

# 냉각액 최소화를 통한 환경 친화적 연삭 가공기술 연구

최현중\*, 이석우, 김대중 (한국생산기술연구원), 정해도 (부산대학교)

## A Study on the Environment-Friendly Grinding Technology through Minimizing Coolant

H. Z. Choi, S. W. Lee, D. J. Kim (Korea Institute of Industrial Technology)  
H. D. Jeong (Pusan National Univ.)

### ABSTRACT

The concern of environmental problems by using coolant required the recycling technologies of used coolant and development of environmental-friendly coolant. Some methods have been developing. Those are the dry grinding with compressed cold air and grinding with misted coolant. The former is effective in the cooling effect, but has not the performance of lubrication. Otherwise, the latter can satisfy both of them and also decrease the environmental pollution.

This paper tried to analyze the cooling effect and surface integral of coolant, compressed cold air, mist through measuring the temperature of grind point and grinding force. Especially, the grinding method with misted coolant according to parameters was done. So, the grinding method with misted coolant proved to be effective as one of methods to decrease the environmental pollution.

Key Words : Environmental Problem(환경문제), Dry grinding(건식연삭), Compressed Cold Air(압축냉각공기) Mist(미스트), Cooling Effect(냉각효과), Lubrication(윤활), Grinding Force(연삭력), Coolant(연삭유)

### 1. 서론

연삭 가공에서는 스톨과 공작물 사이의 윤활과 공작물의 냉각 및 칩 배출을 위해 다량의 연삭유를 사용하고 있다. 그러나 최근에 가공 중에 사용하는 연삭유로 인한 환경문제가 대두되면서 생산 현장을 비롯한 여러 곳에서 환경오염을 줄이기 위한 많은 노력과 연구가 진행되고 있다<sup>(1),(2),(6)</sup>.

연삭유는 사용으로 인한 문제점은 연삭유가 가공 시 공중으로 분진화 되어서 작업장의 공기를 심하게 오염시키며 특히, 윤활성능을 향상시키기 위해 넣어주는 염소(Cl), 인(P), 황(S) 등과 같은 극압첨가제는 작업자의 질병을 유발시킨다. 또한 가공 단가에서 연삭유가 차지하는 비용(약 15%)과 폐 연삭유의 처리를 위한 비용이 비싸고 이로 인한 환경오염이 문제가 된다<sup>(1),(2)</sup>.

이러한 문제점들을 해결하기 위해서 연삭 가공 시 연삭유를 사용하지 않거나 극미량만을 사용하는

가공기술, 사용한 연삭유를 재 활용하는 기술 및 환경 친화적인 연삭유의 개발 등과 같은 연구가 진행되고 있다. 특히, 압축냉각공기를 이용한 가공기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있는데 압축냉각공기를 이용하는 건식가공의 경우 공구의 마모가 적어 공구 수명은 길어졌지만 연삭유의 윤활 특성을 살릴 수 없었다<sup>(1),(2)</sup>. 따라서, 산업현장에 공급되는 압축공기와 연삭유 극미량 공급장치(MQL, Minimum Quantity Lubrication)를 이용한 연구와 연삭유를 Mist 화 하여 가공 전에 공급하는 방법 등도 연구되고 있다<sup>(6)</sup>. 이러한 가공기술은 가공물의 표면품질과 가공성능을 향상시킬 뿐만 아니라 연삭유 사용을 최소화함으로써 환경오염을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 연삭시 가공물 표면의 온도 측정, 가공력 측정 등을 통하여 연삭유, Mist 및 압축냉각공기의 냉각 효과 및 가공물의 표면품질에 미치는 영향을 알고자 하였다. 특히, 연삭

유를 Mist 화하여 압축냉각공기와 함께 사용하는 가공방법을 제시하여 연삭 후 가공물의 표면품위를 관찰함으로써 위 방법이 연삭유의 사용을 줄일 수 있는 가공방법 중의 하나로써 효과적임을 보이고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 이론해석

가공중에 발생하는 연삭점에서의 연삭력 실험과 발생온도를 이론적으로 해석하였다.

연삭력은 단위면적의 가공물을 제거하는데 필요한 에너지로 수직방향 분력  $F_N$  과 수평방향 분력  $F_T$  으로 나누어지며,  $F_N$  가  $F_T$  에 3~4 배정도 크다. 일반적으로 연삭력과 연삭량은 선형적인 관계를 이루며 드레싱 조건 및 연삭 조건에 따라 그 비례정도가 결정된다<sup>(5)</sup>. 다음은 수직방향 아래 식은 분력  $F_N$  와 수평방향 분력  $F_T$  의 관계를 나타내는 식이고, 비례상수  $\mu$  값은 비 연삭력과 연삭 가공변수에 따라 달라진다.

$$F_N = \mu \cdot F_T$$

$$F_T = 75 \cdot \text{Power} / V_s$$

$\mu$  : 비례상수(수직분력/수평분력)  
 Power : 연삭에 필요한 동력(HP)  
 $V_s$  : 슷들의 회전속도(m/sec)

가공중에 발생한 연삭력은 열로 전환되어 공작물에 유입되는데 이동 열원 이론을 이용하여 유입된 열량을 계산하는 식은 다음과 같다<sup>(3),(4),(6)</sup>.

$$\theta_{zx} = \frac{2}{\pi} \cdot \varepsilon \cdot q \cdot \frac{\alpha}{k} \cdot \frac{1}{v_w} \int_{x-L}^{x+L} e^{-\mu} \cdot K_0 [\mu^2 + Z^2]^{1/2} du$$

여기에 삼각형 이론모델  $f(x) = (x+L)/l$  을 적용해 깊이(Z)에 따른 온도분포  $\theta_{zx}$  는

$$\theta_{zx} = \frac{\varepsilon q}{\pi k} \int_{-l}^l e^{-\frac{v_w(x-x')}{2\alpha}} \cdot K_0 \left\{ \frac{v_w}{2\alpha} [x-x']^{2/2} \right\} f(x') dx'$$

$k$  : 공작물의 열전도 계수,  $v_w$  : 공작물 속도  
 $\varepsilon$  : 에너지 유입비율,  $K_0$  : Bessel 변수

로 나타낼 수 있으며, 이것을 이용해 총 발생열에 대한 공작물에 유입된 에너지 유입비율<sup>(6)</sup>을 구하면

$R = 1 / (1 + \beta \cdot [\pi \cdot (k \cdot \rho \cdot c)]_s \cdot V / (2(k \cdot \rho \cdot c)_w \cdot v_w)^{1/2} f(Q) A_s G_s)$   
 이 된다.

$\beta$  : 열원강도분포에 좌우되는 파라미터  
 $G_s$  : 단위면적당 활동입자의 수  
 $A_s$  : 슷들입자의 평균 접촉면적  
 $k$  : 열전도율,  $\rho$  : 밀도,  $c$  : 비열

## 2.2 실험장치 및 실험방법

### 2.2.1 Vortex tube

Vortex Tube 는 압축공기의 공급만으로 냉·온 풍 공기를 얻을 수 있는 장치이다. 기본원리는 공급된 압축공기가 와류 형태로 고속회전하면서 이동하기 때문에, 원심력으로 인한 와류 바깥쪽과 중심부에 큰 압력차이가 발생한다. 이로 인해 와류 중심부 공기는 출구쪽으로 이동하면서 바깥쪽으로 열량을 빼앗기므로 저온의 공기를 얻을 수 있게 된다. 또한 설치나 운반이 용이하고 공급된 압축공기가 0.5~0.7MPa(5~7bar)일 때 냉풍은 -40℃까지, 온풍은 190℃까지 얻을 수가 있다.

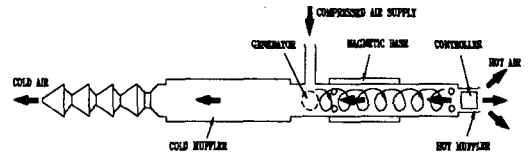


Fig. 1 Vortex tube

### 2.2.2 Mist 분사 노즐

Mist 분사노즐은 압축냉각공기와 연삭유를 Mist 화 해서 가공 점에 공급하여 주는 장치이다. 본 실험에 사용된 노즐은 Fig. 2 와 같이 압력차에 의해 연삭유를 공급해주는 사이폰 방식(Syphon Type)을 사용하고 있다. 압축공기가 노즐 외부의 출구를 통해 노즐 끝 단에서 빠른 속도로 분사되면 압력이 낮아지고, 이때 발생하는 압력 차에 의해서 연삭유 Tank로부터 연삭유가 공급되어 공기와 같이 분사되면서 Mist 화 되는 방법이다. Vortex tube 는 가공점에서의 냉각효과를 위해서 사용했고 압축냉각공기에 의한 연삭유의 응결을 방지하기 위하여 공기와 연삭유가 독립된 Line 을 통하여 공급되는 외부혼합되는 방식을 사용하였다.

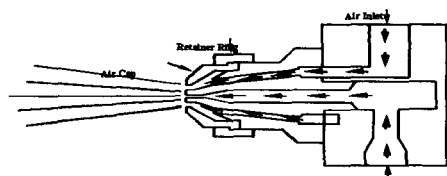


Fig. 2 Mist spray nozzle

### 2.2.3 연삭시편

Fig. 3은 실험에 사용된 SCM21 시편을 나타낸 그림이며 온도측정을 위해 시편에 열전대를 용접한 모습이다.

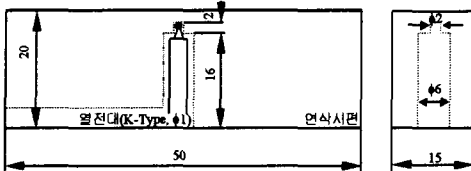


Fig. 3 Grinding specimen

Table 1 Table of experimental condition

Wheel	CBN 170N75EG2-3W, 305 × 15 × 127	
Mist	Temp of Cold air	-15°C
	Spray Capacity	36 l/min(air) 0.6cc/min(coolant)
Compressed Cold Air	Pressure	4 kg/cm <sup>2</sup>
	Temperature	-15 °C
Coolant	수용성 W2 중 3 호(Emulsion4%)	
Dresser	Rotary dresser	
Working Condition	Depth of cut	10, 20, 30 μm
	Wheel Speed	30m/sec
	Table Speed	6mm/sec

### 2.2.4 실험장치

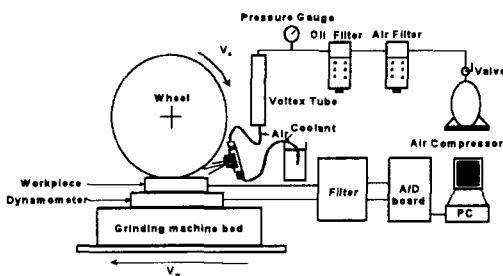


Fig. 4 Schematic diagram of experimental device

Table 1은 연삭 실험조건을 나타낸 것이다. 사용한 숫돌은 Vitrified Bond CBN 숫돌이고 Mist, Compressed cold air 그리고 Coolant에 의한 3가지 냉각방법에 따라 Spindle shaft용 재질인 SCM21 시편을 10, 20, 30 μm의 연삭 깊이로 가공하면서 공작물에 유입되는 에너지를 측정하였다. 공작물에 유입되는 온도의 측정은 온도범위가 -165~1260 °C이고 지름이 1mm인 K type (chromel-alumel)의 열전대

를 사용했으며 시편의 표면에서 2mm 되는 지점에 가공한 구멍에 용접 시켰고, 열전대를 통한 발생한 기전력은 1000 배로 증폭되어 A/D board를 거쳐 PC에 저장된다. 연삭력은 Kistler 9257B 공기동력계를 사용하여 수직과 수평방향의 연삭력을 측정했다. 표면 거칠기는 Rank Taylor Hobson Surtronic 3+를 이용하여 측정하였다. Fig. 4는 실험장치를 나타낸 그림이다

### 2.2.5 실험결과

Fig. 5는 연삭 깊이가 30μm인 경우 냉각 방법에 따라서 가공 중에 공작물에 유입되는 온도 분포를 측정한 것이다. 실험 전 시편의 온도는 24°C였으며 열전대에서 신호가 들어오지 않는, 즉 가공물을 2mm까지 연삭 하였을 때의 온도를 측정한 것이다. 연삭유를 사용한 경우의 최대 온도는 39.2°C이었으며, Mist는 64.6°C 그리고 압축냉각공기는 86.4°C이었다. 그래프를 보면 냉각 방법에 따라 가공물의 온도 차이가 큰 것을 알 수 있다.

냉각 방법으로 압축냉각공기와 Mist를 이용하였을 경우에는 Vortex Tube를 이용하여 노즐 출구에서 -15 °C로 분사되는 압축냉각공기를 사용하였기 때문에 가공 점에서 가공 열을 냉각 시키기에는 풍량 등이 부족하였다. Vortex Tube는 입력 된 공기가 냉풍과 온풍으로 나뉘기 때문에 풍량이 적으며, 또한 노즐 끝 단에의 온도가 -15°C이지만 가공 점은 노즐로부터 약 50mm 떨어져 있기 때문에 가공 점에 공급되는 냉각공기의 온도는 좀 더 높기 때문에 냉각 효과가 떨어지는 것이다. 그러므로 풍량 늘이고 냉각공기의 온도를 더욱 낮게 하면 냉각 효율은 향상되리라 생각된다.

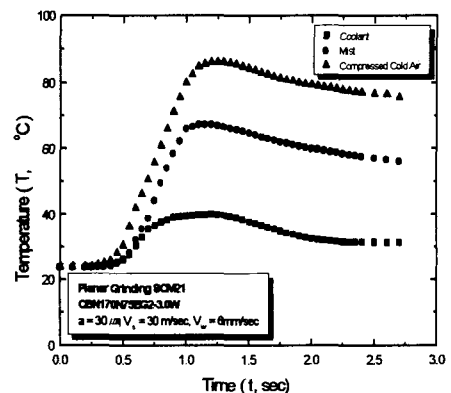


Fig 5 Temperature according to cooling methods

Fig 6 은 연삭 깊이가  $30\mu\text{m}$  인 경우에 냉각방법에 따른 연삭력의 접선 방향의 분력을 측정하는 것이다. 접선방향 분력은 연삭 점에서 발생하는 에너지와 관련이 있을 뿐만 아니라 냉각 방법에 따른 윤활 성능하고도 관계가 있다. 연삭유는 윤활 성능이 좋기 때문에 가공 저항력이 적고 압축냉각공기만을 이용하는 경우는 윤활 역할을 하는 매체가 없기 때문에 가공저항력이 가장 크게 나타난다. 가공점에서의 에너지 유입은 법선력과 관계가 있는데 접선력과 법선력은 비례 관계에 있으므로 접선 분력이 크면 소비 에너지가 증가한다. 그러므로, 접선 분력이 크면 가공 점에서의 에너지 유입도 많아지므로 그림 5 와 같은 온도 분포를 나타내는 것이다.

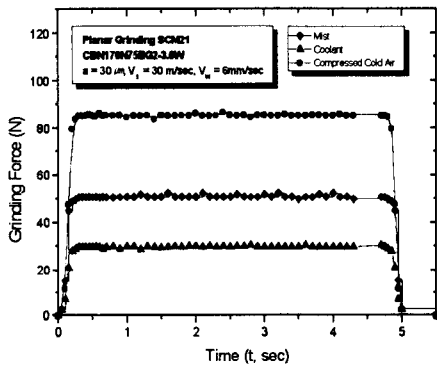


Fig. 6 Grinding force( $F_T$ ) according cooling methods

Fig. 7 은 연삭깊이에 따른 표면거칠기를 측정하는 것이다. 그래프를 보면 연삭유나 Mist 를 이용해 가공한 경우는 Ra 또는 Rz 에서 비슷한 결과를 보이고 있지만 압축냉각공기의 경우는 다소 표면거칠기가 나쁘게 나왔다.

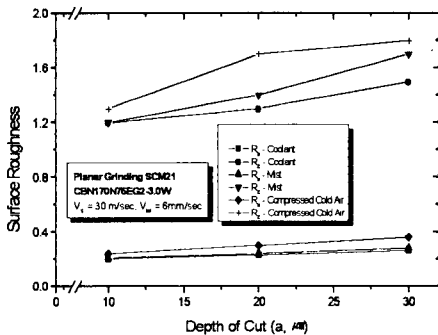


Fig. 7 Surface roughness according to cooling methods

### 3. 결론

본 논문에서는 연삭액 사용을 최소화하는 환경친화적 연삭 가공기술을 개발하는데 목적이 있다. 이를 위해 Mist 를 이용한 연삭 가공실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연삭유를 사용한 경우가 가장 냉각효과가 좋았으며 압축냉각공기의 경우가 가장 공작물의 온도가 높다.
- 2) 가공력의 측정결과도 온도분포 결과와 비슷한 경향을 나타냈는데 이는 이론식에서 설명하였듯이 연삭력이 열발생에 직접적으로 관련이 있기 때문이다.
- 3) 표면거칠기는 연삭유를 이용한 것이 좋게 나왔는데 이는 가공점에서의 윤활효과가 좋기 때문이다.

### 후기

본 연구는 1998 년도 선도기술 개발사업의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사합니다.

### 참고문헌

1. H. Z. Choi, S. W. Lee, H. D. Jeong, "A comparison of the cooling effects of the compressed cold air and coolant for cylindrical grinding", Proceeding of AFDM, pp 319-322, 1999
2. H. Z. Choi, S. W. Lee, J. S. Ahn, "A study on the surface integrity for the cylindrical grinding with the compressed cold air", Abrasive technology, pp. 187-192, 1998.
3. T. Kato, H. Fujii, "Energy Partition in Conventional Surface Grinding", ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, pp. 393-398, 1999.
4. C. Guo, Y. Wu, V. Varghese, S. Malkin "Temperature and Energy Partition for Grinding with Vitrified CBN Wheels", Annals of the CIRP Vol. 48/1, 1999
5. 김성모, 안유민, "원통 외경 연삭 가공의 질삭력 해석에 관한 연구", 춘계정밀공학회는 문집, pp. 87-91, 1995.
6. 김남경, 이동호, 성낙창, 송지복, "냉각 공구 장치에 의한 환경 친화 연삭연구", 한국정밀 공학회지, 제 15 권 제 9 호, pp.145-151, 1998.