

고속 머시닝센터의 진동특성 및 가공성 평가

강익수*, 강명창⁺, 김정석⁺, 김기태⁺⁺

Evaluation of Vibration Characteristics and Machinability of High Speed Machining Center

Ik-Soo Kang*, Myung-Chang Kang⁺, Jeong-Suk Kim⁺, Ki-Tae Kim⁺⁺

Abstract

The high speed machining center(HMC) has been widely applied to manufacture a die and trial product in many machine industry. Because the evaluation for HMC is not sufficiently performed and the efficient cutting conditions can't be selected, a great loss has been caused in the cost aspect. In this study, the need of preliminary running time and unstable spindle speed is presented by the analysis of acceleration in idling. The Machinability for the TiAlN coated flat end mill and STD11(H_rC60) is evaluated from the trends of tool wear and cutting force according to cutting conditions. The resonance spindle speed is identified through the tool wear and natural frequency test.

Key Words : High Speed Machining Center(고속 머시닝센터), Machinability(가공성), Tool Wear(공구마멸), Cutting Force(절삭력), Natural Frequency(고유진동수)

1. 서론

국내외적으로 고속 머시닝센터의 개발과 수요가 활발하게 이루어지고 있으며, 고속가공기술을 적용하여 보다 빠르고, 정밀하게 금형 및 시작품을 제작하고 있다. 하지만, 고속가공기에 대한 평가나 고속가공시에 나타날 수 있는 현상들에 대한 연구가 미진하여 발생할 수 있는 문제점에 신속한 대처가 어렵고, 고속가공기의 장점을 충분히 활용하지 못하고 있으며, 적절한 가공조건을 선정하지 못해 비용적으로 막대한 손실을 초래하고 있는 실정이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 다양한 방법으로 가공기의 성능을 파악하여 최적의 성능을 발휘할 수 있는 조건을 제시하고, 유용한 정보를 제공하는 것이 필요하다.

공작기계의 성능평가에서 가장 중요한 부분은 주축계이며, 실제 가공공정을 수행하면서 가공성을 파악할 수 있는 대표적인 인자는 공구마멸이다. 공구마멸 중에서도 엔드밀의 경우에는 여유면마멸(Flank Wear)의 특성이 가공성을 평가하는 주요한 인자가 된다. 또한, 절삭력은 공구마멸과 함께 가공성을 평가하는 주요한 측정신호이며 저속영역에서는 상용화된 공구동력계가 적용되고 있지만, 10,000rpm 이상의 고속영역에서는 응답에 문제가 되고 날당 고주파 신호의 획득이 곤란하기 때문에 고속에서의 절삭력신호는 신뢰성이 떨어지게 된다⁽¹⁻³⁾.

지금까지 공구마멸에 대한 평가와 감시에 대한 연구가

* 발표자, 부산대학교 정밀기계공학과(iskang@pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30번지

+ 부산대 기계공학학부

++ 화천기공(주)

많이 진행되어 왔지만, 많은 연구 결과들이 조건별 마멸경향에 대한 평가만 있거나, 마멸에 따른 센서신호를 정량화하여 직접적인 측정없이 마멸량을 감시(Monitoring)하고자 하는 연구가 대부분이었다. 신중한 분석과 평가가 이루어지지 않으면 이러한 연구는 일회적인 실험에 불과할 수 있으며, 신뢰성을 잃는 경우도 발생하게 된다.

주축의 진동특성에 대한 파악도 주요한 성능평가 척도이며 가속도계(Accelerometer)를 사용한 주축의 성능평가 방법에는 주축을 회전시켜 신호의 변화로부터 특이 회전수를 찾은 것과 정지한 주축에 대해 고유진동수를 측정하여 공진 유발가능 회전수를 찾는 방법이 있으며, 가공실험을 통해 검증하게 된다. 이외에도 열변위 오차, 주축 및 테이블 이송 오차, 런아웃(Runout) 등의 측정을 통해 공작기계 주축계의 성능을 평가하게 된다.

본 연구에서는 42,000rpm급 주축을 가진 고속 머시닝센터에 대해 주파수응답 특성과 가속도계를 사용하여 주축회전수별 진동특성을 파악하고, 열변위 특성을 알아보았으며, 기본적인 주축회전수, 날당이송 변화에 따른 가공조건별 공구마멸 경향과 절삭력 특성을 분석하여 펄드밀에 대한 측면가공시의 가공성을 평가하고자 한다.

2. 실험적 배경

2.1 기계진동 특성

일반적으로 대부분의 기계는 진동을 하며, 특히, 베어링(Bearing)을 포함하는 회전기계는 시간에 따라 Fig. 1과 같이 3단계로 진동이 진행된다⁽⁴⁾. I 은 초기운전으로 안정화되어 가는 단계이며, II는 정상적인 운전이 진행되는 단계이고, III은 급격한 진동으로 파괴(Failure)가 진행되는 구간이다. 감시를 통해 III단계 초기인 A 위치에서 조기에 검지(Detection)하여 운전을 멈추어야 한다.

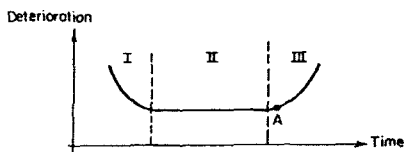


Fig. 1 Deterioration-time Curve for Machinery

회전기계인 공작기계의 주축계도 이러한 진동특성을 보일 것이며, 다양한 속도의 변속이 가능하기 때문에 초기에 불안정한 속도영역이 존재하고, 안정화되기 위한 예비운전

이 필요하다.

2.2 고속가공과 공구마멸

범용가공에 비해 고속가공은 빠른 주축회전수로 인해 동일한 소재제거율(MRR; Metal Removal Rate)을 가지면서도 가공조건들이 상대적으로 낮아서 공구수명이 길고, 좋은 표면정도가 예상되지만, 소직경 엔드밀의 사용으로 강성이 약화되고, 고속으로 원주속도가 증가하며, 런아웃(Runout)과 공구처짐(Tool Deflection)이 증가하여 오히려 공구수명이 줄어드는 경향을 보이게 된다. Fig. 2와 3의 실험결과가 이를 잘 나타내주고 있다⁽⁵⁾

Fig. 2와 3은 20,000rpm급 주축에 대한 실험결과이며 주축회전수 증가에 대해서는 공구수명이 지속적으로 감소하며, 날당이송 증가에 대해서는 선형적으로 감소하였다. 40,000 rpm 급 주축에 대해서도 실험결과에 대한 검증이 필요하며, 동일한 가공효율에서 어떤 가공조건을 증가시키는 것이 유효한지가 파악되어야 할 것이다

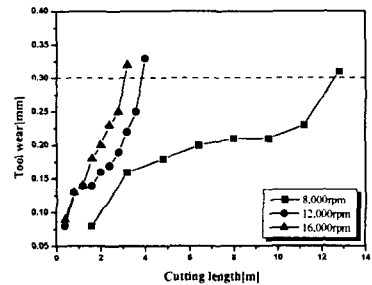


Fig. 2 Tool Wear according to Spindle Speed

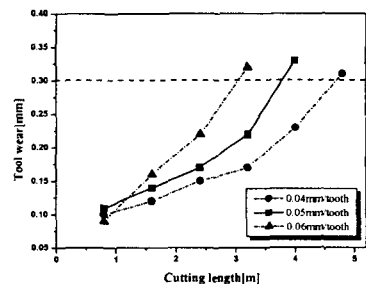


Fig. 3 Tool Wear according to Feed per Tooth

3. 실험장치 및 방법

최대 주축회전 42,000rpm, 최대 이송속도 32m/min인 5

축 머시닝센터(Mikron UCP -710)를 사용하였다. Fig. 4에 Mikron UCP-710의 그림과 재원, Fig. 5와 6에 실험장치도, Table 1에 실험에 사용된 장비와 사양을 나타내었다.

Max. rpm	42,000rpm
Max. Feed	32m/min
Spindle Power	14kW
Controller	Heidenhain TNC426

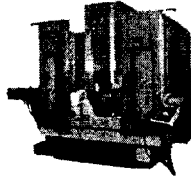


Fig. 4 Specification of High Speed Machining Center

Table 1 Specification of Instrument

Machining Center	Mikron UCP -710
Oscilloscope	Lecroy9300A, 200MHz
Tool Dynamometer	3-axis Force Sensor(9251A)
FFT Analyzer	B&K 4Ch. Type 3022
Impact hammer	PCB 086B04
CCD Camera	Neocom(×200)
Accelerometer	B&K 4393
Tool	4 Flute Flat Endmill (TiAlN-coated Tool)
Workpiece	STD11(HrC 60)

Fig. 5는 주축계의 진동특성 실험장치도이다. 가속도센서를 주축의 반경방향과 이송방향에 부착하여 주축회전수를 변화시키면서 가속도 신호를 디지털 오실로스코프로 획득하였고, 가진실험도 동일한 방향, 즉 반경방향과 이송방향에 대하여 각각 가속도센서를 설치한 후 임팩트해머로 가진하여 수행하였다.

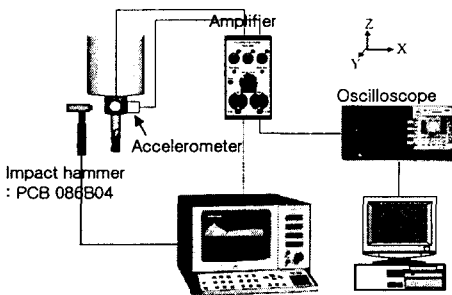


Fig. 5 Experimental Set-up for Dynamic Characteristics of Spindle

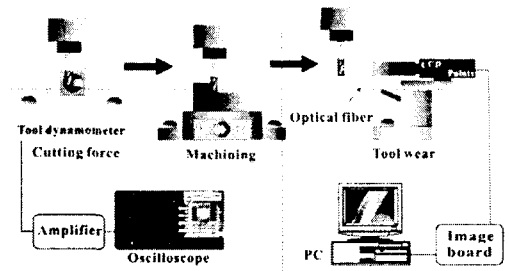


Fig. 6 Experimental Set-up for Machinability Evaluation

가공조건에 따른 절삭력과 가속도신호의 특성을 파악하기 위하여 고속가공용 공구동력계에서 주축회전수, 반경절입, 날당이송을 변화시키면서 절삭력과 가속도신호를 획득하였고, 공구동력계의 응답특성을 분석하였다. 또한, 주축회전수에 따른 공구마멸 특성을 파악하기 위하여 날당이송과 반경절입, 축절입은 고정하고 주축회전수를 증가시키면서 공구마멸 실험을 행하였고, 고정된 이송율(Feedrate)을 줌으로써 속도와 이송에 대한 가공효율 특성을 파악하였다. 40,000rpm급과 20,000rpm급 주축의 가공성 비교를 위하여 20,000rpm급인 Makino V-55에서는 한 조건에 대해 비교실험을 행하였다. 공구마멸 실험시에는 절삭력→가공→공구마멸 측정의 순으로 1패스(Pass)가 10cm인 가공시편에 대해 주기적인 패스가공을 행하면서 절삭력을 획득하고, 공구마멸을 측정하였다. 주축이 고속으로 회전할 경우, 이송이 상당히 빨라지므로 길이가 2cm인 절삭력 시편에서 안정된 신호를 획득하기 위해 날당이송을 0.1mm/tooth 이하로 제한하였다.

여유면마멸이 0.26mm이상 진전시에는 심한 치핑(Chipping)으로 불꽃이 발생하고, 표면이 타는 현상이 나타나므로 0.26mm를 마멸기준으로 정하였다.

공구마멸은 여유면마멸을 측정하였으며, 공작기계 테이블 위에서 가공 후 좌표이동을 통해 바로 기상에서 직접 측정할 수 있도록 제작된 전용지그(Exclusive jig)와 CCD를 적용한 기상계측 마멸측정장치를 사용하여 측정정밀도와 측정시간을 단축시킬 수 있었다.

4. 실험결과 및 고찰

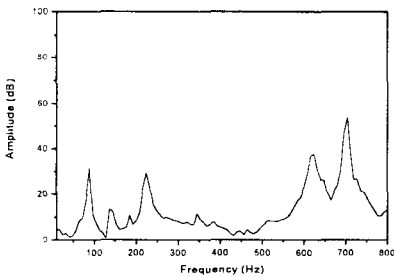
4.1 주축의 주피수응답 특성

주축의 동적 특성은 가공물의 표면조도 및 절삭깊이를 결정하는 주요한 요소이므로 절삭조건 선정시 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 주축에 대한 고유진동수를 측정하였

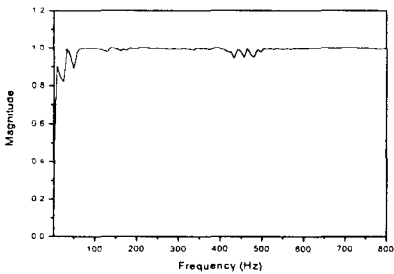
다. 주파수 응답함수(Frequency Response Function)는 전 단계가 선형이고 노이즈가 없다면 출력은 입력에 따라 발생함으로 기여도함수(Coherence Function) 값은 항상 1이 될 것이다. Fig. 7과 8에 공구를 장착하지 않은 주축의 반경방향과 이송방향에 대한 실험결과를 나타내었고, Table 2에는 고유진동수를 나타내었다.

기여도함수를 보면 실험결과에 대해 신뢰를 부여할 수 있으나 저주파영역에서 기여도함수가 1이 아닌 것은 충격망치의 틱부분이 단단하여 저주파영역을 가진하지 못한 걸로 사료된다. 공구의 영향을 살펴보기 위해 주축-공구계의 주파수 응답함수 측정결과는 공구탈착시와 거의 일치하였다.

주파수 응답함수 측정결과 이송방향과 반경방향이 다르게 나타났다. 이송방향의 1·2차 고유진동수는 88Hz와 224Hz이고, 반경방향은 184Hz와 280Hz로 나타났다. 1차 고유진동수 88Hz와 184Hz는 회전수로 변환하면 5,280rpm과 10,800rpm으로 회전수 영역이내이다. 4날 공구의 경우 10,000rpm 회전시 절삭주파수는 667Hz이기 때문에 안정영역이라 볼 수 있다. 그러나 공구에 따라서 주축 질량의 증가로 고유진동수가 하향화되는 경향이 있으므로 1차 고유진동수에 대한 충분한 검토가 필요하다.



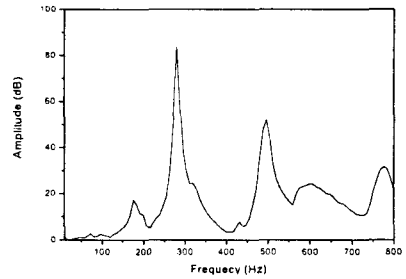
(a) Frequency Response Function



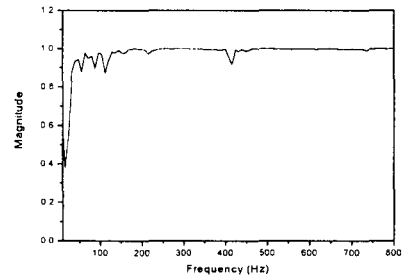
(b) Coherence Function

Fig. 7 Frequency Response Function and Coherence

Function of Spindle(Feed-direction)



(a) Frequency Response Function



(b) Coherence Function

Fig. 8 Frequency Response Function and Coherence Function of Spindle(Radial-direction)

Table 2 Results of Frequency Responses Functions

		Order(Hz)			
		1st	2nd	3rd	4th
Spindle	Feed	88	224	624	704
	Radial	184	280	496	624

4.2 주축회전수별 진동 특성

2,000rpm부터 40,000rpm까지 2,000rpm간격으로 주축 회전수를 연속적으로 변화시키면서 이송방향(x-축)과 반경방향(y-축) 가속도신호를 획득하였다. 1회 주축 구동시간은 7분이며, 4회에 걸쳐 실시한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

1회 구동시 주축의 고유진동수 영역인 30,000~35,000rpm, 40,000rpm에서 높은 가속도를 보이며, 점차적으로 줄어들다가 4회 구동시에는 거의 안정된 경향을 보여 주고 있다. 이로써 주축 구동초기에 불안정한 속도영역이 존재하므로, 가공 전에 충분한 예비구동시간이 주어져야 할 것이다. 또한 20,000rpm이하에서는 이송방향과 반경방향

가속도가 동일하나, 20,000rpm이상에서는 반경방향이 이송방향 보다 큰 경향을 보이고 있다. 이는 주축의 주파수 응답함수에서도 볼 수 있듯이 두 방향의 고유진동수의 차이로 보여진다. 머시닝센터가 반경방향에 대해 테이블이 이동하는 것이 아니라 주축이 이동하면서 외팔보의 형태를 취하기 때문에 20,000rpm이상에서는 특정 조건에 따라 반경방향 이송이 가공성에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

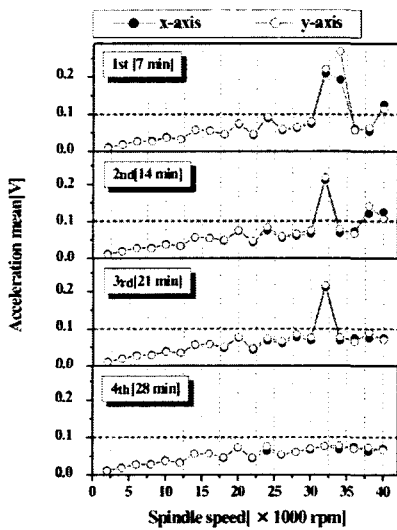


Fig. 9 Acceleration Property according to Spindle Speed

4.3 열변위 특성

초기운전시 주축의 열적 거동을 살펴보고 공회전에 필요한 워밍업시간을 알아보기 위하여 최대 주축회전수까지 가동하여 축방향 변위를 높이게이지(Height gage)를 이용하여 측정하였다.

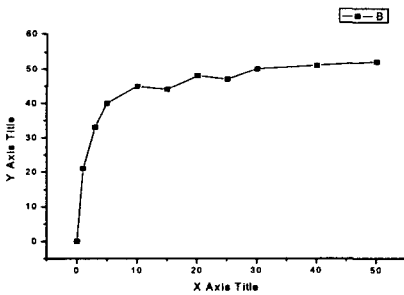


Fig. 10 Thermal Displacement Characteristics of Spindle

Fig. 10은 열변위 측정 결과를 보여주고 있다. 머시닝센터

터 운전개시 후 30분이 경과한 시점에서 주축의 최대 변위량이 50 μ m 정도에서 안정화되었다. 따라서 충분한 예비운전을 하여야 함을 알 수가 있었다.

4.4 고속 가공성 평가

날당이송이 증가하면 공구 여유면과 공작물과의 접촉이 크게 되어 마찰이 증가하고, 절입이 증가하면 칩두께가 커져서 칩에 의한 부하가 증가하기 때문에 Fig. 11에서처럼 절삭력과 가속도 신호가 모두 증가하게 된다. 주축회전수가 증가함에 따라 절삭력은 일정한 경향을 보이는 데, 이는 이론적인 날당 금속제거량과 잘 일치하며, 주축이 고속에서도 안정되었음을 나타낸다. 반면에, 10,000rpm이하와 30,000rpm 부근에서 큰 가속도 특성을 보이고 있다

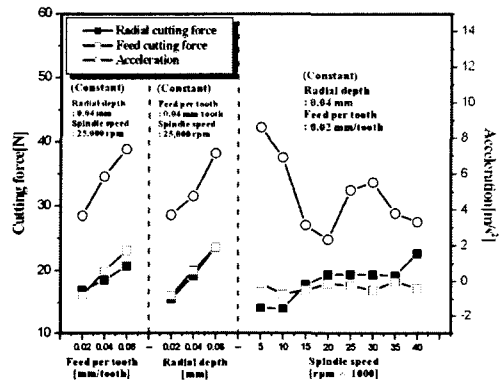


Fig. 11 Trends of Cutting Force and Acceleration according to Cutting Conditions

공구마멸 실험에 대한 가공조건을 Table 3에 나타내었고, 주축회전수에 따른 공구마멸 경향을 Fig. 12에 나타내었다. 10,000rpm을 기준으로 회전수가 2배로 증가하면 공구수명이 약 4배, 3 배로 증가하면 약8배정도로 감소함을 알 수 있다. 하지만, 20,000 rpm의 경우에는 심한 소음과 함께 공작물 표면에 채터(Chatter)무늬가 발생하였다. 20,000rpm 급 주축과의 비교를 위해 3축 머시닝센터인 Makino V-55에서도 10,000rpm에서 동일한 조건으로 가공을 행한 결과 Fig. 12에서 알 수 있듯이 40,000rpm급 보다 공구수명이 절반정도로 떨어졌다. 이는 공구홀더의 강성문제로 사료되며 고속가공에서는 Makino V-55의 공구홀더인 BT type보다, Mikron의 HSK type(HSK 40E)이 적합하다는 것을 알 수 있다.

Table 3 Cutting Conditions

Experiment	Feed/tooth (mm/tooth)	Radial Depth (mm)	Spindle Speed (rpm)
Spindle speed variation	0.05	0.05	10,000, 20,000, 30,000
Constant Feedrate	0.09, 0.045, 0.03	0.05	10,000, 20,000, 30,000

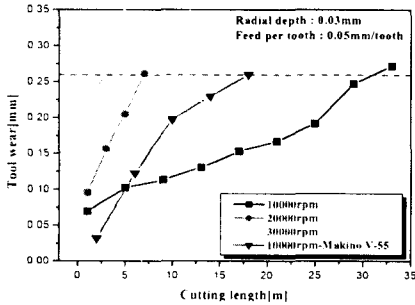


Fig. 12 Tool Wear Trends according to Spindle Speed

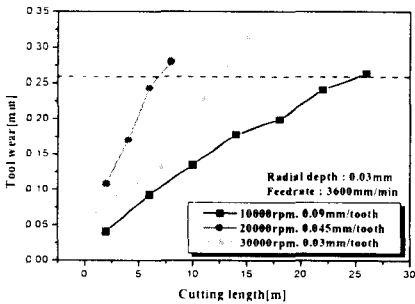


Fig. 13 Tool Wear Trends in Constant Feedrate

이송률이 3,600mm/min으로 고정된 경우의 가공효율은 Fig. 13에서처럼 이송이 높은 10,000 rpm에서 공구수명이 가장 우수하였고, 주축회전수가 고속으로 갈수록 공구수명이 저하되는 경향을 보였지만, 20,000rpm에서는 30,000 rpm보다도 공구수명이 현저히 저하됨을 확인하였다. 또한 표면도 10,000rpm보다 20,000, 30,000rpm에서 나쁜 경향을 보였다. 따라서 주축회전수가 날당이송보다 공구마멸에 더 큰 영향을 미치므로, 동일한 가공효율을 갖는 금속제거량에서는 주축회전수를 증가시키는 것보다는 날당이송을 높이는 것이 유리할 것이다.

5. 결론

고속 머시닝센터의 진동 특성과 가공성 평가를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

주파수 응답함수 측정결과 이송방향의 1·2차 고유진동수는 88Hz와 224Hz이고, 반경방향은 184Hz와 280Hz로 나타났다. 그리고 가속도신호 분석을 통해 고유진동수 영역인 30,000-35,000rpm, 40,000rpm 고속에서 주축의 불안정성을 확인하였고, 열변위 특성을 통해 예비구동시간의 필요성을 제시하였다. 또한 가공효율이 동일한 경우 주축회전수 보다는 이송을 증가시키는 것이 공구마멸 측면에서 유리하며, 20,000rpm 이상에서는 HSK형 공구홀더가 BT형보다 유리함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 2003년도 산업자원부의 중기거점과제의 일환으로 화천기공(주) 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Yan, D., El-wardancy, T. I. and Elbestawi, M. A., 1995, "A Multisensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling," *MTM*, Vol. 35, No. 3, pp. 383-398.
- (2) Roth, J. T. and Pandit, S. M., 1998, "Early Prediction of Impending End-milling Tool Failure using Acceleration Signals," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 26, pp. 243-248.
- (3) Kim, J. S., Lee, D. W., Kang, M. C., Lee, K. Y. and Kim, J. H., 1999, "Development of 3-Component Tool Dynamometer for Evaluation of Machinability in High Speed Machining," *Journal of the KSPE*, Vol. 16, No. 5, pp. 11-18.
- (4) Braun, S., 1986, *Mechanical Signature Analysis*, Faculty of Mechanical Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa.
- (5) 김정석, 1999, "고속가공성 평가 및 가공상태 모니터링 기술 개발," *화천기공(주) 연구보고서*.