

고속 불엔드밀링에서 가공조건에 따른 초내열합금 (Inconel 718)의 가공특성 평가

권해웅*, 김정석⁺, 강익수⁺⁺, 김기태⁺⁺⁺
(논문접수일 2009. 11. 03, 심사완료일 2009. 12. 02)

Machining Characteristics Evaluation of Super Heat-resistant Alloy(Inconel 718) According to Cutting Conditions in High Speed Ball End-milling

Hae-Woong Kwon*, Jeong-Suk Kim⁺, IK-Soo Kang⁺⁺, Ki-Tae Kim⁺⁺⁺

Abstract

Inconel 718 alloy has been applied to high temperature, high load and corrosion resistant environments due to its superior properties. However, This alloy is a difficult-to-cut nickel-based superalloy and the chipping or notch wear is mainly generated on the cutting edge of the tool. In this study, the machinability of Inconel 718 is investigated to improve tool life under various cutting conditions with TiCN-based coated ball-end mills. The cutting conditions can be suggested to improve both the tool life and machined surface quality in Inconel 718 high speed machining.

Key Words : Inconel 718(인코넬 718), Machinability(가공성), Tool Wear(공구마멸), Tool Life(공구수명)

1. 서론

니켈합금(Nickel-based alloys)은 고온 환경에서도 견딜 수 있는 내열성과 내마모성, 내부식성등이 높은 특성을 가지고 있는 합금으로서 최근 기계 산업의 발달로 항공기 엔진과 발전기의 터빈 등에 그 사용이 늘어나고 있다. 초내열 합금인 Inconel 718은 Ni을 주원소로 하여 Cr, Fe, Ti, Mn, 등을

첨가한 내열합금의 일종으로 특히-250℃의 저온에서 700℃의 고온까지 높은 강도를 가지며 시효상태에서도 용접이 가능하고 980℃까지 내산화성이 우수하다. Inconel 718이 절삭가공이 힘든 이유는 경도가 일반 난삭재질에 비해 크지 않으나 Fe의 함량은 줄이고 니켈과 크롬의 함량을 증가 시켜 인성이 크고 고온강도가 큰 특성이 있어 가공시 절삭온도에 의해 가공경화가 발생하기 쉬우며, 공구재료와의 친화성이

* 부산대학교 대학원 기계공학부

+ 교신저자, 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구소(ERC/NSDM) (juskim@pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산시 금정구 장전1동 산30번지

++ 부산대학교 기계공학부

+++ 화천기공(주)

높아 여러 형태의 이상마멸을 촉진시키기 때문이다.^(1~3)

고정도, 고능률을 위한 절삭이 어려운 Inconel 718과같은 난삭재의 가공에 있어서는 절삭가공시 알맞은 공구의 선택이 필요하다. 그리고 공구의 수명을 연장시키고 고품위의 제품을 얻기 위해서는 절삭속도, 이송량, 절삭깊이등의 절삭조건을 고려하여 최적의 절삭조건에서 가공하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 볼엔드밀을 이용하여 초내열합금 Inconel718의 밀링가공에서 절삭속도, 절삭깊이 그리고 이송량을 변화시킨 절삭조건에서 공구마멸, 절삭력 그리고 표면거칠기 등의 특성을 실험적으로 얻어 그 특성을 상호비교 평가하고자 한다.

2. Inconel 718의 가공성 평가

2.1 가공성 평가 및 표면 거칠기 측정

본 실험에 대한 장치도를 Fig. 1에 나타내었다. 20,000rpm 급, 3축 고속 머시닝 센터(Makino V55)를 사용하고 수용성 절삭유를 충분히 분사해주는 습식조건에서 모든 실험을 수행하였다. 그리고 절삭거리가 가장 긴 조건에서 오일미스트와 건식으로 실험하여 비교하였다. 일정 거리 가공후 공구마

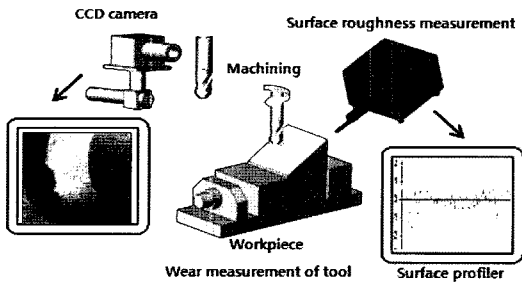
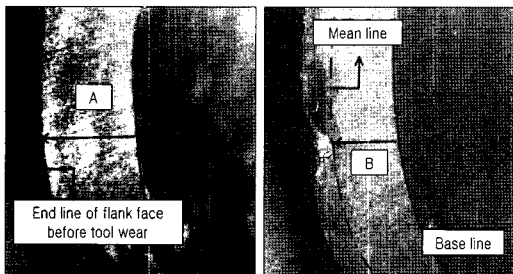


Fig. 1 Experimental set-up



Flank wear width : A-B=0.2mm
Fig. 2 Measurement method of tool wear

멸의 진행을 관찰하기 위해 CCD 카메라(JAI-CVS3200)를 이용하여 공구의 런아웃과 측정오차를 줄이고자 머시닝 센터 내부에 고정하여 측정하였다. Fig. 2에는 공구마멸 측정 방법을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 마멸형상의 폭이 0.2mm(A-B)에 도달되었을 때 공구교환시기로 결정하였다. 실험에 사용된 볼엔드밀(Union tool, C-CEB)은 TiCN 계열의 코팅을 적용한 엔드밀로서 직경 8mm, 2날, 30°의 헬릭스 각을 가지고 있다. 공구날 길이 14mm, 공구 총길이 90mm 이며 실험시 공구 돌출량은 21mm로 하였다.

표면거칠기의 측정을 위해 가공한 시편을 표면거칠기 측정기(Taylor Hopson- Surtronic 3+)를 이용하여 측정거리 2.5mm로 표면거칠기를 측정하였다.

3차원 형상가공에 주로 이용되는 볼엔드밀은 가공시 기하학적 형상의 특성으로 공구의 절삭날 중심에서는 절삭속도가 0이 되어 실제 절삭이 이루어지지 않게 된다. 가공시 발생된 칩에 의한 재절삭이 되지 않게 하기 위해 공구와 공작물간에 경사각을 주어 유효 칩배출 공간을 넓게 하는 것이 필요하게 된다. 따라서 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 공작물을 45°경사각을 주어 실험하였으며 공구경로는 경사면의 경사각을 따라 증가시키고 이송방향은 수평방향이 되는 수평상방향으로 설정하여 하향절삭이 되게 하였다.⁽⁴⁾

Table 1은 본 실험에 사용된 Inconel 718의 성분조성 및

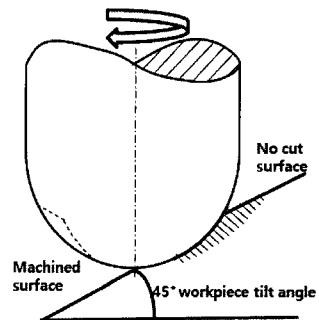


Fig. 3 Cutter orientation

Table 1 Composition of Inconel 718

C	Cr	Fe	Ni
0.02~0.08	17~21	15~21	50~55
Nb	Ti	Al	Ta
4.75~5.5	0.75~1.15	0.3~0.7	0.1max
Mo	Co	Hardness(H _r C)	
2.8~3.3	1.0max	42.3	

Table 2 Experimental conditions

Exp. No	Spindle speed (rpm)	Feed per tooth, F_t (mm/tooth)	Radial depth of cut, R_d (mm)
1	6,000	0.1	0.1
2	6,000	0.2	0.1
3	6,000	0.1	0.2
4	8,000	0.1	0.1
5	8,000	0.2	0.1
6	8,000	0.1	0.2
7	10,000	0.1	0.1
8	10,000	0.2	0.1
9	10,000	0.1	0.2

경도를 나타내었다.

모든 실험의 가공환경은 수용성 절삭유(극동유화 New Cool S 1A, KS W1종)를 머시닝센터의 절삭유 분사 노즐을 이용하여 절삭점에 분사하였다. 스피들 회전수 6,000rpm에서 10,000rpm까지 회전수별로 각기 다른 3가지의 조건에서 실험을 수행하였다. Table 2에는 실험번호별 가공 조건을 나타내었다.

2.2 절삭력 측정

절삭력을 측정하기 위하여 공작물과 같은 형상의 가공시편을 가공하여 공구동력계(Kistler 9257B)위에 설치후 절삭시 발생하는 3분력을 동시에 측정하여 앰프를 이용하여 증폭시킨후 A/D변환 처리하였다.

2.3 냉각방법에 따른 공구수명

수용성 절삭유를 사용한 습식조건과 오일과 공기를 혼합한 오일 미스트, 그리고 냉각 장치를 사용하지 않은 건식가공을 수행하여 냉각 방법에 따른 공구의 수명을 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭특성 및 공구마멸

본 실험에서는 스피들 회전수, 반경절입, 날당이송의 조건이 가공성에 미치는 영향을 파악하였다. Fig. 4에 공구마멸의 사진을 나타내었다. 반경절입량이 0.2mm인 사진에서는 다른 조건에 비해 마멸폭이 넓게 형성된 것을 볼 수 있으며

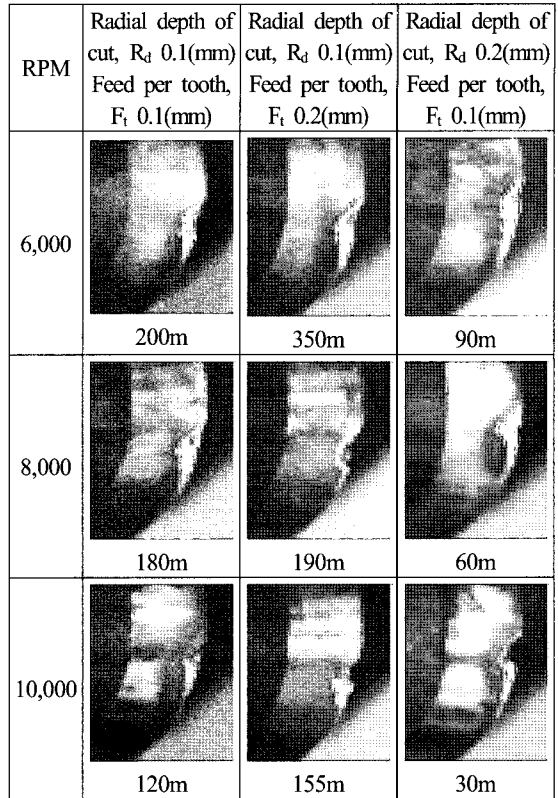
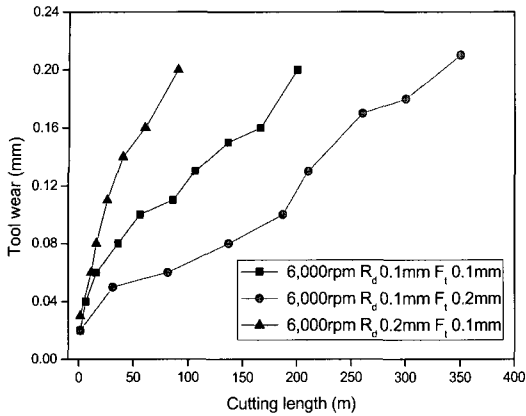


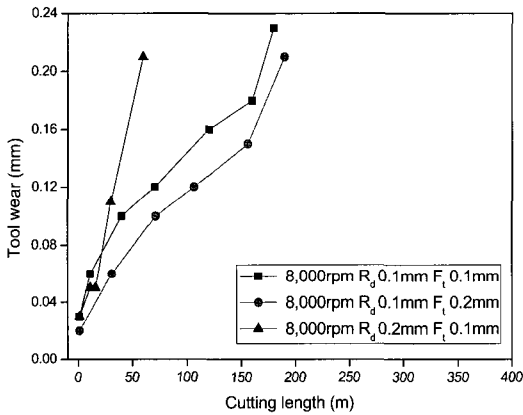
Fig. 4 Tool wear pictures according to cutting conditions

절삭속도가 낮은 6,000rpm에서는 비교적 안정된 여유면의 플랭크마멸이 관찰되지만, 절삭속도가 높아지고 절입량이 커질수록 치핑과 같은 이상마멸이 나타남을 알 수 있다. 그리고 절삭길이에 따른 공구마멸의 경향을 Fig. 5에 나타내었다. 스피들회전수가 증가할수록 공구마멸의 기울기가 급격히 증가한다. 정상마멸이 아닌 치핑과 같은 이상마멸이 공구에 발생하면 공구수명을 저하시키는 원인이 된다. 초내열합금인 Inconel 718은 고온강도와 고인성으로 인해 고속절삭시 공구는 칩과 피삭재와 접촉하는 계면사이에는 큰 압력이 작용하여 심한 마찰조건에서 절삭유가 공구-칩, 공구-피삭재의 효과적인 침투가 이루어지지 않아 공구수명 연장에 효과가 없는 것으로 여겨진다.⁽⁵⁾

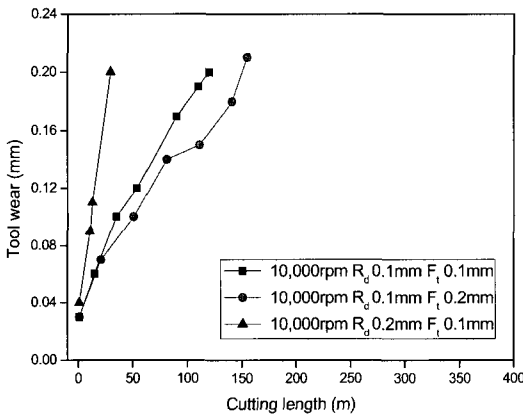
또한 모두 다른 스피들 회전수의 조건에서 반경절입량이 0.1mm에서 0.2mm로 증가할 경우가 날당이송이 0.1mm에서 0.2mm로 증가할 경우 보다 마멸이 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 절삭력 측면에서 설명될 수 있다. 본 실험에서 절삭력은 3분력중 가장 영향이 큰 주



(a) 6,000rpm



(b) 8,000rpm



(c) 10,000rpm

Fig. 5 Tool wear curves according to condition

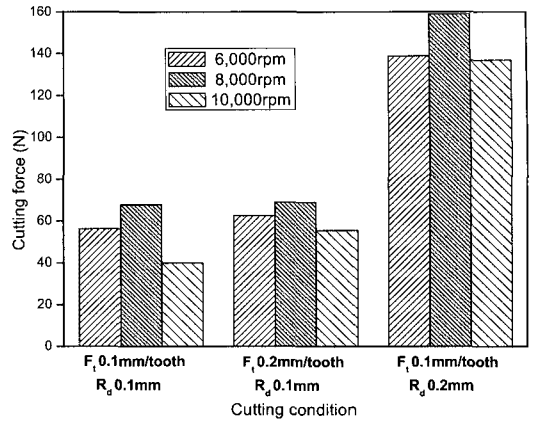


Fig. 6 Cutting force according to cutting condition

분력의 크기만을 나타냈으며, 3회 측정하여 평균값을 적용하였다. 모든 조건에서 날당이송량이 0.1mm에서 0.2mm로 증가했을 경우 절삭력의 변화는 크지 않다. 또한 적당한 크기의 날당이송량의 증가는 주분력의 크기에 큰 영향을 없음을 알 수 있다. 이처럼 절삭력이 크게 증가하지 않기 때문에 공구의 손상이 크게 증가하지 않으며 절삭거리가 짧아짐으로 절삭거리가 늘어난다. 이는 소재제거율(Material Removal Rate : MRR)을 고려한 가공에서는 반경절입량의 증가보다 날당이송의 증가가 유리함을 알 수 있다.

일반적으로 탄소강(SM20C)과 같은 피삭재의 경우 절삭속도가 높아질수록 절삭력이 감소하며⁽⁶⁾, SKD11의 가공시에도 절삭속도가 10m/min에서 30m/min까지는 증가하다 그이상의 구간에서는 감소하는 것을 알 수 있다.⁽⁷⁾ Inconel 718의 볼랜드밀 가공에서는 8,000rpm이상에서 절삭력이 감소하는 경향을 가지고 있는 것으로 판단된다.

3.2 냉각에 따른 공구수명

Fig. 7은 냉각 방법에 따른 가공길이를 나타내었다. 모든 가공의 조건은 습식에서 가공길이가 가장 길게 나타난 6,000rpm 조건과 반경절입량 0.1mm와 날당이송량 0.2mm의 조건에서 수행하였다. 그 결과, 오일미스트를 사용하여 가공했을 때 다른 습식이나 건식보다 가공길이가 긴 것을 알 수 있다. 이것은 볼랜드밀 가공에서 절삭시의 가열과 비절삭시의 냉각을 주기적으로 반복하는 단속절삭의 형태에서, 수용성 절삭유를 이용한 습식 가공에서 절삭유의 냉각작용으로 인해 공구가 심한 열적 피로를 받게 되므로 공구수명이 건식에 비해 감소함을 알 수 있다. 그림에 보이는 바와같이 오일미

스트를 사용한 절삭실험의 경우에는 마멸초기(running-in)에 오일미스트에 의한 공구마멸 억제효과가 크게 작용하지 않고 있으나, 그림에 보이는 절삭길이 250m 정도 이후 구간 증기(progressive)이후에서는 효과적인 공구마멸 억제효과가 나타나고 있다. 오일 미스트의 경우 고압의 공기와 혼합하여 분사함으로써 칩 배출이 원활하게 이루어지고 유체인 절삭유에 비해 열전도성이 떨어지므로 절삭시 발생하는 절삭열을 냉각시키는 정도가 습식에 비해 약하므로 습식과 비교하여 공구에 전달되는 열적 충격이 감소하여 공구수명이 증가한다.⁽⁸⁻¹¹⁾

본 실험에서도 오일 미스트 조건에서 공구마멸의 경향이 다른 건식이나 습식조건에 비하여 안정적인 마멸 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 다른 조건에 비해 공구에 전달되는

열적 충격이 작게 작용하여 공구의 수명이 길게 나타나는 것으로 사료된다.

3.3 공구마멸과 표면거칠기

Tabel 3에 표면거칠기의 값(Ra)을 나타내었다. Inconel 718가공후의 표면거칠기의 값들은 공구마멸이나 가공조건들에 의한 특별한 경향은 나타나지 않았다. 그러나 전체적인 표면거칠기의 평균값들은 절삭력이 높게 나온 8,000rpm일 때보다 절삭력이 작은 10,000rpm에서 평균적인 표면거칠기의 값이 작은 것으로 나타났다. 일반적으로 절삭속도가 증가하고 이송속도가 감소할수록 표면거칠기는 양호해지는 결과가 나타난다.^(12,13) 본 실험에서도 같은 경향을 확인할 수 있으나 비교적 고속인 10,000rpm에서는 공구의 수명이 낮아지는 것을 알 수 있다. 때문에 실제 가공에서는 공구수명과 가공시간 같은 경제성을 고려하여 가공조건을 선택해야 한다.

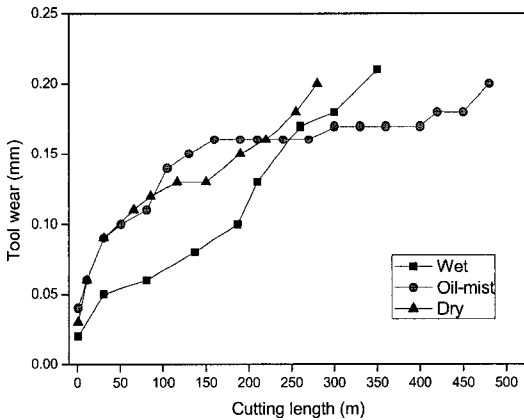


Fig. 7 Cutting length according to cutting environments

Table 3 Surface roughness according to cutting condition

rpm	Cutting condition	Tool wear		
		0mm	0.1mm	0.2mm
6,000	R _d 0.1mm, F _t 0.1mm	2.00μm	1.82μm	1.39μm
	R _d 0.1mm, F _t 0.2mm	1.29μm	1.91μm	2.02μm
	R _d 0.2mm, F _t 0.1mm	1.37μm	1.42μm	1.25μm
8,000	R _d 0.1mm, F _t 0.1mm	1.46μm	2.11μm	1.38μm
	R _d 0.1mm, F _t 0.2mm	1.64μm	2.47μm	2.20μm
	R _d 0.2mm, F _t 0.1mm	1.85μm	1.90μm	2.20μm
10,000	R _d 0.1mm, F _t 0.1mm	1.10μm	1.23μm	0.99μm
	R _d 0.1mm, F _t 0.2mm	1.16μm	1.39μm	2.25μm
	R _d 0.2mm, F _t 0.1mm	1.00μm	1.48μm	1.17μm

4. 결론

Inconel 718의 볼 엔드밀 가공에서 다양한 절삭 조건에 따른 절삭특성과 공구의 마멸을 실험한 결과는 다음과 같다.

- (1) 동일한 소재 제거율(MRR)조건에서 절삭력에 크게 민감한 반경절입량의 증가보다 상대적으로 덜 민감한 날당이 송량을 증가하여 가공하는 것이 공구수명 측면에서 유리하다.
- (2) 가공면의 평균적인 표면거칠기는 10,000rpm의 조건에서 가공했을 때 가장 양호한 것으로 나타났다.
- (3) 절삭유를 사용한 습식가공보다 오일미스트를 사용한 가공 환경에서 공구에 전달 되는 열적 충격이 감소하여 공구수명이 증가하였다.

후 기

본 연구는 화천기공(주)의 난삭재 가공성 평가에 관한 과제 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Balazinski, M., Songmene, V., and Kops, L., 1995, "Improvement of tool life through variable feed milling of Inconel 600," *CIRP Annals*, Vol. 44, pp. 55~58

- (2) Kim, S. W., Park, H. B., Lee, D. W., and Kim, J. S., 1998, "Evaluation on High-Speed Machining of Inconel 718," *JKSPE*, No. 5, pp. 182~185
- (3) Kim, K. W., Choi, H. M., Chae, W. S., and Kim, D. H., 2001, "Performance of PVD and CVD Coated Carbide Tools in Machining Inconel 718," *JKSAE*, pp. 41~48
- (4) Kim, S. W., Ahn, C. S., Lee, D. W., 2000, "Evaluation of Machinability by Cutting Environments in High-Speed Machining of Difficult-to-cut Materials(Test for Tool Life Using Compressed Chilly Air Cooling)," *JKSMTE*, Vol. 9, No. 5, pp. 158~163
- (5) Cho, C. Y., Moon, S. D., and Ryu, S. H., 2006, "Effect of Cusp on the Cutting Characteristics and Tool Wear of Semi-finishing if Ball-end Milling," *Proceedings of the Ksmte Spring Conference 2006*, pp. 257~262
- (6) Jang, S. C., and Kim, K. W., 2005, "Prediction of Cutting Forces in High Speed End Milling," *JKSMPE*, Vol. 4, No. 4, pp. 21~27
- (7) Jun, T. S., Kim, N. K., and Chung, S. C., 1999, "Cutting Force Analysis in End Milling Process for High-Speed Machining of Difficult-to-Cut Materials," *Proceedings of the Ksmte Conference*, pp. 359~364.
- (8) Lee, C. M., Kim, S. W., Lee, D. W., and Kim, J. S., 2000, "Evaluation of thermal characteristics by cutting environments in high speed ball end-milling," *Proceeding of the Ksmte Autumn Conference*, pp. 34~38
- (9) Su, Y., He, N., Li, L., and Li, X. L., 2006, "An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V," *Wear* 261, pp. 760~766
- (10) Venugopal, K. A., Paul, S., and Chattopadhyay, A. B., 2007, "Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling," *Wear* 262, pp. 1071~1078
- (11) Adrian Sharman, Richard C. Dewes, and David K. Aspinwall, 2001, "Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology* 118 pp. 29~35
- (12) Kim, H. G., Sim, J. H., Lee, and J. C., 2007, "Machinability Evaluation of CBN Ball End Milling in Die & Mold Steels with High Hardness", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 4, pp. 119~126
- (13) Han, J. S., Jo, H. C., and Jung, J. Y., 2005, "A Study on the Surface Roughness on the Machined Surfaces," *JKSIE*, pp. 301~306