

# 소형 자동창고용 3축 Stacker crane 개발에 관한 연구

김재열,\* 심재기,\* 박상규,\*\* 김희석,\*\*\* 한재호\*\*\*\*

## A Study on the Development of Small Size Three-Axis Stacker Crane for Automatic Ware House.

J. Y. Kim, \* J. K. Sim, \* S. G. Park, \*\* H. S. Kim, \*\*\* J. H. Han\*\*\*\*

### ABSTRACT

In this study, small size stacker Crane for automatic ware house and interface circuit is designed and manufactured. IBM-PC is used as a controller.

At 50 kg<sub>f</sub> load, optimal motion velocity is 20 mm/min for X and Y axis and 12 mm/min for Z axis. Position resolution is 0.005 mm and repeatability is  $\pm 0.025$  mm. Through characteristic experiment, effectiveness of the designed and manufactured stacker crane. PC control program, and design of interface circuit and construction of control system are shown. From these results, the developed stacker crane can be apply to FMS(Flexible Manufacturing System) and FA(Factory Automation) of industrial field.

**Key Words** : Automatic Ware House (자동창고), Optimal Motion Velocity (최적동작속도), Position Resolution (위치결정도), Repeatability (반복위치결정도)

### 1. 서론

산업이 급속도로 발전함에 따라 소비자의 요구는 점점 다양화 되고 이에 대응하기 위하여 제품은 다품종 소량생산체제로 변화되었으며 FA 분야에서 이에 따르는 자재의 적정재고 유지와 적시 공급이 절실히 요구되고 있다. 이러한 변화에 대응하기 위해서 창고(warehouse)는 많은 관리인력과 비용이 필요하게 되었으나

산업현장에서는 3D현상등으로 인력의 확보가 어렵게 되었다. 이에 창고를 효율적으로 관리하기 위한 수단으로써 기계화창고 즉 자동창고의 필요성이 대두되었다.

자동창고 시스템(AS/RS:Automated Storage and Retrieval System)<sup>1),2),3),4)</sup>이란 물자의 관리와 입출력에 관련된 장비의 운용이 자동화된 창고로서 공간 이용을 최소화하며 공간의 이용율을 최대화 한다는 기본 개념하에 설비와 관리방식을 자동화하여 재고관리의

\* 조선대학교 정밀기계공학과  
 \*\* 여주수산대학교 기계공학과  
 \*\*\* 기아자동차 기술연구소  
 \*\*\*\* 조선대학교 대학원 기계공학과

강화를 통한 생산성 향상을 시도하는 공장자동화의 한 수단으로 이용된다. 자동창고는 1970년대 초에 최초로 등장하였으며 초기에는 보관중심의 창고 이었으나 최근의 다품종 소량생산시스템으로 바뀌어지면서 재고의 선별적인 입고와 출고의 필요성에 의해 자동창고시스템을 구성하는 기기도 고정도, 고신뢰성, 고능력 기능을 추가하여 제어할 필요가 있게 되었다.<sup>5)</sup>

자동창고의 구성요소 중에 Stacker crane은 자동창고에서 물품을 입/출고하는 기계로써 이에 따르는 제어운행은 자동창고 운용에 큰 비중을 차지한다.

우리나라의 생산자동화는 1987년 이후 급격히 늘어나고 있으며 생산자동화 중에서 자동창고용 Stacker crane부분의 연구 중요성을 인식하여 현재 각종 산업분야에서도 여러가지 모델로 연구가 이루어지고 있으며 실제 시스템을 구성하여 설치하고 있다.<sup>6), 7), 8), 9)</sup> 하지만 현재 시공되고 있는 대다수의 자동창고는 완제품을 저장하는 중, 대형 자동창고용 Stacker crane 으로 한정되고 있는 실정이다. 그러나 생산시스템의 발달로 생산공정내에서의 부품이나 가공물을 보관하고 반송하는 소형의 자동창고의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 본 연구는 생산공정라인에서 부품이나 가공물을 보관하고 반송하는 소형자동창고용 Stacker crane의 설계 및 제어시스템을 개발하고자 한다.

2. 이론적 배경

Stacker crane 의 기하학적 정보를 얻기 위해 이웃하는 링크사이의 공간이동을 표현하는 방법으로 Denavit-Hartenberg 행렬방식을 사용하였다. 앞의 링크 좌표계에 대한 다음 링크 좌표계의 관계를 링크의 기하학적 파라미터  $\alpha_i, \theta_i, a_i, d_i$ 에 대한 (4×4) 동차변환행렬(Homogeneous transform matrix)로서 표현된다.

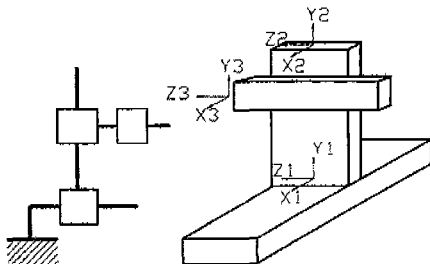


Fig. 1 Link and coordinate of stacker crane

식 (1)에서 회전관절의 경우에는  $\theta_i$ 가 변수가 되고 미끄럼관절의 경우에는  $d_i$ 가 변수가 되며 나머지 3개의 파라미터는 고정된다. 이들 기하학적 파라미터를 이용하여 조인트  $i$ 의 좌표계와 조인트  $i-1$  좌표계의 관계를 나타내면  $\tau_{i-1} = {}^{i-1}A_i \tau_i$ 이며, 본 연구에서 설계된 Stacker crane 의 모든 관절이 미끄럼 관절로 구성되어있으므로

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 표현되며  $i$  번째 좌표계를 기준 좌표계에 대해 나타낼때의 동차변환 행렬을  ${}^0T_i$ 라 하면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$${}^0T_i = {}^0A_1 {}^1A_2 \cdots {}^{i-1}A_i \quad (2)$$

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 Stacker crane의 관절배치 및 좌표를 나타내고 있다.

다음은 운동방정식의 표현으로 본 연구에서는 Lagrange-Euler 방정식을 사용하여 운동방정식을 유도하였는데 Lagrange-Euler 방정식은 링크전체의 운동에너지  $K(q, \dot{q})$ 와 위치에너지  $P(q)$ 를 구하여 Lagrangian 방정식을 이용하여 유도한다.

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} L(q, \dot{q}) \right] - \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}) = \tau_i \quad (3)$$

관절  $i$ 가 미끄럼 관절이기 때문에,

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

링크 전체의 운동에너지  $K$ 는,

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = 1/2 \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i [Tr(U_p J_i U_r^T) \dot{q}_p \dot{q}_r] \quad (5)$$

이며 전체의 위치에너지  $P$ 는,

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = - \sum_{i=1}^n m_i g (T_i^i \bar{r}_i) \quad (6)$$

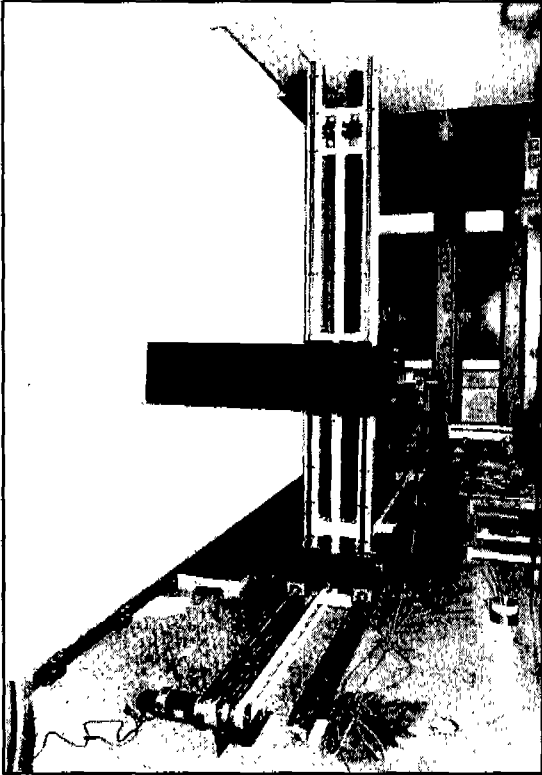


Photo. 1 Stacker crane and Rack

여기서  $g = (g_x, g_y, g_z, 0)^T$ 는 중력 가속도 벡터이며 기준좌표계에 대해서 표현된다.

앞에서 구한 운동에너지  $K$ 와 위치에너지  $P$ 를 사용하여 Lagrangian  $L = K - P$ 가 구해지고 이것을 Lagrange-Euler 방정식에 적용하여 풀면 링크  $i$ 를 구동시키기 위해 필요한 관절  $i$ 의 액츄에이터 토크를 구할 수 있다.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (7)$$

$$= \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + C_i, \quad i = 1, 2, L, n$$

### 3. Stacker crane 시스템 구성

#### 3-1. 구동부

본 연구에서는 Stacker crane의 위치를 결정하기

위한 3자유도의 미끄럼축(Prismatic Axis) 위치구조를 가지고 있으며 폴 형(Pole Type)으로 구성하였다. Photo. 1은 완성된 Stacker crane과 랙을 나타내고 있다.

Stacker crane은 X축 4000 mm, Y축 2000 mm의 긴 스트로크와 고정밀도의 속도, 위치결정 및 동기운전을 목적으로 하기 때문에 X축과 Y축은 타이밍 벨트 구동방식을 사용하였으며, Z축은 저가이며 비교적 높은 위치 정밀도와 강성을 지니는 C7급의 TM 이송나사와 너트로 구성하였다. 그리고 프레임은 구동장치의 형상과 중량 및 강도를 고려하여 알루미늄 프레임으로 구성하였고 용이한 조립을 위하여 프레임 연결은 볼트로 체결하였다. 구동원으로는 X, Y, Z축 모두 금성사의 DC 서보 모터 FMD 시리즈를 사용하였으며, X축과 Y축은 서보모터의 감속과 토크의 증대를 위하여 일본 KOMO사의 SH형의 콤포넌트 R시리즈 하모닉드라이브 감속기를 사용하였다. Z축은 TM 이송나사에 모터축을 연결하기 위하여 일본 NBK사의 MST(Miniature Slit Type Flexible Coupling)시리즈를 사용하였다. 모터의 선정조건을 Table 1에 나타내었다.

#### 3-2. 검출부

Stacker crane의 위치검출용으로 사용된 인크리멘탈 엔코더는 1000P/R의 것을 사용하였고 출력펄스를 4채배 하여 4000P/R의 정밀도를 가지게 된다. 속도제어는 모터동력이 비교적 작아서 타코제너레이터를 사용

Table 1 Selecting item of DC-servo motor

Item	Symbol	X Axis	Y Axis	Z Axis
Total mass of feed mechanism	W	150 Kg	89 Kg	61 Kg
Feed velocity	VL	30 m/min	30 m/min	19 m/min
Coefficient of Friction	v	0.2	0.2	0.2
Reduction gear ratio	R	1:10	1:10	1:1
Allowable acceleration of feed mechanism	$\alpha$	1.5 m/sec <sup>2</sup>	2 m/sec <sup>2</sup>	4 m/sec <sup>2</sup>
Transmissibility	$\mu$	90 %	90 %	90 %
Stroke per revolution	LP	200 mm	200 mm	4 mm
Stroke	L	4000 mm	2000 mm	1000 mm
Maximum revolution of motor	N	4000 rpm	4000 rpm	4000 rpm

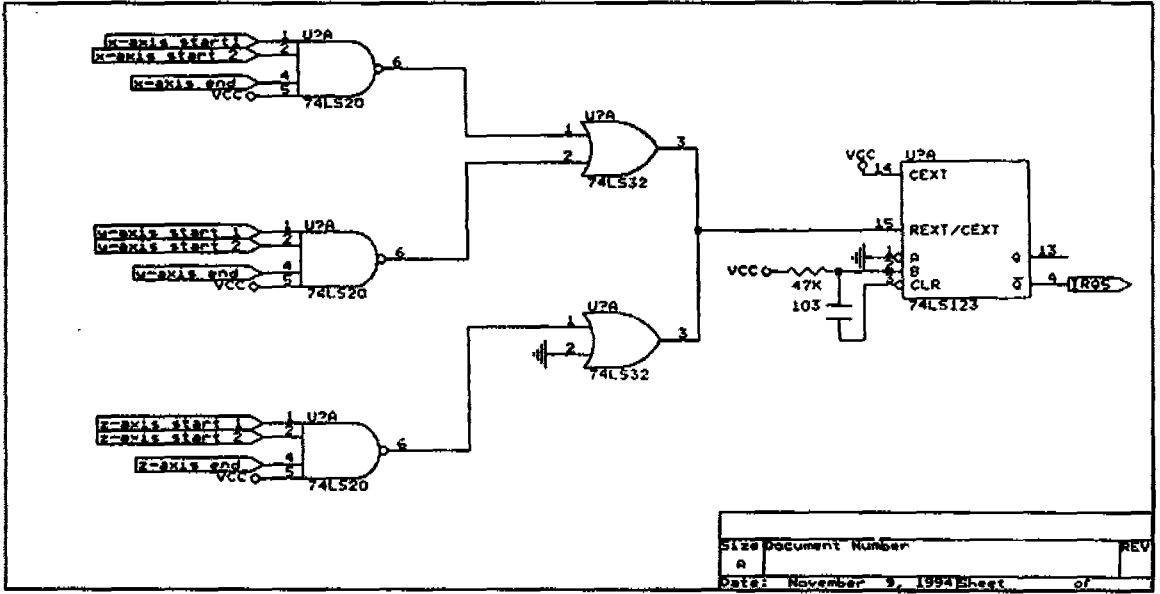


Fig. 2 Limit Circuit

하지 않고 인크리멘탈 엔코더 신호로부터 F/V 변환기를 사용하여 속도 신호를 검출하였다. 출력신호는 장거리 전송과 외부 잡음 대응에 유리한 라인 드라이브 (Line Driver) 방식을 선정하였다. 본 연구에서 제작한 Stacker crane은 4000×2000×1000mm의 작업 공간을 가진다. 이 작업 공간을 벗어 날려고 하거나 각 축의 절대 원점 위치를 확인하고자 할 때, 각 축의 양단에 위치한 리미트 센서는 위의 정보를 알려주게 된다. 리미트 센서는 작업공간의 시작 부분에 두개씩 있

고, 끝부분에 한 개씩, 총 9개가 있다.

Fig. 2는 리미트 센서 신호에 의해 인터럽트를 발생하는 회로를 나타내었다. 인터럽트가 발생하면 어느 센서에서 발생하였는가를 조사한 후 IBM PC상의 메인 프로그램에서 인터럽트 서비스 루틴을 구동하여 처리한다. 본 연구에서 리미트 센서는 금성기전의 고주파 발진형 근접센서인 ZVF-S30-10DNO를 사용하여 구성하였다.

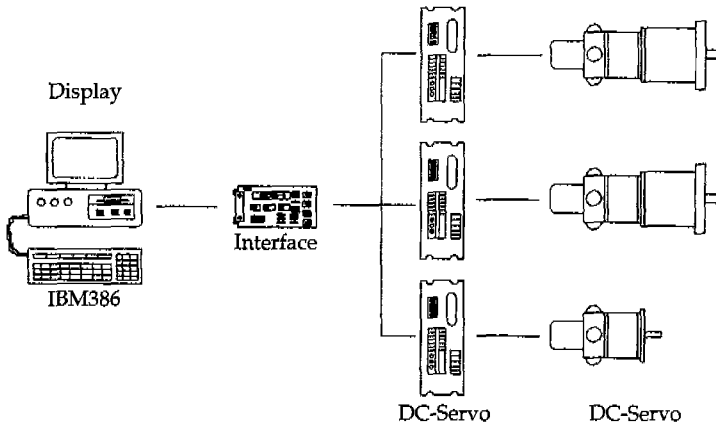


Fig. 3 Schematic diagram of control system

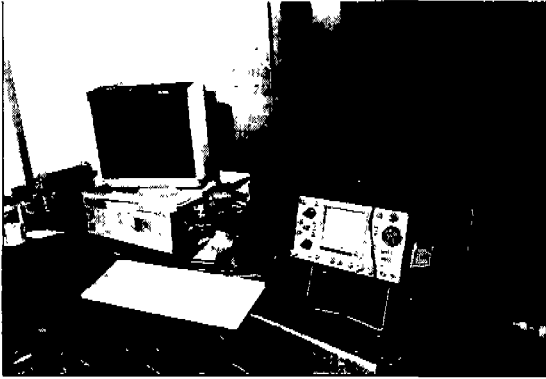


Photo. 2 Stacker crane control system

### 3-3 제어부

제어시스템은 상용화된 NC 컨트롤러를 사용하지 않고 매크로 어셈블러 언어를 이용하여 운영 프로그램을 작성하였고 이 프로그램이 IBM PC-386과 인터페이스 카드를 통하여 서보드라이브, 서보 모터, 센서들을 컨트롤 하도록 구성하였다. 시스템 구성도는 Fig. 3과 같다.

본 연구에서 사용된 서보 드라이브는 금성사의 FDD-106PD로서 위치, 속도 동시 제어용으로 설계되었으며 PWM 주파수는 15KHz이고 최대 지령입력은 400 KPPS이다. 위치 결정도는  $\pm 1$ Pulse이며, 정상 상태 위치 오차를 Zero로 하기 위하여 비례 이득과 적분 시간 등을 시스템 특성에 따라 결정할 수 있으며 비상정지기능, 과속도, 과전류, 과부하 등의 이상 상태 검출 기능들이 있다. Photo. 2는 Stacker crane 컨트롤 시스템을 나타내었다.

서보 드라이브에 IBM PC의 지령을 전달하고 Stacker crane을 컨트롤하기 위해서 인터페이스 카드를 제작하였다. IBM PC의 지령을 전달하는 소자는 INTEL사의 Programmable Peripheral Interface IC인 82C55A를 사용하였고, 컴퓨터의 지령 신호가 잡음에 약하고 전송길이가 짧은 TTL 레벨이므로 이를 개선하기 위하여 고속 OP-AMP인 LM318 IC를 사용하여 지령 신호를 증폭하였다. Fig. 4는 인터페이스 카드의 Address Setting 회로이며 다른 I/O Device Controller와의 충돌을 막기 위하여 4개의 Address

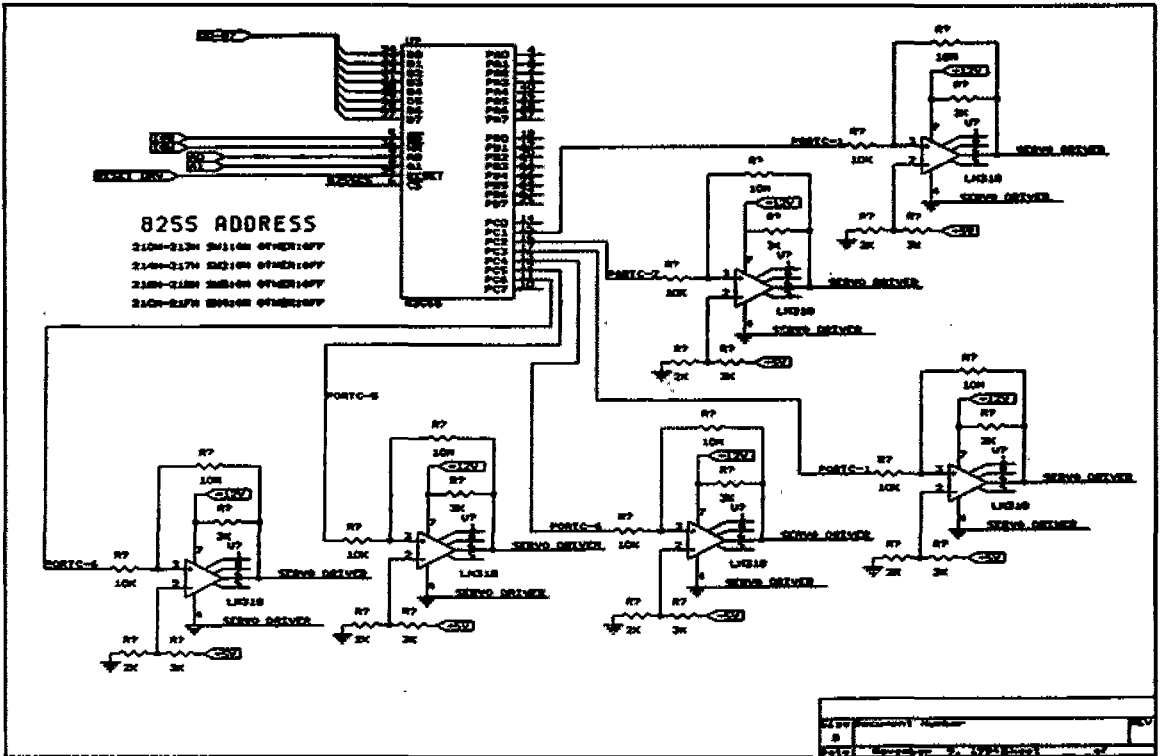


Fig. 4 Interface circuit

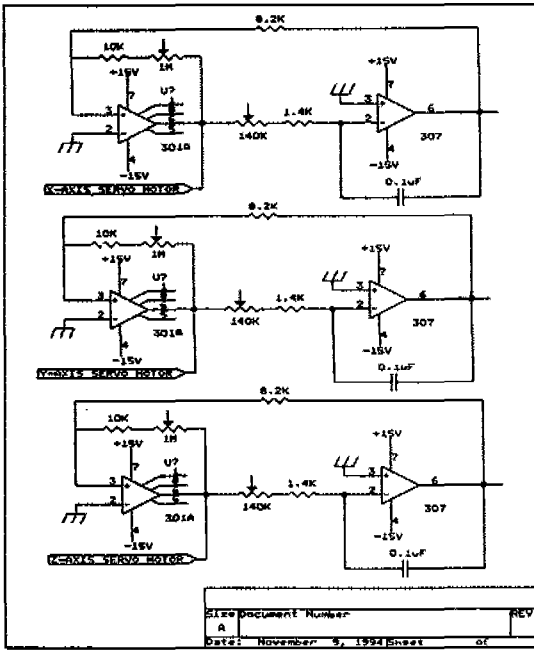


Fig. 5 JOG mode circuit

를 가지며 Dip Switch를 조정함으로써 Address를 변경할 수 있도록 하였다. 82C55A와 LM318 IC로 구성되어 있는 컴퓨터 지령 전달부와 지령 신호 증폭부로 나누어져 있다. Fig. 5는 주제어기인 IBM-PC의 갑작스런 오동작과 이상상태 대비, Stacker crane의 부분별 검사 및 수리 등을 위하여 수동으로 조정할 수 있도록 하기 위하여 만든 수동 조정 모드 회로이다. Fig. 6은 Stacker crane의 제어 알고리즘을 나타내고 있다.

#### 4. 성능시험

##### 4-1. 실험장치의 구성

설계, 제작한 Stacker crane의 일반특성을 알아보기 위하여 속도 측정장비는 최대 5mW 용량의 헬륨네온레이저를 이용하였고 반복위치 정밀도를 측정하기 위하여 일본 Mitutoyo사의 Digimatic indicator와 Digimatic mini-processor DP\_1HS를 사용하여 측정하였다. Fig. 7은 속도측정 시스템을 나타내며 Fig. 8은 반복위치정밀도 측정 시스템이다.

##### 4-2 실험결과 및 고찰

본 Stacker crane 시스템은 Fig. 3과 같이 컴퓨터

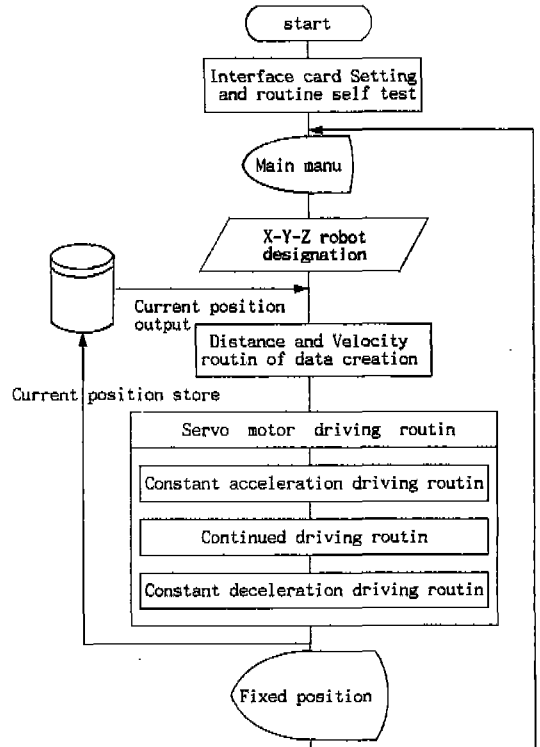


Fig. 6 Algorithm of stacker crane control system

제어부와 서보모터구동부 및 기계구동부로 나눌 수 있다. 이들 각 부분에 대한 연관기능 실험을 통하여 시스템 전체에 대한 성능을 파악할 수 있다. 특히 속도측정 실험과 반복위치결정정도 실험을 실시하여 각 축의 동작 속도와 반복정밀도를 구하였고 이를 통하여 Stacker crane 시스템에 사용된 각 축의 성능을 알수 있었다. 또한 최적동작 속도를 구하기 위하여 여러가지 동작 속도로 반복위치결정정도 시험을 실시하여 목표로

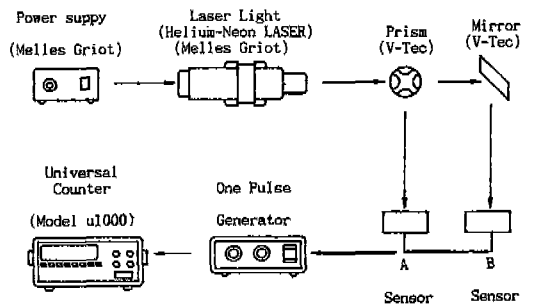


Fig. 7 Schematic diagram of speed measurement system

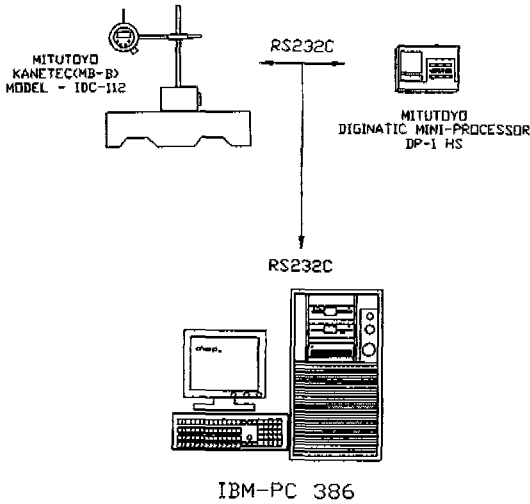


Fig. 8 Schematic diagram on measurement system of repeated position precision

하는 정밀도 이상의 오차값을 가질때의 동작속도보다 낮은 속도로 구동하면서 실험적으로 구하였다.

반복 위치결정정도 실험은 X축, Y축, Z축 모두 1000mm 구간을 반복적으로 이동시켜 실험하였고, 실험속도의 조절은 프로그램 상에서 딜레이 루틴을 작성하여 실시하였다. 속도 Profile은 사다리꼴 방식을 사용하였으며 그래프에 나타난 속도는 1000mm 구간의 Stacker crane 평균속도이다. 부하하중 50 Kg<sub>r</sub> 일때 여러가지 동작 속도에서 X축, Y축, Z축을 반복적으로 동작시킨 후 평균 오차 값을 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11의 그래프로 나타내었다.

본 연구에 사용된 Stacker crane 시스템의 관절은 운동학적으로 각각의 축이 1자유도 만을 가지도록 설계, 제작 되었지만 가이드웨이와 운동하는 기계요소의 가공 및 조립의 부정확도에 의하여 6개의 기하학적 오차를 가지며 특히 구동요소가 긴 경우 Stacker crane 팔끝에서의 위치오차는 크게 증폭되어 오차가 커지는 아베의 오차(Abbe Error)가 생기게 된다. 따라서 본 연구에 사용된 Stacker crane 시스템은 각 축당 6개의 기하학적 오차와 X축, Y축, Z축 간의 조립오차인 직각도 오차가 3개 존재하므로 총 21개의 기하학적 오차를 가지고 있다. 이러한 기하학적 오차들은 Stacker crane 시스템 자체의 성능을 저하시킨다. 본 연구에서는 부품선정과 가공, 조립 단계에서 많은 계측 장비를 사용하여 이러한 오차들을 최소화하였고, 최적동작 속

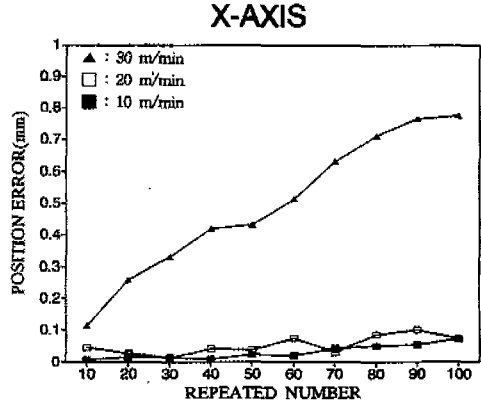


Fig. 9 Relation between X-axis errors and repeated numbers for a velocity

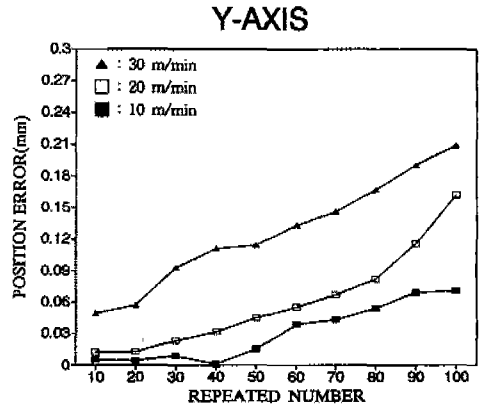


Fig. 10 Relation between Y-axis errors and repeated numbers for a velocity

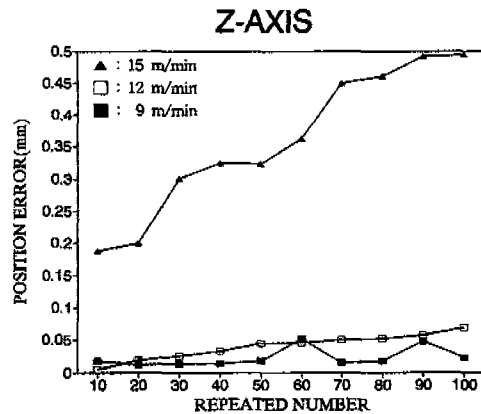


Fig. 11 Relation between Z-axis errors and repeated numbers for a velocity

도 측정 실험과 반복 위치 결정 정도 실험 결과값은 이러한 기하학적 오차를 내포하고 있는 상태에서의 오차값을 나타낸다. 실험 결과에서 X축 보다는 Y축, Y축 보다는 Z축의 이송오차가 적었는데 이것은 X축 이송부에 Y축과 Z축 모두 부하하중으로 작용하는데 반하여 Y축 이송부는 Z축만이 부하하중으로 작용하므로 부하하중에 의한 관성이 X축 보다는 Y축이, Y축 보다는 Z축이 더 적게 작용하기 때문이다. Fig. 9과 Fig. 10, Fig. 11의 그래프는 각 축의 동작 횟수를 증가시키기에 따라 이송오차가 서서히 증가하고, 동작 속도가 증가 할수록 이송오차가 급격히 증가함을 알 수 있다. 즉 부하하중이 최대로 작용할 때 동작 횟수 보다는 동작 속도의 영향에 민감하다는 것을 알 수 있으며, 특히 급격하게 증가하는 ▲의 원인은 동작 속도에 따른 Stacker crane 시스템의 공진(Resonance)의 영향으로 사료된다. 그래프의 동작 속도와 이송오차를 분석하여 최적 동작 속도를 X축과 Y축은 20m/min으로, Z축은 12m/min으로 결정하였다. 최적 동작 속도일 때 X축의 모터 회전수는 1000rpm이고 가·감속 시간은 0.22 sec, 가·감속 거리는 36.67mm, 위치 결정 시간은 3.22sec가 소요되었고, Y축의 모터 회전수는 1000rpm이고 가·감속 시간은 0.17sec, 가·감속 거리는 28.33mm, 위치 결정 시간은 3.17sec가 소요되었으며, Z축의 모터 회전수는 3000rpm이고 가·감속 시간은 0.05sec, 가·감속 거리는 5mm, 위치 결정 시간은 5.05sec이었다. 위치 분해능과 정밀도는 가장 기본적이고 중요한 특성인데 본 연구에서 설계, 제작된 Stacker crane의 위치 분해능은 최대 0.005mm이고, 약 50회의 동작 후 원점 보정을 하게 되면 반복 위치 정밀도는  $\pm 0.025\text{mm}$  이내에서 동작하게 된다. 반복 위치 정밀도 실험에서 발생된 오차 값들은 주로 부하의 관성과 정, 역회전시의 백러쉬, 그리고 슬라이드 면의 직진도와 마찰력 등이 기계적인 오차의 주원인이 되고 엔코더의 엔코딩 오차, 제어용 케이블의 노이즈 침입 등은 전기적인 오차의 주원인이 된다. 이러한 요인들이 Stacker crane 시스템의 정밀도를 크게 저하시켰다. 이와 같은 오차 요인을 극복하기 위해서는 세미-클로즈드 루프(Semi-Closed Loop) 방식인 본 시스템에 백러쉬와 피치 오차량을 측정하여 보정 루틴을 삽입하거나, 리니어 엔코더(Linear Encoder)를 이용한 풀-클로즈드 루프(Full-Closed Loop) 방식이나 하이브리드 서보(Hybrid Servo) 방식으로 제어계를 구성하면 고속이며 고정도인 시스템을 구성할 수 있다.

또한 본 연구에 사용된 Stacker crane 시스템의 기하학적 오차와 백러쉬, 피치 오차량을 레이저 계측 장비로 측정하여 측정된 오차값을 전달함수로 하여 피이드포워드(Feed forward) 제어기를 구성하면 보다 저렴하면서도 고속, 고정도의 시스템을 구성할 수 있으므로 이에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 생산 공정내의 소형 자동창고용 Stacker crane과 인터페이스 회로를 설계, 제작하였으며 IBM-PC를 사용하여 제어기를 구성하였으며, 제작된 Stacker crane 시스템의 성능은 부하하중 50kgf 일 때 최적 동작 속도는 X축과 Y축은 20m/min, Z축은 12m/min, 위치 분해능은 최대 0.005mm이고  $\pm 0.025\text{mm}$ 의 고정도의 반복 위치 정밀도를 가진다. 특성 실험을 통하여 설계, 제작한 Stacker crane과 PC를 이용한 제어 프로그램, 인터페이스 회로의 설계 및 제어계 구성의 유효성을 입증하였으며 이상의 결과로 본 연구는 FMS 분야 및 그밖의 산업체 공장 자동화에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. Ashayeri, J., Gelders, L., and Wassenhove, L., "A Microcomputer-based optimization model for the design of Automated Warehouse." *Int. J. Prod. Res.*, Vol.23, 4, pp.825-839
2. Bozer, Y., A., and White, J., A., "Travel Time Models for Automated Storage/retrieval Systems." *AIIE Transactions*, Vol.16, No.4, pp.935-945, 1977.
3. Graves, S., C., Hausman, W. H., and Schwarz, L. B., "Storage-Retrieval Interleaving in Automatic Warehousing Systems", *Mang. Sci.*, Vol.23, No.9, pp.935-945, 1977.
4. Groover, M. P., "Automation, Production Systems & computer Integrated Manufacturing." Prentice Hall International, 1987.
5. Robert E. Young, "Software Control



- Strategies For Use in Implementing Flexible Manufacturing Systems" Industrial Engineering, 1981.
6. Proc, Inst, Refrig "Engineering Design for Automated Warehouse" Vol.41, pp.66-76
  7. Hiroyasu, Fanakubo, "Actuators For Control", Gordon and Breach Science Publish, pp.148-158, 1991.
  8. Martin, Clifford, "Modern Electric/Electronic Motors", Prentice Hall International, pp.70-114, 1990.
  9. 한국기계연구소, "자동창고 운영시스템 개발" pp.26-27, 1991.