

기계 하중에 따른 PV모듈 변형 분석

An analysis of the deformation of PV module under different mechanical loads

최주호*, 정태희**, 송희은***, 김일수****, 장효식*****, 강기환*****† ,
Choi, Ju-Ho*, Jung, Tea-Hee**, Song, Hee-Eun***, Kim, Il-Soo****, Chang,
Hyo-Sik*****, Kang, Gi-Hwan*****†

(Submit date: 2013. 5. 2. Judgment date: 2013. 5. 10. Publication decide date: 2013. 6. 24.)

Abstract : Recently, PV module that the most important part of the photovoltaic system is more widened to lower manufacturing costs for module. However, the broad PV module results to the serious mechanical damage coming from installation circumstances such as snow, wind etc of snow and finally lead to the dramatic degradation of the electrical behavior of PV module. In this paper, 3 kinds of PV modules that consist of the different thickness and area of front glass and the diverse cross sectional structures of the frame are prepared for this experiment. The drooped length and electrical outputs of the PV modules are measured by means of applying 600Pa mechanical load to the PV modules from 1200Pa to 5400Pa base on the mechanical load test procedure of K SC IEC 61215 standard. The simulation data are obtained by the simulation tool as ANSYS and those are validate by comparing with the those experimental results figure out relations between the deformation and the constituent part of PV module.

Key Words : 태양전지 모듈(PV module), 기계하중(Mechanical loads), 태양전지 모듈변형(Deformation of PV module), 앤시스 프로그램(Ansys program), 처짐량(Drooped length)

*****† 강기환(교신저자) : 한국에너지기술연구원
E-mail : ghkang@kier.re.kr, Tel : 042-860-3418
*최주호 : 충남대학교 녹색에너지기술전문대학원
**정태희 : 한국에너지기술연구원
***송희은 : 한국에너지기술연구원
****김일수 : 목포대학교 기계공학과
*****장효식 : 충남대학교 녹색에너지기술전문대학원

*****† Kang Gi-Hwan(corresponding author) : Solar Energy Department, Korea Institute of Energy Research(KIER).
E-mail : ghkang@kier.re.kr, Tel : 042-860-3418
*Choi Ju-Ho : Graduate School of Green Energy Technology, Chungnam National University.
**Jung Tae-Hee : Solar Energy Department, Korea Institute of Energy Research(KIER).
***Song Hee-Eun : Solar Energy Department, Korea Institute of Energy Research(KIER).
****Kim Il-Soo : Department of Mechanical Engineering, Mokpo University.
*****Chang Hyo-Sik : Graduate School of Green Energy Technology, Chungnam National University

1. 서 론

PV모듈은 옥외에서 약 20년 이상의 장기간 노출 때문에 자연환경의 영향을 강하게 받는다. PV모듈의 성능 또는 수명에 영향을 미치는 주요 요인으로는 태양광선 중의 자외선, 온도변화, 습도, 바람, 적설, 결빙, 우박 등에 의한 기계적 스트레스, 염분, 기타 부식성 가스 또는 모래, 분진 등을 생각할 수 있다. 이러한 가혹한 환경으로부터 태양전지를 보호하고 PV모듈의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방안에 관한 연구를 다양하게 진행하고 있다. [1][2]

특히 풍압과 같은 동하중은 태양광 시스템 전체의 파손 및 일부를 손상시킬 수도 있으며, 때에 따라 주기적이고 지속적인 풍압의 변화에 의해 PV모듈의 끝부분만 큰 하중을 가하여 변형을 유발하게 됨으로써 PV모듈의 내구성 및 출력저하에 관한 결과가 보고된바 있다.[3]

PV모듈에 정하중이 지속적으로 작용하게 될 때 동적하중에서 보다 PV모듈에 더 큰 영향을 미치게 되며, 정·동하중에 복합적으로 작용할 때 PV모듈의 항복강도 변화에 더욱 큰 영향을 더 미치게 된다. 외부하중은 태양전지의 파괴 및 크랙(Crack)을 발생시켜 PV모듈의 출력을 저하시킬 뿐 아니라 PV모듈 수명이 직접적으로 영향을 미치게 된다.[4][5]

경우에 따라 강한 외부하중을 인가한 PV모듈이 초기에는 마이크로크랙(Micro-crack)이나 혹은 크랙이 발생하지 않을 수도 있지만 주기적인 온도 변화에서는 크랙이 성장하고 미스매치(mismatch)에 의한 PV모듈 내 태양전지 열화가 가속되어 PV모듈의 수명을 단축시키는 결과를 초래하는 것을 볼 수 있다. [6]

외부하중은 PV모듈의 변형(Deformation)에 영향을 미치며 PV모듈의 모든 구성요소가

변형되지만, 그 중 리본(Ribbon)과 태양전지의 접합 부분은 금속성분으로써 변형에 더욱 취약하다. 따라서 외부하중 변화에 태양전지와 리본의 결합을 유지시키기 위하여 납땜(Soldering)으로 접합(Contact)하는 방식 대신 전도성 필름을 이용한 ECA(Electrical Conductive Adhesive) 방법과 보다 낮은 온도에서 접합할 수 있는 물질에 관한 다양한 연구가 진행되어지고 있다.[7]

외부하중은 PV모듈 전체 구성요소의 고유 특성을 저하시키는 중요한 원인으로써 각각의 PV모듈 구성 요소가 PV모듈 전체의 변형에 영향을 미치는 분석의 필요성은 항상 존재하게 된다.

본 연구에서는 PV모듈에 작용하는 하중으로 인한 PV모듈 내부의 태양전지 파손과 PV모듈 전체의 출력 감소 최소화를 위하여 PV모듈의 변형을 변화에 영향을 미치는 PV모듈 구성요소를 분석하였다. 이를 위해 PV모듈의 면적과 구성요소가 서로 다른 각각의 PV모듈을 이용하여 출력 및 하중 변화에 대해 변형률을 측정하였다. 또한 변형률 변화를 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 각각의 PV모듈 구성요소가 하중변화에 따른 PV모듈 전체의 변형률에 어떤 영향을 미치는지에 대해 확인 할 수 있었다.

2. PV모듈 기계하중 측정

2.1 실험장치

본 실험에서는 Sun simulator를 사용하여 IEC61215에서 요구하는 PV모듈의 발전성능시험 기준에 따라 STC(Standard Test Condition) 조건인 온도 25°C, 광원 1kW/m²에서 PV모듈의 출력을 측정하였다. PV모듈에 하중을 가하였을 때 태양전지의 파손 여부를 확인하기 위

하여 EL(Electro- luminescence) 장비를 사용하였다. 일반적으로 측정 시료에 전류를 흘려주게 되면 열이 발생하게 된다. 이때 발생하는 열의 적외선을 통해 제품의 불량을 확인하는 방법이 EL측정 방법이다. PV모듈의 경우 발전할 수 있는 정격 전류와 동일한 전류를 PV모듈에 흘려주면 태양전지는 적외선이 발생한다. 태양전지에서 전류가 흐르는 부분은 열이 발생하며, 파손된 부분은 비활성화 되어 열을 발산하지 않으므로 암 상태를 나타낸다. EL장비의 이러한 원리를 이용하여 눈에 보이지 않는 태양전지의 마이크로크랙에 대해 확인하는데 사용했다. 기계하중 장비를 이용하여 PV모듈 전면에 일정한 압축하중을 가하고 PV모듈 후면에는 지지대를 설치하여, 하중의 증가에 따른 PV모듈의 변형률 및 파손 여부를 파악 할 수 있다.

2.2 실험방법

PV모듈에서 물리적인 변형에 관여하는 요소는 유리의 두께, 크기, back sheet와 EVA sheet의 결합력뿐만 아니라 프레임의 구조 등 다양하게 존재한다.

본 연구에서 사용된 PV모듈은 구조간의 결합력 차는 존재하지 않고 프레임의 구조와 유리의 두께 및 크기에 따라서 변형된다고만 가정하였다. 실험을 진행하기 위해서 전면 유리 및 프레임 구조가 다른 3종류의 PV모듈을 제작하였다. IEC 61215인증의 기계하중 시험방법과 유사한 방법으로 진행하였다. PV모듈에 하중을 가하기 전·후에 EL측정을 통한 마이크로크랙 확인과 I-V Curve를 통한 출력 감소 확인은 IEC 61215에서 실험하는 2400Pa, 5400Pa의 하중이 적용된 후 측정하였다. 이때 하중에 대한 PV모듈의 변형을 자세히 확인하고자 1200Pa에서부터 600Pa씩 증가하여

5400Pa까지 하중을 가하면서 변형을 확인하였다. 3종류의 PV모듈 각 요소를 제작하여 하중에 대한 PV모듈의 변형률의 변화를 확인하고자 기계하중 실험을 수행하였다. 각 PV모듈과 프레임 단면의 간략도는

Fig. 2-1에 나타내었으며, PV모듈의 상세 크기와 PV모듈의 변형에 중요한 요소로 판단되는 A~D2는 Table 2-1에 나타내었다. PV모듈은 일반적으로 유리, EVA(Ethylene vinyl acetate), 태양전지, Back sheet로 구성되며, 프레임과 결합된다.

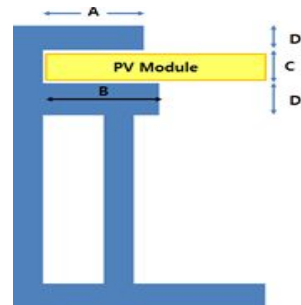


Fig 2-1 Diagram of PV module near frame

Table 2-1에서 Module_B는 다른 두 PV모듈보다 약 65% 큰 면적을 가지며, Module_A와 Module_C의 면적은 거의 동일하며 유리의 두께는 각각 3.2mm, 4mm를 갖는다. Module_A, B, C 세 요소의 차이가 있음을 볼 수 있다.

Table 2-1 PV module size

Module type		Module_ A	Module_ B	Module_ C
Module size (mm)	Width	999	1,308	1,001
	Length	1,665	1,960	1,675
Frame cross-section size (mm)	A	10.5	12.3	14
	B	10.5	12.8	11.8
	C	5.2	6	6.2
	D1	1.6	2.3	1.6
D2	1.6	2.3	1.6	
Glass (mm)	Thickness	3.2	4	4

2.3 하중에 따른 태양전지 파손 변화

EL장비를 이용하여 Module_A, B, C의 하중 작용에 따른 마이크로크랙의 변화를 확인할 수 있다. PV모듈에 하중이 작용하지 않을 때는 파손된 영역이 보이지 않았으며, 2400Pa에

서는 Module_B와 Module_C는 파손된 영역을 확인할 수 없었으며 Module_A는 약간의 파손이 발생되었다. 5400Pa의 경우 Module_B는 유리가 하중을 견디지 못하고 완전히 파괴되었으며, Module_A와 Module_C는 파손된 태양전지가 다수 발생되어 다른 부분 보다 어둡게 나타나는

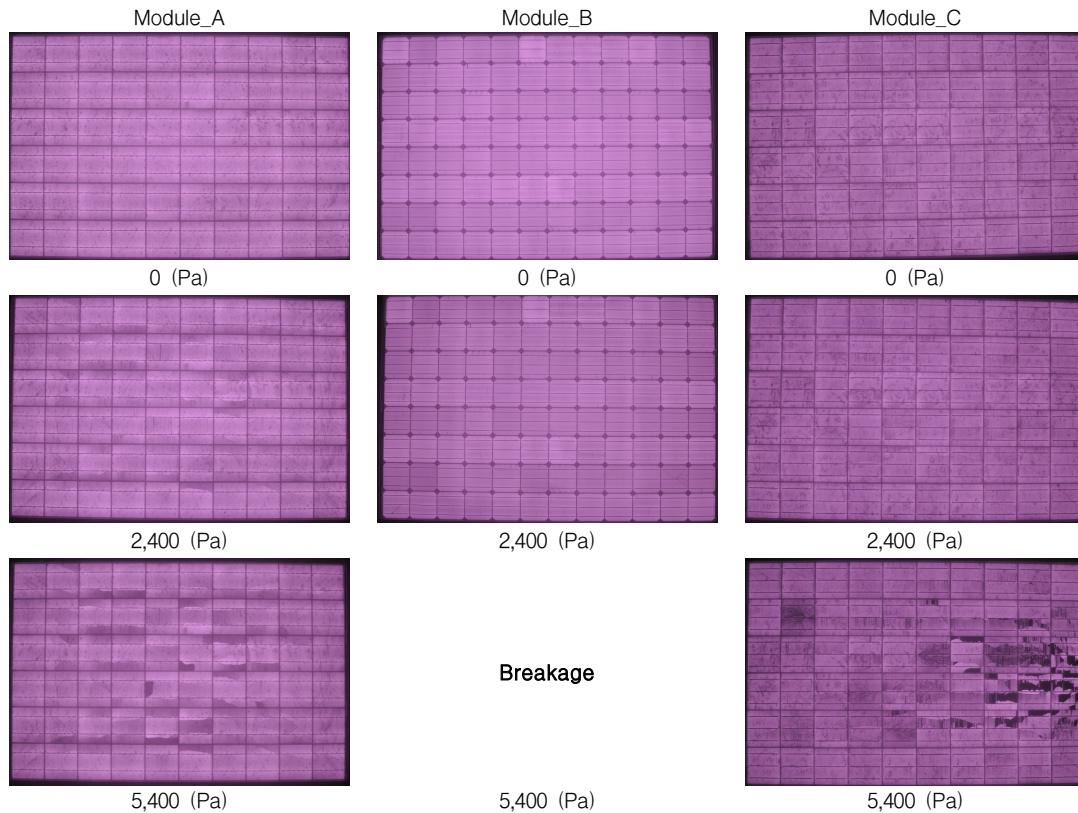


Fig.2-2 EL images of PV modules applied with the different mechanical loads

것을 확인 할 수 있다. 이러한 부분은 태양전지가 파손됨으로 인해 태양전지의 전극이 분리되고, Ribbon과 태양전지의 분리 등으로 인해 비활성화 된 영역이 다수 발생되었기 때문이다. 특히 Module_C의 알루미늄프레임이 유리의 변형률의 하중을 견디지 못하여 일부 특정부분에서 다수의 태양전지가 파손된 것으로 보인다.

2.4 PV모듈 출력 분석

세 개의 PV모듈 중에서 A와 C는 크기가 거의 동일하며, B는 대형PV모듈에 속하게 된다. Fig. 2-3에서 Module_A의 I-V Curve는 2400Pa까지 출력의 변화가 없었지만 5400Pa

에서 4.3%의 출력 감소가 나타남을 확인할 수 있다. Module_B의 그래프는 보는 바와 같이 2400Pa의 하중에서 출력의 변형이 거의 발생되지 않았다. 그러나 5400Pa의 하중이 시작되기 직전에 PV모듈의 유리가 파손됨으로 인해 더 이상 출력 측정이 불가능하게 되었다. Module_C의 출력 변화 그래프는 보는 바와 같이 2400Pa까지는 출력의 변화가 거의 없었지만 5400Pa의 하중이 작용된 후 20.3%의 출력감소가 발생됨을 알 수 있다. 이 때 그래프가 단계별로 감소되는 이유는 PV모듈 내부의 스트링에서 파손된 태양전지의 비율의

차이가 발생하여 바이패스다이오드가 작동하므로 계단형식으로 감소되는 그래프가 나타나게 되었다.

Fig. 2-4에서와 같이 PV모듈에 작용하는 하중에 따라 변화를 나타낸다. Module_B는 4200Pa까지 일정하게 변형되었지만 4800Pa에서 급격하게 변형이 증가되었다. 4800Pa이후에는 PV모듈의 항복강도를 벗어나게 되어 더 이상 측정이 불가능하게 되었다. Module_A, C는 4800Pa까지 일정하게 변형이 증가하지만 5400Pa의 하중에서 Module_C는 급격한 변화를 보이고 Module_A는 별다른 변화가 발생하지 않았다.

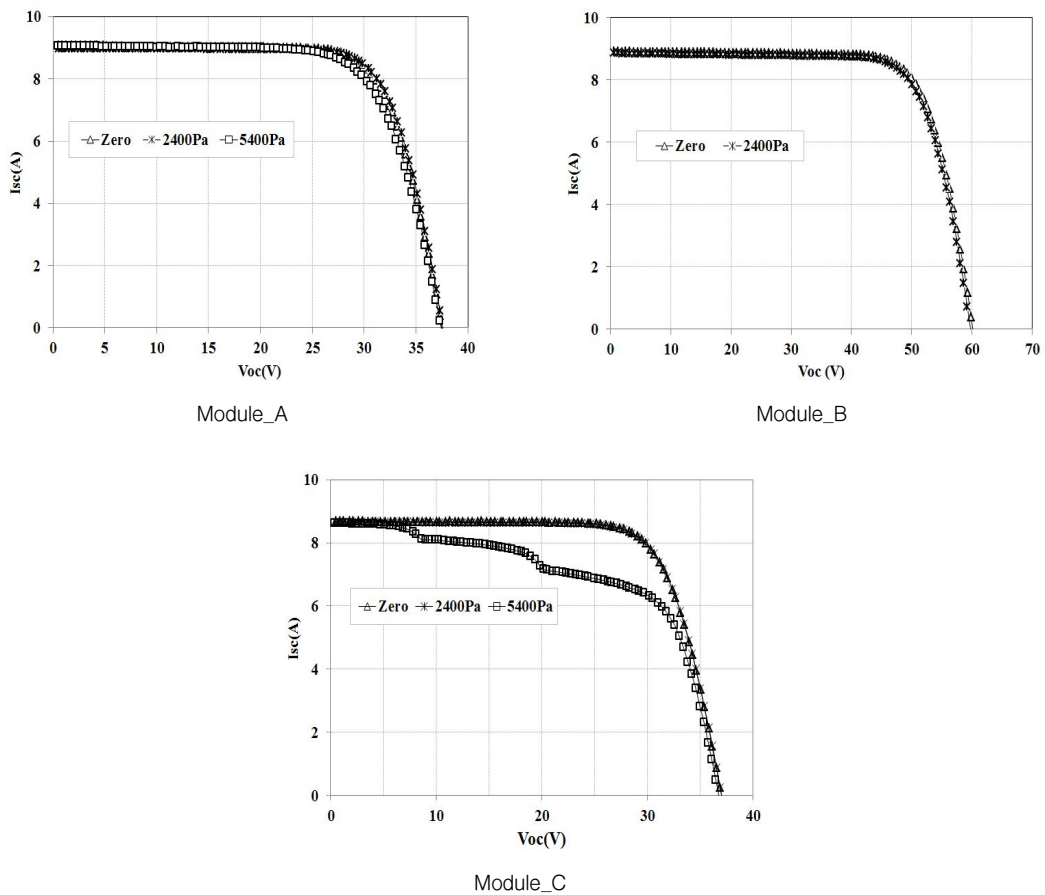


Fig. 2-3 I-V Curves of PV modules

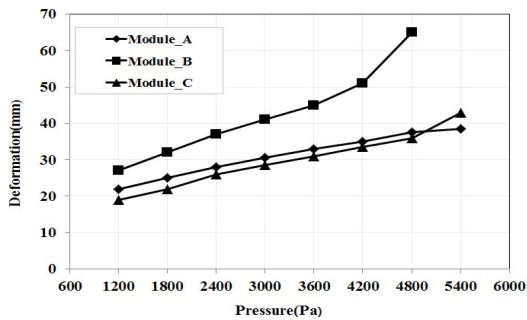


Fig. 2-4 Deformation Graph of PV module

Table 3-1 PV Module Element Properties

	Density (kg/m ³)	Young's Modulus(Pa)	Poisson's Ratio	Tensile Strength(Pa)
Glass	2500	6.80E+10	0.19	1.08E+08
Frame	2770	7.10E+10	0.33	3.10E+08
EVA	960	4.20E+06	0.4	2.50E+07
Back-sheet	1394	2.50E+05	0.4	3.40E+07
Rubber	930	1.00E+08	0.4	2.76E+07

Fig. 2-4에서 보이는 바와 같이 PV모듈에 작용하는 하중에 따라 변화를 나타낸다. Module_B는 4200Pa까지 일정하게 변형되었지만 4800Pa에서 급격하게 변형이 증가되었다. 4800Pa이후에는 PV모듈의 항복강도를 벗어나게 되어 더 이상 측정이 불가능하게 되었다. Module_A, C는 4800Pa까지 일정하게 변형이 증가되다 5400Pa의 하중에서 Module_C는 급격한 변화를 보이고 Module_A는 별다른 변화가 발생하지 않았다.

3. PV모듈 해석

본 연구의 실험 결과를 해석하기 위하여 ANSYS Workbench의 Mechanical application의 여러 해석 중 structural을 사용하였다. Mechanical에서 유한요소 해석을 수행하기 위해 Table 3-1에서 보는 바와 같이 재료 물성을 정의하였으며, 이후에 해석모델 생성 > 연결 관계 정의 > 격자모

델 생성 > 하중 및 구속조건 정의 > 해석 수행 > 결과 확인으로 이루어지게 된다. Back-sheet는 S사에서 제작한 모델의 물성을 기초 데이터로 이용하였으며, EVA 데이터는 J사에서 생산한 모델을 이용하였다. Glass와 Rubber는 일반적인 물성을 기초로 하였으며, Frame은 Aluminium의 물성을 적용하였다. PV모듈의 모델을 Autodesk Inventor를 이용하여 완성 하였으며, 완성된 모델을 ANSYS Geometry System에 적용하였다. PV모듈의 전체 형상과 단면 형상은 Fig. 3-1에 나타내었다.

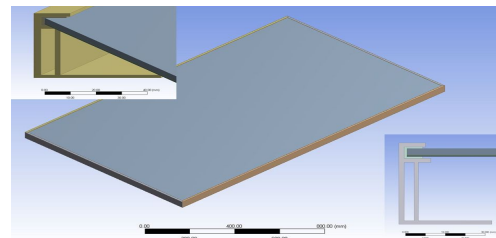


Fig. 3-1 The structure for PV module

PV모듈 각 요소의 연결 관계를 정의하였으며 격자모델은 기하학적 형상에 대하여 자동으로 질점과 요소를 생성하였다. Fig. 3-2는 PV모듈의 고정면을 정의하고 PV모듈에 작용하는 자중과 지점에 따라 하중을 가하였다. PV모듈에 작용하는 하중을 지정하였다.

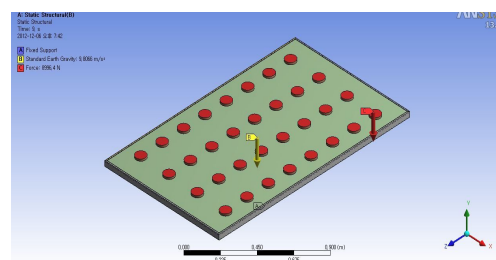


Fig. 3-2 The distribution of mechanical loads on PV module

모든 해석의 결과는 숫자로 계산되지만 구조

물 전체에 걸친 응력이나 변위 등을 색상으로 표현하여 시각적으로 분석할 수 있다. 이때 응력 등의 분포도(Contour)를 관찰해서 분포도가 갑작스런 변화를 보이는 곳이나 연속적이지 않은 곳이 있는지 확인 할 수 있다. PV모듈에 응력이 작용하였을 때 변형을 나타낸다. 가장 많은 변형이 일어나는 곳이 PV모듈의 중심부가 되는 것을 Fig. 3-3을 통해 볼 수 있다.

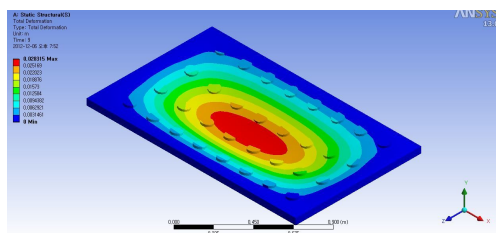


Fig. 3-3 The Simulation results for the deformation of PV module

Fig. 3-4는 시뮬레이션을 이용하여 하중이 작용할 때 PV모듈의 변형을 그래프로 나타내었다. 각각의 PV모듈에 1200Pa의 하중이 작용할 때 변형의 차이는 5mm 이내이다. 하지만 5400Pa의 하중이 PV모듈에 작용할 때 각 PV모듈 사이의 변형이 결과적으로 약 22mm의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. Module_A는 가장 작은 변형률을 보이며 0.005의 기울기 값을 갖는다. Module_B의 기울기 값이 0.0077로서 가장 큰 변형률을 보이는 것을 알 수 있다.

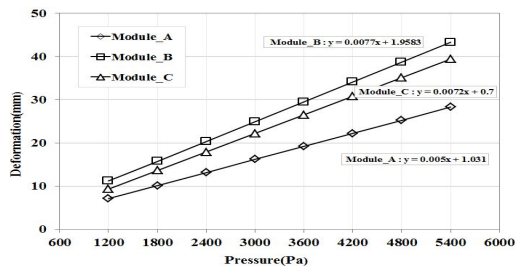


Fig. 3-4 The Simulated deformation of PV module

Fig. 3-5~3-7은 각각의 PV모듈이 받는 하중에 따른 변형을 실험과 시뮬레이션을 비교하였다. 본 실험에서는 PV모듈의 면적 및 유리의 두께의 따른 변형의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 때 실험과 시뮬레이션의 차이가 발생하는 이유는 태양전지는 PV모듈은 EVA, Backsheet, 유리, 프레임등의 다중복합구조물 로써 시뮬레이션과 실험의 결과 값 차가 발생되었지만 본 논문에서 중점으로 보고자 하는 것은 변형률이 PV모듈에 미치는 영향을 확인하고자 한다. 이때 실험결과 값을 선형 그래프로 나타내면, 이를 통해 PV모듈의 변형의 변화량이 거의 동일함을 확인 할 수 있다.

Fig. 3-5은 Module_A의 하중에 대한 변형률을 부호를 이용하여 도시하였으며, 각 부호가 위치한 지점에 대한 연결선을 선형 일차함수로 근사화 시켜 그 기울기를 비교하였다. 실험과 시뮬레이션에서 변형률 값의 차이는 평균 약 16mm 정도 발생되며, 각각의 그래프 기울기 값은 0.0043과 0.005로서 차이가 미미하며 하중에 따른 변형의 변화가 거의 동일함을 볼 수 있다.

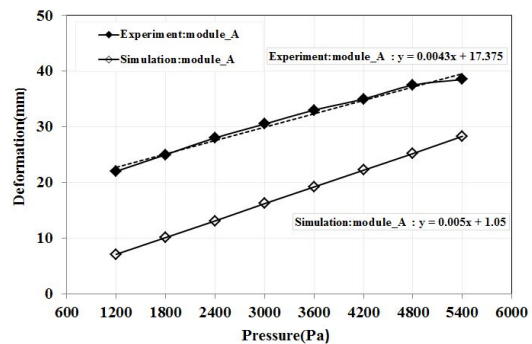


Fig. 3-5 The Deformation of PV Module (Module_A)

Fig. 3-6은 다른 두 PV모듈 보다 약 1.4배의 크기를 갖는 Module_B을 실험과 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 실험과 시뮬레이션의 변형률의 차이는 평균 약 12mm 정도 발생되며,

실험 그래프의 경우 4200Pa 이전에는 5mm의 증가 추세를 보인다. 이후 4800Pa의 하중에서 65mm를 나타내며 14mm의 급격한 증가량을 나타낸다. 5400Pa에 도달하기 전 PV모듈의 파손이 발생하여 더 이상의 변형을 측정할 수 없게 되었다. 시뮬레이션 상에서는 그래프가 0.0076의 기울기 값을 나타내며 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 실험과 시뮬레이션 상에서 오차가 발생하게 되지만 비슷한 기울기 값을 가지게 되어 PV모듈의 파손 전 상황의 변형의 결과 예측이 가능하다.

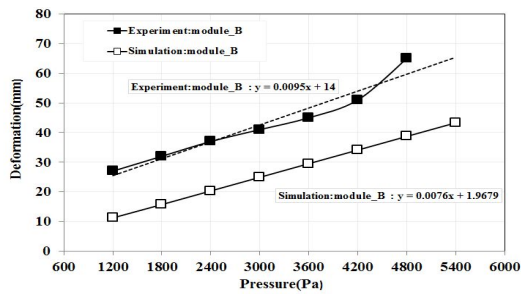


Fig. 3-6 The Deformation of PV Module (Module_B)

Fig. 3-7은 module_C의 하중 증가에 따른 변형을 나타내고 있다. 그래프의 기울기 차이가 0.0072, 0.0047로서 0.0025를 나타내면서 4800Pa까지는 실험과 시뮬레이션에서 비슷한 추세를 나타나고 있지만 5400Pa의 하중이 작용하면서 급격한 변형을 보이는 것을 알 수 있다.

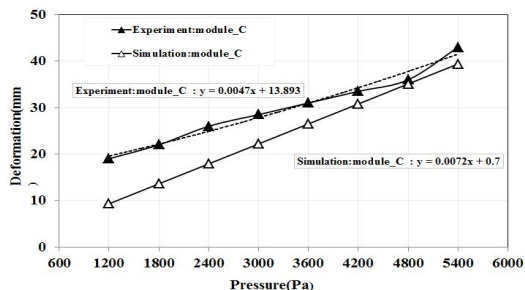


Fig. 3-7 The Deformation of PV Module (Module_C)

실험과 시뮬레이션 상에서 실험의 오차 발생 요인으로 탄성거동-비선형 파괴의 예측의 어려움과 PV모듈 각 요소의 물성값 오차 발생의 가능성을 배제하기 어려움이 있다. 또한 PV모듈 구성요소 간의 구속 조건 및 접촉강도가 시뮬레이션에서 반영되지 않았기 때문이라고 추측된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PV모듈이 옥외 노출되어 기계적 하중을 받게 되는 점을 고려하여, PV모듈 표면유리에 기계하중 실험을 실시하고 PV모듈의 출력 측정 및 태양전지의 마이크로크랙에 대한 상관관계 분석에 따른 PV모듈의 변화를 파악할 수 있었다.

- (1) 유리 두께의 따라 PV모듈의 변형률 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 유리의 두께가 커짐으로 인해 프레임 홈의 두께 (Table 2-1, C) 부분의 길이도 늘어나게 된다. 홈의 두께 길이 변화에 따라 유리와 프레임의 결합강도 문제도 있지만 유리를 지지하고 있는 프레임에서 하중 분산의 문제도 있다고 판단된다.
- (2) ANSYS를 이용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 하중에 의한 PV모듈의 변형률 뿐만 아니라 PV모듈 전체 구성요소의 영향을 확인하였다. 본 연구에서 수행한 실험에서 PV모듈의 변형과 시뮬레이션에서 변형의 기울기가 유사함을 알 수 있다. 이를 통해 본 연구에서와 같이 Ansys를 이용하여 시뮬레이션을 함으로 외부하중에 의한 PV모듈 변형에 간접적인 예측 방법으로 유효함을 알 수 있다.
- (3) 본 연구의 결과는 PV모듈을 생산하기 위해 설계하는 과정에서 PV모듈의 기계하중에

대한 영향을 예측하기 위한 기초자료로써 활용이 가능할 것으로 생각되며, 향후 프레임 구조 변화, 각 요소간의 접촉 강도, EVA의 가교도 등 다양한 조건 변화를 통해 PV모듈의 변형이 최소화되기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

modules due to micro cracks
9. 이상순, “실리콘 솔라시스템 구조해석을 위한 유한요소법”, 홍릉과학출판사 (2010)

참 고 문 헌

1. Liu-De Chih et al., “Assessing the reliability and degradation of ribbon in photovoltaic module”, 37th PVSC(2011) IEEE
2. Zemen et al., “Photovoltaic module performance and degradation as compared in distinct climatic regions”, 38th PVSC(2012) IEEE
3. Marcus Assmus et al., “Measurement and simulation of vibrations of PV-modules induced by dynamic mechanical loads”, Progress in Photovoltaics(2011)
4. Sarah Kajari-Schroder et al., “Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests”, Solar Energy Materials & Solar Cells(2011)
5. M. Kontges et al., “The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks”, Solar Energy Materials & Solar Cells(2011)
6. 송영훈, “결정질 Si 셀의 미소 균열 패턴에 따른 PV모듈의 전기적 특성 연구”, 건국대학교 대학원 석사학위논문 (2012).
7. Y. Zemen et al., “The impact of yield strength of the interconnector on the internal stress of the solar cell within a module”, 25th EU PVSEC(2010)
8. Quantifying the risk of power loss in PV