

소형 Stacker crane 개발에 관한 연구

(A Study on the Development of Small Size Stacker Crane)

*김 재열 , *김 영석, **한 재호(※), **김 창현, **오 보석

* 조선대학교 정밀기계공학과

** 조선대학교 대학원

1. 서 론

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 요구 되어지고 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)^{1),2),3),4)}이란 물자의 관리와 입·출력에 관련된 장비의 운용이 자동화된 창고로서 공간이용을 최소화하며 공간의 이용율을 최대화 한다는 기본 개념하에 설비와 관리방식을 자동화하여 재고관리의 강화를 통한 생산성 향상을 시도하는 공장자동화의 한 수단으로 이용된다. 초기에는 보관중심의 창고이었으나 최근의 다품종 소량생산시스템으로 바뀌어지면서 재고의 선별적인 입고와 출고의 필요성에 의해 자동창고시스템을 구성하는 기기도 고정도, 고신뢰성, 고능력 기능을

추가하여 제어할 필요가 있게 되었다.⁵⁾

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^{6),7),8)}. 하지만 현재 시공되고 있는 대다수의 자동창고는 완제품을 저장하는 중, 대형 자동창고용 Stacker crane으로 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 crane의 기하학적 정보를 얻기 위해 이윳하는 링크사이의 공간이동을 표현하는 방법으로 Denavit-Hartenberg 행렬방식을 사용하였다. 앞

의 링크 좌표계에 대한 다음 링크 좌표계의 관계를 링크의 기하학적 파라미터 $a_i, \theta_i, \alpha_i, d_i$ 에 대한 (4x4) 동차변환행렬(Homogeneous transform matrix)로서 표현된다. 식(1)에서 회전관절의 경우에는 θ_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 $r_{i-1} = {}^{i-1}A_i r_i$ 이며, 본 연구에서 설계된 Stacker crane 의 모든 관절이 미끄럼 관절로 구성되어 있으므로

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

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.1 은 본 연구에서 사용된 Stacker crane 의 관절배치 및 좌표를 나타내고 있다.

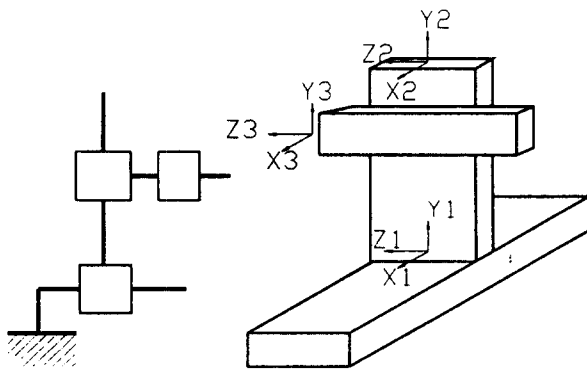


Fig.1 Link and coordinate of Stacker crane

다음은 경로의 표현으로서 운동의 시작점을 x^0 , 끝점을 x^f 라하고 운동에 소요되는 시간을 T 라 했을 때 이 두점사이의 선형보간법으로 Stacker crane 의 운동을 나타낼 수 있다. $\lambda(t)$ 를 운동의 경로에 따른 속도분포라고 하면 Stacker crane 침단부의 위치와

속도, 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X(t) &= x^0 + \lambda(t)(x^f - x^0) \\ \dot{X}(t) &= \dot{\lambda}(t)(x^f - x^0) \\ \ddot{X}(t) &= \ddot{\lambda}(t)(x^f - x^0) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3) 의 $\lambda(t)$ 를 선택함에 따라 여러 가지 속도계획을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 사다리꼴 속도계획을 사용하였다. 아래 Fig.2 는 가속과 감속의 시간이 각각 T_a, T_d 인 사다리꼴 속도계획으로 식 (4)와 같다.

$$\lambda = \begin{cases} \frac{2}{(2T - T_a - T_d)T_a} t & 0 < t \leq T_a \\ \frac{2}{(2T - T_a - T_d)} & T_a < t \leq T_d \\ \frac{2}{(2T - T_a - T_d)T_d} (T - t) & T_d < t \leq T \end{cases} \quad (4)$$

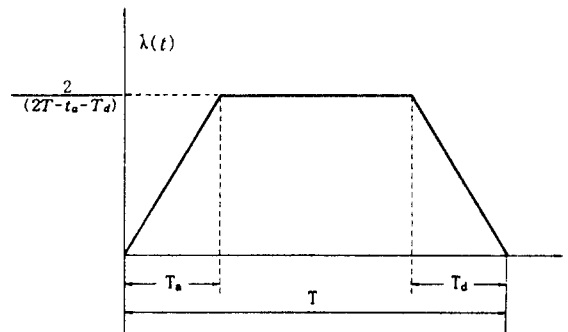


Fig.2 Trapezoidal velocity profile

3. Stacker crane 시스템 구성

3-1 구동부

본 연구에서는 Stacker crane 의 위치를 결정하기 위한 3자유도의 미끄럼축(Prismatic Axis) 위치구조를 가지고 있으며 폴 형(Pole Type)으로 구성하였다. 아래의 Photo.1 은 완성된 Stacker crane 을 나타내고 있다.



Photo.1 Stacker crane

구동원으로는 X, Y, Z 축 모두 금성사의 DC 서보 모터 FMD 시리즈를 사용하였으며, X 축과 Y 축은 서보모터의 감속과 토크의 증대를 위하여 일본 KOMO사의 SH형의 콤포넌트 R 시리즈 하모닉드라이브 감속기를 사용하였다. Z 축은 TM 이송나사에 모터축을 연결하기 위하여 일본 NBK사의 MST(Miniature Slit Type Flexible Coupling)시리즈를 사용하였다.

3-2 검출부

Stacker crane 의 위치검출용으로 사용된 인크리멘탈 엔코더는 1000 P/R 의 것을 사용하였고 출력펄스를 4채배 하여 4000 P/R 의 정밀도를 가지게 된다. 속도제어는 모터동력이 비교적 작아서 타코제너레이터를 사용하지 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 crane 은 $4000 \times 2000 \times 1000$ mm 의 작업 공간

을 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 있고, 끝부분에 한 개씩, 총 9개가 있다.

Fig.3 는 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 - 10 DNO 를 사용하여 구성하였다.

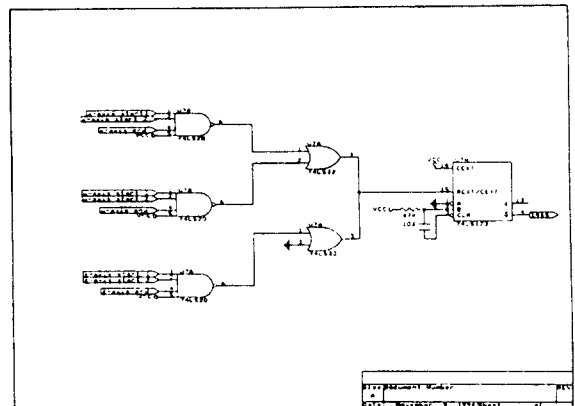


Fig.3 Limit Circuit

3-3. 슬라이드 기구 (Linear slide mechanism)

슬라이드 기구에 작용하는 굽힘용력이 이송부 재료의 허용용력 이하라도 처짐이 발생하여 허용 처짐보다 커지면 이송테이블의 마찰 증가로 제어시스템에 왜란으로 작용하며 궤적오차, 진동 등의 원인이 되므로 엄격하게 제한을 두어야 한다. Fig.4 는 슬라이드 기구의 개략도 이다.

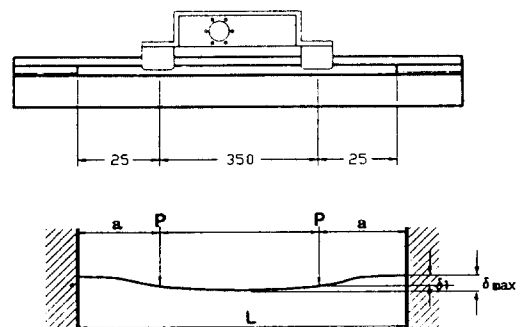


Fig.4 Schematic diagram of linear slider

슬라이드 기구의 굽힘 계산식은 다음 식과 같다.

$$\delta_1 = \frac{P_a^3}{6EI} \left(2 - \frac{3a}{L}\right) = 8P_a^3 \left(2 - \frac{3a}{L}\right) C \quad (5)$$

$$\delta_{\max} = \frac{P_a^3}{24EI} \left(2 + \frac{3b}{a}\right) = 2P_a^3 \left(2 + \frac{3b}{a}\right) C$$

최대 처짐각 β 는 식 (6) 과 같다.

$$\beta = \frac{P_a^2 b}{2EI \cdot L} = \frac{24 P_a^2 b C}{L} \quad (6)$$

여기서 E 는 종탄성계수(Kgf·mm²), P 는 집중하중(Kgf), L 은 길이(mm), I 는 단면2차모멘트 (mm⁴) 이며 C 는 2.49×10^{-11} 이다. (6) 식과 Table.4 에서 주어진 보의 특성치로 부터 계산된 최대 처짐각은 1.06×10^{-5} (rad)이다. 일반적으로 굽힘에 의한 처짐의 제한치로 보는 슬라이드 기구의 최대처짐각이 1/1000 (rad) 보다 훨씬 작은 값이므로 슬라이드 기구의 굽힘용력은 충분하다.

Table 1 Specification of linear slider

Item	Symbol	Numerical Value
Modulus of longitudinal elasticity	E	2.1×10^4 (Kgf/mm ²)
Length element of beam	L, a, b	400, 25, 350 (mm)
Diameter of beam	D	30 (mm)
Moment of beam	I	3.98×10^4 (mm ⁴)
Load of beam	W	3.33 (Kgf)
Working Load	P	37.5 (Kgf)

3-4 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.5 과 같다.

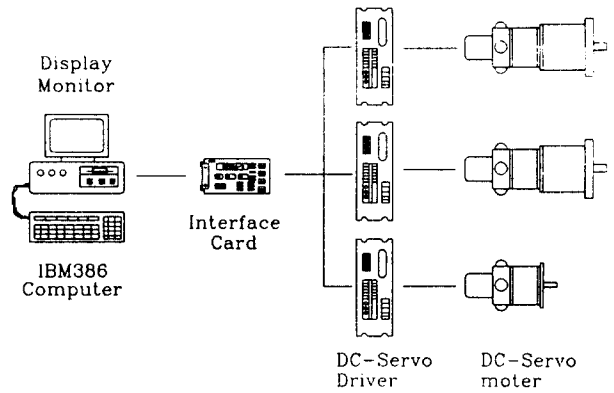


Fig.5 Schematic diagram of control system

본 연구에서 사용된 서보 드라이브는 금성사의 FDD - 106 PD 로서 위치, 속도 동시 제어용으로 설계되었으며 PWM 주파수는 15 KHz 이고 최대 지령입력은 400 KPPS 이다. 위치 결정도는 ± 1 Pulse 이다.

서보 드라이브에 IBM PC의 지령을 전달하고 Stacker crane 을 컨트롤하기 위해서 인터페이스 카드를 제작하였다. IBM PC의 지령을 전달하는 소자는 INTEL 사의 Programmable Peripheral Interface IC 인 82C55A를 사용하였고, 컴퓨터의 지령 신호가 잡음에 약하고 전송길이가 짧은 TTL 레벨이므로 이를 개선하기 위하여 고속 OP - AMP 인 LM318 IC를 사용하여 지령 신호를 증폭하였다. 인터페이스 카드의 Address Setting 회로는 다른 I/O Device Controller 와의 충돌을 막기 위하여 4개의 Address 를 가지며 Dip Switch 를 조정함으로써 Address 를 변경할 수 있도록 하였다. 82C55A 와 LM318 IC로 구성되어 있는 컴퓨터 지령 전달부와 지령 신호 증폭부로 나누어져 있다. 또한 주제어기인 IBM-PC의 갑작스런 오동작과 이상상태 대비, Stacker crane 의 부분별 검사 및 수리 등을 위하여 수동으로 조정할 수 있도록 하기 위하여 수동 조정 모드 회로도 제작하였다.

4. 성능실험

4-1 실험장치의 구성

설계, 제작한 Stacker crane 의 일반특성을 알아보기 위하여 속도 측정장비는 최대 5mW 용량의 헤

램내온레이저를 이용하였고 반복위치 정밀도를 측정하기 위하여 일본 Mitutoyo 사의 Digimatic indicator 와 Digimatic mini-processor DP_1HS 를 사용하여 측정하였다. Fig.6 은 속도측정 시스템을 나타내며 Fig.7 은 반복위치정밀도 측정 시스템이다.

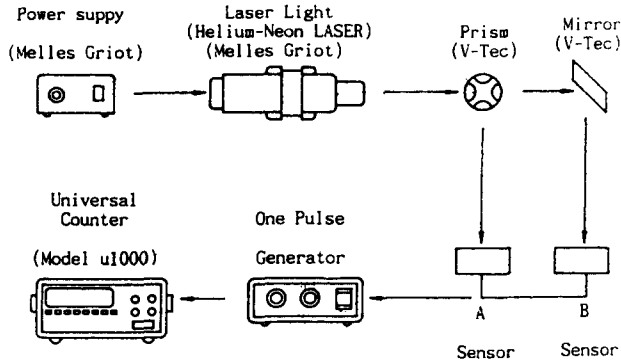


Fig.6 Schematic diagram of speed measurement system

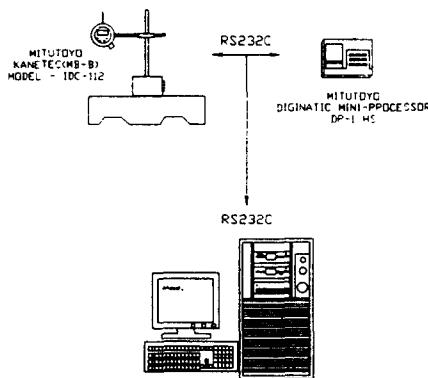


Fig.7 Schematic diagram on measurement system of repeated position precision

4-2 실험결과 및 고찰

본 Stacker crane 시스템은 컴퓨터 제어부와 서보 모터구동부 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 알 수 있었다. 또한 최적동작 속도를 구하기 위하여 여러가지 동작 속도로 반복위치결정정도 시험을 실

시하여 목표로 하는 정밀도 이상의 오차값을 가질 때의 동작속도보다 낮은 속도로 구동하면서 실험적으로 구하였다.

반복 위치결정정도 실험은 X 축, Y 축, Z 축 모두 1000mm 구간을 반복적으로 이동시켜 실험하였고, 실험속도의 조절은 프로그램 상에서 딜레이 루틴을 작성하여 실시하였다. 속도 Profile 은 사다리꼴 방식을 사용하였으며 그래프에 나타난 속도는 1000mm 구간의 Stacker crane 평균속도 이다. 부하하중 50 Kg 일때 여러가지 동작 속도에서 X 축, Y 축, Z 축을 반복적으로 동작시킨 후 평균 오차 값을 Fig.8, Fig.9, Fig.10 의 그래프로 나타내었다.

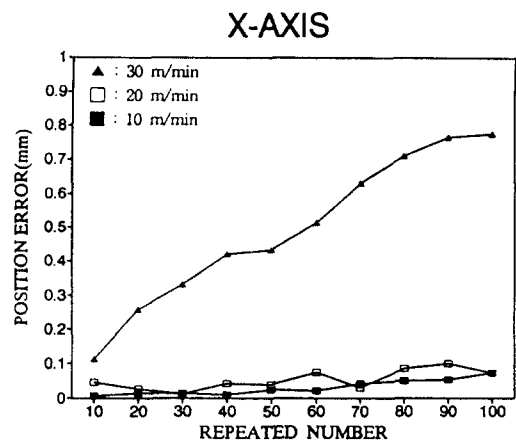


Fig.8 Relation between X-axis errors and repeated numbers for a velocity

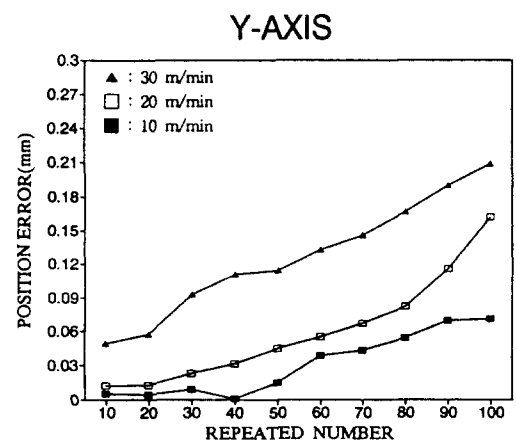


Fig.9 Relation between Y-axis errors and repeated numbers for a velocity

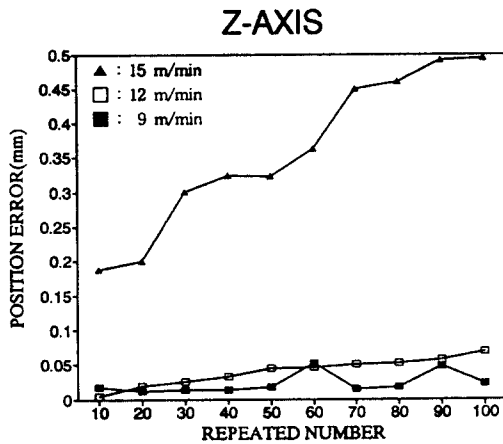


Fig.10 Relation between Z-axis errors and repeated numbers for a velocity

본 연구에 사용된 Stacker crane 시스템은 제작 및 조립과정에서 필연적인 기하학적 오차를 가지게 된다. 이러한 기하학적 오차들은 Stacker crane 시스템 자체의 성능을 저하시키므로 부품선정과 가공, 조립 단계에서 많은 계측 장비를 사용하여 이러한 오차들을 최소화하였고, 최적동작 속도측정실험과 반복위치결정정도 실험 결과값은 이러한 기하학적 오차를 내포하고 있는 상태에서의 오차값을 나타낸다.

Fig.8 과 Fig.9, Fig.10 의 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 동작횟수보다는 동작속도의 영향에 민감하다는 것을 알 수 있으며, 특히 급격하게 증가하는 ▲의 원인은 동작속도에 따른 Stacker crane 시스템의 공진(Resonance)의 영향으로 사료된다. 그래프의 동작 속도와 이송오차를 분석하여 최적동작 속도를 X 축과 Y 축은 20 m/min 으로, Z 축은 12 m/min 으로 결정 하였다.

최적동작 속도일때 X 축의 모터회전수는 1000 rpm 이고 가·감속시간은 0.22 sec, 가·감속 거리는 36.67 mm, 위치결정 시간은 3.22 sec 가 소요되었고, Y 축의 모터회전수는 1000 rpm 이고 가·감속 시간은 0.17 sec, 가·감속 거리는 28.33 mm, 위치결정 시간은 3.17 sec 가 소요되었으며, Z 축의 모터회전수는 3000 rpm 이고 가·감속시간은 0.05 sec, 가·감속 거리는 5 mm, 위치결정 시간은 5.05 sec 이었다.

위치분해능과 정밀도는 가장 기본적이고 중요한 특성인데 본 연구에서 설계, 제작된 Stacker crane 의 위치분해능은 최대 0.005mm 이고, 약 50회의 동작후 원점보정을 하게 되면 반복위치정밀도는 $\pm 0.025\text{mm}$ 이내에서 동작하게 된다. 반복위치정밀도 실험에서 발생된 오차 값들은 주로 부하의 관성과 정, 역회전시의 백러쉬, 그리고 슬라이드 면의 직진도와 마찰력 등이 기계적인 오차의 주원인이 되고 엔코더의 엔코딩오차, 제어용 케이블의 노이즈 침입 등은 전기적인 오차의 주원인이 된다. 이러한 요인들이 Stacker crane 시스템의 정밀도를 크게 저하시켰다. 특히 백러쉬에 의한 오차 요인을 극복하기 위해서 세미-클로즈드 루프(Semi-Closed Loop) 방식인 본 시스템에 백러쉬와 피치 오차량을 측정하여 보정 루틴을 삽입하였다. 본 연구에서 설계, 제작된 Stacker crane은 회로를 제작하고 제어신호들이 대부분 TTL 레벨이므로 제어에 있어서 유연성이 있는 반면 현장에서 발생하는 전기적 노이즈에 약하고 원거리 컨트롤이 어려운 단점이 있다. 차후 이를 개선하기 위한 연구가 계속 진행되어야 할것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 생산공정내의 소형 Stacker crane 을 설계, 제작하였으며 IBM-PC를 사용하여 제어를 구성하였으며, 제작된 Stacker crane 시스템의 성능은 부하하중 50 kgf 일때 최적동작 속도는 X 축과 Y 축은 20 m/min, Z축은 12 m/min, 위치분해능은 최대 0.005 mm 이고 $\pm 0.025\text{mm}$ 의 고정도의 반복위치정밀도를 가진다. 특성 실험을 통하여 설계, 제작한 Stacker crane 과 PC를 이용한 제어프로그램, 인터페이스 회로의 설계 및 제어계 구성의 유효성을 입증하였으며 이상의 결과로 본 연구는 FMS 분야 및 그밖의 산업체 공장자동화에 응용될 수 있을것으로 사료된다.

참고문헌

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, No9, 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