

고속 가공성 평가 및 가공상태 모니터링 기술 개발

김전하(부산대 대학원), 김정석, 강명창(부산대 ERC/NSDM), 나승표, 김기태(화천기공(주))

Machinability evaluation and development of monitoring technique in high-speed machining

J. H. Kim(Graduated School, PNU), J. S. Kim, M. C. Kang(ERC/NSDM, Pusan Univ.),
S. P. Na, K. T. Kim(Hwacheon Machinery Co.)

ABSTRACT

The high speed machining which can improve the production and quality in machining has been adopted remarkably in die/mold industry. As the speed of machine tool spindle increases, the machinability evaluation and monitoring of high speed machining is necessary. In this study, the machinability of 30,000rpm class spindle was evaluated by using the developed tool dynamometer and the machining properties of high hardened and toughness materials in high speed were examined. Finally, the in-process monitoring technologies of tool wear were presented through the prediction by the experimental formula and pattern recognition by the neural network.

Key Words : High-speed machining(고속가공), Machinability(가공성), Tool wear(공구마멸), Acceleration(가속도) Cutting force(절삭력), Neural Network(신경회로망), Monitoring(감시)

1. 서론

21세기 부품과 소재산업의 발달로 고품질·고정도 금형의 생산이 주목받고 있는 현 상황에서 절삭가공은 이러한 금형산업의 큰 근간을 이루고 있다. 절삭가공 중에서도 기존의 생산위주인 범용가공에 비해 생산과 품질을 동시에 향상시킬 수 있고, 항공산업, 금형산업 등에서 내구성과 내마멸성이 뛰어난 고경도·고인성 재료가 주류를 이루면서 정삭에 의한 고정밀도의 가공을 행하고, 마무리 가공을 불필요하게 만들 수 있는 고속가공이 보다 많이 대두되고 있으며, 기존의 가공과는 달리 고속가공은 FF(Flash Fine)가공에 의해 빠르고, 정밀한 부품과 금형을 만들기 위해 필수적인 가공이 되고 있는 추세이다.

절삭가공공정에서 제품의 품질을 좌우하는 부분은 크게 공작기계, 공구, 피삭재의 세 부분으로 나눌 수 있다. 특히, 국외 공작기계 메이커(Maker)들은 고속가공기를 상용화한 상태이지만, 국내는 현재 개발중이거나 수입에 의존하고 있다. 고속가공기는 강성과 정밀도 측면에서 우수하게 설계되고, 제작되므로 구축된 후 생산자 측면에서는 금형생산 비용을 줄이기 위해 공구와 피삭재의 상태를 감시하는 것이 중요한 문제이다.^(1~4)

본 연구에서는 캘리브레이션과 고속의 응답성이 검증된 3축 힘센서(Force sensor)를 이용하여 제작한 고속의 공구동력계와 가속도센서를 사용하여 고속가공에 적합한 센싱기술을 개발하였고, 30,000 rpm급 주축의 고속가공성을 평가하였다. 또한, 난삭성 재료인 고경도(STD11 HRc60)와 고인성(SUS304)소재의 고속가공 특성을 규명하였다. 공구측면에서는 공구마멸을 쉽게 측정할 수 있는 새로운 기법과 장치를 개발하였으며, 이를 바탕으로 실시간 간접측정에 의한 공구마멸 감시를 위하여 절삭력과 가속도신호로부터 유효한 파라메타를 추출하여 신뢰성 있는 공구마멸과 상태감시 기법을 개발하였다.

2. 이론적 배경 및 실험장치

2.1 고속 가공성 평가

최대 주축회전 42,000 rpm, 최대 이송속도 32 m/min인 MIKRON UCP-710 5축 머시닝센터를 사용하여, 30,000 rpm급 주축의 가공성을 평가하였으며, 최대 주축회전 20,000 rpm, 최대 이송속도 50 m/min인 MAKINO V-55 3축 머시닝센터를 이용하여, 고경도와 고인성 소재의 가공성을 평가하였다. 플랫 엔드밀(Flat endmill)에 의한 측면가공을 수행하였으며,

가속도신호는 절삭력신호 획득시 동시에 획득하였고, 조건별 순차적 가공 후 표면조도를 측정하였다. Fig. 1에는 개략적인 가공성 평가용 실험장치도를 나타내었고, Table 1에는 사용한 장비, 센서, 공구, 공작물 각각의 사양을 나타내었다.

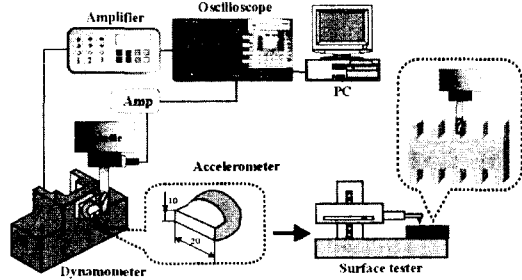


Fig. 1 Experimental setup for machinability evaluation

Table 1 Specification of instrument

Instrument	Specification
Machining center	MAKINO V-55(20,000 rpm) MIKRON UCP-710(42,000 rpm)
Surface tester	Taylor Hobson(2D, 3D)
Microscope	Olympus, Optical($\times 500$)
Oscilloscope	Leeroy9300A, 200MHz
CCD	PULNIX Lens($\times 200$)
Tool dynamometer	3-axis force sensor(9251A)
Accelerometer	B&K 4393, Resonance freq. =55kHz
Tool	WC(TiAlN coated and uncoated), 4 flute flat endmill
Workpiece	STD11(HRC15, HRC60), SUS304

2.2 공구마멸 측정과 감시

공구마멸 감시를 위해서는 먼저 정확한 마멸데이터를 얻는 것이 중요하다. 하지만, 엔드밀의 경우 헬릭스(Helix)각과 여유(Flank)각으로 인해 정확한 초점을 잡기가 어렵기 때문에 많은 오차를 유발하게 된다. 그 외 공구탈착, CCD부착, 조명각도와 조도, 관측자 등에 의한 오차가 발생한다. 이러한 오차 요소들을 제거하기 위하여 Fig. 2와 같이 새로운 공구마멸 측정용 CCD장착 지그(Jig)를 제작하였다.

지그는 공작기계 테이블(Table)에 장착되어, 공구탈착없이 가공 후 바로 좌표를 마멸측정 좌표로 주축을 이동시키게 하였다. Fig. 2와 같이 광원도 소형으로 제작하여 테이블에 부착하였고, 광섬유를 지그상에 장착하여 36.5°의 각도에서 가장 좋은 조명이 비취짐을 파악하였으며, 회전지지대로 조명각도를 조절할 수 있게 하였다. 조명의 조도는 12V 50W 할로겐램프(Halogen lamp)로도 좋은 이미지를 얻을 수 있었다. 공구마멸은 200배로 확대되어 이미지보드(Image board)를 통해 PC상 나타나고, PC화면상에 기준선을 설정하고, 날 1차여유면 끝을 기준으로 가공기의 Y축을 10 μm씩 이동시키면서 마멸을 측정하였

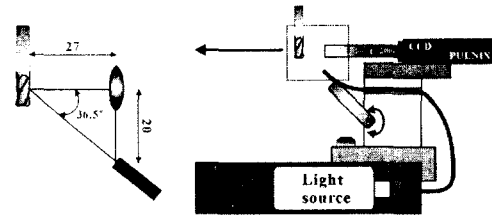


Fig. 2 Light angle and experimental setup of CCD Jig

다. 따라서, 공구마멸의 측정정밀도는 10 μm이다. 공구마멸의 측정위치는 4날에 대해서 상, 중, 하 위치에서 총 12 곳의 마멸을 측정하였고, 한 날을 지정하여 이미지들을 저장하였다.

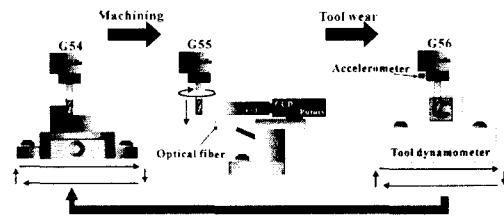


Fig. 3 Tool pass for tool wear measurement

실시간 간접 공구마멸 감시를 위한 가공 공구경로를 Fig. 3에 나타내었다. 모든 장비는 테이블상에 장착된 상태이며, 좌표계 G54(가공), G55(공구마멸), G56(절삭력,가속도)을 각각 설정하여, 가공과 측정을 순차적으로 수행하며 데이터를 획득하였다. 획득된 절삭력과 가속도신호로부터 마멸의 경향을 잘 나타내는 유효 파라메타들을 Table 2와 같이 추출하였다.

Table 2 Efficient parameters for tool wear

signal	Parameter	Nomenclature	No.
Cutting force	Radial cutting force	F_r	1
	Feed cutting force	F_f	2
	Resultant cutting force	RF	3
Acceleration	4th order frequency	A_4	4
	8th order frequency	A_8	5

반경과 이송절삭력은 설정값(Threshold)을 10N으로 한 평균값이며, 절삭력의 합력 RF는 반경과 이송방향 절삭력 제곱합의 제곱근이며 식 (1)과 같다

$$RF = \sqrt{F_r^2 + F_f^2} \dots\dots\dots (1)$$

가속도신호는 주파수변환(FFT)을 통해, 날의 회전파수인 4차와 그 2배 되는 8차 조화주파수가 좋은 경향을 나타내므로 이를 파라메타로 하였다.

감시 방법으로 실험식에 의한 마멸값의 예측과 패턴을 분류하여 신경회로망으로 패턴을 인식하게 하는 두 방법을 수행하였다. 먼저, 실험식에 의한 마멸값 예측을 위해 각 파라메타에 대한 마멸의 산포도를 조사해본 결과 직선형태보다는 곡선의 형태를 유지하므로 실험식을 곡선 회귀모형으로 정하였다. 최소자승법으로 각 파라메타에 대한 상수 a, b를 구해 실험식을 정하고, 재현실험을 통해 측정치와 예측치의 오차율을 평가한 결과 편차가 다소 존재하여, 5개 파라메타의 예측값들을 식(2)와 같이 평균하여 편차를 측정정밀도 수준으로 내릴 수 있었다.

$$Y = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 [a[i] \cdot x[i]^{b[i]}] \right) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, y : 공구마멸, x : 파라메타 값, a,b: 상수
i : 각 파라메타 No.

패턴인식을 위해 사용한 방법은 Fig. 4와 같은 오류 역전파 퍼셉트론(Back Propagation Perceptron) 신경회로망이며, 감독학습을 행하였다.

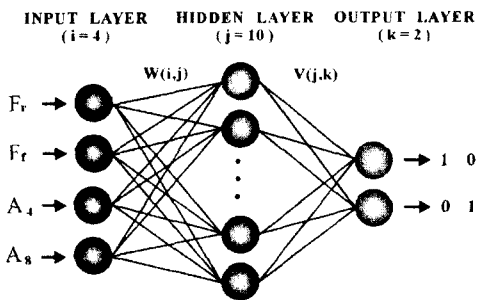


Fig. 4 Neural Network

입력 파라메타는 오인식을 줄이기 위해 A8 값과 유사하게 노멀라이징(Normalizing)하였다. 입력층 4개, 은닉층 10개, 출력층 2개로 구성되었고, 전달함수는 시그모이드(Sigmoid)함수이고, 반복횟수는 30,000회로 제한하였다. 학습으로 얻어진 입력과 출력 가중치들에 대해 측정된 4개의 입력 파라메타를 입력시키고, 시그모이드 함수를 거치게 하여 결과적인 인식패턴을 얻게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 30,000rpm급 주축 고속 가공성 평가

주축이 고속으로 회전할 경우, 이송이 상당히 빨라지므로, 길이가 2 cm인 절삭력 시편에서 안정된 신호를 획득하기 위해 날당이송을 0.06 mm/tooth 이하로 제한하였고(최소가공시간 0.1 sec이상), 소재는 STD11(HRc15)를 사용하였다. 30,000 급 주축의 가공성 평가를 위한 가공조건을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Cutting conditions

Experiment	F _t (mm)	D _r (mm)	D _a (mm)	S _s (rpm)
F _t variation	0.02~0.06 Step 0.02	10	0.04	25,000
D _r variation	0.04	10	0.02~0.06 Step 0.02	25,000
S _s variation	0.02	10	0.04	5,000~40,000 Step 5,000

where, F_t : Feed per tooth, D_r : Radial depth
D_a : Axial depth, S_s : Spindle speed

Fig. 5에서처럼 날당이송이 증가하면 공구여유면과 공작물과의 접촉이 크게 되어 마찰이 증가하고, 절입이 증가하면 칩두께가 커져서 칩에 의한 부하가 증가하기 때문에 절삭력이 증가하게 된다. 반대로 이러한 요인들은 칩제거량(Metal Removal Rate)을 증가시키게 된다. 주축회전수가 증가함에 따라 절삭력은 일정한 경향을 보이는 데 이는 고속에서도 주축의 상태가 안정하다는 것을 나타내며, 회전당 칩제거량이 일정하기 때문이다.

가속도 신호의 경우 날당이송과 절입의 증가로 주축에 작용하는 부하 증가로 진동이 증가함을 알 수 있으며, 주축회전수의 증가는 10,000 rpm이하와 30,000 rpm부근에서 큰 진동특성을 보이고 있다.

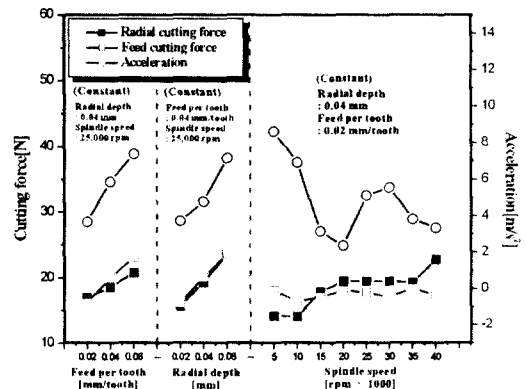


Fig. 5 Tendency of Cutting force

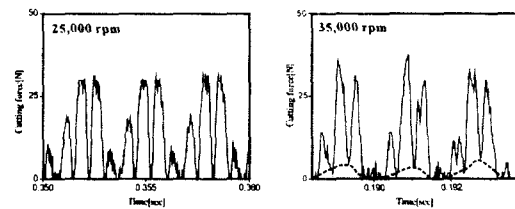


Fig. 6 Variation of cutting force waveform

주축회전이 고속이 되면서 Fig. 6과 같이 고속 공구동력계의 응답특성에 문제가 있음을 알 수 있다.

25,000 rpm(1.67kHz)의 경우 비절삭시간이 존재하고, 날당신호를 반영하고 있지만, 35,000 rpm(2.3kHz)이 되면서 비절삭시간이 사라지면서 날당신호를 잘 재현하지 못하고, 낮은 응답특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 30,000 rpm이상 고속에서 신뢰성 있는 절삭력특성을 위한 방법이 강구되어야 할 것이다.

3.2 난삭성 소재의 고속가공 특성 평가

고경도·고인성소재의 가공성 평가를 위한 가공 조건은 Table 4와 같으며, 저경도(HRc15)소재도 동일한 조건으로 마멸시험시 비교·평가하였다.

Table 4 Cutting conditions

Experiment	F _t (mm)	D _r (mm)	D _c (mm)	S _c (rpm)
F _t variation	0.03~0.07 Step 0.02	10	0.05	10,000
D _r variation	0.04	10	0.03~0.07 Step 0.02	10,000
S _c variation	0.02	10	0.05	6,000~18,000 Step 4,000

Fig. 7에서 알 수 있듯이, SUS304 소재는 인성이 강한 반면, 경도는 낮으므로 고경도 소재에 비해 낮은 절삭력을 나타낸다. 따라서, 절삭력은 소재의 경도에 좌우됨을 알 수 있다. SUS304소재의 경우, Fig. 7에서처럼 이송 절삭력이 반경 절삭력보다 커짐을 알 수 있고, 주축회전수가 증가할수록 절삭력이 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 SUS304소재의 특성인 내충격성과 고인성특성이 반경과 이송 절삭력에 크게 관여하고 있음을 나타내는 것이다.

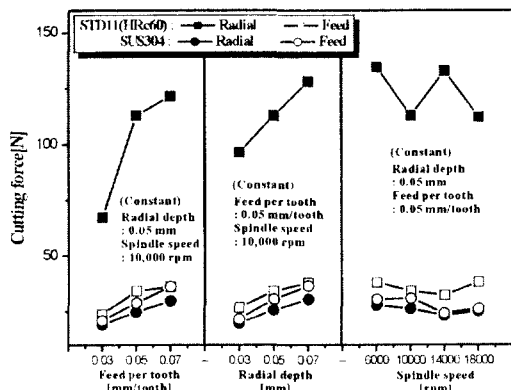


Fig. 7 Tendency of cutting force

코팅된 초경합금공구의 경우 고경도 소재에 대한 수명은 20m 정도이지만, 동일한 조건에서 SUS304에 대해서는 공구마멸이 거의 발생하지 않았다. 따라서, 고경도·고인성소재에 대한 비교가 될 수 없으므로 HRc60 고경도 소재는 코팅된 초경합금공구로 가공

하여 HRc15 소재와 비교하고, SUS304소재는 코팅되지 않은 초경합금공구로 가공하여 HRc15소재와 비교하였다. 결과적으로 Fig. 8에서처럼, SUS304소재는 초경합금공구에 대해 뛰어난 가공성을 나타내었다.

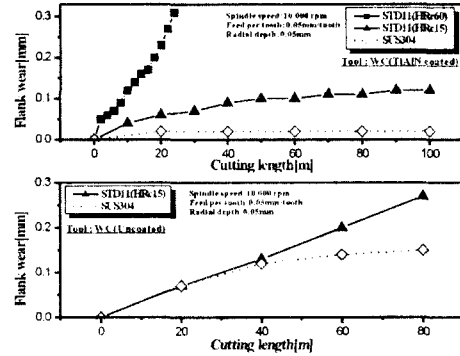


Fig. 8 Tendency of Tool wear

3.4 공구마멸 측정과 감시기법

각 위치별 마멸편차 범위와 공구마멸 추이 및 형상을 Fig. 9에 나타내었으며, 여유면마멸이 0.25 mm 이상부터는 표면형상도 좋지 않고, 표면이 타버리면서 마멸이 급진전되므로, 공구수명 한계를 여유면마멸 0.25 mm로 정하였다. 날 위치별 측정 마멸편차가 1위치에서 가장 적고, 최대마멸이 발생하므로 1위치의 마멸 평균값을 기준데이터로 정하였다.

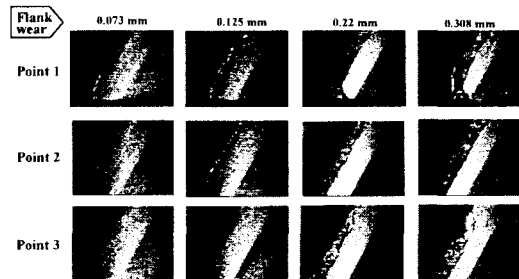
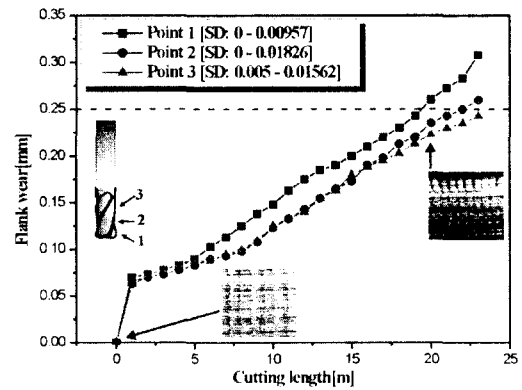


Fig. 9 Tendency and shape of flank wear

회귀모형의 공구마멸 예측실험식이 직선 모형식에 비해 측정치와의 편차가 1/4정도 줄어들음을 알 수 있었다. 동일 조건의 재현실험으로 얻어진 예측 공구마멸과 5개 예측 공구마멸의 평균치인 Y값을 Table 5에 나타내었다. 각각의 예측값들의 편차가 존재하고, 평균 예측마멸이 편차들을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 초기에 오차가 10 μm 이내로 측정정밀도보다 낮은 좋은 예측을 보이지만, 0.15 mm 이상에서는 마멸의 진전이 빨라지면서 오차가 20 μm 정도로 커지다가 다시 낮아지는 경향을 보이고 있다.

Table 5 Tool wears predicted by experimental formula

No	Measu-red	y[1]	y[2]	y[3]	y[4]	y[5]	Y
		Predicted [Error(%)]	Predicted [Error(%)]	Predicted [Error(%)]	Predicted [Error(%)]	Predicted [Error(%)]	Predicted [Error(%)]
1	0.058	0.058(0.4)	0.061(5.4)	0.059(2.4)	0.052(9.6)	0.063(11.6)	0.059(1.7)
2	0.073	0.071(2.8)	0.071(4.4)	0.071(2.8)	0.063(11.0)	0.078(7.4)	0.071(2.7)
3	0.088	0.101(14.3)	0.096(9.3)	0.099(13.0)	0.106(20.3)	0.092(4.4)	0.099(12.5)
4	0.1	0.103(4.8)	0.104(4.0)	0.104(4.4)	0.114(13.9)	0.098(2.0)	0.105(5.0)
5	0.105	0.111(6.1)	0.110(4.7)	0.111(5.5)	0.110(4.4)	0.106(0.5)	0.110(4.8)
6	0.12	0.120(0.2)	0.119(0.7)	0.120(0.5)	0.124(3.1)	0.109(9.0)	0.118(1.7)
7	0.128	0.127(0.8)	0.127(0.5)	0.127(1.0)	0.127(0.8)	0.126(1.9)	0.127(0.2)
8	0.143	0.135(5.4)	0.139(3.0)	0.136(5.1)	0.138(3.4)	0.140(2.4)	0.138(3.5)
9	0.16	0.140(12.3)	0.145(9.2)	0.141(12.0)	0.141(11.7)	0.139(13.1)	0.141(11.9)
10	0.183	0.162(11.8)	0.165(9.9)	0.162(11.6)	0.153(16.2)	0.170(6.9)	0.162(11.5)
11	0.188	0.166(12.0)	0.174(7.5)	0.167(11.3)	0.167(11.4)	0.167(11.0)	0.168(10.6)
12	0.195	0.181(7.0)	0.187(4.0)	0.182(6.6)	0.174(10.8)	0.205(5.2)	0.186(4.9)
13	0.21	0.231(10.0)	0.229(9.1)	0.231(10.1)	0.238(7.7)	0.251(19.3)	0.234(11.4)
14	0.26	0.301(15.9)	0.289(11.3)	0.302(16.1)	0.302(16.0)	0.262(0.8)	0.291(11.9)
15	0.283	0.294(3.8)	0.288(1.9)	0.295(4.2)	0.290(2.4)	0.253(10.7)	0.284(0.4)

Table 6에는 신경회로망에 의한 패턴인식의 결과를 나타내고 있다. 여유면마멸 측정값의 패턴과 인식한 패턴의 결과치가 잘 들어맞음을 알 수 있다.

Table 6 Comparison of measured and predicted pattern

No	Measu-red	Pattern No.	F_1	F_2	A_3	A_4	Predicted pattern No.
			($\times 0.00015$)	($\times 0.0003$)	($\times 5$)		
1	0.058	1	0.00575	0.00918	0.00391	0.00905	1
2	0.073	1	0.00744	0.01038	0.00515	0.00794	1
3	0.088	1	0.01152	0.01401	0.00965	0.00994	1
4	0.1	1	0.01212	0.01509	0.0106	0.0109	1
5	0.105	1	0.01317	0.0159	0.0101	0.0121	1
6	0.12	1	0.01434	0.01713	0.0118	0.0127	1
7	0.128	1	0.01545	0.01824	0.0122	0.0155	1
8	0.143	1	0.01671	0.01977	0.0136	0.018	1
9	0.16	1	0.01748	0.02061	0.014	0.0179	1
10	0.183	1	0.02087	0.02322	0.01535	0.0239	1
11	0.188	1	0.02151	0.02442	0.0173	0.0233	1
12	0.195	1	0.02414	0.02616	0.0183	0.0311	1
13	0.21	1	0.02873	0.02955	0.0219	0.0372	1
14	0.26	2	0.04238	0.0375	0.03515	0.0431	2
15	0.283	2	0.04485	0.03912	0.0355	0.0454	2

Fig. 10에는 최종적인 학습데이터와 측정데이터에 의한 인식패턴의 결과를 나타내고 있다. 경계영역인 여유면마멸 0.25 mm 부근에서 감독패턴과의 오차를 보이지만, 이로부터 마멸의 정도를 어느 정도 파악할 수 있으며, 마멸이 보다 많이 진전되면, 완전한 감독패턴에 도달할 것이다.

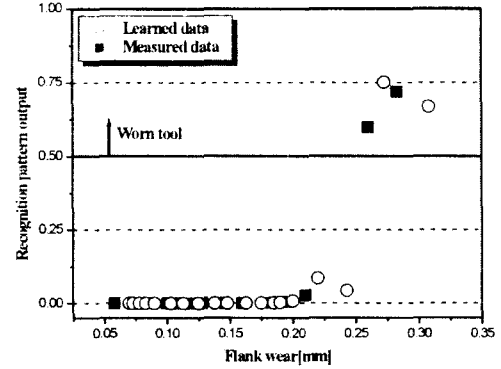


Fig. 10 Result of pattern recognition

4. 결론

본 연구를 통한 결과는 다음과 같다.

- 1) 30,000 rpm급도 20,000 rpm급 주축의 가공성 평가 결과와 유사한 결과를 나타내었으며, 특히, 저속 영역과 30,000rpm부근에서 큰 진동특성을 나타낸다.
- 2) 공구마멸측정 오차성분을 최대한 줄인 테이블 부착용 지그를 제작하여 공구마멸을 측정하였다.
- 3) 고인성소재는 이송이 변경 절삭력보다 크며, 초경 합금공구로 가공시 뛰어난 가공성을 나타냈다.
- 4) 예측실험식과 신경회로망의 패턴인식 결과가 신뢰할 수 있는 수준이며, 이러한 실시간 간접측정법의 유효성을 확인하였다.

후기

본 연구는 2000년도 산업자원부의 중기거점과제 일환으로 화천기공(주) 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Minyoung Lee, Charles E. Thomas, Douglas G. Wildes, "Prospects for in-process diagnosis of metal cutting by monitoring vibration signals", Journal of Materials Science 22, 3821-3830, 1987
2. K. F. Martin, "A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools", MTM, Vol. 34, No. 4, pp. 527-551, 1994
3. Di Yan, T. I. El-wardany, M. A. Elbestawi, "A multisensor strategy for tool failure detection in milling", MTM, Vol. 35, No. 3, pp. 383-398, 1995
4. 이기용, 강명창, 이득우, 김정석 "절삭력 신호에 의한 공구 런아웃의 온라인 감시", 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 195-198, 1998