

볼나사를 이용한 고속 TOOL 이송장치 개발에 관한 연구

A Study on the Development of High Speed Tool Feed System by Ball screw

*김성식(※) **김경석 ***양승필 ****정현철 ****김상복

* : 조선대학교 대학원

** : 조선대학교

*** : 동아전문대학교

**** : 조선대학교 대학원

KEYWORD

Ball screw(볼나사), Piston(피스톤), Learning control(학습제어), Ovality(타원), Preload(예압), Grease(구리스), Slide way(안내면), Turcite(타카이드), Fine Ceramics(파인세라믹스)

1. 서 론

자동차용 피스톤의 단면형상은 엔진의 가동상태, 고온 상태일 때에 진원이 되도록 열팽창을 고려해서 설계되고 상온상태에서는 편 방향과 편 직각방향의 두께가 균일하지 않기 때문에 피스톤의 단면형상은 타원에 가까운 형상이 되고 이송방향도 직선이 아닌 3차원 형상¹⁾으로 된다. 따라서 피스톤가공에는 비진원 윤곽절삭을 필요로 하게 된다. 종래 피스톤의 가공에는 모방절삭방식이 이용되고 있지만 모방절삭의 경우에는 각각의 피스톤형상에 대해서 모방모델을 제작하지 않으면 안되고 그 모델 자체의 제작시간이 필요하게 된다. 또 C축의 회전수는 스타일러스의 추종성 한계로 800RPM 정도가 한계이고 스타일러스의 마모로 품질이 저하된다. 최근 엔진의 저연비, 고출력의 연구가 진전됨에 따라 피스톤 형상도 수시로 바뀌어 모방절삭방식으로는 대응이 어려워지고 CNC 선반에 의한 가공을 행하고자 하는 요구가 높아지고 있다. 단면형상이 비진원인 축의 가공을 행하는 경우 C축의 회전에 동기해서 바이트의 위치결정을 행하는 제어기구의 개발이 선행되어야 하지만 특히 품질을 높이고 생산성을 향상시키기 위해서는 위치결정 기구의 고속응답성과 절삭력에 견딜 수 있는 충분한 힘이 필요하게 된다. 고속위치결정 장치의 구동방식은 1987

년 일본 Izumi Industries, Ltd.에서 Minoru Tanaka에 의해 개발된 전자흡인력방식²⁾ 외에 전기유압서보방식³⁾, Linear motor 방식^{4),5)}, 압전 액츄레이터 방식^{4),6)} 등이 있다. 전기유압 서보 방식은 응답성이 낮고, 유온관리를 포함한 보전이 어려우며 장치가 대형이다. 리니어모터 방식은 출력이 낮고, 장치가 대형이다. 압전 액츄레이터 방식은 변위가 작고 장치가 대형이다. 전자흡인력 방식 역시 변위가 작다는 단점이 있다. 그러나 각 방식별로 성능향상을 목적으로 많은 연구와 개발로써 이 분야를 이끌어 가고 있다. 이에 반하여, 우리 나라의 고속이송 Tool 이송장치 개발의 수준은 초보적인 수준이지만 최근 그 응용기술에 관한 연구가 활발해지고 있다. 고속위치결정 장치로서 또 하나의 방법은 서보 모터와 볼나사를 이용하는 것이다. 이 방식은 코스트, 장기간에 걸친 안정성, 속도대응성 및 제어가 용이하며 사용이 용이하다.

본 연구에서는 서보 모터와 볼나사를 연결하고 Learning control(학습제어)^{7),8)} 조작법을 적용하여 서보계의 지연이나 절삭력에 의한 외란등을 보상함으로써 고속가공이 가능토록 하고 실제 피스톤을 가공하여 위치결정 정도와 응답성을 평가하고자 한다.

2. Tool 이송장치 고속화

2.1 절삭저항^{9),10)}

피스톤의 형상과 재질은 엔진의 종류에 따라 다르게 설계되지만 본 연구에서는 기준경 $\varnothing 80$ mm, Pitch 0.3 mm이고 재질은 AC8A이며 타원 형상을 갖는 피스톤을 대상으로 하였다. 이러한 피스톤 가공의 생산성을 향상시키기 위해서는 Tool 이송장치의 고속화가 필수이며 이 장치는 절삭저항을 충분히 이겨내도록 설계되지 않으면 안된다. 따라서 가공깊이 0.3mm에서 C축 회전수 별로 절삭저항을 측정하였다. 측정은 KISTLER 9257A에 의해 실시하였으며 측정결과를 Fig. 1에 나타내었다.

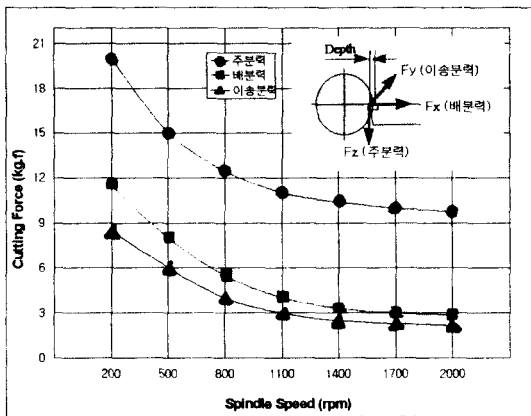


Fig. 1 Spindle Speed vs. Cutting Force

2.2 서보모터의 선정¹¹⁾

타원형상의 피스톤을 가공하기 위해서는 C축의 회전에 대해 공구의 위치가 동기 되지 않으면 안된다. 또한 C축의 회전속도를 높이기 위해서는 공구이송장치의 설계가 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 서보 모터와 볼나사를 이용하여 회전 운동을 직선운동으로 변환하여 전달하고 고속화를 위해 특별한 제어방식을 부여하였다. 서보모터는 슬라이드 구성의 부하 이너서와 절삭시 발생하는 부하 토크를 충분히 이겨내고 응답성이 높은 모델의 선정이 필요하다. Tool 이송장치에 사용되는 모터에 의한 C축의 회전속도를 이론적으로 살펴보면 다음 식에 의해 알 수 있다.

$$N \leq \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{L}{2\pi} \frac{k^2}{1+k} \frac{T_1 - T_2}{(J_1 - J_2)s}} \quad (1)$$

여기서, 타원의 장축 반경을 a(mm)라 하고 단축 반경을 b(mm)라 하며

N : C축의 회전수(rpm)

J₁ : 모터 이너서(kgf · cm · sec²)

J₂ : 부하 이너서(kgf · cm · sec²)

L : 모터 1회전당 이동량(mm)

k = b/a (피스톤의 장 · 단경비)

T₁ : 모터 최대토크(kgf · cm)

T₂ : 부하 토크(kgf · cm)

s = a - b (Y축 스트로크 mm)를 나타낸다.

모터의 사양은 Table. 1과 같으며 볼나사 리이드에 대한 식(1)의 결과치를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Specification of Servo motor

Item	Unit	Specification
Output Power	kw	1.8
Max. Torque	kg · cm	480
Rotor Inertia	kg · cm · sec ²	0.010
Max. Speed	rpm	3000
Max. Acceleration	rad/sec ²	48,000

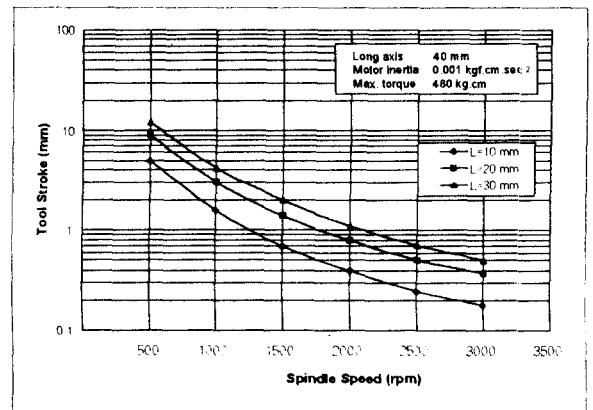


Fig. 2 Spindle Speed vs. Tool Stroke

2.3 볼나사의 선정^{12),13)}

Fig. 2에서 서보모터의 회전각이 적을수록, 즉 서보모터 1회전당 이동하는 거리(볼나사의 리이드)가 클수록 C축의 회전수를 높일 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 볼나사의 리이드가 크게 되면 축방향 부하토크가 낮아지기 때문에 강

성, 부하용량, 속도 등의 사용환경을 고려한 설계가 필요하다. 또한 위치결정 정도와 반복정도를 향상시켜야 하고 볼의 편마모에 대한 대책이 선행되지 않으면 안된다. 따라서 본 실험장치에서는 볼나사의 리이드를 10mm로 선정하고 정도등급은 C1급, 예압은 25kg.f로써 예압방식은 Oversize방식을 택하였다. 예압방식은 더블너트 예압방식과 싱글너트 예압방식이 있으나 가능한 부하이너서를 최소화 할 목적으로 싱글너트 예압방식인 Oversize 방식으로 하였다. 볼의 편마모 방지 대책은 마모를 줄이기 위한 특수 Grease(구리스)를 사용하고 볼의 위치를 순환시키기 위하여 전체 이동거리를 20mm로 하여 피스톤 가공중 왕복운동을 할 수 있도록 마크로 프로그램을 삽입시켰다. Table 2.는 볼나사의 제원을 나타낸다.

Table 2. Specification of Ball Screw

Item	Specification
Dia of Shaft	Ø20 mm
Lead	10 mm
Grade	C1
Basic Lead	9.99937 mm
Ball dia	Ø3.175 mm
Turns and Circuits	2.5 × 1
Preload	25 kg.f
Preload type	Over size
Lubrication	Abrasion Grease

2.3 SLIDE WAY

안내면의 구성은 부하이너서를 최소화시켜야 하므로 최대한 가볍게 하여야 하고 Stick slip이 없도록 해야 한다. 슬라이드의 본체는 구상흑연 주철에 특수합성수지 Turcite를 부착후 스크래핑하고 슬라이드는 두랄루민(AL7075)에 파인세라믹스¹⁴⁾ AL₂O₃를 코팅하여 구성하였다. 스크래핑은 최소이송단위와 로스트모션을 체크하면서 인치당 접촉면을 12개 이상을 목표로 하였다. 로스트모션의 데이터는 전체이동거리에 대해 3개소를 측정하였고 관련데이터를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸다.

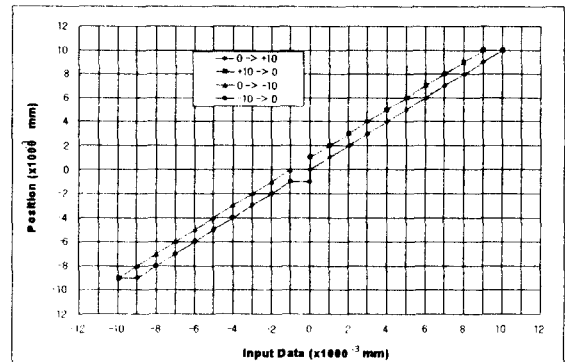


Fig. 3 Lost motion data(stroke 10 mm)

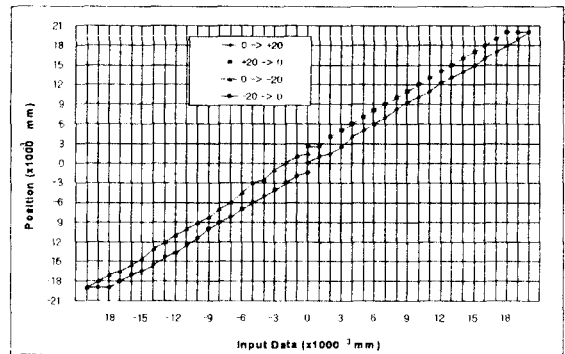


Fig. 4 Lost motion data(stroke 19 mm)

2.4 제어방법^{7),8)}

피스톤 가공 데이터는 C-X-Z-Y 축을 동시 제어토록 구성하고 X축은 초기 위치결정을 담당하며 C-Z-Y축의 고속사이클 가공 G05기능으로 가능하게 된다. C축의 회전에 대하여 공구대(Y축)의 이송을 정밀하게 하기 위하여 Y축은 7.8축 보드에 연결하였으며 학습제어 기능을 부가하였다. 학습제어는 임의의 주기로 반복되는 지령에 대하여 지령과 피이드백의 편차가 "0"이 되도록 보정량을 만들어 내어 최종적으로 편차가 "0"에 가까운 치수로 된다. 학습기능에는 일반모드, 학습중단모드, 학습계속모드, 보정데이터 모드로 4개의 기능이 있다. 이 기능들은 각각 특징이 있지만 본 장치에서는 보정데이터 모드를 선택하였다. 이 모드는 전원을 넣어 최초의 고속사이클 가공시에만 학습을 하고 다음 회부터의 고속사이클 가공은 최초가공 학습시에 만들어진 데이터를 사용하여 움직인다. 이 기능은 장시간 기계적 변동이 없는 경우에 사용되며 2회째부터는 학습을 하지 않기 때문에 위치편차가 수렴되기까지의 시

간이 불필요하게 되어 사이클타임을 단축시킬 수 있으며 주기마다의 반복성도 양호하다. 여기서 초기에 만들어진 보정데이터는 다른 모드로 변경하거나, 전원을 OFF하지 않는 한 지워지지 않는다. 데이터의 보간은 최대 0.5msec, 즉 C축 1회전을 40개 블록(9°)으로 분할하므로써 식 2의 고속 위치 결정축(Y축)의 주파수 f (Hz)는 100Hz가 가능하다.

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

여기서 N(rpm)은 C축 회전수이다.

Fig. 5에서 C축 1회전당 공구이동의 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. 5는 학습제어의 개략도를 나타내며 $H(s)$ 는 기본 주기인 L 과 같은 지연시간 L 을 갖는 Controller로 초기 함수 1주기 분으로부터 연속적으로 주기 신호를 발생하는 함수발생기구로 된다. 이때 $H(s)$ 는 식 (3)과 같다.

$$H(s) = \frac{1}{1 - \exp(-sL)} \quad (3)$$

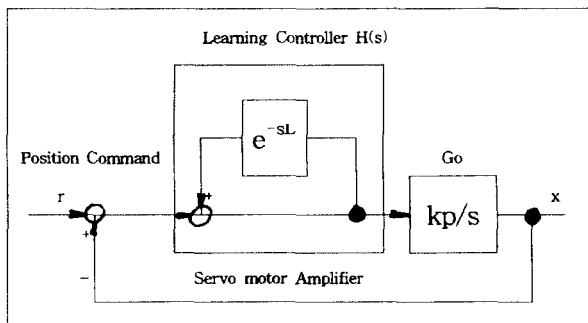


Fig. 5 Schematic diagram of learning control

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

3. 실험장치¹⁵⁾

선삭에서 원통절삭시 이송방향이 반전하는 경우 X축에서의 백래쉬 발생으로 그 부분에 형상오차가 발생하고 중량이 무겁기 때문에 피스톤 가공의 고속화가 불가능하다. 따라서 X축은 피스톤 직경에 따라 위치결정만 행하고 X축 위에 Y축을 부가하여 고속위치결정이 가능하도록 하였다. 슬라이드부 중량은 4.7kg으로 관성을 최소화하고 구동모터는 100Hz까지 응답 가능한 FANUC社의 모델을 선정하였으며 모터의 관성모멘트 대비 슬라이드부의 관성모멘트를 55% 이내로 설계하였다. 실험장치의 전체구성은 CNC 선반에 Y축을 부가하고 주축구동을 서보모터로 구동하며 피스톤 가공을 위한 별도의 소프트웨어를 부가하였다. Photo. 1에 실험장치의 가공부 구성을 나타내고 Fig. 6에 Control 시스템의 구성을 나타낸다.

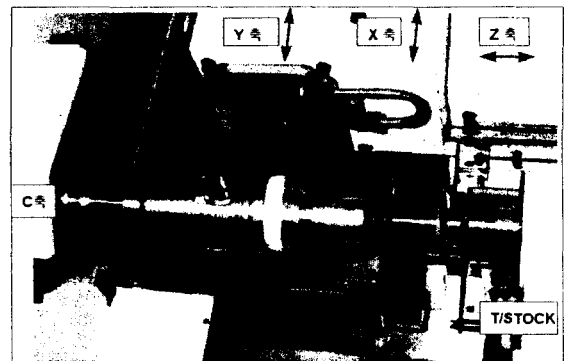


Photo. 1 Construction of cutting part

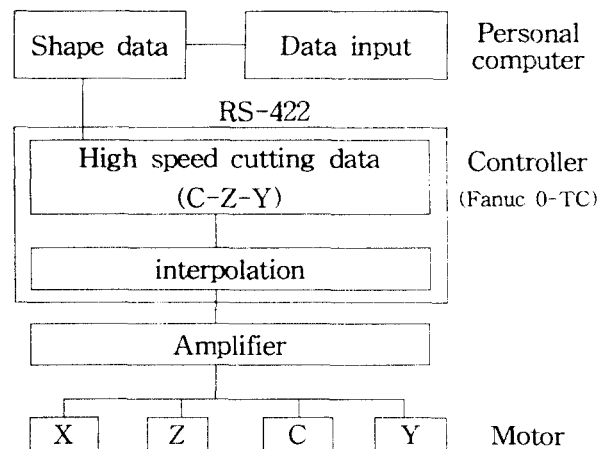


Fig. 6 Schematic diagram of control system

4. 실험결과 및 고찰

피스톤의 기준경 $\varnothing 80$ mm이고 진원가공이 완료된 소재를 이송속도 0.3mm의 조건으로 가공하여 가공정밀도를 정리하고 정밀도가 유지되는 범위에서 회전수 대비 공구의 스트로크를 정리하였다. 가공정밀도는 위치편차로 나타낼 수 있으며 장경기준으로 $\pm 30^\circ$ 위치는 $3\mu\text{m}$ 이내이고 전체 $10\mu\text{m}$ 이내임을 확인하였으며 공구대 구동모터의 능력대비 80%의 성능을 얻을 수 있었다. 또한 모터의 최대능력인 3000rpm의 경우도 시도하였으나 G05 고속가공 시작시 기계의 오동작으로 불가능하였다. Fig. 7은 2500rpm의 결과이고, Fig. 8은 1800rpm, Fig. 9에 1250rpm의 결과를 나타낸다. Fig. 10은 모터 자체의 능력 대비 구동시스템의 능력을 나타낸다.

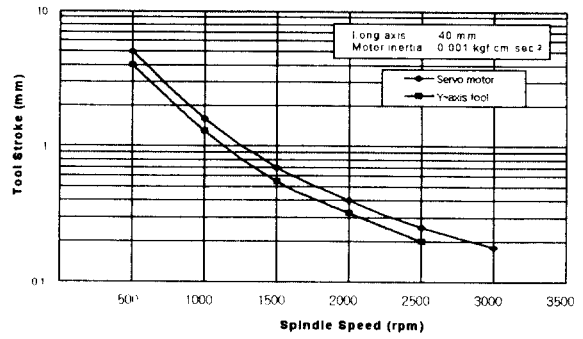


Fig. 10 Spindle speed vs. Tool stroke

5. 결 론

피스톤 등과 같이 타원형상을 가공하기 위한 공구 이송장치를 서보 모터와 볼 나사를 이용하여 제작후 가공정밀도를 평가하고 모터 자체의 최대 응답성과 구동장치의 응답성을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정적상태의 위치 편차가 $2\mu\text{m}$ 이내이고 피스톤 가공정밀도가 장경기준 30° 위치에서 $3\mu\text{m}$, 전체형상에서 $10\mu\text{m}$ 이내임을 확인하였다.
2. 구동축의 관성모멘트를 구동모터의 55% 이내로 설계하여 C축 회전수와 공구의 이동거리 능력을 모터대비 80%를 얻을 수 있었다.
3. 최대 2500rpm 가공으로 공구대의 응답성을 8Hz까지 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 山本英繼, “고성능화, 고신뢰화에 대응한 기계장치의 열대책 설계”, 機械設計技術, Vol. 7, No. 4, pp. 41-45, 1992.
2. 山口智實, 東京大學 博士論文, 1988.
3. Toshiro HIGUCHI外3名, “電氣油壓サーボ機構による高速非圓形輪廓切削旋盤の開発”, 精密工學會誌, Vol.56, No.2, pp.293-298, 1990.
4. 山川陽一他3名, 豊田工機技報, Vol. 33, No.3, pp. 14-19, 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.

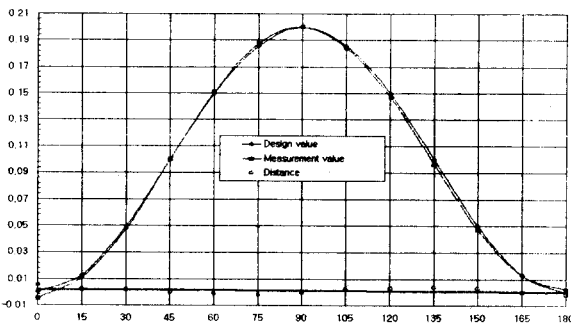


Fig. 7 Measuring results of ovality(2500rpm)

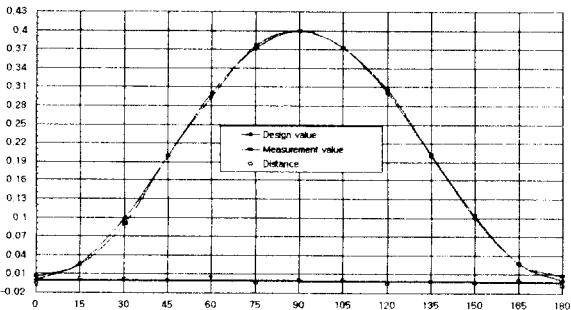


Fig. 8 Measuring results of ovality(1800rpm)

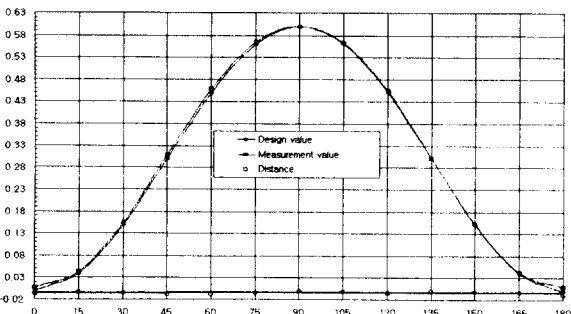


Fig. 9 Measuring results of ovality(1250rpm)

82-92, 1990.

6. 田中實, “ピストン外形 加工用 高速 CNC 旋盤の開發”, 内燃機關, Vol. 29, No. 12, pp. 72-80.
7. Toshiro HIGUCHI, Tomomi YAMAGUCHI, “Cutting Tool Positioning Control by Periodic Learning Control Method and Inverse Transfer Function Compensation”, システムと制御, Vol. 30, No.8, pp. 503-511, 1986.
8. FANUC LTD, “デジタル AC サーボ 取扱説明書”, A-63639-005, 1991.
9. KISTLER 9257A Manual & Catalog
10. 현동훈, “선삭가공의 절삭저항과 절삭동력”, 기계설계기술, Vol.11, No.5, pp.121-130, 1996.
11. FANUC LTD, “FANUC AC Servo Motor Series Catalog & Manual, 1992.
12. NTN 株式會社, “精密 ホールねじ Catalog, No. 6202, 1989.
13. 大塚 二郎・坂戸 啓一郎, 精密位置決め機構設計, 工業調査會, 1996.
14. 水田進・河本邦仁, “セラミック 材料”, 東京大學出版會, 1986.
15. 김경석, 김성식 외, “비진원 가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회, Vol. 13, No. 4, pp. 152-162, 1996.