

## 연삭 가공시 공작물의 열변형과 새로운 노즐의 개발

### Development of the New Type Nozzle and the Thermal Deformation at Workpiece in Grinding

김 남 경\*·안 국 찬\*

Nam-Kyung Kim · Kook-Chan Ahn  
(1995년 7월 13일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

#### ABSTRACT

Grinding temperature and thermal deformation(dimensional error) are studied theoretically and experimentally. The propose of this research is clarified loading phenomena and residual stress in order to guide nozzle's efficiency.

The main results to be obtained are as follows:

1) When grinding condition is high efficient grinding, FEM program is developed about grinding heat and dimensional error.

2) Thermal deformation depend on temperature distribution is in good agreement with experimental results in case of little grinding energy flux but is comparatively in good agreement with in case of large ( $3.5 \times 10^6$  J/m).

3) In terms of high efficient grinding at field(table speed 4m/min), grinding fluid (dilution 5/100) obtained a good workpiece quality and decreased a grinding temperature.

4) A surface roughness, dimensional error, residual stress and loading phenomena with guide nozzle are decreased and these results obtained a good workpiece quality.

#### 1. 서 론

연삭가공은 많은 절삭날을 가진 스톨에 의해 가공된다. 그러나 많은 절삭날은 항상 예리한 것만은 아니고 또한 고속으로 가공되므로 연삭점에서는 상당히 높은 열이 발생한다. 이러한 연삭열은

가공변질층·잔류응력을 발생시키고 공작물의 피로강도와 내마모성을 저하시킨다. 또 표면거칠기를 악화시켜 가공 품위를 저하시키고 열팽창에 의해 가공정도를 나쁘게 한다. 이와같은 연삭열을 억제시키는 방법에는 여러가지가 있겠지만 중요한 인자로서 연삭액의 작용을 들 수 있다. 연삭액은

\* 전주산업대학교 기계설계공학과

숫돌날과 공작물, 숫돌날과 칩 사이의 유향작용, 열 흡수로 공작물의 온도 상승을 저하시키는 냉각 작용, 숫돌의 로딩(Loading)방지 작용 등을 들 수 있다. 이러한 연삭액의 효과를 상승시키기 위해서는 가공조건에 적당한 성질을 가진 연삭액의 설정은 물론 공급방법이 중요한 요소이다. 그러나 연삭 숫돌의 고속회전으로 생기는 공기층의 흐름 등으로 숫돌과 피삭재 사이의 접촉면에 연삭액의 주입이 어려운 점이 있다. 따라서 숫돌과 공작물의 접촉점 부근에 얼마나 가까이 연삭액을 공급하는가 하는 것이 연삭열을 낮추는 데 있어서 제일 중요한 요건이 될 것이다. 이와같은 연삭열에 관련된 연구로써, Nakano는 평면 연삭에 있어서 공작물의 열변형과 연삭 후 형상오차에 대해 실험<sup>1)</sup>과 이론<sup>2)</sup>을 통해 정량적으로 검토했다. Okuyama<sup>3)</sup>는 단공정 연삭에 있어서 열변형 거동을 유한 요소법에 의해 밝히고, 평면 연삭 실험을 행해서 공작물 내부와 표면의 진척도를 측정하고 해석 결과의 타당성을 확인했다. Masuko<sup>4)</sup>와 Nishiwaki<sup>5)</sup>는 연삭 기구에 관한 유체의 영향을 상세히 기술하였고, 연삭액이 접촉호에 침투하는 과정<sup>6)</sup>과 침투된 유량의 평가<sup>7)</sup> 등에 관한 연구 등 연삭액의 효과와 공급 방법에 관한 많은 연구가 있다. 이 모든 경우가 좀더 양호한 연삭 효율을 얻기 위한 공급 장치의 설계에 속하나, 현장에서 사용하기 위한 분위기에는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 연삭가공에서 공작물의 열변형 거동을 유한 요소법으로 밝힌 것을 기초로 하여 공작물의 변형 정도를 밝히고, 범용 평면 연삭기를 이용한 실험에 의해 연삭지향, 연삭 온도 및 가공 표면의 프로파일을 측정해서 해석 결과와의 타당성 여부를 검토하고 새로 개발된 가이드 노즐의 성능을 평가하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 열전달 지배방정식

연삭 숫돌과 공작물의 접촉점에서 발생한 연삭열의 대부분은 공작물 내부로 유입된다. 연삭가공에 관한 이러한 현상은 정지하고 있는 연속체에 대한 비정상 2차원 열전도 문제로 해석할 수 있고 지배 방정식은 식(1)과 같이 표현된다<sup>8)</sup>.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q \quad (1)$$

여기서, T=온도, ρ=밀도, c=비열, λ=열전도율, Q=열 발열율이다.

### 2.2 FEM 해석과 모델

Fig. 1은 열탄소성 유한요소 프로그램의 흐름도를 나타내고 있다.

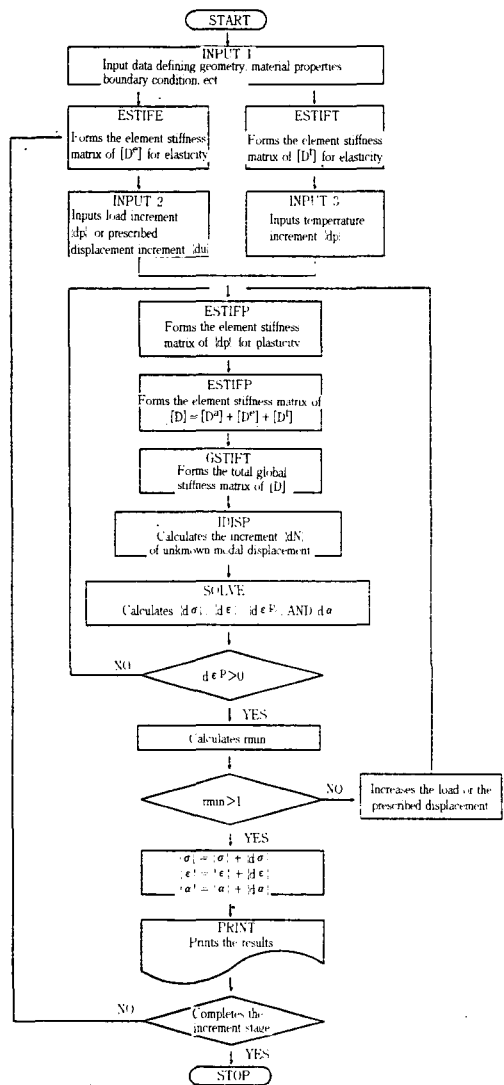


Fig. 1 Flow chart of thermal deformation FEM program

Fig. 2는 연삭시 온도 분포 및 변형 형태를 계산하기 위한 유한요소 모델을 표시한 것이다.

열원을 표면상의 절점에 집중해서 부가하고 얻어진 온도 분포를 기초로 해서 공작물 내부의 응력 및 변위를 계산한다.

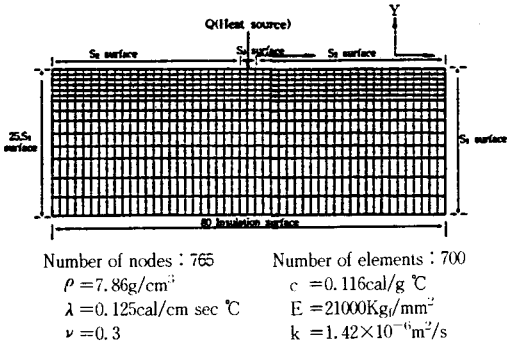


Fig. 2 The FEM meshmodel for grinding heat and thermal deformation

Fig. 2의 모델링 조건은 다음과 같다.

- 1) 온도분포는 열전도를 2차원 문제로 하고 물성치는 온도 의존성은 없는 것으로 한다.
- 2) 응력계산에서는 공작물을 탄성체로 취급한다.
- 3) 공작물의 재질은 균질이며 등방성인 것으로 한다.
- 4) 평면 변형을 상태로 가정한다.

### 2.3 경계조건

- 1) 연삭숫돌과 공작물의 접촉부위에 열원이 있는 것으로 한다.
- 2) 연삭숫돌과 공작물과의 접촉부위를 제외한 나머지 부분은 주위와 대류에 의해 열전달 되는 것으로 하였다.
- 3) 공작물과 고정구의 접촉 열저항은 없고, 고정부위는 단열된 것으로 한다.
- 4) 주위의 온도는 대기온도로 20°C로 한다.
- 5) 연삭에너지 유속은  $(F_1 V_s) / (B \sqrt{\Delta D})$ 의 식을 이용하였다<sup>9)</sup>.

경계조건에 따라 본 해석에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$T = T_\infty$ 는 Fig. 2의  $S_1$  경계면에 대기온도로써 20°C를 입력한다.

$$h(T - T_\infty) = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \frac{\partial T}{\partial y} l_y \right)$$

는 Fig. 2

의  $S_2$  경계면으로 주위로 대류열전달이 있는 면이다.

$q = q_a$ 는 Fig. 2의  $S_3$  경계면으로 열원이 있는 면이다.

$S_1, S_2$ 와  $S_3$ 를 합하면 전체 경계면이 되고,  $S_1$ 은 주위 벽면 온도를 고려하는 경계면이고,  $S_2$ 는 주위와 대류 되어지는 경계면이며  $S_3$ 는 외부열이 전도되어 들어오는 면이다.

연삭 가공에는 온도분포 및 연삭저항이 주어지기 때문에 탄성으로 부터 소성으로 천이하는 요소에 대하여는 온도분포의 증분 및 하중증분을 임의로 결정할 수 없다. 즉, 항복점, 응력-변형률 관계가 온도 의존성을 가진 함수로 생각하여야 한다. 따라서 계산의 정도를 향상시키기 위해서는 하중 변화값을 보정해 주어야 하고 본 연구에서는 Yamada의 식<sup>10)</sup>을 이용하였다.

## 3. 실험방법 및 장치

### 3.1 실험장치

연삭온도를 측정하기 위한 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이 Fig. 3이다. 공작물과 고정용 지그와의 열전달을 막기 위하여 단열재를 부착하였으며 연삭기의 열변형을 피하기 위하여 약 30분간의 예비운전 후 실험을 행하였다.

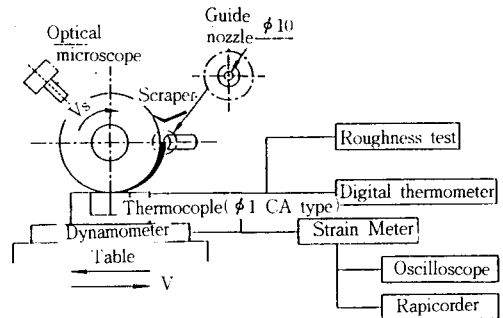


Fig. 3 Schematic diagram of experimental equipments

### 3.2 실험 방법

연삭깊이를 일정하게 하기 위하여 실험데이터를 얻기 전에 습식으로 5μm의 연삭깊이를 2회 연삭을 실시하였다. 그 후 스파크 아우트(spark out)시켜 실험하였다. 온도 측정은 공작물 밑면으로부터 표면에서 10mm 깊이까지 열전대를 삽입하여 측정

하였다. 열전대 삽입위치는 공작물의 좌우 각 1/3 되는 지점이다. 온도보정을 위하여 다른 1본의 열전대를 심고, 디지털 온도계(Digital thermometer)를 통하여 연삭가공 때마다 온도 측정을 행하였다. 연삭 후 길이 방향의 형상오차 프로파일(Profile)을 축침식 조도계로써 측정하였다. 또 X-선 회절법을 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 실험에 이용한 장치의 사양을 나타낸 것이 Table 1이다.

Table 1 Specification of experimental equipments

Equipment	Model
Grinding Machine	MITSUBI TYPE 407
Tool dynamometer	AST Type TSM-IMM
Thermocouple	φ1, CA type
Surface roughness tester	Taylor-Hobson
Residual stress tester	RIGAKU

연삭액 공급은 2종류의 Nozzle 즉, 범용노즐(Normal nozzle)과 차단판을 부착한 가이드 노즐(Guide nozzle with scraper)을 이용하여 연삭유제를 공급하였다. Fig. 4에 가이드노즐의 형상을 나타내었다. 이것은 슛들의 주위를 감싸는 형상으로 되어있어 슛들 주위의 공기층이 슛들과 함께 접촉면으로 유입되도록 되어 있다. 이것은 연삭액의 유입을 도와주는 형상이다.

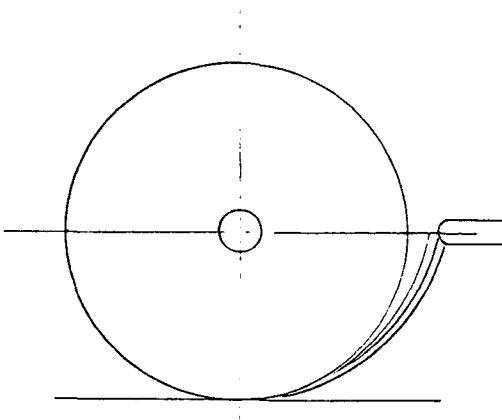


Fig. 4 Shape of guide nozzle

실험에 앞서 예비 슛들에 의해 피삭재 연삭면을 성형하였다. 또 드레서(Dresser)로 슛들을 앞의 연삭 자국이 없어질 때까지 드레싱(Dressing)을 행하여 테이블을 매 행정(Stroke)마다 소정의 연삭깊

이와 유제를 공급하여 일정 연삭량에 도달할 때까지 Table 2에 표시된 연삭 조건으로 실험을 실시하였다.

Table 2 Grinding condition

Grinding method	Up and down cut in surface grinding
Grinding wheel	WA46L7V, C46K6V (205×127×30)(mm)
Wheel speed	1150m/min
Grinding depth	10~100 μm
Workpiece material	SM45C, AL7075(80×25×5)(mm)
Table speed	4~12m/min
Grinding fluid	Soluble type(Hocut 757) Dilution 1/100 5/100 10/100 50/100
Dressing condition	
1) Dresser	Single point diamond
2) Dressing speed	1150m/min
3) Dressing in feed	50 μm/rev

연삭가공 현장에서 실제 사용가능한 고능률 연삭조건은 Fig. 5에 표시했듯이  $V \leq 4m/min$ 에서 표면 조도를 일정하게 유지하면서 가공능률을 최대한 향상시킬 수 있으므로 공작물 속도를 4m/min에 두고 연삭가공을 행하였다<sup>13)</sup>.

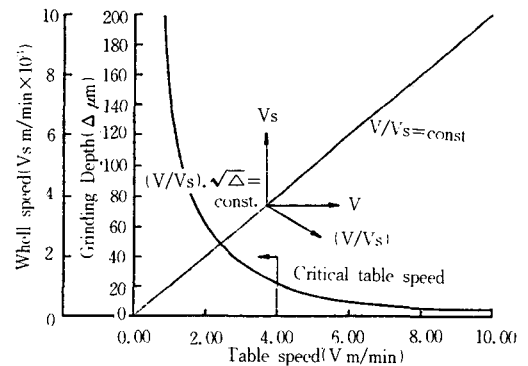


Fig. 5 The theoretical value of grinding depth according to initial condition under constant surface roughness

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 공작물 온도 및 형상오차

열원이 공작물속도로 이동하는 경우에 계산은 슷돌이 위치한 곳에서 열원을 입력하여 한번의 해석을 행하고 이때 얻어진 온도와 슷돌을 약간 이동시킨 위치에서 열원이 입력되고 있다고 고려하여 해석한 것으로 몇번을 반복하면 열원이 이동한 것과 같은 결과가 된다. 여기서 얻어진 결과로 공작물의 온도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 열원 전방에서는 열이 거의 전도되지 않은 것을 보이고, 접촉후 근방의 표층부에 편재되어 있는 것을 알 수 있으며, 열원이 이동하기 때문에 등온선 간격이 열원 후방에서는 좁은모양을 보이고 있다. 그리고 열원의 속도가 늦을 때( $V=4\text{m/min}$ )의 등온선 모양이 빠를 때( $V=12\text{m/min}$ )의 등온선 모양보다 온도 분포가 집중되어 있음을 알 수 있는데, 이것은 열원의 속도가 빠를수록 공작물로 열이 전도되는 시간이 짧기 때문이다. 아울러 열원 속도가 늦은 경우 표면에서 깊은 쪽으로 높은 온도가 형성되고 있음을 보여주고 있다. 연삭 속도가 빠를 때가 일반적으로 느릴 때 보다 열원 강도가 큰데 비하여, 공작물의 온도분포가 보다 낮은 이유는 연삭 속도가 빠른 경우가 단위 시간당 공작물에 유입되는 전체 열량이 작기 때문이다.

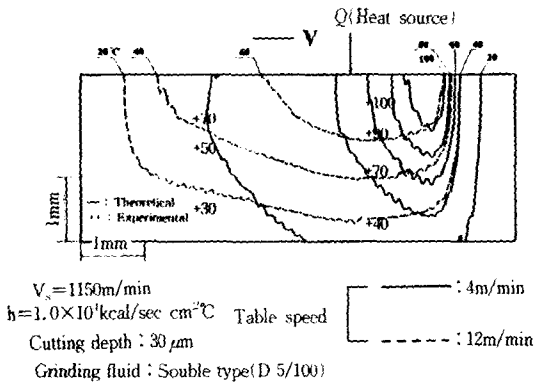


Fig. 6 Workpiece temperature distribution according to the table speed

Fig. 7은 평면연삭 중 공작물의 열변형을 위한 요소법으로 계산한 결과의 한 예를 나타낸 것이다. 열원의 속도는 4m/min과 12m/min으로 하였고, 열원이 공작물의 2/3지점을 지날 때의 열변형 형상을 나타낸 것이며 X, Y축 방향의 변위를 1000 배로 확대한 것이다.

여기서 알 수 있는 것은 표층부가 열 팽창하면 동시에 볼록형상으로 변형하나, 연삭속도에 따라

공작물의 열변형 모습이 명확히 다를 수 있다. 연삭속도가 12m/min의 경우에는 공작물의 뒷부분이 비교적 완만하게 만곡되어지 반면 연삭속도가 4m/min인 경우에는 극부적으로 급격하게 열 변형되는 모습을 보여주고 있다. 공작물의 좌우 모서리 부분이 처져 있는데 이것은 열변형과 아울러 슷돌이 공작물로 부터 벗어날 시점 즉 연삭이 끝날 부분이 되면 연삭 저항이 서서히 감소되고 연삭 저항의 수직 분력이 탄성 회복되기 때문이다.

이러한 공작물의 변위는 이것에 대응한 실질 절입량의 증가를 가져온다는 것을 알 수 있기 때문에 연삭 후 공작물의 형상은 상하를 뒤집은 오목 형상이 된다는 것이 예측되어 진다. 그리고 열원 분포나 연삭저항의 분포에서 알 수 있듯이 열원 강도의 분포가 하향연삭인 경우 전 연삭 과정 중에서 중앙으로 부터 우측지점으로 가장 큰 값을 가지고 있으므로 공작물의 최대 형상오차( $U_{max}$ )는 공작물 길이 L의 중앙부에서 최대값을 표시하는 것이 아니고 중앙에서 우측 위치에서 최대 형상오차가 되고 그 후 감소하는 것을 알 수 있다.

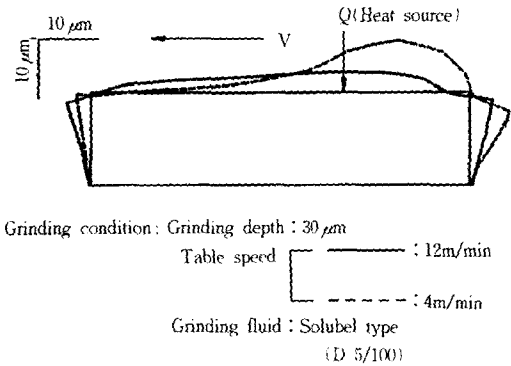


Fig. 7 The configuration of deformed workpiece

Fig. 8은 시간에 대해 무차원화 시킨 연삭에너지 유속( $\phi = F_s V_s / BV$ )과 형상오차 사이의 관계를 나타낸 것이다. 모든 경우에는 연삭에너지 유속이 크면 가공 후 형상오차가 증가한다는 것을 알 수 있다. 실선은 계산에 의한 결과이다. 연삭에너지 유속이 작은 범위에서는 SM45C를 WA46L7V 슷돌로 가공한 실험에서 실험치와 거의 일치하지만 그 값이  $3.5 \times 10^6 \text{ J/m}$  이상이 되면 실험치의 증가 비율이 감소하고 있다. 이것은 압축응력에 의한 표층부의 항복이나, 이것에 수반한 잔류응력에 의한 인장응력의 완화 때문이라고 생각되어 진다.

이것들을 종합한 것은 실제의 공작물 형상과 비교적 잘 일치하고 있다. 특히 해석적으로 예측한 온도분포를 가지고 계산한 열 변형량(형상오차)도 타당성이 있다는 것을 알았다. 그러므로 공작물의 형상 정도를 크게 지배하는 것은 열변형량이다.

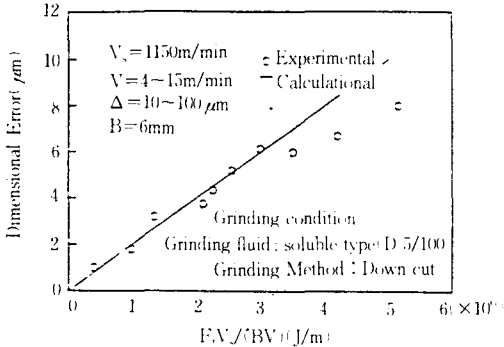


Fig. 8 Relation between dimensional error and time dimensionless grinding energy flux

#### 4.2 가이드노즐의 성능 평가

##### 4.2.1 가공면의 정밀도

연삭액은 냉각성을 가진 수용성(soluble type : Hocut 757)을 사용하고, 탄소강(SM45C)을 피삭 재료 공작물 속도 4m/min로 가공하면서 각 노즐마다 희석도를 변화시켜서 표면거칠기를 비교하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 일반적인 경

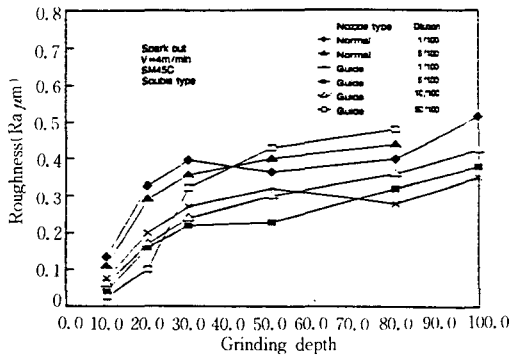


Fig. 9 Relation between surface roughness and grinding depth at two nozzle type(variable dilution)

향에서 알 수 있듯이 연삭 깊이가 적을 수록 양호한 표면거칠기를 보여 주고 있으며 노즐 형태가 범용노즐 보다는 가이드노즐이 큰 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그것은 접촉호 내로 원활하게 유입된 연삭유가 윤회와 냉각으로 인해 저항이 감소되고 탄소성 범위가 축소됨으로써 상당히 양호

한 결과를 가져온 것으로 보인다. 특히 가이드노즐에서는 연삭 깊이 60 μm 이상에서는 희석도가 큰것 즉, 냉각성이 큰 연삭유제가 좋은 가공정밀도를 나타내고 있다. 그러나 범용노즐은 연삭깊이 60 μm 이상에서는 버어닝 현상 등으로 가공이 거의 불가능하였다.

숫돌과 공작물 간의 탄성 변위, 숫돌의 마모 및 공작물의 열변형의 영향 등이 형상오차에 영향을 미치고 있으나, 일반적인 연삭 조건에서는 형상오차는 연삭열이 대부분을 차지하고 있다. 그러므로 가이드노즐 등에서 희석도를 달리한 경우 공작물 온도 측정을 통해서 그들의 연삭 조건에서 형상오차를 비교하여 공작물의 온도를 나타낸 것이 Fig. 10이다. 여기서 알 수 있듯이 범용 노즐에서 공작물 최고온도는 350°C(희석도 5/100)가 되고, 연삭 표면하 약 2.5mm에서 20°C가 되었다. 희석도가 1/100인 경우에는 표면 바로 아래에서는 300°C 정도로 조금 낮아지나 500 μm이하에서는 희석도에 관계가 없다. 가이드노즐에서는 공작물의 최고 온도는 약 80°C(희석도 5/100)와 50°C(희석도 1/100)가 되고, 연삭 표면하 약 1.5~2.0mm에서 20°C가 되었다. 특히 희석도에 따라서 표면 온도가 차이가 난다. 일반적으로 사용하는 희석도 5/100정도에서는 표면 바로 아래 온도는 100°C이하로 연삭 가공하기에는 좋은 조건이다. Fig. 9와 Fig. 10을 종합하면 가이드노즐이 희석도 5/100정도로 할 경우 표면조도와 공작물 온도 등에 양호한 효과를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

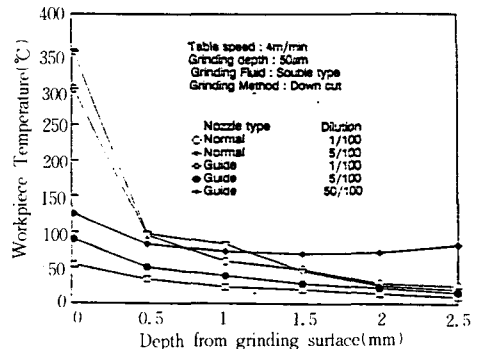


Fig. 10 Relation between workpiece temperature and depth from grinding surface at two nozzle type(variable dilution)

Fig. 11에서는 가이드노즐과 범용노즐의 공작물 온도(표면하 500 μm지점)와 형상오차를 보여주고

있다. 그림에서 보듯이 가이드노즐 사용하여 연삭 가공할 경우 공작물 온도가 낮아지므로 형상오차도 개선된 것을 보여주고 있다. 그것은 가이드노즐로 공급되어진 연삭액은 다공질 스톨 내부로 침투하여 연삭점에 고루 공급되기 때문이라고 여겨진다. 그러므로 고능률 연삭시 공작물 온도를 감소시킬 수 있을 것이다. 이것으로 보아도 개발된 노즐이 뛰어난 효과를 보여주고 있다. 그리고 범용노즐 사용시 Ch<sub>1</sub>에서 측정된 공작물 표면에서 500 $\mu$ m 지점의 온도가 70 $^{\circ}$ C인 반면에 Ch<sub>2</sub>에서 측정된 온도는 110 $^{\circ}$ C 정도 되는 것으로 보아 Ch<sub>1</sub>온도가 Ch<sub>2</sub>온도에 영향을 끼친다고 볼 수 있다.

그리고 연삭온도에 의해 지배되는 연삭면의 형상오차는 범용 노즐에 의한 형상오차보다 가이드노즐을 설치한 경우가 적게 된다. 형상오차는 연삭시 연삭열에 의해서 과열된 연삭면이 일단 블록한 모양으로 열 팽창한 후 인장 열응력이 연삭 후 급냉에 의해서 일부 인장 잔류응력으로써 잔류되기 때문에 기인한다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 연삭과정으로서 연삭시의 공작물의 열팽창의 일부가 설정 연삭깊이에 대해 최대의 제거량을 나타내기 때문에, 가이드노즐을 사용하면 연삭열이 피삭재로의 유입이 감소되어 공작물 온도를 감소시키므로 형상오차도 감소되어 진다고 생각된다.

#### 4.2.2 잔류응력 및 로딩현상

Fig. 12는 단공정에서 알루미늄(7075)을 피삭재로 하여, 공작물 속도를 4m/min으로 일정하게 두고, 연삭깊이를 달리한 경우 각 지점의 잔류응력을 Table 3과 같은 조건으로 측정된 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 범용노즐 보다는 개발된 가이드노즐을 사용하면 잔류응력이 현저히 감소된다. 이것은 잔류응력에 영향을 미치는 것이 거의 열응력인 것으로 보아 가이드노즐을 사용하므로 해서 가공시 발생하는 열이 급격히 감소되는 것으로 추정할 수 있다. 즉 연삭유제가 연삭 스톨과 공작물 사이의 접촉지점에 양호하게 공급되어 진다. 특히, 가이드노즐을 사용하므로써 연삭깊이를 100 $\mu$ m까지도 가공할 수 있으며, 그에 따른 잔류응력도 범용노즐 사용시 연삭 깊이 60 $\mu$ m로 가공할 때 보다 잔류응력 측면에서는 양호한 결과를 보여주고 있다. 그리고 어느 노즐이나 표면에서 25 $\mu$ m 지점에서는 인장응력이 급격히 감소되고 있는 것으로 보아 버어니싱효과 등에 의해 인장응력이 급격히

감소되는 것으로 보인다<sup>11,12)</sup>.

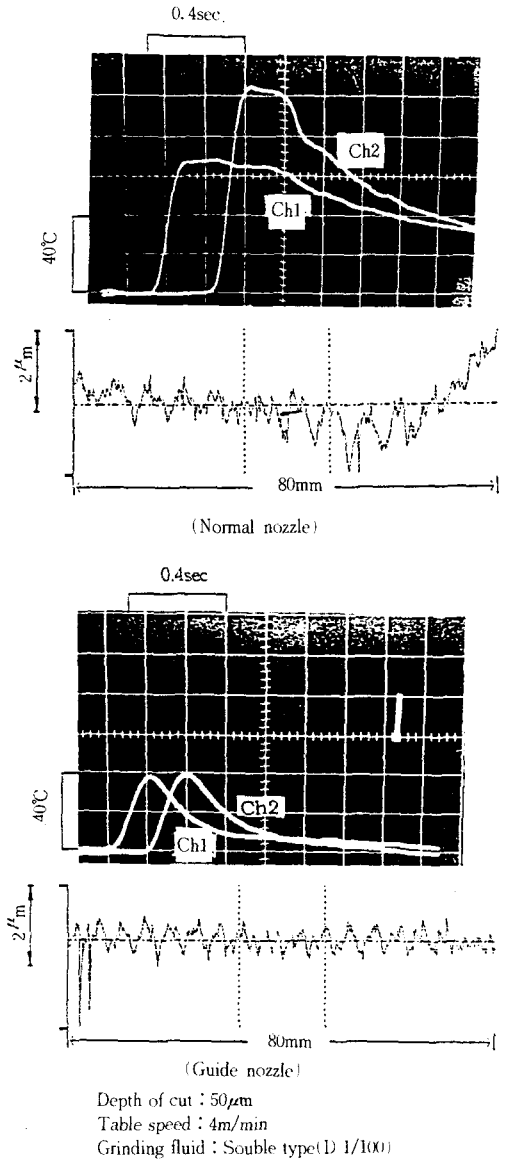


Fig. 11 Workpiece temperature and grinding profile according to two nozzle type

고능률 연삭가공시 알루미늄합금은 로딩(Loading)이 비교적 잘 생기기 때문에 연삭시점에서부터 칩의 두께가 점진적으로 커지고 언제나 새로운 연삭입자에 의해 양호한 가공면을 얻을 수 있는 상향방식이 합리적인 연삭방식이다<sup>13)</sup>.

상향 원통 연삭시 칩 길이의 일반식은 다음과 같

Table 3 X-ray measuring condition of residual stress

Condition	Valve
Target	Cr target
Voltage	25~30Kv
Current	8~9mA
Area	2×4mm <sup>2</sup>
Angle of incidence	0°, 15°, 30°, 45°

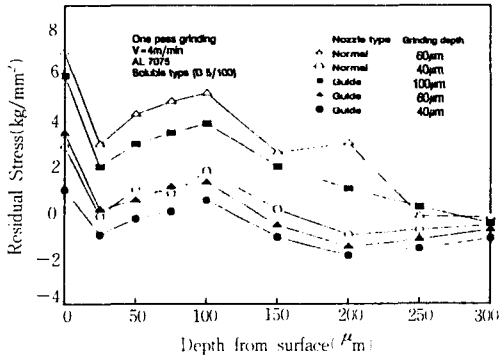


Fig. 12 Variation of grinding residual stress with grinding depth at one pass grinding

이 표시된다.

$$L_c = (1 + V_w/V_s) \sqrt{\Delta / (1/D + 1/d_w)} \dots\dots\dots (2)$$

식(2)에서  $V_w/V_s$ 는 1에 비해 너무 적으므로 무시하고 평면연삭에서는  $d_w = \infty$ 이므로 식(2)은 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$L_c = \sqrt{D\Delta} \dots\dots\dots (3)$$

칩의 두께는 일반적으로

$$g = 2a V_w/V_s \sqrt{\Delta / (1/D \pm 1/d_w)} \dots\dots\dots (4)$$

그리고 식(4)를 평면 연삭에서는  $d_w = \infty$ 로 두면,

$$g = 2a V_w/V_s \sqrt{\Delta / D} \dots\dots\dots (5)$$

와 같이 된다.

식(5)에서 일정한 금속제거율이라고 가정하면 고능률 연삭가공(공작물속도 지속, 고연삭 깊이) 쪽이  $g$ 가 작다. 식(3)과 식(5)에 의해 고능률 연삭가공시 칩의 형태는 긴 접촉후 때문에 상대적으로 가늘고 긴 칩이 생성된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 연삭깊이 50 μm, 공작물속도 4m/min의 조건에서 알루미늄(7075)을 습식으로 연삭할 때 범용노즐과 가이드노즐의 성능에 따른 슛돌 표면 사진이다. 검은 색은 로딩이 되지 않은 부분이고, 흰색은 알루미늄 칩들이 부착되어 로딩현상을 일으킨 모습을 보여주고 있다. 슛돌 표면사진에서 보듯이 가이드 노즐을 사용할 경우가 범용노즐 보

다는 가늘고 긴 칩에 의한 로딩현상이 현저히 감소된다는 것을 잘 보여 주고 있다. 즉 고능률 연삭의 조건에서는 긴 접촉후가 형성되어 유체가 연삭되는 지점에 도달하기 힘들지만, 개발된 노즐을 사용하면 접촉후에 유체공급이 원활해져 로딩현상을 감소시킬 수 있다.

위의 결과들에서 알 수 있듯이 개발된 가이드노즐의 성능을 평가하기 위하여 알루미늄(7075)을 사용하여 잔류응력과 로딩현상을 조사해 본 바에 의하면 범용노즐을 사용할 때 보다는 개발된 가이드노즐을 사용할 때가 잔류응력 및 로딩현상의 감소 부분에서 양호한 결과를 가져왔다.

### 5. 결 론

연삭 가공시 발생하는 연삭열과 열 변형량(형상오차)을 이론과 실험을 통해 규명하고 개발된 가이드 노즐의 성능을 평가하기 위해 표면조도, 형상오차, 잔류응력 및 슛돌표면의 로딩현상을 조사 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고능률 연삭조건에서 연삭열과 열 변형량에 관한 프로그램을 개발하여, 연삭가공시 열변형량을 예측하므로써 자동제어를 통한 정밀연삭가공의 가능성을 제시하였다.
- 2) 해석적으로 예측된 온도분포에 의한 열 변형량과 실험치는 연삭에너지 유속이 낮은 범위에서 거의 일치하고  $3.5 \times 10^4 \text{ J/m}$  이상의 범위에서도 비교적 근접한다.
- 3) 현장에서 사용 가능한 고능률 연삭조건(공작물속도 4m/min)에서 희석도 5/100인 연삭유체가 좋은 가공정밀도를 유지하면서 공작물 온도도 감소시킬 수 있다.
- 4) 범용노즐에 비해 개발된 가이드노즐을 사용하면 표면조도, 형상오차, 잔류 응력 및 슛돌표면의 로딩현상을 현저히 감소시킬 수 있다.

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 연구된 것이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 1) Yoshikuni Nakano, Katsuhiko OTA,



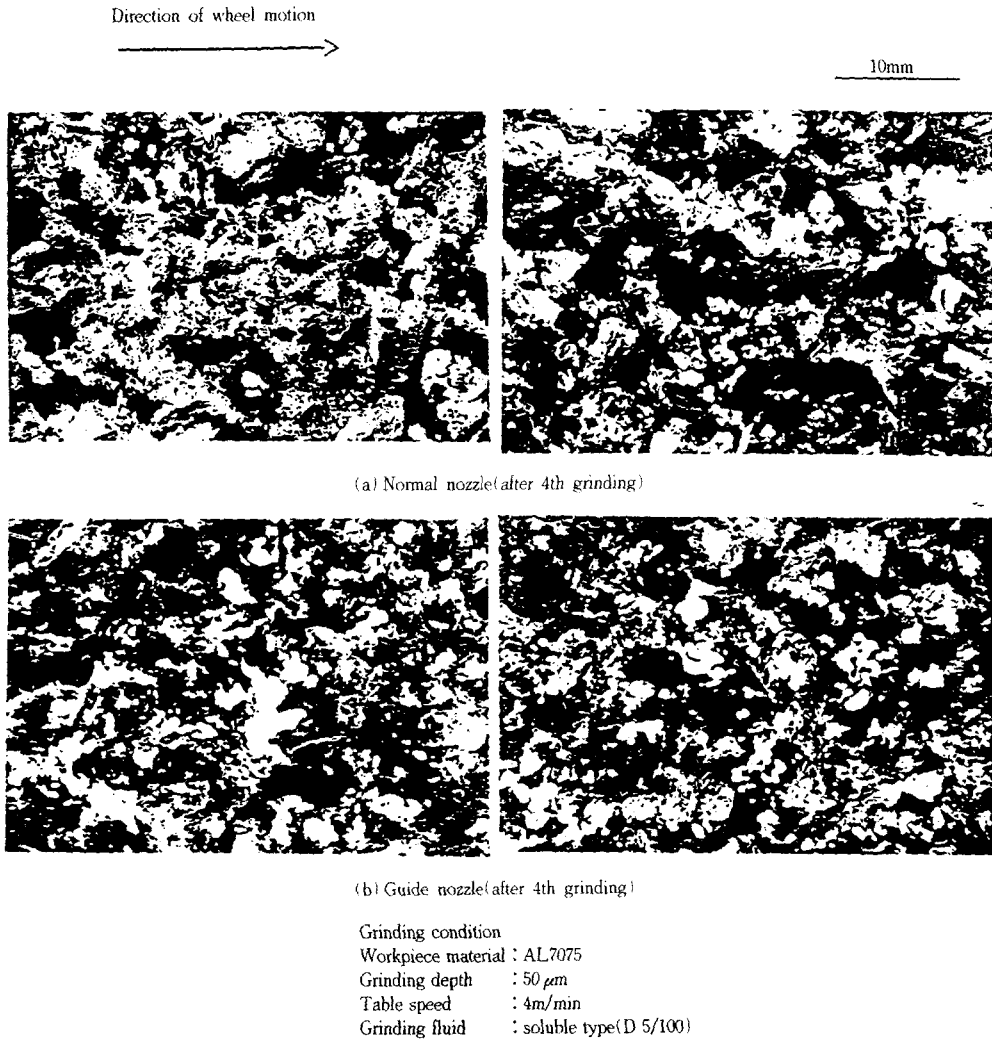


Fig. 13 Loading phenomena of grinding wheel

“Thermal Deformations of Workpieces During Surface Grinding and Profile Errors of Finished Workpieces”, JSPE, 39, 2, pp. 225~229, 1973.

- 2) Yoshikuni Nakano, Katsuhiko OTA, “Analysis of Steady-State Thermal Deformations of Workpieces During Surface Grinding Operations”, JSPE, 41, 4, pp. 364~368, 1975.
- 3) Shigeki Okuyama, Tokuhiko Nishihara and Suehisa Kawamura, “Study on the Flatness

of Work Prouced by Surface Grinding-Etfects of Bending Caused by Grinding Heat”, JSPE, 54, 8, pp. 1497~1501, 1988.

- 4) Masami Masuko, Nobuhiko Nishiwaki et. al, “Efect of Grinding Fluids on Grinding Machanism (1st Report)”, Lubrication 23, 12, pp. 896~903, 1978.
- 5) Nobuhiko Nishiwaki, Yoshio Saito et. al, “Efect of Grinding Fluids on Grinding Mechanism (2nd Report)”, Lubrication 23, 12, pp. 904~911, 1978.

- 6) Takayuki Goto, Junji Shibata, "Processes for Grinding Fluid Leaving the Nozzle to Reach the Wnfact Area", JSPE, 50, 9, p. 1494, 1984.
  - 7) Toshio Akiyama, Junji Shibata and sakae Yometsu, "Study on Efective Delivery Conditions of Grinding Fluid-Evaluation of Fluid Film in the Gap of the Contact Area", JSPE, 51, 7, pp. 1453~1459, 1985.
  - 8) 失川元基, "流れと熱傳導の有限要素法入門", 培風館, pp. 115~131, 1985.
  - 9) 大石進, "クリーブフィールド研削に関する研究", Ph. D. Thesis, 東京道立大學 pp. 65~82, 1984.
  - 10) Y. Yamada, N. Yoshimura and T. Sakurai, "Plastic stress-Strain Matrix and its Applica-  
tion for the Solution of Elastic-Plastic Problems by the Finite Element Method", Int. J. Mech. sci. Pergamon Press, Printed in Great Britain Vol. 10, pp. 343~354, 1968.
  - 11) S. Yonetani, etc, "Residual Stress and Distortion in AC3A Aluminum Castings by Grinding", Light Metals, Vol. 39, No. 1, 1989.
  - 12) Y. Miyoshi, "X-ray Analysis of Residual Stress in Surface Layer", J. Japan Society of Precision Engineering, Vol. 55, No. 8, 1989.
  - 13) 김남경, 송지복, "A Fundamental study on high efficient Grinding with General Grinding Machine", 한국정밀학회지, Vol. 7, No. 4, pp. 65~72, 1990.
-