

비진원 가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구 (A study on the Development of CNC Lathe for Noncircular Cutting)

*김경석 **양승필 ***김성식(※), 정현철, 김정호, 이도윤

* 조선대학교 기계설계공학과
** 동아전문대학 금형설계과
*** 조선대학교 대학원

제 I 장 서 론

자동차 엔진의 피스톤은 핀 구멍의 복잡한 형상과 2사이클 엔진의 경우 실린더쪽 흡기 및 배기 포트의 위치에 따라 균일하지 않은 열이나 응력 등의 영향에 의한 변형을 고려하여, 상온에서의 형상이 각종 평가 시험을 거쳐 엔진마다 다양한 형상을 갖는 피스톤으로 결정된다. 일반적으로 횡단면 형상은 타원이고 종단면 형상은 테이퍼 및 선형의 프로파일을 갖도록 되어 있다. 그러므로 피스톤의 외경 사상가공에는 예전부터 마스터 모델(Master Model)을 사용한 모방절삭 방식이 많이 이용되고 있으며, 현재에도 이 방식이 주류를 이루고 있다. 모방 절삭 방식은 피스톤과 동일 형상인 모방 모델(이하 마스터 캠이라 함)을 기계 주축대에 피스톤과 동축 상에 부착하여, 모방 장치에 의해 피스톤을 마스터 캠(Master Cam)과 동일한 형상으로 가공하는 방법이다. 그러나 모방절삭 방식에는 마스터 캠에 압접하는 스타일러스(Stylus)의 추종성 한계로 가공 회전수(500rpm)에 한계가 있고, 스타일러스의 마모에 의해 외경 형상이 변화하게 되어 정도의 산포가 크며, 마스터 캠의 제작비가 비싸고 장시간이 소요된다. 또한 모방압력에 있어 모방압이 높으면 마스터 캠의 발열과 스타일러스의 이상 마찰이 발생하여 가공의 정도가 저하하고, 모방압이 낮으면 절삭 저항에 의해 모방성에 악영향을 끼치게 된다. 그 때문에 이 모방압에 대해서는 각 회사의 특유의 기술을 필요로 한다. 그러나 최근 열영상 해석 기술의 향상으로 엔진의 고 출력화, 저연비 대책 등이 진전됨에 따라 피스톤의 재질과 형상은 다종다양하게 되었다. 피스톤의 재질은 알루미늄 합금이 주 재료로 되어 있지만 디젤 엔진에서는 압축링 흡 부위에 내마모성의 향상을 목적으로 오스테나이트 주철의 링 트랩(Ring Trap)이 들어간 피스톤이 많다. 따라서 구동력에는 링 트랩부의 절삭 저항을 이겨내는 힘이 필요하

게 된다. 또한 최근 수요가 증가하는 경향이 있는 주철 피스톤에 대해서는 절삭 저항값이 더욱 크게 되어 모방 절삭 방식으로 대응이 어려워지고, 새로운 피스톤 가공기의 요구가 높아지고 있다.

본 연구에서는 컴퓨터 제어에 의한 방법으로서 타원 형상을 갖는 임의의 피스톤을 고속, 고정도로 가공할 수 있는 CNC(Computer Numerical Control)선반 개발에 관하여 연구하였다.

피스톤 데이터를 퍼스널 컴퓨터로 입력하고 CNC 제어하므로 마스터 캠의 제작 불필요, Recess 등과 같은 미세가공 가능, 피스톤의 형상변경 용이, 고속가공 등으로 모방절삭 방식보다 훨씬 높은 생산성 향상이 기대된다.

제 II 장 이론 해석

2.1 가공 원리

C축, Y축, Z축을 동기 시키고 Fig. 1과 같이 C축 1회 전당 공구가 P₁에서 P_n까지 헬릭컬 형상의 경로를 갖게 되면 이 경로를 피스톤 전 길이에 걸쳐 반복함으로써 타원가공이 가능하다. $\Delta\theta_i$, ΔZ_i , Δr_i 는 공구가 공구 경로상의 임의의 점 P_i에서 P_i로 이동할 때의 각축 이동량이고, 이 값이 고속가공 프로그램 데이터의 한 블록이 된다.

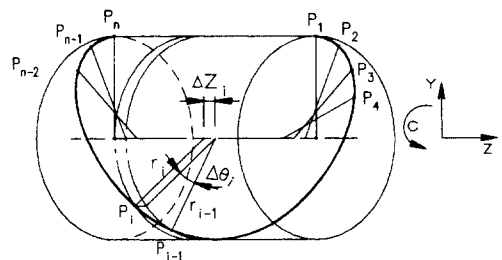


Fig. 1 Path of tool

또한 공작물을 회전시켜 타원 형상을 선삭가공하기 위해서는 주축(C축) 1회전당 공구가 2회 왕복해야 한다. 따라서 주축의 회전수를 높이기 위해서는 고속 이송 시스템의 높은 추종성이 요구되고, 그 성능은 모터의 능력이 중요한 요인이 된다. 사인파 형상의 타원을 가공하는 경우 고속 위치 결정축(Y축)의 주파수 f (Hz)는

$$f = \frac{2 \times N}{60} \quad (1)$$

이며, 여기서 N (rpm)은 주축(C축) 회전수이다.

타원의 장경과 반경차인 공구의 이동량 y (mm), 공구의 이동속도 \dot{y} (m/sec), 공구의 이동가속도 \ddot{y} (m/sec²)는 다음과 같다.

$$y = \frac{Y_1}{2} \times \sin(f \times 2\pi \times t) \quad (2)$$

$$\dot{y} = \frac{Y_1}{2} \times f \times 2\pi \times \cos(f \times 2\pi \times t) \quad (3)$$

$$\ddot{y} = -\frac{Y_1}{2} (f \times 2\pi)^2 \times \sin(f \times 2\pi \times t) \quad (4)$$

여기서, Y_1 (mm) = (타원의 장경 - 타원의 단경) / 2 이다.

2.2 학습 제어

임의의 주기로 반복되는 지령이나, 주기마다 서서히 변화하는 지령에 대해서 고정도의 제어가 가능한 이 기능은 지령과 피드백의 편차가 0이 되도록 보정량을 만들고 최종적으로 편차는 0에 근접 하도록 한다. 이것은 고속가공 사용시에 유효하게 되며 보통의 편차에 의한 피드백 제어에 더해서 1주기 전의 편차를 부가하는 일로서 주기적인 목표 입력에 고정도로 추종시키는 방식이다. 이때 1주기 전의 최종값이 다음 주기의 초기값으로 되는 것이 반복제어이고, 각 주기마다의 초기값을 같도록 하는 것이 학습제어이다. Fig. 2는 현재의 서보계의 개략도를 표시한 것이다. 이 계는 스텝 형태의 위치지령에 대해서 제어 편차를 발생치 않는다. 1주기 전달 함수가 직류 입력 즉 s 가 0으로 수렴함에 따라 출력이 무한대로

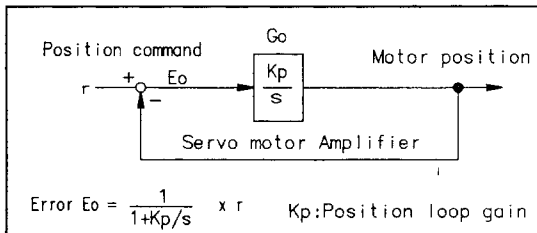


Fig. 2 Block diagram of current servo system

되기 때문이다.

여기서, 주기 L 을 얻는 지령 r 을 Fourier급수로 전개하면 $2\pi/L$ 를 주기로 하여 $\omega k = 2\pi k/L$ 인 고주파를 갖는 지령이 된다. 이 ωk 각각의 주파수에 대해 Loop Gain(k)이 무한대가 되는 Controller $H(s)$ 를 투입하면 각 주파수 ωk 성분에 대해서 제어 편차가 0이 되고, 지령에 대해서 고정도로 추종된다.

Fig. 3에 반복제어의 개략도를 나타냈다. $H(s)$ 는 기본 주기인 L 과 같은 지연시간 L 을 갖는 Controller로 초기 함수 1주기 분으로부터 연속적으로 주기신호를 발생하는 함수발생기구조로 된다. 이때 $H(s)$ 는

$$H(s) = \frac{1}{1 - \exp(-sL)}$$

이 된다

s 에 $j\omega$ 를 대입 하면 명확하게 $\omega = \omega k$ 인 전체 주파수에 있어서 출력이 무한대이므로 시스템이 안정하다면 반복 지령에 대해 편차가 0이 된다. 이것은 주기 L 에 동기 한 외란에 대해서도 동일결과가 되기 때문에 외란에 의한 편차 억제에 대해서도 효과를 기대할 수 있다.

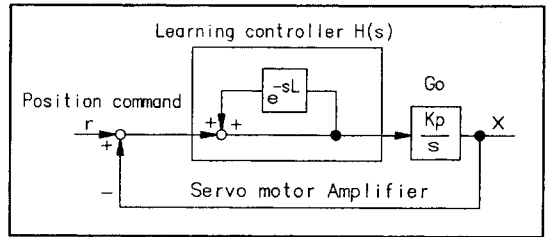


Fig. 3 Schematic diagram of repeating control

Y축에 1주기($\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$) 0.04sec이고, 다음식으로 표현되는 동작을 지령하여 테스트한 결과 Fig. 4에 나타난 것과 같이 약 8회(0.32sec)의 반복제어에 의해 편차가 구해지며 약 $1\mu\text{m}$ 이하인 위치오차로 되었다.

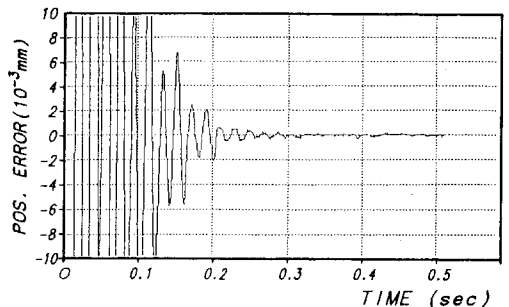


Fig. 4 Results of repeating control(position error)

$$Y\text{축의1주기} = -0.15 \times \frac{(1 - \cos 2\theta)}{2}$$

여기서, θ (degree)는 C축의 각도이다.

2.3 타원 공식 및 보간

Fig. 5에서 일반적 타원의 식을 x, y 좌표로 나타내면

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1$$

이고, 이때 점 $A(x,y)$ 를 극좌표 (r, θ) 로 나타내면 다음과 같다.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$\therefore x = a \cos \alpha, \quad y = b \sin \alpha \quad (5)$$

$$\tan \theta = \left(\frac{b}{a}\right) \tan \alpha$$

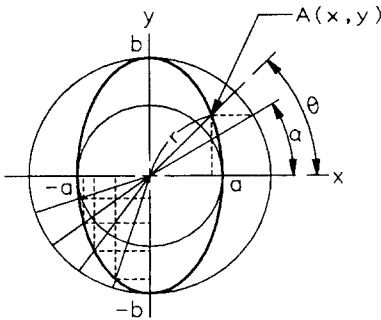


Fig. 5 Shape of oval

$$r = \sqrt{(a^2 + a^2 \tan^2 \theta) \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{a^2}{b^2}\right) \tan^2 \theta} \right)}$$

$$= \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta}} \quad (6)$$

이며,

$$\frac{1}{r} = \sqrt{\left(\frac{\sin \theta}{b}\right)^2 + \left(\frac{\cos \theta}{a}\right)^2} \quad (7)$$

이다.

기준 직경 $\phi 80mm$, 타원량 $\phi 0.3mm$ 인 경우의 각 위치별 데이터를 예로 들면 다음과 같다.

$$a = 40 - 0.15 = 39.85 \text{ mm}$$

$$b = 40 + 0.15 = 40.15 \text{ mm}$$

각 위치별 데이터를 Table 1에 나타냈다.

Table 1 Data of polar coordinates

	(r, θ) (mm, degree)	(x, y) (mm, mm)
①	(39.8500, 0.0000)	(39.8500, 0.0000)
②	(39.8700, 15.0000)	(38.5110, 10.3190)
③	(39.9240, 30.0000)	(34.5753, 19.9622)
④	(40.0003, 45.0000)	(28.2845, 28.2845)
⑤	(40.0774, 60.0000)	(20.0372, 34.7045)
⑥	(40.1297, 75.0000)	(10.3863, 38.7623)
⑦	(40.1500, 90.0000)	(0.0000, 40.1500)

위치 ①과 ② 사이에서 r, θ 에 동기 하여 공구의 이동을 직선 보간 하면

$$r = \frac{(r_2 - r_1)\theta}{(\theta_2 - \theta_1)} + r_1 \quad (8)$$

이고, $x-y$ 평면에서 위치 ①과 ②를 직선으로 연결하면

$$x = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} (x - x_1) \quad (9)$$

이다. θ 를 $0^\circ \sim 15^\circ$ 까지 1° 마다 목표값과의 차, 또는 식 (9)와 목표값과의 차는

$$y = x \tan 8^\circ$$

로 표시된다.

제 III 장 실험

3.1 실험 장치

피스톤의 외경을 가공하기 위해서는 3축 동시제어가 필수라 할 수 있으며 동시제어를 위해서는 몇가지 조건이 필요하다. 첫째, 고속 위치 결정을 할 수 있는 축 구성, 둘째, 피스톤의 형상 데이터를 처리하고 기계어로 변환할 수 있는 Software, 셋째, 많은 양의 데이터를 고속으로 전송, 넷째, 피스톤의 형상에 맞는 Jig&Fixture 및 절삭 공구 등이다. 본 실험 장치는 일반적인 CNC 선반에 주축을 C축으로 하고 고속 위치 결정을 위한 Y축을 부가하였으며 네개의 축을 제어할 수 있는 Controller를 이용하여 C-Y-Z축 동시제어로 비원형 절삭을 할 수 있다. 또한 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 피스톤 형상을 데이터화하고 기계측 리모트 버퍼(Remote Buffer)로 고속전

송 하도록 하였다. 고속 위치결정장치에 이용되는 구동방식에는 전기 유압서어보 방식, Servo Motor-Ball Screw 방식, Linear Motor 방식, 압전 Actuator 방식, 전자 흡인력 방식이 있으나 본 실험 장치에서는 제어가 용이하고 강성이 크며 실용성이 높은 Servo Motor-Ball Screw 방식을 이용하였다. Photo. 1에 실험 장치의 외관, Photo. 2에 가공부의 구성을 나타냈다.

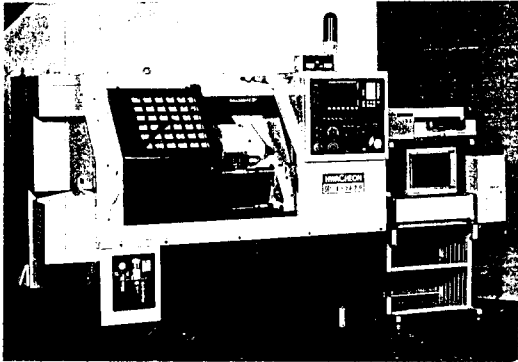


Photo. 1 Experimental apparatus

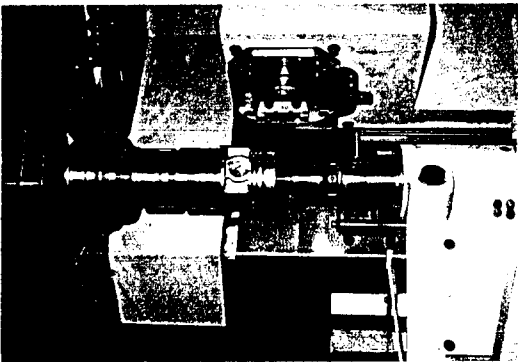


Photo. 2 Construction of cutting part

3.2 실험 방법

실험에 사용한 시험편 재료는 자동차 디젤 엔진에 사용되는 피스톤으로서 알루미늄을 주성분으로 한 합금(AC8A)이다. 또한 엔진의 내마모성을 향상시키기 위한 니켈계 오스테나이트(Austinite) 주철링이 삽입된 피스톤을 열처리한 후 장경을 기준으로 가공여유가 $\phi 0.3\text{mm}$ 인 진원이 되도록 황삭가공한 소재이며, 피스톤의 형상 및 치수의 예는 Fig. 6과 같다. 본 실험에서 가공한 형상은 Ovality, Profile, Recess, Serration이며, 사용 공구는 멀티(Mult) 방식으로, Ovality, Profile, Recess를 가공하는

다이아몬드 공구, 오스테나이트 주철링 부를 가공하는 초경공구, Serration을 가공하는 전용공구로 구성하였다. 위 네가지 형상의 가공은 한 프로그램 내에서 완성되고 절삭저항에 의한 형상 오차의 변화를 줄이기 위하여 황삭가공을 한 후 사상가공시 $\phi 0.1\text{mm}$ 를 가공했다. 또한 C축의 회전수 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm, 2500rpm과 타원량 $\phi 0.2\text{mm}$, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 0.6\text{mm}$ 의 형상을 각각으로 가공하였다. 가공이 완료된 피스톤을 전용측정기를 이용하여 각 위치별 데이터와 그래프를 출력하고 설계값과 측정값의 오차가 허용영역 내에 있는지를 확인했다. 또한 회전수와 타원량이 가공정도에 미치는 영향을 확인하고 다량의 피스톤을 가공하여 공정능력지수값을 평가했다.

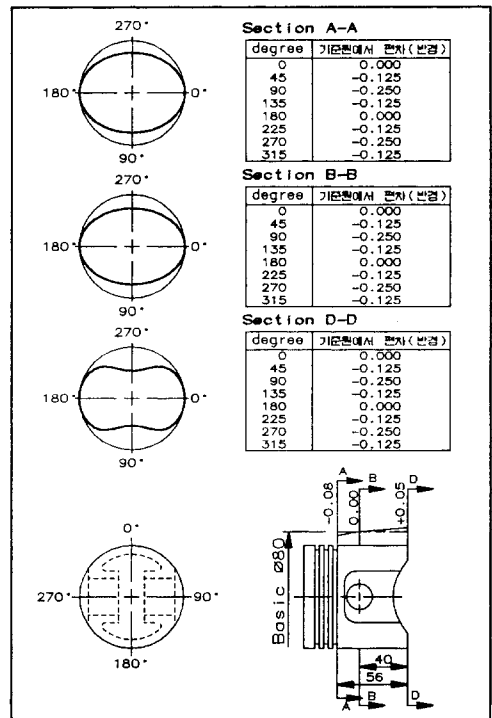


Fig. 6 Shape and dimensions of piston

제 IV 장 실험 결과 및 고찰

4.1 실험 결과

본 연구에서는 장경을 기준으로, 가공여유가 $\phi 0.3\text{mm}$ 이고 니켈계 오스테나이트 주철링이 삽입된 피스톤을 가공함에 있어서 C축 회전수 1000rpm, 1500rpm, 2000rpm, 2500rpm에서 타원량 $\phi 0.2\text{mm}$, $\phi 0.4\text{mm}$, $\phi 0.6\text{mm}$ 가 되

도록 가공하였으며, Ovality, Profile, Recess의 형상을 동시가공 하였다. 가공 완료된 피스톤을 전용측정기를 이용하여 설계값과 데이터를 분석한 결과 허용영역 내에 있음을 확인하였다. 또한 130개의 피스톤을 연속으로 가공하여 측정하고 공정능력지수(CP : Process Capability)값을 다음 식에 의해 산출한 결과 CP = 1.70을 얻었다.

$$CP = \frac{USL - LSL}{6\sigma(n - 1)}$$

공정능력지수값의 분석그래프를 Fig. 7에 히스토그램으로 나타내고, Ovality 측정결과를 Table 2와 Fig. 8에 나타냈다. Profile 측정결과를 Table 3과 Fig. 9에 나타냈으며 Recess 측정결과를 Fig. 10에 나타냈다.

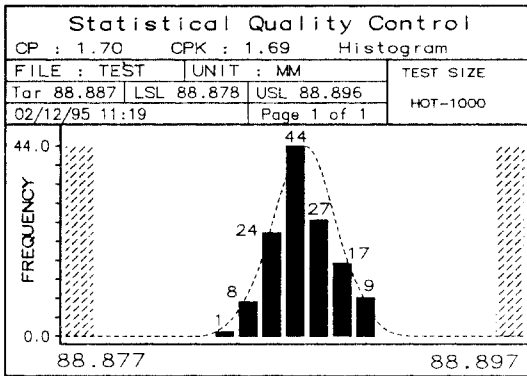


Fig. 7 Histogram of process capability

Table 2 Measuring results of ovality (φ 0.2 mm)

φ 0.2	분할각도 (deg)	설계값 (mm)	2500 rpm	
			측정값 (mm)	편차 (mm)
	0	0.000	-0.005	-0.005
	10	0.006	0.005	-0.001
	20	0.013	0.023	0.000
	30	0.035	0.048	-0.002
	40	0.066	0.080	-0.003
	50	0.100	0.116	-0.001
	60	0.134	0.151	0.001
	70	0.164	0.179	0.002
	80	0.186	0.193	-0.001
	90	0.198	0.200	0.000
	100	0.198	0.195	0.001
	110	0.186	0.175	-0.002
	120	0.164	0.147	-0.003
	130	0.134	0.113	-0.004
	140	0.100	0.083	0.000
	150	0.066	0.047	-0.003
	160	0.035	0.020	-0.003
	170	0.013	0.003	-0.003
	180	0.001	-0.001	-0.002

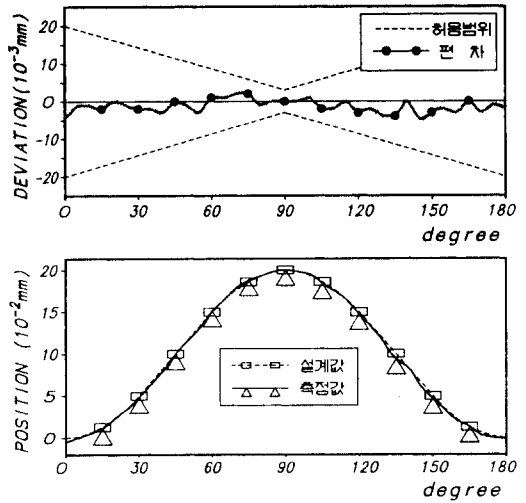


Fig. 8 Measuring results of ovality (φ 0.2mm 2500rpm)

Table 3 Measuring results of profile (φ 0.2mm)

측정높이 (mm)	설계값 (mm)	φ 0.2mm 2500rpm	
		측정값 (mm)	편차 (mm)
0.0	-0.500	-0.498	-0.002
1.0	0.200	-0.199	0.001
2.0	0.100	0.100	0.000
3.0	-0.600	0.051	0.001
4.0	0.030	-0.029	-0.001
5.0	0.016	-0.018	0.002
8.0	-0.004	-0.005	0.001
10.0	0.000	0.000	0.000
14.0	0.000	0.000	0.000
24.0	-0.004	-0.003	0.001
27.0	0.016	-0.017	0.001
29.3	0.034	-0.034	0.000
32.3	-0.070	-0.071	0.001
34.8	-0.106	-0.107	0.001
36.8	-0.142	-0.144	0.002
38.8	-0.184	-0.185	0.001
40.8	-0.238	-0.238	0.000
42.4	-0.290	-0.292	0.002
44.2	-0.380	-0.384	0.004
45.7	-0.600	-	-
47.7	-0.614	-	-
53.7	-0.718	-	-
55.0	-0.740	-0.738	-0.002
58.5	-0.800	-0.798	-0.002
59.2	-0.812	-	-
61.7	0.800	-	-
62.6	-0.800	-	-
64.5	-0.800	-	-
64.7	-0.720	-0.721	0.001
67.3	-0.830	-0.832	0.002
72.8	-1.300	-1.302	0.002
74.7	-1.462	-1.463	0.001
76.0	-1.573	-1.580	0.003

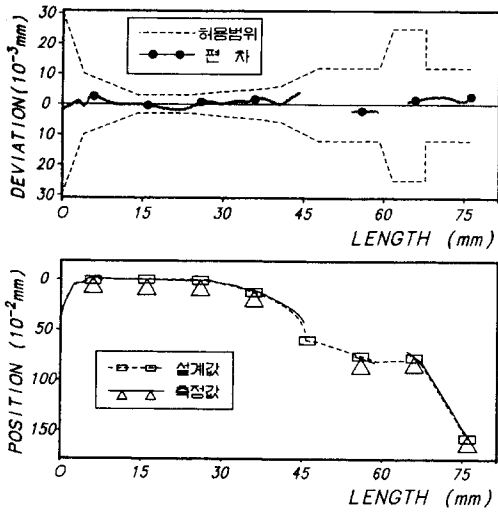


Fig. 9 Measuring results of profile ($\phi 0.2\text{mm}$ 2500rpm)

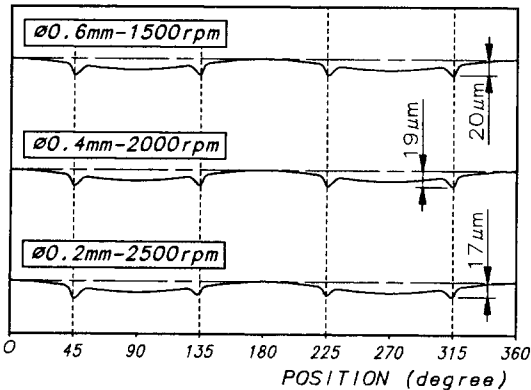


Fig. 10 Measuring results of recess
(1500rpm, 2000rpm, 2500rpm)

4.2 고찰

가공소재와 형상을 임의로 결정하고 결과값을 판단하기에는 평가기준이 막연하므로 자동차 엔진에 사용되는 피스톤을 가공소재로 하였고 주축회전수와 타원량을 변경하며 실험하였다. 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 도면의 단편적인 데이터를 형상데이터화하고, 기계어로 변환시킨 후 피스톤 형상의 이상 여부를 그래픽화된 화면과 NC 프로그램으로 확인했다. 입력 완료된 데이터를 RS-422C 케이블을 이용하여 DNC(Direct Numerical Control) 방식에 의해 NC축의 리모트 버퍼로 고속전송하여 가공했다. 프로그램은 C축의 분할각도에 따라 고속위치결정축(Y축)

의 동시제어로 Ovality를, C축의 회전과 Z축이동의 동시제어로 Profile가공을 기본으로하여 C-Y-Z축 동시가공하였다. 가공 결과값은 진원도 측정기로 측정하였으나 형상차원의 그래프는 목측으로 평가할 수 밖에 없고 장경과 단경의 차만 출력되므로 각 위치별 데이터를 알 수 없었다. 따라서 설계값과 측정값을 해석하고 각 위치별 데이터를 확인할 수 있는 전용측정기를 이용하여 비교한 결과, 두 값은 거의 일치하고, 편차가 허용영역 내에 있음을 확인하였다. 또한 2500rpm의 고속가공과 퍼스널 컴퓨터에 입력되어 있는 File만의 변경으로 다종의 피스톤을 쉽게 가공할 수 있었으며 데이터 수정도 짧은 시간에 행할 수 있었다.

본 연구에서는 생산성 향상에 치중하였고, 130개의 연속가공으로 치수의 산포가 크지 않음을 확인하였다. 그러나 피스톤은 더블타원, 비대칭타원 등의 형상이 있고 타원량이 많은 Pump Shaft와 초정밀을 요하는 비디오드럼 등의 비진원형상의 가공이 있다. 향후, C축의 고속화, 가공형상정도의 향상으로 각종 피스톤은 물론 Pump Shaft와 비디오드럼 가공도 가능하게 될 것으로 사료된다.

제 V 장 결 론

CNC 선반에 고속 응답성을 갖춘 위치 결정 기구 Y축을 부가하여 C축과 Y축의 제어로 Ovality를, C축과 Z축의 제어로 Profile을 한 프로그램 내에서 동시가공하였으며, 데이터를 퍼스널 컴퓨터로 입력하여 고속가공하고 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 타원량 $\phi 0.2\text{mm}$ 인 경우 2500rpm(Y축 83 Hz)까지 고속가공하였으며 500rpm 정도인 모방절삭 방식보다 생산성을 훨씬 향상시킬 수 있었다.
2. 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 단편적인 피스톤 데이터를 형상처리하고, 기계어로 변환시킨 후 입력형상을 확인할 수 있으므로 형상 변경이 용이하고, 다종의 피스톤에 대해 Data File의 변경만으로 바로 적용할 수 있었다.
3. 모방절삭 방식에서는 가공이 불가능한 Recess 등과 같은 미세가공이 가능함을 확인할 수 있었다.
4. 가공 Cycle Time을 줄임으로써 다량의 피스톤을 짧은 시간에 가공할 수 있었으며, 130개의 피스톤을 연속가공하여 측정된 결과 공정능력지수 $CP = 1.70$ 을 얻었다.

5. C축의 회전수와 형상정도를 더욱 향상시킴으로써 더블타원, Eccentricity, Offset, 비대칭 타원의 피스톤은 물론 Pump Shaft와 같은 비진원 형상가공도 가능하게 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 山本英繼, “고성능화·고신뢰화에 대응한 기계장치
의 열대책 설계”, 機械設計技術, Vol. 7, No. 4, pp.
41-45, 1992.
2. 田中實, “피스톤外形 加工用 高速 CNC 旋盤의
開發”, 內燃機關, Vol. 29, No. 12, pp. 72-80.
3. R.Munro, “Fuel Economy-Its Influence on Diesel
Piston Design Features”, SAE Paper, 830067.
4. 山口智實, 東京大學 博士論文, 1988.
5. 平野秀和, “AP2V-CII 兩ドライブ形 CNC 피스톤
旋盤”, 豊田工機技報, Vol. 35, No. 1, pp. 32-40,
1994.
6. 화천기계, “CNC 피스톤가공기 HOT-1000과 가공
용 프로그램 S/W HOTS”, 기계자동화, Vol. 4, pp.
36-40, 1994.
7. 안 병규, “SPINDLE 포함한 多軸 MOTION 制御”,
CNC 콘트롤라 WORKSHOP 논문집, pp. 3-18,
1993.
8. FANUC LTD, “디지털 AC サーボ 取扱説明
書”, A-63639-005, 1991.
9. 水田進·河本邦仁, “セラミック 材料”, 東京大學出
版會, 1986.
10. NTN 株式會社, “精密 ボールねじ Catalog, No.
6202, 1989.