

알루미늄합금 절삭시 절삭성과 절삭조건의 상관성에 관한 연구

오석형[#]

A Study on the Correlation between Machinability and the Cutting Condition in Machining Aluminum Alloy

Seok-Hyung Oh[#]

ABSTRACT

Using NC or CNC machine tool, the unmanned automatic production system has been growing recently in the manufacturing field. Thus it is important to find out the machinability of cutting force, tool wear and surface roughness during the cutting process. It is necessary to find how to estimate the machinability for the effective cutting condition because of problem about cutting power, tool wear, cutting time and precision.

This study was planned to discover the relations of tool wear by variations of roughness and derived to correlate the wear with the surface roughness on the cutting parameter(cutting force, flank wear, surface roughness, friction angle, shear angle, slenderness ratio) when the aluminum alloy was cut in turning.

Key Words : Slenderness Ratio(세장비), Machinability(절삭성), Cutting Force(절삭력), Surface Roughness(표면조도), Friction Angle(마찰각), Shear Angle(전단각)

1. 서 론

자동화 공작기계가 확산되어 감에 따라 기계가공 공정의 중요한 분야인 절삭가공이 무인화, 자동화 및 경제성의 실현을 위해 많은 연구가 수행되어 지고 있다. 이러한 가공 시스템의 구축을 위해 먼저 선행되어야 할 조건이 많은데, 그 중에서도 가공재나 절삭조건의 변화에 따른 절삭성의 평가가 필요하다.

이는 절삭가공에 따른 공구마모, 절삭동력, 표면조

도, 가공시간 등의 정도를 판별하여 절삭성능을 평가하기 때문이다.

최근의 연구 동향은 피삭재의 절삭동력의 성분 및 가공재료의 물리적인 성질을 이용하여 간접적인 방법을 통해 절삭동력 측면에서의 절삭성을 평가하며, Seo 등^[1]은 가공 시 발생하는 chip의 형태를 통하여 절삭성을 평가하기도 한다. 특히, 기계가공에 동반되는 공구의 마모량을 측정하여 공구수명 측면에서 절삭성을 판정^[2-3]하거나 다량의 실험적인 자료를 이용하여 통계적인 기법으로 절삭성을 예측^[4-6]하는 등의 방법을 이용하는 경우도 있다. 이와 같이 절삭 과정 중에 발생하는 절삭력^[7-8], chip의 형태, 절삭온도^[9-11],

[#] 교신저자 : 군산대학교 기계공학부
E-mail : osh@kunsan.ac.kr

공구마모 등의 방법에 의해 절삭성을 평가하기 위한 연구가 진행되고 있다.

이러한 절삭성의 평가는 가공의 정밀성에 영향을 미치며 경제적인 절삭조건의 선택에 중요하기 때문에 많은 실험이 필요하며, 절삭조건이 변화되면 이에 따른 절삭성의 평가가 재구성되어야 한다. 또한 가공물의 물리적 성질, 공구재료, 절삭조건 및 공구 기하학은 절삭성에 많은 영향을 미치기 때문에 임의의 절삭조건에서 정확한 절삭성의 평가가 매우 어려운 일이다.

따라서 본 연구에서는 절삭조건의 변화에 따라 절삭성의 평가를 위한 보다 효율적인 인자를 얻기 위해 알루미늄 합금을 피삭재로 사용하여 준 2차원 선삭 가공을 하였을 경우 절삭저항, 공구의 마모량과 표면 조도의 특성을 절삭성의 평가에 효율적으로 적용하여 절삭성 개선을 위한 절삭조건의 선택방법에 대하여 구명코져 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 절삭역학과 절삭성

가공물이 공구에 작용하는 힘을 절삭저항이라 하며, 그 크기나 작용방향은 절삭방법, 가공재료 및 기타의 절삭조건에 따라 다르다. Fig. 1은 본 연구를 수행함에 있어 선반에서 환봉을 가공할 때의 절삭저항을 도시한 것이다. F_c 는 주절삭분력(principal cutting force), F_a 는 이송분력(feed force), F_r 은 배분력(radial force)이다.

절삭저항은 절삭에 필요한 동력을 결정하는 데 필요할 뿐 아니라 재료의 절삭성(machinability)을 판정하는 데에도 기준이 된다. 그 외에 공구의 기하학적 현상, 절삭깊이, 이송(feed), 절삭속도 및 세장비(물림 깊이/이송)와 같은 절삭조건의 적부를 판정하는데 중요한 인자가 되며 절삭저항은 공구각의 영향을 크게 받고 그 중에서도 절삭각의 영향이 가장 크게 영향을 받는다. Schlesinger에 의하면 공구의 마모와 함께 절삭저항이 급증하게 되는데, 주분력의 경우 서서히 약간 증가하나 배분력과 이송분력은 급증하여 저항이 크게 되기 때문에 공구수명의 관점에서 절삭성의

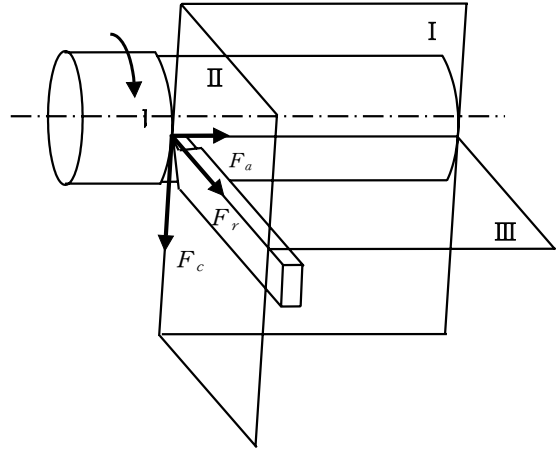


Fig. 1 Three components of the cutting force

판정에 배분력 또는 이송분력을 측정하여 절삭성을 판정하였다.

공구면에 작용하는 마찰력(F_t)과 수직분력(F_n)을 Fig. 2의 절삭력 선도에서 구하면 다음과 같다.

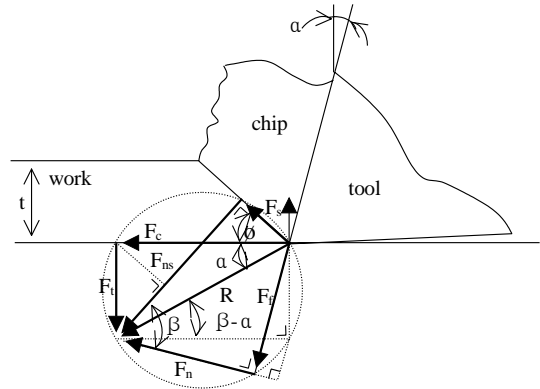


Fig. 2 Force diagram for orthogonal cutting

$$F_f = F_c \cdot \sin \alpha + F_t \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

$$F_n = F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

이 된다. 여기서, α 는 공구의 인선에 수직인 면과 공구 경사면이 이루는 경사각이다.

식(1)과 (2)로부터 공구면과 chip사이의 마찰각 β 및 마찰계수 μ 는

$$\begin{aligned} \mu &= \tan \beta = \frac{F_f}{F_n} = \frac{F_c \cdot \sin \alpha + F_t \cdot \cos \alpha}{F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \sin \alpha} \\ &= \frac{F_t + F_c \cdot \tan \alpha}{F_c - F_t \cdot \tan \alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

이 된다.

Ernst-Merchant는 순수 전단응력설에 의해 가공물이 전단된다고 가정하여 $\frac{dF_c}{d\phi} = 0$ 인 조건에서

$$2\phi + \beta - \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

라는 Ernst-Merchant 제1방정식을 제안하였으며, 이를 절삭기구학을 해석하는데 사용되고 있다.

2.2 공구마모와 절삭성

가공재료의 절삭성을 평가하거나 공구의 성능을 알기 위해 공구수명을 파악하는 것이 필요하며, 무인화공장을 가동하는 데에는 공구상태 인식이 프로세서 진단 시스템에서 중요한 역할을 한다. 가공시 공구가 큰 압력을 받아 마찰이 일어나며 이에 따른 기계적인 마모가 발생된다. 이들 마모가 발생하는 위치 및 형상에 따라 Fig. 3에서와 같이 flank 마모, crater 마모 및 groove마모 등이 있다.

공구수명은 공구의 경사각, 절삭속도, 이송, 공구재료, 가공재료 및 인선의 영향을 받는다. 공구각의 경우 절삭저항과 밀접한 관계를 갖고 있으며, 이에 따른 발생열이 공구 수명에 관여하는 것으로 보고 되고 있다.

2.3 표면조도와 절삭성

가공면의 요철의 빈도와 크기를 조도(거칠기, roughness)라 하며, 정밀도를 정하는 중요한 인자이다. 따라서 정밀가공의 관점에서 표면조도는 절삭성을 평가하는 항목이다. 가공 표면에 영향을 미치는 절삭 인자는 절삭속도 및 절삭각의 경우 절삭각이 작을수록 chip의 변형이 작고 예리한 인선으로 가공을 수행하기 때문에 표면조도가 개선되나 공구수명의 관점에서 보면 수명이 단축된다는 문제점이 있다. 절삭깊이가 증가하면 조도가 좋지 않게 된다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 4와 같이 CNC 정밀선반의 척에 6061-T6 알루미늄 합금의 피삭재($\phi 90 \times 500\text{mm}$)인 봉재를 고정하고 주축의 회전 시 마찰을 최소화하기 위해 유압식 심압

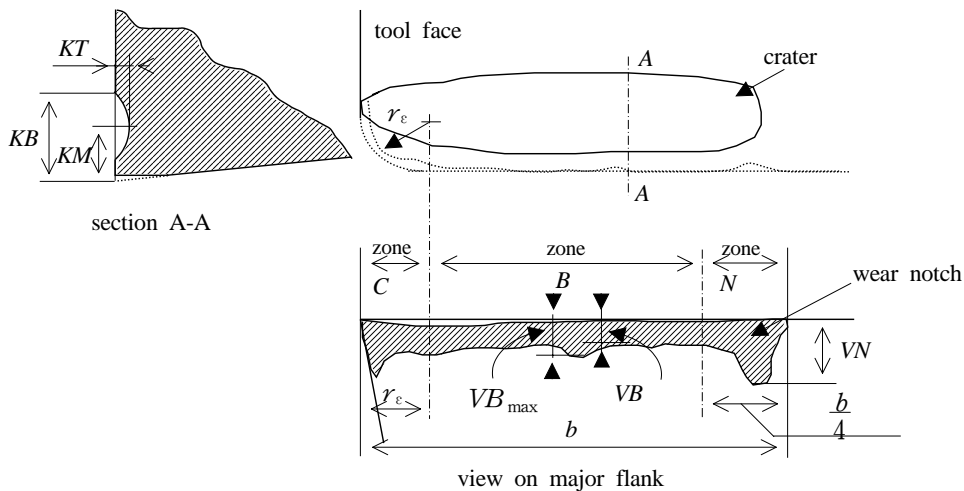


Fig. 3 Geometry of turning of tool wear

대(tail stock)에 베어링 센터로 지지하였으며, 터릿 공구대(turret tool post)에 공구대를 지지할 수 있는 치구를 제작하여, 이 치구 위에 공구동력계(Kistler 9257A)를 부착하고 P20(TPGN 160304 ASA321) 초경공구(인선반경 0.4mm이하, 상면경사각 0°, 유효경사각 6°, 주절인각 90°, 여유각 11°)를 고정하여 준 2차원 선삭가공을 행하였다.

공구 마모량은 공구 연삭기에서 임의로 3가지 플랭크 마모(0.3, 0.6, 0.9 mm)를 가공하여 초경공구용 연삭숫돌과 다이아몬드 연삭숫돌로 연삭 처리한 후 실험을 수행하였고 공구수명의 판정기준은 초경공구에 대한 선삭용 단일 공구수명을 제안한 ISO (International Organization for Standardization; <http://www.iso.ch>)판정기준에 준하였다.

실험조건은 절삭단면적 0.15mm² 이 되도록 절삭깊이와 이송을 결정하여 그 비를 세장비라 정의하고, 이 세장비를 5종류로 하여 변화시키면서 각각 10회 중복 실험을 행하였다. 수치제어 선반을 이용함으로써 절삭속도, 이송속도와 절삭깊이를 정확히 유지하여 실험을 수행하였다.

절삭속도는 100, 200, 300 m/min을 선정하였다. 실험장치와 실험조건은 Table 1과 같다.

공구동력계에서 출력된 절삭분력을 charge amplifier에서 증폭한 후 A/D converter를 이용하여 데이터 수집을 행하였고, 이 데이터를 통계처리 하여 절삭력의 특성을 파악하였고 공구마모의 진행과 더불어 가공물의 표면조도 특성을 얻기 위해 일정한 절삭구간에서 실험을 수행하면서 절삭력의 특성(최대, 최소, 평균, RMS(root mean square))을 계산하였다.

표면조도의 측정은 1회 가공이 완료된 후 표면조도 측정기를 이용하여 가공방향과 직각 되는 방향(이송방향)으로 표면조도를 측정하였다. Fig. 5와 같이 표면조도의 측정기를 사용하여 cutoff는 0.8mm로 일정하게 하여 측정하였고, R_a , R_y 를 3회 측정하여 평균값으로 조도를 평가하였다.

Table 1 Cutting condition

Effective Rake(α)[°]	6
Depth of cut(t)[mm]	0.60, 0.90, 1.20, 1.50, 1.80
Feed(f)[mm/rev]	0.25, 0.17, 0.13, 0.10, 0.08
Slenderness ratio(G)	2.5:1, 5:1, 10:1, 15:1, 22:1
Cutting Speed(V)[m/min]	100, 200, 300
Flank Wear(VB)[mm]	New, 0.3, 0.6, 0.9



Fig. 4 Experimental apparatus

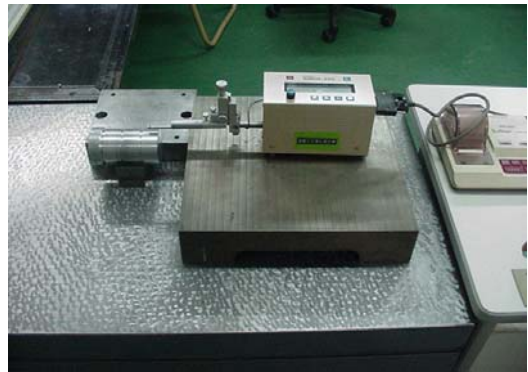


Fig. 5 Roughness measurement device

4. 실험결과 및 고찰

절삭성의 평가는 절삭동력에 영향을 미치는 절삭저항과 가공의 정밀성에 영향을 미치는 공구마모(주로 flank 마모), 가공면의 조도 등을 절삭조건 변화에 따라 해석하였다.

4.1 절삭저항에 의한 절삭성

Fig. 6은 알루미늄 합금을 절삭한 경우 절삭속도 300m/min에서 최대 주분력을 세장비의 변화에 따라 나타낸 그림으로 세장비가 증가하면 주분력의 크기는 미소하게 증가한다. 특히, 공구의 마모에 따른 절삭동력의 관계는 없음을 알 수 있다. 이는 피삭재의 절삭저항이 작기 때문에 공구의 마모량에 따른 절삭저항에 영향이 거의 없는 것으로 생각된다.

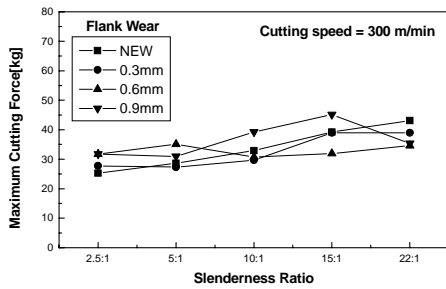


Fig. 6 Maximum cutting force vs slenderness ratio at flank wear

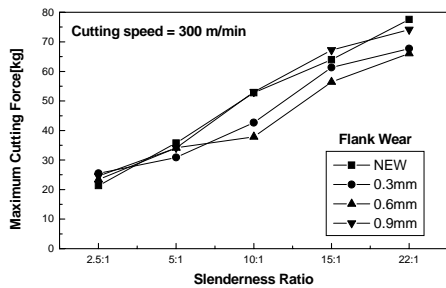


Fig. 7 Maximum radial force vs slenderness ratio at flank wear

Fig. 7은 같은 절삭속도 300m/min에서 최대 배분력을 세장비의 변화에 따라 나타낸 그림으로 세장비가 증가하면 배분력의 크기는 주분력에 비해 크게 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 세장비의 변화가 절삭저항 함수관계로 작용하며, 주분력에 비해 배분력에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 실험 과정 중에 마모되지 않은 공구가 절삭력이 크게 나타나는 원인은 구성인선이 발생되어 공구의 기하학(절삭각)이 변하게 되어 절삭저항이 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 절삭저항의 관점에서 절삭성을 평가하기 위해서는 주분력의 변화를 이용하는 것 보다 배분력을 이용하여 평가하는 것이 유리함을 알 수 있다.

Fig. 8은 프랭크 마모가 0.6mm일 때 세장비의 변화에 따른 공구경사면에서의 마찰각을 절삭속도의

변화에 따라 나타낸 그림으로, 세장비가 증가할수록 공구경사면의 마찰각은 증가하며 절삭속도가 증가할수록 마찰각은 증가하고 있는 경향을 보여주고 있다. 이는 절삭속도가 증가하면 공구면에 수직으로 작용하는 작용력이 공구면과의 마찰력보다 상대적으로 크게 되는 것을 의미하며, 마찰각이 증가할수록 절삭동력이 큰 것을 의미한다. 따라서 세장비나 절삭속도가 증가하면 주분력의 증가에 비해 배분력의 증가가 뚜렷함을 의미하며, 절삭력의 분석결과 주분력보다 배분력의 영향이 크게 나타나는 경우와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 절삭속도의 변화에는 마찰각이 뚜렷이 증가하나 공구의 마모량에 따라서는 마찰각의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 9는 Ernst-Merchant 제1방정식을 이용하여 계산된 전단각을 프랭크 마모가 0.6mm일 때 절삭속도

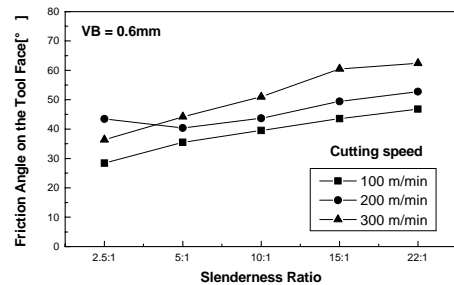


Fig. 8 Friction angle vs slenderness ratio at cutting speed

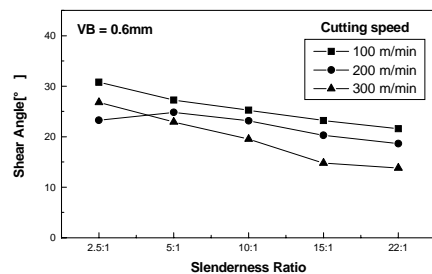


Fig. 9 Shear angle vs slenderness ratio at cutting speed

와 세장비의 변화에 따라 나타낸 그림으로, 절삭속도가 증가하면 절삭력이 증가하기 때문에 전단각은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 세장비가 증가하면 이에 따라 감소함을 알 수 있다. 또 공구가 마모됨에 따라 전단각은 감소하여 절삭 저항이 상대적으로 증가함을 보여준다. 이는 일반적인 절삭에서 나타나는 현상과 잘 일치한다.

4.2 표면조도와 절삭성

절삭성을 평가하기 위한 또 하나의 인자인 표면조도는 가공의 정밀도 및 가공시간에 영향을 미친다. Fig. 10은 절삭속도가 300m/min에서 세장비와 공구마모에 대한 표면조도를 도시한 것으로서, 절삭동력의 경우와는 상반되게 세장비가 증가하면 감소하여 절삭성이 개선됨을 알 수 있으며 공구의 마모에 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 11은 절삭속도가 300m/min에서 가공면의 조도를 공구마모와 세장비의 변화에 따라 나타낸 그림으로 공구의 마모에 영향이 거의 없으며 세장비가 증가하면 표면조도가 감소하여 절삭성이 개선됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 프랭크 마모량이 0.0mm일 때 가공면의 표면조도를 세장비와 절삭속도의 변화에 따라 나타낸 그림으로 절삭속도나 마모량의 경우 표면조도에 거의 영향을 미치지 않으며, 세장비의 증가와 더불어 표면조도의 개선이 뚜렷함을 알 수 있다. 따라서 동일한 절삭단면적의 경우 되도록 이송을 작게 하여 세장비를 크게 하는 것이 조도측면에서의 절삭성이 개선됨을 알 수 있고, 가공면의 조도는 절삭조건 중에서 이송이 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

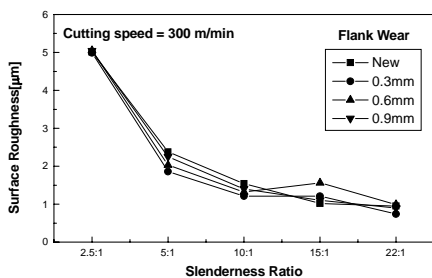


Fig. 10 Surface roughness vs slenderness ratio at flank wear

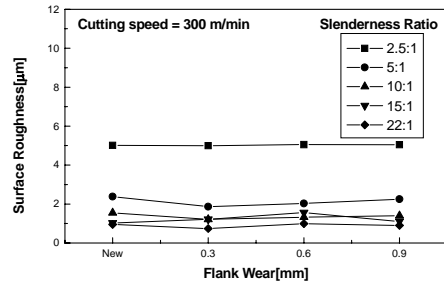


Fig. 11 Surface roughness vs flank wear at slenderness ratio

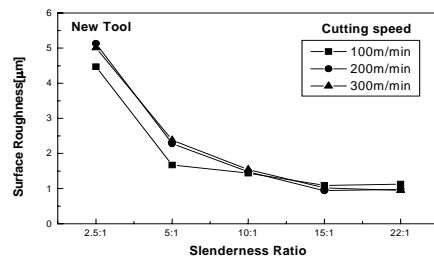


Fig. 12 Surface roughness vs slenderness ratio at cutting speed

5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 합금의 절삭가공에서 절삭조건 변화와 절삭성에 대한 선삭 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 동일한 절삭단면적인 경우에 세장비를 작게 절삭조건을 선정하는 것이 절삭저항 측면에서 절삭성 개선에 유리하며, 공구마모의 평가에 주분력의 변화를 이용하는 것보다 배분력을 이용하여 하는 것이 유리하다.
2. 알루미늄합금과 같은 연성 재료를 가공할 경우 공구마모 측면에서 절삭성을 개선하기 위해 절삭각이 큰 공구를 사용하는 것이 유리하다.
3. 세장비가 증가할수록 공구경사면의 마찰각은 증가하며 절삭속도가 증가할수록 마찰각은 증가하며,

마찰각이 증가할수록 절삭동력이 증가한다..

4. 같은 절삭단면적인 경우에 세장비를 크게 절삭조건을 선정하는 하는 것이 표면조도의 관점에서 절삭성 개선에 유리하다.

Applying the Finite Element Method to the Calculation of Temperature Distributions in Machining and Comparisons with Experiment," Trans. ASME, Vol. 105, pp. 149-154, 1983.

12. 서남섭, "금속절삭이론," 동명사, 1988.

참고문헌

1. Sim, G. J., Cheong, C. Y., Oh, S. H., Seo, N. S., "A Study on the Classification and Prediction of the Chip Type under the Specified Cutting Condition in Turning," KSPE, Vol. 12-8, pp. 53-62, 1995.
2. Korean, Y., "Cutting Force Model for Tool Wear Estimation," ASME, pp166-169, 1989.
3. Pedersen, K. B., "Wear Measurement of Cutting Tools by Computer Vision," Int. J. Mech. Tool Manufact, Vol. 30-1, pp. 131-139, 1990.
4. Zlatin, N., "Predictability Aspects of Aerospace Products with Regard to Machinability," ASTM, 1967.
5. Wu, R. M., Meyer, R. N., "An Analysis of the Development of Carbide Tool Crater Wear," Int. J. Mech. Tool Des. Res., Vol. 7, pp. 123-153, 1967.
6. Lay, G. J., Saito, Y. and Ito, Y., "Detection of Tool Wear by Dynamic Component of Cutting Force," JSPE, Vol. 50-7, pp. 1117-1122, 1984.
7. Masuda, M., Torri, M., "The Influence of Cutting Force on Boundary Failure of Cutting Tool," JSPE, Vol. 53-10, pp. 1596-1601, 1987.
8. Lemaire, J. C., Backofen, W. A., "Adiabatic Instability in Orthogonal Cutting of Steel, Metal," Trans., pp. 477, 1972.
9. Levy, E. K., "Analytical Investigation of the Effect of Tool Wear on the Temperature Variations in a Metal Cutting Tool," Trans. ASME, pp. 251-257, 1976.
10. Shaw, M. C. and Lezanski, P., "Tool Face Temperatures in High Speed Milling," Trans. ASME, Vol. 112, pp. 132-135, 1990.
11. Stevenson, M. G., "Further Developments in