소 변위  $\delta s$ 의 관계인  $\delta W = F\delta s$ 로부터 손가락 말단 힘(fingertip force)  $F_f$ 의 분력  $F_x, F_y$  및 말단점의 미소 변위  $\delta s_x, \delta s_y$ 와 와이어의 인장력 및 미소 변위  $F_w, \delta s_w$ 의 관계는 다음과 같다.

$$F_w \delta s_w = F_x \delta s_x + F_y \delta s_y \quad (2a)$$

$$F_w = F_x \frac{\delta s_x}{\delta s_w} + F_y \frac{\delta s_y}{\delta s_w} \quad (2b)$$

또한,  $F_x, F_y, \delta s_x, \delta s_y, \delta s_w$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_x = -F_f \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 - 2\delta q_1\right) \quad (3a)$$

$$F_y = F_f \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 - 2\delta q_1\right) \quad (3b)$$

$$\delta s_x = \{l_1 \cos(\alpha_1 + \delta q_1) + l_2 \cos(\alpha_2 + 2\delta q_1)\} - p_{x0} \quad (4a)$$

$$\delta s_y = \{l_1 \sin(\alpha_1 + \delta q_1) + l_2 \sin(\alpha_2 + 2\delta q_1)\} - p_{y0} \quad (4b)$$

$$\delta s_w = -r\delta q_1 \quad (4c)$$

이 때, 식 (4)로부터  $\delta s_x/\delta q_1$ 와  $\delta s_y/\delta q_1$ 를 구하면

$$\frac{\delta s_x}{\delta q_1} = -l_1 \sin(\alpha_1 + \delta q_1) - 2l_2 \sin(\alpha_2 + 2\delta q_1) \quad (5)$$

$$\frac{\delta s_y}{\delta q_1} = l_1 \cos(\alpha_1 + \delta q_1) + 2l_2 \cos(\alpha_2 + 2\delta q_1)$$

와 같다.  $F_w$ 는 식 (2), (3), (4) 및 (5)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_w = \frac{F_f}{r} \times & \left[ -\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 - 2\delta q_1\right) \{l_1 \sin(\alpha_1 + \delta q_1) + 2l_2 \sin(\alpha_2 + 2\delta q_1)\} \right. \\ & \left. - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2 - 2\delta q_1\right) \{l_1 \cos(\alpha_1 + \delta q_1) + 2l_2 \cos(\alpha_2 + 2\delta q_1)\} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

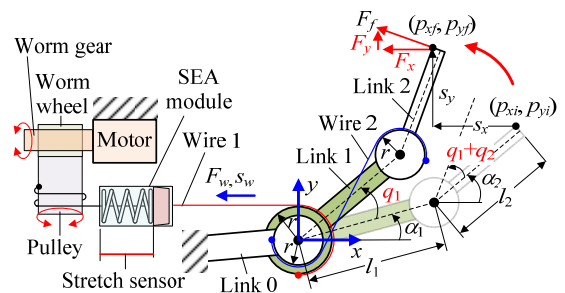


그림 3. 손가락 메커니즘의 기구학.

Fig. 3. Kinematics of finger mechanism.

표 1. 로봇 손가락의 설계 파라미터.

Table 1. Design parameters for robot fingers.

Variable	$l_1$	$l_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$r$
Value	45 mm	55 mm	34°	49°	10 mm

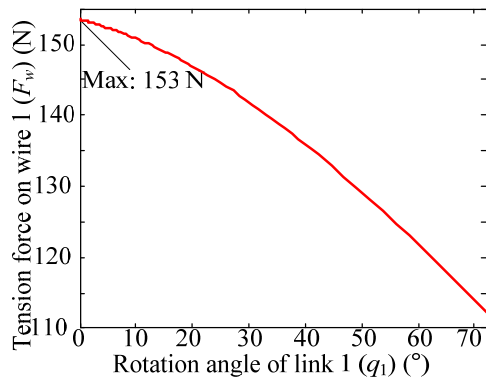


그림 4. 링크 1의 회전각에 따른 와이어 1의 인장력.  
Fig. 4. Applied tension force on wire 1 versus rotation angle of link 1.

표 2. 감속기의 감속비.

Table 2. Gear ratio of speed reducers.

Worm gear	Gearhead for finger A and A'	Gearhead for finger B
15:1	157:1	128:1

그림 3의 손가락의 실제 파라미터는 표 1과 같다[7].

4. 기어 및 모터의 선정

본 연구에서는 손가락 말단부의 최대 힘을  $F_f = 10\text{ N}$ 으로 설정하였으므로 식 (6)으로부터 각 위치에서 손가락이 최대  $F_f$ 의 힘을 내기 위해 필요한 와이어 1의 인장력  $F_w$ 를 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 또한,  $F_w$ 의 최댓값(153 N)과 구동부 풀리의 반경(6 mm)을 이용하여 구동부에 요구되는 최대 토크가 0.92 Nm임을 확인하였다.

본 연구에서는 모터의 개수를 최소화하기 위하여 3개의 손가락 중에서 2개의 손가락을 연동하여 하나의 모터로 구동하였으므로, 이때 요구되는 최대 토크는 1.84 Nm가 됨을 알 수 있다. 손가락이 완전히 퍼진 상태( $q_1 = q_2 = 0^\circ$ )에서 허용 범위( $q_1 = q_2 = 72^\circ$ )까지 굽히는 데 소요되는 시간은 4초를 목표로 하였다. 이에 따라 각 구동부에 요구되는 토크와 회전 속도, 기어효율 등을 고려하여 표 2와 같은 감속비의 기어 및 감속기를 선정하였다.

III. SEA 기반 로봇 핸드의 개발

본 연구에서 개발한 로봇 핸드의 무게는 1 kg이며, 손가락의 길이는 100 mm, 손바닥의 크기는 117 x 85 x 75 mm이다. 핸드는 그림 5와 같이 총 3개의 손가락으로 구성되어 있다. 손가락 B는 하나의 SEA 모듈과 구동 모터를 통해서 동작하며, 손가락 A와 A'은 2개의 손가락이 하나의 SEA 모듈과 구동 모터를 통해서 동시에 동작한다. 또한, 모터 및 소형 기어를 사용하여 손가락 A와 A'의 사잇각  $\gamma$ 를 0°부터 70°까지 조절할 수 있게 함으로써, 로봇 핸드는 다양한 형상의 물체를 안정적으로 파지할 수 있다.

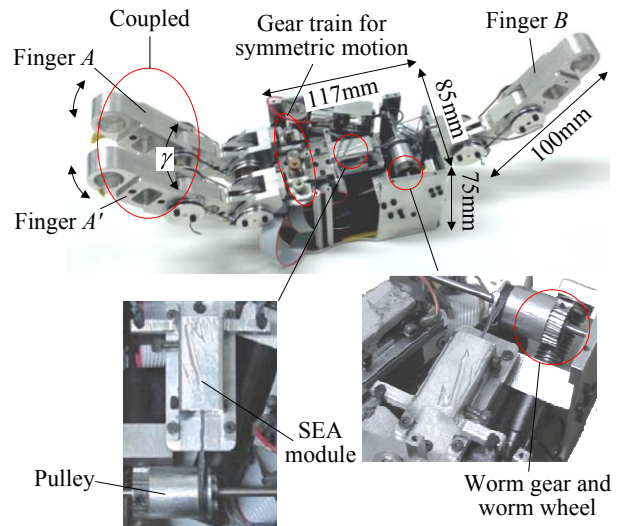


그림 5. 로봇 핸드의 시제품.  
Fig. 5. Prototype of robot hand.

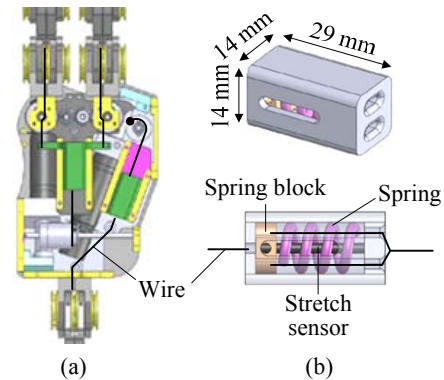


그림 6. SEA 기반의 로봇 핸드: (a) SEA 모듈의 배치도, (b) SEA 모듈의 구조.  
Fig. 6. SEA-based robot hand: (a) arrangement of SEA module, and (b) construction of SEA module.

로봇 핸드에 사용되는 SEA 모듈을 그림 6(a)와 같이 설계하였다. 스프링의 좌굴을 막기 위해 스프링 하우징이 설계되었으며, 스프링 변위를 측정하기 위하여 스프링 블록과 하우징 사이에 스트레치 센서를 설치하였다. 스프링 블록 양단에 고정된 와이어는 하우징 양쪽 슬릿(slot)을 통과하여 손가락 구동부에 연결된다. 따라서 손가락에 외력이 인가될 때, 구동부의 와이어를 통해 당겨진 스프링 블록이 스프링을 압축하게 된다. 본 연구에서는 로봇 핸드의 협소한 공간에 삽입이 용이하도록 29 x 14 x 14 mm 크기의 소형 SEA 모듈을 설계하였다.

로봇 손가락에 외력이 작용하지 않을 경우, SEA 내부 스프링의 변위가 발생하지 않으므로 구동 모듈의 회전 및 와이어의 감기는 길이에 따라 손가락이 회전하게 된다. 그러므로 그림 7(a)와 같이 계획된 경로를 따라 손가락이 구동된다. 반면에, (b)와 같이 파지하는 물체와의 접촉력 등에 따라 손가락에 외력이 인가되면 손가락의 회전을 위하여 구동부가 와이어를 당길 때 스프링에 변위가 발생하게 되고, 이 변위를

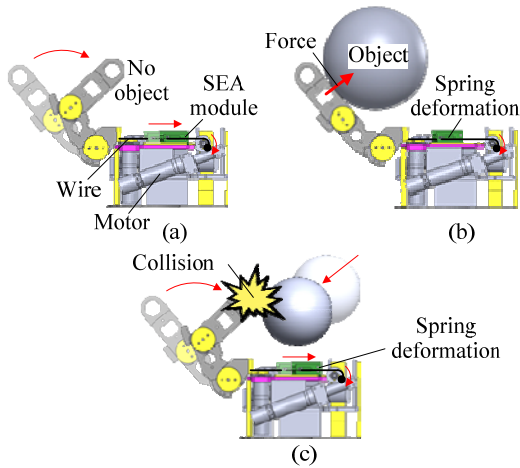


그림 7. 다양한 상황에서의 SEA 모듈 동작: (a) 외력이 작용하지 않는 경우, (b) 외력이 작용하는 경우, (c) 충돌이 발생하는 경우.

Fig. 7. Motion of SEA module in various cases: (a) without external force, (b) with external force, (c) unexpected collision.

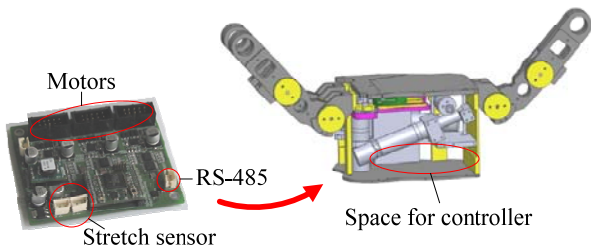


그림 8. 로봇 핸드의 제어기.  
Fig. 8. Controller for robot hand.

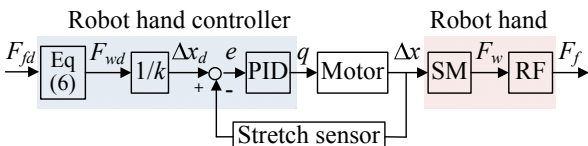


그림 9. 로봇 핸드의 제어 블록 선도.  
Fig. 9. Control block diagram of robot hand.

측정하여 외력의 크기를 계산할 수 있다. 또한 (c)와 같이 손가락 구동 중에 예기치 않은 충돌이 발생할 경우, SEA 내 스프링이 충격력을 흡수하므로, 감속기, 링크 등 기구부의 파손을 방지할 수 있다.

본 연구에서는 로봇 핸드의 구동 및 스트레치 센서를 통한 변위 감지를 위하여 그림 8과 같이 제어기를 개발하였다. 개발된 제어기는 3개의 DC 모터를 동시에 구동할 수 있으며, 2개의 스트레치 센서로부터 전압 변화를 감지할 수 있다. 또한 RS-485 통신을 사용하여 PC와 통신하며 1 ms의 제어 주기를 갖는다.

로봇 제어기는 그림 9와 같이 식 (6)을 사용하여 손가락 말단부의 목표 힘  $F_{fd}$ 를 목표 스프링 변위  $\Delta x_d$ 로 변환한다. 현재 손가락 위치에서  $F_{fd}$ 를 생성하기 위한 목표 와이어 인장력  $F_{wd}$ 를 계산하고, 스프링 강성  $k$ 를 이용하여  $F_{wd}$ 를 생성하기 위해 필요한  $\Delta x_d (=F_{wd}/k)$ 를 계산한다. SM (SEA module)

과 RF (Robot Finger)는 각각 SEA 모듈의 기구부와 로봇 손가락을 나타내며, 스프링의 실제 변위  $\Delta x$ 는 SM을 거쳐 실제 와이어 인장력  $F_w$ 로 변환되고,  $F_w$ 는 RF를 거쳐 손가락 말단부의 실제 힘  $F_f$ 로 변환된다.

로봇 제어기는 스트레치 센서를 통해 측정된 스프링의 실제 변위  $\Delta x$ 를 피드백 받아 목표 값과 실제 값 사이의 오차  $e = \Delta x_d - \Delta x$ 를 계산한다. 계산된  $e$ 에 대해 PID 제어를 수행함으로써,  $\Delta x$ 가  $\Delta x_d$ 를 추종하도록 하여 실제 힘과 목표 힘 사이의 오차를 최소화한다.

IV. 실험 및 결과

개발된 SEA 기반 로봇 핸드의 성능 평가를 위한 다양한 실험을 수행하였다. 로봇 핸드의 힘 제어 성능을 검증하기 위해 SEA를 통하여 계산된 손가락 말단부의 힘과 상용 힘센서를 사용하여 측정된 값을 비교하였다. 또한, 다양한 대상물체에 대한 파지 실험을 통하여 개발된 로봇 핸드의 파지 성능을 검증하였다.

1. 손가락 말단 힘 측정 실험

로봇 핸드의 힘 제어 성능을 검증하기 위하여 그림 10, 11과 같이 로봇 핸드의 물체 파지 시에 SEA를 사용하여 추정된 외력과 상용 힘센서를 통하여 측정된 외력을 비교하였다. 그림 10은 손가락 A-A'가 손바닥에 설치된 힘센서를 누를 때 인가되는 외력을 비교하였고, 11은 손가락 B에 대하여 같은 실험을 반복하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 손가락 말단부의 목표 힘  $F_{fd}$ 를 0 N부터 단계적으로 변화시켰을 때 손가락 A-A'의 경우 5% 이하, B의 경우 7.5% 이하의 오차율이 발생하였다. 오차율은 스트레치 센서의 응답시간을 고려하여  $F_{fd}$  인가 후, 2초가 경과했을 때의  $F_f$  값을 이용하여 계산하였다. 계산된 오차율로부터, 힘센서를 통하여 실제 측정된 외력과 목표 힘 사이에 큰 오차가 없음을 알 수 있으며, 개발된 SEA를 사용한 핸드의 힘 제어 및 안정적 파지가 가능하다.

개발된 로봇 손가락의 각 관절은 서로 연동되어 회전하

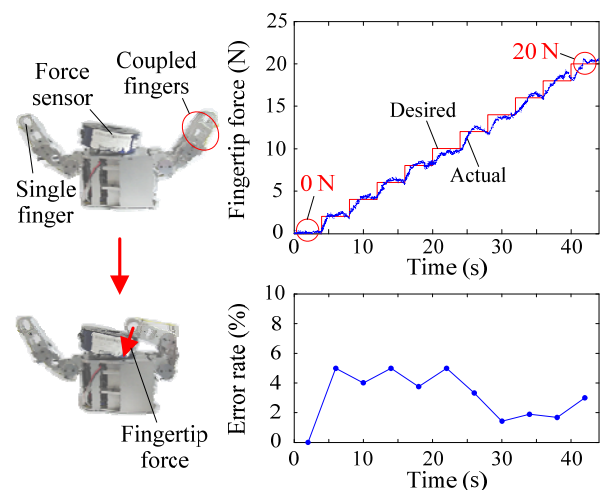


그림 10.  $q_1 = 50^\circ$ 일 때, 손가락 A와 A' 말단 힘의 점진적 인가.

Fig. 10. Gradual increase of fingertip force of finger A and A' at  $q_1 = 50^\circ$ .

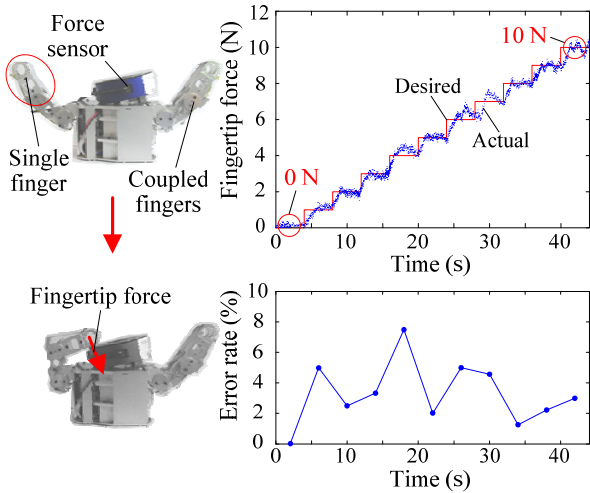


그림 11.  $q_1 = 50^\circ$ 일 때, 손가락 B 말단 힘의 점진적 증가.  
Fig. 11. Gradual increase of fingertip force of finger B at  $q_1 = 50^\circ$ .

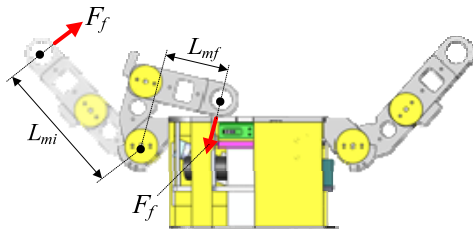


그림 12. 다양한 손가락 배치에서의 모멘트 팔 길이.  
Fig. 12. Length of moment arm at various finger configurations.

로, 그림 12와 같이 위치에 따라 모멘트 암 길이가 변하게 되고( $L_{mi} \sim L_{mf}$ ), 이에 따라 동일한 말단부 힘  $F_f$ 를 위한 관절 토크가 변하게 된다. 그러므로 식 (6)을 사용하여  $F_f$ 를 위해 필요한 인장력  $F_w$ 를 산출하고, 이에 따라 각 손가락을 제어 함으로써 원하는 말단부 힘을 얻을 수 있다.

2. 물체 파지 실험

물체의 형상은 육면체, 구, 원기둥(원뿔)과 같은 도형의 조합으로 단순화될 수 있으므로, 이들 각 도형을 안정적으로 파지할 수 있으면 다양한 형상의 물체를 안정적으로 파지는 것이 가능하다[8]. 이를 검증하기 위하여 그림 13과 같이 종이 박스(육면체), 야구공(구), 컵(원기둥), 무게 추(원기둥)를 대상으로 파지 실험을 수행하였으며, 복잡한 형상을 갖는 조이스틱과 마우스에 대해서도 동일한 실험을 반복하였다. 로봇 핸드가 물체를 파지했을 때, 손가락과 물체 사이에 미끄러짐이 발생하지 않는 상태를 안정적인 파지라고 가정하였으며[9,10], 물체의 재질과 무게에 맞추어 최대 10 N의 범위 안에서 파지력을 조절함으로써 그림 13과 같이 다양한 물체에 대한 안정적인 파지가 가능하였다. 이를 통하여, 개발한 로봇 핸드의 파지 성능을 검증할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 힘 제어와 유연운동이 가능한 SEA 기반의 3자유도 로봇 핸드를 개발함으로써 다양한 물체에 대한 안정적인 파지가 가능하도록 하였다. 다양한 실험을 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

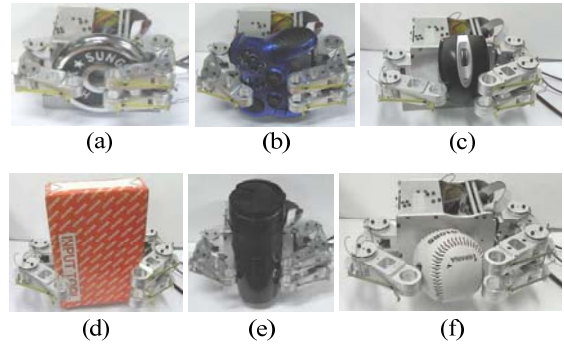


그림 13. 물체 파지: (a) 무게 추(1 kg, 금속), (b) 조이스틱(190 g, 플라스틱), (c) 마우스(150 g, 플라스틱), (d) 박스(75 g, 종이), (e) 컵(300 g, 플라스틱), (f) 야구공(135 g, 가죽).  
Fig. 13. Grasping of objects: (a) weight (1 kg, metal), (b) joystick (190 g, plastic), (c) mouse (150 g, plastic), (d) box (75 g, paper), (e) cup (300 g, plastic), and (f) baseball (135 g, leather).

- 1) 스프링을 포함하는 SEA 메커니즘은 손가락의 유연운동을 제공하므로 물체의 안정적인 파지가 가능하다.
- 2) 로봇 핸드의 SEA 메커니즘을 이용하여 핸드와 물체 사이에 작용하는 힘을 측정할 수 있으므로, 별도의 힘/토크 센서를 사용하지 않고 로봇 핸드의 파지력 제어가 가능하다.

참고문헌

- [1] M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, "DLR-Hand II: next generation of a dexterous robot hand," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 109-114, 2001.
- [2] H. Iwata, H. Liu, and S. Sugano, "Design of human symbiotic robot TWENDY-ONE," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 580-586, 2009.
- [3] J. B. Song and B. S. Kim, "Variable stiffness actuator for compliant motion," *Korea Robotics Society Review (in Korean)*, vol. 8, no. 1, pp. 3-11, 2011.
- [4] www.mekabot.com, "Meka Robotics."
- [5] G. A. Pratt and M. M. Williamson, "Series elastic actuators," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 399-406, 1995.
- [6] S. Y. Lee, J. B. Song, and B. S. Kim, "3-DOF compliant robot hand capable of grasping various objects," *Conf. on Korean Society for Precision Engineering (in Korean)*, vol. 11, pp. 247-248, 2011.
- [7] S. I. Ahn, Y. H. Oh, and S. J. Kwon, "Design of a humanoid robot hand by mimicking human hand's motion and appearance," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, pp. 62-69, 2008.
- [8] A. T. Miller, "Automatic grasp planning using shape primitives," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1824-1829, 2003.
- [9] M. R. Cutkosky, "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 269-279, 1989.
- [10] B. J. Choi, S. H. Lee, S. C. Kang, and H. R. Choi, "Development of anthropomorphic robot hand with tactile sensor. SKKU hand II," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 12, pp. 594-599, 2006.



### 이 승 업

2011년 고려대학교 기계공학과 졸업.  
2011년~현재 고려대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 로봇 핸드.



### 김 병 상

2004년 고려대학교 기계공학과 졸업.  
2011년 고려대학교 기계공학과(공학박사). 관심분야는 가변 강성 액추에이터 설계 및 제어.



### 송 재 복

1983년 서울대학교 기계공학과 졸업.  
1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 안전 머니플레이터, 이동로봇의 주행, 지능형 로봇의 설계 및 제어.



### 채 수 원

1977년 서울대학교 기계공학과 졸업.  
1979년 KAIST 기계공학과(공학석사).  
1989년 MIT 기계공학과(공학박사). 1996년~현재 고려대학교 기계공학부 교수.  
관심분야는 전산역학 및 기계설계, CAE, 생체역학.