

서보모터를 이용한 자동공구교환장치의 개발

고정한*, 강기영**, 이상조***

Development of Automatic Tool Changer with Servo-Motor

Jeong Han Ko*, Ki Young Kang**, and Sang Jo Lee***

ABSTRACT

To enhance machining efficiency, tool exchange time have to be reduced. Most automatic tool changer is made up of compound cam and motor. It is not easy to design and manufacture compound cam, and it has no flexibility. But if servo motor is used, it is easy to change tool changer's motion profile and to adjust it to other machine tools. In this paper, automatic tool changer is developed with servo motor, clutch, ball-screw and spline nut. Experimental results show that automatic tool changer designed with servo motor have good faculties.

Key Words : Automatic Tool Changer(자동공구교환장치), Tool Exchange Time(공구교환시간), Machine Tools(공작 기계), Servo-Motor(서보 모터), Clutch(클러치), Ball-Screw(볼스크류), Spline Nut(스프라인 너트), Compound Cam(복합 캠)

1. 서론

최근 가공기술의 고도화에 발 맞추어 가공공정에 있어서도 무인화된 자동화 시스템을 지향하는 노력이 시도되고 있고, 이미 FMS, DNC시스템 등으로 구현되어 생산현장에 널리 이용되고 있다. 특히 선진 외국에서는 이러한 FMS에 공구관리 및 생산관리시스템을 접목시켜 CIM개념의 생산방식이 출현되고 있다. 이들 최첨단의 자동가공 시스템을 구현하기 위해서는 가공물과 가공공정에 따라 자동으로 공구를 교환할 수 있는 장치의 개발이 필수적으로 요구된다. 생산방식 또한 다양한 소비자의 요구에 부응하기 위해 종전의 대량생산체제에서 벗어나 다품종 소량생산체제로 천이 되어가고 있으며, 제품의 기능이 고도화됨에 따라 가공물의 가공

형상도 매우 복잡해져 가는 추세여서 공구의 교환 횟수가 증가하고, 교환주기도 짧아지는 것이 현실이다. 따라서 가공효율의 제고를 위해서는 공구교환시간에 대한 개선이 매우 중요하게 된다. 현재의 자동공구교환장치(ATC)는 유압 구동 방식에서 캠 구동 방식으로 변화되어, 공구의 교환시간이 크게 단축되었지만 복합 캠을 사용한 공구교환장치의 경우 중요 부품인 캠의 설계와 가공에 많은 비용이 소요되고 있는 실정이고, 가격 및 성능에서 국제경쟁력을 갖춘 자동공구교환장치의 개발이 미진한 상태여서 이에 대한 연구가 필요하다. 따라서 가공시스템의 자동화, 무인화 추세에 적극 대응하여 이 분야에 있어서의 국제경쟁력을 제고하기 위해서는 관련된 기반 기술의 확보가 시급한 현실이다. 이러한 맥락에서 기존의 자동공구교환장치(이하 ATC라 칭한다.)에 대해 성능 및 가격 면에서 경쟁력을 갖

* 연세대학교 기계공학과 대학원
** (주) 한원정기
*** 연세대학교 공과대학 기전공학부

도록 하고, 개발된 기술이 타 부문에도 적용될 수 있도록 하는 것이 본 연구의 목적이자 배경이다.

현재 개발되어 있는 ATC는 거의 대부분이 복합 캠으로 구동되고 있다. 공구교환시간(Tool to Tool)은 수직형 머시닝 센터의 경우 1.5초에서 10초 정도의 분포를 보이며, 수평형 머시닝 센터의 경우 3초에서 12초 정도로 분포되어 있다. 최근에는 이러한 캠 구동 방식에서 탈피하여 서보모터와 3차원 기구를 이용하여 ATC를 개발하려는 움직임이 일본에서 일어나고 있으며, 일본 오쿠마사에서는 볼스크류와 2개의 서보모터를 이용한 고속 ATC를 개발한 바가 있다.^[2] 그러나, 이 제품의 경우 ATC 아암이 회전운동을 할 때, 2개의 서보모터가 완전히 동기화되어 움직여야 하고, 한 개의 모터를 사용할 때보다 복잡한 제어방식이 요구되며, 설치면적이 커진다는 단점이 있다.

본 연구에서는 서보모터 1개와 클러치를 이용하여 동력전달을 조정함으로써 위의 단점을 해결하고, 동시에 기존의 캠 구동방식 ATC의 크기 이하로 기구부를 설계하여 차세대 서보모터 구동방식 ATC를 제작하고, 그 성능을 시험하였다.

2 ATC의 구동방식의 특징

2.1 기구를 이용한 방법

일정한 속도로 회전하는 모터의 회전 운동을 기구를 이용하여 변경해서, 원하는 운동의 형태와 속도 프로파일을 얻는 방법을 의미한다. 캠을 사용하는 것이 가장 일반적인 방법이지만 캠의 설계와 제작에는 많은 know-how가 필요하다. 특히, 제품화 후 안정된 품질을 확보하기 위해서는 캠의 가공에 대한 기술적 뒷받침이 필요하다.

2.2 서보모터를 이용한 방법^[5]

운동의 속도프로파일은 서보모터를 사용하여 정밀하게 제어하고 운동형태(회전운동 → 직선운동)만 간단한 기구를 이용하여 변경하는 방법을 의미한다. 이를 구현하기 위한 메카트로닉스 기술을 비롯한 제반기술은 완전히 갖추어져 있고, 장치를 간단하게 구성할 수 있어 제품의 신뢰성을 높일 수 있고, 제어장치를 고도화함으로써 공구교환속도를 개선하는 등 고성능화를 실현할 수 있다. 또한 서

보모터를 사용한 경우에는는 필요에 따라 운동형태나 속도프로파일의 변경이 용이하다는 장점이 있다. 이것은 다른 공작기계에도 쉽게 이식이 가능하다는 것을 의미한다. 대량으로 생산되는 공작기계에는 캠 방식의 ATC를 사용하는 것이 타당할 수 있지만, 특수한 목적의 전용 가공기에 사용하는 ATC를 캠 방식으로 제조한다면, 원가 상승의 요인으로 작용할 것이다. 따라서 특수한 목적의 ATC를 제조할 때에는 캠방식은 알맞지 않다고 생각된다. 특히 캠은 잘못 설계해서 제조하면 사용이 불가능하고 다시 설계, 제조해야 하지만, 서보모터를 이용한 경우에는 운동의 형태나 속도를 설계사양에 적합하도록 변경할 수 있다. 비용 면에서도 최근 서보모터 및 관련장치의 가격이 낮아지고 있으므로 연구의 가치가 충분하다고 판단된다.

3. 고속 ATC 개발

3.1 기구학적 고찰

자동공구교환장치(ATC)는 공구를 잡기 위한 암(arm)과, 암(arm)이 회전운동과 직선운동을 할 수 있도록 하는 축(shaft)으로 이루어져 있다. 기존의 ATC는 복합 캠과 3차원 기구를 사용하여 이 두 가지 운동을 하나의 구동원으로 만들어냈다. 그러나 앞서서도 언급하였듯이 캠의 설계와 제작이 어렵고, 고속화라는 과제를 해결하기 위하여, 서보모터를 이용한 ATC의 개발이 일본 등 선진업체에서 제안되고 있다.

서보모터를 이용하여 ATC를 개발하는데 가장 중요한 것은 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하는 기구의 선정이다. 이 기구에는 랙과 피니언, 리드 스크류, 볼스크류 등이 있다. ATC에는 완전한 회전운동도 필요하므로, 필요에 따라서 회전운동과 직선운동 둘 다 가능한 기구가 필요하다. 하나의 예를 들면, 스카라 로봇의 마지막 관절에 부착된 팔에 볼스크류와 스프라인 너트를 사용하여, 자유롭게 직선운동과 회전운동을 일으키는 기구로 사용하고 있다.

이들 볼스크류와 스프라인 너트를 이용하는 경우에는, 일반적으로 각각의 너트에 구동부가 독립적으로 부착된다. Fig. 1에 볼스크류 너트와 스프라인 너트를 이용한 기구의 예를 도시하였다. 순수한 직선운동만 일으키는 경우에는 볼스크류 너트를 NI만큼 회전시키면 되고, 순수한 회전운동만 일

으키는 경우에는 볼스크류 너트와 스프라인 너트를 같은 방향으로 동시에 $N1=N2$ 가 되도록 회전시키면 된다. 스프라인 너트만을 회전시키는 경우에는 볼스크류가 회전하면서 이동하게 되므로, 특수한 목적에 사용하면 된다. 이 기구를 사용하면, 복합 갭과 똑같은 운동을 만들기는 힘들지만, 하나의 기구로 직선이송운동과 회전운동이 둘 다 가능하다는 관점에서 보면 충분히 ATC에 이용 가능하다. 단, 설계를 위해서는 여러 가지 하중조건과 회전속도를 고려하여야 한다.

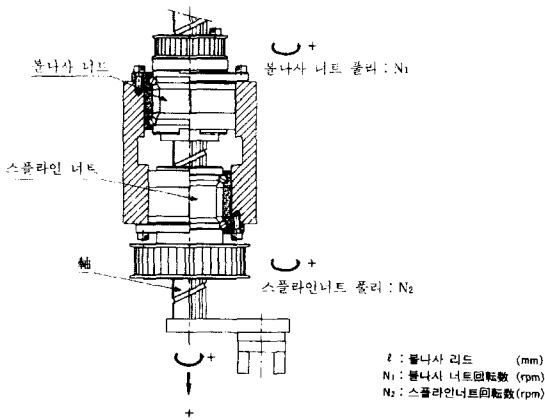


Fig. 1 Ballscrew system with ballscrew nut and spline nut^[1]

실제로 일본 오쿠마사에서 개발한 서보모터를 이용한 ATC의 경우에는, 두 개의 서보모터를 이용하여 독립적으로 볼스크류 너트와 스프라인 너트를 구동하였다.^[2] 이 때 가장 주의해야 할 점은 순수하게 회전운동만을 요할 경우 두 개의 너트를 완전히 동기화시켜 움직여야 한다는 것이다. 조금이라도 회전각도에 차이가 생긴다면, 회전운동뿐만 아니라 직선운동도 포함되어 나타난다.

이러한 단점을 해결하기 위해, 본 연구에서는 볼스크류 너트와 스프라인 너트를 하나의 구동원으로 구동시키는 방법을 적용하였다. 이 방법은 두 너트의 회전운동을 완전하게 동기화시켜서 일으킬 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 순수한 직선운동만이 필요한 경우에는 스프라인 너트는 정지시키고, 볼스크류 너트만을 회전시켜야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 구동원과 스프라인 너트 사이에 클러치를 사용하여 동력전달을 조정하였다.

사용된 볼스크류의 사양은 Table 1과 같다.^[1]

Table 1 Specification of THK BNS type ballscrew and spline

호칭 형번		BNS 4040
나사축	나사축 외경	40
	나사축 내경	29
	리드	40
기본 정격 하중	Ca(Kgf)	2180
	Coa(Kgf)	5070
정적허용 모멘트	MA(Kgf-m)	70.1
기본 정격 토오크	CT(kgf-m)	42.7
	Cor(kgf-m)	38.5

동력을 전달할 때에는 절대로 미끄러짐이 생기면 안되기 때문에, ATC에는 마찰 클러치는 사용할 수가 없다. 그래서 미끄러움이 일어나지 않는 이빨 물림 클러치(toothed clutch)를 사용하였다. 선정된 클러치는 독일 마이어사의 Stationary-field toothed clutch EK-ER 4Z 형이다.^[3] 이 클러치는 전자기력을 이용하여 동력을 단속하도록 되어있다. 사용된 클러치는 클러치 판 사이의 간격을 0.1~0.3mm로 맞추어야 하기 때문에 조립시에 매우 주의해야 한다.

ATC의 실제 사용시에는, 클러치가 이어지거나 끊어질 때 반드시 지연 시간을 고려하여 모터를 움직여야 한다. Table 2의 클러치 사양을 보면 on-time시 100msec, off-time시 120msec가 소요됨을 알 수 있다. 이러한 시간지연은 클러치 내부의 전자기력을 일으키는 코일에 전류가 흐르는데 시간이 걸리기 때문에 생기는 것이다.

클러치의 판 스프링이 볼트로 축과 체결될 때, 판 스프링과 축 사이에 1mm 이상의 두께를 가진 황동을 끼워넣게 되어 있다. 이것은 클러치의 코일에서 발생하는 자속이 축 쪽으로 새지 않도록 하기 위함이다. 이 황동의 두께는 1mm 이상이면 되므로, 이 두께를 조정함으로써 클러치 이빨 사이의 공차를 맞출 수 있다. 사용된 클러치의 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of Stationary-field toothed clutch EK-ER 4Z^[3]

형명		EK-ER 4Z
Type		Electromagnet type
전달가능한 토크(Nm)		120
최대 회전속도(rpm)		6000
회전관성	Rotor(kgcm ²)	12.6
	Amature(kgcm ²)	7.35
소비 전력	코일온도 20 °C (W)	25
	코일온도 120 °C (W)	18
동작 시간	On-time (msec)	100
	Off-time (msec)	120
이빨의 갯수		348

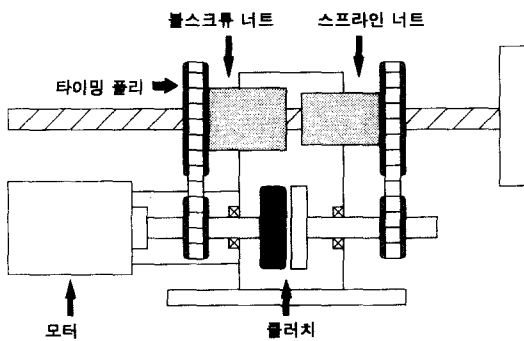


Fig. 2 Schematic diagram of ATC

이와 같은 기구들을 사용하여, 순수한 회전운동이 필요하면 클러치를 연결하여 볼스크류 너트와 스프라인 너트를 동시에 구동하고, 순수한 직선운동이 필요하면 클러치의 연결상태를 해제하여 볼스크류 너트만을 구동하도록 하였다. Fig. 2에 설계된 ATC의 개략도를 도시하였다.

3.2 자동공구교환장치의 전체적 구조 설계

볼스크류 너트와 스프라인 너트의 구동시에도 역시 미끄럼이 일어나면 곤란하므로 타이밍 벨트를

이용하였고, 감속비는 3:1로 하였다. 구동부의 관성량을 포함한 전체 관성량을 예상하고, 가속하는데 필요한 시간을 정하면, 모터의 부하토크를 계산할 수 있고, 이 계산에 의해 선정된 감속비가 3:1이다.

본 연구의 ATC의 크기는, 상용화된 복합 캠을 이용한 ATC보다 크지 않도록 설계하려고 노력하였다. 장치의 크기와 부품수를 줄이려고 하다보니, 베어링도 약간 특수한 품목을 사용하게 되었다. 일반적인 테이퍼 롤러 베어링을 사용해도 충분하다고 생각되었지만, 여러 가지 가공상, 조립상의 문제 때문에 크로스 로울러 베어링을 사용하게 되었다. 사용한 크로스 로울러 베어링은 일본 THK사의 RB 4510이다.^[1]

3.3 구동모터의 선정

ATC의 구동원인 모터는 AC 서보모터로 결정하였다. 구동모터를 선정할 때 가장 중점으로 생각해야 할 사항은 부하관성과 가속시간이다. 동작시간을 줄이려면, 모터의 감가속 시간을 줄여야 하고, 그만큼 가속도가 증가하며 가속도에 부하관성을 곱한 양이 모터에서 출력되어야 할 토크이기 때문이다. 구동모터를 선정하는 계산은 다음과 같다.

3.3.1 예압에 의한 마찰토크

$$T_D = k \times \frac{F_{a0} \cdot l}{2\pi} \quad (3.1)$$

T_D : 예압에 의한 토크 (kgf-cm)

F_{a0} : 예압 하중 (kgf)

l : 리드 (cm)

F : 예압 너트의 내부 마찰계수
(0.1~0.3)

3.3.2 가속에 의한 부하 토크

$$T_J = J_M \dot{\omega} = J_M \frac{2\pi n}{60t} \quad (3.2)$$

T_J : 가속에 의한 부하 토크 (kgf-cm)

J_M : 모터에 걸리는 관성 모멘트

(kgf· cm· sec²)

$\dot{\omega}$: 모터축의 각가속도 (rad/sec²)

n : 모터축 최종 회전속도 (rpm)

t : 가속 시간 (sec)

관성 모멘트는 모터축에 걸리는 값을 기준으로 하였으므로, 감속비가 있는 경우에는 모터축 환산 관성 모멘트로 계산하여야 한다. 관성 모멘트 중에서 자동공구교환장치 암(arm), 암에 고정된 공구 2개가 가장 큰 부분을 차지하였고, 볼스크류, 볼스크류 너트, 스프라인 너트, 타이밍 폴리 4개, 클러치, 클러치 양쪽의 축 2개, 모터의 관성은 이에 비하면 별로 크지 않다. 공구 한개의 무게는 4kg이라고 가정하여 계산을 하였다. 암의 무게가 생각보다 큰데, 암의 재질을 보다 가벼운 알루미늄 합금으로 바꾸어 관성을 줄인다면 같은 모터를 사용해서도 공구교환 시간을 줄일 수 있다.

여러 가지 가정을 하였지만 계산된 관성 모멘트는 약 0.1 kgf· cm· sec² 정도 되었다. 각가속도를 400 π rad/sec² 으로 하면 이때 소요되는 구동 토크는

$$T = J_M \dot{\omega} \quad (3.3)$$

이므로 약 125.6 kgf· cm = 12.6 N· m 정도 되고, 이 때의 회전각은

$$\theta = \frac{1}{2} \dot{\omega} t^2 \quad (3.4)$$

의 식으로 구할 수 있다. 감속비가 3:1 이므로 모터가 3회전해야 너트가 1회전한다. 가속완료 시 모터가 1.5 회전하도록 가속시간을 정하면 위의 식(3.4) 에서 약 0.12초가 된다. 이 때의 모터의 회전속도는

$$\omega = \dot{\omega} t \quad (3.5)$$

로 구할 수 있다. 계산결과는 약 1450 rpm 이고, 이 수치는 모터의 정격 회전속도와 거의 유사하다. 실제 구동시에는 사다리꼴 가감속 방법을 사용하지 않고, S자형 가감속을 사용하였다.

모터축과 볼스크류 너트축과는 타이밍 벨트로

연결되지만, 타이밍 벨트에서의 백래쉬와 탄성 변형은 없는 것으로 가정하였다. 아래에 ATC의 작동 원리를 간단히 기술하였다.

- ① 암을 90° 회전시켜 주축의 공구를 잡는다.
- ② 그대로 직선운동을 하여 공구를 주축에서 분리한다.
- ③ 암을 180° 회전시켜 새로운 공구가 주축 앞에 놓이도록 한다.
- ④ ②번의 운동과 반대되는 방향으로 직선운동을 하여 새로운 공구를 주축에 삽입한다.
- ⑤ 암을 ①번의 운동과 반대되는 방향으로 90° 회전시켜서, 교환된 공구를 매거진에 놓기 위한 준비를 한다.

3.3.3 구동모터에 걸리는 총 토크

$$T_M = T_D + T_f \quad (3.6)$$

위의 식(3.1)로 구한 마찰 토크는 약 2.7 N· m 정도이므로 식(3.6)에 의해 구동모터에 걸리는 총 토크는 약 15.5 N· m 가 된다.

성능이 우수한 모터를 사용하면 ATC가 작동하는데 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 그러나 가격이 비싸므로 적당한 선에서 절충을 할 필요가 있다. 서보모터 드라이버는 이 모터에 알맞은 사양으로 구입하였으며, 드라이버의 상위 제어기는 컴퓨터를 사용하였다.

4. 실험 결과

모터는 위에서 구한 구동 토크 값을 기준으로 선정하였다. 선정된 모터는 LG산전의 AC 서보모터로 최대 24.5 N· m 의 토크를 출력할 수 있으며, Table 3에 자세한 사양을 실어 놓았다. 모터의 정격 토크가 8.27 N· m 이므로 약간 위험하지만, ATC는 계속 운전을 하는 장치가 아니므로 최대 토크를 기준으로 선택하였다.

서보모터의 작동 순서는 다음과 같다.

- ① 0.15초 동안 모터 270° 회전(arm 90° 회전)
- ② 0.15초 동안 클러치 해제
- ③ 0.5초 동안 모터 3240° 회전(arm 120mm 직진)
- ④ 0.15초 동안 클러치 연결
- ⑤ 0.2초 동안 모터 540° 회전(arm 180° 회전)

- ⑥ 0.15초 동안 클러치 해제
- ⑦ 0.5초 동안 모터 -3240° 회전(arm 120mm후퇴)
- ⑧ 0.15초 동안 클러치 연결
- ⑨ 0.15초 동안 모터 -270° 회전(arm -90° 회전)

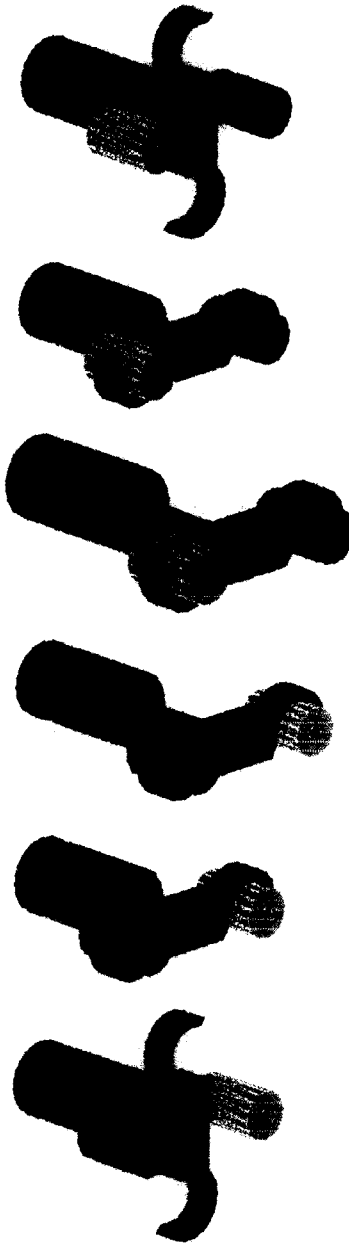


Fig. 3 Working mechanism of ATC

Table 3 Specification of AC servo-motor
FMA-TF13^[4]

형명	FMA-TF13
정격 출력 (kW)	1.3
정격 토크 (N·m)	8.27
순시 최대 토크 (N·m)	24.5
정격 회전 속도 (rpm)	1500
최대 회전 속도 (rpm)	3000
회전자 관성 (gf·cm·sec ²)	23.5
정격 파워 레이트 (kW/sec)	27.6
중량 (kg)	15.8

각 구간에서 모터가 움직이는데 소요되는 시간은, 실제 실험을 병행하면서 결정하였다. 즉, 모터의 출력 토크가 최대 토크의 80%를 넘지 않도록 각 구간의 작동 시간을 결정하였다. 만약 교환해야 할 공구의 무게가 더 무거워진다면, 모터에 걸리는 부하가 커지므로, 각 구간별로 작동 시간이 증가하고, 결국 전체의 공구교환시간이 증가한다. 연구의 모델로 삼은 캠식 ATC는 공구교환시간이 3.5초였고, 이 연구로 개발한 ATC는 2.2초이다.

모터의 기준 회전각은 부드러운 가속을 위해 5차 함수를 사용하였다.^[6] 클러치가 연결되고 해제되는 시간은 0.15초로 충분히 안전하게 선정하였다. 모터 회전각의 제어는 간단한 비례 제어기만을 사용하였다. 각 작동 구간별로 모터에 부하로 작용하는 질량과 회전 관성 모멘트가 변화하므로, 각각의 구간에 대한 제어 계인은 실험적으로 결정하였다. 실험 결과 간단한 비례 제어만으로도 원하는 운동을 충분히 만들어 낼 수 있었다.

①번 과정의 모터의 회전각을 기준 입력과 모터의 실제 출력되는 회전각을 비교하여 Fig. 4에 도시하였다. 오버슈트(Overshoot)없이 안정하게 기준 입력을 추종함을 알 수 있다. ①부터 ⑨까지의 전 과정에 대한 기준 입력과 출력을 Fig. 5에 도시하였다. 모든 과정에서 안정하게 기준 입력을 추종함을 알 수 있다. 그림의 스케일이 커서 에러량을 정확히 보기가 어려우므로 Fig. 6에 에러량을 도시하였다.

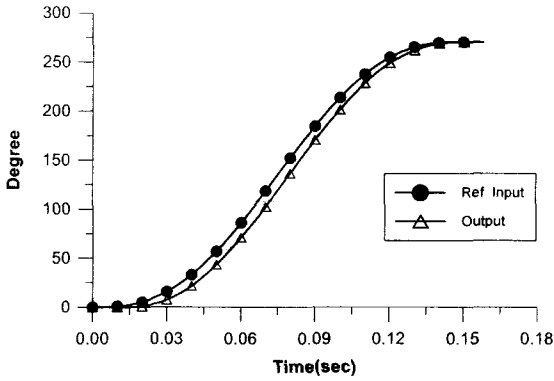


Fig. 4 Reference input and output of motor shaft for ① process

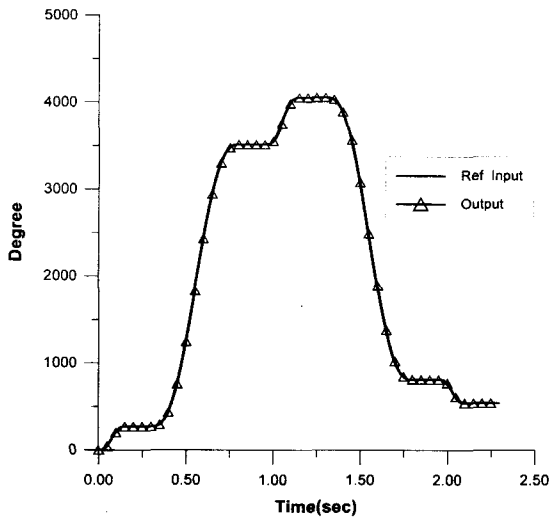


Fig. 5 Reference input and output of motor shaft for ①~⑨ process

ATC의 경우에는 절대로 오버슈트(Overshoot)가 존재해서는 안되는데, 실험 결과 전혀 오버슈트가 존재하지 않음을 알 수 있다. 그리고 목표 시간 내에 에러가 0으로 수렴하므로, 원하는 동작을 무리 없이 수행함을 알 수 있다. 공구의 무게를 가볍게 해서 실험하였을 경우, 에러의 최대값이 약간씩 줄어드는 경향을 나타내었고, 이것은 모터의 부하가

줄어들었기 때문이라고 생각된다. 공구의 무게가 무거워지면 모터에 걸리는 부하가 점점 증가하므로 에러의 최대값이 증가하게 된다.

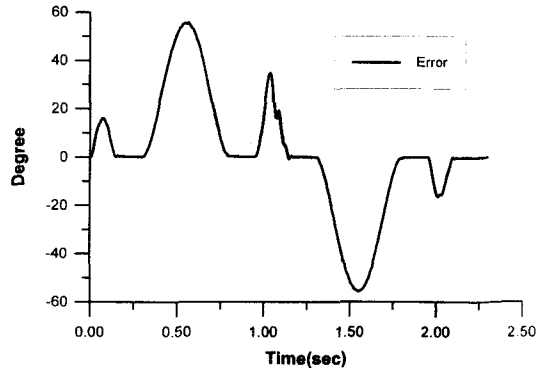


Fig. 6 Rotation Error of motor shaft for ①~⑨ process

5. 결론

최근 가공기술의 고도화에 발 맞추어 가공공정에 있어서도 무인화된 자동화 시스템을 지향하는 노력이 시도되고 있고, 최첨단의 자동 가공 시스템을 구현하기 위해서는 가공물과 가공공정에 따라 자동으로 공구를 교환할 수 있는 장치의 개발이 필수적으로 요구된다. 더구나 가공효율의 제고를 위해서는 공구교환시간에 대한 개선이 매우 중요하게 된다.

이러한 이유로 본 연구에서는

- (1) 각종 공작기계에 쉽게 응용할 수 있는 고속의 자동공구교환장치를 서보 모터, 클러치, 볼스크류, 스프라인 너트를 이용하여 개발하였다.
- (2) 기존의 캠형 자동공구교환장치보다 간단한 구조를 가지면서 동작을 고속화하기 위해, 기구학 측면의 고려와 함께 메카트로닉스 기술을 도입하여 연구개발을 수행하였다.
- (3) 서보모터를 이용하여 운동의 프로파일만을 바꿈으로써 다른 공작기계에도 쉽게 적용할 수 있도록 하였다.
- (4) 자동공구교환장치 설계에 대한 제반기술을 확립하였다.

후기

본 연구는 한원정기 주식회사의 지원하에 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. "직동운동 시스템," THK Co. Ltd. Catalog No. 100-1K, 1995.
2. "한국 기계공구," 한국기계공구상연합회, 통권 192(17권 1호), pp36-43, 1995, 1월
3. "Toothed Clutches," Mayer Transmissions Ltd. Catalog No. KB3, 1996.
4. "AC SERVO DRIVE FDA-3000 Operating Manual," LG산전, 1996.
5. Benjamin C. Kuo, Jacob Tal, "Incremental Motion Control - Volume 1," SRL Publishing Company, 1978.
6. John J. Craig, "Introduction to Robotics," Addison-Wesley Publishing Company, pp. 227-256, 1985.