

GOVP1200201376

634.115  
L293 2

최 종  
연구보고서

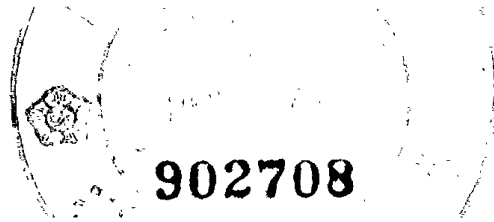
19

# 자율이동 다관절 과실(사과) 수확 로봇 개발

Development of multi knuckle apple harvesting robot

경북대학교

농 립 부



902708

[별지 제7호 서식]

## 최 종 보 고 서

1999 년도 농림기술개발사업에 의하여 완료한 자율이동 다관절 과실(사과) 수확  
로봇 개발에 관한 연구의 최종보고서를 별첨과 같이 제출합니다.

첨부 : 1. 최종보고서 10부

2. 최종보고서 디스켓 1매

2001 년 9 월 28 일

주관연구기관 : 경북대학교

총괄연구책임자 : 장 익 주 (인)

주관연구기관장 :

직 인

농 립 부 장 관 귀 하

# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “자율이동 다관절 과실(사과) 수확 로봇 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2001년 9 월 28일

주관연구기관명 : 경북대학교

총괄연구책임자 : 장 익 주

세부연구책임자 : 장 익 주

연 구 원 : 팽 정 수

연 구 원 : 김 차 현

연 구 원 : 유 경 선

연 구 원 : 정 종 인

# 요 약 문

## I. 제 목

자율이동 다관절 과실(사과) 수확 로봇 개발

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

우리나라 산업 가운데서 농업이 차지하는 비중은 낮지만 사회 경제적으로 농업의 중요성을 감안할 때 앞으로 더욱 발전시켜야 할 분야이다. 더욱이 1995년 WTO 체제 발족으로 모든 산업이 무한 경쟁을 하지 않을 수 없게 된 가운데 농촌인구의 급격한 감소, 노임의 상승, 농작업 기피현상 등이 국내 농업발전을 저해하는 커다란 요인이 되고 있다. 농가인구의 경우 1994년 5,167천명(총인구의 11.6%)에서 2001년에는 2,423천명(5.1%)으로 급격히 감소되고 노령화와 부녀화 추세가 더욱 가속화 될 전망이며 이와 같은 여건 속에서 농업이 경쟁력을 갖추기 위해서는 생산비를 절감하고 품질을 향상시켜야 한다.

농산물의 가격은 국제 경쟁력뿐만 아니라 국내 경쟁에서도 큰 문제가 되고 있다. 특히 농산물의 종류에 따라서는 노동이 가격에 큰 영향을 미치고 있다. 우리나라는 특히 노동력이 가격결정에 큰 영향을 미치고 있는 나라중의 하나이다. 우리나라 수도작의 경우는 단위 면적당의 노동시간은 농업기계화에 의해서 상당히 감소하였고, 특히 대면적의 생산비는 감소하였다고 볼 수 있다. 그러나 과수는 꽤 많은 시간을 요하므로 전생산비의 60%전후의 큰 노동비가 차지하고 있다. 따라서 노동생산비를 감소시키기 위하여 정밀작업이 가능한 농업용 로봇을 개발하고자 농업기계분야에서는 많은 연구를 하고 있다.

본 연구에서는 노동집약적인 과수경영의 규모확대와 생산성 향상 및 우리나라 과수산업의 국제경쟁력강화를 위하여 노동력 절감문제를 농업기계화를 통하여 접근하고자 과수원 작업 중 종래의 기계화 방법으로는 작업이 불가능한 수확 작업에 대하여 메카트로닉스 기술을 활용하여 무인작업이 가능한 로봇을 개발하고자 하였다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

개발하고자하는 자율이동 다관절 과실(사과) 수확 로봇은 화상처리에 의한 수형 분석이 가능하며, 작업 필드 내에 있는 과실을 선별 수확 할 수 있고, 화상처리를 이용하여 수확하기 가장 좋은 위치와 경로를 고속으로 알아내는 인공지능의 과실 수확 로봇을 개발하는데 최종 목표를 두고 본 연구에서는 다관절 과실(사과) 수확 로봇의 매니퓰레이터와 로봇의 이동이 가능한 주행차량을 개발하였고, 로봇의 제어장치와 과실 인식장치를 개발하였다.

3년 간 추진한 본 연구의 구체적인 연구 내용은 다음과 같다.

1. 사과수확 로봇의 매니퓰레이터의 개발
2. 사과수확 로봇의 주행차량 개발
3. 사과수확 로봇의 제어장치 개발
4. 화상처리에 의한 사과의 인식 알고리즘 개발

상기의 연구 내용에 의거하여 수행된 연구 범위는 다음과 같다.

1. 사과수확 로봇의 매니퓰레이터는 10축 수직 다관절 로봇으로서 잎, 가지 등의 장애물을 회피할 수 있는 고능률의 사과 수확 로봇의 매니퓰레이터이다. 구동제원과 작동범위를 충분히 고려하여 제작하였다.
2. 사과수확 로봇의 주행차량은 작동거리가 큰 매니퓰레이터를 장착하므로 수확작업 시 차체의 흔들림, 로봇의 하중, 밸런스 등을 고려하여 제작하였으며, 로봇의 전원공급을 위한 발전기가 장착되어있고, 무인화가 가능하도록 모든 조작장치는 유압구동 되며 원격조작이 되도록 제작하였다.
3. 사과수확 로봇의 제어장치는 CCD 카메라를 이용하여 수확대상물인 사과를 인식하고, 화상처리에 의해 목표물의 3차원 위치를 출력하는 화상 처리부와 목표물의 위치에 따라 관절의 적정 위치를 결정하는 메인 컨트롤러, 결정된 위치 지령에 의해 필요한 회전 속도와 토크를 결정하고 이에 따라 각각의 모터에 구동 전압을 출력하기 위한 서보 컨트롤러 및 DC모터 제어 드라이브로 구성되어 있으며 화상처리부 이외의 장치는 실용화를 고려하여 본 연구에서 직접 개발하였다.
4. 화상처리에 의한 사과인식 알고리즘 개발 - 사과의 인식과정은 컴퓨터에 의해서 처리가 가능하도록 CCD 카메라로부터 화상을 입력받아서 아날로그 데이터를 디지

털 데이터로 바꾸었다. 디지털화 된 화상에서 사과 인식 알고리즘을 사용하여 사과의 2차원 좌표를 구하고, 사과의 특징값 계산과 위치 보정을 위해서 다치화상을 이치화한 후에 라벨링(labeling)하였다. 디지털화 된 화상은 데이터량이 많으므로 처리 시간을 많이 요구한다. 이를 해결하기 위해서 사과의 인식과정을 거친 검색과 정밀 검색으로 나누어 실행하였으며 새로운 색좌표 함수를 사용하여 데이터량을 줄였다. 사과의 3차원 위치를 구하기 위해서 한 대의 카메라로 서로 다른 위치에서 입력한 2개의 화상을 이용한 스테레오(stereo)화상기법을 사용하였다. 본 연구에서는 사과 수확에 사과의 크기와 속도 및 3차원 위치를 정확히 알 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

##### 1. 연구개발 결과

##### 가. 사과 수확 로봇의 매니플레이터 개발

- 1) 수직 다관절 사과 수확 로봇은 베이스 선회, 제1아암의 회전, 제2아암의 회전 및 선회, 제3아암의 회전 및 선회, 종단관절의 회전 및 선회, 수확 hand로 구성되어 있다.
- 2) 로봇의 축간거리와 무게는 베이스 높이 - 780mm, 270kg, 제1아암 - 570mm, 16kg, 제2아암 - 870mm, 32kg, 제3아암 - 490mm, 7kg, 종단관절 아암과 hand - 440mm, 5kg이고 총 중량은 330kg이다.
- 3) 로봇의 작동범위의 각도는 베이스 선회 - 270° , 제1아암의 회전 - 전방45° , 후방 45° , 제2아암의 회전 - 상향 45° , 하향 45° , 제2아암의 선회 - 270° , 제3아암의 회전 - 상향135° , 하향 135° , 제3아암의 선회 - 270° , 종단관절 아암의 회전 - 상향 135° , 하향 135° , 종단관절 아암의 선회 - 270° 이다.
- 4) 로봇의 작동 범위의 거리는 수평거리 860 ~ 2220mm, 수직거리 1440 ~ 2260mm, 선회각도 270° , 회전각도 90° , 270° 이다.

#### 나. 사과 수확 로봇의 주행차량 개발

- 1) 본 차량은 자율이동 농업기계장치의 무인 자동화와 로봇의 실용화를 앞당기는 목적으로 다관절 과실 수확 로봇 연구의 일환으로 제작되었다. 습지나 연약 지반에서도 주행성이 좋은 무한궤도 방식을 채택하였으며, 수확로봇의 장착 및 전원공급 등의 기능을 수행한다.
- 2) 전체 배치는 중심부에 로봇을 장착, 차량의 좌측에 단자함, 컨트롤박스, 전원부, 모니터, 발전기, 우측에 배터리, 유압펌프 그리고 사과상자의 공간을 확보하였다. 또한 다관절 과실 수확 로봇의 전면에 연료탱크, 로봇제어장치, 영상처리 컴퓨터 등을 두었으며 다관절 과실 수확 로봇의 오작동으로 인한 제어장치, 컴퓨터의 손상을 줄이기 위해 별도의 케이스를 제작하였다.
- 3) 67V, 42V, 24V의 직류전압의 출력의 얻는 전원부 회로를 구성하여 각각 모터 구동전압-(67V, 24V), 브레이크 구동전압-(24V, 12V), DC 브러쉬·서보 모터-(67V) 등에 사용하도록 하였다.
- 4) 3600rpm에서 240V를 얻는 발전기를 장착하였으며 사용되는 발전기 풀리 외경은  $\varnothing 82\text{mm}$ 가 되며 2가닥의 B형 V벨트를 장착하였다.
- 5) 컨트롤 박스를 제작하여 차량의 조작성을 용이하게 했으며 모니터와 같이 수확 로봇의 작업과 관련된 장비와 동일한 위치에 설치함으로써 작업자의 편의를 도모하였다.
- 6) 차량의 제어 부분은 유압회로로 구성하였고 총 10개의 실린더를 사용, 제각기 차량의 구동부분에 필요한 변속장치, 조향장치 등에 적용하였다.
- 7) 유압회로의 경우 높은 압력을 사용하지 않기 때문에 액츄에이터 등의 유압 관련부품의 선정 시 유체의 체적감소나 압력에 의한 점도 변화는 고려하지 않고 압력 강하만 고려하였으며 각 제어부분마다 적절한 크기의 실린더와 펌프, 유압탱크 등을 선정하였다.

#### 다. 사과 수확 로봇의 제어장치 개발

- 1) 모터는 정격토크  $22.3\text{kgf} \cdot \text{cm}$ , 순간 기동토크  $112.0\text{kgf} \cdot \text{cm}$ 인 400W급 컵 모터



를 사용하였으며, 제어 가능한 회전수는 10-1400rpm으로 하고, 22.3kgf·cm까지의 부하 변동에도 일정 속도를 유지할 수 있도록 시스템을 설계하였다. 시험부하는 로터의 27배 관성을 가진 주철제 풀리를 사용하였다.

- 2) 구동 회로의 스위칭 작용이 제어 회로에 간섭하는 현상을 막기 위해 구동부와 제어 회로부의 전원을 분리하고, 모터의 용량을 감안하여 별도의 구동부 전원을 제작하였다.
- 3) 속도와 토크의 정확한 제어를 위해 속도 검출신호와 전류 검출신호를 피드백하는 폐루프 시스템을 구성하였으며, 속도 제어루프에 토크 제어루프를 삽입하여 응답성과 안정성을 높이도록 하였다.
- 4) Gate driver는 포토 커플러를 사용하여 구동부와 절연하였으며, 순간 최대 전류에 대하여 70% 이상의 여유 용량을 가진 IGBT를 사용하여 과전류 보호기능을 가진 H 브리지를 구성하였다.
- 5) 최저 및 최고 제어 회전수에서의 PWM 듀티비를 측정한 결과 약 10%의 오버슈트가 있으나, 듀티비는 51%와 73%로 입력 전압에 비례함을 알 수 있었다. 또한 주요 출력부 12곳의 파형을 측정한 결과, 속도 지령에 따라 잘 추종됨을 확인하였다.
- 6) 회전수를 0에서 1400rpm으로 출력하도록 하는 속도 지령의 스텝입력에 대한 무부하에서의 응답 시간은 250ms로서 근사적으로 계산한 값과 잘 일치하였다.

라. 화상처리에 의한 사과 인식 알고리즘 개발

1) 새로운 색좌표 함수  $X = \frac{R - G + 256}{2}$  으로 사과를 인식할 수 있었다.

2) 상관계수법과 SSDA법을 사용한 형판정합(Template Matching)으로 사과의 2차원 좌표를 구하였다. 인식된 사과의 좌표는 실제의 사과와 최대 6 pixel 이내의 오차였다.

3) 사과의 검색 과정을 거친검색과 정밀검색으로 나누어서 검색시간과 데이터량을 줄였으며, CPU클럭 40MHz인 486-DX 컴퓨터를 사용하였을 때 한 개의

입력화상의 처리시간은 평균 2.5초 이내였다.

- 4) 이치화상의 라벨링으로 사과 의 원형도, 중심위치, 크기 등의 특징 값을 수치화했으며, 화상을 평활화하여 화상에 존재하는 잡음성분을 제거하였다.
- 5) 컬러화상의 재귀적 역치처리(recursive thresholding)를 사용하여 가지와 잎을 검출했으며 하늘을 구분했다. 또한 화상의 모멘트 특징을 사용하여 장애물의 위치와 방향을 결정했다.
- 6) 2개의 입력화상으로 스테레오 화상처리를 하여 사과의 3차원 위치를 구할 수 있었다.

## 2. 활용에 대한 건의

가. 개발된 다관절 사과 수확 로봇은 현장에 보급할 경우 시스템의 효율적인 운용을 위한 현장 적응 연구 검토가 필요함.

나. 특허출원 등 지적 재산권 확보가 될 때까지 보안이 필요.

# SUMMARY

## I .TITLE

Development of multi knuckle apple harvesting robot.

## II. PURPOSE OF STUDY and IMPORTANCE

Even though agriculture is not main industry of korea. That must improve considering importance of agriculture in terms of economic situation. Thus domestic agriculture is getting worse since W.T.O started in 1995. Especially lack of labor force, aging and high labor cost make bad effect on agriculture structure under unlimited competitive area. Looking into agricultural population reduced from 5 millions in 1994 to 2.4 millions in 2001. To survive and grow competitiveness under those disadvantages, cost down and improving quality are the only the way.

In case of rice farming, labor cost cut downed a lot by introducing agricultural machines. Labor cost dominate 60 % of total production cost in the orchard. Therefore developing agricultural robot is required for cost down. In this study is to develop unmaned control robot used by mechatronics technology for saving labor cost.

## III. CONTENTS OF STUDY and RANGE

Multi knuckles robot is able to recognize fruit in the working field. The final purpose of developing robot function is to figure out the best root and position to pick the fruits. Result from this study, robot driving system, manipulator, robot controller and fruit recognizer are developed.

The content of study for 3 years are belows.

- A. Apple harvesting robot manipulator.
- B. Apple harvesting robot driving system.
- C. Apple harvesting robot control system.

D. Apple recognition algorithm using image processing.

More details are followings.

- A. The manipulator of apple harvesting robot has 10 knuckles which make it possible for robot to efficiently avoid obstacles. such as leaves, branches and so on. That is developed by considering operation range and specification.
- B. Driving system is developed by considering vibration, weight and balance due to long range operating manipulator. Power generator is installed. All of controllers are designed to be able to remote control and hydraulic operation.
- C. Apple harvesting robot control system is able to recognize apple by CCD camera. The position of apple is decided by main controller. Servo controller and DC servo motor controller make decide RPM and torque for each motor.
- d. Development of apple recognition algorithm using image processing. An algorithm of apple recognition was developed using digital image information received through CCD camera. Input image was binarized and labeled to calculate characteristic value of image and position calibration.

Scanning apple was divided into both rough and detail scanning in order to reduce data size and required time. To get 3d position of apple using stereo method. The algorithm is developed from this study which is able to recognize apple size, mature status and accurate 3d position.

#### IV. RESULTS

- 1. Development of manipulator for vertically moving multi-knuckle apple harvesting robot
  - A. The robot's movements consist of base rotation, first knuckle arm rotation, second knuckle arm turn and rotation, third knuckle arm turn and rotation, last knuckle turn and rotation and hand movement.
  - B. Axis distance and weights are :

base - 780mm, 270kg, first knuckle arm - 570mm, 16kg, second knuckle arm - 870mm, 32kg, third knuckle arm - 490mm, 7kg, last knuckle arm and hand - 440mm, 5kg respectively and 330kg total.

C. Angular ranges robot movements are :

base turn - 270 degrees, first knuckle arm rotation - forward 45 degrees and backward 45 degrees, second knuckle arm rotation - upward 45 degrees and downward 45 degrees, third knuckle arm rotation - upward 135 degrees and downward 135 degrees, third knuckle arm turn - 270 degrees, last knuckle arm rotation - upward 135 degrees and downward 135 degrees and last knuckle arm turn - 270 degrees, respectively.

D. Total robot movement ranges are vertical : from 860mm to 2220mm, horizontal : from 1440mm to 2260mm, turn angle 270 degrees and rotation angle 90 degrees or 270 degrees, respectively.

2. Development of device for multi-knuckle apple-picking robot vehicle

A. General layout is :

Apple picking machine on the center, terminal box, control box, power supply, monitor and generator on the left side of the vehicle, battery, hydraulic pump and apple container on the right side of the vehicle, fuel tank, robot control unit and image processing computer on the front. Further, as a protective measure for computer malfunction, control units and computer are surrounded by an additional metal housing.

B. The power supply was designed to let out three different voltages :

67V and 24V for activating motors.

24V and 12V for engaging brakes.

67V for servo-motors and DC brush motors.

C. The generator lets out 240V at 3600rpm, utilizes 82 diameter pulley with two B-type V belts.

D. The control box facilitates manipulation of the vehicle. Plus, well organized allocation of control units for the apple picking robot with monitors and related equipments are very friendly and convenient for the operator.

E. Control unit for the vehicle is made up of hydraulic circuits. ten hydraulic cylinders constitute dynamic components, such as transmission and steering system.

F. Since the active hydraulic pressure in this unit is not really high, decrement of fluid volume and variation of viscosity were not considered. However, decrement of the pressure was carefully applied for hydraulic pressure related parts. Appropriate capacities of cylinders, pumps and tanks were selected by considering every single condition of control units.

### 3. Development of the Servo control system for the Apple harvesting robot

#### A. Property of the cup motor used in the system:

Rated torque 22.3kgf · cm, Inst. max. torque 112.0kgf · cm, Rated output 400W. System has been designed in a way it can provide a stable control over rotation range 10 to 1,400 rpm and load fluctuation up to 22.3kgf · cm. The system has been tested with cast iron pulley which had inertia 27 times bigger than the rotor's.

B. Power suppliers for driving part and control circuit have been separated so that switching action in the driving part would not affect control circuit's function. Plus, an individual power supplier was designed in consideration of motor's capacity.

C. Closed loop system which feeds back velocity signals and electric current signals has been used in order to ensure control accuracy over velocity and torque. Velocity control loop has built-in torque control loop so as to enhance system responsiveness and stability.

D. Gate driver was insulated from driving devices using photo coupler. And it

has H bridge format with IGBT which has over 70 percent surplus capacity against the instantaneous maximum electric current.

E. PWM duty ratio test at minimum and maximum rpm showed overshoot by 10%. However, this duty ratio - 51 and 73 percent - was proportional to incoming voltage. Waveform test on 12 main output points indicated that they are well advised by the velocity commands.

F. For step input of the velocity command which requires rpm output to be between zero and 1,400, step response time in no-load running was 250ms which corresponds to the approximately calculated value.

#### 4. Development of Apple Recognition Algorithm Using Image-processing

A. The algorithm developed in the study recognized an apple with new color decision function  $X=(R-G+256)/2$ .

B. With both rough and detail scanning, the algorithm reduced image data size to scan and time required.

C. By using binary image labeled, apple recognition function calculated characteristic values of apple image and calibrated position of apple.

D. By recursive thresholding on color image, obstacles was detected, and with moment characteristic of binary apple image, the position and direction of obstacles was computed.

E. By using two images inputted in other position, shaking-method calculated 3d-position of apple.

# CONTENTS

Chapter 1. Introduction. ....	21
Chapter 2. Development of apple harvesting robot manipulator. ....	25
Section 1. Test equipment and method. ....	25
1. Configuration and motion plan. ....	25
2. Determination of driving specification. ....	28
A. Base Rotator. ....	29
B. First knuckle arm. ....	31
C. Second knuckle arm. ....	33
D. Third knuckle arm. ....	35
Section 2. Result and Investigation. ....	37
1. Base Rotator. ....	37
2. First knuckle arm. ....	40
3. Second knuckle arm. ....	42
4. Third knuckle arm. ....	43
5. Operating range of robot. ....	45
Chapter 3. Development of apple harvesting robot vehicle driving system. ....	46
Section 1. Consideration points of build up vehicle driving system. ....	46
Section 2. Configuration of driving system and selection. ....	46
1. Configuration of driving system and specification. ....	46
2. The selection of hydraulic system. ....	50
A. Hydraulic cylinder and pump selection. ....	53
1) Main clutch, generator clutch. ....	53
2) Transmission and steering system. ....	55



3) Left and Right supporter. ....	56
4) Hydraulic pump and tank selection. ....	57
B. Pressure drop of piping. ....	58
1) In line piping. ....	59
2) Serpentine piping. ....	60
Section 3. Configuration of power transmission. ....	61
Section 4. Development of power and generator selection. ....	63
1. Power and generator section. ....	63
2. Design generator pulley. ....	65
Section 5. Control box and development transmission. ....	69
Chapter 4. Development control system of apple harvesting robot. ....	73
Section 1. Material and method. ....	73
1. Configuration and motion plan. ....	73
A. Configuration range. ....	73
B. Configuration and design specification. ....	74
1) Motor and encoder. ....	74
2) Power voltage. ....	76
3) Control circuit. ....	76
C. Servo motor control system. ....	76
D. Summary of speed control circuit. ....	78
1) Speed feedback. ....	79
2) Current feedback. ....	79
3) Detection of RPM and direction. ....	79
4) PWM alteration and Dead time. ....	80
5) H bridge and power device. ....	82
2. Design control system. ....	84
A. Motor driving circuit. ....	84

1) DC motor. ....	84
2) Maximum driving current and power device. ....	88
3) Gate Driver. ....	89
B. PWM alteration circuit. ....	90
C. Dead time addition circuit. ....	90
D. Speed detecting circuit. ....	90
E. Speed control circuit. ....	92
F. Current detecting circuit. ....	92
G. Power Section. ....	92
3. Test method. ....	93
A. Test equipment. ....	93
B. Wave output test. ....	94
C. Speed input tracking test. ....	94
D. Step response test. ....	94
Section 2. Result and Investigation. ....	95
1. Wave output evaluation. ....	95
2. Steep input tracking evaluation. ....	100
3. Step response evaluation. ....	101
Chapter 5. Development of apple recognition algorithm using image-processing. ....	105
Section 1. Test method and equipment. ....	105
1. Test method. ....	105
2. Test equipment. ....	106
3. Decision of function in the color coordination. ....	107
4. Decision of function for apple recognition. ....	109
Section 2. Decision of apple's position in the 2 dimension. ....	111
1. Decision of 2 dimensional position. ....	111
2. Calculate center-position and direction of obstacles by using moment	

characteristic. ....	115
A. Apple image for binarization. ....	116
B. Equalized binary image for labeling. ....	118
C. Labeled binary image. ....	120
D. Calculate center-position and direction of obstacles by using moment characteristic. ....	121
Section 3. Obstacle detection. ....	123
1. Method for obstacle detection. ....	123
2. The center of obstacle and detecting direction. ....	125
Section 4. Decision of apple's position in the 3 dimension. ....	126
1. Geometry of stereo image. ....	127
2. Image processing by shaking method. ....	128
Chapter 6. Summary and conclusion. ....	130
Reference. ....	134

# 목 차

제1장 서론 .....	21
제2장 사과수확 로봇의 매니플레이터 개발 .....	25
제1절 실험 장치 및 방법 .....	25
1. 구성 및 동작 계획 .....	25
2. 구동제원의 결정 .....	28
가. 베이스 선회대 .....	29
나. 제1 아암 .....	31
다. 제2 아암 .....	33
라. 제3 아암 .....	35
제2절 결과 및 고찰 .....	37
1. 베이스 선회대 .....	37
2. 제1 아암 .....	40
3. 제2 아암 .....	42
4. 제3 아암 .....	43
5. 로봇의 작동 범위발 .....	45
제3장 사과수확 로봇의 주행차량 개발 .....	46
제1절 차량 제작의 고려 사항 .....	46
제2절 차량장치 구성 및 선정방법 .....	46
1. 장치 구성 및 제원 .....	46
2. 유압장치의 선정 방법 .....	50
가. 유압실린더 및 펌프의 선정 .....	53

1) 메인 클러치, 제너레이터 클러치 .....	53
2) 변속장치, 조향장치 .....	55
3) 좌, 우측 지지대 .....	56
4) 유압펌프 및 탱크의 선정 .....	57
나. 배관의 압력강하 .....	58
1) 직선 배관 .....	59
2) 변형 배관 .....	60
제3절 차량의 동력전달부 구성 .....	61
제4절 전원부와 발전부의 선정 및 개발 .....	63
1. 전원부와 발전부 .....	63
2. 발전기 폴리의 설계 .....	65
제5절 컨트롤 박스와 변속부의 개발 .....	69
제4장 사과수확 로봇관절의 서보 제어장치 개발 .....	73
제1절 재료 및 방법 .....	73
1. 구성 및 동작 계획 .....	73
가. 구성의 범위 .....	73
나. 구성 및 설계사양 .....	74
1) 모터 및 엔코더 .....	74
2) 전원 전압 .....	76
3) 제어회로 .....	76
다. 서보 모터 제어 시스템 .....	76
라. 속도 제어회로의 개요 .....	78
1) 속도 피드백 .....	79

2) 전류 피드백 .....	79
3) 회전 속도와 방향의 검출 .....	79
4) PWM 변조와 Dead Time .....	80
5) H 브리지와 파워 디바이스 .....	82
2. 제어 시스템 설계 .....	84
가. 모터 구동 회로 .....	84
1) DC 모터 .....	84
2) 최대 구동 전류와 파워 디바이스 .....	88
3) Gate Driver .....	89
가. PWM 변조회로 .....	90
나. Dead Time 부가회로 .....	90
다. 속도 검출회로 .....	90
라. 속도 제어회로 .....	92
마. 전류 검출회로 .....	92
바. 전원부 .....	92
3. 시험방법 .....	93
가. 시험 장비 .....	93
나. 파형 출력 시험 .....	94
다. 속도 입력 추종 시험 .....	94
라. 스텝응답 시험 .....	94
제2절 결과 및 고찰 .....	95
1. 파형 출력 평가 .....	95
2. 속도 입력 추종 평가 .....	100
3. 스텝응답 평가 .....	101

제5장 화상처리에 의한 사과 인식 알고리즘 개발 .....	105
제1절 실험 방법 및 장치 .....	105
1. 실험 방법 .....	105
2. 실험 장치 .....	106
3. 색좌표 함수 결정 .....	107
4. 사과의 인식함수 결정 .....	109
제2절 사과의 2차원 위치 결정 .....	111
1. 2차원 위치 결정 .....	111
2. 특징값 계산과 사과의 중심위치 보정 .....	115
가. 사과화상의 이치화 .....	116
나. 이치화상의 평활화 .....	118
다. 이치화상의 라벨링 .....	120
라. 사과의 특징값 계산과 중심위치 보정 .....	121
제3절 장애물 검출 .....	123
1. 장애물 검출 방법 .....	123
2. 장애물의 중심과 방향 검출 .....	125
제4절 사과의 3차원 위치 결정 .....	126
1. 스테레오 화상의 기하구조 .....	127
2. Shaking기법에 의한 스테레오 화상처리 .....	128
제5장 요약 및 결론 .....	130
참고문헌 .....	134

## 제1장 서론

우리나라 산업 가운데서 농업이 차지하는 비중은 낮지만 사회 경제적으로 농업의 중요성을 감안할 때 앞으로 더욱 발전시켜야 할 분야이다. 더욱이 1995년 WTO 체제 발족으로 모든 산업이 무한 경쟁을 하지 않을 수 없게 된 가운데 농촌인구의 급격한 감소, 노임의 상승, 농작업 기피현상 등이 국내 농업발전을 저해하는 커다란 요인이 되고 있다. 농가인구의 경우 1994년 5,167천명(총인구의 11.6%)에서 2001년에는 2,423천명(5.1%)으로 급격히 감소되고 노령화와 부녀화 추세가 더욱 가속화 될 전망이다. 이와 같은 여건 속에서 농업이 경쟁력을 갖추기 위해서는 생산비를 절감하고 품질을 향상시켜야 한다.

농산물의 가격은 국제 경쟁력뿐만 아니라 국내 경쟁에서도 큰 문제가 되고 있다. 특히 농산물의 종류에 따라서는 노동이 가격에 큰 영향을 미치고 있다. 우리나라는 특히 노동력이 가격결정에 큰 영향을 미치고 있는 나라중의 하나이다. 우리나라 수도작의 경우는 단위 면적당의 노동시간은 농업기계화에 의해서 상당히 감소하였고, 특히 대면적의 생산비는 감소하였다고 볼 수 있다. 그러나 과수는 꽤 많은 시간을 요하므로 전생산비의 60%전후의 큰 노동비가 차지하고 있다. 따라서 노동생산비를 감소시키기 위하여 정밀작업이 가능한 농업용 로봇을 개발하고자 농업기계분야에서는 많은 연구를 하고 있다.

과실수확 로봇은 공장 내에서 작업을 행하는 것이 아니고 야외 또는 하우스 내에서 작업하는 것이므로 환경조건이 나쁘다. 대상물에 대해서도 형상이나 색도가 부정확하고 잎이나 가지 등에 부분적으로 가려져 있는 것이 많다. 또한 이것을 취급하는 사용자도 공장내의 로봇과는 달리 일반 농가이고 일반기계나 전자전기장치의 운전 유지관리에 관한 기술 수준이 낮다. 이와 같이 이러한 로봇의 특징을 보더라도 기술적으로 특이한 로봇이 된다.



이러한 특수한 기술을 활용하여 노동집약적인 과수경영의 규모확대와 생산성 향상 및 우리나라 과수산업의 국제경쟁력강화를 위하여 노동력 절감문제를 농업기계화를 통하여 접근하고자 과수원 작업 중 종래의 기계화 방법으로는 작업이 불가능한 수확 작업에 대하여 메카트로닉스 기술을 활용하여 무인작업이 가능한 로봇을 개발하고자 하였다. 개발하고자하는 자율이동 다관절 과실(사과) 수확 로봇은 화상처리에 의한 수형 분석이 가능하며, 작업 필드 내에 있는 과실을 선별 수확 할 수 있고, 화상처리를 이용하여, 수확하기 가장 좋은 위치와 경로를 고속으로 알아내는 인공지능의 과실 수확 로봇을 개발하는데 최종 목표를 두고 본 연구에서는 자율이동 다관절 과실(사과) 수확 로봇을 개발하였다. 본 연구의 다관절 사과 수확 로봇은 9축 수직 다관절 로봇으로서 잎, 가지등의 장애물을 회피할 수 있는 고능률의 사과 수확 로봇의 매니플레이터이다.

또한 사과수확 로봇의 주행차량은 다관절 과실 수확 로봇의 장착과 로봇의 수확작업에 필요한 모든 기능을 지원하는 것을 목적으로 하는 완전한 무인 자율 주행차량의 개발에 최종목표를 두고 있다.

과실 수확 로봇을 구동하기 위해서는 많은 변수가 고려되어야 하는데, 특히 각 관절의 운동은 로봇 전체의 정밀도를 좌우하는 중요한 요소이다. 관절의 운동에서 한 관절의 위치와 각도, 운동 속도 및 토크 등의 변화는 연결된 다른 관절에 부하의 변동을 발생시키므로, 이에 대응하여 필요한 속도 및 토크를 가감할 수 있어야 한다. 또한 각 매니플레이터는 기동과 정지시 로봇 전체에 충격을 가하지 않도록 가속-정속-감속의 일정한 구동 패턴을 적용할 필요가 있다. 이와 같이, 관절의 운동 중에 발생할 수 있는 여러 가지 부하의 변동에 대처하고, 각 관절의 위치와 운동궤적에 따라 구동 패턴을 적용하기 위해서는 각 관절부 및 로봇 전체의 기계적인 정밀도뿐만 아니라, 부하량에 따라서 속도나 토크의 제어량을 자동으로 조절 할 수 있는 제어 시스템이 필요하다.

따라서 사과 수확 로봇의 제어장치 개발에서는 사과 수확 로봇의 관절 구동에 사용

되는 서보 모터를 제어함에 있어서, 각 매니플레이터에 걸리는 부하의 변동에도 요구되는 회전 속도를 일정하게 유지할 수 있는 제어 시스템을 설계·제작하여, 주요 지점에서의 출력 파형을 측정하고 속도 지령에 대한 회전수의 추종, 단위 스텝 입력에 대한 응답 시험을 통해 제어기의 성능을 평가하고자 하였다.

사과수확로봇의 시각장치를 위한 사과 인식 알고리즘을 개발의 연구는 다음과 같다. 사과수확로봇의 시각장치는 야외의 자연환경에서 작업을 수행해야 하기 때문에 조명조건의 변화에 무관하게 대상을 인식해야 한다. 특히 복잡한 대상물의 형상, 크기, 위치, 속도 등을 인식할 수 있어야 한다.

사과 인식을 위한 화상처리의 첫 단계는 사과의 정확한 위치와 특성을 인식하는 것에서 시작된다. 외계의 정보를 입력받기 위한 센서로는 인간의 시각을 대신할 수 있는 시각센서를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 시각 센서는 단일센서로서는 많은 정보를 빠르게 입력받을 수 있는 CCD 카메라를 사용하였다. CCD 카메라에서 입력된 아날로그 데이터는 화상처리 보드에서 디지털 데이터로 변환되어 컴퓨터에 의해서 직접적으로 정보처리가 가능하게 된다.

컴퓨터에 의한 디지털 화상정보 처리는 다음과 같은 장점이 있다. 첫째로 컴퓨터를 사용하여 처리하므로 정확성이 높고 반복처리에 따른 오류가 거의 발생하지 않는다. 둘째로 제어목적에 따라 프로그램에 의해 제어용의 각종 변수들을 자유롭게 설정하거나 변경할 수 있다. 셋째로는 프로그램의 변경에 의해 각종 처리를 실현할 수 있고 새로운 환경에서도 지능적인 프로그래밍이 가능하다. 이러한 장점에도 불구하고 화상처리에 의한 대상물 인식에 있어서 다음과 같은 문제점들을 해결하여야 했다. 첫째로 데이터량이 많다는 것이다. 본 연구에서 사용한 화상은 RGB 컬러 화상이므로 한 Frame에 3MB의 정보가 입력되므로, 화상을 압축하고 사과 인식에 적합한 새로운 색좌표 함수를 구하여 화상의 데이터량을 줄였다. 둘째로는 많은 시간이 소요된다. 경제성 있는 제어가 되도록 많은 데이터의 처리시간을 단축할 수 있는 알고리즘이 요구된다. 셋째로 사과수확로봇은 대상물인 사과를 수확하기 위해서는 2차원

정보뿐만 아니라 3차원 정보를 필요로 한다. 디지털처리 된 화상은 2차원 정보만을 가지고 있으므로 3차원 정보를 구하기 위해서 새로운 알고리즘의 개발이 요구되어 본 연구를 수행하였다.

## 제2장 사과수확 로봇의 매니플레이터 개발

### 제1절 실험 장치 및 방법

#### 1. 구성 및 동작 계획

수직다관절 사과로봇은 관절축을 중심으로 회전운동을 하는 수직 다관절 로봇이다. 직교좌표형의 경우는 로봇 팔의 선단이 최초 수평이면 x,y,z축이 움직여도 수평이 유지되지만 다관절형은 만약 제1, 제2, 등의 관절 하나가 움직이면 로봇의 선단에도 그 영향이 미쳐서 위치변화가 발생하기 때문에 최초의 수평상태를 유지하기 위해선 수정 동작이 필요하므로 위치 데이터의 연산처리에 시간이 걸린다. 그러나 컴퓨터의 발달로 연산처리에 걸리는 시간에는 별로 문제되지 않을뿐더러 인간의 팔과 같은 운동을 하기 때문에 로봇 같은 운동을 한다. 따라서 작업하는 것만의 기계가 아니라 인간에 가까운 동작을 하는 기계라고 생각할 수 있다. 본 연구에서는 과실 수확용 로봇을 개발하는 것이 주된 목적이므로 과실의 위치와 장애물의 회피에 가장 적합하다고 생각되어 다관절 로봇 형태의 과실 수확 로봇을 개발하고자 하였다.

수직 다관절 과실수확로봇은 베이스 선회, 제1아암의 회전, 제2아암의 회전 및 선회, 제3아암의 회전 및 선회, 중단관절의 회전 및 선회, 수확 hand로 구성되어 있고, 동작은 다음과 같이 한다.

- 1) 베이스 선회 : 로봇 전체를 회전시키고, 그 각도를  $\theta_1$ 로 한다. 위에서 봐서 시계방향으로 회전하는 경우를 정(+)으로 하고, 반시계 방향으로 회전하는 경우를 부(-)로 한다. 선회범위는 270 °로 한다.
- 2) 제1아암의 회전 : 제1아암의 회전각을  $\alpha$ 로 하고 수직위치로부터 전방으로 회전시킬 경우를 정(+)으로 하고, 후방으로 회전시킬 경우를 부(-)로 한다. 선회범위는 90 °이다. 제1아암의 회전축을 제1관절로 한다.
- 3) 제2아암의 회전 : 제2아암의 회전각을  $\beta$ 로 하고 수평위치로부터 상향으로 회전시

킬 경우를 정(+ )으로 하고, 하향으로 회전시킬 경우를 부(- )로 한다. 선회범위는 90 °이다. 제2아암의 회전축을 제2관절로 한다.

4) 제2아암의 선회 : 제2아암 이후의 모두를 선회시키고,  $\theta_2$ 로 한다. 앞에서 봐서 시계방향으로 회전하는 경우를 정(+ )으로 하고, 반시계 방향으로 회전하는 경우를 부(- )로 한다. 선회범위는 300 °로 한다.

5) 제3아암의 회전(제1손목의 굽힘) : 제3아암의 회전각을  $\gamma$ 로 하고 수평위치로부터 상향으로 회전시킬 경우를 정(+ )으로 하고, 하향으로 회전시킬 경우를 부(- )로 한다. 선회범위는 270 °이다. 제3아암의 회전축을 제3관절로 한다.

6) 제3아암의 선회(제1손목의 뒤틀림) : 제3아암 이후의 모두를 선회시키고,  $\theta_3$ 로 한다. 앞에서 봐서 시계방향으로 회전하는 경우를 정(+ )으로 하고, 반시계 방향으로 회전하는 경우를 부(- )로 한다. 선회범위는 300 °로 한다.

7) 종단관절의 회전 (제4아암의 회전, 제2손목의 굽힘) : 제4아암의 회전각을  $\delta$ 로 하고 수평위치로부터 상향으로 회전시킬 경우를 정(+ )으로 하고, 하향으로 회전시킬 경우를 부(- )로 한다. 선회범위는 270 °이다. 제4아암의 회전축을 제4관절 또는 종단관절로 한다.

8) 종단관절 선회(제4아암의 선회, 제2손목의 뒤틀림) : 제4아암 이후의 모두를 선회시키고,  $\theta_4$ 로 한다. 앞에서 봐서 시계방향으로 회전하는 경우를 정(+ )으로 하고, 반시계 방향으로 회전하는 경우를 부(- )로 한다. 선회범위는 300 °로 한다.

9) 수확 hand (잡는장치) : 수확할 사과를 잡는 장치.

이와 같이 동작이 9개인 다관절 로봇으로서 인간의 팔과 허리의 기능에 가능한 한 접근시켜서 과실수확을 고정도, 고능률로 가능하도록 하였다. 특히 종단관절은 사람의 손목에 해당하고 제3관절은 사람의 팔꿈치에 해당한다고 가정했을 때 사람의 팔꿈치에 해당하는 관절을 1개 더 가지고 있는 이유는 사람이 과실수확을 할 때 손이 과실에 닿지 않으면 허리를 굽히든지 뒤틀어서 과실을 잡으려고 하는 경우가 많다. 따라

서 본 연구의 로봇은 사람의 허리와 어깨에 해당하는 베이스 선회와 제1관절만으로는 사람의 허리와 등뼈의 기능을 충분히 수행하지 못하므로 허리와 등뼈의 기능 대신에 팔꿈치의 기능을 수행하는 제2관절로 대체한 것이다. 또한 로봇의 동작은 9축 동시 제어도 가능하지만 과실을 수확할 때, 과실을 잡던지 놓으면서 팔을 움직이는 경우는 없으므로 본 연구의 로봇에서는 8축 동시제어를 행하여 팔의 위치를 결정한 후 9축 짜인 hand의 제어를 행하도록 할 계획이다.

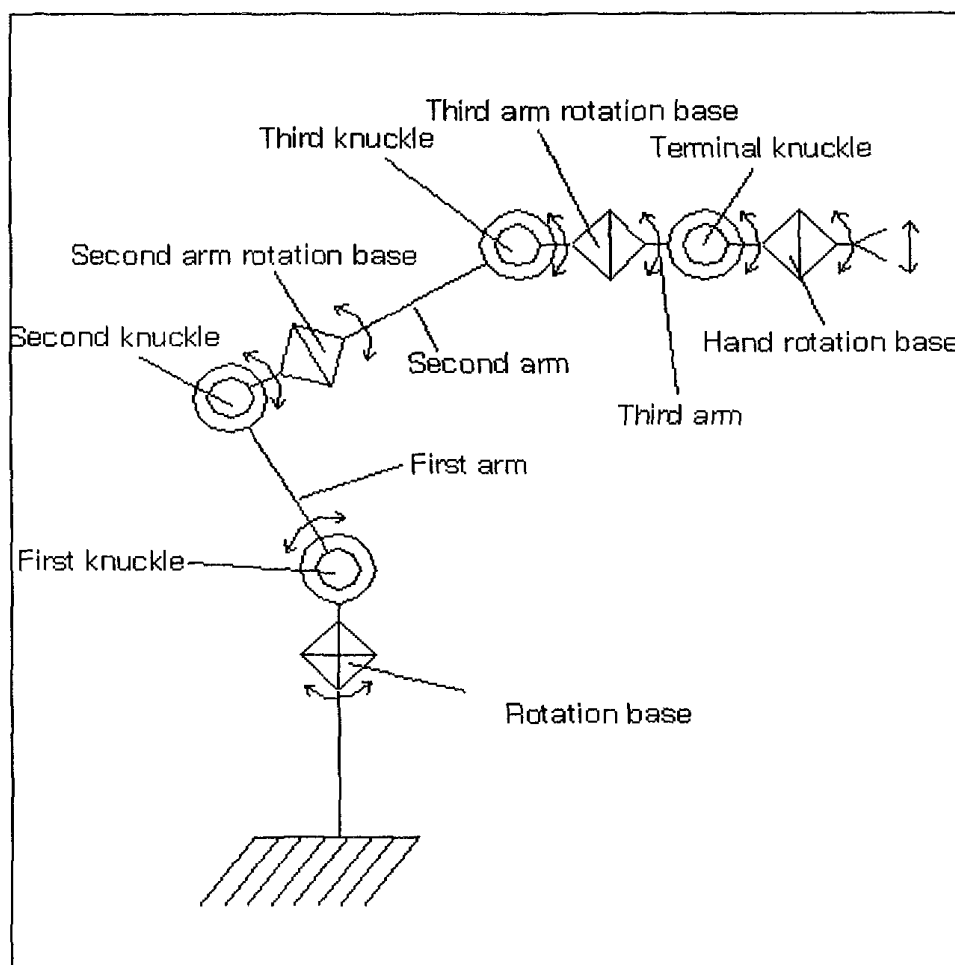


Fig 1. Robot device

## 2. 구동 제원의 결정

로봇 아암을 회전하기 위하여 최대 토크가 필요한 것은 그림 2와 같이 아암이 수평으로 될 때이다. 여기에서 각부의 치수나 중량을 다음과 같이 가정(假定)한다.

- 1) 제1 Arm의 제1, 제2 관절 축간 거리를 570mm로 하고 중량을 16kg<sub>f</sub>로 하여 제1관절로부터 285mm의 지점에 중심(重心)이 있는 것으로 한다.
- 2) 제2 Arm의 제2, 제3관절 축간거리를 870mm로 하고 중량을 32kg<sub>f</sub>로 하여 제2관절로부터 435mm 지점에 중심이 있는 것으로 한다.
- 3) 제3 Arm의 제2, 제3, 종단관절 축간거리를 1360mm로 하고 중량을 7kg<sub>f</sub>로 하여 제2 관절로부터 1115mm의 지점에 중심이 있는 것으로 한다.
- 4) 종단암 및 잡음장치를 포함하여 5kg<sub>f</sub>로 하고, 제2 관절로부터 축간거리는 1800mm로 하여 1580mm의 지점에 중심이 있는 것으로 한다.
- 5) 최대 가반 중량을 0kg<sub>f</sub>로 하고 제2 관절로부터 1800mm의 지점에 있는 것으로 한다.

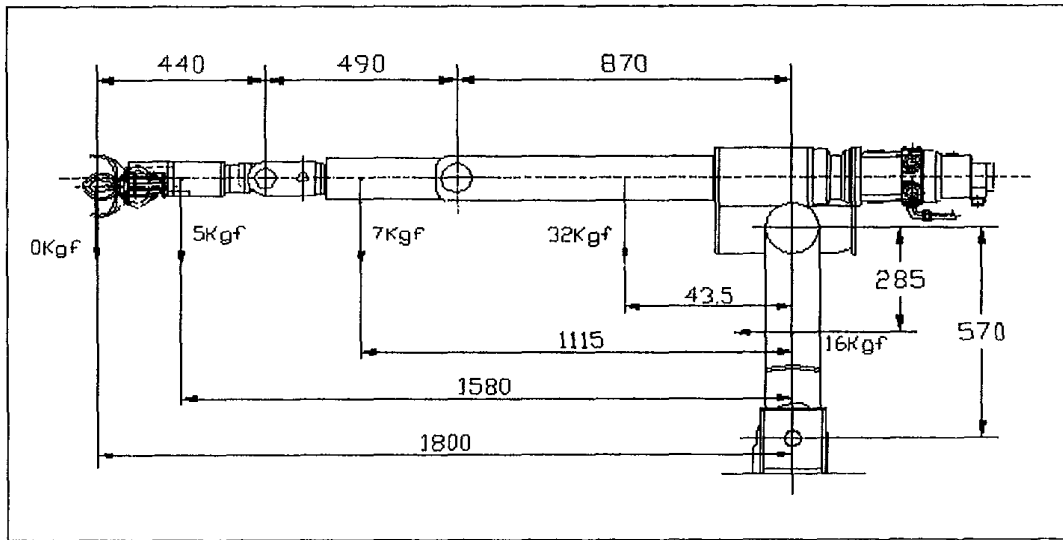


Fig 2. Weight of arm

가. 베이스 선회대

선회대는 Robot 전체를 회전시키는 것으로서 로봇을 원활하고 필요한 회전을 유지하기 위한 토-크를 고려하여야 한다. 특히 아암을 수평으로 뺐을 때 관성모멘트 때문에 선회를 시작할 때 서보 모터의 구동 토-크도 고려하여야 한다. 로봇 아암의 선회축 회전 관성모멘트를 계산해보면 그림 3(a)와 같이 4각형 판의 중심축 회전 관성모멘트  $I_G$ 는 다음과 같이 표시된다.(판의 두께는 길이에 비교하여 극히 작다)

$$I_G = \frac{1}{12} \cdot \frac{W}{g} \cdot l^2 \quad (1)$$

W: 판의 중량 (kgf)

g : 980 (cm/s<sup>2</sup>)

l : 판의 길이(cm)

또한 중심(重心)축에서  $l_1$ 만큼 떨어져 있는 개소를 축으로 하여 이 판을 회전시킬 때의 관성 Moment는 다음과 같이 표시된다.

$$I = I_G + \frac{W}{g} l_1^2 \quad (2)$$

$l_1$ 이  $l$ 에 비하여 크게 되면,  $I_G$ 보다  $\frac{W}{g} l_1^2$ 가 멀리 떨어져 있는 모양으로 크게 된다. 로봇 아암의 각부분 중량과 선회축에서의 거리는 그림3(b)에 표시하였으므로 각부의 중심축 회전 관성모멘트를 무시하면 로봇 아암의 선회축 회전 관성모멘트는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{980} \{ (0 \times 180^2) + (5 \times 158^2) + (7 \times 111.5^2) + (32 \times 43.5^2) + (16 \times 28.5^2) \} \\ &= 291.218 \text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 아암을 1.2rpm ( 아암 선단의 주속도는 8.1cm/s )의 속도로서 회전 할 때 선회개시 시에 필요한 토-크는 다음과 같이 표시된다. (단 정지 마찰 토-크는 무시한다)

$$T = I \times \dot{\omega} \quad (4)$$



$T$  : 회전개시토크 ( $\text{kgf} \cdot \text{cm}$ )

$I$  : 관성 Moment ( $\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ )

$\dot{\omega}$  : 각가속도 ( $\text{rad}/\text{s}^2$ )

또한 각속도  $\omega$  는  $2\pi N$  ( $N$ : rpm) 로서 표시되므로

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi N = 2\pi \cdot 1.2 = 7.54 [\text{rad}/\text{min}] \\ &= 0.125 [\text{rad}/\text{s}] \end{aligned} \quad (5)$$

로봇 아암을  $\omega=0$ 의 상태에서  $\omega=0.125$ 로 하므로 가정으로 0.1초를 요한다고 보면

$$T = I \dot{\omega} = 291.218 \times \frac{0.125 - 0}{0.1} = 364.022 \text{kgf} \cdot \text{cm} \quad (6)$$

로봇 아암 각 부분의 중심축 회전 관성모멘트 및 정지 마찰 토크를 고려하면 선회개시 시의 기동토크는  $364.022 \text{kgf} \cdot \text{cm}$ 가 필요하다. 따라서, 그림 3(b)의 중앙부에 장착된 Servo cup Motor는 기동토크  $112 \text{kgf} \cdot \text{cm}$ , 감속비를 123:1로 설정하면 베이스 선회대와 좌,우측 서보 모터는 물론 제1관절 상부의 모든 장치를 회전시키는데 충분하다.

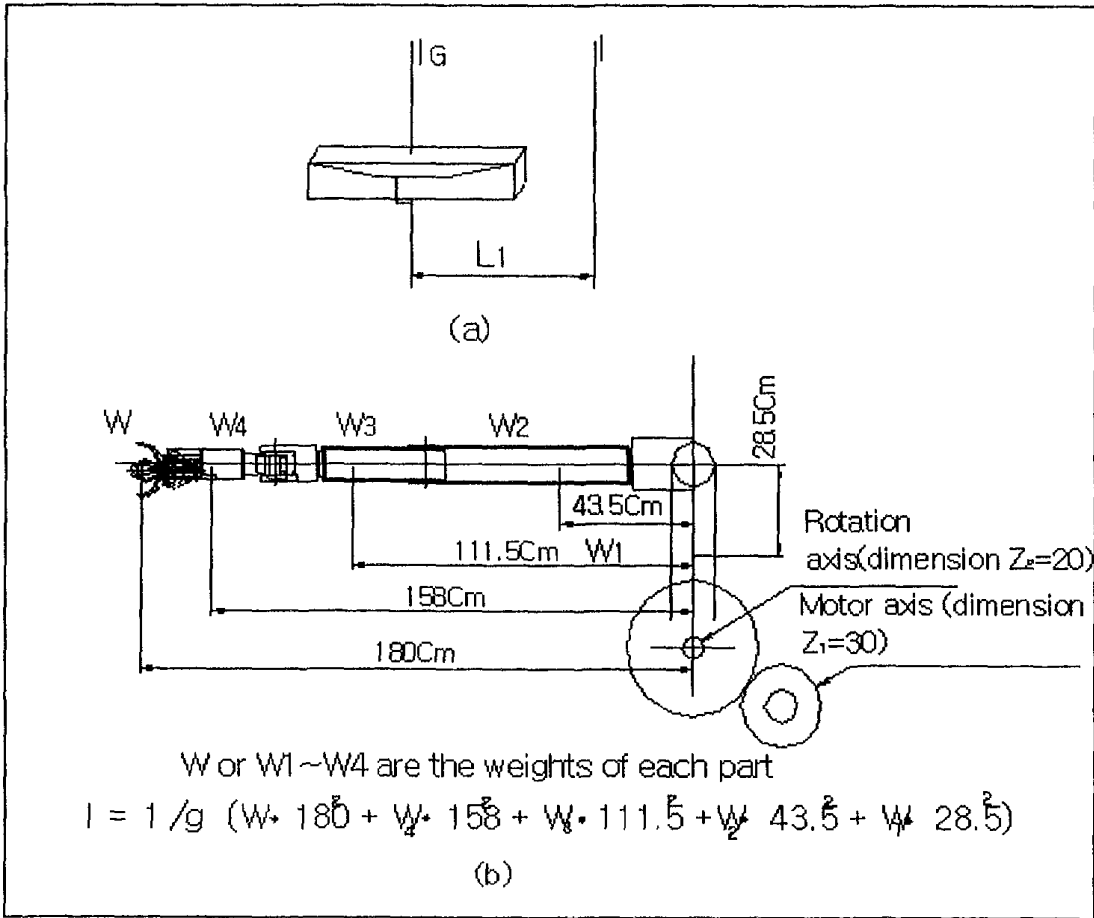


Fig 3. Inertia moment

나. 제1 아암

제1아암을 선회시킬 때 필요한 토-크  $T_1$ 은 아암이 수평일 때 최대로서

$$T_1 = 0 \times 180 + 5 \times 158 + 7 \times 111.5 + 32 \times 43.5 + 16 \times 28.5 \quad (7)$$

$$= 3418.5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

서보모터는 공칭토-크 112kgf · cm의 것을 사용하고, 실제의 구동토-크는 22.3kgf · cm로 하여 계산한다. 치차는 1단으로 하여 전달효율은 0.85로 하고 치수비(齒數比)를

$i$ 라고 하면

$$(Motor의\ 토크) \times (치수비) \times (전달효율)^2 = (필요토크) \quad (8)$$

$$치수비 = \frac{3418.5}{22.3 \times 0.85^2} = 268 \quad (9)$$

필요 치수비는 식(9)와 같이 268이지만 안전을 고려하여 치수비를 270으로 하였다.

그림4에 표시한 것처럼 치차의 모듈  $m$ 을 5.0 으로 하고 치수  $Z$ 를

$$Z_1 = 30, Z_2 = 20$$

$$i = 270 = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{20}{30} \quad (10)$$

되게끔 결정하고 치수 30 과 20의 치차는 Motor 축과 선회축에 일체가 되게 조립되었으며 치차의 재질은 모두 특수강(SNCM21)으로 제작하고 치폭은 15mm로 하였다. 치차의 강도에 대하여는 서보 모터의 회전수  $N$ 을 약 23 rpm 로 하였으므로 모터 축에 부착된 치차의 주속도  $V$ 는

$$V = \frac{\pi(mZ_1) \times N}{60} = \frac{3.14 \times 5 \times 30 \times 23}{60} = 180.55 \text{ mm/s} = 0.1806 \text{ m/s} \quad (11)$$

로 극히 저속이 되므로 이빨에 가해지는 정적인 굽힘 강도만을 단순화 시켜 검토하였다. 제1 Arm에 발생한 Moment는 2707.5kgf·cm로서 치차  $Z_2$ 의 반경은 30인데서

$Z_1$ 과  $Z_2$ 의 치차 이빨에 걸리는 힘  $F$ 는

$$F = \frac{3418.5}{5} = 683.7 \text{ kgf} \quad (12)$$

이다. 그러므로 루이스(Lewis) 식에 따라

$$F = \delta mby \quad (13)$$

$\delta$  : 저속회전 경우의 허용능력

$m$  : Module     $b$ : 치폭     $y$ : 치형계수 (0.446)

$$\delta = \frac{F}{mby} = \frac{683.7}{5 \times 15 \times 0.446} = 20.44 \text{kgf/mm}^2 \quad (14)$$

특수강의 인장강도는 80kgf/mm<sup>2</sup>이상으로 되어 있으므로 실용상 아무런 지장은 없다.

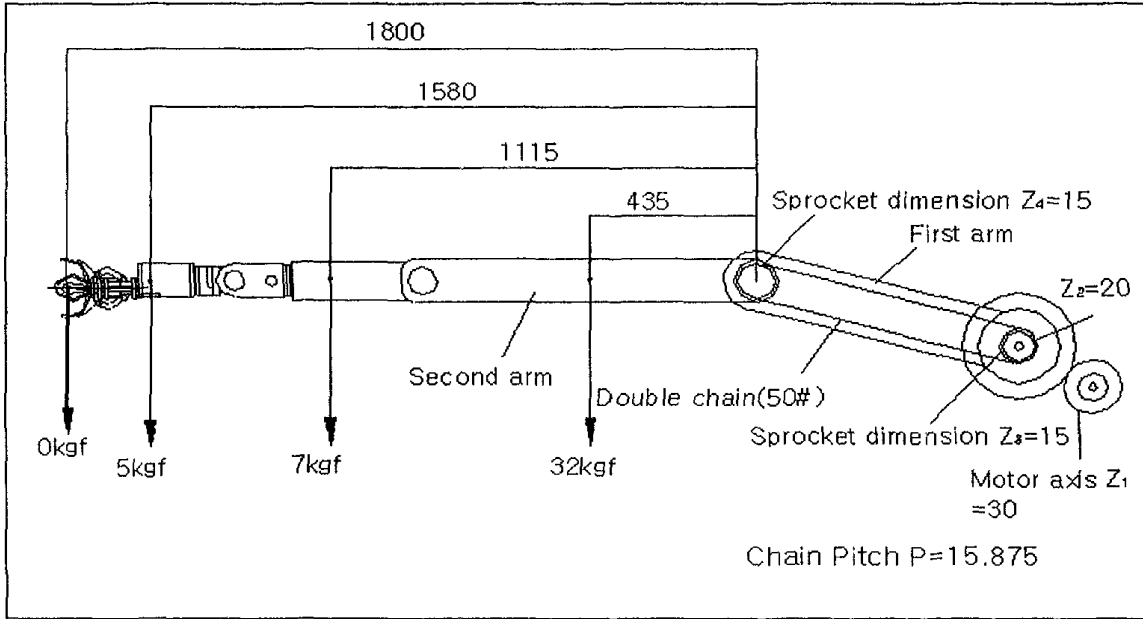


Fig 4. Dimension ratio of second arm rotation

다. 제2 아암

그림4와 같이 제2 아암을 선회시키는데 필요한 토-크는

$$\begin{aligned} T_2 &= 0 \times 180 + 5 \times 158 + 7 \times 111.5 + 32 \times 43.5 \\ &= 2962.5 \text{kgf} \cdot \text{cm} \end{aligned} \quad (15)$$

서보 모터는 제1아암과 같은 것을 사용하고 구동토-크는 112kgf·cm로서 그림3(b)에서와 같이 제1 아암의 하부 반대측에 모터를 부착하여 제1 아암의 모터와 균형이 잡히게 배치하였다. 또한 제2 아암의 구동부분의 동력전달은 치차와 체인을 병용하였다.

치차를 1단, 체인은 더블체인 1단으로 하고, 전달효율은 양쪽모두 0.85로 하여 치차의 치수  $Z_2=20$ 으로 한다. 치수비를  $i$ 로 하면

$$i = \frac{2962.5}{112 \times 0.85^3} = 43.071 \quad (16)$$

이것도 충분하고 좋게 하기 위해 치수비  $i$ 는 50으로 하고 치차는 모듈 5로 모터 축 치차의 치수를  $z_1=30$ ,  $z_2=20$  스프로켓 피치가 15.875mm로서 치수  $z_3=15$   $z_4=15$ 로 한다. 또한 치차  $z_2$ 와 스프로켓 치수  $z_3$ 와는 동일축에서 일체가 되어 회전한다. 따라서  $i$ 는

$$i = \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} = \frac{20 \times 15}{30 \times 15} = 0.667 \quad (17)$$

로 된다.

역시 치차의 강도는 제1 아암의 경우보다 토-크가 적어지므로 충분하다. 체인 및 체인 스프로켓트에 대해서는 기계구조용강(SM45C)으로, 제2Arm 구동시의 장력F는 체인 스프로켓트 ( $z_4=15$ ) 반경이 42mm로 되어 있으므로

$$F = \frac{2962.5}{4.2} = 705.36 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (18)$$

이다. 그러므로 루이스(Lewis) 식에 따라

$$F = \delta mby \quad (19)$$

$\delta$  : 저속회전 경우의 허용능력

$m$  : Module     $b$ : 치폭     $y$ : 치형계수 (0.446)

$$\delta = \frac{F}{mby} = \frac{705.36}{5 \times 15 \times 0.446} = 21.07 \text{ kgf/mm}^2 \quad (20)$$

기계구조용강의 인장강도는  $60 \text{ kgf/mm}^2$ 이상으로 되어 있으므로 실용상 아무런 지장은 없다.

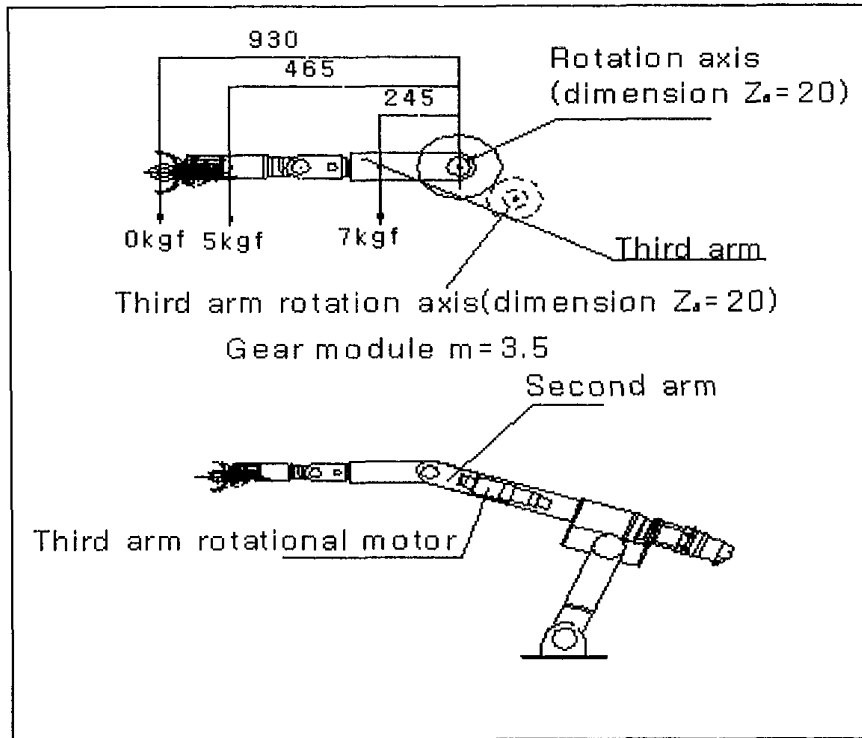


Fig 5. Dimension ratio of third arm rotation

라. 제3 아암

그림 5와 같이 제3 아암을 선회하는 데 필요한 토-크는

$$T_3 = 0 \times 180 + 5 \times 158 + 7 \times 111.5 = 1570.5 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (21)$$

서보 모터는 구동토-크 6.4kgf · cm로서 그림5 와 같이 제2 관절암의 내측 중앙에 부착하였으며, 치치를 1단으로 하고 전달효율은 0.85로 하여 치수비를  $i$ 라고 하면

$$(\text{Motor의 토크}) \times (\text{치수비}) \times (\text{전달효율})^2 = (\text{필요토-크})$$

$$i = \frac{1570.5}{6.4 \times 0.85^2} = 339.641 \quad (22)$$

339로 됩니다만 충분하고 안전하게끔 치수비를 340으로 하여 그림 에 표시한 것처럼 치차의 모듈 m을 3.5로 하고 치수Z를

$$Z_5 = 20 \quad , Z_6 = 20$$

$$i = 340 = \frac{Z_6}{Z_5} = \frac{20}{20} \quad (23)$$

되게끔 결정하여 치 과 20의 치차는 모터 축과 선회축에 일체가 되게 조립하고 치차의 재질은 모두 특수강(SNCM21)으로 제작하고 치폭은 16mm로 하였다. 치차의 강도에 대하여는 서보 모터의 회전수 N을 약36 rpm로 하였으므로 모터 축에 부착된 치차의 주속도 V는

$$V = \frac{\pi(mZ_5) \times N}{60} = \frac{3.14 \times 3.5 \times 20 \times 36}{60} = 131.88 \text{ mm/s} = 0.131 \text{ m/s} \quad (24)$$

로 극히 저속이 되므로 이빨에 가해지는 정적인 굽힘 강도만을 단순화 시켜 검토하였다. 제3 아암에 발생한 모멘트는 859.5kgf·cm로서 치차 Z<sub>6</sub>의 반경은 31.5인데서 Z<sub>5</sub> 과 Z<sub>6</sub> 의 치차에 걸리는 힘 F는

$$F = \frac{1570.5}{3.15} = 498.571 \text{ kgf} \quad (25)$$

이다. 그러므로 루이스(Lewis) 식에 따라

$$\delta = \frac{F}{mby} = \frac{498.571}{3.5 \times 16 \times 0.446} = 19.962 \text{ kgf/mm}^2 \quad (26)$$

특수강의 인장강도는 80kgf/mm<sup>2</sup>이상으로 되어 있으므로 실용상 아무런 지장은 없다.

## 제2절 결과 및 고찰

### 1. 베이스 선회대

베이스의 선회는 그림 6과 같이 베이스대의 선회축을 중심으로 하여 360° 회전이 가능하다. 로봇을 움직이는 9개의 모터중, 베이스 선회대를 제외한 모든 모터가 베이스대 상부에 위치하기 때문에 베이스의 선회와 같이 움직인다. 따라서 모터의 리드선이 장애가 되어 동작을 제한하므로, 1회전 이상 회전시키기는 곤란하다. 실제로는 180° 정도의 위치에서 충분하지만 모터의 리드선을 길게 하여 약 270° 까지 선회하도록 설정하였다. 선회는 로봇 전체를 회전 시켜야 하므로 큰 토크가 필요하다. 따라서 베이스 선회대 모터는 기동토크 112kgf·cm, 운전토크 22.3kgf·cm인 YASKAWA CUP MOTOR 400W, 회전수 1750rpm인 DC 모터를 사용하였고, 최대 전달토크 30kgf·cm, 감속비 123 : 1인 하모닉 감속기를 사용하였다. 선회속도는 최대 23rpm에서 관절의 회전속도 140° / 초로서 본 연구의 로봇을 회전시키기에 충분하였다.

또한, 베이스 선회대의 구조는 그림 6에서와 같이 베이스대에 내경  $\phi$  200mm의 베이스 로테이터를 M10볼트(특수볼트) 6개로 견고하게 조립하고 베이스 선회대 내부에는 외경  $\phi$  200mm, 내경  $\phi$  140mm, 폭 25mm의 대형 롤러 베어링을 타입하여 베어링의 내륜에 하모닉 드라이브(정밀 감속기) 하우징 상부를 압입시켰다. 베이스 선회대 중앙 보스에는 원주방향으로 6개의 M10 암나사를 가공하여 플렉스플라인이 견고하게 조립되게 하였으며, 정밀 감속기 하우징 내부에는 서큘러스플라인이 견고하게 조립되게끔 하였다. 정밀 감속기 하우징 하부에는 서보킵 모터가 M8 볼트 4개로 견고히 취부되어 있으며, 모터의 축에는 웨이브 제네레이터가 일체로 조립되어 있다. 베이스 선회대(선회축) 구동은 서보킵 모터에서 동력을 전달받아 웨이브 제네레이터에 연결되고, 플렉스플라인과 서큘러스플라인의 작동에 의하여 플렉스플라인에 동력이 전달되어 외경  $\phi$  200mm의 롤러 베어링의 외륜과 함께 베이스 로테이터가 회전하게 된다. 정밀 감속기 하우징 하부는 중간 블록 B에 고정되게 하였으며, 베이스 로테이터의 회전에 의해 베이스 대의 상부가 원활하게 선회되게 하였다. 베이스대(선회대)는 로봇 아암을



수평으로 하여 최대 가반 중량물을 잡을 때 최대 모멘트를 받게 되므로 자립이 가능한 선회대가 필요하다. 선회대의 크기는 한 변이 600mm의 정방형 단면으로 두께 30mm의 주철블록으로하고, 이블록의 중앙부에 외경  $\phi 370\text{mm}$ , 내경  $\phi 354\text{mm}$ , 높이 650mm의 원통으로 지지하는 것으로 하여, 이것을 블록 A로 한다. 로봇이 아암을 수평으로하여 중량 0kg의 물체를 잡을 때 점C를 지점으로 하여 쓰러지게끔 하는 모멘트를 계산하면 다음과 같이 된다.

대략 그림 7에 따라서 자중에 의한 모멘트를 계산한다.

- 1) 손목굽힘, 손목회전(비틀), 잡음장치를 합하여 약 5kgf로 하고, 선회축에서의 거리를 158cm로 한다.
- 2) 제 3아암의 무게를 3.5kg, 종단 관절암 및 종단 관절암을 4kgf로 하고, 합계 7.5kgf로 하여 선회축에서의 거리를 111.5cm로 한다.
- 3) 제 2아암의 무게를 11kgf, 제 3암 회전용 모터 9kgf, 제 2관절 선회와 제 2관절 보조암을 12kgf로 하여 합계 32kgf로 선회축에서의 거리를 43.5cm로 한다.
- 4) 제 1암과 체인을 합하여 16kgf로 하고, 선회축에서의 거리를 28.5cm로 한다. 또한 연미부분과 모터는 선회축보다 좌측에 있으므로 무시한다.

로봇은 아암의 길이 180cm의 곳에서 0의 중량물을 잡고, 점 C와 선회축에서의 거리는 30cm로 한다.

$$0 \times (180 - 30) + 5 \times (158 - 30) + 7 \times (111.5 - 30) + 32 \times (43.5 - 30) + 16 \times (28.5 - 30) = 1618.5 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (27)$$

식 27은 로봇팔이 점C를 중심점으로 하여 쓰러지려는 모멘트이다. 또한 선회대는 20kgf, 블록 A는 약 50kgf, 연미에는 32kgf의 모터가 1개, 베이스 대 좌측에 30kg의 모터가 1개, 선회대 우측에 30kg의 모터가 1개, 좌측에 6kg의 기어 박스 1개, 우측에 6kg의 기어 박스 1개, 블록 A의 내부에 30kgf의 모터가 1개 있다. 합하여 약 224kgf의 중량이 선회축 부근에 있고, 점 C를 지점으로 하여 로봇을 쓰러지지 않게 하려는

모멘트는

$$224 \times 30 = 6720 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (28)$$

로서 로봇의 자립으로서는 충분하다. 그 결과 로봇의 전체중량은 약 330kgf로 안전하므로 선회대는 로봇의 자립이 가능하여 이동 할 수 있는 차량의 프레임 상부 중앙에 탑재 고정시키는 형태로 하여 이동하면서 과일을 수확 할 수 있게 하였다.

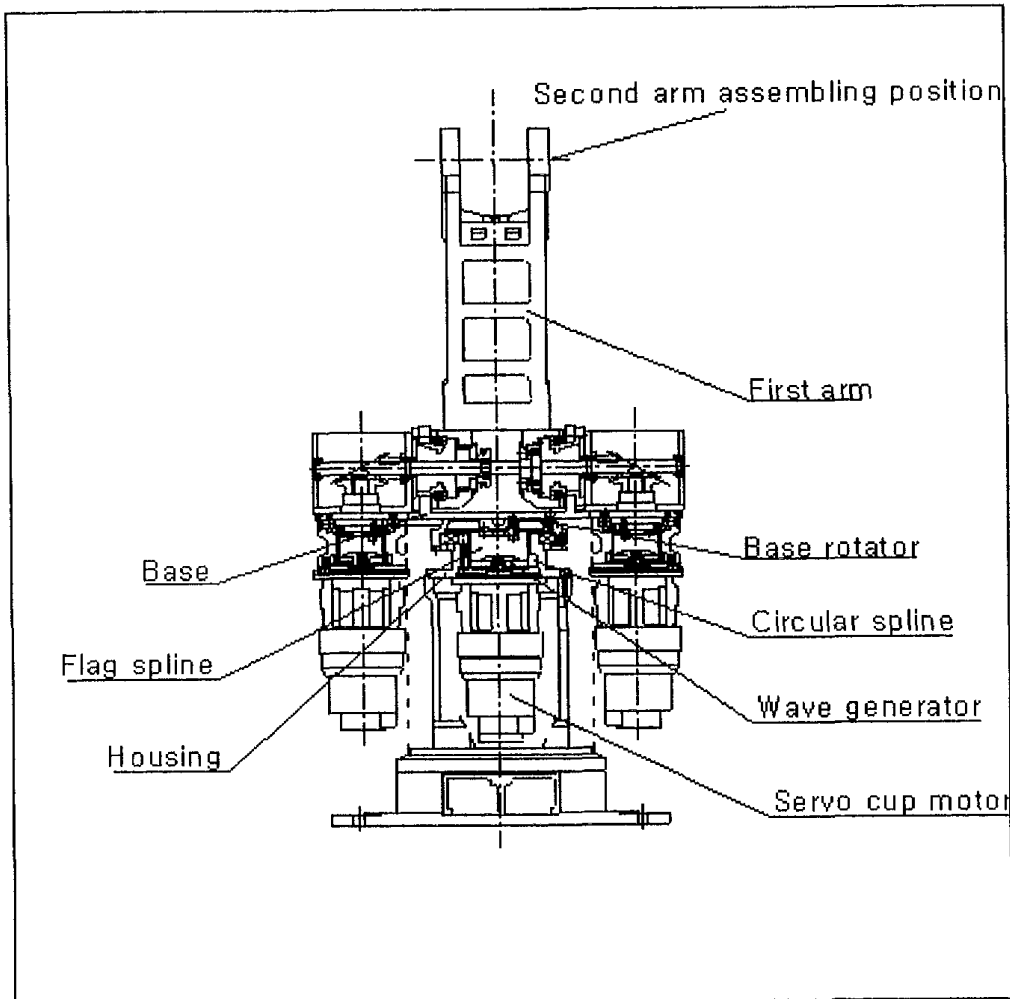


Fig 6. Detail drawing of base rotator

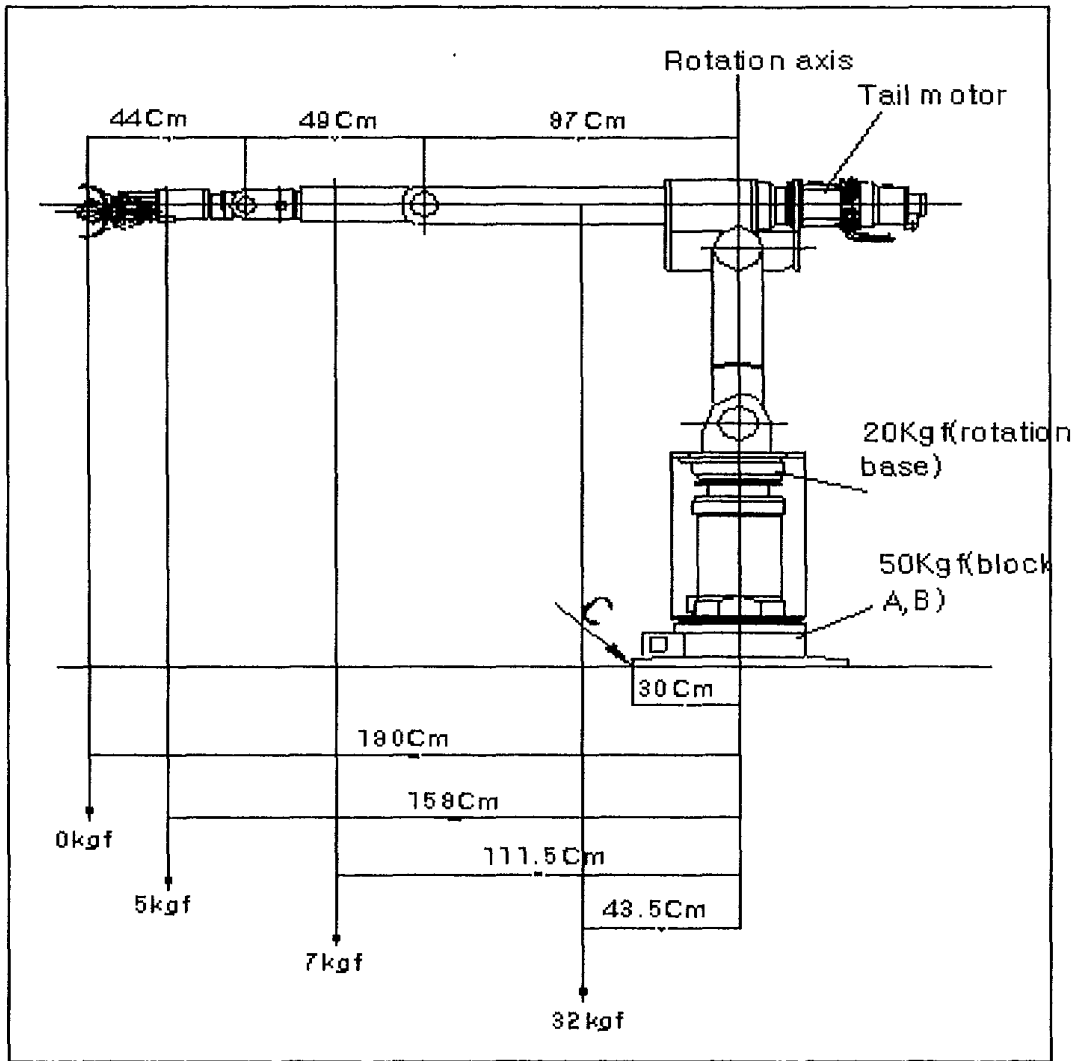


Fig 7. Robot balance

## 2. 제1 아암

베이스대의 수직위치로부터 전방 $45^{\circ}$ , 후방 $45^{\circ}$  움직임이 가능하므로 제1아암의 회전 범 위는  $90^{\circ}$  이다. 제1아암의 회전도 베이스 선회대를 제외한 모든 암을 작동 시켜야 하므로 큰 동력이 필요할 것으로 사료되어 모터와 감속기의 사양은 베이스 선회대용

과 동일한 것을 사용하였다. 모터와 감속기는 그림6에서와 같이 베이스 선회대 우측에 장착하였고, 감속기와 제1아암의 연결은 제1관절암 하부우측면 내부에 M6볼트 6개 (특수강볼트)로 회전축을 일체가 되게끔 고정하였으며, 회전축의 끝부분은 우측 기어박스에 조립된 두 개의 볼베어링에 지지되게 하였다. 동력의 전달은 감속기 상부에 취부된 치차(치수30, 모듈5.0, 치폭17mm)와 회전축에 취부된 치차(치수20, 모듈5.0 치폭 17mm)에 의하여 속도비 1/170로 전달된다. 특히 여기에서는 확고한 동력 전달이 되도록 치차의 백래쉬를 최대한 줄이기 위하여 헬리컬 베벨 치차를 사용하여 동력이 전달 되도록 하였다. 또한 프레임은 그림6에서와 같이 중량16kg의 알루미늄 주물로 가공 제작 되었으며 프레임 좌,우 측면에는 제1아암과 제2아암의 선회를 원활하게 할 수 있는 베어링 취부 홈을 가공하였으며, 베어링 잡이를 취부할 수 있는 M6 암나사(깊이:16mm)를 각각 원주 6등분하여 가공하였고, 내부 우측에는 제1아암 회전축을 조립할 M6암나사(깊이:18mm) 6개를 원주등분하여 가공하여 놓았다. 프레임의 하부 중앙에는 제2아암 선회용 체인을 조립할 수 있도록 폭50mm, 높이170mm로 절개하였으며 하부중심에서 높이 570mm의 지점에 제2아암의 보조 아암을 부착할 수 있는 Y자형의 홈을 가공하여 양 측면에는 제2아암 축을 지지할 베어링 홈을 가공하여 놓았다.

제2아암의 보조 아암은 중량4.5kg의 알루미늄 주물로 가공되었으며 가로346mm, 세로 140mm, 폭116mm, 두께8mm의 ㄷ자형으로, 전, 후 방향에는 제2관절 이후에 사용할 서보 컵 모터와 제2아암 선회대를 취부할 M8 나사구멍이 각각 4개씩 가공되어 있다. 중앙부의 좌측면에는 제2아암의 관절 축이 조립될  $\phi 35\text{mm}$ 의 구멍이 뚫려 있고 이 구멍을 중심으로 제2아암과 스프로킷트가 고정 조립될 수 있는  $\phi 7\text{mm}$  구멍 6개가 가공되어 있으며,우측면에는 제2아암 축 지지대가 조립될  $\phi 35\text{mm}$ 의 구멍이 뚫려있다.

프레임과 보조아암의 조립은 프레임 하부의 우측내부에는 제1아암 회전축이 프레임에 취부되고 프레임 우측 끝단에 취부된 볼베어링에 지지되어 제1아암이 헬리컬 베벨 치차의 동력을 전달받아 원활하게 선회하게 되고 프레임 하부의 좌측에는 프레임끝단에 취부된 볼베어링에 의해 지지되어 제1아암 아이들축 끝단에 취부된 더블 스프로킷트

와 상부 보조암에 조립된 더블스프로켓트에 체인(더블50#)이 연결되어 보조암이 회전되어 제1아암 이후의 상부가 작동하게 되어있다.

### 3. 제2 아암

제2아암의 회전각은 수평위치로부터 상향 45°, 하향 45°로 움직임이 가능하므로 제2관절암의 선회범위는 270°이다. 작동은 그림6에서와 같이 베이스대 선회대 좌측에 부착된 좌측 서보 컵 모터와 하모닉 드라이브의 작용에 의해 헬리컬 베벨 기어에 동력이 전달되고 제1아암 하단부 회전축에 장착된 더블스프로켓트, 치수15, 피치 15.875mm, 외경83과 제1아암 상단부 즉 제2아암의 보조 아암 내부에 장착된 스프로켓, 치수15, 피치 15.875mm 외경83에 50 # 더블 체인에 동력이 전달되어 제2관절암 축에 최종적으로 동력이 전달되고, 제2아암의 보조 아암과 일체가 되어 제2아암을 회전시키도록 하였다.

제2아암의 프레임A,B는 두께8.0mm, 폭120mm, 길이 700mm의 알루미늄 판으로 끝을 둥글게 가공하여 프레임A,B로 하였다. 프레임 좌측면에는 아암 취부대를 부착 조립할 수 있는  $\phi 6.5\text{mm}$ 의 구멍을 가공하였으며, 우측면에는 제3관절 축을 조립할 수 있는  $\phi 78\text{mm}$ 구멍을 가공하였다.

제2아암의 선회는 그림8에서와 같이 제2관절 보조 아암 상부에 부착된 서보 컵 모터에서 동력을 전달받아 하모닉 드라이브의 작동에 의해 제2아암과 제2아암 이후의 모든아암을 동시에 회전시킨다. 제2아암의 선회에서도 제2아암 이후의 모든 아암을 선회시켜야 하므로 다소 큰동력이 필요할 것으로 사료되어 모터와 감속기의 사양은 제1아암에 사용한 것과 동일한 것으로 사용하였다.

제2아암의 연결은 그림8에서와 같이 서보 컵 모터와 감속기에 취부된 좌·우의 지지대가 제2아암의 보조암 전,후에 M8볼트 8개로 견고하게 조립되게 하였다.

#### 4. 제 3 아암

제3아암의 회전축을 제3관절로 하고, 제1, 제2 아암은 수확 Hand를 수확 할 과실까지 이동하는 역할만 하지만 제3아암 부터는 사과나무 속의 사과를 수확할 때 장애물을 피하여야 할 경우가 발생하므로 회전각을 크게 한 것이 특징이다. 따라서, 제3아암의 회전각은 수평위치로부터 상향  $135^\circ$ , 하향  $135^\circ$  로 움직일 수 있도록 하였으므로 제3아암의 회전범위는  $270^\circ$  이다.

제3아암의 연결은 그림8에서와 같이 제2아암의 상단부에 조립된 2개의 볼베어링(6913ZZ)내륜에 제3관절의 관절 축의 조합과 제3관절 축 잡이에 지지되게 하였으며, 제3관절 축의 조합과 제3관절 축 잡이는 제3관절 아암의 좌우에 각각 고정 취부되어 있다. 작동은 그림5에서와 같이 제2아암 속에 장착된 DC서보 모터에서 동력을 전달받아 하모닉 드라이브의 작용에 의해 하모닉 드라이브 축 끝단에 열결된 회전축(B)에 동력이 전달되고, 회전축(B)에 일체로 조립된 헬리컬 베벨 치차(치수20, 외경  $\phi 63$ , 치폭 16mm)에 동력이 전달되어 제3관절 축의 헬리컬 베벨 치차와 직결로 동력이 전달되어 제3아암을 회전시키게 되고, 제3아암은 종단관절 아암과 연결되어 있다.

제3관절에 사용된 서보 모터의 사양은 300W, 75V, 5.6A, 3000rpm이고, 감속기의 사양은 최대 전달 토크  $6.4\text{kg} \cdot \text{m}$ , 감속비 80 : 1 인 하모닉 감속기를 사용하였다. 신뢰 속도는 최대 37.5rpm에서 관절의 회전속도  $225^\circ / \text{초}$  로서 본 로봇의 회전에는 충분하였다. 프레임A,B는 그림5에서와 같이 두께6.0mm, 폭110mm, 길이410mm의 알루미늄판으로 좌측 끝 부분을 R55로 둥글게 가공하여 프레임A,B로 하였다. 프레임 좌측면에는 제3관절축의 조합과 제3관절 축잡이(B)가 조립될 수 있는  $\phi 43\text{mm}$ 의 구멍과 이들을 고정할 M6 나사가 원주 6등분으로 가공되어 있다. 또한 프레임 A,B의 상단 중앙부에는  $\phi 50\text{mm}$ 의 구멍을 가공하여 제6모터를 취부하였고, 모터의 축에 종단관절아암을 연결하였다.

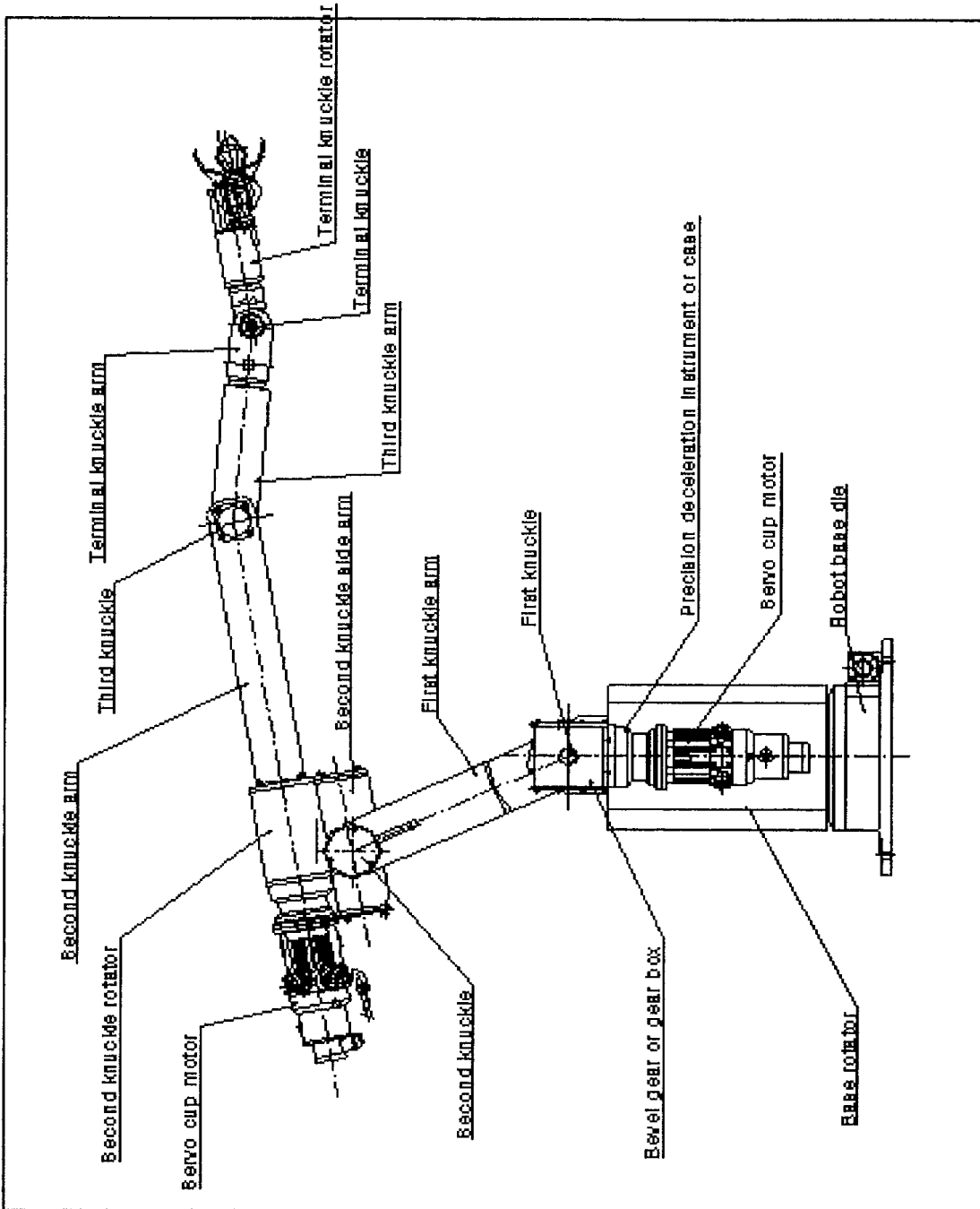


Fig 8. Terms of robot modules

### 5. 로봇의 작동 범위

종단 관절과 종단아암은 제3관절과 동일한 구조로 제작되었으나 사용된 모터와 감속기는 소출력의 것이고 그림과 같이 제작되었다. 로봇의 축간거리는 베이스 높이 - 780mm, 제1아암 - 570mm, 제2아암 - 870mm, 제3아암 - 490mm, 종단관절 아암과 hand - 440mm이고, 작동할 수 있는 회전각도 및 선회 각도의 범위는 베이스 선회 -270°, 제1아암의 회전 - 전방 45°, 후방 45°, 제2아암의 회전 - 상향 45°, 하향 45°, 제2아암의 선회 -270°, 제3아암의 회전 - 상향 135°, 하향 135°, 제3아암의 선회 - 270°, 종단관절 아암의 회전 - 상향 135°, 하향 135°, 종단관절 아암의 선회 - 270° 이다. 작동 범위는 그림9와 같이 수평거리 860 ~ 2220mm, 수직거리 1440 ~ 2260mm, 선회 각도 270°, 회전각도 90°, 270° 이다.

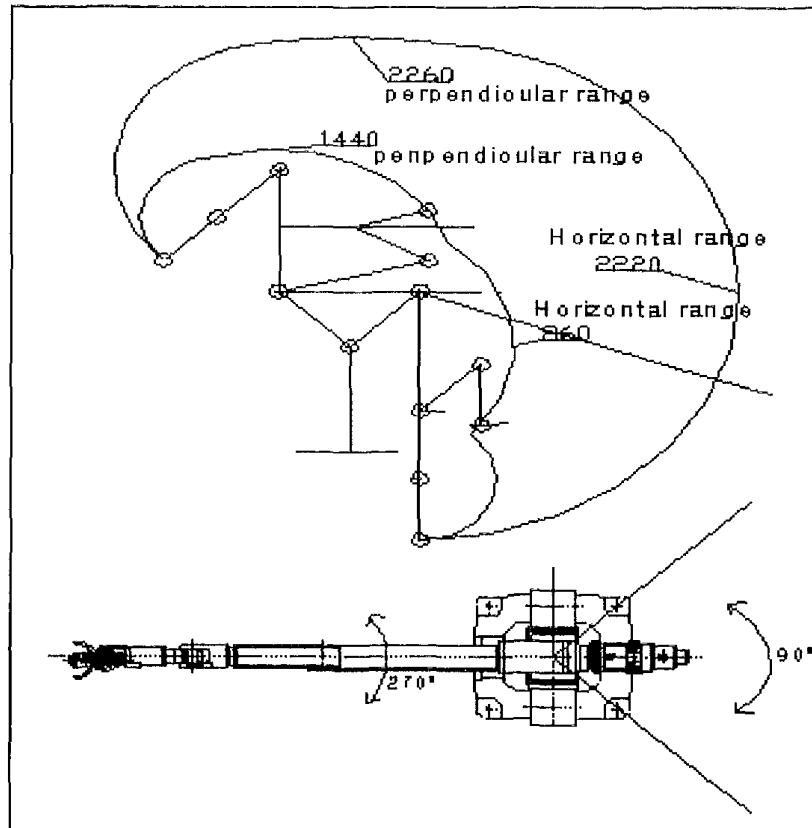


Fig 9. Working range of robot



## 제3장 사과수확 로봇의 주행차량 개발

### 제1절 차량제작의 고려 사항

- 1) 사과와 같이 큰 수관을 가지는 과수의 과실수확을 행하기 위해서는 작동거리가 큰 매니플레이터를 장착하므로 작업 시 차체의 흔들림이 비교적 적은 차량을 제작.
- 2) 수확 로봇을 장착하고 충분한 하중을 견딜 수 있도록 제작.
- 3) 수확 로봇의 작동 범위 내에서는 일체의 차체 장치의 간섭이 없도록 구성.
- 4) 수확 로봇의 자체 전원공급이 가능하도록 제작.
- 5) 수확 로봇의 장착 이후의 굴곡지나 경사지의 선회시 차체의 기울어짐이 없도록 충분한 전, 후방 밸런스 고려.
- 6) 차량의 모든 제어장치와 다관절 과실 수확로봇의 제어장치간에 간섭이 없고 장치간의 조작에 있어 운전자의 편의성을 고려.
- 7) 수확 로봇 및 차량 제어장치 등의 오작동에 대비한 차량 장치의 안전성을 강화.

### 제2절 차량장치 구성 및 선정방법

#### 1. 장치 구성 및 제원

본 연구에서 제작된 차량의 전체 배치를 살펴보면 우선 차량의 차량중심부분에 다관절 과실 수확 로봇의 좌, 우측 모터부의 회전반경을 고려하여 충분한 공간(가로 650mm, 세로 760mm)을 확보하였으며 차량의 좌측에 단자함, 컨트롤박스, 전원부, 모니터, 발전기, 우측에 배터리, 유압펌프 그리고 사과상자를 놓을 공간을 확보하였다. 또한 다관절 과실 수확로봇의 전면에 연료탱크, 로봇제어장치, 메인 컴퓨터 등을 두었

으며 다관절 과실 수확로봇의 오작동으로 인한 제어장치, 메인 컴퓨터의 손실을 줄이기 위해 수확 로봇의 제어부에 별도의 센서를 장착하였으며 안전을 위한 케이스도 제작하였다. 모니터 밑 부분에는 키보드 장착을 위한 수납공간을 두었으며 로봇 주변에 C자형 프레임을 설치하여 앞부분의 컨트롤박스, 배터리 등에서 엔진으로 연결되는 모든 전선과 유압배선, 로봇관련 전선 등의 배치공간으로 사용하여 회선 점검시 유리하도록 하였다. 또한 엔진과 연계하여 별도의 발전기와 전원부를 설치함으로써 야외에서의 별도의 전원공급을 생략하여 수확작업에 용이하도록 하였다. 차륜은 무한 궤도 방식을 채택하여 습지나 연약 지반, 경사지의 주행성능을 좋게 하였으며 차량의 모든 제어와 로봇의 제어를 간단한 컨트롤 장치로 구성해서 한 곳에서 제어가 가능하도록 작업자의 편의성을 도모하였으며 차량의 모든 상황과 다관절 과실 수확 로봇의 상황을 한 곳에서 점검이 가능하도록 제작하였다. 또한 여러 개의 벨트와 풀리가 있는 엔진부분에는 덮개를 씌워 작업자의 안전사고를 미연에 방지할 수 있도록 하였으며, 자동 조작뿐만 아니라 수동 조작으로도 클러치 제어가 가능하도록 하여 차량엔진 점검시 편의성을 고려하였다.

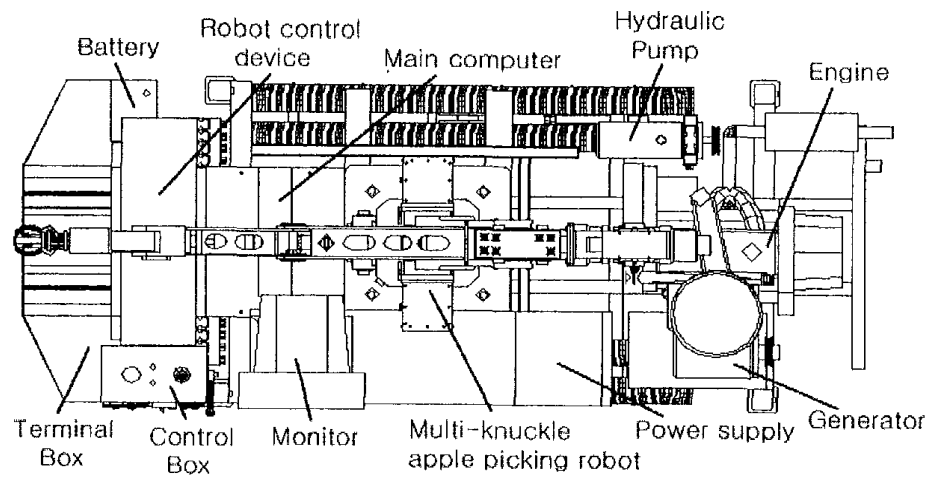


Fig 10. Equipment configuration mounted on vehicle

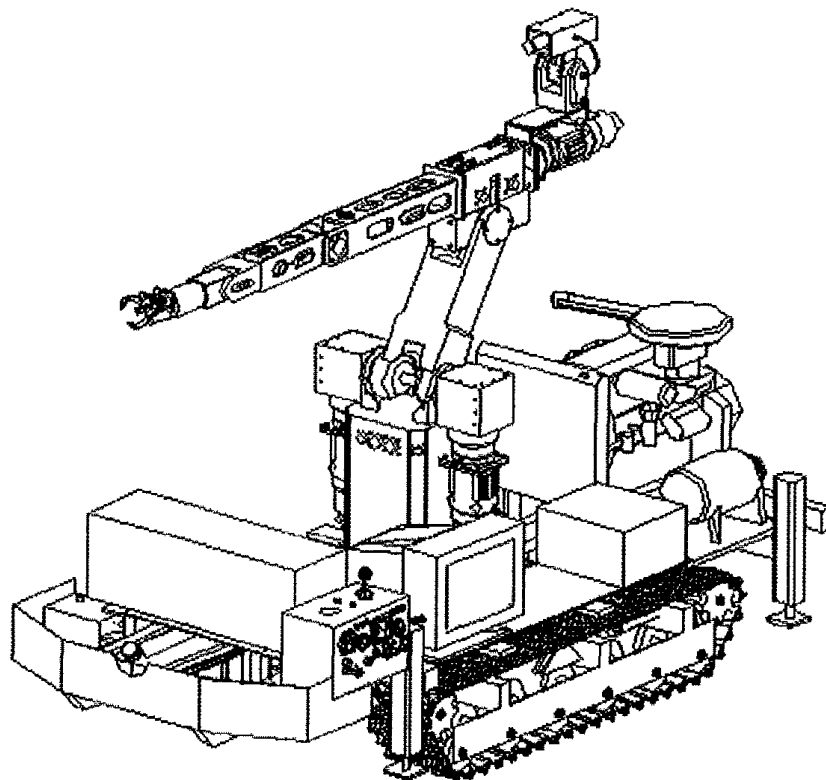


Fig 11. Figure of vehicle

Table 1. Specification of vehicle

body	length(mm)	3240	power transmission type	movement type	caterpillar		
	width(mm)	1290		shift	manual 3 forwards, manual 1 reverse		
	height (including robot)(mm)	1260					
	weight(kg)	1600				clutch	multiple disk type
	engine	type				OHC inline 4 cylinder water-cooled gasoline engine	drive & parking break
power/rpm (ps/rpm)			maximum 48/5000	caterpillar	(width × pitch × length)		
		cylinder dia × stroke			78 × 78.4	touch-down pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	0.18-0.26
displacement			1498cc	hydraulic system			
		maximum torque			14.2/3500	capacity (cm <sup>3</sup> /rev)	5
weight(kg)			108			actual pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	120
minimum rotation radius(m)			2.1				
slope capacity(in degree)			30				

## 2. 유압장치의 선정방법

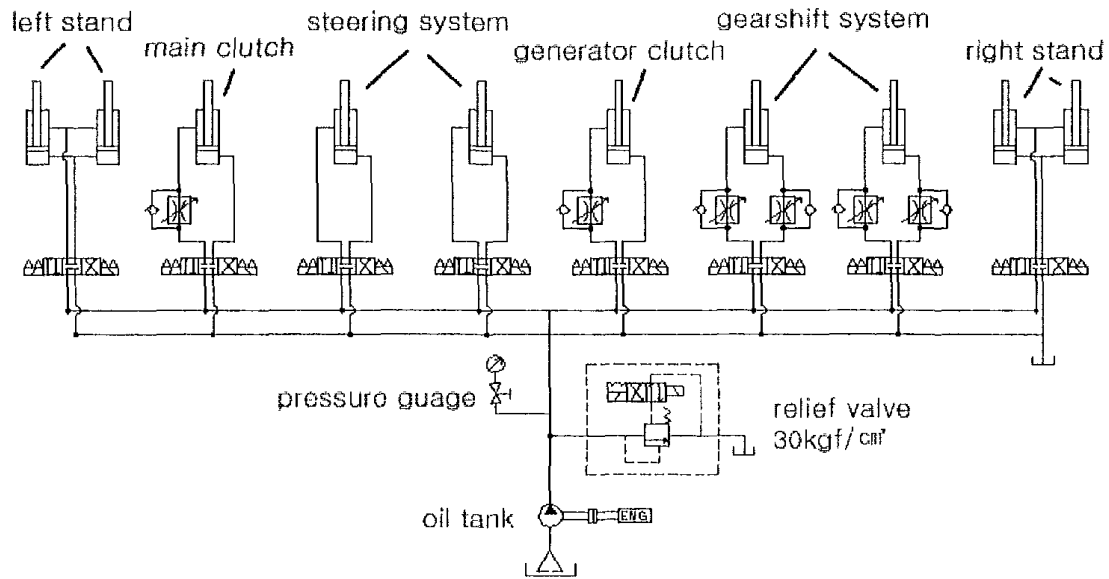


Fig 12. Schematic diagram of hydraulic system

그림 12는 차량에 설치된 유압장치의 회로도를 나타낸 것이다. 제어기술에서 동력을 전달하는 데에는 유압이외에도 기계, 전기, 공압 등의 매체가 사용될 수 있으나 힘과 속도를 무단으로 조절 할 수 있고 큰 동력을 전달 할 수 있는 유압을 사용하였다. 특히 유압은 과부하에 대한 방지대책이 간단함으로 인해 유압장치를 사용하게 되었으며 설치된 유압장비는 전기신호, 즉 솔레노이드 밸브에 의하여 주로 작동되는 고정식 유압설비이다. 메인 클러치, 제너레이터 클러치는 유압실린더의 출구 관로측에서 유압유를 교축하여 실린더의 작동속도를 제어하는 미터-아웃(meter-out) 유량제어방식으로 속도제어에 필요한 양 이외의 잉여 유압유는 병렬로 연결된 압력 릴리프 밸브를 통해 탱크로 방출되며 펌프의 압력은 실린더 부하 압력에 관계없이 릴리프 밸브의 설정압력이 된다. 또한 유량의 제어에는 가변용량형 펌프를 사용하여 1회전당의 토출량을 변경하는 방법과 정용량형 펌프와 유량제어밸브를 사용하는 두 가지의 방법이 있

으나 후자의 경우를 사용하여 회로의 단순화와 속도제어의 용이성을 기했다. 총 10개의 유압실린더와 각 부분에 사용될 8개의 솔레노이드 밸브를 사용하였으며 각각 좌, 우측 지지대, 메인 클러치, 조향장치, 제너레이터 클러치, 변속장치 등에 사용하였다.

설치된 솔레노이드 밸브는 중립위치에서 연결구 P, T, A, B가 모두 차단되어 있는 폐쇄식 센터형 4포트3위치밸브이며 DUNKIN-BESKO사의 것을 사용하였다. 이 폐쇄식 센터형 밸브는 외력을 받아 일시적으로 미동해서는 안 되는 경우와 액츄에이터를 정지한 상태로 다른 액츄에이터를 작동시킬 경우, 즉 독립적인 제어가 가능한 경우, 1개의 펌프로 여러 개의 액츄에이터를 구동시키는 경우 주로 사용된다. 또한 압력의 급격한 상승으로 인해 모터가 정지하는 것을 막고 일정한 압력유지를 위해 직동형 릴리프 밸브를 유압펌프의 토출 라인에 설치하였으며 압력은 작동에 적절한  $30\text{kgf/cm}^2$ 로 설정하였다. 유압펌프는 차량용에 많이 사용되는 배인펌프를 사용하였다. 다른 펌프에 비해 토출압력의 맥동이 거의 없기 때문에 원활한 운동을 할 수 있고 소음이 적고 선단이 바모해도 압력이 떨어질 염려가 거의 없다.

유압실린더는 주로 복동 한쪽 로드형을 사용하였으며, 차량 전반부의 미션주위에 축직각 포트형으로 설치하였다. 좌, 우측 지지대의 실린더는 직접 부하하중에 적절한 것으로 제작하였고 나머지는 기존의 규격실린더를 사용하였다. 배관은 압력배관용 탄소강관과 호스를 사용하였다.

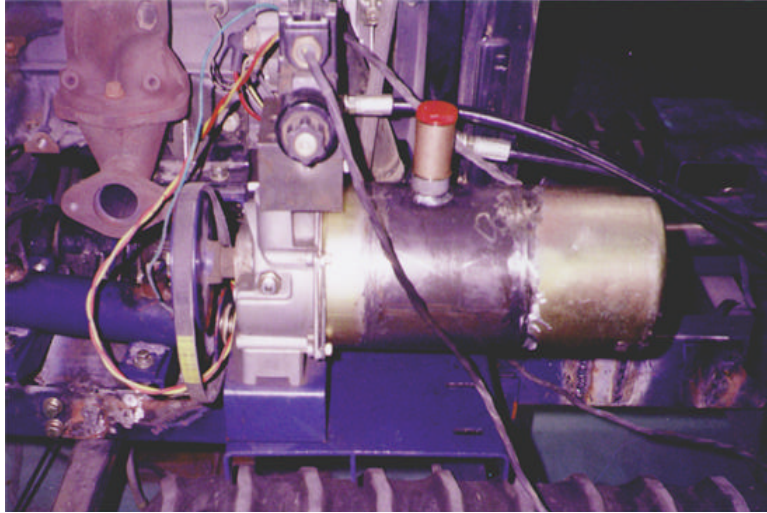


Fig 13. Hydraulic pump

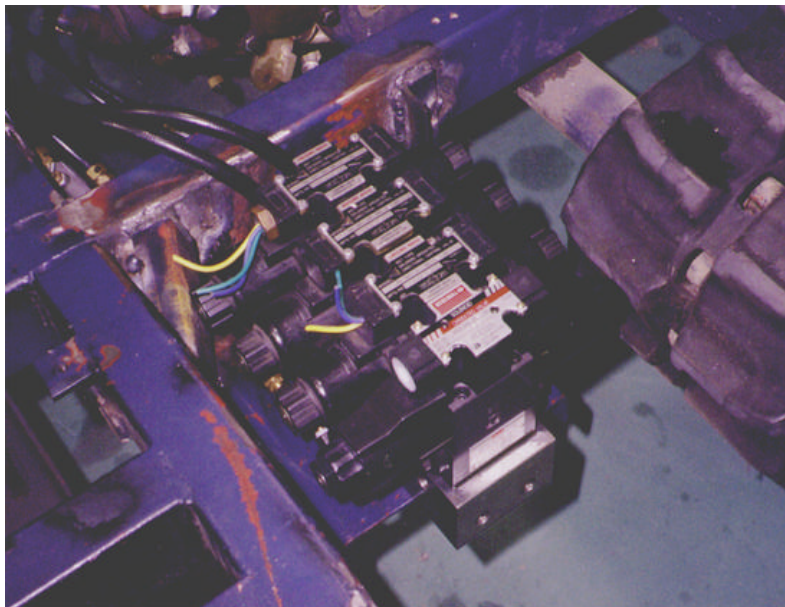


Fig 14. Solenoid valve

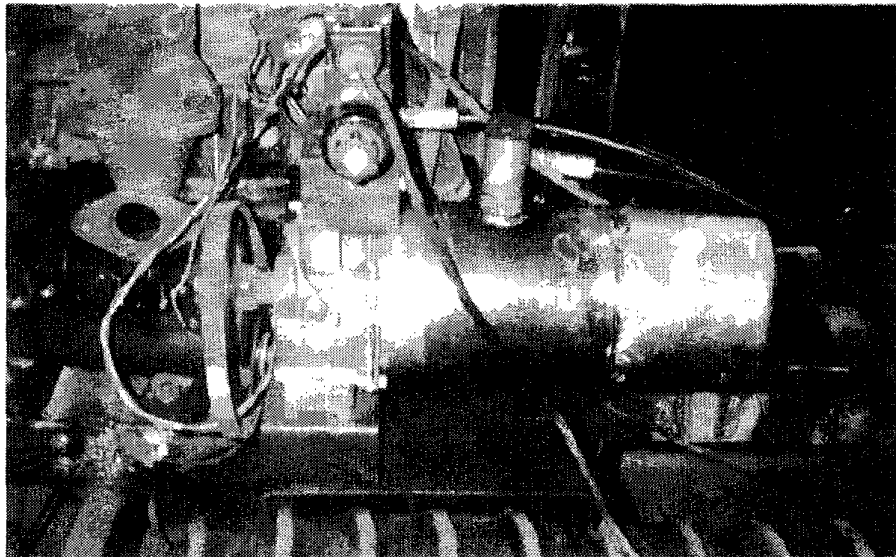


Fig 13. Hydraulic pump

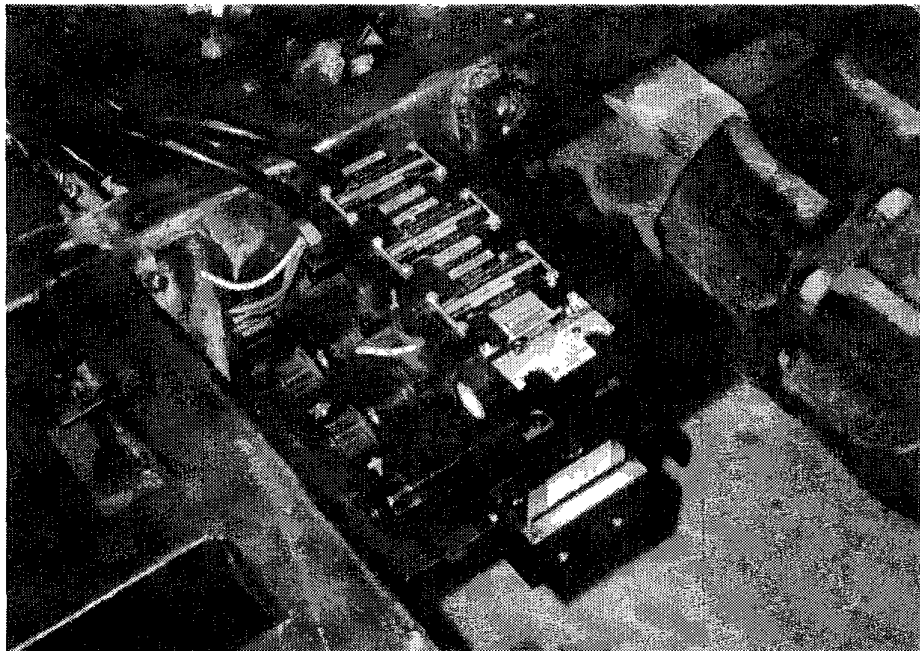


Fig 14. Solenoid valve



가. 유압실린더 및 펌프의 선정

유압실린더를 선정하기 앞서 압력, 누설, 안전성, 크기 등을 고려한 사용압력이 유압펌프에서 결정되어지는데, 이 경우 산업용 소형으로 적절한  $30\text{kgf/cm}^2$ 로 선택하였다. 실린더의 경우는 후진운동시에 단위 시간당 피스톤 로드와 부피만큼을 덜 채워도 되기 때문에 후진시의 속도가 더욱 빠르고 부하가 적게 걸리는 복동 실린더를 선택하였으며 또한 차량에 설치된 대부분의 유압실린더는 실린더의 행정 거리가 피스톤 로드지름에 비해 과도하게 크지 않기 때문에 좌굴(buckling)에 대한 검토를 할 필요가 없었다.

1) 메인 클러치, 제너레이터 클러치부

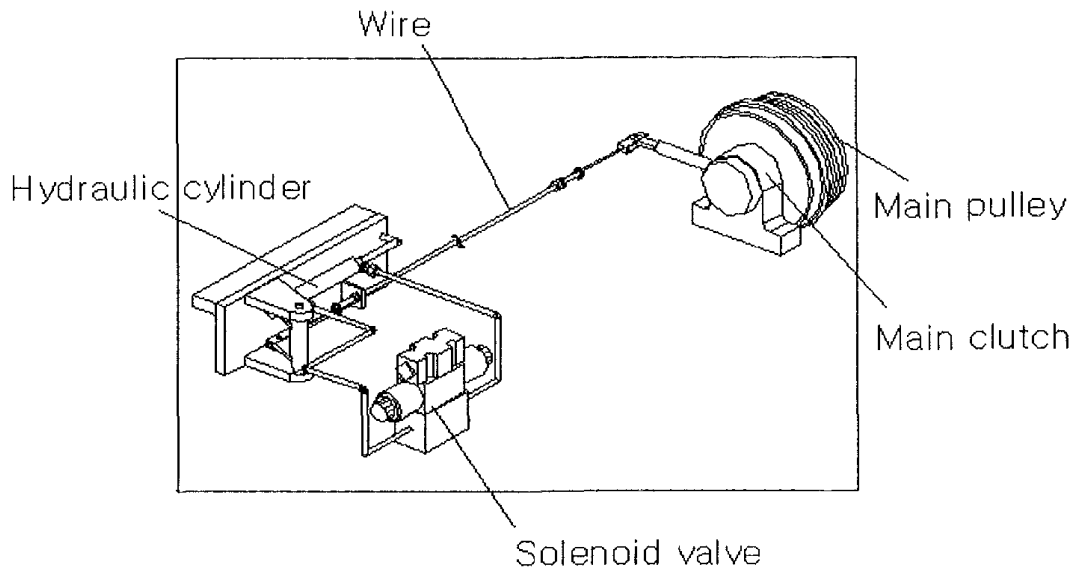


Fig 15. Control of main clutch

우선 요구되어지는 실린더 직경을 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$F = \eta \cdot p \cdot A \text{ or } d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\eta \cdot \pi \cdot p}} \quad (29)$$

F : 추력(kgf),  $\eta$  : 기계적 효율 (압력이 30kgf/cm<sup>2</sup>의 경우 0.85)

p : 압력(kgf/cm<sup>2</sup>), A: 가압면적(cm<sup>2</sup>), d : 피스톤직경(cm)

메인 클러치와 제너레이터 클러치에 사용되는 실린더의 경우 클러치에 걸리는 부하는 사람의 힘으로도 작동이 가능한 상태이며 대략 30kgf로 가정하였으며 부하실린더에 걸리는 최종압력은 배관압력손실 1kgf/cm<sup>2</sup>, 방향제어밸브 압력 손실 0.5kgf/cm<sup>2</sup>, 후진운동시의 배압 0.5kgf/cm<sup>2</sup> 등을 제외한 28kgf/cm<sup>2</sup>이며 요구 되는 실린더직경은 위 식을 이용하여 12.7mm로 계산된다. 이 경우 압력이 30kgf/cm<sup>2</sup>로 설정되었기 때문에 기계적 효율은 0.85로 취할 수 있다. 또한 실린더의 선정에서 실린더가 표준화되어 있으므로 요구되어진 계산치 12.7mm보다 큰 16mm, 면적비 1.25인 표준 실린더를 사용할 수 있으며 이 경우 로드직경은 14.3mm이고 면적비는 피스톤 축 면적을 (피스톤 축 면적-피스톤 로드 단면적)의 값으로 나눈 값을 의미한다.

메인 클러치를 제어함에 있어 요구되어지는 실린더의 소요속도는 50mm/s이므로 쿠션내장형 실린더를 사용할 필요가 없으며 다음 식을 이용해 소요유량을 구할 수 있다.

$$Q = Ap \cdot v \quad (30)$$

Ap : 부하가 걸리는 실린더 단면적, v : 소요 속도

소요유량은 0.6 l/min가 나온다.

또한 후진시의 속도와 소요되는 동력은 다음 두 식을 이용할 수 있다.

$$v = \frac{Q}{Apr} \quad (31)$$

Apr : 부하가 걸리는 실린더 로드축 단면적, Q : 소요 유량

$$L_s = \frac{p \cdot Q}{450 \cdot \eta} \quad (32)$$

$L_s$  : 소요동력(PS) ,  $p$ : 토출 압력 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$Q$  : 토출량( $\ell/\text{min}$ ) ,  $\eta$ : 전효율 80%

이 경우 속도는 62mm/s이며, 소요 동력은 0.05PS가 나온다.

위와 같이 메인 클러치와 제너레이터 클러치의 경우 필요한 유압실린더, 펌프 등과 압력손실을 고려해보면 실린더 직경은 16mm, 소요동력은 0.05PS를 필요로 하나 실제 적으로 차량에 설치된 실린더는 요구된 값보다 큰 기존의 DUNKIN-BESKO 사의 cylinder bore 20mm, Rod dia 10mm 인 실린더를 사용하여 최고 75.5kg<sub>f</sub> 까지의 부하를 견딜 수 있도록 구성하였다. 이 경우 소요유량은 0.94  $\ell/\text{min}$ 이고, 필요한 소요 동력은 0.074PS가 되며 소요 동력값이 이론치와 실제 설치된 실린더의 값과 미소한 차이가 있지만 차량 구동에 있어 큰 영향을 미치지 않으므로 좀 더 많은 부하에 견디도록 구성하였다.

## 2) 변속장치, 조향장치

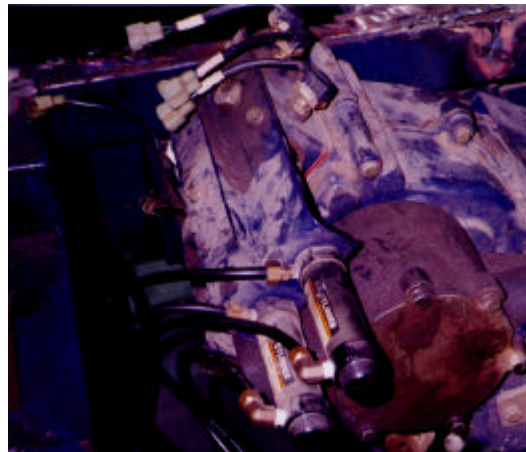


Fig 16. Gearshift hydraulic cylinder

$$L_s = \frac{p \cdot Q}{450 \cdot \eta} \quad (32)$$

$L_s$  : 소요동력(PS) ,  $p$ : 토출 압력 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

$Q$  : 토출량( $\ell/\text{min}$ ) ,  $\eta$ : 전효율 80%

이 경우 속도는 62mm/s이며, 소요 동력은 0.05PS가 나온다.

위와 같이 메인 클러치와 제너레이터 클러치의 경우 필요한 유압실린더, 펌프 등과 압력손실을 고려해보면 실린더 직경은 16mm, 소요동력은 0.05PS를 필요로 하나 실제 적으로 차량에 설치된 실린더는 요구된 값보다 큰 기존의 DUNKIN-BESKO 사의 cylinder bore 20mm, Rod dia 10mm 인 실린더를 사용하여 최고 75.5kgf 까지의 부하를 견딜 수 있도록 구성하였다. 이 경우 소요유량은 0.94  $\ell/\text{min}$ 이고, 필요한 소요 동력은 0.074PS가 되며 소요 동력값이 이론치와 실제 설치된 실린더의 값과 미소한 차이가 있지만 차량 구동에 있어 큰 영향을 미치지 않으므로 좀 더 많은 부하에 견디도록 구성하였다.

## 2) 변속장치, 조향장치

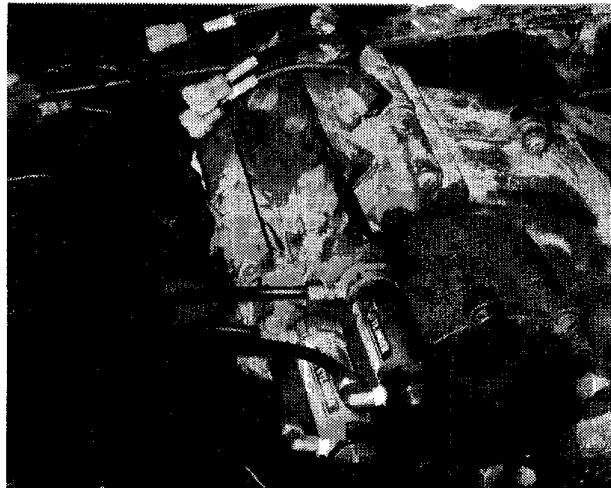


Fig 16. Gearshift hydraulic cylinder

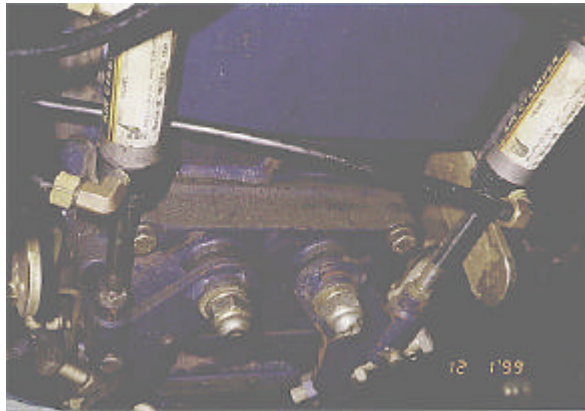


Fig 17. Steering hydraulic cylinder

미션 하부에 설치된 조향 장치 실린더에 걸리는 하중은 25kg, 미션 상부에 설치된 변속 장치 실린더에 걸리는 하중은 10kg로 산정, 이 경우 요구되는 실린더 직경은 각각 11.5mm, 7.3mm이며 동일한 표준실린더(cylinder 12mm, rod dia 5.4mm)의 것을 사용할 수가 있다. 또한 이 경우 소요유량은 각각 0.34 ℓ/min, 0.2 ℓ/min이며 소용 동력식  $L_s = \frac{p \cdot Q}{450 \cdot \eta}$  을 이용하여 소요동력은 0.03PS와 0.02PS로 나타났다. 하지만 실제 사용된 유압실린더는 기존의 실린더(cylinder 25mm, rod dia 12mm)를 사용하였고 소용동력은 0.12PS로서 큰 동력 차이를 보이지 않았다.

### 3) 좌, 우측 지지대

지지대는 원형이 아닌 사각형의 형태로 제작하여 차체 프레임에 장착이 용이하도록 했으며 각각에 걸리는 하중설정은 실제 차량을 떠받치는 것보다는 수확 작업시 차체 고정예 더 많은 비중을 두어 유압시스템에도 많은 힘을 요구하지 않도록 각각 100kg로 설정하였고 다른 부속장치의 실린더보다 빠른 속도를 요구하지 않으므로 요구속도는 20mm/s로 설정하였다.

이 경우 요구되는 실린더 직경은 23mm이며 표준 실린더 25mm를 사용할 경우 소요유량은 0.59 ℓ/min이며 소요동력은 0.05PS이다. 하지만 실제적으로 좀 더 많은 하

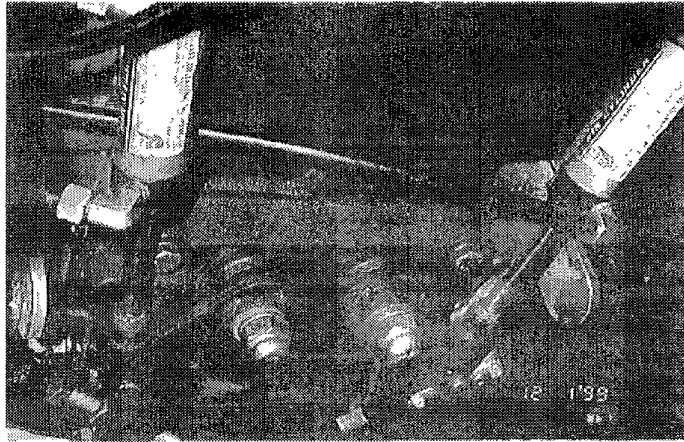


Fig 17. Steering hydraulic cylinder

미션 하부에 설치된 조향 장치 실린더에 걸리는 하중은 25kgf, 미션 상부에 설치된 변속 장치 실린더에 걸리는 하중은 10kgf로 산정, 이 경우 요구되는 실린더 직경은 각각 11.5mm, 7.3mm이며 동일한 표준실린더(cylinder 12mm, rod dia 5.4mm)의 것을 사용할 수가 있다. 또한 이 경우 소요유량은 각각 0.34 ℓ/min, 0.2 ℓ/min이며 소용 동력식  $L_s = \frac{p \cdot Q}{450 \cdot \eta}$  을 이용하여 소요동력은 0.03PS와 0.02PS로 나타났다. 하지만 실제 사용된 유압실린더는 기존의 실린더(cylinder 25mm, rod dia 12mm)를 사용하였고 소요동력은 0.12PS로서 큰 동력 차이를 보이지 않았다.

### 3) 좌, 우측 지지대

지지대는 원형이 아닌 사각형의 형태로 제작하여 차체 프레임에 장착이 용이하도록 했으며 각각에 걸리는 하중설정은 실제 차량을 떠받치는 것보다는 수확 작업시 차체 고정에 더 많은 비중을 두어 유압시스템에도 많은 힘을 요구하지 않도록 각각 100kgf 로 설정하였고 다른 부속장치의 실린더보다 빠른 속도를 요구하지 않으므로 요구속도는 20mm/s로 설정하였다.

이 경우 요구되는 실린더 직경은 23mm이며 표준 실린더 25mm를 사용할 경우 소요유량은 0.59 ℓ/min이며 소요동력은 0.05PS이다. 하지만 실제적으로 좀 더 많은 하

중여유를 고려하여 40mm 표준실린더에 가깝도록 제작하였다. 이 경우 한 실린더 당 소요동력은 0.12PS이지만 한 배관에 차량의 앞, 뒤 두 개의 실린더가 연결되어 있어서 약 0.24PS의 동력을 필요로 하며, 동시에 좌, 우측 두 개의 지지대를 쓸 경우 0.5PS의 동력과 6.04 ℓ/min의 유량을 필요로 한다.



Fig 18. Vehicle stand

#### 4) 유압펌프 및 탱크의 선정

총 8개의 실린더를 작동하지만 실제 동시에 작동하는 것은 좌, 우측 지지대 둘뿐이며 또한 이 부분이 가장 많은 부하를 받게 되어 유압펌프 선정시 지지대를 기준으로 선정하였으며 실린더 스트로크를 고려하여야 하나 조향장치, 변속장치등의 각 부분 등은 거의 실린더경이 미소하여 유압유의 양에 많은 영향을 미치지 않으므로 실린더의 선정 시 생략하였으며 지지대의 경우는 예외로 하였다. 앞서 지지대의 실린더 선정 시 요구된 소요 유량 6.04 ℓ/min를 기준으로 사용압력 30kgf/cm<sup>2</sup>, 펌프 회전수 2376rpm에서 펌프의 전효율은 75%이다. 이 경우 전효율은 실험식

$$\eta = \frac{1 - \frac{C_s \cdot \Delta P}{2\pi n}}{1 + C_d \frac{2\pi n}{\Delta P} + C_f} \quad (33)$$

C<sub>s</sub> : 내부 누설계수, C<sub>d</sub> : 펌프의 점성계수

중여유를 고려하여 40mm 표준실린더에 가깝도록 제작하였다. 이 경우 한 실린더 당 소요동력은 0.12PS이지만 한 배관에 차량의 앞, 뒤 두 개의 실린더가 연결되어 있어서 약 0.24PS의 동력을 필요로 하며, 동시에 좌, 우측 두 개의 지지대를 쓸 경우 0.5PS의 동력과 6.04 l/min의 유량을 필요로 한다.

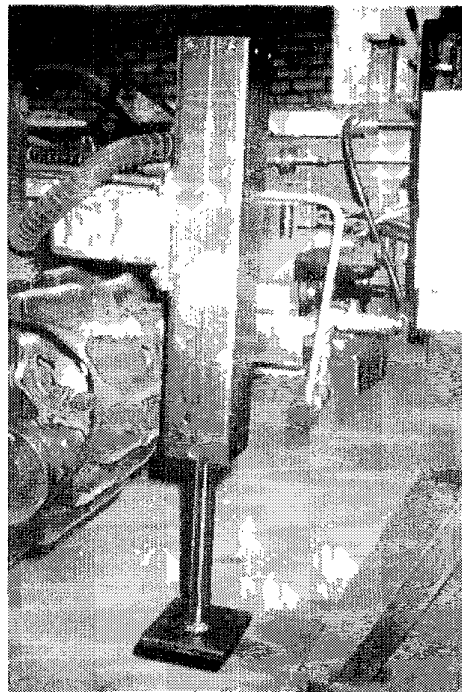


Fig 18. Vehicle stand

#### 4) 유압펌프 및 탱크의 선정

총 8개의 실린더를 작동하지만 실제 동시에 작동하는 것은 좌, 우측 지지대 둘뿐이며 또한 이 부분이 가장 많은 부하를 받게 되어 유압펌프 선정시 지지대를 기준으로 선정하였으며 실린더 스트로크를 고려하여야 하나 조향장치, 변속장치등의 각 부분 등은 거의 실린더경이 미소하여 유압유의 양에 많은 영향을 미치지 않으므로 실린더의 선정시 생략하였으며 지지대의 경우는 예외로 하였다. 앞서 지지대의 실린더 선정시 요구된 소요 유량 6.04 l/min를 기준으로 사용압력 30kgf/cm<sup>2</sup>, 펌프 회전수 2376rpm에서 펌프의 전효율은 75%이다. 이 경우 전효율은 실험식

$$\eta = \frac{1 - \frac{C_s \cdot \Delta P}{2\pi\mu n}}{1 + C_d \frac{2\pi\mu n}{\Delta P} + C_f} \quad (33)$$

Cs : 내부 누설계수, Cd : 펌프의 점성계수



$n$  : 회전수 ,  $\Delta P$  : 토출관과 흡입관의 압력차,

$C_f$  : 펌프의 마찰계수,  $\mu$  : 마찰계수

을 이용한 배인 펌프의 토출 용량대비 압력과 전효율의 관계선도를 이용하여 구할 수 있다. 따라서 이 경우 펌프의 용량을 아래 식을 이용해 구하여 보면

$$qd(\text{펌프의용량}) = \frac{Q \cdot 1000}{n \cdot \eta} \quad (34)$$

$n$  : 회전수,  $\eta$  : 전효율,  $Q$  : 소요 유량

3.4cc/rev 가 되며 소요 동력식을 이용한 소요 동력은 0.54PS이다. 그러므로 펌프는 최소 용량 3.4cc/rev 의 것을 사용하여야 하며 실제 차량에 설치된 펌프는 용량이 더 큰 5cc/rev의 배인펌프를 사용하였다. 이 경우 소요동력은 1.06PS, 소요 유량은 11.8 l/min이며 이 값은 차량 전체의 동력에 비해 아주 작은 값으로 차량의 기타 작동에 무리가 없는 것으로 나타났다.

또한 유압탱크의 크기를 선정하는 경우 좌, 우측 지지대를 제외한 대부분의 유압실린더는 작동시 작동유의 변화량이 아주 작기 때문에 실제 가장 큰 지지대를 기준으로 선정하였다. 이 경우 좌, 우측 지지대의 스트로크를 지면보다 높게 하여 250mm선정, 4개의 유압 실린더 작동시 작동유의 변화량은 1.26 l 가 되며 탱크의 선정시 최소크기는 변화량의 3배인 3.78 l 가 되어야 하며 실제 4 l 크기의 탱크를 설치하였다.

#### 나. 배관의 압력강하

유압장치에서 배관은 펌프와 밸브 및 액츄에이터를 연결하여 유압에너지를 수송하는 역할을 하지만 유압펌프에서 세팅된 압력이 유압실린더에 전달되는 과정에서 압력손실이 발생한다. 일반적으로 호스와 파이프의 유량 단면적은 배관내의 압력손실에

영향을 미치고 이는 유압시스템의 효율에 영향을 미치므로 파이프배관, 엘보우, 밴드, 엘보우밴드 등을 제한치 이내로 설계하여 사용하여야 한다.

압력강하에 앞서 우선 솔레노이드 밸브까지 설치된 배관 속의 유속이 적절한지 다음 식을 이용해 구할 수 있으며 이 경우 설치된 배관 직경은 7.5mm, 도입유량은 198cm<sup>3</sup>/s이다.

$$A = \frac{Q}{v} , \quad A = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (35)$$

A: 배관 단면적(cm<sup>2</sup>) , Q : 유량(cm<sup>3</sup>/s)

v : 유체의 속도(cm/s) , d : 배관직경(cm)

결과적으로 배관내의 유량속도는 4.5m/s가 되며 통상 관압력 50kgf/cm<sup>2</sup>까지 4m/s 전후가 되도록 하는 기준치를 참고하여 볼 때 적절하게 설계가 되었으며 이는 곧 적절한 직경의 배관 설치를 의미한다. 또한 압력강하의 경우 유체가 흐를 때의 내부마찰이나 배관 벽에서의 마찰은 저항의 형태로 되어 압력강하의 형태로 측정되거나 계산될 수 있으며 현재 설치된 유압시스템은 저압에 가까우므로 압력강하를 제외한 실제적인 유체의 체적감소나 압력에 의한 점도변화는 고려할 필요가 없는 것으로 판단되었다.

### 1) 직선 배관

솔레노이드 밸브까지의 총2545mm의 길이에 해당하는 직선배관내의 압력강하는 아래의 Darcy-Weisbach의 실험식을 이용하여 계산하였다

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (36)$$

$\Delta P$  : 압력강하(kgf/cm<sup>2</sup>) ,  $\lambda$  : 배관의 관 마찰계수(=75/Re)

l : 배관길이 (m) , d : 배관직경(cm)

$\rho$  : 밀도 (kg/m<sup>3</sup>) , v : 유체속도(m/s)

차량에 설치된 관의 유체의 흐름은 레이놀즈 상수의 결정식  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$  을 이용한 관마찰계수를 결정하여 보면 0.063이 되며 광유계의 일반 유압유의 밀도  $850\text{kg/m}^3$ 를 적용 대입하여 위 식에서 압력강하를 구하여 보면  $0.05\text{kgf/cm}^2$ 가 나온다 .

미션 좌측에 설치되어 메인 클러치, 조향 시스템의 경우 연결관이 61mm 더 길어져  $0.06\text{kgf/cm}^2$ 이 되며  $0.01\text{ kgf/cm}^2$ 의 차이를 보인다. 좌, 우측지지대의 경우는 솔레노이드 밸브를 나오면서 유압실린더까지 나오는 길이가 더욱 길어져 직선배관의 전체적인 압력강하는  $0.07\text{kgf/cm}^2$ 로 나왔다.

또한 좌, 우측 지지대를 제외한 나머지 유압실린더에 유입되는 내경이 솔레노이드 밸브를 지나면서 3mm로 작아져 이 경우의 속도는  $28.3\text{m/s}$ , 길이 290mm, 관 마찰계수 0.02로 되며 압력강하는  $0.66\text{kgf/cm}^2$ 로 되었다.

## 2) 변형 배관

직선배관 뿐만 아니라 변형 배관(엘보우 등 포함)내에서의 압력강하를 고려하면 이 경우 저항은 유량과 관의 기하학적 형상에 따라 달라지며 압력손실은 통상 사용되는 배관에서 실험으로 얻어진 손실계수  $\zeta$ 를 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta P = \zeta \cdot b \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (37)$$

$\Delta P$  :압력강하( $\text{kgf/cm}^2$ ) ,  $\zeta$ :손실계수 , b :보정계수(m)

$\rho$ :밀도 ( $\text{kg/m}^3$ ) , v :유체속도(m/s)

차량에 설치된 관의 경우 관의 흐름에 대한 레이놀즈 상수에 대한 보정계수 b는 1.3, 파이프 형상에 대한 손실계수  $\zeta$ 는 1, 직선부분을 제외한 변형부분의 8곳의 값을 구하여 적용하여 보면  $0.23\text{kgf/cm}^2$ 이 나온다.

좌, 우측 지지대의 경우는 6곳이 더해져  $0.4\text{kgf/cm}^2$ 이 나오며 따라서 한 실린더의 작

동시 직선과 변형부분을 합한 총 압력강하는 방향제어밸브 압력손실  $0.5\text{kgf/cm}^2$ 을 합한  $1.5\text{kgf/cm}^2$ , 지지대의 경우는  $1\text{kgf/cm}^2$ 이므로 유압펌프에서  $30\text{kgf/cm}^2$ 으로 설정된 압력의 값이 전달과정에서 압력손실이 약  $1\sim 2\text{kgf/cm}^2$ 로 나타났다.

또한 사용압력에 관한 관의 두께 공식 Barow 공식

$$t = \frac{p \cdot D}{200 \cdot \sigma} \quad (38)$$

$t$  : 관의 두께 ,  $p$ : 사용압력( $\text{kgf/cm}^2$ ) ,  $D$ : 관의 바깥지름(mm)

$\sigma$  : 허용응력( $\text{kgf/mm}^2$ ) :인장강도/안전계수, 일반적으로 안전계수는 4)

을 이용하면 두께1.7mm, 최소인장강도가  $30\text{kgf/mm}^2$ 인 저압 배관용 탄소 강관을 사용한 경우 그 결과 요구되어진 인장강도  $3.7\text{kgf/mm}^2$ 에 비해 아주 큰 값의 차이로 안전하게 보여주는 것으로 나타났다.

### 제3절 차량의 동력전달부 구성

차량의 동력전달은 로봇의 장착으로 인하여 차량의 뒷편에 위치한 엔진 풀리로부터 아래쪽에 위치한 메인 클러치 풀리, 추진축, 변속기, 피니언과 베벨 기어, 조향 클러치, 궤도차륜 순으로 되어있으며 메인 클러치 풀리 부분에서 유압 풀리, 발전기 풀리로 연결되어 있다. 조향 장치는 좌, 우 브레이크로 구성 되어있으며 선회 반경은 2.5m이며 브레이크를 사용할 경우 최소 선회 반경은 1.9m이다. 클러치는 3개의 마찰판을 가진 다판 클러치를 사용하여 크기를 줄였으며 엔진 플라이휠로부터 3개의 V벨트로 연결되어 있다. 엔진의 상시 rpm을 2600으로 두었을 때 풀리의 P.C.D와 회전수를 이용한 속도비 공식을 이용해 구하면 각각의 회전수는 메인 클러치 풀리 1406.9rpm, 발전기 풀리 1872rpm, 유압펌프 풀리 2376rpm이 나온다.

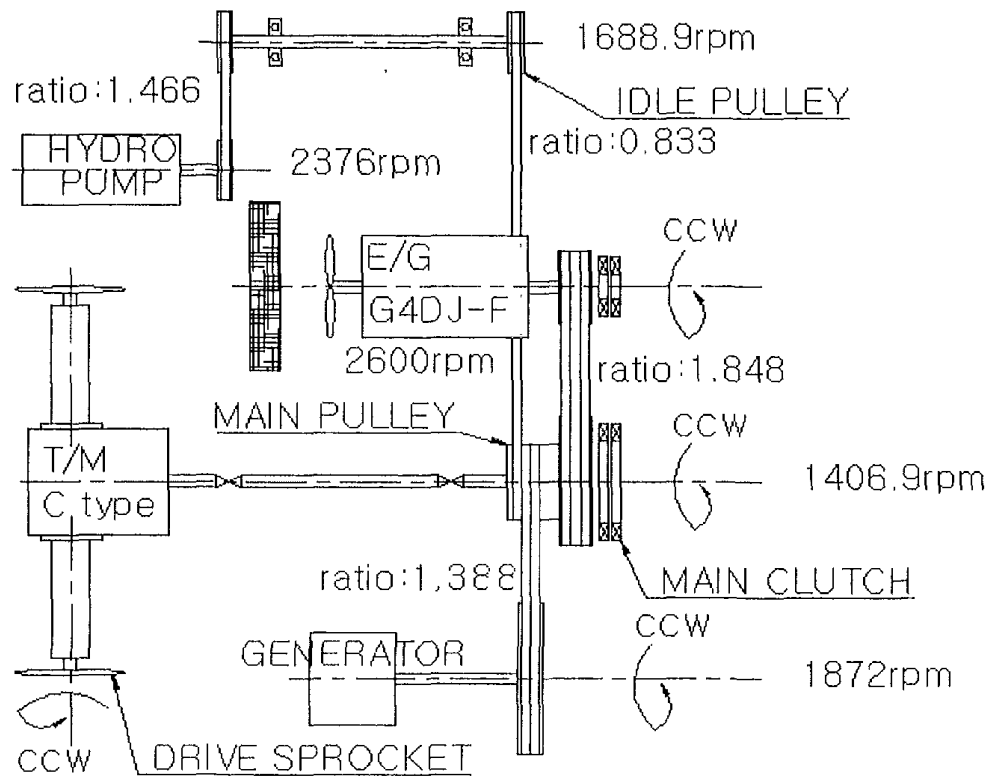


Fig 19. Power delivery diagram of vehicle

## 제4절 전원부와 발전부의 선정 및 개발

### 1. 전원부와 발전부

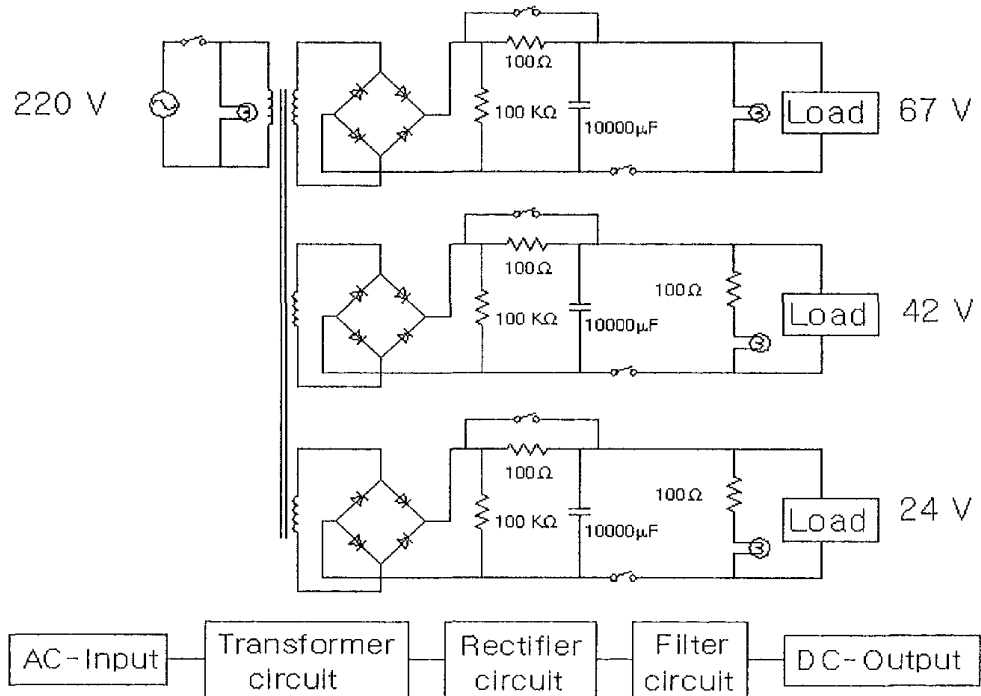


Fig 20. Schematic diagram of power supply

그림 20은 차량의 좌측후반에 설치된 전원부의 회로도를 나타낸 것이다. 이 회로도 는 크게 목적하는 크기의 직류전압을 얻기 위한 변압회로와 브릿지 다이오드회로를 구성하여 교류전압의 전주기에 대해 방향변화 없이 출력전압을 얻을 수 있는 정류회 로 그리고 정류회로에서 하지 못한 리플(맥동분)을 억제하기 위한 저항과 콘덴서로 구성된 평활 회로로 되어있다. 또한 콘덴서와 브릿지 다이오드 사이에는 100kΩ과 100 Ω의 5W저항을 설치하였는데 이 회로는 콘덴서 양단(+, -)에 설치된 한 쌍의 스위치 를 이용하여 사용 전에는 100Ω의 저항에 의해 콘덴서의 급속 충전(쇼트현상)을 방지

하고 사용 후는 100k $\Omega$ 의 저항에 의하여 콘덴서를 방전하여 안전을 고려하였다. 그리고 이 회로는 67V, 42V, 24V의 직류전압의 출력을 얻도록 구성하여 각각 모터 구동 전압-(67V, 24V), 브레이크 구동전압-(24V, 12V), DC 브러쉬·서보 모터-(67V) 등에 사용하였다.

발전기는 120V와 240V의 두 종류의 전압을 얻을 수 있으며 3600rpm에서 정격전압을 얻을 수 있고 차량후반부 엔진 아랫부분에 설치된 유니버설 축 풀리에 연결되도록 설치하였다. 발전기축과 바닥부분에 L자형의 지지대(열간강관)를 설치하여 차량에 고정하였다. 축 부분에는 벨트의 회전하는 힘을 지지하기 위해 폭 34mm에 6205 볼베어링 두 개를 슬라이딩 공차를 두고 삽입하였으며 원활한 동력전달과 슬립손실을 줄이기 위해 2개의 풀리를 제작하여 B형 V벨트로 연결하였다. 실제 제작된 발전기의 모양과 사양을 그림 21과 표 2에 나타내었다.

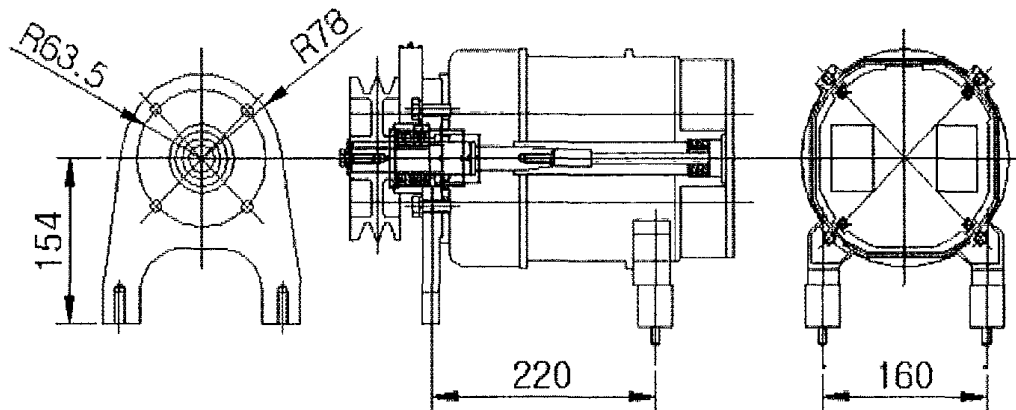


Fig 21. Generator

Table 2. Specification of generator

Specification	
MODEL	09799-1
SERIES	SVP5000
VOLTS	120/240
WATTS	5,000
RPM	3,600
PHASE 1 HERTZ	60
AMPS	41.7/20.8

CSASS F INSULATION  
AT 40°C CONTINUOUS DUTY  
GENERAC CORP.

## 2. 발전기 풀리의 설계

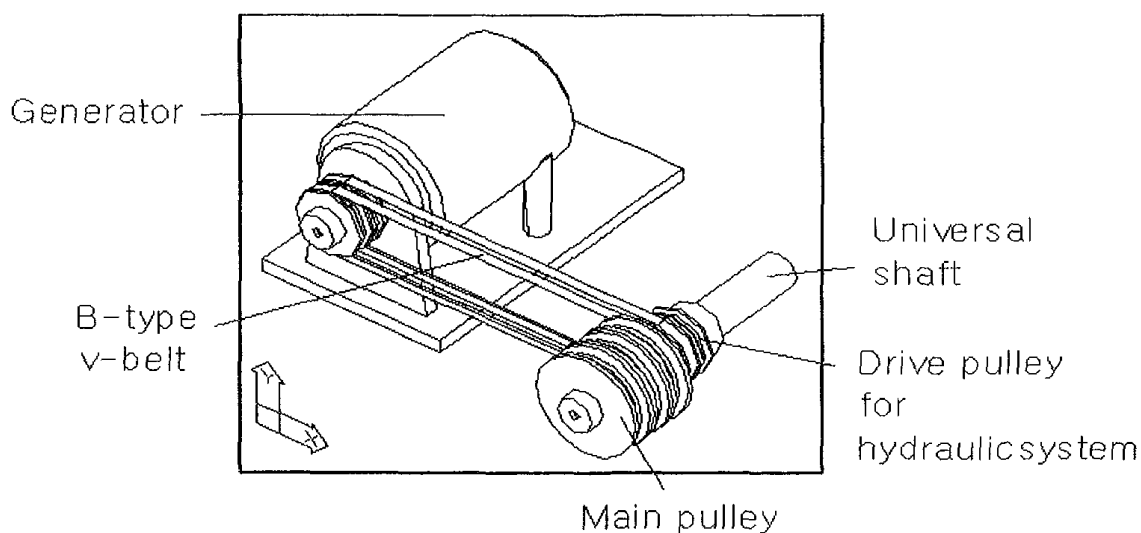


Fig 22. Connection between main clutch pulley and generator pulley

그림 22와 같이 발전기 V 벨트 풀리경의 결정과 가닥수를 선정을 위한 과정을 살펴보면 엔진 회전수 5,000rpm을 가정하여 (차량이 정지한 후 로봇의 작업이 이뤄진다고 가정, 실제 부하가 걸리지 않는 경우) 유니버설 축에 28PS의 힘이 걸리고 이 경우



에 발전기에 필요한 동력은 약 6PS, 필요한 회전수는 3,600rpm이다.

우선 발전기 풀리 외경을 구하기 위해 유니버설 축의 rpm을 얻어야 하며 이 모든 과정은 속도비 공식

$$i = \frac{n}{N} = \frac{D}{d} \quad (39)$$

(N, D : 원동차의 지름, 회전수 , n, d : 종동차의 지름, 회전수)

을 이용하여 구하게 되며 엔진 플라이휠에서 유니버설 축 풀리로, 유니버설 축 풀리에서 발전기 풀리로 두 단계의 과정을 거치게 된다. 처음의 경우

i) 엔진 회전수 : 5000rpm(N) , ii) Engine 풀리경 :  $\varnothing 124(\text{mm})(D)$

iii) 클러치 풀리경 :  $\varnothing 216 (\text{mm})(d)$ 의 값을 이용하면 유니버설 축 회전수(n)는 2870rpm이 나오며, 두 번째의 경우

i) 유니버설 축 회전수 : 2870rpm(N) , ii) 유니버설 축 풀리경 :  $\varnothing 102(\text{mm})(D)$

iii) 발전기 rpm : 3600(n)을 이용하면 결과적으로 발전기 풀리경을 속도비 공식을 이용하여 구하여 보면 81.516mm가 되며 약  $\varnothing 82\text{mm}$ 가 된다.

유니버설 축 풀리와 발전기 풀리 사이의 벨트의 길이(L)와 속도(V)는 아래의 공식들을 이용하여 구할 수 있다.

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(d+D) + \frac{(D-d)^2}{4C} \quad (40)$$

C : 풀리 중심사이의 거리, d, D : 풀리 경

$$V = \frac{\pi D n}{60 \times 1000} \quad (41)$$

n : 풀리 rpm, d : 유니버설 축 풀리경

속도는 15.3m/s가 나오며 벨트는 5-10 마력인 경우 B, C형을 선정하나 좀 더 컴팩트한 B형을 선정하였고 우선 가닥수 결정에 앞서 현재 벨트의 속도가 10m/s보다 크므로 원심력을 고려, 원심력에 의한 장력의 증가량을 살펴보아야 하며 이 경우 벨트 하나 당 전달마력( $H_0$ )을 구하기 위해 다음 공식을 이용한다.

$$H_0 = \frac{(T_t - \frac{w v^2}{g})v}{75} \cdot \frac{e^{\mu' \theta} - 1}{e^{\mu' \theta}} \quad (42)$$

$\mu'$  : 외관 마찰 계수,  $T_t$  : 벨트의 허용 인장 응력

$w$  : 벨트의 단위 길이 당 중량,  $v$  : 벨트의 속도

위의 공식에 적용되는 구성요소들의 값을 구하기 위해 먼저 단위 길이당 중량( $w$ )과 장력의 증가량( $T$ )의 값을 살펴보면 B형 벨트의 경우 단면적은  $1.5\text{cm}^2$ , 벨트 비중은 1.2이므로  $w$ 는

$$w = 1.5 \times 100 \times \frac{1.2}{1000} = 0.18 \text{ kg/m} \quad (43)$$

따라서 장력의 증가량을 아래의 공식을 이용하여 구하면

$$T = \frac{w(\text{kg}) v^2 (\text{m/s})}{g(\text{m/s})} \quad (44)$$

$w$  : 단위 길이당 중량, 비중 : 1.2,  $g$  : 중력 가속도

4.3kg이다.

또한 이 경우 접촉중심각  $\theta$  를 아래 식을 이용하여 구하면

$$\sin \phi = \frac{D-d}{2C} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \theta \text{ (발전기풀리)} &= 180^\circ - 2\phi \\ &= 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left( \frac{D-d}{2 \times C} \right) \end{aligned}$$

C : 중심사이의 거리, D, d : 폴리경

3.07rad 이며, 고무벨트와 주철 폴리의 경우 마찰계수  $\mu=0.4$ , B형의 허용 인장 응력은  $T_t= 24\text{kg}$ 이므로 이 값을 이용한 외관마찰계수  $\mu'$  는 아래와 같다.

$$\mu' = \frac{\mu}{\sin \frac{\alpha}{2} + \mu \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{0.4}{\sin 20^\circ + (0.4 \times \cos 20^\circ)} = 0.56$$

$$e^{\mu'\theta} = 2.718^{0.56 \times 3.07} = 5.58, \quad \frac{e^{\mu'\theta} - 1}{e^{\mu'\theta}} = \frac{5.58 - 1}{5.58} = 0.82$$

따라서, 앞서 구한 값들을 이용한 한 가닥의 전달마력( $H_0$ )은 3.295PS가 나오며 부하수정계수( $K_2$ )는 발전기의 경우 0.9이며 접촉각도 수정계수( $K_1$ )는 접촉각도를 이용하여 구하면 1이 된다. 또한 약 6PS의 동력전달에 필요한 벨트 가닥수는 아래 공식을 이용하면

$$Z = \frac{H}{H_0 K_1 K_2} \quad (46)$$

$H_0$  : 한 가닥의 전달 마력 , H : 소요 동력

$K_1$  : 접촉각도 수정계수 ,  $K_2$  : 부하수정계수

2.02가 나오며 약 2개가 소요됨을 알 수 있다.

## 제5절 컨트롤 박스와 변속부의 개발

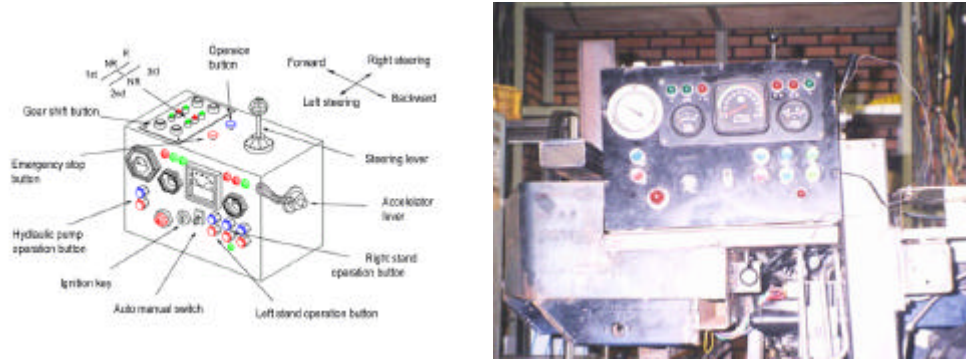


Fig 23. Control box

그림 23은 차량의 조작부로서 엔진, 조향, 기어변속, 유압장치 등의 수동조작을 행하는 컨트롤 박스의 모양을 나타낸 것이며 가로370mm, 세로210mm, 높이260mm로 되어 있다. 컨트롤 박스 전면은 시동키 및 유압조작 버튼, 표시등, 유압계, 연료계, 회전속도계 등이 설치되어 있고 상부는 기어변속 버튼 4개와 현재의 변속위치를 알려주는 표시부, 조향 조작 레버, 긴급정지 버튼이 설치되어 있으며 컨트롤박스 오른쪽에는 와이어로 연결된 가속 레버가 설치되어 있다. 먼저 박스 전면부에 설치된 유압조작 버튼들은 차량배터리의 12V의 전원을 공급받아 솔레노이드 밸브와 단자를 경유하여(연결 방식은 모터의 방향전환방식과 유사) 연결되어 있으며 차량차체에 접지 하였다. 또한 왼쪽 2개의 버튼은 릴리프밸브와 연결되어 유압장치 전체의 ON, OFF 역할을 하며 오른쪽 6개의 버튼 중 좌측 4개는 좌, 우측 지지대를 작동하도록 되어 있다. 또한 윗 부분에 설치된 변속조정부의 LED는 변속위치를 검출하기 위해 트랜스미션에 설치된 6개의 위치센서와 연결되어 있으며 변속 버튼은 미션에 X-Y축으로 설정된 두

## 제5절 컨트롤 박스와 변속부의 개발

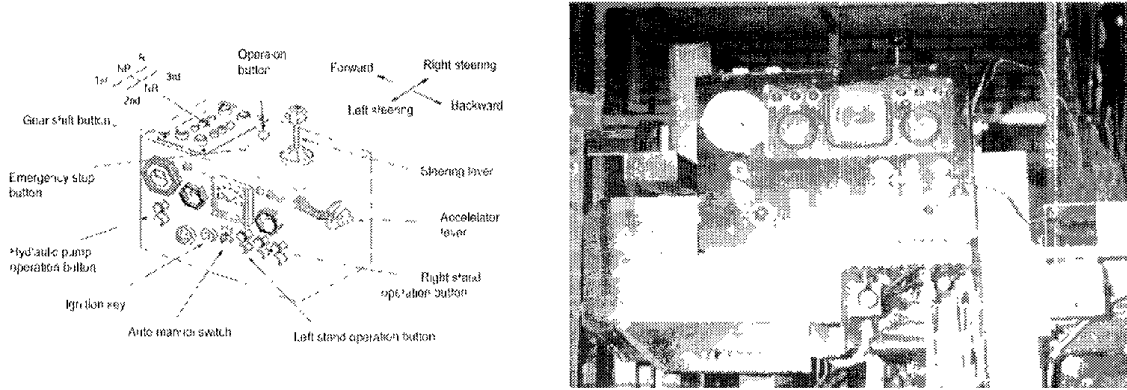


Fig 23. Control box

그림 23은 차량의 조작부로서 엔진, 조향, 기어변속, 유압장치 등의 수동조작을 행하는 컨트롤 박스의 모양을 나타낸 것이며 가로370mm, 세로210mm, 높이260mm로 되어있다. 컨트롤 박스 전면은 시동키 및 유압조작 버튼, 표시등, 유압계, 연료계, 회전속도계 등이 설치되어 있고 상부는 기어변속 버튼 4개와 현재의 변속위치를 알려주는 표시부, 조향 조작 레버, 긴급정지 버튼이 설치되어 있으며 컨트롤박스 오른쪽에는 와이어로 연결된 가속 레버가 설치되어 있다. 먼저 박스 전면부에 설치된 유압조작 버튼들은 차량배터리의 12V의 전원을 공급받아 솔레노이드 밸브와 단자를 경유하여(연결 방식은 모터의 방향전환방식과 유사) 연결되어 있으며 차량차체에 접지하였다. 또한 왼쪽 2개의 버튼은 릴리프밸브와 연결되어 유압장치 전체의 ON, OFF 역할을 하며 오른쪽 6개의 버튼 중 좌측 4개는 좌, 우측 지지대를 작동하도록 되어있다. 또한 윗 부분에 설치된 변속조정부의 LED는 변속위치를 검출하기 위해 트랜스미션에 설치된 6개의 위치센서와 연결되어 있으며 변속 버튼은 미션에 X-Y축으로 설정된 두

개의 유압실린더를 작동하도록 만들어져 있다. 이 X-Y축은 실제로는 2개의 실린더가 평행하게 설치되어 있으나 기어변속의 형태가 H형으로 봤을 때 H상하 방향을 X, 수평방향을 Y로 생각하면 된다. 예를 들어 1단에서 2단으로 바꾸고자 할 때는 먼저, Y축 실린더가 1ST위치에서 NL(좌측중립)쪽으로 작동하고 NL위치에 오면, X축 실린더를 작동시켜 NR(우측중립)쪽으로 밀어주고 Y축 실린더가 한번 더 레버를 2ND쪽으로 밀어줌으로서 변속이 완료된다. 전자밸브는 DC24V용 전자밸브를 사용하였고 센서는 접점형인 리미트 스위치를 사용하였다. 총 8개의 솔레노이드 밸브 각 부분에 회선의 색깔을 각기 달리하고 차량 앞부분에 별도의 단자를 설치하여 밸브의 작동여부상태를 점검하는 데 용이하도록 했다. 표 3은 우선적으로 연결된 각 밸브의 회선색깔을 나타낸 것이며 그림 23은 미션부와 비션 위에 장착된 센서를 도시한 것이다.

Table 3. Color of electric wire

use	hydraulic system ON,OFF	right-steering cylinder	left-steering cylinder	main clutch	right stand	left stand
ON	yellow	white	pink	gray	brown	brown
OFF	green	flame color	blue	blue	black	pink

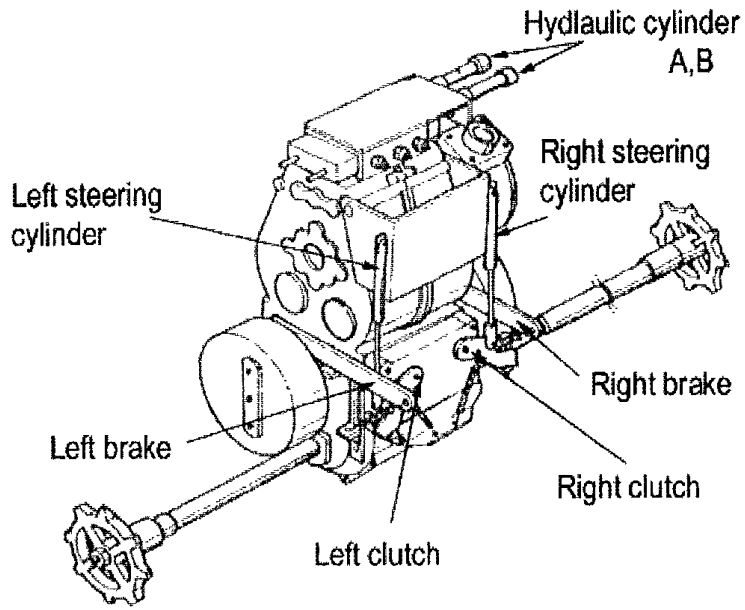


Fig 24. Transmission

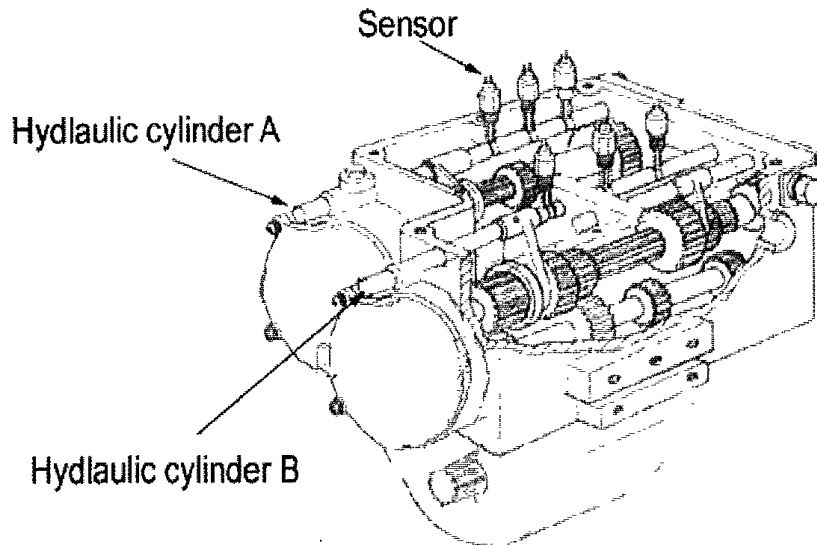


Fig 25. sensors mounted on transmission

Table 4. Specification of hydraulic system

		main, generator clutch	gearshift	steering	vehicle stand	hydraulic pump
theoretical	cylinder dia (mm)	12.7	7.3	11.5	23	-
	flow rate ( l / min )	0.6	0.2	0.34	0.59	8.08
	required power (PS)	0.05	0.02	0.03	0.05	0.54
actual	cylinder dia (mm)	20	25	25	40	-
	flow rate ( l / min )	0.94	1.5	1.5	1.51	11.88
	required power (PS)	0.074	0.12	0.12	0.12	1.06



# 제4장 사과 수확 로봇 관절의 서보 제어장치 개발

## 제1절 재료 및 방법

### 1. 구성 및 동작 계획

#### 가. 구성의 범위

화상처리에 의한 사과의 인식 알고리즘 개발에서, CCD 카메라를 이용한 화상처리에 의해 대상물인 사과를 인식하고 3차원 위치를 결정하는 알고리즘을 개발하였다. 결정된 사과의 3차원 위치 정보는 PC의 serial 포트를 통해 로봇 제어기에 입력되어 각 관절을 구동하게 된다.

수직 다관절 사과 수확 로봇의 매니플레이터 개발에서, 기동 토크가 큰 67V<sub>DC</sub> 400W급 DC Cup 모터를 사용하여 수직 다관절 시스템을 구성하였다. 사용된 모터는 정격토크가 22.3kg<sub>f</sub>·cm (정격출력 0.4kW)이고 순간 기동토크가 112.0kg<sub>f</sub>·cm (순간 최대출력 2.0kW)로 보고하였다.

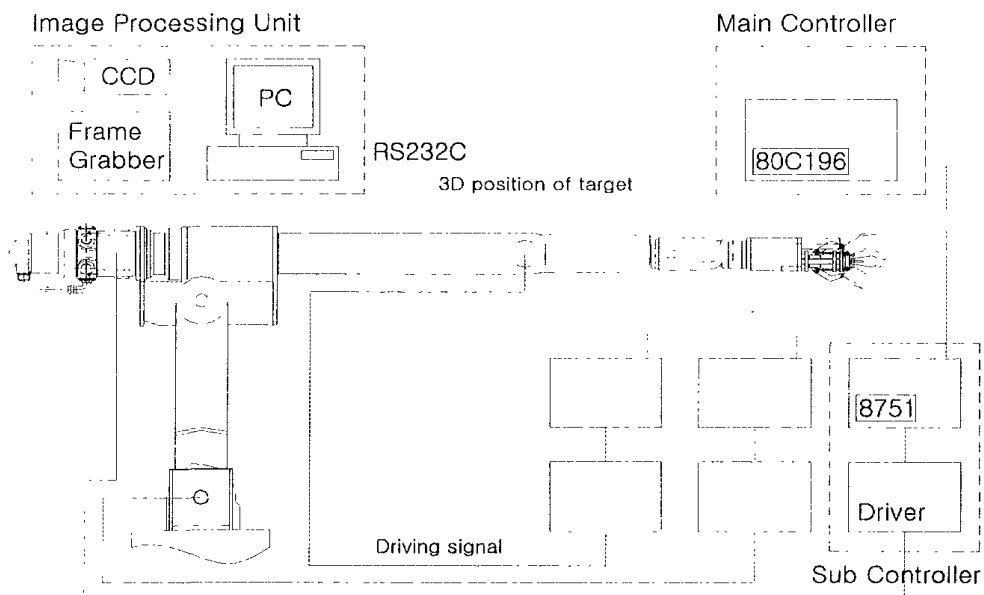


Fig. 26. Control schematic of the apple harvesting robot system

사과 수확 로봇의 전체 구성은 그림 26과 같이 CCD 카메라를 이용하여 수확 대상 물인 사과를 인식하고, 화상 처리에 의해 목표물의 3차원 위치를 출력하는 영상 처리부와 목표 좌표에 따라 각 관절의 적정 위치를 결정하는 위치 제어 담당의 메인 컨트롤러, 결정된 위치 지령에 의해 필요한 회전 속도를 결정하고 이에 따라 각 모터에 구동 전압을 출력하기 위한 서브 컨트롤러 및 DC 모터로 구동되는 매니퓰레이터로 구성되어 있다.

본 연구는 서브 컨트롤러에 해당하는 서보 모터 제어 시스템을 개발하기 위한 것으로, 10~1400rpm의 범위에서 정격 구동 토크인 22.3kgf·cm 까지 부하의 변동에도 회전속도를 일정하게 유지할 수 있도록 속도 제어와 토크 제어에 초점을 두고 시스템을 설계하였다.

#### 나. 구성 및 설계사양

##### 1) 모터 및 엔코더

모터는 기동 토크가 크고, 전류 대 토크의 직선성이 강하며, feedback unit이 일체로 부착되어 있는 DC Cup 모터를 사용하였다. 시험을 위한 부하로는 외경 200mm, 내경 150mm, 두께 22mm의 주철제 풀리를 축에 취부하였다. 이 시험부하의 관성 모멘트는  $1.554 \times 10^{-1} \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ 로서 로터 관성의 약 27배에 해당하는데, 일반적으로 3-10배를 취하는 것에 비하여 매우 큰 편이다. 한편, 관성 모멘트는 다음의 두 식에 의해 계산된다.

모터축에 취부된 중공 원통형 시험 부하의 모터축 환산  $GD_L^2$ 의 계산식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 GD_L^2 [\text{kgf} \cdot \text{cm}^2] &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot (D_o^2 - D_i^2) \\
 &= \frac{\pi}{8} \cdot \rho \cdot L (D_o^4 - D_i^4)
 \end{aligned}
 \tag{47}$$

m : 부하의 질량 [kgf]

$\rho$  : 재료의 밀도 [kgf/cm<sup>3</sup>]

L : 축방향 길이 [cm]

Do, Di : 외경 및 내경 [cm]

단속운전이나 시동시 또는 브레이크에 의한 제동시에는 매우 큰 토크가 발생한다.  $GD^2$ 은 이러한 플라이휠 효과를 뜻하는 공업용 관성의 단위로서, 일반적으로 모터의 동특성을 표현하는데 사용되며, 관성 모멘트  $J$ 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$J [\text{kg}_f \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2] = \frac{GD^2}{4 \cdot g} \quad (48)$$

$g$  : 중력 가속도 [ $980 \text{ cm/s}^2$ ]

Table 5. Layout of motor, power supply and control mode

Motor and test load	
Torque constant	2.97 $\text{kg}_f \cdot \text{cm/A}$
Moment of inertia (Rotor)	$0.571 \times 10^{-2} \text{ kg}_f \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$
Moment of inertia (Load)	$1.554 \times 10^{-1} \text{ kg}_f \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$
Power supply	
Motor	67 $\text{V}_{\text{DC}}$
Power device	20 $\text{V}_{\text{DC}}$
Logic circuit	5 $\text{V}_{\text{DC}}$ , 15 $\text{V}_{\text{DC}}$
Control mode	
Load torque	22.3 $\text{kg}_f \cdot \text{cm}$
RPM	10~1400 rpm
Velocity control signal	-5~+5 $\text{V}_{\text{DC}}$
PWM frequency	$\geq 16 \text{ kHz}$
Step-response time	$\leq 250 \text{ ms}$

설계사양은 표 5와 같으며, 무부하 회전수 1400rpm을 출력하기 위한 스텝 응답은 모터의 기계적 시정수, 전기적 시정수, 가속정수, 마찰 손실 토크, 점성 제동 계수, 열 저항 등을 고려하여 약 250ms이내로 제어하고자 하였다.

### 2) 전원 전압

모터 구동부의 스위칭 작용으로 발생하는 노이즈가 제어회로에 간섭하는 현상을 막기 위해 구동부의 전원과 제어회로의 전원을 분리하여 설계하였으며, 모터의 용량을 고려하여 대용량의 트랜스와 콘덴서를 사용하였다.

### 3) 제어회로

속도 제어신호는  $0 \sim +5V_{DC}$  입력일 때 CW,  $-5 \sim 0V_{DC}$  입력일 때 CCW로 하였고, 회전 방향은 모터의 축 정면을 기준으로 하였다.

### 다. 서보 모터 제어 시스템

기본적인 서보 모터 제어 시스템은 그림 2와 같이 오차검출기, 증폭기, 전력 변환기, 제어 대상인 서보 모터와 엔코더 등으로 구성되며, 제어계는 위치 제어루프, 속도 제어루프, 전류 제어루프가 있다.

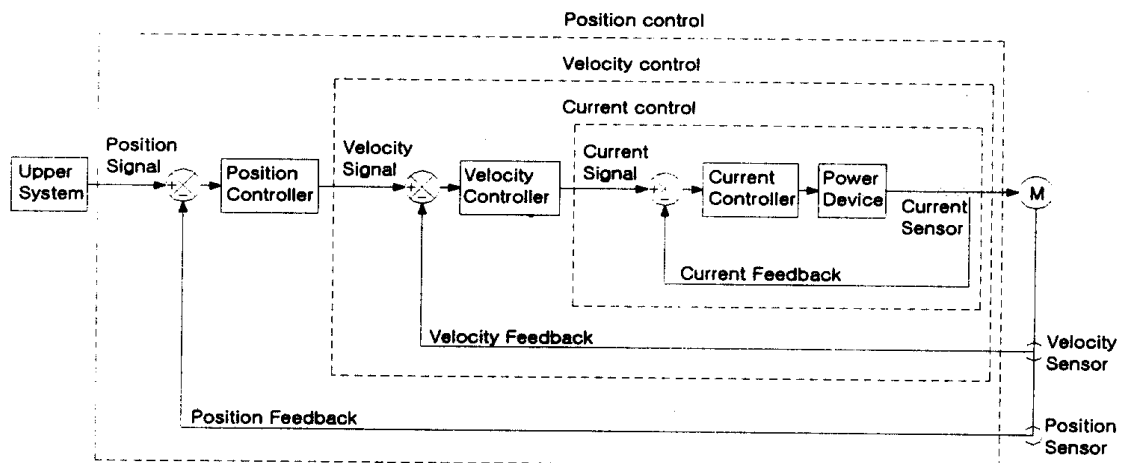


Fig. 27. Block diagram of a servo motor control system

위치 제어루프는 상위 시스템의 지령(command)을 받는 메인 루프로서 속도 제어루프와 전류 제어루프보다 우선 순위가 높아서, 위치 제어기의 출력신호가 속도지령이 되고 이것이 속도 제어루프에 입력된다. 속도 제어루프는 위치 제어루프의 마이너 루프로써, 전류 제어루프는 속도 제어루프의 마이너 루프로써 각각 작동하게 된다.

제어계를 메인 루프와 마이너 루프로 구성할 경우 마이너 루프의 응답이 메인 루프의 응답보다 훨씬 높아지게 된다. 따라서 위치 제어를 메인 루프로 하고 속도 제어와 전류 제어를 마이너 루프로 하는 종속 접속 제어계로 구성하면, 위치 제어계의 안정도(stability)를 향상시키고, 상위계에서 하위계를 보다 쉽게 제어할 수 있다.

각 제어계는 자동제어에서 가장 널리 쓰이는 PID 제어방법을 사용한다. P제어는 비례동작(proportional action)으로서 목표값과 피드백의 오차에 비례하는 조작량을 제어하는 방법으로 시스템의 안정도를 높이고 오버슈트(overshoot)의 크기를 줄이며, 진동이 발생하는 경우 그 진폭을 작게 하는 기능을 가진다. 그러나 제어량이 목표값에 근접하면 조작량이 너무 작아져서 더 이상 미세하게 제어할 수 없는 상태 즉, 정상상태 오차(steady-state error)가 발생하는 단점이 있다. I제어는 적분동작(integral action)으로서 시간지연(time delay)을 발생시켜 정상상태 도달시간을 길게 함으로서 과도응답 특성을 저하시킨다. D제어는 미분동작(differential action)으로 오차의 미분값에 비례하여 이루어지며, 급격한 외란에 대하여 큰 제어입력을 주어 신속하게 원래의 제어상태로 돌아가도록 함으로서 정상상태 도달시간을 줄여준다.

PI제어는 P제어에서 발생하는 잔류편차를 보정하기 위한 방법으로, 그림 28과 같이 미소한 잔류편차를 시간적으로 누적하여 어떤 크기로 된 곳에서 조작량을 증가시킴으로서 편차를 제거하는 형태이다. PI제어는 정확한 목표값으로 제어할 수 있지만, 일정한 시간이 필요하여 제어 응답 속도가 나빠진다. 따라서 D제어를 추가함으로서 급격한 외란에 대해 편차를 보고, 전회 편차와의 차가 큰 경우에는 조작량을 크게 하여 신속하게 반응하도록 한 것이 PID제어이다.

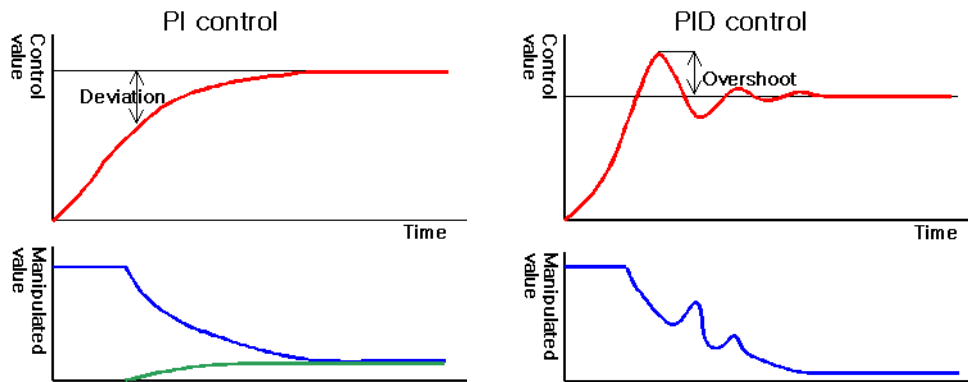


Fig. 28. Characteristic curve of PI and PID control

라, 속도 제어회로의 개요

속도 제어회로는 그림 29에 보여지는 블록선도와 같이 속도 제어기, 오차 검출기, 전류앰프, PWM 변조회로, dead time 부가회로, 구동회로, 전류센서, F-V 변환기(속도 검출기) 등으로 구성된다.

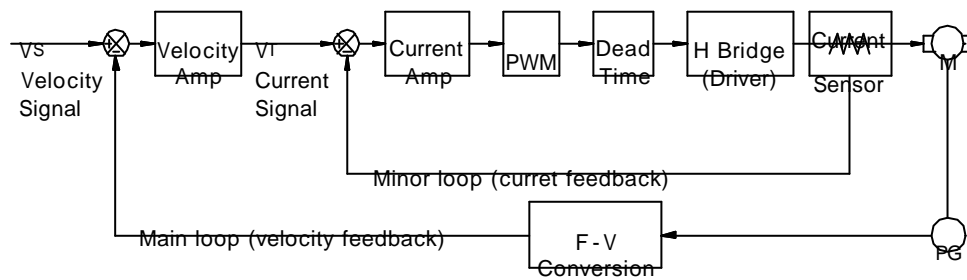


Fig. 29. Block diagram of a velocity control

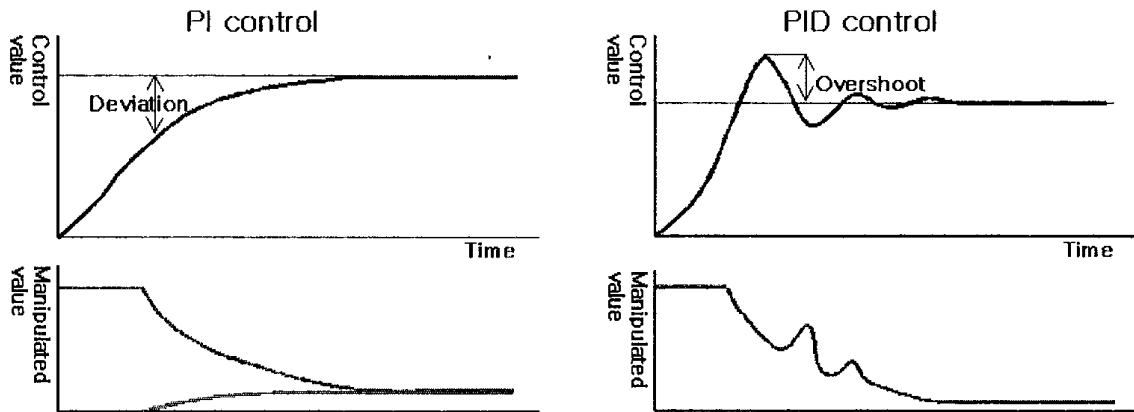
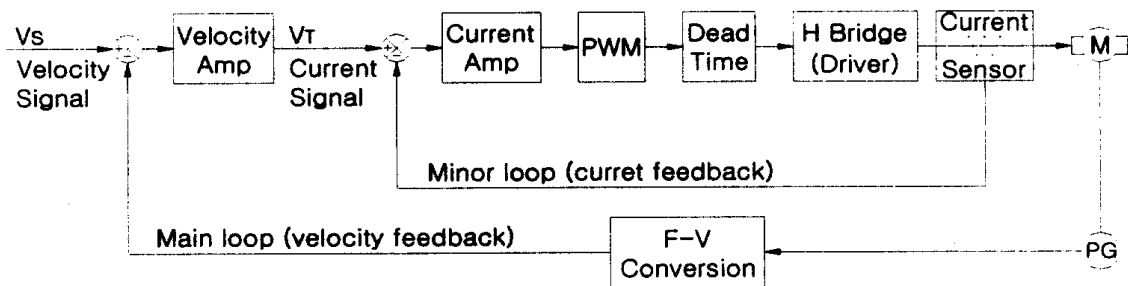


Fig. 28. Characteristic curve of PI and PID control

라. 속도 제어회로의 개요

속도 제어회로는 그림 29에 보여지는 블록선도와 같이 속도 제어기, 오차 검출기, 전류앰프, PWM 변조회로, dead time 부가회로, 구동회로, 전류센서, F-V 변환기(속도 검출기) 등으로 구성된다.



### 1) 속도 피드백

속도지령과 속도 피드백 신호의 차를 속도 앰프에 입력하여 회전속도가 일정하게 되도록 PI(비례적분)제어를 행하고, 출력인 전류지령을 전류 제어기에 입력한다.

### 2) 전류 피드백

전류 앰프는 전류 센서로 검출한 전기자 전류를 피드백 받아 제어신호에 비례하는 토크를 발생시키는 전류제어를 행한다. 이와 같이, 속도루프 내에 전류루프를 마이너 루프로 삽입하면 응답성과 안정성이 향상된다.

### 3) 회전 속도와 방향의 검출

모터의 회전속도와 회전위치에 대한 정보를 검출하기 위한 센서로서 일반적으로 엔코더를 사용한다. 광학식 로터리 엔코더는 축의 회전에 따라 A, B, Z상 3가지의 펄스열을 출력하게 된다. 모터가 정방향(CW)으로 회전하는 경우 A상 펄스가 B상보다 90도 앞서게되고, 원점신호인 Z상 펄스는 1회전당 1개가 발생한다. 따라서 A, B상의 위상차를 비교하면 회전방향을 얻을 수 있다. 그림 30(a)는 정방향 및 역방향 회전의 경우 각 펄스열의 출력을 나타내고 있다.

한편, 엔코더의 출력 펄스는 회전수에 비례하여 펄스폭이 변화하는데, 회전속도가 빠를수록 단위시간당 출력 펄스수가 많아진다. 펄스로부터 회전 속도를 검출하는 방법은 주파수-전압 변환(Frequency-Voltage Conversion) 방식, 펄스카운트 방식, 주기 측정 방식 등이 있으며, 얻어지는 속도신호는 속도 제어기에 피드백 된다.



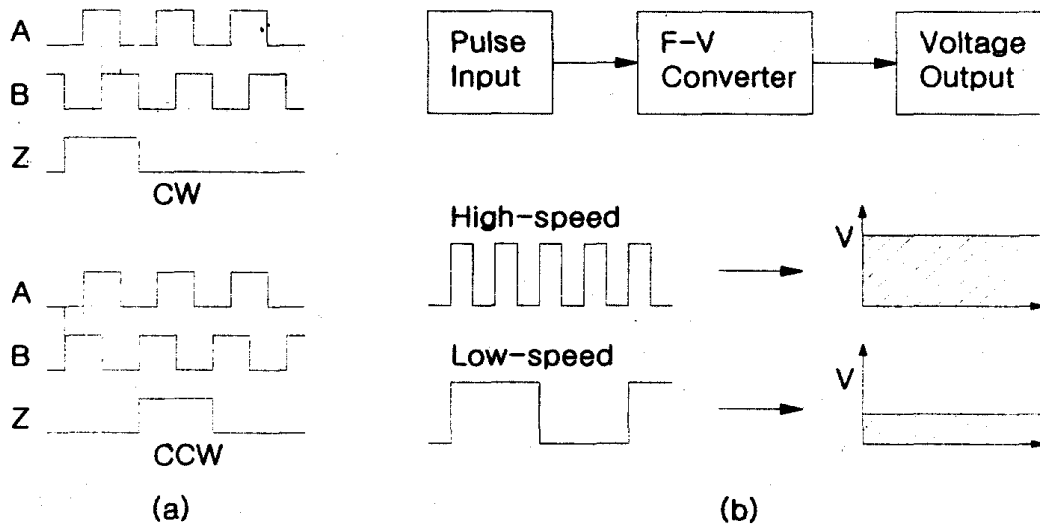


Fig. 30. Fundamental of rotative direction detection and F-V conversion

F-V 변환 방식은 그림 30(b)와 같이 엔코더에서 출력되는 펄스의 주파수를 F-V 변환기를 통해 아날로그 신호인 전압신호로 바꾸는 방식이다. 따라서 회전속도에 비례하는 크기의 전압신호가 출력된다.

펄스카운트 방식은 단위 시간당 펄스 수를 카운트하여 이를 회전속도로 환산하는 방식으로, 디지털 카운터 회로가 필요하다. 회전속도 [rpm] = 카운트된 펄스 수 / 단위시간 ÷ 회전당 출력 펄스 수로 표현된다.

주기측정 방식은 디지털 타이머 회로를 이용하여 출력펄스의 주기 T를 측정하고 이를 속도 신호로 환산하는 방법으로서, 저속에서 보다 정확한 측정이 가능하다. 회전속도 [rpm] = (1/T) × 60 ÷ 회전당 출력 펄스 수로 표현된다.

#### 4) PWM 변조와 Dead Time

전류 제어기의 아날로그 출력신호는 Gate Driver를 구동하여 파워 디바이스의 전원을 스위칭할 수 있도록 디지털 신호로 가공된다. 펄스폭 변조 (Pulse Width Modulation)는 대표적인 전류제어 방식으로, 아날로그 신호를 어느 일정한 주기로 샘플

플링하고 그 값에 비례한 펄스폭으로 변환함으로써 아날로그량을 디지털화한다. 그림 31에는 삼각파 비교방식에 의한 PWM 파형 발생의 원리를 나타내었다.

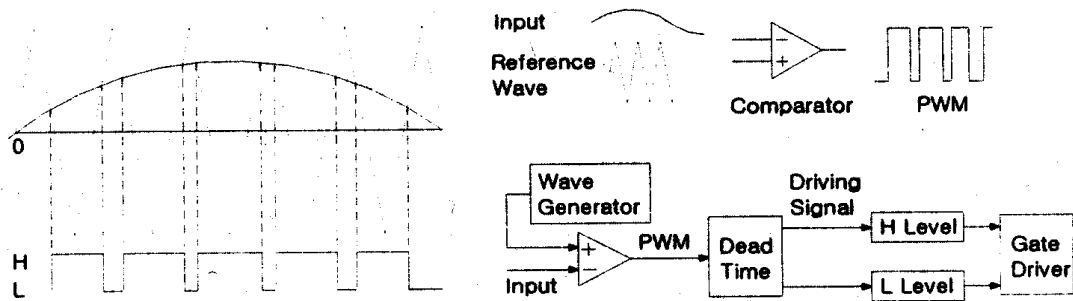


Fig. 31. Fundamental of the PWM wave generation by a chop comparator

PWM의 출력 신호는 그림 32와 같이 PWM 주기( $t_{PWM}$ ) 별로 위상이  $180^\circ$  반전되어 H레벨과 L레벨의 신호로서 H브리지에 입력된다. 여기서 Gate Driver와 각 파워 디바이스가 ON에서 OFF 또는 OFF에서 ON으로 될 때 스위칭이 지연될 경우 상하의 Tr이 동시에 ON되는 주기가 생길 수 있다. 이때 상부와 하부 사이에 과도한 관통전류(short current)가 흘러 모터 및 구동부의 손상을 가져오게 된다. 따라서, ON/OFF 변환 시에 상하 Tr 모두 OFF가 되는 주기, 즉 단락 방지 시간  $t_d$  (dead time)를 추가하여 안전하게 작동하도록 한다.

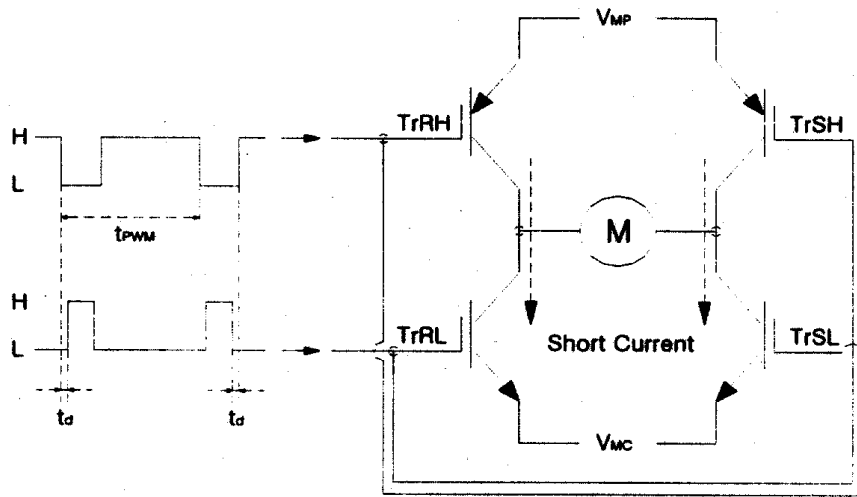


Fig. 32. Block diagram of the consideration of dead time addition

5) H 브리지와 파워 디바이스

H 브리지는 단일전원으로 모터에 가하는 전압의 방향을 바꿈으로서 정역 구동이 가능하도록 고안된 회로로서 그림 33과 같은 구조로 동작한다.

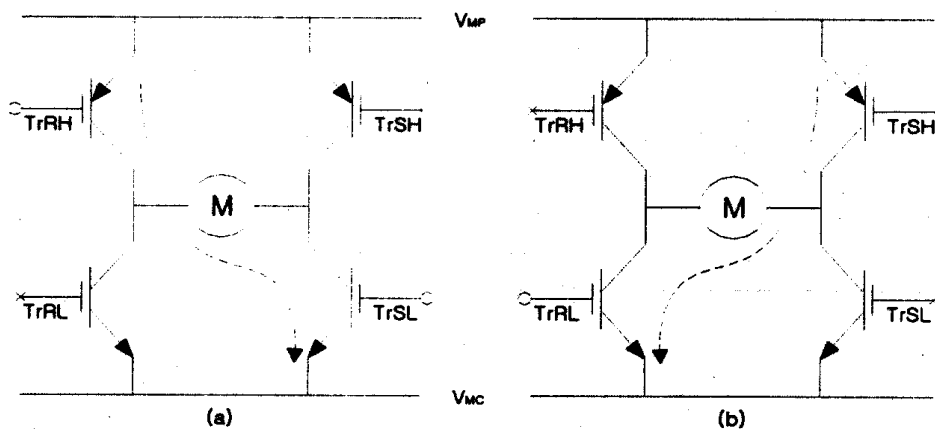


Fig. 33. Principle of the activation of H bridge

기본동작은 TrRH와 TrSL만 동시에 ON으로 하면 (a)와 같이 전류가 흐르고 모터는 정회전 하게되며, 반대로 TrSH와 TrRL만 ON으로 하면 (b)와 같이 전류가 흐르고 모터는 역회전하게 된다. 서보 모터는 (a)동작과 (b)동작을 반복하면서 회전하는데, 이때의 회전속도는 각 파워 디바이스에 전압이 인가되는 시간 간격 즉, H레벨과 L레벨의 비로써 결정된다.

H브리지를 구성하는 파워 디바이스는 구동 전압과 전류에 따라 여유 있는 선택을 할 필요가 있다. 또한 PWM의 주파수를 16kHz 이상의 가청영역 밖으로 고려하기 때문에 고속 스위칭이 가능한 소자여야 한다.

DC 회로용의 반도체 스위칭 소자로는 바이폴러 트랜지스터 (Bipolar Transistor)와 사이리스터 (Thyristor), Power MOSFET (Power Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor)등이 있다. BT는 전류 제어형 소자로서 ON 상태에서 전력 손실이 낮은 장점이 있으나, 스위칭 타임과 턴오프 타임이 긴 단점이 있다. Gate 단자에서 Cathode 단자로의 트리거 전류에 의해 턴온 되는 사이리스터는 Anode와 Cathode 사이에 역전압을 인가해야만 턴오프 되는 단점이 있다. 반면 MOSFET는 전압 제어형 소자로서 BT에 비해 입력 임피던스가 높고 스위칭 타임이 짧아 고속 스위칭이 가능하지만, 전력 손실이 크다는 단점이 있다.

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 BT와 MOSFET의 장점을 결합시킨 새로운 형태의 소자로서, PNP형 BT와 전력용 MOSFET를 접속한 구조를 가지고 있다. 따라서 전압 제어형 소자이면서 스위칭 타임과 턴오프 타임이 빠르고, 턴온시 내부 저항이 낮아 전력용 MOSFET보다 높은 스위칭 용량을 가지게 된다.

## 2. 제어 시스템 설계

### 가. 모터 구동 회로

그림 34와 35에 제작한 제어회로와 전 회로에 대한 블록 선도를 나타내었다.

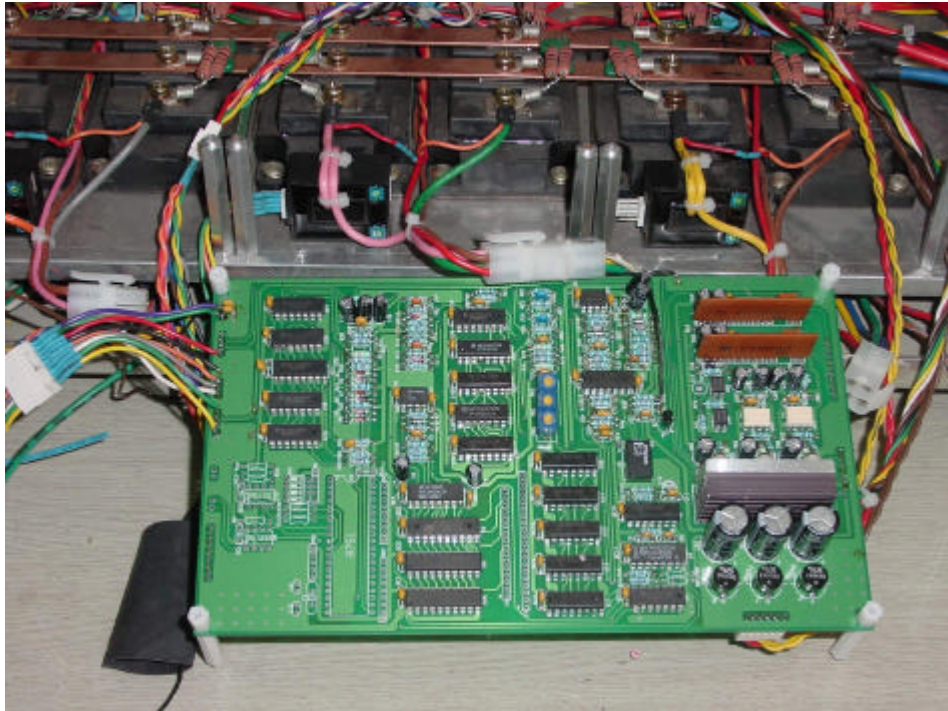


Fig. 34. View of the control logic and power device

#### 1) DC 모터

사용한 모터는 YASKAWA(Japan)사의 UGCMED-04-YR13 (그림 36)으로서, 표 6에는 모터의 제원을, 표 7에는 feedback unit의 제원을 나타내었다.

## 2. 제어 시스템 설계

### 가. 모터 구동 회로

그림 34와 35에 제작한 제어회로와 전 회로에 대한 블록 선도를 나타내었다.

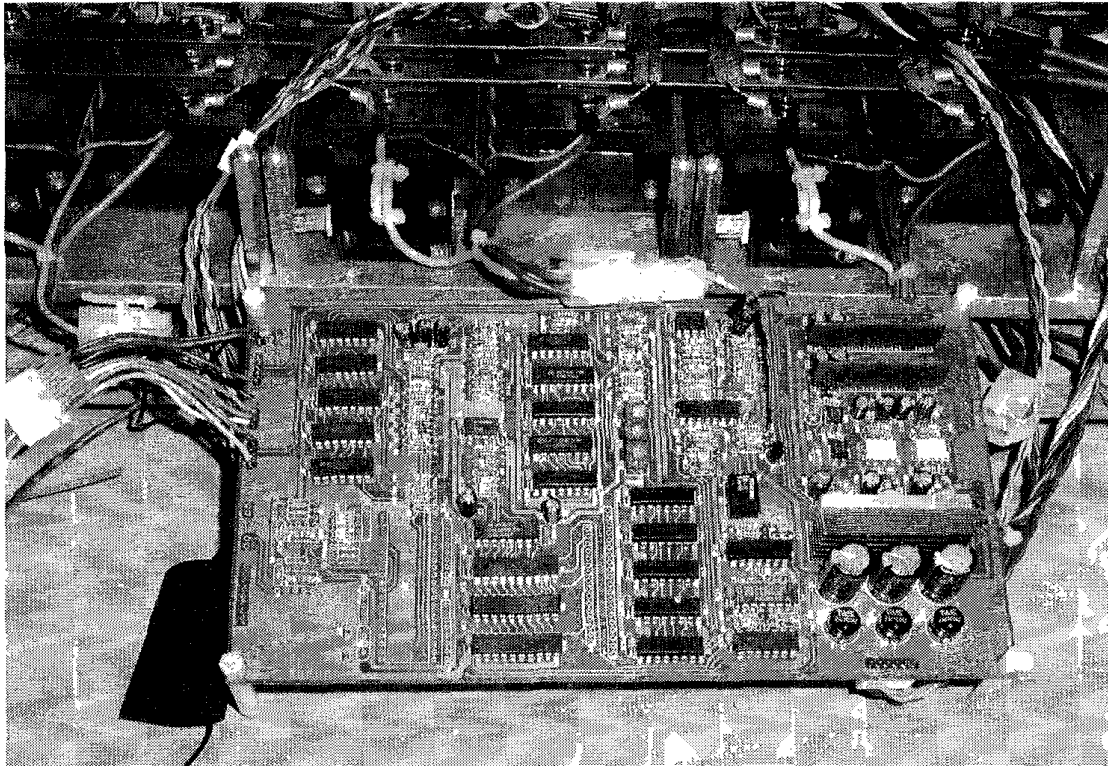


Fig. 34. View of the control logic and power device

#### 1) DC 모터

사용한 모터는 YASKAWA(Japan)사의 UGCMED-04-YR13 (그림 36)으로서, 표 6에는 모터의 제원을, 표 7에는 feedback unit의 제원을 나타내었다.

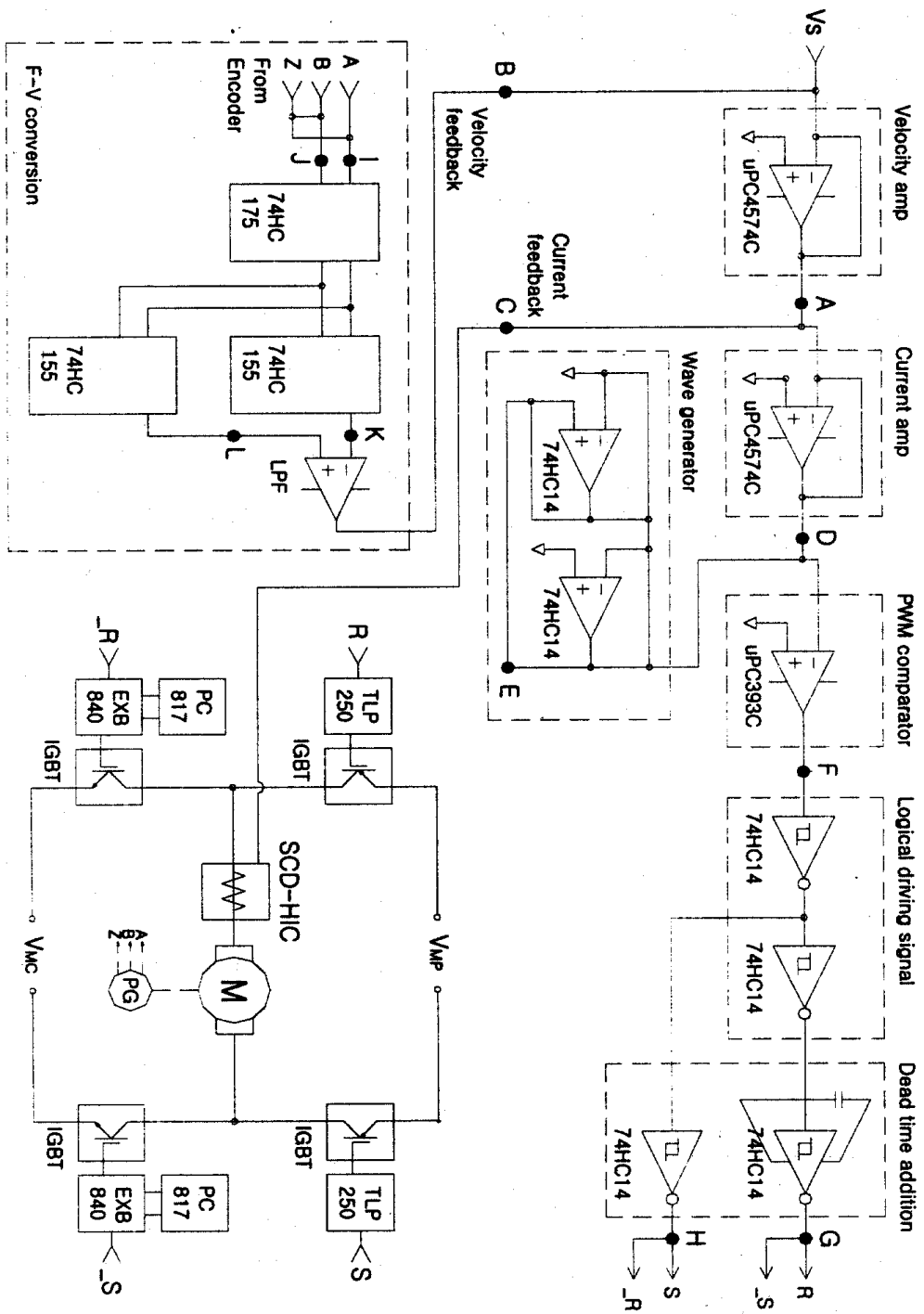


Fig. 35. Block diagram of the entire logic circuit

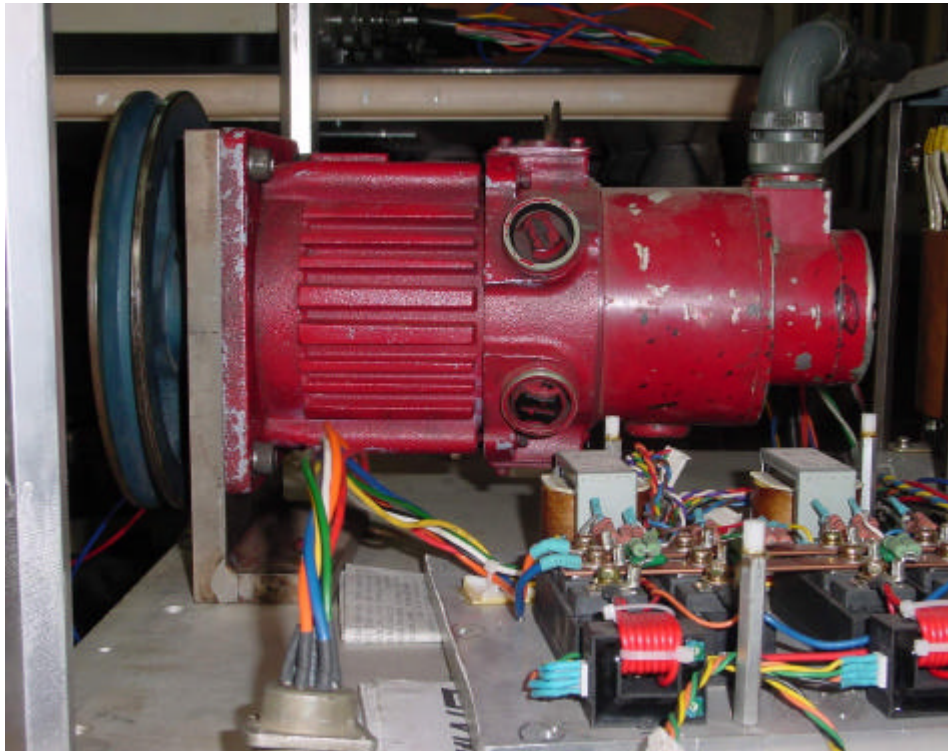


Fig. 36. Side view of cup motor, encoder and test load

모터는 가능한 한 효율이 높은 것을 선택해야 하는데, 그것은 파워 디바이스의 전류용량에 여유가 생기고, 소자 및 모터 자체의 발열을 적게 할 수 있기 때문이다. 모터의 효율은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\eta[\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{1.027 \times NT}{E_s I_a} \quad (49)$$

$P_{in}$  : 입력전력[W]

$N$  : 회전수[rpm]

$E_s$  : 공급 전압[V]

$P_{out}$  : 출력[W]

$T$  : 토크[ $\text{kg} \cdot \text{m}$ ]

$I_a$  : 전기자 전류[A]



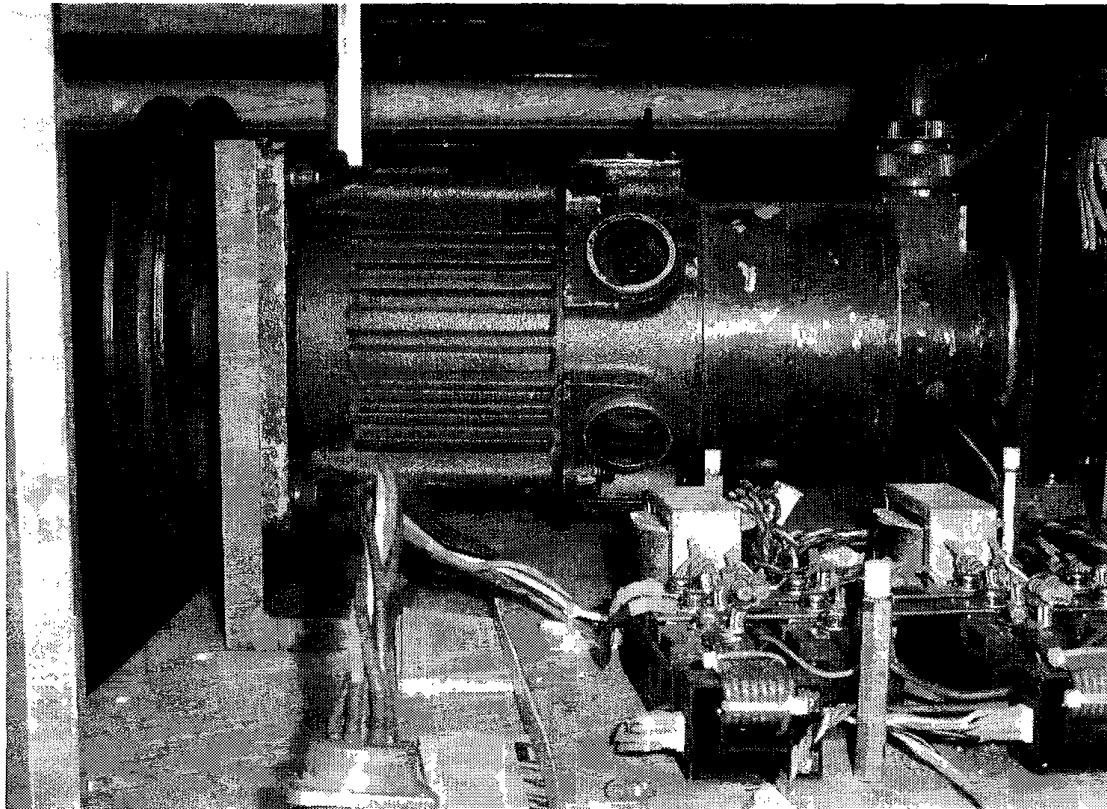


Fig. 36. Side view of cup motor, encoder and test load

모터는 가능한 한 효율이 높은 것을 선택해야 하는데, 그것은 파워 디바이스의 전류용량에 여유가 생기고, 소자 및 모터 자체의 발열을 적게 할 수 있기 때문이다. 모터의 효율은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\eta[\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{1.027 \times NT}{E_i I_a} \quad (49)$$

$P_{in}$  : 입력전력[W]

$N$  : 회전수[rpm]

$E_i$  : 공급 전압[V]

$P_{out}$  : 출력[W]

$T$  : 토크[ $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ]

$I_a$  : 전기자 전류[A]

Table 6. Specifications of the motor used in the control system

Motor type	-	brushed DC
Rated output ( $P_R$ )	kW	0.4
Rated current ( $I_R$ )	A	8.2
Rated torque ( $T_R$ )	$\text{kgf} \cdot \text{cm}$	22.3
Rated speed ( $N_R$ )	rpm	1750
Rated volage ( $V_R$ )	$V_{DC}$	67
Inst. Max. output ( $P_P$ )	kW	2.0
Inst. Max. current ( $I_P$ )	A	40.0
Inst. Max. torque ( $T_P$ )	$\text{kgf} \cdot \text{cm}$	112.0
Max. speed ( $N_P$ )	rpm	2900
Torque constant ( $K_T$ )	$\text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{A}$	2.97
Back EMP constant ( $K_E$ )	$\text{mV}/\text{rpm}$	30.5
Rotor inertia ( $J_M$ )	$\text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$	$0.571 \times 10^{-2}$
Mechanical time constant ( $\tau_m$ )	ms	34.4
Electrical time constant ( $\tau_e$ )	ms	0.61
Viscous damping coefficient	$\text{gf} \cdot \text{cm}/\text{rpm}$	0.15
Acceleration constant	ms	187
Max. angular acceleration	$\text{rad}/\text{s}^2$	4870

Table 7. Specifications of the feedback unit mounted on the motor

Encoder type	-	incremental rotary
Resolution	ppr	500
Output voltage	$V_{DC}$	12
Output phase	-	A, B, Z

## 2) 최대 구동 전류와 파워 디바이스

모터의 제원으로부터 알 수 있는 바와 같이 토크  $22.3\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 를 출력하기 위한 정격 전류는  $8.2\text{A}$ , 순간 최대 전류는  $40\text{A}$ 이다. 파워 디바이스는 최대 전류와 직접 연관되는 소자이므로, 구동 회로부는 이점을 고려하여 충분한 여유를 두고 회로를 설계하였다. 파워 디바이스로는 바이폴러 트랜지스터와 Power MOSFET의 장점을 가진 IGBT 모듈을 사용하였다.

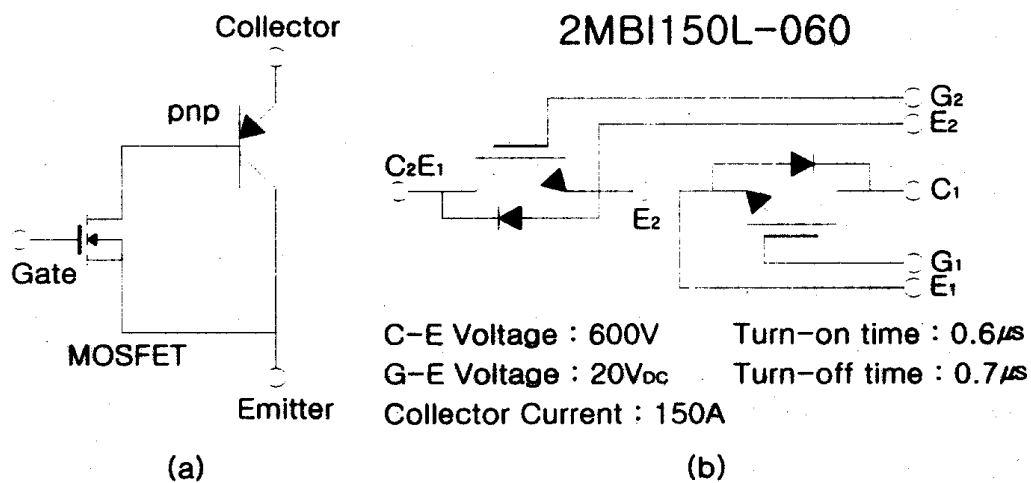


Fig. 37. Equivalent circuit of IGBT and structure of the 2MBI150L-060

Fuji Electronics(Japan)사의 IGBT 2MBI150L-060은 턴온 타임  $0.6\mu\text{s}$ , 턴오프 타임  $0.7\mu\text{s}$ , 허용 내압이  $600\text{V}$   $150\text{A}$ 로서, 오동작이나 과부하로부터 디바이스의 파손을 방지하기 위해 순간 최대 전류  $40\text{A}$ 에 대하여 70% 이상의 여유를 가지는 제품을 사용하였다. 그림 37에 IGBT의 등가회로(a)와 2MBI150L-060의 구조 및 특성(b)을 나타내었다.

### 3) Gate Driver

모터 구동 선단의 파워 디바이스 IGBT를 작동하기 위한 Gate Driver는 TLP250 및 PC817과 EXB840의 조합으로 H브리지를 구성하였다(그림 38). H레벨 좌우의 TLP250과 L레벨 좌우의 EXB840은 각각 RH, SH, RL, SL 신호를 받아 4개의 IGBT로 구성된 H 브리지를 구동한다.

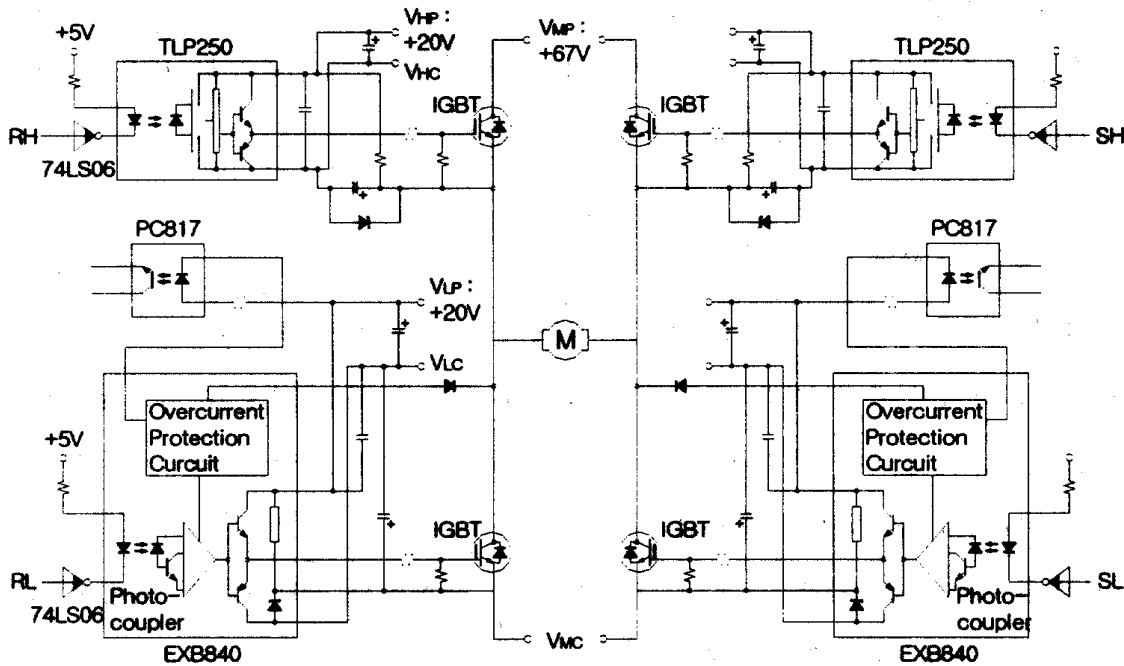


Fig. 38. Circuit diagram for the H-bridge composed of four set of Gate Driver and IGBT

TLP250과 EXB840은 고속 포토 커플러를 내장하고 있어서, 제어 회로부와 파워 라인을 절연함으로써 노이즈의 영향을 받지 않도록 한다. 또한 EXB840은 과전류 보호 회로를 내장하고 있어서, 과부하시의 에러신호 처리를 위한 PC817과 함께 시스템의 안전성을 높이도록 하였다.

#### 가. PWM 변조회로

전류 앰프의 출력신호와 기준 삼각 파형이 컴퍼레이터에 입력되면, 내부에서는 이들의 크기를 비교하여 PWM 신호, 즉 전류 제어신호의 크기에 비례하는 펄스폭을 갖는 ON, OFF 신호를 출력한다. 컴퍼레이터는 저전력형의  $\mu$ PC393C를 사용하였고, 이때 삼각파의 진폭은 약 9.0V, 주파수는 가청영역 밖인 16kHz 이상이 되도록 하였다.

#### 나. Dead Time 부가회로

PWM 신호에 부가하는 단락 방지 시간  $t_d$ 는 TLP250의 응답속도와 IGBT의 턴오프 지연시간을 고려하여, 2~3 $\mu$ s 정도가 적절한 것으로 판단되었다.

#### 다. 속도 검출회로

엔코더에서 발생하는 2개의 펄스 신호(A, B상)를 주파수-전압 변환(F-V Conversion) 방식의 속도 검출 회로에 입력하여 모터의 회전 방향과 회전속도에 해당하는 검출신호를 얻도록 하였다. 검출 신호는 회전방향에 따라 전압 극성이 바뀌며, 회전수에 비례하는 크기로 출력된다.

그림 39는 속도 검출회로의 동작 구성과 출력 파형이다. 정방향 및 역방향 회전에 의한 A상과 B상의 출력 펄스열에 대하여, 안정된 검출 신호를 얻기 위해 각 상의 펄스신호의 상승 및 하강 edge에서 두 개의 단안정 멀티 바이브레이터를 트리거하여 MM<sub>A</sub>, MM<sub>B</sub>와 같이 출력 펄스수를 4배로 하였다.

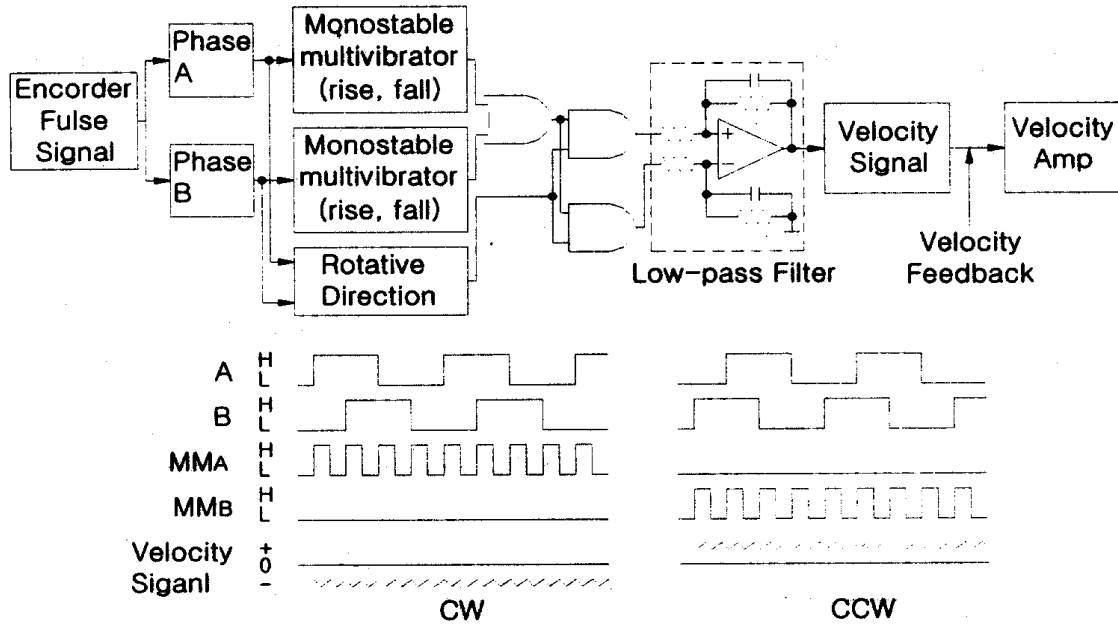


Fig. 39. Block diagram of the velocity detection and waveform output

한편 회전 방향 검출회로에서는 A상과 B상의 위상차를 이용하여 방향 신호를 얻어 낸다. 방향 신호와 MMA, MMB를 AND 연산하여 방향에 따른 펄스열 만을 추출하고, 저역 통과 필터(Low Pass Filter)에 입력하여 직류의 속도 검출 신호를 얻을 수 있었다. LPF는 차단 주파수의 저역 부분만을 통과시키고 고역 부분은 감쇠시킴으로서 잡음의 발생을 억제하기 위한 회로이다. 속도 검출 회로 전체의 전달함수는 다음 식과 같이 된다.

$$G(s) = \frac{V_{OE}}{\omega_{PG}} \quad (50)$$

$V_{OE}$  : F-V 변환 회로의 출력전압 [V]

$\omega_{PG}$  : 엔코더 출력 펄스의 각 주파수 [rad/s]

라. 속도 제어회로

그림 40은 비례적분 제어의 기본 회로로서, 입출력 전압  $V_I$ 와  $V_O$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

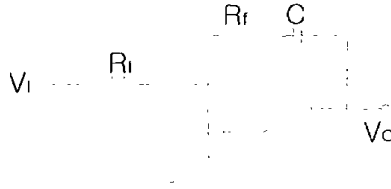


Fig. 40. Circuit diagram of a proportional integral control

$$V_O = - \left( \frac{R_f}{R_I} V_I + \frac{1}{CR_I} \int V_I dt \right) \quad (51)$$

이 식으로부터 알 수 있는 것과 같이 비례적분회로의 출력전압은 입력전압의 비례적인 배수( $R_f/R_I$ )와 입력전압을 시간 적분한 값을 적분시간( $CR_I$ )으로 나눈 값으로 가산한 것이다. 이 회로의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{V_O(s)}{V_I(s)} = - \frac{1 + sCR_f}{sCR_I} \quad (52)$$

마. 전류 검출회로

전류의 검출에는 DongJae Industrial(Korea)사의 홀 전류 센서 SCD-HIC를 사용하였다. 이는 홀소자를 이용하여 전류자계의 강도를 전압으로 변환하는 전류센서로서,  $0 \sim \pm 50A$ 의 전류 범위에서 직선성이 매우 우수한  $0 \sim \pm 4V$ 의 전압을 출력한다.

바. 전원부

제어 회로에는  $5V_{DC}$  및  $15V_{DC}$ 를 공급하고, 파워 디바이스용으로  $20V_{DC}$ 를 사용하였

다. 구동부는 제어계와 절연된 별도의 전원을 사용하여  $67V_{CD}$ 를 공급하였다. 그림 41은 제작한 전원부이다.

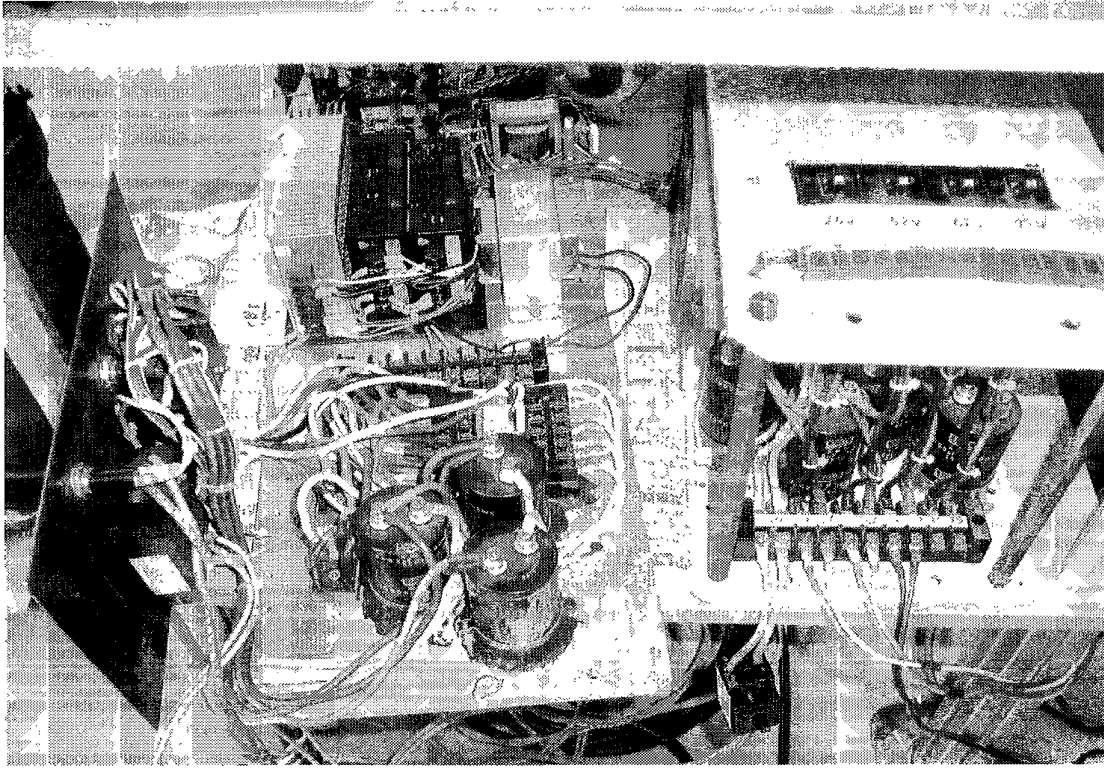


Fig. 41. View of the power supply separated from driver and control logic

### 3. 시험방법

#### 가. 시험 장비

제어기의 성능시험에서 관련 데이터를 수집하기 위한 장비로서 Tektronix (USA)사의 디지털 오실로스코프 TDS724A와 Pico Technology(UK)사의 ADC-100, 회전속도계, IBM PC 등을 사용하였다.

TDS724A는 500MHz의 대역폭에 최대 샘플링 속도 1GHz, 측정감도 1mV, 최소 픽업타임 500ps의 측정 능력을 제공하는 디지털 오실로스코프로써, DC 계인의 정확도는 측정전



압 $\pm 0.7\%$ 이다.

ADC-100은 PC 기반의 데이터 수집 장치로, 최대 샘플링 속도 100kHz에 분해능이 12bit인 두개의 채널을 제공한다. 입력된 데이터는 parallel 포트를 통하여 PC에 전달되고, 응용 소프트웨어인 PicoScope 및 PicoRecorder를 통해 수집·기록된다.

#### 나. 파형 출력 시험

제어기의 동작 확인을 위해 저속에서 응답과 출력이 불안정한 DC 모터의 특성을 고려하여 최저 제어 회전수인 10rpm, 무부하 상태에서 주요 출력의 파형을 측정하였다. 회전방향은 정회전으로 하였고, 각 측정지점은 그림 35와 같이 전류지령(A), F-V 변환 출력(B), 모터 전류(C), 전류앰프의 출력(D), 삼각파 발진기의 출력(E), PWM 컴퍼레이터 출력(F), H레벨의 R신호 출력(G), L레벨의 S신호 출력(H), 엔코더 출력의 A상(I), 엔코더 출력의 B상(J), 디코더 출력의 A상  $MM_A$ (K), 디코더 출력의 B상  $MM_B$ (L)의 12곳으로 하였다. 또한 최저 및 최고 제어 회전수에서의 듀티비 비교를 위해 PWM 출력을 측정하였다.

#### 다. 속도 입력 추종 시험

속도 지령신호에 대한 속도 피드백 신호 및 회전수의 관계를 비교하였다. 속도 지령신호  $V_s$ 를 CW방향 +4.1V ~ CCW방향 -4.1V까지 변화시킬 때 이에 따른 회전수 N과 모터 회전속도에 대응하는 속도 피드백 전압 FV의 출력을 측정하여,  $V_s$ 와 N 그리고  $V_s$ 와 FV의 비례관계를 확인하였다.

#### 라. 스텝응답 시험

단위 스텝입력에 대한 응답의 해석은 제어 시스템의 응답성을 평가하기 위한 일반적인 방법이다. 속도 지령전압에 단위 스텝형 펄스를 입력하고, 이에 대한 출력으로

F-V 변환 출력과 전류 피드백 신호의 파형을 측정하였다. 속도 지령전압의 크기는 정지 상태에서 회전수 1400rpm을 출력하기 위해 4.1V로 하였다.

## 제2절 결과 및 고찰

### 1. 파형 출력 평가

제어기의 출력을 평가하기 위해 PWM 듀티비와 12곳의 주요 지점에서 파형을 측정하였으며, 각 출력의 디스플레이 시간간격을 고정하여 쉽게 비교할 수 있도록 하였다.

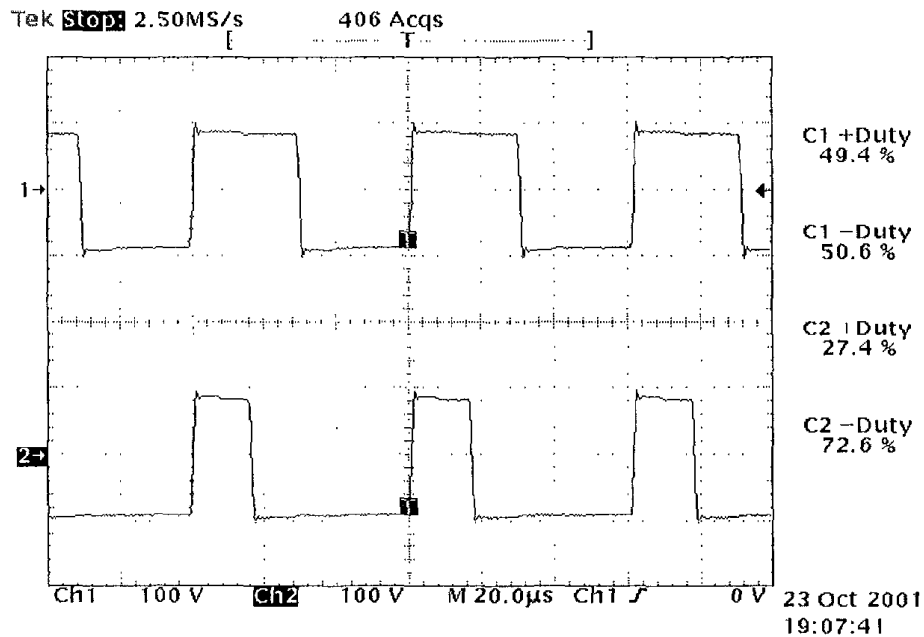


Fig. 42. PWM output of servo controller at 10rpm and 1400rpm

그림 42는 최저 및 최고 제어 회전수 10rpm(Ch 1), 1400rpm(Ch 2) 운전에서 제어기 출력인 PWM 파형을 측정된 것이다. 상승과 하강에서 약 10%의 오버슈트가 보이고 있으나, 듀티비가 51%, 73% 정도로서 입력 전압에 비례하고 있음을 알 수 있다.

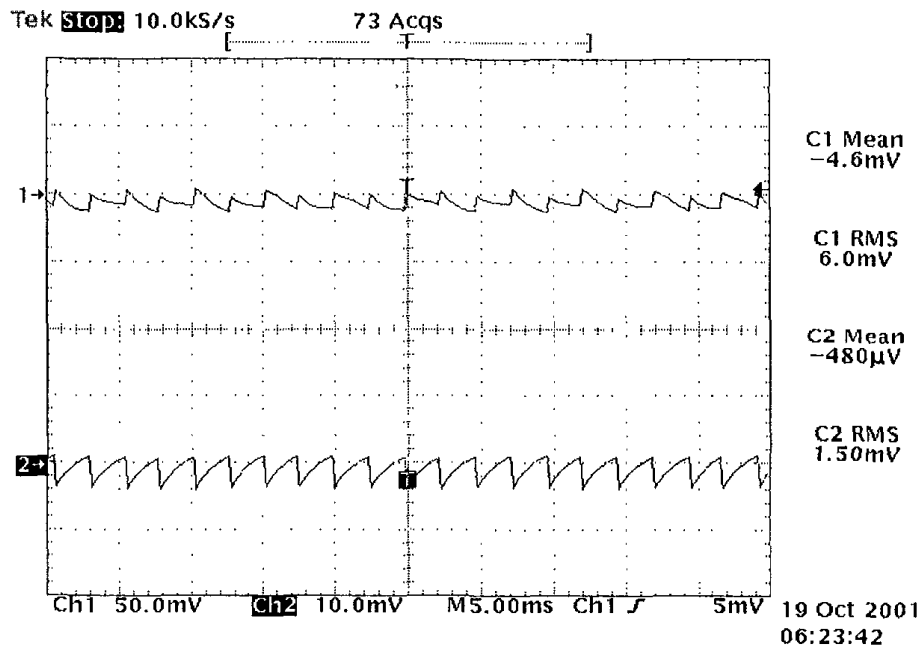


Fig. 43. Waveform of the current signal and output of F-V converter

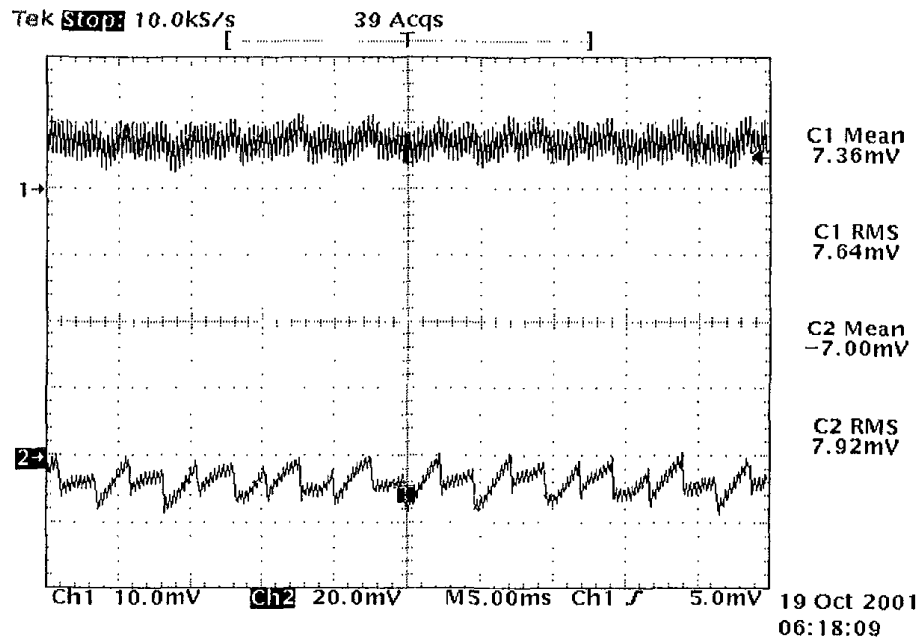


Fig. 44. Waveform of the detected current and output of current amplifier

그림 43은 전류지령(Ch 1)과 속도 피드백 신호인 F-V 변환 출력(Ch 2)이다. 전류 지령은 Ch 1의 기준 전압에서 CCW일 때 상향, CW일 때 하향으로서, 전류 지령에 따라 회전 속도가 잘 출력되고 있음을 알 수 있다.

그림 44는 전류 피드백 신호인 모터 전류(Ch 1)와 전류 앰프의 출력(Ch 2) 파형을 나타내고 있다. 전류 지령과 모터 전류의 오차가 증폭되어 출력으로 나타나고 있다. 두 그래프에서 속도 피드백 신호와 검출된 모터 전류 신호, 전류 앰프의 출력이 유사한 형태의 파형을 나타내는 것과 같이 입력에 대한 추종이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

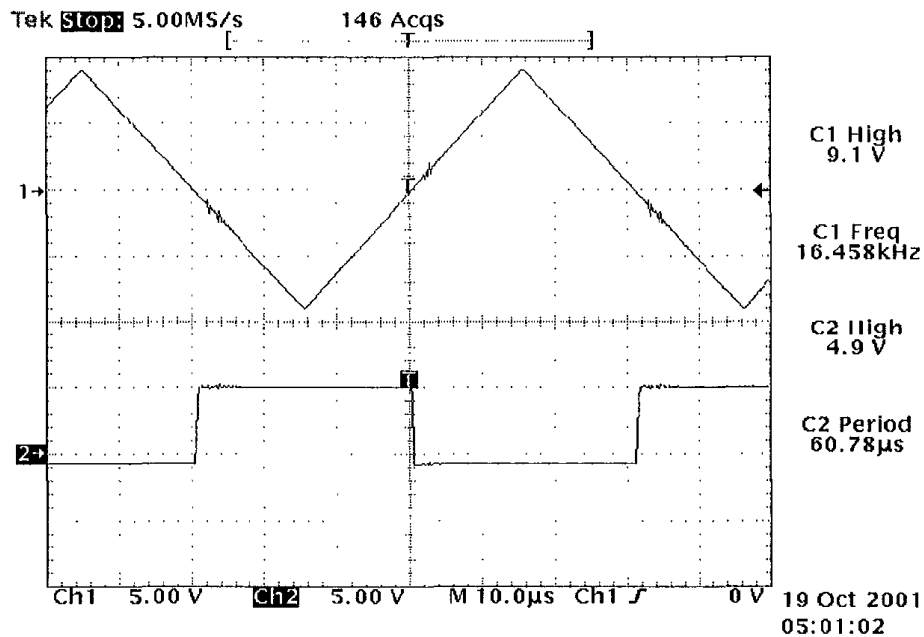


Fig. 45. Waveform of the wave generator and PWM output driven by velocity command

그림 45는 삼각파 발진기의 출력(Ch 1)과 기준 전압에 대응하는 PWM 변조 신호의 출력(Ch 2) 파형이다. PWM에서 기준 파형이 되는 삼각파 발진기의 출력은 매우 규칙적이며, PWM의 주파수를 가청영역 밖인 16kHz 이상으로 설정한 바와 같이  $f_{PWM} \geq$

16.4kHz 이고, 이때 삼각파의 진폭은 약 9V이다.

그림 46은 PWM 출력에 dead time을 부가한 R 신호(Ch 1) 및 S 신호(Ch 2)를 나타내고 있다. 결정된 바와 같이 R 신호에는 PWM의 상승에 동기하여, S 신호에는 PWM의 하강에 동기하여 약  $3\mu\text{s}$ 의  $t_d$ 를 부여하고 있다.

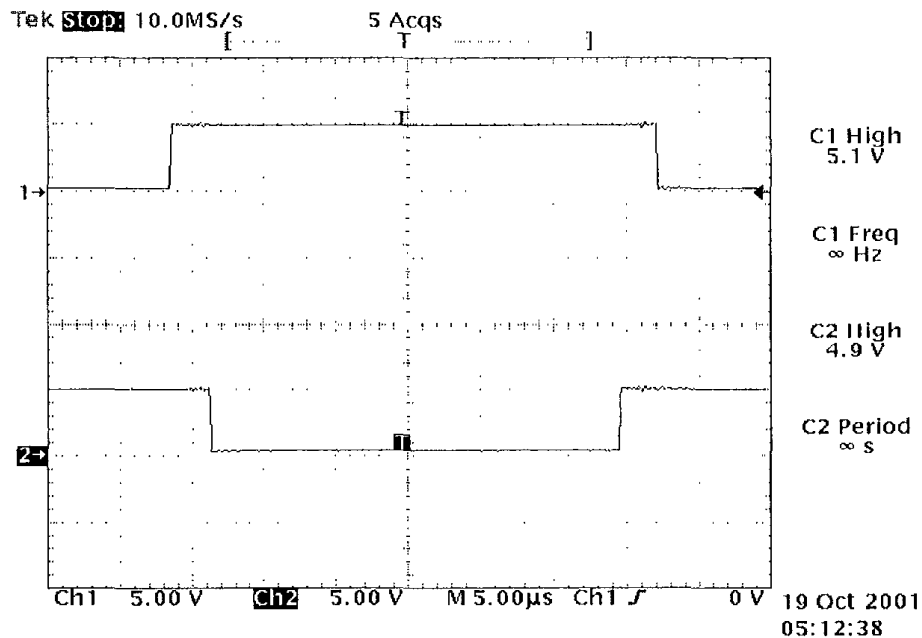


Fig. 46. Dead time of the R and S signal synchronized with PWM

그림 47은 엔코더의 A상 출력(Ch 1)과 B상 출력(Ch 2)을 비교한 것으로, 모터의 정회전에 따라 A상이 B상보다  $90^\circ$  선행하고 있음을 보여준다.

그림 48에서는 A상과 B상의 펄스열이 디코더를 통과한 후 각 상의 상승 및 하강에 동기하여 4배로 출력되고 있다. 이것은 앞서 말한바와 같이 F-V 변환에서 안정된 출력 전압을 얻기 위한 것이다.

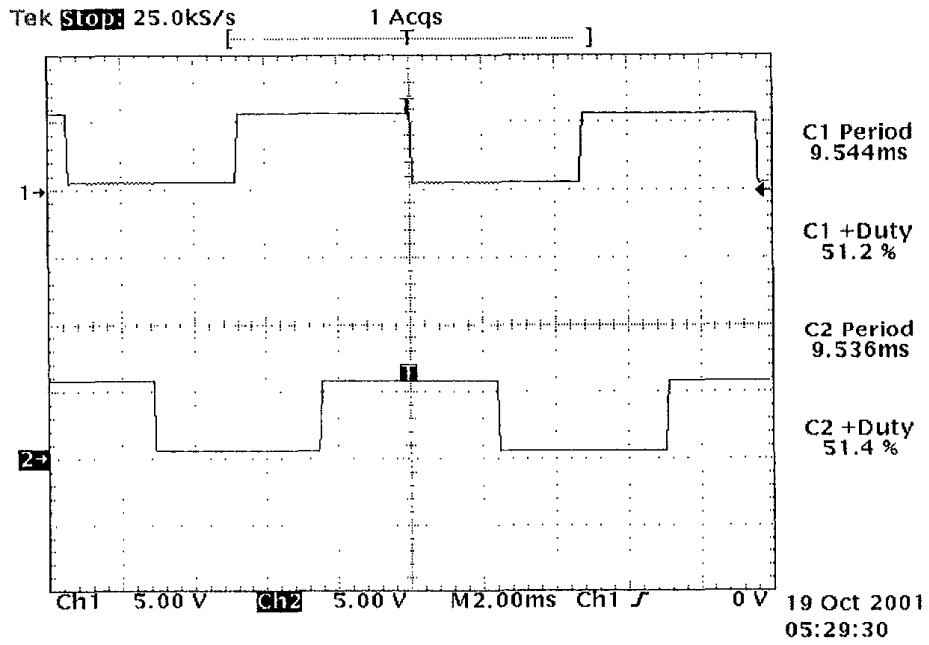


Fig. 47. Comparison of A and B phase of encoder

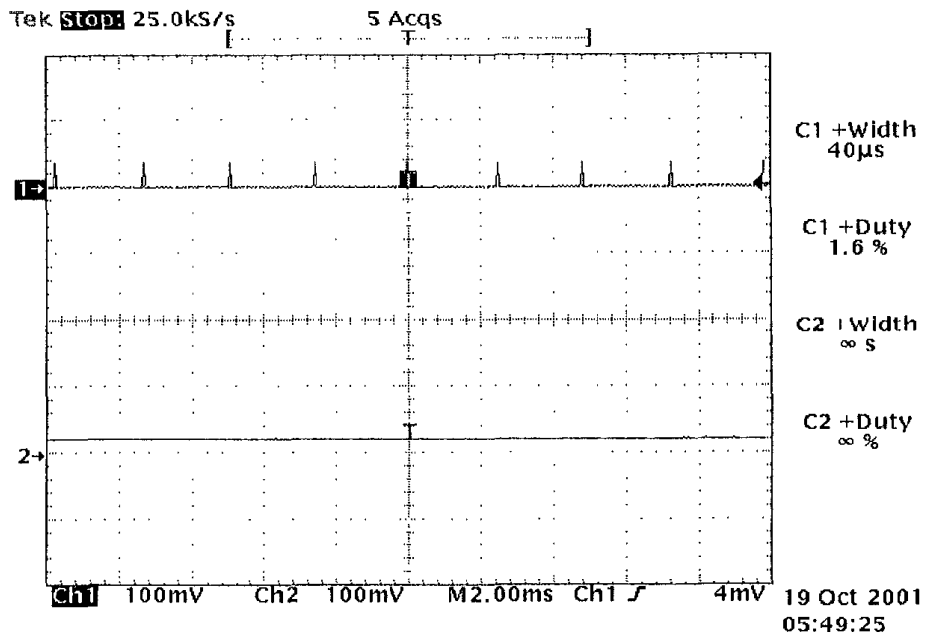


Fig. 48. Quadruplicated waveform of decoder output

## 2. 속도 입력 추종 평가

속도 지령신호( $V_s$ )에 대한 회전수( $N$ )와 속도 피드백 전압( $FV$ )을 측정하였다.

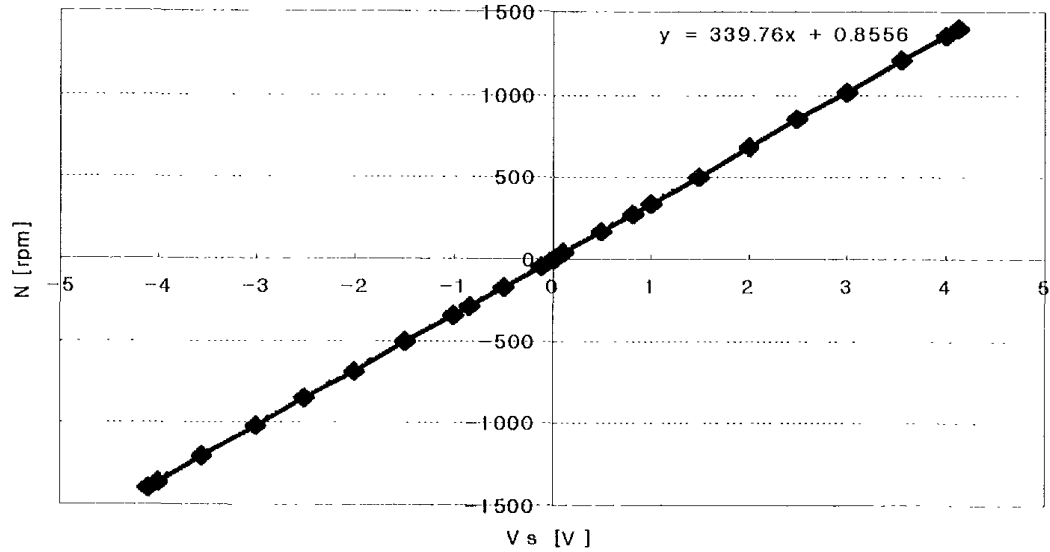


Fig. 49. Linearity between velocity command and rpm

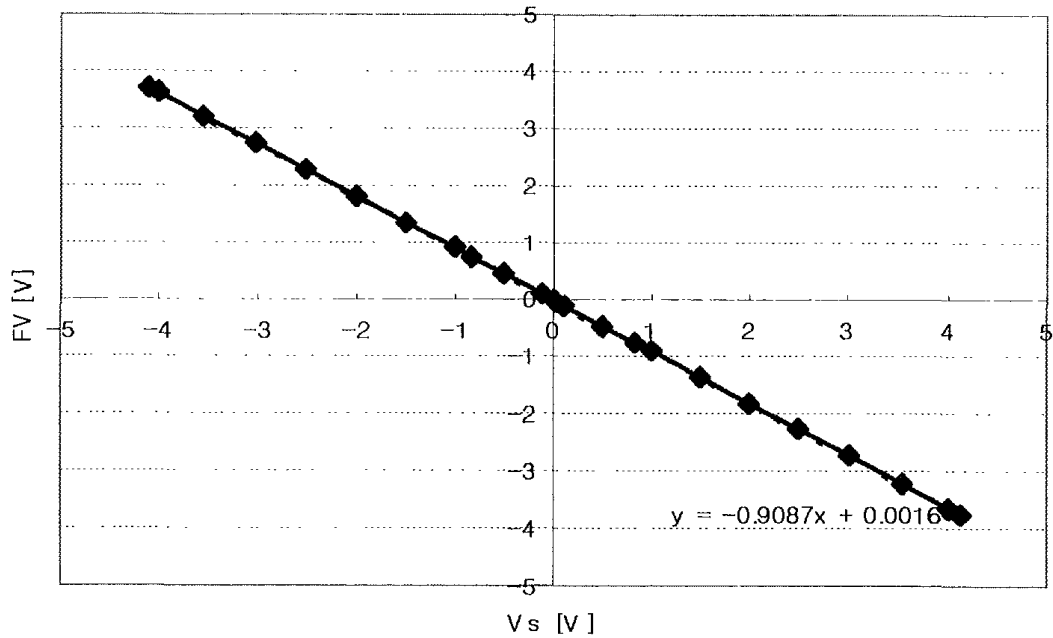


Fig. 50. Linearity between velocity command and velocity feedback voltage

그 결과 그림 49와 50에 나타나는 바와 같이 각 관계는 비례 직선적인 것으로 나타났다.  $V_s$ 에 대한  $N$  및  $FV$ 의 출력은 다음 식으로 표현 될 수 있었다.

$$N = 339.76 V_s + 0.8556 \quad (53)$$

$$FV = -0.9087 V_s + 0.0016 \quad (54)$$

### 3. 스텝응답 평가

속도 지령전압  $V_s$ 를 0V에서 4.1V로 계단상으로 변화시킴으로서 단위 스텝입력을 인가하고 이에 따른 F-V 변환 출력 및 전류 피드백 출력의 변화를 측정하였다. 통상 모터의 회전속도는 tachometer로 검출하지만, 엔코더와 F-V 변환 회로가 그 대체이므로 속도 피드백 신호를 그대로 모터의 회전속도로서 검출하였다. F-V 변환회로에 의한 시간지연이 측정오차로 작용할 수 있으나, 모터 자체의 기계적 시정수 등에 비해 매우 작으므로 그 영향은 없는 것으로 가정하였다.

그림 51과 52는 무부하 상태에서 스텝 입력을 인가한 경우, F-V 출력과 모터 전류의 변화이다. 회전수는 약 250ms에서 안정하게 출력되고 있으며, 토크에 해당하는 전류 피드백 신호는 처음에 기동 토크가 발생하였다가 정속으로 가면서 점점 줄어들고 있음을 알 수 있다.



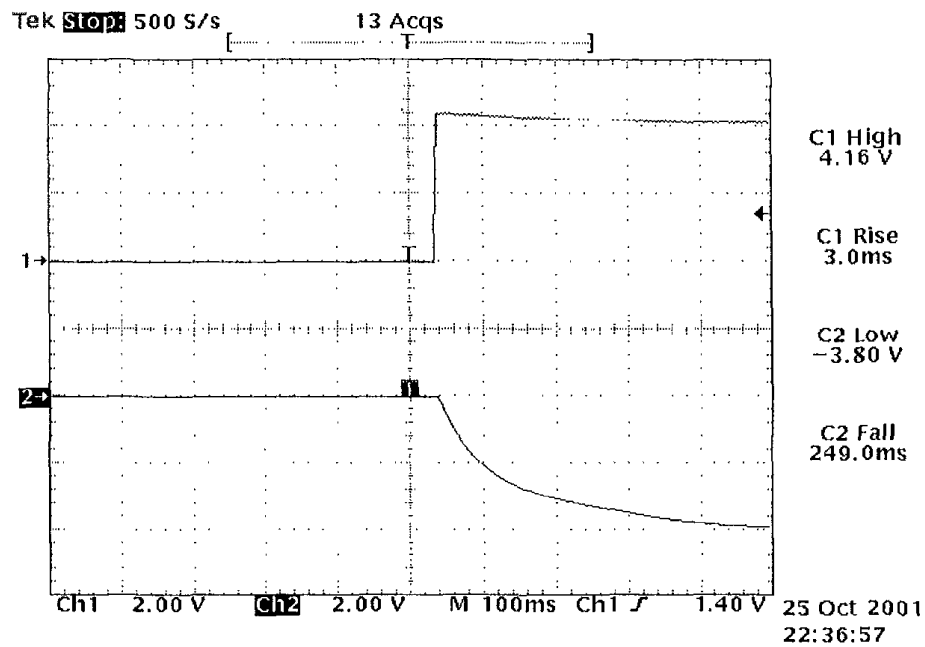


Fig. 51. Response of velocity feedback to a step input in unloaded state

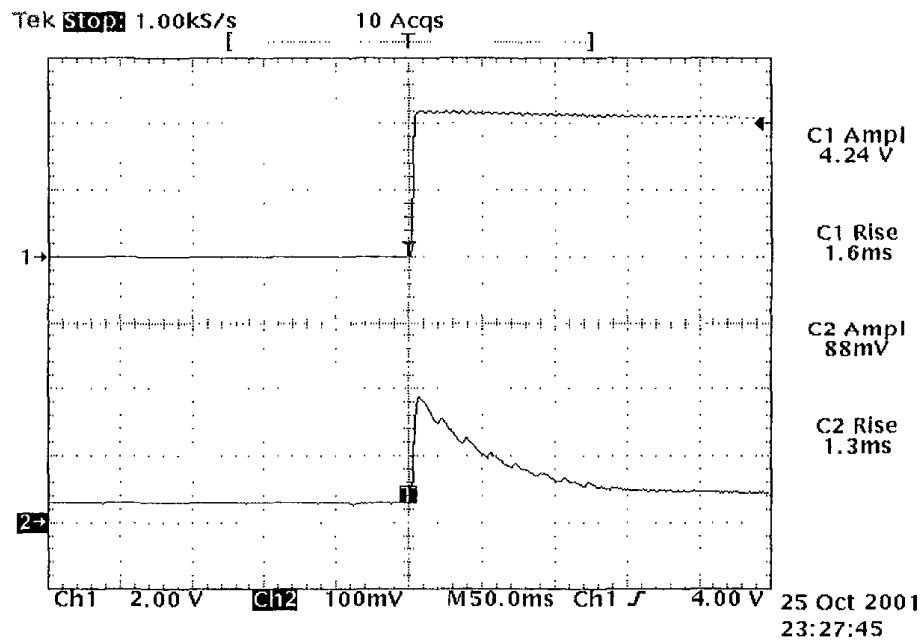


Fig. 52. Response of detected current to a step input in unloaded state

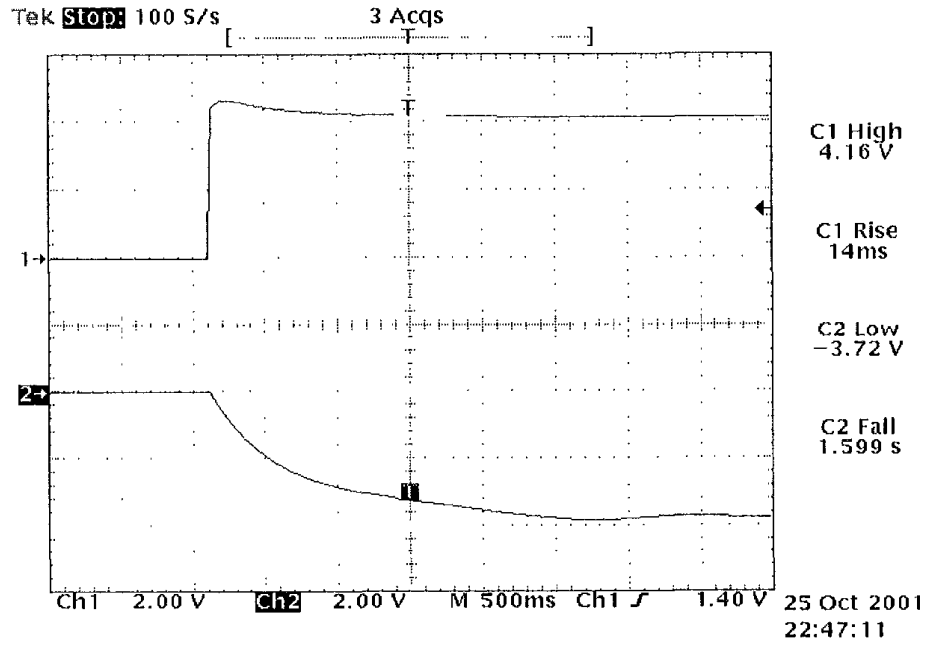


Fig. 53. Response of velocity feedback to a step input with test load

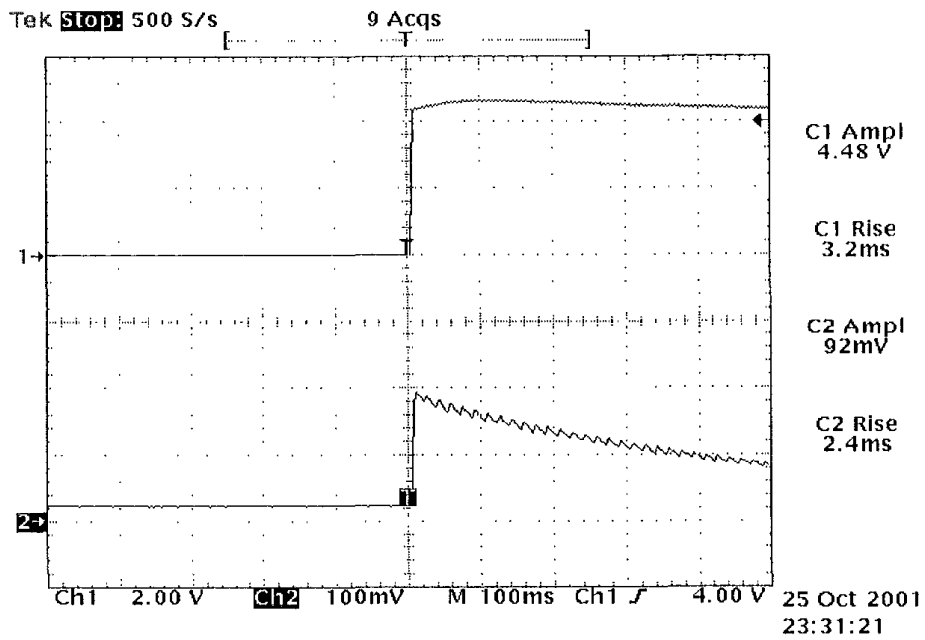


Fig. 54. Response of detected current to a step input with test load

그림 53과 54는 각각 시험부하를 취부한 상태에서의 F-V 출력과 모터 전류의 출력이다. 무부하 상태의 F-V 응답은 250ms인데 비해, 시험부하를 취부한 상태에서는 약 1.6s를 나타내었다. 이는 시험부하의 관성이 로터 관성의 약 27배 이상 크기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 모터 전류의 크기도 정속 회전이 될 때까지 완만하게 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 무부하 상태와 시험부하 상태 모두 오버슈트는 보이지 않으며, 설계 사양의 무부하 상태 스텝 응답시간 250ms를 잘 달성하고 있다. 따라서, 모터의 사양으로부터 계산한 근사값이 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

## 제5장 화상처리에 의한 사과 인식 알고리즘개발

### 제1절 실험 방법 및 장치

#### 1. 실험 방법

사과의 인식과정은 컴퓨터에 의해서 처리가 가능하도록 입력장치로부터 화상을 입력받아서 아날로그 데이터를 디지털 데이터로 바꾸었다. 디지털화 된 화상에서 사과의 인식 알고리즘을 사용하여 사과의 2차원 좌표를 구하고, 사과의 특징값 계산과 위치 보정을 위해서 다치화상을 이치화한 후에 라벨링(labeling)하였다. 디지털화 된 화상은 데이터량이 많으므로 처리 시간을 많이 요구한다. 이를 해결하기 위해서 사과의 인식과정을 거친 검색과 정밀 검색으로 나누어 실행하였으며 새로운 색좌표 함수를 사용하여 데이터량을 줄였다. 사과의 3차원 위치를 구하기 위해서 한 대의 카메라로 서로 다른 위치에서 입력한 2개의 화상을 이용한 스테레오(stereo)화상기법을 사용하였다.(그림 55)

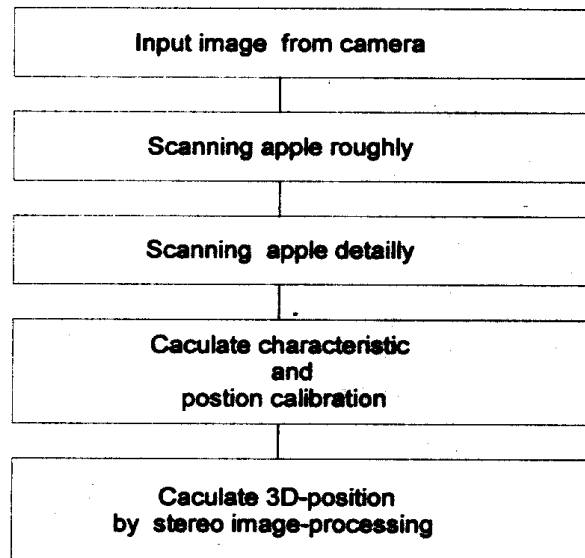


Fig. 55. Flowchart for apple recognition

## 2. 실험 장치

장치 구성은 그림 56과 같이 Data Input Unit와 Data Processing Unit의 2개 부분으로 구성하였다. Data Input Unit는 Sony사의 XC-711 CCD 카메라로 RGB 화상을 받아들인다. Data Processing Unit는 화상 입력 장치로부터 데이터를 받아들이는 ITEX MFG Image-processing Board와 화상을 분석하는 컴퓨터로 이루어진다. Image-processing Board는 입력 화상을 디지털화하여 내부의 메모리에 데이터를 저장한다. 컴퓨터는 Image-processing Board의 화상의 입출력을 제어하며, Board 내에 저장되어 있는 디지털 화상 데이터에 화상 처리기법을 사용하여 사과의 인식을 행한다.

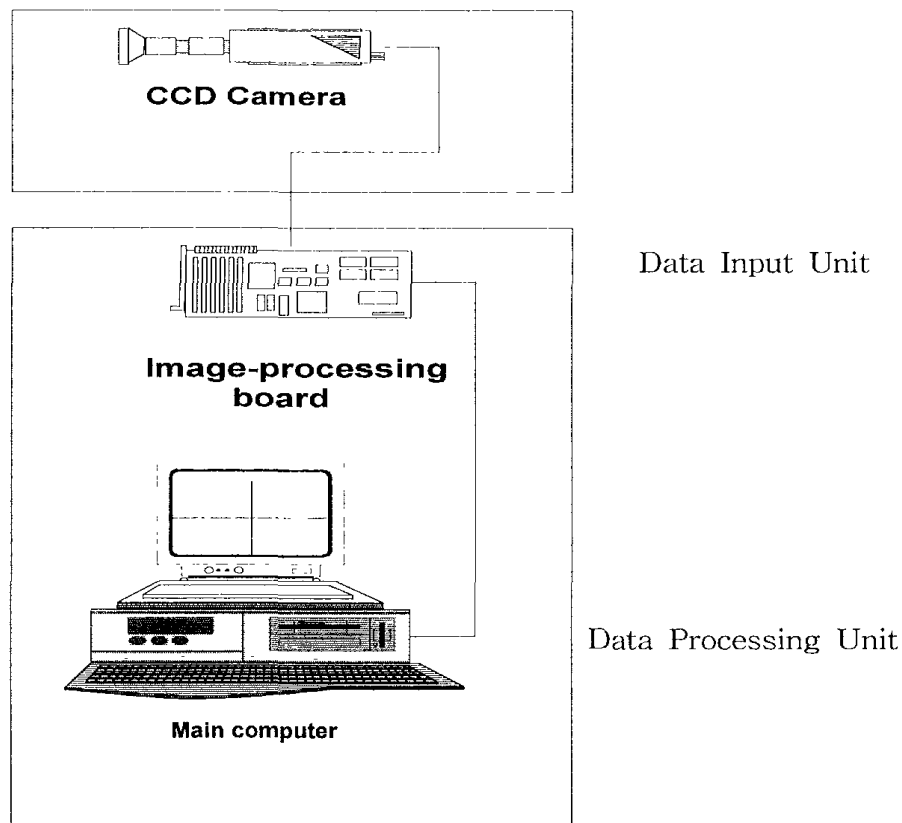


Fig 56. Image processing system for apple recognition

### 3. 색좌표 함수 결정

색은 인간의 시각 인식에서 중요한 역할을 담당한다. 컴퓨터에 의한 화상처리 또한 색정보가 필요하며, 특히 빛의 영향을 받는 자연 장면을 인식하기 위해서는 색정보는 필수적인 요소가 된다. 모든 색은 빨강, 녹색, 파랑 삼원색의 가중치의 합으로 구성된다. R, G, B를 이러한 삼원색에 대응하는 값이라 하면, 모든 색은 이 세 요소로 구성되는 벡터로서 표현할 수 있다. 인간이 볼 수 있는 가시광선의 파장은 380~780 nanometer 범위를 형성하고, 이 범위는 다시 세분화되어 다양한 색깔을 나타내게 된다.(그림 57) 또한 인간의 시각은 모든 색에 대해 똑같이 민감하지는 않고, 각각 455nm(blue), 535nm(green), 570nm(red)에서 강한 반응을 보이며, G와 R이 B에 비해 상대적으로 민감하다.(그림 58)

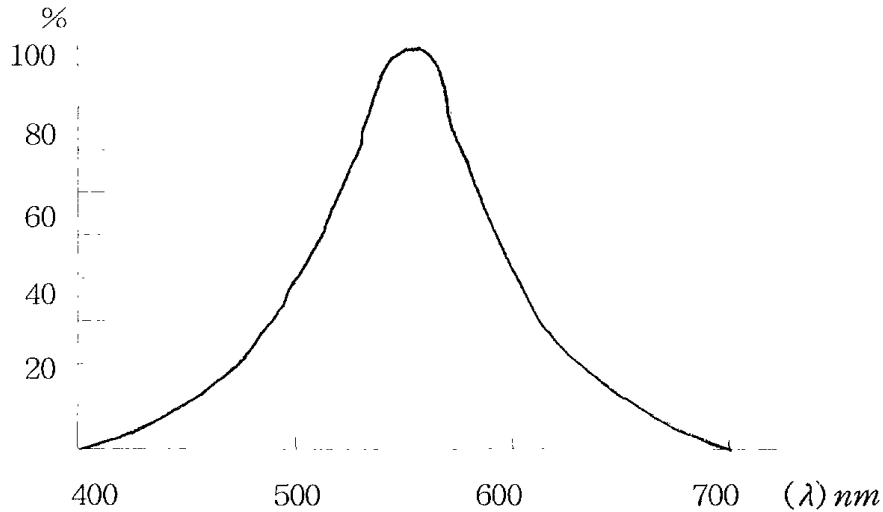


Fig 57. Sensitivity in the Human eye

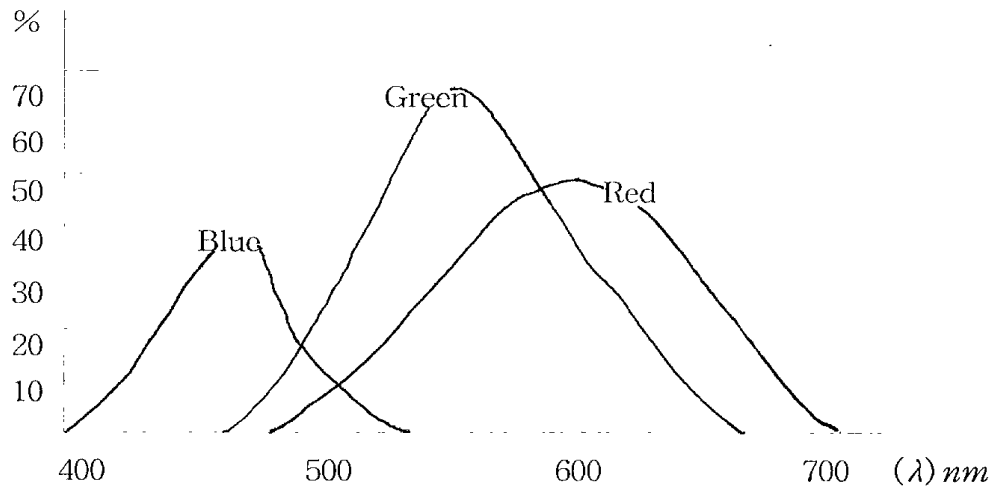


Fig 58. Relative response in the Human eye photopigment

사과의 인식을 위해 사용할 색좌표를 결정하기 위해서 그림 58에서와 같이 인간의 색에 대한 반응을 토대로 새로운 색좌표를 결정하였다. CDD 카메라에서 받아들인 RGB의 3원색을 가지고 아래 식과 같은 임의의 선형 결합에 의해서 여러 가지 새로운 색좌표계를 만들 수 있다.

$$X = aR + bG + cB \quad (a, b, c \text{는 상수}) \quad (55)$$

또한 화상 처리에서는 R/G나 G/B와 같이 색의 스펙트럼간의 비(比)를 특징 값으로 이용하는 경우가 있다. 스펙트럼간의 비(比)를 사용할 경우 부동 소수점 연산에 의한 계산이 이루어지므로 큰 화상을 처리할 경우 많은 시간이 필요하다. 어떤 색좌표가 유효한가는 처리 대상에 따라서 다르므로 여러 가지 색 특징을 만들어 두면 대상물 분석에서 유효한 특징을 골라 낼 수 있다. 일반적으로 색의 차이를 결정함수로 판단하여 대상을 인식하는 방법이 처리 속도가 빠르고, 수치적 분석이 용이해 많이 쓰이

고 있다. 결정함수는 간략할 수록 처리 속도를 높이는데 효과적이다. 따라서 색의 3원색에 대한 인간의 눈의 민감도를 토대로 하여 R-G로 새로운 색좌표를 구성하였으며, 컴퓨터에 의한 처리속도 향상과 데이터량을 줄이기 위하여 다음 식과 같이 변환시켜 사용하였다.

$$X = \frac{R - G + 256}{2} \quad (0 \leq X, R, G \leq 255) \quad (56)$$

#### 4. 사과인식함수 결정

사과의 인식은 표본화상과 입력화상간의 유사성(類似性)을 구하는 방법을 사용하였다. 인식 대상물인 사과는 다양한 크기를 가지므로 표본화상을 크기별로 5등급으로 나누어서 대응시켰다.(표 8)

Table 8. Apples grade by size

크기등급 데이터량	등급 1	등급 2	등급 3	등급 4	등급 5
화소수 (pixel)	32 x 32	48 x 48	64 x 64	80 x 80	96 x 96
데이터량 (byte)	1024	2304	4096	6400	9216

표 8에서 같이 표본화상은 많은 메모리 양을 필요하므로 컴퓨터내의 저장 장치에 저장하여 필요에 따라서 다시 사용할 수 있도록 하였다.

표본화상과의 유사성의 척도로는 상관계수법에 의한 상관계수(correlation)와 SSDA(sequential similarity detection algorithm)법에 의한 비유사도를 사용하였다.

두 변수 X, Y 사이의 상관관계식은 다음과 같다.



$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma \cdot \sigma'} \quad \text{또는} \quad r = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \bar{x} \bar{y}}{\sigma \cdot \sigma'} \quad (57)$$

$\bar{x}$  : X의 평균값  $\bar{y}$ : Y의 평균값  $\sigma$  : X의 표준편차  $\sigma'$  : Y의 표준편차

상관계수  $r$ 은 항상  $-1 \leq r \leq 1$  을 만족하는 것으로 양의 상관관계일 때는  $r > 0$  이고 음의 상관일 때에는  $r < 0$ 이며, 상관이 없을 때는 0 이다. 실험에서 사용한 사과의 판단 기준은  $r \geq 0.55$ 를 사용하였다.

SSDA(sequential similarity detection algorithm)법에서는 매칭(matching)의 척도로 비유사도  $\int \int |f - t| dx dy$  을 사용하였다. 다음 식은 임의의 점  $(u, v)$ 에서 입력화상  $f(x, y)$ 와 표본화상  $t(x, y)$ 와의 비유사도  $m(u, v)$ 를 나타낸다.

$$m(u, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m |f(k+u-1, l+v-1) - t(k, l)| \quad (58)$$

비유사도  $m(u, v)$ 은 다음과 같은 특징을 가진다. 첫째,  $t(x, y)$ 와 일치하는 패턴이  $(u, v)$ 에 있으면 값이 작고 반대이면 큰 값을 가진다. 둘째,  $t(x, y)$ 와 전혀 일치하지 않는 경우는  $t(x, y)$  내의 각 화소에 있어서 입력화상과의 농도차의 절대값을 순차적으로 더해 가면  $m(u, v)$ 이 급격히 증대한다. 셋째, 연산 도중에 농도차의 부분 합이 어떤 역치를 넘으면,  $t(x, y)$ 와 일치하는 패턴이 없는 것으로 여기고 다음 장소로  $m(u, v)$ 의 계산을 이동할 수 있다. 이 방법은 대부분의 계산이 가감산이고, 대부분 계산도중에 중단되기 때문에 계산 시간이 단축된다.

## 제2절 사과 2차원 위치 결정

### 1. 2차원 위치결정

사과의 인식은 표 9, 표 10, 표 11과 같이 입력화상과 표준화상과의 형판정합(Template Matching)을 사용하였다. 형판정합에서는 화상 자체가 처리 데이터로 하기 때문에 표준화상을 생성하는 작업은 간단하고, 화상처리 과정은 표준화상과 입력화상을 직접 정합하는 것이므로 알고리즘이 간략하게 구성된다. 이 방법은 찾고자 하는 대상의 화상이 단순한 구조를 갖고 물체의 수가 제한되는 경우에 효율적이다. 본 연구에서 사용한 표준화상은 각 화소의 값이 입력화상의 각 화소의  $X = \frac{R-G+256}{2}$  값을 가지는 화상이다. 형판정합에 의한 사과의 인식과정은 입력화상과 표준화상 사이의 유사성 척도(similarity measure)를 하여 이루어진다. 일반적으로 사용되어지는 유사성 척도는 다음 식과 같다.

$$S = \sum f(x, y) \cdot t(x, y) \quad (59)$$

$f(x, y)$ 는 입력화상을 나타내고,  $t(x, y)$ 는 표준화상인 형판이다.

Table 9.  
Example  
template for  
template  
matching

1	1	1
1	1	1
1	1	1

Table 10. Example  
binary input image for  
template matching

1	1	0	0	0
1	1	1	0	0
1	0	1	0	0
1	1	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Table 11. Example  
similarity of template  
matching

7	4	2	X	X
7	4	2	X	X
4	2	1	X	X
2	1	8	X	X
X	X	X	X	X
X	X	X	X	X

구체적인 형판정합 과정은 다음과 같다.(그림 59)

Step 1. 카메라로부터 화상  $f(x,y)$ 를 입력받는다.

- Step 2. 검출하려고 하는 대상물  $t(x, y)$ 를 입력화상  $f(x, y)$ 의 임의의 점  $(i, j)$ 에 중심이 겹치게 한다.
- Step 3.  $t(x, y)$ 와  $f(x, y)$ 의 겹치는 부분에서 유사도를 계산한다.
- Step 4. Step2~Step3의 조작을 입력화상  $f(x, y)$ 의 모든 점에 대해서 실시한다.
- Step 5. Step2~Step4의 과정에서 구해진 유사도가 미리 정의한 임계값을 넘는 위치를 찾는다.

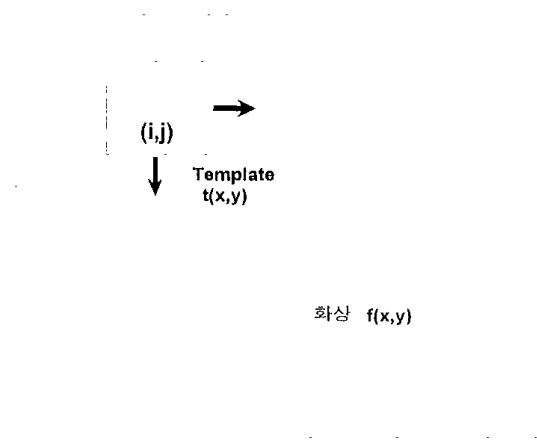


Fig 59. Diagram of template matching

사과의 위치결정 과정을 고속화하기 위하여 거친검색과 정밀검색의 두 단계로 나누어서 행하였다. 거친검색에서는 표준화상을 몇 pixel씩 간격 두고 입력화상과 물려서 정합의 척도를 구하여 사과가 존재할 범위를 구한다.

두 번째의 정밀검색 과정에서는 거친검색에서 구해진 범위에서만 표준화상을 1 pixel씩 이동시켜서 정합의 척도가 최대인 위치를 구한다. 이렇게 하여 전체적으로 정합의 척도를 계산하는 횟수와 계산 시간이 단축되었다.

거친검색 과정에서 정합의 척도는 SSDA (sequential similarity detection algorithm)법에서의 비유사도  $\int \int |f - t| dx dy$ 을 사용하였으며 표준화상과 8 pixel씩 겹

치계 하여 검색하였다.(그림 61, 그림 62, 그림 63)



Fig 61. Original image of input image for template matching

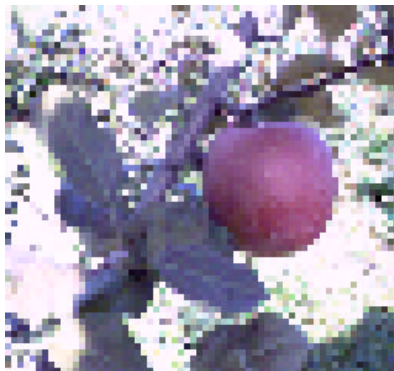


Fig 62. Zoom-outed image of compressed image

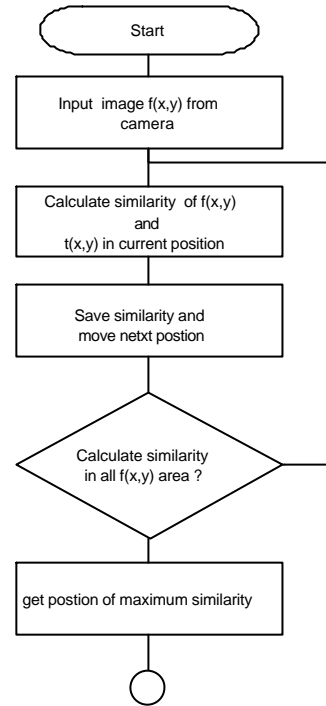


Fig 60. Flowchart of apple scanning

치게 하여 검색하였다.(그림 61, 그림 62, 그림 63)



Fig 61. Original image of input image for template matching

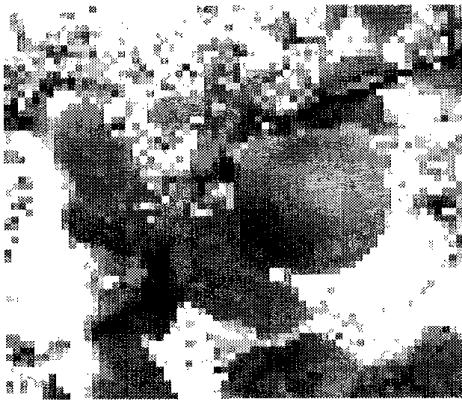


Fig 62. Zoom-outed image of compressed image

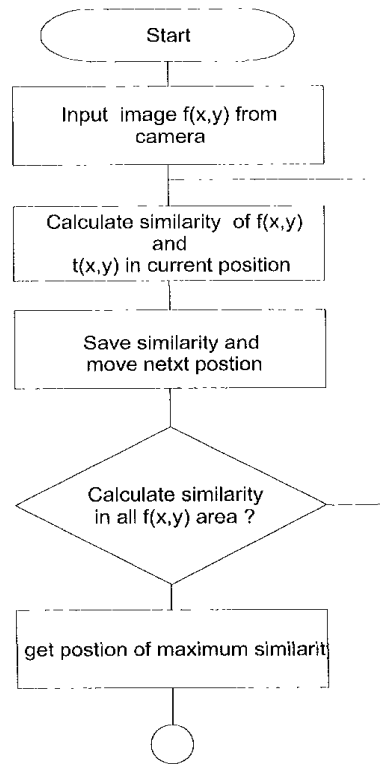


Fig 60. Flowchart of apple scanning



Fig 63, Image in rough scanning process

거친검색 과정에서는 표준화상을 8 pixel씩 이동하므로 유사도가 최대가 되는 최적의 중심점을 지나칠 경우가 있다. 이런 오류를 피하기 위해서 정밀검색에서는 입력 화상의 모든 영역에 대해서 매칭(matching)을 하지 않고, 거친검색에서 구해진 영역을 중심으로 두 화상을 1 pixel씩 겹쳐서 매칭(matching)의 척도를 구하였다. 정밀검색에서 사용한 매칭의 척도는 상관계수이며, 가장 높은 상관계수값을 가지는 점을 사과 중심위치로 하였다. 이러한 방법으로 거친 검색에 지나칠 수 있는 최적 위치를 구할 수 있었다.



Fig 64, Image of apple captured at rough scanning



Fig 65, Image of apple captured at detail scanning

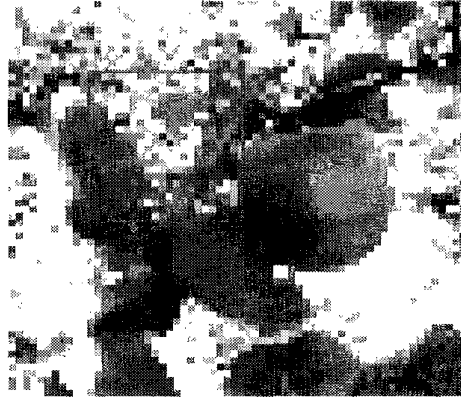


Fig 63. Image in rough scanning process

거친검색 과정에서는 표준화상을 8 pixel씩 이동하므로 유사도가 최대가 되는 최적의 중심점을 지나칠 경우가 있다. 이런 오류를 피하기 위해서 정밀검색에서는 입력화상의 모든 영역에 대해서 매칭(matching)을 하지 않고, 거친검색에서 구해진 영역을 중심으로 두 화상을 1 pixel씩 겹쳐서 매칭(matching)의 척도를 구하였다. 정밀검색에서 사용한 매칭의 척도는 상관계수이며, 가장 높은 상관계수값을 가지는 점을 사과 중심위치로 하였다. 이러한 방법으로 거친 검색에 지나칠 수 있는 최적 위치를 구할 수 있었다.

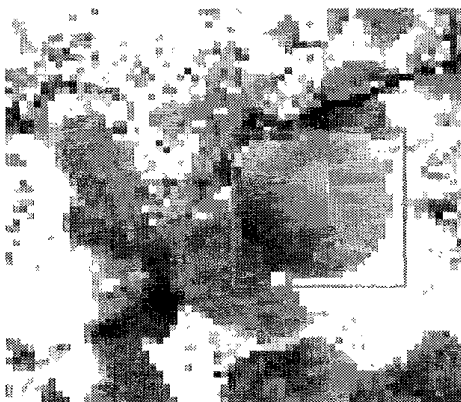


Fig 64. Image of apple captured at rough scanning

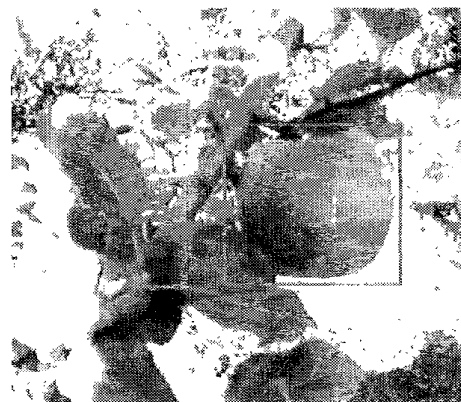


Fig 65. Image of apple captured at detail scanning

## 2. 특징값 계산과 사과 중심위치 보정

3차원 상에 위치해 있는 사과를 수확하기 위해서는 정확한 3차원 위치를 구해야 한다. 본 실험에서는 3차원 위치를 구하기 위해서 서로 다른 위치에서 입력한 두 화상을 이용한 스테레오 화상기법을 사용하고 있다. 스테레오 화상기법에서는 입력된 두 화상에서 각각의 대상물의 정확한 위치를 구하는 것이 중요하다. 3차원 위치를 구하기 전에 2차원 평면상에서 정확한 사과의 위치 보정이 필요하다. 형판정합에서 구한 2차원좌표는 상관계수값과 비유사도에 기초한 위치이므로 사과의 중심위치와 반드시 일치하는 것은 아니다. 또한 원 화상에 아무런 전처리(前處理)를 하지 않았기 때문에 화상의 잡음에 의한 오차가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 66과 같이 사과의 정확한 위치와 특징을 구하기 위해서 화상을 이치화 하였으며, 이치화된 화상을 라벨링(labeling)하여 대상물의 특징을 구하고 사과의 중심위치를 보정하였다.

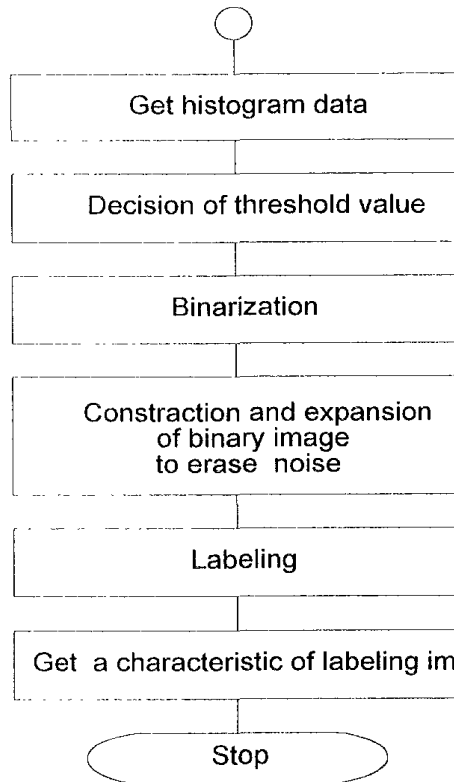


Fig 66. Flowchart of characteristic detection and position calibration



가. 사과화상의 이치화

다치화상을 이치화하기 위해서는 임계값을 결정하여야 한다. 사과수확로봇의 작업은 실외에서 이루어지기 때문에 시간과 날씨에 따라 자연광이 달라지게 되므로 고정된 임계값을 적용할 수가 없다. 이것을 해결하기 위해서 아래와 같은 순서로 화상의 변화에 따라 최적의 임계값을 자동적으로 결정하도록 하였다.

Step 1. 화상처리 영역을 x축, y축 각각 8 pixel마다 색좌표 함수값의 평균값을 표본 화소로 하여 잡음을 줄이고 처리 속도를 향상시켰다.(그림 68)

$$f'(x_n, y) = \frac{1}{8} \sum_{n'=n}^{n+8} f(x_{n'}, y) \quad (60)$$

Step 2. Step 1에서 구한 화상  $f'(x, y)$ 의 히스토그램을 구한다.(그림 69)

$$Histogram(n) = \sum_{x'=sx}^{sx+dx} \sum_{y'=sy}^{sy+dx} f'(x', y') \quad (61)$$

Step 3. 이동 평균을 구하여 히스토그램을 평활화 한다.(그림 70)

$$Histogram^*(n) = \frac{1}{5} \sum_{n'=n-2}^{n+2} Histogram(n') \quad (62)$$

Step 4.  $Histogram^*(n)$ 의 평균값을 구한다.

$$Mean = \frac{1}{256} \sum_{n'=0}^{255} Histogram^*(n') \quad (63)$$

Step 5. 평균값을 중심으로 좌우로 최대  $Histogram^*(n)$  값을 구한다.

$$MAX_L = Max(Histogram^*(n)), \quad 0 \leq n \leq Mean \quad (64)$$

$$MAX_R = Max(Histogram^*(n)), \quad Mean < n \leq 255$$

Step 6. 평균값을 중심으로 좌우 최대  $Histogram^*(n)$  값 사이의 최소값을 임계값으

로 한다.(그림 71)

$$\text{Threshold Value} = \text{Min}(\text{Histogram}*(n)), \quad \text{MAX}_L \leq n \leq \text{MAX}_R \quad (65)$$



Fig 67. Original R-G image  
for binarization



Fig 68. Zoom-outed R-G  
image for binarization

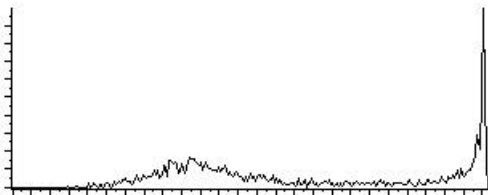


Fig 69. Histogram of R-G image

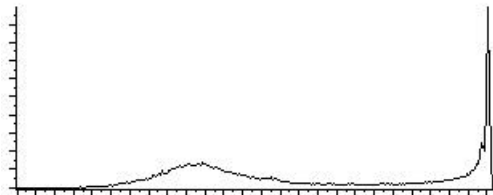


Fig 70. Equalized histogram of R-G  
image



Fig 71. Binarized image

로 한다.(그림 71)

$$\text{Threshold Value} = \text{Min}(\text{Histogram}*(n)), \quad \text{MAX}_L \leq n \leq \text{MAX}_R \quad (65)$$



Fig 67. Original R-G image for binarization

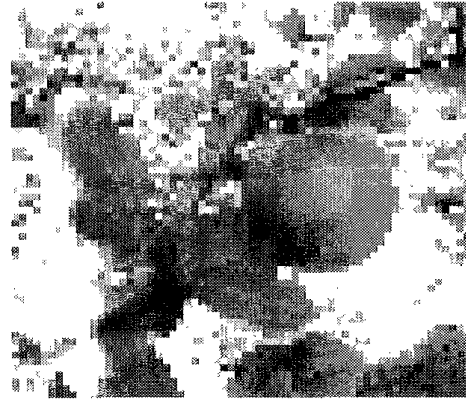


Fig 68. Zoom-outed R-G image for binarization

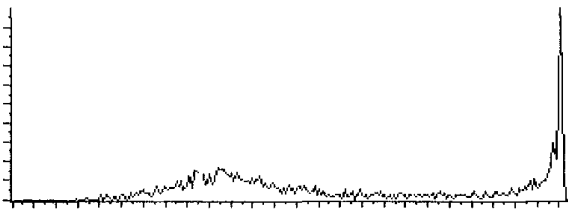


Fig 69. Histogram of R-G image

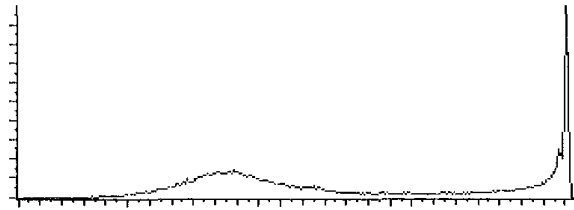


Fig 70. Equalized histogram of R-G image

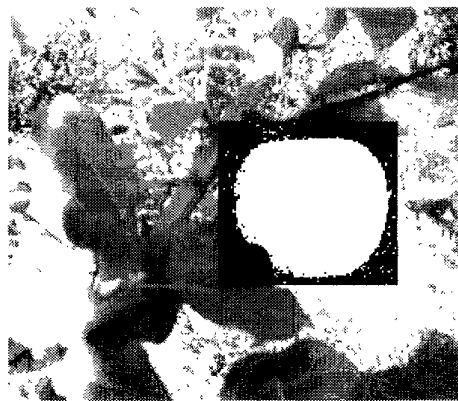


Fig 71. Binarized image

### 나. 이치화상의 평활화

인공적으로 만들어지는 이상적인 도형과 같은 화상을 제외하고는 실제의 다치화상에 이치화 처리를 통해 얻어진 이치화상에는 면적이 작은 구멍이나 작은 점등을 포함하는 경우가 많다. 이들 성분은 본질적인 화상 정보에 기여하지 못할 뿐만 아니라 화상의 해석에 있어 오류를 발생시킬 수 있다. 이들 성분을 이치화상에 있어서 잡음성분(noisy component in binary image)이라 하며 화상의 본질적인 정보를 훼손하지 않고 이것들을 제거하여 화상을 평활화하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이러한 잡음 성분을 없애기 위해서 화상의 축소와 확대를 통하여 잡음성분을 없앴다.(그림 74, 그림 75) 입력화상을  $f_{ij}$ , 출력화상을  $g_{ij}$ 라 할 때, 수축(contraction)은 주어진 화상요소의 경계화소를 모두 삭제하는 처리로 기본 조작은 다음과 같다.

$$f_{ij} = 0 \text{ 또는 } f_{ij} \text{의 인접한 화소가 0일 경우에는 } g_{ij} = 0$$

$$\text{그 외의 경우는 } g_{ij} = 1$$

팽창(expansion)은 수축처리와는 반대로 0값을 가지는 화소의 방향으로 경계화소를 증식시키는 처리로 기본 조작은 다음과 같다.

$$f_{ij} = 1 \text{ 또는 } f_{ij} \text{의 인접한 화소가 1일 경우에는 } g_{ij} = 1$$

$$\text{그 외의 경우는 } g_{ij} = 0$$

이치화상의 팽창과 수축은 작은 성분이나 작은 구멍을 검출하거나 소멸시키는 효과가 있어 별개로 사용하지 않고 조합해서 사용한다.

수축→팽창 : 이치화상 주위의 작은 성분이나 폭이 좁은 부분을 제거하는 효과를 가진다. (그림 72)

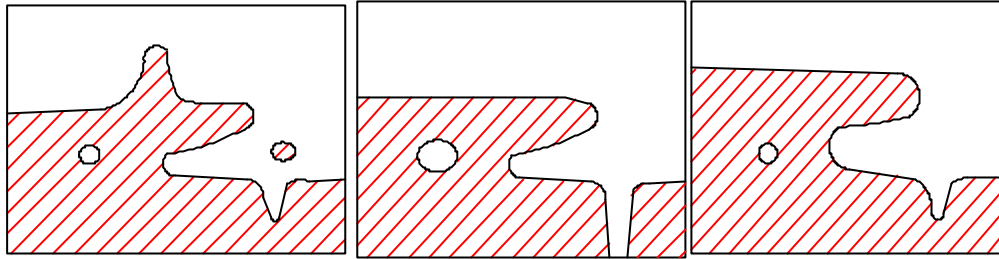


Fig 72. Effect of extraction and expansion

팽창→수축 : 연결 성분이 작은 구멍이나 작은 오목 부분을 메우는 효과를 가진다.  
(그림 73)

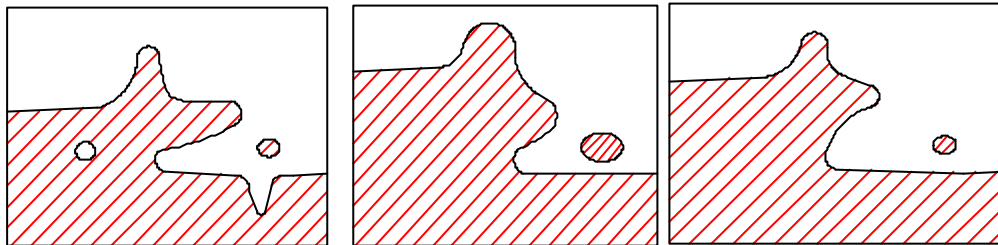


Fig 73. Effect of expansion and extraction



Fig 74. Image with noises



Fig 75. Smoothed image by using expansion and extraction

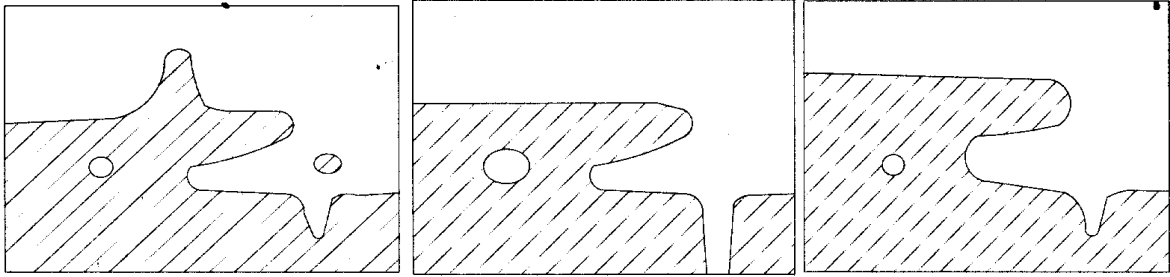


Fig 72. Effect of extraction and expansion

팽창→수축 : 연결 성분이 작은 구멍이나 작은 오목 부분을 메우는 효과를 가진다  
(그림 73)

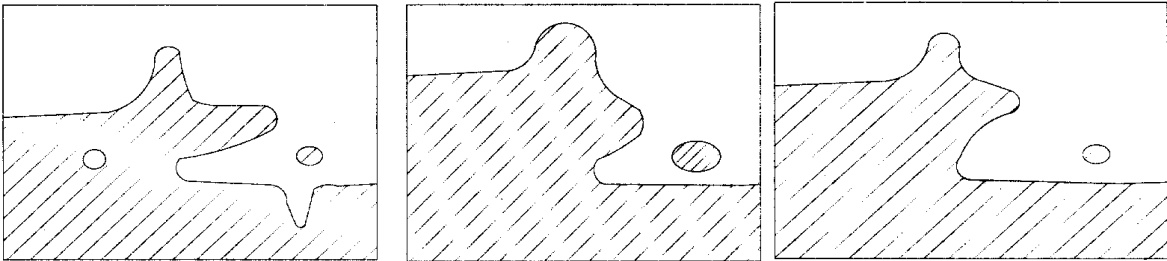


Fig 73. Effect of expansion and extraction

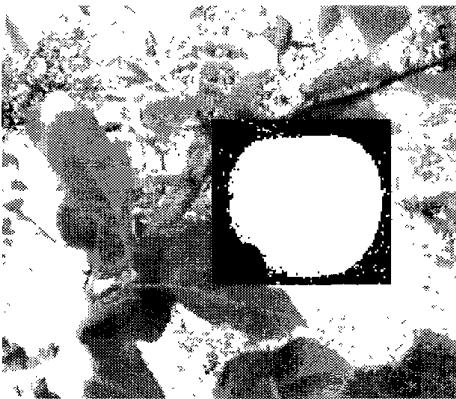


Fig 74. Image with noises

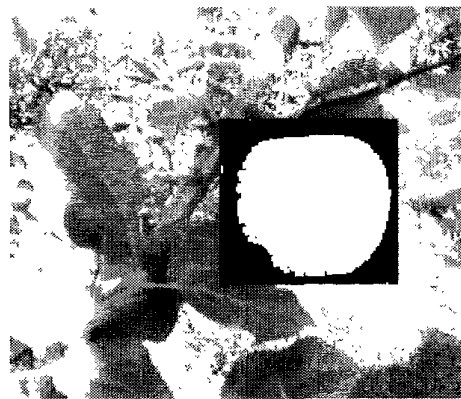


Fig 75. Smoothed image by using expansion and extraction

#### 다. 이치화상의 라벨링

연결되어진 성분에 대해서 개개의 특징을 해석하기 전에 각 성분을 추출할 필요가 있다. 이치화상에서 이웃하는 모든 화소에 같은 번호를 할당하고, 다른 연결 성분에는 다른 번호를 할당하는 조작을 라벨링(labeling)이라 한다.(그림 78, 그림 79) 다음은 순차주사와 병렬형 전파를 조합한 라벨링 알고리즘의 구체적인 방법이다.

Step 1. 화상을 TV-래스터(raster) 주사로 차례로 주사한다.(그림 76)

Step 2. 번호가 할당되어 있지 않은 한 개의 화소를 발견하면, 이 화소에 대하여 사용되고 있지 않은 번호를 붙인다.

Step 3. Step 2의 화소를 중심으로 8방향으로 접하고 있는 화소에 대하여 같은 번호를 붙인다. 이 조작은 레이블이 최초의 화소로부터 전파해 가는 처리이다.(그림 77) 처리를 되풀이해서 새로운 번호를 전파해야 할 화소가 없을 때 1개의 연결 성분 전체에 같은 번호가 붙여진다.

Step 4. 다시 화상을 주사를 계속하여 아직 번호가 붙어 있지 않은 화소가 있으면 Step 1~Step 3의 처리 순서로 새로운 번호를 붙인다.

Step 5. 화상 전체 래스터(raster) 주사가 끝났을 때 라벨링(labeling) 알고리즘은 끝난다.

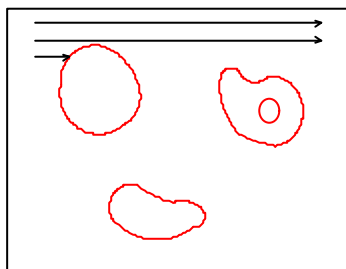


Fig 76. Search of unlabeled pixel by using TV-raster scan

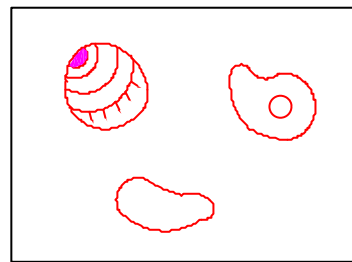


Fig 77. Process of label propagation

#### 다. 이치화상의 라벨링

연결되어진 성분에 대해서 개개의 특징을 해석하기 전에 각 성분을 추출할 필요가 있다. 이치화상에서 이웃하는 모든 화소에 같은 번호를 할당하고, 다른 연결 성분에는 다른 번호를 할당하는 조작을 라벨링(labeling)이라 한다.(그림 78, 그림 79) 다음은 순차주사와 병렬형 전파를 조합한 라벨링 알고리즘의 구체적인 방법이다.

Step 1. 화상을 TV-래스터(raster) 주사로 차례로 주사한다.(그림 76)

Step 2. 번호가 할당되어 있지 않은 한 개의 화소를 발견하면, 이 화소에 대하여 사용되고 있지 않은 번호를 붙인다.

Step 3. Step 2의 화소를 중심으로 8방향으로 접하고 있는 화소에 대하여 같은 번호를 붙인다. 이 조작은 레이블이 최초의 화소로부터 전파해 가는 처리이다.(그림 77) 처리를 되풀이해서 새로운 번호를 전파해야 할 화소가 없을 때 1개의 연결 성분 전체에 같은 번호가 붙여진다.

Step 4. 다시 화상을 주사를 계속하여 아직 번호가 붙어 있지 않은 화소가 있으면 Step 1~Step 3의 처리 순서로 새로운 번호를 붙인다.

Step 5. 화상 전체 래스터(raster) 주사가 끝났을 때 라벨링(labeling) 알고리즘은 끝난다.

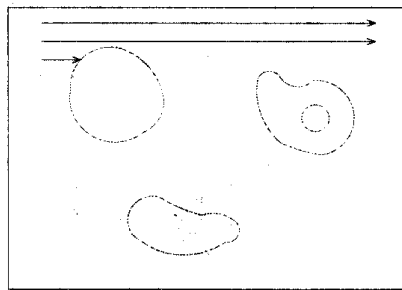


Fig 76. Search of unlabeled pixel by using TV-raster scan

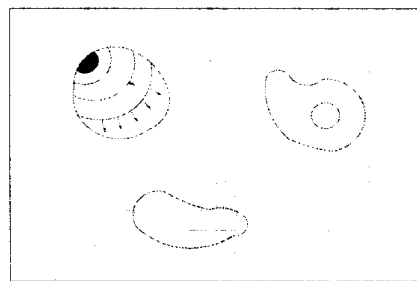


Fig 77. Process of label propagation





Fig 78. Equalized binary image for labeling

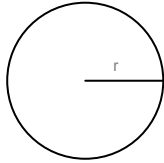

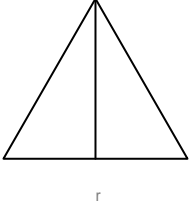


Fig 79. Labeled binary image

라. 사과의 특징값 계산과 중심위치 보정

라벨링된 화상에서 면적, 주위의 길이, 원형도, 중심 좌표와 같은 특징값을 구할 수 있다. 표 12는 대표적인 도형의 특징값을 나타낸다.

Table 12. Characteristic of several image type

종류	원	정사각형	정삼각형
화상의 형태			
면적	$\pi r^2$	$r^2$	$\frac{\sqrt{3}}{4} r^2$
주위 길이	$2\pi r$	$4r$	$3r$
원형도	1.0	$\frac{\pi}{4} = 0.79$	$\frac{\pi\sqrt{3}}{9} = 0.60$

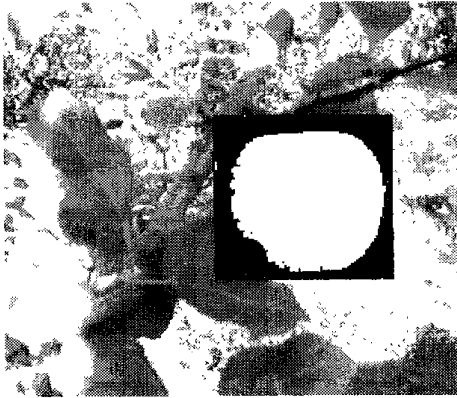


Fig 78. Equalized binary image for labeling

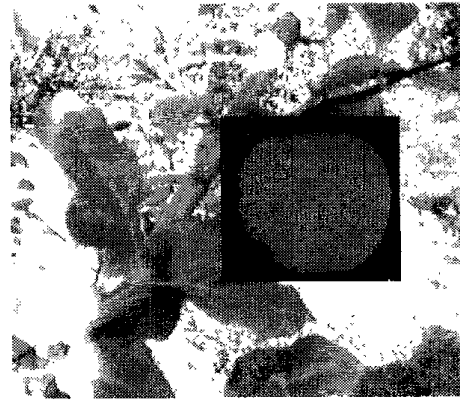
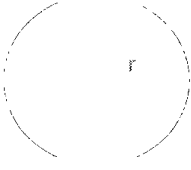
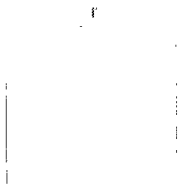
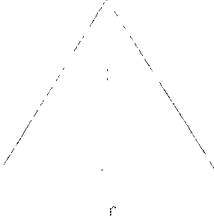


Fig 79. Labeled binary image

라. 사과의 특징값 계산과 중심위치 보정

라벨링된 화상에서 면적, 주위의 길이, 원형도, 중심 좌표와 같은 특징값을 구할 수 있다. 표 12는 대표적인 도형의 특징값을 나타낸다.

Table 12. Characteristic of several image type

종 류	원	정사각형	정삼각형
화상의 형태			
면적	$\pi r^2$	$r^2$	$\frac{\sqrt{3}}{4} r^2$
주위 길이	$2\pi r$	$4r$	$3r$
원형도	1.0	$\frac{\pi}{4} = 0.79$	$\frac{\pi\sqrt{3}}{9} = 0.60$

라벨링화상의 원형도는 면적과 주위의 길이를 이용하여 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$C = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (C : \text{원형도}, A : \text{면적}, L : \text{주위길이}) \quad (66)$$

위의 식에서 C의 값은 원에 가까울수록 1.0에 가까워지고, 도형이 복잡하게 될수록 1.0보다 작은 값을 가지게 된다.

라벨링 화상에서 중심 위치를 구하는 식은 다음과 같다.

$$Center(X_c, Y_c) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \right) \quad (67)$$

본 연구에서는 사과의 검색과정에서 인식된 사과에 대해서 원형도가 0.7이하 일 경우 사과의 인식대상에서 제외시켰으며, 또한 표준화상크기의 40%이하의 면적을 가지는 라벨링 화상도 인식과정에서 제외시켰다.



Fig 80. Labeled image for center position calibration

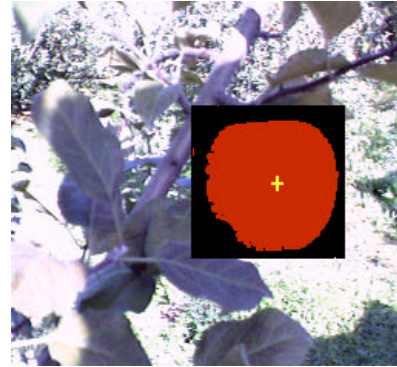


Fig 81. Calibrated Image in center position

라벨링화상의 원형도는 면적과 주위의 길이를 이용하여 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$C = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (C : \text{원형도}, A : \text{면적}, L : \text{주위길이}) \quad (66)$$

위의 식에서 C의 값은 원에 가까울수록 1.0에 가까워지고, 도형이 복잡하게 될수록 1.0보다 작은 값을 가지게 된다.

라벨링 화상에서 중심 위치를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{Center}(X_c, Y_c) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \right) \quad (67)$$

본 연구에서는 사과를 검색과정에서 인식된 사과에 대해서 원형도가 0.7이하 일 경우 사과를 인식대상에서 제외시켰으며, 또한 표준화상크기의 40%이하의 면적을 가지는 라벨링 화상도 인식과정에서 제외시켰다.

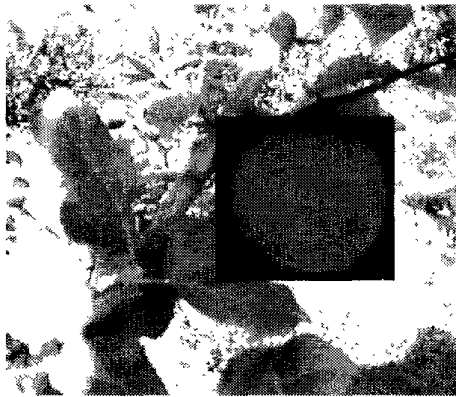


Fig 80. Labeled image for center position calibration

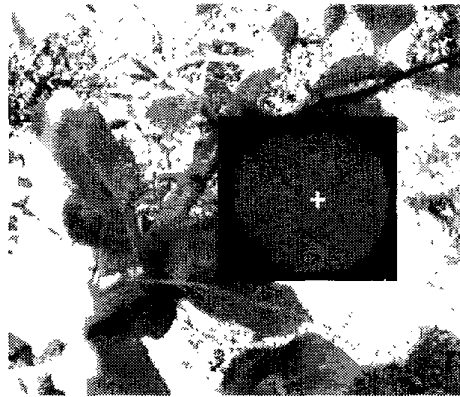


Fig 81. Calibrated Image in center position

## 제3절 장애물 검출

### 1. 장애물 검출 방법

사과를 인식할 때 잎이나 가지와 같은 장애물에 의해서 사과화상이 가려지는 경우가 있다. 이러한 장애물을 검출하기 위해 단순한 이치화 처리를 확장해서, 복잡한 화상이라도 영역을 분할을 할 수 있도록, 컬러 화상을 대상으로 개발된 재귀적 역치처리(recursive thresholding) 방법을 사용하여 관심 영역에서 각각 색채 특징별로 화상의 구성 요소를 분할하였다.(그림 82) 구체적인 처리 과정은 다음과 같다.

Step 1. 입력화상으로부터 R, G, B에 관한 히스토그램을 각각 구한다. 이때 히스토그램은 입력화상의 모든 영역의 히스토그램이다.

Step 2. 각 히스토그램의 피크(peak)를 구하고, 가장 샤프(sharp)한 피크를 고른다. 선정된 피크에 속하는 화소를 구하고, 그 화소로 이루어진 연결 영역을 구한다. 이때 면적이 작은 연결 영역은 제외한다.

Step 3. Step 2에서 구해진 연결 영역 및 그 밖의 나머지 연결 영역의 각각에 대해서 Step1 ~Step2 의 처리를 재귀적으로 반복하고, 모든 영역에 대한 히스토그램이 완전히 단봉성(單峰性)이 될 때까지 분할을 되풀이한다.

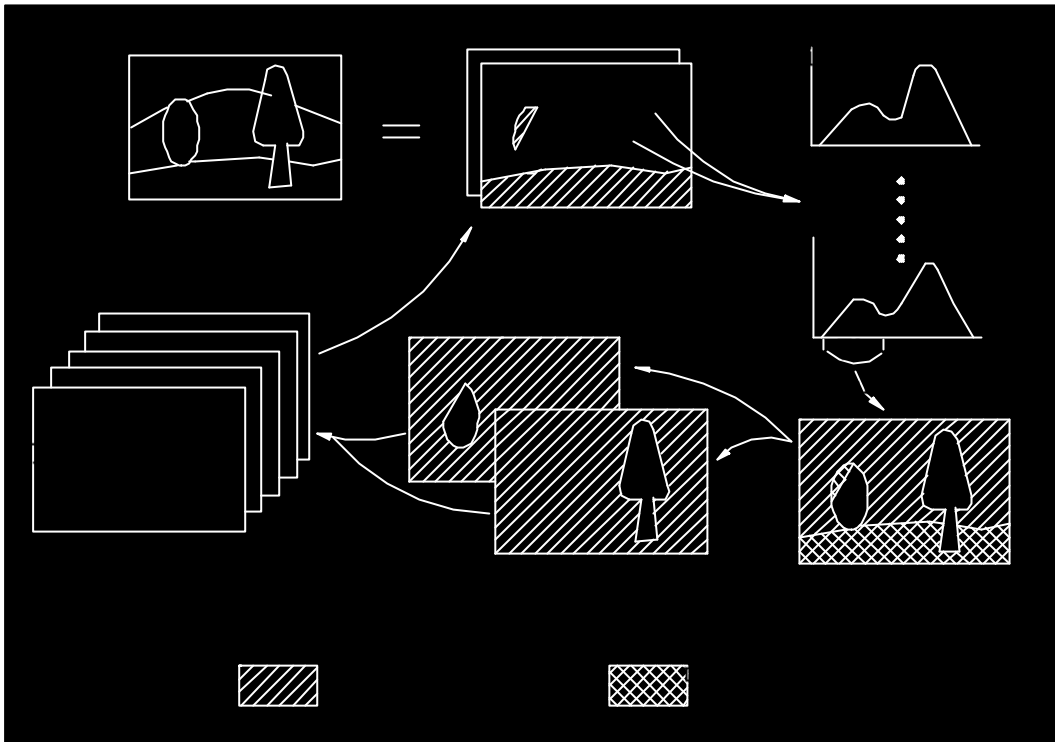


Fig 82. Diagram for obstacle detection



Fig 83. RGB image for detection of obstacles

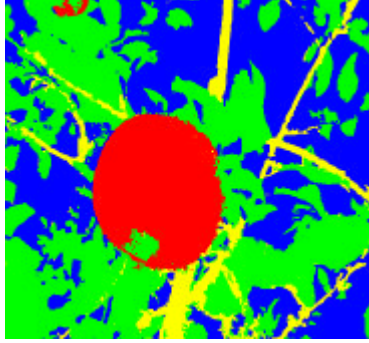


Fig 84 Image divided into leaf, branch, apple and sky

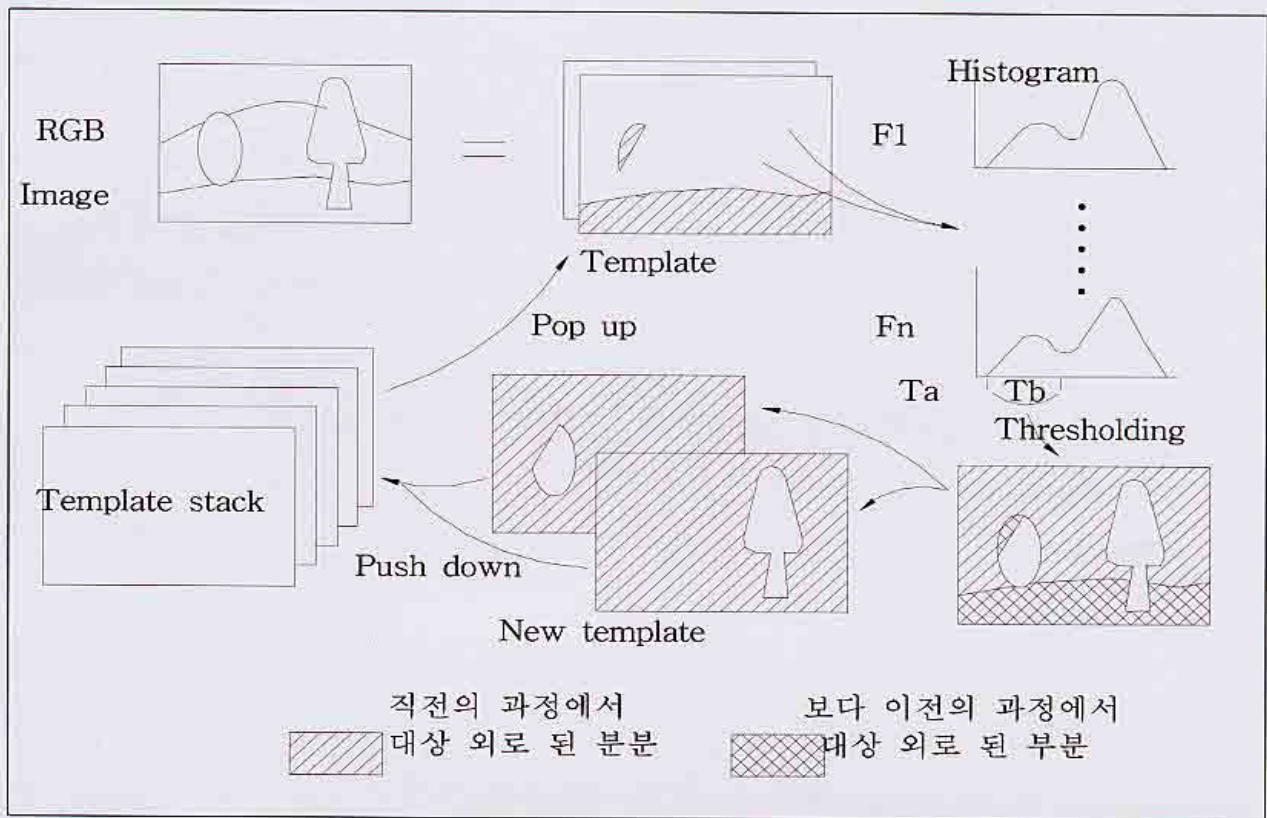


Fig 82. Diagram for obstacle detection



Fig 83. RGB image for detection of obstacles

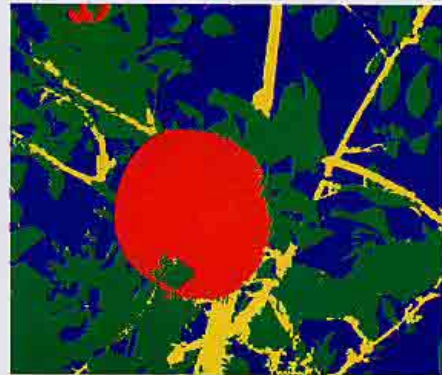


Fig 84. Image divided into leaf, branch, apple and sky

## 2. 장애물의 중심과 방향 검출

사과의 화상이 장애물에 의해 가려질 경우 장애물의 중심 위치와 방향을 결정하기 위해 화상의 형상 특징 중에서 모멘트(moment) 특징을 사용하였다.(그림 85) 화상의 모멘트 특징은 일반적으로 다음 식으로 정의되는  $M(p, q)$ 과 그 조합에 의해서 결정된다.

$$M(p, q) = \sum_{(i,j)} i^p j^q f_{ij} \quad (68)$$

$f_{ij}$ 는 화상 내에서 1을 취하고, 밖에서 0값을 취하는 2값 화상이다.

(p, q)의 조에 의해서 화상의 여러 가지 특징 량이 결정된다.

화상의 무게중심(  $I_c, J_c$ ) :  $M(0,0)$ 에는 도형의 면적,  $M(1,0)$  및  $M(0,1)$ 은 I축, J축에 대한 모멘트를 나타내므로 도형의 중심 좌표 ( $I_c, J_c$ )는 다음과 같다.

$$I_c = \frac{M(1, 0)}{M(0, 0)} \quad (69)$$

$$J_c = \frac{M(0, 1)}{M(0, 0)}$$

화상의 주축의 방향  $\theta$ : 화상이 뻗어 있는 방향으로서  $M(2,0)$ 과  $M(0,2)$  은 도형의 회전에 관한 것이므로 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\tan^2 \theta + \frac{M(2,0) - M(0,2)}{M(1,1)} \tan \theta - 1 = 0 \quad (70)$$

그림 85에서와 같이 장애물의 주축의 각도와 모멘트 자체를 구함으로써 장애물 방향을 결정할 수 있으므로 사과 수확시 사과수확로봇의 핸드의 진입 각도를 결정할 수 있다.



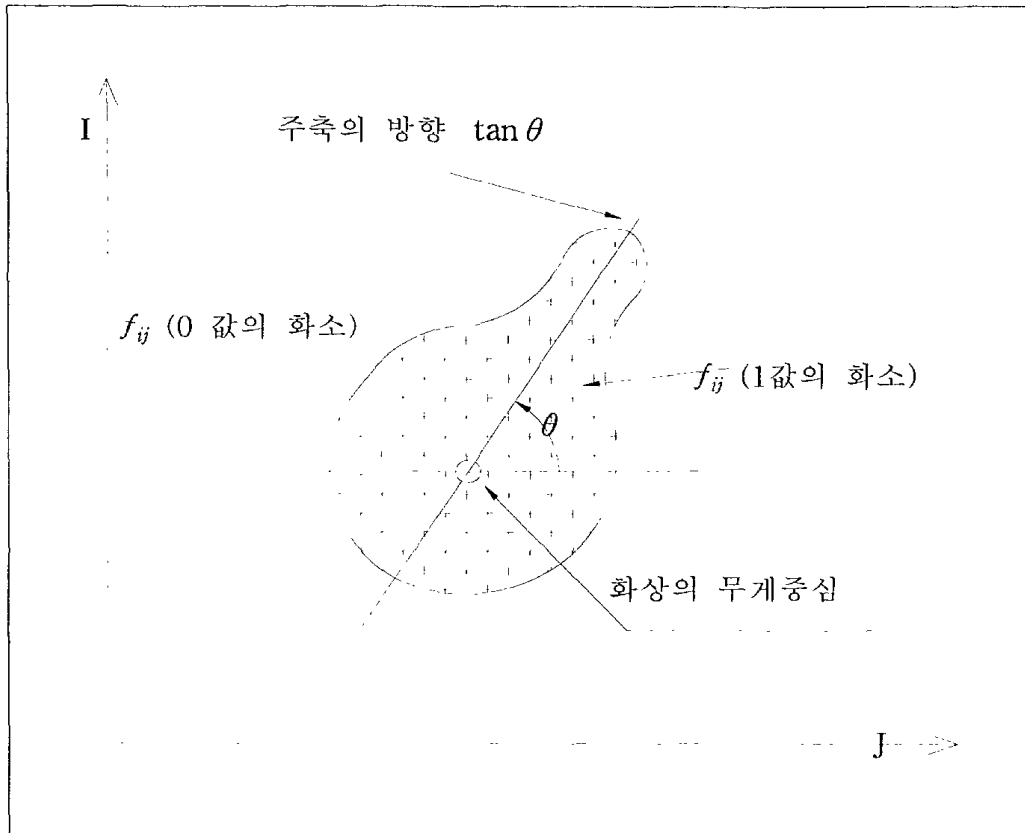


Fig 85. Calculate center-position and direction of obstacles by using moment characteristic

#### 제4절 사과 3차원 위치 측정

사과수확로봇에 의한 사과수확을 위해서는 2차원뿐만 아니라 3차원 위치를 구해야 한다. 사과의 3차원 위치를 구하기 위해 스테레오(stereo) 화상 처리법을 사용하였다. 스테레오 화상처리의 목표는 2개의 렌즈를 통하여 얻어진 화상을 이용하여 3차원 거리 정보를 얻는 것이다. 하나의 물체가 서로 다른 두 위치에서 보여진다면 그 물체의 3차원적 위치를 추정할 수 있다. 효율적인 스테레오 비전의 구현을 위해서 입력화상은 다음의 조건을 만족해야 한다.

첫째, 화상은 구별되는 특징들이 나타날 수 있도록 이미지가 구성되어야하며 균일한 명암을 가져야 한다. 둘째로 두 렌즈의 초점 사이에는 적절한 거리 차이가 있어야 한다. 셋째로 거리정보는 두 초점에서 동시에 보이는 화상 점에서만 계산되어야 한다. 스테레오 알고리즘의 기초는 장면에 존재하는 한 점 P(X, Y, Z)의 거리 Z는 서로 다른 초점에서 얻은 두 화상에서의 대응되는 점간의 상대적 차이에 의하여 계산될 수 있다는 것이다.

이를 위하여 스테레오 알고리즘은 다음의 단계를 포함한다.

- Step 1. 각각의 두개의 화상에서 특징 점을 찾는다.
- Step 2. 두 화상의 특징 점들간의 대응관계를 찾는다.
- Step 3. 대응되는 특징 점들로 변위를 측정한다.
- Step 4. Step 3에서 구한 변위로부터 3차원 위치를 구한다.

사과화상의 스테레오 처리과정 중에서 화상의 특징 점은 사과 중심위치이고 두 특징 점의 관계는 사과의 중심 위치가 동일선상에 존재한다는 것이다. 또한 특징 점들의 변위는 사과의 2차원 좌표이다. 그러므로 다른 두 위치에서 입력된 두 개의 2차원 화상으로부터 3차원 위치 요소 Z 값을 구할 수 있다.

### 1. 스테레오 화상의 기하구조

그림 86에서 두 초점사이의 거리 기본선(baseline) L이며, f는 카메라의 초점에서 화상 평면까지의 초점거리(Focal length)를 나타낸다. 이때 3차원 공간상의 한 점 P(X, Y, Z)에 대응되는 왼쪽 화상 평면의 좌표를  $P_l$  이라고 하고 오른쪽 화상 평면의 점을  $P_r$ 이라 할 때,  $P_r$ 의 위치와 같은 좌표를 갖는 왼쪽 화상의 점을  $P_r'$ 로 표시하면 왼쪽 화상에서  $P_l$  과  $P_r'$ 의 차이가 변위 d가 된다. 위의 정보를 가지고 다음과 같은 거리 정보를 구할 수 있다.

$$Z = L \cdot \frac{f}{P_l - P_r'} \quad (71)$$

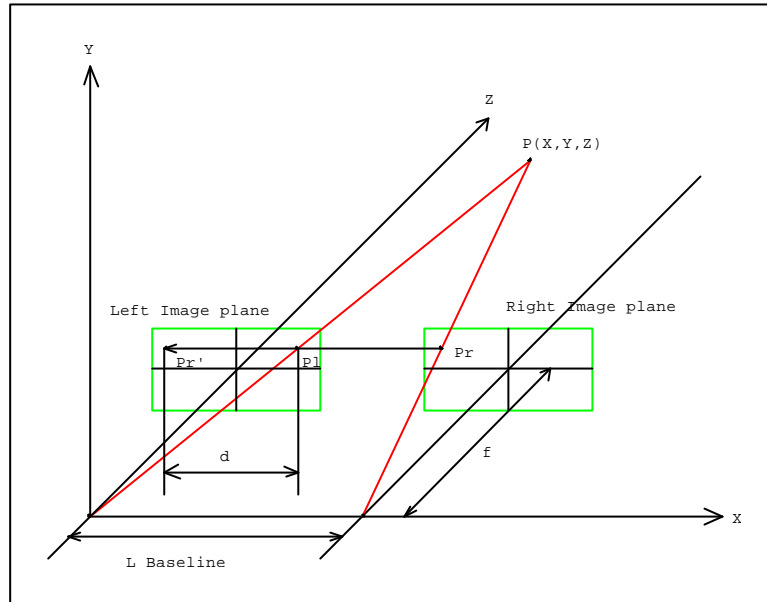


Fig 86. Diagram of stereo image-processing

## 2. Shaking기법에 의한 스테레오 화상처리

그림 86과 같이 스테레오 화상처리를 위해서는 두 개의 화상이 필요하다. 본 연구에서는 두 개의 화상을 입력받기 위해서 2대의 카메라를 사용하지 않고 한 대의 카메라만을 사용하여 스테레오 화상처리를 행하였다. 이를 위해 Shaking기법을 사용하였다. 먼저 한 위치에서 한 개의 화상을 획득한 후 카메라를 다른 위치로 일정한 거리를 이동하여 두 번째 화상을 입력하고, 이 두개의 이미지로부터 스테레오 화상처리를 행하였다. 카메라의 이동은 로봇 팔의 이동에 따라 카메라를 함께 이동시켰다. 여기서 로봇 팔의 이동 거리가 기본선(L)이 되는 원리이다. 구체적인 과정은 다음과 같다.

Step 1. 현재 로봇의 팔 위치에서 하나의 화상을 입력하고 대상물을 인식한 다음 2차

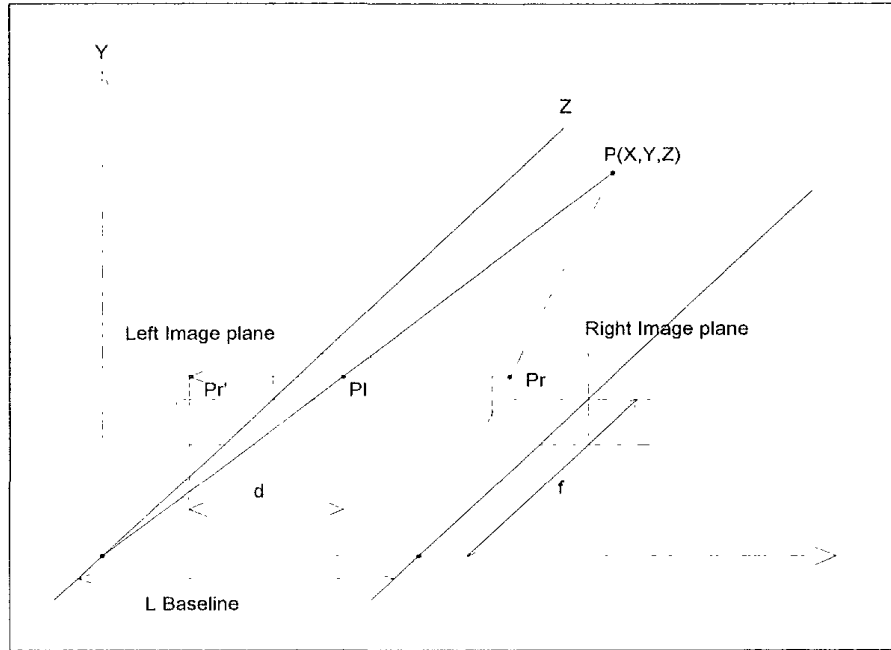


Fig 86. Diagram of stereo image-processing

## 2. Shaking기법에 의한 스테레오 화상처리

그림 86과 같이 스테레오 화상처리를 위해서는 두 개의 화상이 필요하다. 본 연구에서는 두 개의 화상을 입력받기 위해서 2대의 카메라를 사용하지 않고 한 대의 카메라만을 사용하여 스테레오 화상처리를 행하였다. 이를 위해 Shaking기법을 사용하였다. 먼저 한 위치에서 한 개의 화상을 획득한 후 카메라를 다른 위치로 일정한 거리를 이동하여 두 번째 화상을 입력하고, 이 두개의 이미지로부터 스테레오 화상처리를 행하였다. 카메라의 이동은 로봇 팔의 이동에 따라 카메라를 함께 이동시켰다. 여기서 로봇 팔의 이동 거리가 기본선(L)이 되는 원리이다. 구체적인 과정은 다음과 같다.

Step 1. 현재 로봇의 팔 위치에서 하나의 화상을 입력하고 대상물을 인식한 다음 2차

원 위치( $P$ )를 구한다.

Step 2. 로봇의 팔을 일정한 거리(L) 만큼 이동시킨다.

Step 3. Step 2번의 위치에서 두 번째 화상을 입력하고 대상물을 인식한 다음 2차원 위치( $P_r'$ )를 구한다.

Step 4. Step 1과 Step 3에서 구한 2개의 2차원 정보를 사용하여 3차원 위치

$$Z = L \cdot \frac{f}{P_l - P_r'}$$
 를 구한다.

## 제6장 요약 및 결론

### 1. 사과 수확 로봇의 매니플레이터 개발

본 연구는 노동 집약적인 과수 경영의 규모 확대와 생산성 향상 및 우리나라 과수 산업의 국제 경쟁력 강화를 위하여 노동력 절감 문제를 농업기계화를 통하여 접근하고자 과수원 작업 중 종래의 기계화 방법으로는 작업이 불가능한 수확작업에 대하여 메카트로닉스 기술을 활용하여 무인작업이 가능한 로봇을 개발하는 데 목적이 있다. 본 연구의 수직 다관절 사과 수확 로봇은 9축 수직 다관절 로봇으로서 옆, 가지 등의 장애물을 회피할 수 있는 고능률 사과 수확 로봇의 매니플레이터로서 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 1) 수직 다관절 사과 수확 로봇은 베이스 선회, 제1 아암의 회전, 제2 아암의 회전 및 선회, 제3 아암의 회전 및 선회, 종단관절의 회전 및 선회, 수확 hand로 구성되어 있다.
- 2) 로봇의 축간거리와 무게는 베이스 높이 - 780mm, 270kg, 제1아암 - 570mm, 16kg, 제2아암 - 870mm, 32kg, 제3아암 - 490mm, 7kg, 종단관절 아암과 hand - 440mm, 5kg이고 총 중량은 330kg이다.
- 3) 로봇의 작동범위의 각도는 베이스 선회 - 270° , 제1아암의 회전 - 전방45° , 후방 45° , 제2아암의 회전 - 상향 45° , 하향 45° , 제2아암의 선회 - 270° , 제3아암의 회전 - 상향135° , 하향 135° , 제3아암의 선회 - 270° , 종단관절 아암의 회전 - 상향 135° , 하향 135° , 종단관절 아암의 선회 - 270° 이다.
- 4) 로봇의 작동 범위의 거리는 수평거리 860 ~ 2220mm, 수직거리 1440 ~ 2260mm, 선회각도 270° , 회전각도 90° , 270° 이다.

## 2. 사과 수확 로봇의 주행차량 개발

- 1) 본 차량은 자율이동 농업기계장치의 무인 자동화와 로봇의 실용화를 앞당기는 목적으로 다관절 과실 수확 로봇 연구의 일환으로 제작되었다. 습지나 연약 지반에서도 주행성이 좋은 무한궤도 방식을 채택하였으며, 수확로봇의 장착 및 전원공급 등의 기능을 수행한다.
- 2) 전체 배치는 중심부에 로봇을 장착, 차량의 좌측에 단자함, 컨트롤박스, 전원부, 모니터, 발전기, 우측에 배터리, 유압펌프 그리고 사과상자의 공간을 확보하였다. 또한 다관절 과실 수확 로봇의 전면에 연료탱크, 로봇제어장치, 영상처리컴퓨터 등을 두었으며 다관절 과실 수확 로봇의 오작동으로 인한 제어장치, 컴퓨터의 손상을 줄이기 위해 별도의 케이스를 제작하였다.
- 3) 67V, 42V, 24V의 직류전압의 출력의 얻는 전원부 회로를 구성하여 각각 모터 구동 전압-(67V, 24V), 브레이크 구동전압-(24V, 12V), DC 브러쉬·서보 모터-(67V) 등에 사용하도록 하였다.
- 4) 3600rpm에서 240V를 얻는 발전기를 장착하였으며 사용되는 발전기 폴리 외경은  $\varnothing 82\text{mm}$ 가 되며 2가닥의 B형 V벨트를 장착하였다.
- 5) 컨트롤 박스를 제작하여 차량의 조작성을 용이하게 했으며 모니터와 같이 수확 로봇의 작업과 관련된 장비와 동일한 위치에 설치함으로써 작업자의 편의를 도모하였다.
- 6) 차량의 제어 부분은 유압회로로 구성하였고 총 10개의 실린더를 사용, 제작기 차량의 구동부분에 필요한 변속장치, 조향장치 등에 적용하였다.
- 7) 유압회로의 경우 높은 압력을 사용하지 않기 때문에 액츄에이터 등의 유압 관련부품의 선정 시 유체의 체적감소나 압력에 의한 점도 변화는 고려하지 않고 압력 강하만 고려하였으며 각 제어부분마다 적절한 크기의 실린더와 펌프, 유압탱크 등을 선정하였다.

### 3. 사과 수확 로봇의 제어장치 개발

본 연구는 고정밀도의 작업이 가능한 사과 수확 로봇의 개발을 목표로 하여, 관절의 구동에 사용되는 모터의 서보 제어 시스템을 개발하기 위한 것이다. 제어 시스템은 다른 매니플레이터의 운동 등 다양한 부하의 변동이 있어도 회전 속도를 일정하게 유지함으로써 정확한 제어가 가능하여야 한다. 이를 위해 속도제어와 토크제어에 초점을 두고 시스템을 설계 제작하여 파형 출력 시험, 속도 입력 추종 시험 및 스텝 응답 시험을 수행하였으며, 이들의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모터는 정격토크  $22.3\text{kgf}\cdot\text{cm}$ , 순간 기동토크  $112.0\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 인 400W급 컵 모터를 사용하였으며, 제어 가능한 회전수는 10-1400rpm으로 하고,  $22.3\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 까지의 부하 변동에도 일정 속도를 유지할 수 있도록 시스템을 설계하였다. 시험부하는 모터의 27배 관성을 가진 주철제 플리를 사용하였다.
- 2) 구동 회로의 스위칭 작용이 제어 회로에 간섭하는 현상을 막기 위해 구동부와 제어 회로부의 전원을 분리하고, 모터의 용량을 감안하여 별도의 구동부 전원을 제작하였다.
- 3) 속도와 토크의 정확한 제어를 위해 속도 검출신호와 전류 검출신호를 피드백 하는 폐루프 시스템을 구성하였으며, 속도 제어루프에 토크 제어루프를 삽입하여 응답성과 안정성을 높이도록 하였다.
- 4) Gate driver는 포토 커플러를 사용하여 구동부와 절연하였으며, 순간 최대 전류에 대하여 70% 이상의 여유 용량을 가진 IGBT를 사용하여 과전류 보호기능을 가진 H 브리지를 구성하였다.
- 5) 최저 및 최고 제어 회전수에서의 PWM 듀티비를 측정된 결과 약 10%의 오버슈트가 있으나, 듀티비는 51%와 73%로 입력 전압에 비례함을 알 수 있었다. 또한 주요 출력부 12곳의 파형을 측정된 결과, 속도 지령에 따라 잘 추종됨을 확인하였다.
- 6) 회전수를 0에서 1400rpm으로 출력하도록 하는 속도 지령의 스텝입력에 대하여 무부하에서의 응답 시간이 250ms로서 근사적으로 계산한 값과 잘 일치하였다.



#### 4. 화상처리에 의한 사과 인식 알고리즘 개발

사과수확로봇의 사과인식장치 제어를 위해서는 사과의 인식이 필요하다. 본 연구에서는 CCD 카메라를 이용한 화상처리에 의해 사과의 인식과 위치 결정 알고리즘을 개발하였다. 검색 시간과 데이터 량을 줄이기 위해 거친검색과 정밀검색을 나누어서 행하였으며 장애물 검출을 위해서는 컬러 화상을 대상으로 재귀적 역치 처리(recursive thresholding)를 사용하였다. 또한 화상의 모멘트(moment) 특징을 사용하여 장애물의 방향과 중심 위치를 구하여 사과 수확시 로봇의 핸드 진입방향을 결정하게 하였다. 사과의 3차원 좌표는 한 대의 카메라를 사용하는 Shaking기법을 사용하여 스테레오 화상처리로 구했다.

본 연구의 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 새로운 색좌표 함수  $X = \frac{R-G+256}{2}$  으로 사과를 인식할 수 있었다.
- 2) 상관계수법과 SSDA법을 사용한 형판정합(Template Matching)으로 사과의 2차원 좌표를 구하였다. 인식된 사과의 좌표는 실제의 사과와 최대 6 pixel 이내의 오차였다.
- 3) 사과의 검색 과정을 거친검색과 정밀검색으로 나누어서 검색시간과 데이터 량을 줄였으며, CPU클럭 40MHz인 486-DX 컴퓨터를 사용하였을 때 한 개의 입력 화상의 처리시간은 평균 2.5초 이내였다.
- 4) 이치화상의 라벨링으로 사과의 원형도, 중심위치, 크기 등의 특징 값을 수치화 했으며, 화상을 평활화하여 화상에 존재하는 잡음성분을 제거하였다.
- 5) 컬러화상의 재귀적 역치처리(recursive thresholding)를 사용하여 가지와 잎을 검출했으며 하늘을 구분했다. 또한 화상의 모멘트 특징을 사용하여 장애물의 위치와 방향을 결정했다.
- 6) 2개의 입력화상으로 스테레오 화상처리를 하여 사과의 3차원 위치를 구할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 장익주, 과수원 무인 작업 로봇 개발에 관한 연구, 농촌진흥청 연구보고서, pp.51-85.1995
2. Naoshi Kondo, K.C.Ting. Robotics for Bioproduction Systems, Design and Control of Manipulators. ASAE/The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems. pp.31-36. 1998.5
3. 洞 啓二, 堀尾 亨也. マイコン制御 ハンドロボット(設計・制作・制御). パワー社. pp.4-35. Nov. 1958
4. M.ブコブラトッチ /V.ボトコニヤシク. ロボット工學の基礎---マニピュレータの動力學. シュプリンガー・フェアラーク 東京株式會社, Springer-Verlag Tokyo Berlin Heidelberg New York London Paris. pp.5-12. Dec. 1961
5. 三菱株式會社. MITSUBISHI 三電機 マイクロロボット RV-M2 MOVEMASTER RP-M2 . pp1-26.
6. 章 益柱, 果樹産業의 로봇이용전망, 果樹産業化消息, 1994.
7. 章 益柱, 무인스피드스프레어의 開發, 韓國農業機械學會, 1991.
8. 章 益柱, 果樹園自動化 操向車輛의 開發研究, 韓國農業機械學會, 1994.
9. 章 益柱, 사과收穫 로봇의 開發, 韓國農業機械學會, 1994.
10. 章 益柱, 원칩 마이크로 컴퓨터를 이용한 스피드 스프레이어의 변속장치 개발, 慶北大學校 農業科學技術 研究所 농학지 제8권 : 11-20, 1990.
11. 彭 禎守, 수직 다관절 사과收穫로봇의 매니플레이터 개발, 1999
12. 신 홍렬, 自動化를 위한 油壓제어기술, 북두출판사, 1999
13. 이 주성, Hydraulics and Pneumatics, 대광서림, 2000
14. 이 정일, 機械設計 규격 및 데이터북, 일진사, 2000
15. Fitch ,E. C, Hong, I.T, Hydraulic component design and selection, 2000

16. Asano Kiyoto, 電氣·電子 回路 / 淺野清登 ; 深澤一幸 ; 大羽十三男 共著 ; 성안당, 1999.
17. Mille.Gary M, Modern electricity/electronics, 대웅, 1996.
18. 한 연석, 電氣電子工學, 學文社, 1999.
19. Takahana.Ariya, 自動車工學概論, 東明社, 1998.
20. Nihon chidosha Kijutsukai, 自動車 工學 技術 大辭典 / 日本 自動車 技術 會著 ; 編輯部 編, 科學技術, 1996.
21. YASKAWA : 메카트로닉스를 위한 서보기술 입문, 세운, 1996.
22. 세운 : DC 모터의 制御回路 設計, 세운, 1996
23. 유경선 : 화상처리에 의한 사과인식 알고리즘 개발, 경북대학교 대학원 석사학위 논문, 1998.
24. 권기영 : 시설원예용 작업자 추종 운반로봇 개발, 경북대학교 대학원 박사 학위 논문, 2000.
25. 손재룡 : 토마토 수확로봇 개발, 농업기계학회지 제25권 제5호. pp. 415-420, 2000.
26. 이용중외 : 산업용 서보모터의 제어시스템 설계, 대영사, pp.157-182, 1999
27. 이왕현 : 모터 제어 기술, 성안당, 1997.
28. 加勝一 : 小型 모터 制御用 IC, 機電研究社, 1995.
29. 박선득 : 最新 IC 活用技術, 성안당, 1988.
30. 김상진 : OP앰프회로 디지털회로, 성안당, pp.84-94, 1990.
31. 김용성 : 디지털 공학 입문, 영진출판사, pp.126-149, 344-373, 1991.
32. 박정일외 : 마이크로 컴퓨터 인터페이스, KALA, pp.115-184, 1989.
33. 주해호외 : 제어공학, 문운당, pp.2-16, 161-205, 236-240, 1996.
34. P.J.McKerrow : 로봇공학, 기술, pp.631-690, 1995.
35. 강형식 : DC 모터 PID 제어가 설계에 관한 연구, 충남대학교 산업대학원 석사학

- 위 논문, 1997.
36. 박귀태외 : VCR 에서 DSP 를 이용한 고정밀 서보 시스템 설계, 고려대학교 생산 기술연구소 생기연논문집 제 29권, pp.41-46, 1993.
  37. 최진영 : PID 제어 알고리즘 및 앞섬 뒤집 보상 알고리즘을 이용한 DC 서보 전동기의 속도 제어, 경북대학교 대학원 석사학위 논문, 1989.
  38. 이상욱 : 마이크로 프로세서에 의한 DC 서보 모터 속도제어기 구성에 관한 연구, 동의대학교 산업기술대학원 석사학위 논문, 1994.
  39. 이제희 : 서보시스템의 추적성능 향상에 관한 연구, 인하대학교 대학원 박사학위 논문, 1997.
  40. 임태현 : 로봇 매니퓰레이터의 Hand/Eye 시각 서보 제어기 설계에 관한 연구, 부산대학교 대학원 석사학위 논문, 2000.
  41. Y. Dote : Servo Motor and Motion Control Using Digital Signal Processors, Prentice-Hall, 1990
  42. Richard W. Miller : Servomechanisms - devices and fundamentals, Reston Pub., 1977.
  43. Y. Ohshima, Y. Akiyama : Servo sensors - elements and applications, Intertec Communications, 1988.
  44. 谷腰欣司 : モータ 應用回路 101選, 世和, 1994.
  45. 世和編輯部 : モータ 制御用 IC 技術, 世和, 1992.
  46. 見城尚志, 松非信行 : モータのマイコン制御, 総合電子出版社, 1983.
  47. 장익주, 김용구, 문종열 : 기계화 적용형 과수 모델과 무인 로봇 개발에 관한 연구, 농촌 진흥청 연구 보고서: pp.63-96, 1994.
  48. 농업기계화 연구소 : 농업용 로봇 연구개발 동향과 전망: pp.123-125, 1996.
  49. 이문호 : 퍼스컴을 이용한 화상처리: pp.29-37, 1993.
  50. 최형일 : 컴퓨터 비전 입문: pp.23-25, pp.174-175, 1991.

51. 金熙昇 : 영상 인식: pp.60-62, 1993.
52. 金太均 : 화상처리기초: p.160-193, 1990.
53. 日本工業技術센터 : 컴퓨터 畫像處理入門: pp.78-193, 1993.
54. DANIEL B.DINER and DERK H. FENDER : Human Engineering in Stereoscopic Viewing Devices: pp.3-10, 1993.
55. Rafael C. Gozales and Richard E. Wood : Digital Image Processing: pp.443-458, 1992.
56. Robert A. Schowengerdt : Remote Sensing Models and Methods for Image Processing: pp.264-286, 1997.
57. Steven Harrington : Compute Graphics: pp.436-449, 1991.
58. Schott, J. R. 1996 : The Image Chain Approach: pp.394-398, 1996.
59. Castleman, K.R : Digital Image Processing Englewood Cliffs: p.667, 1996.
60. Ingebritsen. S. E. and R. J. P. Lyon : Principal components analysis of multitemporal image pairs: pp.687-696, 1985.
61. Schalkoff, R. J. : Digital Image Processing and Computer Vision: pp.489-490, 1989.