

조직배양체 이식로봇 시스템의 소프트 그리퍼 개발

Development of a soft gripper in robot system for use in transplanting tissue culture plants

이 현동*
정희원
H. D. Lee

김 기대*
정희원
K. D. Kim

김 정필*
정희원
J. P. Kim

1. 서 론

식물 조직배양이란 세포, 조직, 또는 기관 등을 식물체로부터 무균적으로 분리하여 적당한 조건하에서 배양하여 생육시키는 기술을 말한다. 식물 조직배양에서는 이식과정이 필수적인 요소이지만 이 이식과정에서는 숙련된 노동자가 무균환경하에서 작업을 행하기 때문에 생산비의 60 - 70%정도가 인건비로 소요된다.

따라서, 본 연구는 식물 조직배양의 생산비를 낮추기 위한 자동화의 하나로 조직배양체 이식을 위한 이식로봇 시스템의 개발에서 대상작물과 직접 연관이 있는 소프트 그리퍼를 개발하는데 목적을 두었으며, 대상작물로는 조직배양으로 생성된 인공씨감자 줄기부를 사용하였다.

인공씨감자란 감자줄기의 눈이나 켈러스를 추출하여 인공배지에 배양하며 몇가지 특정한 처리(고농도 탄수화물, 저온, 단일조건)를 해주면 줄기부의 발달과 더불어 배양기내에서 보통감자를 1000분의 1로 축소해 놓은 완두콩만한 초소형 감자가 생성된다. 이 초소형 감자는 파종시 일반 씨감자의 바이러스, 곰팡이, 박테리아등의 병원균 감염현상을 막을 수 있으며, 인공씨감자로 재배된 감자는 일반 씨감자로 재배된 감자 보다 양질이며 다량으로 생산된다.

또한 소프트 그리퍼란 대상물체를 집을 때 집는 힘을 측정하여 대상물체가 손상을 받지 않는 적절한 힘으로 집을 수 있는 그리퍼를 말하며, 본 연구에서는 대상작물의 줄기부 강성(stiffness)과 비슷한 재질로 만든 핑거부로 식물을 집으면서 식물에 가한 힘을 측정하여 식물 줄기부에 손상을 주지않는 범위에서 식물을 집을 수 있도록 그리퍼를 설계하였다. 식물은 생육조건, 식물 자체의 함수율 및 크기 등에 따라 식물 줄기부의 강성이 다르며, 식물 줄기부와 그리퍼 접촉면 재질의 마찰계수에 따라 식물을 핸들링하는 조건이 달라진다.

따라서, 대상작물인 인공씨감자 줄기부에 대한 정보와 줄기부를 핸들링하는 장치와의 작동조건을 정립하여 인공씨감자 줄기부 핸들링에 적합한 소프트 그리퍼를 개발하고, 그리퍼와 식물줄기부의 특성에 따른 핸들링 조건을 실험적으로 분석하여, 향후 조직배양 이식을 위한 로봇 연구 및 개발에 활용할 수 있도록 하고자 본 연구를 수행하였다.

* 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

2. 재료 및 방법

2.1. 대상작물

본 연구에 사용된 작물은 조직배양으로 6주 경과된 인공 씨감자 줄기부이며, 품종은 대지품종을 사용하였으며, 그림 1은 실험에 사용된 인공씨감자 줄기부의 배양모습을 나타낸 것이다. 인공씨감자가 열리기 바로직전의 식물체를 배양용기에서 채취하여 배양액을 물로 씻은 후 실험에 사용하였다.

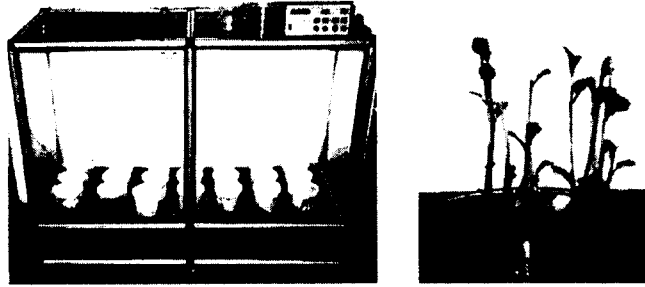


Fig. 1 Cultivating of artificial potato seedling

2.2. 기초 실험

먼저 그리퍼가 식물과 직접 접촉하는 부분의 모양이나 폭을 설계하는데 기초자료로 활용하기 위하여 배양체의 기하학적 특성인 줄기 직경, 첫 번째 마디 간격, 배양액 수면과 첫 번째 가지사이의 간격, 기울어진 각도 등을 각도기와 버니어 캘리퍼스로 측정하였다.

또한 그리퍼가 식물을 집을 때 식물이 압축되어 파괴되는 힘 이하로 집기 위하여 줄기부의 압축 강도 측정 실험을 하였다. 줄기를 부위별로 4등분(뿌리부 근처의 줄기, 중간 줄기부, 가지, 줄기 윗 끝부분)으로 나누어 직경 8mm 테프론 바를 이용하여 1mm/s의 속도로 압축하였다.

그리고, 배양체를 배양액에서 적출할 때 소요되는 힘을 측정함으로써 식물이 그리퍼에서 미끄러지지 않으며 손상이 되지 않는 그리퍼의 적정 악력을 구하는 자료로 사용하기 위하여 적출력을 측정하였다. 적출시 상향 속도를 5mm/s로 일정하게 한 후, 소요되는 최대의 힘을 측정하였다.

마지막으로, 그리퍼가 식물에 손상을 가하지 않는 범위 내에서 식물을 집을 수 있도록 그리퍼의 적정 악력을 측정하였다. 주위에서 쉽게 구할 수 있는 고무, 코르크, 실리콘 등의 재질을 식물과 접촉하는 부분으로 사용하였다. 적출력 실험에서 얻은 결과값과 같은 무게를 식물에 걸어서 식물을 그리퍼로 집고 식물이 핑거에서 미끄러지지 않으며 식물에 손상이 가지 않는 최소한의 힘으로 집었을 때 그때의 힘을 계측하였다.

2.3. 하드웨어의 설계

본 연구의 하드웨어의 구성은 소프트 그리퍼와 그리퍼를 상하 수직운동을 할 수 있게 하는 Z축 이동장치로 구성된다. 먼저 그림 2에서 보는 바와 같이 그리퍼는 동력전달부, 핑거부, 식물과의 접촉부로 구성되었다. 동력전달부는 모터축 연장선에 오른 나사산과 왼 나사산이 나있는 볼트 스크류를 연결하여 모터의 회전운동을 평행-집게운동으로 변환한다. 핑거부는 식물체를 집는 역할과 집으며 식물에 가해지는 악력을 계측하는 역할을 한다. 식물접촉부는 식물을 배양용기에서 적출할 때 식물에 손상이 가지않고 식물이 미끄러지지않으며 부드럽고 식물과의 마찰계수가 큰 재질을 사용하였다. 그림 3은 식물접촉부의 구성도를 나타낸 것이다.

또한 Z축은 식물을 배양용기에서 적출하는 역할을 한다. 본 연구에서는 그리퍼 및 Z축의 구동원인 스텝핑 모터 2개, 모터에 펄스를 보내는 모터 드라이버 2개, 2축 제어용 모터 인터페이스 보드, 핑거부에 장착되어 악력을 측정할 수 있는 스트레인 게이지, 스트레인 앰플리파이어, A/D 변환기 등을 사용하였다. 그림 4는 그리퍼 제어 및 계측시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

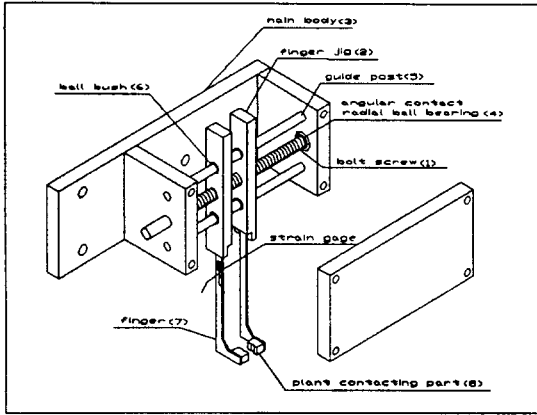


Fig. 2 Schematic diagram of a soft gripper

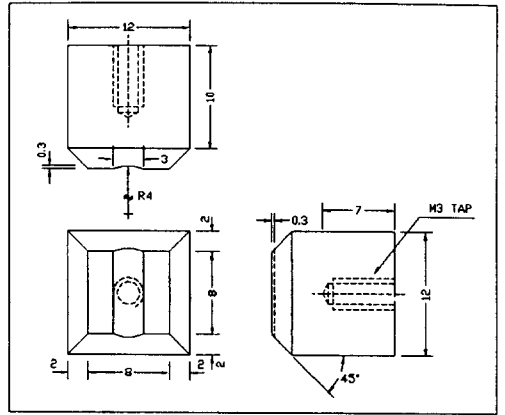


Fig. 3 Schematic diagram of plant contacting part

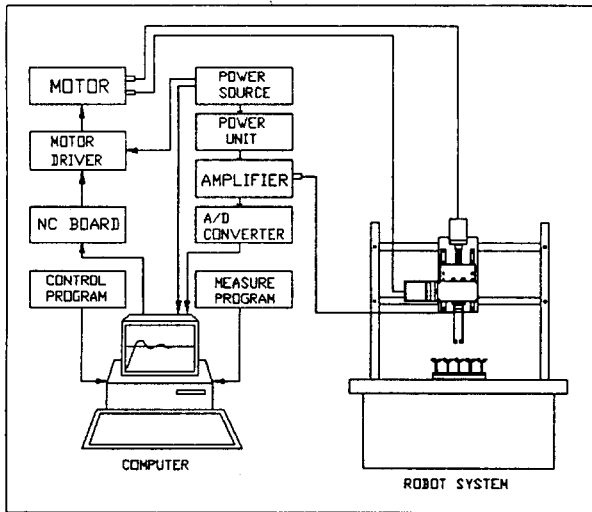


Fig. 4 Schematic diagram of control system of gripper

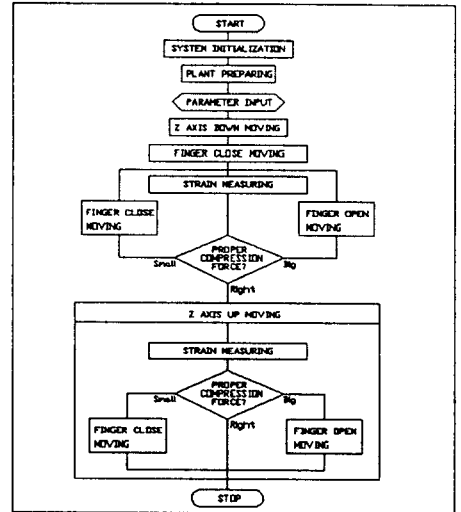


Fig. 5 The flow-chart of control program of soft gripper

2.4. 소프트웨어의 설계

본 연구의 제어 프로그램은 Microsoft社의 Basic V7.1 언어로 개발되었다. 이 프로그램은 본 연구에 사용된 그리퍼 및 Z축 구동용 모터의 구동과 스트레인 측정장치를 연결하여 동작할 수 있도록 개발되었다. 그림 5의 제어 프로그램의 순서도에서 보듯이, 먼저 시스템을 초기화한 후, 식물을 그리퍼 시스템에 위치시킨다. 배양묘를 배양액에서 적출할 기본 데이터(집을 위치, 작동 속도, 적정 압력 등)를 입력받은 후 Z축이 하향하여 집을 위치에 다다르면 그리퍼가 식물을 집으며 압축하기 시작한다.

그리퍼가 미리 설정해는 적정 압력이 될 때까지 식물을 압축한 후 Z축의 상향운동으로 식물을 배양액에서 적출한다. 이때, 그리퍼 핑거의 압력이 달라질 수 있으므로 완전히 적출될 때까지 그리퍼의 계측부에서 센싱하여 압력의 강약을 조절한다. 그리퍼의 계측부에서는 압력이 변하면 적정 압력과 계측값과의 편차만큼을 모터 회전각도로 환산하여 압력을 조절하면서 식물을 적출하도록 제어하였다.

2.5. 그리퍼 성능 실험

식물을 집기위한 그리퍼의 작동조건은 먼저 식물에 손상이 가지 않게하며, 배양액에서 적출할 때 식물이 핑거에서 미끄러지거나 끊어지지 않고 배지에서 성공적으로 식물을 적출하여야 한다.

먼저, 그리퍼 시스템의 조립상 문제점이나 모터의 회전시 장치의 구동을 체크하였다.

실제 대상작물에의 적용은 배양용기에서 배양된 식물을 그리퍼 시스템에 위치시켜 그리퍼가 제어 프로그램에 의해 정확히 적정 악력으로 식물을 집을 수 있도록 제어되었는가와, 식물 적출시 식물 줄기를 집고있는 악력이 변화할 수 있기 때문에, 적정 악력을 유지하면서 식물에 손상을 주지않고 그리퍼에서 식물이 미끄러지지 않게 용기에서 적출되도록 제어되었는가를 실험하였다.

그림 6은 그리퍼 제어실험을 하고 있는 모습이며, 그림 7에서는 실험 중인 그리퍼 시스템의 모습을 보여주고 있다.



Fig. 6 The picture of gripper in the control experiment

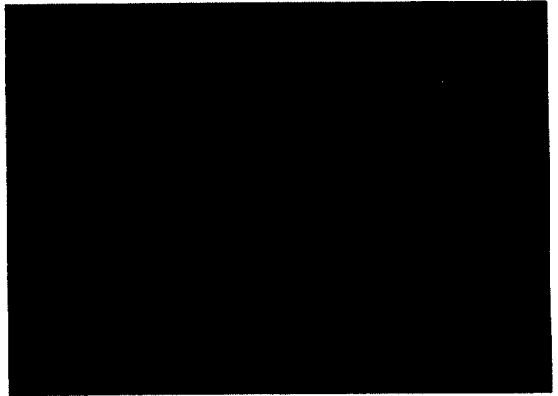


Fig. 7 The picture of soft gripper system in the experiment

3. 결과 및 고찰

3.1. 기초실험 결과

배양체 줄기부의 기하학적 특성의 조사는 조직배양으로 생성된 인공씨감자 줄기부를 채취하여 각 도기와 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 줄기부의 기하학적 특성인 줄기 직경, 마디간격, 기울어진 각도 등을 조사하였다. 표 1은 대상작물의 기하학적 특성을 평균, 표준편차, 최대치, 최소치로 나타낸 것이다. 표 1에서 살펴보면, 그리퍼가 집을 수 있는 줄기부분은 뿌리부 근처로써 첫 번째 마디간격, 배지수면과 첫 번째 가지사이가 된다. 이곳의 간격을 보면 10.54mm와 10.13mm의 값이 나오기 때문에 안전율을 고려하여 8mm의 폭으로 식물을 집도록 식물 접촉부를 설계하였다.

또한 식물의 기울어진 각도가 평균 5.26° 인 것을 고려할 때, 식물의 기울어짐은 그리퍼의 작동에 그다지 크게 작용하지 않는 것으로 사료되기 때문에 식물 접촉부 설계시 고려사항에서 제외하였다.

줄기부 압축강도 측정결과는 표 2에서 보는바와 같이 뿌리부 평균 압축강도는 3.47N이었고, 최대 압축강도는 5.14N, 최소 압축강도는 1.71N 으로 나타났다.

배양체 적출 실험에서는 표 3에서 보는 바와 같이 적출력의 평균은 0.13N, 표준편차는 0.09, 최대치는 0.40N, 최소치는 0.03N으로 나타났다. 따라서, 그리퍼 핑거의 적정 악력 측정 실험에서는 적출력의 최대치 보다 큰 0.41N (42g)을 식물 밑 끝에 걸어 적정 악력을 측정하였다.

결과를 살펴볼 때 적출력은 뿌리부의 줄기직경, 식물의 길이, 묻힌 깊이등과는 상관관계가 있지 않은 것으로 나타났으며, 뿌리의 길이와 개수, 뿌리끼리의 얽힘, 뿌리부의 용기와와의 부착성 등이 적출력의 크기를 좌우하는 것으로 나타났다.¹⁵⁾ 따라서 식물 뿌리끼리의 간섭이나 뒤얽힘이 없이 배양한다면 적출력의 크기가 작아지리라 사료된다.

Table 1 Geometric quality of the tissue culture plant stem

Item	Quality			
	mean	S. D	max.	min.
Distance between a branch and its neighboring branch (mm)	10.54	4.22	20.1	3.3
Distance between agar surface and the first branch up from the agar surface (mm)	10.13	3.64	20.35	3.65
Angle of plant incline (°)	5.26	2.84	10.5	0
Stem diameter(near root) (mm)	2.03	0.34	2.90	1.40

Table 2 The results of diameter and compressive strength in each part

parts	diameter (mm)				compressive force (N)			
	mean	S.D.	max.	min.	mean	S.D.	max.	min.
near root	2.03	0.34	2.90	1.40	3.47	2.16	5.14	1.71
stem	1.76	0.32	2.35	1.30	2.04	0.59	3.04	0.87
branch	1.14	0.16	1.40	0.80	1.35	0.44	2.20	0.72
upper stem	1.47	0.23	1.90	1.00	1.66	0.57	2.81	1.13
all	1.60	0.43	2.90	0.80	2.13	1.43	5.14	0.72

Table 3 The result of test measuring extractive force

Item	Mean	S.D.	Max.	Min.
extractive force (N)	0.13	0.09	0.40	0.03

Table 4 The result of measuring proper gripping force of tissue culture plant stem by each material of plant contacting part (unit : N)

Material	Mean	S. D.	Max.	Min.
Rubber	0.34	0.04	0.46	0.29
Cork	0.38	0.03	0.44	0.33
Silicone	0.29	0.03	0.34	0.25

Table 5 The correlation analysis between stem diameter and proper gripping force by each material of plant contacting part($\alpha = 0.05$)

Item	Sample number	R	t_0	$t(n-2; \alpha)$
Rubber	65	-0.2160	-0.9644	2.101
Cork	65	-0.2884	-1.2781	2.101
Silicone	65	0.3850	1.7700	2.101

그리퍼의 적정 악력 측정 실험에서는 그리퍼 핑거의 끝에 식물과의 접촉부분을 따로 설계하여 부착한 후 식물의 적정 악력을 분석하는데 사용하였다. 식물 접촉부를 고무, 코르크, 실리콘 등의 재질을 사용하여 실험한 결과가 표 4에 나타나 있다. 표 4에서 살펴보면 고무(지우개용) 재질을 사용할 때 적정 악력이 평균 0.34N이고, 코르크 재질을 사용하였을때 적정 악력이 평균 0.38N, 실리콘 재질을 사용하였을때 적정 악력이 평균 0.29N 으로 나타났다. 따라서 이 결과를 토대로 식물과의 마찰이 가장 큰 재질이 실리콘 재질인 것으로 사료되며, 탄성에 있어서는 각각의 재질을 압축하고 놓았을 때 재질의 모양이 변하지 않으며 복원되는 성능이 실리콘 재질이 탁월하므로 실리콘 재질의 탄성이 3가지 재료중 가장 좋은 것으로 사료된다.

또한 식물 줄기직경과 적정 악력과의 상관관계를 95%의 신뢰도로 검정하였다. 표 5의 각 재료별 줄기직경과 적정 악력과의 상관분포에서 보듯이, 표본상관계수 R은 고무가 -0.2160, 코르크가 -0.2884, 실리콘이 -0.3850으로 나타났으며, t-분포 에서 t_0 의 값은 각각 -0.9644, -1.2781, 1.7700으로 나타나 t-분포표 결과인 2.101보다 t_0 값이 작기때문에 줄기직경과 적정 악력과의 관계에서는 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 따라서 식물과의 마찰계수가 가장 크며, 재질의 탄성이 가장 좋은 실리콘 재질을 식물접촉부로 선택하였으며, 적정 악력을 최대치보다 높은 0.343N (35gf)으로 설정하여 제어 프로그램에 사용한 후 그리퍼 성능 실험에 사용하였다.

3.2. 그리퍼 성능실험 분석결과

(1) 그리퍼 핑거의 배양체 줄기부 적정 악력 제어

그림 7에서 보는 바와 같이 그리퍼가 식물을 집을 때 적정 악력에 다다를 때 까지의 제어 궤적을 그래프로 나타내었다. 그리퍼 악력이 $0.343\text{N} \pm 6.86 \times 10^{-3}\text{N}$ 밖의 범위에서는 모터의 운동을 10° (0.083mm) 씩 제어하였고, $0.343\text{N} \pm 6.86 \times 10^{-3}\text{N}$ 사이에서는 3° (0.025mm) 씩 회전하도록 제어하여 적정 악력 범위인 $0.343\text{N} \pm 2.94 \times 10^{-3}\text{N}$ 사이에 정확히 도달하도록 제어하였다. 모터의 제어각도는 계측하기 시작한 순간부터 250° 에서 430° 범위를 제어하였다.

(2) 배양체 적출시 그리퍼 핑거의 악력 제어

그리퍼가 식물을 배양액에서 적출할 때 악력이 변할 수 있으므로 그리퍼가 배양체 줄기부를 배양 용기에서 적출할 때 그리퍼의 악력을 계측하여 식물이 그리퍼에서 미끄러지거나 손상되는 일이 없도록 하였다.

적정 악력 범위인 $0.343\text{N} \pm 2.94 \times 10^{-3}\text{N}$ 이상 벗어난 경우에는 모터의 회전을 벗어난 악력만큼 모터의 회전 각도로 환산한 후 방향을 설정하여 그리퍼 동력 모터가 회전하게 하여 적출하였고, $2.94 \times 10^{-3}\text{N}$ 미만일 경우에는 적정 악력으로 간주하여 그리퍼 동력 모터의 회전을 멈추고 적출 작업을 계속하였다.

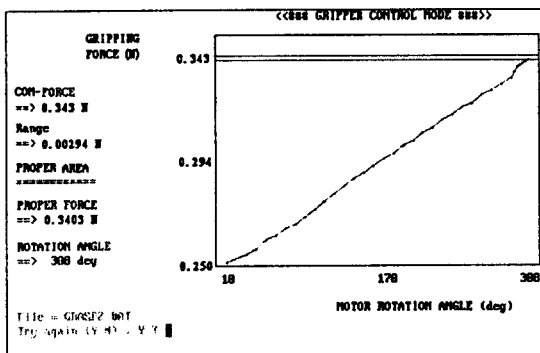


Fig. 7 The result of gripping control during the gripping

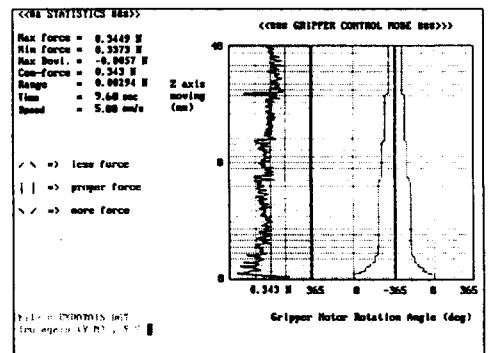


Fig. 8 The result of gripping control during the extraction

배양체를 적출할 때의 그리퍼 상향속도는 5mm/s 로 일정하게 하였고, 제어 시간 간격은 0.05sec 로 하였으며, 배양체를 배양용기에서 완전히 적출할 때까지 상향을 계속하였다. 그림 8은 그리퍼 핑거가 배양체 줄기부를 적출할 때 힘의 측정값(왼쪽)과 그리퍼 모터의 운동(오른쪽) 궤적(각도)을 나타낸 결과의 한 예를 보여주고 있다. 처음 적출시에는 적정 악력범위의 상하범위로 악력을 조절하며 적출하다가 배양체 줄기부의 리올러지 특성인 시간-변형사이의 관계¹⁰⁾에 의하여 같은 힘임에도 불구하고 적출이 끝났을 때 모터는 처음 위치에서 (-)방향, 즉 그리퍼 핑거사이를 더 근접시킨 위치에서 배양체 줄기부를 집고있는 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

조직배양체를 증식하는 과정이나 포트에 이식하는 과정에서 식물을 집고, 이식하는 장치는 필수적인 요소이다. 따라서 본 연구에서는 대상작물의 줄기부 강성과 비슷한 재질로 만든 핑거부로 식물을 집으면서 식물에 가한 힘을 측정하여 식물줄기부에 손상을 주지 않는 범위에서 식물을 집고 이식작업을 할 수 있는 조직배양체 이식을 위한 소프트 그리퍼를 개발하였다.

본 연구에서는 대상작물의 기하학적 특성, 줄기부의 압축강도 측정, 줄기부를 배양액으로부터 뽑을 때 소요되는 적출력 측정, 그리퍼 핑거의 적정 악력등의 기초 실험을 통하여 소프트 그리퍼의 형상 및 제어 인자를 설정하였으며, 그리퍼 제어 및 성능실험을 통하여 개발된 그리퍼의 성능을 검증하였다. 본 연구에서 그리퍼 구동 모터의 회전각도별 스트레인의 변화는 모터 10° 회전당 $2.94 \times 10^{-3} \text{N}$ 이었고, 이에따라 제어를 하였다. 실제 대상작물에의 적용에서는 70개의 조직배양체를 용기에서 적출해본 결과 54개가 완벽하게 용기에서 적출되었고, 16개는 뿌리끼리의 얽힘으로 인하여 다른 배양체까지 딸려 올라오는 결과를 냈다. 또한, 배양체 줄기를 적출한 후 그리퍼와 접촉한 식물 줄기부분을 육안으로 검사해본 결과 줄기부의 손상이나 꺾임등이 나타나지 않았다. 따라서 본 시스템은 조직배양체 이식에 매우 적절하다고 사료된다.

이상의 실험결과를 종합하면, 본 연구에서 사용된 그리퍼에서 식물 접촉부를 실리콘 재질로 하였을 때 줄기부 적정 악력은 0.343N (35gr)정도이며, 배양용기 안의 배양체가 심겨있는 밀도를 줄이거나, 이식시기를 조절한다면 식물에 손상이 가지않는 범위에서 100%의 이식율을 낼것으로 사료되며, 실용화가 충분히 가능할 것으로 사료된다.

5. 참고 문헌

- Huang, B. K. and F. Ai. 1990. Air-pruned transplant production system for fully automated transplanting. ACTA Horticulture : 523-528
- Kim, K. D and Takayuki Kojima. 1996. Dvelopment of an automatic system for a vegetable factory. Journal of the Japaness society for agricultural machinery 45 : 22-25
- Watake, Hiroaki and Atsushi Kinase. 1990. Robot for plant tissue culture. Robot No.64 : 74-79
- Simonton, W. 1990. Automatic geranium stock processing in a robotic workcell. ASAE Vol.33(6) : 2074-2080
- Yang, Y., K. C. Ting and G. A. Giacomelli. 1991. Factors affecting performance of sliding-needles gripper during robotic transplanting of seedling. ASAE Vol.7(6) : 493-498
- 류관희 외. 1996. 생물생산을 위한 지능로봇 공학. 문운당
- 문정기. 1996. 소식물체 생산 자동화 기술개발(1) -연구보고서-. 한국기계연구원
- 이현동, 김기대, 문정기. 1997. 조직배양체 이식을 위한 소프트 그리퍼의 개발; 조직배양체 줄기의 압축시험. 한국농업기계학회 동계학술대회 논문집 : 81-87
- 정재동. 1988. 식물 조직배양 입문. 정원출판사
- 허윤근. 1987. 수도의 역학적 및 리올러지 특성에 관한 연구. 충북대학교 대학원