技術論文 한국공작기계기술학회지 제 5 권 제 2 호 1996. 6
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

피스톤 가공용 CNC 선반 HOT-1000 개발에 관한 연구

김경석*, 김종관*, 김상복**, 김성식**, 정현철***, 이도윤***

A study on the Development of CNC Lathe HOT-1000 for Piston Cutting

Keong-suk Kim, Jong-kwan Kim, Sang-bok Kim
Sung-sik Kim, Hyun-chul Jung, Do-yun Lee

Abstract

The purpose of this study is the development of a lathe which can cut any pistons of oval shape with high speed, accuracy and precision by CNC (Computer Numerical Control) method. Y axis which is the mechanism of position determination with high speed response has been added to the CNC lathe and ovality and profile has been cut under the synchronous control of C-Y-Z axes. In the case of ovality of ϕ0.5mm, the productivity can be improved up to 1500rpm by high speed cutting than modeling method.

Keyword : profile, ovality, recess, eccentricity, offset

제 I 장 서 론

자동차 엔진의 피스톤은 핀 구멍의 복잡한 형상과 흡기 및 배기 포트의 위치에 따라 균일하지 않은 열이나 응력 등으로 엔진 가동 중에 변형이 발생한다. 따라서 이를 상쇄시키기 위하여 엔진마다 다양한 형상을 갖는 피스톤으로 설계된다. 일반적으로 횡단면 형상은 타원이고 종단면 형상은 테이퍼 및 선형의 프로파일을 갖도록 되어 있다. 그러므로 피스톤의 외경 사상 가공에는 예전부터 마스터모델 (Master Model)을 사용한 모방(Copying)절삭 방식이 많이 이용되고 있으며, 현재에도 이 방식이 주류를 이루고 있다. 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 모방 압력에 있어 모방압이 높으면 마스터 캠의 발열과 스타일러스의 이상 마찰이 발생하여 가공의 정도가 저하하고, 모방압이 낮으면 절삭 저항에 의해 모방성에 악영향을 끼치게 된다. 그러나 최근 엔진

* 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터
** 화천기술개발 연구소
*** 조선대학교 대학원

의 고출력화, 저연비 대책[1] 등이 진전됨에 따라 피스톤의 형상은 다종다양하게 되었고 가공결과를 측정기에 의존하지 않고 실제 자동차 엔진에 운전 후 결과 분석에 임하기도 한다. 따라서 모방절삭 방식으로 대응이 어렵고 또한 디이젤 엔진의 압축링 홈 부위에 내마모성 향상을 목적으로 오스테나이트 주철 링 트랩(Ring Trap)이 들어간 피스톤은 더욱 대응이 어렵다. 본 연구에서는 CNC(Computer Numerical Control) 선반을 이용하여 피스톤을 고속, 고정도로 가공할 수 있는 피스톤 가공기[2)~9)] HOT-1000 개발에 관하여 연구하였다.

제 Ⅱ 장 이 론 해 석

2.1 가 공 원 리

C축, Y축, Z축을 동기 시키고 Fig.1과 같이 C축 1회전당 공구가 P_1에서 P_n까지 헬리컬 형상의 경로10)를 갖게 되면 이 경로를 피스톤 전 길이에 걸쳐 반복함으로써 타원가공이 가능하다. $\Delta\theta_i$, ΔZ_i, Δr_i는 공구가 공구 경로상의 임의의 점 P_{i-1}에서 P_i로 이동할 때의 각축 이동량이고, 이 값이 고속가공 프로그램 데이터의 한 블럭이 된다.

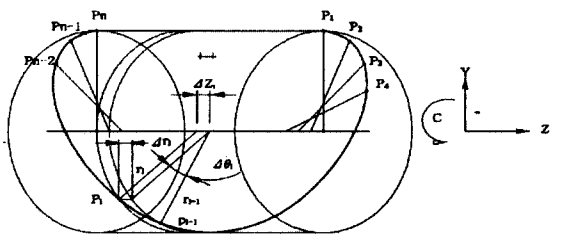


Fig. 1 Path of tool

또한 공작물을 회전시켜 타원 형상을 선삭 가공하기 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

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

이며, 여기서 N(rpm)은 주축(C축)의 회전수이다.

타원의 장경과 단경의 반경차인 공구의 이동량 y(mm)와 이동속도 $\dot{y}(\mathrm{mm/sec^2})$와 이동 가속도 $\ddot{y}(\mathrm{mm/sec^2})$와 이동 가속도는 다음과 같다.

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

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

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

여기서, Y_1(mm)=(타원의 장경-타원의 단경)/2 이다.

한편 모터의 가속 능력 $\ddot{\theta}(\mathrm{mm/sec})$는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = \frac{T_a - T_f}{J_R - J_P} \qquad (2-5)$$

여기서, T_a (Kg · mm)는 모터의 가속 토오크이고 T_f (Kg · mm)는 절삭 토오크이며 J_R (Kg · mm/sec)은 Rotor Inertia, J_P(Kg · mm/sec)는 부하 Inertia이다.

식 (2-5)를 직선 왕복 운동하는 공구의 가속도로 나타내면 다음과 같다.

$$\ddot{y} = \frac{\ddot{\theta} \times L_1}{2\pi} \qquad (2-6)$$

L_1은 Ball Screw의 Lead를 나타내고 식 (2-4)와 식 (2-6)에 의해 주축의 회전수와 공구 이동량과의 관계를 구할 수 있다.

2.2 학 습 제 어

임의의 주기로 반복되는 지령이나, 주기마다 서서히 변화하는 지령에 대해서 고정도의 제어가 가능한 이 기능은 지령과 피이드백의 편차가 0이 되도록 보정량을 만들고 최종적으로 편차는 0에 근접하도록 한다. 이것은 고속가공 사용 시에 유효하게 되며 보통의 편차에 의한 피이드백 제어에 더해서 1주기 전의 편차를 부가하는 일로서 주기적인 목표 입력에 고정도로 추종시키는 방식이다. 이때 1주기 전의 최종 값이 다음 주기의 초기 값으로 되는 것이 반복제어이고, 각 주기마다의 초기

값을 같도록 하는 것이 학습제어[11]이다. Fig. 2 반복제어 개략도에서 주기 L을 얻는 지령 r을 Fourier급수로 전개하면 $\omega k = 2\pi k/L$인 고주파를 갖는 지령이 된다. 이 ωk 각각의 주파수에 대해 Loop Gain(k)이 무한대가 되는 Controller H(s)를 투입하면 각 주파수 ωk성분에 대해서 제어 편차가 0이 되고, 지령에 대해서 고정도로 추종된다. H(s)는 기본 주기인 L과 같은 지연시간 L을 갖는 Controller로 초기 함수 1주기 분으로부터 연속적으로 주기 신호를 발생하는 함수 발생기구로 된다. 이때 H(s)는

$$H(s) = \frac{1}{1-\exp^{(-sL)}} \text{ 이된다.}$$

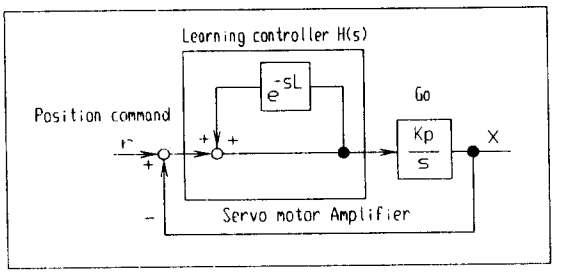


Fig. 2 Schematic diagram of repeating control

Y축에 1주기(θ =0° ~360°) 0.04sec이고, 다음식으로 표현되는 동작을 지령하여 테스트한 결과 Fig. 3에 나타난 것과 같이 약 8회(0.32sec)의 반복제어로 구해지고, 편차는 약 1μm 이하인 위치오차로 되었다.

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

여기서, θ(degree)는 C축의 각도이다.

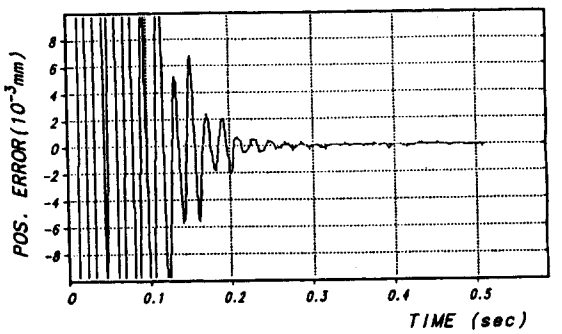


Fig. 3 Results of repeating control(position error)

2.3 타원 공식 및 보간

타원 형상을 고속으로 가공하기 위해서는 먼저 목표치의 오차를 최소화하여 지령해야 한다. 본 논문에서는 x, y 좌표값의 일반 타원식이 아닌 r, θ의 극좌표 지령 방식의 소프트웨어를 구성하였다. Fig. 4에서 일반적 타원의 식은 x, y 좌표로 나타내어

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

이때 점 A(x,y)를 극좌표(r, θ)로 나타내면 다음과 같다.

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

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$\therefore\ x = a\cos\theta_1,\ \ y = b\sin\theta_1$$

$$\tan\theta_2 = \left(\frac{b}{a}\right)\tan\theta_1$$

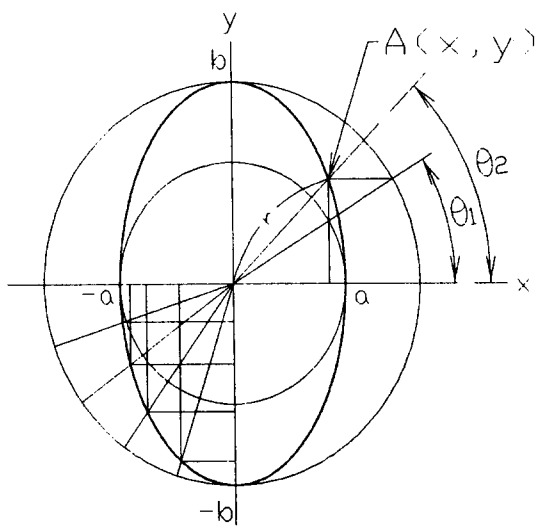


Fig. 4. Shape of oval

$$r = \sqrt{(a^2 + a^2\tan^2\theta_2)\left(\frac{1}{1+\left(\frac{a^2}{b^2}\right)\tan^2\theta_2}\right)}$$

$$= \frac{a\,b}{\sqrt{a^2\sin^2\theta_2 + b^2\cos^2\theta_2}} \text{ 이며}$$

$$\frac{1}{r} = \sqrt{\left(\frac{\sin\theta_2}{b}\right)^2 + \left(\frac{\cos\theta_2}{a}\right)^2}$$ 이다.

제 Ⅲ 장 실 험

3.1 실 험 장 치

본 실험 장치는 일반적인 CNC 선반에 주축을 C축으로 하고 고속 위치 결정을 위해 고강성, 낮은 열팽창 및 내마모성에 중점을 둔 Y축을 부가하였으며 네개의 축을 제어할 수 있는 Controller를 이용하여 C-Y-Z축 동시 제어로 Ovality와 Profile 형상을, C-X-Y축 동시 제어로 홈 가공을 행할 수 있다. 한편 지지대는 구상흑연 주철에 표면은 낮은 마찰계수를 갖고 동 마찰계수와 정 마찰계수가 거의 같은 값으로써 Stick Slip을 배제할 수 있으며 자체 윤활성의 성질을 갖는 1964년 미국 SHAMBAN社와 NASA에서 공동 개발된 Turcite "B"를 부착하였다. 또한 퍼스널 컴퓨터에서 피스톤 형상을 데이터화 하고 기계 측의 리모트 버퍼(Remote buffer)를 이용하여 고속전송 및 고속가공토록 하였다. 구동방식으로는 제어가 용이하고 강성이 크며 실용성이 높은 Servo Motor Screw 방식을 이용하였다. Photo. 1에 실험 장치의 가공부 구성을 Fig. 5에는 Control 시스템의 구성을 나타냈다.

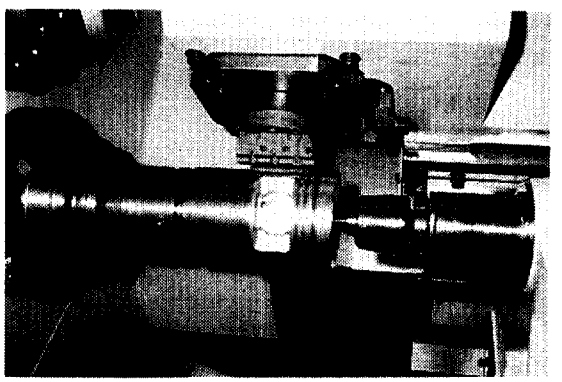


Photo. 1 Construction of cutting part

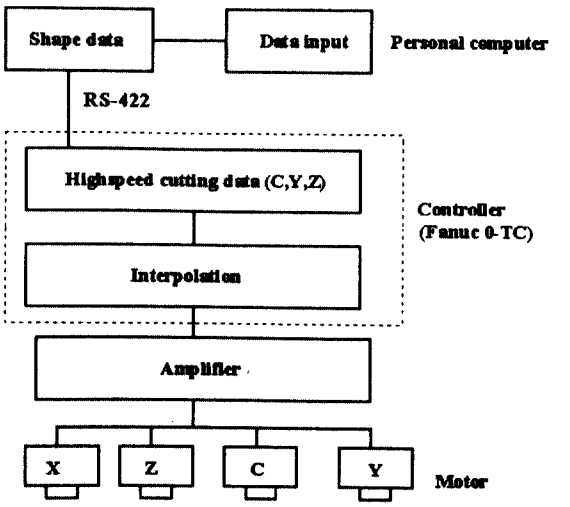


Fig. 5 Schematic diagram of control system

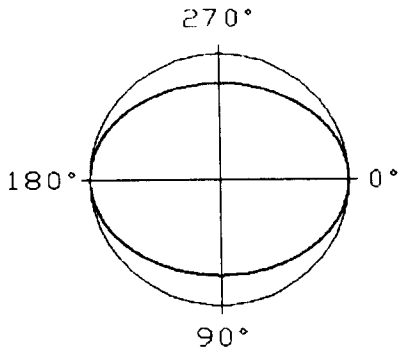
3.2 실험 방법

실험에 사용한 시험편 재료는 자동차 디이젤 엔진에 사용되는 피스톤으로 알루미늄을 주성분으로 한 합금(AC8A)이다. 또한 엔진의 내마모성을 향상시키기 위한 니켈계 오스테나이트(Austenite) 주철링이 삽입된 피스톤을 열처리 한 후 장경을 기준으로 가공 여유가 ϕ 0.3mm인 진원이 되도록 황삭가공한 소재이며, 피스톤의 형상 및 치수의 예는 Fig. 6과 같다. 본 실험에서 가공한 형상은 Ovality, Profile, Serration이며, 세가지 형상의 가공은 한 프로그램 내에서 완성되고 절삭 저항에 의한 형상 오차의 변화를 줄이기 위하여 황삭가공한 후 사상가공시 ϕ0.1mm를 가공했다. 또한 타원량과 프로파일이 위치별로 변화하는 피스톤을 C축의 회전수 1500rpm에서 가공하였다. 가공이 완료된 피스톤을 전용 측정기를 이용하여 설계값과 측정값과 오차를 확인했다.

제 Ⅳ 장 실험 결과 및 고찰

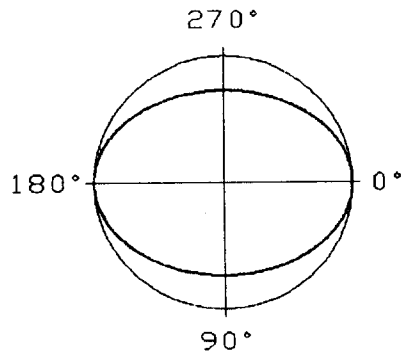
4.1 실 험 결 과

본 연구에서는 장경을 기준으로, 가공여유가 ϕ0.3mm이고 니켈계 오스테나이트 주철링이 삽입된 피스톤을 C



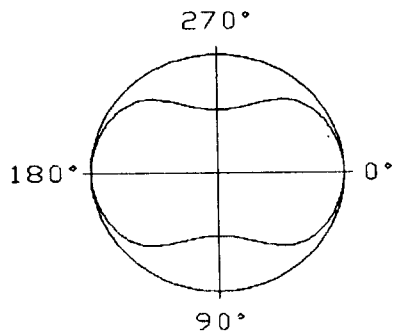
Section A-A (OVAL 0.5 mm)

각 도	기준원에서 편차 (반경)
0°	0.000
45°	-0.125
90°	-0.250
135°	-0.125
180°	0.000
225°	-0.125
270°	-0.250
315°	-0.125



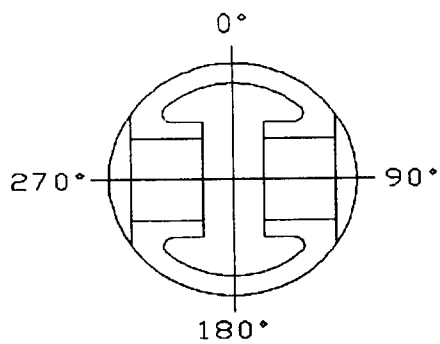
Section B-B (OVAL 0.6 mm)

각 도	기준원에서 편차 (반경)
0°	0.000
45°	-0.150
90°	-0.300
135°	-0.150
180°	0.000
225°	-0.150
270°	-0.300
315°	-0.150



Section D-D (OVAL 1 mm)

각 도	기준원에서 편차 (반경)
0°	0.000
45°	-0.175
90°	-0.500
135°	-0.175
180°	0.000
225°	-0.175
270°	-0.500
315°	-0.175



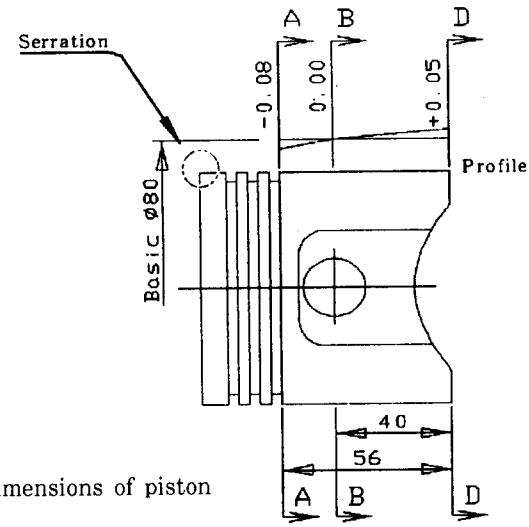


Fig. 6 Shape and dimensions of piston

축 회전수 1500rpm에서 타원량과 프로파일이 위치별로 변화하는 피스톤에서 Ovality, Profile, Serration 형상을 동시가공 하였다. 가공 완료된 피스톤을 전용 측정기를 이용하여 실제 입력값과 측정 데이터를 분석한 결과 허용영역 내에 있음을 확인하였다. Fig. 7에 타원량 ϕ 0.5mm 더블타원량 0.025mm의 측정결과를 나타내고 Fig. 8에 프로파일의 측정결과, Fig. 9에 세레이션의 측정결과를 나타냈으며 스커트(Skirt)부의 표면조도를 Fig. 10에 나타내었다.

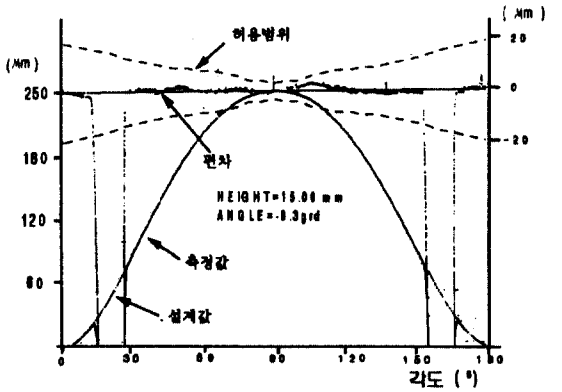


Fig. 7 Measuring results of double ovality

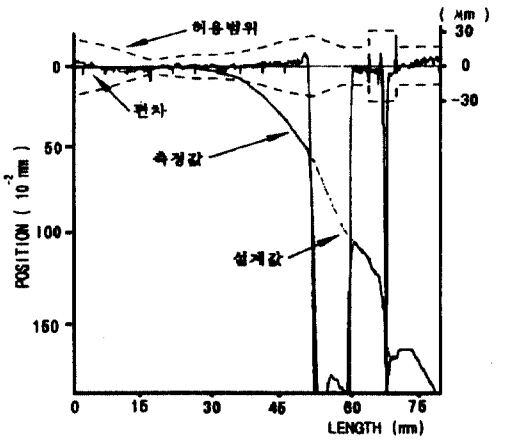


Fig. 8 Measuring results of profile

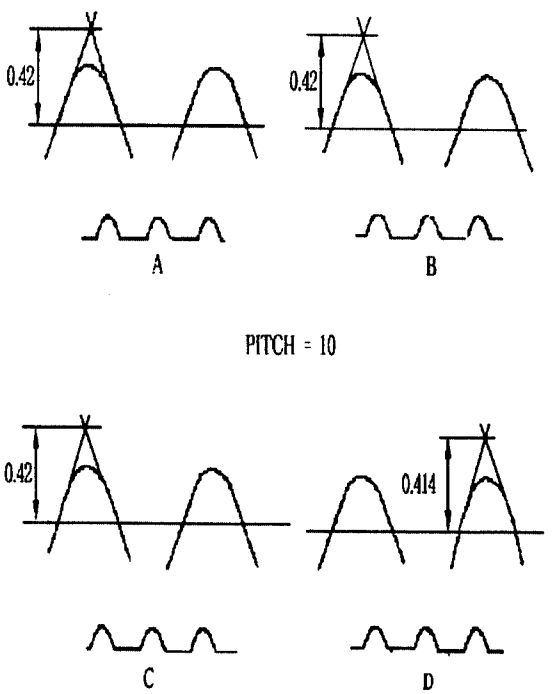


Fig. 9 Measuring results of serration

CUTOFF	0.8 mm	0.8 mm	0.8 mm
LENGTH	10.00 mm	10.00 mm	10.00 mm
V-MAG	2000	2000	2000
H-MAG	10	10	10
T-SPEED	0.3 mm/s	0.3 mm/s	0.3 mm/s
Ra	3.13 μm	3.12 μm	3.13 μm
Rmax	13.88 μm	15.88 μm	14.48 μm
Rz	13.71 μm	14.35 μm	14.02 μm
Sm	320.72 μm	320.04 μm	322.85 μm

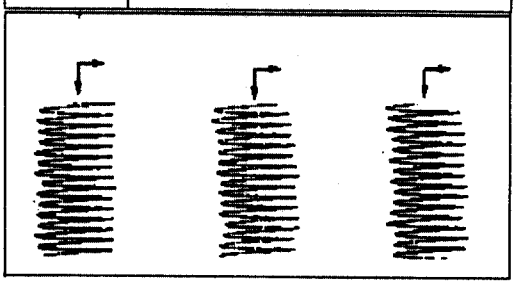


Fig. 10 Measuring results of roughness

4.2 고 찰

정규타원 φ0.5mm 더블타원량 0.025mm 등 각 위치별로 변화하는 타원량과 프로파일을 갖는 자동차용 피스톤의 Ovality, Profile, Serration의 형상을 C축 1500rpm으로 동시가공 하였다. 또한 퍼스널 컴퓨터에 입력된 Software의 이용으로 도면의 단편적인 데이터를 형상 데이터화하고, 기계어로 변환시킨 후 피스톤 형상의 이상 여부를 그래픽화된 화면과 NC 프로그램으로 확인했다. 입력 완료된 데이터를 RS-422 케이블과 NC측의 리모트 버퍼를 이용하여 DNC(Direct Numerical Control) 고속전송 및 고속가공하였다. 프로그램은 C축의 분할각도에 따라 고속위치결정축(Y축)의 동시제어로 Ovality를, C축의 회전과 Z축 이동의 동시제어로 Profile가공을 기본으로 C-Y-Z축 동시제어로 Ovality와 Profile을, C-X-Y축 동시제어로 세레이션 홈을 동시가공 하였다. 가공 완료된 피스톤을 전용 측정기를 이용하여 각 형상별로 측정데이터와 설계입력값을 비교 한 결과 허용치 내에 있음은 물론 편차 5μm 이내의 Ovality와 Profile을 얻을 수 있었고 2μm 이내의 표면조도 편차로 Photo. 2에서 나타난 물결현상이 나타나지 않도록 하였다. 또한 세레이션 홈부의 가공형상 및 가공 깊이도 원주방향(4개소) 모두 일정한 결과로써 실험장치의 동적 정밀도 및 각 축의 추종성이 양호함을 확인하였다. Photo. 2는 자동차 엔진에서 200간 운전후 피스톤의 형상을 나타낸 것으로 마모되지 않은 핀 방향부의 표면조도를 측정한 결과 10mm 구간에서 7μm의 편차가 발생하였다.

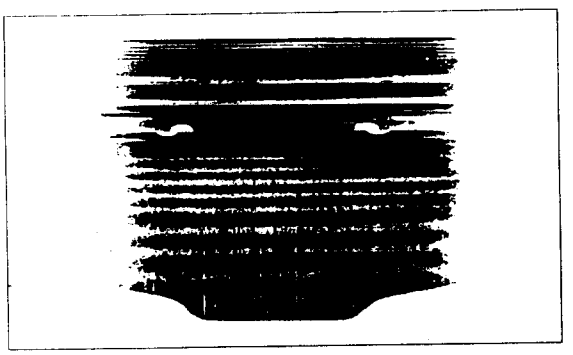


Photo. 2 200시간 운전후의 피스톤의 형상

제 V 장 결 론

CNC 선반에 고속 응답성을 갖춘 위치 결정 기구 Y축을 부가하여 C-Y-Z축의 동시 제어로 Ovality와 Profile을 동시제어 하고 C-X-Z축의 동시제어로 Serration 형상을 동시가공하고 데이터를 퍼스널 컴퓨터로 입력하여 고속가공 후 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 5μm이내의 Ovality와 Profile의 형상정도와 스커트부의 2μm이내의 표면조도 편차로 고정도의 피스톤 형상가공이 가능하였다.
2. 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 단편적인 피스톤 데이터를 형상 처리하고, 기계어로 변환시킨 후 입력형상을 확인할 수 있으므로 형상 변경이 용이하고, 다종의 피스톤에 대해 Data File의 변경만으로 바로 적용할 수 있었다.
3. 세레이션의 경우 원주방향(4개소) 모두 형상정도와 가공깊이가 일정한 결과로써 실험장치의 동적 정밀도 및 각 축의 추종성이 양호함을 확인하였다.
4. 향후 C축의 회전수와 형상정도를 더욱 향상시킴으로써 3중 타원, Eccentricity, Offset, 비대칭 타원의 피스톤 가공도 가능하게 될 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 조선대학교 수송기계부품 공장 자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구 되었음.

참 고 문 헌

1. G.Betz, H.Zellbeck, "Untersuchung zur Reibleistung der Kolbengruppe", MTZ, Vol. 47, No. 10, pp. 433, 1986.
2. 田中實, "ピストン外形 加工用 高速 CNC 旋盤の 開發", 內燃機關, Vol. 29, No. 12, pp. 72-80.
3. 山口智實, 東京大學 博士論文, 1988.
4. 三宅秀彦, "CNC 피스톤 가공기 TPS-3000과 가공

용 프로그램 데이터 작성 시스템", 기계기술, pp. 42-46, 1992.
5. 渡邊政治, 松崎哲夫, "AP2V CNC 高速 ピストン 旋盤", 豊田工機技報, Vol. 31, No. 2, pp. 82-92, 1990.
6. 김경석, 김성식, "CNC 선반을 이용한 타원 가공에 관한 연구", 한국공작기계기술학회 논문집, pp. 63-69, 1995
7. 平野秀和, "AP2V-CII 兩ドライブ形 CNC ピストン 旋盤", 豊田工機技報, Vol. 35, No. 1, pp. 32-40, 1994.
8. 화천기계, "CNC 피스톤가공기 HOT-1000과 가공용 프로그램 S/W HOTS", 기계자동화, Vol. 4, pp. 36-40, 1994.
9. 金 成植, "非眞圓 加工用 CNC 旋盤 開發에 關한 硏究", 碩士論文, 1994
10. 안 병규, "SPINDLE 포함한 多軸 MOTION 制御", CNC 콘트롤러 WORKSHOP 논문집, pp. 3-18, 1993.
11. FANUC LTD, FANUC Series (Catalog), Oct. 1990.