

열팽창을 고려한 심압대의 실험적 설계에 관한 연구

김성식*, 김경석**, 장완식**, 최정석***

A Study on the Experimental Design of Tail stock with Consideration Thermal Expansion

Sung Sik Kim*, Kyoung Suk Kim**, Wan Shik Jang**, Jeong Seok Choi***

Abstract

To make high accuracy cutting of long materials and a piston for the engines, it must be necessary to keep the thermal stability of spindle and tail stock in CNC lathe.

If a object is clamped at the ends, the thermal expansion and cutting resistance, in cutting process, generate the deflection of cutting objects. Especially, in the case of a piston ring, piston ovality and piston profile, the influences of deflection are very serious. In order to solve the problems, most of piston cutting are worked under simply support. However, the problems exist, yet. Therefore, this paper proposes the new structure of tail stock which can compensates the deflection.

Key Words : Tail stock(심압대), Thermal Expansion(열팽창), Piston(피스톤), Piston-ring(피스톤-링), Cutting resistance(절삭저항), Ovality(타원), Profile(프로파일), Sleeve(슬리브)

1. 서론

절삭가공 중 소모되는 에너지¹⁾를 분류하면 주 전단 영역에서 변형에너지(Deformation Energy), 칩이 경사면 위와 인선 밑으로 흘러갈 때 드는 마찰 에너지(Friction Energy), 칩이 휘는데 드는 에너지(Chip Curl Energy), 소재가 전단면을 지날 때 운동량 변화로 인한 에너지(Energy due to Momentum Change), 새로운 가공표면이 창출됨에 따른 표면 에너지(Surface Energy) 등으로 구분할 수

있다. 그런데 통상적으로 전체에너지의 약 70 % 이상이 전단 변형에너지로 쓰이고 30 %정도는 마찰에너지로 쓰이며 나머지는 거의 무시할 수 있을 정도로 작다. 이렇게 소모되는 에너지의 대부분은 열로 바뀌어 공구, 칩 및 공작물의 온도를 상승시키며 이로 인하여 절삭가공의 기술적, 경제적인 문제에 직·간접적으로 많은 어려움을 야기시키기 때문에 공구 및 작업조건²⁾에 대한 연구는 끊임 없이 계속되고 있다. 선삭 가공 중 가늘고 긴 소재를 가공하거나 대형 공작물을 가공하는 경우에는 절삭시간이 길

* 목포과학대학 기계설계학과
** 조선대학교 기계공학부
*** 목포과학대학

기 때문에 절삭할 때 발생하는 열이 소재에 영향을 주는 경우가 많다. 특히 엔진용 피스톤 링의 가공공정^(3,4,5)을 보면 내경 가공이 완료된 후 테스트 바-아(Test bar)와 같은 고정도의 축에 여러 개의 피스톤-링(Piston ring)을 조합한 후 동시에 가공을 하게 된다. 이때 주축의 정도는 물론 심압대(Tail stock)의 정도에 따라 가공정도는 크게 차이가 난다. 따라서 일반 CNC 선반의 정도 측정법^(6,7,8)과는 달리 주축과 심압대의 동축도를 중요 시 한다. 이는 재료를 절삭할 때 발생하는 절삭 저항^(9,10)(Cutting resistance)이 작아 기계정도의 B항목⁽⁸⁾에 영향을 미치지 않기 때문이다. 심압대의 초기 정도와 유지정도는 본체(Frame)의 구멍과 이동축(Quill)간의 틈새(Clearance)에 가장 큰 영향을 받는다. 통상적으로 이동축을 연삭 가공하고 이 축의 치수를 측정하여 본체의 구멍을 호닝(Honing)가공 하거나, 반대로 호닝을 먼저하고 그 치수에 맞추어 축을 연삭하는 방법으로 현장맞춤을 하게 된다. 하지만 조립 및 전후 이동을 하기 위해서는 필수적으로 틈새가 있어야 하고, 이 틈새는 가공정도에 악영향을 끼치게 된다.

본 연구에서는 종전 방식의 심압대를 기준으로 하고 구멍과 이동축 사이에 인칭동^(11,12)의 슬리브(Sleeve)를 사용하여 틈새를 줄임으로써 주축에 대한 정도 및 흔들림 정도를 향상시키고 소재의 열팽창량을 흡수할 수 있는 구조로 설계하고 실험을 통해 정도향상은 물론 정도 유지도를 향상시킬 수 있는 심압대 구조에 대하여 연구하였다.

2. 소재의 열변형과 절삭저항

소재의 열변형⁽¹³⁾은 평균온도 상승에 의한 단순한 열팽창 및 온도차에 의해 휘어진다. 온도상승에 의한 간단한 연신율은 식 (1)과 같고 주축 단의 고정과 같은 외팔보 상태에서 온도차에 의한 굽힘은 식 (2)와 같이 나타나며, 주축과 심압대 양단을 지지하는 경우처럼 양단 지지보에서는 온도차에 의한 굽힘은 식 (3)과 같이 나타난다.

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta t \cdot l \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{\alpha}{2} \cdot \Delta t \cdot \frac{l^2}{h} = \frac{\alpha}{2} \cdot \Delta t \cdot \lambda \cdot l \quad (2)$$

$$f_1 = \frac{\alpha}{8} \cdot \Delta t \cdot \frac{l^2}{h} = \frac{\alpha}{8} \cdot \Delta t \cdot \lambda \cdot l \quad (3)$$

여기서, Δl 는 연신율, f_1 은 휨의 크기(mm), Δt 는 온도상승 혹은 온도차(℃), α 는 선팽창계수, λ 는 l/h 로써 구조물의 세장비를 나타낸다. 하지만 선삭 가공할 때 발생되

는 열, 특히 소재에 전달되는 열을 측정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 소재에 열을 가하고 심압대 추력(Thrust force)을 변화시키며 소재가 0.002 mm 이상 변화되는 점을 실험을 통하여 얻었다. 대상의 소재는 SM45C로써 승용차 피스톤의 대표적인 $\phi 100$ mm, 피스톤 링을 가공할 때 주로 이용하는 봉의 길이인 1000 mm와 동일하게 선정하였다. 이때 중량은 61.7 kgf 이고 SM45C의 비열은 0.115 kcal/kg℃, 따라서 필요열량은 7.1 kcal/℃ 이고 3배로 하여 21.3 kcal/℃ 이며 2 ℃ 상승을 목표로 하여 42.6 kcal의 열량이 필요하다.

$$1 \text{ kcal} = \frac{1}{860} \text{ kw} \quad (4)$$

식 (4)에서 2 ℃를 올리기 위해서는 50 w가 필요하고 식 (5)에서 968 Ω 의 저항이 걸리게 된다.

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (5)$$

여기서, 선경 $\phi 1.6$ mm의 600 v 비닐절연전선의 선 저항은 20 ℃에서 9.09 Ω /km이므로 100 km가 필요하게 되어 현실적으로 불가능하다. 따라서 밴드형으로 검토하되 별도의 게이지로 확인이 가능한 동과 방지용으로 검토하였다.

전력 10 w/m, 허용온도는 110 ℃ 인 동과 방지용 히터⁽¹⁴⁾를 1000 mm의 소재에 권선 20, 피치를 50 mm로 하여 실험하였으며, 실험 주위온도는 28 ℃이다. 장치의 개략도는 Fig. 1, 온도의 상승 및 심압대 추력은 Fig. 2와 같다. 또한 선삭 가공할 때의 절삭 저항값은 압전체(Piezoelectric material)를 이용한 압전형 공구 동력계 KISTLER 9257A⁽⁹⁾를 이용하여 절삭속도 150 m/min에서 SM45C의 절삭깊이와 피이드에 따라 절삭저항을 측정하고 피스톤을 가공할 때 발생하는 절삭 저항값도 측정하였다.

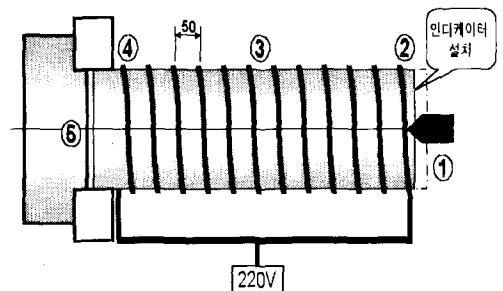


Fig. 1 Construction of thermal expansion

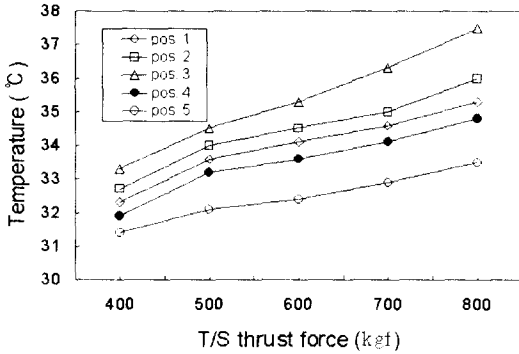


Fig. 2 Measuring results of thermal deformation

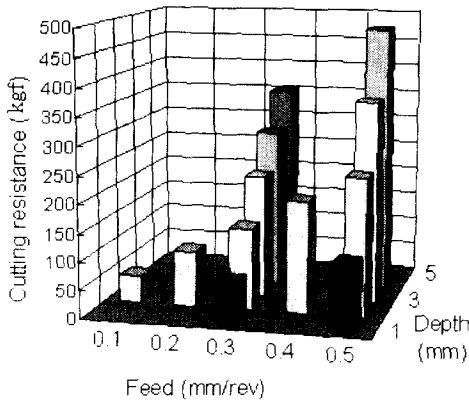


Fig. 3 Measuring results of Cutting resistance (SM45C)

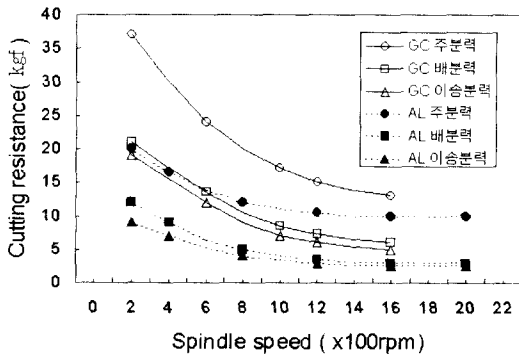


Fig. 4 Spindle speed vs. Cutting resistance (Piston)

SM45C의 선삭 가공 시 절삭저항은 Fig. 3, 피스톤 가공 시의 절삭저항은 Fig. 4 와 같다.

3. 심압대 구조와 정도

심압대의 정도는 절삭저항이나 기계구조에 따라 주축의 정도와 동일하게 각 회사의 노하우에 의해 조립이 되고 있다. 하지만 자체정도는 어떤 조건이든 동일하다고 볼 수 있다. 자체정도라 함은 이동축의 반복정도가 대표라 할 수 있고 이동축이 전진한 상태에서 절삭력 정도의 하중을 X 축 방향으로 가했을 때 변하는 정도, 변화 후 복원정도를 정의하고 있다. 또 하나의 동적 정도로서는 열팽창을 흡수할 수 있는 구조의 요구를 희망하게 된다.

3.1 보통의 심압대

통상적인 심압대의 구조와 절삭을 보면 Fig. 5와 같이 양단이 고정된 상태로 만일 열에 의한 소재의 열팽창이 있다면 결국 소재가 휘거나 심압대 추력이 크다면 기계 전체의 변형을 초래시키게 된다.

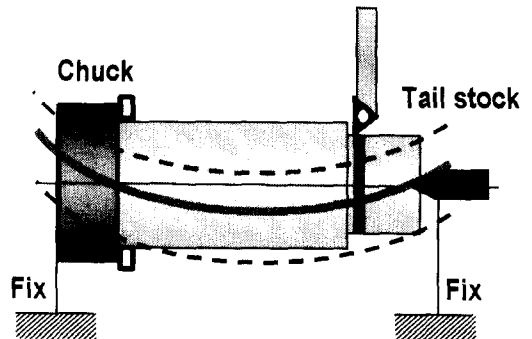


Fig. 5 General of tail stock

3.2 개선의 심압대

심압대를 개선하기 위해서는 첫째, 본체의 구멍과 이동축(Quill)간의 틈새를 줄이는 일, 둘째, 열팽창을 흡수하기 위하여 소재의 연신율(Δl)에 맞추어 후진할 수 있도록 해야 한다. 따라서 틈새를 줄이기 위하여 연신율이 크고 베어링이나 마찰부분에 사용되는 10~12 %의 주석(Sn)과 1.0~1.5 %의 인(P)이 함유된 인청동을 사용하여 압력을 가함으로써 틈새를 줄이고 일정 압력이상이 되면 이동축이 후진 가능도록 설계하였다.

Fig. 6의 슬리브(Sleeve) 형상에서 단위 길이 당 표면적은 $50.3 \text{ cm}^2/\text{cm}$ 이고, 최대 공급 유압력 50 kgf/cm^2 에서 클램프력(Clamp Force)은 251.5 kgf/cm^2 가 된다. 따라서 슬리브의

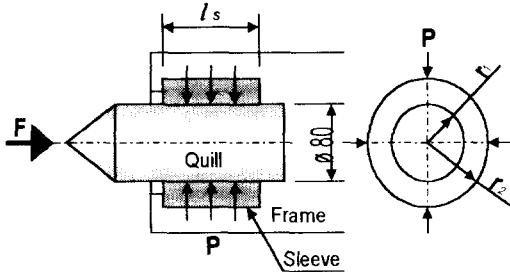


Fig. 6 The sleeve shape of tail stock

길이 60 mm 일 때 최대 클램프력은 식 (6)에 의해 1509 kg f가 되며 단위 압력 당 클램프력은 30.18 kgf가 된다

$$F = l_s \times F_c \quad (6)$$

여기서, l_s 는 슬리브의 길이 60 mm이고, F_c 는 단위 면적당 클램프력 251.5 kgf/cm²이다.

또한 단면방향의 검토에서 슬리브의 두께를 1.5mm로 했을 때 반경방향의 변위는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} U_{r_1} &= -\frac{2P \cdot r_1 \cdot r_2^2}{E(r_2^2 - r_1^2)} \\ &= 0.896 \times 10^{-4} \times P(\text{cm}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, E 는 인철동의 탄성계수로써 0.72×10^6 kgf/cm²이다. 최대 유압력 50 kgf/cm²에서 슬리브의 최대 변위는 0.045 mm가 된다. 정도나 강성차원에서 심압대 본체와 이동축의 틈새는 없어야 한다. 하지만 조립성을 위하여 틈새는 불가피하고 틈새를 최소화하기 위하여 현장맞춤 작업으로 0.005 mm의 틈새를 목표로 하였고 이 틈새를 없애기 위한 압력 5.6 kgf/cm²를 제외한 압력만이 실제 클램프력으로 작용하여 1340 kgf가 된다.

4. 실험방법

4.1 소재고정의 반복정도

직경 φ 40 mm, 길이 600 mm, 진직도 0.003 mm이고, 양단지에서 끝단 흔들림 0.002 mm인 테스트 바-아를 사용하고 주축에서의 고정오차를 줄이기 위하여 척(Chuck)을 사용하지 않고 데드(Dead) 센터를 사용하여 양단을 지지하고 공구대에 인디케이터(Indicator)를 부착하여 테스트 바-아의 높이 차를 측정하였다. 이때 설치오차 및 선반의 이동축 정도에 의한 오차를 줄이기 위해 반복테스트를 하였다.

4.2 하중에 따른 변화와 복원정도

심압대 이동축의 최대 이동량은 보통 100 mm 정도이며 가능한 한 돌출량을 작게 하여 사용하는 것이 가공정도에 영향이 작지만 다종의 제품을 가공할 때는 매회 심압대 전체의 이동이 난해하기 때문에 길게 돌출 시켜 사용하기도 하고 자동화라인 가공, 특히 피스톤은 소재 착탈을 위하여 전 길이의 돌출이 불가피 하다. 따라서 심압대 이동축의 돌출량에 따라 각각으로 실험을 하였으며, 하중은 CNC 선반에서 황삭 가공 시에 걸리는 500 kgf까지의 하중으로 시험을 하였다. 시험을 위한 개략도를 Fig. 7에 나타낸다.

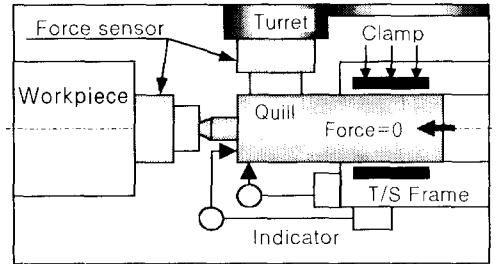


Fig. 7 Schematic diagram of load addition system

4.3 가공정도

자동차 엔진용 피스톤의 대표적인 형상은 단면 방향에 타원(Ovality), 길이방향에 슬통형의 프로파일(Profile) 형상을 갖고 있다. 이중 프로파일의 형상은 심압대의 정도가 중요한 역할을 한다. 따라서 Photo. 1과 같이 소재를 고정할 때 주축과 심압대 양단을 고정하지 않고 지지하는 정도의 압력으로 가공을 하고 있다. 또한 일반 센터

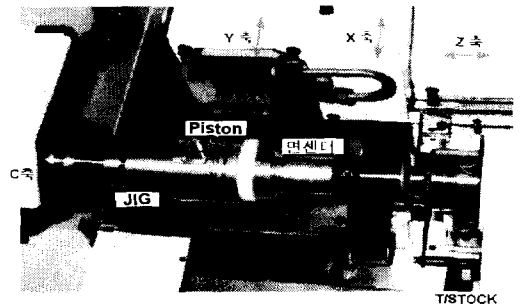


Photo. 1 Construction of piston chucking

고정이 아닌 별도의 면이면서 회전이 가능한 센터를 이용하게 된다. 이에 새로운 방식의 심압대를 이용하고 기존의 피스톤 가공방식^(15, 16)에 준하여 가공을 하고 그 결과 중 타원과 프로파일의 정도가 허용치 내에 있는지를 평가하였다.

5. 실험결과 및 고찰

φ40×600 mm 이고 흔들림 0.002 mm인 테스트 바-아를 사용하여 주축에 대한 심압대의 반복정도를 측정한 결과 0.003 mm 이내로 종전방식(최대 0.015 mm) 대비 훨씬 높은 정도이고, 심압대의 돌출길이와 유압력의 변화에 대한 정도 차 역시 미소한 양으로 이는 가공정도에 큰 영향을 미치고, 특히 다량의 연속가공을 하는 경우 안정된 정도로 가공이 가능하리라 생각된다. 소재고정의 반복정도 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

심압대 이동량은 작업조건에 따라 돌출량이 수시로 변

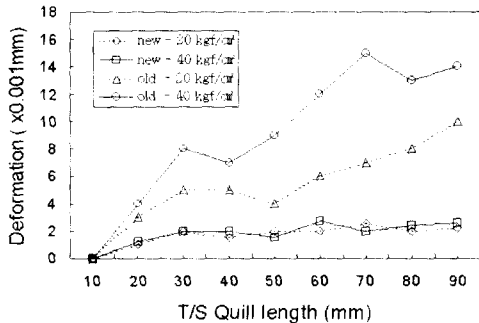


Fig. 8 Measuring results of Repeatability

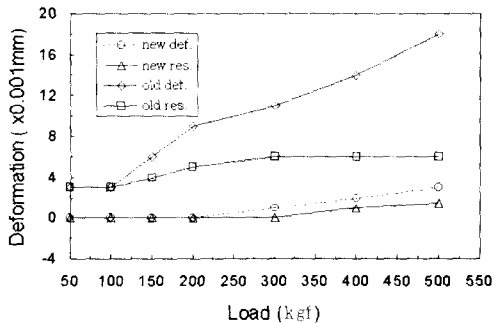


Fig. 9 Measuring results of deformation & restoration (position 50 mm - 30 kgf/cm²)

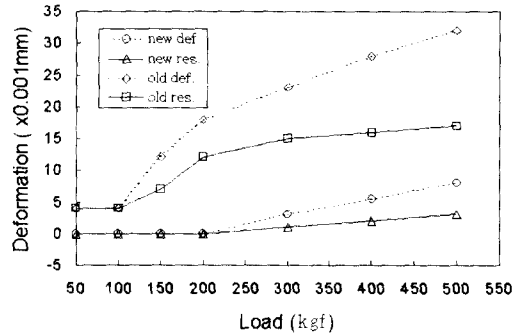


Fig. 10 Measuring results of deformation & restoration (position 90 mm - 30 kgf/cm²)

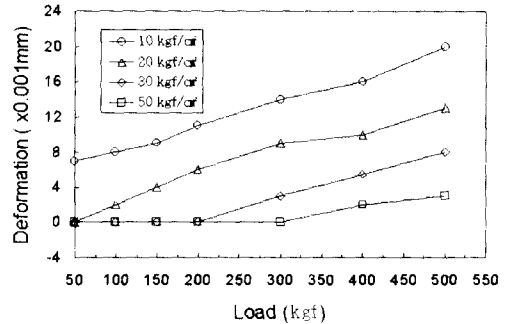


Fig. 11 Measuring results of deformation (position 90 mm)

경되고 가공조건에 따라 가해지는 하중 역시 다르게 부여 된다. 하중의 변화와 돌출량의 변화에 따른 변위를 측정할 결과 50 mm 돌출에서 X축 방향으로 최대하중을 가했을 때 0.003 mm의 변위, 90 mm에서 0.008 mm의 변위가 나타났으며 복원력에 있어서도 종전의 방식대비 높은 정도로 가공정도를 향상시킬 수 있으리라 본다.

하중에 대한 변위와 복원 실험 결과를 Fig. 9, Fig. 10에 나타내고 클램프 압력에 대한 변위 결과를 Fig. 11에 나타내며, Fig. 12에 축방향(Z축방향) 변위가 일어나는 한계를 나타내었다.

Fig. 12의 결과에서 압력 12 kgf/cm²까지는 틈새를 없애는데 필요한 압력이고 최대 클램프력은 1150 kgf 임을 알 수 있다.

실제 엔진에 사용하는 피스톤 50 개를 연속가공 후 전수검사를 통하여 타원과 프로파일의 형상을 분석한 결과 타원의 장경을 기준 하여 좌우 30° 범위에서의 편차가

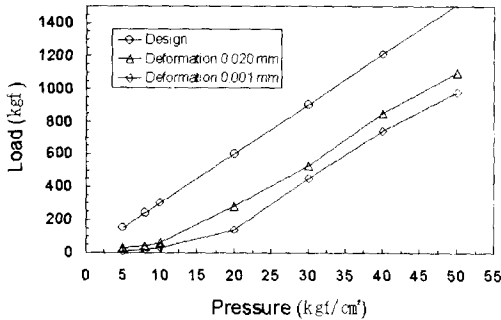


Fig. 12 Measuring results of absorption

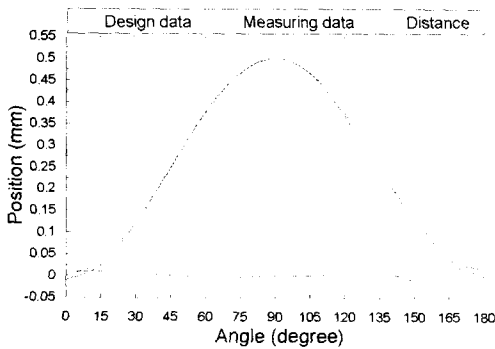


Fig. 13 Measuring results of Ovality

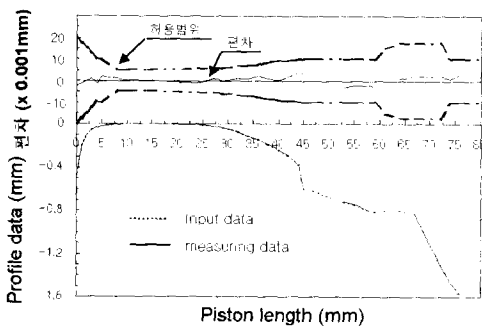


Fig. 14 Measuring results of Profile

0.002 mm 이내이고, 프로파일 형상 역시 허용치 내의 오차를 나타내었다. 이 결과로 신규 피스톤 가공 시 초기 세팅(Setting)은 물론 양산가공까지의 시간을 단축시킬 수 있음을 확인하였다. 피스톤의 측정결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타낸다.

6. 결 론

선삭에서 긴 소재의 가공 또는 CNC 절삭에 의해 엔진용 피스톤을 고정도로 가공하기 위해서는 주축의 정도는 물론 심압대의 정도는 필수적인 요건이라 할 수 있다. 종래의 심압대 구조와 달리 새로운 방식의 구조를 갖는 설계와 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 심압대 본체 구멍과 이동축의 틈새를 줄임으로써 심압대의 반복정도를 향상시키고, 돌출량과 클램프 압력에 대한 정도 차를 줄일 수 있음을 확인하였다.
- (2) 피스톤 가공 시 형상정도를 향상시킬 수 있으며 초기의 시험가공은 물론 양산가공까지의 시간을 단축시킬 수 있다.
- (3) 소재의 열팽창을 흡수할 수 있는 구조로 가공정도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 “1998~1999년도 한국과학재단 지정 조선대학교 지역 협력 연구센터인 수송기계 부품 자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었습니다.”

참 고 문 헌

- (1) 양민양, “절삭가공 이론과 실제”, 청문각.
- (2) 이봉진 외, “절삭데이터 핸드북”, 한국과학기술원 정밀기계 연구센터, 1981.
- (3) 동양피스톤, “피스톤-피스톤 링 가공 공정 데이터 북”, 1996.
- (4) 유성기업, “피스톤-피스톤 링 기술데이터”, 1997.
- (5) ART, “Piston Catalogue & Technical Data”, 1984.
- (6) 한국공업규격, “공작기계의 시험방법 통칙”, KSB4001.
- (7) 한국공업규격, “수치제어기계의 시험방법 통칙”, KSB4204.
- (8) 한국공업규격, “수치제어 선반의 시험방법 및 검사”, KSB4207.
- (9) KISTLER 9257A Manual & Catalogue.
- (10) 현동훈, “선삭 가공의 절삭저항과 절삭동력”, 기계설계기술, Vol. 11, No. 5, pp. 121~130, 1996.

- (11) 한국 공업 규격, “베어링용 동-철계 합금주물”, KS D 60004, 1966.
- (12) 박환규 외 2인, 최신 기계재료학, 보문당.
- (13) 백인환 외 5인, “공작기계 (구동기구 및 설계원리)”, 청문각.
- (14) 태영전열, 동과 방지용 히터 매뉴얼, 1998.
- (15) 김성식 외, “비진원 가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회, Vol. 13, No. 4, pp. 152~162, 1996.
- (16) 田中實, “ピストン外形 加工用 高速 CNC 旋盤の開発”, 内燃機關, Vol. 29, No. 12, pp. 72~80.