반도체디스플레이기술학회지 제16권 제3호(2017년 9월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 3. September 2017.

Solar Cell Wafer용 Squaring & Grinding Machine의 진동 억제를 위한 설계 변경

신호범[*]·노승훈[**†]·윤현진[**]·길사근[*]·김영조[***]·김건형[****]·한대성[*****]
[*]금오공과대학교 대학원, [**†]금오공과대학교 기계시스템공학과,
[***]구미대학교 기계공학과, [****]위드, [*****]디에이치테크

Design Alterations of a Squaring & Grinding Machine for the Solar Cell Wafer to Suppress Vibrations

Ho Beom Shin[*], Seung Hoon Ro[†], Hyun Jin Yoon[**], Sa Geun Kil[*], Young Jo Kim[***], Geon Hyeong Kim[****] and Dae Sung Han[*****]**
[*]Graduate School, Kumoh National Institute of Technology,
[**†]Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
[***]Dept. of Mechanical Engineering, Gumi University, [****]With Co., [*****]Dhtech Co., Ltd.

ABSTRACT

Solar cell industry requires high technologies to stabilize apparatuses for the wafer manufacturing. Vibrations of squaring & grinding machines are one of the most critical factors for causing residual stresses of ingots, which are the main reasons of the breakage in the following processes such as wire sawing, cleaning, and modularity. In this study, the structure of a squaring & grinding machine has been analyzed through experiments and computer simulations to figure out the ways to suppress the vibrations effectively, and further to minimize the breakage of wafers. The result shows that simple design changes of applying a few ribs can improve the stability of the machine.

Key Words : Solar cell wafer, Squaring & grinding machine, Breakage, Design alterations, Improved stability

1. 서 론

전 세계적으로 유가상승, 에너지·환경문제, 신산업 창출 등의 이유로 신재생 그린에너지 시장의 확대가 가속화되고 있다. 에너지 자원의 확보가 세계 각국의 생존전략으로 떠오르는 가운데 태양광 발전은 향후 에너지 부족을 해결할 핵심 대안의 하나로 국가의 산업경쟁력에 큰 영향을 미친다.

이러한 태양광 산업에서 가장 중요한 요소 중 하나는 태양전지 제조공정의 원가를 최소화하여 상용전력과의 생산원가 차이를 줄이는 것이다. 태양전지 Wafer 제조공정 중Squaring과 Grinding 공정 장비는 결정 성장된 잉곳을 사각단면에 가깝게 절단한 후 절단면을 연마하는 장비로, 이 장비의 진동은 가공 정도를 해칠 뿐 아니라 불량률을 높여 제품 및 가격 경쟁력에 큰 악영향을 미친다.

Fig. 1은 태양전지 기판(단결정형)의 제조공정이며 본 연구의 대상이 되는 Squaring & grinding machine의 경우 Squaring 과정 중 진동이 심할 경우 잉곳 표면 및 내부에 잔류응력이 커져 후속 공정에서Wafer breakage를 유발하게 된다.

본 연구에서는 Squaring & grinding machine의 진동을 최소화할 수 있도록 설계를 개선함으로써 Breakage를 최소화하고 Wafer 생산공정의 안정화와 가격경쟁력 제고를 목표

[†]E-mail: shro@kumoh.ac.kr

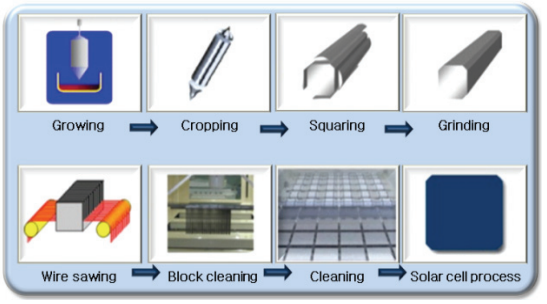

Fig. 1. Wafer manufacturing process.

로 한다. 이러한 안정화 설계 기술은 관련 분야의 경쟁력 강화와 원천 기술 확보에 초석이 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 장비의 동특성 분석

2.1 동특성 분석 실험

장비의 진동이 Wafer에 주는 손상 억제를 위한 설계 개선안의 도출을 위해 주파수 분석 실험을 통하여 구조물의 동특성을 분석한다.

2.1.1 Squaring & grinding machine 구조

Fig. 2는 Squaring & grinding machine의 주요 부위 및 명칭이다. 본 공정은 잉곳이 Squaring part, Cylindrical grinding part, Surface grinding part를 차례로 거치는 순서로 진행된다.

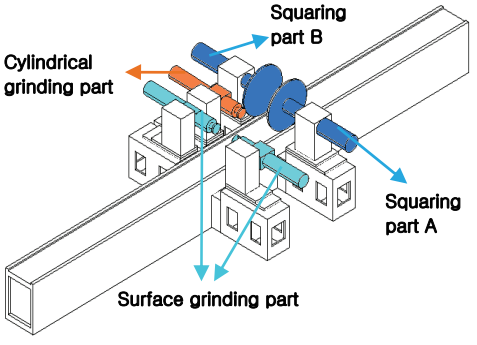

Fig. 2. Squaring & grinding machine.

2.1.2 동특성 분석 실험 방법

Fig. 3과 같이 장비에 가속도 센서를 부착한 후 충격(Impact) 형태의 힘을 주면 주파수 분석기를 통해 전달함수를 얻을 수 있다.

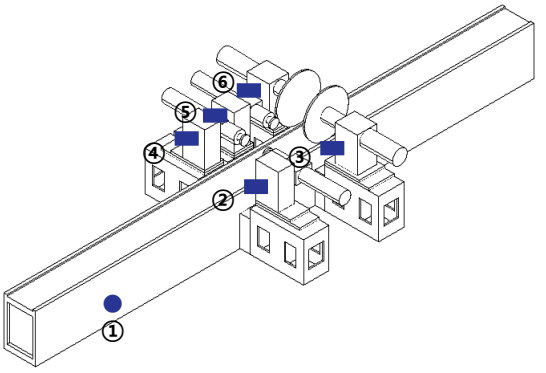

Fig. 3. The locations of the sensors.

2.1.3 동특성 분석 실험 결과

실험으로부터 얻어진 전달함수를 [Fig. 4]를 이용하여 구조물의 동특성(진동의 크기, 진동의 전달 경로, 고유진동수 및 진동 형태) 을 확인할 수 있다. Fig. 4는 실험을 통하여 얻어진 전달함수의 그래프 중 하나이다.

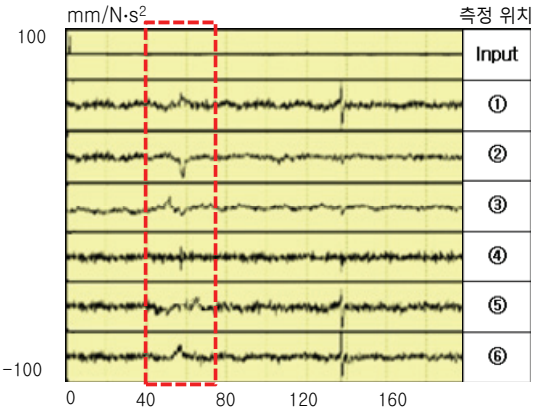

Fig. 4. Transfer functions of the machine.

그래프의 꼭지점에서 각 고유진동수를 알아낼수 있으며 그 값은 Table 1에 제시되어 있다. 측정 위치별 전달함수의 크기와 방향을 비교해보면 1차 고유진동수에서 Squaring part A 좌우진동, 2차 고유진동수에서 Squaring part B 앞뒤진동, 3차 고유진동수에서 Surface grinding part 상하진동임을 확인할 수 있다.

Table 1. Natural frequencies of the machine

Range[Hz]	10~100	101~200
Nat. freq.[Hz]	53, 57, 58, 64, 69	138, 164

2.2 유한요소해석(FEM)을 이용한 모델링

구조물의 진동 특성을 분석하기 위하여 구조물 전체 및 각 부위 Element들의 진동 상태를 유한요소해석을 통하여 규명한다. 즉, Simulation 결과가 실험 결과와 일치하는지를 확인함으로써 Simulation model의 타당성을 검증한 후 그 결과를 바탕으로 개선안을 Simulation model에 적용하고 그 결과를 확인하는 과정을 반복하여 제작이 용이하고 효과가 큰 최적 설계 개선안을 완성할 수 있다.

2.2.1 유한요소해석 모델

Simulation을 통해 구조물의 동특성을 파악하기 위해 구조물의 형상, 물성치, 지지조건을 반영하여 Fig. 5와 같이 모델링을 진행하였다.

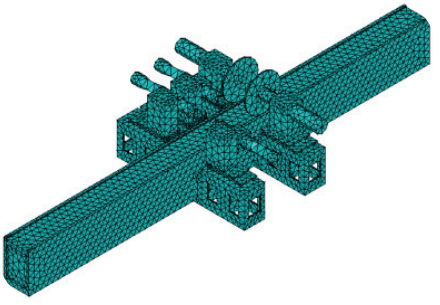

Fig. 5. A simulation model of the machine.

2.2.2 유한요소해석 결과

유한요소해석 프로그램을 이용하여 구현된Simulation model의 해석 결과로 나온 고유진동수를 Table 2에 표로 정리하였고 Fig. 6은 그 중 작동속도와 공진 가능성이 있는 고유진동수와 그 때의 진동 형태이다.

Table 2. Natural frequencies of the machine

Range[Hz]	10~100	101~200
Nat. freq.[Hz]	52, 56, 57, 62, 71	135, 159

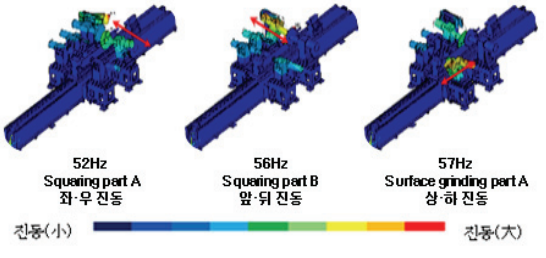

Fig. 6. Natural frequencies and mode shapes of the machine.

2.3 동특성 분석 실험과 유한요소해석 결과 비교

실험 및 Simulation을 통하여 얻어진 고유진동수를 비교한 결과는 Table 3과 같다. 두 경우의 상대적 오차는 5% 이하로 실험에 의한 결과와 시뮬레이션에 의한 분석 결과가 잘 일치하는 것으로 판단된다. 시뮬레이션 모델이 실제 장비의 특성을 잘 반영하고 있으므로 이 모델을 이용하여 개선안을 도출하고자 한다.

Table 3. Natural frequencies from experiment and simulation

Analysis \ Range[Hz]	10~100	101~200
실험	53, 57, 58, 64, 69	138, 164
Simulation	52, 56, 57, 62, 71	135, 159

3. 안정화 설계안 도출 및 효과 확인

3.1 개선방향 설정

실험 및 유한요소해석을 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 장비의 문제점을 파악하고 그에 따른 개선안을 적용하는 방식으로 최적의 설계안을 도출하고자 하며 Table 4는 기계의 작동 조건이다. Excitation forces에서 $f_0 = m \times e \times \omega^2$이며, m은 회전체 질량(57kg), e는 편심(질량 중심과 회전 중심의 거리),[m], ω는 회전속도[rad/s]이다.

첫째, Surface grinding part 작동 속도(50Hz)와Squaring part 고유진동수(52, 56Hz)가 공진하므로 이를 억제하기 위해 Squaring part 설계 개선을 통한 고유진동수 변경이 필요하다.

둘째, Surface grinding part 작동 속도(50Hz)와 Surface grinding part 고유진동수(57Hz) 역시 공진 하므로 Surface grinding part의 설계 개선이 필요하다.

Table 4. Excitation sources

Excitation sources	Excitation frequencies[Hz]	Excitation forces[N]
Squaring	83	18
Cylindrical grinding	92	20
Surface grinding	50	15

3.1.1 설계 개선안 #1

구조물 위쪽의 질량에 비해 취약한 하부 지지 부위의 강성을 보강하고 공진을 회피하기 위해 Fig. 7과 같이 Squaring part A에 보강대를 적용하였다.

Fig. 7의 조건을 유한요소해석 Model에 적용하여 Simulation을 진행하였으며 Table 5는 개선안 적용에 따른 고유진동수 변화 및 진동크기 변화를 비교한 것이다. 지지부를 적

용함으로써 지지 강성이 높아짐에 따라 증가된 1차 고유진동수(75Hz)가 Surface grinding part 작동 속도(50Hz)와의 공진영역에서 멀어졌다.

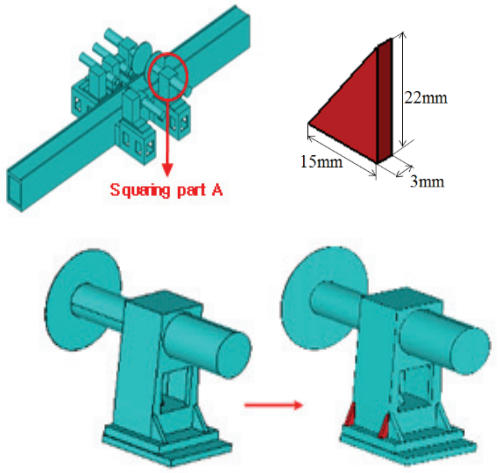

Fig. 7. Design alteration #1.

Table 5. Natural frequencies and vibration magnitudes of original model and alteration #1

		Original	Alteration #1	Comparison
Nat. freq.	1st	52	75	44% ↑
	2nd	56	56	-
Vib. magnitudes		9	5	45% ↓

3.1.2 설계 개선안 #2

#1과 같은 원리로 Squaring part B에도 보강대를 적용하였다.

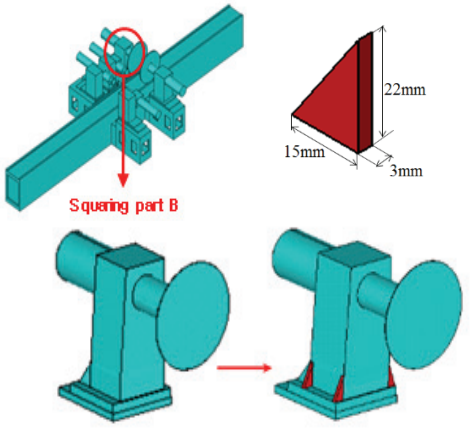

Fig. 8. Design alteration #2.

Fig. 8의 조건을 유한요소해석 모델에 적용하여 시뮬레이션을 진행한 결과 Table 6에서 확인할 수 있듯이 2차 고유진동수가 56Hz 에서 75Hz로 증가해 공진 영역에서 멀어졌다.

Table 6. Natural frequencies and vibration magnitudes of original model and alteration #2

		Original	Alteration #2	Comparison
Nat. freq.	1st	52	52	-
	2nd	56	75	34% ↑
Vib. magnitudes		9	5	45% ↓

3.1.3 설계 개선안 #3

본 장비의 문제가 되는 Surface grinding part 작동 속도(50Hz)와 Surface grinding part 고유진동수(57Hz)의 공진을 회피하기 위해 Surface grinding part에 보강대를 적용하였다.

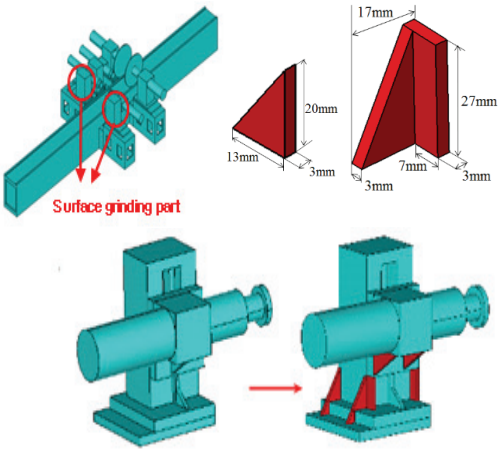

Fig. 9. Design alteration #3.

Fig. 9의 조건을 유한요소해석 Model에 적용하여 Simulation을 진행한 결과 공진 억제로 9%의 진동이 소멸한 것을 확인할 수 있다.[Table 7]

Table 7. Natural frequencies and vibration magnitudes of original model and alteration #3

		Original	Alteration #3	Comparison
Nat. freq.	1st	52	52	-
	2nd	56	86	51% ↑
Vib. magnitudes		9	8	9% ↓

3.2 최적 설계안 도출 및 효과 확인

앞에서 언급된 설계 변경안 #1, #2, #3의 결과 모두 진동 감소 효과가 있으므로 3가지 설계안을 조합하여 최종 설계안으로 확정하였다.

Squaring part A, B를 설계 변경하여Surface grinding part 작동속도와 Squaring part 고유진동수의 공진을 억제하였다. 또한 Surface grinding part의 구조 개선을 통하여Surface grinding part 작동속도와 Surface grinding part고유진동수의 공진을 회피하였다.

설계 개선 전후의 진동 크기를 비교하기 위해 Table 8에 도시/정리하였으며 Fig. 10에 비교 그래프를 나타냈다. 최종 설계 개선안의 경우 개선 전에 비하여 진동이 전체적으로80% 정도 소멸된 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 다루었던 Surface grinding part의 작동속도(50Hz)구간[Fig. 10 점선 구간]은 진동량이 약 90% 감소하였다. 최종 설계안이 실제로 적용될 경우 구조물의 진동이 현격히 감소될 뿐만 아니라 잔류응력 억제로 가공품질의 향상과 부속 공장에서의 Breakage를 크게 줄일 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

Table 8. Natural frequencies and vibration magnitudes of original model and alteration #1+#2+#3

		Original	Alteration	Comparison
Nat. freq.	1st	52	75	44% ↑
	2nd	56	79	41% ↑
Vib. magnitudes		9	2	80% ↓

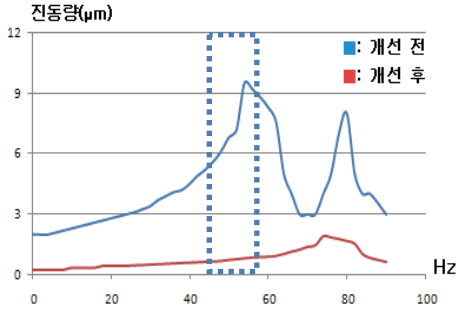

Fig. 10. Magnitudes of vibrations along total (graph).

4. 결 론

본 연구는 Solar cell wafer 가공장비의 동특성 분석 실험 및 Simulation을 이용하여 진동의 주된 원인을 분석하고 이를 바탕으로 구조 개선을 통해 장비의 안정성을 높임과 동시에 가공품질을 제고시키는 설계 변경안을 제시하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 주파수 분석 실험 결과와 Simulation 결과가 허용오차 범위 내에서 일치하고 있어 본 연구의 해석 과정은 타당한 것으로 사료된다.[Table 3]

2) Surface grinding part 작동속도 (50Hz)와 Squaring part 고유진동수(52, 56Hz)가 공진하므로 이를 회피하기 위한 설계 개선이 필요하다.

3) Surface grinding part 작동속도(50Hz)와 Surface grinding part 고유진동수(57Hz)가 공진하므로 이를 회피하기 위한 설계 개선이 필요하다.

4) 설계 개선안을 통해 그 효과를 파악하였고 최종적으로 Squaring part A, B, Surface grinding part 의 설계 변경을 통하여 진동량이 약 80% 감소함을 확인할 수 있다.

5) 진동량이 80% 감소하게 되면 표면조도가 90%이상 개선되어 불량률이 크게 줄어든다. 본 연구의 설계변경 기술은 투자 비용 대비 고부가가치를 창출한다. 본 연구의 기술을 타 공정 장비에도 적용하여 Solar cell 가공 표면 품질의 고급화 및 박판화를 통해 기술 경쟁력 우위를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비 지원에 의하여 연구된 논문으로 이에 관계자 여러분께 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Rajalingham, C., Bhat, R. B., and Xistris, G. D., “Vibration of Rectangular Plates using Plate Characteristic Functions as Shape Functions in the Rayleigh-Ritz Method,” *J. of Sound and Vibration*, Vol. 193, pp. 497-509, (1996).
2. Ro, S. H., Cho, H. J., and Choi, E. H., “Analysis of the Free Vibrations of Rectangular Plates Using Database,” *Transactions of the KSME*, Vol. 24, pp. 1978-1990, (2000).
3. Cho, H. J., and Ro, S. H., “Effect of Design Parameters on the Variation of Natural Frequencies of the Uniform and the Nonuniform Cantilever Beams,” *Transactions of the KSME*, Vol. 23, pp. 697-708, (1999).
4. Moon, K. I., and Kim, S. W., “Recent Trends of Heat Treatment Research(2),” *The Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 19, pp. 170-175, (2006).
5. Jeon, C. S., Kim, Y. G., Yun, S. H., and Kwon, H. B., “A

Study on Impact Damage Characteristics of the Window Glass for High Speed Train," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, pp. 217-223, (2012).
6. Ro, S. H., "Design Alteration of a Milling Machine Structure for the Improved Stability," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 5, pp. 72-78, (2006).
7. Ro, S. H., Mechanical Vibrations with Applications, Chaosbook, pp. 317-328, 2013.
8. Bashir, B. M., Min, W., Jia, F., and Wei-Hong, Z., "Dynamic damping of machining vibration: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, pp. 2935-2952, (2017).
9. Mehdi, E., Ramin. S., and Subhash. R., "Vibration analysis and optimal design of multi-layer plates partially treated with the MR fluid," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 82, pp. 80-102, (2017).

접수일: 2017년 8월 18일, 심사일: 2017년 9월 18일,
게재확정일: 2017년 9월 18일