

# 엔드밀을 이용한 기계가공에서 표면거칠기 제어를 위한 퍼지 모델

## Fuzzy Model for controlling of Surface Roughness using End-Mill in Machining

김홍배(한국기술교육대학교 대학원), 이우영(한국기술교육대학교 기계공학부)  
Kim, Heung-Bae(cadcam@kut.ac.kr), Lee, Woo-Young(wylee@kut.ac.kr)

### ABSTRACT

The dynamic characteristics of turning processes are complex, non-linear and time-varying. Consequently, the conventional techniques based on crisp mathematical model may not guarantee surface roughness regulation. This paper presents a fuzzy controller which can regulate surface roughness in milling process using end-mill under varying cutting condition. The fuzzy control rules are established from operator experience and expert knowledge about the process dynamics. regulation which increases productivity and tool life is achieved by adjusting feed-rate according to the variation of cutting conditions. The performance of the proposed controller is evaluated by cutting experiments in the converted CNC milling machine. The result of experiments show that the proposed fuzzy controller has a good surface roughness regulation capability in spite of the variation of cutting conditions.

**Key Words** : Fuzzy Theory(퍼지이론), Fuzzy Reasoning(퍼지 추론), End-mill(엔드밀), Surface roughness(표면 거칠기), Non-Linear(비선형), Feed-Rate(이송량)

### I. 서론

최근 절삭가공에서 정밀도 및 생산성 향상을 위하여 CNC 공작기계의 보급이 급속하게 증가되고 있다. 보통의 CNC 공작기계에서는 작업자의 경험과 숙련된 지식을 바탕으로 절삭조건을 가공하기 전에 미리 선택하여 작업하여야 한다. 그러나 공구와 공작물의 재질이 다양하고 공작물 재질의 불균일로 인한 절삭깊이의 변화, 공구마모 등의 불확실한 요인이 있기 때문에 최적 절삭조건으로 가공하는 것은 실제로 매우 어려우며, 작업자는 항상 최악의 경우를 예상하여 여유 있는 절삭조건으로 가공하기 때문에 생산성 저하를 가져오게 된다. 그래서 CNC 공작기계에서 작업자의 지식이나 경험에 관계없이 생산성을 향상시키며

설계 상에 표시된 최종의 고품위 절삭면을 얻을 수 있는 제어가 요구된다.

최근 Yao 등은 정삭 공정에서 공구마모의 중요성을 인식하고 현상을 감시하는 연구를 발표했다. 또한 Dornfeld는 공구의 마모에 따른 AE(acoustic emission) 신호를 추종하여 선삭에서 가공부품의 표면 거칠기와 공구마모 사이의 상관관계를 조사하였다. 퍼지 추론은 인간의 추론이 중요한 역할을 하는 모델에 대해서 적용이 가능하다. 예를 들어 선반의 작업자는 절삭 칩의 형태, 색깔의 변화, 절삭소음 그리고 표면 거칠기의 변화와 같은 애매한 신호를 이용하여 공구가 마모되었는지를 판정하게 된다. 또한 퍼지 이론은 Zadeh에 의해 이론적 근거가 확립되었으며, Mamdani에 의해 제어에 처음으로 도입되었다. Mamdani는 퍼지

제어를 모형 증기기관제어에 직접 응용하였다. 그 이후 최근까지 퍼지제어는 산업계에서 널리 응용되어 왔으며, 그 대표적인 예로서, Yasunobu의 지하철운전, 컨테이너크레인운전, Sugeno의 자동차 운전, Li의 서보시스템제어 등 여러 분야에 도입되어 좋은 결과를 얻었으며 최근에는 복잡하고 느린 공정시스템에서부터 로봇 및 서보제어와 같은 빠른 시스템에까지 퍼지제어의 응용범위를 넓혀가고 있다.

본 연구에서는 복잡하고 비 선형적인 엔드밀가공에 표면 거칠기를 제어하는 새로운 퍼지제어기를 제안하고, 제안된 퍼지제어기의 유용성을 검토하기 위하여 스피들 회전수와 이송량 등의 절삭조건을 변화시키면서 표면 거칠기 평가 실험을 행하였다.

## II. 퍼지 모델

퍼지제어기는 명확한 값(crisp value)으로 측정된 입력변수 값을 적절한 퍼지 값(퍼지집합)으로 바꾸어 주는 퍼지화부와 그 반대로 작용하는 비퍼지화부, "If-then-" 형태의 복수개의 규칙들로 되어 있는 퍼지규칙부, 그리고 퍼지규칙들을 이용하여 퍼지입력에 대한 퍼지출력을 추론해 내는 퍼지추론장치부 등으로 크게 나뉘어진다.

### 1. 퍼지화기 (Fuzzifier)

본 연구에서는 엔드밀을 이용한 밀링 작업에서 원하는 표면 거칠기를 나타내도록 제어하는 것이 목적이므로 퍼지제어기의 입력변수를 기준 표면거칠기와 계측 표면거칠기의 차인 표면거칠기 오차와 그 오차의 변화량으로 하고, 출력변수는 표면 거칠기를 조절하기 위해 스피들 회전수의 변화량으로 하였다. 그러므로 조건부 변수는 표면 거칠기의 오차(e)와 그 오차의 변화량( $\Delta e$ )이고, 결론부 변수는 제어입력의 변화량( $\Delta s$ )으로 된다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$e(i) = R_r(i) - R_c(i) \quad (1)$$

$$\Delta e = e(i) - e(i-1) \quad (2)$$

$$s(i) = s(i-1) + \Delta s(i) \quad (3)$$

여기서,  $R_r(i)$ 와  $R_c(i)$ 는 각각  $i$ 번째 샘플링 시간의 기준 표면거칠기와 실제 표면 거칠기이고,  $s(i)$ 는  $i$ 번째 제어입력 량이다.

소속함수는 설계자의 경험적 지식과 시뮬레

이션을 통하여 제어변수  $e$ ,  $\Delta e$ ,  $\Delta s$ 에 대한 퍼지 변수를 다음과 같이 5개의 용어 집합으로 정의하였다.

$$T = \{PB, PS, ZO, NS, NB\}$$

여기서, PB : Positive Big

PS : Positive Small

ZO : Zero

NS : Negative Small

NB : Negative Big

설계한 소속함수는 퍼지추론 시에 수식계산을 쉽게하기 위하여 삼각형 형태로 설계하였고, 입출력 변수에 대한 전체집합(universe of discourse)을 계측량의 변화폭과 조직 값의 영향성을 고려하여 설정하였다.

Fig. 1,2,3은 퍼지변수들의 멤버쉽 함수를 나타낸다.

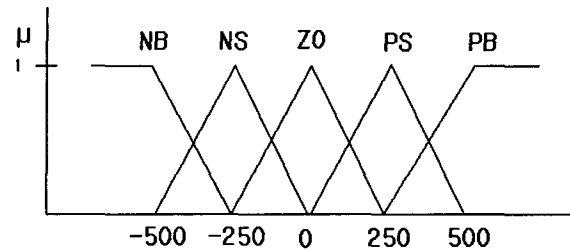


Fig. 1 Membership Function of surface roughness error(e)

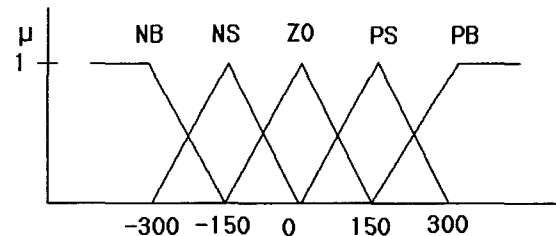


Fig. 2 Membership Function of variation of surface roughness error( $\Delta e$ )

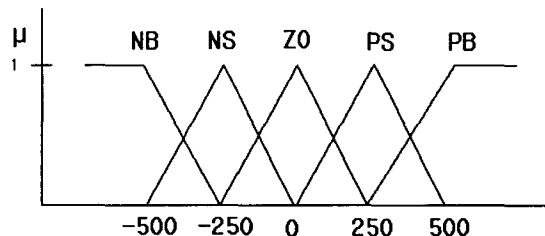


Fig. 3 Membership Function of variation of spindle speed( $\Delta s$ )

### 2. 퍼지룰베이스 (Fuzzy Rule Base)

본 연구의 퍼지제어기는 Two-input/Single

-output(MISO) 시스템이므로 제어규칙은 다음과 같이 표현된다.

$$R = R^1_{MISO}, R^2_{MISO}, \dots, R^i_{MISO} \quad (4)$$

여기서,  $R^1_{MISO}$  는 "If-then-"문으로 아래와 같이 기술할 수 있다.

"If e is PB and  $\Delta e$  is PS, then  $\Delta s$  is PB"

위의 입출력 관계에 따라 제어규칙을 만들면 Table 1과 같다.

Table 1 Fuzzy rule base

$\Delta e$	NB	NS	ZO	PS	PB
E					
NB	NB	NP	NB	NM	ZO
NS	NB	NM	NS	ZO	PM
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NM	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PM	PB	PB	PB

### 3. 퍼지추론장치(Fuzzy Inference Engine)

제어규칙이 만들어지면 입력조건에 따른 출력을 추론한다. 추론은 제어에 널리 사용되는 Mamdani의 최소최대연산법(min-max method)을 이용하여 추론을 행한다. 아래와 같은 네 개의 제어규칙이 존재하면,

R1 : If e is PB and  $\Delta e$  is PS, then  $\Delta s$  is PB (5)

R2 : If e is PB and  $\Delta e$  is ZO, then  $\Delta s$  is PB (6)

R3 : If e is PS and  $\Delta e$  is PS, then  $\Delta s$  is PM (7)

R4 : If e is PS and  $\Delta e$  is ZO, then  $\Delta s$  is PS (8)

규칙에 대한 적합도는 다음과 같다.

$$w1 = PB(e) \wedge PS(\Delta e) \quad (9)$$

$$w2 = PB(e) \wedge ZO(\Delta e) \quad (10)$$

$$w3 = PS(e) \wedge PS(\Delta e) \quad (11)$$

$$w4 = PS(e) \wedge ZO(\Delta e) \quad (12)$$

R1, R2, R3, R4 규칙에 의한 추론결과는 아래와 같다.

$$PB^* = w1 \wedge PB(\Delta s) \quad (13)$$

$$PB^* = w2 \wedge PB(\Delta s) \quad (14)$$

$$PM^* = w3 \wedge PM(\Delta s) \quad (15)$$

$$PS^* = w4 \wedge PS(\Delta s) \quad (16)$$

### 4. 비퍼지화기(Defuzzifier)

네 개의 추론은 무게중심법을 사용하여 퍼지화 한다.

$$\Delta s = \frac{\Delta s1PB^* + \Delta s2PB^* + \Delta s3PM^* + \Delta s4PS^*}{PB^* + PB^* + PM^* + PS^*} \quad (17)$$

여기서,  $\Delta s1, \Delta s2, \Delta s3, \Delta s4$ 는  $\Delta s$ 의 중심좌표에서 추론값의 위치이다.

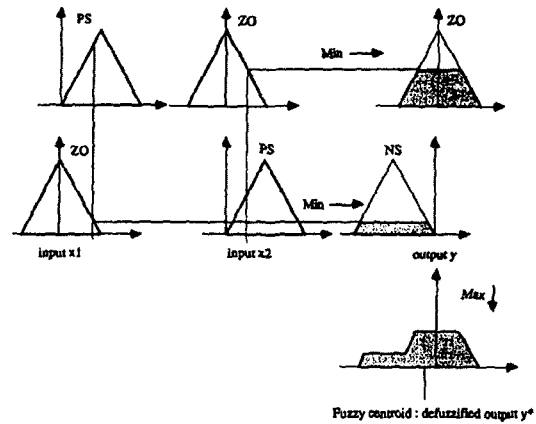


Fig. 4 Mamdani method

## III. 평가 실험

### 1. 실험장치

본 연구의 실험장치는 CNC 밀링을 이용하였으며, 시스템의 구성은 CNC 밀링, 공구, 광학식 표면거칠기 측정장치 등으로 이루어졌다.



Fig. 5 CNC milling machine



Fig. 6 Surface roughness measurement

퍼지제어기는 Off-line으로 이루어지며, 각각의 가공 시마다 표면 거칠기를 측정하여 작성한 C프로그램의 입력으로 하고 C프로그램의 출력인 스피들의 변화량을 받아서 다음 가공을 수행하게 된다. 기준 표면 거칠기는 일반

적으로 도면에 사용하는 량을 기준으로 하였으며, 시편은 알루미늄 6061을 사용하였다.

**2. 실험방법**

기계가공에 필요한 파라미터들은 아래의 Table 2와 같이 고정을 하였다. Table 2에는 실험에 사용한 가공조건들이 나타나있으며, 실험에 사용된 재료에 그 형태는 Fig. 7에 나타나 있다.

Table 2. Experimental Parameters

Parameter	Value
Feed rate	500 (mm/min)
Axial depth of cut	5 (mm)
Radial depth of cut	1 (mm)

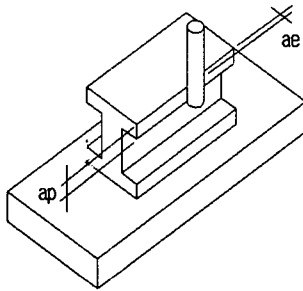


Fig. 7 Materials and its shape

초기 스피들 회전수는 1000rpm으로 하였으며, 기준 표면 거칠기의 값은 200(nm)로 하였다. 실험은 표면 거칠기의 값이 200±(50)(nm)인 경우에 적용한 퍼지 로직이 필요없는 것으로 간주하여 끝내는 것으로 하였다.

**IV. 실험 결과**

실험은 총 3번 이루어졌으며, 각각의 실험마다 퍼지 C 프로그램된 퍼지 로직에서 나온 스피들 회전수의 증가량을 가지고 계속 실험을 하여 Table 3, 4, 5와 같은 결과를 얻었다. Fig. 8, 9, 10, 11에는 각각 실험한 대한 표면 조도 측정 결과를 보여주고 있다.

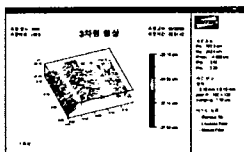


Fig. 8 1st Surface roughness(762.9 nm)

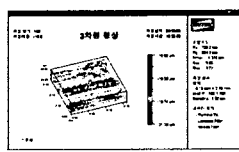


Fig. 9 2nd surface roughness(730.2 nm)

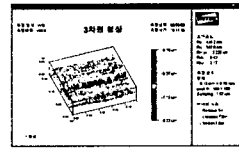


Fig. 10 3rd surface roughness(434.2 nm)

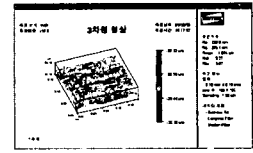


Fig. 11 4th surface roughness(223.6 nm)

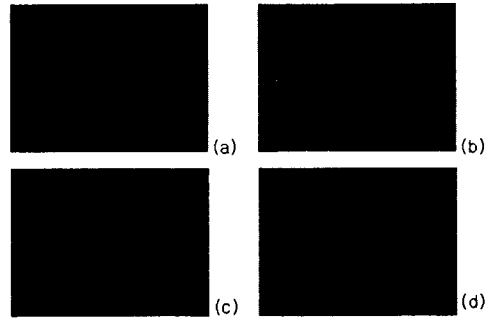


Fig. 12 Machined surface(x10)

Fig. 12에는 실제 가공된 면의 배율 10배의 현미경 사진으로, 그림에서 보여지는 것과 같이 1차부터 4차에 이르기까지 표면의 조도가 양호해 지는 것을 알 수 있다.

두 번째 실험에서는 초기 스피들회전수를 800rpm으로 그리고 세 번째에서는 500rpm으로 하였다.

Table 3. Experimental result(#1)

$e \backslash \Delta e$	측정된 표면 거칠기 (nm)	표면 거칠기 오차(e)	오차의 변화량( $\Delta e$ )	스피들 회전수의 변화량( $\Delta s$ )	스피들 회전수
1차	762.9	562.9	(450)	416.3	1416.3
2차	730.2	530.2	32.7	255.3	1671.6
3차	434.2	234.2	296.0	250.1	1921.7
4차	223.6	23.6	210.0	69.3	1991

Table 4. Experimental Result(#2)

$e \backslash \Delta e$	측정된 표면 거칠기 (nm)	표면 거칠기 오차(e)	오차의 변화량( $\Delta e$ )	스피들 회전수의 변화량( $\Delta s$ )	스피들 회전수
1차	812	612	(450)	676	1476
2차	487	287	325	423	1899
3차	187	-13	300	-24	1871

Table 5 Experimental result(#3)

$e \backslash \Delta e$	측정된 표면 거칠기 (nm)	표면 거칠기 오차(e)	오차의 변화량( $\Delta e$ )	스피들 회전수의 변화량( $\Delta s$ )	스피들 회전수
1차	1027	827	(450)	724	1224
2차	630	430	397	487	1711
3차	458	258	172	296	2007
4차	248	48	210	37	2044

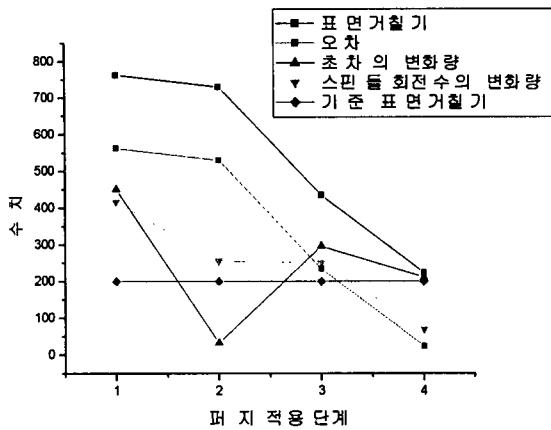


Fig. 13 Experimental result #1

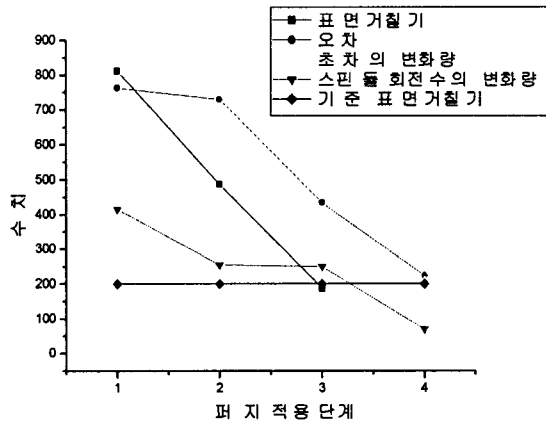


Fig. 14 Experimental result #2

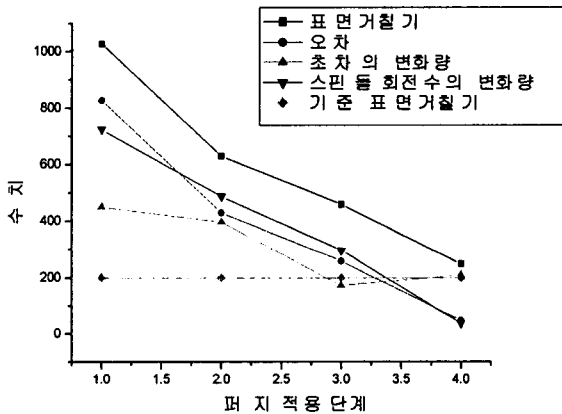


Fig. 15 Experimental result #3

표면 거칠기를 제어하기 위한 퍼지제어기를 제안하였다. 실험결과 도면에 표기된 정량적인 표면 거칠기를 낼 수 있는 최적의 파라미터(스핀들 회전수)를 제안한 퍼지제어기를 이용하여 찾을 수 있었다.

기존의 작업자의 경험에 의존한 가공변수의 선정방법은 상당한 시간과 노력을 요구하였으나, 이러한 퍼지 모델을 이용하여 CNC 기계의 컨트롤러에 입력하면 스스로 최적의 가공 품질을 낼 수 있는 가공 파라미터들을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 공장자동화 및 지능화에 많은 도움이 되며 나아가 생산 단가를 낮춤으로서 국가 경쟁력에도 많은 도움이 된다.

### 참고문헌

- Masory, O. and Koren, Y., 1983, "Variable gain Adaptive Control System for Machin Tools", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 165~174.
- Masory, O. and Koren, Y., 1985, stability Analysis of a Constant Force AC System for Turning", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 107, No. 4, pp. 295~300.
- Masory, O., 1984, "Real-Time Estimation of cutting Process Parameters in Turning", Trans. ASME. 106, pp. 218~221.
- Tomizuka, M. and Zhang, S., 1988, "Modeling and Conventional/Adaptive PI control of a Lathe Cutting Process", Trans. ASME, Vol. 110 pp. 350~354
- Lauderbaugh, L. K. and Ulsoy. A. G., 1989, "Model Reference Adaptive Force Control in Milling", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, No. 111, pp 13~21.

### V. 결론

본 연구에서는 시스템이 복잡하고 절삭과정이 비선형적인 엔드밀을 이용한 밀링가공에서