

Ti-6Al-4V 합금의 절삭특성과 FEM 해석 비교에 관한 연구

김남용*, 홍우표**, 이동주***

A Study on the Cutting Characteristics and Analysis by a FEM in the Machining of Ti-6Al-4V alloy

Nam-Yong Kim*, Woo-Pyo Hong**, Dong-Ju Lee***

Abstract

The cutting characteristics of Ti-6Al-4V alloy and tool wear when machining Ti-6Al-4V alloy was studied to understand the machining characteristics. This material is one of the strong candidate materials present and future aerospace or medical applications. Nowadays their usage has already been broaden to commercial applications such as golf club head, finger rings and many decorative items. Anticipating the general use of this material and development of the titanium alloy in domestic facilities, the review and the study of the machining parameters for those alloys are deemed necessary. This study is concentrated to the machining parameters of the Ti-6Al-4V alloy due to their dominant position in the production of titanium alloys.

Key Words : Cutting characteristics(절삭특성), Cutting force(절삭력), Machining(기계가공), Surface roughness(표면거칠기), Ti-alloy(티타늄 합금), Tool life(공구수명), Tool wear(공구마모), Tungsten carbide tool(초경공구)

1. 서 론

최근 산업의 발달에 따른 기계산업의 고도화에 따라 신소재 사용의 증가에서 가장 두드러진 소재중 하나가 바로 티타늄이다. 티타늄은 가볍고 강하면서도 내식성이 양호하기 때문에 "꿈의 금속"이라고 하여 1947년 미국에서 처

음 공업적인 생산이 시작되어 공업재료로 등장한 이후로 반세기가 경과하였다.⁽¹⁾ 특히 티타늄의 비중은 4.51로서 동이나 니켈의 약 50%에 해당하고 스테인리스보다 60% 정도 가볍기 때문에 중량을 경량화 할 수 있다. 특히 비강도(specific strength, S/ρ)가 높아 구조용 재료로서 항공, 우주, 군수분야, 자동차, 화학장치, 의료분야 등에 그 사용범

* 충남대학교 대학원 기계공학과
(nyjack@dreamwiz.com)
** 국방과학연구소
*** 충남대학교 기계공학과

위가 다양화 되고 있다. 티타늄의 가격은 대표적인 Ti-6Al-4V 합금의 경우 1파운드 당 약 30달러로 스테인리스강 가격의 약 2배에 달하여 그 우수한 특성에도 불구하고 항공·우주, 화학 플랜트와 유도탄, 잠수함 등 특수한 용도에 집중되고 그 확산 속도는 기대되는 만큼 빠르게 이루어지지 않고 있다. 자연히 티타늄합금의 기계가공에 관한 연구도 활성화 되지 않고 있다. 국내의 항공, 우주산업 분야는 그 기초가 쌓여가고 이미 성장단계로 나아가고 있으므로 이에 따른 티타늄합금의 가공이 점차 많아지고 있으며, 나아가 티타늄 소재의 국내생산도 예상해 볼 수 있는 단계에 도달해 있다고 생각된다. 여기에 티타늄의 정확한 절삭특성 및 가공특성에 대해서는 아직 미비한 점이 많다. 그러므로 티타늄의 기계가공에 대한 기본적인 지식의 축적이 우선적으로 요망되는 시점에 있다. 이에 본 연구에서는 현재 절삭가공에서 주로 사용되고 있는 초경공구를 사용하고 티타늄합금의 50% 이상⁽²⁾을 차지할 만큼 많이 사용되고 있는 Ti-6Al-4V 티타늄합금을 기준으로 절삭가공시 플랭크 마멸(flank wear)을 기준으로 한 공구마멸과 절삭속도, 절삭깊이, 이송량등 절삭조건에 변화에 따른 절삭특성에 대한 실험을 행하여 티타늄합금의 절삭가공시 절삭온도의 영향에 대하여 연구하였으며, 아울러 액체 질소를 절삭제로 적용하였을 때 얻어지는 절삭온도의 저하와 그 효과에 관하여 실험적 방법으로도 연구하였다. 또한 FEM을 이용하여 시뮬레이션으로 접근한 상용 해석 프로그램인 AdvantEdge⁽³⁾를 이용하여 해석후 실험 데이터와 비교, 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 시편

본 실험에 사용된 실험장치로는 독일산 GEMA선반을 사용하였고 채터발생을 억제하기 위하여 가공물을 심압대로 지지하고, 선삭가공을 행하였다. 절삭력을 측정하기 위해서 선반의 공구대에 공구동력계를 장착하였다. 이때 charge Amplifier를 DAQ Board에 연결하여 컴퓨터로 데이터를 분석하였다. 절삭공구는 Taegu Tec의 SNMA 120408로 일반적으로 널리 쓰이는 것을 선택했다. 또한 공구의 플랭크 마모를 측정하기 위하여 Hanra Micro Measure 측정시스템을 사용하였다. 절삭면의 표면거칠기를 측정하기 위해 일본의 Mitutoyo사의 모델 SurfTest SV-500을 사용하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 실험기기

및 사양을 나타낸 것이며, Fig. 1은 실험장치 개략도이다. 본 실험에 사용된 시편의 기계적 성질 및 화학성분은 각각 Table 2, 3과 같다.

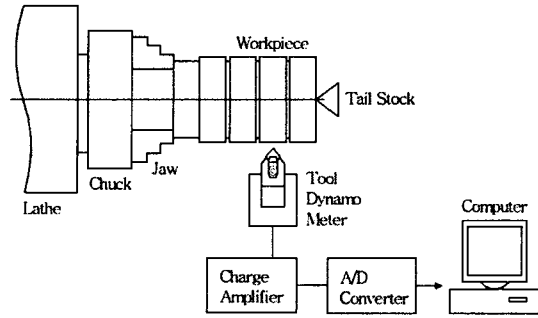


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for cutting test

Table 1 Specifications of experimental apparatus

Apparatus Model	Name	Manufacturer
Lathe	GEMA (Germany)	GC-200
DC Charge Amplifier	Kistler	type 9257A
Oscilloscope	Iwatsu	SS-5702
Tool Dynamometer	Kistler	type 5011
A/D Converter	National Instrument	DAQ 1200
Tool Holder	Taegu Tec	CSDNN2525M
Insert Type	Taegu Tec	SNMA 120408(K10)

Table 2 Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy

Direction	UTS di(KSI)	0.2%YS (KSI)	EL(%)	RA(%)
Longitudinal	148.7	138.3	12	29.3
Transverse	144.7	133.5	12	21.6

Table 3 Chemical comparisons of Ti-6Al-4V alloy

Elements	Ti	Al	V	Fe	O2	C	N2	H2	Y
wt (%)	89.13	6.3	3.8	0.19	0.16	0.01	0.01	0.0015	0.001

2.2 실험방법

본 연구의 목적은 절삭속도, 절삭깊이, 이송량등 절삭조건에 따른 절삭특성을 실험·분석하는 것으로 절삭력과 공구마모의 절삭조건은 Table 4와 같다. 실험 데이터는 예비실험을 거친 후 공구마모와 절삭력은 3회 반복하여 평균값으로 하였고, 표면거칠기는 5회 반복한 평균값으로 하였다. Fig. 2는 절삭력 실험시 일정한 절삭깊이로 가공하면서 이송량을 변화시키는 실험을 하기위한 시편의 형상이다. 공구팁은 매 실험때마다 새로운 것으로 교환하여 사용하였다.

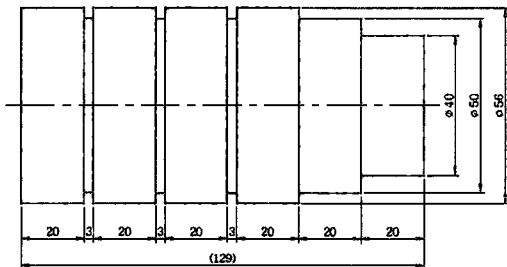


Fig. 2 Specimen for cutting test

Table 4 Cutting conditions

Cutting condition	Cutting speed	50~120 (m/min)
	Feed	0.1~0.3 (mm/rev)
	Depth of cut	0.5~1.5 (mm)
	Cutting circumstance	Dry cutting
	Tool	SNMA 120408(K10)

공구마모는 플랭크 마모(flank wear), 크레이터 마모(crater wear)로 크게 나눈다. 본 연구에서는 절삭력과 관계가 깊은 플랭크 마모를 측정하였다. ISO의 규정에 의한 플랭크 마모 랜드(flank wear land) V_B 가 0.3mm에 도달되었을 때를 공구마모로 보고 공구교환시기로 선정하였다. 이때 마모 형상은 공구현미경을 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공구마모

공구마모의 형태는 Fig. 3처럼 응착마모를 보인다. 마멸

폭은 플랭크 마모폭보다 크레이터 마모폭이 더욱 크고 뚜렷하게 발달하였고, 주 절삭날에서 매우 가까운 곳에서부터 크레이터 마모가 시작되었다. 절삭속도 60 (m/min)까지는 시간에 따른 초경공구의 마모가 뚜렷하지 않고 정상 마모 구간이 분명하지 않다가 급속 마모 구간으로 진행하여 공구수명에 한계를 보이게 되며, 절삭속도 60 (m/min)보다 높은 절삭속도에서는 공구마모가 시간에 따라 진행



(a)



(b)

Fig. 3 Adhesion of tool rake face and chipping on the main cutting edge

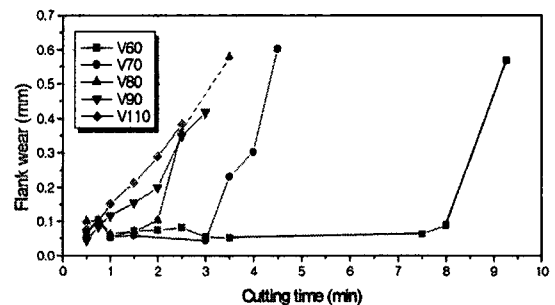


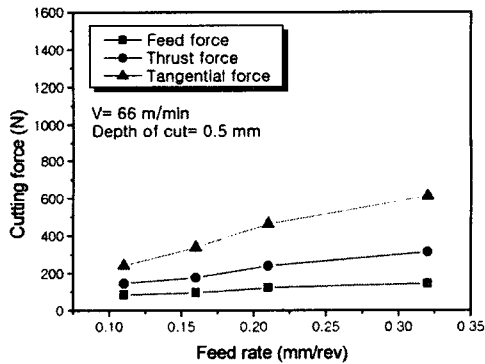
Fig. 4 Tool wear test results for Ti-6Al-4V alloy using carbide tool K10

되는 정상마모 형태를 보이다가 급속마모 구간으로 진행되었다.^(4,5,6,7)

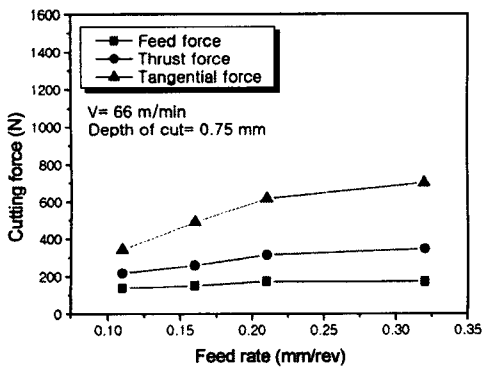
Fig. 4은 초경공구 K10을 사용하여 건식절삭한 공구수명시험의 결과를 보인다. 본 실험에서 이송량 0.32 (mm/rev), 절삭깊이 1.5 (mm)의 가공조건에서는 매우 낮은 공구수명을 나타냈다. 그러므로 쾌삭강에 비하여 16~27% 정도의 높은 난삭성 지표를 얻었다

3.2 절삭특성

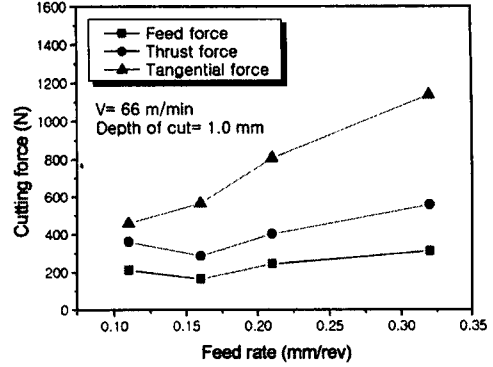
Ti-6Al-4V 합금의 절삭특성은 공구마모 실험을 통하여 확인하였으며, 가공성이 비교적 양호한 66 m/min의 속도 부근에서 측정된 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 여기서, 주분력은 절삭시간의 경과에 따라 크기가 줄어드는 현상을 발견할 수 있었으며, 그 원인은 절삭진행과 더불어 크레이터 마멸이 주 절삭날에 매우 인접하여 시작되기 때문에 절삭 중 유효 공구 상면 경사각의 증가효과를 초래하기 때문인



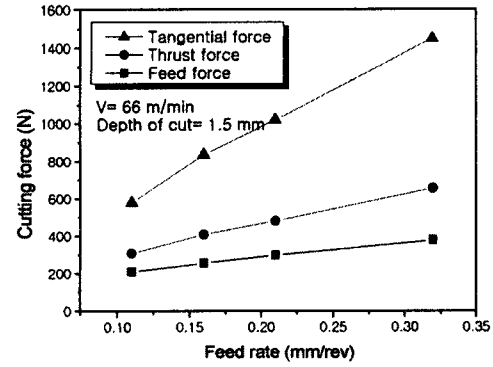
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Comparison of cutting forces according to depth of cut

것으로 판단된다.

주분력 및 배분력은 절삭깊이의 증가에 따라 절삭력의 크기가 증대하는 경향이 뚜렷하나 이송분력은 절삭깊이의 영향을 비교적 적게 받는 것으로 나타났다. 또한 주분력의 경우 이송에 대해서 선형적인 변화를 나타내는 것을 확인하였다.

3.3 표면거칠기

Fig. 6은 Table 4의 절삭조건에 따른 표면거칠기 측정값을 보여주는 그래프이다. 절삭깊이가 증가할수록 표면거칠기가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 이송속도가 크고 절삭깊이가 클수록 표면거칠기는 증가함을 알 수가 있다. 그 원인은 절삭력이 크므로 가공중 공작물과 공구사이에 진동에 의하여 표면거칠기가 절삭면에 나쁜 영향을 주는 것으로 판정된다.⁽⁸⁾

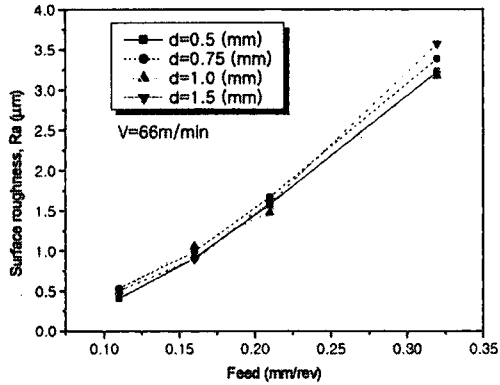


Fig. 6 Relation between surface roughness and cutting conditions

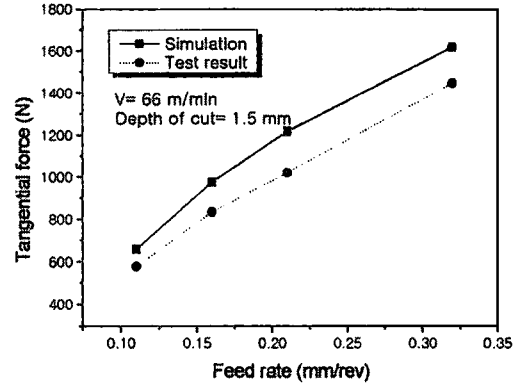


Fig. 8 Cutting force simulation on tangential force (V=66m/min, Depth of cut=1.5mm)

3.3 절삭온도 및 절삭력의 시험결과와 FEM 시뮬레이션의 비교

본 연구에서 FEM 해석은 AdvantEdge를 이용하여 수행하였으며 이 과정을 Fig. 7에 나타낸다

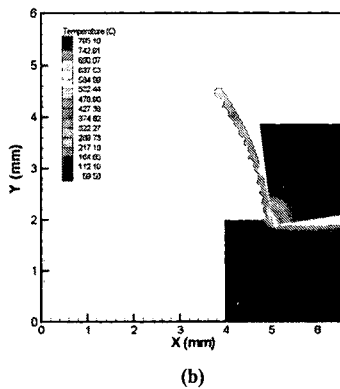
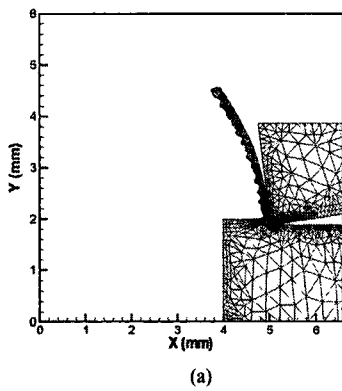


Fig. 7 Cutting simulation for turning by the AdvantEdge

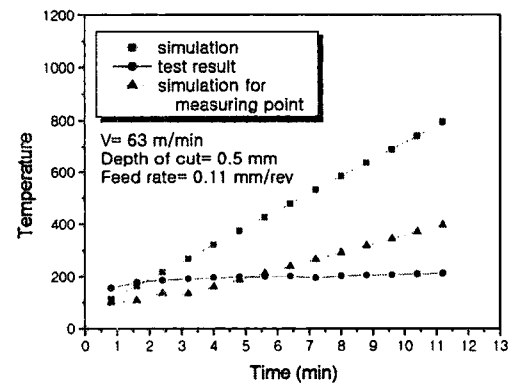


Fig. 9 Cutting temperature simulation and experiment result of cutting tool rake face (V=63m/min, Depth of cut=1.0mm, Feed=0.1mm/rev)

Fig. 8은 본 실험에서 얻어진 주분력값과 FEM 시뮬레이션에 의한 비교 그래프이다. 실험데이터와 시뮬레이션 데이터가 서로 유사한 경향을 나타냄을 알 수가 있다.^(9,10) 실험 데이터가 시뮬레이션 데이터보다 작은 것은 열 변화 현상등을 시뮬레이션에서 고려하지 못한 것으로 생각된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 절삭속도만 각각 63m/min과 110m/min으로 다르게 하였을 때의 시뮬레이션 데이터와 실험데이터를 나타낸 그래프이다. 절삭력에서는 어느정도 유사한 결과를 얻었던 것에 비하여 온도에서는 많은 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 해석결과, 절삭속도가 증가할수록 절삭온도가 상승하는 것을 확인할 수가 있었으며, Fig.

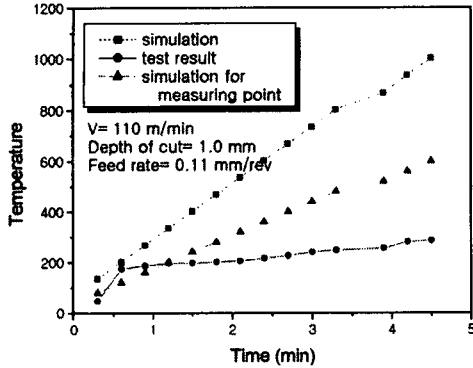


Fig. 10 Cutting temperature simulation and experiment result of cutting tool rake face (V=110m/min, Depth of cut=1.0mm, Feed=0.1mm/rev)

9에서의 저속 절삭가공에서는 절삭온도의 상승이 느리다는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서의 고속 절삭가공에서는 시뮬레이션 절삭온도의 상승이 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있다. 실험데이터의 절삭온도는 저속 절삭가공과 고속 절삭가공에서와 마찬가지로 200°C 정도로 유지하고 있다. 이것은 실험시 온도의 측정은 공구 날끝이 아닌, 공구 날끝에서 1mm 떨어진 거리에서 측정된 데이터이다. 따라서 시뮬레이션 데이터도 1mm 간격을 두고 온도상승을 Fig. 9와 Fig. 10에서 나타낸다. 절삭속도의 차이에도 불구하고 실험데이터의 절삭온도의 차이가 분명히 나타나지 않은 점은 절삭온도 측정이 공구날끝이 아닌, 1mm 떨어진 곳에서 측정하여 열손실을 고려하지 못한 것이라고 할 수 있다. 공구마모율의 증가가 분명한 차이를 나타내었던 것과 비교하면, 측정온도의 유사함은 바로 이점 때문이라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 티타늄합금 중 가장 많이 사용되고 있는 Ti-6Al-4V 합금의 선삭에 있어서 초경공구의 마모와 절삭특성을 실험과 FEM 시뮬레이션 해석을 통하여 수행하였으며, 연구결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) Ti-6Al-4V 합금의 건식절삭에서 절삭속도 60 m/min까지는 시간에 따른 공구의 마모가 뚜렷하지 않고, 급속마모 구간으로 진행하여 공구수명에 이르고 절삭속도 70 m/min 이상에서는 초경공구

K10의 마모가 시간에 따라 분명하게 진행되는 정상마모 형태를 나타낸 후 급속마모 구간으로 진행하였다. 따라서 Ti-6Al-4V 합금의 선삭 가공조건에서 절삭속도를 60~70 m/min의 범위로 한정하는 것이 절삭능률을 고려한 최적속도임을 확인하였다.

- (2) 절삭특성 실험결과 가공시간의 경과에 따라 주분력의 크기가 줄어드는 현상이 나타났으며, 그 원인은 절삭의 진행과 더불어 크레이터 마모가 주절삭날에 매우 인접하여 시작되기 때문에 절삭중 유효공구상면 경사각의 증가효과를 초래하기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 주분력 및 배분력은 절삭깊이의 증가에 따라 절삭력의 크기가 증대하는 경향이 뚜렷하나 이송분력은 절삭깊이의 영향을 비교적 적게 받는 것으로 나타났으며, 표면거칠기에 있어서는 매우 크게 나타났다. 평균거칠기는 이론값에 일치하는 경향을 보이며 양호한 상태를 보였다.
- (4) 절삭속도의 증가에 따라 절삭온도가 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, 절삭온도 60 m/min 이하의 저속가공에서는 수분 내에 열 평형에 도달하여 정상상태에 도달하는 반면에 90m/min 이상의 고속에서는 수분 내에 열평형에 도달하지 못하고 계속하여 온도 상승이 일어났다.

참고 문헌

- (1) (社)チタニウム協會, “チタンの加工技術,” 日刊功業新聞社, 第1章 1992.
- (2) M. C. Show, S. O. Dirke, P. A. Smith, N. H. Cook, E. G. Loewen, and C. T. Yang, “Machining Titanium”, Massachusetts Institute of Technology Rep., 1954
- (3) Third Wave AdvantEdge Theoretical Manual Version 3.6
- (4) Noboru Ueda, Tetsuo Matsuo “A Study of Sawtoothed Chip Formation(1st) -Analysis of the Pitch of Shear Zones and the Distance of Slips”, J. of JSPE, Vol. 44, No.9, pp.1085~1091, 1978.
- (5) J. Sheikh-Ahmad and J.A.Bailey, “Flow Instability in the Orthogonal Machining of CP Titanium”, J. of Manufacturing Science and Engineering, ASME, Vol. 119, pp.307~313, 1997.

- (6) J. C. Lemaire and W. A. Backofen, "Adiabatic Instability in the Orthogonal Cutting of Steel", Metallurgical Transactions, Vol. 3, pp.477~481, ASME, 1972.
- (7) Eiji Usui, Toshiyuki Obikawa, Takahiro Shirakashi, "Study on Machining Process of Difficult-to-Machine Materials(2nd)-Analysis of Stress and Temperature Distributions by Visio-Plasticity Technique and Finite Difference Method", J. of JSPE, Vol.52, No.9, pp.1623~1630.
- (8) 김남용, 홍우표, 이동주, "초경공구를 사용한 Ti-6Al-4V 합금의 절삭가공시 공구마멸과 절삭특성에 관한 연구", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp,2000.
- (9) T.Obikawa, "Computational Machining of Titanium alloy-Finite Element Modeling and a Few Result", J. of JSPE, Vol. 118, pp.208~215, 1996.
- (10) 이영문, 최원식, 송태영, 박태준, 장은실, "3차원 절삭시 칩-공구 마찰 및 진단 측정 해석", 한국정밀공학회지 제 16권 제 6호, pp.190~196, 1999.