

3D 스캔을 이용한 실리콘 태양전지의 휨 현상 측정 연구

윤필영* · 백태현*** · 송희은**** · 정하승** · 신승원***†

* 홍익대학교 기계공학과, ** 홍익대학교 기계시스템디자인공학과,
*** 충북대학교 전기공학과, **** 한국에너지기술연구원

Measurement of Bow in Silicon Solar Cell Using 3D Image Scanner

Phil Young Yoon*, Tae Hyeon Baek***, Hee Eun Song****, Haseung Chung** and Seungwon Shin***†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hongik Univ.,

** Dept. of Mechanical and System Design Engineering, Hongik Univ.

*** Dept. of Electrical Engineering, Chungbuk Univ.

**** Korea Institute of Energy Research

(Received February 19, 2013 ; Revised March 15, 2013 ; Accepted March 18, 2013)

Key Words: Silicon Solar Cell(실리콘 태양전지), Bow Phenomenon(휨 현상), Thermal Expansion Rate(열팽창률), 3D Image Scanner(실리콘 태양전지), Data regression(곡선 접합)

초록: 실리콘 태양전지의 두께를 줄일 경우 여러 문제점이 발생하게 되는데 그 중에서 태양전지의 휨 현상은 제품 수율의 직접적인 원인이 되어 제품 상용화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 본 연구에서는 태양전지의 실리콘 웨이퍼 두께를 가변하였을 때의 휨 정도에 대해 정밀하게 측정하고자 하였다. 측정 결과의 신뢰성을 높이고 비 대칭성 형상에 대해 자세하고 정밀하게 분석하기 위해 3D 이미지 스캐너를 사용하였다. 그 결과 실리콘 웨이퍼의 두께가 감소할수록 휨 정도는 급격하게 증가하고 곡률 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 실리콘 웨이퍼의 두께가 감소할 수록 휨 정도의 편차가 증가하여 형상의 비 대칭성이 증가하는 것 또한 확인되었다. 또한 Ag 전극의 부착이 휨 현상을 어느 정도 감소시키는 것을 알 수 있었다.

Abstract: To reduce the cost per watt of photovoltaic power, it is important to reduce the cell thickness of crystalline silicon solar cells. As the thickness of the silicon layer is reduced, two distinctive thermal expansion rates between the silicon and the aluminum layer induce bowing in a solar cell. With a thinner silicon layer, the bowing distance grows exponentially. Excessive bowing could damage the silicon wafer. In this study, we tried to measure an irregularly curved silicon solar cell more accurately using a 3D image scanner. For the detailed analysis of the three-dimensional bowing shape, a least square fit was applied to the point data from the scanned image. It has been found that the bowing distance and shape distortion increase with a decrease in the thickness of the silicon layer. An Ag strip on top of the silicon layer can reduce the bowing distance.

1. 서 론

최근 환경문제와 결부되어, 온실효과에 영향을 주는 이산화탄소의 배출이 없는 청정에너지에 대한 관심이 증가되고 있다. 최근 신재생 에너지로 분류되는 풍력, 조력, 태양 에너지 등 다양한 청정 에너지원 중 특히 태양 에너지를 사용하는 태양광

발전이 미래의 에너지원으로 많은 주목을 받고 있다. 태양광 발전은 신재생 에너지원 중에서도 적용범위나 신뢰성 측면에서 장점이 많은 기술임에도 불구하고 현재 높은 발전단가로 인해 대량 보급에 제한이 많다. 태양광 발전 시스템의 가격 구성은 크게 모듈, 주변장치, 설치비용으로 구성되며 이중 모듈이 차지하는 비중이 전체의 약 60% 이상을 차지한다. 실리콘 태양전지 모듈은 다시 실리콘 원재료, 잉곳, 셀, 모듈 제조 비용으로 구성되며 모듈 비용 중 실리콘 재료가 차지하는 비중

† Corresponding Author, sshin@hongik.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

이 약 55 %이다. 현재 전세계적으로 보급되는 태양광 발전 시스템의 80% 이상이 실리콘 태양전지를 적용하고 있으며 앞으로도 이러한 추세는 계속 될 것으로 전망된다. 따라서 가격 경쟁력 향상을 위해서는 실리콘 사용량을 줄이는 것이 중요하고 이는 태양전지의 두께를 줄이는 것을 의미한다.⁽¹⁾

실리콘 태양전지의 두께를 줄일 경우 에너지 변환효율이 감소하는 등 여러 문제점이 발생하게 되며, 그 중에서 실리콘 태양전지의 휨 현상은 기관 파손을 야기시키고 제품 수율에 직접 연관되어 제품 상용화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다.⁽²⁾ 실리콘 태양전지의 휨 현상은 기관 제작 공정과정 중 후면전계 (back surface field, BSF)층의 생성을 위해 알루미늄 층과 실리콘 층을 소결시키는 과정에서 주어진 온도조건에 따라 실리콘과 알루미늄 층이 서로 다른 열팽창을 하기 때문에 발생하게 된다. 휨 현상은 실리콘의 두께가 얇아질수록 더욱 증가하게 되고, 이러한 휨 현상의 크기가 커질 경우 공정과정에서 태양 전지가 파손될 가능성도 증가하게 된다. 최근 초박형 태양전지의 휨 현상을 예측하고 제어하기 위한 다양한 실험 및 수치해석에 관한 연구가 진행되기 시작하고 있다.⁽³⁾

Chen 등⁽⁴⁾은 ABAQUS 시뮬레이션을 통해 실리콘 웨이퍼의 두께를 120 μm ~ 200 μm 로 변화시킬 때 휨 정도가 감소하는 현상을 수치적으로 해석하였으며, 전면 구리전극의 크기가 휨 현상에는 큰 영향을 주지 않는다는 것을 파악하였다. Huster 등⁽⁵⁾은 실리콘 웨이퍼의 두께를 120 μm 에서 200 μm 로 변화했을 때 휨 현상이 감소하는 정도와 공정 후 시간이 흐름에 따른 휨 정도의 변화량에 관하여 직접적인 실험을 통해 분석하였다. 또한 공정이 완료된 실리콘 태양전지를 극저온 상태에 있게 함으로써 휨 현상을 감소 시키는 방법을 고안하였다. Schneider 등⁽⁶⁾은 실리콘 태양전지의 알루미늄 층의 두께가 휨 현상과 광량에 어떠한 영향을 주는 지 실험을 통해 분석하였으며 공정과정에서의 가열온도와 공정속도가 휨 현상에 어떠한 영향을 주는 지 파악하였다.

현재 초박형 태양전지의 휨 현상에 대해 많은 연구들이 진행되고 있으며 또한 이러한 휨 현상을 줄이기 위한 방법에 대한 관심 역시 증가되고 있으나 휨 현상 자체에 대한 체계적인 측정기준이나 방법이 없는 것이 현실이다. 지금까지의 대부분의 연구들이 휨 현상에 대해 가장 특징적인 부분의 휨 정도를 단순 측정기구를 사용하여 측정하였다. 본 연구에서는 태양전지의 휨 현상에 영향을 주는

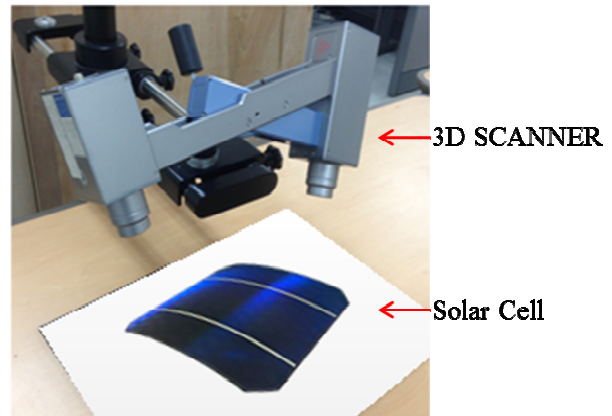


Fig. 1 Schematic of 3D scan image

인자들에 대해 보다 정밀한 분석을 하기 위해 3D 이미지 스캐너를 사용하여 전체적인 변화량을 측정하고자 하였다. 추출한 점 형태의 3D 스캔 데이터를 적절한 2 차원 표면으로 만들기 위해서 공간을 분할한 후 최소제곱법을 사용해 곡선 접합하여 휨 정도를 정밀하게 측정하였다. 또한 실리콘 층의 두께의 변화에 따른 휨 현상을 파악하였으며, 실리콘 층위의 Ag 전극이 태양전지의 휨 현상에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. 실험 방법

기존의 연구들은 대부분 휨 현상을 측정하기 위해서 적절한 기준점을 설정한 후 버니어 캘리퍼스 등으로 직접적인 길이를 측정하는 방법을 취하였다. 휨 현상은 한 축을 고정으로 반원 형태로 휨이 발생하기(Fig. 1의 solar cell 참조) 때문에 휨 정도가 작은 경우에는 오차가 크게 발생하지 않아 한쪽 단면에서의 휨 길이를 직접적으로 측정하는 것이 가능하나, 휨 정도가 큰 경우 측정된 길이는 대부분 많은 오차를 포함하게 된다. 또한 휨 형상을 자세히 보면 완벽한 반원 형태가 아니고 비대칭적인 형상을 보이고 있다. 특히 실리콘 태양전지의 두께가 줄어들 수록 형상의 비 대칭성이 더욱 커지게 된다. 따라서 실리콘 태양전지의 두께의 변화에 따른 휨 현상에 대해 자세히 분석하기 위해서는 발생하는 휨 정도뿐만 아니라 형상의 변형에 대해서 파악하는 것 역시 중요하다.

변형량의 정확한 측정은 수치모델을 이용하여 휨 현상을 파악하려는 노력들과 동시에 진행되어야 하며 이러한 수치도구의 정확성을 검증하기 위해서는 보다 정확한 변형 데이터가 요구된다. 본

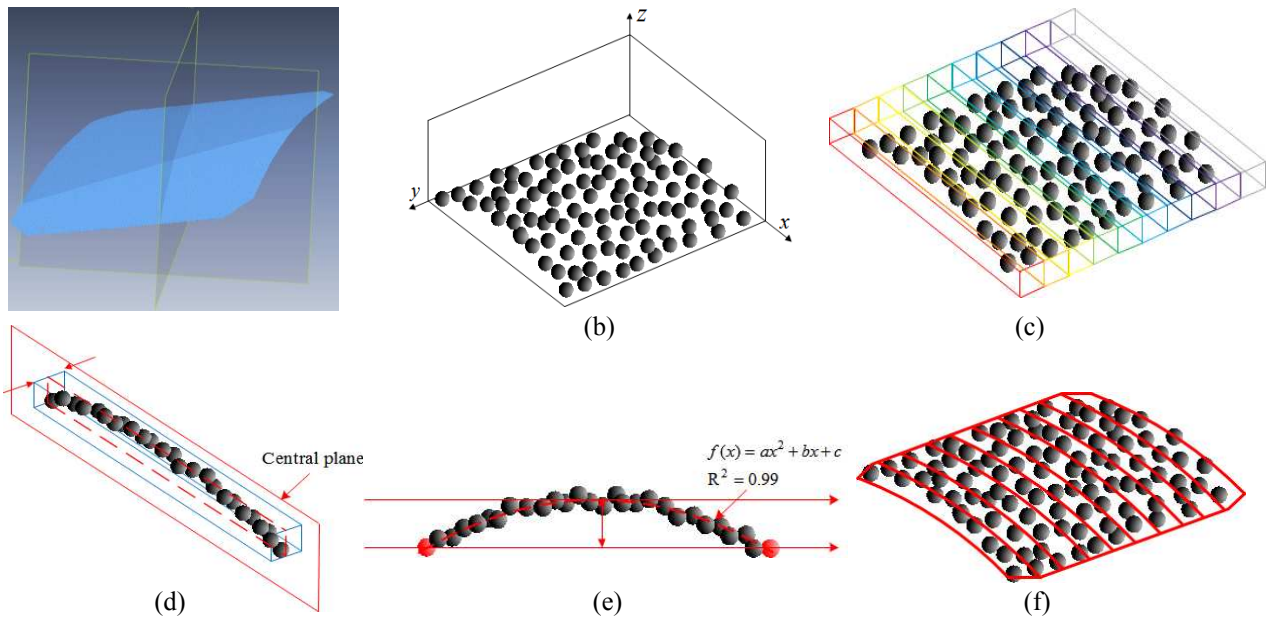


Fig. 2 Process of Least square fit to 3D scanned data

연구에서는 실리콘 태양 전지의 휨 현상을 보다 정밀하게 측정하여 결과의 신뢰도를 높이기 위해 3D 이미지 스캐너 장비를 사용하였다. 그에 대한 개략도는 Fig. 1 에서 확인할 수 있다. 3D 이미지 스캐너는 비접촉식으로 기판의 파손이나 변형 없이 휨 현상에 대해 자세히 측정 및 분석할 수 있을 뿐만 아니라 휨 현상이 일정 수준 이상으로 크게 발생한 경우에 대해서도 측정이 가능하다.

실험에서 사용된 측정장비는 3 차원 스캐너 REXCAN 560 으로 1280×960 Pixel 의 해상도와 $\pm 0.02 \sim \pm 0.08$ mm 의 측정 정밀도를 가지며 다중 줄무늬 패턴을 사용하여 측정한다. 휨 현상이 클 경우에는 곡면형상 때문에 발생하는 그림자로 인해 측정을 하지 못하는 부분이 발생하게 된다. 따라서 이럴 경우 여러 각도에서 세분화하여 이미지를 측정한 후 이를 합성하는 방법을 취하였다. 이에 따라 3 차원 공간에 데이터가 생성되며 이를 곡선 접합하여 휨 정도를 측정하였다.

본 연구에서는 Czochralski 방법으로 제작된 면적 156×156 mm²의 p-type 단결정 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 전면의 Ag 전극은 스크린 인쇄방식으로 제작되었고, 두께 25 μ m, 폭 100 μ m, 길이 153 mm 의 패턴이 2.4 mm 간격으로 65 개가 인쇄되었다.⁽⁷⁾ 태양전지의 후면전계(BSF)층 제작과정은 크게 가열과 냉각 두 가지 과정으로 나눌 수 있다. 알루미늄과 실리콘 층 사이를 소결시켜 BSF 층을 생성하기 위해 IR lamp 를 사용해 일정시간 가열을 한 다음 fan 을 사용하여 위에서 공기를 분사해 가

열된 실리콘 태양전지를 식혀주는 과정으로 제작 된다. 실리콘 태양전지의 휨 현상은 고온의 기판을 냉각하는 과정에서 실리콘 웨이퍼와 알루미늄의 서로 다른 부피 팽창률로 인해 발생하게 된다.

실리콘 웨이퍼의 두께가 변형률에 가장 큰 영향을 주기 때문에 알루미늄 두께가 일정한 상태(40 μ m)에서 실리콘 웨이퍼의 두께를 90, 120, 150, 180 μ m으로 가변하여 실리콘 태양전지의 휨 정도에 대한 영향을 분석하였다. 또한 실리콘 웨이퍼 위에 부착하는 Ag 전극이 휨 현상에 주는 영향을 분석하기 위해 Ag 전극이 없는 경우에 대하여도 실리콘 웨이퍼의 두께를 가변하여 측정하였다.

3. 측정 방법

3D 이미지 스캐너를 사용하여 실리콘 태양전지의 형상 데이터를 추출하면 데이터는 점 형태로 되어 있고 Fig. 1 에서와 같이 얇은 판 형태의 실린더 형상을 보인다. 본 연구에서는 간단한 2 차원 회기 분석을 이용해 곡선 접합하여 휨 현상을 정량적으로 파악하고자 하였다. 곡선 접합을 하기 위해 우선 3D 스캔 이미지 데이터를 추출하면 Fig. 2 의 (a)와 같이 데이터 형상이 대각선으로 기울어져 있다. 이럴 경우 곡선 접합이 어려우므로 스캔 데이터들을 Fig. 2 의 (b)와 같이 xy 평면에 맞게 회전 이동하여 곡선 접합이 용이하도록 하였다.

일반적으로 3D 스캔 이미지 데이터의 경우 3 차원 표면에 대해 곡선 접합하여야 한다. 3 차원 형

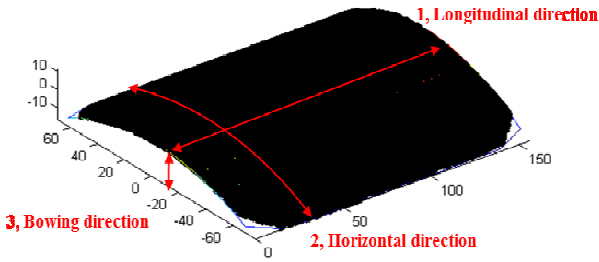


Fig. 3 Least square fitted surface from 3D scan image

상을 곡선접합 할 경우 매우 복잡한 과정을 거치게 된다. 실리콘 태양전지의 휨 현상은 한쪽 방향으로만 곡률이 있고 곡면과 수직한 방향으로 변화가 거의 없는 실린더 형상이다. 곡면과 수직한 방향으로 여러 영역으로 나눌 경우 각 영역이 2차원 곡선 형태가 되므로 각 영역을 Fig. 2의 (c)와 같이 분할하여 3차원이 아닌 2차원 분포에 대해 간단한 회기 분석을 적용하고자 하였다. 분할되는 각 영역의 크기를 작게 할수록 곡선 접합 후 얻어지는 형상의 정확도는 증가하게 되지만, 너무 작은 크기의 영역으로 나눌 경우에는 각 영역에 포함되는 데이터의 수가 부족하게 되어 곡선 접합 결과의 신뢰도가 떨어지게 된다. 본 연구에서는 데이터가 충분히 포함될 수 있도록 10개 정도의 영역으로 나누는 것이 가장 적절한 것으로 파악되었다.

Fig. 2(d)와 같이 각 영역의 중심(central plane)으로 데이터들을 모아 한 평면상에 위치하게 하여 2차원 평면의 데이터(Fig. 2(e))에 대해 최소 제곱법을 사용하여 곡선 접합 하였다. 곡선 접합식은 이차다항식 $f(x) = ax^2 + bx + c$ 를 사용하였다. 곡선 접합식의 신뢰성을 확인하기 위해 잔차를 확인한 결과 모든 경우에 대해 0.99 이상이 나와 신뢰성이 높다고 판단하였다. 따라서 다항식의 차수를 증가하는 것이 불필요하다고 판단하여 2차식 이상 차수를 증가하여 진행하지 않았다. 각 영역에서 곡선 접합한 결과를 조합하면 Fig. 2(f)와 같다.

실리콘 태양전지의 휨 현상은 앞서 언급 했듯이 대칭이 아니라 비대칭적 형상이기 때문에 버니어 캘리퍼스 등을 이용하여 직접적으로 측정할 경우 양 끝 부분과 같이 특정 부분만 측정할 수 있어 측정하지 못하는 부분이 발생하게 된다. 따라서 측정 부분에서 휨 현상의 최대값을 찾기 어렵게 되어 측정결과가 오차를 갖게 된다. 본 연구에서는 보다 정확하게 휨 정도의 최대값을 측정하기 위해 곡선의 양 끝점을 이은 선의 기울기와 곡선

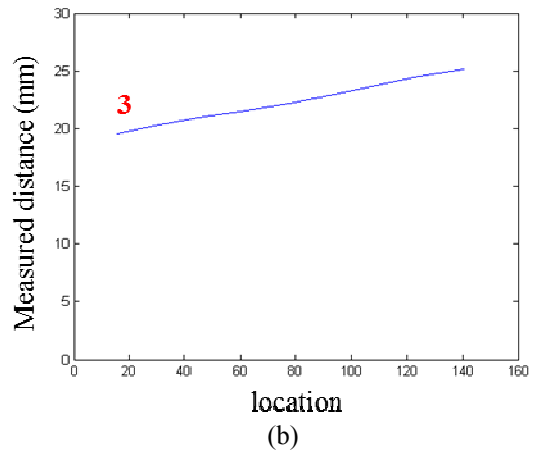
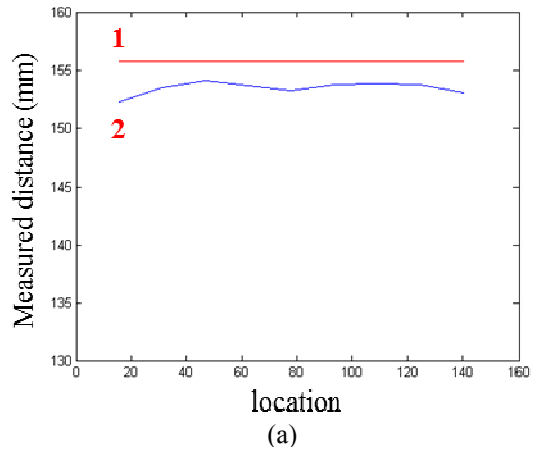


Fig. 4 Longitudinal, horizontal and bowing measurement of the silicon solar cell

상 한 점에서의 기울기가 일치하는 점에서의 수직 거리를 측정하였다(Fig. 2(e)). 각 영역에서 측정된 휨 현상을 조합하면 전체적인 휨 현상의 분포에 대해서도 확인할 수 있다. 이를 이용하여 공정 전후의 전체적인 형상의 변화량에 대해서도 분석하였다. 그리고 휨 현상을 측정하는 부분에서의 곡률을 계산하여 그 분포에 대한 분석 역시 수행하였다. 또한 실리콘 태양전지의 직선길이와 곡선 길이를 측정하여 공정 전후의 전체적인 형상 변화에 대해서도 분석하였다.

Fig. 3은 3D 이미지 스캔 한 결과를 곡선 접합한 결과인데 태양전지의 직선길이(longitudinal), 곡선길이(horizontal) 그리고 휨 현상(bowing)을 측정하였다. Fig. 4는 실리콘 웨이퍼의 두께가 90 μm이고 알루미늄 층의 두께가 40 μm일 때 측정된 결과이며, 결과의 경향성을 자세히 확인하기 위해 그래프를 확대하여 나타내었다. 직선길이와 곡선길이의 경우에는 Fig. 4(a)와 같이 측정 위치에 따른 측정값의 변화가 적은 것을 확인할 수 있고, 휨

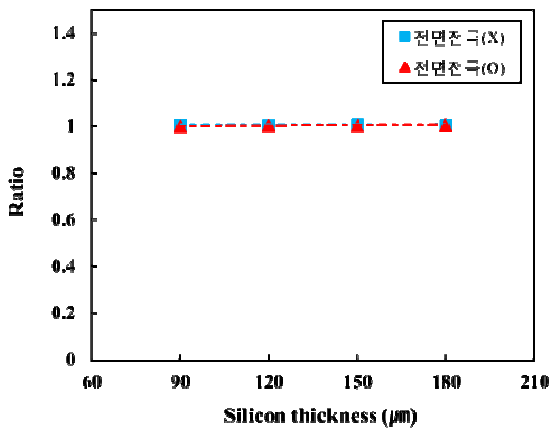


Fig. 5 Longitudinal and horizontal ratio of the silicon solar cell with various silicon thickness

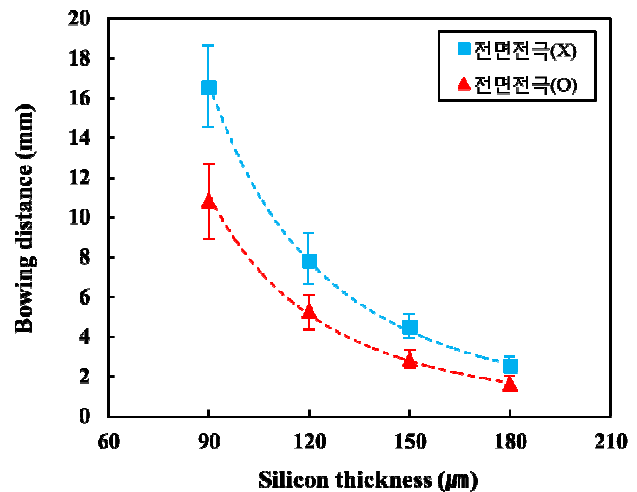
현상의 경우에는 Fig. 4(b)와 같이 측정 위치에 따라 측정 값에 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 변형의 비대칭성을 나타내고, 본 연구에서는 실리콘의 두께가 감소함에 따른 휨 현상의 평균적인 변화뿐만 아니라 각 두께에서 휨 현상의 편차가 어떻게 분포하는 지에 대해서도 분석하고자 하였다.

4. 결과 및 고찰

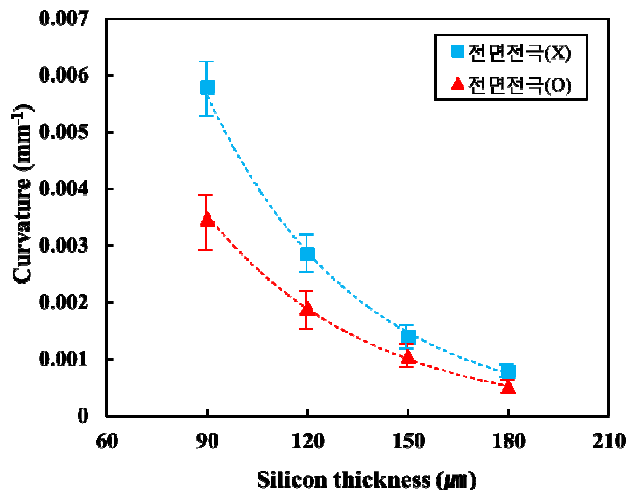
본 연구에서는 일정한 알루미늄 두께에 대해서 실리콘 웨이퍼의 두께를 90, 120, 150, 180 μm 으로 가변 하였을 때의 휨 현상이 어떻게 변화하는지, 그리고 전면의 Ag 전극의 유무가 휨 현상에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

태양전지 제작 공정 전 후 전체적인 형상의 변화율에 대해 파악하기 위해 Fig. 3 에서와 같이 실리콘 태양전지의 직선 길이(longitudinal)와 곡선 길이(horizontal)를 측정하였고, Fig. 5 는 공정 전후의 길이 변화율을 나타낸다. 태양전지 제작 과정 전후의 길이 변화율은 실리콘 웨이퍼의 두께변화에 대해 그 차이가 미비하여 거의 일정하다고 할 수 있다. 따라서 실리콘 태양전지의 두께를 감소하여 제작 할 경우 공정 전후 길이 변화에는 영향이 없다는 것을 확인하였다.

Fig. 6 은 실리콘 웨이퍼의 두께를 90, 120, 150, 180 μm 으로 가변하였을 때 휨 현상을 측정된 결과이다. 측정된 결과의 정확성을 높이기 위해 각각의 경우에 대해 여러 샘플을 측정하였으며 보여진 결과는 그에 대한 평균한 값을 나타낸다. 또한 측정샘플들 중에서의 최대 및 최소값을 error bar 형태로 추가하여 표시하였다. 실리콘 웨이퍼의 두께가 감소할수록 휨



(a)



(b)

Fig. 6 Bowing and curvature measurement of the silicon solar cell with various silicon thickness

정도는 급격하게 증가하며 곡률 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 실리콘 웨이퍼의 두께가 감소할수록 형상 내에서 휨 정도의 편차가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 실리콘 웨이퍼의 두께가 두꺼울 경우 형상의 비 대칭성이나 휨 현상이 문제가 되지는 않지만 초박형 실리콘 태양전지를 제작할 경우에는 휨 현상이 증가할 뿐만 아니라 형상의 비 대칭성도 증가하는 것을 나타낸다.

또한 Ag 전극을 부착한 경우 부착하지 않았을 때보다 휨 현상이 작게 측정됨을 확인할 수 있었고, 휨 정도의 편차 또한 Ag 전극이 있는 경우가 그렇지 않은 경우보다 작게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Ag 전극을 부착하여 태양전지를 제작할 경우 휨 현상을 어느 정도 완화시킬 수 있다는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 실리콘 태양전지에서 실리콘 층의 두께를 가변 하였을 경우 휨 정도에 대해 정밀하게 측정하고자 하였다. 또한 Ag 전극의 부착 유무가 휨 현상에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 측정결과와 신뢰성을 높이고 비 대칭적 형상에 대해 자세하고 정밀하게 분석하기 위해 3D 이미지 스캐너를 사용하였다. 그 결과 실리콘 웨이퍼의 두께가 감소할수록 휨 정도는 급격하게 증가하였으며 곡률 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 실리콘 웨이퍼의 두께가 감소할 수록 휨 정도의 편차가 증가하여 형상의 비대칭성이 증가하는 것 또한 확인되었다. 형상의 길이 변화는 없는 것을 확인하였고, Ag 전극의 부착이 휨 현상을 어느 정도 감소시키는 것을 알 수 있었다.

실리콘 태양전지의 휨 현상을 제어하기 위해서는 실리콘 두께의 영향 뿐만 아니라 다양한 열적 조건이 휨 현상에 어떠한 영향을 주는지에 대해 파악되어야 하고, 수치해석이 보다 적합한 해석도구로 활용될 수 있다. 본 연구의 결과는 향후 진행하게 될 컴퓨터 시뮬레이션 해석 결과의 검증에 매우 중요한 비교자료로 활용될 예정이다.

후 기

이 논문은 2012 년 한국에너지기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. GP2012-0002).

참고문헌

- (1) Meemongkolkiat, V., Nakayashiki, K., Kim, D. S., Kopecek, R. and Rohatgi, A., 2006, "Factors Limiting the Formation of Uniform and Thick Aluminum-Back-Surface Field and Its Potential," *Journal of the Electrochemical Society*, 153(1) G53-G58.
- (2) Khadilkar, C., Kim, S., Shaikh, A., Sridharan, S. and Pham, T., 2005, "Characterization of Al Back Contact in a Silicon Solar Cell," *Presented at the International PVSEC-15*, Shanghai, China
- (3) Hilal, M. M., Gee, J. M. and Hacke, P., "Bow in Screen-printed Back-contact Industrial Silicon Silicon Solar Cells," *Solar Energy Materials and Solar Cell*, Vol. 91, Issue. 13, pp. 1228~1233.
- (4) Chen, C.-H., Lin, F.-M., Hu, H.-T. and Yeh, F.-Y., 2009, "Residual Stress and Bow Analysis for Silicon Solar Cell Induced by Soldering," paper on, webpage: 140.116.36.16/paper/
- (5) Huster, F., 2005, "Aluminum Back Surface Field : Bow Investigation and Elimination," *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Pre-Print, 2AO.2.1.
- (6) Schneider, A., Gerhards, C., Fath, P., Bucher, E., Young, R.J.S., Raby, J.A. and Carroll, A.F., "Bow Reducing Factors for Thin Screenprinted MC-Si Solar Cells with Al BSF," 2002, *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*, pp. 336~339.
- (7) Baek, T. H., Hong, J. H., Lim, K. j., Kang, G. H., Kang, M. G. and Song, H. E., 2012, "Bow Reduction in Thin Crystalline Silicon Solar Cell with Control of Rear Aluminum Layer Thickness," *Trans. of the Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 32, No. 3, pp.193~198.

(1) Meemongkolkiat, V., Nakayashiki, K., Kim, D. S.,