

## 리니어 모터를 이용한 척킹 컴플라이언스 보상

이 선 규<sup>†</sup>, 이 진 호<sup>\*</sup>

(2000년 9월 8일 접수, 2001년 11월 16일 심사완료)

### Chucking Compliance Compensation by Using Linear Motor

Sun-Kyu Lee and Jin-Ho Lee

**Key Words :** Three Jaw Chuck(3 조척), Chucking Compliance(척킹 컴플라이언스), Roundness(진원도), Compensation(보상), Cutting Tool Feed System(공구 이송장치), Linear Motor(리니어 모터)

#### Abstract

This paper introduces a compensating system for machining error, which is resulted from chucking with separated jaws. In machining the chucked cylindrical workpiece, the deterioration of machining accuracy, such as out-of-roundness is inevitable due to the variation of the radial compliance of the chuck workpiece system which is caused by the position of jaws with respect to the direction of the applied force. To compensate the chucking compliance induced error, firstly roundness profile of workpiece due to chucking compliance after machining needs to be predicted. Then using this predicted profile, the compensated tool feed trajectory can be generated. And by synchronizing the cutting tool feed system with workpiece rotation, the chucking compliance induced error can be compensated. To satisfy the condition that the cutting tool feed system must provide high speed and high position accuracy, brushless linear DC motor is used. In this study, firstly through the force-deflection experiment in workpiece chucked lathe, the variation of radial compliance of chuck workpiece system is obtained. Secondly using the mathematical equation and cutting experiment result, the predicted profile of workpiece and its compensation tool trajectory are generated. Thirdly the configuration of compensation system using linear motor is introduced, and to improve the system performance, PID controller is designed. Finally the tracking performance of system is examined by experiment. Through the real cutting experiment, roundness is significantly improved.

#### 1. 서 론

3 조척(three jaw chuck) 회전선반을 이용하여 원형의 공작물을 가공할 때, 척의 위치에 따른 공작물 반경 방향의 컴플라이언스 변화로 인해 절삭깊이의 차이가 발생하여 가공 후 공작물의 진원도가 저하된다.<sup>(1)</sup> Fig. 1 은 원형의 공작물이 3 조 척에 의해 체결된 모습과 3 조 척에 기인한 가공 후 진원도의 저하를 나타내고 있다. 이와 같은 척킹 컴

플라이언스에 의한 공작물의 진원도 저하는 채터가 발생하기 전에 두드러지고,<sup>(2)</sup> 비늘모양(scale like)채터링 현상에 영향을 주는 등,<sup>(3)</sup> 채터 문제와 밀접히 연관이 되어있다. 이러한 진원도의 저하를 피하기 위해 공작물의 반경 방향으로 균일한 척킹력을 주도록 하는 콜릿척(collet chuck)을 사용할 수 있으나 자주 교체해야 하는 단점이 있다. 척킹 컴플라이언스에 의한 진원도 변화에 관한 기존의 연구로는 원형 공작물 및 중공형 공작물의 가공시 발생하는 진원도 변화와 척킹 조건과의 관계를 실험적으로 규명하거나,<sup>(1)</sup> 척킹력에 따른 절삭력과 관계를 수학적으로 밝히고,<sup>(4)</sup> 수학적 모델링을 통하여 실린더 형이나 중공형 공작물의 가공 후 진원도 저하를 예측하는<sup>(2,3)</sup> 방법 등이 제시되어 왔

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 광주과학기술원 기전공학과

E-mail : skyee@kjist.ac.kr

TEL : (062)970-2388 FAX : (062)970-2384

<sup>\*</sup> 회원, 광주과학기술원 대학원 기전공학과

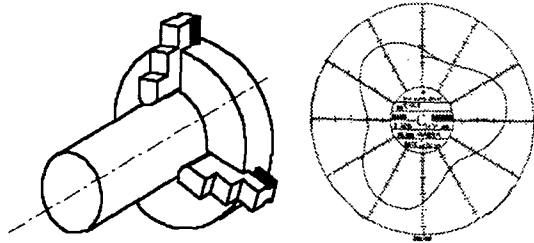


Fig. 1 Cutting of cylindrical workpiece with 3 jaw chuck and out-of-roundness due to 3 jaw chuck

으나 이의 보상에 관한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 척킹 컴플라이언스에 따른 가공 오차를 보상하기 위한 기구로서 리니어 모터를 이용한 고속 공구이송장치를 개발하였다. 즉, 척에 의한 원형정도 변화의 예상 프로파일을 구한 후, 이를 토대로 보상 가공 궤적을 생성하여 절 공구가 보상궤적을 따라 고속으로 이송하게 하여 결과적으로 보상 효과를 얻게 한다. 공구이송부에 사용하는 리니어 모터는 기존의 동력 전달 장치와는 달리 회전 운동을 직선운동으로 바꾸는 장치가 필요 없으므로 백래쉬나 마찰 효과를 줄일 수 있고, 그에 따른 전력 손실이 적어 고정도, 고속 기능이 뛰어난 특성을 지니고 있으므로 원형 공작물의 회전 고속으로 동기화 하여 공구를 정확히 위치시켜야 하는 시스템 사양에 적합하다.<sup>(8)</sup>

본 논문에서는 우선 공작물이 척킹된 범용 선반에서의 컴플라이언스 변화를 확인한 후, 척킹 컴플라이언스에 의한 절 깊이 변화식과 절 실험결과를 이용하여 보상궤적을 생성하였다. 그리고 보상 기구로서의 리니어 모터를 이용한 공구 이송 장치를 설계하고 시스템 분석을 통해 제어기를 구현하였다. 설계된 제어기를 실제 시스템에 적용시켜 보상 가공 궤적을 추종 하게 함으로써 궤적 추종 성능을 실험을 통해 확인 한 후, 마지막으로 실제 절 실험을 통하여 공작물의 보상 결과를 검토하였다.

## 2. 척킹 컴플라이언스의 변화

척의 클램핑 위치에 따른 반경방향의 강성변화를 살펴보기 위하여 Fig. 2 와 같이 선반에 공작물을 파지하고 로드셀을 이용하여 하중을 가하면서 상대편의 변위를 전기 마이크로미터로 측정하였다. Fig. 3 은 척킹력을 변화 시켰을 때 공작물체의 원주상 위치별 강성을 나타내고 있다. 여기서 척킹력

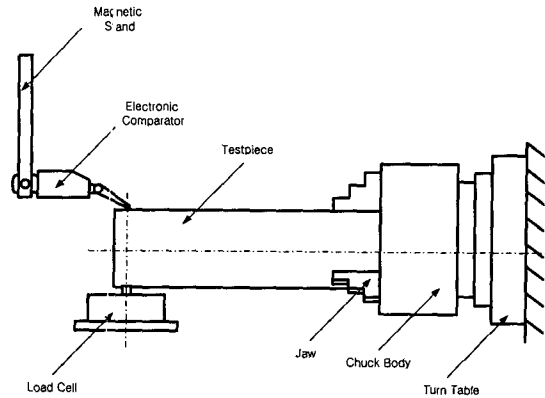


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set up

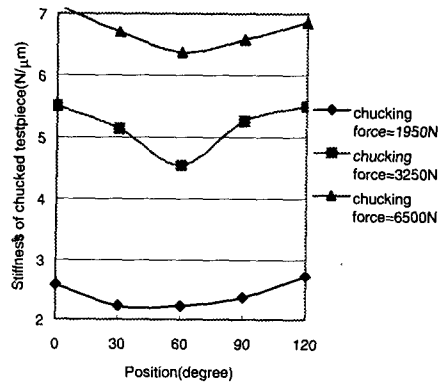
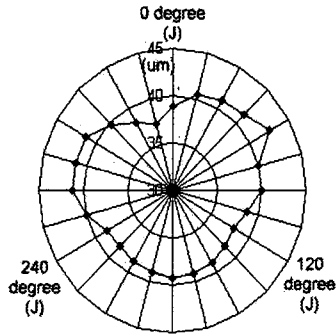


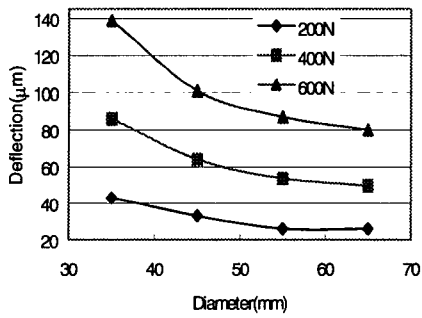
Fig. 3 Effect of directional orientation at different positions with varying chucking force (workpiece material : steel, diameter : 65mm, loading point : 125mm from the jaw face)

은 다음과 같이 측정하였다. 즉, 토크렌치를 사용하여 척을 조일 때 그 값을 로드셀로 측정하여 토크렌치의 값과 척킹력과의 관계를 얻은 후, 추후 실험 시 그 관계를 이용하여 척킹력을 계산하였다. 이 결과에서 힘을 주는 방향의 맞은 편에 척이 위치할 경우(0°와 120°) 강성이 최대가 됨을 알 수 있고, 척킹력의 증가에 따라 공작물체의 강성이 크게 증가함을 알 수 있다.

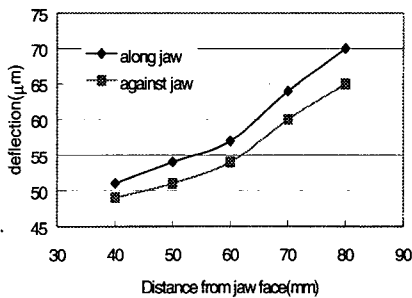
Fig. 4 는 전각도 별로 측정된 변위를 나타낸 것으로 척킹 컴플라이언스가 가공 후 공작물체의 진원도에 크게 영향미침을 알 수 있다. Fig. 5 는 공작물체의 지름 및 하중위치에 따라 공작물체의 강성이 변화하는 양상을 보여주고 있다.



**Fig. 4** Deflection variation of solid testpiece (workpiece material : steel, diameter : 35mm, loading point : 125mm from the jaw face, radial force : 150N, chucking force : 3077N)

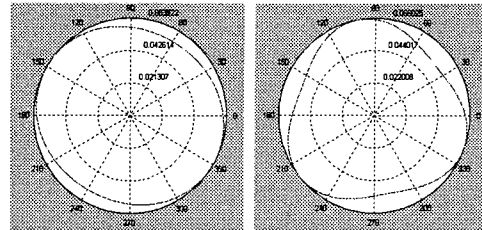


(a) Effect of workpiece diameter on the variation of deflection (workpiece material : steel, loading point : 125mm from the jaw face, radial force : 200N, 400N, 600N, chucking force : 6593N)

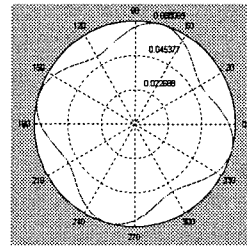


(b) Effect of loading point on the variation of deflection (workpiece material : steel, diameter : 68mm, radial force : 700N, chucking force : 6593N)

**Fig. 5** Effect of workpiece configuration on the variation of deflection



(a) 2 jaw chuck (b) 3 jaw chuck



(c) 4 jaw chuck

**Fig. 6** Roundness profiles of a workpiece chucked by various types

### 3. 보상가공 궤적

#### 3.1 진원도 변화

M. Rahman 에 의하면 진원도 변화량을 다음과 같이 구할수 있다. 척에 의해 외경이  $R$  인 공작물 내부에  $r$  만큼의 거리에서 생기는 외력의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$F(t) = \frac{Na_0}{2} \left( \frac{r}{R} \right) + N \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{r}{R} \right)^{2n} [a_n \cos Nn\alpha t + b_n \sin Nn\alpha t] \quad (1)$$

이때 각 기호는 Table 1 에 나타내는 바와 같다. 따라서 절삭깊이  $x$  는 다음 미분방정식의 해가 되고,

$$\frac{Md^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx = F(t) \quad (2)$$

최종적으로 척킹에 따른 절삭깊이 변화식은 다음과 같이 된다.

$$\Delta x(t) = \frac{Na_0}{2K} \left( 1 - \frac{r}{R} \right) + \frac{a_1 \sin N\omega_1 t - b_1 \cos N\omega_1 t}{\omega_1 B} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^N \right] \quad (3)$$

여기에 공작물의 두께 및 공작물 길이 방향의 거리에 따른 컴플라이언스와 감쇠성능을 고려하면 전 가공구간에 대해서 가공형상을 예측할 수 있다. Fig. 6 은 식 (3)을 이용하여 공작물 임의 지점에서의 가공형상을 척킹방식 차이에 따라 비교한 것이다.

Table 1 Identification of parameters

Symbols	Description
$\Delta x(t)$	Real depth of cut
N	Number of jaw
R	Diameter of workpiece
r	Radial distance inside workpiece
M	Mass involved in dynamic compliance of chucking system
B	Damping involved in dynamic compliance of chucking system
K	Stiffness involved in dynamic compliance of chucking system
$\omega$	Angular velocity of workpiece
$\omega_r$	Resonating spindle speed
$a_0, a_1, b_1$	Fourier coefficients of reaction force

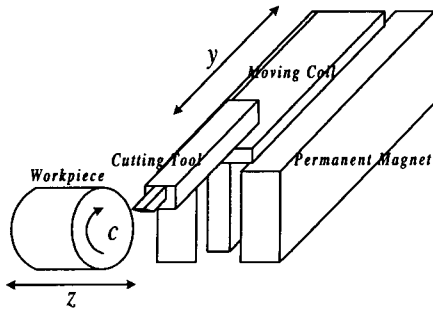


Fig. 7 Schematic diagram of compensated machining using linear motor

3.2 보상가공 궤적

Fig. 7 과 같은 리니어 모터를 이용한 가공기에 서 3 조 척킹 컴플라이언스를 보상가공하기 위해 서는 공구절입(y), 공구이송(z), 공작물회전(c)의 3 축 동기제어가 중요하며 특히 주축 1 회전 당 y 축 이 3 회 왕복 이송 해야 한다. 따라서 c 축의 회전 속도를 V[rpm], y 축의 왕복주파수를  $f_y$ [Hz]라 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$V = 20 f_y [rpm] \tag{4}$$

3 조척에 의한 절삭깊이 변화는 식 (3)에서 N 에 3 을 대입하고,  $A_0, A_1, B_1, \theta$ 를 다음과 같이 놓으면

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{3a_0}{2K} \left(1 - \frac{r}{R}\right), & A_1 &= \frac{a_1}{\omega_r B} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^3\right], \\ B_1 &= \frac{b_1}{\omega_r B} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^3\right], & \theta &= \omega_r t \end{aligned} \tag{5}$$

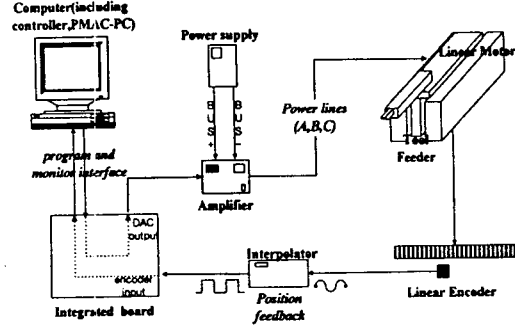


Fig. 8 Tool feeder system using linear motor

식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta x(t) = A_0 + A_1 \sin 3\theta - B_1 \cos 3\theta \tag{6}$$

위 식에서 절삭시 척에 의해 생기는 반력을 푸리에 급수를 이용하여 표시할 때, 반력이 주기함수라고 가정하면  $b_1$  및  $B_1$ 이 0 이 되므로 최종적으로 절삭깊이 변화식은 다음과 같이 간략화할 수 있다.

$$\Delta x(t) = A_0 + A_1 \sin 3\theta \tag{7}$$

또한 위 식에서  $A_0$  는 원하는 절삭깊이(wanted depth of cut),  $A_1$ 은 척킹 컴플라이언스의 변화로 인한 진원도의 저하량이므로 이를 보상하기 위한 공구의 이송 변위는 다음과 같이 된다.

$$\Delta x(t)_{comp} = A_0 - A_1 \sin 3\theta \tag{8}$$

따라서 절삭깊이에 따른 가공 후 진원도의 값을 이용하여 보상가공 궤적을 생성할 수 있다.

4. 공구이송장치의 구성 및 제어기 설계

4.1 공구이송장치의 구성

공구이송장치는 Fig. 8 과 같이 리니어 모터, 제어기가 내장된 PC, 모터에 적당한 전류를 공급하기 위한 앰프와 위치제어와 정류를 위한 리니어 엔코더로 구성되어 있다. 리니어 모터 시스템의 성능은 적절한 모터의 선택, 기계구조의 고강성화, 서보계의 강성 및 추종 성능 등에 의해 좌우된다. Fig. 9 는 리니어 모터를 이용한 공구 이송 장치의 모습이고, Table 2 와 Table 3 은 각각 리니어 모터와 리니어 엔코더의 사양을 나타낸다. 제어기는 Delta-Tau 사의 PMAC 컨트롤러를 사용하였고, 앰프는 전류증폭기인 Glentek 사의 SM8315 를 사용하였다.

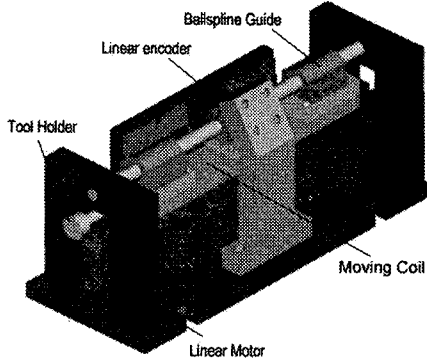


Fig. 9 Overall shape of cutting tool feed system

Table 2 Specification of motor

Spec. of motor	unit	Value
Max./Continuous force	N	2000/400
Max./Continuous power	W	6700/226
Mass of moving coil	Kg	2.95
Thrust constant (Kt)	N/A	54.5
Back emf (Kb)	V·s/m	47.2
Coil resistance (R)	Ω	3.8
Coil inductance (L)	mH	5
Max. coil current (Ip)	A	36.8

Table 3 Specification of linear encoder

Accuracy	±3μm
Resolution	0.2μm
Max. allowable velocity	480m/min
Max. allowable acceleration	250m/s <sup>2</sup>

4.2 제어기 설계

Fig. 10 은 제어기와 앰프를 포함한 리니어 모터 시스템의 폐루프 블록선도이며 각 파라미터 값들은 Table 4 와 같다.  $M$  은 공구와 리니어모터의 코일을 포함한 이동질량이고,  $B$  는 기계시스템의 감쇄계수이다. 이 값은 쿨롱마찰력에 의한 등가 점성감쇄계수를 근사한 값으로서 무절삭시 모터이송방향으로의 주파수 응답법을 이용하여 구하였다.  $K_t$  는 모터의 토크상수로 스펙상의 값을 이용하였고  $K_a$  는 앰프게인으로 입력전압대 출력전류를 측정함으로써 값을 구하였다. 따라서 전체 시스템의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

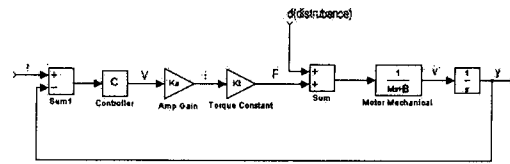


Fig. 10 Closed loop block diagram of servo system

Table 4 Identification of parameters

$M$	$B$	$K_t$	$K_a$
4.74 Kg	201.6 Ns/m	54.5 N/A	11.45 A/V

Bode Diagrams

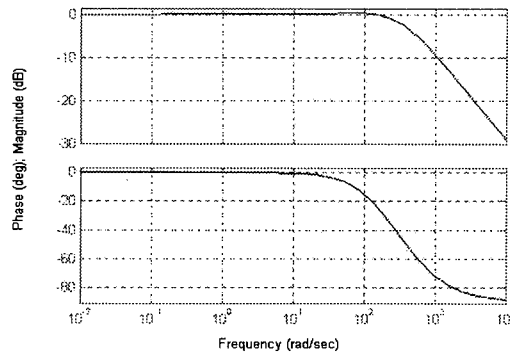


Fig. 11 Closed loop frequency response using PID controller

$$y = \frac{CK_a K_t}{Ms^2 + Bs + CK_a K_t} r + \frac{1}{Ms^2 + Bs + CK_a K_t} d$$

$$= \frac{624C}{4.74s^2 + 201.6s + 624C} r + \frac{1}{4.74s^2 + 201.6s + 624C} d \quad (9)$$

구해진 전달함수를 이용하여 시스템의 응답특성을 보다 향상시키기 위하여 PID 제어기를 사용하였다. 제어기는 시스템의 오버슈트를 5% 이내로 하고 스텝 입력에 대한 정상상태 오차가 1% 미만인 되도록 각각의 이득값을  $K_p=147.6$ ,  $K_i=32.3$ ,  $K_d=2.5$  로 정하였다. Fig. 11 은 제어기를 사용한 시스템의 폐루프 주파수 응답특성을 나타내는데, 시스템의 대역폭이 약 80Hz 임을 알 수 있다.

5. 추종성능 및 보상결과

5.1 추종성능

설계된 제어기를 적용시킨 시스템의 보상가공 궤적에 대한 추종성능을 실험을 통해 검토하였다. 척킹 컴플라이언스에 의해 50μm 의 진원도 저하량이 생겼을 때를 가정하여 생성된 보상궤적을 추

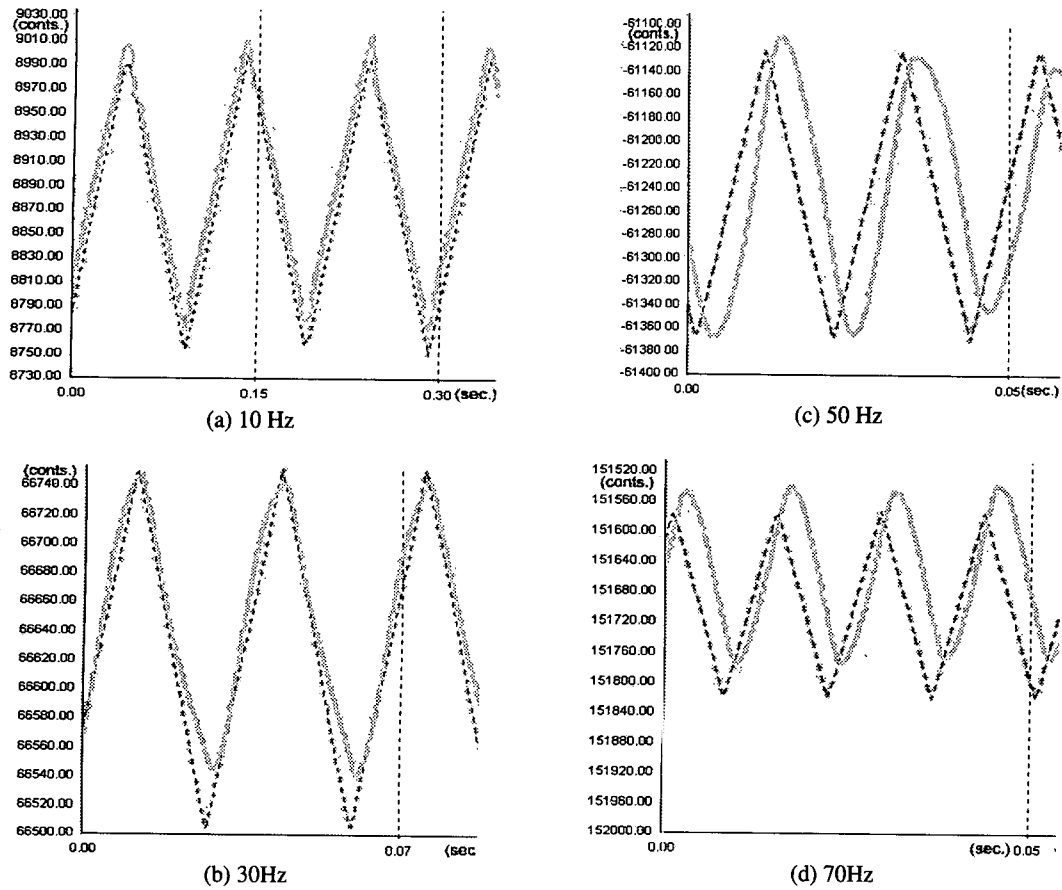


Fig. 12 Tracking performance of compensation trajectory

Table 5 Tracking error on each frequency

	10Hz	30Hz	50Hz	70Hz
Amplitude error( $\mu\text{m}$ )	2.7	8.6	5.8	6.3
Phase error (rad)	0	0.126	0.241	0.275

Table 6 Compensation experiment conditions

	Experiment 1	Experiment 2
Material	Al	Al
Rpm of workpiece	1000	1000
Diameter(mm)	52	35
Thickness(mm)	2.5	1.5
Depth of cut(mm)	0.1	0.06
Overhang length	30	30

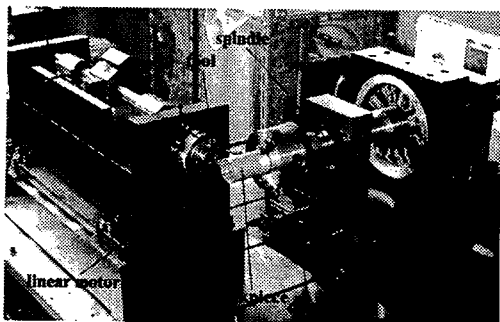
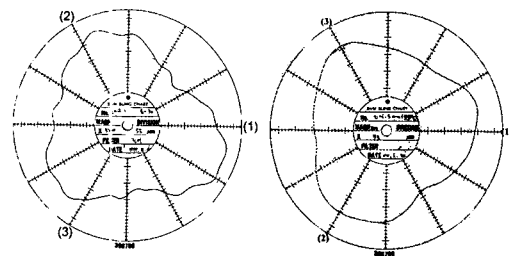


Fig. 13 Overall shape of compensation system

중하게 하였고, Fig. 12 는 그 결과를 각 주파수별로 나타낸 그림이다. 여기서 점선과 실선은 각각 지령치와 추종치를 나타내며 y 축의 conts.는 변위를 나타내는 것으로서 1cont 가 0.2 $\mu\text{m}$ 에 해당된



(a) Experiment 1(55 $\mu\text{m}$ ) (b) Experiment 2(33 $\mu\text{m}$ )  
Fig. 14 Roundness of workpiece without compensation

다. Table 5 는 각 주파수별 구동 시 발생하는 위상

오차 및 진폭오차를 나타내는 것으로 고주파수로 구동할수록 오차가 증가함을 알 수 있다.

공구이송의 x 축과 공작물 회전축 y 의 동기제어를 위해 Prog. 1 과 같은 P-MAC 프로그램을 작성하였다. 즉, 이 프로그램은 공작물이 1 회전할 때 공구가 3 번 왕복 운동하도록 공작물이 1/3 회전할 때 공구가 1 번 왕복운동 하도록 한 것이고 이에 따른 속도를 지정해 준 것이다. 이 프로그램을 이용하여 보상가공을 수행할 때에는 일반 가공 시 공작물에 가했던 척킹력과 동일한 척킹력을 가하여야 하며, 처음 공구와 공작물의 위치를 Fig. 15 같이 align 시켜야 한다.

**Prog. 1 Program for synchronization**

```

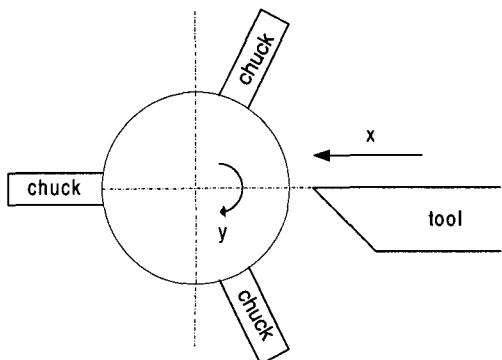
;x:공구이송축, y:공작물이송축
P100=1000 ;1000rpm set
P200=2500 ;Rotary encoder pulse
P300=10000/6 ;1/6 회전
P400=1/(2* 103*50) ;50Hz 일때의 x 축 move time
P500= 275 ;55μm 보상시 x 축 이송변위
; (55μm*0.2=275)
; 실험 2 의 경우는 P500=165

close
OPEN PROG 1
CLEAR
INC
M26=0

ta10 ts10 f50000
x500 ;척삭깊이 0.1mm(500count*0.2μm)
; 실험 2 의 경우는 x300

WHILE(M26=0)
P1=((P100*P200)/60*4) F(P1) Y(P300) tm(P400) X(P500) ;
공구 1 회 전진, 공작물 1/6 회전
P1=((P100*P200)/60*4) F(P1) Y(P300) tm(P400) X(-P500) ;
공구 1 회 후퇴, 공작물 1/6 회전
ENDW

ta10 ts10 f50000 x10000
CLOSE
    
```



**Fig. 15** Initialization align for synchronization

**5.2 보상결과**

**5.2.1 실험장치의 구성**

척킹 컴플라이언스를 보상하기 위한 장치는 Fig. 13 과 같이 공구이송부와 공작물이송 및 공작물회전부로 구성 되어있다. 공구 이송부는 리니어 모터를 액추에이터로 이용하였고, 끝단에 툴을 부착하여 절삭을 할 수 있도록 하였다. 공작물이송부는 DC 서보모터를 이용하여 공작물의 회전을 공구이송에 동기제어 할 수 있게 하였고 공작물을 3 곳에서 파지하기위해 3 조척을 부착하였다.

**5.2.2 실험방법**

우선 일반가공 시 발생하는 절삭깊이 변화식(7)을 구하기 위해 Table 6 과 같은 조건에서 가공실험을 수행한 결과 Fig. 14 와 같은 진원도를 얻었다. 이때 측정된 배분력은 리니어 모터의 추력 이내의 값이므로 절삭 시 리니어 모터가 절삭깊이를 일정히 유지 했다고 볼 수 있다. 따라서 이 진원도 형상은 3 조에 의해 기인된 척킹컴플라이언스 변화에 의해 생성된 것임을 알수 있다. 이 결과를 토대로 절삭 깊이 변화식을 구하면 각각 다음과 같게 된다.

$$\Delta x(t) = 100 + 27.5 \sin 3\theta \quad (10a)$$

$$\Delta x(t) = 60 + 16.5 \sin 3\theta \quad (10b)$$

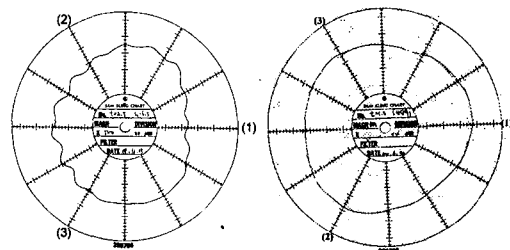
따라서 이에 대한 보상 가공 궤적은 각각 다음과 같다.

$$\Delta x(t)_{comp} = 100 - 27.5 \sin 3\theta \quad (11a)$$

$$\Delta x(t)_{comp} = 60 - 16.5 \sin 3\theta \quad (11b)$$

**5.2.3 실험결과**

Fig. 16 은 실험 1 과 실험 2 의 보상 후 진원도를 나타낸다. 각각의 경우 보상전과 비교했을 때 보상 후 진원도가 45%=(55-30)/55\*100)와 57%=(33-



**(a) Experiment 1(30μm) (b) Experiment 2(14μm)**  
**Fig. 16** Roundness of workpiece with compensation

14)/34\*100) 향상되었다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 원형 공작물 가공 시 칩킹 컴플라이언스로 인해 가공 후 발생하는 원형정도 저하 현상을 개선하기 위한 보상 시스템으로서 리니어 모터를 이용한 공구 이송 장치의 구성 및 설계와 적용에 관해 연구하였다. 먼저 칩킹 컴플라이언스에 영향을 미치는 칩킹 조건과 진원도의 관계를 살펴본 후 칩킹 컴플라이언스에 의한 절삭깊이 변화식과 절삭실험 결과를 이용하여 보상계적을 생성하였다. 그리고 리니어 모터를 이용하여 공구이송장치를 설계, 구현하고 이를 주축과 동기제어함으로써 보사가공을 한 결과, 각 조건에서 51%, 57%씩 진원도가 향상되었음을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) RAHMAN Mustafizur and ITO Yoshimi, 1979, "Machining Accuracy of a Cylindrical Workpiece Held by a Three-Jaw Chuck," *J. JSPE*, Vol. 13, No. 1, pp. 7~12.
- (2) Rahman, M., "A Study on the Deviation of Shape of a Turned Workpiece Clamped by Multiple Jaws," *Annals of the CIRP*, Vol. 38/1/1989, pp. 385~388.
- (3) Miyao, K. and Iwaki, T., 1969, "Reflection of Circular plate clamped in a Three-Jaw Chuck," *Trans. of the JSME*, 35, 270, pp. 313~317.
- (4) Walter, M. F. and Stahl, J.E., 1994, "The Connection between Cutting and Clamping Force in Turning," *Int. J. Mach. Tools. Manufact*, Vol. 34, No. 7, pp. 991~1003.
- (5) DOI Masahiro, MASUKO Masami, ITO Yoshimi, 1982, "三つつねチャック加工時に生ずる特異なひりマークの観察," *Trans. of the JSME*, 48, 434, pp. 1633~1639.
- (6) Chang, J. Y., Lai, G. J. and Chen, M. F., 1994, "A Study on the Chatter Characteristics of the Thin Wall Cylindrical Workpiece," *Int. J. Mach. Tools. Manufact*, Vol. 34, No. 4, pp. 489~498.
- (7) Lai, G. J. and Chang, J. Y., 1995, "Stability Analysis of Chatter Vibration for a Thin Wall Cylindrical Workpiece," *Int. J. Mach. Tools. Manufact*, Vol. 35, No. 3, pp. 431~444.
- (8) Bartos, F. J., 1997, "Linear Motors and Control Take a "Direct" Route to Top Performance," *Control Engineering*, Vol. 44, No. 4, pp. 90~2,94,96,98,100.
- (9) 서준호, "브러시리스 리니어 모터를 이용한 고속 비진원 공구 이송장치의 동특성 및 제어," 광주과학기술원 1997 석사학위 논문.
- (10) Srinivasan, K. and Tsao Tsu Chin, 1997, "Machine Tool Feed Drives and Their Control-A Survey of the State of the Art," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 743~755.
- (11) Alter, D. M. and Tsao Tsu-Chin, 1994, "Stability of Turning Processes with Actively Controlled Linear Motor Feed Drives," *Transactions of the ASME*, Vol. 116, pp. 298~307.
- (12) Alter, D. M. and Tsao Tsu-Chin, 1996, "Control of Linear Motor for Machine Tool Feed Drives: Design and Implementation of H. Optimal Feedback Control," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 118, pp. 649~656.
- (13) Van Brussel, H. and Van den Braembussche, P., "Robust Control of Feed Drives with Linear Motors," *Annals of the CIRP*, Vol. 47/1/1998, pp. 325~328.
- (14) Shahian Bahram and Hassul Michael, *Control System Design using Matlab*, Prentice Hall.
- (15) Sigurd Skogestad and Ian Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control-Analysis and Design*, John Willy & Sons.
- (16) Balas, Gray J., Doly, John C., Glover Keith, Packard Andy and Smith Roy, 1993, "μ-Analysis and Synthesis TOOLBOX," The Math Works Inc.
- (17) Delta Tau System Inc., 1996, "PMAC User's Manual."