

면삭밀링가공시 공구 부절삭날 마모길이의 퍼지적 평가

고 태 조,* 조 동 우**

Fuzzy estimation of minor flank wear in face milling

Tae Jo Ko,* Dong Woo Cho**

ABSTRACT

The flank wear at the minor cutting edge significantly affects the geometric accuracy and surface roughness in finish machining. A fuzzy estimator based on a fuzzy inference algorithm with a max-min composition rule is introduced to evaluate the minor flank wear length. The features sensitive to minor flank wear are extracted from the dispersion analysis of a time series AR model of the feed directional acceleration signal. These features, dispersions, are used for constructing linguistic rules, and then the fuzzy inferences are carried out with test data sets collected under various cutting conditions. The proposed system turns out to be effective for estimating minor flank wear length.

Key Words : Tool wear(공구마모), Minor cutting edge(부절삭날), Minor flank wear(부플랭크면 마모), Fuzzy estimator(퍼지평가기), Fuzzy inference(퍼지추론), Feature(특징)

1. 서 론

무인화 운전에서 공구의 on-line 감시는 효율적인 공구의 교환이나 가공부품의 품질관리 측면에서 중요성을 차지해오고 있다. 이러한 이유로 무인화 또는 자동화에 서 공구마모에 관한 연구가 많이 추진되어져 왔다.⁽¹⁻²⁾ 그러나 대부분의 연구는 주플랭크면(major flank)마모에 관한 것이거나,⁽³⁻⁵⁾ 주플랭크면과 크레이터면(crater)마모를 동시에 감시하는 것이다.⁽⁶⁾

Fig. 1과 같이 평면으로 챔퍼링된 밀링 인서트를 사

용하는 정밀면삭밀링공정과 같은 실제의 절삭에서는 부플랭크면(minor flank)마모는 치수정밀도와 표면거칠기에 많은 영향을 미친다.

최근 Yao⁽⁷⁻⁹⁾ 등은 정삭공정에서 공구마모의 중요성을 인식하고 봉재를 선삭할 때 일어나는 공구마모의 복합적인 현상을 감시하는 연구를 발표했다. 또한 Dornfeld는 공구의 마모에 따른 AE(acoustic emission) 신호를 추종하여 선삭에서 가공부품의 표면거칠기와 공구마모사이의 상관관계를 조사했다.⁽¹⁰⁾ 한편 일반적인 밀링공정에서 공구마모의 감시에 관한 연구는 많으

* 대우중공업㈜

** 포항공과대학교 기계공학과(중신회원)

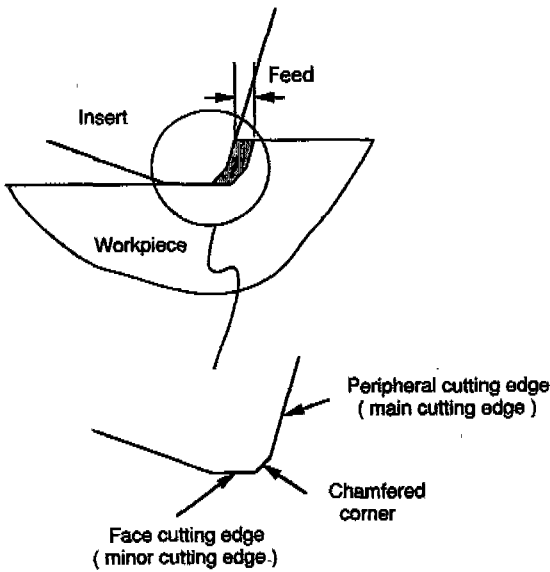


Fig. 1 Surface obtained by plane-chamfered milling cutter inserts and tool geometry

나,⁽¹¹⁻¹²⁾ 정삭밀링가공 중에 부절삭날에서의 공구마모를 감지하는 연구는 거의 없었다.

한편 공구마모길이의 평가는 정삭공정에서 기하학적 치수정밀도와 표면거칠기를 제어하는데 있어서 필수적일 뿐아니라 효과적인 공구교환정책을 위해서 필요한데, 앞에서 언급된 대부분의 연구는 공구의 상태 (fresh/worn)를 분류하는 것이기 때문에 가공의 제어와 같은 목적에는 사용하기가 쉽지 않다. 공구마모를 평가하기 위한 시도는 최근 Koren에 의해 시도되었는데 그는 모델에 기초한 방법으로 절삭력을 측정하여 공구마모율을 평가하는 연구를 했다.⁽¹³⁾

본 연구에서는 퍼지추론(fuzzy inference)을 이용하여 정밀 면삭밀링공정에서 부플랭크면 마모를 평가하는 방법을 제시한다. 퍼지추론은 인간의 추론이 중요한 역할을 하는 모델에 대해서 적용이 가능하다. 예를들어 선반의 작업자는 절삭칩의 형태, 색깔의 변화, 절삭소음 그리고 표면거칠기의 변화와 같은 애매한 신호를 이용하여 공구가 마모되었는지 또한 언제 공구를 교환해야 되는지를 판정하게 된다.

Zadeh에 의해 도입된 퍼지집합은 애매함(vagueness)을 표현하기 위하여 집합을 확장시킨 것이다.⁽¹⁵⁾ 퍼지집합은 특정 클래스에 소속되어지는 정도를 나타내는 소속도 값이 0부터 1사이에서 변하도록 그 정도를

부여하는 소속도 함수로 나타내어진다. 이때 경험이나 휴리스틱한 지식은 언어적 규칙으로 표현이 되고, 언어적 규칙은 추론을 하는데 사용되어진다. 즉 언어적 규칙과 퍼지집합을 이용하여 퍼지추론을 하며, 이를 이용하여 퍼지 평가를 구축한다. 따라서 본 연구에서 부플랭크면의 마모에 민감한 특징(feature)의 거동을 잘 파악하여 퍼지평가를 구성할 수 있다.

퍼지 평가를 만드는 과정은 언어적 규칙의 제정, 전체공간에서 퍼지 부분집합의 나누기, 소속도함수 형태를 정의하는 과정으로 크게 나눌수 있다. 이 과정은 패턴분류에서 학습과정에 해당한다고 할 수 있다. 본 연구에서 언어적 규칙을 제정하기 위해 사용되어진 특징은 주축의 하우징에 장착시킨 가속도계 신호의 이송방향 성분을 시계열 AR 모델링 한 후, 이로부터 기여도(dispersion) 해석을 수행하여 얻는다.^(7-9, 16-17, 24) 평가를 구축한 후, 정밀 면삭밀링가공에서 다양한 절삭조건하에서 구해진 시험절삭 데이터를 이용하여 off-line으로 부플랭크면 마모를 평가함으로써 그 성능을 검사하였는데, 이 방법은 우수한 성능을 나타내었다.

2. 평가기 구성요소

2.1 적응 전처리기

전처리기는 특징의 여유(redundancy)를 감소시키고 불변성(invariance)을 제공하기 위해 원시 데이터를 다르게 표현하는 것이다. 이것은 패턴분류에서 특징추출(feature extraction)이라고 하며, 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 구조로 되어 있다.

이러한 목적을 위하여 자동회귀 시계열 모델링을 사용한다.^(18, 24) 즉, 시계열 x_t 에 대한 n 차 회귀모델에 있어서, 현재의 측정값은 n 단계 이전의 값을 이용하여 다항식으로 나타낼 수 있다.

이산 AR(n)모델의 일반화 식은

$$x_t - \phi_1 x_{t-1} - \phi_2 x_{t-2} - \dots - \phi_n x_{t-n} = a_t \quad (1)$$

여기서 t 는 이산시간지수를 나타내고, x_t 는 계의 응답, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ 은 자동회귀계수 그리고 a_t 는 백색잡음이다. 만약 백색잡음 입력에 대한 계의 응답이 정적 스토캐스틱 과정이라면, 식 (1)로 주어지는 AR(n) 모델은 지승평균오차를 최소화함에 의해 최적화가 가능하다. 본 연구에서는 신호의 사전 통계적 성질을 필요로 하지않고, 또한 새로운 데이터를 받을 때마다 따라

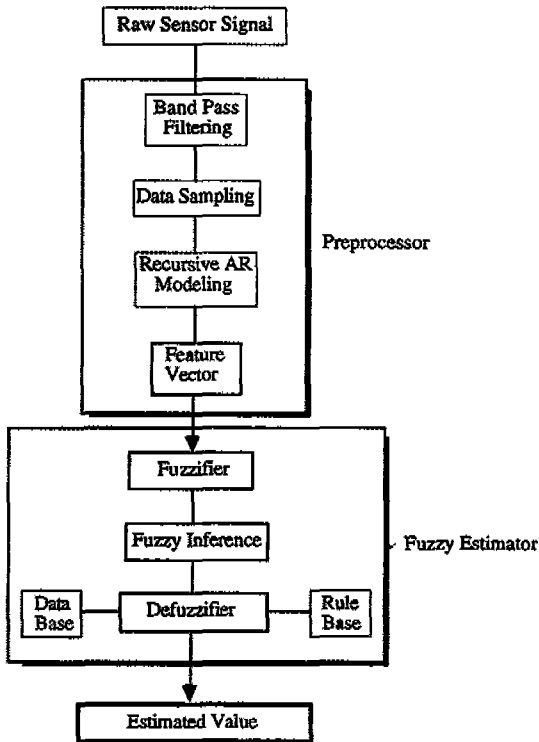


Fig. 2 Preprocessor and fuzzy estimator structure for the evaluation of tool wear length

미터를 갱신하는 RLS(Recursive Least Square)법으로 모델링하게 되므로,⁽²⁰⁾ 실제 적용이 batch알고리즘에 비해 쉽다.

적당한 AR모델이 결정되면 계의 각각의 모드가 기여하는 분산을 정량적으로 나타내기 위해 기여도 해석을 한다. 이때 기여도 퍼센트는 계의 총 파워에 대한 각각의 모드의 기여도를 나타내는 지수로서 기여도를 해석하여 구하는데,⁽¹⁸⁻¹⁹⁾ 본 연구에서는 이것을 특징(feature)으로 사용한다.

2.2 퍼지 평가기

전처리기에서 구해진 특징은 퍼지평가기의 입력으로 사용된다. Fig. 2와 같이 퍼지평가기는 다음과 같은 5개의 주요 유니트로 구성되어 있다. (1) 실수를 퍼지부분집합으로 나타내는 퍼지화기, (2) 평가규칙을 이용하여 퍼지추론을 하는 퍼지추론알고리즘, (3) 규칙에 사용되는 퍼지 부분집합의 소속도 함수를 추론알고리즘에 제공하는 데이터베이스, (4) 평가규칙을 추론알고리즘

에 제공하는 규칙베이스, (5) 퍼지집합인 퍼지추론의 결과를 공구마모길이와 같은 실수로 바꾸어주는 비퍼지화기로 구성되어 있다. 이러한 각각의 과정은 다음장에서 상세히 설명한다.

3. 퍼지추론알고리즘

전체공간 U 상의 퍼지집합 A 는 소속도 함수 $\mu_A:U \rightarrow (0,1)$ 에 의해 정의되어지는데, U 상의 요소 x 는 완전한 소속도인 1과 소속도가 없는 0 사이의 값 $\mu_A(x)$ 를 갖도록 한다. 즉 μ_A 는 U 를 소속도 공간인 $M, M = (0,1)$ 으로 매핑시키는 것이며, $\mu_A(x)$ 는 집합 A 에 대한 x 의 소속도를 나타내는 것이다.

퍼지평가기의 설계는 계의 과정에 대해 작업자가 충분히 이해하여 구축할 수 있다. 따라서 이 방법은 경험이나 휴리스틱한 지식을 사용하는 것으로서, 계를 평가하는 작업자의 전략은 언어적 규칙을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다. “만약 진동이 중간정도이면, 마모는 크다.” 여기서 진동과 마모는 입력과 출력에 대한 언어적 변수이며 Positive Big(PB), Positive Medium(PM) 등과 같은 퍼지부분집합을 이용하여 정의할 수 있다. 이러한 퍼지 부분집합은 Fig. 3과 같이 입력과 출력공간에서 여러개의 퍼지부분집합을 정의하는 소속도 함수를 이용하여 나눌수 있는데, 본 연구에서는 전체 공간상에서 삼각형의 소속도함수를 갖고 동일한 간격으로 나누어져있는 7개의 퍼지변수로 구성되어 있다.

이때 모든 가능한 상황에 대해 언어적 규칙을 만들 수는 없으므로, 퍼지관계(fuzzy relation)를 이용하여 추론된 출력 퍼지집합을 얻기 위해 추론의 합성법칙을 사용한다. 퍼지관계는 평가과정에서 입력과 출력사이의 관계이다.⁽²⁰⁻²¹⁾ 그러면 입력(Medium Vibration)과 출력(Big Wear) 사이의 관계는 두 집합의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = input * output \tag{2}$$

여기서 *는 곱을 나타낸다. 예를 들어 다음의 관계

$$R_i = (Vibration)_{Medium} * (Wear)_{Big} \tag{3}$$

는 아래와 같은 소속도 함수를 갖는다.

$$\mu_{Ri} = \{\mu_{Medium}(Vibration) \wedge \mu_{Big}(Wear)\} \tag{4}$$

이러한 n 개의 서로 다른 관계로 구성된 규칙은

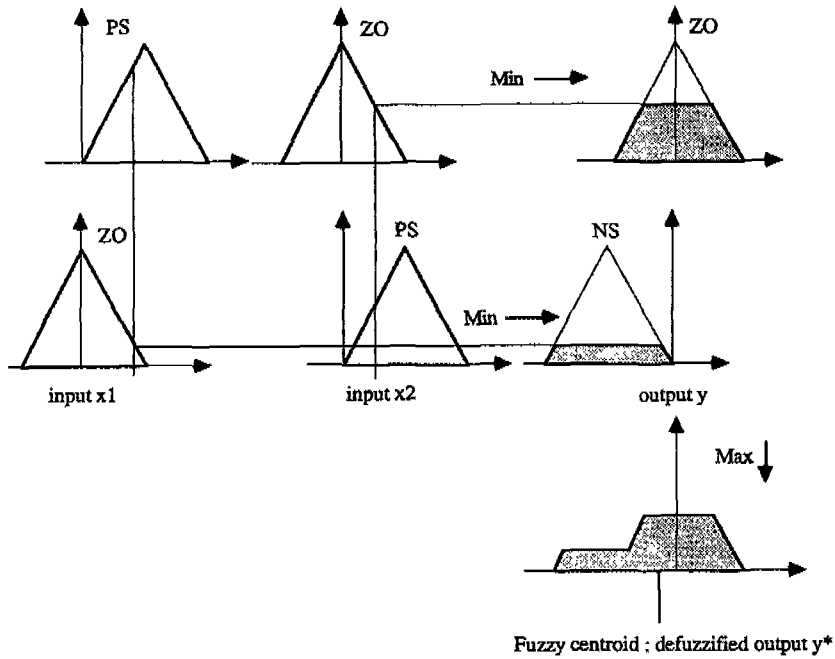


Fig. 4 Fuzzification, the max-min composition of inference and the defuzzification procedure

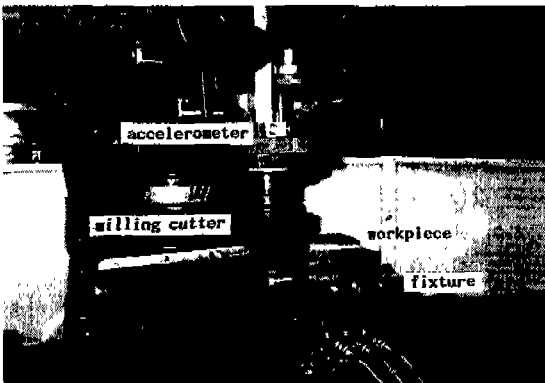


Fig. 5 The photograph of the experimental setup

챔퍼링된 것이 적당하기 때문에,⁽²³⁾ 초경공구로서 평면으로 챔퍼링된 인서트(P20)를 사용하였다. 가공시편은 탄소강(SM45C)으로 된 사각형의 소재(60×70 mm)가 사용되었으며, 절삭속도, 이송속도 그리고 절삭깊이는 각각 350-1100 rpm, 20-40 mm/min, 0.3-0.8 mm의 범위내에서 변경하여 절삭하였으며 Table 1과 같이 평가기의 규칙제정과 그 성능을 검사하기 위해서 각각 8개의 그룹으로 분류하였다. 건식절삭을 수행하였으나

Table 1 Cutting conditions for estimation experiments

Group	Cutting Speed (rpm)	Feedrate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Cutting Fluid
1	350	20	0.5	Dry
2	650	20	0.5	
3	1100	20	0.5	
4	1100	20	0.3	
5	1100	20	0.8	
6	1100	40	0.5	
7	650	40	0.5	
8	650	40	0.3	

칩을 절삭영역에서 배출시키기 위해 압축공기를 분사했으며, 공구현미경과 표면거칠기 측정기를 이용하여 매번 실험을 수행하는 동안 부플랭크면에서의 공구마모와 가공시편의 표면거칠기를 측정하였다.

Fig. 6은 절삭그룹 1의 조건하에서 공구의 마모에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다. 공구마모의 초기에는 표면거칠기의 변화가 거의 없다가 어떤 점 이후는 공구의 마모와 더불어서 표면거칠기는 점점 나빠

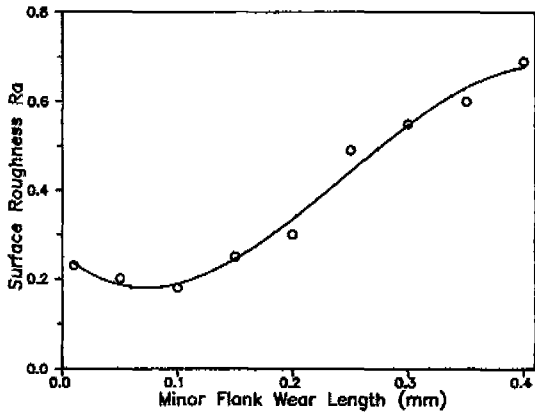


Fig. 6 The relationship between surface roughness and minor flank wear length(cutting group 1)

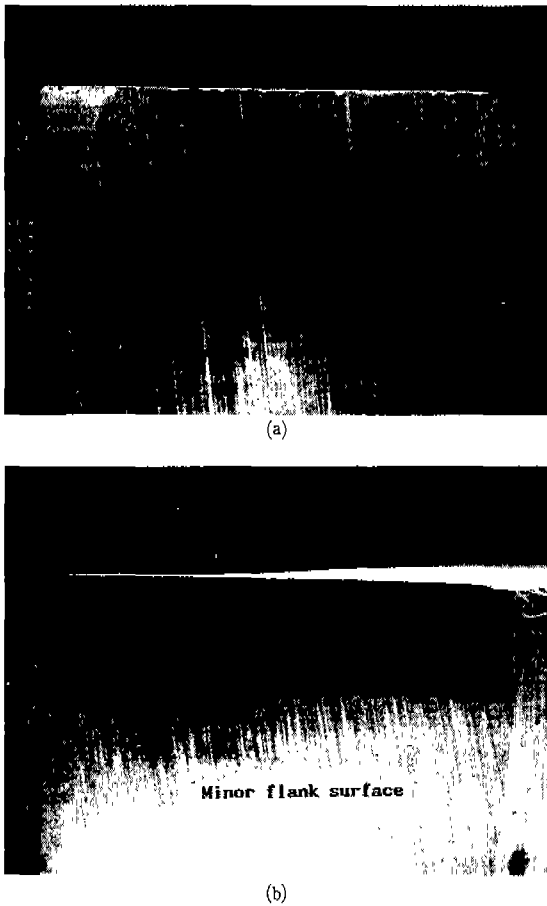


Fig. 7 SEM photographs of an insert:(a) new tool, (b) worn tool

진다. 즉 표면거칠기는 공구의 마모진행과 깊은 관계가 있음을 보여준다. 한편 Fig. 7은 부플랭크면 마모를 나타내는 SEM사진이다.

정밀 연삭밀링공정에서의 공구수명완료시점은 표면거칠기나 기하학적 치수정밀도가 일정한 범위에 도달했을 때를 기준으로 삼는다. 본 실험에서는 부플랭크면 마모의 길이가 0.4 mm에 도달하거나 표면거칠기가 0.8 μm R_a (최초의 표면거칠기의 4배)에 도달했을 때를 공구수명이 완료된 것으로 보았다.⁽¹⁰⁾ 이러한 방법으로 두벌의 실험데이터를 만들었는데, 하나는 학습(규칙의 제정) 그리고 나머지 하나는 평가기의 성능을 검사하기 위한 것이다. 가속도센서(B&K type 4321)는 공구의 진동을 가장 잘 측정할 수 있도록 주축하우징에 설치했으며, 모든 신호는 off-line 신호처리를 위해 전하증폭기를 통하여 VHS 데이터 기록계에 저장했다.

4.2 전처리

가속도신호를 먼저 10에서 1000 Hz의 컷오프 주파수를 갖는 대역필터를 통과시켜 가속도 신호의 DC성분을 제거하였으며, 이 신호는 2000 Hz의 샘플링 주파수로 1024개씩 A/D 변환기를 통해서 AR모델링을 위해 PC로 받아들여졌다. AR모델의 차수는 수렴속도와 모델의 잔류오차를 고려하여 6으로 결정하였다.⁽²⁰⁾ Fig. 8은 0.5초 동안 기록된 가속도 신호와 AR 모델로부터 한단계 이전에 예측한 신호 및 모델링한 첫번째 및 두번째 변수(ϕ_1 과 ϕ_2)의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 모델계수는 0.3초 이후에 수렴하는 것을 볼 수 있으며 그 이후는 RLS모델에서 필요한 초기조건을 영으로 하지 않고 현재의 값을 사용하기 때문에 수렴속도는 빨라진다. Fig. 8(a) 및 8(b)에서 볼 수 있듯이 측정신호와 예측신호는 잘 일치하고 있으며 따라서 본 모델은 계를 잘 모델링하는 것으로 볼 수 있다.

부플랭크면 공구마모에 따른 이송방향 가속도 신호의 기여도값들의 민감도를 보기 위해, Fig. 9에 첫번째와 두번째 모드 기여도를 나타내었다. 그림에 의하면 첫번째 모드의 기여도는 공구의 마모진행에 따라 증가하는 경향을 보이고 있고, 두번째 모드의 기여도는 마모의 초기에는 증가하다가 어느 점 이후는 거의 일정한 값을 갖는다. 이때 모델의 파라미터를 이용하여 구한 파워스펙트럼의 공구마모 진행에 따른 변화가 Fig. 10이다.⁽¹⁸⁻¹⁹⁾ 위와 동일한 경향을 볼 수가 있으며 따라서 본 연구에서는 첫번째와 두번째 모드의 기여도값을 연

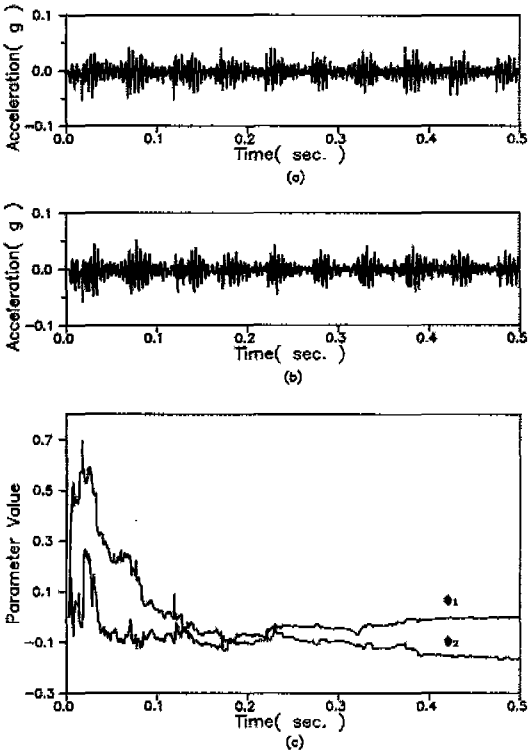


Fig. 8 (a) The measured signal of acceleration:(b) the one step ahead predicted signal:(c) the convergence of the first two model parameters

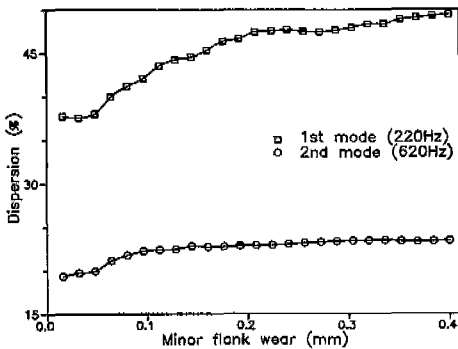


Fig. 9 Dispersion pattern in the feed directional acceleration with minor flank wear(cutting group 4)

어적 규칙을 만드는 특징으로서 사용한다.

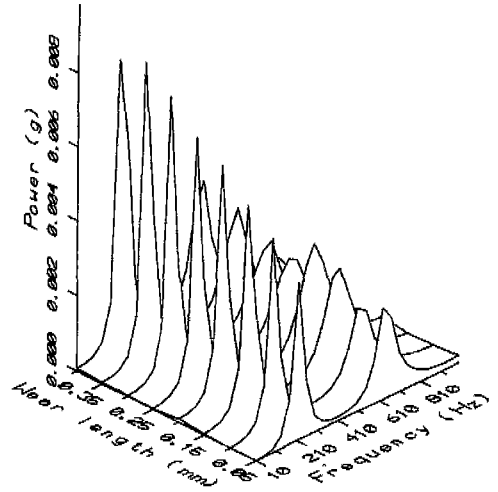


Fig. 10 The power spectral density of the feed directional acceleration for different tool wear lengths

5. 퍼지평가기의 적용

부플랭크면 마모의 진행특성을 알고난 후, 퍼지평가기를 구성하기 위한 적절한 언어적 규칙을 제정한다. 선정된 특징은 전절(4.2절)에서 언급했듯이 주축하우징의 이송방향 가속도 신호에 대한 첫번째와 두번째 모드의 기여도이다. 모든 입력과 출력은 학습단계에서 미리 정해진 값으로 정규화 시켜 사용하였다.

먼저 단일절삭조건(그룹 4)만을 이용하여 만든 퍼지평가기의 언어적 규칙이 Table 2이다. 이 규칙은 공구의 마모진행에 따른 기여도의 패턴으로부터 만들어진 것이다. 예를들어 "만약 첫번째 모드의 기여도가 NB이고 두번째 모드의 기여도가 NS이면, 공구마모는 NM이다."

본 연구에서의 퍼지평가기는 Table 2의 퍼지언어규칙과 Fig. 3의 퍼지부분집합의 정의 그리고 Fig. 4의 max-min합성규칙과 비퍼지화방법에 의해 만들어졌다. Fig. 11은 구축된 퍼지평가기에 두가지 입력특징의 모든 경우의 조합에 대한 공구마모길이를 평가한 3차원 그림으로서, 만들어진 퍼지평가기의 특성을 보이고 있다. 이렇게 만들어진 퍼지평가기에 성능검사를 위해 만들어진 그룹 4의 절삭조건이 입력되어 실제 측정된 값과 비교한 결과가 Fig. 12이다. 이와 같이 고정된 단일

Table 2 Fuzzy rule for estimating tool wear length(cutting group 4)

		2nd dispersion						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
1st dispersion	NB	NB	NM	NM				
	NM			NS	NS	NS		
	NS				NS	NS	ZO	
	ZO					ZO	ZO	ZO
	PS					PS	ZO	PS
	PM					PS	PS	PS
	PB					PS	PM	PB

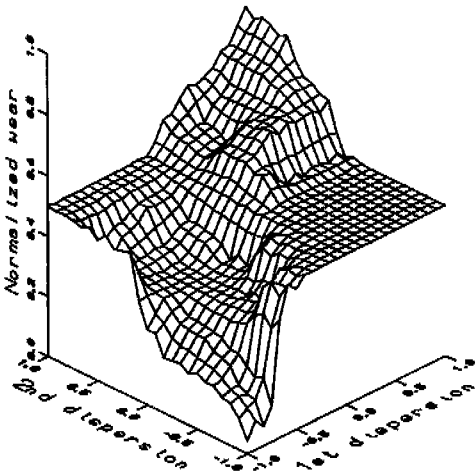


Fig. 11 Output wear length vs. all the combinations of values of the two input state variables (Table 2)

절삭조건하에서는 평가기는 평균오차 11%를 나타내었다. 그러나 이 평가기는 단일 절삭조건하에서 만들어진 것이기 때문에 모든 절삭조건에 대해서는 적용할 수가 없다.

이러한 문제를 해결하기 위해 절삭그룹 1부터 8까지의 모든 절삭조건에 대해 다시 언어적 규칙을 제정할 필요가 있으며 이것이 Table 3이다. 이 경우는 언어적

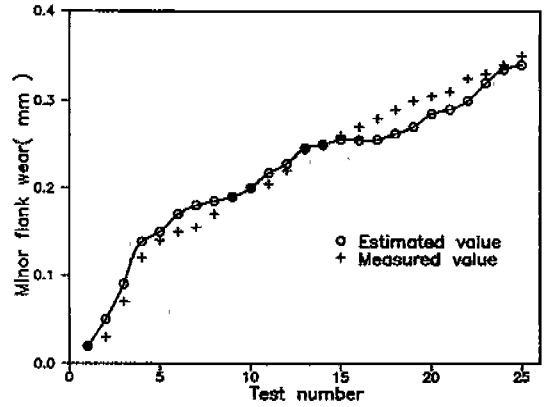


Fig. 12 The comparison between estimated and measured values(cutting group 4)

Table 3 Fuzzy rule for estimating tool wear length(cutting group 1-8)

		2nd dispersion						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
1st dispersion	NB	NB	NB	NB	NB	NM		
	NM	NB	NS	NS	NS	NS	NS	NB
	NS	PB	PB	ZO	PM	ZO	PS	PS
	ZO	PS	PB	PB	PB	PB	PB	PS
	PS	NB	NS	ZO	PB	PB	PB	PS
	PM		NM	NS	NS	PS	PB	PB
	PB			NB	NS	ZO	PS	PM

규칙이 대단히 복잡해지고 경우에 따라서는 서로 다른 절삭조건과 공구마모에 대해서 동일한 특징값이 발생할 수가 있으므로 규칙의 제정시 잘 타협시킬 필요가 있다. 마찬가지로 모든 경우의 특징에 대해 평가한 공구마모길이의 3차원적 결과가 Fig. 13이다. 이렇게 여러 절삭조건하에서 구축된 평가기에 그룹 4의 절삭조건이 들어왔을 때 평가한 결과가 Fig. 14로서, 평가결과가 단일절삭조건에서 만든 평가기로 평가했을 때보다는 (Fig. 12) 공구의 마모초기단계에서는 나쁘지만 그 이후는 측정값을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. Fig.

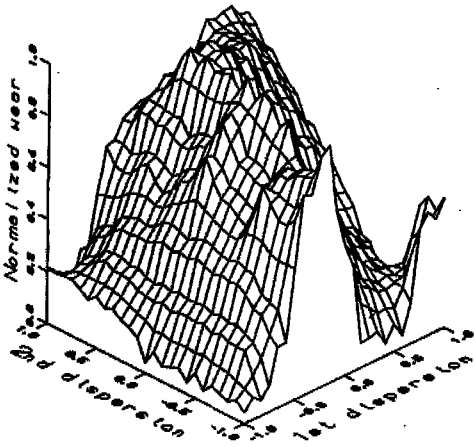


Fig. 13 Output wear length vs. all the combinations of values of the two input state variables (Table 3)

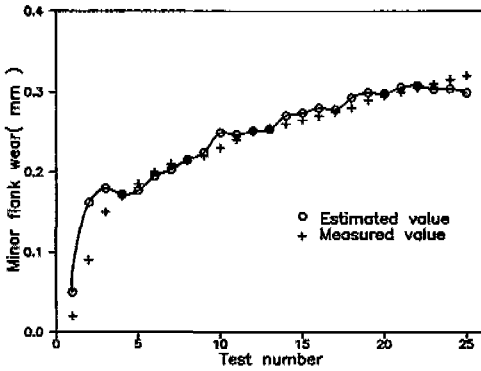


Fig. 14 The comparison between estimated and measured values (cutting group 4)

15(a), (b) 그리고 (c)는 절삭그룹 1, 5, 8이 적용되었을 때의 결과이다. 퍼지평가는 비록 넓은 범위의 절삭조건일지라도 잘 작동하고 있음을 보인다. 모든 절삭그룹에 대해 본 평가기의 성능을 검사한 후 계산한 결과가 Fig. 16으로서 총 오차는 12%에 이르고 있다. 따라서 퍼지추론을 이용하여 만들어진 본 퍼지평가는 만약 퍼지규칙이 넓은 범위의 절삭조건하에서 작성이 된다면 어떠한 범위의 절삭조건하에서도 잘 작동할 수가 있을 수 있다.

한편 일반적으로 퍼지평가는 어떻게 언어적 규칙이 만들어졌는지에 따라서 성능이 매우 달라진다. 따라서 규칙은 평가기의 성능과 규칙의 복잡성을 조화롭게 타협시켜야 한다. 퍼지평가기의 성능에 영향을 주는 또

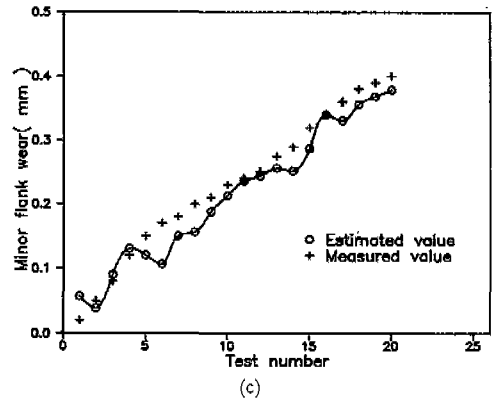
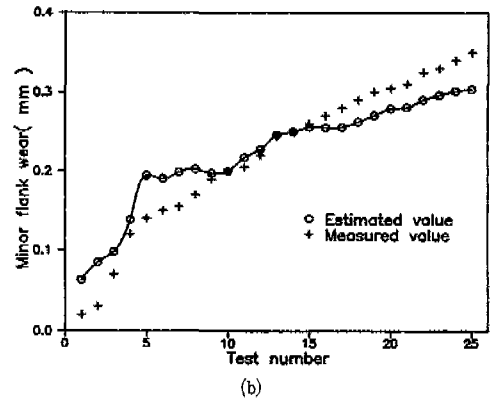
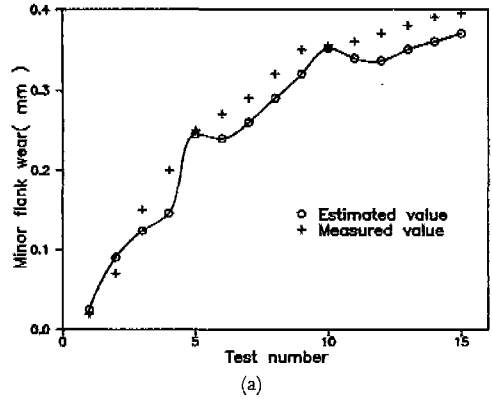


Fig. 15 The comparison between estimated and measured values:(a) cutting group 1;(b) cutting group 5;(c) cutting group 8

다른 요소는 전체공간에서 퍼지변수를 어떻게 정의하고 이의 소속도 함수의 형태는 어떻게 할 것인가이다. 본 연구에서는 7개의 퍼지변수, 동일하게 나눈 퍼지부분집합 그리고 삼각형의 퍼지소속도가 사용되었다. 만약 퍼

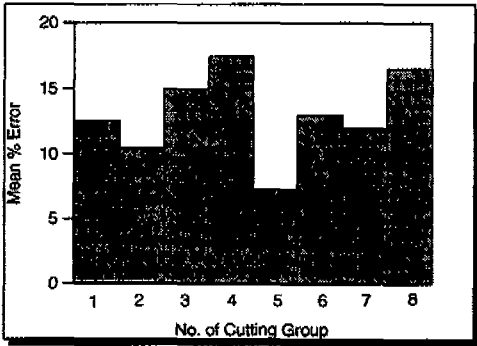


Fig. 16 The performance of the fuzzy estimator

지평가가 빨리 작동해야 한다면 퍼지변수의 수는 줄일 수가 있으며, 이 경우 평가결과는 미세한 범위내에서 평가가 되어지지는 않는다. 퍼지부분집합을 다르게 나누던지 소속도 함수를 달리 주는 것도 평가기의 성능에 큰 영향을 미치며 따라서 평가기의 설계시에는 이들의 영향이 충분히 고려되어 설계되어야 한다.¹⁴⁾

6. 결론

본 연구는 정밀 면삭밀링공정에서 공구의 부플랭크면 마모의 길이를 평가하는 방법을 제시했는데, 시계열 분석법에서의 기여도해석으로 입력특징을 추출하고, 이에 퍼지추론을 적용했으며 off-line실험으로부터 다음의 결과를 얻었다.

1. 주축 하우징의 이송방향 가속도 신호의 첫번째와 두번째 모드의 기여도는 공구의 부플랭크면마모에 민감하므로 특징으로 사용할 수가 있다.
2. 전처리기와 결합하고 퍼지추론을 이용하여 만들어진 퍼지 평가기는 여러 종류의 절삭조건하에서도 퍼지 규칙만 제정하면 공구의 마모길이를 잘 평가할 수 있으며 본 연구에서는 전체평균오차 12%이내에서 평가할 수 있었다.
3. 퍼지평가는 상응하는 퍼지언어규칙을 바꾸거나 추가함에 의해 절삭환경의 변화에 잘 적응할 수 있는 특성을 갖고 있다. 따라서 절삭환경이 변화하였을 때에도 과도한 학습이 필요없이 적절한 언어적 규칙의 수정으로 쉽게 적응할 수 있는 능력이 있다.

후 기

이 연구는 94년도 학술진흥재단 지방대 중점연구비지원에 의한 결과이며, 동계단의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. L. Dan, J. Mathew, "Tool wear and failure monitoring techniques for turning-Areview", *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, Vol. 30, No.4, pp.579-598, 1990.
2. J. Thusty, "A critical review of sensors for unmanned machining", *Ann. CIRP*, Vol.32, pp.563-572, 1983.
3. S. Y. Liang, D. A. Dornfeld, "Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission", *ASME J. Eng. Ind.*, Vol.111, pp.149-159, 1989.
4. S. Rangwala, D. A. Dornfeld, "Sensor integration using neural networks for intelligent tool condition monitoring", *ASME J. Eng. Ind.* Vol.112, pp.219-228, 1990.
5. H. Trabelsi, E. Kannatey-Asibu, Jr., "Pattern-recognition analysis of sound radiation in metal cutting", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.6, pp.220-231, 1991.
6. F. Giusti, M. Santochi, G. Tantussi, "On-line sensing of flank and crater wear of cutting tools", *Ann. CIRP*, Vol.36, pp.41-44, 1987.
7. Y. Yao, X. D. Fang, "Modelling of μ ltivariate time series for tool wear estimation in finish turning", *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, Vol.32, No.4, pp.495-508, 1992.
8. Y. Yao, X. Fang, G. Arndt, "Comprehensive tool wear estimation in finish machining via μ ltivariate time series analysis of 3-D cutting forces", *Ann.*

- CIRP, Vol.39, No.1, pp.57-60, 1990.
9. Y. Yao, X. Fang, G. Arndt, "On-line estimation of groove wear in the minor cutting edge for finish machining", Ann. CIRP, Vol.40, pp.41-44, 1991.
 10. A. E. Diniz, J. J. Liu, D. A. Dornfeld, "Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning", Wear, Vol.152, pp.395-407, 1992.
 11. M. A. Elbestawi, T. A. Papazafiriou, R. X. Ru, "In-process monitoring of tool wear in milling using cutting force signature", Int. J. Mach. Tool. Manuf., Vol.31, No.1, pp.55-73, 1991.
 12. T. M. Teitenberg, A. E. Bayoumi, G. Yucesan, "Tool wear modelling through an analytic mechanistic model of milling processes", Wear, Vol.154, pp.287-304, 1992.
 13. Y. Koren, T. Ko, A. G. Ulsoy, K. Danai, "Flank wear estimation under varying cutting conditions", ASME J. Dynamic Systems, Measurements, and Control, Vol.113, pp.300-307, 1991.
 14. I. Kouatli, B. Jones, "An improved design procedure for fuzzy controlsystems", Int. J. Mach. Tool. Manuf., Vol.31, No.1, pp.107-122, 1991.
 15. L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and control, Vol.8, pp.338-353, 1965.
 16. D. W. Cho, K. F. Ehman, "Pattern recognition for on-line chatter detection", Mech. Systems and Signal Processing, Vol.2, No.3, pp.279-290, 1988.
 17. T. J. Ko, D. W. Cho, J. M. Lee, "Fuzzy pattern recognition for tool wear monitoring in diamond turning", Ann. CIRP, Vol.41, No.1, pp.125-128, 1992.
 18. S. M. Pandit, S. M. Wu, "Time series and system analysis with application", John Wiley, New York, 1983.
 19. K. F. Ehamn, S. M. Wu, "A feasibility study of on-line identification of chatter in turning operations", ASME J. Eng. Ind., Vol.102, pp.315-321, 1981.
 20. L. Ljung, T. Soderstrom, "Theory and practice of recursive identification", MIT Press, Cambridge, MA., 1987.
 21. G. J. Klir, T. A. Folger, "Fuzzy sets, uncertainty and information", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1988.
 22. E. H. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis", IEEE Comput., pp.1182-1191, 1977.
 23. G. T. Smith, "Advanced machining-The handbook of cutting technology", IFS, UK., 1989.
 24. Tae Jo Ko, Dong Woo Cho, "Tool wear monitoring in diamond turning by fuzzy pattern recognition", ASME J. Eng. Ind., Vol.116, pp.225-232, 1994.