

냉각 공기장치에 의한 환경 친화 연삭 연구

김남경*, 이동호**, 성낙창***, 송지복****

A Study on Environment-Friendly Grinding by Using Cold Air

Nam-Kyung Kim*, Dong-Ho Lee**, Nak-Chang Sung***, Ji-Bok Song****

ABSTRACT

In this study, the experimental and analytic investigation with cold air system has been performed for improving the working environment of the conventional grinding fluid. Very simple cold air system was developed which could replace by the conventional grinding fluid system. The identification of heat of grinding zone is very important for precision grinding. The experimental data was analysed to investigate the heat which was transferred to the workpiece. It was found that 45~55% of the total energy for dry grinding, 22~28% for wet grinding, and 32~35% for cold air system are conducted to the workpiece in grinding with cubic boron nitride wheel. Cubic boron nitride wheel could reduce the residual stress and thermal damage comparing with aluminium oxide wheel, because cubic boron nitride wheel has very high extreme thermal conductivity.

Key Words : Cold air system(냉각 공기장치), Grinding zone(연삭영역), Dry grinding(건식연삭), Wet grinding(습식연삭), Thermal damage(열손상), Cubic boron nitride wheel(CBN숫돌), Aluminium oxide wheel (Al_2O_3 숫돌)

1. 서론

연삭가공시 숫돌과 공작물 사이의 접촉영역에서 발생하는 높은온도(1200~1500℃)⁽¹⁾에 의한 열손상을 억제하기 위해 사용되는 연삭유제는 분무상태로 공기중에 분포되기 때문에 작업자의 건강에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라 폐기 유실되어 환경 오염에 주요한 원인이 된다. 때문에 연삭가공의 이상적인 목표는 인체에 무해하고 환경을 오염시키지 않는 연삭유제를 개발하여 추구하는 정밀

도를 얻을 수 있어야 할 것이다.

그러나 아직은 완전히 환경친화적이고 인체에 무해한 유제가 개발되어있지 않으며 다만 환경오염을 최소화하고 가공표면의 거칠기를 개선하기 위한 연삭 가공방법으로 액체질소등이 점차로 가시화되고 있고^(2,3), 열교환기를 이용한 냉풍연삭기술로 환경친화적인 연삭가공도 행해지고 있으나⁽⁴⁾, 실용화를 위해 해결하여야 할 많은 문제점을 지니고 있다.

연삭유제의 성능을 파악하기 위해 접촉호 영역에서 발

* 진주산업대학교 기계설계공학과
 ** 연암공업대학 기계설계학과
 *** 동아대학교 환경공학과
 **** 부산대학교 기계공학부

생하는 연삭열의 거동을 파악하고, 공작물로의 에너지 유입비율을 정확히 규명할 필요가 있다. Al_2O_3 슷들의 경우에는 습식과 건식에 관계없이 에너지 유입비율이 60~75%라는 것을 이론과 실험으로 밝혔다.⁽⁵⁾ 다이아몬드 슷들에 의한 세라믹가공에서는 습식연삭에서는 20%이고 건식에서는 60%였다.⁽⁶⁾ 그리고 현재 거의 실용화 단계에 있는 크립피드 연삭은 5%미만일 것이라고 했으나, 실제 상향연삭에서는 약 4.5%, 하향 연삭에서는 약 3%의 에너지유입비율의 차이를 볼 수 있다.⁽⁷⁾

따라서 본 연구에서는 환경적으로는 무해하고 보관성과 경제성이 우수한 공기를 냉각처리, 연삭지점에 분사할 간단한 냉각공기 분사 연삭가공 장치를 구축하여 그 효과를 에너지 유입비율과 연삭성능을 실험적으로 규명, 환경친화적인 연삭가공의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 연삭가공시 공작물에 유입되는 열량

2.1 발생열원과 공작물의 온도분포

공작물의 온도 유입비율을 밝히기 위해 이동 열원 이론⁽⁸⁾을 이용하여 계산하였다.

$$\theta_x = \frac{2}{\pi} \cdot \varepsilon \cdot q \cdot \frac{\alpha}{k} \cdot \frac{1}{v_w} \int_{x-L}^{x+L} e^{-u} \cdot K_0[u^2 + Z^2]^{1/2} du \quad (1)$$

만약 열원의 강도가 $qf(x')$ 이고, 여기에서 $f(x')$ 은 분포함수(distribution function), 깊이 z 에서 온도 분포를 θ_x (temperature distribution)로 할때 식(1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_x = \frac{\varepsilon q}{\pi k} \int_{-l}^{l} e^{-\frac{v_w(x-x')}{2\alpha}} K_0 \left\{ \frac{v_w}{2\alpha} [(X-X')^2 + Z^2]^{1/2} \right\} f(x') dx' \quad (2)$$

여기에서,

x 는 연삭방향에 따른 열원의 거리, x' 는 열원의 좌표이며, q 는 연삭영역에서 평균열 플럭스로 다음과 같이 표현된다.

$$q = \frac{P}{l \cdot b} \quad (3)$$

비에너지 형식으로 표시할 수도 있다.

$$q = \frac{U v_w a}{l_c} \quad (4)$$

P 는 연삭동력이고, U 는 비에너지, a 는 연삭깊이, ε 는 전체연삭열이 공작물로 들어가는 비(에너지 유입비율), α 는 공작물의 열확산계수이고, k 는 공작물의 열전도계수, v_w 는 공작물 속도, l 은 공작물과 연삭스틀 사이의 접촉길이의 반, K_0 는 Bessel 변수이며, 각각의 변수는 $X = \frac{v_w x}{2\alpha}$, $L = \frac{v_w l}{2\alpha}$, $Z = \frac{v_w z}{2\alpha}$ 그리고 $u = \frac{v_w(x-x')}{2\alpha}$ 로 표현된다.

요구되는 열플럭스 분포에 대한 온도분포는 식(2)에서 적절한 $f(x')$ 항에 대입함으로써 얻어진다. 연삭가공시 접촉호에서 열원분포는 사각형열원(uniform heat source)보다는 삼각형열원(triangular heat source)의 분포가 실제적인 연삭 가공시 발생하는 열원의 모양과 일치하므로^(6,7) 여기에서도 삼각형열원에 대하여 해석하였다. 기하학적인 접촉호 l_c 에 대응한 열원의 길이는 $2l$ 이다. 삼각형열원의 이론적인 온도분포는 $f(x') = (x'+l)/l$ 로 표현할 수 있다. 그리고 상향연삭에서 열원은 연삭 제거량이 최대인 접촉호 끝나는점에서 최대이고 접촉호 시작점에서 최소이다. 이렇게 개발된 프로그램은 쉽게 공작물의 온도 유입비율을 밝히는데 이용할 수 있다.

2.2 공작물에 유입되는 열량

고강도 난삭재의 정밀연삭 가공에 많이 사용될 CBN스틀들은 Al_2O_3 슷들 보다 연삭할 경우 낮은 온도를 나타낸다. 이것은 낮은 비에너지를 가지기 때문이다. 즉 HRC60 정도의 베어링강 연삭시 비에너지는 대략 Al_2O_3 의 $44J/mm^3$ 인데 비해 CBN은 $35J/mm^3$ 이기 때문에 낮은 연삭온도를 가진다. 그러나 실제적으로는 CBN스틀로 연삭할시 공작물에 유입되는 에너지 비율이 낮기 때문이라고 예측된다. 그것은 Al_2O_3 슷들의 열전도율($36Wm^{-1} K^{-1}$)이 CBN스틀($1300 Wm^{-1} K^{-1}$)의 열전도율보다 매우 낮아 상대적으로 공작물과 슷들입자 사이에서 발생하는 다량의 열이 Al_2O_3 슷들보다 CBN스틀로 훨씬 잘 전도되기 때문이다. CBN스틀의 에너지 유입비율을 구하기 위해 슷들 속도 v_s 로 공작물 표면을 따라 모서리를 자른 원추모양으로 CBN스틀입자에 각각 열전도 된다고 가정하여 해석했다. 공작물과 슷들입자에서 최대온도 값을 구하고, 에너지 유입비율 ε 은 다음식과 같이 구해진다.⁽⁹⁾

$$\epsilon = \frac{1}{1 + \beta \left[\frac{\pi(k\rho c)_g v_s}{2(k\rho c)_w v_w} \right]^{1/2} f(\zeta) A_o G_a} \quad (5)$$

여기에서 β 는 열원의 강도 분포에 좌우하는 파라메타이고, $f(\zeta)$ 는 공작물과 스톨입자 사이의 접촉보다 실질적으로 크기 때문에 고려되어지는 함수, G_a 는 단위면적당 활동입자의 수, A_o 스톨입자의 평균 접촉면적, k 는 열전도율, ρ 는 밀도, c 는 비열, 하첨자 g 는 스톨입자, w 는 공작물을 나타낸다. 측정된 ϵ 에 대응하는 A_o 의 값은 대략적으로 식(5)로부터 얻어진다.

$\gamma=1$, $G_o = 4.34 \times 10^6 / m^2$ (150 메쉬, 집중도 100)
 $(k\rho c)_g = 23 \times 10^8 J^2 s^{-1} m^{-4} k^{-2}$, $(k\rho c)_w = 2.1 \times 10^8 J^2 s^{-1} m^{-4} k^{-2}$ 그리고 $\alpha_g = 7.4 \times 10^{-4} m^2 / s$ 유입비율 $\epsilon = 0.2$ 를 대입하면 $A_o = 1.51 \times 10^{-3} mm^2$ 를 얻는다. 연삭입자의 단면적이 $\pi d_k^2 / 4$ 이면 지름은 0.044mm이다. 그러므로 CBN스톨입자의 지름이 Al_2O_3 스톨입자의 지름(입도 #60의 지름: 0.297~0.250mm)보다 훨씬 작고 날카롭기 때문에 연삭영역으로부터 열을 효과적으로 스톨로 방출할 수 있다.

3. 장치의 구성과 성능 분석

3.1 냉각공기 분사 연삭가공 시스템

개발된 냉각 공기 공급장치가 기존 연삭 방법과 비교할 때 어느 정도 연삭열을 감소시키며, 유입 비율을 낮추게 되는가를 살펴보기 위해 Fig.1과 같은 장치를 구축하여 실험을 수행하였다. 건조시스템을 통해 에어컴프레사에서 공급된 압축공기가 필터링되어 보텍스튜브에 공급된다. 공급된 압축공기는 보텍스튜브를 통과하면서 -40℃ 정도로 냉각되고^(10,11) 이 냉각공기가 노즐(8.25mm × 0.40mm)을 통해 연삭지점에 공급되도록 설계되었다.

일반적으로 건식연삭시 발생하는 칩과 스톨입자가 순간적으로 공작물 표면에 머물면서 발생될 수 있는 로우딩현상과 표면 거칠기의 악화를 방지하기 위해 반대측에 설치된 흡입장치를 통해 흡입되도록 하였다. 이러한 장치는 연삭가공시 스톨입자와 칩등의 비산을 방지하여 작업자의 건강에도 좋은 영향을 미칠것이다.

3.2 시스템의 성능분석

Fig.2에서 연삭온도 측정을 위한 열전대는 지름이 1mm인 K type(chromel-alumel)으로 온도측정범위

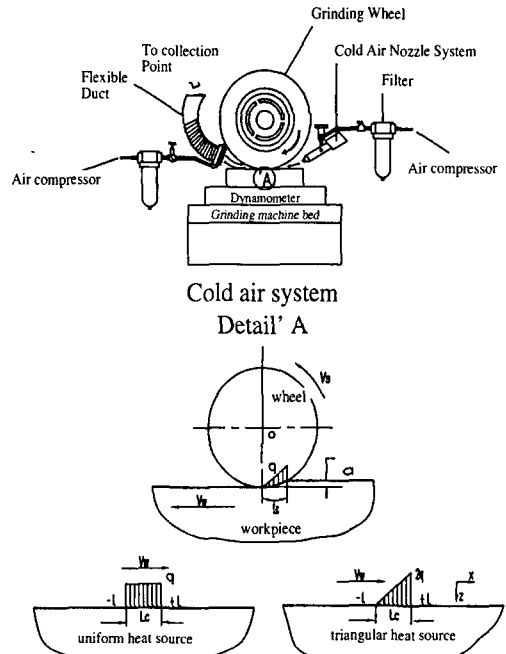
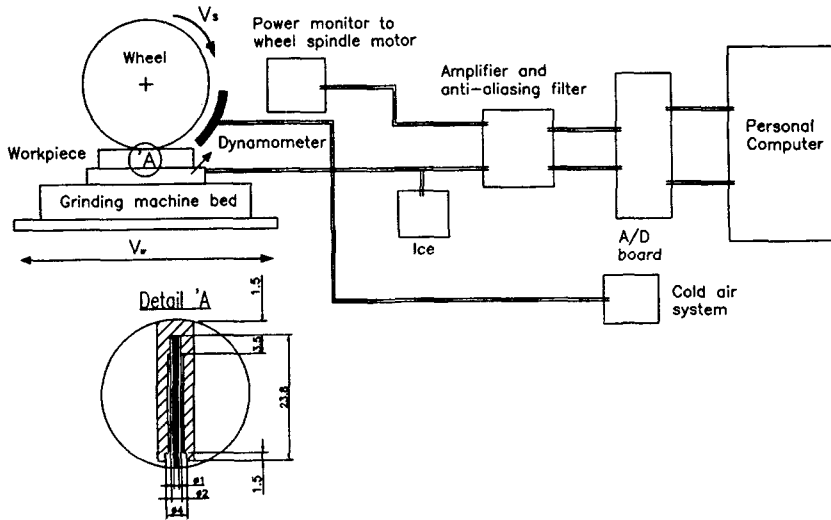


Fig. 1 Cold air system and Distribution of heat source

(-165~1260℃)인 두선이 테프론으로 입혀진 것을 사용하였다. 열전대(hot spot welder)를 표면으로부터 1.5mm 지점에 용접 하고 계속하여 12.5μm씩 연삭하였다. 그때 열전대를 통해 발생하는 기전력을 1000배 증폭하여 P/C에 저장시켜, 이 데이터를 Metlab등의 프로그램을 통해 분석하여, 공작물의 평균온도를 예측하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 정확한 공작물로의 유입비율을 밝히는데 평균온도를 이용하였다. 또한 동력계(Kistler type 9257B)를 통해 구한 연삭력, 표면거칠기 측정장치(Rank Taylor Hobson Surtronic 3+) 및 동력측정기에서 측정된 모터 파워(P)를 식(3)에 대입하여 평균 열플럭스를 계산하고, 냉각공기장치의 성능을 분석하였다. 주축에서의 전체 동력은 홀센서(F. W. Bell-px 2202B)를 사용하여 측정하였고, 순수동력은 비가공시 측정된 주축력(idling power)를 빼 버리면 얻어진다.

연삭기가 정상상태에 도달할 때 까지 약 10~15분 동안 동작시킨 후 비가공시 동력을 측정하고, 모든 가공은 상향연삭으로 행하였다. 그리고 건식연삭가공을 할 때는 3~4분 이상의 시간을 주어 공작물 온도가 주위온도에 도달한 후 재가공을 행하였다. Table 1은 연삭조건과 스톨 및 공작물의 성분을 나타낸다



Workpiece with thermocouple hole

Fig. 2 Schematic arrangement of experimental setup

Table 1 Grinding conditions for temperature measurement

Grinding condition	wheel speed	$V_s=30\text{m/s}$
	workpiece speed	$V_w=130\text{mm/s}$
Dressing condition	wheel diameter	$d_s=250\text{mm}$
	depth of cut	$a=0.0125\text{mm}$
	grinding width	$b=7\text{mm}$
Workpiece material & thermal properties	dressing lead	$S_d=0.14\text{mm}$
	dressing depth	$a_r=0.0125\text{mm}$
Grinding wheel and specifications	$k=60.5\text{ W/mK}$	
	$\rho=7854\text{ kg/m}^3$	
	$c=434\text{ J/kgK}$	
	Harden steel (HRC62)	
	Vitrified CBN B150L100VX	

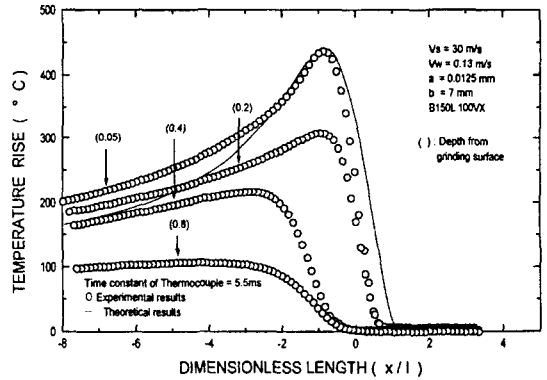


Fig. 3 Experimental and theoretical temperature and energy partition $\epsilon=52\%$ with dry condition at various depth

4. 실험결과 및 고찰

개발된 프로그램은 전체적인 열 플럭스에 기초로 하였고, 공작물의 이론적인 온도분포는 이동열원 이론을 이용하여 계산하였다. 연삭동력은 식(3)을 사용하였는데, 기하학적 접촉길이는 $l_c = \sqrt{d_s a}$ 를 이용하고, b 는 공작물의 폭이다. Fig.3에서 점들로 나타난 것은 열전대가 표면으로부터 심어져 있는 깊이의 연삭이 이루어질 때 측정된 온도들의 실험데이터를 나타낸다. 횡좌표에 나타난 무차원 길이 (x/l)는 열원의 위치에 대한 준정적상태를 나타낸다. 무차원 거리에 해당되는 수평축은 기하학적 현 길이 $l_c = \sqrt{d_s a}$ 로 나타낼 때 $2l$ 길이의 연삭접촉 길이(-1~1)

의 중간점(열원의 중간점 $x/l=0$)에서 측정한다. 실험에 의한 데이터는 시간과 거리의 함수로써 나타내고, 식(6)에 의해 무차원 길이로 나타낸다.

$$\frac{x}{l} = \frac{-v_w t}{l} + \frac{x_0}{l} \quad (6)$$

여기서 t 는 시간, $2l$ 는 접촉길이, x_0 는 연삭 개시점으로부터 열전대까지의 거리 그리고 v_w 는 공작물 속도이다.

그리고 실선은 개발된 프로그램을 이용하여 온도데이터를 해석적으로 예측한 삼각형열원을 이용한 이론적인 결

과이다. 연삭영역의 중간점 위치는 측정된 온도데이터와 해석적 온도데이터가 일치됨을 보여 주고 있으며, 기하학적 접촉길이와 실험적 접촉길이가 비교적 잘 일치한다. 표면 아래 깊이는 각 측정된 온도데이터에 대해 영점을 최종적으로 지나가는 것으로 정하고 최종으로 지나가기 직전까지의 지나간 횟수에 1회 연삭깊이를 곱해줌으로 표면으로부터 연삭지점의 깊이를 얻을 수 있다. Fig.3는 열전대가 끊어지기 직전의 4번째 지점 즉 표면으로부터 0.05mm지점의 온도를 측정하여 해석결과와 비교하였다. 결과에서 보듯이 접촉호의 시작점 부근에서는 온도가 거의 0 즉 열원이 0이다가 급작스럽게 상승된 온도가 접촉호 부근에서 440℃ 정도인 가장 높은 온도를 보여 주고 있다. 접촉호가 끝나는 지점쪽으로 갈수록 냉각이 이루어지면서 서서히 감소되는 모습을 보여주고 있다. 그리고 CBN숫돌의 온도 유입비율은 건식연삭인 경우 약 52%였다. 각 점선의 온도 실험 측정치는 처음은 표면으로부터 0.05mm지점의 온도를 나타내고 그외 각각 0.2, 0.4, 0.8지점의 온도를 나타낸다. 그림과 같이 온도 증가는 단순한 비례 증가가 아니다. 각각의 데이터에서 보듯이 냉각이 되는 지점에서 온도는 약간의 차이를 보여 주고 있다. 이것은 냉각이 건식 연삭인 경우 주위온도에 의해서만 냉각되므로 최대온도의 차이가 있다라도 냉각되는 경향은 비슷하다. Fig.4는 개발된 냉각 공기장치에 의한 온도해석 결과와 이론치를 비교한 결과 온도 유입비율은 약 35%였다. 연삭 표면으로부터 0.075mm지점 즉 열전대가 끊어지기 직전의 6번째의 온도 분포를 나타낸다. 그리고 연삭이 끝나는지점의 냉각되는 형태는 건식연삭 때와 같은 모습이다. 이것은 접촉호 근방에서 냉각공기를 분사하기 때문에 그의 지점은 건식연삭과 같은 모양이 되는것 같지만 냉각공기의 유속과 유량이 많으면 차이를 보일 것이다.

Fig.5는 습식연삭을 행한 이론치와 실험치의 결과이며 온도 유입비율은 25%이다. 이때 연삭표면으로부터 0.0625mm 지점 열전대 끊어지기 직전 5번째의 온도 분포를 나타낸다. 접촉호가 시작되는 지점의 냉각되는 형태는 유체의 접촉호 통과에 의해서 비교적 잘 냉각되고 있으나, 크립피드와 같은 고속 고압에서 유체 사용에 의한 냉각의 형태⁽⁷⁾는 볼 수 없다. 이런 결과에서 보듯이 건식 연삭보다는 개발된 냉각 공기장치에 의한 연삭 성능의 결과가 매우 뛰어나다. 모든 결과에서 보듯이 접촉호가 끝나는 지점에서 이론치와 실험치의 차이가 큰 것은 회전하는 숫돌을 따라 냉각공기나 연삭유체가 접촉호를 원활히

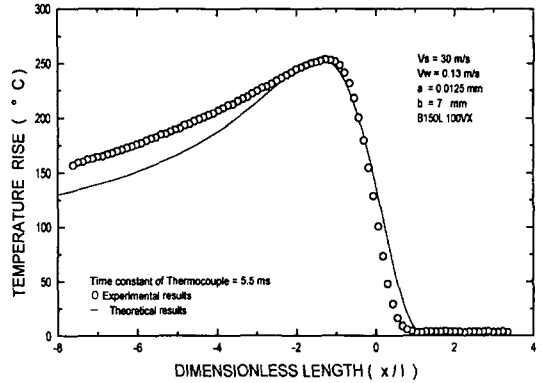


Fig. 4 Experimental and theoretical temperature and energy partion $\epsilon = 35\%$ with air cold system at 0.075 mm depth

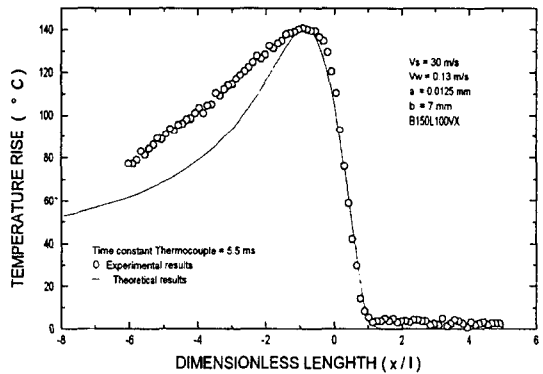


Fig. 5 Experimental and theoretical temperature and energy partion $\epsilon = 25\%$ with wet condition at 0.0625 mm depth

통과하지 못한 결과로 고려된다. 상대적으로 연삭유체의 냉각효과는 연삭 시작점에서 많은 효과를 보여주고 있다. Fig.6은 건식연삭에서 유입비율은 50%로 하여 표면에서 각 깊이에 따른 최대온도를 이론치와 비교한 것이다. 이론치와 비교적 잘 일치하며, 아울러 표면 근방 0.1mm이 내에서는 실험치가 이론치보다 다소 높고 표면에서 먼 곳일수록 약 0.7mm이후에서는 실험치가 비교적 낮은 경향을 보이고 있다. 표면에 가까워 질수록 에너지 비율이 높고, 표면에서 멀어질수록 에너지 유입비율이 낮은 것을 알 수 있다. 그러므로 CBN숫돌의 건식연삭시 유입되는 에너지 유입비율은 45~55%이므로 산화알루미늄계의 유입비율 60~75%보다 현저하게 낮은 것으로 보아 CBN숫돌을 이용하여 연삭 가공을 하면 공작물의 열손상

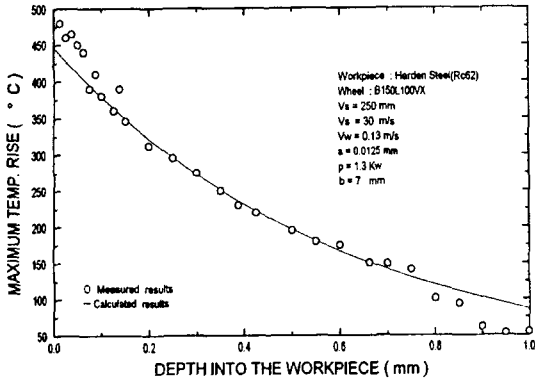


Fig. 6 Experimental and theoretical maximum temperature rise versus depth of energy partition value $\epsilon = 50\%$ with dry condition.

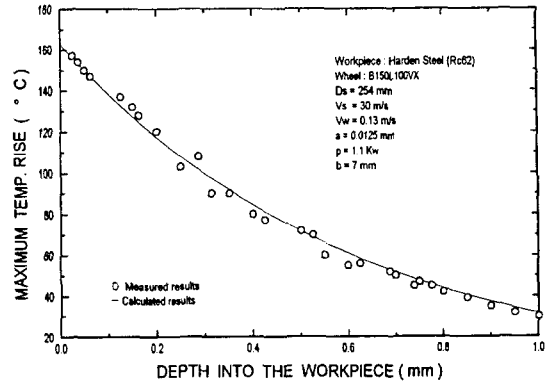


Fig. 8 Experimental and theoretical maximum temperature rise versus depth of energy partition value $\epsilon = 24\%$ with wet condition.

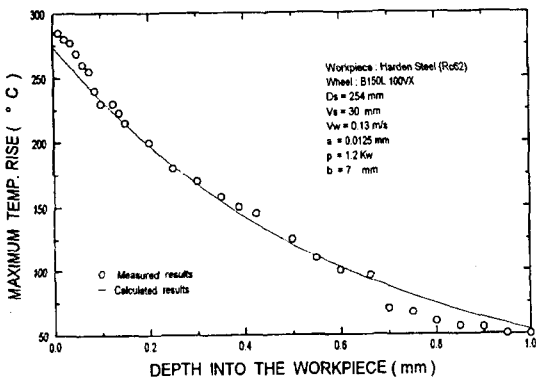


Fig. 7 Experimental and theoretical maximum temperature rise versus depth of energy partition value $\epsilon = 34\%$ with air cold system.

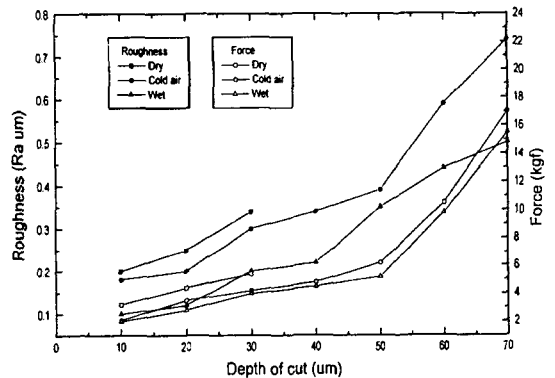


Fig. 9 Relation between roughness, force and depth or cut at variable fluid system.

이나 잔류응력등을 현저하게 감소시킬 수 있을 것이다.

Fig.7은 개발된 냉각 공기장치에 의한 에너지 유입비율을 알아보기 위한 그림이다. 유입비율은 34%로 할 경우 건식연삭과 같이 0.1mm이내의 표면 근방에서는 실험치가 이론치보다 높고, 0.7mm이후 즉, 표면과 멀어 질수록 실험치가 이론치보다 낮은 것으로 보아 냉각공기에 의한 시스템은 건식연삭과 유사한 경향을 보여준다. 냉각 공기장치에 의한 에너지 유입비율이 낮은 것으로 보아 건식연삭때 보다는 좋은 효과를 볼 수 있다. Fig.8은 CBN 슷들로 습식연삭을 행할 시 공작물에 유입되는 에너지 비율을 24%로 하고 표면으로부터 여러가지 깊이에서의 최대온도와의 관계를 나타낸 그림이다. 건식연삭과 달리 에너지 유입비율이 훨씬 낮고, 습식에 의한 냉각 효과가 잘

나타났다.

특히 건식연삭에서 보듯이 표면 근방과 표면으로부터 먼 곳의 에너지 유입비율이 차이를 보이지 않는다. 그것은 연삭유제에 의해 접촉초 부분을 제외하고는 열원이동에 의한 중첩의 효과가 적어 표면이나 표면에서 먼곳이나 전도에 의해 일정한 정도의 열이 전도되어 건식연삭과 같은 현상을 찾아볼 수 없음을 알 수 있다.

Fig.9는 CBN스들의 성능을 분석하기 위해 표면조도와 연삭힘을 측정 한 결과이다. 건식연삭을 할 경우 30 μ m 이내의 가공은 가능하지만 이상의 가공은 버어닝현상등에 의해 가공이 불가능하였다. 그러나 냉각 공기장치에 의한 연삭과 습식연삭은 70 μ m까지 가공이 가능하였으며, 표면조도도 건식에 비해 냉각 공기장치가 우수하였고 가

공 범위도 습식연삭 이상의 효과를 가져와 정밀 가공 현장에 적용하여 습식연삭시 발생하는 환경적인 피해와 유제의 비산등에 의한 작업자의 건강 악화등을 크게 개선시킬 수 있을 것이다. 특히 건식 연삭시 비산될 수 있는 칩이나 슛들의 영향을 Fig.1과 같은 흡입 장치를 부착하여 그 영향을 최소화할 수 있을 것이라 생각한다. 연삭력 부분에서도 습식연삭보다는 떨어지지만 건식연삭에 비해 우수함을 볼 수 있다. 결론적으로 연삭 성능면에서도 비교적 설치가 간단한 냉각 공기장치를 이용하면 정밀가공의 산업현장에 적용할 수 있다.

5. 결 론

연삭 작업시 다량으로 사용되는 유제가 작업자의 건강과 환경오염에 심각한 영향을 미치므로 이를 감소시키기 위해 현장에서 쉽게 구할 수 있는 공기를 이용한 환경친화적이고 인체에 무해한 간단한 냉각 공기장치를 개발하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 이론치와 실험치 온도는 접촉호 근방에서 잘 일치하며, 개발된 프로그램은 공작물의 에너지 유입비율을 예측하기가 용이하다.
- 2) CBN스튬을 사용하여 공작물의 에너지 유입비율은 건식연삭시 45~55%이고 습식연삭에서는 22~28% 그리고 냉각 공기장치에서는 32~35%정도이다.
- 3) 건식연삭과 냉각 공기장치를 이용하여 연삭할 시 연삭 표면에 가까울 수록 유입비율이 높으나 습식연삭시는 그러한 현상을 발견할 수 없었다. 그리고 연삭유제에 의한 냉각효과는 연삭이 시작되는점에서 많은 효과를 나타낸다.
- 4) 공작물의 에너지 유입비율 측면에서도 CBN스튬을 사용할 때 Al_2O_3 슛들에 의한 가공때 보다는 열손상과 잔류응력 등을 현저히 감소시킬 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 지방대 육성과제에 의한 지원금으로 수행된 과제로 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Malkin "Grinding Technology, Theory and Applications of Machining with Abrasives," Ellis Horwood Limited, 1988.
2. S. Malkin, "Review of Materials Processing Literature 1973-75," Grinding Journal of Eng. for Ind. pp. 901-980, 1977.
3. C.Evans, "Cryogenic Diamond Turning of Stainless Steel," Annals of CIRP Vol. 40 pp. 571- 575, 1991.
4. Hiroyuki H.,Kazuhiko Y.and Munehiko H., "Study of Environment Conscious CBN Cooling Air Grinding Technology," Vol. 62, No. 11, 1996.
5. Kohli,S. P, Guo, C. and Malkin, S., "Energy Partition for Grinding with Aluminium Oxide and CBN Abrasive Wheels," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, pp. 160-168, 1995.
6. Zhu, B., Guo C., Sunderland, J. E. and Malkin, S., "Energy Partition the Workpiece for Grinding of Ceramics," Annals of the CIRP, Vol. 44, pp. 269-271, 1995.
7. N. K. Kim, Guo C., S. Malkin, "Heat flux Distribution and Energy Partition in Creep Feed Grinding," Annals of the CIRP Vol. 46, pp. 227-232, 1997.
8. J. C. Jeager, "Moving Source of Heat and Temperature at Sliding Contacts," Proc., Roy., Soc., New South Wales, 76, pp. 203-224, 1942.
9. Lavine, A. S., Malkin, S., and Jen, T., "Thermal Aspects of Grinding with CBN," Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 557-560, 1989.
10. Fulton,C. D., "Ranque's Tube," Refrig. Eng., Vol. 5, pp. 473-479, 1950.
11. 김종화, 유갑중, "에너지 분리 향상을 위한 보텍스 튜브의 최적화에 관한 연구," 경북대학교 기계공학과 석사 논문, 1996.