



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

고온의 태빙 공정을 제거한 신규 2단계

태양전지 모듈화 공정에 대한 연구



2019년 2월

부경대학교 대학원

인쇄공학과

백상엽

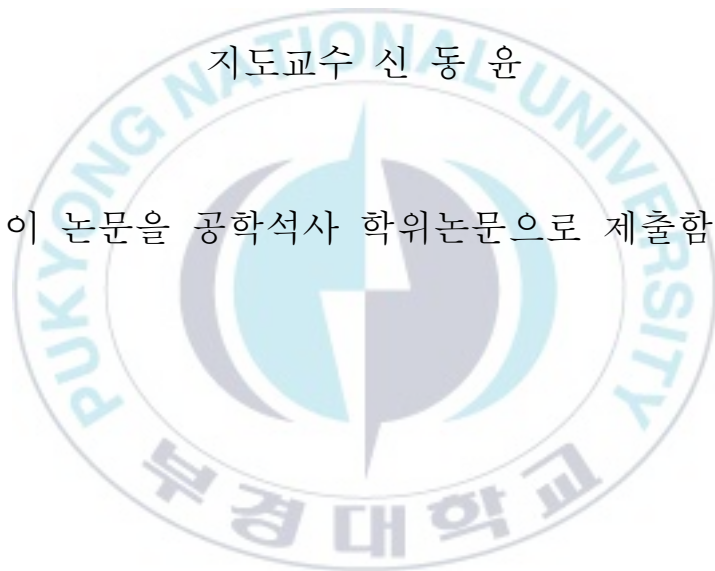
공 학 석 사 학 위 논 문

고온의 태빙 공정을 제거한 신규 2단계

태양전지 모듈화 공정에 대한 연구

지도교수 신 동 윤

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2019년 2월

부경대학교 대학원

인쇄공학과

백상엽

백상엽의 공학석사 학위 논문을 인준함.

2018년 12월 14일



주 심 공학박사 송 희 은



위 원 공학박사 강 민 구



위 원 공학박사 신 동 윤



목 차

목차	I
List of Figures	V
List of Tables	IX
Abstract	X
 I. 서론	 1
1. 이산화탄소로 인한 비가역적인 기후 변화	1
1.1 대기 온난화(atmospheric warming)	2
1.2 강수량 변화(rainfall change)	2
1.3 해수면 상승(sea level rise)	2
2. 대체 에너지	4
2.1 원자력발전	4
2.2 신재생에너지(태양광발전)	5
2.3 결정질 실리콘 태양전지	5
3. 결정질 실리콘 태양전지의 모듈화	7
3.1 모듈화 공정의 필요성	7
3.2 모듈 제작 공정	7
3.3 모듈 구성 재료	8
4. 연구 배경	12
4.1 태양전지 모듈화를 위한 태빙 공정	12

4.2 기존 태빙 공정의 문제점	13
4.3 고온의 태빙 공정을 제거한 신규 태양전지 모듈화 공정	18
II. 실험	19
1. LOM 기술을 통한 태양전지 모듈	19
1.1 LOM 기술의 정의	19
1.2 메탈리본이 임베디드된 EVA 시트	21
2. LOM 기술을 통한 단위 모듈	22
2.1 단위 모듈 제작에 사용된 재료	22
2.2 메탈리본이 임베디드된 EVA 시트 제작	23
2.3 단위 모듈 제작 과정	24
3. 제작된 단위 모듈 분석	27
3.1 변환 효율 측정	27
3.2 열 사이클(thermal cycle) 시험	30
4. LOM 기술을 통한 2 × 2 모듈	31
4.1 2 × 2 모듈 제작에 사용된 재료	31
4.2 메탈리본이 임베디드된 EVA 시트 제작	32
4.3 2 × 2 모듈 제작 과정	36
5. 제작된 2 × 2 모듈 분석	39
5.1 변환 효율 측정	39
5.2 EL 이미지 분석	40

III. 결과 및 고찰	41
1. BiSnAg 메탈리본의 용융 테스트	41
1.1 열 프레싱을 통한 저융점 메탈리본의 기계적 특성	42
1.2 열 프레싱을 통한 저융점 메탈리본의 전기적 특성	44
1.3 용융 방법에 따른 접촉 비저항	48
2. 단위 모듈 분석 결과	49
2.1 단위 모듈 효율 측정 결과	49
2.2 열 사이클 시험 결과	50
3. 2 × 2 모듈 분석 결과	52
3.1 2 × 2 모듈 효율 측정 결과	52
3.2 EL 이미지 분석 결과	53
4. 직렬 저항 상승 원인 분석 및 해결 방안	54
4.1 BiSnAg 메탈리본의 저항	54
4.2 EVA 시트의 확산	58
4.3 문제 해결 방안	60
5. LOM 기술을 통한 태양전지 모듈의 양산화	62
6. 기대효과 및 활용방안	66
6.1 장비 투자비 및 운용비 절감	66
6.2 인건비 절감	67
6.3 차세대 박형 실리콘 태양전지 적용	68
6.4 메탈리본의 굴곡으로 인한 문제점 제거	69

6.5 멀티와이어 태양전지 적용	71
6.6 신뢰성 및 생산수율 향상 그리고 생산단가 절감	73
IV. 결론.....	74
참고문헌.....	75



List of Figures

Figure 1. Schematic illustration of photovoltaic module structure	(8)
Figure 2. Schematic illustration of tabbing process in photovoltaic modulization	(12)
Figure 3. a) micro-cracks and b) bowing phenomenon caused by high- temperature tabbing process.....	(14)
Figure 4. Solar cell breakage rate in photovoltaic modulization.....	(14)
Figure 5. Wafer thickness trend to reduce production cost of crystalline silicon solar cells	(15)
Figure 6. Breakage to thin photovoltaic module due to tabbing process using low melting solder paste	(17)
Figure 7. Process simplification with LOM technology	(20)
Figure 8. Schematic illustration of the LOM technology	(20)
Figure 9. EVA sheet and metal ribbon used in the experiment.....	(21)
Figure 10. Solar cell used in the experiment (unit module)	(22)
Figure 11. EVA sheet with metal ribbons made using UV curing machine and UV- bond.....	(23)
Figure 12. Schematic illustration of electric shunt generation at the edge of the solar cell in contact with the metal ribbon.....	(24)
Figure 13. Unit module manufactured without defoaming process.....	(25)
Figure 14. Manufacturing process using LOM technology (unit module)	(26)
Figure 15. Unit module manufactured by the LOM technology	(26)
Figure 16. I-V characteristics of photovoltaic module on temperature variation	(28)
Figure 17. Solar simulator used to measure unit module efficiency by courtesy of the photovoltaic laboratory, Korea Institute of Energy Research	(29)
Figure 18. Temperature conditions of thermal cycle test	(30)
Figure 19. Solar cell used in the experiment (2 × 2 module).....	(31)
Figure 20. Bubble generation due to UV-bond during laminating process	(32)

Figure 21. Manufactured 2×2 module without bubble generation.....	(33)
Figure 22. EVA sheet with metal ribbons manufactured using glue gun.	(34)
Figure 23. Drawing for the manufacture of 2×2 module, a) CAD program drawing and b) size comparison of printed drawing and solar cell.....	(35)
Figure 24. Solar cell edge isolation process, a) applying UV-bond to solar cell edge and b)UV-bond curing by UV curing machine	(36)
Figure 25. Comparison of LOM technology and conventional modulization.....	(37)
Figure 26. Temperature and pressure conditions of lamination process.....	(38)
Figure 27. Solar simulator used to measure 2×2 module efficiency by courtesy of the photovoltaic laboratory, Korea Institute of Energy Research	(39)
Figure 28. Schematic illustration of contact points in photovoltaic module manufactured by LOM technology	(41)
Figure 29. Image of SnPb metal ribbon, a) before hot pressing and b) after hot pressing	(43)
Figure 30. Image of BiSnAg metal ribbon, a) before hot pressing and b) after hot pressing	(44)
Figure 31. a) image of contact resistivity measurement between solar cell and metal ribbon and b) schematic illustration of sample made for contact resistivity measurement.....	(45)
Figure 32. Contact resistivity measurement result according to temperature variation with respect to soldered BiSnAg metal ribbon	(46)
Figure 33. Contact resistivity measurement result according to time variation with respect to soldered BiSnAg metal ribbon	(47)
Figure 34. Contact resistivity measurement result according to melting method with respect to soldered SnPb metal ribbon.....	(48)
Figure 35. I-V curve comparison of best unit module.....	(49)
Figure 36. Parameters of 2×2 module manufactured by the LOM technology according to the number of thermal cycles with respect to conventional modulization.....	(51)

Figure 37. Electrical performance comparison of 2×2 module by LOM technology and conventional modulization.....	(52)
Figure 38. 2×2 module manufactured by LOM technology a) actual image and b) electroluminescence image.....	(53)
Figure 39. Measured resistance of BiSnAg and SnPb metal ribbons.....	(54)
Figure 40. I–V curve comparison of best unit module according to solder alloys of metal ribbon.....	(55)
Figure 41. Parameters of unit module using BiSnAg metal ribbon according to the number of thermal cycles with respect to unit module using SnPb metal ribbon	(56)
Figure 42. a) measured resistance with or without EVA sheet, b) image of sample without EVA sheet after hot pressing, and c) image of sample with EVA sheet after hot pressing	(59)
Figure 43. Temperature and pressure conditions of modified lamination condition process.....	(60)
Figure 44. Parameters of photovoltaic module manufactured by the LOM technology according to modified lamination condition process	(61)
Figure 45. Schematic illustration of layup equipment and EVA sheet with metal ribbon for alignment	(62)
Figure 46. a) possibility of electric shunt due to metal ribbon and b) applying insulation paste to metal ribbon touching the edge of solar cell.....	(63)
Figure 47. Schematic illustration of layup process for LOM technology	(65)
Figure 48. Tabbing equipment for photovoltaic module manufacturing by courtesy of the photovoltaic laboratory, Korea Institute of Energy Research.....	(66)
Figure 49. Image of tabbing and bussing ribbons used in photovoltaic modules..	(67)
Figure 50. Breakage to thin solar cell due to high temperature tabbing process	(68)
Figure 51. Expansion of metal ribbon due to heat in external environment.....	(69)
Figure 52. Electrical shunt due to thermal expansion and contraction of metal ribbon	(70)

Figure 53. Solar cells according to the number of busbars, a) 3 busbar structure
and b) multi busbar structure..... (72)

Figure 54. Finger width of 3 busbar and multi busbar solar cell over the series
resistance contribution (left of y-axis) and shading (right of y-axis) (72)



List of Tables

Table 1. Melting and solidus temperature data of solder alloys	(21)
Table 2. Failure rate of photovoltaic module in external environment.....	(50)



Study on New Two-Step Photovoltaic Modulization without
a High-Temperature Tapping Process

Sang-Yup Baek

Dept. of Graphic Arts Engineering, Graduate school,

Pukyong National University

Abstract

Crystalline silicon solar cells undergo a tabbing process that uses a metal ribbon to serially connect the solar cells due to the low voltage of less than 700mV. In order to dissolve the solder alloy coated on the metal ribbon, the tabbing process proceeds at a high temperature, which causes micro-cracks and bowing phenomenon due to the generated thermal and mechanical stress in the solar cell during the tabbing process, thereby deteriorating the long-term reliability of the photovoltaic module. In this study, we propose a new photovoltaic modulization that can manufacture photovoltaic module by lay-up and lamination process using low melting point metal ribbon without a high-temperature tabbing process. This new modulization(Layup-Only Modulization, hereinafter abbreviated as LOM) is proposed. The electrical characteristics between the module manufactured through the LOM technology and the conventional soldering method is analyzed under the initial and after thermal environmental test.

I. 서론

1. 이산화탄소로 인한 비가역적인 기후 변화

18세기 산업혁명 이후 현재까지 전 세계적으로 에너지 사용량이 급격하게 늘어남에 따라 지구 표면의 평균기온이 상승하고 있다. 이러한 지구 표면의 온도 상승 현상을 지구 온난화라 부른다. 대부분의 전문가들은 지구 온난화의 발생 이유를 화석 연료의 연소 과정에서 발생하는 온실기체인 이산화탄소(CO_2 : carbon dioxide) 때문이라고 규정하고 있으며, 에너지 사용량의 증가에 따라 화석 연료 사용량이 증가함으로써 이산화탄소의 배출량은 늘어나고 있다. 이러한 이산화탄소의 가장 큰 문제점은 이산화탄소의 비가역적인 성질로 인해 배출량을 감소시키거나 배출을 중단하여도 감소시킬 수 있는 농도가 한정적이라는 것이다. 따라서, 이산화탄소의 배출량을 조절하더라도 지구 온난화는 지속된다.⁽¹⁾ 이러한 이산화탄소로 인해 발생하는 비가역적인 기후 변화는 다음과 같다.

1.1 대기 온난화(atmospheric warming)

이산화탄소로 인해 지구의 평균 온도가 상승할 경우, 상승된 기온으로 인해 해수면이 열팽창하게 된다. 이때, 열팽창된 해수면은 이산화탄소의 배출을 중단하여도 지속적으로 열을 방출하게 되며, 이로 인해 대기 온난화는 이산화탄소의 비가역적인 성질과 같이 지속된다.

1.2 강수량 변화(rainfall change)

지구의 평균 온도 상승으로 인해 저위도의 바다 근처 섬들은 해수의 증발량이 늘어나 강수량이 증가하게 되는 반면, 일부 지역(남유럽, 호주 서부 및 아프리카 북부)에서는 장기적인 강수량 감소를 겪게 된다. 이러한 강수량의 변화는 지구 온난화의 진행에 따라 증가하게 된다. 전문가들은 10년의 평균 온난화 정도 당 건기의 건조함은 10%씩 증가할 것으로 예측하고 있으며⁽²⁾, 이로 인해 모든 대륙에는 아열대화가 진행되어 물 공급의 어려움 또한 발생할 것으로 예측되고 있다.

1.3 해수면 상승(sea level rise)

해수면 상승의 원인은 빙하의 용해와 해수의 열팽창으로 나눌 수 있다. 이산화탄소로 인해 지구 온도가 상승함에 따라 빙하가 용해되어 해수면이 상승하게 된다. 현재, 그린란드 및 남극 대륙의 빙상에서는 지구 온난화로 인한 급격한 얼음 손실이 관찰되고 있으며, 빙하의 완전한 손실은 0.2 ~ 0.7 m의 해수면 상승을 야기한다.⁽¹⁾ 또, 빙하가 손실될 경우, 빙하에 의해 반사되는 태양에너지양이 감소하여 바다 및 육지에 흡수되는 태양에너지양이 증가하는 악순환이 발생한다.

또, 지구 온난화로 인해 해수가 열팽창함으로써 해수면은 상승하게 된다. 이러한 해수의 열팽창으로 인한 해수면의 상승 정도는 앞서 언급한 빙하의 용해로 인한 해수면의 상승 정도 보다 높다. 이러한 이유들로 인해 이산화탄소 농도가 1000 ppmv(parts per million-volume)를 초과할 경우, 0.6 ~ 1.9 m의 해수면 상승을 야기하게 된다.⁽¹⁾

따라서, 이산화탄소 배출량 지속적으로 증가할 경우, 미래에 기후 완화 방법이나 매우 효율적인 에너지원이 개발되더라도 이산화탄소의 비가역적인 성질로 인해 기후 변화는 지속될 것이다. 이는 이산화탄소의 배출량 완화를 위해서는 화석 연료를 대체할 에너지의 도입이 필요하며, 이것은 곧 필수적이게 될 것이다.



2. 대체 에너지

2.1 원자력발전

현재, 화석 연료를 대체할 에너지로는 원자력발전과 신재생에너지로 나눌 수 있다. 그 중 원자력발전은 원자로 안에서 핵분열 시 발생하는 열과 증기를 이용해 전기를 생산하는 원리로써 낮은 발전 단가로 인해 대체 에너지로 각광받고 있다.

하지만 원자력발전 중 생성되는 핵 폐기물로 인한 피해와 보관 등의 유지 보수 비용이 추가적으로 발생하기 때문에 장기적으로 볼 경우 발전 단가는 더 높아질 것으로 예상된다. 이러한 원자력발전의 가장 큰 문제점은 원자력발전 중 원자력으로 인한 사고를 유발할 수 있다는 점이다. 원자력발전으로 인한 원전 사고는 구소련 키시탐 원자력 사고(1957년, 피해 규모 : 6등급)를 시작으로 일본 후쿠시마(2011년, 피해 규모 : 7등급) 등 많은 사고를 가져왔다. 특히, 가장 최근에 발생한 일본의 후쿠시마 원전 사고의 경우 현재까지도 피해 상황이 진행되고 있으며, 피해 복구까지는 엄청난 시간과 25조엔 이상의 천문학적 금액이 소요될 것으로 예측된다.

2.2 신재생에너지(태양광발전)

신재생에너지는 태양광, 태양열, 지열, 풍력, 수력, 해양, 바이오, 폐기물 등 재생이 가능한 에너지를 의미한다.⁽³⁾ 이러한 신재생에너지 중 태양광을 이용한 태양광발전시스템은 에너지원이 무한하고 유지 보수가 간단하며 환경오염 및 소음이 없다는 장점으로 인해 도심 속에서 사용하기에 매우 적합한 에너지라 평가받고 있으며, 국소적 전력 공급 시스템인 마이크로그리드(microgrid)에 쉽게 적용할 수 있기 때문에 화석 연료를 대체할 에너지로써 활발하게 연구가 진행되고 있다.⁽⁴⁾

2.3 결정질 실리콘 태양전지

태양광발전시스템에 사용되는 다양한 종류의 태양전지 중 실리콘을 원료로 하는 실리콘 태양전지는 전체 태양전지 생산량의 약 90%를 차지하고 있다. 많은 종류의 태양전지 중 실리콘 태양전지를 주로 생산하는 이유는 다음과 같다. 첫 번째로 지구에서 풍부하게 사용 가능한 원소인 Si를 기본 원료로 사용하고 있으며, 두 번째로 이러한 Si의 흡광 스펙트럼은 태양광 스펙트럼과 매우 유사하므로 태양광에너지를 효율적으로 사용할 수 있기 때문이다. 또, 세 번째로 상온에서 실리콘의 밴드갭 에너지(E_g)는 1.12 eV로 태양광 발전에 사용하기 매우 적당한 밴드갭 에너지를 가졌기 때문이다. 일반적으로 밴드갭 에너지보다 큰 태양광에너지의 경우 흡수되어 자유전자를 생성하지만 잉여 에너지만큼 열로 소비되어 태양전지의 효율을 감소시킨다. 반면에 밴드갭 에너지 보다 작은 태양광에너지의 경우 흡수되지 못하고 통과되기 때문에 자유전자를 생성하지 못한다. 상기의 이유로 인해 태양전지의 가장 효율적인 밴드갭 에너지는 1.0 ~ 1.6 eV 이다.

이러한 장점으로 인해 실리콘 태양전지는 낮은 생산단가 및 높은 효율이라는 이점을 가져 수많은 태양전지 중 가장 높은 경제성을 가지고 있다.



3. 결정질 실리콘 태양전지의 모듈화

3.1 모듈화 공정의 필요성

태양전지는 태양광발전시스템의 최소 단위로서 실제 외부환경에서 발전 시에는 태양전지를 모듈화하여 사용한다. 이때, 태양전지를 모듈화하여 사용하는 이유는 다음과 같다. 첫째, 개별의 태양전지의 경우 전압이 700 mV 이하로 매우 낮기 때문에 태양전지들을 상호 직렬로 연결하여 태양광발전시스템에서 요구하는 전압을 얻기 위해서이며, 둘째, 온도, 습기, 눈, 비, 바람 등 외부환경의 영향을 받기 쉬운 태양전지를 보호하여 태양광발전 시 장기 신뢰성(약 25년 이상)을 확보하기 위해서이다.

3.2 모듈 제작 공정

태양전지를 모듈화하는 공정은 크게 보았을 때 3가지로 나눌 수 있다. 태양광발전시스템에서 요구되는 전압을 얻기 위해 솔더 합금이 코팅된 메탈리본을 이용하여 태양전지판을 상호 직렬로 연결하는 1) 태빙(tabbing) 공정, 그 후 태양전지를 외부환경으로부터 보호하기 위한 재료들을 순서대로 적층하는 2) 레이업(lay-up) 공정, 레이업 된 재료들을 라미네이터를 이용해 저온, 진공에서 합착하는 3) 라미네이션(lamination) 공정이 있다. 상기의 공정들을 통해 제작된 태양전지 모듈은 마지막으로 프레임과 정션 박스를 연결하여 태양광발전시스템에 사용한다.

3.3 모듈 구성 재료

결정질 실리콘 태양전지의 모듈화를 위한 구성 재료는 프레임, 유리, 상부 EVA 시트, 태양전지, 하부 EVA 시트, 백시트, 정션 박스로 구분된다. 레이업 공정에서는 태양전지의 상부 및 하부에 EVA 시트를 넣어주며 전면에는 유리, 후면에는 백시트를 위치시켜 준다. 이렇게 적층된 모듈 구성 재료들은 라미네이션 공정을 통해 합착한 후 마지막으로 정션 박스와 프레임을 부착한다. 이러한 모듈 구성 재료들의 위치는 Fig. 1에 나타나있는 바와 같으며, 각 구성 재료들의 역할은 다음과 같다.

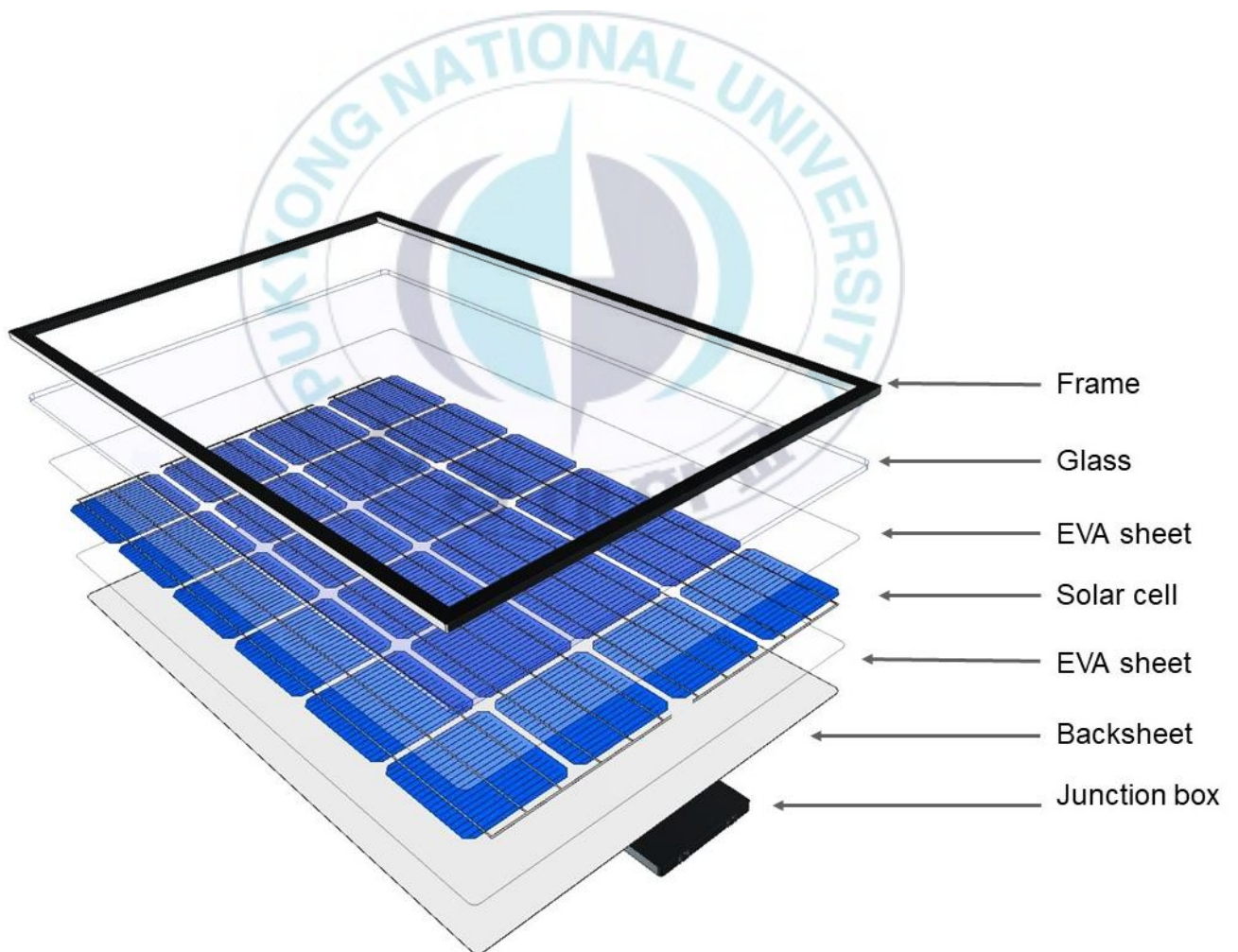


Figure 1. Schematic illustration of photovoltaic module structure

1) 프레임 (frame)

프레임은 태양전지 모듈을 형성하는 마지막 구성 재료로써 유리로 된 태양전지 모듈의 표면을 보호하며 전체적인 태양전지 모듈의 안정화를 통해 장기 신뢰성을 확보하는 역할을 한다.

2) 유리 (glass)

태양전지 모듈에 사용되는 유리는 장기간 자외선 노출에 안정적이고 외부 충격으로부터 저항이 강하며 외부에서의 수분 침투를 막아 태양전지의 장기 신뢰성을 확보하는 역할을 한다. 일반적으로 건축용으로 사용되는 유리는 철분의 함량이 많아 녹색을 띠며, 이는 광 투과도를 낮추게 된다. 태양전지는 태양광을 흡수하여 발전하기 때문에 태양전지가 사용할 수 있는 파장 범위에서의 광 투과도를 높이기 위해 유리의 철분 함량이 0.02% 이하인 저철분 유리를 주로 사용한다. 이러한 저철분 유리로는 일반 유리에 비해 철분 성분을 크게 낮춰 광 투과도를 높인 저철분 평면 유리와 광 이용 효율을 높이기 위해 유리 표면을 요철 형태로 제작해 표면에서의 태양광 반사를 줄인 저철분 무늬 유리도 나눌 수 있다.⁽⁵⁾

3) 봉지재(EVA sheet)

태양광발전시스템의 최소 단위인 태양전지는 태양전지 모듈의 구성 재료 중 가장 고가이면서 깨지기 쉬운 재료이다. 봉지재는 이러한 태양전지를 습기, 먼지, 물리적 충격 등 외부환경으로부터 보호하며, 라미네이션 공정 후 유리와 태양전지 그리고 백시트 간을 완전히 접합시키는 역할을 한다. 이러한 봉지재로는 실리콘 수지, EVA(ethylene vinyl acetate) 시트, PVB(poly vinyl butyral) 등이 사용되고 있다. 이전 태양광 모듈 제조 시에는 실리콘 수지의 사용이 많았으나, 모듈화 공정 중 기포 발생에 따른 탈포 공정이 필요하며, 태양전지의 움직임에 따라 위치 안정화를 유지하기 위한 시간이 많이 소요된다는 문제점이 있다. 또, PVB의 경우 재료 자체의 흡습성으로 인해 태양전지 모듈의 장기 신뢰성을 악화시키기 때문에 현재 봉지재로는 EVA 시트가 가장 많이 사용된다.^{(6), (7)}

4) 백시트(backsheet)

태양광발전시스템은 태양광을 흡수하여 발전하기 때문에 태양전지 모듈은 외부에 노출된 상태에서 사용된다. 이때, 태양전지 후면에 위치하는 백시트는 외부환경과 맞닿아 있기 때문에 수분의 침투 위험성이 높아 낮은 수분 침투율을 가져야만 한다. 만약 백시트의 수분 침투율이 높을 경우 모듈 내부에 침투한 수분으로 인해 EVA 시트의 변색 및 de-lamination 현상이 발생하여 태양전지 모듈의 발전 효율을 저하시키는 요인이 된다. 이러한 백시트는 장파장 영역의 태양광을 반사하여 태양전지의 광 이용 효율을 높이기 위해 흰색의 백시트가 주로 사용된다.

5) 정션 박스(junction box)

태양전지 모듈의 구성 재료 중 정션 박스는 전기적으로 연결된 회로를 보호하는 단자 함으로써 태양전지 모듈에서 생산한 전력을 인버터로 보내는 역할을 한다. 이러한 정션 박스는 태양전지 모듈의 후면 백시트에 부착되며, 부착을 위해 실리콘 및 접착 양면 고무 테이프 등의 고분자 재료를 사용한다.



4. 연구배경

4.1 태양전지 모듈화를 위한 태빙 공정

태양전지 생산량의 대부분을 차지하는 결정질 실리콘 태양전지는 일반적으로 700 mV 이하의 낮은 전압으로 인해 Fig. 2와 같이 메탈리본을 이용하여 태양전지들을 상호 직렬로 연결하는 태빙 공정을 거치게 된다. 이러한 태빙 공정은 과거에는 사람이 직접 인두기를 이용해 납땜을 하였지만, 현재는 자동화된 태빙 장비를 이용하여 공정이 진행된다. 또, 태빙 공정은 사용되는 열원에 따라 소프트 터치 솔더링, 열풍 솔더링, 레이저 스팟 솔더링, IR 램프 및 유도 전류를 이용한 방식 등이 사용되고 있다.^{(8), (9)}

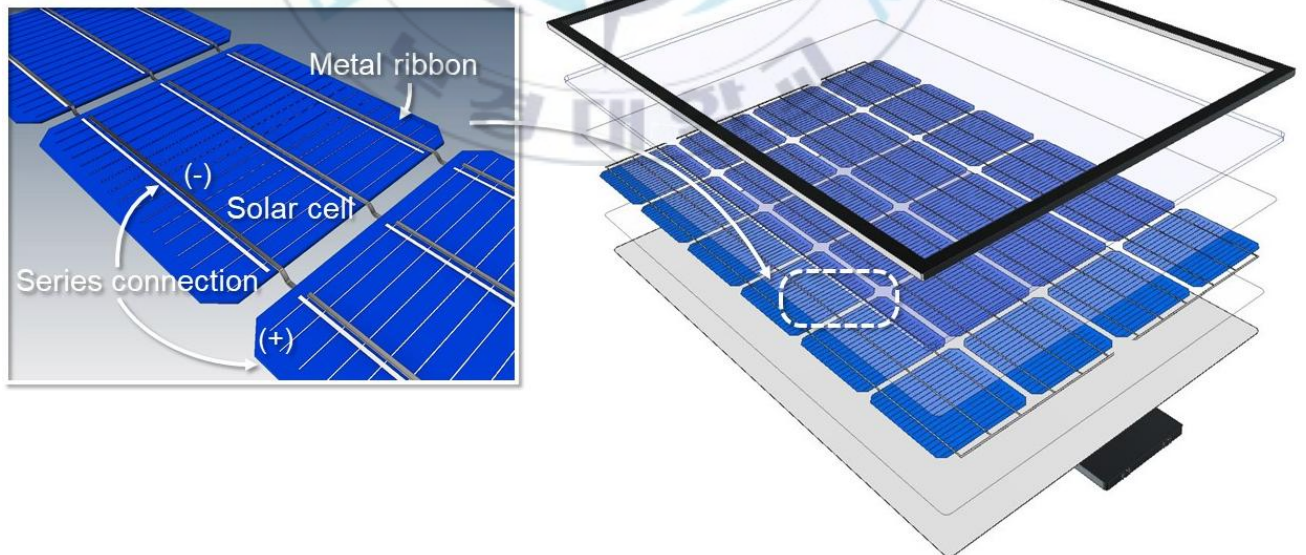


Figure 2. Schematic illustration of tabbing process in photovoltaic modulization

4.2 태빙 공정의 문제점

메탈리본을 이용하여 태양전지 간을 전기적으로 연결하는 태빙 공정은 태양전지의 전면과 인접한 태양전지의 후면을 연결하는 매우 복잡한 공정이다. 따라서, 태빙 공정은 높은 기술이 요구되기 때문에 단위 공정이 많으며 장시간 공정이 진행된다. 이러한 태빙 공정의 가장 큰 문제점은 메탈리본에 코팅된 솔더 합금을 녹이기 위해 300~400℃의 온도에서 태빙 공정이 진행되기 때문에 태양전지에는 열 및 기계적 스트레스가 가해지게 된다는 점이다.

1) 마이크로-크랙 및 휨 현상

고온의 태빙 공정 중 태양전지에는 열 충격이 가해지며, 이로 인해 Fig. 3 a)와 같이 태양전지 내부에는 마이크로-크랙(micro-cracks)이 생성된다. 또, 고온의 태빙 공정 후 상온으로 식혀질 때 태양전지와 메탈리본 간의 열팽창계수(CTE)의 차이로 인해 Fig. 3 b)에 나타나 있는 바와 같이 휨(bowing) 현상이 발생하게 된다. 상기의 문제점은 태양전지 모듈화 공정에서 불량률을 야기하게 되며, 그 결과, Fig. 4에 나타나 있는 것과 같이 고온의 태빙 공정으로 인해 발생하는 태양전지의 파손 발생률은 전체 모듈화 공정 대비 49%를 차지하게 된다. 또, 태양전지가 파손되지 않더라도 열 및 기계적 스트레스를 받은 태양전지는 태양광발전 중 외부환경에서의 일일 열 사이클링에 의해 마이크로-크랙이 성장하거나 접합부의 금속이 탈락되는 현상이 발생하게 되며, 이는 태양전지의 직렬 저항 상승으로 이어져 태양전지 모듈의 장기 신뢰성을 저하시키는 요인이 된다.⁽¹⁰⁾

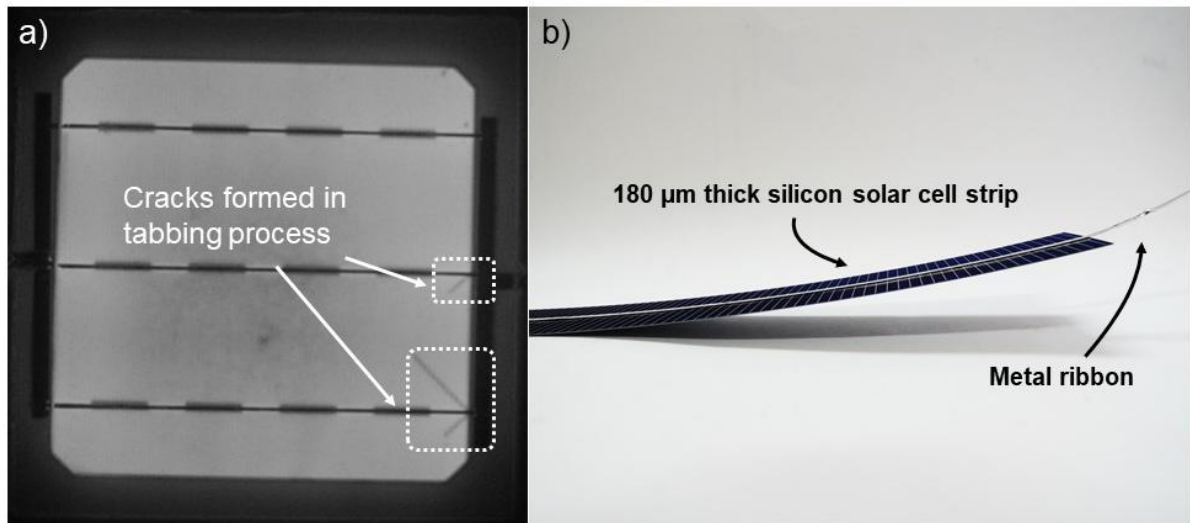


Figure 3. a) micro-cracks and b) bowing phenomenon caused by high-temperature tabbing process^(1 1)

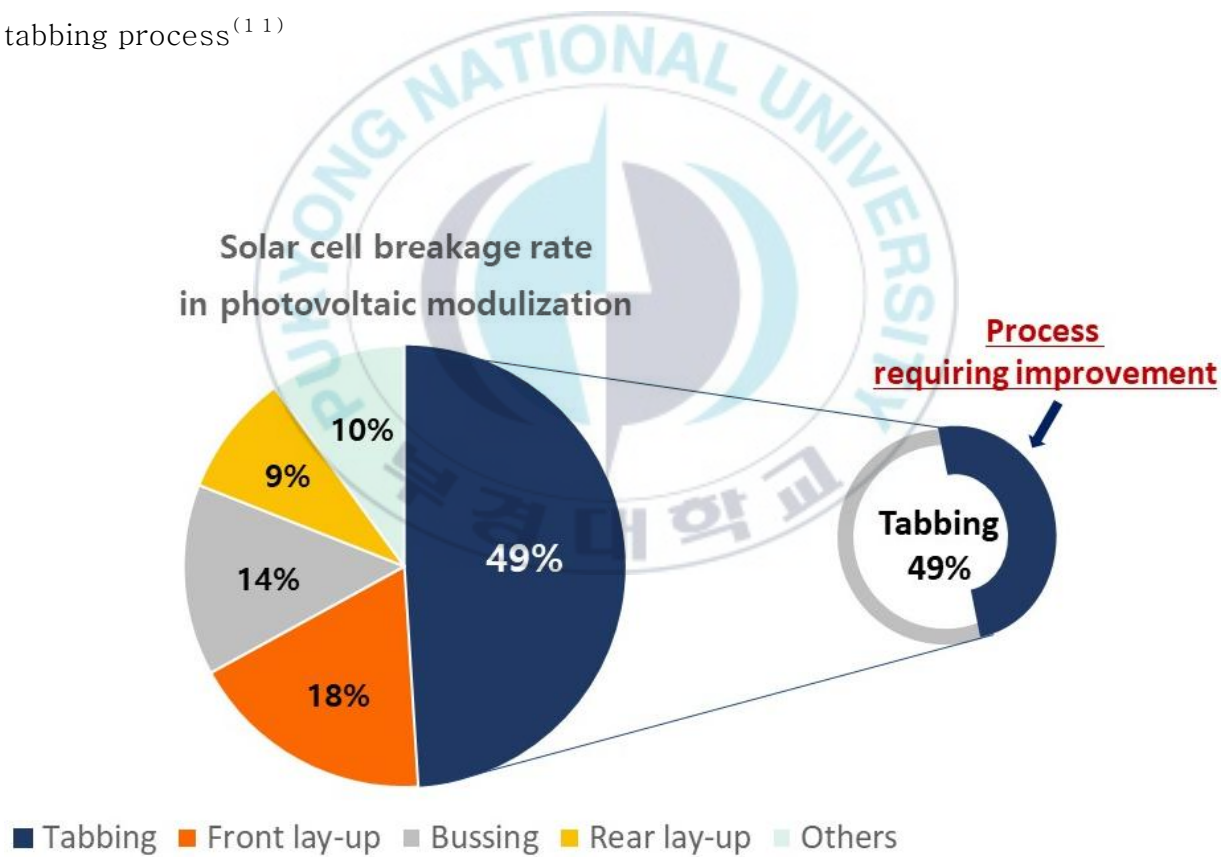


Figure 4. Solar cell breakage rate in photovoltaic modulization^(1 2)

2) 박형 결정질 실리콘 태양전지

결정질 실리콘 태양전지의 제조 단가 중 약 35%를 차지하는 잉곳 및 실리콘 웨이퍼는 태양전지 모듈의 가격을 결정하는 중요한 요소이다.⁽¹³⁾ 실리콘 웨이퍼의 두께가 180 μm 에서 100 μm 로 감소 시 잉곳에서 생산되는 실리콘 웨이퍼 수는 약 15.4% 증가하게 된다. 따라서, 제조단가 절감을 위해 실리콘 웨이퍼의 두께는 Fig. 5와 같이 현재 상용화되는 170 ~ 180 μm 에서 지속적으로 감소하여 2028년도에는 130 ~ 150 μm 까지 박형화가 진행될 것으로 예상된다.

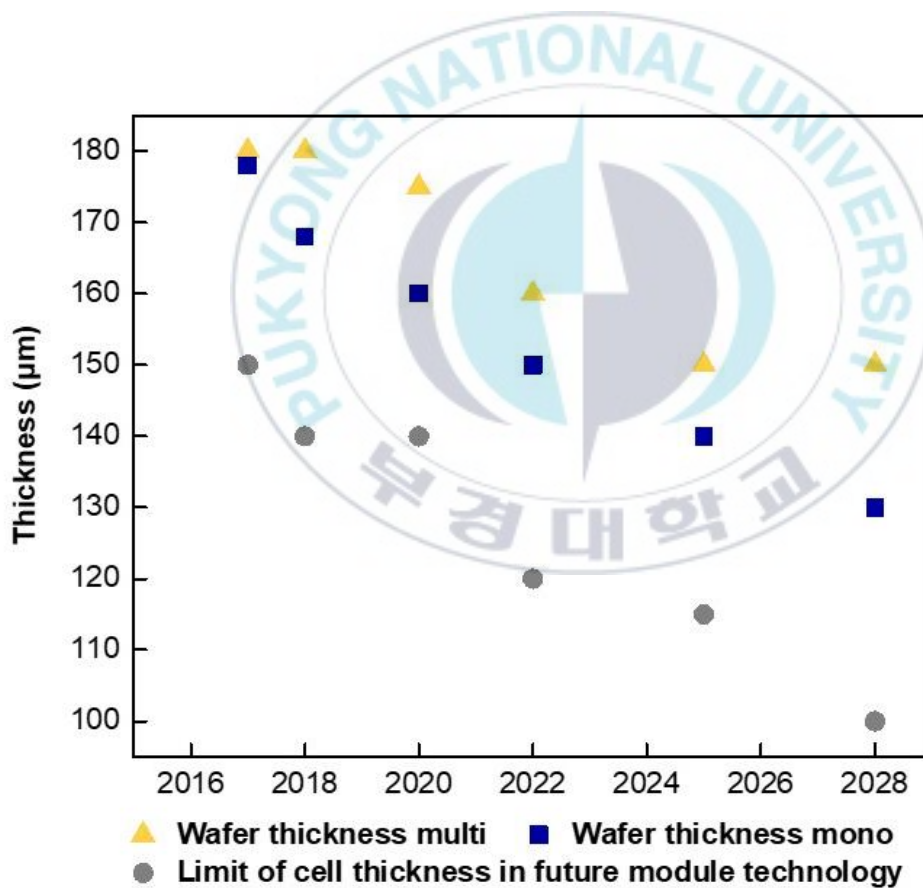
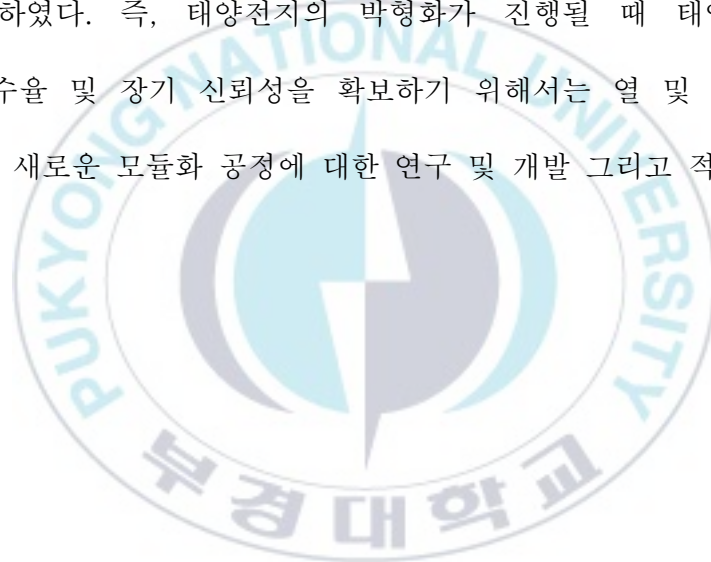


Figure 5. Wafer thickness trend to reduce production cost of crystalline silicon solar cells⁽¹⁴⁾

태양전지 모듈화 공정 중 태빙 공정의 경우 원활하고 빠른 공정을 통한 생산성 확보를 위해 짧은 시간(약 2초 이내) 이내에 공정을 진행해야 하기 때문에 매우 높은 온도에서 공정이 진행된다. 이때, 메탈리본의 온도는 약 400℃까지 올라가게 되며, 결과적으로 고온의 태빙 공정 후 메탈리본과 태양전지의 열팽창계수 차이로 인해 태양전지의 휨 현상이 발생하게 된다. 특히, 박형 태양전지의 경우에는 고온의 태빙 공정으로 인해 발생하는 메탈리본의 수축력을 견디지 못해 파손된다. Fig. 6은 저융점 솔더 페이스트를 이용하여 태빙 공정의 온도를 낮춰 제작한 박형 태양전지 모듈의 이미지이다. 저융점 솔더 페이스트를 사용하여 태빙 공정의 온도를 낮췄음에도 불구하고 태양전지의 파손은 불가피하게 발생하였다. 즉, 태양전지의 박형화가 진행될 때 태양전지의 파손율을 최소화하여 생산수율 및 장기 신뢰성을 확보하기 위해서는 열 및 기계적 스트레스를 최소화할 수 있는 새로운 모듈화 공정에 대한 연구 및 개발 그리고 적용이 필수적이다.



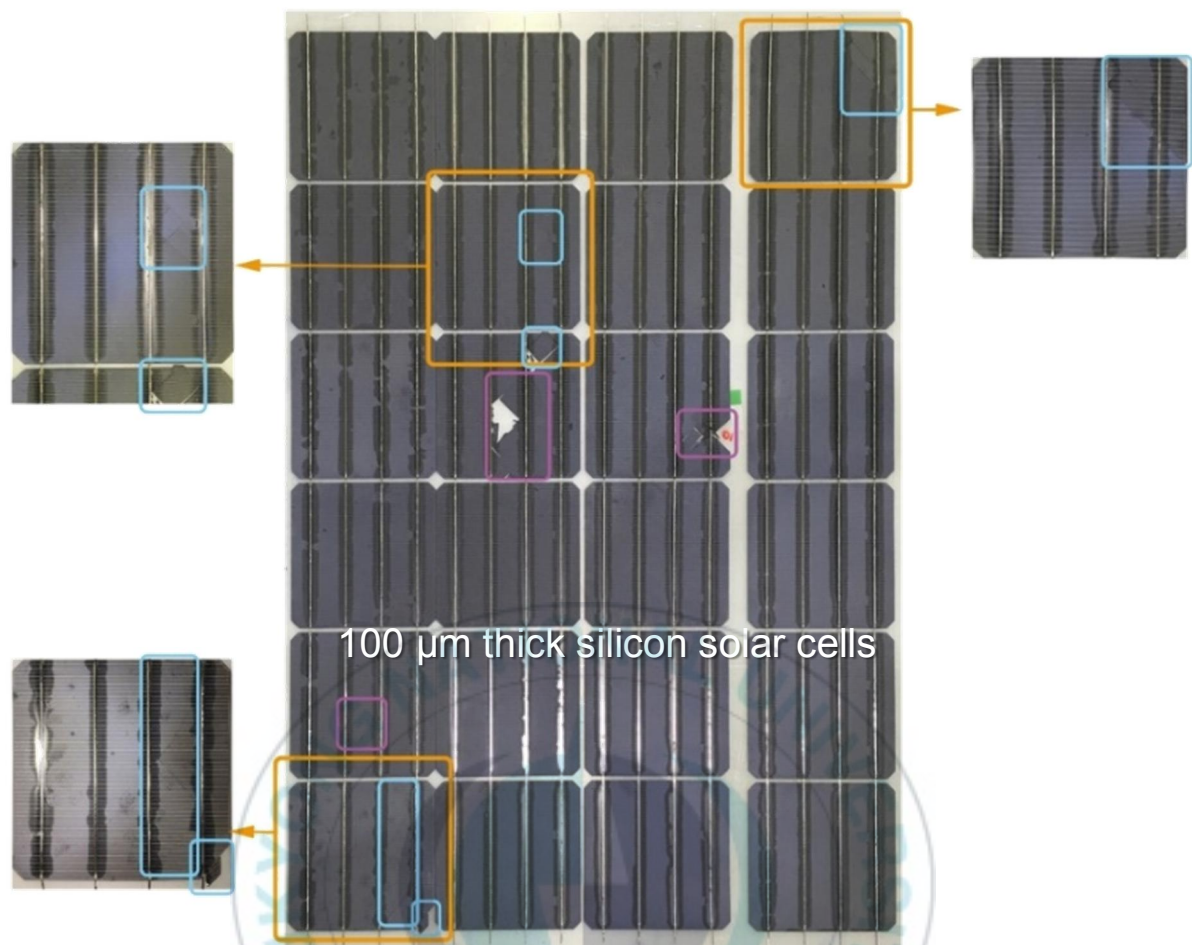


Figure 6. Breakage to thin photovoltaic module due to tabbing process using low melting solder paste⁽¹¹⁾

4.3 고온의 태빙 공정을 제거한 신규 태양전지 모듈화 공정

본 연구에서는 저융점 메탈리본을 이용하여 고온의 태빙 공정 없이 레이업과 라미네이션 공정만으로 태양전지 모듈을 제작하는 신규 태양전지 모듈화 공정(Layup-Only Modulization, 이하 LOM으로 약칭)을 제시하도록 한다. LOM 기술은 태빙 공정 없이 태양전지의 모듈화가 진행되기 때문에 태양전지에 가해지는 열 및 기계적 스트레스를 최소화할 뿐만 아니라, 모듈 제작에 필요한 장비 및 전력 그리고 제작 시간을 절약시켜 태양전지 모듈의 장기 신뢰성과 경제성 확보에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.



II. 실험

1. LOM 기술을 통한 태양전지 모듈

1.1 LOM 기술의 정의

높은 효율 및 낮은 생산단가라는 큰 이점으로 인해 태양전지 생산량의 대부분을 차지하는 결정질 실리콘 태양전지는 태양광발전시스템에서 요구하는 전압 및 장기 신뢰성 확보를 위해 모듈화하여 사용한다. 이러한 태양전지 모듈화 공정은 크게 보았을 때, 1) 고온의 태빙 공정, 2) 레이업 공정 및 3) 라미네이션 공정으로 나눌 수 있다.

LOM 기술은 저융점 메탈리본을 이용해 라미네이션 공정 중 메탈리본에 코팅된 솔더 합금이 녹으면서 태양전지 버스바와 메탈리본 사이의 인터커넥션을 형성한다. 따라서, 기존 3단계 모듈화 공정에서 고온의 태빙 공정을 제거할 수 있기 때문에 Fig. 7에 나타나 있는 것과 같이 레이업 공정과 라미네이션 공정만으로 태양전지의 모듈화가 가능해진다. Fig. 8은 상기의 3단계 모듈화 공정을 2단계로 단순화할 수 있는 LOM 기술의 아이디어를 나타낸 일러스트이다.

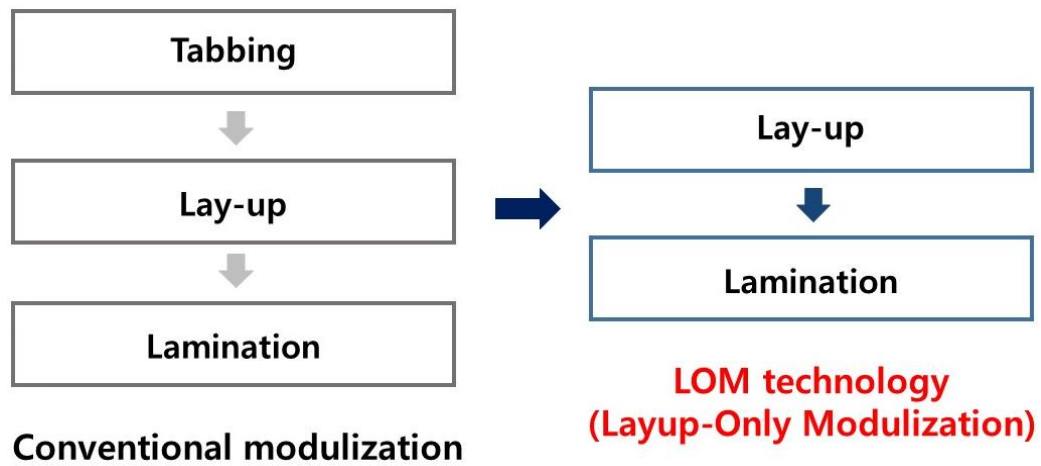


Figure 7. Process simplification with LOM technology

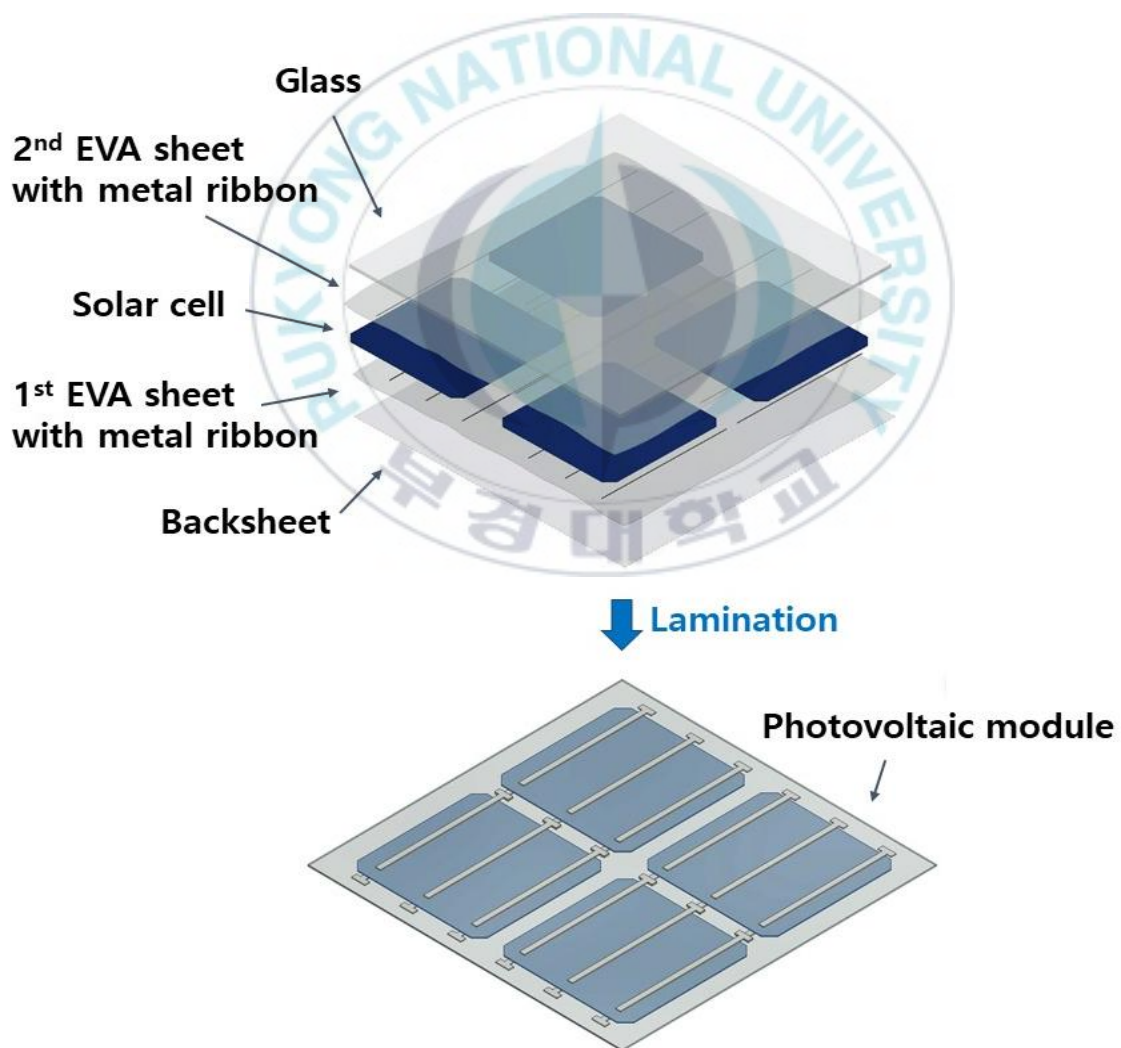


Figure 8. Schematic illustration of the LOM technology

1.2 메탈리본이 임베디드된 EVA 시트

기존의 3단계 모듈화 공정을 2단계로 단순화하기 위해 Fig. 9에 나타나 있는 EVA 시트와 메탈리본을 이용하여 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’를 제작하였다. 이때, 라미네이션 공정 중 메탈리본에 코팅된 솔더 합금이 용융되어 태양전지 버스바와 메탈리본 간의 인터커넥션을 형성하기 위해 Table 1에 제시된 다양한 용점을 가지는 솔더 합금 중 139℃의 용점을 가지는 BiSnAg 메탈리본을 사용하였다.



Figure 9. EVA sheet and metal ribbon used in the experiment

Table 1. Melting and solidus temperature data of solder alloys ^(1 5)

Solder alloy	Melting temperature (°C)	Solidus temperature (°C)
Sn40.5/Bi58/Ag1.5	139	138
Sn60/Pb40	190	183
Sn95/Ag05	240	221
Sn77.2/In20/Ag2.8	187	175
Sn97/Cu03	300	227
Sn95.5/Ag4.0/Cu0.5	220	217

2. LOM 기술을 통한 단위 모듈

2.1 단위 모듈 제작에 사용된 재료

LOM 기술을 통해 태양전지 모듈을 제작하기 위해 사용된 재료들은 다음과 같다. 메탈리본은 앞서 언급한 저융점의 BiSnAg 메탈리본(ETP-Cu Sn40.5/Bi58/Ag1.5, KOS Ltd.)을 사용하였으며, 메탈리본이 임베디드될 봉지재로는 EVA 시트(J0500, SKC Co., Ltd.)를 사용하였다. Fig. 10은 모듈 제작 시 사용된 6 inch, M2 크기(156.75 x 156.75 mm)의 단결정 태양전지(SH-1900S-M(T02), SHINSUNG E&G Co., Ltd.)로써 후면 전극의 경우 Al-BSF 구조이며, 전면 전극의 경우 세그먼트 형태의 3 버스바 구조를 가진다. 또, 태양전지 모듈의 전면을 보호하는 유리로는 광 투과도가 높은 저철분 유리(SM-type, Flat Solar Glass Group Co., Ltd.)를 사용하였으며, 후면재로는 광 이용 효율을 높이기 위해 흰색의 백시트(BQ3RE35(W), SKC Co., Ltd.)를 사용하였다.

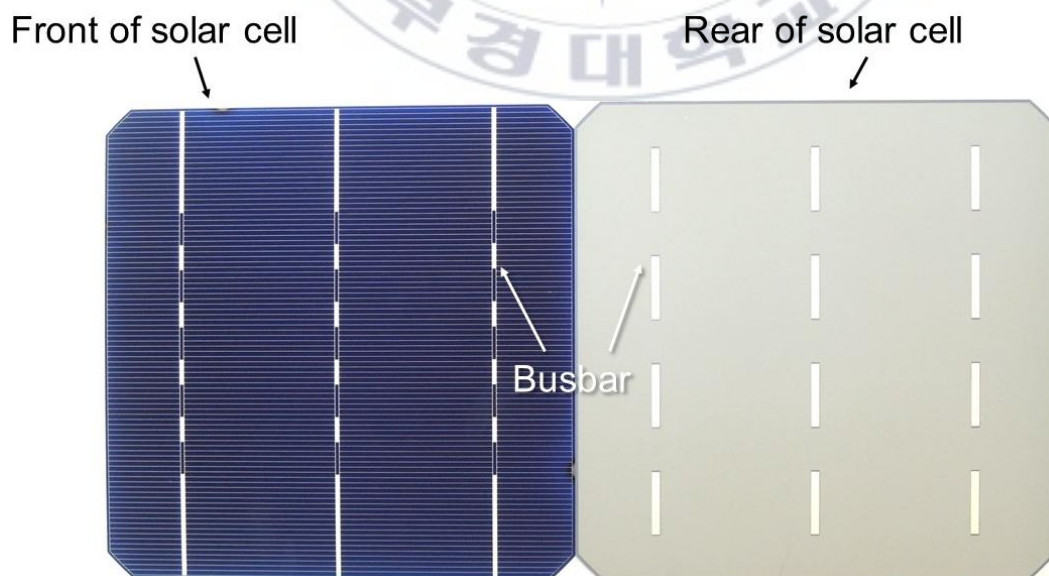


Figure 10. Solar cell used in the experiment (unit module)

2.2 메탈리본이 임베디드된 EVA 시트 제작

태빙 공정 없이 레이업 공정과 라미네이션 공정만으로 태양전지 모듈을 제작하기 위해 사용된 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’의 제작 방법은 다음과 같다. 먼저, 메탈리본을 EVA 시트에 부착시키기 위해 EVA 시트에 메탈리본을 올려놓은 후 메탈리본의 양단부 및 중앙에 UV-bond(UV-8800, Skycares Co.)를 소량 도포해준다. 이때, 도포된 UV-bond는 UV 경화기(PRIME - 100™ Series, Skycares Co.)를 이용해 수초 간 자외선 경화를 진행하였으며, 이렇게 제작된 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’의 이미지는 Fig. 11에 나타나 있다.



Figure 11. EVA sheet with metal ribbons made using UV curing machine and UV-bond

2.3 단위 모듈 제작 과정

LOM 기술을 통한 단위 모듈의 제작 순서는 다음과 같다. 먼저, Fig. 12와 같이 태양전지의 엣지(edge)와 닿는 메탈리본이 용융됨으로써 발생하는 태양전지의 전기적 션트를 방지하기 위해 태양전지의 엣지에는 절연 페이스트(XB-3245, Fujikura Kasei Co., Ltd.)를 도포해 주었다. 도포된 절연 페이스트는 핫플레이트를 이용하여 120℃의 온도에서 30분간 경화를 진행하였으며, 이로 인해 태양전지의 전기적 션트를 방지하기 위한 절연막을 형성하였다.

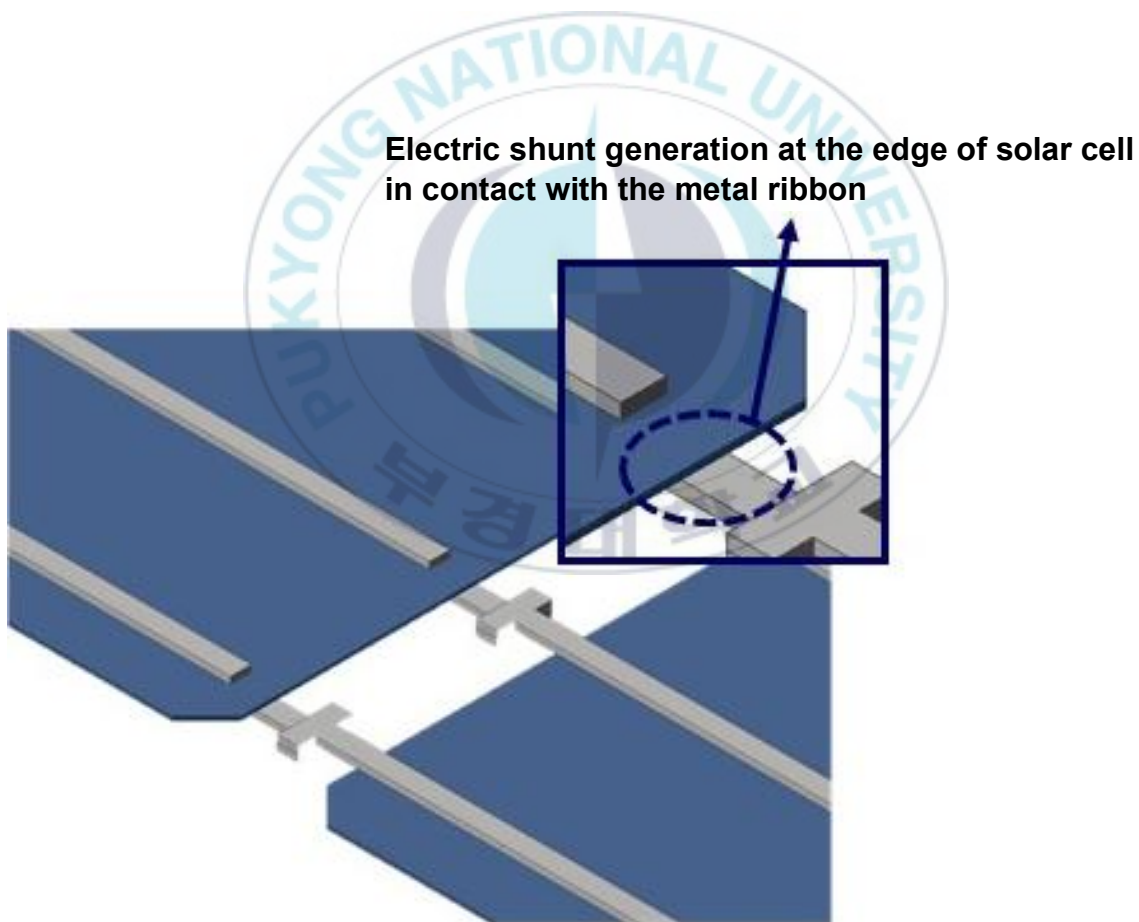


Figure 12. Schematic illustration of electric shunt generation at the edge of the solar cell in contact with the metal ribbon

그 후, 백시트, 메탈리본이 임베디드된 첫 번째 EVA 시트, 태양전지, 메탈리본이 임베디드된 두 번째 EVA 시트, 유리 순으로 적층하는 레이업 공정을 진행한다. 마지막으로 적층된 모듈 구성 재료들을 저온 진공에서 합착하는 라미네이션 공정을 통해 태양전지 모듈을 완성하였다. 이때, 일반적인 대학교 실험실 단위에서는 라미네이션 공정을 위한 대형 라미네이터가 없기 때문에 자체적으로 라미네이션 공정을 진행하였으며 진행 공정은 다음과 같다.

라미네이션 공정 중 기포가 완전히 제거되지 않은 모듈은 외부 환경에서 사용 시 기포가 태양광을 산란시켜 모듈의 출력이 감소되거나, 시간의 지남에 따라 기포가 성장하여 de-lamination 및 변색 현상이 발생하게 되어 제작된 모듈의 장기 신뢰성이 저하된다. 이러한 이유로 인해 기포들이 발생한 모듈은 생산라인에서 불량으로 취급하기 때문에 기포 제거가 필수적이다.⁽¹⁶⁾ 본 실험에서는 라미네이션 공정 중 발생하는 기포를 제거하기 위해 진공펌프(MVP 6, Woosung Vacuum Co., Ltd.)와 가정용 진공 포장지를 이용해 탈포 공정을 진행하였으며, 원활한 탈포 공정을 위해 가정용 롤러를 이용하여 수동으로 힘을 가해 기포를 제거해 주었다. Fig. 13은 탈포 공정 없이 제작한 태양전지 모듈의 이미지이다.

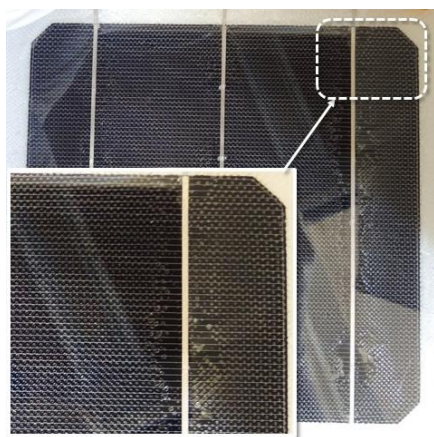


Figure 13. Unit module manufactured without defoaming process

탈포 공정 후 태양전지 모듈 구성 재료들은 공압식 열 프레스기(공압식 열 프레스기, YOUNG JIN JEWELRY TOOL Co., Ltd.)를 이용하여 160℃의 온도에서 5분간 합착을 진행하였다.⁽¹⁷⁾ Fig. 14는 LOM 기술을 통한 단위 모듈의 제작 과정이며, 제작된 단위 모듈의 이미지는 Fig. 15에 나타나 있다.

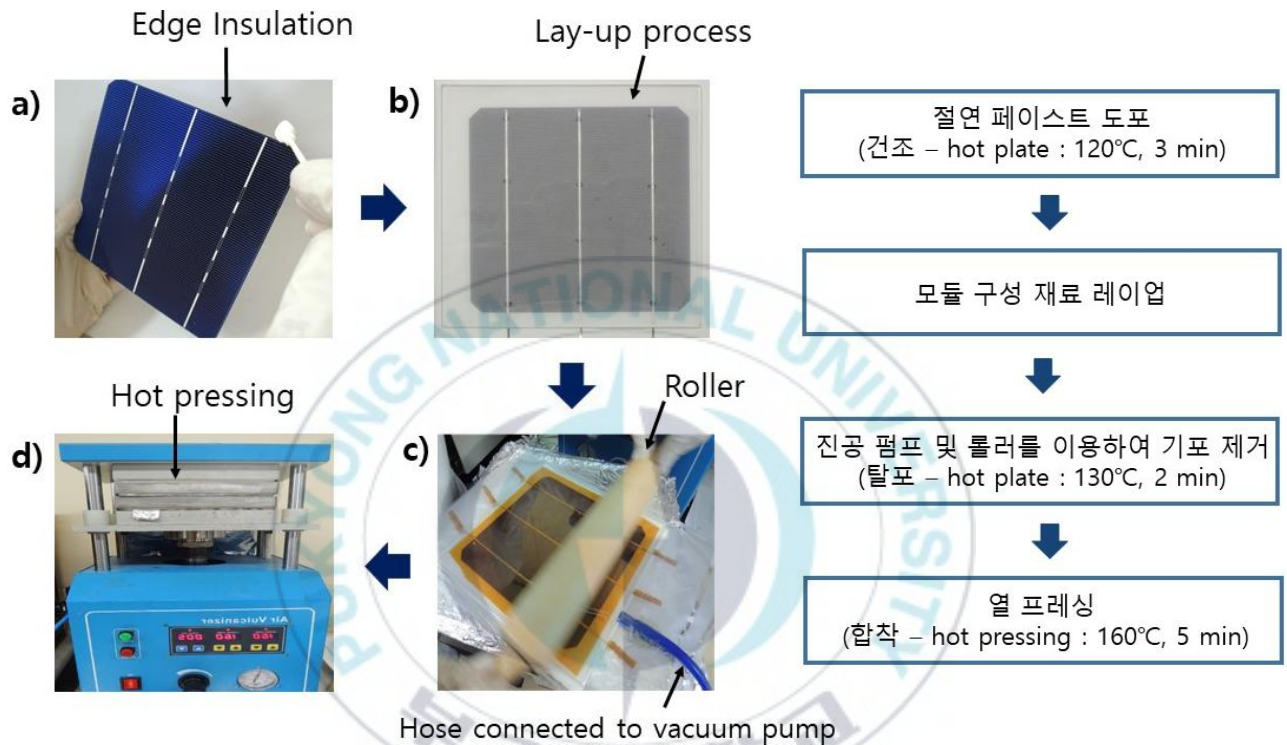


Figure 14. Manufacturing process using LOM technology (unit module)

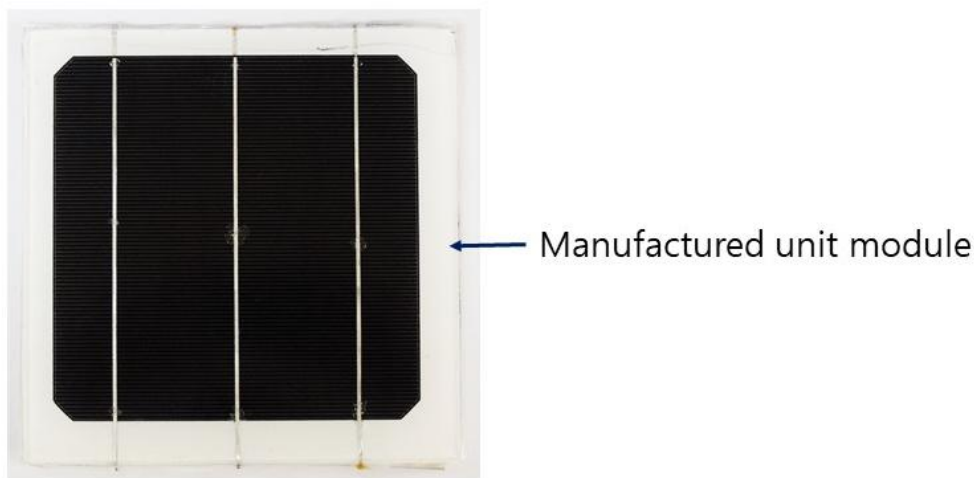


Figure 15. Unit module manufactured by the LOM technology

3. 제작된 단위 모듈 분석

3.1 변환 효율 측정

변환 효율은 제작된 태양전지 모듈에 입사된 에너지 대비 생성된 에너지의 비로 태양광발전시스템에서 발전 성능을 파악할 수 있는 가장 중요한 데이터이다. 이러한 태양전지의 효율은 아래와 같은 이유로 외부 온도에 영향을 쉽게 받기 때문에 정확한 효율 측정을 위해서는 일정한 온도로 제어한 후 효율 측정을 진행하여야 한다.

대부분 반도체 소자들은 온도의 변화에 따라 밴드갭 에너지가 달라지기 때문에 온도에 민감한 특성을 지닌다. 일반적으로 온도가 증가할 때 반도체의 밴드갭 에너지는 감소하게 되어 더 낮은 에너지로 자유전자의 생성을 가능하게 한다. 그러나, 태양전지의 전류-전압 특성을 봤을 때 전류의 경우에는 온도 상승에 따라 Eq. 1과 같이 더 많은 전자-전공 쌍을 생성하기 때문에 광생성전류(I_L)의 증가로 인해 단락전류(I_{sc})는 일정량 증가하는 반면, 개방전압(V_{oc})의 경우 Eq. 2와 같이 온도가 상승함에 따라 증가된 포화전류(I_0)로 인해 큰 감소를 보이게 된다.⁽¹⁸⁾ 이때, 온도의 증가로 인한 개방전압의 감소 폭은 단락전류의 증가 폭에 비해 매우 크며, 이로 인해 온도의 증가에 따라 Eq. 3에 제시된 변환효율(η)은 감소하게 된다. 온도에 따른 태양전지의 전류-전압 특성은 Fig. 16과 같으며, 이론상으로 모듈의 온도가 1℃씩 상승할 때 약 0.5%의 출력 감소가 발생하게 된다. 따라서, 태양전지 정확한 효율 측정 및 판단을 위해 온도 편차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하의 정확도를 가져야 한다.⁽¹⁹⁾

$$I_{sc} = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qV}{nkT} \right] - 1 \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \dots\dots\dots (3)$$

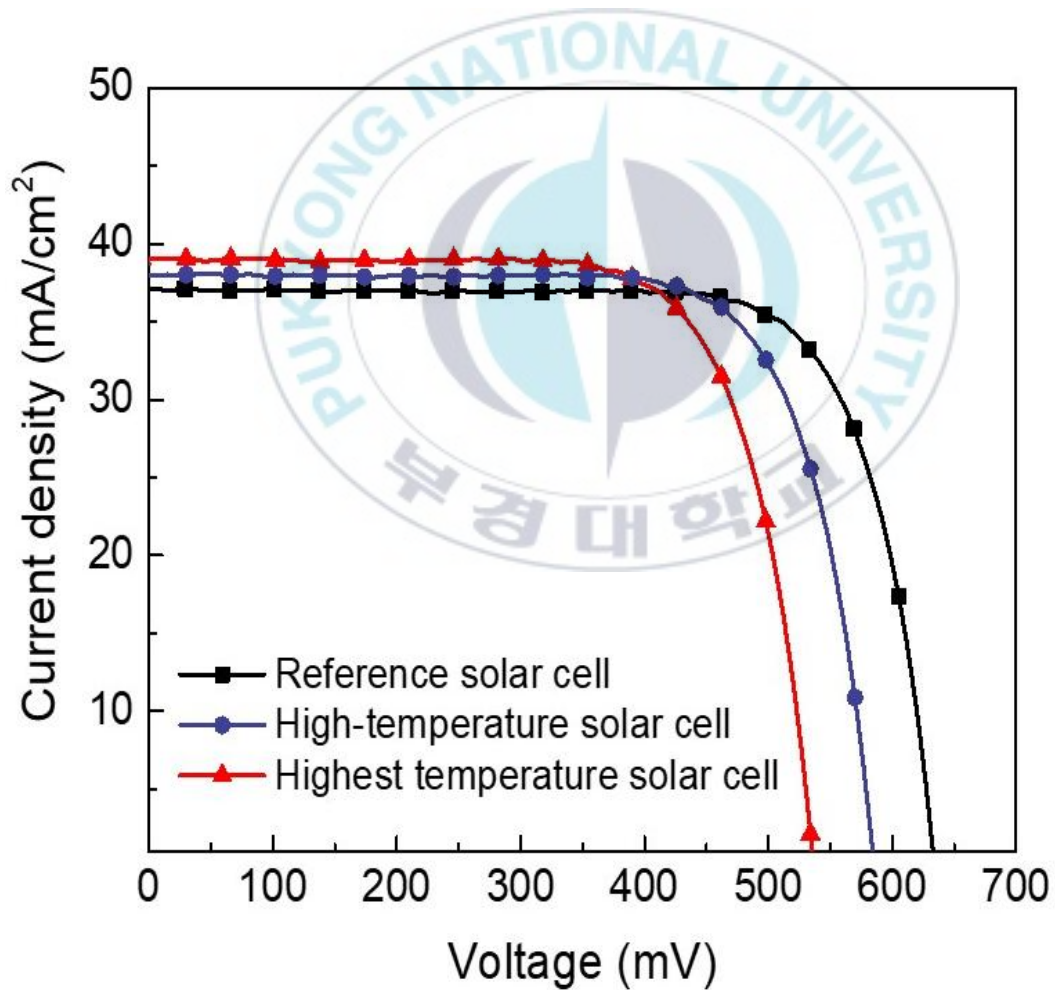


Figure 16. I–V characteristics of photovoltaic module on temperature variation

본 실험에서는 효율 측정 날짜에 따라 온도가 변화함으로써 발생하는 측정 오차를 줄이기 위해 LOM 기술을 통해 제작된 태양전지 모듈과 고용점의 메탈리본 (ETP-Cu Sn60/Pb40, KOS Ltd.)을 사용하는 기존의 3단계 모듈화 공정을 통한 모듈과 비교하였다. Fig. 17은 제작된 단위 모듈의 효율 측정 시 이미지이며, 측정 장비로는 한국에너지기술연구원의 태양전지 발전 성능 시험 장치(K3000, McScience, Inc.)를 사용하였다.

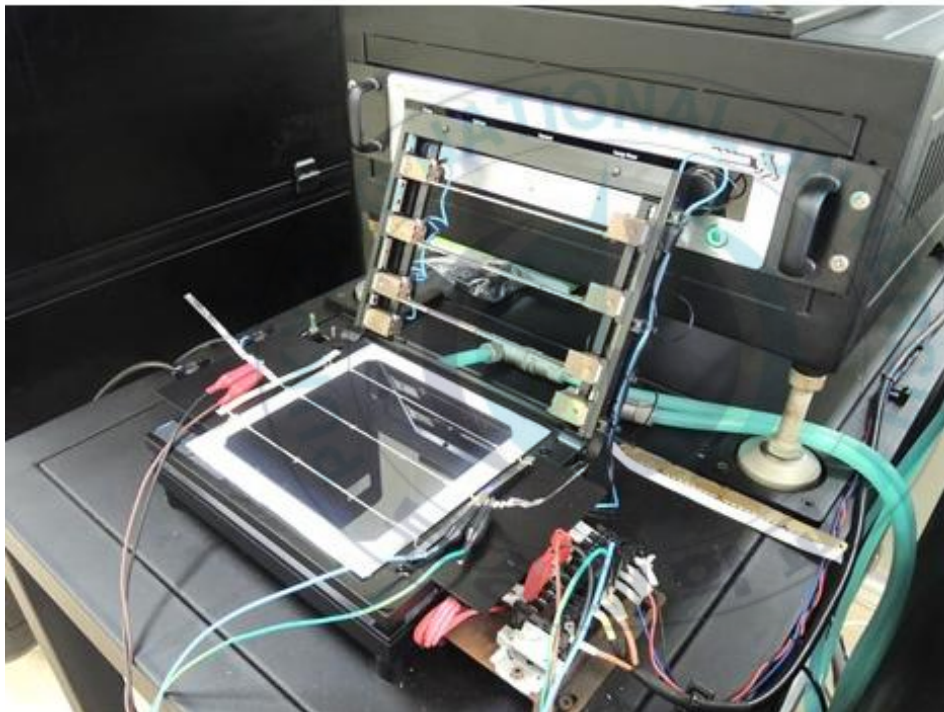


Figure 17. Solar simulator used to measure unit module efficiency by courtesy of the photovoltaic laboratory, Korea Institute of Energy Research

3.2 열 사이클(thermal cycle) 시험

열 사이클 시험은 태양전지 모듈의 신뢰성을 분석하는 방법 중 하나로써 태양전지 모듈에 온도 변화를 반복해 열 및 기계적 스트레스, 접합 불량, 균열 등 실제 외부 환경에서 발생하는 문제점을 단기간에 파악 가능한 가속화 테스트이다. LOM 기술을 통해 제작된 모듈의 장기간 사용에 따른 문제점을 단기간에 파악하기 위해 한국에너지기술연구원의 열 사이클 장비(DYR-22P, Daeyang ETS Co., Ltd.)를 이용하여 신뢰성 테스트를 진행하였다. 열 사이클 조건은 Fig. 18과 같으며 급격한 온도 변화를 위해 -45°C 에서 80°C 까지를 1 사이클로 설정하였으며, 1 사이클에는 5 시간이 소요되었다. 본 실험에서는 총 200 사이클(1000 시간)동안 열 사이클 시험을 진행하였다. 열 사이클에 따라 단위 모듈들의 효율을 측정하여 전기적 성능의 변화 정도를 파악하였으며, 효율 측정 시 앞서 언급한 바와 같이 온도 변화로 인한 측정 오차를 줄이기 위해 기존의 3단계 모듈화 공정을 통한 단위 모듈과 비교하였다.

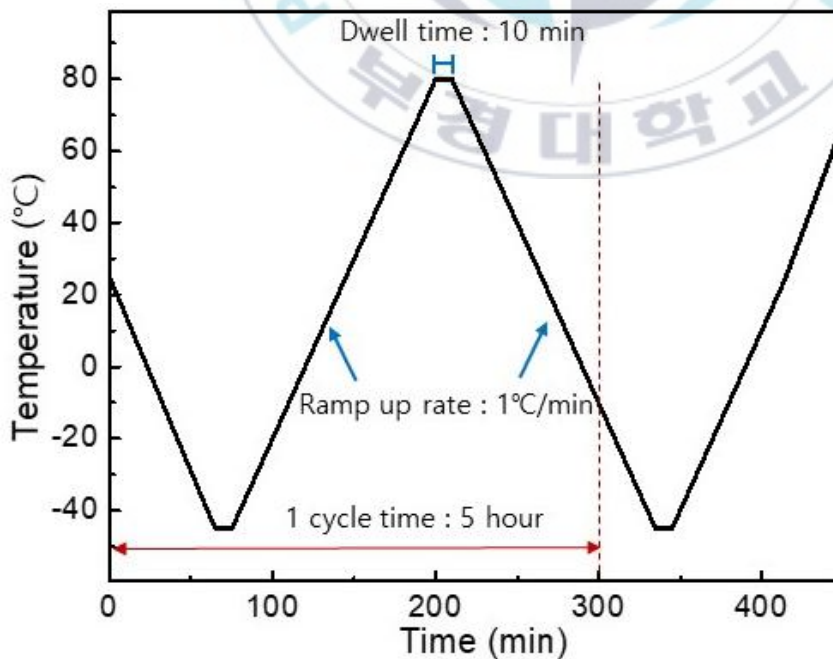


Figure 18. Temperature conditions of thermal cycle test

4. LOM 기술을 통한 2 × 2 모듈

4.1 2 × 2 모듈 제작에 사용된 재료

LOM 기술에 대한 대면적 테스트를 위해 2 × 2 크기의 태양전지 모듈을 제작하였다. Fig. 19는 태양전지 모듈 제작 시 사용된 6 inch, M2 크기(156.75 x 156.75 mm)의 단결정 태양전지(SR6SKCN0B2040, Sino-American Silicon Products Inc.)로써 전면 및 후면 전극은 세그먼트 형태의 3 버스바 구조를 가진다. 태양전지 모듈화 공정에 필요한 기타 구성 재료들은 단위 모듈 제작에 사용된 재료들과 동일한 제품을 사용하였다.

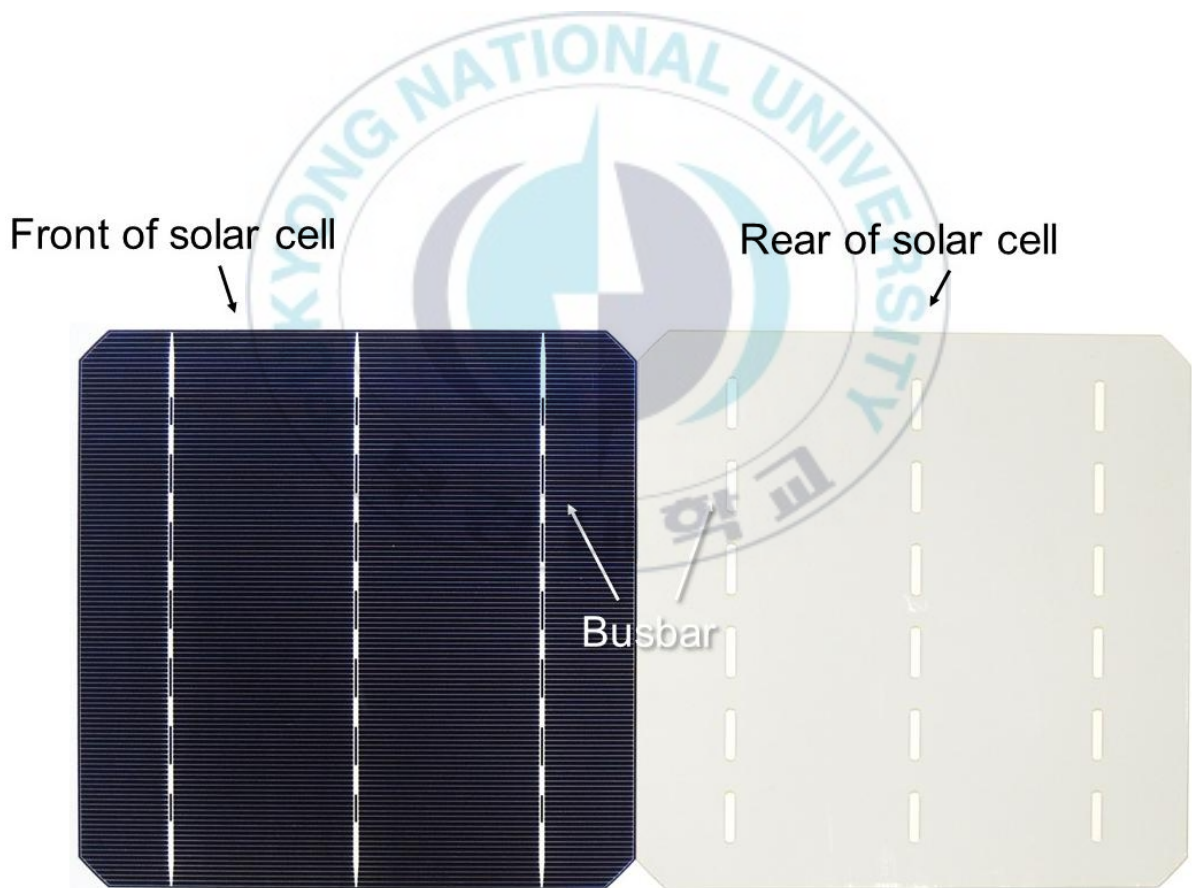


Figure 19. Solar cell used in the experiment (2 × 2 module)

4.2 메탈리본이 임베디드된 EVA 시트 제작

Fig. 20은 UV-bond를 이용한 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’를 사용하여 제작한 단위 모듈의 이미지이다. 경화된 UV-bond는 라미네이션 공정 중 가열되어 주변 부분에 기포가 발생하는 문제점이 발생하였다. 또, 액체 상태의 UV-bond는 경화 후 고체 상태로 존재하기 때문에 라미네이션 공정 중 가해지는 압력으로 인해 UV-bond가 경화된 부분에는 스트레스가 집중되어 태양전지에 물리적 충격이 가해지게 된다. 따라서, 2×2 모듈 제작에 사용될 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’에는 UV-bond가 아니라 EVA 시트와 유사한 성질을 가진 핫멜트 접착제를 사용하였으며, 이를 통해 UV-bond로 인해 발생하는 문제점을 해결하였다. Fig. 21은 핫멜트 접착제를 이용한 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’를 사용하여 제작한 2×2 모듈의 이미지이다.

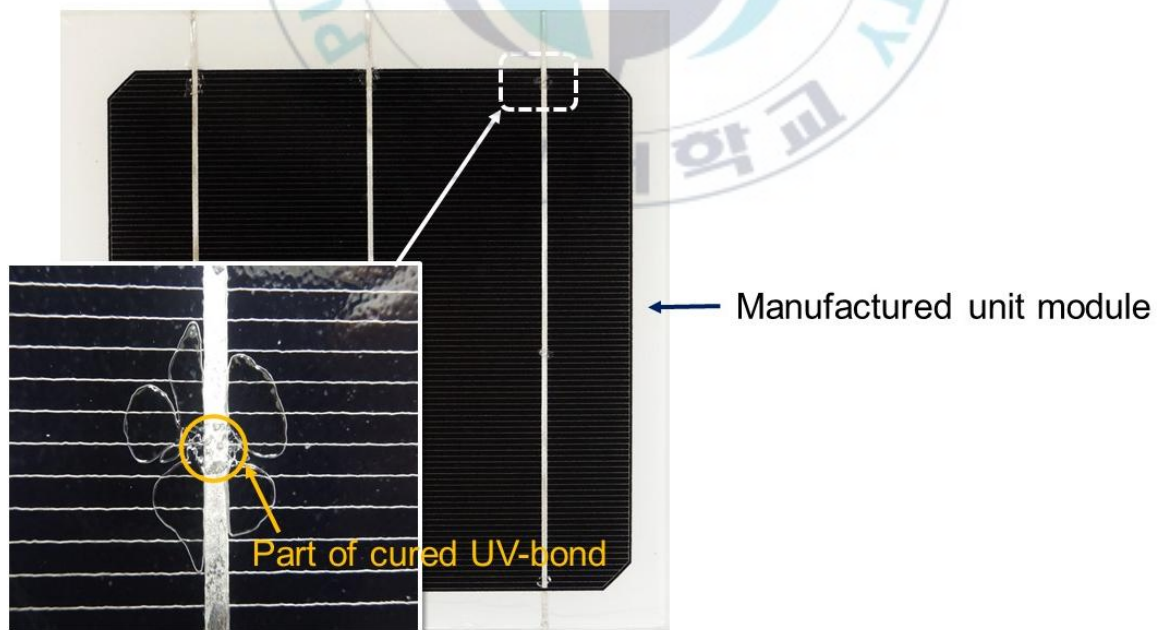


Figure 20. Bubble generation due to UV-bond during laminating process

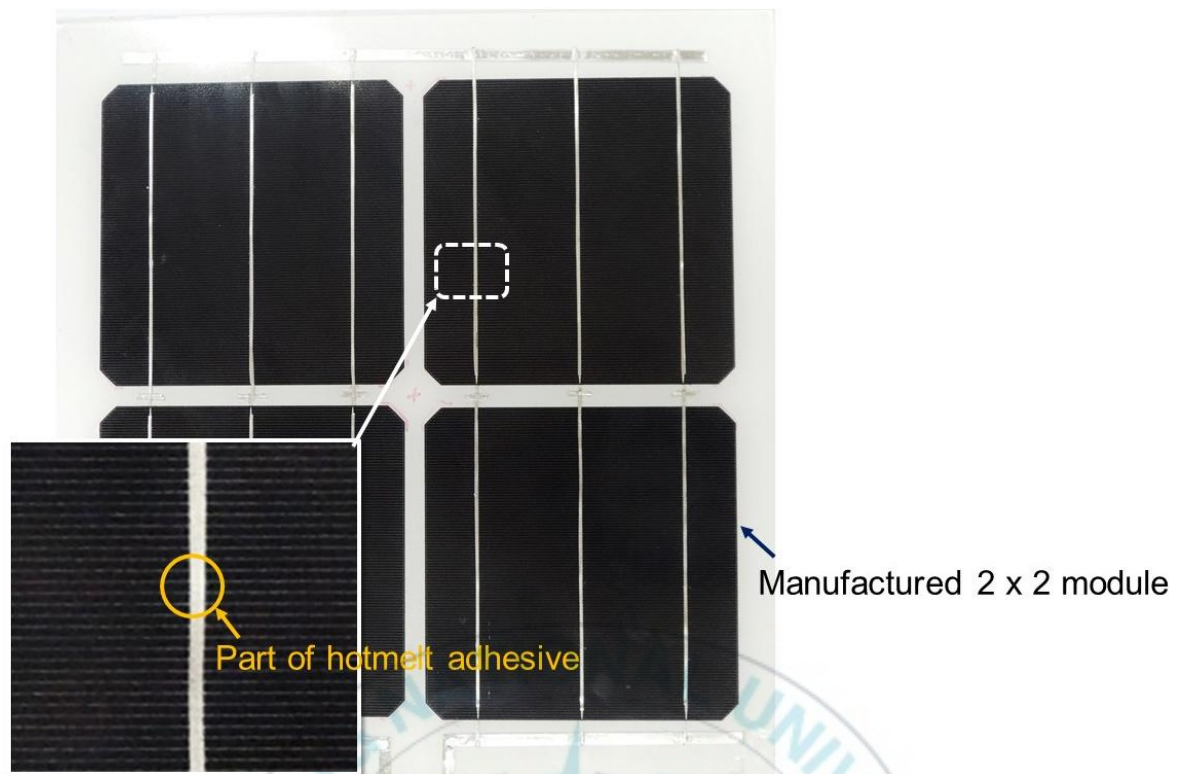


Figure 21. Manufactured 2×2 module without bubble generation

2 × 2 모듈 제작 시 사용된 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’의 제작 과정은 다음과 같다. 먼저, EVA 시트에 메탈리본을 올려놓은 후 양단부 및 중앙 부분에 핫멜트 접착제가 장착된 글루건을 이용하여 Fig. 22와 같이 부착시켜 주었다. 이때, 부착된 메탈리본의 형태는 기존의 ‘I’ 형태가 아니라 ‘T’ 형태로 제작하였으며, 이를 통해 레이업 공정 중 상부 및 하부 메탈리본 접점에서의 얼라인먼트가 용이해질 뿐만 아니라 접점에서의 접착 저항을 낮추는 효과도 얻을 수 있었다.

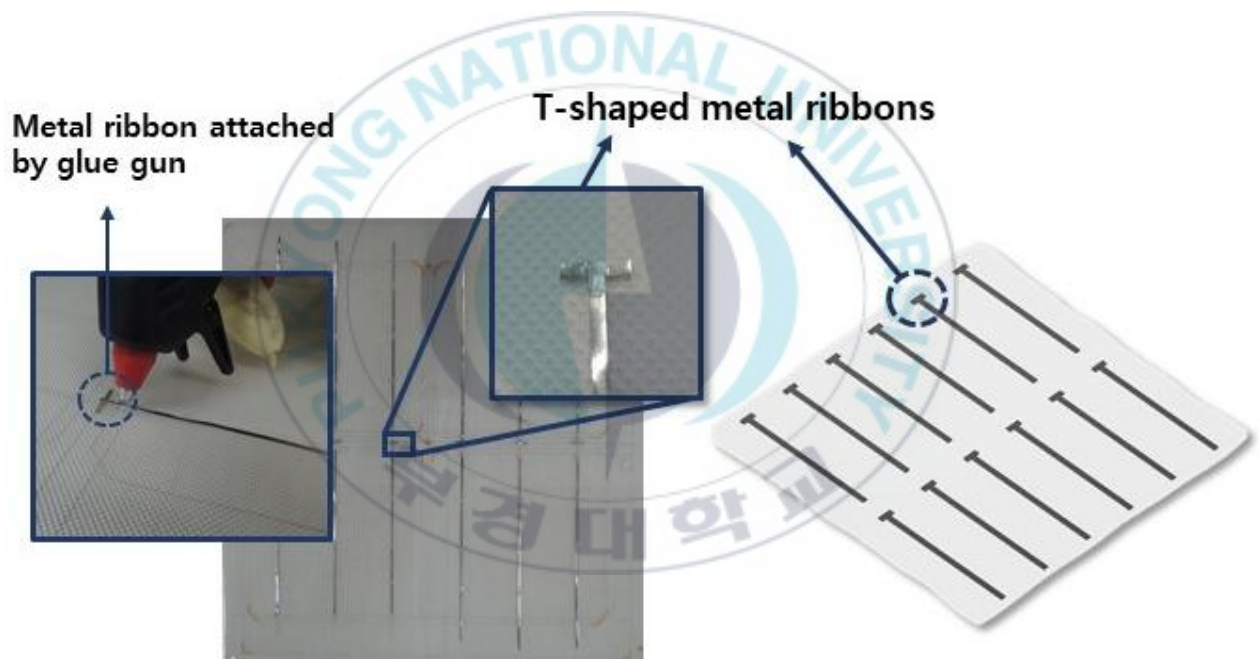


Figure 22. EVA sheet with metal ribbons manufactured using glue gun

또, ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’를 제작 시 자동화된 기계가 아닌 사람이 직접 제작하기 때문에 제작 중 발생하는 얼라인먼트의 오차를 방지하기 위해 전용 도면을 인쇄하여 사용하였다. Fig. 23 a)는 2×2 태양전지 모듈 제작 시 정확한 얼라인먼트를 위해 CAD 프로그램을 이용해 제작한 도면이며, Fig. 23 b)는 인쇄된 도면과 실제 모듈 제작에 사용된 태양전지의 크기를 비교한 이미지이다. 인쇄된 도면을 통해 상부 및 하부 메탈리본 간의 접점, 메탈리본과 버스바 사이의 접점에서 얼라인먼트를 정확하게 하였으며 태양전지 사이의 간격 또한 일정하게 위치시켜 주었다. 만약 정확한 얼라인먼트가 이뤄지지 않는다면 접합 불량이나 전기적 접촉의 문제점이 발생할 수 있다. 또, 제작된 태양전지 모듈에서 태양전지 간의 간격이 일정하지 않다면 태양전지 사이에 있는 백시트의 여백이 달라져 태양전지 모듈 간의 발전 성능이 불균일해지는 현상이 발생하게 되며, 이로 인해 모듈 간의 정확한 성능 비교가 불가능해진다⁽¹⁸⁾

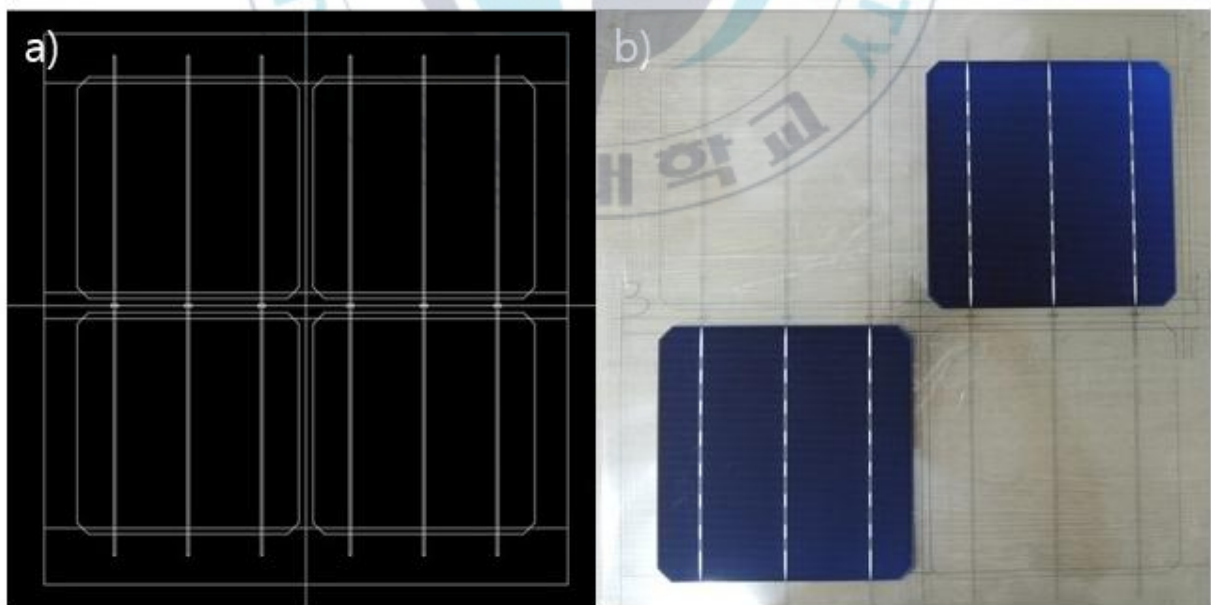


Figure 23. Drawing for the manufacture of 2×2 module, a) CAD program drawing and b) size comparison of printed drawing and solar cell

4.3 2 × 2 모듈 제작 과정

태양전지 모듈화 공정 중 발생하는 태양전지의 전기적 선트를 방지하기 위해 메탈리본과 닿는 태양전지의 엣지 부분에는 절연막을 형성해 주었다. 이때, 신속한 공정의 진행을 위해 Fig. 24와 같이 UV-bond와 UV 경화기를 사용해 수초 안에 절연막을 형성하였다.

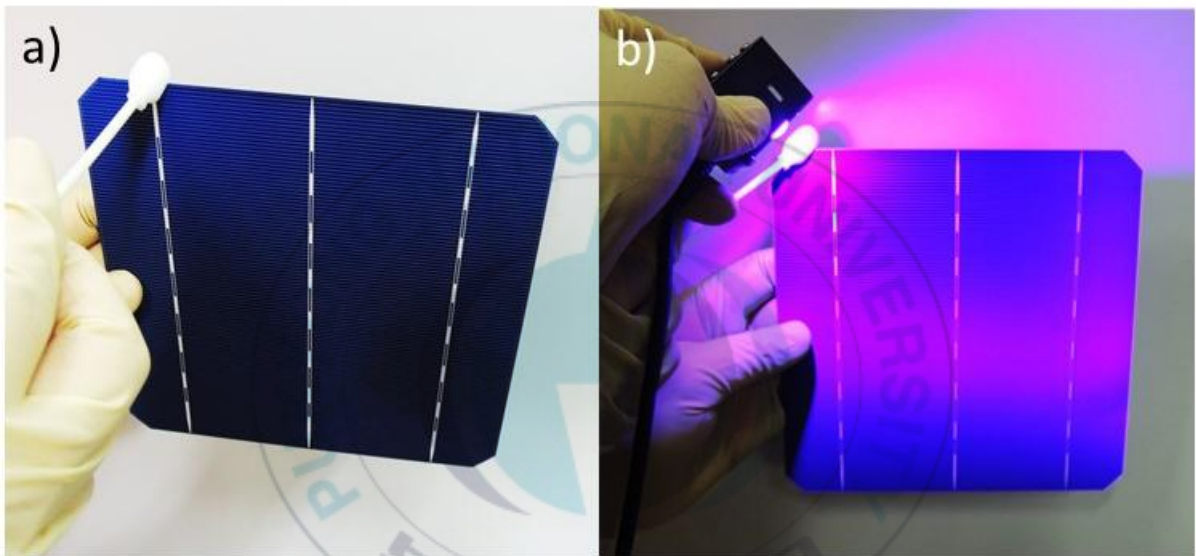


Figure 24. Solar cell edge isolation process, a) applying UV-bond to solar cell edge and b) UV-bond curing by UV curing machine

Fig. 25는 태양전지 모듈의 제작 과정을 나타낸다. 라미네이션 공정의 경우, 이전 단위 모듈 제작 시 사용한 열 프레스기로는 대면적 모듈의 합착이 불가능하기 때문에 한국에너지기술연구원의 진공 라미네이터 장비(480-1222S, Nisshinbo Mechatronics, Inc.)를 이용하여 레이업 된 2 × 2 모듈 구성 재료들을 합착하였다. Fig. 26은 합착을 위해 사용한 라미네이터 장비의 설정 압력 및 온도에 대한 그래프이다.

[Conventional modulization]



[LOM technology]



Figure 25. Comparison of LOM technology and conventional modulization

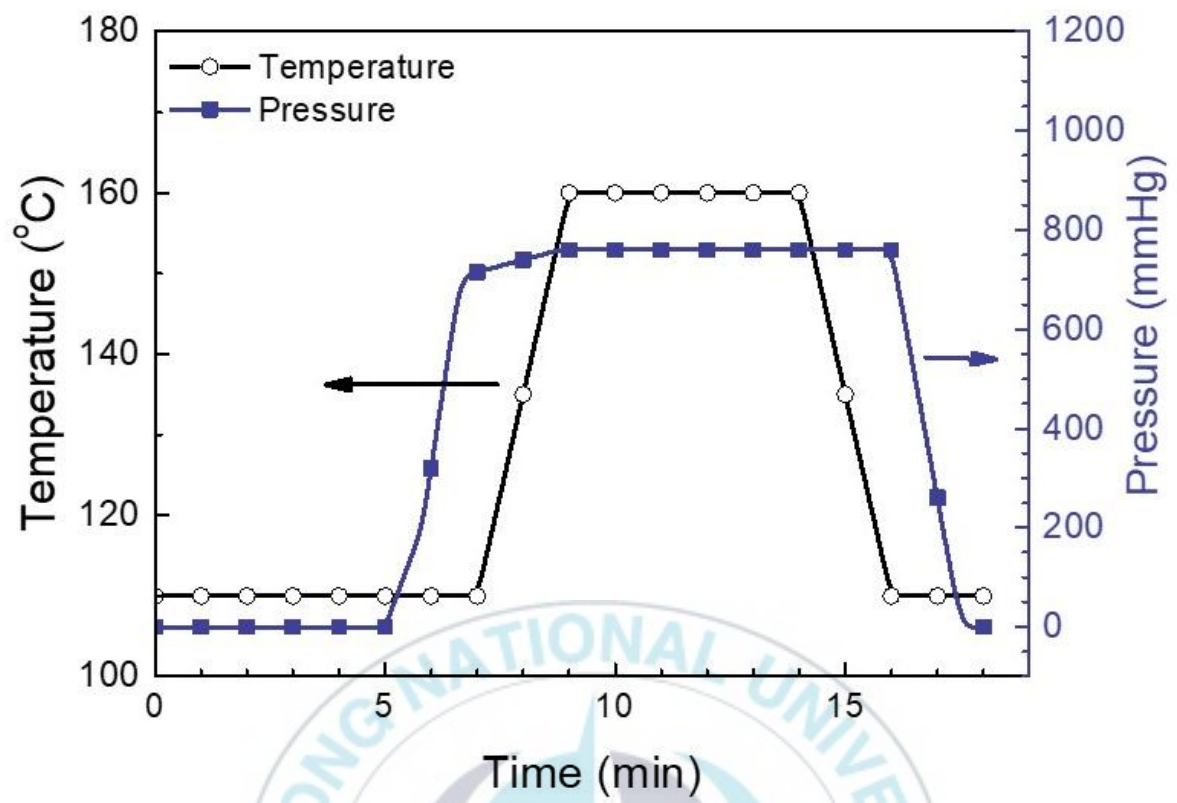


Figure 26. Temperature and pressure conditions of lamination process

5. 제작된 2 × 2 모듈 분석

5.1 변환 효율 측정

이전 단위 모듈의 효율 분석 방법과 같이 LOM 기술을 통해 제작된 2 × 2 모듈의 측정 결과는 기존 3단계 모듈화 공정을 통한 2 × 2 모듈과 비교 분석하였다. Fig. 27은 LOM 기술을 통해 제작된 2 × 2 모듈의 효율 측정 시 이미지이며, 측정을 위해 한국에너지기술연구원의 태양전지 모듈 발전 성능 시험 장치(WPPS2.0x1.5-50x6, WACOM ELECTRIC CO., Ltd.)를 사용하였다.



Figure 27. Solar simulator used to measure 2 × 2 module efficiency by courtesy of the photovoltaic laboratory, Korea Institute of Energy Research

5.2 EL 이미지 분석

EL 이미지(Electroluminescence image)는 LED(light emitting diode)의 원리를 이용한 분석 방법이다. 태양전지의 발전 원리는 밴드갭 이상의 태양광에너지를 태양전지가 흡수하여 생성된 엑시톤이 전자와 정공으로 분리되어 전력을 생산하는 것이다. 반대로 전류를 공급할 때 전자와 정공은 재결합하여 LED와 같이 발광하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 EL 이미지 촬영 시에는 제작된 모듈에 전류를 주입했을 때 생성되는 발광에너지를 적외선 카메라를 이용해 촬영하며, 촬영된 모듈의 이미지에서는 전류를 공급받아 발광하는 영역은 밝게 나타나지만 마이크로-크랙이나 접합 불량 등의 결함을 가진 영역은 어둡게 나타나게 된다. 이러한 EL 이미지 분석 방법은 태양전지 모듈에 충격을 주지 않고도 단기간에 시각적으로 판단하기 힘든 내부적 결함을 분석할 수 있다. 본 실험에서는 EL 이미지 촬영 장비를 통해 LOM 기술을 통한 2×2 모듈의 내부적 결함을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 저융점 메탈리본의 용융 테스트

고온의 태빙 공정 없이 레이업 공정과 라미네이션 공정만으로 태양전지 모듈을 제작하기 위해서는 라미네이션 공정 중 메탈리본에 코팅된 솔더 합금이 용융되어 Fig. 28와 같이 1) 태양전지의 버스바에서 메탈리본, 2) 상부 및 하부 메탈리본 간의 접점에서 전기적 및 기계적 접합이 형성되어야 한다. 라미네이션 공정 후 저융점 메탈리본으로 인해 형성되는 전기적 및 기계적 접합 정도를 확인해보기 위해 열 프레스기를 이용하여 선행 실험을 진행하였다.

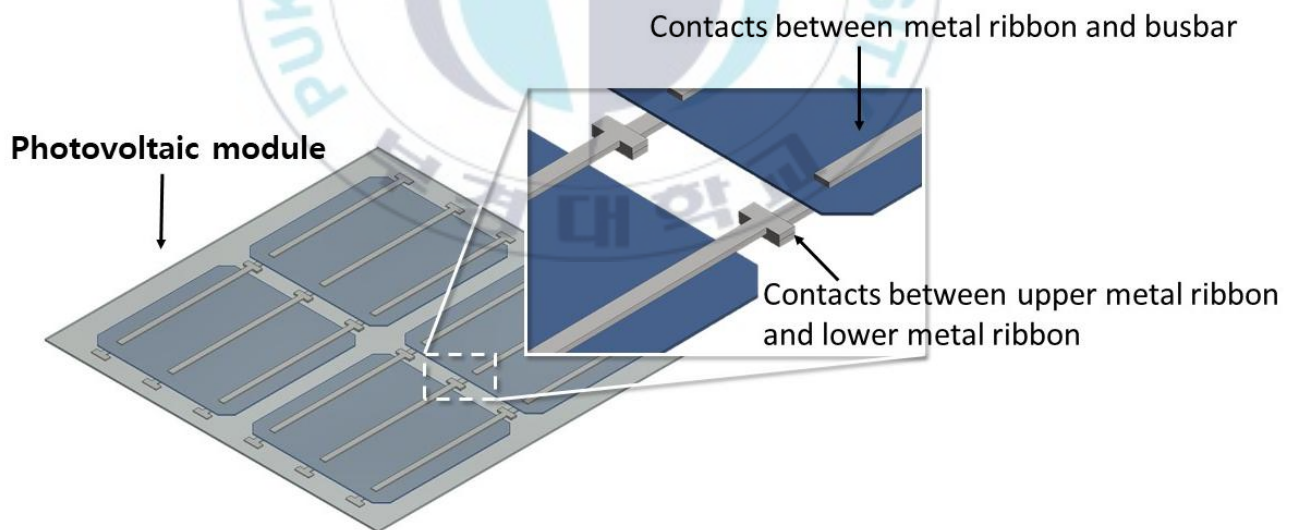


Figure 28. Schematic illustration of contact points in photovoltaic module manufactured by LOM technology

1.1 열 프레싱을 통한 저융점 메탈리본의 기계적 특성

라미네이션 공정 중 메탈리본에 코팅된 솔더 합금이 용융됨으로써 발생하는 기계적 접합 정도를 확인해보기 위해 메탈리본을 열 프레싱하여 테스트를 진행하였다. 이때, 열 프레스의 설정 온도는 라미네이션 공정의 피크 온도인 160°C 로 설정하였으며, 5분간 열 프레싱을 진행하였다. Fig. 29는 열 프레싱 전후의 SnPb 메탈리본이며, Fig. 30은 BiSnAg 메탈리본이다. 실험 결과, 고융점의 SnPb 메탈리본은 코팅된 솔더 합금의 융점이 190°C 이기 때문에 Fig. 29 a)와 같이 위치시킨 후 열 프레싱을 진행하여도 Fig. 29 b)와 같이 솔더 합금이 용융되지 않음을 알 수 있다. 반면에 저융점 BiSnAg 메탈리본은 솔더 합금의 융점이 139°C 로 열 프레싱 공정 중 충분히 용융되기 때문에 Fig. 30 a)와 같이 메탈리본을 위치시킨 후 열 프레싱을 진행하면 Fig. 30 b)와 같이 기계적으로 접합되어 손으로 들어 올렸을 때에도 메탈리본의 위치가 고정된다.

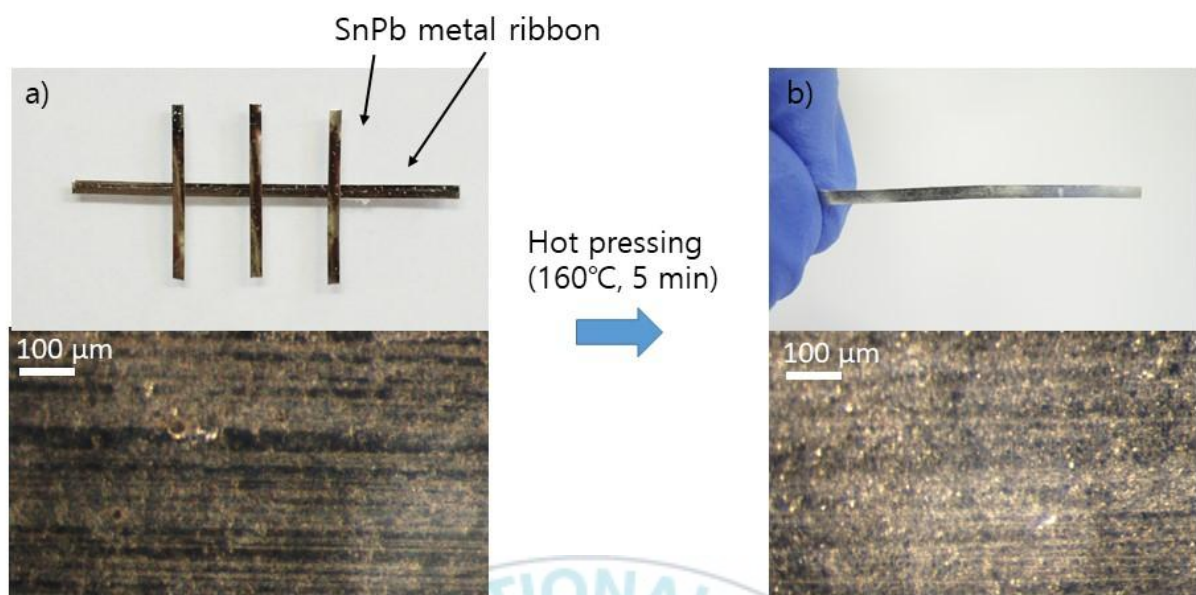


Figure 29. Image of SnPb metal ribbon, a) before hot pressing and b) after hot pressing

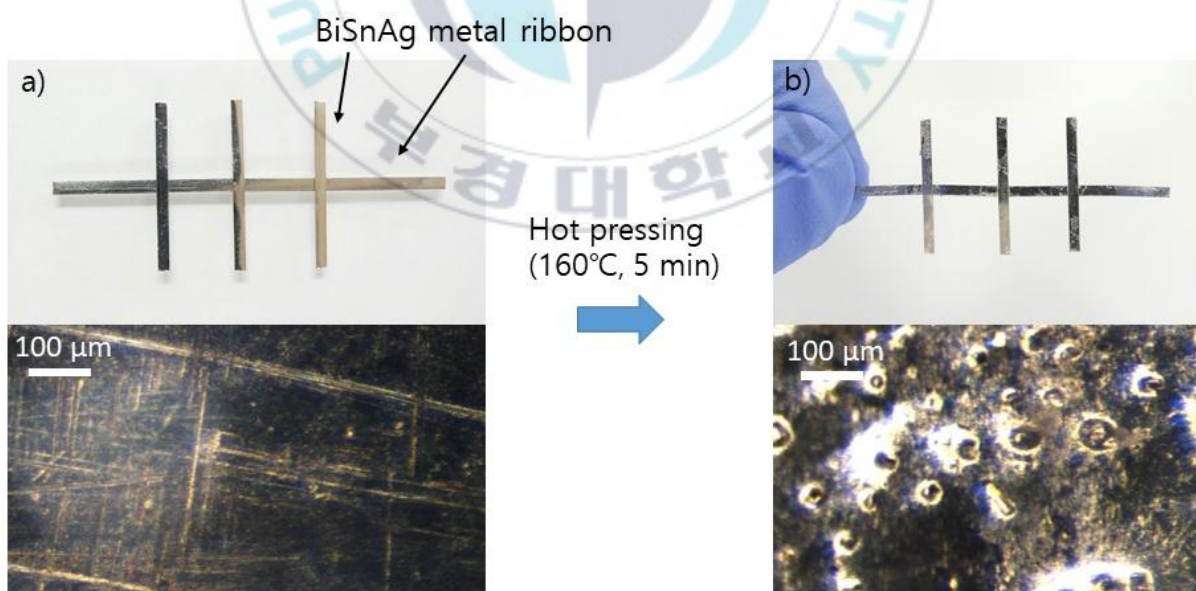


Figure 30. Image of BiSnAg metal ribbon, a) before hot pressing and b) after hot pressing

1.2 열 프레싱을 통한 저융점 메탈리본의 전기적 특성

라미네이션 공정 중 메탈리본에 코팅된 솔더 합금이 용융됨으로써 형성되는 전기적 접합 정도를 확인해보기 위해 BiSnAg 메탈리본과 커팅된 태양전지를 이용하여 샘플을 제작하였다. 샘플 제작에 사용된 태양전지는 단결정 태양전지(SH-1900S-M(TO2), SHINSUNG E&G Co., Ltd.)이며 레이저 장비(Nanio 532-10-V, INNOLAS Co., Ltd.)를 이용해 diode operating current (%) : 89, passed : 80의 조건에서 2×2 cm 크기로 커팅하였다. 그 후 커팅된 태양전지의 버스바에 메탈리본을 올려놓은 후 열 프레스기의 설정 온도 및 시간을 변경해가며 샘플을 제작하였다. 제작된 샘플들의 전기적 성능을 파악하기 위해 프로브 스테이션(MST 4000A, MS Tech Co., Ltd.)과 소스 미터(Model 2410, Keithley instruments Inc.)를 이용하여 접촉 비저항을 측정하였다. Fig. 31 a)는 접촉 비저항 측정 시 이미지이며, Fig. 31 b)는 제작된 샘플의 일러스트이다.

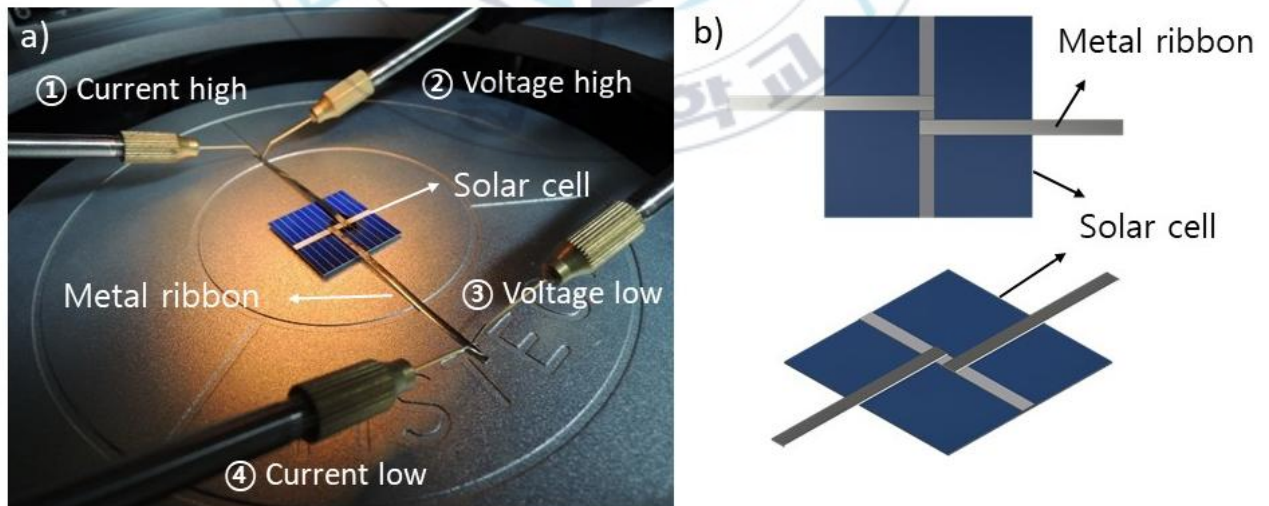


Figure 31. a) image of contact resistivity measurement between solar cell and metal ribbon and b) schematic illustration of sample made for contact resistivity measurement

먼저 태양전지와 메탈리본 경계면에서의 접촉 비저항을 구하기 위해 프로브 스테이션과 소스 미터를 이용하여 저항 R_{tot} 을 측정하였다. Eq. 4에 나타나 있는 것과 같이 측정된 저항 R_{tot} 은 메탈리본 및 버스바의 저항이 포함된 값이기 때문에 R_{tot} 에서 메탈리본의 저항 값 R_{ribbon} , 버스바의 저항 값 R_{busbar} 을 제거해 접촉 저항 값 R_c 을 구하였다. 구해진 접촉 저항 R_c 에 면적을 곱해 Eq. 5와 같이 접촉 비저항 ρ_c 를 계산하였다.

$$R_{tot} = 2R_{ribbon} + R_{busbar} + 2R_c \dots\dots\dots (4)$$

$$\rho_c = R_c A \dots\dots\dots (5)$$

따라서, 최종적으로 구해지는 샘플의 접촉 비저항 공식을 정리하면 Eq. 6과 같이 산출된다.

$$\rho_c = \frac{\{[R_{tot} - 2R_{ribbon} - R_{busbar}]A\}}{2} \dots\dots\dots (6)$$

1) 열 프레스 온도 변화에 따른 샘플의 접촉 비저항

Fig. 32은 설정 온도의 변화에 따라 제작된 샘플들의 접촉 비저항 값이다. 열 프레스의 설정 온도를 140℃에서 160℃로 증가시키면 따라 접촉 비저항은 감소하는 경향을 보이는 반면, 160℃ 이상의 온도에서는 유사한 접촉 비저항 값이 측정되었다. 따라서, 160℃의 온도에서 라미네이션 공정을 진행하게 된다면 BiSnAg 메탈리본에 코팅된 솔더 합금이 충분히 용융되어 메탈리본과 태양전지 간의 우수한 전기적 접합이 형성될 수 있음을 알 수 있다.

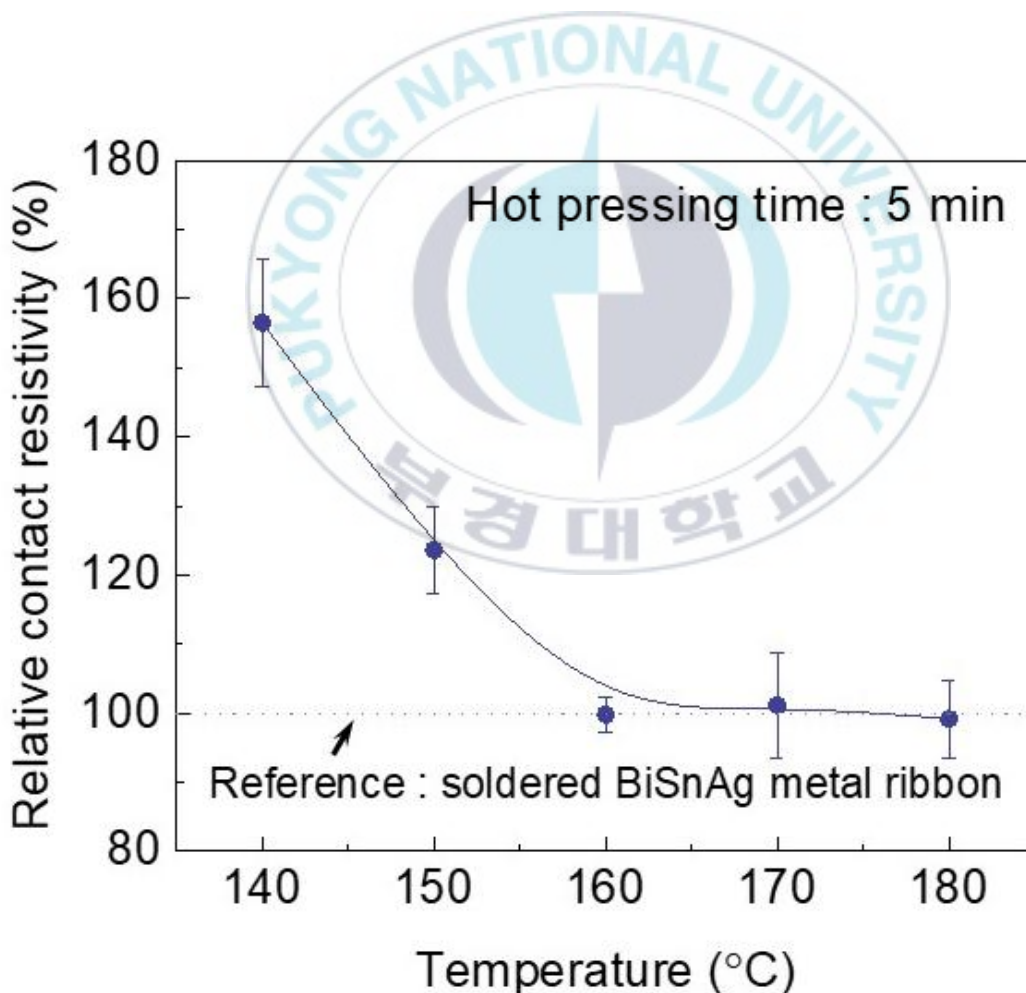


Figure 32. Contact resistivity measurement result according to temperature variation with respect to soldered BiSnAg metal ribbon

2) 열 프레싱 시간의 변화에 따른 샘플의 접촉 비저항

Fig. 33은 설정 시간의 변화에 따라 제작된 샘플들의 접촉 비저항 값이다. 온도를 160℃로 설정했을 때 열 프레싱 시간의 변화에 따른 샘플들의 접촉 비저항은 매우 유사한 값이 측정되었다. 이는 160℃의 온도에서 5분 이상 라미네이션 공정을 진행할 경우 BiSnAg 메탈리본에 코팅된 솔더 합금이 충분히 용융 가능하다는 것을 보여준다.

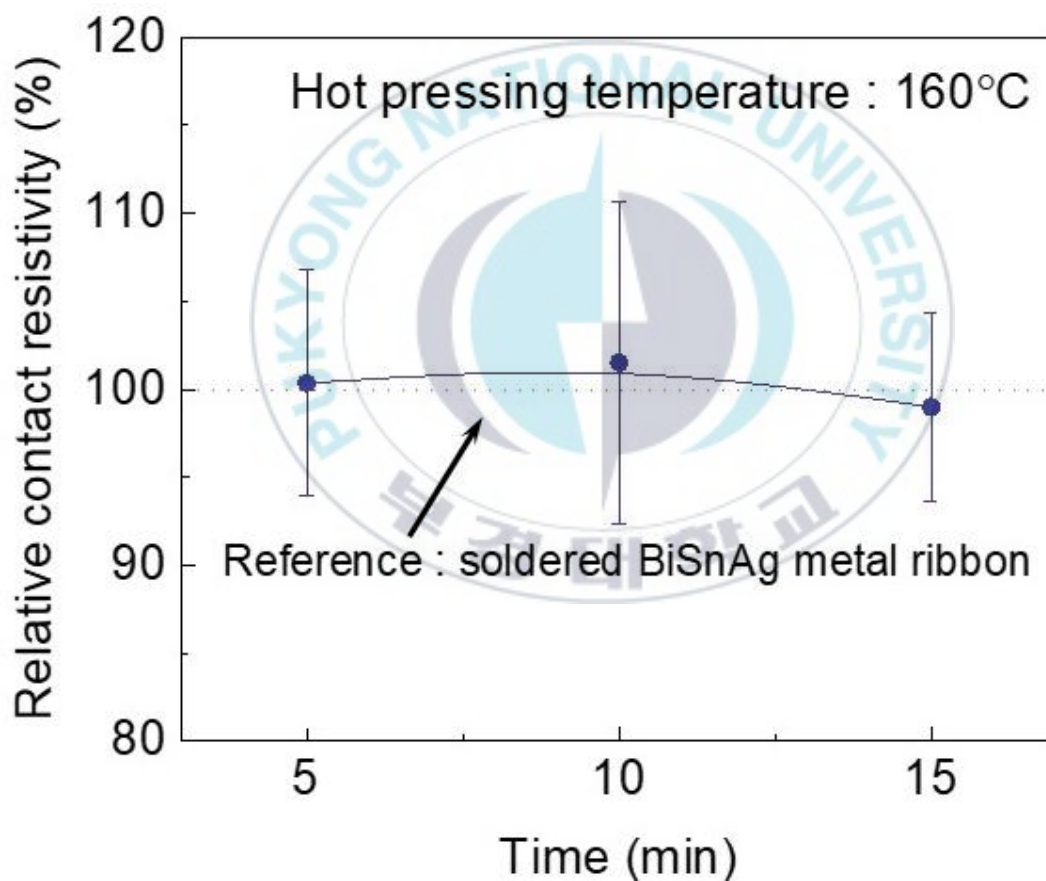


Figure 33. Contact resistivity measurement result according to time variation with respect to soldered BiSnAg metal ribbon

1.3 용융 방법에 따른 접촉 비저항

상기의 데이터를 바탕으로 열 프레싱 조건을 160℃, 5분으로 설정한 후 BiSnAg 메탈리본 간을 합착하여 샘플 제작하였다. 이때, 기존의 납땜 방식을 통해 제작된 샘플과의 비교를 위해 납땜 인두기(FX-888D, Hakko Corp.)를 사용하여 수동으로 SnPb 메탈리본 간을 납땜한 샘플과 BiSnAg 메탈리본 간을 납땜한 샘플도 함께 제작하였다. 이때, 납땜 방식을 통한 샘플 제작 시 신속하고 원활한 공정을 위해 납땜 인두기의 온도를 SnPb 메탈리본의 경우 450℃, BiSnAg 메탈리본은 250℃로 설정하였다. Fig. 34는 측정된 접촉 비저항 데이터이다. 열 프레싱 방식을 통한 BiSnAg 메탈리본 샘플의 접촉 비저항은 고온의 납땜 방식을 통해 제작한 SnPb 및 BiSnAg 메탈리본 샘플들과 큰 차이를 보이지 않았다. 상기의 결과는 LOM 기술을 사용 시 고온의 태빙 공정 없이 태양전지 모듈 제작이 가능함을 의미한다.

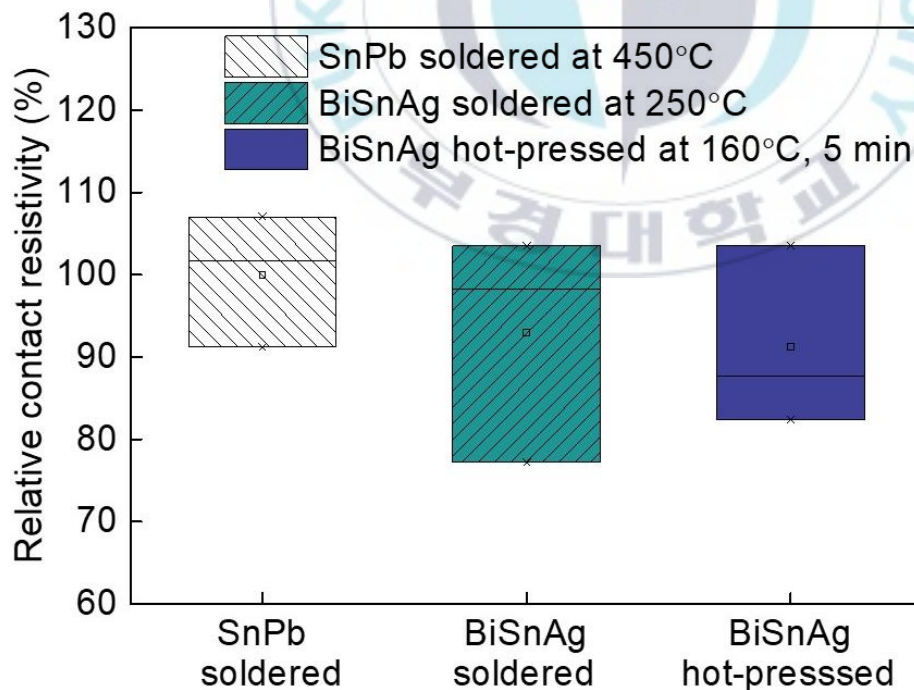


Figure 34. Contact resistivity measurement result according to melting method with respect to soldered SnPb metal ribbon

2. 단위 모듈 분석 결과

2.1 단위 모듈 효율 측정 결과

LOM 기술을 통해 제작된 단위 모듈의 전기적 특성을 알아보기 위해 기존 3단계 모듈화 공정을 통한 단위 모듈의 효율과 비교 분석해보았다. 측정 결과, 기존 3단계 모듈화 공정을 통한 단위 모듈들의 평균 효율은 17.57%, LOM 기술을 통해 제작한 단위 모듈은 17.35%로 측정되었다. 이때, LOM 기술을 통해 제작된 모듈의 평균 효율이 다소 낮은 이유는 4장에서 다루도록 하겠다. Fig. 35은 각 샘플 중 최고 효율을 가지는 단위 모듈의 전류-전압 곡선을 비교한 데이터이다. 고온의 태빙 공정 없이 저융점 메탈리본을 이용해 레이업과 라미네이션 공정만으로 태양전지 모듈을 제작하였음에도 불구하고 전류-전압 곡선에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

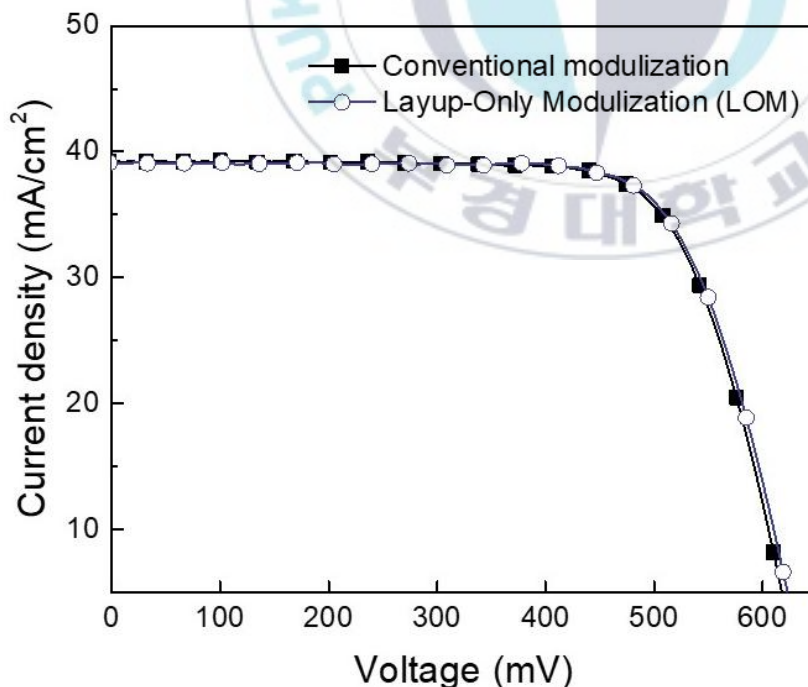


Figure 35. I-V curve comparison of best unit module by LOM technology and conventional modulization

2.2 열 사이클 시험 결과

실제 외부환경에서 발전하는 태양전지 모듈은 온도, 습기, 눈, 비, 바람에 의해 Table 2에 나타나 있는 것과 같이 노화 현상을 겪게 되며, 이로 인해 태양전지 모듈의 장기 신뢰성이 저하된다. LOM 기술을 통해 제작한 태양전지 모듈의 장기 신뢰성을 단기간에 파악하기 위해 열 사이클 시험을 진행하였다. 또, 앞서 언급한 바와 같이 측정 시 온도의 변화로 인해 발생하는 오차를 줄이기 위해 기존 3단계 모듈화 공정을 통해 제작된 모듈과 함께 비교하였다. 진행된 열 사이클 시험은 200 사이클(1000 시간)동안 진행하였으며, 측정 결과는 Fig. 36과 같다. LOM 기술을 통해 제작된 모듈과 기존 3단계 모듈화 공정을 통해 제작된 모듈을 비교했을 때, 열 사이클 횟수에 따라 측정된 개방전압(V_{oc}) 및 단락전류(I_{sc})는 매우 유사하게 측정되었다. 직렬 저항(R_s)의 경우 초기값이 약 5%p 높게 측정되었으며, 이로 인해 초기 변환 효율(Eff) 및 충전률(FF)이 다소 낮게 측정되었다. 하지만, 열 사이클 횟수에 따른 측정 결과의 변화 정도를 봤을 때 기존 3단계 모듈화 공정을 통한 태양전지 모듈과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Table 2. Failure rate of photovoltaic module in external environment⁽²⁰⁾

Aging phenomenon	Ratio (%)
Corrosion	45.3%
Cell or interconnect breaks	40.7%
Output lead problems	3.9%
Junction box problems	3.5%
EVA sheet delamination	3.4%
Overheated wirers, diodes, terminal strips	1.5%
Mechanical damage	1.4%
Defective bypass diodes	0.2%
Sum	100%

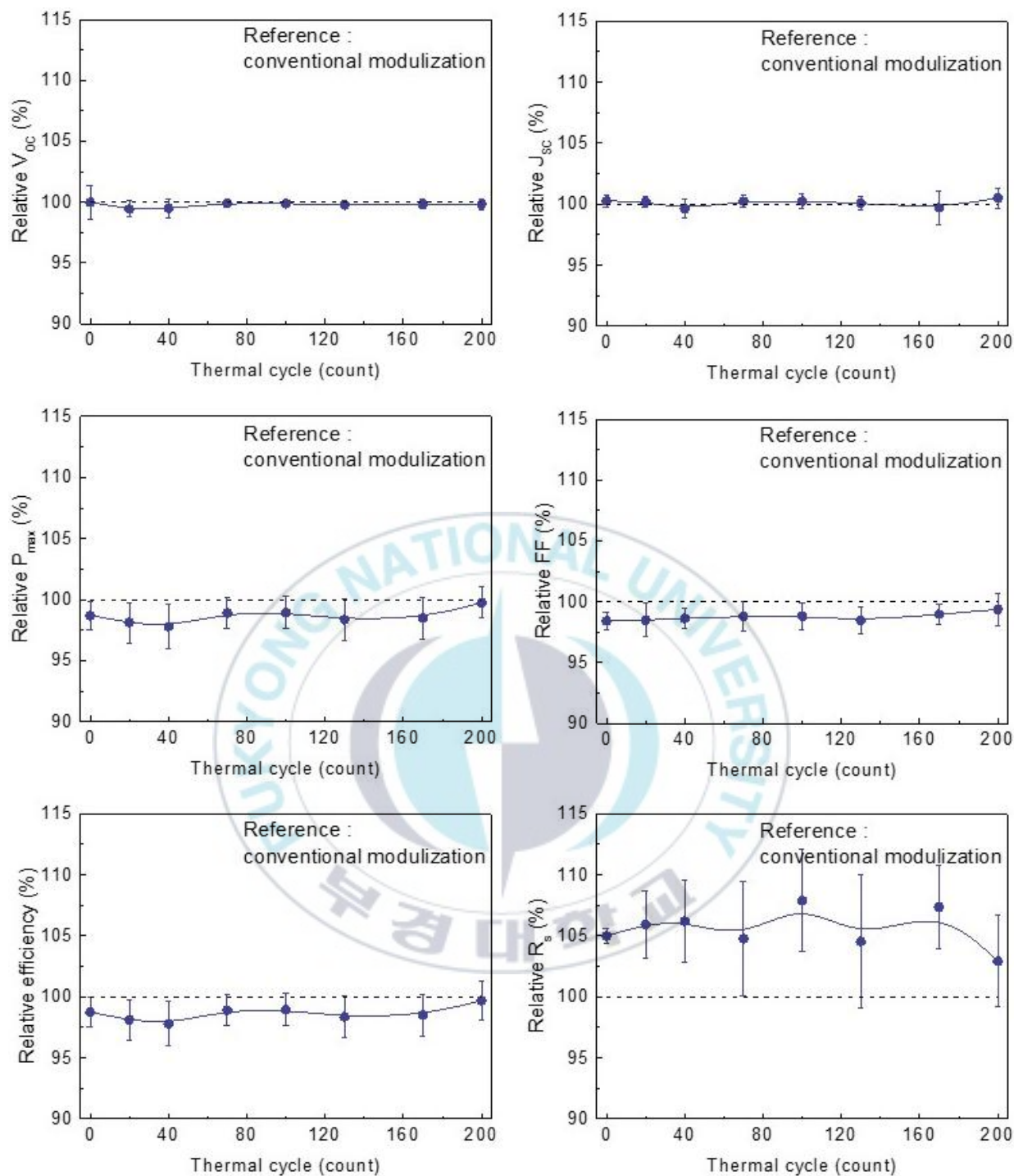


Figure 36. Parameters of 2×2 module manufactured by the LOM technology according to the number of thermal cycles with respect to conventional modulation

3. 2 × 2 모듈 분석 결과

3.1 2 × 2 모듈 효율 측정 결과

LOM 기술을 통해 제작된 모듈의 대면적 테스트를 위해 2 × 2 크기의 태양전지 모듈을 제작하였다. Fig. 37은 기존 3단계 모듈화 공정 및 LOM 기술을 통해 제작된 2 × 2 모듈의 전류-전압 곡선 및 파라미터를 비교한 데이터이다. 제작된 모듈들의 전류-전압 곡선은 매우 유사한 형태를 보였다. 측정된 파라미터의 경우, 개방전압(V_{oc}) 및 단락전류(I_{sc})는 매우 유사한 값을 보인 반면, 직렬 저항(R_s)은 기존의 모듈화 공정에 비해 2.2 mΩ 높게 측정되었으며, 이로 인해 충전률(FF)은 1.04%p 낮게 측정되었다. 효율의 경우, 기존 3단계 모듈화 공정을 통한 태양전지 모듈은 18.91%, LOM 기술을 통한 태양전지 모듈의 효율은 18.95%로 측정되었다.

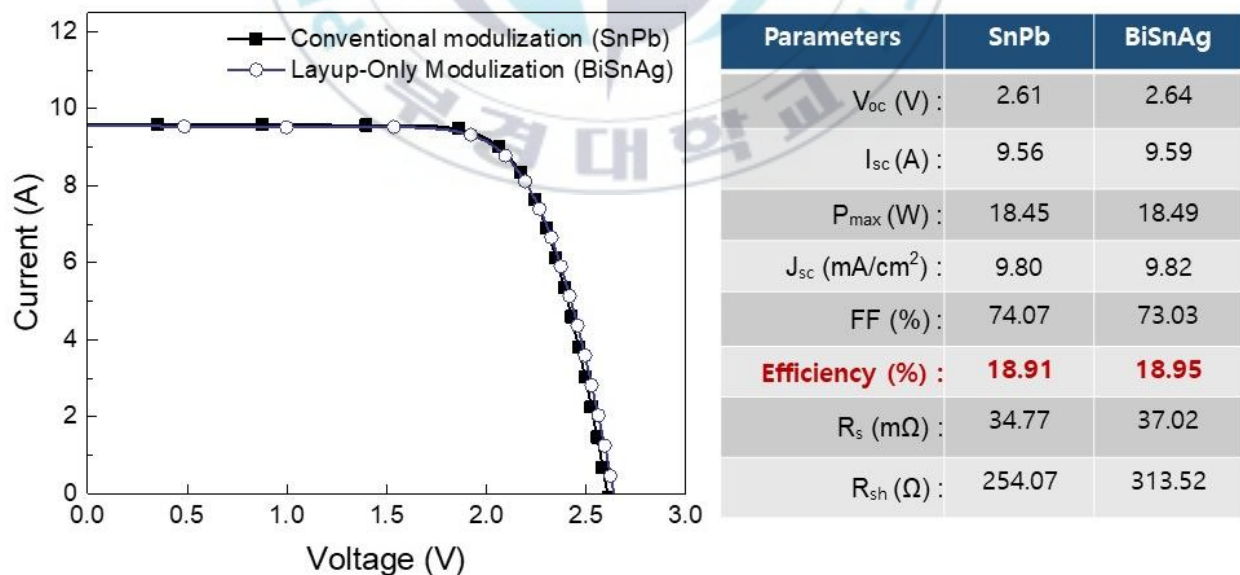


Figure 37. Electrical performance comparison of 2 × 2 module by LOM technology and conventional modulization

3.2 EL 이미지 분석 결과

LOM 기술을 통해 제작된 태양전지 모듈에 생성된 마이크로-크랙이나 접합 불량 등의 내부적 결함을 파악하기 위해 EL 이미지를 촬영하여 분석을 진행하였다. Fig. 38은 LOM 기술을 통해 제작한 2×2 모듈의 실제 이미지 및 EL 이미지이다. 제작된 2×2 모듈의 EL 이미지를 봤을 때 모듈화 공정 중 열 및 기계적 스트레스로 인해 발생하는 마이크로-크랙이나 메탈리본과 버스바, 상부 및 하부 메탈리본에서의 접합 불량은 나타나지 않았다. 따라서, 상기의 EL 이미지 분석 결과는 LOM 기술을 통해 태양전지 모듈을 제작할 경우, 접합 불량이나 열 및 기계적 스트레스 없이 모듈화가 가능함을 알 수 있으며, 이는 두께가 $100 \mu\text{m}$ 급의 박형 태양전지 모듈 제작에도 적용 가능할 것으로 예상된다.

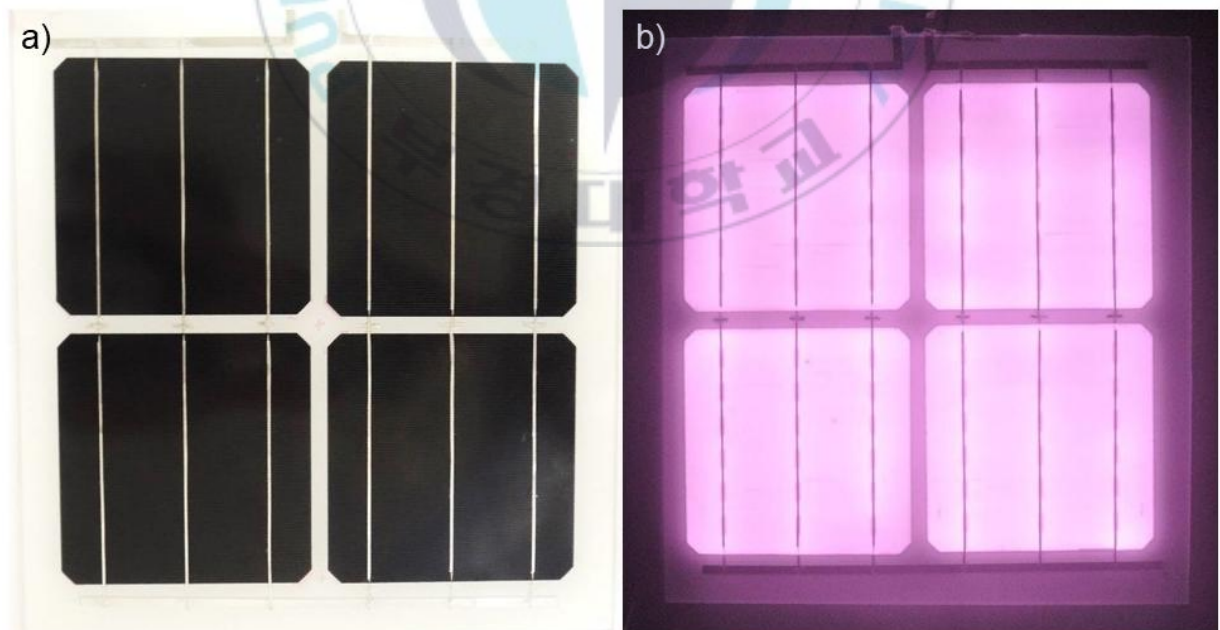


Figure 38. 2×2 module manufactured by LOM technology a) actual image and b) electroluminescence image

4. 직렬 저항 상승 원인 분석 및 해결 방안

4.1 BiSnAg 메탈리본의 저항

LOM 기술과 기존 3단계 모듈화 공정을 통해 제작된 태양전지 모듈의 직렬 저항 차이가 발생하는 원인을 파악하기 위해 LOM 기술에 사용된 BiSnAg 메탈리본과 기존 3단계 모듈화 공정에 사용된 SnPb 메탈리본의 저항을 비교하였다. 이때, 측정 시 오차를 줄이기 위해 각 메탈리본들은 100 cm로 커팅하여 저항을 측정하였으며, 각 메탈리본들의 측정된 저항은 Fig. 39와 같다. 100 cm로 커팅된 BiSnAg 메탈리본의 평균 저항은 0.0761 Ω , SnPb 메탈리본의 평균 저항은 0.0570 Ω 으로 BiSnAg 메탈리본의 저항이 SnPb 메탈리본에 비해 약 1.33 배 높게 측정되었다.

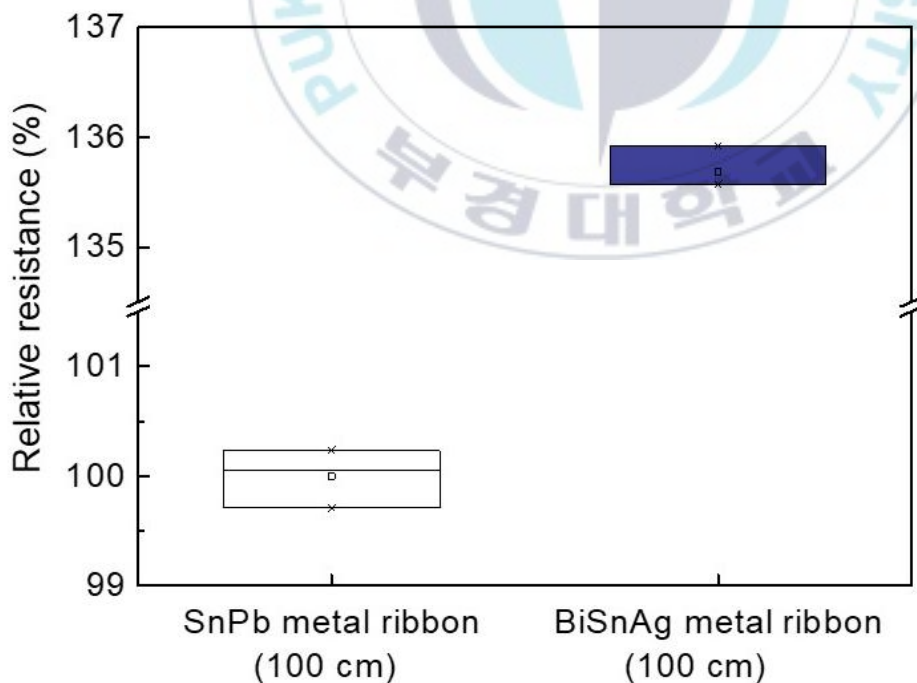


Figure 39. Measured resistance of BiSnAg and SnPb metal ribbons with respect to SnPb metal ribbon

사용된 메탈리본 간의 저항이 다르므로써 직렬 저항의 차이가 발생할 가능성을 알아보기 위해 SnPb 메탈리본 및 BiSnAg 메탈리본을 태양전지에 납땜한 단위 모듈들을 제작하였다. 이때, 신속하고 원활한 공정을 위해 납땜 시 온도를 SnPb 메탈리본의 경우 450℃, BiSnAg 메탈리본은 250℃로 설정하였다. 제작된 단위 모듈들은 초기 효율을 측정한 후 열 사이클 시험을 진행하였다. Fig. 40은 각 샘플의 최고 효율을 가지는 단위 모듈의 전류-전압 곡선을 비교한 데이터이며, Fig. 41은 열 사이클 횟수에 따른 측정 결과를 나타낸다.

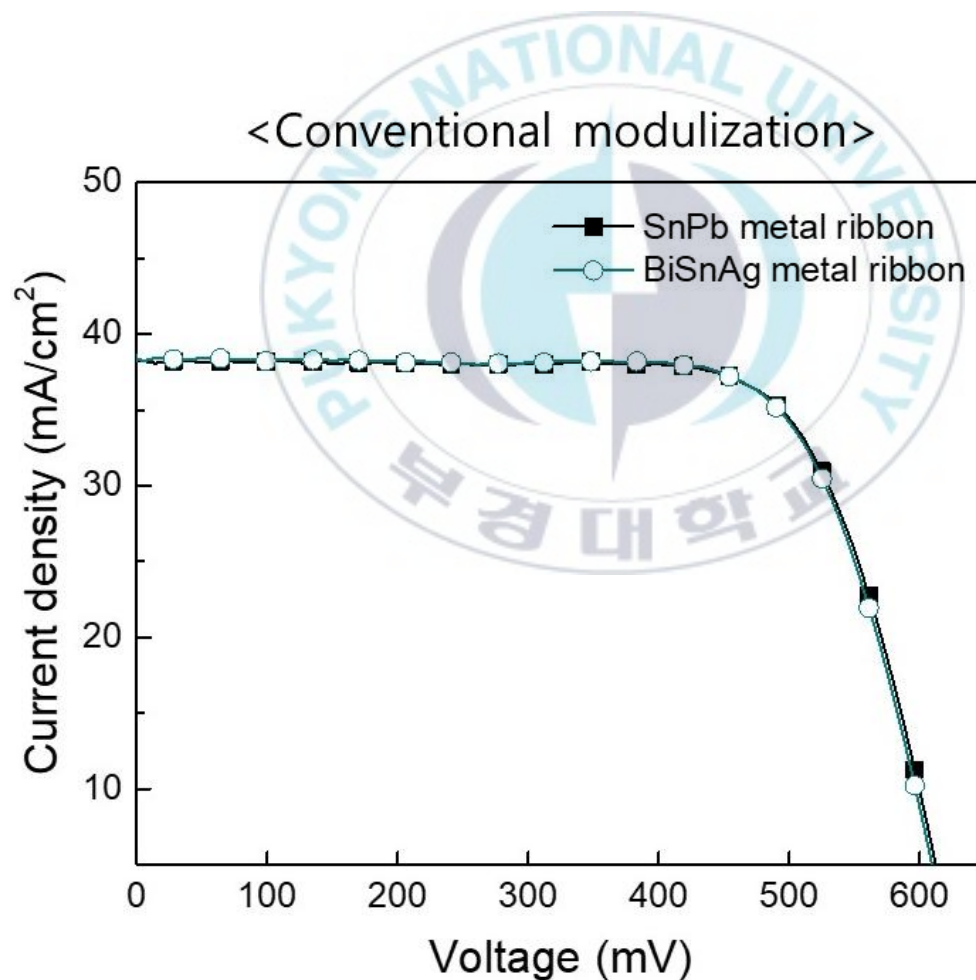


Figure 40. I-V curve comparison of best unit module according to solder alloy of metal ribbon

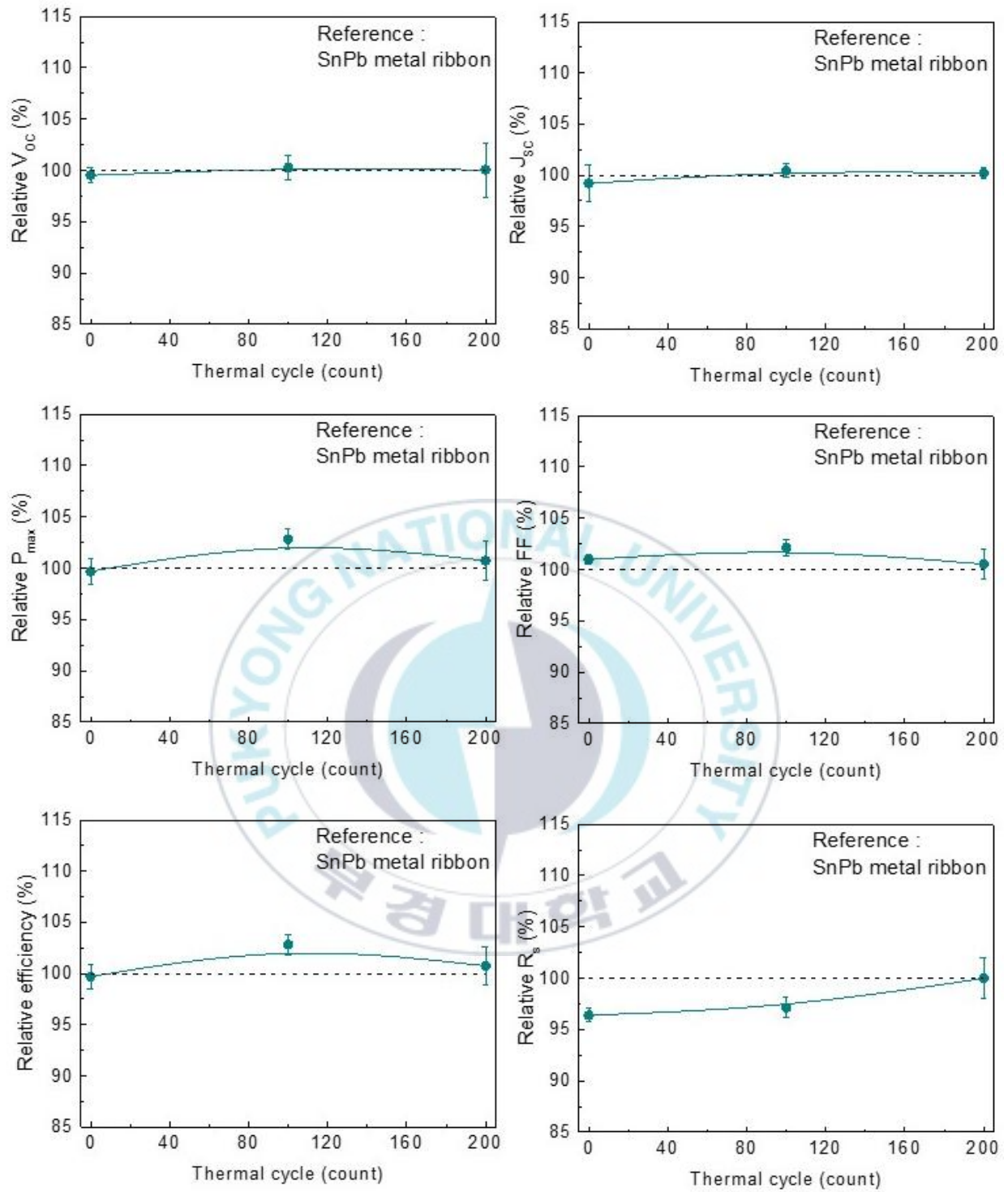


Figure 41. Parameters of unit module using BiSnAg metal ribbon according to the number of thermal cycles with respect to unit module using SnPb metal ribbon

측정 결과, 초기 효율의 경우 SnPb 메탈리본을 이용한 모듈의 평균 효율은 17.21%, BiSnAg 메탈리본을 이용한 모듈의 평균 효율은 17.16%로 유사한 값이 측정되었으며, 각 샘플 중 최고 효율을 가지는 모듈의 전류-전압 곡선도 매우 유사한 결과를 보였다. 또, 열 사이클 횟수에 따라 측정된 파라미터 역시 SnPb 메탈리본과 BiSnAg 메탈리본을 사용한 모듈 간의 큰 차이는 보이지 않았다. 이는 사용되는 메탈리본의 저항은 다르지만 메탈리본 자체의 저항이 매우 낮기 때문에 태양전지 모듈에서는 큰 차이가 발생하지 않음을 의미하며, LOM 기술 및 기존 3단계 모듈화 공정을 통한 태양전지 모듈 간의 직렬 저항 차이는 메탈리본에 코팅된 솔더 합금의 차이가 아님을 알 수 있다.



4.2 EVA 시트의 확산

제작된 모듈 간의 직렬 저항 차이의 원인으로 EVA 시트 확산으로 인한 가능성을 확인해보았다. 라미네이션 공정 중 EVA 시트가 녹으면서 메탈리본과 버스바 사이에 침투할 가능성을 알아보기 위해 EVA 시트 유무에 따른 샘플을 제작하여 접촉 비저항을 비교하였으며, 샘플의 제작 과정은 다음과 같다. 먼저, 레이저 장비를 이용해 diode operating current [%] : 89, passed : 80의 조건에서 태양전지를 2 cm × 2 cm 크기로 커팅하였으며, 커팅된 태양전지의 전면 버스바에는 메탈리본 혹은 메탈리본과 함께 EVA 시트를 적층하여 열 프레싱을 진행하였다. 진행된 열 프레싱 공정은 라미네이션 공정의 온도에 맞춰 설정하였다. 이때, 열 프레스기의 온도 상승 및 하강 속도는 라미네이터 장비에 비해 느리기 때문에 상대적으로 긴 시간 공정이 진행되므로 EVA 시트의 확산으로 인해 발생하는 문제점을 극대화하여 분석할 수 있었다. Fig. 42 a)는 제작된 샘플들의 저항 값이며, b) 및 c)는 제작된 샘플에 대해 수동으로 힘을 가하여 메탈리본을 태양전지에서 분리시킨 후의 이미지이다.

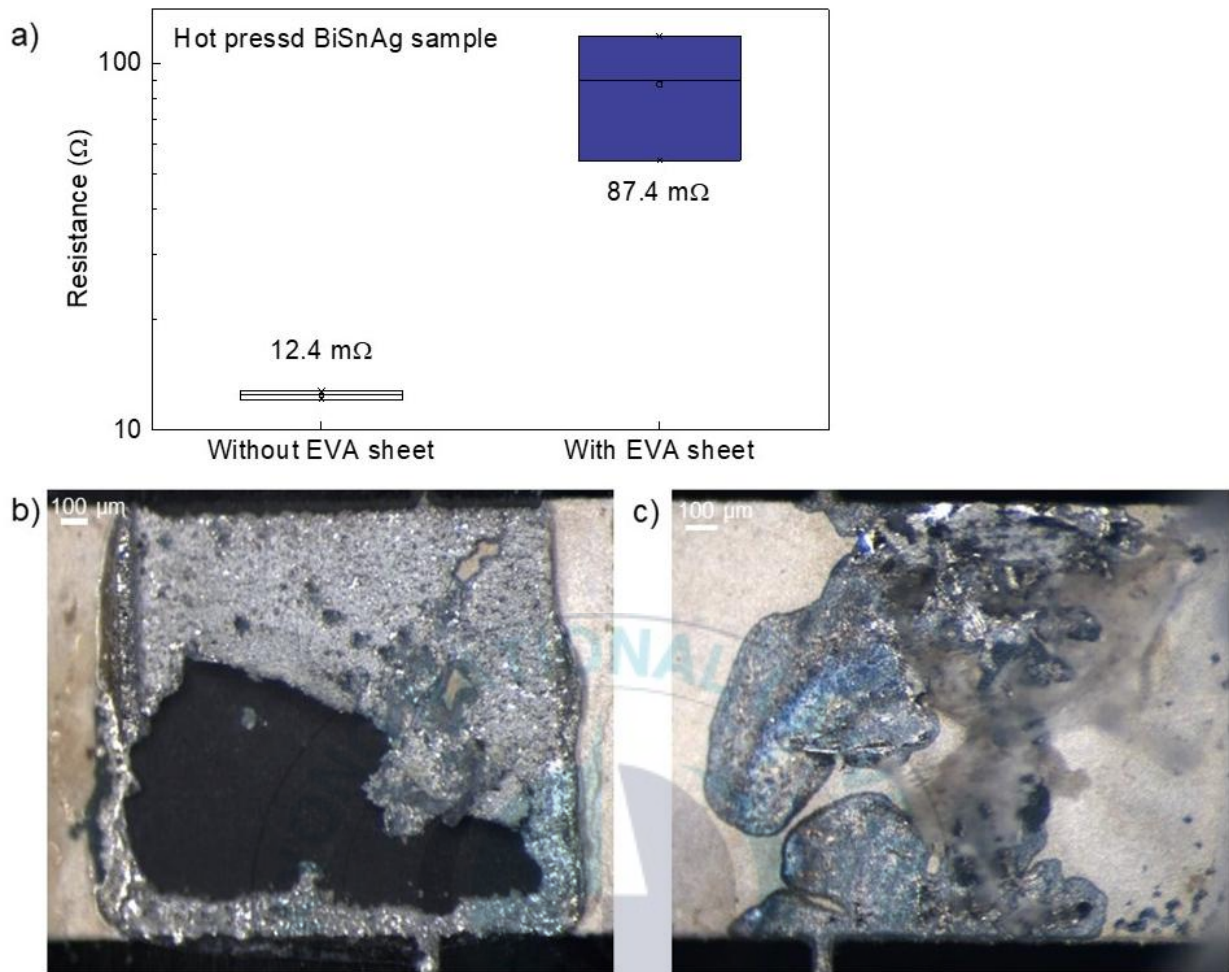


Figure 42. a) measured resistance with or without EVA sheet, b) image of sample without EVA sheet after hot pressing, and c) image of sample with EVA sheet after hot pressing

라미네이션 공정 중 EVA 시트는 메탈리본에 코팅된 솔더 합금보다 더 낮은 온도에서 용융된다. 이렇게 낮은 온도에서 용융된 EVA 시트는 메탈리본과 버스바 사이에 침투하게 되며, 이로 인해 메탈리본과 버스바 사이의 전기적인 접촉 면적은 줄어들게 된다. 따라서, EVA 시트의 확산으로 인해 LOM 기술을 통해 제작된 태양전지 모듈의 직렬 저항이 상승한 것으로 판단된다.

4.3 문제 해결 방안

라미네이션 공정 중 EVA 시트의 확산을 방지하기 위해 예열 온도를 기존의 110°C가 아니라 Fig. 43과 같이 70°C로 설정한 후 LOM 기술을 통한 태양전지 모듈을 제작하였다.

측정 결과, Fig. 44와 같이 라미네이션 공정 조건을 변경한 후 LOM 기술을 통해 태양전지 모듈을 제작했을 때 기존의 3단계 모듈화 공정을 통한 태양전지 모듈의 측정 결과와 매우 유사한 값이 측정되었다. 즉, 라미네이션 공정 조건 변경을 통해 EVA 시트의 확산을 방지하여 직렬 저항이 소폭 상승하는 원인을 완전히 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

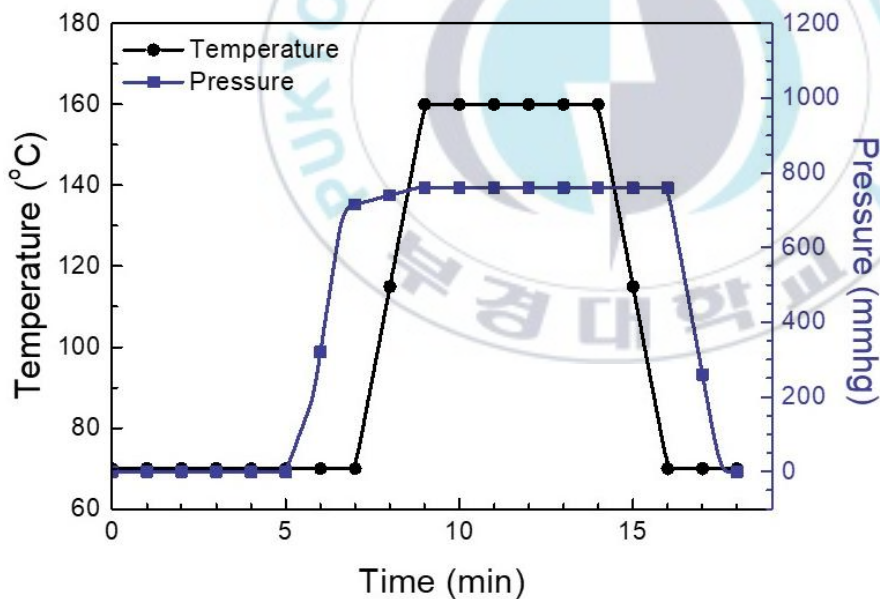


Figure 43. Temperature and pressure conditions of modified lamination condition process

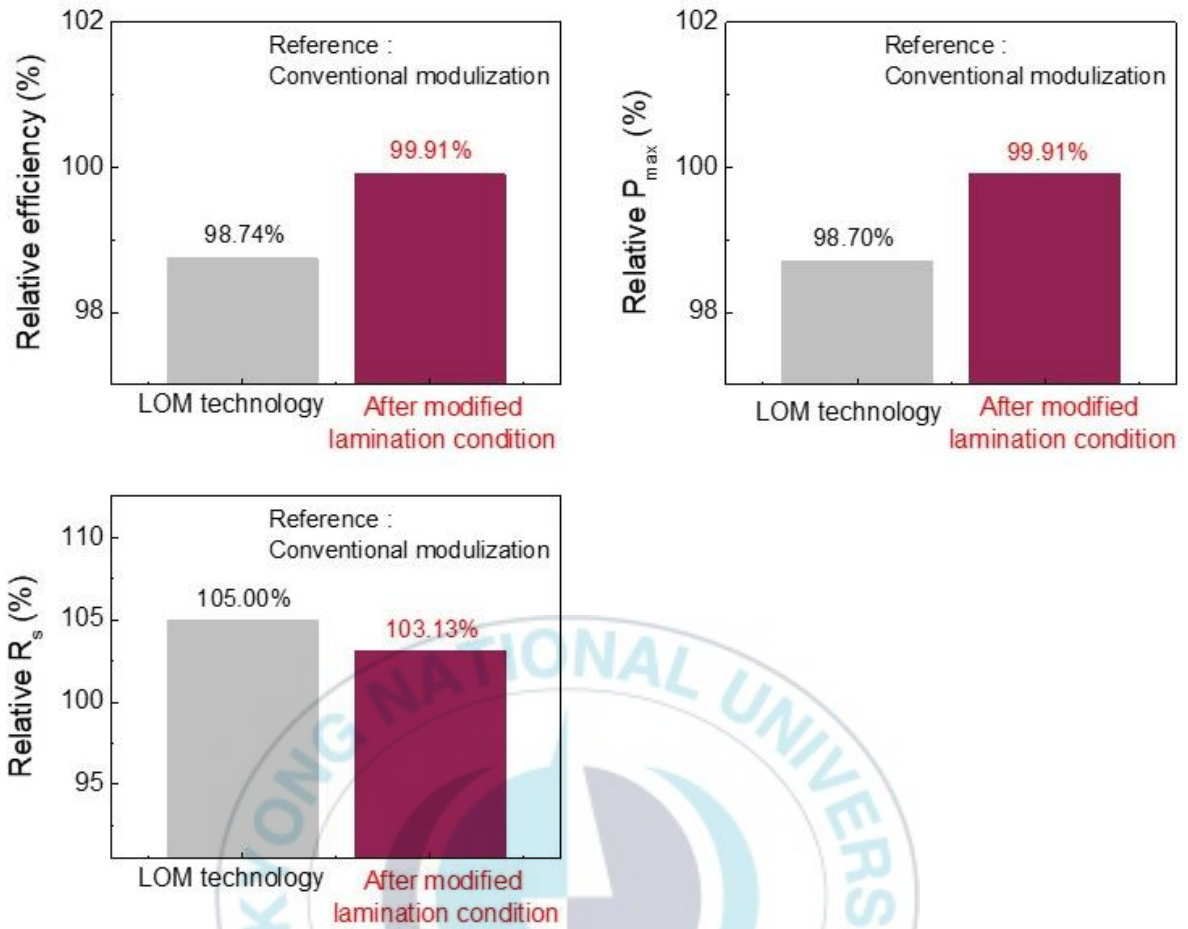


Figure 44. Parameters of photovoltaic module manufactured by the LOM technology according to modified lamination condition process with respect to conventional modulization

5. LOM 기술을 통한 태양전지 모듈의 양산화

LOM 기술을 실제 모듈화 공정에 적용했을 때, 모듈화 공정의 안정성 및 제작된 태양전지 모듈의 품질 신뢰성을 높이기 위해서는 1) 버스바와 메탈리본 및 2) 상부 및 하부 메탈리본의 접점에서 쉽고 정확한 얼라인먼트가 이루어져야 한다. 이를 위해 Fig. 45과 같이 가장자리에 일정한 크기와 간격으로 얼라인먼트용 홀이 펀칭된 EVA 시트와 이러한 홀들이 들어갈 수 있는 핀이 돌출된 전용 레이업 장비를 이용함으로써 EVA 시트의 위치 안정화를 통한 쉽고 정확한 얼라인먼트를 가능하게 할 수 있다.

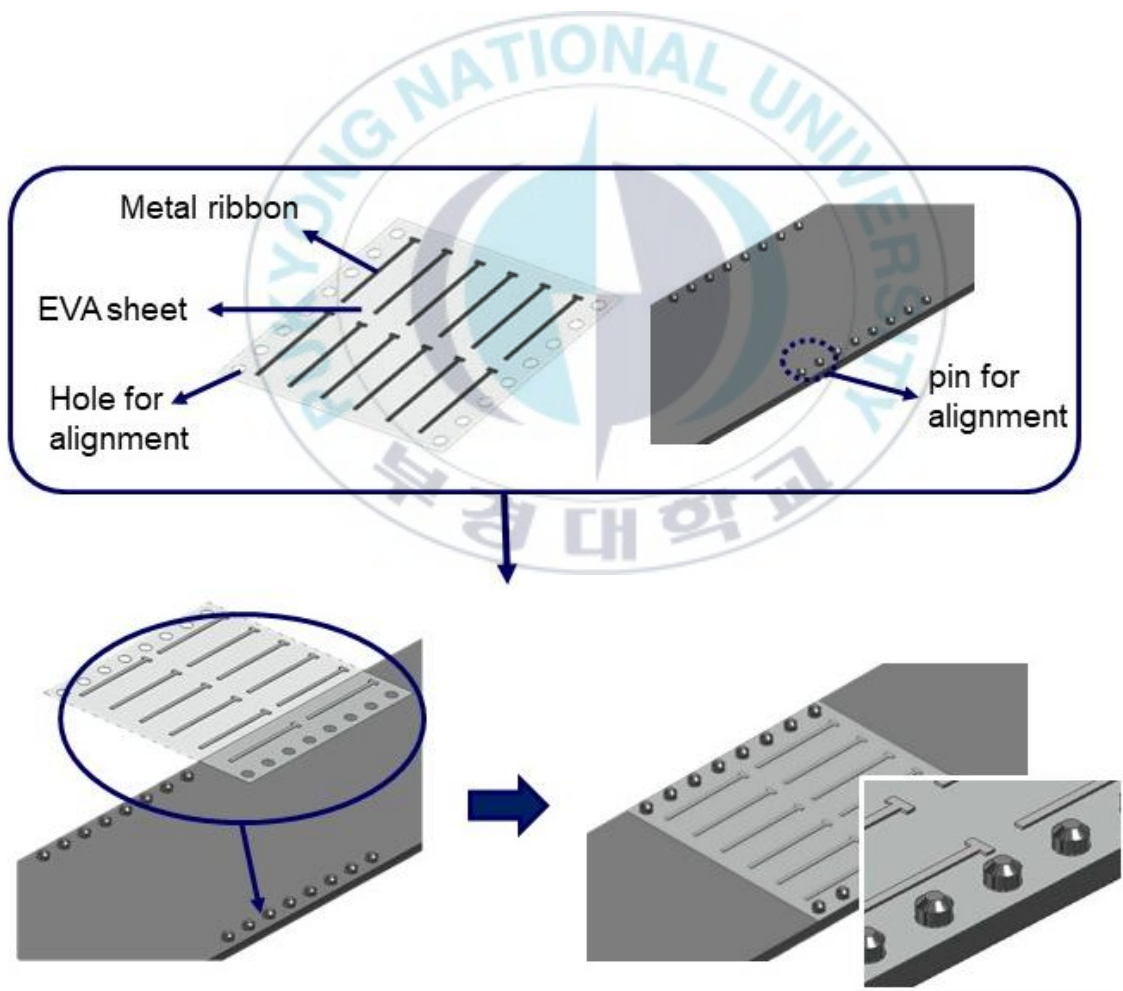


Figure 45. Schematic illustration of layup equipment and EVA sheet with metal ribbon for alignment

또, 모듈화 공정 중 Fig. 46 a)와 같이 태양전지의 엣지 부분과 메탈리본이 닿음으로 인해 태양전지의 전기적 션트를 유발할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 절연막을 형성해야만 한다. 이때, 절연막은 태양전지의 엣지 부분에 형성해주는 것이 아니라 Fig. 46 b)와 같이 태양전지 엣지 부분과 닿는 메탈리본에 선택적으로 형성해줌으로써 태양전지에 별다른 처리 없이 전기적 션트 문제점을 제거할 수 있다.

Electric shunt generation at the edge of solar cell

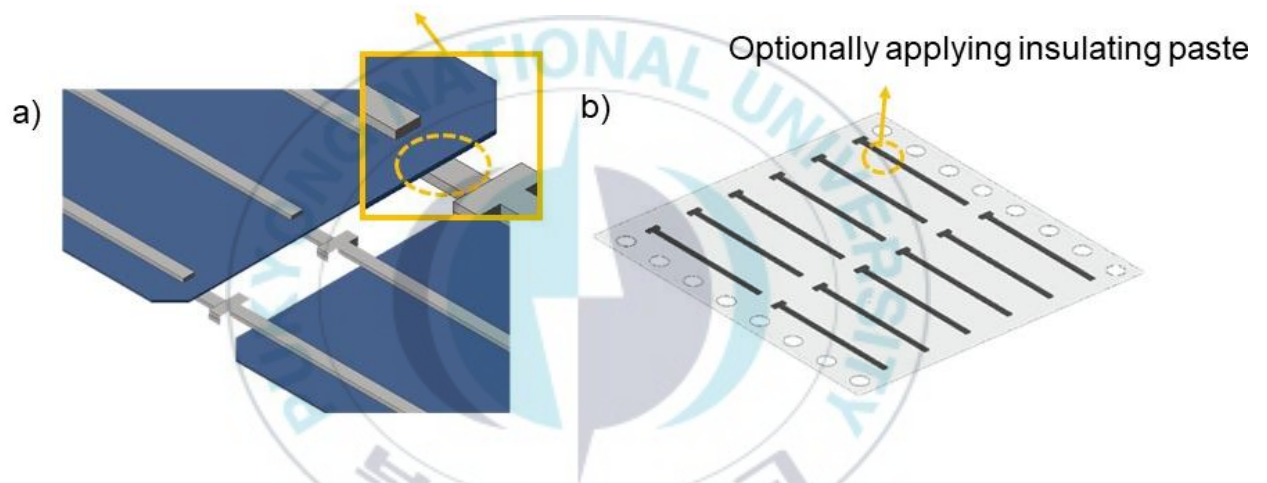
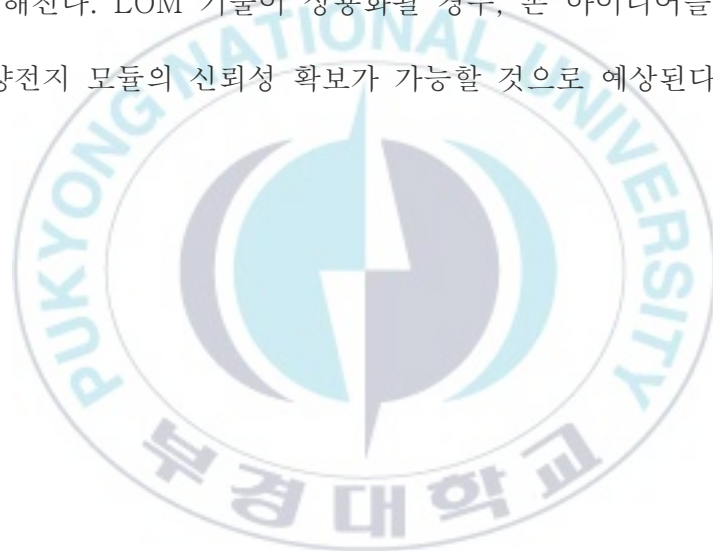


Figure 46. a) possibility of electric shunt due to metal ribbon and b) applying insulation paste to metal ribbon touching the edge of solar cell

Fig. 47는 상기의 홀과 핀들이 있는 EVA 시트 및 레이업 장비를 이용하는 태양전지 모듈화 공정에 대해 제시되어 있다. 먼저, 백시트, 메탈리본이 임베디드된 첫 번째 EVA 시트, 태양전지, 메탈리본이 임베디드된 두 번째 EVA 시트, 유리 순으로 태양전지 모듈 구성 재료들을 적층한다. 이때 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA 시트’를 적층 시에는 EVA 시트 양단부에 위치한 홀들을 전용 레이업 장비의 핀에 넣어 얼라인먼트를 맞춰준다. 마지막으로 EVA 시트의 양단부를 커팅한 후 라미네이션 공정을 진행한다. 라미네이션 공정 중에는 메탈리본에 코팅된 솔더 합금이 용융됨으로써 메탈리본과 버스바, 상부 및 하부 메탈리본 접점에서 인터커넥션이 형성되며, 이를 통해 테빙 공정 없이 태양전지의 모듈화가 가능해진다. LOM 기술이 상용화될 경우, 본 아이디어를 통해 공정의 안정성 및 제작된 태양전지 모듈의 신뢰성 확보가 가능할 것으로 예상된다.



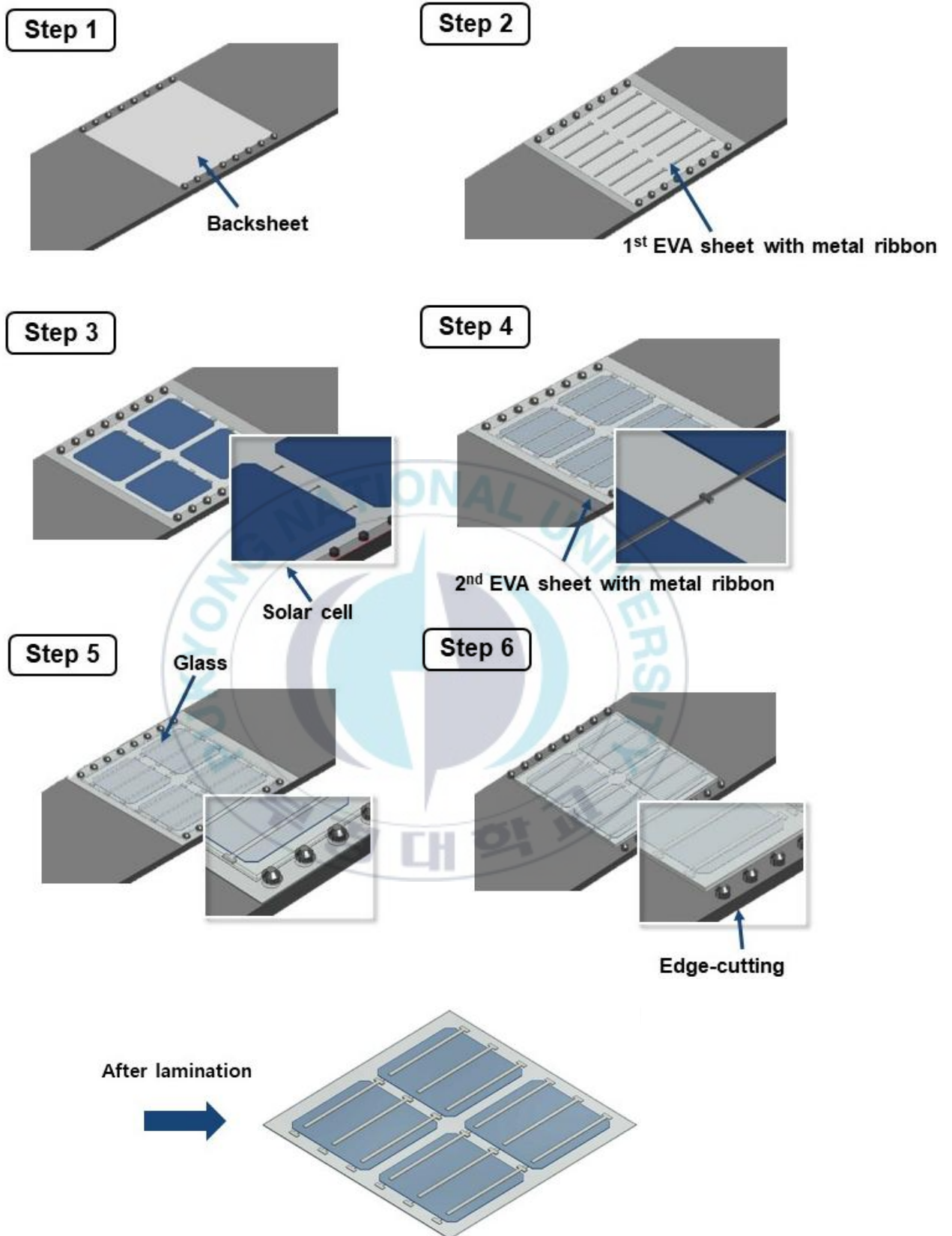


Figure 47. Schematic illustration of layup process for LOM technology

6. 기대효과 및 활용방안

6.1 장비 투자비 및 운용비 절감

기존 3단계 모듈화 공정에서는 메탈리본과 태양전지를 전기적 및 기계적으로 접합하기 위해 Fig. 48에 나타나 있는 태빙 장비를 사용한다. LOM 기술은 EVA 시트에 저융점 메탈리본을 임베디드 시켜 사용하기 때문에 태빙 공정의 필요성을 제거하였고, 이를 통해 태빙 장비를 제거함으로써 장비 구매를 위한 초기 투자비용, 유지 보수 비용 및 가동을 위한 전력비 등의 고정 비용을 절감할 수 있다.



Figure 48. Tabbing equipment for photovoltaic module manufacturing by courtesy of the photovoltaic laboratory, Korea Institute of Energy Research

6.2 인건비 절감

태양전지 모듈화 공정에 사용되는 메탈리본은 Fig. 49과 같이 버스바와 접촉하여 전자를 수집하며 전자의 이동경로 역할을 하는 태빙리본과 이러한 태빙리본을 정션 박스와 연결해주는 버싱리본으로 구분되어 있다. 버싱리본을 이용하여 태양전지와 정션 박스를 전기적으로 연결하는 공정을 버싱 공정이라 부르며, 이러한 버싱 공정은 일반적으로 사람이 직접 공정을 진행한다. LOM 기술에서는 태빙리본과 버싱리본이 EVA 시트에 임베디드 되어있는 상태로 공정이 진행되기 때문에 버싱 공정의 자동화가 가능할 것이며, 이를 통해 인건비의 절감을 야기할 수 있다.

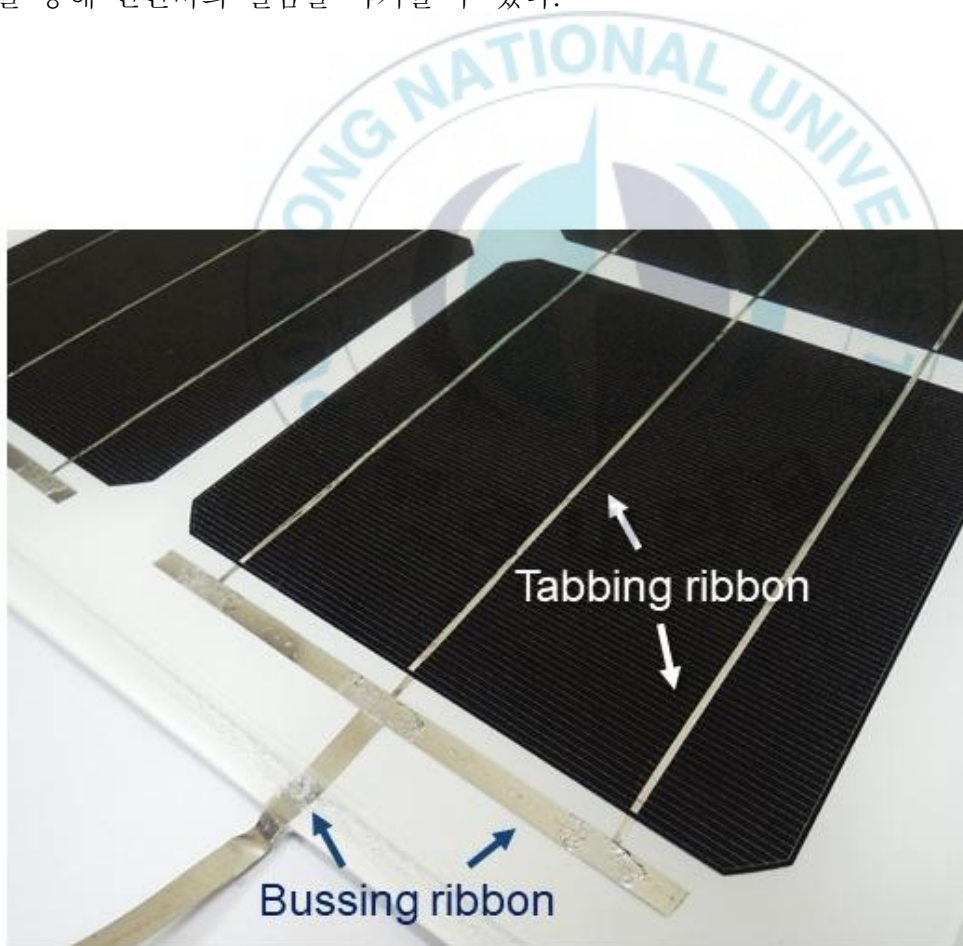


Figure 49. Image of tabbing and bussing ribbons used in photovoltaic modules

6.3 차세대 박형 실리콘 태양전지 적용

Fig. 50는 태빙 공정으로 인해 파손된 박형 실리콘 태양전지의 이미지이다. 태빙 공정은 고온에서 공정이 진행되기 때문에 공정 후 상온으로 온도가 식혀지면서 태양전지와 메탈리본의 열팽창계수가 다름으로 인해 휨 현상이 발생하게 된다. 이때, 실리콘 웨이퍼의 박형화가 진행될수록 태빙 공정 중 태양전지에 가해지는 스트레스는 급격하게 증가하게 되므로 태양전지 내부에는 스트레스가 쌓이거나 심할 경우 파손이 발생된다. 따라서, 미래의 두께 $100\ \mu\text{m}$ 급의 박형 실리콘 태양전지를 모듈화할 경우의 가장 큰 문제점은 고온의 태빙 공정으로 인해 태양전지에 가해지는 열 및 기계적 스트레스이다. LOM 기술은 태빙 공정의 필요성을 제거하였기 때문에 박형 실리콘 태양전지 모듈을 제작 시 발생하는 스트레스 유발 요소를 최소화함으로써 박형 실리콘 태양전지에도 적용이 가능하다.

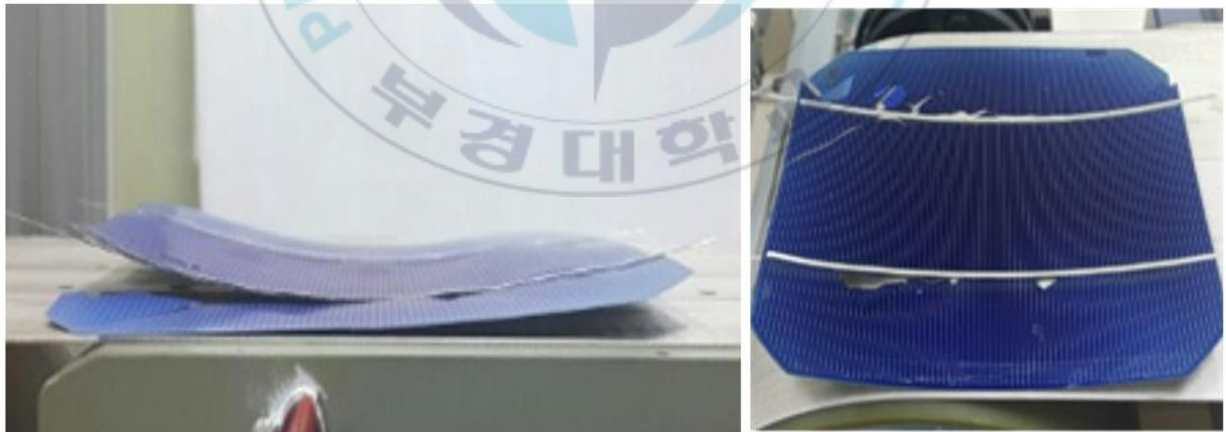


Figure 50. Breakage to thin solar cell due to high temperature tabbing process⁽²¹⁾

6.4 메탈리본의 굴곡으로 인한 문제점 제거

태빙 공정은 태양전지 A의 상부 버스바와 태양전지 B의 하부 버스바를 메탈리본을 이용하여 전기적으로 연결하는 작업이다. 이때, 태양전지 사이의 위치한 메탈리본에는 굴곡이 발생하며, 이러한 메탈리본의 굴곡은 외부 환경에서 가해지는 열로 인해 Fig. 51과 같이 팽창하게 되며 온도가 다시 내려갈 때는 수축하게 된다. 이때, 메탈리본의 열팽창 및 수축의 반복으로 인해 태양전지 엮지에는 스트레스가 집중되며, 심할 경우 태양전지의 파손이 일어나게 되거나 메탈리본의 형태가 변형되어 Fig. 52와 같이 태양전지의 전기적 선트를 유발하게 된다. 하지만, LOM 기술을 통해 제작된 모듈의 경우, 태양전지 사이에 위치한 메탈리본에는 굴곡이 없기 때문에 상기의 문제점 없이 장기간 태양광발전이 가능하다.

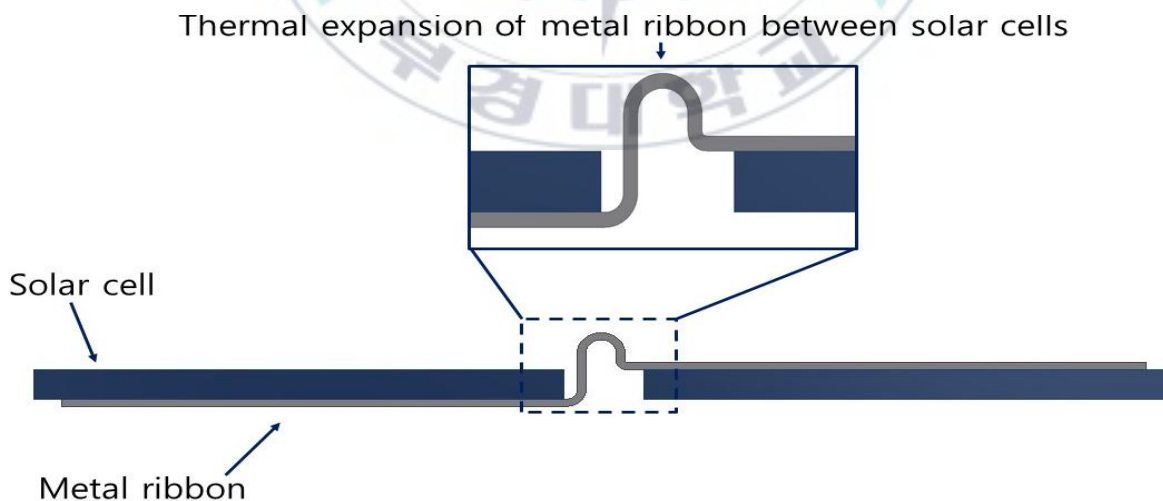


Figure 51. Expansion of metal ribbon due to heat in external environment

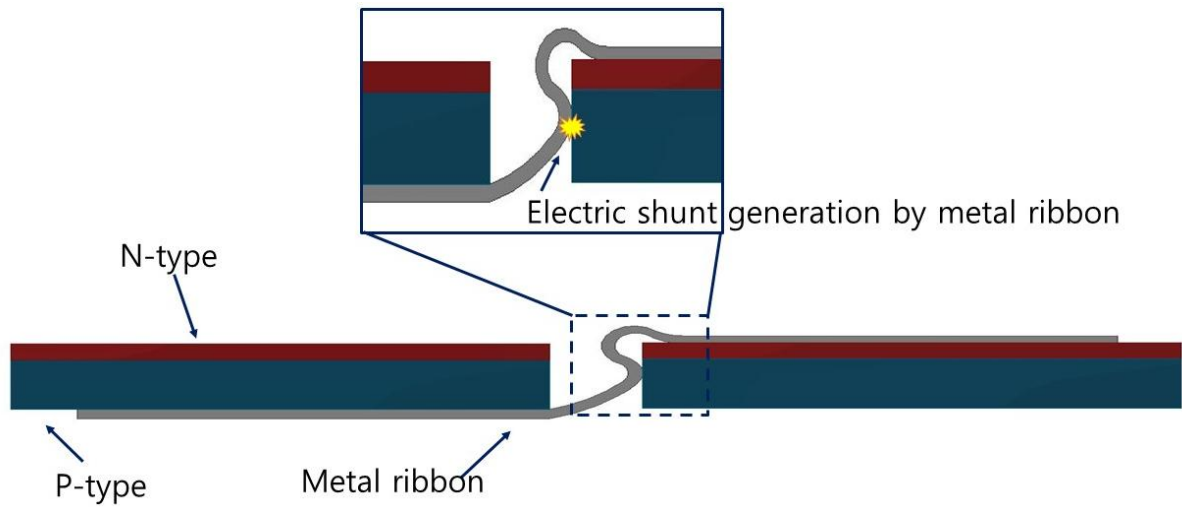


Figure 52. Electrical shunt due to thermal expansion and contraction of metal ribbon



6.5 멀티와이어 태양전지의 적용 가능성

태양전지의 버스바는 기존의 3 ~ 5 버스바 구조에서 Fig. 53과 같이 다수의 버스바 구조로 이동하고 있으며, 이러한 다수의 버스바를 가진 태양전지를 멀티와이어 태양전지라 부른다. 멀티와이어 태양전지는 다수의 버스바로 인해 Fig. 54에 나타나 있는 바와 같이 핑거전극의 직렬 저항 기여도가 대폭 감소하게 된다. 따라서, 핑거전극의 선폭 미세화가 진행됨에 따른 직렬 저항의 상승 정도를 최소화함으로써 높은 종횡비(aspect ratio)의 필요성 없이 선폭의 미세화가 가능해진다. 이를 통해 Ag paste의 사용량 및 광학 손실(optical shading loss)을 최소화함으로써 태양전지의 생산단가 절감 및 효율 상승이 가능해진다.⁽²²⁾

하지만 멀티와이어 태양전지는 태빙 공정 시 다수의 구리와이어를 사용하기 때문에 기존의 3 ~ 5 버스바 태양전지에 비해 휨 현상과 마이크로-크랙의 발생 가능성이 높아 공정이 매우 복잡하고 불량률이 높으며 고도의 기술이 요구된다.

LOM 기술에서 사용되는 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA sheet’와 같이 저융점 솔더 합금이 코팅된 구리와이어를 EVA 시트에 임베디드하여 사용한다면 레이업 공정과 라미네이션 공정만으로 멀티와이어 태양전지 모듈의 제작이 가능해지며, 이를 통해 멀티와이어 태양전지의 가장 큰 문제점인 공정의 어려움을 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

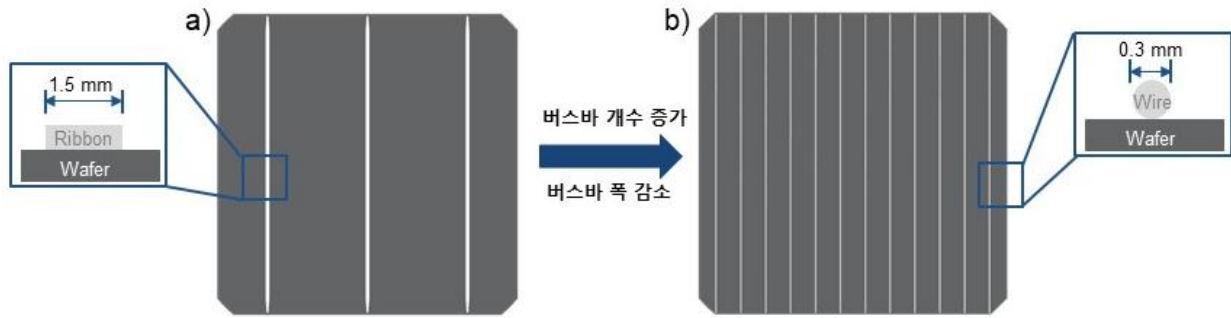


Figure 53. Solar cells according to the number of busbars, a) 3 busbar structure and b) multi busbar structure

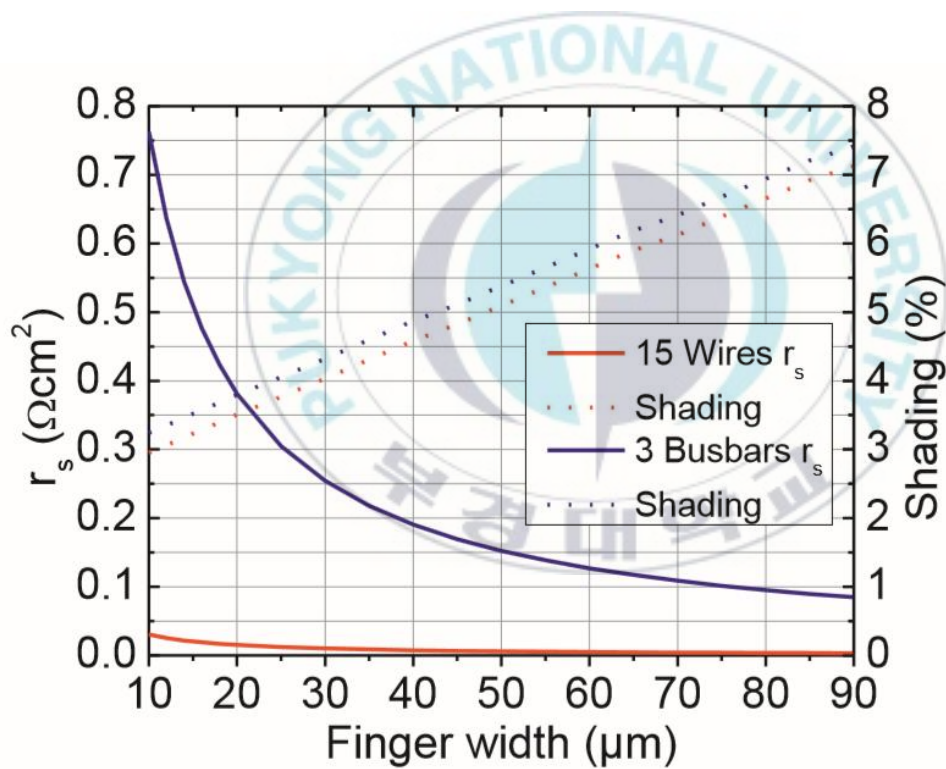


Figure 54. Finger width of 3 busbar and multi busbar solar cell over the series resistance contribution (left of y-axis) and shading (right of y-axis)^(2 3)

6.6 생산수율 및 신뢰성 향상 그리고 생산단가 절감

메탈리본을 이용해 태양전지들을 상호 직렬로 연결하는 태빙 공정은 모듈화 공정 중 가장 많은 불량률이 발생하는 작업으로, 이러한 태빙 공정을 위한 장비는 모듈 제조 장비 중 가장 고가이며 다수의 유닛 장비가 요구된다. LOM 기술은 태빙 공정 없이 태양전지 모듈화가 가능하기 때문에 태빙 장비의 제거와 공정의 단순화를 통해 태양전지 모듈의 생산 수율 및 신뢰성 향상 그리고 생산단가 절감이 가능해진다. 따라서, LOM 기술은 태양전지 모듈의 경제성 확보에 큰 기여를 할 것으로 예상된다.



IV. 결론

태양전지 생산량의 대부분을 차지하는 결정질 실리콘 태양전지는 일반적으로 700 mV 이하의 낮은 전압으로 인해 메탈리본을 사용하여 태양전지들을 상호 직렬로 연결하는 태빙 공정을 거치게 된다. 본 연구에서는 저융점 메탈리본을 이용하여 고온의 태빙 공정 없이 태양전지의 모듈화가 가능한 신규 모듈화 공정(Layup-Only Modulization, 이하 LOM으로 약칭)에 대해 연구하였다. 상기의 LOM 기술을 통해 태양전지 모듈을 제작하기 위해 저융점 메탈리본이 EVA 시트에 임베디드된 새로운 형태의 모델을 제작하였으며, 이러한 ‘메탈리본이 임베디드된 EVA sheet’를 통해 레이업 공정과 라미네이션 공정만으로 태양전지 모듈을 제작하는데 성공하였다.

LOM 기술을 통해 제작된 태양전지 모듈의 전기적 특성을 알아보기 위해 고온의 태빙 공정이 포함된 기존의 3단계 모듈화 공정을 통한 태양전지 모듈과 효율을 비교하였으며, 후에 열 사이클 시험을 진행하였다. 그 결과, 대부분의 파라미터들은 유사하게 측정되었지만 LOM 기술을 통한 태양전지 모듈은 EVA 시트의 확산으로 인해 직렬 저항(R_s)이 다소 상승하여 충전률(FF)이 소폭 감소하였다. 하지만 열 사이클 횟수에 따른 전기적 특성의 변화 정도는 매우 유사하였으며, 이는 장기 신뢰성의 측면에서는 문제가 없음을 의미한다. 따라서, 라미네이션 공정 조건의 변경을 통해 EVA 시트의 확산을 방지한다면 LOM 기술을 통해 제작된 태양전지 모듈의 문제점은 없다고 판단된다.

이러한 LOM 기술은 고온의 태빙 공정으로 인해 태양전지에 가해지는 열 및 기계적 스트레스를 제거할 뿐만 아니라, 태빙 공정에 필요한 장비 및 전력, 그리고 제작 시간을 절약할 수 있기 때문에 태양전지의 경제성 확보에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

참고문헌

-
- ¹ Solomon, S., Plattner, G. K., Knutti, R., and Friedlingstein, P. (2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1704–1709.
- ² Narisma, G. T., Foley, J. A., Licker, R., and Ramankutty, N. (2007). Abrupt changes in rainfall during the twentieth century. *Geophysical Research Letters*, 34(6).
- ³ Lee, S. H. and Park, J. H. (2011). Investigating multi-attributes for expanding new renewable energy in agricultural sectors: Applying the analytic hierarchy process. *Korean Journal of Agricultural Science*, 38(1), 183–190.
- ⁴ Bahaj, A. S. and James, P. A. B. (2007). Urban energy generation: the added value of photovoltaics in social housing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 2121–2136.
- ⁵ 박형식, 정재성, 신명훈, 김선보, 이준신. (2016). 광 포획 태양전지 모듈 커버용 유리 기판 기술 현황. *Current Photovoltaic Research*, 4(3), 119–123.
- ⁶ La Mantia, F. P., Malatesta, V., Ceraulo, M., Mistretta, M. C., and Koci, P. (2016). Photooxidation and photostabilization of EVA and cross-linked EVA. *Polymer Testing*, 51, 6–12.
- ⁷ 강경찬, 이진섭, 강기환, 허창수, 유권중. (2008). 태양전지모듈용 EVA sheet의 특성 평가 방법. *한국태양에너지학회 춘계학술대회논문집*, 92–97.
- ⁸ 노태정, 김선진, 박민용. (2013). 적외선 램프를 이용한 비접촉식 태양전지 셀 솔더링 장치 개발에 관한 연구. *한국산학기술학회 논문지*, 14(1), 45–50.
- ⁹ Zarmai, M. T., Ekere, N. N., Oduoza, C. F., and Amalu, E. H. (2015). A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic

module assembly. *Applied Energy*, 154, 173–182.

¹⁰ Zemen, Y., Schulz, S. C., Trommler, H., Buschhorn, S. T., Bauhofer, W., and Schulte, K. (2013). Comparison of new conductive adhesives based on silver and carbon nanotubes for solar cells interconnection. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 109, 155–159.

¹¹ Shin, D. Y., Chung, H. W., Song, H. J., Lee, J. I., Kim, K. H., and Kang, G. H. (2018). Thermomechanical–stress–free interconnection of solar cells using a liquid metal. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180, 10–18.

¹² Ji, M.-K., Park, S. M., Kim, Y. R., Kang, I.-C., and Kang, G. H. (2015). Photovoltaic systems' s cost saving technologies. *The Magazine of Korean Solar Energy Society*. Vol. 13, No. 1, pp. 11~17.

¹³ Schubert, G., Huster, F., and Fath, P. (2006). Physical understanding of printed thick–film front contacts of crystalline Si solar cells—Review of existing models and recent developments. *Solar energy materials and solar cells*, 90(18–19), 3399–3406.

¹⁴ SEMI PV Group, International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV.net), Results 2017, (<http://www.itrpv.net>), last accessed on the 17th August 2018.

¹⁵ Solder Alloys: Physical and Mechanical Properties, (http://alasir.com/reference/solder_alloys/), last accessed on the 5th of January 2018.

¹⁶ 이진섭, 강기환, 박지홍, 유권중, 안형근, 한득영. (2007). PV 모듈 제조공정에서 Lamination 과 Bubble의 상관성. *한국태양에너지학회 춘계학술대회논문집*, 109–113.

¹⁷ 김문호, 엄효상, 변두진, 최길영. (2016). 태양전지 봉지재용 에틸렌 비닐 아세테이트 공중합체 필름의 광열화 거동. *폴리머*, 40(3), 477–482.

¹⁸ 신혜영, 최홍규, 김용규, 안윤기, 최준영, 윤철구, 임명환, 김종수, 서범관. (2009). 태양전지 온도에 따른 효율. *한국조명·전기설비학회 춘계학술대회논문집*, 356-359.

¹⁹ 박경은, 강기환, 김현일, 유권중, 김준태. (2010). 결정질 태양전지모듈의 온도 변화를 고려한 발전성능 예측식 검증. *한국태양에너지학회 춘계학술대회논문집*, 115-120.

²⁰ 전유재, 강민수, 소경준, 이재준, 신영의. (2014). 태양전지 두께와 조성에 Ribbon 따른 Ribbon 접합부의 장기 신뢰성 특성에 관한 연구. *에너지공학*, 23(4), 88-94.

²¹ 강민구, 최선호, 장보운, 강기환, 이정인, 송희은. (2016). 박형 결정질 실리콘 태양전지 기술 동향. *한국태양광발전학회지*, 2(1), 6-17.

²² Walter, J., Tranitz, M., Volk, M., Ebert, C., and Eitner, U. (2014). Multi-wire interconnection of busbar-free solar cells. *Energy Procedia*, 55, 380-388.

²³ Braun, S., Hahn, G., Nissler, R., Pönisch, C., and Habermann, D. (2013). Multi-busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption. *Energy Procedia*, 38, 334-339.