

## 금속기판재에 따른 박막형 태양전지의 열변형량 예측에 관한 연구

구 승현<sup>1)</sup>, 이 흥렬<sup>2)</sup>, 임 태홍<sup>3)</sup>

### Study on the prediction about thermal deformation of thin film solar cell according to metal substrates

Seunghyun Koo, Heungyeol Lee, TaiHong Yim

**Key words** : Flexible substrate(연성기판재), Thermal expansion behavior(열팽창 거동), Alloy foil(합금포일), Finite Element Methode (유한요소해석), Flexible solar cell(플렉서블 태양전지)

**Abstract** : 박막형 태양전지 및 플렉서블 태양전지 기판으로 사용되는 금속기판의 우수성은 잘 알려져 있다. 그러나 상용 금속기판이 직면하고 있는 문제점을 보완하기 위해서 전주법으로 제조된 2원합금 금속포일을 개발하였으며, 박막형 및 플렉서블 태양전지의 기판재로 적용가능성을 확인하였다.

일반적으로 태양전지를 제조할 때 열 공정이 수행되며, 이때 기판재와 cell을 구성하는 반도체의 열팽창 계수 차이에 의한 열변형으로 결함이 발생될 수 있고, 태양전지 효율 및 수명을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 이러한 원인이 될 수 있는 구성 재료간의 열팽창계수 차이에 의한 cell의 변형량을 추정하기 위해 유한요소해석 방법을 사용하였다. 유한요소해석을 수행하기 위해 ALGOR 라는 해석 tool 을 사용하였다.

유한요소해석 수행에 사용된 상용 금속인 Mo, Ti, Al, SUS 포일과 전주법으로 제조된 2원합금 금속포일의 열팽창 계수는 실험을 통한 측정치이며, cell을 구성하는 반도체의 열팽창 계수와 열특성은 참고 문헌에 있는 자료들이다. 이 값들을 기반으로 cell의 구성을 단순화시킨 가상의 태양전지가 제조 공정 온도에서 상온으로 냉각될 때의 열변형량을 계산하였다.

#### subscript

FEA : Finite element analysis  
Mo : Molybdenum  
Ti : Titanium  
Al : Aluminum  
SUS : stainless steel  
CIS : Copper indium selenide

#### 1. 서론

세계적으로 태양광을 이용한 태양전지 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 고가의 Si 사용으로 인한 높은 생산단가로 인하여 보급화에 어려움을 보이고 있다. 이것을 대체하기 위해 박막 형태의 태양전지 연구가 진행되기 시작했으며, 그중 한 분야로써 연성 기판을 적용한 태양전지 연구도 진행되고 있다.

연성기판으로 적용되고 있는 기판들은 크게 폴리머와 금속기판으로 나누어지며, 각각의 연성

기판은 각 분야에 적절한 범위에서 사용되고 있지만 기판으로써의 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 재료들의 단점을 보완하여 전주법<sup>1)2)</sup>으로 제조된 Fe-Ni 합금 기판재를 개발하였다.

플렉서블 태양전지를 제조하기 위해서는 기판과 cell 층의 열안정성이 중요하다. 따라서 기판으로 적용하기 위해서는 태양전지 제조 공정온도에서 상온으로 갈 때 cell 역할을 하는 반도체와 기판과의 열팽창 계수 차이에 의한 열변형이 최소화 되어야 효율이 좋은 태양전지를 개발 할 수가 있다. 따라서 선행 연구를 통하여 플렉서블 태양전지 기판으로 적용하기 위해서 현재 응용되고 있는 금속기판과 전주법으로 제조된 Fe-Ni 합

- 1) 한국생산기술연구원  
E-mail : ksh75@kitech.re.kr  
Tel : (032)850-0251 Fax : (032)850-0450
- 2) 한국생산기술연구원  
E-mail : hylee@kitech.re.kr  
Tel : (032)850-0239 Fax : (032)850-0230
- 3) 한국생산기술연구원  
E-mail : thyim@kitech.re.kr  
Tel : (032)850-0233 Fax : (032)850-0230

금 기판의 열팽창 거동을 분석하였다<sup>3)</sup>. 그러나 이것을 바탕으로 열팽창 거동에 따른 cell 층과 기판과의 열변형 실험은 많은 시간과 노력이 소모된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 유한요소법을 사용하였다.

유한요소해석법은 형상을 모델링하여 수치계산을 통하여 열변형을 손쉽게 판단할 수 있어 널리 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 cell과 기판의 열팽창 거동 차이에 의한 문제점을 확인하고, 어떤 기판이 플렉서블 태양전지 기판으로 만족하는지 확인하였다.

## 2. 해석조건

유한요소해석법을 적용하여 cell과 기판의 온도에 따른 열변형을 해석하기 위해서는 해석에 사용되는 재료의 물리적 특성이 필요하다. 선행 연구를 통하여 적용되는 재료의 열팽창 거동을 측정하여 열팽창 계수를 확보하였다<sup>1)-2)</sup>. 그리고 SiO<sub>2</sub><sup>4)</sup> 열팽창 계수는 참고문헌에서 확보하였다. 또한 CIS<sup>5)</sup>의 열팽창 계수는 상온에서 500 °C까지  $8.3 \times 10^{-6}$  으로 일정한 것으로 가정하였다. 그리고 표1은 각재료의 밀도, 탄성계수, poisson's ratio 등을 참고문헌을<sup>2)-9)</sup> 통하여 확인하였다.

해석에 사용된 상용금속 기판은 Mo(99.95%), SUS, Ti(garde2), Al(99.9%) 이며, 전주법으로 제조된 Fe-42Ni 합금을 사용하였다. 그리고 절연층으로 SiO<sub>2</sub> 와 후면전극으로 Mo를 적용하였다. 최종적으로 CIS를 적용하였다.

해석을 수행하기 위해 플렉서블 태양전지 형상을 2차원으로 Modeling 하였다. 형상은 길이 200  $\mu$ m, 두께 50  $\mu$ m 의 기판과, 절연체로 두께 1  $\mu$ m 의 SiO<sub>2</sub>를, 그리고 후면전극으로 두께 1  $\mu$ m 의 Mo를 설계하였다. Cell 형상의 길이를 200  $\mu$ m 로 가정하여 계산한 것은 계산결과를 cell 두께 50  $\mu$ m 와 대비하여 한 장의 그림으로 쉽게 나타내기 위해서 이다. 그리고 CIS 화합물을 3  $\mu$ m로 하여 가정하였다. (그림1). 그리고 기판의 한점을 고정시켰으며, 바닥위에 모델이 존재하도록 설정하였다. 그리고 500 °C에서 상온으로 냉각했을 때의 열변형을 기판부분의 재료들만 교체하여 해석하였다. 그리고 계면과 계면사이는 매우 치밀하게 결합되어 있으며, 탄성영역 내에서만 변형이 발생한다는 조건 하에서 해석을 수행하였다.

ALGOR 라는 tool 가지고 위의 모든 조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

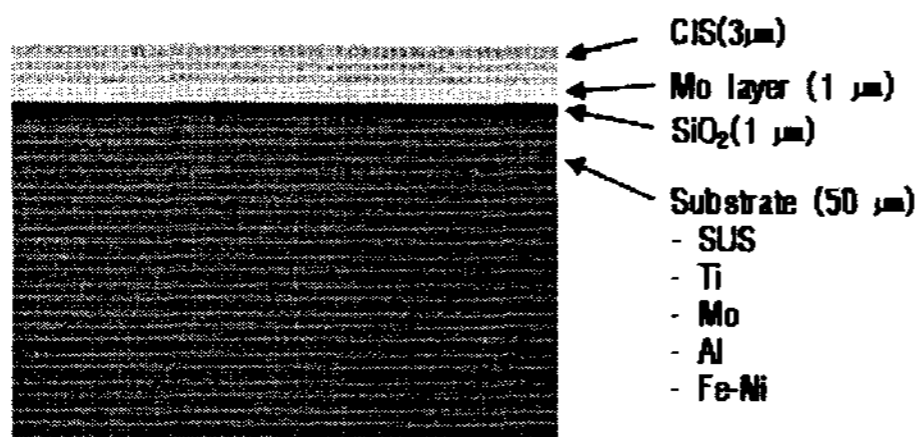


Fig.1 The finite element model of CIS solar cell

Table.2 The Properties of materials.

Materials	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elasticity modulus(GPa)	poisson's ratio
CIS	5.77	110	0.34
SiO <sub>2</sub>	2.2	75	0.17
Molybdenum	10.22	310	0.31
SUS	7.9	193	0.29
Titanium	8.7	128	0.34
Aluminum	2.4	62	0.33
Fe-Ni	8.1	147	0.25

## 3. 실험 결과

### 3-1. 상용금속 기판재를 적용한 해석

Al 기판을 적용하여 해석을 수행하였다. Al<sup>6)</sup> 기판은 열팽창 계수가 cell을 형성하는 CIS 층 보다 높은 것으로 나타났다. 따라서 기판과 cell 층간의 열팽창 계수의 차이로 인하여 cell 층에 인장이 걸릴 것으로 예측된다. 그리고 해석을 통하여 두 층의 열팽창 차이로 인하여 cell층에 인장이 걸리는 것으로 확인되었다.

그림2는 500 °C에서 상온으로 냉각되었을 때의 변형을 보여주고 있으며, 실제 값에 약 10% 로 scale up 하여 나타내었다. 최대 변형량은 기판재인 Al에서 약 2.5  $\mu$ m 수축하는 것으로 나타났으며, 최대 변형은 SiO<sub>2</sub> 와 Al 기판 사이에서 약 2% 로 나타났다.

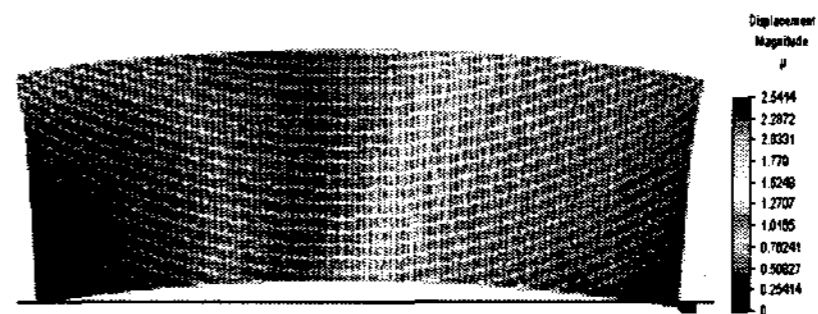


Fig.2 The displacement result of Finite element analysis of flexible solar cell applied aluminum substrate

Mo<sup>7)</sup> 기판을 적용하여 해석을 수행하였다. Mo 는 재료가 수축하는 결과를 나타내어 본 해석에 자료를 사용하기에 어려움이 있었다. 따라서 기존의 알려진 값을 찾아 해석에 사용하였다.

Mo 기판은 CIS 층과 비교하면 낮은 열팽창 계수를 갖는다. 따라서 CIS 층이 압축응력을 받을 것으로 예상되었다.

그림3은 Mo 기판을 적용하여 해석한 결과이다. 열팽창 계수 차이에 CIS 층에 압축이 걸리는 것으로 나타났다. 또한 최대 변형량은 CIS 층에서 약 0.5  $\mu$ m 수축하는 것으로 나타났다. 또한 최대 변형률은 약 0.39 %로 Mo 기판과 SiO<sub>2</sub> 층에서 나타났다. Al 기판을 적용할 때보다 고온공정 후 냉각시 안정성이 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 Mo 기판을 적용한다면 고온공정 후 냉각시 열변형에 의한 결함을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

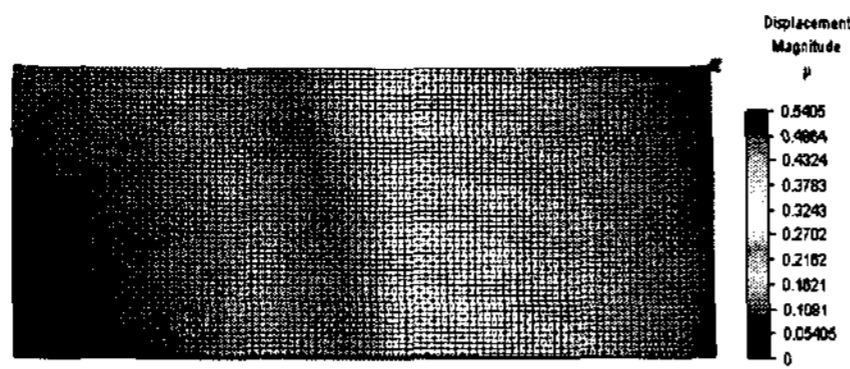


Fig.3 The displacement result of finite element analysis of flexible solar cell applied Molybdenum substrate

SUS<sup>8)</sup>기판을 적용하여 해석을 수행하였다. SUS 기판은 CIS 층과 비교하면 높은 열팽창 계수를 갖는다. 따라서 CIS 층이 인장응력을 받을 것으로 예상된다.

그림4는 SUS 기판을 적용하여 해석한 결과이다. 열팽창 계수 차이에 CIS 층에 인장이 걸리는 것으로 나타났다. 최대 변형량은 SUS 층에서 발생했으며 약 1.64 μm 정도 수축하는 것으로 나타났다. 또한 최대 변형률은 SiO<sub>2</sub> 층과 Mo layer 사이에서 발생하였으며 약 1.6% 값을 나타내었다. Al 보다 낮은 값을 보이고 있어 Al 기판보다 적용가능성이 높은 것으로 판단된다.

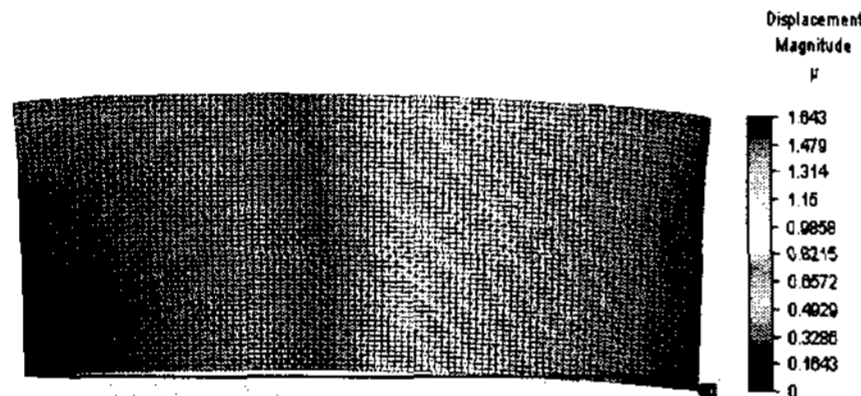


Fig.4 The displacement result of Finite element analysis of flexible solar cell applied Stainless steel substrate

Ti<sup>9)</sup>기판을 적용하여 해석을 수행하였다. Ti 기판과 CIS 층의 열팽창 계수는 Ti 가 높은 것으로 나타났으며, 이론상으로 CIS 층에 인장이 걸릴 것으로 판단된다.

그림5는 Ti 기판을 적용하여 해석한 결과이다. 열팽창 계수 차이에 의해 CIS 층에 인장이 걸리는 것으로 나타났다. Ti 기판 쪽에 최대 변형량이 발생하였으며, 그 값은 약 0.8 μm 정도로 나타났다. 또한 최대 변형률은 SiO<sub>2</sub> 층과 Mo layer 층에서 발생하였으며 그 값은 약 0.5% 로 나타났다.

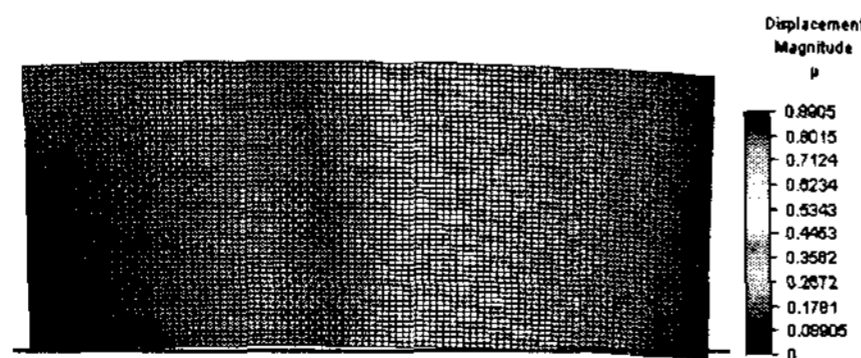


Fig.5 The displacement result of Finite element analysis of flexible solar cell applied Titanium substrate

### 3-2. Fe-Ni 합금 기판재를 적용한 해석

전주법으로 제조된 Fe-Ni<sup>3)</sup> 합금을 플렉서블 태

양전지용 기판으로 사용될 경우 cell 층과 기판층의 열팽창 거동에 따른 변화를 관찰하고자 유한요소해석법을 적용하여 분석하였다. 기판으로 사용된 합금은 Fe-42Ni 이다.

그림6은 전주법으로 제조된 Fe-42Ni 합금 기판재를 적용하여 해석한 결과를 보여주고 있다. 최대 변형량은 0.4 μm 로 CIS 층에서 발생하였으며, 최대 변형률은 Fe-Ni 기판과 SiO<sub>2</sub> 층 사이에서 0.4% 로 나타났다. 상용 금속 기판재보다 전주법으로 제조된 Fe-Ni 합금 기판재가 플렉서블 태양전지용으로 적용 가능 할 것으로 판단된다.

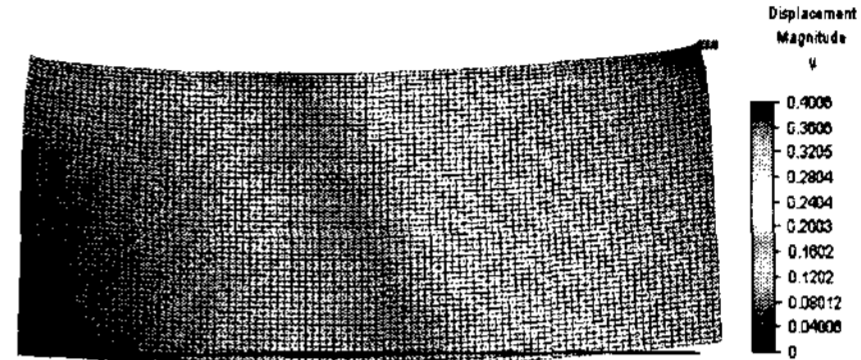


Fig.6 The displacement result of Finite element analysis of flexible solar cell applied Titanium substrate

표2는 적용된 금속기판의 종류에 따라서 발생하는 최대변위량과 최대 strain von mises 을 정리한 것이다. Mo, Ti 와 Fe-Ni 기판을 적용한 해석에서 매우 안정적인 변형량 과 변형률을 얻을 수 있었다. 그리고 Al 기판은 높은 값을 나타내어 플렉서블 태양전지용 기판으로 적절하지 않는 것으로 확인 되었다. 또한 절연층으로 들어간 SiO<sub>2</sub> 층이 열공정 후 냉각시 낮은 열팽창 거동으로 변형에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 열팽창 거동이 비슷한 다른 절연층으로 대체하는 것이 필요하다고 생각된다.

무거운 Mo 와 고가의 Ti 기판은 생산성 측면에서 적절하지 못하므로 가볍고 생산단가도 저렴한 전주법으로 제조된 Fe-Ni 합금이 플렉서블 태양전지용 기판으로 적절하다고 판단된다.

Table.2 The result of finite element analysis of flexible solar cell model applied commercial metal and electrodeposited Fe-Ni

Substrate	Max displacement (μm)	Max. Strain (%)	Stress type of CIS layer	Strain of CIS layer (Max,%)
Al	2.5	2	인장	0.5
Mo	0.5	0.39	압축	0.35
SUS	1.64	1.6	인장	0.41
Ti	0.8	0.5	인장	0.37
Fe-Ni	0.4	0.4	압축	0.32

## 4. 결론

상용금속 기판과 전주법으로 제조된 Fe-Ni 합금 기판을 적용한 플렉서블 태양전지 모델을 설

계하여, 유한요소해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 플렉서블 태양전지용 기판에 적용하기 위해서는 cell 역할을 수행하는 반도체 층과 비슷한 열팽창 거동을 갖는 기판을 사용해야 된다.

2) 500 °C에서 상온까지 냉각하는 태양전지 제조공정 적용을 가정 하에 계산하였을 때 열변형량은 Al, SUS, Ti, Mo, Fe-Ni 순으로 줄어든다.

3) 전주법으로 제조된 Fe-Ni 합금 기판은 플렉서블 태양전지용 기판에 매우 우수한 재료임이 해석을 통해서 간접적으로 확인되었다.

4) 매우 낮은 열팽창 계수를 갖는 절연층은 변형에 큰 원인을 제공하고 있으므로, 태양전지 생산하기 위해서는 서로 다른 재료들과의 열팽창 거동을 고려해서 설계되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 신재생에너지기술개발사업 일환으로 수행되었습니다.

## References

- [1] 임태홍, 이흥렬, 2000, "전착공정에 의한 나노결정질 Ni-Fe 합금의 특성 및 응용" 제3회 국방소재 학술대회 논문집 pp a277-a286
- [2] 임태홍, 이흥렬, 구승현, 허영두. 2006 "플렉서블 태양전지 적용을 위한 2원합금 포일의 열팽창 특성 연구", 한국신재생에너지학회 춘계학술대회논문집 p556-559
- [3] 임태홍, 이흥렬, 구승현, 2007, "플렉서블 태양전지 기판재용 금속포일의 열팽창 특성 연구", 한국신재생에너지학회 춘계학술대회 논문집 p265
- [4] 김동원, 김홍재, 이낙규, 최태훈, 나경환, 권동일, 2003, "EPSI를 이용한 MEMS용 소재의 열팽창 계수 온도 의존성 평가", 대한기계학회 2003년도 춘계학술대회 논문집 p1315
- [5] Karsten otte, Liudmila, Alexander Braun, Igor konovalov, 2006, "Flexible Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cell for space application" thin solid films 511-512 p613~p622
- [6] John E. Hatch, 1984 "aluminum properties and physical metallurgy" ASM, Metals park, Ohio, p19
- [7] Raymond L. smith, Allan ray Putnam, 1986 "Metal handbook ninth edition" volum3, ASM international, p341
- [8] Raymond L. smith, Allan ray Putnam, 1986 "Metal handbook ninth edition" volum3, ASM international, p23, p34
- [9] Raymond L. smith, Allan ray Putnam, 1986 "Metal handbook ninth edition" volum3, ASM international, p372