

# 줄 꼬임 구동을 이용한 수확용 그리퍼의 줄기 절단 장치 설계 및 검증

## The Design and Evaluation of The Stem-cutting Device of Harvesting Gripper Using Twisted String Actuation System

최성모<sup>1</sup>·이동우<sup>1</sup>·황면중<sup>†</sup>

Seong-Mo Choi<sup>1</sup>, Dongwoo Lee<sup>1</sup>, Myun Joong Hwang<sup>†</sup>

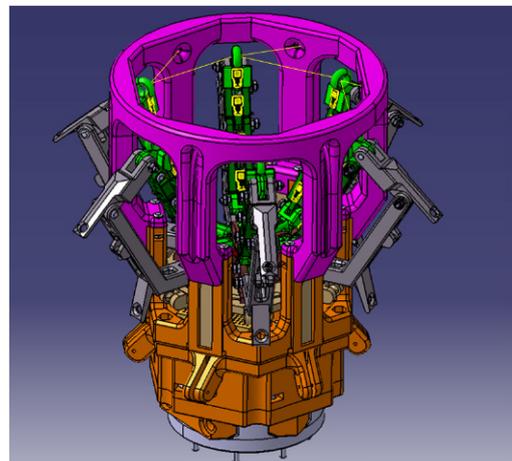
**Abstract:** This paper presents a novel stem-cutting device using a twisted string actuation system combined with the cinch bag-typed gripper proposed in previous research. The suggested cutting device was developed to cut the stem of a tomato using two motors. The relationship between contact time and motor angle was mathematically induced, and the contacting time was verified through the experiments. The contact time has decreased as the offset of each pair of strings at the disk increases. The contact time and its deviation were reduced by increasing the radius of the twisted string bundle, and the motor torque to exert an equivalent cutting force was surged at the same time. The proposed cutting mechanism with 16 strands of twisted string bundle and 40 mm of offset can cut the given tomato stems and stalks, exerting up to 132.4 N of cutting force in 4.6 to 6.5 seconds.

**Keywords:** Fruit Harvesting End-Effector, Cutting Mechanism, Twisted String Actuation System

### 1. 서론

세계적으로 인구의 증가에 의한 식량 수요가 증가하였지만, 농업종사자들이 감소함으로 인해 농업의 효율 증진을 위한 수확로봇의 연구가 진행되고 있다<sup>1-4</sup>. 현재 수확 로봇 연구의 일환으로 비정형성을 가지는 작물을 안정적으로 파지하고 수확작업의 효율을 늘리기 위한 수확용 엔드이펙터의 연구 및 개발이 진행되고 있다<sup>4,5</sup>. 수확의 효율을 증진시키기 위해 Y. Xiong의 그리퍼<sup>6</sup>와 같이 바구니에 많은 양의 딸기를 저장하고 난 뒤 박스에 옮기는 방식을 이용하거나 S. Hayashi의 그리퍼<sup>7</sup>와 같이 단위 길이당 평균 가동시간을 고려하는 등의 방식이 사용되기도 하였다. 이전 연구에서는 그리퍼가 과일을 놓치거나 파지

력에 의하여 과일이 망가지는 등의 문제점 등을 보완하기 위하여 [Fig. 1]과 같은 주머니형 로봇 그리퍼를 제안하였고<sup>8</sup> 주머니형 그리퍼가 토마토, 파프리카 등을 손상 없이 파지할 수 있음을 보였다. 주머니형 그리퍼는 입구 부분을 제외하고 나머지 부분은 커버로 둘러싸여 있어서 수확을 하기 위해 입구로만 과일이 출입할 수밖에 없지만 내부의 손가락 구조물이 7.480



[Fig. 1] The structure of cinch bag-typed robot gripper<sup>[8]</sup>

Received : Mar. 2, 2024; Revised : Jun. 8, 2024; Accepted : Jun. 13, 2024

※ This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Smart Farm Innovation Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (421031-04).

1. Graduate Student, Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea (smchoi97, alpha010@uos.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea (mjhwang@uos.ac.kr)

rad/s의 속도로 회전하는 서보 모터에 의해 빠르게 움직이며 과일을 파지할 수 있다. 이를 고려했을 때 주머니형 그리퍼<sup>[8]</sup>의 과수 수확 예상 시간과 과수 수확 효율은 과수 분리 소요시간에 의해 결정되는 것을 예상할 수 있다.

기존 연구에서는 토마토의 줄기를 절단하기 위해 커터의 절단면에서 발생하는 최소 절단력을 31 N으로 정의하였다<sup>[9,10]</sup>. 주머니형 그리퍼가 과수를 파지할 경우 줄기는 입구에 위치하며, 커터의 위치는 입구 위가 되어야 한다. 주머니형 그리퍼의 입구에서 토마토를 내부에 수용하기 위해 커터는 최소 74 mm 이상의 스트로크가 요구된다. Y. Xiong의 그리퍼<sup>[6]</sup>와 같이 여닫이문의 형태로 커터가 움직일 경우에는 구동부의 움직임이 줄기에 의해 방해받을 수 있어 칼날이 옆으로 움직이는 형태를 가져야 한다. J. Jun의 그리퍼<sup>[11]</sup>와 같이 날이 가위 형태로 구동된다면 주머니형 그리퍼의 육각형 입구 면적이 감소하여 과수 위치 불확정성에 강인하게 대응할 수 없게 된다. 따라서 칼날이 S. Hayashi의 그리퍼<sup>[7]</sup>에 장착된 평행 커터와 같이 입구에 평행하게 움직이는 방식이나 J. Liu의 레이저 절단을 적용하는 방식<sup>[12]</sup>을 고려해야 한다. 하지만 레이저 절단 방식의 소요시간이 길어 수확 효율을 떨어뜨릴 수 있으므로, 칼날이 평행하게 움직이며 줄기를 절단해야 한다. 그리퍼의 크기가 너무 커진다면 과일에 접근하는 과정에서 원줄기나 주변 과일을 건드리며 토마토의 위치를 크게 변화시키거나 주변 과일을 파손시킬 수 있다. 이를 방지하기 위해 커터 설치에 의한 보호구조물 면적의 확장 과 높이가 증가 최소화되어야 한다. DC모터가 장착된 전동 날을 활용할 경우 S. J. Byun의 줄기 절단 메커니즘<sup>[5]</sup>이나 J. Rong의 엔드이펙터<sup>[13]</sup>에 장착된 줄기 절단기와 같이 그리퍼의 높이가 증가하게 된다. 스크류를 이용한 리니어 액추에이터를 사용할 경우 구동장치의 긴 길이로 인해 입구의 면적이 증가하게 되어 설계 요구사항을 만족하지 못하게 된다. 따라서 주머니형 그리퍼의 보호구조물 확장을 최소화하면서 과일을 넣는 공간을 확보할 수 있는 줄기 절단 장치의 개발이 필요하다. 이러한 요구사항을 충족하기 위해 본 연구에서는 구동 메커니즘으로 줄 꼬임 구동 시스템을 선정하였다.

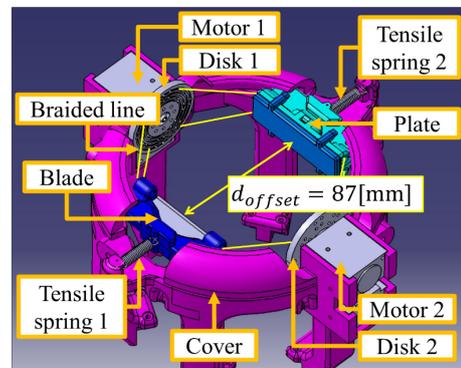
줄 꼬임 구동 시스템은 줄의 꼬임을 이용해 변위를 발생시키는 선형 액추에이션 시스템이다. 이 메커니즘은 작은 모터 토크로 큰 출력 힘을 낼 수 있다는 이점을 지니고 있어 작은 DC 모터로도 큰 절단력을 낼 수 있다<sup>[14,15]</sup>. 또한, 스트로크에 비해 시스템의 크기가 작아 제한된 공간에서 충분한 힘을 발생시킬 수 있다. 그러나 이 메커니즘은 단방향 구동만 가능하며, 구동 시스템의 운동시간이 느리다는 문제가 있다. 이러한 문제는 스프링을 활용하여 수축하고 복원되도록 설계하고, 평행한 실이 최초로 꼬일 때까지 큰 변위가 발생한다는 특성을 이용하여 구동 시스템이 완전히 수축할 때까지의 소요시간을 감소시키는 방법으로 대응할 수 있다.

본 논문에서는 줄 꼬임 구동 시스템을 이용한 줄기 절단 메커니즘을 제안한다. 2장에서는 줄기 절단 메커니즘을 설계하면서 거동을 분석하여 줄기 절단 소요시간과 모터 회전각 사이의 관계를 유도하고, 모터 토크와 절단력 사이의 관계를 계산한다. 3장에서는 줄기 절단시간에 영향을 주는 요소의 길이와 크기를 변경하고 소요시간을 측정함으로써 모델링 된 식을 검증하고, 실제 토마토 줄기를 자르면서 주어진 줄기를 잘 자르는지 확인하였다. 4장에서는 결론을 지으며 추후 연구에 대해 설명한다.

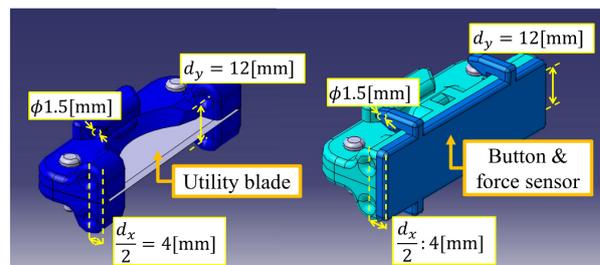
## 2. 줄기 절단 장치의 설계 및 제작

### 2.1 메커니즘의 설계

줄 꼬임 구동형 줄기 절단 메커니즘은 설계 요구사항에 제시한 구속조건을 반영하여 [Fig. 2(a)]와 같이 설계했다. 제안된 메커니즘은 적은 모터 토크만으로도 줄기를 절단할 수 있는 힘을 발생시킬 수 있기 때문에 소형화에 유리하다는 장점을 가지고 있다. 기존의 줄 꼬임 메커니즘은 느린 절단속도 및 크리프 현상에 의한 히스테리시스 발생, 신뢰성 하락의 문제가 존재한다. 본 논문에서는 절단 속도의 향상을 위해 줄의 반지름 및 가닥 수를 증가시켰다. 또한 줄에 미리 인장력을 가해주는 전처리



(a) 3D modeling of protective structures equipped with stem cutting devices



(b) 3D model of blades and plates

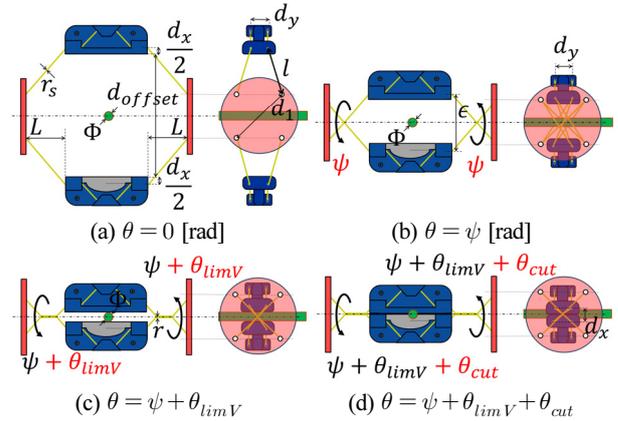
[Fig. 2] The composition and 3D modeling of the stem-cutting device using twisted string actuation system

해주고 꼬이는 실 다발 전체의 반지름을 증가시킴으로써 메커니즘의 히스테리시스를 완화시켰다<sup>[14]</sup>. 마지막으로 줄의 끊어짐과 같은 문제에 대응하기 위해 합사를 사용함으로써 신뢰성을 향상시켰다. 칼날의 형상과 움직임은 과일이 그리퍼 내부에 안착되었을 때 줄기의 위치를 고려하여 일자의 칼날이 평행하게 움직이도록 하였고, 줄기의 불완전한 절단을 방지하기 위해 [Fig. 2(b)]와 같이 평판과 칼날이 마주보는 구조를 채택하였다.

줄 꼬임 구동형 줄기 절단 메커니즘은 칼날, 평판, 인장 스프링, 디스크, 모터와 실로 구성되어 있다. 실은 구동기의 내구도를 고려하여 합사(braided line)를 사용하였다. [Fig. 2(b)]와 같이 유틸리티 칼날을 사용했고, 평판에 장착된 힘 센서를 통해 절단력을 측정할 수 있다. 칼날과 평판이 만나는 지점에서 줄기가 절단되고, V자로 연결된 실은 디스크와 모터의 회전에 의해 꼬이며 칼날과 평판 사이의 거리를 조절한다.  $d_{offset}$ 은 커터의 스트로크를 의미하며  $d_{out}$ 과  $d_{in}$ 은 각각 확장된 주머니형 그리퍼 보호구조물의 외경과 내경이다. 줄 꼬임 구동형 줄기 절단 메커니즘이 장착된 보호구조물은 그리퍼가 과일에 접근할 때 칼날이나 합사가 열매와 접촉하거나 줄기에 걸리지 않도록 하였다. 장치의 크기는 외경 160 mm이고  $d_{offset}$ 을 87 mm로 설정하여 내부에 74 mm의 토마토를 수용할 수 있다. 줄 다발이 꼬이는 방향으로 모터가 회전하면 줄기와 만날 때까지 칼날과 평판이 이동한다. 모터는 칼날과 평판이 줄기와 접촉하고 나서 줄기를 절단하기 위한 절단력에 도달할 때까지 회전한다. 이때  $d_x$ 와  $d_y$ 는 [Fig. 2(b)]와 같이 칼날과 평판에 뚫린 구멍 사이의 거리를 가리킨다.  $\phi$ 는 칼날과 평판에서 실이 지나가는 구멍의 지름이다. 줄기를 절단한 뒤 줄 다발이 풀리는 방향으로 모터가 회전하면 스프링에 의해 칼날과 평판이 이전의 자리로 복귀하게 된다. 칼날과 평판이 항상 같은 위치로 돌아가도록 만들기 위해 스프링의 최대 인장 길이와 최소길이를 제한하였다. 최대 인장 길이는  $d_{offset}$ 의 절반 길이보다 커야 하고, 커터가 완전히 열릴 때 길이가  $\delta_{min}$ 까지 수축할 수 있는 스프링을 선정하였다.

2.2 거동분석과 절단력, 소요시간 모델링

줄 꼬임을 이용한 줄기 절단기의 칼날과 평판이 만나는 과정은 [Fig. 3]의 (a)에서 (d)와 같이 진행된다. 처음에는 [Fig. 3(a)]와 같이 칼날과 평판이 서로  $d_{offset}$ 만큼 떨어져 있다. 여기에서  $d_1$ 은 디스크에서 줄이 떨어진 거리이며,  $r_s$ 는 실 한 가닥의 반지름을 가리킨다. [Fig. 3(b)]와 같이 두 가닥의 줄이 최초로 X자로 꼬일 때까지 스트로크가 빠르게 수축한다. 여기서  $\psi$ 는 줄이 최초로 X자로 꼬일 때까지 디스크가 회전한 각도이고,  $\epsilon$ 은



[Fig. 3] The cutting procedure of the proposed stem-cutting device

[Table 1] The result of the contact time measurement depending on the string connecting method and  $d_1$

$d_1$ [mm]	$\psi$ [°]	$\epsilon$ [mm]
25	150.6	42.9
30	154.2	34.4
35	159.9	25.9
40	170.0	17.2
45	200.0-0.0j	6.5

이때의 스트로크다.  $\epsilon$ 은 실이 최초로 X자로 꼬이기 전과 후의 길이가 같다는 관계로부터 피타고라스의 정리를 통해 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.  $l$ 은 [Fig. 3(a)]와 같이 줄을 위에서 바라봤을 때 정사영된 길이로, 실의 길이는 항상 일정하다는 관계로부터 식 (2)와 같이 유도된다.  $\psi$ 는 실이 최초로 X자로 꼬이기 전과 후의 길이가 같다는 관계를 삼각함수로 정리하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\epsilon}{2} = \sqrt{\left(l - \frac{d_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_y}{2}\right)^2} \tag{1}$$

$$l = \sqrt{\left(\frac{d_{offset} - \frac{d_1}{\sqrt{2}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\frac{d_1}{\sqrt{2}} - d_y}{2}\right)^2} \tag{2}$$

$$\psi = \sin^{-1} \frac{\epsilon + d_y + d_1 - 4l^2}{2d_1 \sqrt{d_y^2 + \epsilon^2}} - \frac{\pi}{4} - \tan^{-1} \frac{\epsilon}{d_y} \tag{3}$$

식 (3)에서  $\psi$ 는  $\epsilon$ 과  $d_1$ 에 대하여 표현되고, [Table 1]의 계산 결과와 같이  $d_1$ 이 증가함에 따라  $\epsilon$ 은 감소하고  $\psi$ 는 증가한다. 이로 인해  $d_1$ 이 증가하면 줄이 최초로 X자로 꼬일 때까지 칼날과 평판이 서로 가까워진다.  $d_1$ 이 약 40 mm를 초과하면 [Table 1]에 정리된 계산 결과와 같이 회전각과 스트로크가 허수로 계

산된다. 줄이 X자로 꼬이기 전에 커터와 칼날이 만나게 되는데, 이 경우 줄기 절단에 실패하게 된다. 이러한 문제를 방지하기 위해  $d_1$ 의 길이가 제한되어야 하며, 그 범위는  $d_x$ 와 줄기의 지름  $\Phi$ 에 의해 식 (4)로부터 계산될 수 있다.

$$\epsilon \geq \Phi + d_x \quad (4)$$

$\Phi$ 의 값을 8 mm라고 설정하였을 때 식 (4)를 계산하면  $d_1$ 은 40.6 mm보다 작거나 73.1 mm보다 커져야 한다.  $d_1$ 이 73.1 mm보다 클 경우, 줄이 꼬이지 않거나 칼날이 평판과 만나지 않게 되므로 프로토타입에 적용될  $d_1$ 의 상한값은 40 mm로 설정하였다. 줄이 꼬이기 시작하면 [Fig. 3(c)]와 같이 칼날과 평판이 줄기와 접촉할 때까지 모터가 회전하고, 이때의 회전각은  $\theta_{limV}$ 라 한다. 디스크가  $\theta$ 만큼 회전하는 동안 칼날과 평판 사이의 거리는 감소하지만, 줄 꼬임 영역 안에 있는 실의 길이  $L_0$ 는 일정하다.  $L$ 은 디스크와 커터 사이에서 줄이 꼬이는 영역의 길이를 의미하며, 칼날과 평판이 중앙에서 직선운동을 한다고 가정하여 양쪽의  $L$ 은 항상 일정한 값을 가진다. 반대편에서도 디스크가 회전하면서  $L_0$ 와  $L$ 이 일정하게 유지되므로, 헬리컬 각  $\alpha$ 는 일정한 것을 식 (5)에서 확인할 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\left(\frac{\epsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_y}{2}\right)^2} + 2r_s + \frac{d_1}{2}}{L} \right) \quad (5)$$

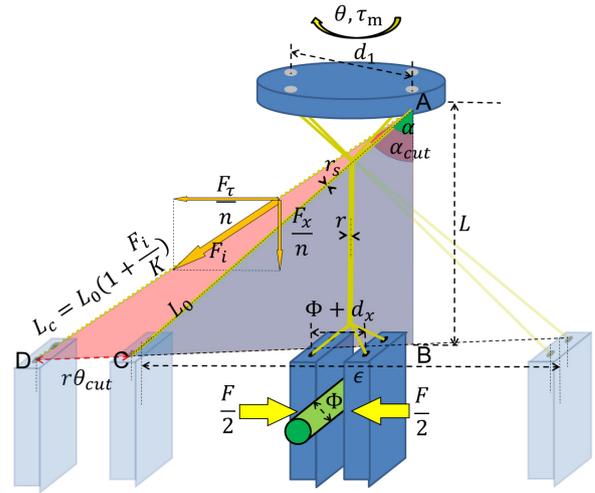
디스크가 회전하는 동안  $\alpha$ 가 일정하므로 디스크가  $\theta_{limV}$ 만큼 회전한 이후에도  $L_0$ 가 일정하다는 것을 [Fig. 4(a)]의 직각 삼각형 ABC를 이용하여 표현할 수 있다. 실 다발은 줄 꼬임 영역 안에서 반지름이  $r$ 인 줄 다발을 형성하며 꼬이므로,  $L_0$ 가 일정하다는 관계는 아래 식 (6)과 같이 피타고라스의 정리로 표현할 수 있다.

$$(l + 2r_s)^2 = r\theta_{limV} + \sqrt{(d_x + \Phi)^2 + d_y^2} \quad (6)$$

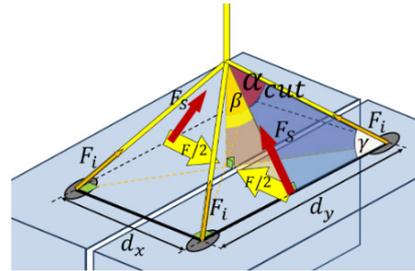
식 (6)을  $\theta_{limV}$ 에 대하여 정리함으로써 줄기와 칼날, 평판이 접촉하기까지 회전하는 각도를 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta_{limV} = \frac{\sqrt{\epsilon^2 + d_y^2} - \sqrt{(d_x + \Phi)^2 + d_y^2}}{2r} \quad (7)$$

양쪽의 모터는 각속도  $\dot{\theta}$ 로 회전한다고 했을 때 줄기와 칼날, 평판이 접촉할 때까지의 소요시간은 식 (8)과 같이  $r$ 과  $\dot{\theta}$ ,  $d_1$ 에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.



(a) Free body diagram of the stem-cutting device



(b) Free body diagram on the blade and plate<sup>[10]</sup>

[Fig. 4] The free body diagram of the proposed stem-cutting device

$$t_{cut} = \frac{\psi}{\dot{\theta}} + \frac{\sqrt{\epsilon^2 + d_y^2} - \sqrt{(d_x + \Phi)^2 + d_y^2}}{2r\dot{\theta}} \quad (8)$$

칼날과 평판이 줄기와 접촉한 후 [Fig. 3(d)]와 같이 모터가 더 회전하면서 절단력이 증가하게 된다. 줄기를 절단할 때까지 모터가 더 회전한 각도  $\theta_{cut}$ 에 의해 줄 꼬임 영역 안에서 실의 길이는 [Fig. 4]와 같이 실에 가해진 장력  $F_i$ 와 실의 탄성계수  $K$ 에 의하여  $\frac{L_0 F_i}{K}$ 만큼 늘어나게 된다. 이로 인해 헬리컬 각  $\alpha$ 가 증가하게 되고, 증가하는 헬리컬 각  $\alpha_{cut}$ 는 아래 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\alpha_{cut} = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\left(\frac{\epsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_y}{2}\right)^2} + 2r_s + \frac{d_1}{2} + r\theta_{cut}}{L} \right) \quad (9)$$

$\theta_{cut}$ 의 값은 늘어난 줄의 길이  $L_c$ 와 밀변이 늘어난 길이  $r\theta_{cut}$ 의 관계를 [Fig. 4(a)]의 직각삼각형 ABD를 이용하여 표현한 식으로부터 식 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_{cut} = \frac{\sqrt{\left(L_0 \left(1 + \frac{F_i}{K}\right)\right)^2 - L^2} - \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_y}{2}\right)^2} + 2r_s + \frac{d_1}{2}}{r} \quad (10)$$

따라서 모터 회전각의 총량과 모터 속도를 이용하여 줄기가 잘릴 때 까지의 예상 시간은 식 (11)로부터 계산된다.

$$t_{cut} = \frac{\psi + \theta_{lim} V + \theta_{cut}}{\dot{\theta}} \quad (11)$$

제안된 메커니즘은 네 갈래의 줄이 중앙에서 꼬이므로, 줄 갈래 수  $n$ 은 4이다.  $F_x$ 는 줄 다발에 가해지는 축방향의 힘이고,  $F_r$ 는 모터 토크  $\tau_m$ 에 의해 줄 다발에 수직 방향으로 가해지는 힘을 가리킨다.  $F_i$ 와  $F_x$ ,  $F_r$ 의 관계는 각각 식 (12), 식 (13)과 같이 나타나고,  $F_i$ 는 식 (14)에 표현된 바와 같이 식 (12)와 식 (13)의 벡터 합으로 나타난다<sup>[10,15]</sup>.

$$F_i \sin \alpha_{cut} = \frac{F_r}{n} = \frac{\tau_m}{nr} \quad (12)$$

$$F_i \cos \alpha_{cut} = \frac{F_x}{n} = \frac{\tau_m}{nr \tan \alpha_{cut}} \quad (13)$$

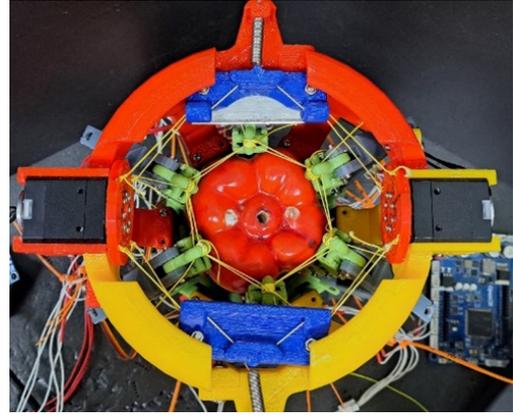
$$F_i = \sqrt{\left(\frac{F_r}{n}\right)^2 + \left(\frac{F_x}{n}\right)^2} = \frac{\tau_m}{nr} \sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \alpha_{cut}}} \quad (14)$$

$$= \frac{\tau_m}{nr \sin \alpha_{cut}}$$

줄기가 완전히 절단되었을 때 [Fig. 3(d)]와 같이 칼날과 평판이 만나게 되며, 이때 칼날과 평판에서 줄이 꼬이는 부분을 확대한 모습은 [Fig. 4(b)]에 표현하였다. 여기서  $F$ 는 줄기를 자른 절단력과 스프링 장력의 합력이고,  $F_s$ 는 칼날 또는 평판에 연결된 줄에서 나오는 장력  $F_i$ 의 합력으로 식 (15)와 같은 관계를 가진다.

$$F_s = \frac{F}{2 \sin \beta} = 2F_i \sin \gamma \quad (15)$$

이때  $\beta$ 는  $F_s$ 와  $d_x$ 가 이루는 각도이며,  $\gamma$ 는  $F_i$ 와  $d_y$ 가 이루는 각도를 나타낸다. 식 (15)에서 정리된  $F$ 와  $F_i$ 의 관계를 통하여  $\theta_{cut}$ 은 줄의 물성치뿐만 아니라 줄기의 절단력에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서  $t_{cut}$ 은  $d_1$ 과  $r$ ,  $\dot{\theta}$ , 줄기 절단력과 줄의 물성치에 의해 결정된다.  $F$ 와  $\tau_m$ 의 관계를 계산한 결과는 식 (14)와 식 (15)를 연립하여 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[10]</sup>.



[Fig. 5] The gripper with the proposed stem-cutting device

[Table 2] Parameter of spring

Material	D [mm]	d [mm]	k [N/mm]	N
stainless	5.5	0.5	0.108	39.5

$$\tau_m = \frac{Fnr \sin \alpha_{cut}}{4 \sin \beta \sin \gamma} \quad (16)$$

식 (9)에 정리된  $\alpha_{cut}$ 과  $\theta_{cut}$ 의 관계를 통해 절단력은 추가 회전각과 실 다발의 반지름  $r$ 에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

### 2.3 프로토타입의 제작

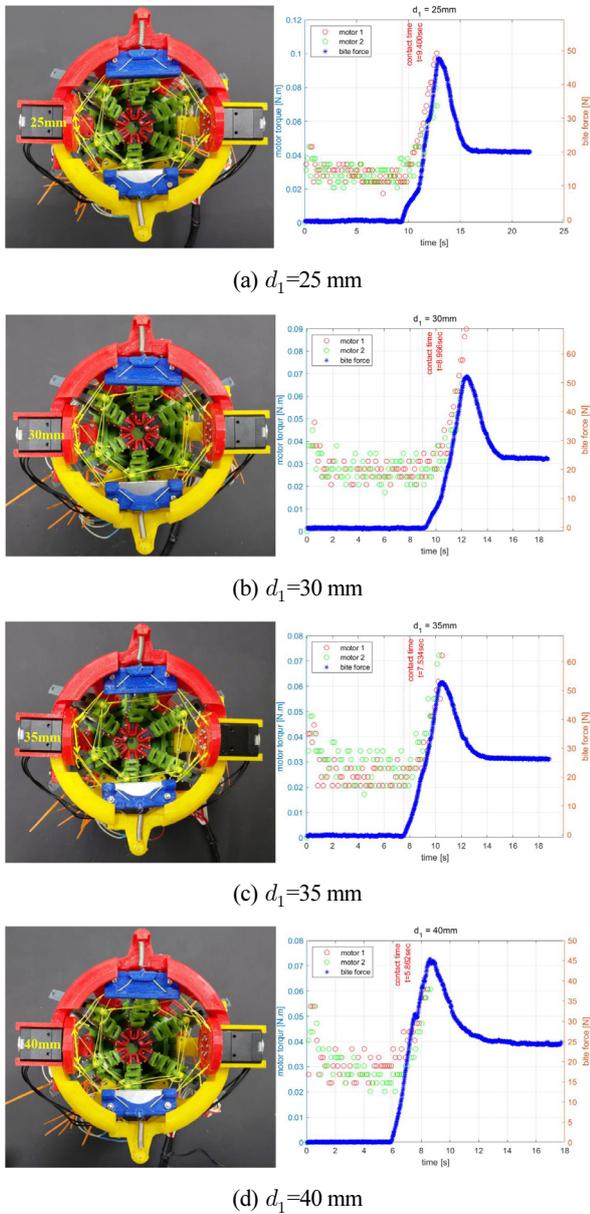
줄 꼬임 구동형 줄기 절단 메커니즘이 장착된 엔드이펙터의 프로토타입은 [Fig. 5]와 같이 PLA 소재로 제작하였으며, 전체 무게는 약 1.4 kg이다. 사용한 합사는 0.4[mm]의 지름과 460.91[N]의 인장강도를 갖고<sup>[16]</sup>, 스프링의 D(외경), d(선경), N(감은 수), k(스프링 상수)는 [Table 2]와 같다<sup>[17]</sup>. 식 (16)에서 최소 절단력 31 N을 내기 위한 모터 토크를 계산한 뒤, 양쪽 모터에서 발생한 모터 토크를 측정하기 위해 다이내믹셀 모터 XM430-W350-T<sup>[18]</sup>를 이용하였다. 모터로 인한 돌출부가 포함된 최대 외경은 205 mm이고, 입구 근처에서는 칼날과 평판이 최대 87 mm까지 열리고 닫힐 수 있다. 네 개의 합사와 스프링에서 나오는 장력에 의해 모터가 회전하지 않으면 평판과 칼날이 움직이지 않도록 고정되고, 줄기 절단 후에 칼날과 평판은 다시 원위치로 돌아가게 된다.

## 3. 실험 및 결과

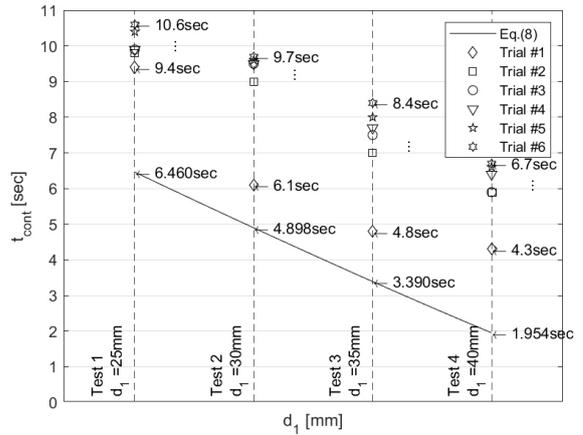
### 3.1 $d_1$ 의 변화에 따른 소요시간 측정 실험

$t_{cut}$ 은  $d_1$ 이 증가하면  $\epsilon$ 값의 감소에 의해 줄어든다. 이러한

$t_{cont}$ 의 양상을 검증하고 식 (8)의 계산 결과와 실측값을 비교하기 위해 [Fig. 6]과 같이 줄기 절단 메커니즘을 작동시키며 실험을 진행하였다. 여기에서 모터의 속도  $\dot{\theta}$ 는 모터가 낼 수 있는 최대 각속도인 4.294 rad/s로 설정하였고, 줄기가 없다는 의미로  $\phi$ 를 0이라 하였다. 이 실험에서 줄은 반지름이  $r_s$ 인 합사 네 개가 줄 꼬임 영역에서 꼬이고, 이때의 실 다발 반지름  $r$ 은 약 0.60 mm이다. [Fig. 6]과 같이 절단력과 모터 토크 그래프와의 비교를 통해 접촉 소요시간을 측정하기 위하여 힘센서와 모터로부터 절단력과 모터 토크를 각각 측정하였다. 여기서 접촉 소요시간은 힘 센서로부터 얻은 절단력 그래프에서 절단력이 증



[Fig. 6] The measurement of contact time depending on the value of  $d_1$



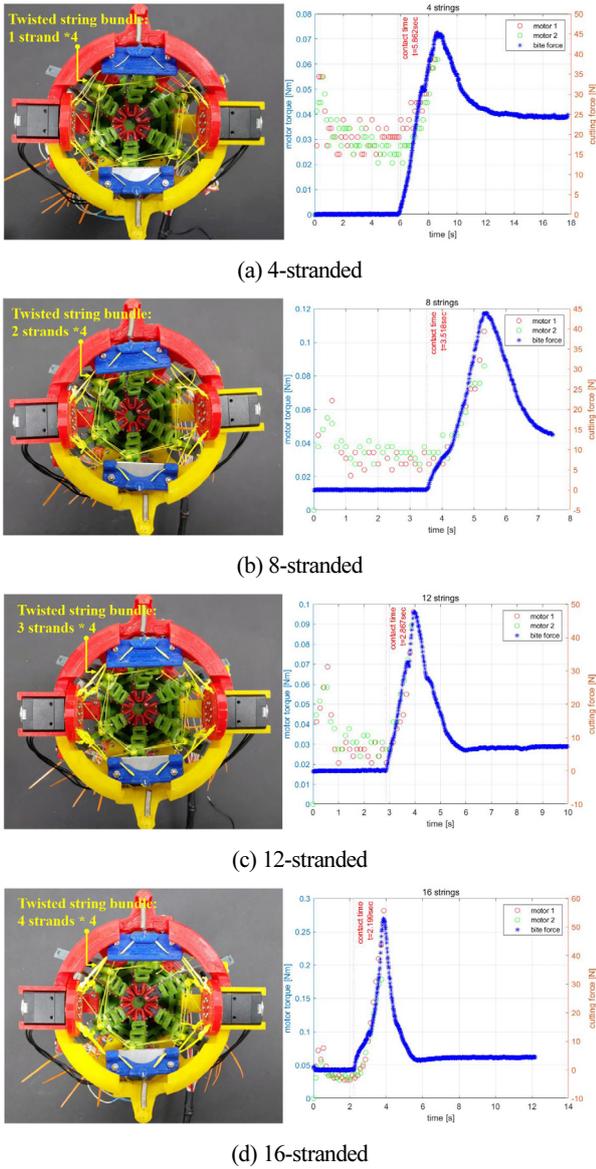
[Fig. 7] The calculated contact time and measured contact time in a different  $d_1$  value

가하기 시작한 지점으로 정의하였다. 실험에서  $d_1$ 은 식 (4)로부터 계산된 상한값을 고려하여 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm으로 설정하였다. 평판과 칼날이 접촉한 이후 줄의 크리프(creep)에 의한  $t_{cont}$ 의 변화를 확인하기 위해 절단력이 40 N을 넘었을 때 모터를 정지시켰다.

여섯 번씩 실험을 반복하며 총 24회의 실험을 했을 때 소요시간을 식 (8)에서 계산한  $t_{cont}$ 와 비교한 결과는 [Fig. 7]과 같다. 이를 통해 실제로도  $d_1$ 이 증가함에 따라  $t_{cont}$ 가 감소하는 경향성을 확인하였다. 접촉 소요시간  $t_{cont}$ 는 식 (8)에서 계산된 양상과 동일하게  $d_1$ 이 증가함에 따라 감소하지만, 실험을 반복함에 따라 크리프(creep) 현상으로 인해 소요시간이 점점 증가하였다. 꼬인 실의 내부에서 공극이 발생한 것, 합사를 이용한 것 그리고 줄에 변형이 발생한 것으로 인해 모델링 오차가 발생하였다. 디스크가 각도  $\psi$ 만큼 회전하는 동안 칼날과 평판에 비틀림이 발생하게 된다. 이러한 비틀림은  $d_1$ 이 증가함에 따라 커지지만, 스프링의 장력과 줄이 이루는 장력이 균형을 이루는 과정에서 칼날과 평판의 좌우 움직임이 억제된다. 이로 인해 비틀림이 생겨도 [Fig. 6]과 같이 디스크가 줄이 풀리는 방향으로 회전할 때 칼날과 평판이 원래대로 돌아오는 것을 확인하였다. 이 실험을 통해  $d_1$ 이 증가함에 따라 줄기 절단의 소요시간이 감소한다는 것을 검증하였다.

### 3.2 $r$ 의 변화에 따른 소요시간 측정 실험

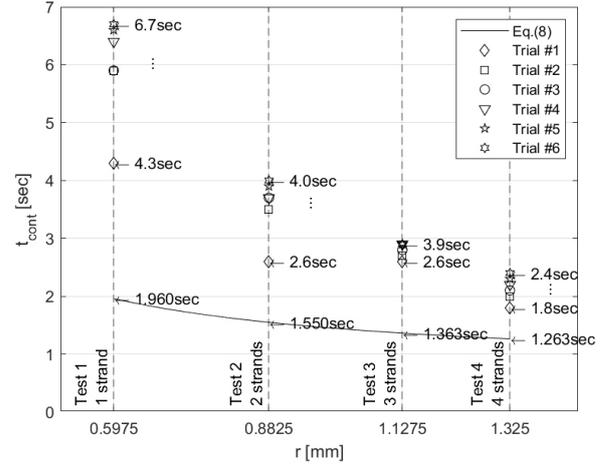
식 (8)의 소요시간에서  $\phi$ 를 0으로 하고, 실 다발의 반지름  $r$ 을 2 mm로 제한했을 때  $r$ 이 증가함에 따라  $t_{cont}$ 가 감소한다.  $t_{cont}$ 가 감소하는 양상을 검증하고 실측값과 비교하기 위해 [Fig. 8]과 같이 한 갈래에 중첩되는 실의 개수를 늘려주면서  $r$ 을 증가시켰다. 실은 [Fig. 2(b)]에서 실이 통과하는 구멍의 지



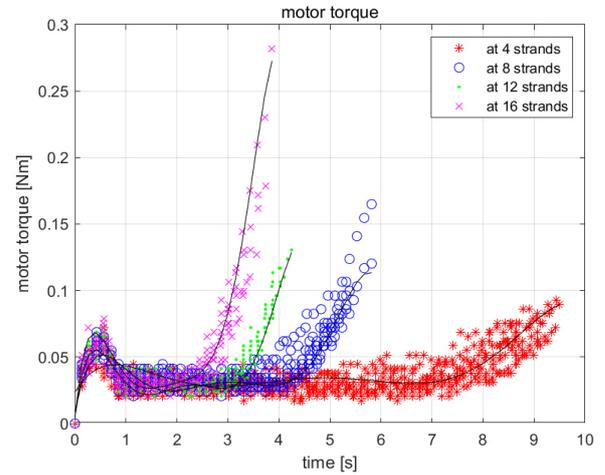
[Fig. 8] The measurement of contact time depending on the number of twisted string bundle

름  $\phi$ 를 고려하여 한 갈래당 최대 네 가닥까지 증가시켰다. 따라서 줄 꼬임 영역에서 꼬이는 실의 개수는 네 가닥, 여덟 가닥, 열두 가닥, 열여섯 가닥이 되고,  $r$ 은 가닥 수가 증가함에 따른 줄 꼬임 영역의 평균 반지름을 측정하고 식 (8)에 반영하였다.  $d_1$ 은 소요시간이 최소인 40 mm로 고정하였고, 줄기를 사용하지 않았다는 의미로  $\phi$ 를 0이라 하였다. 접촉 소요시간의 시점은 절단력이 증가하기 시작한 시간으로 정의하였다. 모터의 회전은 3.1의 실험에서와 같이 절단력이 40 N을 넘는 시점에 정지시켰다.

각각 여섯 번씩 반복하여 총 24회의 실험을 하였다. 실험 반복에 따른 소요시간 변화는 [Fig. 9]와 같이  $r$ 이 증가함에 따라



[Fig. 9] The calculated contact time and measured contact time in a different twisted string bundle



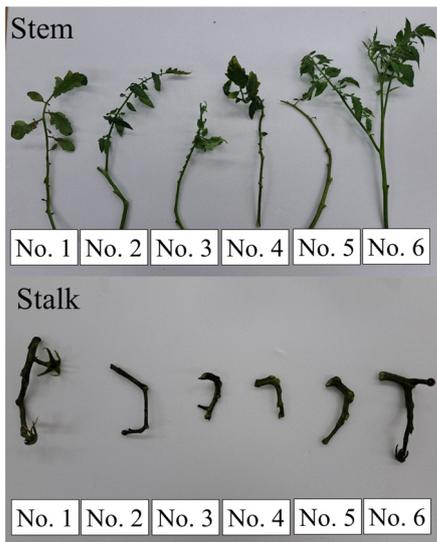
[Fig. 10] The motor torque depending on the number of twisted string bundle

$t_{cont}$ 가 감소하는 것을 확인하였다. 꼬임실의 내부에서 공극이 발생한 것, 합사를 이용한 것과 줄에 변형이 발생한 것으로 인해 오차가 발생하였다. 실험을 반복함에 따라 크리프 현상으로 인해 소요시간이 증가하였지만, 중첩된 실의 개수가 늘어남에 따라 편차가 감소하였다. 이 실험을 통해 실 다발이 꼬이는 부분의 반지름을 늘리면 소요시간이 감소할 뿐만 아니라 줄의 소성변형에 의한 영향도 감소한다는 것을 검증하였다. 하지만 절단력과 모터 토크의 관계에 따라 실 다발의 반지름이 증가하게 되면 같은 절단력을 내기 위한 모터 토크의 값도 증가하게 된다. 이는 [Fig. 10]의 모터 토크 그래프를 통해 확인할 수 있었다. 모터 토크는 칼날과 평판이 접촉한 이후로 증가하였고, 양쪽 모터에서 측정된 최대 토크는 절단력이 40 N을 넘었을 때 줄 다발의 개수가 증가함에 따라 증가하였다. 이를 통해 실 다발의 반지름이 증가하면 줄기 절단 소요시간과 줄

의 크리프에 의한 소요시간 편차는 감소하는 반면에, 같은 절단력을 내기 위해 소요되는 모터 토크는 증가한다는 것을 검증하였다.

### 3.3 토마토 줄기 절단 실험

이 실험에서는 줄 꼬임 구동형 메커니즘이 실제로 토마토의 줄기를 잘 절단하는지 확인하고, 이때의 소요시간과 절단력을 측정하기 위해 [Fig. 11(a)]와 같이 토마토가 달려있던 줄기와 꼭지를 이용하여 줄기 절단실험을 진행하였다. 줄이 구멍을 통과하는 지름과 제한된  $d_1$ 의 상한값을 고려하여  $d_1$ 을 40 mm, 실의 가다수를 열 여섯 가닥으로 설정하고 [Fig. 11(b)]와 같이 12개의 꼭지와 줄기를 절단하였다. 접촉 소요시간과 절단 소요시간을 측정하고 줄기를 잘랐을 때의 절단력을 확인하기 위해 힘 센서로 절단력을 측정하였다. 접촉 소요시간은 절단력 그래프

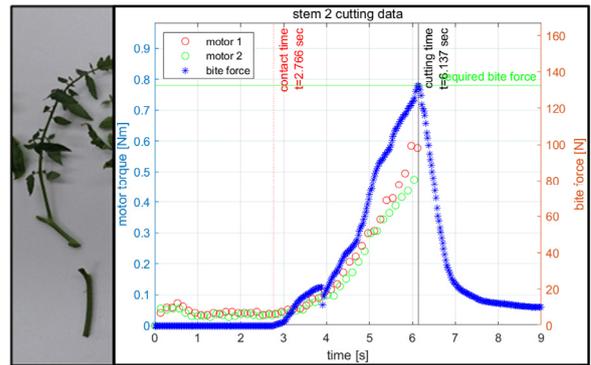


(a) stem cutting experimental sample

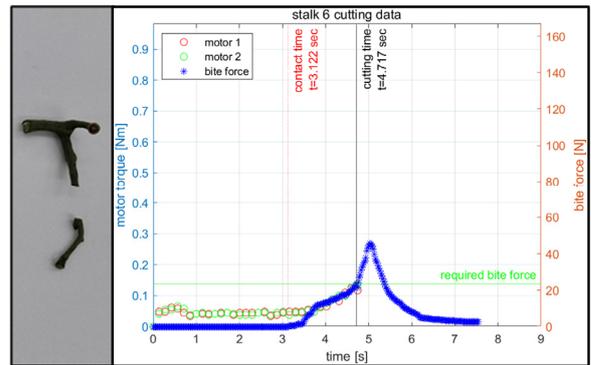


(b) stem cutting experimental environment

[Fig. 11] The stem cutting experiment of the proposed stem-cutting device



(a) stem cutting experimental data



(b) stem cutting experimental data

[Fig. 12] The result of stem cutting experiment

와 모터 토크 그래프를 합쳤을 때 절단력이 증가하기 시작한 시점으로 정의하였다. 줄기가 절단된 뒤 모터의 전원을 차단하였고, 절단 소요시간은 절단력 그래프와 모터 토크 그래프, 줄기 절단 영상을 통해 확인하였다.

실험 결과 [Fig. 12]와 같이 줄 꼬임 구동형 줄기 절단 메커니즘은 주어진 토마토 줄기와 꼭지를 모두 절단하였다. [Table 3]과 같이 줄기를 절단하는 동안 0.265 Nm에서 0.594 Nm의 모터 토크를 소요하며 54.9 N에서 132.4 N의 절단력이 발생하였다. 줄기가 절단되기까지 5.0초에서 6.5초가 걸렸고, 줄의 소성변형과 줄기가 잘린 각도에 의한 절단력 차이, 시료의 줄기 두께와 같은 요인으로 절단 소요 시간이 증가하거나 감소한 것을 확인하였다. 또한, [Table 4]와 같이 0.096 Nm에서 0.199 Nm의 토크를 소요하며 14.7 N에서 44.4 N의 절단력으로 토마토의 꼭지를 절단하였다. 꼭지를 절단 소요시간은 4.6초에서 5.33초로 측정되었고, 줄의 소성변형과 꼭지의 지름 및 물성치의 영향으로 소요시간이 불규칙적으로 변하였다. 실험 결과, 제안된 메커니즘은 실제 토마토의 줄기를 절단할 수 있고, 내부의 공간에 토마토를 수용할 수 있다는 것을 확인하였다. 이로써 보호구조물의 크기를 최소화해야 하는 요구사항을 만족하면서 토마토의 줄기를 절단하기에 적합하다는 것을 검증하였다.

[Table 3] The cutting result of stem part on tomato

Specimen		Cutting force [N]	Max. $\tau_m$ [Nm]	Measured time	
Stem [No.]	$\phi$ [mm]			$t_{cont}$ [sec]	$t_{cut}$ [sec]
1	3.0	126.5	0.381	2.4	5.0
2	6.4	132.4	0.586	2.8	6.1
3	4.3	121.6	0.594	3.5	6.5
4	3.8	54.9	0.330	3.6	5.7
5	6.0	108.9	0.482	3.1	6.1
6	5.1	60.8	0.265	3.7	5.6

[Table 4] The cutting result of stalk part on tomato

Specimen		Cutting force [N]	Max. $\tau_m$ [Nm]	Measured time	
Stalk [No.]	$\phi$ [mm]			$t_{cont}$ [sec]	$t_{cut}$ [sec]
1	8.4	33.3	0.199	3.2	5.3
2	4.4	44.4	0.199	3.3	5.2
3	5.8	20.6	0.178	3.4	5.0
4	3.9	15.7	0.096	3.4	4.6
5	6.2	14.7	0.127	3.4	4.7
6	5.7	23.5	0.137	3.1	4.7

## 4. 결 론

줄 꼬임 구동형 줄기 절단 메커니즘은 줄 꼬임 구동 시스템으로 구동하는 칼날과 평판이 합사와 스프링의 장력에 의해 구속된 채 접촉하거나 원상 복귀하는 움직임을 보인다. 모델링을 통해 줄기 절단시간이 디스크에서의 줄의 거리와 줄 다발의 반지름에 의해 결정되고, 절단력과 모터 토크가 줄 다발의 반지름과 추가 회전각에 의해 결정되는 것을 보였다. 줄기 절단실험을 통해 해당 메커니즘이 약 4.6초에서 6.4초 동안 설계 요구사항에서 정의된 최소 절단력보다 더 큰 힘을 내며 주어진 줄기를 절단할 수 있음을 보였다. 크리프 현상에 의해 접촉 소요시간이 증가한다는 한계가 있지만, 꼬이는 줄다발의 반지름을 증가시킴으로써 소요시간의 편차를 줄일 수 있었다. 줄에 미리 인장력을 가해주고<sup>[14]</sup>, 꼬이는 줄 다발 전체의 반지름을 늘려주는 방법으로 줄의 크리프 변형에 의한 히스테리시스를 완화할 수 있음을 보였다. 향후에는 본 논문에서 제안한 줄기 절단 메커니즘을 포함한 그리퍼를 이용하여 다양한 과수들을 수확하는 실험을 통해 수확성능을 검증하고 통계 분석을 진행할 예정이다.

## References

- [1] E. Navas, R. Fernandez, D. Sepúlveda, M. Armada, and P. Gonzalez-de-Santos, "A Design Criterion Based on Shear Energy Consumption for Robotic Harvesting Tools," *Agronomy*, vol. 10, no. 5, pp. 734, May, 2020, DOI: 10.3390/agronomy10050734.
- [2] Y. Nagasaka, N. Umeda, Y. Kanetai, K. Taniwaki, and Y. Sasaki, "Autonomous Guidance for Rice Transplanting Using Global Positioning and Gyroscopes," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 43, no. 3, pp. 223-234, Jun., 2004, DOI: 10.1016/j.compag.2004.01.005.
- [3] M. Iida, M. Suguri, R. Uchida, M. Ishibashi, H. Kurita, W. J. Cho, R. Masuda, and K. Ohdoi, "Advanced Harvesting System by Using a Combine Robot," *IFAC Proceedings Volume*, vol. 46, no. 4, pp. 40-44, Mar, 2013, DOI: 10.3182/20130327-3-JP-3017.00012.
- [4] S. Y. Moon and M. J. Hwang, "An Adaptive Soft Gripper for Fruit Harvesting," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 28, no. 7, pp. 664-670, Jul., 2022, DOI: 10.5302/J.ICROS.2022.22.0041.
- [5] S. J. Byun, Y. E. Lim, and M. J. Hwang, "Harvesting End-Effector to Minimize Length of Remaining Stem on Fruit by Stem-Cutting with Hook," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 28, no. 10, pp. 926-931, Oct., 2022, DOI: 10.5302/J.ICROS.2022.22.0131.
- [6] Y. Xiong, C. Peng, L. Grimstad, P. J. From, and V. Isler, "Development and field evaluation of a strawberry harvesting robot with a cable-driven gripper," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 392-402, Feb., 2019, DOI: 10.1016/j.compag.2019.01.009.
- [7] S. Hayashi, K. Shigematsu, S. Yamamoto, K. Kobayashi, Y. Kohno, J. Kamata, and M. Kurita, "Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test," *Biosystems Engineering*, vol. 105, no. 2, pp. 160-171, Feb., 2010, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.09.011.
- [8] S. Choi and M. J. Hwang, "Design and Evaluation of a Cinch Bag Typed Robotic Gripper for Fruit Harvesting," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 18, no. 1, pp. 99-109, Feb., 2023, DOI: 10.7746/jkros.2023.18.1.099.
- [9] B. Z. Jia, "Integrated Gripper and Cutter in a Mobile Manipulation Robotic System for Harvesting Greenhouse Products," M.S thesis, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, 2009, [Online], <https://atrium.lib.uoguelph.ca/items/7fde6871-7dae-4f7c-a102-a646c2efb645>.
- [10] S. Choi and M. J. Hwang, "Design of a Stem Cutting Mechanism using Twisted String Actuation for a Fruit Harvesting Gripper," *ICROS Annual Conference 2023*, Gangwon-do, Republic of Korea, pp. 399-400, 2023, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11480368>.
- [11] J. Jun, J. Kim, J. Seol, J. Kim, and H. I. Son, "Towards an Efficient Tomato Harvesting Robot: 3D Perception, Manipulation, and End-effector," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 17631-17640, Jan., 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052240.

[12] J. Liu, X. Xu, and P. Li., "Analysis and Experiment on laser cutting of Fruit Peduncles," *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol. 45, no. 1, pp. 59-64, Jan., 2014, DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.010.

[13] J. Rong, J. Fu, Z. Zhang, J. Yin, Y. Tan, T. Yuan, and P. Wang, "Development and Evaluation of a Watermelon-Harvesting Robot Prototype: Vision System and End-Effector," *Agronomy*, vol. 12, no. 11, pp. 2863, Nov., 2022, DOI: 10.3390/agronomy12112836.

[14] I. Gaponov, D. Popov, and J.-H. Ryu, "Twisted String Actuation Systems: A Study of the Mathematical Model and a Comparison of Twisted Strings," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1331-1342, Aug., 2014, DOI: 10.1109/TMECH.2013.2280964.

[15] H. Singh, D. Popov, I. Gaponov, and J.-H. Ryu, "Twisted String-based Passively Variable Transmission: Concept, Model, and Evaluation," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 100, pp. 205-221, Jun., 2016, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.02.009.

[16] MTF Meo-teol Fish, "High Quality Super Power Braided Line (8 strands)," [Online], [https://www.wfish.co.kr/sp2/goods\\_data\\_view.htm?goods\\_idx=326286/](https://www.wfish.co.kr/sp2/goods_data_view.htm?goods_idx=326286/), Accessed: Jun. 05, 2024.

[17] Misumi, "DS Series Tensile Spring (6565)," [Online] <https://kr.misumi-ec.com/vona2/detail/221000746855/?HissuCode=8567&PNSearch=8567&KWSearch=8567&searchFlow=results2type&list=PageSearchResult>, Accessed: Jun. 05, 2024.

[18] ROBOTIS e-Manual, "XM430-W350," [Online] <https://manual.robotis.com/docs/kr/dx1/x/xm430-w350/>, Accessed: Jun. 05, 2024.



**최 성 모**

2022 공주대학교 기계자동차공학부 기계설계공학전공(공학사)  
2024 서울시립대학교 기계정보공학과(석사)

관심분야: Gripper Design, Mechanical Designing Process, Robot Hardware Design, Field Robotics



**이 동 우**

2023 한국공학대학교 기계설계공학과(학사)  
2023~현재 서울시립대학교 기계정보공학과 석사과정

관심분야: Robot Vision, Robot AI, Robot Calibration, Robot Motion Planning, Manipulation



**황 면 중**

2007 한국과학기술원 기계공학과(학사/석사/박사)  
2008~2009 Case Western Reserve University, Research Associate  
2010~2013 삼성전자 생산기술연구소 책임연구원

2013~2015 한라대학교 기계자동차공학부 조교수  
2015~2021 한국교통대학교 기계공학전공 조교수/부교수  
2021~2024 서울시립대학교 기계정보공학과 부교수  
2024~현재 서울시립대학교 기계정보공학과 교수

관심분야: Robot Motion Planning and Control, Manipulation, Autonomous Mobile Robot