

절삭유 필터링에 따른 엔드밀 가공면 입자 임베딩 현상에 관한 연구

김전하[#], 홍태용*, 이종환**, 강명창***, 김정석****

A Study on the Particle Embedding Phenomena on Machined Surface according to Cutting Fluid in End Milling

Jeon-Ha Kim[#], Tae-Yong Hong*, Jong-Hwan Lee**, Myung-Chang Kang***, Jeong-Suk Kim****

ABSTRACT

With the development of high speed and accuracy machining, the micro-chips are formed in the machining process and broken particles are circulated with the cutting fluid. The surface roughness and accuracy of part are deteriorated because the metal particles included in the cutting fluid are embedded on machined surface. In this study, the influences of particles for the machined surface according to filtering degrees are evaluated and the embedding mechanism is suggested.

Key Words : Cutting Fluid(절삭유), End Mill(엔드밀), Filtering(여과), Particle Embedding(입자 임베딩)

1. 서 론

절삭가공에서 대부분 공구와 피삭재가 접촉하는 부분에 절삭유제를 사용함으로써 공구와 공작물의 냉각과 윤활, 칩의 마찰계수 감소, 칩의 배출 및 제거, 가공 표면의 방청 등의 효과를 거둘 수 있기 때문에 공구수명 및 가공 정밀도 향상을 위해 절삭유가 주로 사용되어 왔다^[1]. 이러한 다량의 유제 분사를 통한 냉각·윤활방식이 작업환경과 인체에 영향을 미

치기 때문에 최근에는 친환경적인 오일미스트나 냉풍방식이 도입되고 있지만, 아직도 절삭유 분사를 위한 순환계(유제탱크, 펌프, 모터, 노즐 등)는 대부분의 공작기계에 기본적으로 장착되어 시판되고 있고, 수용성 절삭유가 범용으로 많이 사용되고 있는 실정이다^[2,3].

최근에는 고속가공에 의한 고속·고정도·고품질가공 실현을 위하여 소직경 엔드밀 공구에 의한 금형과 부품의 가공이 주를 이루고 있다. 따라서, 가공조건들이 낮아지기 때문에 이로 인해 발생하는 칩도 작아서 절삭유제와 함께 순환할 가능성이 커지게 되었다. 이렇게 발생한 미세한 칩이나, 발생하는 칩으로부터 분리되어 생성되는 미세한 금속입자 등이 절삭유제에 포함되어 순환하게 되면 절삭유 순환계에 속하는 부품의 수명을 감소시키거나, 막힘에 의해 분사압의 저

교신저자 : 부산대학교 ERC/NSDM
E-mail : jhakim@pusan.ac.kr

* 한국폴리텍대학

** 부산기능대학교 메카트로닉스과

*** 부산대학교 ERC/NSDM

**** 부산대학교 기계공학부

하 또는 과부하에 의한 펌프, 모터의 고장을 유발할 수도 있다. 그리고, 금속 입자가 절삭유내 유·무기물들과 결합하여 부패를 가중시켜 악취 등이 발생하여 작업장의 환경에도 악영향을 주고 작업자들에 피부 질환 등의 문제를 일으키기도 한다^{4,5)}.

또한, 정밀도가 요구되는 부품이나 금형가공에서 금속입자가 절삭유에 포함되어 순환하게 되면 가공면에 악영향을 미칠 수도 있게 된다. 특히, 전자부품과 같은 경우에는 가공면에 박힌 이물질이 방전 현상을 일으키거나 탈락된다면 제품 성능에 치명적인 손상을 입히게 될 것이고, 자동차 또는 항공기 부품의 경우 가공 부품 표면에 남아 있는 칩 등의 이물질이 부품간의 조립 후 마찰하게 되면 제품의 수명단축 및 파손으로 위험을 초래할 수도 있을 것이다.

본 연구에서는 절삭유에 대한 분석을 ISO 4406 입자계수법에 의한 자동 측정장치와 현미경 입자 분석법을 이용하여 분석하여 합리적인 절삭액 오염도 평가 기준을 제시하고자 하였다. 그리고, 절삭유 순환계통에 부가적인 필터 교체형 마이크로 필터링 장치를 설치하여, 엔드밀 가공시 필터 여과정도에 따라 절삭유에 포함되어 순환하는 금속입자들이 가공면에 미치는 영향과 그 성분을 파악하여 금속입자가 가공면에 임베딩되는 메커니즘(mechanism)을 추론해보고자 하였으며, 궁극적으로는 기존 공작기계들에 일반적으로 장착되어 있는 필터링 장치들보다 우수한 고효율 필터링 장치의 필요성을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 유체 오염도 분석 방법

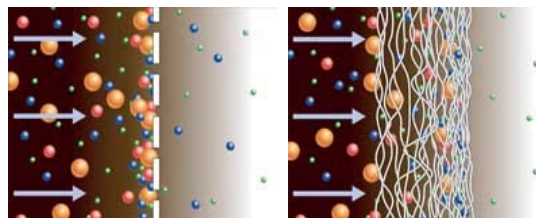
유체 오염도의 분석 방법은 중량법(gravimetric method)과 계수법(counting method)으로 분류된다. 중량법은 ISO 4405에 의해 절차가 규정되어 유체의 오염도를 규정하는 방법으로 진공 필터링 방법을 이용하여 멤브레인(membrane) 디스크에 유체내의 고형입자를 포집하여 중량을 측정하는 방법이다. 그러나, 입자 크기의 판독이 불가능하고, 샘플 단위 부피내 입자

의 중량이 많이 나가는 높은 오염 유체에 유용하며, 입자의 성분에 따른 비중 차이에 큰 영향을 받는다.

계수법은 ISO 4407에 의해 유체 오염도를 규정하는 방법으로 진공 필터링 방법을 이용하여 멤브레인 디스크에 유체의 고형입자를 포집하여 육안 현미경 또는 자동입자 계수기를 이용하여 입자의 크기와 분포를 분석하는 방법으로 ISO 4406 규정으로 오염도를 코드화하여 쉽게 유체 오염도를 규정할 수 있다. 본 실험에서는 입자 계수법을 사용하였다.

2.2 필터와 측정기의 구조 및 원리

유체에 사용되는 필터는 Fig. 1(a)와 같이 표층에서만 직접 차단방법으로 이물질을 제거하는 surface filter와 Fig. 1(b)와 같이 필터 여과재가 통과 방향으로 두께를 가져 연속적 제거가 가능한 depth filter로 나눌 수 있다. surface filter와 달리 depth filter는 필터 전후에서 특정 크기의 입자를 효과적으로 제거할 수 있으며, 절대 여과율(absolute rating)로 표시하고 베타율로 필터의 분리 능력을 표시한다.



(a) Surface filter (b) Depth filter

Fig. 1 Principles of surface and depth filter

본 실험에 사용되는 필터는 Fig. 2와 같은 구조를 가지는 PALL사의 Depth형 필터인 PROFILE II 제품을 사용하였다. 이 필터는 필터링 층이 외곽에서 안으로 들어갈수록 기공구조가 좁아지는 경사형 기공 구조(graded pore)의 고효율 필터로서 제거 효율 99.98%를 가지고 일정한 여과성능을 유지시켜 실험에 대한 안정적인 데이터 산출이 가능하다. 또한, 실험에 사용된 온라인 오염도 측정 장비는 Mesh-blockage 방식을 사용하는 PALL사의 PCM-400이며 그 원리를 Fig. 3에 나타내었다.

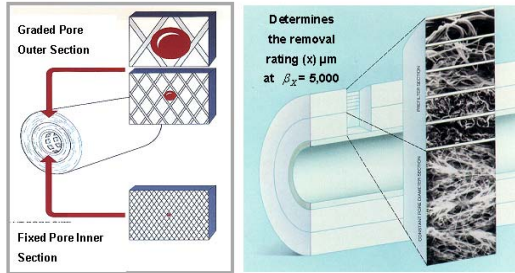
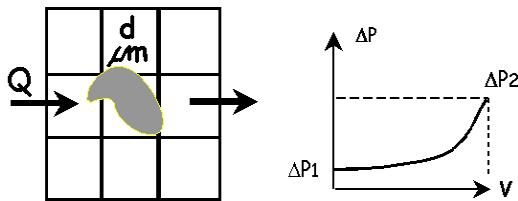


Fig. 2 Structure of depth filter PROFILE II



Blockageratio, $B = 1 - (\Delta P1 / \Delta P2)$

N: Holes number

$C(\text{particles/Vol.}) > d_{\mu m} = \text{Block} B \times N \times \text{Holesized } d_{\mu m}$

$C(\text{particles/mL}) = (\Delta P2 - \Delta P1) / \Delta P2 \times N / V$

Fig. 3 Principle of on-line measuring instrument

3. 실험장치 및 방법

3.1 장치 구성도

본 실험에 사용된 머시닝센터는 최대 주축회전수 20,000rpm, 최대 이송속도 50m/min인 MAKINO V 55 이고, 코팅된 초경 플랫 엔드밀을 사용하여 측면가공이 행해졌다. 가공 전 필터링에 따른 오염도 측정을 위해 PALL사의 모니터링 장비가 사용되었고, 가공 후 시편의 세척과 임베딩 확인을 위하여 초음파세척기가 사용되었으며, 입자 임베딩 현상 관찰을 위해 광학현미경, 입자 성분분석을 위해 SEM, 입자계수를 위하여 현미경이 사용되었다.

기존 고속 머시닝센터의 절삭유 순환계통 중간에 필터를 교체할 수 있는 부가적인 필터링 장치를 구축하여 실험이 행해졌으며, 이와 같은 가공 및 측정 장비들을 사용한 실험 장치도를 Fig. 4, 실험장치의 모델 및 사양들을 Table 1에 나타내었다.

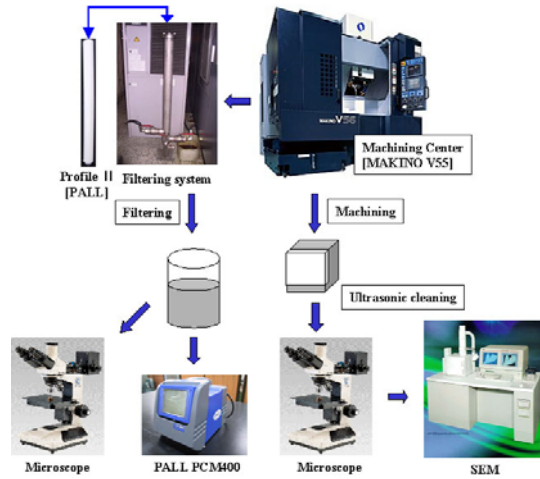


Fig. 4 Experimental setup

Table 1 Experimental instruments

Instrument	Specification
Machining center	Makino V-55, 20,000rpm
Filter	6, 12, 40 μ m[PALL, Profile II]
On-line measuring instrument	PCM400[PALL]
Optical microscope	STM-MJS2[OLYMPUS]
SEM	JSM-5800[JEOL, JAPAN]

3.2 실험방법 및 조건

오염도의 기준은 ISO 4406 오염도 등급으로 평가하였으며, 필터를 사용하지 않은 경우 추출된 샘플의 입자들에 대해 SEM으로 성분을 분석하여 먼저 유체에 포함된 입자들의 성분 분포를 파악하였다.

필터 여과정도에 따른 가공면 입자 임베딩 현상을 관찰하기 위하여 필터를 사용하지 않은 경우, 40, 12, 6 μ m 필터를 교체해 가며 실험을 행하였으며, 오염도 저하에 따라 임베딩된 입자의 분포, 크기 등을 파악하였다. 각각의 조건에서 가공된 표면에 대해 광학현미경으로 입자의 위치와 형태를 관찰하였으며, 관찰된 입자들은 SEM으로 성분을 분석하였다.

실험에 사용된 공구와 공작물, 가공조건 및 가공방법, 절삭유 종류와 상태를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Tool, workpiece and cutting conditions

End mill	WC coated TiAlN, 4-flutes
Workpiece	AL7075
Spindle speed[rpm]	3,000
Radial depth[mm]	0.1
Feed per tooth[mm/tooth]	0.1
Axial depth[mm]	10
cutting method	Side and downward
Cutting fluid	W1-1, Emulsion, 6 months

4. 실험 결과 및 고찰

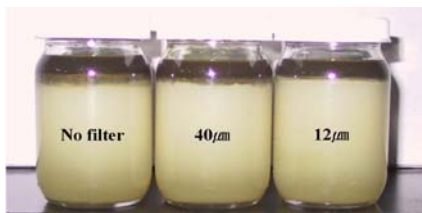
4.1 절삭유 필터와 부유물

실험을 종료한 후 필터링 장치로부터 필터를 분리하여 초기상태의 필터와 비교한 그림을 Fig. 5(a), 필터 정도에 따라 추출된 유제 샘플을 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 5(a)는 40 μ m 필터이다.

절삭유에 포함된 오염 입자와 부유물들로 인해 필터가 심하게 오염되었음을 알 수 있으며, 오염입자들이 중력과 원심력으로 인해 아래쪽으로 침전됨으로써 아래쪽에 위치했던 필터의 오른쪽 부분이 좀 더 필터링 작용이 원활했음을 짐작할 수 있다. 침전되는 금속입자 성분 외에 위쪽으로 떠오르는 부유물의 두께도 여과정도에 따라 차이가 나타남을 파악할 수 있으며, 점성이 낮은 부유오일(tramp oil)을 포함한 부유물들은 필터로 걸러지지 않음을 알 수 있다.



(a) Filter before and after filtering

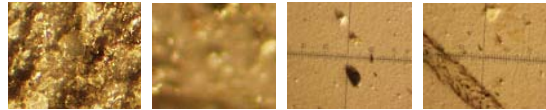


(b) Floating matter depending on filter grade

Fig. 5 Filter and floating matter

4.2 필터링에 따른 오염도 및 성분 분석

Fig. 6과 Table 3에 필터를 사용하지 않은 경우와 정도가 다른 필터를 거친 4가지 샘플에 대한 입자 사진과 오염도 측정 결과치들을 나타내었다.



(a) No filter (b) 40 μ m (c) 12 μ m (d) 6 μ m

Fig. 6 Particle distribution and size by microscope

Table 3 Measuring results of contamination degree

Item	Filter			
	No filter	40 μ m	12 μ m	6 μ m
Contamination degree[ISO4406]	×	21/17	19/15	18/15
Viscosity[St]	×	10	10	10

· Contamination degree A/B

A : Particles of 5 μ m up, B : Particles of 5 μ m up

필터를 사용하지 않은 경우에는 절삭유제의 오염 상태가 너무 심해서 ISO 규격내에서는 오염도 및 점도의 측정 수치가 기록되지 않았으므로, 현재의 절삭유 상태가 가공시 사용해서는 안되는 수준임을 나타낸다. 필터링 효과가 커질수록 오염도 수치가 낮아짐을 알 수 있으나, 점도는 변화가 없었다. 6 μ m 필터의 경우 3분 정도 사용시 필터의 막힘 현상으로 인해 분사압이 현저히 저하되는 현상이 발생되어 이후 실험에서는 40, 12 μ m 필터만 실험에 적용하였다.

필터를 사용하지 않은 절삭유제에 포함되어 있는 다양한 입자들의 SEM 측정 사진($\times 100$)과 성분 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 오른쪽 그래프는 성분분포로 C, O성분은 불순물이며, 주성분인 Fe(68%), Al(20%), Si(8%), Cr(4%)으로 구성되어 있다.

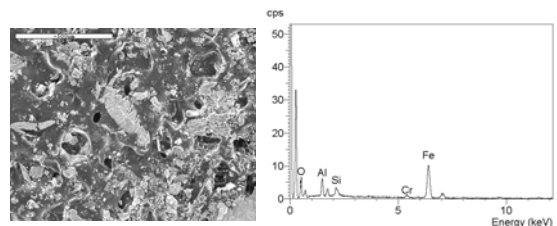


Fig. 7 Distribution and components of particles

4.3 엔드밀 가공면 입자 임베딩 현상

현미경으로 입자의 박힘 상태를 관찰한 결과, 필터를 사용하지 않은 경우는 Fig. 8과 같이 다양한 크기의 입자들이 박혀 있음을 알 수 있으며, 오른쪽 그림에는 10×10mm² 크기 피삭재 면적에 박혀있는 입자의 대략적인 위치를 붉은 점으로 나타내었다. 입자계수법을 이용한 측정 결과 5μm 이상되는 입자의 수가 유제 1ml당 약 10,000개 정도인 것으로 측정되었지만, 광학현미경으로 X-Y stage를 이동시키면서 시각적으로 3개 샘플 시편에 대해 일일이 임베딩 입자를 확인한 결과 5μm 이상되는 입자수가 10×10mm² 크기 피삭재 면적에 대략 10~20개 정도 분포하는 것으로 나타났다. 이는 고압으로 분사되는 절삭유제 내에 있는 입자들이 회전하는 엔드밀 날에 구속되어 가공면에 박힐 확률이 상당히 낮다는 것을 의미한다.

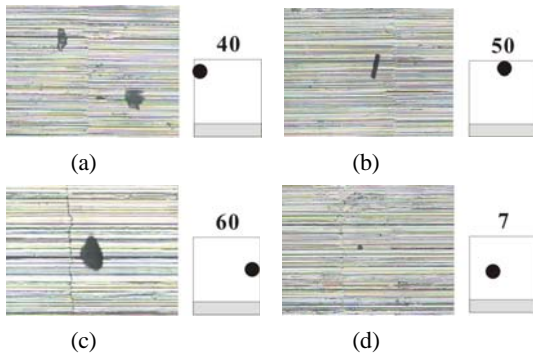
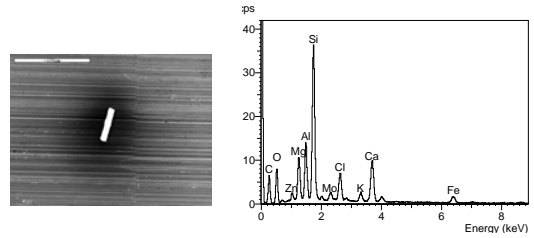


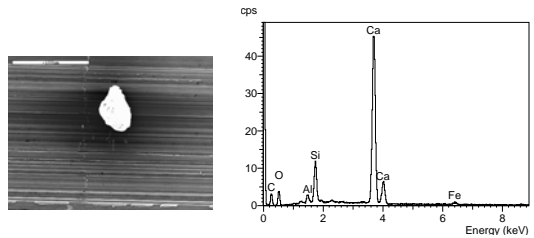
Fig. 8 Particles embedded on machined surface

입자의 성분 분석을 위하여 현미경으로 관찰된 입자들을 Fig. 9에서처럼 SEM 화면상에서 선택적으로 측정하였다. Fig. 8(b)는 Fig. 9(a)와 일치하며, 주 성분은 Si로 판명되었다. 본 연구를 위한 실험이 행해지기 3개월 전에 Si 소재 금속에 대한 가공 실험이 행해졌다는 것이 입증되었으므로 이 임베딩 입자는 그 당시 실험에서 생긴 것이고, 작고 가벼워 유제와 함께 순환한 것으로 사료된다.

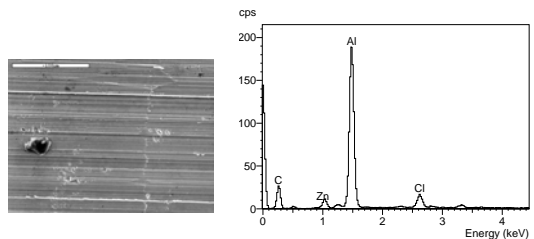
Fig. 8(c)는 Fig. 9(b)와 일치하며, 주 성분은 Ca로 판명되었다. Ca 입자의 정확한 유입 근거를 파악하지 못했지만, 절삭유의 변질에 의한 것으로 사료된다. Si와 Ca 성분의 확인된 입자들은 대부분 Fig. 9(c)와 같은 Al 성분으로 밝혀졌다.



(a) Si particle



(b) Ca particle



(c) Al particle

Fig. 9 Components of particle

Fig. 10(a), (b)에서처럼, 40μm, 12μm 필터로 갈수록 필터를 사용하지 않은 경우에 비해 임베딩 입자들의 크기가 작아지는 경향을 보이며, 성분은 모두 Al으로 판명되었다. 따라서, 엔드밀 가공과 같은 절삭가공시 마이크로 필터링 장치의 필요성을 잘 보여주는 데이터라고 할 수 있다.

Fig. 10에서 필터링되어야 하지만 존재하고 있는 큰 입자들은 대부분 엔드밀의 날부에 응착된 칩이 다음 가공시 가공면에 임베딩되거나, 가공면에 생성된 버(burr)로 사료되며, 특히 Fig. 10(b)의 40μm 크기 입자들은 형태로 보았을 때 그러한 현상에 의해 생성되었을 가능성이 높아 보인다

이상의 실험을 통해 가공면에 임베딩되는 입자들

은 노즐로부터 유체와 함께 분사되는 입자, 엔드밀 날에 응착된 입자, 가공 중 발생한 미세한 칩 입자들이 원인인 것으로 사료되며, 이러한 임베딩 메커니즘을 Fig. 11에 개략적으로 나타내었다.

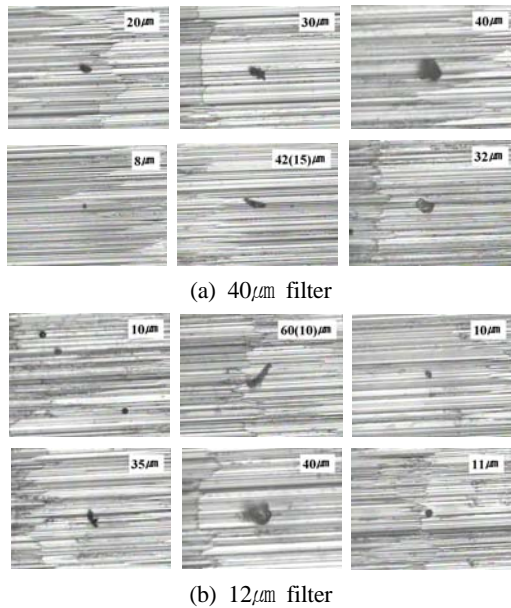


Fig. 10 Embedded particles depending on filter

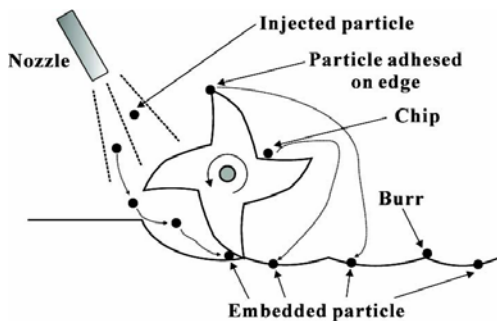


Fig. 11 Particle Embedding mechanism

5. 결 론

엔드밀 가공시 가공면 입자 임베딩 현상에 관한 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 기존 머시닝센터의 절삭유제는 ISO규격으로 측정

- 이 되지 않을 정도로 오염되어 있었고, 필터를 사용하여 40→12→6µm 순으로 필터링될수록 오염도 뿐만아니라, 입자의 크기와 분포 수량이 낮아진다.
- 필터를 사용하지 않은 경우 엔드밀 가공한 피삭재 표면에는 샘플테스트 결과 10×10mm² 면적 내에 5µm 이상 크기의 입자가 대략 10~20개 정도 임베딩되어 있으며, 이들 입자들에 대한 SEM 성분분석 결과 Al, Si, Ca 등을 주성분으로 존재하였다.
- 필터 크기가 40→12µm로 작아질수록 임베딩 입자들의 크기가 작아지는 경향을 보이므로, 기존 절삭유시스템에 추가적인 필터링이 요구된다.
- 입자 임베딩 메커니즘의 매체는 노즐로부터 유체와 함께 분사되는 입자, 엔드밀 날에 응착된 입자, 가공 중 발생한 미세한 칩 입자들로 사료된다.

참고문헌

- 서남섭, “절삭유제가 금속절삭기구에 미치는 영향,” 한국정밀공학회지 제 2권, pp. 69-75, 1985.
- Rahman M. and Senthil Kumar A., “Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling,” Journal of MTM, Vol. 42, pp. 539-547, 2001.
- Kim, S. W. and Lee, D. W., “Evaluation of machinability by cutting environments in high-speed milling if difficult-to-cut material,” Journal of MPT, Vol. 111, pp. 256-260, 2001.
- 박병찬, “절삭유 사용으로 인한 피부질환에 관한 역학조사,” 대한피부학회지, 제29권, 제3호, pp. 298-303, 1991.
- 황준, 정의식, “절삭유 사용이 가공정밀도 및 작업 환경에 미치는 영향에 관한 연구,” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1004-1007, 2001.