

### 원통 플런지 연삭에서의 연삭력에 관한 연구

\*박종찬(LG산전)

박철우(연세대학교 기계공학과 대학원)

이상조(연세대학교 기계공학과)

#### Abstract

Cylindrical plunge grinding is widely used for final machining process of precision parts such as automobile, aircraft, measurement units. In order to make parts which have high precision accuracy and high surface integrity, it is necessary to consider grinding characteristics. these grinding characteristics are closely related grinding force. So in this study, to examine closely characteristics of grinding force, effects of dressing condition, depth of cut and speed ratio on grinding force are considered.

As the result, It is shown that grinding forces are affected by dressing condition, depth of cut and speed ratio and that there exist threshold grinding force and it also affected by dressing condition.

#### 1. 서론

최근 자동차나 항공기, 각종 공작기계, 측정 장비등에 사용되는 기계부품은 높은 치수정밀도와 고도의 내마모성을 요구하고 있다. 연삭 가공은 이러한 정밀 부품의 마무리 공정에 사용되는 정밀가공법으로 산업 현장에서 널리 쓰이고 있다. 특히 원통 플런지 연삭은 양산가공품을 대상으로한 실용적인 고능률 정밀가공법으로 많이 이용되고 있다.

연삭가공에서는 스톨의 누적 효과<sup>[1][2]</sup>가 존재하기 때문에 설정 절입깊이와 실제 연삭량이 다르고 드레싱 조건과, 연삭 조건등에 따라서도 달라지게 되므로 실제의 연삭 현상은 이러한 조건들에 따라 매우 복잡하게 된다. 일반적으로 원통 연삭에서는 드레싱 조건, 절입 조건, 속도 비등의 연삭조건에 따라 진원도, 원통도등의 공작물 형상정도가 달라지게 되고, 연삭조건을 잘못 선정하게 되면 과도한 연삭력으로 스톨의 마멸이 급속히 일어나거나 공작물에 연삭 연소(grinding burn), 연삭 균열(grinding crack)등이 생겨 제품의 치수정도와 표면 품질에 악영향을 미치게 된다.<sup>[6]</sup> 연삭력은 이러한 각종 연삭 현상과 밀접한 관계를 갖는 것으로 연삭 현상의 해석과 각종 연삭 파라미터의 선정, 연삭기 설계의 자료로도 많이 이용되고 있다. 따라서 연삭 현상을 설명하는데 가장 유용한 인자중의 하나인 연삭력을 보다 체계적으로 규명할 필요가 있다.

연삭력에 관해서는 최근까지도 많은 연구자들에 의해서 연구되어 왔고 실험데이터로부터 연삭력을 실험적으로 표현한 결과도 많지만 다양성을 충분히 반영할 수 없고 연삭현상의 복잡성 때문에 대부분 가정과 근사치를 기본으로 하고 있어 실험자에 따라 다소 상이한 결과가

얻어지는 것은 불가피하다.

본 논문에서는 연삭조건에 따른 연삭력의 변화와 연삭기와 공작물의 강성에 기인하는 처짐량을 배제한 실연삭량과 연삭력과의 관계를 고찰하여 원통 플런지 연삭에서의 연삭력의 특성을 고찰해보고자 한다.

#### 2. 원통 플런지 연삭 실험

##### 2.1 실험 장치

본 실험에서 연삭력과 연삭량 및 공작물의 처짐량을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig.2.1에 보인다. 갭 센서 1은 연삭력을 측정하고 갭 센서 2는 이 때의 공작물 처짐량을 측정한다. 또한 연삭 스톨대의 이송량은 갭 센서 3으로 측정한다.

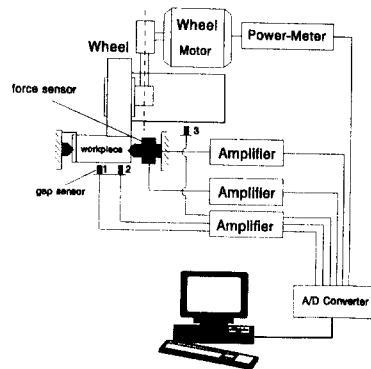


Fig.2.1 Schematic diagram of the experimental setup

연삭력을 인프로세스로 측정하는 방법에는 심압대 센터에 스트레인 게이지를 부착하여 측정하는 방법, 정압 베이링의 압력차를 이용하는 방법, 전력변화와 슷돌 주축의 회전주기의 변화로부터 연삭동력을 구하는 방법등이 있다.<sup>[6]</sup> 그러나, 이러한 방법은 연삭기의 강성에 변화를 주거나, 수돌주축계의 개선을 필요로 하기도 하고 부하가 작게 걸릴때는 측정하지 못한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 연삭력을 용이하게 측정하기 위하여 Ring type의 민감한 piezo sensor를 심압축 센터에 부착하여 연삭력을 측정하였다.

각각의 값들을 임의의 연삭순간에 동시에 받기 위하여 0.01sec의 sampling time으로 데이터를 받았다. 실험에 사용된 실험장치와 측정장치의 사양은 Table.2.1과 같다.

Table.2.1 Experimental apparatus

Apparatus	Maker	Model	Specification
Cylindrical Grinding Machine	KIA machine tool	KGN 32 × 100	CNC Type Motor Power:3.7kW
Gap sensor	Vently Nevada		Maximum range:2mm
Force sensor	Kistler	9167A	Ring type Quartz 3-component
Amplifier	Kistler	5019A	Charge Amplifier
AD/DA CARD	Advantech Co.	PCL-818	Differential 8 Ch.

## 2.2 실험 방법

실험에 사용한 시편은 고탄소 크롬 베이링강(STB2)으로 HRC 55 이상으로 열처리된 시편이다. 센터구멍은 60°의 원추형 센터드릴을 이용하여 가공하였고 센터구멍 연마기를 이용하여 센터구멍을 연마하였다.

연삭기에 사용한 센터는 Mt.4번으로 모두 고정센터이고 실험전에 공작물을 미리 일정량 연삭하여 센터 구멍에 대한 편심량을 보정하였다. 또한 슷돌을 드레싱한 직후에는 공작물을 일정량 연삭하여 초기 슷돌 마모에 의한 영향을 배제하였다.

실험에서의 연삭 사이클은 다음과 같이 구성하였다.

- 1) 공연삭(스틀대 급속 이송): 3 sec
- 2) 플린지 연삭: 30 sec
- 3) 스파크 아웃: 20 sec

실험 변수는 드레싱 깊이, 드레싱 피드, 절입 깊이, 속도비로 정하였고, 실험변수의 수준은 각각 3×3×4×3이다. 배실험마다 3회 이상의 드레싱을 행하였고 실험 조건은 Table.2.2와 같다.

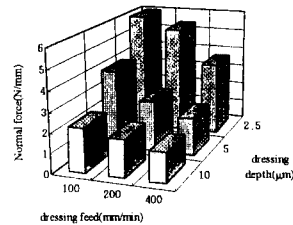
Table.2.2 Experimental condition

Grinding Wheel	WA60KmV, $\phi 405\text{mm} \times 50\text{mm}$
Workpiece	STB2 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$
Wheel speed	33.7 m/min (1590 rpm)
Speed ratio	$K_v = V_w / V_s = 0.00467, 0.00698, 0.0093$ (60 rpm), (90rpm), (120rpm)
Grinding width	20mm
Depth of cut	2 $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 4 $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 6 $\mu\text{m}/\text{rev}$ , 8 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Dressing condition	single diamond dresser dressing depth : 2.5 $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$ dressing feed :100,200,400 m/min
Coolant	No : KSM 2173 Model : flogrind500 Maker : Castrol

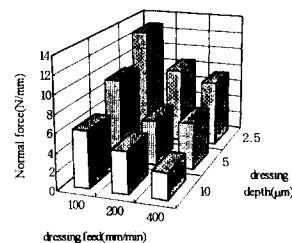
## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 드레싱 조건에 따른 연삭력의 변화

Fig.3.1은 절입 깊이와 속도비를 일정하게 할 경우에 대하여 드레싱 조건이 정상 상태에서의 법선 방향의 연삭력에 미치는 영향을 보인 것으로 드레싱 조건에 따라 연삭력이 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 드레싱 조건에 의해 연삭스틀면의 전삭날 밀도가 달라지기 때문이다. 즉, 드레싱 깊이와 드레싱 피드가 작을 수록 슷돌면의 단위 면적당 슷돌입지수가 더 많아지므로 세밀한 드레싱을 행할수록 연삭력은 증가한다.



(a) depth of cut: 2 $\mu\text{m}$

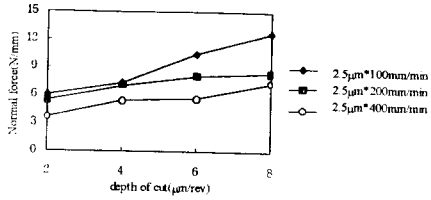


(b) depth of cut: 8 $\mu\text{m}$

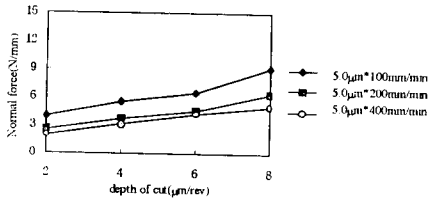
Fig.3.1 Effect of dressing condition on normal grinding force

### 3.2 절입 깊이에 따른 연삭력의 변화

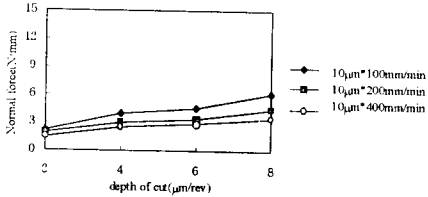
Fig.3.2는 드레싱 조건을 일정하게 하였을 경우 절입 깊이에 따른 연삭력의 변화를 보인 것이다. 그림에서 보는 것처럼 절입 깊이가 증가 할수록 단위시간 단위연삭폭당의 칩생성량이 더 크기 때문에 연삭력이 증가함을 알 수 있다.



(a) dressing depth: 2.5  $\mu\text{m}$



(b) dressing depth: 5  $\mu\text{m}$

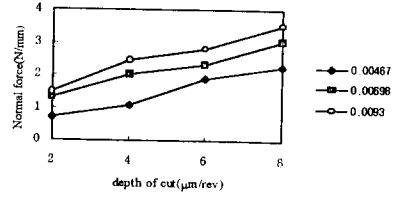


(c) dressing depth: 10  $\mu\text{m}$

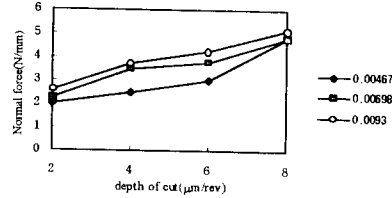
Fig.3.2 Effect of depth of cut on normal grinding force

### 3.3 속도비에 따른 연삭력의 변화

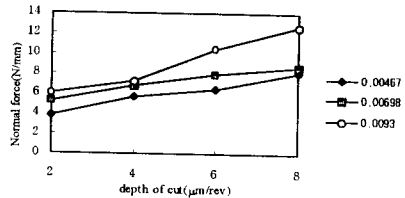
Fig.3.3은 속도비에 따른 연삭력의 변화를 보인 것이다. 일반적으로 연삭가공에서는 스톨의 회전수는 고정되어 있고 공작물의 회전수를 변화하여 가공을 행하는데, 공작물의 회전수는 연삭성능이나 공작물의 표면 품질에도 중요한 영향을 미치게 된다. 그림에서 보는 것처럼 속도비가 클수록 연삭력도 증가함을 알 수 있는데 이는 속도비가 커질수록 단위시간당의 칩생성량이 증가하기 때문이다.



(a) dressing condition: 10  $\mu\text{m} \times 400 \text{ mm/min}$



(b) dressing condition: 5  $\mu\text{m} \times 200 \text{ mm/min}$



(c) dressing condition: 2.5  $\mu\text{m} \times 100 \text{ mm/min}$

Fig.3.3 Effect of speed ratio on normal grinding force

### 3.4 실연삭량과 연삭력과 관계

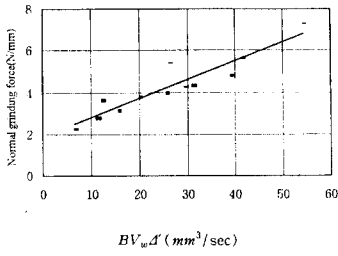
위에서 관찰해본 바와 같이 연삭력은 드레싱 조건과 절입깊이, 속도비 등에 따라 달라지므로 다양한 연삭조건에 대해서 연삭력을 정량적으로 표현하기에는 어려움이 있다. 그러나, 정상 연삭상태에서는 연삭력과 공작물의 반경 감소속도, 탄성 변형량 등이 일정하므로, 이 구간에서의 연삭력은 실연삭량과 밀접한 관련이 있을 것으로 생각되어 식 (1)과 같이 단위시간 단위연삭폭당의 실연삭량과 연삭력은 비례관계가 있다고 가정할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$F = \alpha \times B \times V_w \times \mathcal{A} \quad (1)$$

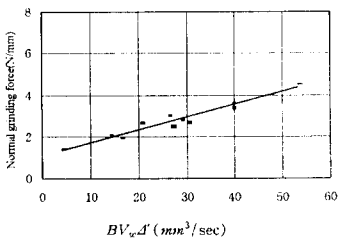
여기서,  $B$ 는 연삭폭이고  $V_w$ 는 공작물의 주속,  $\mathcal{A}$ 는 실연삭량이며  $\alpha$ 는 비례상수를 나타낸다.

Fig.3.4는 식(1)을 바탕으로  $B \times V_w \times \mathcal{A}$ 을 x축으로 하여 드레싱 조건에 따른 실연삭량과 법선 방향의 연삭력을 보인 것이다. 실연삭량이 증가할수록 연삭력도 증가하지만 그 기울기는 드레싱 조건에 따라 달라지게 됨을 알 수 있다. 또한 y축과 만나는 절편은 0으로 되지 않고 양

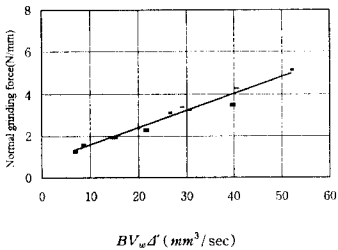
의 값을 갖게 됨을 알 수 있는데 이 값은 질삭이 개시되기 위한 연삭력의 최소값인 threshold grinding force라 생각된다.



(a) dressing condition:  $2.5 \mu\text{m} \times 400 \text{mm/min}$



(b) dressing condition:  $5.0 \mu\text{m} \times 400 \text{mm/min}$



(c) dressing condition:  $10 \mu\text{m} \times 200 \text{mm/min}$

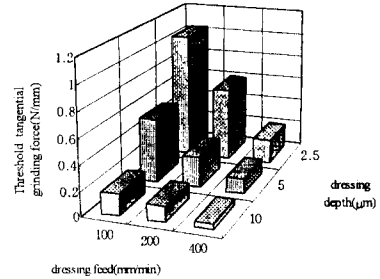
Fig.3.4 Real depth of cut vs. normal grinding force

이로부터 본 실험에서의 절입깊이 범위내에서는 선연삭량과 연삭력은 선형적으로 비례하며 그 기울기와 절입은 드레싱 조건에 따라 다름을 알 수 있다.

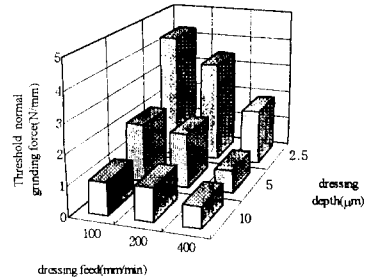
위에서 고찰한 바와 같이 드레싱 조건에 따라 연삭력의 threshold 값은 다르게 된다. 본 실험에서 행한 9가지의 드레싱 조건에 따른 threshold 값을 나타낸 것이 Fig.3.5이다. 그림에서 보는 것처럼 드레싱 조건이 세밀할수록 threshold 값도 커짐을 알 수 있다.

이와 같이 드레싱 피드와 드레싱 깊이를 작게하여 세밀한 드레싱을 행하게 되면 숫돌면의 단위면적당 숫돌입

자의 수가 증가하여 연삭력이 크게 작용하게 된다. 또한 질삭을 개시하기 위한 threshold force 값도 커지게 되므로 초기 과도적 연삭과정이 길어지고 정상 연삭과정에서도 공작물의 치짐량이 크게 되어 치수 정도를 확보하기 위해서는 스파크 아웃 시간을 길게 설정해야 할 것으로 생각된다.



(a) Threshold tangential grinding force



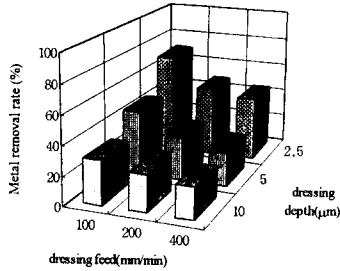
(b) Threshold normal grinding force

Fig.3.5 Effect of dressing condition on threshold grinding force

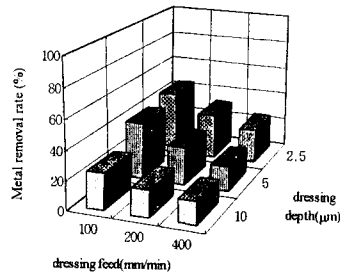
3.5 연삭력과 스파크 아웃 과정에서의 연삭량과의 관계 연삭 과정의 특성상 과도적 연삭 상태가 존재하게 되고 정상 연삭과정까지의 미연삭량은 스파크 아웃 과정에서 대부분 연삭되며, 나머지는 한계 미연삭량으로 된다.

Fig.3.6은 속도비 0.00698(90rpm)로 연삭을 행한 경우, 연삭과정이 끝날때까지의 총연삭량에 대한 스파크 아웃에 의한 연삭량을 percentage로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 드레싱 조건, 절입 깊이 등에 따라 스파크 아웃에 의한 연삭량이 다름을 알 수 있다. 이는 드레싱 조건이 미세할수록 단위 연삭부당의 숫돌 입자의 수가 증가하여 연삭력이 증가하게 되고 따라서 공작물의 치짐량이 크게 되어 정상 연삭상태까지의 총연삭량이 작기 때문이다. 따라서 정상 연삭과정에서 연삭되지 못한 상당 부분의 연삭량이 스파크 아웃과정에서 이루어 지게 된다.

회전당 절입깊이가 작고 드레싱 조건이 세밀할수록 상당부분의 연삭과정이 스파크 아웃에 의하여 이루어짐을 알 수 있고, 스파크 아웃에 의한 연삭량은 드레싱 조건에 따라서도 달라짐을 알 수 있다.



(a) Speed ratio: 0.00698, depth of cut:  $4 \mu m$



(b) Speed ratio: 0.00698, depth of cut:  $8 \mu m$

Fig.3.6 Metal removal rate in spark out state

따라서 정상연삭과정에서 연삭력이 크게 작용하는 경우에는 공작물의 치짐량이 커지기 때문에 스파크 아웃 과정에서 상당 부분이 연삭되므로 스파크 아웃 시간을 선정할 경우에는 드레싱 조건과 절입깊이에 따른 연삭력을 고려하여 충분히 길게 스파크 아웃 과정을 잡아야 할 것이나, 스파크 아웃 시간이 너무 길면 생산비의 증가와 표면에 스크래치가 발생할 우려가 있으므로 최적의 스파크 아웃 시간에 대해서도 고찰할 필요가 있다고 생각된다.

#### 4. 결론

드레싱 조건, 속도비, 절입 깊이등을 변수로 하여 플린지 연삭 과정에서의 연삭력과 연삭량을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연삭력은 드레싱 조건, 절입 깊이, 속도비 등에 따라 영향을 받으며 드레싱 조건이 세밀하고, 절입깊이와 속도비가 클수록 증가한다. 또한, 단위 연삭폭당 작용하는 연삭력을 비교할때 드레싱 조건에 의한 영향이 가장 크다. 이는 드레싱 조건에 의해 슷돌입자의 밀도가 달라지기 때문이며, 드레싱 조건이 세밀할수록 연삭 슷돌면의 단위 면적당 슷돌 입자의 수가 증가하기 때문에 연삭력도 증가한다.

2. 드레싱 조건, 절입 깊이, 속도비등을 고려하여 실연삭량과 연삭력과의 관계를 고찰한 결과 정상 연삭 상태에서는 연삭력과 실연삭량이 일차적인 비례관계에 있음을 알 수 있다. 그러나, 이때의 비례 상수는 드레싱 조건에 따라 달라지고, 연삭이 행해지기 위한 최소의 연삭력인 threshold 값이 존재하며, 이 값도 드레싱 조건에 따라 달라짐을 확인하였다.

3. 연삭력이 크게 작용하는 경우에는 공작물의 치짐량이 커지기 때문에 스파크 아웃 과정에서도 상당 부분의 연삭이 행해진다. 따라서 스파크 아웃 시간을 선정할 경우에는 연삭력을 고려하여 최적의 시간으로 선정할 필요가 있다.

#### 참고 문헌

- [1] 岡村健二郎·中島, "過渡的切期現象の解析を基にした研削理論", 精密機械, 36, 2, pp. 141~146, 1970.
- [2] 岡村健二郎, "研削の過渡特性", 精密機械, 38, 7, pp. 22~27, 1972.
- [3] K.Okamura and T.Nakajima, "Analysis of Transitional Cutting Process", SME Technical Paper, MR 70, 182, 1970.
- [4] 岡村健二郎, "ブランチ研削における切入み過程の研究", 精密機械, 47, 11, pp. 1412~1418, 1981.
- [5] 日本機械工學全集 高能率研削(1), 大河出版刊, pp. 26~32, 1974.
- [6] 小野浩二, 研削仕上, 槇書店 1962.