

실리콘 연삭력에 관한 연구

이충석*, 채승수*, 김종표*, 이종찬#, 최 환**

A Study on the Grinding Force of Silicon

Choong-Seok Lee*, Seung-Su Chae*, Jong-Pyo Kim*, Jong-Chan Lee#, Hwan Choi**

ABSTRACT

Silicon has been widely used in electronic parts as a semiconductor equipment. It, however, requires much effort to grind without microcrack and chipping because of its high hardness and brittleness. So far, many studies for the grinding of engineering ceramics have been done, but not for the grinding of silicon.

In this paper, a theoretical analysis on the grinding forces is introduced. Grinding experiments were performed at various grinding conditions including grinding directions (Up grinding and Down grinding), table speeds and depth of cuts. The grinding forces were measured to compare at various grinding conditions. The experimental values agree well with theoretical ones.

Key Words : Silicon(실리콘), Grinding(연삭), Grinding Force(연삭력), Diamond Wheel(다이아몬드 휠)

1. 서 론

반도체산업은 정보화시대의 핵심산업으로 정보통신산업, 디지털가전산업, 항공우주산업, 자동차산업 등 주요 기반산업의 발전을 뒷받침하고 경쟁력 제고 및 기술향상을 선도하는 기저산업으로서 전후방연관 효과가 매우 큰 지식·자본집약형 첨단산업이다. 실리콘은 도체와 부도체의 중간물질로서 비저항이나 전기적 특성도 도체와는 전혀 다른, 넓은 의미에서의 세라믹스 재료이다. 이 실리콘이 반도체로서 전자부품으로 사용되기까지의 여러 공정 중 꼭 거쳐야 하는 공정이 연삭공정이다. 그렇지만 실리콘은 세라믹스와

마찬가지로 고경도·고취성 재료이기 때문에 연삭가공시 크랙이나 칩핑이 발생하기 쉬우며 생산성도 낮아서 고능률·고정도 가공이 어려워 불량률도 상당히 높은 실정이다. 또한 실리콘의 연삭작업은 고가인 다이아몬드 지석을 이용하는 데 다이아몬드 지석의 절인 마멸이 빨라서 연삭가공 단가가 높다는 문제점을 안고 있다. 경제성과 효율성을 고려한 연삭가공을 위해서는 조건에 따른 실리콘의 연삭특성을 파악하고 각각의 조건에서 최적의 연삭방법을 찾아 데이터베이스화 하는 것이 필요하다^[1].

연삭저항은 재료의 연삭가공특성을 결정짓는 가장 중요한 인자라고 할 수 있다. 즉 일반적인 연삭가공에서는 연삭저항이 작을수록 피삭재의 품위가 좋아짐은 물론이고 공구의 마모도 줄어들 뿐만 아니라 기계효율도 좋아진다. 그러므로 고효율 연삭가공을 위해서는 조건에 따른 연삭저항의 변화를 규명하는 것은 매우 중요하다고 하겠다. 그러나 모든 연삭조건에서 연삭저

* 금오공과대학교 대학원 기계설계공학과

교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : jcleee@kumoh.ac.kr

** 금오공과대학교 기계공학부

항을 측정하여 데이터화 하기는 불가능하다.

본 연구에서는 다이아몬드 지석을 이용한 실리콘의 연삭가공시 연삭조건에 따른 연삭저항을 측정하여 그 변화를 알아보고, 각각의 조건에서 측정된 연삭저항을 토대로 실험적인 공식을 유도하였다. 본 연구를 바탕으로 실리콘의 연삭가공뿐만 아니라, 다른 재료들의 연삭가공이나 절삭가공에 적용할 수 있다는 가능성을 제시하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 평균입자간격

Fig. 1과 같이 휠을 임의의 단위평면으로 절단해 볼 때, 그 평면에서 d_o 의 폭에 존재하는 입자의 개수는 중심이 그 폭에 존재하는 입자의 개수와 일치한다고 생각할 수 있다. 입자 한 개의 체적은 $\pi d_o^3/6$ 이며, 이때의 체적 안에 존재하는 입자가 차지하는 용적률을 V_g , 집중도를 C , 입도를 G 라 하면, $C=400 V_g$ 의 관계가 있고, $d_o=15G^{-1}$ 의 관계로부터 단위체적당 입자 수 N 는 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$N = \frac{6}{\pi d_o^3} V_g = \frac{CG^3}{225000\pi} \quad (1)$$

그리고 휠을 임의의 단위평면 AB로 절단할 때 평면에 의해 분할된 입자수 N_p 는 AB에서 각각 상하로 $d_o/2$ 이내에 중심을 갖는 입자수와 일치하므로

$$N_p = d_o \times N = \frac{6V_g}{\pi d_o^2} = \frac{CG^2}{15000\pi} \quad (2)$$

이 된다.

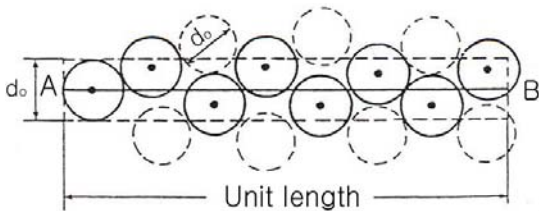


Fig. 1 Distribution of abrasives in the wheel

실제 드레싱 직후에 휠 표면에 분포하는 입자의 수는 결합체의 결합력에 따라 변하게 되므로 여기서 입자의 결합상태를 표시하는 계수 ψ 를 도입하면 단위면적당 입자수 N_p (개/mm²)는

$$N_p = \frac{\psi CG^2}{15000\pi} \quad (3)$$

이 된다. 단위면적에 존재하는 입자 수 N_p 와 평균입자간격 μ 는, $\mu = \sqrt{1/N_p}$ 의 관계가 있으므로 평균입자간격(μ)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다^[2].

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{N_p}} = \frac{217}{\sqrt{\psi CG^2}} \quad (4)$$

2.2 평균 칩단면적

하나의 입자에 작용하는 연삭저항력은 비연삭저항과 입자하나가 제거하는 평균단면적의 곱으로 표시할 수 있다. 먼저 평균 칩 단면적을 구하기 위해서 연삭가공시 t 시간 동안 단위폭당 연삭량 Q 는 공작물의 속도를 V_f , 휠의 설정절입깊이를 a_s 라 하면,

$$Q = V_f \cdot t \cdot a_s \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다.

한편 휠의 원주속도를 V_s , 평균입자간격을 μ 라 할 때, t 시간동안 단위폭당 연삭량 Q 에 관계한 휠 입자의 총 수(n)는 $n = V_s \cdot t / \mu^2$ 이다. 따라서 하나의 입자당 연삭체적 q_m 은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$q_m = \frac{Q}{n} = \mu^2 \cdot \frac{V_f}{V_s} \cdot a_s \quad (6)$$

휠 표면에 연삭입자가 균일하게 배열되어 있다고 가정하면 평균 칩 단면적 a_m (mm²)은

$$a_m = \frac{q_m}{l_c} = \mu^2 \cdot \frac{V_f}{V_s} \cdot \frac{a_s}{l_c} \quad (7)$$

이다.

여기서 연삭휠의 직경을 D 라 하면, $l_c = \sqrt{a_s D}$ 가

되므로 평균 칩단면적은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다^[2,4].

$$a_m = a_s \cdot \mu^2 \cdot \frac{V_f}{V_s} \cdot (a_s D)^{-\frac{1}{2}}$$

$$= (a_s)^{\frac{1}{2}} \cdot \mu^2 \cdot \frac{V_f}{V_s} \cdot (D)^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

2.3 하나의 입자에 작용하는 연삭저항

평면 플런지 연삭시 발생하는 저항은 휠의 접선방향과 법선방향의 성분만 나타난다. 하나의 연삭입자에 작용하는 연삭저항에서 휠의 접선방향 분력을 f_t , 법선방향 분력을 f_n 이라 하면,

$$f_t = k_s \cdot a_m \quad (9)$$

$$f_n = \lambda \cdot f_t = \lambda \cdot k_s \cdot a_m \quad (10)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 λ 는 이분력비 ($\lambda = f_n / f_t$)이며, k_s 는 비연삭저항을 나타낸다.

이 때, 비연삭저항 k_s 과 그 때의 평균 칩 단면적 a_m 은 다음과 같은 관계가 있다.

$$k_s = k_o \cdot a_m^{-\epsilon} \quad (11)$$

여기서 k_o 는 연삭저항 정수이고 ϵ 은 상수로서, 실험에 의해서 구하며 재료의 종류, 열처리, 경도, 휠의 종류 등에 의해 결정되고, 보통 0.25~0.5인 값으로 나타난다. 또한 모두 휠의 회전속도가 빨라질수록 작아지는 경향이 있다.

따라서 하나의 입자에 작용하는 연삭저항의 접선분력 f_t 과 법선분력 f_n 은

$$f_t = k_o \cdot (a_m)^{1-\epsilon} \quad (12)$$

$$f_n = \lambda \cdot k_o \cdot (a_m)^{1-\epsilon} \quad (13)$$

으로 나타낼 수 있다^[2,3].

2.4 연삭저항

연삭작업시 연삭에 관여하는 동시연삭절인수 m 은

휠과 공작물과의 접촉면적중에 존재하는 절인수가 된다. 이 접촉면적은 접촉호의 길이 l_c 와 연삭폭 혹은 공작물 1회전당 이송량 B 와의 곱과 같으므로 동시연삭절인수 m 은,

$$m = \frac{l_c B}{\mu^2} \quad (14)$$

이 된다. 그러므로 연삭을 할 때에 발생하는 저항력의 접선분력(F_t)과 법선분력(F_n)은 각각 식 (15)와 식 (16)으로 표시할 수 있다^[2,3].

$$F_t = m \cdot f_t = \frac{l_c B}{\mu^2} \cdot k_o (a_m)^{1-\epsilon}$$

$$= \frac{l_c B}{\mu^2} \cdot k_o \left((a_s)^{\frac{1}{2}} \cdot \mu^2 \cdot \frac{V_f}{V_s} \cdot (D)^{-\frac{1}{2}} \right)^{1-\epsilon}$$

$$= k_o l_c B (a_s)^{\frac{1-\epsilon}{2}} \mu^{-2\epsilon} \left(\frac{V_f}{V_s} \right)^{1-\epsilon} D^{\frac{\epsilon-1}{2}}$$

$$= k_o B (a_s)^{1-\frac{\epsilon}{2}} \mu^{-2\epsilon} \left(\frac{V_f}{V_s} \right)^{1-\epsilon} D^{\frac{\epsilon}{2}} \quad (15)$$

$$F_n = \lambda \cdot F_t$$

$$= \lambda k_o B (a_s)^{1-\frac{\epsilon}{2}} \mu^{-2\epsilon} \left(\frac{V_f}{V_s} \right)^{1-\epsilon} D^{\frac{\epsilon}{2}} \quad (16)$$

연삭저항은 직접적으로 휠의 입자밀도, 마모면적, 연삭조건 등의 종합적인 결과에 의해서 정해지지만, 휠의 작업면상에서 휠 입자의 거동에 영향을 주는 인자는 매우 복잡하여 정량적으로 보편적인 계산을 하기가 매우 어렵다.

3. 실험장치 및 조건

3.1 장치 구성도

Fig. 2는 연삭력 측정실험 장치의 구성도를 나타낸 것이다.

연삭가공시 휠의 접선방향, 법선방향의 연삭저항을 측정하기 위하여 Fig. 2에서 보는 것처럼 연삭기의 베드위에 Kistler사의 압전형 공구동력계(Kistler, 9257 B)를 설치하고, 그 위에 지그(Jig)를 부착하여 실리콘 시편을 고정하였다. 시편을 연삭하면 연삭저항이 지

그를 통해 공구동력계로 직접 전달되고, 공구동력계에서 이 연삭저항이 아날로그 신호로 발생하게 된다. 그리고 동력계와 연결된 다채널 증폭기(Kistler, 5019B130)에서 증폭시킨 후 아날로그/디지털변환기(National Instrument, PCI6013)를 통해 디지털화되어 개인용 컴퓨터로 전송된다. 이 전송된 디지털신호를 Grinding Software인 Dynaware_K를 이용해 분석하여 연삭저항력을 검출하였다.

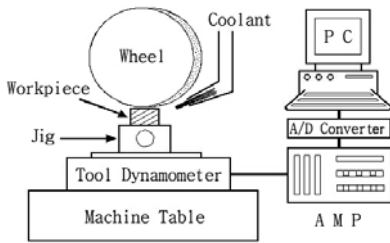


Fig. 2 Experimental set-up for measuring grinding force

3.2 실험조건

Table 1은 실험 조건을 나타낸 것이다. 실험에 사용한 연삭 휠은 다이아몬드계로서 외경이 294mm, 폭이 20mm이며 입도는 #200, 결합도는 N, 집중도는 100, 결합제는 레진본드계이다. 시편은 전자·통신부품으로 널리 사용되는 단결정 실리콘으로 결정방향은 <111>이다.

Table 1 Experimental conditions for grinding

Grinding machine	Horizontal spindle Surface grinding machine	
Workpiece	Silicon	
Wheel	SDC200N100B	
Wheel speed	1700rpm (1570m/min)	
Table speed	1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 32 m/min	
Depth of cut	5, 10, 15, 20, 25, 30 μm	
Grinding type	Plunge & wet & up/down	
Grinding fluid	W-100S (Water soluble type; 40 : 1)	
Dressing condition	Dresser	Copper plate/ Dressing stick(WA 240)
	Grinding type	Plunge & wet
	Wheel speed	1700rpm (1570m/min)
	Table feed	8m/min
	Depth of cut	30 μm
	Cross feed	1mm/pass

4. 실험결과 및 고찰

실리콘의 플런지 연삭가공에서 가공조건의 변화에 따른 연삭저항의 변화를 살펴보기 위하여 일정한 휠 주속도에서 휠의 절입깊이(a_s)와 테이블 이송속도(V_s), 그리고 연삭방식(up, down)의 변화에 따른 연삭저항의 변화를 알아보았다. Fig. 3 ~ Fig. 6은 이송속도와 절입깊이, 연삭조건(상향연삭/하향연삭)에 따른 저항값의 변화를 나타낸다. 그림으로부터 동일한 테이블 이송속도에서 휠의 절입깊이가 증가함에 따라 연삭저항이 점차적으로 증가하고 동일한 절입깊이에서 공작물의 이송속도가 증가할수록 연삭저항이 증가함을 알 수 있다. 또한 법선저항이 접선저항에 비해서 5배 이상 현저히 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 테이블 이송속도와 절입깊이가 증가하게 되면 다이아몬드 휠 면의 입자와 실리콘 사이에 접촉호의 길이 및 최대 절입깊이가 증가하여 접촉면적이 증가하게 되므로 연삭력이 증가한다는 이론 해석과 상응하는 예로 볼 수 있다.

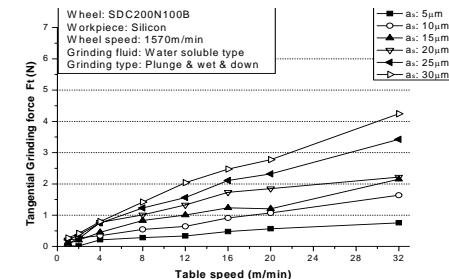


Fig. 3 Tangential grinding force versus feed & depth of cut(Down grinding)

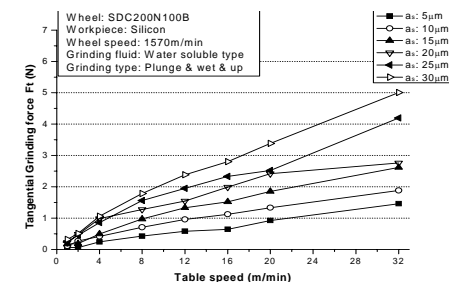


Fig. 4 Tangential grinding force versus feed & depth of cut(Up grinding)

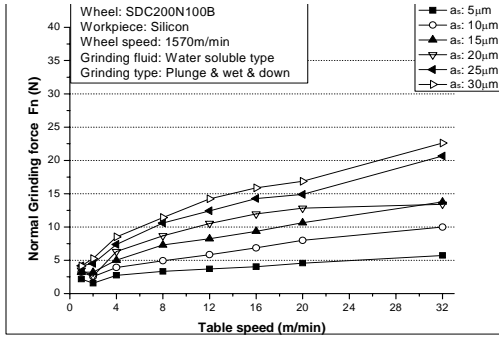


Fig. 5 Normal grinding force versus feed & depth of cut(Down grinding)

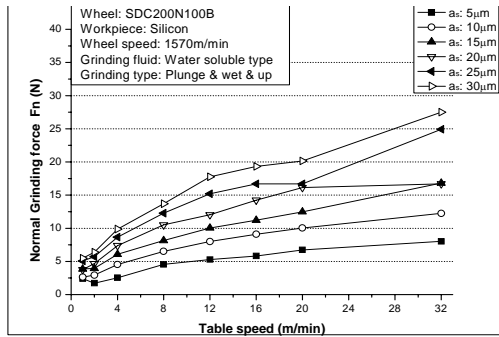


Fig. 6 Normal grinding force versus feed & depth of cut(Up grinding)

또한 실리콘 연삭에 있어서의 연삭저항 경향도 금속 연삭에 대하여 이론적으로 정립한 식 (15)와 식 (16)과도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3~ Fig. 6을 통해 살펴보면, 동일조건하에서의 모든 경우에 상향연삭 저항력의 크기가 하향연삭 저항력의 크기에 비해 높게 나타남을 알 수 있다. 이를 밀링작업의 메커니즘과 연계해서 생각해 보았는데, 휠의 회전방향과 공작물의 이송방향이 반대인 상향절삭에서는 커터가 공작물에 접촉하기 시작할 때 칩이 얇으며 커터 날이 공작물에서 떨어질 때 가장 두껍다. 이 경우에는 법선저항과 같은 방향인 공작물을 테이블에서 들어 올리는 힘이 작용한다. 또한 수평면에서는 커터가 공작물로 끌려 들어가는 경향을 갖는다. 결과적으로 커터의 이송방향과 절삭저항력의 방향이 동일하므로 서로 합산되어 더 크게 나온다고

여겨진다.

마찬가지로 휠의 회전방향과 공작물의 이송방향이 동일한 하향절삭에서는 상향절삭과는 반대로 커터가 공작물을 접촉하기 시작하는 지점에서의 칩 두께가 가장 두꺼우며, 공작물에서 떨어질 때 최소의 두께를 갖는다. 이 때 공구는 공작물을 지지면으로 내려 누르는 경향을 가지며, 공작물은 공구에 의해 뒤로 밀리는 힘을 받게 된다. 이 두 가지 힘은 절삭저항력의 방향과 반대되므로 서로 감산되어 상향절삭저항력에 비해 상대적으로 작게 나오는 것이라 생각된다.

실험에 의해 출력된 접선연삭저항력을 바탕으로 식 (16)을 이용하여 실리콘의 연삭저항정수(k_0) 접

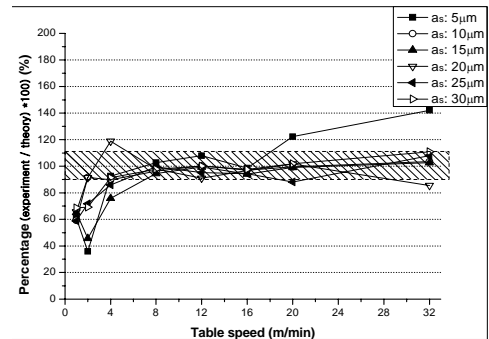


Fig. 7 Percentage of experiment value and theory value

선연삭저항의 지수(ϵ)와 다이아몬드 휠의 평균입자 간격(μ)을 각각 구해본 결과 각각의 값은 $\epsilon = 0.346$, $k_0 = 7.26 N \cdot mm$, $\mu = 0.109 mm$ 이었다. 이로부터 본 연구에서 다이아몬드 휠을 사용한 실리콘소재의 연삭가공시 가공조건에 따른 접선저항력의 크기는 식 (17)과 같다.

$$F_t = 7.26 B(a_s)^{0.827} \mu^{-0.692} \left(\frac{V_f}{V_s}\right)^{0.654} D^{0.173} \quad (17)$$

Fig. 7은 이송속도와 절입깊이를 각각 변화시켰을 때, 실험을 통해 공구동력계로 측정된 접선연삭저항과 식 (17)에 의해 이론적으로 계산한 접선연삭저항 값의 백분율{(실험값/이론값) \times 100%}을 나타낸 것이다. 연삭가공의 결과치는 표준편차가 크고 재현성이

떨어지지만, 이송속도가 매우 느리거나($V_f = 2m/min$ 이하) 절입깊이가 작은 경우($a_s = 5\mu m$)를 제외하고는 거의 대부분이 90%~110%의 정확도를 나타내는 것으로 보아 실리콘 소재의 연삭가공에 대한 충분한 예측모델이 될 수 있다고 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 다이아몬드 휠을 이용한 실리콘의 연삭가공에서 실험조건에 따른 연삭저항력을 측정하여 그 변화를 알아보고, 이를 토대로 실험적인 공식을 유도함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실리콘 연삭저항력은 상향연삭이 하향연삭보다, 법선저항력(F_n)이 접선저항력(F_t)보다 더 큼을 알 수 있었다.
2. 본 연구에서 다이아몬드 휠을 사용한 실리콘소재의 연삭가공시 가공조건에 따른 접선저항력의 크기는 대체적으로 아래의 식을 따른다고 할 수 있다.

$$F_t = 7.26 B(a_s)^{0.827} \mu^{-0.692} \left(\frac{V_f}{V_s}\right)^{0.654} D^{0.173}$$

3. 실험을 바탕으로 이론공식을 유도하고 그 정확도를 알아본 결과 연삭저항의 공식화에 대한 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비를 지원받아 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김종성, “실리콘 공정기술 입문,” 동영출판사, pp. 31-42, 1999.
2. 河村末久研, “研削加工と砥粒加工,” 共立出版 株式會社, pp. 22-46, 1984.
3. 박철우, “연삭가공학 이론과 그 응용,” 과학기술, pp. 11-47, 2002.

4. Malkin,S., “Grinding Technology,” Ellis Horwood, 1989.
5. 康宰勳, “엔지니어링 세라믹스의 研削能率向上 및 鏡面生成에 관한 研究,” 慶南大學校, pp. 89-96, 1994.
6. 海野邦昭, “ファインセラミックスの高効率機械加工,” 日刊工業新聞社, 1986.
7. 조성래 외, “세라믹 재료의 연삭,” 요업기술, Vol. 11, No. 2, pp. 63-71, 1996.
8. 이충석, “Si 연삭가공 특성에 관한 연구,” 금오공과대학교, 2005.