

## 정연삭력 제어를 이용한 형상정도 향상

### Improvement of Geometric Accuracy Using Constant Force Control

김동식\*, 김강석, 홍순익(부산대 대학원),

김남경(진주산업대 기계설계공학과), 송지복(부산대학교 정밀기계공학과)

Dong Sik Kim\*, Kang Sok Kim, Soon Ik Hong(Graduate School, Pusan Univ),

Nam Kyung Kim(ChinJu Industrial Univ), Ji Bok Song(Pusan Univ)

#### ABSTRACT

In the geometric accuracy, most of studies have been concentrated on the analysis of the geometric error, or a control path of grinding using the value of measured geometric error

In this paper, by using the value of measured motor current through hall sensor, detection of the geometric error have been accomplished, and in-process control path of grinding for improvement geometric accuracy, too.

**Key Words** : Geometric accuracy(형상정도), Geometric error(형상오차), Path of grinding(연삭궤적)  
Motor current(모터전류), Hall sensor(홀센서), In-process(인프로세스)

#### 1. 서론

최근의 가공기술은 고정도, 고능률 가공을 지향하고 있으나, 능률과 정밀도를 동시에 향상시키기는 쉽지 않다. 특히 연삭가공은 다듬질 가공으로 주로 이용되어 왔으나, 최근의 산업구조의 변화에 따라 생산력 향상을 위해 정도를 유지하면서 고능률로 가공하는 것이 필요하게 되었다.

연삭에서 고능률 가공법은 크게 두 가지로 구분되는데 고속가공과 중연삭법이다.

고속가공법은 주축이 고속으로 회전하기 때문에 칩질 파괴가 일어나기 쉽다. 따라서 CBN이나 다이아몬드같은 스톨을 사용해야 하고 고속의 모터가 필요하게 된다.

중연삭(Creep feed) 가공법은, 연삭 가공시 절입깊이를 증가시키고 이송속도를 감소시켜서 가공하는 가공법으로 공작물 사이의 간섭길이가 길어지기 때문에 과도한 연삭열이 발생하게 된다.

그리고 다듬질 면을 중시하는 평면 연삭에서는, 스파크 아웃(Spark out)이나, 미소절입의 가공을 해서 열변형을 억제 시킨다. 그러나 고능률 가공을 지향하는 최근의 가공법에서는 단공정에 원하는 다듬질면이 얻어지기를 바라고 있다.

본 논문에서는, 범용 평면 연삭기에서 단공정 중 연삭 가공을 행하였다. 단공정 중연삭시 과도한 연삭열이 발생하고, 이로 인하여 공작물은 불룩한 형태로 변형하게 된다. 그 결과로 스톨은 공작물의 불룩한 변형만큼 과도한 연삭을 행하게 되고, 이로인해 공작물이 냉각하게 되면 공작물은 오목한 형태로 남게 된다.

지금까지의 연구는 대부분 이와 같은 과도한 연삭열로 인해 발생하는 공작물의 굽힘변형이나, 연삭점에서 발생하는 공작물의 국부적 열변형에 대해 유한요소법<sup>(1-2)</sup>을 이용하여 그 형상을 예측하거나, 이미 예측된 형상오차에 대해 스톨의 궤적을 조절해서 형상정도 향상시키려는 노력이 있었다.

본 연구에서는, 홀 센서를 이용해 모터 전류를 측정함으로써 간접적으로 공작물 변형량을 감지하고, 이를 이용해 스톨의 절입깊이를 공작물 변형의 궤적을 따라서 인프로세스(In-process)로 제어함으로써 형상정도를 향상시키고자 한다.

#### 2. 형상오차

## 2.1 형상오차 요인

공작물이 평면연삭기에서 연삭될 때, 연삭된 표면의 평면도에 영향을 주는 요인은 크게 두 그룹으로 나뉘어 진다. 한 그룹은 공작물의 변형을 일으키거나 억제하는 요인을 포함하는 그룹이고, 다른 그룹은 연삭시, 공작물과 스톨축 또는 연삭점에서 상대 변위를 일으키는 요인을 포함하는 그룹이다.

전자에 속하는 요인으로는 국부적 열 팽창, 열 팽창에 따른 굽힘 변형, 연삭력에 의한 변형, 잔류응력에 의한 변형, 자력(Magnetic force)<sup>(3)</sup>에 의한 변형 등이 있으며, 후자에 속하는 요인으로서 테이블의 직선운동 오차, 스톨 축의 탄성 휨, 스톨-공작물간의 접촉 휨, 공작물 홀더(Holder)의 탄성 휨 등을 들 수 있다.

## 2.2 수직변위의 근사해석

단공정 연삭에서 공작물 초기에 작용하는 굽힘 모멘트  $M$ 이 연삭 종료때까지 일정하고, 연삭점 통과 전후에 공작물에 굽힘 모멘트가 작용한다고 가정하고, Fig. 1에 표시한 임의의 점( $x=a$ )의 바로 위에 연삭점이 있다고 하면, 좌표  $x$ 에서의 공작물 중심선의 수직변위  $V(x)$ 에 대해서 다음과 같은 미분방정식이 성립한다.

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (0 \leq x \leq a) \quad \text{---(1)}$$

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = 0 \quad (a \leq x \leq L) \quad \text{---(2)}$$

여기서  $E$  : 종탄성 계수  $I$  : 공작물의 단면 2차 모멘트  $M$  : 굽힘모멘트

경계조건은,  $x=a$ 에서 양 식의  $V(x)$ 와 처짐 각  $dV(x)/dx$ 이 같고, 또한  $V(x=0)=V(x=L)=0$ 을 만족한다.

윗 식을 풀면

$$V(x) = \frac{M}{2EI} \left\{ ax \left( 2 - \frac{a}{L} \right) - x^2 \right\} \quad (0 \leq x \leq a) \quad \text{---(3)}$$

$$V(x) = \frac{Ma^2}{2EI} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \quad (a \leq x \leq L) \quad \text{---(4)}$$

따라서 스톨 바로 아래의 변위  $V(a)$ 는 다음 같이 주어진다.

$$V(a) = \frac{Ma^2}{2EI} \left( 1 - \frac{a}{L} \right) \quad \text{---(5)}$$

이 식을 이용해서 변위  $V(a)$ 를  $V(a)/V_{(max)}$  대  $a/L$ 를 이용해서 그리면 Fig. 2와 같이 된다. 여기서

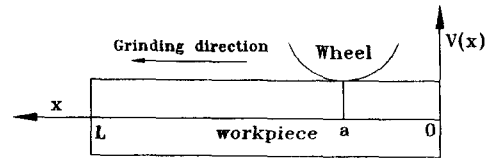


Fig. 1 Coordinates of workpiece and grinding point

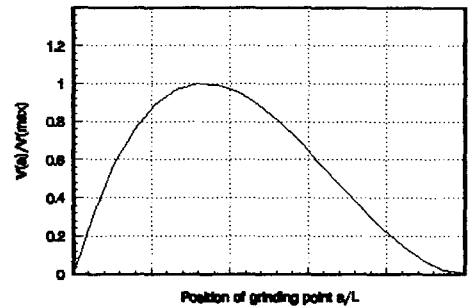


Fig. 2 Vertical displacement under the grinding point

최대치  $V_{(max)}$ 는  $a/L = 2/3$  위치<sup>(4)</sup>에서  $2ML^2/27EI$  값을 가진다.

## 3. 토크와 모터전류

공작기계의 주축과 이송에 사용되는 모터에 관계되는 변수들을 사용하여 절삭공정을 감시하게 되면, 측정장비가 가공공정을 방해하지 않고, 생산현장에 적합하다는 잇점<sup>(5)</sup>이 있다.

모터전류를 감지하기 위해서 홀(Hall)센서가 사용되었다. 홀 소자는 고체의 홀 효과를 이용한 자기 센서로 출력전압이 자계에 직접 비례한다.

스톨에 걸리는 토크와 모터전류와의 관계를 알아보기 위해서 Fig. 3과 같은 실험장치를 구성했다. 실험방법은 시편길이가  $18 \times 18 \times 21$ 인 공작물을 절입깊이를  $10 \mu m$ 부터  $100 \mu m$ 까지  $10 \mu m$ 씩 증가하며, 그때의 토크값과 모터 전류를 레코드에 기록하였다. 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다.

시편의 종류는 금형강인 HP4A, HP1A, 그리고 STD11을 사용하였고, 각각의 재료에서 대해서,

Table 1 Experimental equipment and grinding condition

Grinding machine	<ul style="list-style-type: none"> <li>Model : HYDRAULIC SURF ACE GRINDING MACHINE SGH-6</li> <li>Main shaft motor : FELQ-5 1.5kw 2P Yasukawa</li> <li>Wheel speed : 2450 RPM</li> </ul>
Grinding wheel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type : WA80K7V</li> <li>Shape : 205×25.0×50.80</li> </ul>
Workpiece	<ul style="list-style-type: none"> <li>Material : HP 4A, HP 1A, STD 11</li> </ul>
Grinding method	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plunge grinding &amp; Dry</li> <li>Up cut &amp; One pass</li> </ul>
Table speed	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.6, 0.4, 0.3 m/min</li> </ul>
Depth of cut	<ul style="list-style-type: none"> <li>10~100 μm</li> </ul>
Dressing	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dresser : Single point diamond</li> <li>Depth of cut : 20 μm</li> </ul>
Torque meter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type : SS-500</li> <li>Capacity : 5kgf-m</li> <li>Max speed : 6000 rpm</li> </ul>

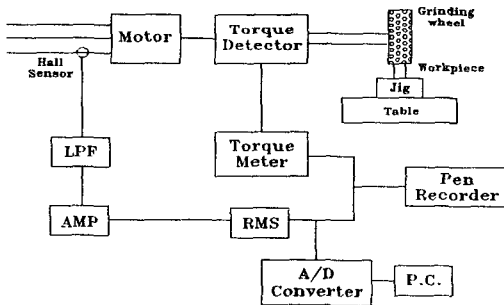


Fig 3. Experimental set up

테이블 속도에 따라 모터전류값을 그래프로 나타내었고, 선형 회귀를 시켰다.

#### 4. 형상정도 예측 및 제어

위의 실험에서 얻어진 모터전류의 선형회귀식의 형태는 다음과 같다.

$$\text{모터전류} = \frac{\text{모터전류 변화량}}{\text{절입깊이 변화량}} + \text{상수}$$

본 연구에서는 연삭가공시 모터전류가 절입깊이에 따라서 거의 선형적으로 증가한다고 가정하고, 연삭시 공작물에 생기는 열로 인해 공작물의 수직변형이

발생하고, 이 수직변형 양만큼 과도하게 연삭된다고 생각하였다.

따라서 선형회귀식의 기울기를 이용하여 가공개시점의 모터전류와 가공중의 가장 높은 모터전류값을 이용하여 형상정도를 예측해 보았다.

그리고, 가공개시점의 모터전류를 최저 모터전류라고 볼수 있으므로 최대 형상오차는 다음과 같다.

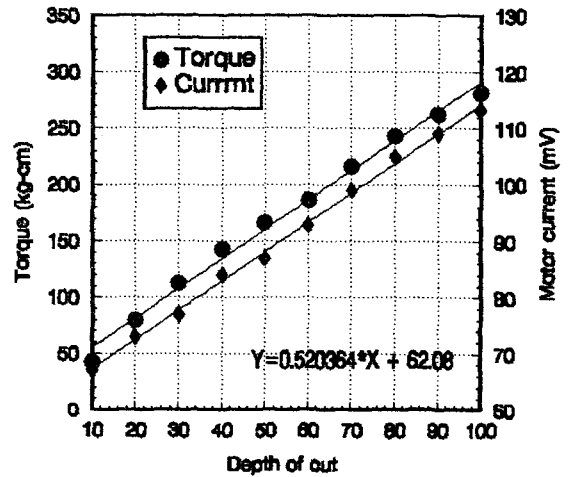


Fig 4. Relation between torque and motor current (HP4A , 0.6m/min)

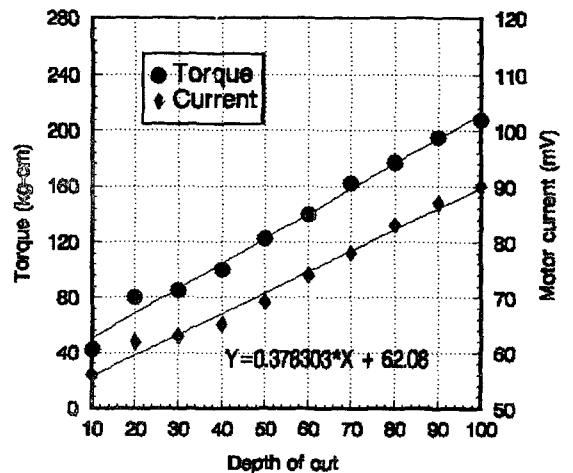


Fig 5. Relation between torque and motor current (HP1A, 0.4m/min)

Table 2 The slope of linear regression equation

Material	Table speed (m/min)	Slope of linear regression equation
HP1A (50 μm)	0.6	0.3710
	0.4	0.3783
	0.3	0.2019
HP4A (40 μm)	0.6	0.5203
	0.4	0.4898
	0.3	0.4069
STD11 (30 μm)	0.6	0.5094
	0.4	0.4769
	0.3	0.5572

$$\text{최대형상오차} = \frac{\text{최대모터전류} - \text{최저모터전류}}{\text{선형회귀식의 기울기}}$$

연삭가공은 다른 가공과는 달리 재현성을 얻기 힘들고 변수들이 많기 때문에, 되도록이면 같은 조건에서 실험을 하기위해 9가지 경우에 대해서 연속 실험을 행하였다.

#### 4.1 실험장치 및 방법

제어장치로서 스테핑모터를 주축펜들에 벨트로 연결시켜, 숫돌의 궤적을 제어하게 하였다.

시편은 별도로 제작한 지그에 물렸으며, 열에 의한 급팽창 발생시 증립축이 위치하게 되는 시편높이의 1/3위치<sup>(4)</sup>에 렌치볼트를 이용하여 고정하였다.

제어용 프로그램은 C언어를 이용해서 구현하였으며, 알고리즘은 숫돌이 공작물에 완전히 들어가는 순간 샘플링 시간을 100Hz로 데이터를 10개를 받아 산술평균을 취해 이 값을 기준값으로 삼고, 다음부터는 데이터를 5개씩 받아 산술평균을 취해서 기준값과 비교한뒤, 그 차이만큼 펄스를 주어서 스테핑모터를 구동시켰으며, 그때의 모터전류를 펜 레코드에 기록하였다.

검증실험은, 테이블 속도 3가지 0.6, 0.4, 0.3 m/min에 대해서 STD11은 절입을 30 μm, HP4A는 절입을 40 μm, HP1A는 절입을 50 μm로 건연삭을 행하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

연삭가공시, 토크의 증가에 따라 비례적으로 모터전류도 증가함을 알수 있었고, 절입깊이에 따라서 구한 모터전류의 선형회귀식을 이용하여, 형상오차를 예측해 보고, 이를 이용하여 숫돌의 궤적을 제어

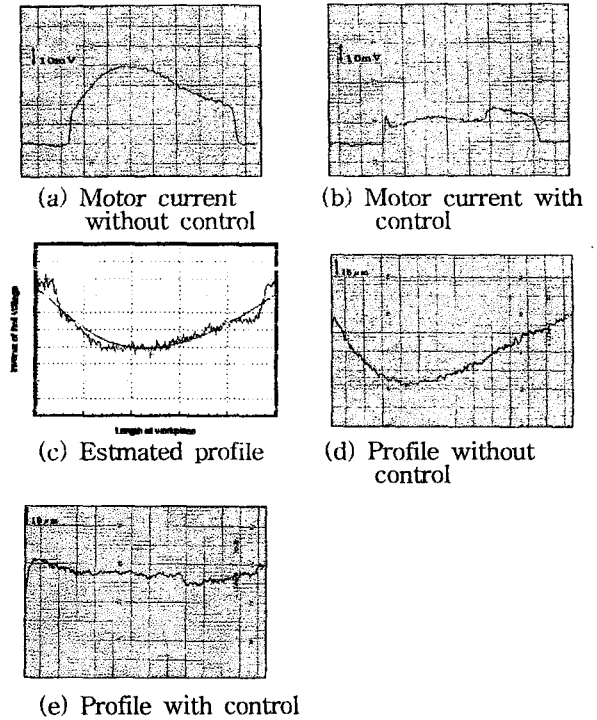


Fig 6. Comparison of experimental results (HP4A, 0.6 m/min)

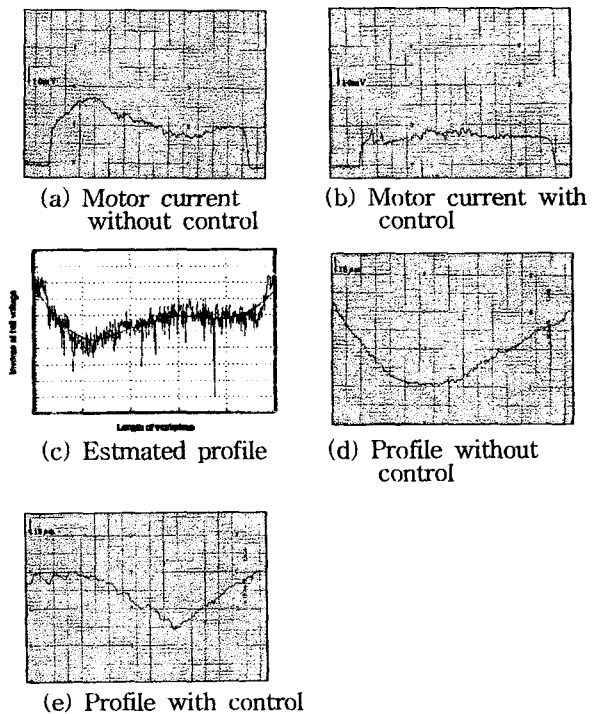


Fig 7. Comparison of experimental results (HP1A, 0.4m/min)

Table 3 Estimation and control geometric error

Material (depth of cut)	Table speed (m/min)	Estimated value ( $\mu\text{m}$ )	Measured value ( $\mu\text{m}$ )	Measured value with control ( $\mu\text{m}$ )
HP1A (50 $\mu\text{m}$ )	0.6	72.77	79.2	38.0
	0.4	52.87	63.3	47.5
	0.3	69.32	41.2	38.0
HP4A (40 $\mu\text{m}$ )	0.6	38.40	60.2	22.2
	0.4	40.83	38.0	38.0
	0.3	48.45	79.2	50.7
STD11 (30 $\mu\text{m}$ )	0.6	38.47	42.7	26.9
	0.4	46.15	66.5	66.5
	0.3	88.68	88.7	57.0

하였다.

결과에서 보듯이, 일반적으로 예측값이 측정값보다 작음을 알수 있는데, 이것은 연삭가공이 다른 가공에 비해 수직분력이 크기때문에, 이로인한 압축력으로 공작물에 오목한 형상을 만들기 때문이라고 생각된다.

제어시, 형상오차의 향상정도는 최대형상오차를 기준으로 볼때, 기대만큼 큰 효과는 얻을 수 없었다. 그 이유로 스테핑모터와 주축핸들사이의 벨트구동이 미끄럼이 발생을 하였고, 미세한 움직임에 대해서는 스테핑모터의 구동력이 약했기때문이라고 생각된다.

그러나, 최대형상오차는 비록 비슷할지라도, 형상오차면적에서 보면 어느정도 향상이 되었음을 알수 있다.

## 6. 결 론

본 논문은 모터전류를 이용하여 형상정도 향상을 시도 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대형상오차가 연삭개시점부터 공작물 길이의 2/3지점에서 발생함을 실험을 통해 검증하였다.
2. 모터전류를 이용하여 형상정도 예측이 가능하였다.
3. 모터전류를 이용하여 인프로세스로 형상정도를 향상시켰다.

## 참 고 문 헌

1. T. Nishihara, S. Okuyama, " Study on the Geometric Accuracy in Surface Grinding - Process of Forming the Workpiece Shape in Plunge Grinding", JSPE 57, 9, pp. 1597~1602, 1991

2. T. Nishihara, S. Okuyama, " Study on the Geometric Accuracy in Surface Grinding - Thermal Deformation of Workpiece in Traverse Grinding", JSPE 59, 7, pp. 1145~1150, 1993
3. T. Nishihara, S. Okuyama, S. Kawamura. " Study on the Grinding Condition to Prevented the Thermal Displacement of a Work Attracted by Magnetic Chuck", CIRP 37, 1, pp. 295~298, 1988
4. T. Nishihara, S. Okuyama, S. Kawamura. " Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding - Effects of Bending Caused Grinding Heat", JSPE 54, 8, pp. 1496~1501, 1988
5. M. A. Mannan, S. Broms, " Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurement", CIRP 38, 1, pp. 347~350, 1989
6. 센서 인터페이스3 기전연구사 전 재승역 1987
7. 유도기기 동명사 박민호 1977