

단결정 실리콘의 DTM가공시 가속도신호의 포락선처리를 이용한 가공특성 분석

Machining Characteristic Analysis of Single Crystal Silicon Wafer Using Enveloping of Acceleration Signal

*이동윤¹, 송기형, 남성호, 홍원표, 이석우

*D. Y. Lee¹, K. H. Song, S. H. Nam, W. P. Hong, S. W. Lee (swlee@kitech.re.kr)

¹ 한국생산기술연구원

Key words : Si-wafer, DTM (Diamond Turning Machine), Ductile-regime machining, Enveloping, Acceleration signal

1. 서론

실리콘, 게르마늄, 유리는 마이크로 전자공학과 광학산업, 그리고 최근의 마이크로 전자기계산업에서 복잡한 부품을 만드는 데 주요 재료로 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 이러한 재료들은 그들이 가지는 여러 가지 장점에 반해 특유의 취성으로 인해 가공성이 좋지 않은 단점도 가지고 있다. 이러한 취성 재료들의 가공을 위해 적용되는 여러 방법 중에서 다이아몬드공구를 이용한 가공 기술은 비교적 큰 소재제거율을 가지므로 경제적이고 효율적인 가공 방법으로 인식되어져 있으며, 선반가공의 경우 사용공구의 형상 및 가공 방법에 따라 응용 분야의 필요에 맞춘 다양한 형상으로서의 직접적인 패턴 가공이 가능하여 지속적인 연구가 이루어져 오고 있다.

Takayuki Shibata 등은 노즈가 둥근 공구(Round-nose Tool)를 이용한 (001), (111) 실리콘 웨이퍼의 가공 실험에서 결정 배향 방향 의존성을 확인하였고, 실리콘의 연성 선반가공 메커니즘을 설명하기 위하여 Slip Orientation Factor를 제안하였다[1]. T.P. Leung 등은 가공 깊이 변화를 통한 실험에서 가공깊이와 가공면에 발생하는 패임(Pitting)의 관계 분석을 통해 임계 절삭 깊이(Critical Depth of Cut)를 판단하였으며[2], C.L. Chao 등은 넓은 가공 속도 및 가공 깊이 범위에 대한 가공 실험을 통해 좀 더 세밀한 임계 절삭 깊이(Critical Depth of Cut) 수치를 제시하였고, 공구 형상이 공구의 마모에 영향을 미친다는 점을 발견하였다[3]. Jiwang Yan 등은 노즈가 평평한 공구(Straight-nose Tool)를 이용한 연성(Ductile-regime) 가공을 소개하였으며[4], 최근의 논문들은 대부분 연성 가공(Ductile-regime Machining)시의 공구의 마모 메커니즘 분석에 초점이 맞추어져 있다[5~7].

그러나, 연성 모드로의 가공 조건에 대하여서는 연구자마다 실험 조건들이 상이하여 견해의 차이가 있는 것이 사실이며, 가공 속도 변화가 미치는 영향에 대한 분석도 미흡한 실정이다. 또한, 실리콘 웨이퍼의 가공에 있어서 가공 상태의 모니터링 방안에 대한 연구도 많이 진행되지 않고 있다.

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼의 가공에 있어서 연성(Ductile-regime) 가공이 가능한 가공 조건의 선정과 가공 상태 모니터링을 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다.

1. 유효 가공 속도 구간 판단을 위한 다양한 가공 속도별 가공
2. 배향(Orientation)의 영향을 받지 않는 임계 가공 깊이(Critical Cutting Depth) 설정을 위한 다양한 가공 깊이별 가공
3. DTM을 이용한 가공 공정중에 연성-취성 간의 가공 상태 변화의 실시간 감시 방안 모색을 위해 가속도 신호를 취득하여 연성 및 취성 가공에서의 신호 특성을 분석

2. 실험

2.1 실험 장비

실험에 사용된 DTM (Diamond Turning Machine)장비는 50~10,000rpm의 스핀들 회전속도를 가지는 NANOTECH 350FG(Moore社, 미국)이고, 일반적인 프리즘 패턴(Prism Pattern) 가공에 사용되고 있는 경사각(Rake angle)이 0°, 노우즈이 각이 90°인 단결정 다이아몬드공구(Single Crystal Diamond Tool, 이하 다이아몬드공구)를 이용하여 가공실험을 실시하였으며, 가공 완료된 시편의 가공면 관찰에는 FE-SEM(Hitachi S-4300, 일본)을 이용하였다. 가속도 신호 취득을 위한 센서로는 PCB Piezotronics

사의 356B1을 사용하였다.

2.2 실험 방법

본 실험에서 사용된 재료는 4"크기의 P-type 단결정 (100) 실리콘 웨이퍼(Si-Wafer)이다. 공구의 영점을 셋팅한 후 건식 가공(Dry Cutting)을 진행하였다. 유효 가공속도 구간의 판단을 위해서는 가공 속도를 15 ~ 384m/min 범위에서 변화시키고, 배향(Orientation)의 영향을 받지 않는 임계 가공 깊이 판단을 위해서는 가공 깊이를 0.1 ~ 1.0μm 구간에서 변화시키면서 가공실험을 실시하였다.

2.3 신호 처리

측정된 진동신호는 회전기계에서 기어의 결합 발생시의 신호와 같이 가공면의 패임으로 인해 충격적인 진동 파형으로 나타나는데, 진동신호의 진폭이 일정치 않고 주기적인 왜곡이 발생하는 진폭 변조(Amplitude Modulation)된 형태로 나타난다. 이를 좀 더 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

조화진동(Harmonic vibration)의 진폭을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = a \cos(\omega t - \alpha) \quad (1)$$

이 때, 진동신호가 진폭 변조되어 최대진폭 $a(t)$ 가 시간에 따라 변화하는 경우에는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a(t) = k(1 + m \cos \omega_m t) \quad (2)$$

여기서 k 는 정수, m 은 차수(=1, 2 등)이며, ω_m 은 변조주파수(Modulation frequency)이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같다

$$x(t) = k \cos(\omega t - \alpha) + \frac{m}{2} \cos[(\omega - \omega_m)t - \alpha] + \frac{m}{2} \cos[(\omega + \omega_m)t - \alpha] \quad (3)$$

식 (3)은 전송파(Carrier wave) 성분 $k \cos(\omega t - \alpha)$ 와 측대역파(Sideband wave) 성분 $\frac{mk}{2} \cos[(\omega \pm \omega_m)t - \alpha]$ 로 구성되는 것을 알 수 있다.

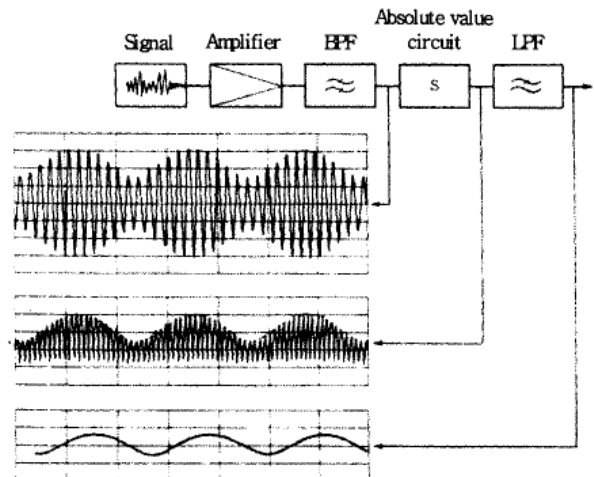


Fig. 1 Signal Processing

실제로 진폭 변조된 진동 신호에 대하여 주파수 분석을 수행해 보면 고주파의 전송파(Carrier wave)를 기준으로 양쪽에 변조된 저주파 신호로 인한 측대역파(Sideband wave) 성분이 나타나는 것을 볼 수 있다. 가공 실험을 통해 측정된 가속도 신호에서 변조되어 있는 취성 가공시의 신호를 명확히 검출하기 위하여 포락선 처리(Enveloping) 기법을 적용하였다. 포락선 처리는 진폭 변조된 신호 데이터에서 측대역파의 주파수인 변조 주파수 성분 ω_m 을 검출하는데 효과적인 기법이다. Fig. 1과 같이 진동 신호를 증폭기에서 증폭하고 파악하고 싶은 진동수 범위를 대역 통과 필터(BPF: Band pass filter)를 이용하여 선택한다. 그리고 절대치 회로(Absolute value circuit)를 통과하여 파형의 음의 부분을 양으로 전환하여 파형의 밀도를 높이고 저역 통과 필터(LPF: Low Pass Filter)를 통과하면 밀도가 높은 파형에 관한 포락 부분만이 남는다.

3. 실험 결과

3.1 가공 속도에 따른 절삭 특성

Fig. 2는 가공속도를 변화시켜 가면서 가공한 실리콘 웨이퍼의 SEM 측정 이미지를 나타낸 것이다. SEM 이미지들을 종합하여 분석해 볼 때 90° 다이아몬드공구를 이용한 (100) 실리콘 웨이퍼의 선반가공 시에 가공 속도를 75 ~ 91m/min로 설정할 경우 연성 가공이 가능함을 확인할 수 있다.

3.2 가공 깊이에 따른 가공면 품질의 배향 의존성

3.1장의 결론으로부터 원활한 가공 상태를 보인 75~91m/min 속도 구간에서도 <110> 방향에서는 패임 현상이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 이미 여러 연구자들에 의해 선행된 연구들에서 밝혀진 바와 같이 실리콘의 결정이 가지는 방향성에 기인한 것으로 보인다[1~5]. 유효 가공 속도 구간 내에서 가공 깊이에 변화를 주면서 배향 의존성(Orientation Dependence)을 살펴보면, 패임 발생이 쉬운 <110> 방향에서는 0.1 μ m까지는 연성 가공이 이루어지는 것을 확인할 수 있었으며, <100> 방향에서는 1.0 μ m까지도 연성 가공이 됨을 확인하였다.

3.3 가공 신호 분석

결정 배향(Crystalline Orientation)의 영향으로 가공 시에 패임이 발생하는 취성 가공과 패임 발생이 없는 연성 가공이 반복적으로 이루어지는 경우에는 충격파형의 가속도 신호가 실리콘 웨이퍼의 회전 주기에 맞추어 반복적으로 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 가속도 신호에 대하여 2.3장에서 언급한 포락선 처리를 통해 FFT 분석을 수행하였다. 이때의 실리콘 웨이퍼의 회전주

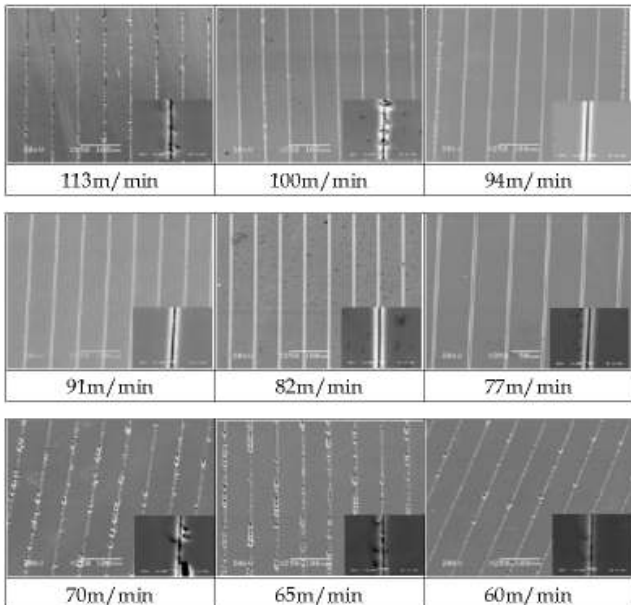


Fig. 2 SEM Image of Machined Surface

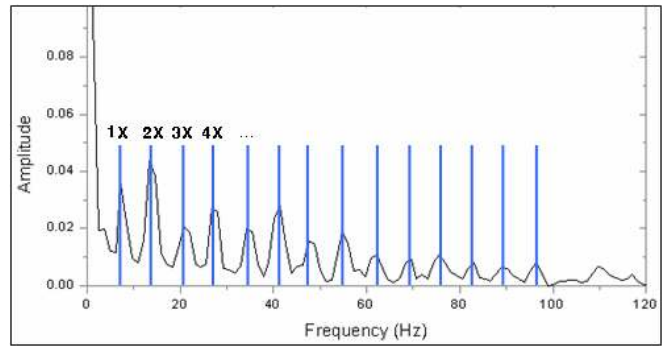


Fig. 3 FFT Analysis for Acceleration Signal of Spiral Machining

파수는 6.9Hz 인데, 포락선 처리를 통해 가공면의 패임 발생으로 나타나는 충격파형으로 인한 회전주파수 성분 및 이의 조화 성분들이 Fig. 3과 같이 명확하게 분리되었다.

4. 결론

취성 소재인 실리콘 웨이퍼의 선반 가공 시의 연성 가공 조건 및 모니터링 방안을 찾기 위한 실험적인 연구를 수행하였다. 실험 결과의 분석을 통하여 다음과 같은 사실을 확인하였다.

1. 90° 다이아몬드공구를 이용한 (100) 실리콘 웨이퍼의 선반 가공 시에 가공 속도를 75 ~ 91m/min로 유지하는 경우 가공 깊이 0.1 μ m 이하에서는 결정 배향(Crystalline Orientation)에 의한 영향을 받지 않고 프리즘 패턴의 가공이 가능하다.
2. 가속도 신호를 이용하여 실리콘 웨이퍼의 연성/취성 가공 상태를 판별 가능하다.

이상의 내용들을 종합하여 활용한다면 실리콘 웨이퍼를 이용한 선반 가공을 수행할 경우에 가공 상태 모니터링을 통해 시간과 비용의 낭비를 감소시키는 것에 도움을 줄 수 있을 것이라 사료된다.

후기

본 연구는 지식경제부에서 지원한 대면적 미세 가공공정 원천 기술 개발 과제에 의해 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Takayuki Shibata, Shigeru Fujii, Eiji Makino and Masayuki Ikida, "Ductile-regime turning mechanism of single-crystal silicon", Precision Engineering, Vol. 18, No 2/3, pp. 129-137, 1996
2. T.P. Leung, W.B. Lee and X.M. Lu, "Diamond turning of silicon substrates in ductile-regime", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 73, pp. 42-48, 1998
3. C.L. Chao, K.J. Ma, D.S. Liu, C.Y. Bai and T.L. Shy, "Ductile behaviour in single-point diamond-turning of single-crystal silicon", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 127, pp. 187-190, 2002
4. Jiwang Yan, Katsuo Syoji, Tsunemoto Kuriyagawa and Hirofumi Suzuki, "Ductile regime turning at large tool feed", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 121, pp. 363-372, 2002
5. B.K.A. Ngoi and P.S. Sreejith, "Ductile Regime Finish Machining - A Review", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 16, pp. 547-550, 2000
6. Jiwang Yan, Katsuo Syoji and Jun'ichi Tamaki, "Some observations on the wear of diamond tools in ultra-precision cutting of single-crystal silicon", Wear, Vol. 255, pp. 1380-1387, 2003
7. M. Sharif Uddin, K.H.W. Seah, X.P. Li, M. Rahman and K. Liu, "Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon", Wear, Vol. 257, pp. 751-759, 2004