

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME94-E-06)에 의하여 연구되었음.

미세드릴가공에 있어서 유전알고리즘과 퍼지추론의 합성에 의한 적응제어

백인환,* 정우섭,** 권혁준***

Adaptive Control by the Fusion of Genetic Algorithms and Fuzzy Inference on Micro Hole Drilling

In-Hwan Paik,* Woo-Seop Chung,** Hyeog-Jun Kweon***

ABSTRACT

Recently the trends toward reduction in size of industrial products have increased the application of micro drilling. But micro drilling has still much difficulty so that the needs for active control which give adaptation to controller are expanding. In this paper initial cutting condition was determined for some workpieces by experiment and GA-based Fuzzy controller was devised by genetic algorithms and fuzzy inference. The fuzzy inference has been applied to the various problems. However the determination of the membership function is one of the difficult problem. So we introduce a genetic algorithms and propose a self-tuning method of fuzzy membership function. Based on this intelligent control, automation of micro drilling was carried out like the cutting process of skilled machinist.

Key words : Micro drilling(미세드릴가공), Cutting force regulation(절삭력 제어), Fuzzy inference(퍼지 추론), Genetic algorithms(유전자 알고리즘), Intelligent control(지능 제어)

1. 서론

미세드릴가공은 최근 공업제품의 소형 경량화 추세로 인해 수요가 급증하고 있으나 드릴직경이 미세해질수록 공구강성이 저하하고, 칩 배출성이 악화되는 등 가공상

에 많은 난점이 발생하기 때문에 정도 높은 가공기와 숙련된 가공전문가를 필요로 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 제어이론을 미세드릴가공공정에 적용하여 변화하는 가공상태에 대응하여 항상 최적의 절삭상태를 유지할 수 있도록 제어기 자체에 적응성을 부여하

* 부산대학교 생산기계공학과

** 부산대학교 대학원 생산기계공학과

*** 경주전문대학 자동차과

고 작업자의 의존성을 경감하고자 하는 적응제어에 대한 연구가 요구되고 있다.

선삭 또는 밀링가공에서는 절삭깊이의 변화와 같은 절삭상황의 변동에 따른 일정절삭력 제어가 수행되고 있으며 드릴가공에 있어서는 심공가공의 경우와 같이 가공이 진행됨에 따라 절삭력이 커지는 경우 혹은 강성이 다른 다층가공물의 가공 등에 있어서 절삭력의 변동을 억제하고 안정한 가공상태를 얻어려는 연구가 수행되고 있다. 드릴가공에 있어서 절삭상태를 가공중 검출하는 방법에는 공구동력계를 이용한 절삭력 측정, AE 등이 보편적이나 적응제어의 실용화 측면에서 이송모터의 전류감지를 통해 적응제어를 시도한 연구도 보고되고 있다.^(1,3)

적응제어방법의 측면에서도 가공시스템의 수학적인 모델링에 의한 방법 뿐만 아니라 가공전문가의 가공방법을 묘사하는 언어적인 규칙에 의한 퍼지제어기 혹은 학습활동에 의한 신경망 제어기에 의한 방법이 선삭 및 엔드밀가공에 있어서 수행되고 있고,^(4,6) 미세드릴가공의 제어에 관한 연구로는 최근 다중센서의 신호를 신경망 기법을 도입하여 공구상태를 규명하려는 연구가 보고되고 있다.^(7,8)

최근 현대화된 가공공장에서는 CNC 머신, 로봇 등을 최적으로 운용할 수 있도록 기능과 경험 등을 기계에 부여한 지능화된 기계가 등장하고 있다. 특히 지능화된 공작기계라는 것은 작업자로 부터 상세한 정보의 입력없이 공작물의 재질변화, 효율 및 부하변동에 따른 요구변화 등을 인식하고 작업순서 등에 관계없이 최적으로 피삭재를 가공할 수 있는 능력을 가지는 것이다.⁽¹³⁾ 한편 미세드릴가공과 같은 작업자의 경험을 필요로 하는 난삭 가공에서는 학습에 의한 인식 알고리즘에 따라 가공상황의 변화를 감시하여 높은 효율을 유지하며 공구파손을 방지할 수 있는 가공 자동화가 필수적이다. 본 연구는 미세드릴가공을 수행하기 위해 우선 절삭상태 검출방법으로써 실용적이고 가공상황에 간섭을 일으키지 않는 주축용 모터의 전류값을 이용하며 제어기 설계를 위해 퍼지추론과 유전알고리즘 이론을 도입한다. 이러한 지능형 가공방법을 미세드릴가공에 구현하기 위해서 오프라인으로 안정한 가공조건을 초기화한 다음 퍼지제어기를 이용하여 일정한 절삭력을 유지할 수 있도록 실시간으로 이송속도를 제어하며 가공상황 변동에 따른 적절한 멤버쉽함수의 파라미터를 자기동조하는 최적화 알고리즘을 제안한 후 실제가공을 통하여

미세드릴가공의 특성과 제어기의 성능을 평가한다.

2. 퍼지 추론 및 유전 알고리즘

2절에서는 GA-based Fuzzy 제어기 설계를 위해 퍼지제어 분야에 많이 이용되고 있는 간략화된 퍼지추론과 최근 최적화 기법으로 관심이 집중되고 있는 유전 알고리즘에 관해 살펴본 후, 본 연구에서 사용한 양자의 결합방법에 관해 기술한다.

2.1 간략화된 퍼지추론

퍼지제어기는 기존의 PID 제어기에 의해 수행되던 운전조건보다 훨씬 넓고 작업자의 작업동작을 언어적인 수단으로 표현하기 때문에 제어규칙을 변경하거나 이해하기가 쉽다는 등의 장점을 가지고 있다.^(9,14)

본 연구에서는 (1)과 같이 후건부가 실수치로 표현되는 간략화된 상태평가형 퍼지규칙을 사용하였다.⁽⁶⁾ A_{i1} , A_{i2} 등은 퍼지규칙의 전제부에 있는 삼각형 형태의 멤버쉽 함수값이며 W_i 는 제어값을 의미하는 실수값이다.

Rule i : IF E is A_{i1} and CE is A_{i2} THEN

$$\Delta U \text{ is } W_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

미세드릴가공에 사용되고 있는 제어규칙에 의한 Fig. 1과 같은 간략화된 추론 방법은 처리속도가 빠르고 계산이 간단하므로 퍼지제어에 이용되고 있으며 출력 y 는 아래와 같은 식으로 나타난다.

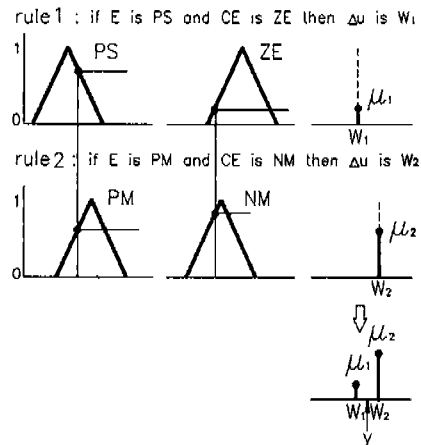


Fig. 1 Graphical representation of simplified fuzzy reasoning method

$$\mu_i = \Pi A_{ij}(x_j) \quad (2)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot W_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (3)$$

2.2 유전 알고리즘에 의한 퍼지 멤버쉽함수 파라미터의 자기동조

퍼지추론은 지식표현에는 적당한 방법이지만 본질적으로 지식을 습득하는 능력을 가지고 있지 않으므로 퍼지제어기를 가변적인 상황에 적합하게 최적의 상태로 운영하려면 전문가의 지식과 경험을 토대로 제어규칙을 구성하고 반복적인 실험 또는 시행착오적인 시도 등을 통해 제어규칙의 구성을 설계해야 한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 규칙베이스의 조정, 입출력 환산계수값 수정 또는 멤버쉽 함수의 조정 등을 수행하여 자기동조할 필요가 있으며 최근에는 신경회로망의 학습기능을 이용하여 퍼지규칙을 얻고자 하는 연구가 진행되고 있다.⁹⁾ 본 논문에서는 삼각형 형태의 멤버쉽 함수를 생성하기 위해 삼각형의 중앙값과 폭을 매개변수로 하여 유전 알고리즘을 사용하였다. 유전 알고리즘은 진화과정의 반복조작으로 적합도에 따라 생존경쟁하여 최적의 개체를 발생시키는 알고리즘으로 신경망 기법의 단점인 국부수렴의 단점이 줄어들고 탐색을 위해 보조적인 정보를 필요로 하지 않으며 모집단의 스트링과 적합함수만을 필요로 하는 비교적 간단한 구성으로 이루어져 있다. 즉 이 방법은 자연 선택과 적자생존과 같은 유전자 메카니즘의 원리를 이용하여 정립된 최적화 알고리즘으로서 유전자를 형성하는 모집단 내에서 하나의 유전자를 선택하여 Fig. 2와 같은 교배 및 돌연변이 연산을 반복하여 가장 우성인 유전자를 선택하는 원리를 응용한 것이며 그 알고리즘은 다음과 같다.^(10, 11, 15, 16)

- 단계 1) 랜덤한 스트링(염색체)을 n개 생성하여 초기 모집단 구성
- 단계 2) 적합도 함수로부터 스트링 평가
- 단계 3) 적합도의 평가에 따라 우성의 스트링들 선택
- 단계 4) 두개의 부모 스트링에서 임의의 교배점의 비트를 교차시켜 교배

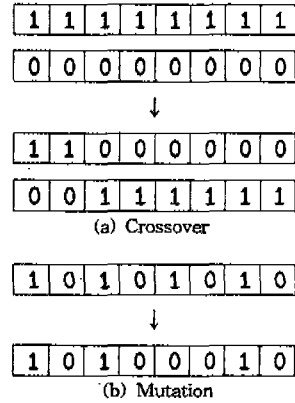


Fig. 2 Crossover and mutation of string

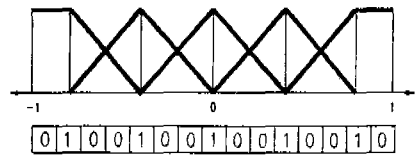


Fig. 3 Fusion of GA and Fuzzy Membership function

- 단계 5) 스트링의 어떤 위치에서 비트 전환시켜 돌연변이 생성
- 단계 6) 제한된 세대수 또는 적합도가 수렴할 때까지 윗 과정 반복

단계 2)에서 단계 5)까지의 1사이클을 세대라 부르며 이 사이클이 진행될수록 스트링은 적합도가 높은 집단으로 진화하게 된다.

이상의 유전 알고리즘에 기초하여 퍼지제어기의 멤버쉽 함수를 Fig 3과 같이 0과 1의 스트링으로 표현하였으며 1의 위치는 전건부의 경우 삼각형 멤버쉽 함수의 꼭지점 위치를 나타내며 후건부의 경우는 실수값의 위치를 나타내고 있다.⁽¹²⁾ 이러한 방식으로 전건부의 멤버쉽 함수와 후건부의 실수값을 자동 조절하였고 대칭으로 멤버쉽 함수를 구성하여 자기동조 계산량을 1/2로 감소시켰다. Fig. 4는 유전알고리즘에 기초한 퍼지제어의 흐름도를 나타낸 것이다.

3. 미세드릴 초기가공조건 선정

미세드릴가공은 대부분 가공기 자체의 정도에 의해 가공여부가 결정되지만 절삭공구, 절삭유제, 주축회전

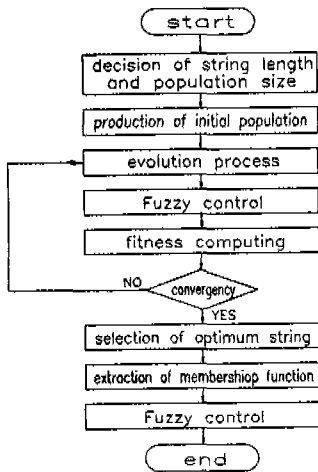


Fig. 4 Flow-chart of GA-based Fuzzy Control

수, 이송, 등의 선택이 가공정도, 공구수명에 미치는 영향도 무시할 수 없으며 안정한 가공조건 선정, 실시간 제어, 가공후 처리 등이 동시에 이루어져야 양호한 결과를 얻을 수 있다.

미세드릴가공조건을 선정할 때는 우선 다음과 같은 점을 주의해야 한다. 미세드릴은 공구재에 따라 초경공구와 고속도강 공구로 대표되며 형태에 따라 스트레이트 형과 피벗 형으로 구분된다. 건절삭에 의한 미세가공은 파손과 직결하게 되므로 절삭유 공급은 필수적이고 주축회전수가 비교적 높기 때문에 윤활작용보다는 냉각작용이 있으며 절성도가 낮은 절삭유제의 사용이 바람직하다. 주축을 고려하면 고속회전이 필요하나 오히려 중속에서부터 저속으로 가공하는 것이 양호한 결과를 얻을수 있으며 칩이 드릴에 휘감기지 않는 이송속도와 드릴회전수를 선정하는 것이 가장 중요하다. 그리고 금형가공 등에서 미세구멍을 가공할 경우 드릴 접촉면 부위의 표면조도가 양호하지 않으면 중심이 어긋나 공구의 절손이나 위치 정밀도가 악화되는 결과를 초래한다.^(17,18)

일반 직경에 관한 드릴의 회전수, 이송에 관한 추천 조건은 체계화 되어 있지만 미세드릴가공에 관해서는 아직까지 미비한 상태이다. 이러한 이유는 공업제품의 요구에 따라 최근에 미세드릴가공이 부각되고 있을 뿐만 아니라 가공지름 및 가공깊이에 따라 최적가공조건이 변동하는데 있다. 즉 미세드릴가공에 있어서는 가공깊이에 따라 절삭력 변동이 크게 나타나므로 어스펙트

Table 1 Initial cutting condition

Workpiece	Diameter (mm)	length (mm)	rpm	Feedrate (mm/min)
SUS304	0.1**	1	3000	2.5
SUS304	0.2**	1	5000	5
SUS304	0.2***	1	7000	6
SUS304	0.4**	2	8000	7.5
SUS304	0.5**	2	10000	5
Brass	0.05*	0.2	600	2
Brass	0.1**	1	3000	3
Brass	0.2**	2	6000	5
Brass	0.2***	2	8000	6
Brass	0.4**	2	8000	5
Brass	0.5**	3	10000	10
SM30C	0.2**	1	6000	5
SM30C	0.5**	1	10000	6

* : GÜHRING (HSC0 JLMQ)

** : SYOKEI

*** : GÜHRING (HSC0 ECEX, coating)

비가 클수록 절삭속도 및 이송을 감소시킬 필요가 있으며 각각의 인자변경에 따라 가공데이터를 체계화한다는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 실험에 의해 확인한 Table 1과 같은 안정한 가공조건을 초기조건으로 설정한 후 이송과 주축회전수의 가공중 제어를 실시하는 것이 효과적이라 생각된다. Table 1은 SUS304, Brass, SM30C에 있어서 스텝백이라는 단순 온-오프 제어에 의해 가공하였을 때의 가공조건이며 각각의 경우에 있어서 사용한 절삭유제와 공구재는 메틸 알콜과 고속도강 피벗드릴이다. 이러한 가공조건은 주축의 동력과 강성, 공구재, 드릴의 포인트각 등에 따라 변경될 수 있으므로 최적가공조건으로 사용하기 보다는 실시간 가공제어의 초기가공조건으로 설정하는 것이 바람직하다고 생각된다.

4. 미세드릴가공용 GA-based Fuzzy 제어기 구축

4.1 실험장치 구성

미세드릴가공을 실현하는 전 시스템 구성은 Fig. 5에 나타내었고 이를 제어하는 프로그램은 C 언어로 구현하였으며 아날로그 입출력, 디지털 입출력과 펄스 계수를 위해 AX5411 multilab 카드와 별도의 카운터 보드를

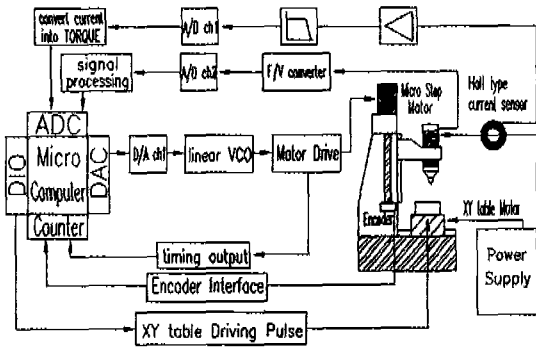


Fig. 5 Experimental setup

사용하였다.

미세드릴가공의 절삭력정보는 홀소자 타입의 전류센서를 사용하여 주축용 모터의 전류값으로부터 간접적으로 검출하였으며 5상 마이크로 스테핑 모터의 구동 펄스는 D/A 변환값에 따른 선형전압제어발전기로 조절하여 Z축의 이송속도를 제어하고 있다. 주축용 모터의 전류값에 의한 절삭력 측정법은 주로 토크 성분을 내포하는 것으로 측정계가 가공상에 간섭을 일으키지 않는 실용적인 감시방법 중의 하나이다. 그리고 미세드릴가공의 방법인 빈번한 스텝백이 발생하더라도 정확한 위치결정을 내기위해 모터 드라이브의 타이밍 신호에 의한 오픈루프 제어와 볼 스크류의 하단에 설치된 엔코더에 의한 세미클로우드 루프를 혼용하고 있다.

4.2 GA-based Fuzzy 제어기

미세드릴가공에 관한 숙련작업자의 경험적 지식을 자동화하려면 우선 미세드릴가공을 실현하는 방법에 대한 노하우가 필요하며 그 진행과정을 Fig. 6에 나타내었

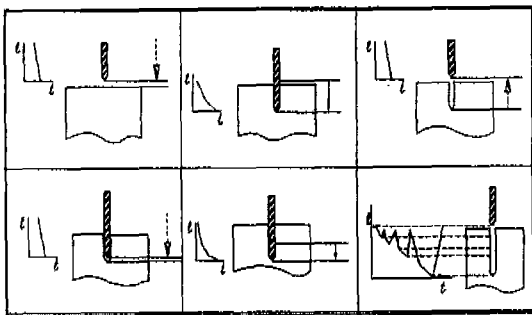


Fig. 6 Process of micro drilling

다. 미세드릴가공의 가장 난점은 공구직경 감소에 따른 공구파손임을 생각해 볼때 급작스러운 부하증가를 방지할 수 있도록 항상 일정한 절삭력으로 가공하는 것이 필수적이다. 따라서 가공 전문가가 가공을 진행하면서 부하가 걸리면 작업자는 이송을 줄여 가공을 하게 되며 이송을 낮추어도 부하가 여전히 일단 스텝백을 시켜서 칩을 제거한 후 다시 가공을 계속한다.

Fig. 6에 있어서 일정 절삭력 가공과정을 제어하기 위해 다음과 같은 퍼지 추론규칙을 사용하였다.

Rule i: IF E is A_i and CE is B_i , THEN ΔU is W_i (4)

$$E(t) = I(t) - I_s, \quad CE(t) = E(t) - E(t-1)$$

E는 일정절삭력에 대한 주축전류값(I_r)을 기준으로 할때 주축전류값의 오차를 나타내는 입력변수이며 CE는 주축전류값의 오차변화를 나타내는 입력변수이고 ΔU 는 가공기 이송속도의 변화를 유도하는 퍼지제어기의 출력변수를 나타내는 것이므로 이는 절삭력의 변동에 따라 이송속도를 연속적으로 조절하는 것을 의미한다. 식 (4)에서 A_i, B_i 의 전건부 멤버쉽함수는 삼각형 형태를 취하며 식 (5)와 같은 언어변수를 사용하였고 W_i 의 후건부는 실수값을 의미한다.

NM: Negative Medium (5)

NS: Negative Small

ZE: Zero

PS: Positive Small

PM: Positive Medium

적절한 퍼지규칙을 찾기 위해 본 논문에서 기준으로 사용한 유전 알고리즘의 적합도 함수는 다음과 같으며 높은 적합도를 가지는 스트링이란 적은 오차와 적은 오차 변화율을 의미한다.

$$Fitness = \frac{K_1}{E} + \frac{K_2}{CE} \quad (K_1, K_2 : const) \quad (6)$$

이상의 내용을 토대로 하여 일정 절삭력을 유지하기 위한 미세드릴가공용 GA-based Fuzzy 제어기를 Fig. 7과 같이 구성하였다. GE, GC, GU는 입출력 값을 노말라이징하기 위한 환산계수이며 온라인 튜닝시 집단중 적합도가 낮은 개체에 대한 제어를 실행할 때는 리미터를 설치하여 시스템의 급격한 변동을 방지하고

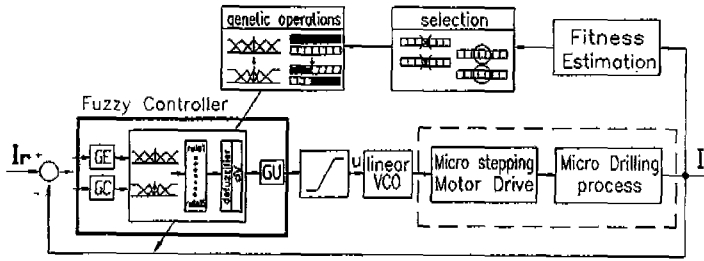


Fig. 7 Basic scheme of the GA-based fuzzy control system

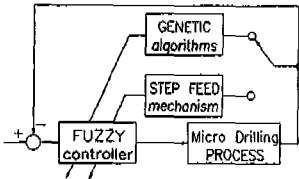


Fig. 8 Expert control system

있고 최대, 최소 이송속도에 대한 제한을 설정하여 최소이송속도에 달하면 스텝백이 발생하도록 하였다. 실험에서는 전 가공과정에 있어서 유전 알고리즘을 적용하여 퍼지제어를 수행하는 경우와 Fig. 8처럼 가공초기에 유전알고리즘에 의한 퍼지제어를 실시하여 적합도가 수렴하면 최적 멤버쉽함수를 선택한 후 스위칭하여 FLC와 스텝피드 메카니즘으로 가공제어하는 전문가 시스템 제어방식의 2가지 모델을 수행하였다. 즉 후자는 Fig. 6과 같은 숙련작업자의 조작을 충실히 실행할 수 있는 제어기를 의미한다.

이와 같은 방법으로 실제 미세드릴가공에 있어서 최적으로 튜닝된 멤버쉽 함수의 한 예를 Fig. 9에 나타내었고 Fig. 10은 Fig. 9의 멤버쉽 함수의 형태로 튜닝 되었을 때 퍼지규칙의 예를 나타낸 것이다.

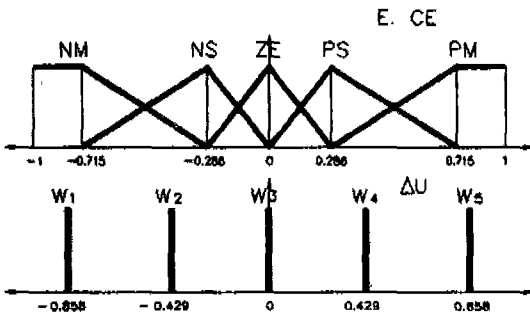


Fig. 9 Membership function

	E	CE	ΔU
1			-0.858
	if E is PM and CE is PM then ΔU is W_1		
2			-0.429
	if E is PS and CE is ZE then ΔU is W_2		
3			0
	if E is ZE and CE is ZE then ΔU is W_3		
4			0.429
	if E is NS and CE is ZE then ΔU is W_4		
5			0.858
	if E is NM and CE is NM then ΔU is W_5		

Fig. 10 Example of rules for tuned membership function

5. 실험 및 고찰

적용제어기의 성능을 쉽게 판단하기 위해 강성이 다른 스테인레스와 황동을 용접한 다층공작물을 가공하여 절삭력을 능동적으로 제어하는 실험을 수행하였다. Fig. 11은 Table 2를 기준으로 일정한 이송속도로 가공하는 경우 다층공작물의 절삭력 변동을 나타내고 있다.

Table 2 Cutting condition

Workpiece	stainless(0.8t) brass(1.2t)
Tool material	HSS
Tool diameter	0.3mm
Spindle rpm	5000 rpm
Feedrate	5 mm/min

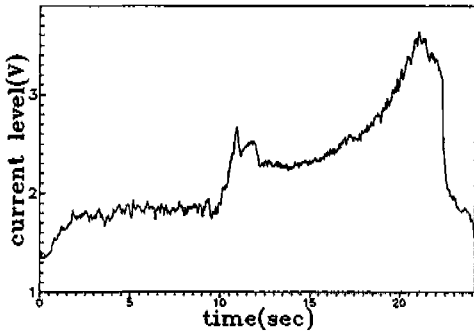


Fig. 11 Variations of the uncontrolled current data

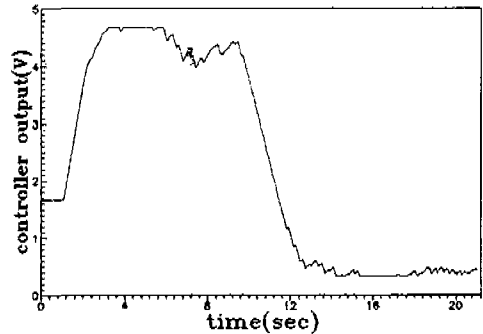


Fig. 13 Variations of controller output

1층 가공물이 스테인레스이고 2층 가공물이 황동임을 고려할때 Fig. 11의 절삭력 변동은 일반 직경의 드릴가공과는 상반되는 결과를 보여주고 있다. 즉 미세드릴가공에 걸리는 절삭력은 아주 미세하므로 가공물 강성에 따른 절삭력 변동보다는 가공시 발생하는 칩의 형태 또는 깊은구멍가공이 될수록 마찰력의 증대 등이 전체 절삭력에 영향을 미친다고 사료된다. 5mm/min의 동일한 이송속도조건에서 스테인레스의 경우는 칩이 분단되어 발생하였지만 황동의 경우 연속형 칩 발생으로 인한 칩막힘 현상이 발생하여 절삭력이 증대하고 있으며 또한 가공깊이가 깊어질수록 절삭력이 급증하고 있다. 이처럼 미세드릴가공에 있어서 가공조건에 따른 절삭력의 변동을 예측하기란 쉽지가 않으므로 일정절삭력을 유지하며 가공을 실현할 수 있는 적응제어의 구축이 요구된다.

4-2절에서 구축한 GA-based Fuzzy 제어기에 의해 Table 2의 절삭조건으로 일정 절삭력가공을 수행한 예와 제어기 출력을 Fig. 12 및 Fig. 13에 제시하고 있으며 유전 알고리즘의 적용을 위해 문자열 집단의 크기

는 20, 각 문자열의 크기는 16, 교배률 0.9, 돌연변이를 0.05로 선택하였다. 초기 스테인레스 가공시는 절삭력을 기준값까지 올리기 위해 제어기 출력값이 급증하며 스테인레스와 황동의 용접층에서 절삭력이 급상승하기 때문에 Fig. 12에 있어서도 약간의 절삭력 상승이 나타난 후 곧이어 일정 절삭력 가공이 수행되고 있다. 황동부분의 칩막힘에 따른 절삭력 상승을 방지하기 위해 제어기 출력은 Fig. 13처럼 거의 하한값까지 도달하게 되며 이는 적응제어 방식으로만 미세한 절삭력을 완벽하게 조절하기는 용이하지 않다는 것을 의미한다. 따라서 GA-based Fuzzy 제어기에 의한 가공과 스텝백가공을 혼용하여 가공전문가의 가공방법과 유사하게 가공할 수 있는 제어기가 요구되며 Fig. 14와 같은 절삭력 변동을 나타내는 황동 미세드릴가공에 있어서 전문가 제어방식에 의해 가공할 때의 초기가공조건과 가공예를 Table 3, Fig. 15 및 Fig. 16에 나타내고 있다. Table 3의 가공조건은 Table 1에서 제시한 초기가공조건보다 이송량(mm/rev)을 약간 크게하여 가공상태에 따라 신호가 민감하게 변화하도록 하였다.

이 경우는 적합도가 안정한 값으로 수렴을 하면 유전 작용은 생략하고 최종 선택된 퍼지 멤버십 함수에 의해 일정 절삭력 가공과 스텝백 가공을 동시에 수행한 것으

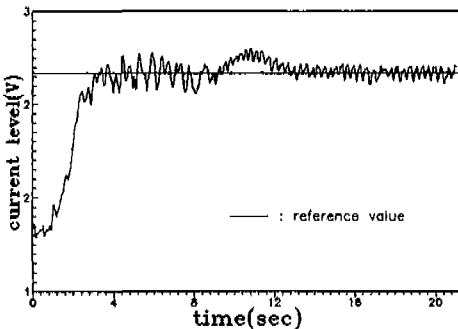


Fig. 12 Adaptive force control of Micro Drilling

Table 3 Initial Cutting condition

Workpiece	Brass(2t)
Tool type	HSCO ECEX(coating)
Tool diameter	0.2mm
Spindle rpm	5000 rpm
Feedrate	7.5 mm/min

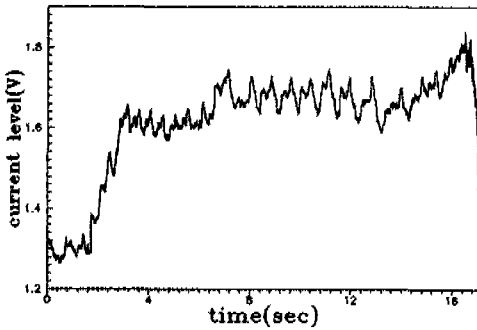


Fig. 14 Variations of the uncontrolled current data

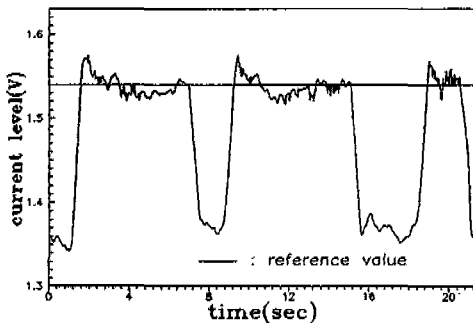


Fig. 15 Expert system control of micro drilling

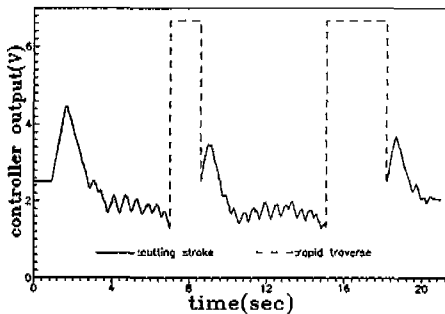


Fig. 16 Variations of controller output

로 가공초기에 있어서 유전 알고리즘과 퍼지추론의 합성에 의한 가공제어시는 각각의 피삭재, 절삭유, 가공지름 등에 따라 적절한 멤버쉽 함수를 탐색하는 일종의 가공조건 탐색이라 생각할 수 있으며 이후 가장 높은 적합도를 가지는 스트링에 의한 퍼지규칙과 스텝백으로 가공제어하는 것이다. Fig. 15 및 Fig. 16에 있어서 가공시는 기준 주축전류값에 근접하고 있고 절삭력이

증가하여 최저이송속도에 도달하면 스텝백이 발생함을 보이고 있다. 스텝백이 발생하였을 때는 급속이송을 위해 제어기 출력이 최대로 나타나고 있고 절삭력은 공회전시 초기값으로 떨어지게 되며 재가공위치에 도달하였을 때는 초기이송속도로 가공이 재개되고 있음을 나타내고 있다.

미세드릴가공의 난점은 급격한 힘의 변동에 의한 공구의 파손이므로 절삭력을 검출하여 단지 스텝백에만 이용할 것이 아니라 가공중에도 힘의 변동을 억제할 수 있는 일정절삭력 가공방법은 효율적인 미세드릴가공을 가능하게 할 것이다. 그리고 일정 절삭력 가공을 수행하기 위해 본 연구에서 사용한 유전알고리즘에 기초한 퍼지제어 방식은 좋은 규칙을 얻기 위해 제어규칙의 수를 늘리거나 사람의 시행착오에 의해 파라미터를 조정하는 것 없이 성능을 향상시킬 수 있기 때문에 미세드릴가공과 같은 불확실한 제어대상에 적합한 알고리즘이라 생각된다.

6. 결 론

퍼지제어는 미세드릴 가공과정처럼 불확실한 제어대상에서 상당히 효과적이지만, 아직 이에 대한 가공특성이 정립되어 있지 않기 때문에 일정절삭력 가공을 수행하기 위한 퍼지규칙은 실제가공을 통하여 시행착오적으로 얻어야 한다는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 유전 알고리즘과 퍼지추론을 결합하여 미세드릴가공의 제어환경에 적합한 전건부의 퍼지 멤버쉽 함수와 결론부의 실수값을 자기동조할 수 있는 방법을 제시하였고 이를 미세드릴의 자동가공공정에 응용하였다. 그리고 숙련된 가공전문가의 노하우를 모방한 효율적인 자동가공공정은 초기가공조건 선정, 일정 절삭력을 유지하기 위한 GA-based Fuzzy추론의 이용, 칩막힘을 방지하는 스텝피이드 메카니즘을 병행하여 실현할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 미세드릴 자동가공공정은 비숙련 가공자일지라도 제어기와의 대화를 통해 효과적인 가공이 가능하게 할 것이며 앞으로 이 분야의 가공자동화를 이룩하는데 기초가 될 것으로 기대된다

참고문헌

1. E.Brinksmeier, "Prediction of Tool Fracture in Drilling", Annals of the CIRP,

- Vol. 39, pp.97-100, 1990.
2. Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, November, pp. 386-392, 1992.
 3. M. A. Mannan, S. Broms, "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements", Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 347-350, 1989.
 4. Y. S. Tarng, Y. S. Wang, "An Adaptive Fuzzy Control System for Turning Operations", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, No. 6, pp. 761-771, 1992.
 5. Y. S. Tarng, S. T. Hwang and Y. S. Wang, "A Neural Network Controller for Constant Turning Force", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 4, pp. 453-460, 1993.
 6. M. K. Kim, M. W. Cho and K. Kim, "Application of the Fuzzy Control Strategy to Adaptive Force Control of Non-Minimum Phase End Milling Operations", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 5, pp. 677-696, 1993.
 7. Ibrahim Nur Tansel, Christine Mekdeci and Oscar Rodriguez, "Monitoring Drill Conditions with Wavelet Based Encoding and Neural Networks", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, No. 4, pp. 559-575, 1992.
 8. Ibrahim Nur Tansel, "Identification of the Prefailure Phase in Micro Drilling Operations using Multiple Sensors", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 3, pp. 351-364, 1992.
 9. 水本雅晴, "ファジィ制御に対する最近の手法", システム/制御/情報, Vol. 38, No. 11, pp. 590-595, 1994.
 10. 市川芳明, "遺傳的アルゴリズムの制御系設計", 電學論D, 113卷, 12號, pp. 1361-1362, 1993.
 11. 山田新一, "GAを用いたファジィ適應制御", 電學論D, 114卷, 10號, pp. 943-946, 1994.
 12. 中西洋八郎, "遺傳的アルゴリズムによるファジィ制御", システム/制御/情報, Vol. 38, No. 11, pp. 590-595, 1994.
 13. 정성중, "공작기계 자동화를 위한 적응제어 기술의 개발동향", 대한기계학회지, 第28卷, 第3號, pp. 635-644, 1988.
 14. Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control", Prentice-Hall, Inc, pp. 9-28, 1994.
 15. Kenneth E. Kinneer, Jr., "Advanced in Genetic Programming", MIT Press, pp. 21-42, 1994.
 16. David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", ADDISON-WESLEY PUB., pp. 60-88, 1989.
 17. 松岡 甫篁, "新しい穴加工技術", 工業調査會, pp. 87-101, 1987
 18. 최신단삭재가공기술, 기술정보, pp. 151-158, 1995.