

절삭률-공구수명 특성 곡선을 이용한 고속가공 공정의 최적화에 관한 연구

최용철*, 김동우*, 장윤상⁺, 조명우⁺⁺, 허영무⁺⁺⁺

Optimization of high-speed machining process using constrained R-T characteristic curve

Y.C. Choi*, D.W. Kim*, Y.S. Chang⁺, M.W. Cho⁺⁺, Y.M. Hea⁺⁺

Abstract

With the recent development of machining technology, high speed machining process is widely used for the mold and difficult-to-cut-materials machining since it allows achieving high productivity and surface quality. However, during the high speed machining process, high cutting speed and feed rate can cause abrupt tool life decrease due to rapid rising of the cutting tool temperature. Such situation may cause increase of machining cost. Thus, in this study, developed optimization algorithm is applied to determine optimal machining variables for multiple high speed machining. The R-T characteristic curve for machining economics problems with a linear-logarithmic tool life model is determined by applying sensitivity analysis. Finally, a series of high speed machining experiments are performed to determine the desired optimal machining variables, and the results are analyzed.

Key Words : High Speed machining : 고속가공, R-T characteristic curve : 절삭률-공구수명 특성곡선,
Machining economic problem : 가공경제문제

1. 서론

하이테크산업의 급속한발전과 더불어 그 구성품의 고정밀도, 고능률 가공에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다. 고속가공은 일반 기계가공에 비하여 높은 절삭속도와 이송속도로 생산비용 절감, 높은 재료 제거율, 가공시간의 단축시킴으로서 생산효율을 증가시켰다. 생산효율의 증가로 머시닝센터를 주로 사용하는 금형 가공에서 각광 받고 있으나, 높은 이송과 절삭속도로 고가의 공구를 급격히 마모시켜 가공업체의 생산이윤을 저하 시킨다. 현재 금형업체의 한 달 동안의 공구 사용비용은 업체에 따라 다소 차이

가 있으나 작업자의 한달 임금과 상응하는 금액을 공구비용으로 지출하고 있다. 이러한 공구 의 지출비용을 줄이기 위해서 금형 가공 업체에서는 가공 재료, 제품의 형상, 크기, 정밀도, 절삭공구에 따라 절삭 환경의 최적화를 하려 하고 있다. 그리하여 생산자는 가공 상황에 따른 적절한 절삭 환경에 대한 데이터를 얻기 위해 생산자마다 공구수명, 절삭력, 표면 거칠기와 같은 자료가 실린 데이터를 얻고자 다양한 실험을 하고 있다. 이렇게 얻어진 절삭조건들은 통계적인 방법을 사용하여 가공환경에 따라서 최적의 가공 경제문제를 형성하게 된다.

* 인하대학교 대학원 (g2021039@inhavision.inha.ac.kr)
인천광역시 남구 용현동 인하대학교 기계공학과
+ 수원대학교 기계공학과
++ 인하대 기계공학과
+++ 한국생산기술연구원

실험을 통하여 얻어진 절삭변수들은 절삭환경에 대하여 그리 유동적이지 못하며 최적의 절삭 환경 또한 절삭 공구 수명에 의하여 결정지어지는 단일화 문제가 대부분이다. 또한 생산현장의 가공환경이 바뀌게 된다면 아무리 같은 공구와 재료를 사용한다 하더라도 최적 환경은 변하게 되며 기존의 절삭 데이터를 가지고 최적 환경을 결정지을 수 없다.

현재 금형 가공은 다품종 소량 생산으로 품종이 바뀌어질 때마다 새로운 절삭경제문의 구성하여야 한다. 이러한 절삭환경은 단일 절삭 경제문제에 대한 지포 일 뿐 통합적인 절삭 경제문제를 구성하기에는 미흡하다. 본 연구는 J사의 가공 조건을 토대로 하여 공구수명을 규명하고 절삭률 - 공구수명 특성곡선을 이용하여 절삭환경의 변화에 따라 새로운 최적의 절삭환경 및 절삭 경제문제를 다루고자한다.

2. 고속가공의 절삭 특성과 공구마모

고속가공에서는 절삭속도의 증가로 절삭 부위의 높은 절삭온도와 큰 전단변형으로 상온에서의 가공재의 전단강도보다 작은 전단력을 가지게 되며, 고온 고압으로 인하여 가공재가 국부적으로 연화되어 가공재가 유체 거동양상을 보인다. 또한 고속가공과 일반가공의 두드러진 차이점은 칩의 모멘텀 효과로 일반가공에서는 칩의 모멘텀은 무시할 정도로 작으나 고속가공에서는 높은 절삭속도로 모멘텀을 무시할 수 없게 된다. 따라서 고속가공에서는 절삭력은 매우 작아지나 칩의 모멘텀은 매우 커지게 된다. 고속가공에서의 공구의 마모는 여러 가지 복합적인 현상으로 인하여 발생하며 크게 두 가지 형태로 나타난다. 첫 번째로 고속의 절삭속도에 의해서 갑자기 공구에 과도한 힘이 걸리기 때문에 공구의 크랙이 발생하며, 크랙에 의하여 비정상적인 공구의 파손이 일어난다. 두 번째는 이상적인 공구의 파손으로 절삭거리에 따라 점진적 일어나는 마모로 이중 가장 큰 역할을 하는 것이 고경도의 가공재료와 높은 절삭속도, 이송속도로 공구와 피삭체 사이에 심한 마찰로 인하여 높은 절삭열이 발생하며, 절삭열에 의해 마모이며, 또 다른 형태는 공구와 공작물 사이에 이물질이 연삭 입자의 역할을 하여 발생하는 형태의 두 가지가 있다. 가공 중 발생한 높은 절삭열은 공구의 코팅층을 변질시키며 공구와 절삭재 사이에서는 화학적 반응이 일어난다. 이와 같이 변질된 코팅층은 공구의 내마모성을 저하시켜 공구의 마모가 쉽게 일어나게 한다. 이물질에 의한 공구의 마모는 공작물 가공시 미세한 칩이 발생하며, Fig.1에서 보는 것처럼 칩은 공구와 공작물 사이에서 연삭 입자의 역할을 한다.

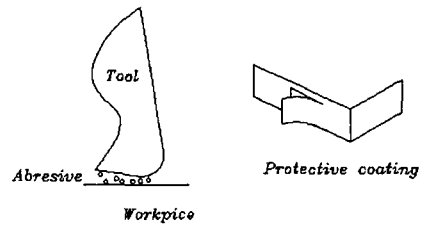


Fig.1 The Wear mechanisms on the coated tool

미세한 칩은 공구의 코팅층을 빠르게 박리 시키고 이로 인하여 공구의 마모를 쉽게 일어나게 한다. 따라서 공구의 마모는 어떤 특정한 인자로 인하여 발생하는지 정확히 알 수가 없다. 공구수명은 여러 조건에 민감하게 변화하므로 환경에 따른 적절한 조건을 부여하여야 한다. 따라서 절삭환경에 따른 적절한 절삭 환경을 결정해야하며, 본 논문에서는 R-T 특성곡선을 사용하여 최적의 절삭환경을 예시할 것이다.

3. R-T 특성곡선의 구성

생산을 최대화 하기위해 절삭경제 문제는 절삭공정 시간과 기계 정지시간의 두 항의 합을 목적함수로 하며, 절삭률과 공구 수명식에 의하여 다음과 같은 식으로 표현 된다.

$$I = \frac{K_1}{R} + \frac{K_2}{RT} \quad (1)$$

목적함수 I는 가공 절삭비용의 최소화와 생산량을 최대화 하기 위한 함수로서 K_1 과 K_2 는 작업자의 분당 임금과 절삭 공구 비용 등의 절삭함수이다. 절삭실험 데이터의 회귀분석에 의한 모델링과 기하계획법에 의하여 공구 수명과 절삭력 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = C \prod_{i=1}^n X_i^{b_i} \quad T = r \prod_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

절삭경제문제는 목적함수 I와 구속 조건식에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Minimize

$$I = C_{01} \prod_{i=1}^n X_i^{-1} + C_{02} \prod_{i=1}^n X_i^{a_i} \quad (3)$$

subject to

$$d = C_j \prod_{i=1}^n X_i^{a_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

식에서 나타난 C_{01} , C_{02} a_{0j} 는 절삭력 공구수명모델의

계수 및 지수들이고 m 은 구속조건의 수이다. 위 식을 기하적 방법으로 쌍대 문제로 구성하면

Maximize

$$d = \left(\frac{C_1}{w_1}\right)^{w_1} \left(\frac{C_2}{w_2}\right)^{w_2} \prod_{j=1}^n C_j^{w_j} \quad (5)$$

Subject to $w_{01} + w_{02} = 1 \quad (6)$

$$w_{01} + a_{ij}w_{02} + \sum_{j=1}^m a_{ij}w_j = 0 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

기하적 방법으로 얻어진 쌍대목적함수에 로그를 취하면 선형식이 된다. C_{01} 와 C_{02} 는 쌍대변수 w_j 의 기본해화여부에 영향을 미치지 않는다. 그리고 w_1 은 절삭환경구성에 영향을 미치지 않으므로 생략이 가능하다. w_1 를 제외하고 새로운 쌍대문제를 구성하면 다음과 같다.

Maximize

$$z = \ln(d) = \sum_{j=1}^m (\ln C_j) w_j \quad (8)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}w_j = P_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad 0 < w_{02} \leq 1 \quad (9)$$

$$w_j \geq 0 \quad \text{여기서 } P_i = 1 - (1 + a_{0i})w_{02} \quad (10)$$

위의 식에 실험에 의한 데이터를 대입시켜 원 문제 I합수를 만든다.

4. 실험에 의한 고속가공의 최적화

4.1 실험 장치

현장에서 사용하고 있는 고속가공환경을 적용하여 실험하였다. 본 실험에서 사용된 고속 머시닝센터는 최대주축 속도 1485 fpm, 최대 이송속도 1181in/min인 DECKEL MAHO사의 DMV 100수직형 고속 머시닝 센터를 사용하며 공구수명실험을 하였다. Fig.2은 실험 장치도를 보여주고 있다. 절삭 공구는 현장의 가공 환경을 고려하여 가공현장에서 사용하고 있는 $\phi 8$ 4날 flat end mill을 사용하였다.

4.2 실험 방법

본 실험에서는 KS규격을 기준으로 하여 공구마모 판정을 하였으며, 마모 폭 0.3mm, 일 때를 기준으로 하여 측정하였다. 절삭력은 공구마모 실험하기 전과 공구마모 후를 측정하였다.

실험은 습식 가공으로 하였으며 실험 조건 은 금형 가공업체의 가공환경을 고려하여 Table 1과 같이 선정하였다.

공구마모의 측정은 이송길이 376mm 측정 후 매 940mm를 측정 하였고 마모의 크기가 KS규격에 가까워 지면 측정 거리를 최소 188mm 간격으로 측정하였다. 공구의 4날을 모두 측정하여 마모 폭의 평균값이 0.3mm이면 공구수명이 다한 것으로 하였다.

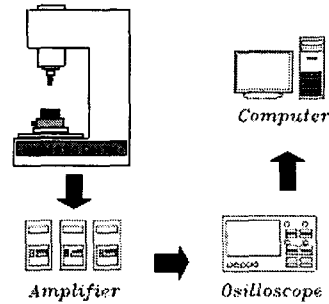


Fig. 2. Experimental set up for measuring cutting force

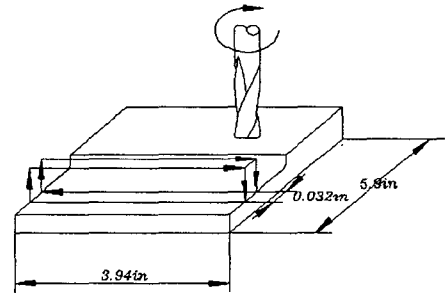


Fig. 3 Cutter orientation

Table 1 Experimental condition

Machining parameter			
work piece	SKD 61		
	HRC 49 ~ 53		
operation	Down milling		
fpm (ft/min)	577	660	742
feed(ipm)	110	151	198
depth (in)	0.027	0.024	0.02
Cutting Environment	wet.		

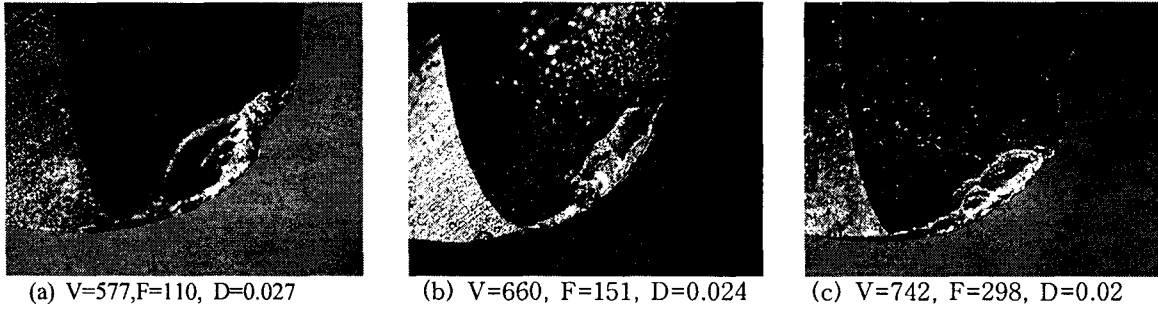


Fig.4 Photographs of the tool wear of the end mill in relation to the Experimental condition

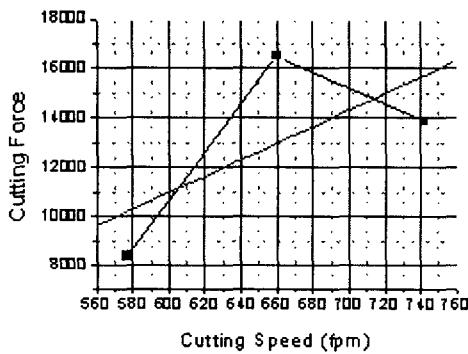


Fig. 5 Cutting force according to Cutting Speed

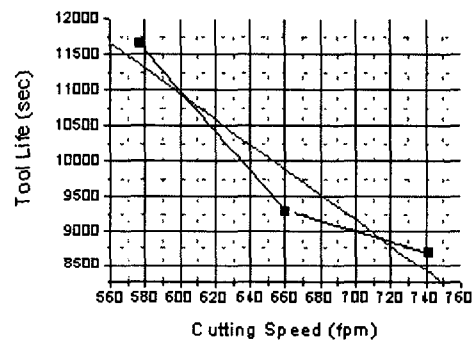


Fig. 6 Tool Life according to Cutting Speed

4.3 실험 결과

최적의 절삭 경제문제를 구성하기 위해서는 절삭력식과 공구수명식을 필요로 한다. Fig. 5은 실험 초기의 절삭력 분포를 나타낸 것이다. 실험에 의한 공구마모 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험을 시작하고 초기 측정 점부터 공구에 미세한 치핑이 발생하였으며, 절삭 깊이가 증가 할수록 이상적인 마멸을 일으켰다. 그리고 어느 정도의 절삭 깊이에 도달하면 절삭열에 의해 공구가 파손되었다. 이는 코팅층이 절삭열에 의하여 가열과 냉각이 반복적으로 일어나 열충격에 의하여 코팅층이 박리 되어 일어난 것으로 보인다. Fig. 6 조건별 공구마모 결과이다. 절삭경제문제에 적용하기 위하여 절삭력과 공구수명의 실험 결과 값을 회귀 분석을 통하여 수식을 모델링 하였다.

5. 절삭경제

절삭경제 함수 I를 절삭력 모델링하기 위하여 공구 마모 결과와 측정된 데이터를 가지고 회귀 분석을 통하여 다음과

같은 공구 수명식 (T), 절삭력(P)와 절삭률(R)에 대한 모델식을 얻었다.

공구수명 모델 :

$$T = 9788.86V^{0.1469} D^{-1.3585} F^{-1.5574} \quad (11)$$

절삭력 모델 :

$$P = 12444.076F^{2.2032} D^{2.4321} \quad (12)$$

재료 제거율 :

$$R = 12VDF \quad (13)$$

현재의 J사의 작업자 임금비용 ₩400/min 이며, 공구 및 공구 교환비용 ₩100,000으로 목적함수를 모델링 하였다. 경제문제의 구축을 주는 인자로는 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이, 절삭력으로 하였다. 절삭력 구속조건은 마모후의 조건별 절삭력을 측정하여 그중 최소 절삭력 26826gf를 가 공경제문제의 제약 조건으로 사용하였다. 공구수명 모델과

절삭력 모델을 목적함수 I에 대입하면 다음과 같다.

Minimize

$$I = 33.3V^{-1}D^{-1}F^{-1} \times 0.85V^{-11469}D^{0.3585}F^{0.5574} \quad (14)$$

Subject to

$$0.464D^{2.4321}F^{2.2032} \leq 1 \quad (15)$$

$$0.0013V \leq 1 \quad (16)$$

$$3.7D \leq 1 \quad (17)$$

$$0.005F \leq 1 \quad (18)$$

$$577V^{-1} \leq 1 \quad (19)$$

$$0.02D^{-1} \leq 1 \quad (20)$$

$$110F^{-1} \leq 128 \quad (21)$$

위의 원 문제 I 대하여 기하적 계획법을 사용하여 로그 쌍대문제를 구성하면 아래의 d와 같은 쌍대문제가 된다.

Maximize

$$d = -0.77w_1 - 6.65w_2 + 1.31w_3 - 5.3w_4 + 6.36w_5 - 3.91w_6 + 4.7w_7 \quad (22)$$

Subject to

$$w_2 - w_5 = 1 - 0.1469w_{02} \quad (23)$$

$$4.314w_1 + w_3 - w_6 = 1 - 1.3582w_{02} \quad (24)$$

$$3.234w_1 + w_4 - w_7 = 1 - 1.5574w_{02} \quad (25)$$

로그 쌍대문제를 풀어 최적의 심플렉스표를 구하면 현재 환경에 대한 최적 환경의 변화 추세를 알 수 있다. 심플렉스표를 이용하여 로그 쌍대문제를 풀면 Table 2와 같은 최종 심플렉스 표를 얻을 수 있다.

Table 2 Optimal Simplex Table

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	sol
Z	0	0	2.56	0	0.29	94.69	0.6498	
W2	0	1	0	0	-1	0	0	1.01
W1	4.31	0	0.23	0	0	-0.23	0	0.23
W4	3.23	0	-0.75	1	0	0.75	-1	0.26

6. 경제적 목표 및 절삭경제 상수의 변화

Simplex Table을 이용하여 쌍대문제의 최적해를 구하면 w_2, w_1, w_4 가 된다. 최적해는 원문제의 구속 조건식 (15), (16), (17)을 불변하게 구속한다. R-T특성 곡선을 그리기 위해 실행 가능 여부를 결정하는 구간을 정해야 하는데, 이 구간은 최적해를 로그쌍대 문제 제약식에 대입하여 w_{02} 의 값을 구하여 실행 가능 영역을 구한다.

$$\begin{bmatrix} w_2 \\ w_1 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.232 & 0 \\ 0 & -0.749 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 - 0.1469w_{02} \\ 1 - 1.3582w_{02} \\ 1 - 1.5574w_{02} \end{bmatrix} \quad (26)$$

w_2 이외의 다른 변수들은 모두 어느 식에 대입을 하여도 양의 값을 가지게 되므로 실행가능 영역을 구할 수가 없다. 실행가능영역이 변하는 구간은 다음과 같다.

$$1\text{구간} : 0 < w_{02} < 0.642$$

$$2\text{구간} : w_{02} = 0.642$$

$$3\text{구간} : 0.6425 < w_{02} < 0.736$$

$$4\text{구간} : w_{02} = 0.736$$

$$5\text{구간} : 0.736 < w_{02} < 1$$

현재 가공 환경에서 C_{01}/C_{02} 는 0.02로 최적의 절삭경제를 구성하는 절삭가공 환경은 $V=577, F=198, D=0.027$ 가 된다.

Table3 Change of Machining Objectives and Constran

Regin	Dual		Primal		
	w_{02}		Co1/Co2		
	max	min	max	min	
1	0	0.642	w_1, w_2, w_4	0.025	Force, Max speed, Max feed
2		0.642	w_1, w_2	0.89 0.025	Force, Max feed
3	0.642	0.736	w_1, w_2	2.9 0.89	Force, min feed, Max speed
4		0.736	w_2, w_7	3.5 0.89	Max speed, min fee
5	0.736	1	w_2, w_7	3.5	Max speed, min fee

만약 임금 및 공구비용이 임금W400에서 W300으로 공구 비용은 W100,000에서 W150,000으로 바뀌어 진다

면 C_{01}/C_{02} 는 0.05로 변화하게 된다. 따라서 현재의 최적 절삭 환경은 Table3로부터 $V=577$, $F=198$, $D=0.024$ 로 변화하게 된다. 이와 같이 절삭력 - 공구수명 특성 곡선은 절삭 경제 상수의 변화로 인해 최적의 절삭조건을 재구성 및 풀이 없이도 얻을 수 있는 장점이 있다.

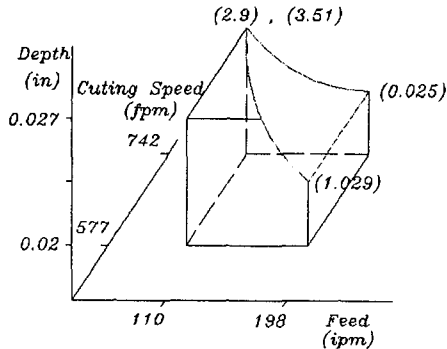


Fig. 7 R-T Curve of Change of Machining Objectives and Constant

7. 결론

본 실험에서는 절삭력-공구수명 특성 곡선을 이용하여 현장의 가공 경제문제를 풀어 보았다. 현장의 가공 환경에 최대한 접근하고자 J사에서 사용하고 있는 가공조건을 바탕으로 하여 실험을 하였으며, 실험에 의해 얻어진 절삭력, 공구 수명을 회귀 분석하여 환경에 따른 가공 최적화를 논하였다. R-T 특성 곡선을 통한 절삭경제 문제는 공구수명, 절삭을 가공비용 등의 경제 문제를 적용하여 납기일단축, 가공시간의 단축, 효율적인 절삭가공환경을 보다 손쉽게 얻을 수 있고 가공 환경의 변화에 따라 가공비용 계수를 R-T 특성 곡선에 적용하여 손쉽게 현재의 가공 환경을 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

지금까지 고속가공에서 작업자의 경험을 바탕으로 가공 환경의 변화에 적합한 가공조건과 경제문제를 해결하려 하였다. 이러한 문제점을 선형 계획법과 기하적 계획법을 사용하여 복합적인 가공 경제문제에 접근해 보았으며, R-T 특성 곡선을 통하여 가공환경이 바뀌어도 유연적으로 가공 환경에 대응할 수 있는 방법을 제시 하였다. 이는 유동적으로 변하는 가공환경에 최적의 가공조건과 생산을 향상이라는 두 가지 목표를 동시에 달성할 수 있는 방법을 실험을 통하여 확인하여 현재보다 생산물의 향상에 기여 할 수 있을 것이라 생각된다. 절삭가공 이론과 실제

참고 문헌

- (1) Y.S. Chang and M.W. Cho 2001 "flexible optimization of machining variable using constrained R-T characteristic curve" Taylor and Francis. VOL.39, NO.17, 4065-4075
- (2) C.L.Hough, Jr and Y. Chang 1998, " Constrained Cutting Rate - Tool Life Characteristic Curve, Part 1 Theory and General Case" ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering Vol. 120(1), 156 - 159.
- (3) C.L.Hough, Jr and Y. Chang 1998, " Constrained Cutting Rate - Tool Life Characteristic Curve, Part 2 Convex Programs" ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering Vol.120(1), 160 - 165
- (4) Beightler, C.S., and Phillips, D.T., 1976 Applied Geometric Programming, John Wiley and Sons, New York.
- (5) Knut Sorby, Kjell Tonnessen and Jan Erik Torjusen, 2000 "Improving High Speed Flank Milling Operation in Multi-Axis Machines" Annals of the CIRP Vol. 49.
- (6) J. S. Kim, D. W. Lee, Y. H. Jeong, M. C. Kang 2000 " Advanced Machining Technology for Die Manufacturing" Journal of the Korean Society of Precision Engineering. Vol, 17, No, 4
- (7) Slavko Dolin ek, Borivoj u tar ic, Janez Kopaca 2001, "Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes" Elsevier Science
- (8) Min Yang Yang, 1998, "Optization of Cutting Tool for High Speed Machining" The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol 12.
- (9) S.W.Kim, C.S. Ahn and D.W. Lee 2000 " Evaluation of Machinability by Cutting Environments in High-Speed Machining of Difficult-to-cut Materials" Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineering. Vol.9
- (10) M,Y,Yang, 1997, "절삭가공 이론과 실제" Cheong Moon Gak Phbishers.