

태양전지용 실리콘 웨이퍼의 멀티 와이어 쏘잉 시 절삭저항력에 관한 연구

황인환*, 박상현*, 안국진**, 권대근**, 이종찬*^{#,}

*금오공과대학교 기계설계공학과, ** (주)새한나노텍

A Study on Cutting Force during Multi Wire Sawing of Silicon Wafers for Solar Cells

In-Hwan Hwang*, Sang-Hyun Park*, Kuk-Jin An**, Geon-Dae Kwun**, Chan-Jong Lee*^{#,}

*Department of Engineering Science & Mechanics, Kumoh National Institute of Technology,

** SAEHAN NANOTECH LTD.

(Received 21 December 2015; received in revised form 31 March 2016; accepted 4 April 2016)

ABSTRACT

Reducing the wafer breakage rate and sawing thinner wafers will decrease the cost of solar cells. This study was carried out in order to identify ways to achieve this goal. In this study, the cutting force characteristics using an ingot tilting-type diamond multi wire-sawing machine were analyzed. The cutting force was analyzed while varying the tilting angles and wire speed. The obtained data were analyzed by classifying the tangential cutting force and the normal cutting force. In this cutting force experiment, the difference between the forces was confirmed; it was found that it rises with increasing the tilting angles and decreases when the wire speed elevates. The resulting value can be utilized as basic data for the determination of an ideal cutting recipe.

Key Words : Multi Wire Sawing Machine(멀티 와이어 쏘잉 장비), Diamond Wire Saw(다이아몬드 와이어 쏘), Cutting Force(절삭력), Silicon Ingot(실리콘 잉곳)

1. 서 론

결정질 태양전지 웨이퍼 제조공정에 있어서 종래에 단결정 실리콘 잉곳의 쏘잉 공정에 대한 연구는 슬러리를 사용한 와이어 쏘잉에 대한 연구가 주를

이루었으며, 그 분야는 절삭공정 뿐만 아니라 와이어 보우를 고려하여 와이어 절삭과정에서의 진동의 영향을 연구하였다^[1~4]. 하지만 기술의 발달로 다이아몬드가 전착된 와이어가 개발되면서 절삭 공정의 다양한 측면을 고려한 실험이 이루어지고 있다^[5~7].

본 연구에서는 절단 웨이퍼와 Kerf-loss가 120 μ m를 구현할 수 있도록 개발된 잉곳 중심의 틸팅형 멀티 와이어 쏘잉 머신을 이용해 태양전지용 실리콘 잉곳의 고속절삭 시 발생하는 절삭력을 가공조건에 따라 비교·분석 하였다.

Corresponding Author: jclee@kumoh.ac.kr
Tel: +82-54-478-7376, Fax: +82-54-478-7382

2. 실험장치 및 방법

2.1 잉곳중심 틸팅 방식의 쏘잉 머신

본 연구에 사용된 멀티 와이어 쏘잉 머신은 잉곳 중심에서 틸팅이 이루어지는 쏘잉 머신으로써 이송계 동기화시스템과 관성저감 기술을 적용하여 절삭 중에 발생하는 진동을 최소화시켜 와이어 선속도 900m/min, Solar wafer 두께 120 μ m을 구현할 수 있는 초정밀·고속 쏘잉 머신이다.

아래 Fig.1에는 본 실험에 사용된 멀티 와이어 쏘잉 머신 형상을 나타내었다. Fig.1에서 (a)는 쏘잉 머신의 형상을 나타내고 있고, (b)는 틸팅 unit, (c)는 Spindle을 나타내고 있다.

2.2 절삭력 측정 시스템

실리콘의 절삭 가공 시 발생하는 절삭저항력을 측정하기 위해서 압전형 공구동력계(Piezo-electric type tool dynamometer, Kistler 9254)를 Oscillating 지그에 설치하고 그 위에 별도로 제작한 지그를 설치한 후 공작물을 고정하였다.

절삭실험 시 Wire와 공작물의 상대운동에 의해 발생되어지는 힘은 공구동력계에서 발생하는 아날로그 신호로 변환이 되며 다채널 증폭기(Multichannel charge amplifier: Kistler 5019A)에서 신호가 증폭된 후 아날로그-디지털 변환기(A/D Converter)를 거쳐 디지털 신호로 변환이 되어 PC



Fig. 1 Multi wire sawing M/C of tilting type

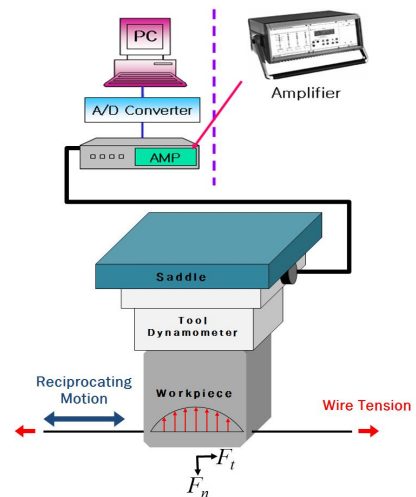


Fig. 2 Experimental set-up

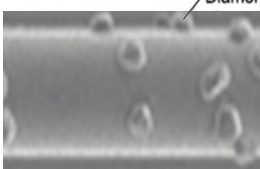
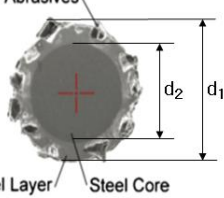
로 전송된다. 이렇게 전송된 Data는 연삭저항력 측정 Software를 통해 검출되며, 검출된 연삭 저항력 Data는 주분력 F_t 와 배분력 F_n 으로 나누어 수치화 및 도시화된다.

위 Fig. 2에는 절삭력 측정시스템의 간략한 개략도와 쏘잉 머신에 장착된 측정시스템을 나타내고 있다.

2.3 다이아몬드 와이어

실리콘 잉곳의 절삭 가공에 사용된 와이어는 박형 웨이퍼 제작에 최적화된 다이아몬드 와이어를 사용하였다. Table 1에는 본 실험에 사용된 다이아몬드 와이어의 제원을 나타내었다.

Table 1 Shape of Diamond electro-deposited wire saw(unit: μ m)

Shape of Diamond electro-deposited wire saw(unit: μ m)	
	
d_1	d_2
120	100

2.4 태양전지용 실리콘

쏘잉 절삭실험에 사용된 피삭재는 결정질 태양전지 제조에 사용되는 소재인 단결정 실리콘(Si)을 사용하였다. 아래 Table 2에는 단결정 실리콘의 물성을 나열하였다.

Table 2 Physical properties of workpiece

Silicon(Si) 100%	
Density (g/cc)	2.3
Knoop microhardness	11270
Hardness, Mohs	7.0
Modulus of elasticity (GPa)	112.4
Compressive strength (MPa)	120
Bulk modulus (GPa)	98.74
Poissons ratio	0.28
Shear modulus (GPa)	43.9

2.5 실험조건

쏘잉 방법은 실리콘 잉곳이 배분력 방향인 Z축으로 하향 절입하고, 잉곳 중심에서 틸팅하는 상태에서 와이어가 주분력 방향으로 정·역방향 이송하면서 발생하는 절삭력을 분석하였다.

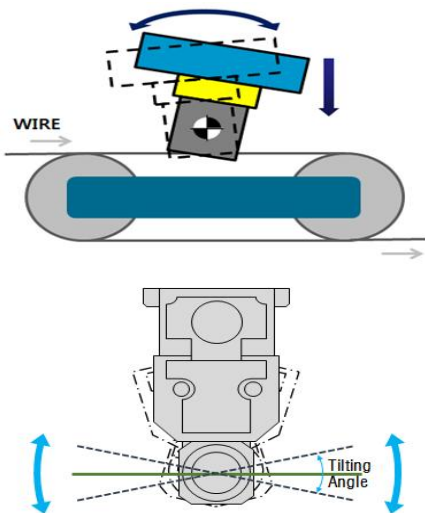


Fig. 3 Tilting motion of sawing machine

Fig. 3은 쏘잉 머신이 잉곳중심에서 틸팅하는 상태를 도식화하여 나타낸 것이다. 틸팅 회전수는 설정된 각도만큼 분당 왕복하는 횟수를 나타낸다.

절삭실험 조건은 절입속도(Depth speed) 1.0mm/min, 틸팅 각도(Tilting Angle) 5°, 와이어 선속도(Wire speed) 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16m/s에서 틸팅 회전수(Number of Tilting) 20, 40, 60 cycle/min을 적용하여 실험을 수행하였다. 절삭실험 수행에 앞서 동일한 재료제거율의 구현을 위해 단결정 실리콘 잉곳의 모서리 부분에 라운드가 진 부분을 절삭 후 동일 접촉면이 되는 부분부터 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주분력 F_t 비교

Fig. 4 ~ 5는 120 μ m 다이아몬드 와이어로 동일 절입 속도와 틸팅 각도에서 와이어 선속도와 틸팅 각도를 변화시켜가면서 절삭공정에서 얻어진 접선 분력(F_t)을 나타낸 그래프이다. 와이어 선속도에 따른 각각 다른 틸팅 회전수의 실리콘 잉곳의 절삭저항력은 미미하게 증가하는 경향을 보인다. 또한 틸팅 회전수에 따른 각 와이어 선속도의 실리콘 잉곳

Table 3 Experimental conditions

Sawing Machine	Multi Wire Saw Machine (EWS300)
Sawing Tool	Diamond Wire Saw(120 μ m)
Sawing condition	Depth speed: 1.0mm/min
	Tilting angle: 5°
	Wire speed: 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 m/s
	Number of Oscillating: 20, 40, 60 cycle/min
Workpiece	Silicon Ingot
Tool dynamometer	Kistler, 9254
Amplifier	Multichannel charge amplifier (Kistler 5019A)

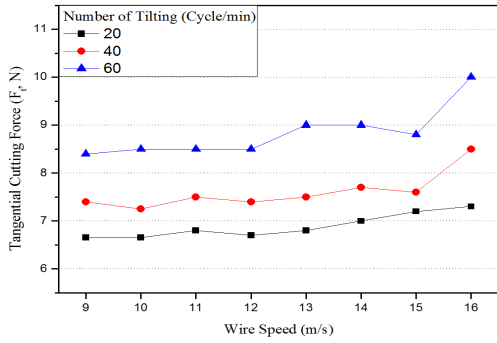


Fig. 4 Tangential cutting force versus wire speed

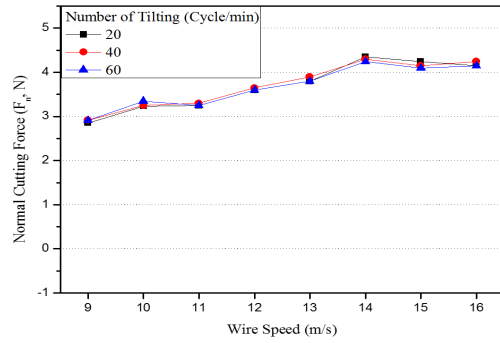


Fig. 7 Normal cutting force versus wire speed (Forward direction of wire motion, Forward direction of Tilting)

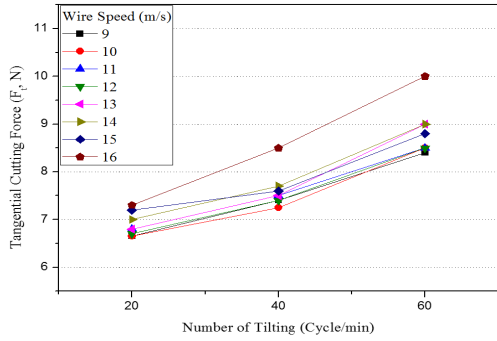


Fig. 5 Tangential cutting force versus number of tilting

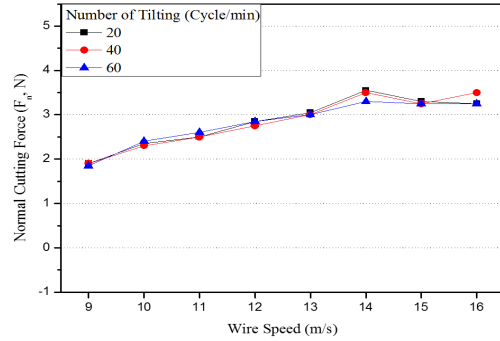


Fig. 8 Normal cutting force versus wire speed (Forward direction of wire motion, Reverse direction of tilting)

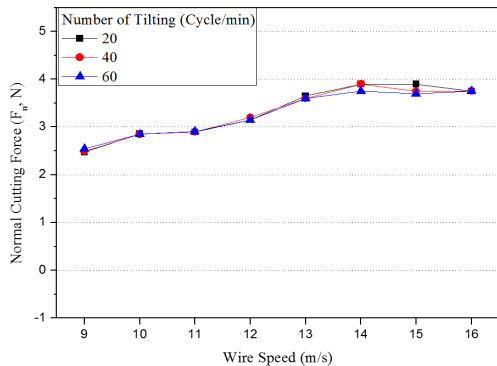


Fig. 6 Normal cutting force versus wire speed (Reverse direction of wire motion)

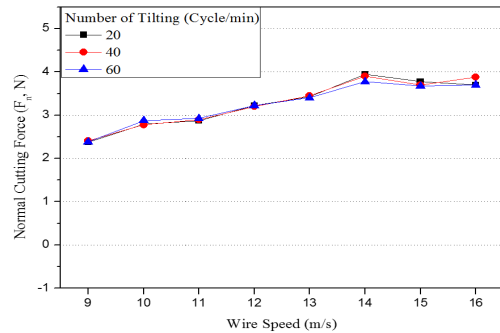


Fig. 9 Normal cutting force versus wire speed (Forward direction of wire motion, Averages of Forward and Reverse in tilting)

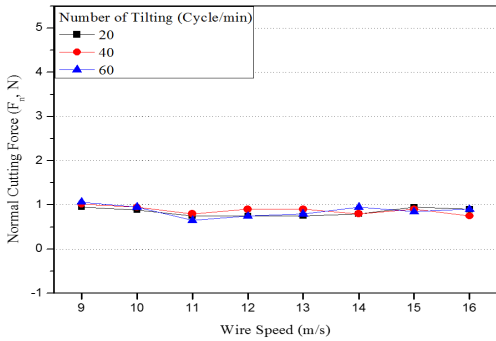


Fig. 10 Normal cutting force versus wire speed(Forward direction of wire motion, Difference of forward and reverse in tilting)

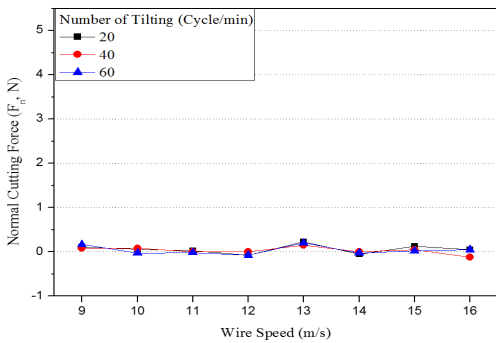


Fig. 11 Normal cutting force versus wire speed(Difference of forward direction and reverse direction in wire motion)

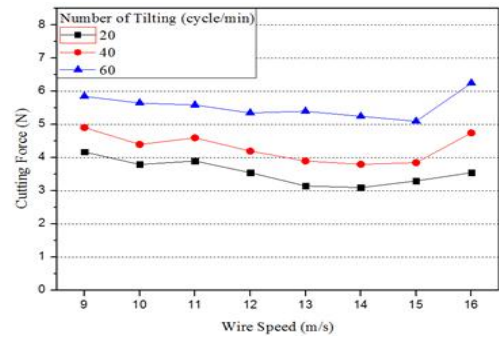


Fig. 12 Cutting force versus wire speed (Difference of tangential cutting force and normal cutting force)

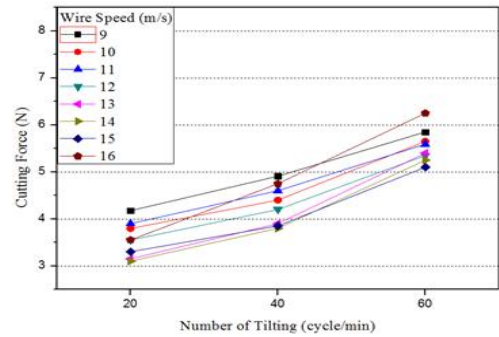


Fig. 13 Cutting force versus number of tilting (Difference of tangential cutting force and normal cutting force)

의 절삭저항력은 같은 톨팅 회전수에서는 증가량이 미미하지만, 톨팅 회전수 20cycle/min과 40cycle/min에서 0.4~1.2N 증가하고, 톨팅 회전수 40cycle/min과 60cycle/min에서 1~1.5N 증가함으로써 톨팅 회전수가 높아질수록 절삭저항력의 증가폭이 커짐을 확인하였다.

3.2 와이어 선속도에 따른 배분력 F_n

Fig. 6 ~ 11은 절삭공정에서 얻어진 법선분력(F_n)을 나타낸 그래프로써 톨팅 회전수에 따른 각 와이어 선속도의 실리콘 잉곳의 절삭저항력은 같은 와이어 선속도에서 변화가 없이 동일한 값을 가진다.

와이어 선속도에 따른 각 톨팅 회전수의 실리콘 잉곳의 절삭저항력은 와이어가 정·역방향 이송할 때 모두 증가를 하였으며, 와이어 선속도가 14m/s 이상에서 절삭저항력의 변화가 없는 것은 절입속도보다 재료제거율(Material removal rate)이 높아 와이어의 처짐 현상이 작아졌기 때문이라 판단된다.

와이어의 정방향 절삭가공에서 톨팅 회전의 방향에 따라 배분력의 절삭저항력이 증가-감소를 반복하게 되는데, 이는 와이어 역방향 절삭가공에서 배분력의 절삭저항력이 일정한 것과 비교하여 다를 수 있다. 와이어 정방향 이송에서 배분력의 평균값 그래프인 Fig. 9과 와이어 역방향 이송에서 배분력 그래프 Fig. 6의 절삭저항력 차이인 Fig. 11에서 절삭저항력이 동일함을 확인함으로써 톨팅 회전

이 정방향 절삭가공 중에 균일한 값인 $0.43 \pm 0.1N$ 만큼 절삭저항력에 영향을 미침을 알 수 있다.

3.3 주분력 F_t 과 배분력 F_n 의 비교

Fig. 12~13는 주분력과 배분력에서 와이어 선속도에 따른 각각 다른 틸팅 회전수의 실리콘 잉곳의 절삭저항력 차이를 나타낸 그래프이다. Fig. 12에서 주분력이 배분력보다 3.1~6.25N의 높은 절삭저항력이 작용하고 틸팅 회전수가 높아질수록 절삭저항력의 차이가 커짐을 알 수 있다. 또한 와이어 선속도가 증가할수록 절삭저항력이 감소하는 경향을 보이는데, 이러한 현상은 Fig. 4에서의 주분력 절삭저항력 증가폭보다 Fig. 6에서의 배분력 절삭저항력 증가폭이 크기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 실리콘 잉곳 틸팅 중심의 멀티 와이어 쓰잉 머신과 다이아몬드 와이어를 이용해 절삭실험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 주분력에서 틸팅 회전수가 증가할수록 절삭저항력의 크기 차이가 커짐을 확인하였다.
2. 주분력에서 와이어 선속도가 증가할수록 절삭저항력은 증가하지만 그 변화량은 미미함을 확인하였다.
3. 배분력에서 틸팅 회전수는 절삭저항력에 영향이 없음을 확인하였다.
4. 배분력에서 와이어 역방향 이송 중에 틸팅의 영향은 없으나, 와이어 정방향 이송 중에 틸팅의 영향은 $0.43 \pm 0.1N$ 만큼 나타났다.
5. 절삭실험에서 주분력이 배분력보다 높은 절삭저항력을 가지며, 틸팅 회전수가 증가할수록 절삭저항력 차이가 커지고, 와이어 선속도가 증가할수록 절삭저항력이 작아짐을 확인하였다.

후 기

“본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2012T100100647)”

REFERENCES

1. Yang, F., and Kao, I., “Interior Stress for Axisymmetric Abrasive Indentation in the Free Abrasive Machining Process: Slicing Silicon Wafers With Modern Wiresaw,” *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 121, No. 3, pp. 191-195, 1999.
2. Liedke, T. and Kuna, M., “A Macroscopic Mechanical Model of the Wire Sawing Process,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, pp. 711-720, 2011.
3. Kao, I., “Technology and Research of Slurry Wiresaw Manufacturing Systems in Wafer Slicing with Free Abrasive Machining,” *International Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 7, pp. 7-20, 2004.
4. Zhu, L. and Kao, I., “Galerkin-based Modal Analysis on the Vibration of Wire-slurry System in Wafer Slicing using a Wiresaw,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 283, pp. 589-620, 2005.
5. Chen, W., Lin, X., Li, M., Yin, C. and Zhou, L., “On the Nature and Removal of Saw Marks on Diamond Wire Sawn Multicrystalline Silicon Wafers,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 27, pp. 220-227, 2014.
6. Wu, h., “Wire Sawing Technology: A State-of-the-art Review,” *Precision Engineering*, Vol. 43, pp. 1-9, 2016.
7. Park, C. Y., Kweon, H. K., Peng, B. and Jung, B. G., “A Study on New Twist-Diamond Wire Characteristics for Improving Processing Performance,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 26-33, 2016.