

## 파지 알고리즘을 이용한 평면연삭의 형상정도 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of Geometric Accuracy by using

Fuzzy Algorithm in Surface Grinding

천 우진\* (부산대 대학원)

김 남경 (진주산업 대 기계설계공학과, 정밀정형 및 규형가공연구센타)

하 만경 (부산공업대 기계설계학과)

송 지복 (부산대 정밀기계공학과, 정밀정형 및 규형가공연구센타)

### ABSTRACT

In heavy grinding that is one of the high efficient grinding method, meaningful thermal deformation is generated by high temperature. So, after machining, geometric error generated on the workpiece

The most important factor on the geometric error is temperature difference between upper layer and lower layer( $T_a$ ). Relations between  $T_d$  and grinding condition and maximum geometric error and grinding condition are obtained by experiment. This relations are used in fuzzy algorithm for improvement geometric accuracy.

The main results are as follows : (1) The linear relation between maximum geometric error and grinding condition is obtained by experiment. (2) The linear relation between maximum temperature difference between upper layer and lower layer and grinding condition is obtained by experiment. (3) Control path of wheel for improvement geometric accuracy is obtained by using the fuzzy algorithm.

**Key words :** Fuzzy algorithm, Surface grinding, Thermal deformation, Geometric error

### 1. 서론

최근의 가공기술은 초정밀, 고능률 가공을 지향하고 있으며 능률과 정밀도를 동시에 향상시킬 수 있는 가공법이 많이 연구되고 있다. 하지만 정밀도와 능률이라는 상반된 개념을 진중하게 한 용이하지가 않다.

표면거칠기를 향상시키는 마무리 가공으로 가상 진동적이면서도 현제까지 많이 쓰이는 인식 가공은 가공능률 면에서 보면 형상가공을 주로 하는 선사가공에 미치지 못하고 있다. 따라서 표면 거칠기를 지하시키지 않으면서도 고능률 가공이 가능하며 형상가공과 마무리 가공이 동시에 이루어질 수 있는 중인식이 점차로 주목을 빙고 있다.

중연삭은 진위진이를 증가 시키 자속으로 가공하는 방법으로 인식 슬롯 입자와 공작물 사이의 간섭진이가 길어진다. 이에 따라 높은 가공성이 발생하게 된다. 이 인식열 때문에 공작물, 상면과 하면의 온도차에 의한 인용력이 발생하여 공작물의 중앙부분이 불룩한 열변형이 생기게 된다.

인식시 발생하는 형상오차는 많은 사위들이 유한요소법을 이용해 그 경향을 연구했다.<sup>1,4)</sup>

인식열에 의한 열변형 때문에 발생하는 형상오차는 인식액을

직접히 공급하여 인식온도를 낮게 함으로서 어느 정도 해결이 가능 하지만, 고속으로 회전하는 슬롯과 공작물의 간섭영역에 인식액을 원활하게 공급한다는 것에는 성당한 어려움이 따른다. 이런 인식액을 공급하는 방법을 개선시키는 연구도 있다.<sup>5)</sup>

또 다른 해결방법으로는 가공 종료 후 진위진이를 주지 않고 공작물 테이블만 왼쪽운동 시키는 스파크 아웃(Spark Out)을 행하여 형상오차를 어느 정도 줄일 수는 있으나 이러한 방법은 고능률 가공에는 적합하지가 않다.

따라서 본 연구에서는 단공정(One Pass) 평면 중인식에 있어서 발생하는 형상오차의 케진을 실험에 의해 구한 다음 형상오차에 차례대로 영향을 미친다고 알려져 있는 인식열과 연삭 조건과의 상관관계를 실험에 의해 실험식을 유도하고, 형상오차의 최대 값과 인식조건과의 관계를 실험을 행하여 구해 실험식을 유도한다. 실험에 의해 구한 실험식들을 피지 알고리듬(Fuzzy Algorithm)의 변수로 도입해 추론을 행하여 형상오차를 해소할 수 있는 슬롯의 진위량 조절 위치를 구한다.

이 케진에 따라 슬롯을 수직방향으로 이동 시키 절입량을 조절해서 형상 정도를 향상시키고자 한다.

## 2. 형상정도에 미치는 열변형의 영향

연삭가공을 행하게 되면 고온의 인삭열이 발생하게 된다. 이러한 인삭열에 의해 공작물이 변형된 상태에서 가공이 되고, 가공 종료후 공작물의 온도가 실온으로 떨어지면 공작물이 원래의 모양으로 복귀하면서 그림 1에 보이는 바와 같은 중앙부분이 파여져 있는 형상오차가 발생하게 되는 것이다.

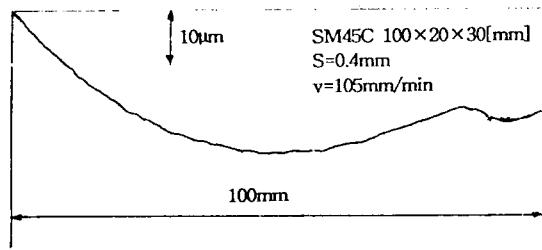


Fig. 1 Profile of Ground Surface of Workpiece

그림 1은 시편을 절임깊이 0.4mm, 이송속도 105mm/min으로 실제 가공하여 표면온도 측정기를 이용하여 그 표면형상을 구한 것이다.

최대 형상오차와 최대 인식온도의 관계, 그리고 공작물 각각의 위치에서 형상오차와 평균온도차의 관계를 알아보기 위해 온도 측정 실험을 행하고, 각각의 연삭조건에서의 최대 형상오차량을 구하기 위해 형상오차 측정 실험을 행한다.

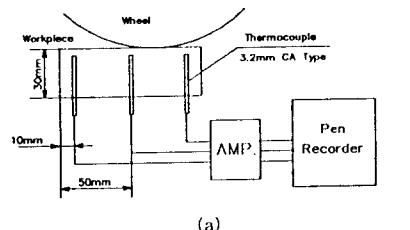
### 2.1 공작물의 온도 측정

연삭가공시의 공작물의 온도를 측정하기 위해 시편(SM45C)을 가로 100mm × 높이 20mm × 깊이 30mm의 형상으로 제작하여 중앙부와 양끝 단에서 10mm지점에 Ø3.7의 구멍을 뚫고, 그 곳에 CA Type #3.2 열전대를 각각 1개씩, 3개를 심는다. 온도 측정 실험에서는 시편을 일손실을 최소화하기 위한 바이스로 고정하였고, 가공을 할 때 각 열전대로부터 출력되는 전기 신호를 증폭기가 내장된 펜 레코더(Pen Recorder)를 이용해 온도를 기록하였다.

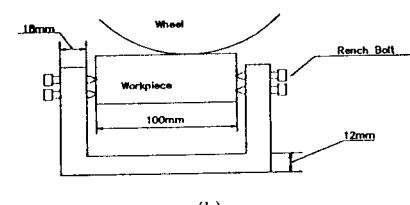
밀링으로 가공한 초기의 시편 표면이 고르지 않기 때문에 선가공으로 표면을 평활하게 만들었다. 이때에도 인식인에 의한 시편이 약 70~90°C까지 상승을 하게 되므로 온도가 40°C까지 냉각될 때를 기준으로 인식 조건을 설정해서 실험을 하였다.

연삭온도의 기준은 가공이 이루어지고 있는 일원 아래 3mm 지점의 온도로 잡았으며 이렇게 측정한 3개 온도의 평균을 구해 평균온도차로 정의한다.

그림 2(a)는 공작물의 온도를 측정하기 위한 실험장치를 나타내고 그림 2(b)는 열손실을 최소화하기 위해 제작한 바이스를 나타내고 있다. 공작물과 렌치 볼트의 접촉부분으로 손실되는 열량은 무시했다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Configuration of Experiment and (b) Special Vice for Minimum Heat Transfer

### 2.2 형상 오차 측정실험

이 실험에서는 2.1진의 온도 측정용 시편과는 다른 시편을 이용하였다.

온도측정용 시편은 구멍이 3개가 있고, 바이스에 의한 가로방향의 힘을 받기 때문에, 이 시편에 의해 측정된 형상오차는 정성적인 상태의 형상오차와는 달리 될 수 있다. 따라서 다른 시편을 제작하여 형상 오차 측정 실험을 수행하였다.

이 실험에서 사용된 형상오차 측정용 시편은 내부에 구멍이 되지 않은 동형상의 시편으로, 마그네티크 치에 고정해서 선가공으로 표면을 고른 후 서한 다음 각각의 인식조건을 설정하여 실험을 하였다.

### 2.3 실험 결과 및 고찰

공작물의 온도 측정 실험에서는 Pen Recorder 상의 기록지에 시편에 부착한 3개의 열전대에서 출력되는 온도곡선이 그려진다. 이 3개의 온도는 각각의 위치에서 속도의 이동에 따라 온도의 증가와 감소의 상태를 나타낸다. 3개 온도의 평균을 구한 평균온도차  $T_d$ 의 속도의 가공위치에 따른 관계가 그림 3에 나타나 있다.

그림 3에 보이는 바와 같이  $T_d$ 는 가공위치의 제곱근에 비례하는 형상을 하고 있다. 여기에서는 실험식을 간단히 하기 위해 가공위치의 제곱근에 비례상수를 같은 형태로 나타낸다.

즉 평균온도차  $T_d$ 는 다음과 같은 실험식으로 표현이 가능하다.

$$T_d = k_T \cdot x^{0.5} \quad (1)$$

이기서  $k_T$  : 실험에 의해 구해지는 상수.

$x$  : 가공 위치

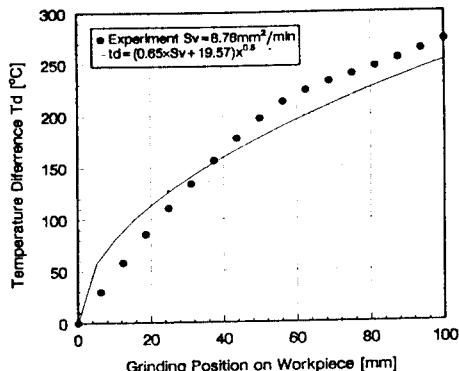


Fig. 3 Result of  $T_d$  Obtained by Simulation and Experiment

식 (1)의 비례상수  $k_T$ 는 설정 절입량(S)과 공작물 테이블의 이송 속도(v)의 합이 포함되어 있기 때문에 연삭조건에 따라 달라지게 된다. 이를 표현하면 아래의 식 (2)가 된다.

$$k_T = k'_T \cdot S \cdot v \quad (2)$$

여기서  $S$  : 속돌의 설정 절입량  
 $v$  : 공작물 테이블의 이송 속도

따라서 연삭 조건에 관계없이 사용이 가능한 비례상수  $k'_T$ 로 다시 식 (1)을 표현하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_d = k'_T \cdot S \cdot v \cdot x^{0.5} \quad (3)$$

앞의 그림 1에서 보인 바와 같이 공작물의 중앙부분에서 형상오차는 최대치를 나타낸다. 이때 공작물 내부의 평균온도차는 그림 3에서 보는 바와 같이 최대 온도에 약 70~80%에 달하게 된다. 또 형상오차가 공작물 중앙부의 최대치에서 다시 감소하는 끝부분으로 가공위치에서는 평균온도차가 최대값에 가깝게 된다. 이러한 관계들을 이용해 퍼지 알고리듬의 규칙을 만든다.

그림 4는 최대 온도차와 설정 절입량(S)과 공작물 테이블의 이송 속도(v)의 합  $S \cdot v$ 의 관계를 나타내는데 역시  $S \cdot v$ 에 대해 선형성을 가지고 있음을 알 수 있다.

이 실험식은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$T_{d\_max} = k_{Tm1} \cdot S \cdot v + k_{Tm2} \quad (4)$$

여기서  $S$  : 속돌의 설정 절입량  
 $v$  : 공작물 테이블의 이송 속도  
 $k_{Tm1}, k_{Tm2}$  : 실험에 의해 구해지는 상수

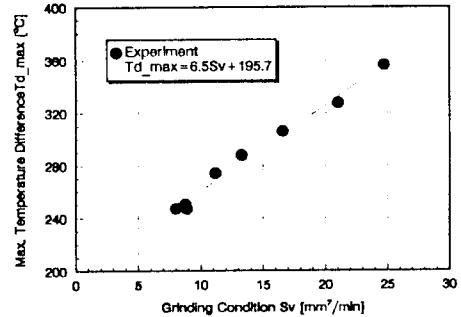


Fig. 4 Relation Between  $S \cdot v$  and  $T_{d\_max}$

형상오차와 인삭조건의 관계식을 구하기 위해 각각의 연삭조건에 의해 실험이 행하여진 시편의 표면조도측정기로 측정해 최대 형상오차( $U_{max}$ )를 구한다. 이 최대 형상오차와 연삭 조건을 대표한다고 할 수 있는 설정 절입량(S)과 공작물 테이블의 이송 속도(v)의 합  $S \cdot v$ 의 관계는 그림 5에 보이는 바와 같이 비례관계가 성립함을 알 수 있다.

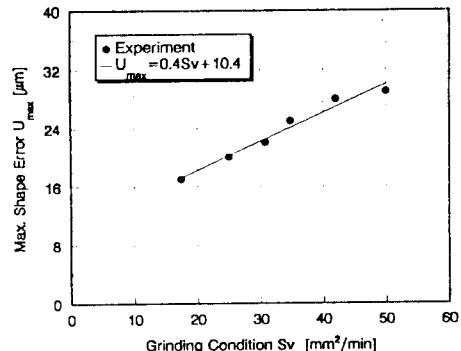


Fig. 5 Relation Between  $S \cdot v$  and  $U_{max}$

이 비례관계는 최소자승법에 의해 직선으로 표시하며 이 식은 아래의 실험식 (5)로 표현이 가능하다.

$$H_1 = k_{h1} \cdot S \cdot v + k_{h2} \quad (5)$$

여기서  $S$  : 속돌의 설정 절입량  
 $v$  : 공작물 테이블의 이송 속도  
 $k_{h1}, k_{h2}$  : 실험에 의해 구해지는 상수

### 3. 퍼지 알고리듬의 컴퓨터 시뮬레이션

인민적인 퍼지 알고리듬은 각각의 변수를 목표치에 도달한 정도를 표시하는 Error와 그 Error의 변화량인 Error Change로 나누어 그것의 정량화한 값을 아래와 같이 보통 7가지로 나누

어 생각한다.<sup>7)</sup>

- PB : Positive Big
- PM : Positive Middle
- PS : Positive Small
- ZE : Zero
- NS : Negative Small
- NM : Negative Middle
- NB : Negative Big

정량화(Quantizing, Mapping)라고 하는 것은 실제 발생 가능한 모든 범위를 일정한 구간으로 한정함을 의미한다. 그림 6(a)가 이를 보여주고 있다.<sup>7)</sup>

그림 6(a)에서 보면 발생 가능한 Error의 최소값을  $E_{min}$ 으로, 발생 가능한 Error의 최대값을  $E_{max}$ 으로 했을 때 이러한 실제 구간 전체가 [-6, 6]으로 정량화되는 것을 알 수 있다. 각 경우의 귀속도(소속도)는 최대가 1이고 최소가 0이다.

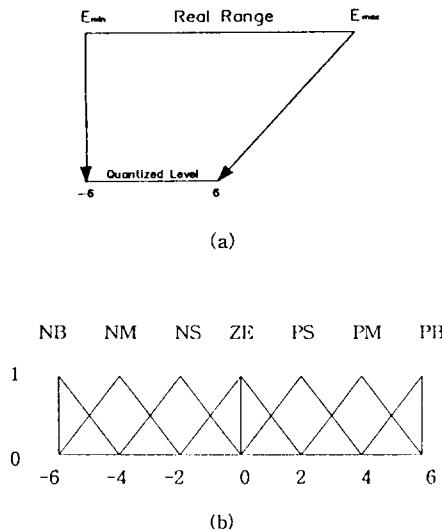


Fig. 6 (a) Mapping and (b) Fuzzy Model

이런 경우의 정량화된 래郁闷은 Table 1에 나타난 바와 같이 고려되고, Table 1에 따른 퍼지 모델이 그림 6(b)에 있다.

그러나, 본 연구에서는 설정한 세이번수인 가공물의 평균온도차와 평균온도차의 변화량, 그리고 가공 위치등의量을 가지고 고려하기 때문에 각각의 변수들은 양(Positive)의 값만을 가지고 있다. 따라서 Negative의 영역을 제외한 Positive의 영역만 가지고 퍼지 모델을 구성하였으며 모델의 단순화를 위해 Zero와 Middle 부분을 제외하고 Small과 Big 부분만을 고려한 단조 적선형 모델을 사용하였다.

Table 1. A Model of Quantized Levels

Linguistic Set	Quantized Levels											
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PS	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
ZE	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 3.1 규칙

형상 정도를 향상시키기 위한 프로그램에 이용되는 규칙(Rule)들은 아래의 네 가지로 표시된다.

- Rule 1.  $T_d : PS \wedge x : PS \rightarrow y : PS$
- Rule 2.  $T_d : PB \wedge x : PS \rightarrow y : PB$
- Rule 3.  $T_d : PB \wedge x : PB \rightarrow y : PS$
- Rule 4.  $T_d : PB \wedge DT_d : PS \wedge x : PB \rightarrow y : PB$

여기서  $x$ 는 가공위치이다.

예를 들어 Rule 1의 경우를 설명하면 평균온도차인  $T_d$ 가 작고 가공이 이루어지고 있는 위치가 가공 시작 위치에서 가까우면 수동의 전위량을 조금 감소(수동의 위치를 설정 위치보다 약간 상승 --> 즉, 절위량을 약간 감소)시키라고 하는 의미이다. 나머지 룰들도 마찬가지의 형태로 구성되어 있으므로, 이 룰들이 형상 오차의 정도(度)를 모두 나타내고 있다고 할 수 있다.

Rule 4에만 나타나는  $DT_d$ 는  $T_d$ 의 차이를 구한 것으로 공작물의 끝단을 인식시키기 위해 도입하였다. 민수  $DT_d$ 는 80% 이상 가공되었을 경우 발생하게 되는데, 그 이유는 끝단의 인식이라는 문제도 있고, 가공 초기부터 계산을 했을 경우는 30%의 가공위치부터는 거의 변화가 없기 때문이다.

그림 7에 이 Rule들의 모델을 표시하였다.

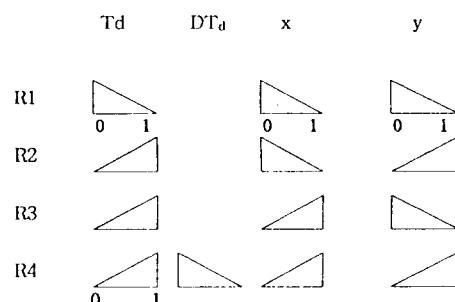


Fig. 7. A Fuzzy Model of the Rules

### 3.2 추론 과정

가공길이를 1mm단위로 구분한다. 공작물의 길이는 100mm이지만 실제 분할한 구간 수는 100등분이 아니다. 그 이유는 그림 8에 보이는 바와 같이 윗돌이 진위값이 S를 가지고 가공을 시작하면 윗돌 중심이 공작물의 시작 지점과 수직인 위치에 있음 때 부터 가공이 시작하는 것이 아니라, 공작물 시작 위치로부터 간섭길이인  $\sqrt{2RS}$ 만큼 앞선 지점에서부터 가공이 시작된다. 따라서 실제 가공길이는 100mm에  $\sqrt{2RS}$ 를 더한 길이가 되며 가공구간을 1mm단위로 나눈 구간의 수도 절위값이 S에 따라 달라지게 된다.

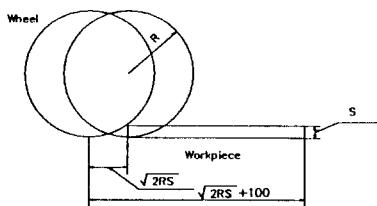


Fig. 8 Geometry Between Wheel and Workpiece

구간별 길이 1mm로 나뉘어진 각 위치에서의 평균 윤도차, 거리를 계산하여 일정한 구간(0에서 1까지)으로 정량화 시킨다. 그런 다음 위의 4가지 규칙에 적용시키기 각각의 정량화된 변수에 해당하는 기중치  $w_i$ 들을 구한 다음 이중에서 작은 값을 취해 각 툴의 기중도  $w_{ij}$ 를 설정한다.<sup>10)</sup> 여기서 퀴즈  $i$ 는 가공위치를 mm단위로 나타내고,  $j$ 는 Rule의 번호를 나타내고 있다.

이렇게 구한 기중도  $w_{ij}$ 는 각 툴들의 기중치를 표현한다.

### 3.3 추론과정의 예

가공위치를 분할한 구간  $i$ 가  $X$ 인 경우(인식개시후 윗돌이  $X$ mm인 지점에 있는 경우) 각각 변수에 대한 계산 값과 그 계산값의 피지 모델로의 정량화 된 값이 아래의 표 Ex1과 같이 나타난다고 가정한다.

Table Ex1. A Model of Example Case

	Td	DTd	x	y
계산값	Td_cal	DTd_cal	x_cal	
정량화된 값	Td_q	DTd_q	x_q	
R1	Td1		x1	y1
R2	Td2		x2	y2
R3	Td3		x3	y3
R4	Td4	DTd4	x4	y4

여기서 표 Ex1 내부에 응영으로 처리된 값들이 각 툴의 최소값을 나타내고 있다. 2개이상의 출력치에서는 작은 값을 출력값으로 정한다. 그 이유는 피지 제이에 있어서 각 툴을 구성하고

있는 명제들은 AND연산으로 연결되어 있고 그것의 피지 알고리듬상에서의 의미는 min연산이다.<sup>8)</sup>

위의 표 Ex1에 나타나는 값들에 의해 추론을 행하는 과정은 다음의 그림 Ex1으로 표시한다.

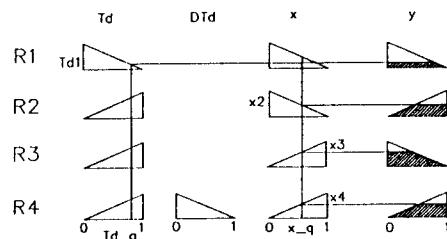


Fig. Ex1 A Process of Inference in Example.

그림 Ex1에 따라 나타나는  $y$ 의 빛급진 사나리꼴 모양이 각 툴의 출력값이 되어 이 4개의 사나리꼴을 모두 모아서 무게중심을 구해 최종적인 결론을 구한다.

이 과정이 그림 Ex2에 보여지고 있다.

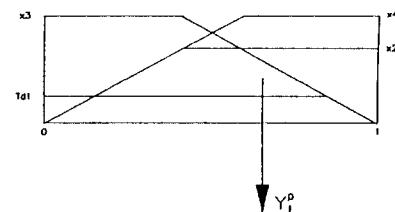


Fig. Ex2 Process of Calculation

최종적인 결론식<sup>9)(6)</sup>은 기중치  $w_{ij}$ 를 포함하고 있다.

$$y_i^p = \frac{\sum_{j=0}^4 (w_{ij} \cdot y_{ij})}{\sum_{j=0}^4 w_{ij}} \quad (6)$$

이 기중치  $w_{ij}$ 는 실제로  $[\frac{1}{3}, \frac{2}{3}]$ 의 구간에서 값이 존재하고 있다. 그 이유는 최소의 값이 나오는 경우는 좌변이 수직인 직각삼각형의 경우이고, 최대의 값이 나오는 경우는 우변이 수직인 직각삼각형의 경우이다.

따라서 그 각 경우에서의 무게 중심은  $\frac{1}{3}, \frac{2}{3}$ 이되기 때문에 최종적인 기중치  $w_{ij}^p$ 는 아래의 식(7)에 의해 [0,1]구간으로 확장시킨다.

$$w_{ij}^p = (w_{ij} - \frac{1}{3}) \times 3 \quad (7)$$

식(7)에 의해 다시 표현되는 가중치  $w_i$ 가 제어 입력을 결정 한다.

$w_i$ 의 값은 [0,1]사이의 값을 가지게 되며 1이 되는 경우는 가장 적합하다는 의미이고, 0인 경우에는 전혀 적합하지가 않다는 의미이다.

식 (6)은 다음의 식 (8)과 같이 수정된다.

$$y_i^o = \frac{\sum_{j=0}^4 (w_i^j \cdot y_j)}{\sum_{j=0}^4 w_i^j} \quad (8)$$

이 출력값에 의해 숫돌의 위치를 결정한다.

그림 9는 각각의 입력값(인식 조건)에 대한 형상오차를 최소한으로 줄일 수 있는 숫돌의 위치를 구한 결과이다.

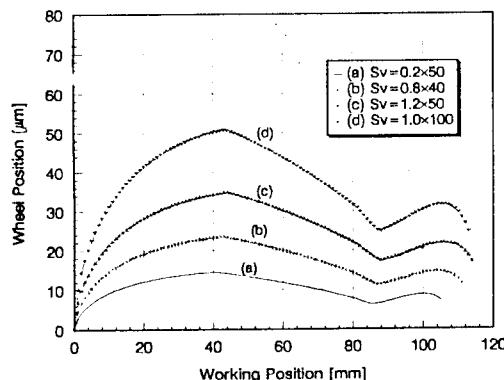


Fig. 9 Result of Simulation

#### 4. 결론

본 연구에 의해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평면인식을 행할 때 발생하는 형상오차의 최대값을 설정 철 입량(S)과 공작물 테이블의 이송 속도(v)의 항인  $S \cdot v$ 에 의해 나타내었다.
- 2) 형상오차의 지배적인 원자로 알려져 있는 공작물의 상면과 하면의 온도차를 실험에 의해 구하고 그 실험식이 인식조건인 절입깊이(S)와 공작물 테이블의 이송 속도(v)와의 항인  $S \cdot v$ 에 관한 일치함수로 나타나는 실험식을 제시하였다.

- 3) 형상오차를 줄이는 숫돌의 위치를 형상오차 케치의 대칭으로 제안하고 그 케치를 유도해 낼 수 있는 규칙 4개를 제시하였으며, 그 4개의 규칙이 도입된 퍼지 알고리듬의 프로그램에 의해 형상오차를 줄이는 숫돌의 위치를 구했다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Tokuhiko N., Shigeki O. "Study on the Geometrical Accuracy in Surface Grinding - Process of Forming the Workpiece Shape in Plunge Grinding", JSPE 1991. 9. pp.1597 - 1602
- 2) Tokuhiko N., Shigeki O. "Study on the Geometrical Accuracy in Surface Grinding - Influence of the Cooling Action of Grinding Fluid on Thermal Deformation", JSPE 1992. 8. pp.1339 - 1344
- 3) Tokuhiko N., Shigeki O. "Study on the Geometrical Accuracy in Surface Grinding - Thermal Deformation of Workpiece in Traverse Grinding", JSPE 1993. 7. pp.1145 - 1149
- 4) 박구하, "연삭기공에 있어서 인식형으로 인한 청상오차에 관한 연구", 한국정밀공학회 1992 춘계 학술대회 초록집 pp.120-124
- 5) Yoji T., Hidemitsu A. "Improvement of Grinding Fluid Application in Creep Feed Grinding - Relation between State of Grinding Fluid Application and Workpiece Temperature", JSPI 1984. 7. pp.1075 - 1078
- 6) Yoshio S., Tsutomu S. "Effects of Thermal Deformation on the Accuracy of Surface Grinding", JSPE 1984. 4. pp.679 - 684
- 7) 青野道夫, "퍼지 제어 시스템", 朴致用, 崔恒植 譯, 大英社 1990
- 8) Li, Y. F. and Lau, C. C., "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 9, April 1989, pp. 65-72.
- 9) H.-J. Zimmermann, "FUZZY SET THEORY AND ITS APPLICATIONS", Second Edition, Kluwer Academic Publisher. 1991. pp.205