

# 나노미터 표면가공시 절삭조건에 관한 연구

문재일\*, 김부태\*, 김영일\*\*, 허성중\*\*

## A Study on the Cutting Conditions in Machining for Nanometer Surface

Jae-Il Moon\*, Boo-Tae Kim\*, Young-Il Kim\*\*, Seoung-Jung Heo\*\*

### ABSTRACT

Since early 1960s, the high precision machining technology, so called ultra-precision technology or nano technology, has been developed in many field based on single point diamond turning technology. The major application of this technology is the optical components with aspherical surfaces.

Now a days, customer requires the smaller and lighter optical elements, such as camera, video and etc., with higher performance for convenience. So, the manufacturer focuses on the ultra-precision technology. Thus, this technology becomes the major target to challenge the advanced barrier for the next machining technology.

**Key Words** : ultra-precision(초정밀), aspherical surface(비구면), optical element(광학기기)

### 1. 서론

생산공학 학술대회(International Institution for Production Engineering Research, CIRP)에서 초정밀공학의 중요성에 관해 1983년 Taniguchi 가 제창한 후 1984년 Loewen 이 1987년 Mckeown 이 서로 개인의 의견을 발표 한 바 있으며 많은 학자들이 이구동성으로 초정밀공학의 중요성을 제기 하였다. 특히 초정밀 금

속가공(Ultraprecision metal cutting, UPMC)은 20세기중 가장 성공한 생산공학의 결과라고 말하고 있다. 초정밀가공은 주로 단결정 다이아몬드공구를 사용하는 초정밀절삭(UPMC), 초정밀 Grit으로 된 다이아몬드휠(Wheel)을 이용한 초정밀연삭, 극소한 Grit을 이용하는 초정밀 폴리싱 등으로 분류할 수 있다. 초정밀가공 수준은 끊임없이 향상되어 왔으며, 시대에 따라 목표 정도가 요구되는데 현재의 초정밀가공 목표는 형상정도 100nm,

\* 삼성전자 생산기술센터 정밀기기팀  
\*\* 두원공업전문대학 기계과

표면조도 5nmRa로 하고 있으며, 이를 만족시키는 가공 방법의 하나가 단결정 다이아몬드 공구를 사용한 초정밀 절삭이다. 초정밀절삭은 대부분 첨단기기(High tech device) 부품으로 1989년이후로 초정밀가공기(Diamond Turning Machine, DTM)를 이용한 초정밀 가공 부품, 즉 Camcorder용 EVF Lens, Camera lens, CDP 대물 LENS, P/J TV Lens 등의 제품들을 국산화에 성공을 하여 생산해 왔으며 향후 사용범위가 점차 확대되고 더욱 엄격해지는 가공정도를 만족시키기 위하여 다이아몬드 공구를 사용한 초정밀절삭 과정의 해석을 위한 체계적인 연구가 요망된다. 따라서 본 연구에서는 DTM장비의 특성을 파악하고, 종래의 경험적인 방법으로 습득한 가공조건의 타당성을 조사함과 아울러, 이를 분석하여 적정 가공조건을 도출 및 가공 DB를 구축하고자 한다.

2. 초정밀절삭의 이론적 배경<sup>(6)(7)</sup>

초정밀부품의 사용범위가 점차 확대되고 더욱 엄격한 가공정도를 만족시키기 위하여 초정밀절삭 과정에 대한 완전한 이해가 요구되고 있으나, 표면형상에 관계되는 인자들의 수가 매우 많고 절삭과정 중에 이들 인자들이 상호작용을 하는 복잡성으로 인하여 이에 대한 해석을 어렵게 하고 있다. 선삭가공시 발생하는 절삭력의 각 분력은 Fig.1에서 보여 주듯이 주분력(Fz), 배분력(Fy), 이송분력(Fx)의 3분력으로 나눌 수 있으며, 이를 다시 가공력(cutting force)과 마찰력(friction force)으로 나누는 경우도 있다.

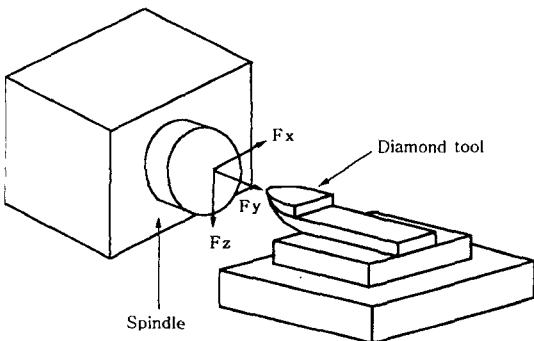


Fig. 1 Three-dimensional diamond cutting process

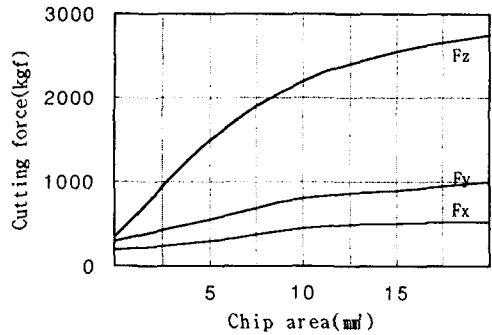


Fig. 2 Relationship between cutting force and variable chip area

일반적인 선삭가공시 각각의 가공조건에 대한 절삭력의 경향을 Fig.2에서 보여주고 있다. 주분력이 가장 큰 경향을 보이며 배분력이 주분력의 3정도로 나타나고 있다.

선삭가공시 가공결과에 영향을 미치는 요인은 크게 4가지로 분류할 수 있다.<sup>(9)</sup>

- 1) 절삭조건 : 절삭깊이, 이송속도, 절삭속도, 절삭유 상태
- 2) 공구형상 : 선단반경, 경사각, 여유각, 칩 브레이커, 어프로치각
- 3) 공작물 재질 : 강도, 경도, 연성, 화학성분
- 4) 공구 마멸 : 플랭크 마멸, 크레이터 마멸, 선단 마멸

이외에도 공작기계의 동특성이나 외부의 환경변수(온도, 습도)등이 있으며, 초정밀 가공이 발전됨에 따라 온도에 의한 영향이 매우 중요한 인자로 등장하고 있다. 이들 중에서 절삭조건에 의한 영향은 가장 중요하며 가공결과에 직접적인 영향을 주는 인자이다. 특히 이송속도의 경우는 in-out modulation을 발생시켜 표면조도에 영향을 미치고, 재생 채터를 발생시키기도 하므로 가장 중요한 인자이다. Diamond 공구형상을 Fig.3에 표시한다. 공구형상이 가공결과에 미치는 영향은 가공물이 평면이 아닌 곡면가공일 경우 특히 심하게 나타나며, 선단반경의 형상정도가 가공면의 형상에 전사되므로 매우 중요한 인자가 된다.

공구마멸의 각 부위를 Fig.4에 표시한다. 공구마멸은 공작물의 표면거칠기를 저하시킬 뿐만 아니라, 큰 절삭력을 발생시켜 가공온도를 상승시키므로 표면에 잔류응력이나 가공변질층을 두텁게 할 우려가 있으므로 공구의 수명을 예측할 수 있는 방법을 개발하여 수명이 다한 공구

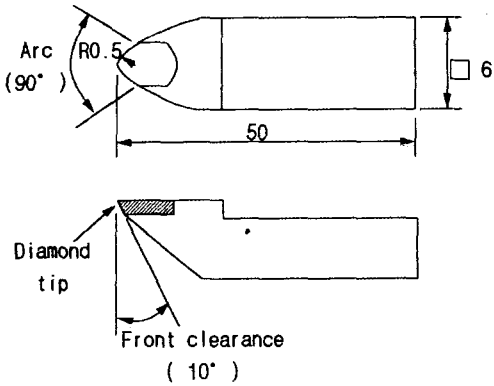


Fig. 3 Shape of diamond turning tool (Conical controlled waviness 0.1 $\mu$ m)

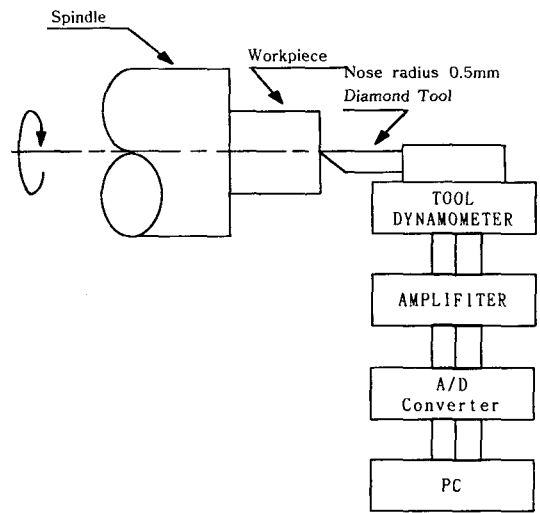


Fig. 5 Experimental setup of the DTM

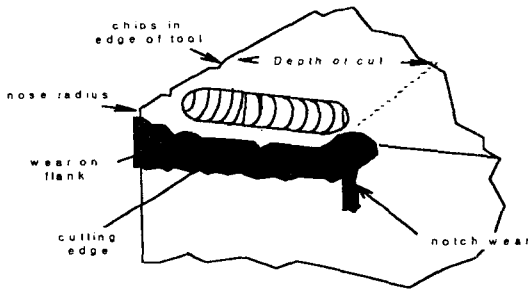


Fig. 4 Some types of wear on turning tools

를 적기에 교체시키는 것도 중요하다. 이들 인자 중 가장 큰 영향을 미치는 절삭조건의 변화에 대한 가공결과를 획득하여 분석 하고자 한다.

### 3. 실험장치 및 결과

#### 3.1 실험장치

선삭가공시 절삭력을 측정하기 위하여 구성된 실험장치의 개략도는 Fig.5에서보여주고 있다. 실험은 단결정 Diamond 공구와  $\phi 60 \times 20$  크기의 알루미늄 소재에 대해 절삭속도와 공구수명의 Diagram을 그려 상수n과 c를 결정하는 Reichel의 방법은 많은 피삭재와 시간이 소요됨으로 Brandsma가 고안한 단면절삭(Cross cutting) 방법으로 절삭실험을 실시하였다. DTM에 설치된 압전형 공구동력계(Kistler 9257B)를 이용하여 얻은 아날로그 3축 절삭력 신호를 A/D 변환기(DAS-16F)를 통하여

Table 1 Experimental apparatus

장비명	Maker	Model	Specification
Tool Dynamometer	Kistler	9257B	Natural frequency : 4kHz Tangential force(Fz) : 0-10kN Radial force(Fy) : -5-5 kN Feed force(Fx) : -5-5kN
Amplifier	Kistler	5007	Frequency range : 0-180kHz Output current : $\leq \pm 5$ mA Output voltage : $\pm 100$ V Output impedance : 100 $\Omega$ Accuracy : $\pm 1\%$
A/D Board	Kiethly	DAS-16F	16 Channels : 16SE Resolution : 12 bits Accuracy 0.01% of reading $\pm 0.5\%$
Diamond Turning M/C	Taylor Hobson	Nanoform 300	Resolution : 2.5nm (0.1 $\mu$ " ) X-Axis Straightness : $\leq 0.15\mu$ m Z-Axis Straightness : $\leq 0.15\mu$ m Work Spindle Runout : $\leq 0.05\mu$ m
Surface Test	Taylor Hobson	FormTalysurf Series 2	Traverse Length : 120mm Straightness : 0.5 $\mu$ m/120mm Tip Radius : 2 $\mu$ m Stylus force : 70-100mg Resolution : 1nm

PC로 전송하여 데이터 처리를 하였다. 실험에 사용된 장비의 사양은 Table 1에 표시하였다. 가공된 공작물을 평가하기 위해 측정식 표면조도계를 이용하여 컷 오프 (Cut-off)를 0.08mm로 중심선 평균거칠기(Ra)로 표면 거칠기를 측정하였다.

#### 3.2 DTM의 특성 파악

DTM 장비의 특성을 파악하기 위하여 가공하지 않을

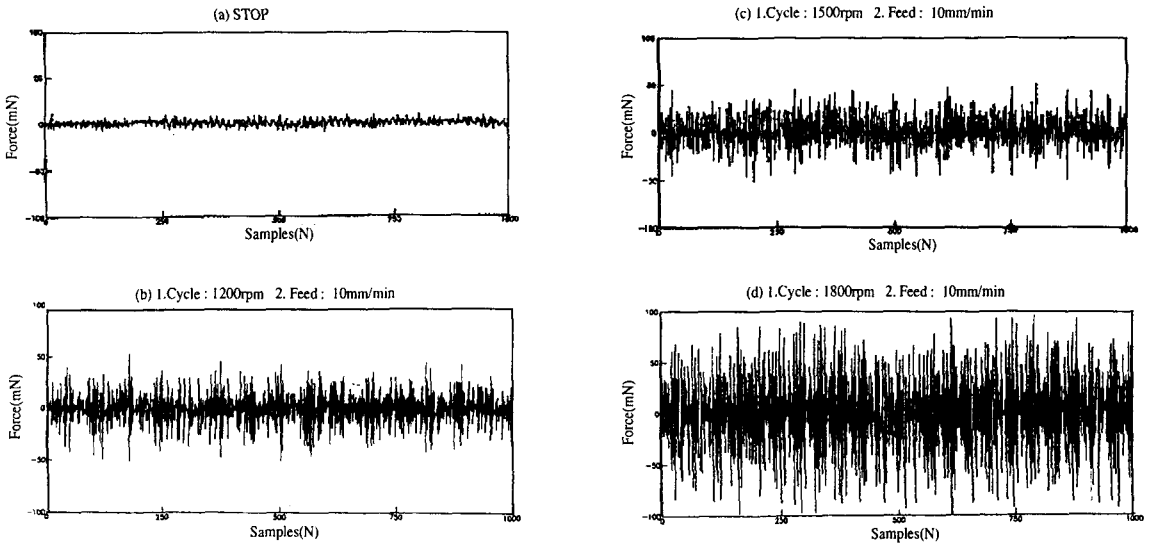


Fig. 6 Tool dynamometer signal on idling

경우 각 조건들에 대한 공구동력계의 신호를 비교 분석한다. 즉, 공구동력계에서 나오는 신호는 공구동력계에 부가되는 힘이며 이것은 공구동력계에 부착된 압전소자가 변형을 일으켜 힘을 생성하므로 진동신호로 판단하여도 무관하다. 스펀들과 테이블이 정지한 상태에서 공구동력계의 신호가 Fig.6(a)에 표시하였다. 신호의 분산이 매우 적으며, 각 방향에서의 힘의 표준편차는 2~4mN 정도이다. 공회전시 회전수에 따른 공구동력계의 신호를 Fig.6(b)~(d)에 표시한다. 여기서 보면 회전수 1800rpm의 경우 진동이 매우 심하며, 1200rpm과 1500rpm에서의 신호는 거의 유사한 경향을 나타내고 있다.

### 3.3 실험방법

3.2에서 파악된 DTM의 특성에 따라 회전수에 따른 절삭력과 표면거칠기를 조사해 보고, 이송, 절입의 영향을 각각 조사하여 각 인자의 영향을 비교한다. 회전수 1500rpm, 절입3 $\mu$ m, 이송3mm/min인 경우의 절삭력과 표면거칠기를 Fig.7에 표시하였다.

### 3.4 회전수에 따른 가공특성

회전수에 따른 절삭력, 표면거칠기를 각각 Fig.8, Fig.9에 표시하였다. 통상적인 가공의 경우 주절삭력( $F_z$ )이 가장 큰 경향을 보이나, 본 실험에서 얻은 결과는 배분력( $F_y$ )이 가장 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 절삭깊이가 미소하고, 면절삭이라는 특성 때문이라고 생각된다.

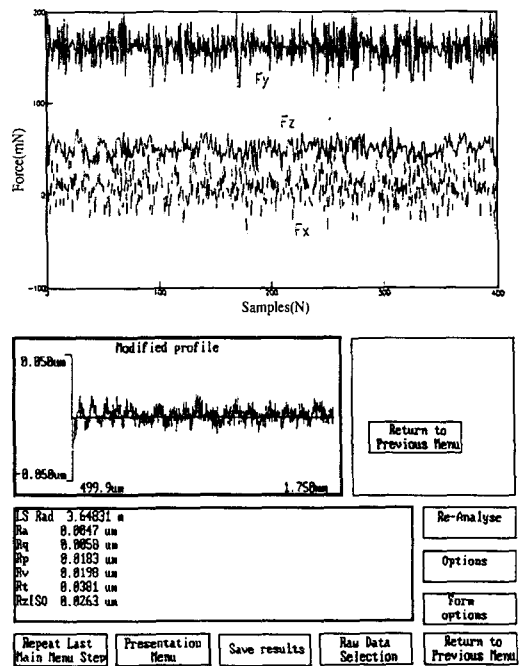


Fig. 7 cutting force and roughness  
(Speed:1500rpm, Feed :3mm/min, Depth of cut :3 $\mu$ m)

다. 이송분력( $F_x$ )은 거의 동일하지만 가장 큰차이를 보이는 것은 주분력이며 1500rpm, 1600rpm에서 가장 낮은 수치를 보여 절삭이 원활한 상태에서 연성모드 가공이

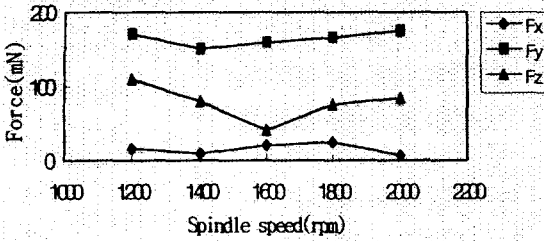


Fig. 8 Relationship between cutting force and spindle speed (Feed :3mm/min, Depth of cut :3=μm)

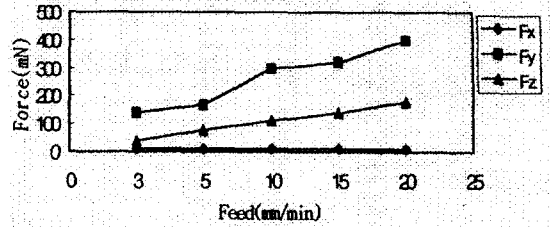


Fig. 10 Relationship between cutting force and feed (Spindle speed : 1500rpm, Depth of cut :3=μm)

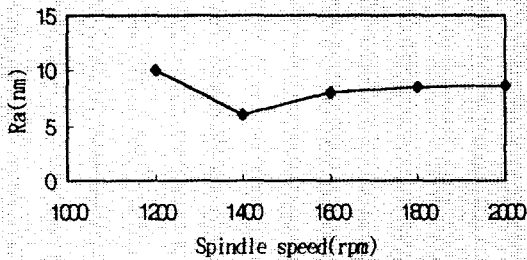


Fig. 9 Relationship between surface roughness Ra and spindle speed (Feed :3mm/min, Depth of cut :3=μm)

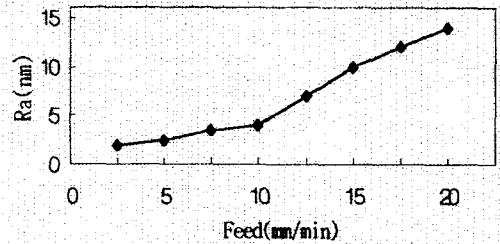


Fig. 11 Relationship between surface roughness Ra and feed (Spindle speed : 1500rpm, Depth of cut :3=μm)

이루어지고 있음을 알 수 있다. 1200rpm, 2000rpm에서는 3분력이 모두 증가하는 경향을 보여 절삭상태가 경성모드에 가깝다는 것을 알 수 있다. 표면거칠기의 경향을 보면, 절삭력이 최소인 1500rpm, 1600rpm에서 가장 좋은 결과를 보이며, 1200rpm에서 거칠기가 가장 나쁜 것을 알 수 있다. 이는 절삭력이 작은 연성모드 가공에서 표면거칠기가 가장 양호하며, 절삭력이 상대적으로 큰 1200rpm에서 경성모드에 가까운 가공이 진행되어 표면거칠기가 나쁘게 되는 것을 알 수 있다.

### 3.5 이송에 따른 가공조건

이송에 따른 절삭력, 표면거칠기를 각각 Fig.10, Fig.11에 표시하였다. 이송에 따른 절삭력의 경향을 보면, 이송이 클 수록 절삭력이 크게 나타나며, 이는 이송이 클 수록 절삭면적이 증가하기 때문이다. 각 분력의 비를 보면 이송분력의 회전수를 변화시킨 경우와 마찬가지로 거의 변화가 없으며 주분력과 배분력은 선형적으로 증가함을 보이고 있다. 회전수를 변화시킨 경우와 비교하여 보면 절삭력이 거의 선형적으로 변화하며, 주분력의 선형성이 더욱 강하다. 절삭력이 거의 선형적으로 증가하는데

비해 표면거칠기는 거의 제곱에 비례하여 불량하게 됨을 볼 수 있다. 회전수를 변화시킨 경우와 비교해 보면 주분력이 표면거칠기에 가장 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

### 3.6 절삭깊이에 따른 가공특성

절삭깊이에 따른 절삭력, 표면거칠기는 각각 Fig.12, Fig.13에 표시하였다. 절삭깊이가 증가하면 절삭면적이 증가하므로 절삭력은 크게 됨을 볼 수 있고, 절삭깊이에 따라 이송분력의 증가 경향이 뚜렷함을 볼 수 있다. 그러

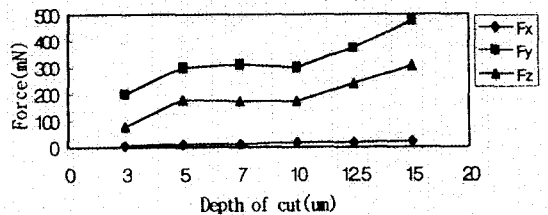


Fig. 12 Relationship between cutting force and depth of cut (Feed :5mm/min, Cycle :1500rpm)

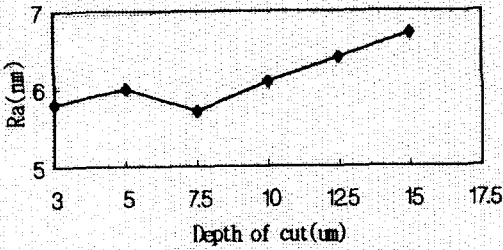


Fig. 13 Relationship between roughness and depth of cut (Feed :5mm/min, Cycle : 1500rpm)

나 절삭깊이가 커짐에 따라 표면거칠기가 증가하지만, 위의 두 가지 조건과 비교해 보면, 그 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 경험적인 방법에 근거한 가공을 체계적으로 실험을 통해 측정하고, 이를 기초로 진단 및 가공에 영향을 미치는 각 인자들의 영향을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) DTM의 특성은 1500rpm 부근에서 안정적인 경향을 보였다.
- 2) 초정밀가공시 주절삭력보다 배분력의 절대값이 2배 정도 크게 나타났다.
- 3) 표면거칠기는 회전수 1500rpm, 이송 3mm/min, 절입 3um일때 4.7nmRa의 결과를 얻어 적정조건으로 나타났다.
- 4) 이송이 증가함에 따라 절삭력은 증가하며 표면거칠기는 제품에 비례하여 나빠진다. 그러나 한계점 이하에서는 이송이 작으면 오히려 배분력이 주분력보다 크게 나타나는데 이것은 버니싱(Burnishing)의 작용으로 표면거칠기가 나빠지는 현상이다.
- 5) 초정밀가공시 절입이 증가하면 절삭력은 증가하지만,

표면거칠기에 미치는 영향은 적다.

#### 참고 문헌

1. N.Taniguchi, "Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing," Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 3, pp. 573~582, 1983.
2. E. G. Loewn, "Perceived Limitations on Future Advances in Ultraprecision Machining," Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 413~415, 1984.
3. P. A. Mckeown, "The role of Precision Engineering in Manufacturing of the future," Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 2, pp. 495~501, 1987.
4. N. Ikawa et al, "Ultraprecision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future," Annals of the CIRP Vol. 40, No. 2, pp. 587~594, 1991.
5. 윤영식, "다이아몬드 공구를 사용한 정밀선삭과정의 해석," 연세대 학위논문, 1992.
6. M. C. Shaw, "Metal Cutting Principles," Oxford Science Pub., 1991.
7. E.M.Trent, "Metal Cutting," Butterworth the Heinemann, 1991.
8. 김동원, "기계공작법," 청문각, 1986.
9. 이종항, "신경회로망과 절삭력을 이용한 선삭가공시 발생하는 공구마멸의 예측," 연세대 학위논문, 1994.
10. W. Konig, "High precision turning of hardened steel parts," 8th IPES, 1995.