



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

액체금속을 이용한 실리콘 태양전지 모듈의
상온 인터커넥션 방법에 대한 연구



2018년 8월

부경대학교대학원

인쇄공학과

정혜욱

공 학 석 사 학 위 논 문

액체금속을 이용한 실리콘 태양전지 모듈의
상온 인터커넥션 방법에 대한 연구

지도교수 신 동 윤

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 8월

부경대학교 대학원

인쇄공학과

정혜욱

정혜욱의 공학석사 학위 논문을 인준함.

2018년 8월 24일



주 심 공학박사 이 정 인 (인)

위 원 공학박사 송 형 준 (인)

위 원 공학박사 신 동 윤 (인)

목 차

목차	I
List of Figures	IV
List of Tables	VI
Abstract	VII
I. 서론	- 1 - 1
1. 연구 배경	1
1.1 결정질 실리콘 태양전지 모듈 제작공정 및 구조	1
1.2. 태양전지 모듈 태빙 (tabbing) 공정 방법	2
1.3 결정질 실리콘 태양전지의 박형화	5
2. 새로운 인터커넥션 소재의 도입	7
2.1 액체금속을 이용한 선행연구	7
2.2 액체금속을 이용한 태양전지 모듈 인터커넥션	8
II. 실험	10
1. 갈린스탄 페이스트 제조	10
1.1 갈린스탄	10
1.2 캐리어비이클 제조	11
2. 단위 모듈 제작	14
2.1 EVA를 이용한 단위모듈 제작 과정	14

2.2	액상실리콘을 이용한 단위모듈 제작 과정	17
3.	효율 측정	19
4.	신뢰성 테스트	22
III.	결과 및 고찰	23
1.	갈린스탄 페이스트	23
1.1	갈린스탄 페이스트 제작에 따른 인쇄성 향상	23
1.2.	갈린스탄 페이스트 유체특성	24
1.3	갈린스탄 페이스트 성분 분석	27
1.4	갈린스탄 페이스트 기계적 소결	29
1.5	갈린스탄 함량에 따른 접착 비저항 변화	30
2.	단위모듈 제작 시 발생한 문제	31
2.1	갈린스탄 누설 문제	31
2.2	액상실리콘	31
3.	EL 측정 및 분석 결과	33
4.	단위 모듈 효율측정 결과	35
4.1	갈린스탄 페이스트 인터커넥션 방식 과 솔더링 인터커넥션 방식 비교	35
4.2	열 사이클 실험 후 전기적 특성 변화	- 37 -37
5.	효율 저하 원인 분석	41
5.1	갈린스탄 확산에 의한 전극 부식 여부 확인	41
5.2	갈린스탄 확산에 의한 금속 간 화합물 형성	42

5.3 액상실리콘 접합문제.....	44
IV. 결론.....	46
참고문헌.....	47



List of Figures

Figure 1. Configuration of crystalline silicon solar cell module	(1)
Figure 2. Series interconnection between silicon solar cell and metal ribbon	(2)
Figure 3. Solar cell damage due to high temperature soldering process ⁰	(3)
Figure 4. Trend for minimum as-cut wafer thickness and cell thickness ⁰	(5)
Figure 5. Serious breakage of 100 μm wafers using low melting soldering ⁰	(6)
Figure 6. Application of liquid metal to flexible sensors ⁰	(7)
Figure 7. a) A strip of interconnection using a conventional soldering method, b) A strip of interconnection using a liquid metal, Illustration of c) solder joint fracture and debonding, d) cross-section of junction using liquid metal.....	(9)
Figure 8. Procedure of carrier vehicle and galinstan paste	(12)
Figure 9. Schematic illustration of the fabrication steps of a unit module using EVA	(15)
Figure 10. Temperature and pressure conditions of lamination process.....	(16)
Figure 11. Image of unit module fabricated using a galinstan paste.....	(16)
Figure 12. Schematic illustration of the fabrication steps of a unit module using liquid silicone.....	(18)
Figure 13. Short-circuit current (I_{sc}) in solar cell I-V curve	(19)
Figure 14. Open-circuit current (V_{oc}) in solar cell I-V curve	(20)
Figure 15. Fill factor (FF) in solar cell I-V curve.....	(21)
Figure 16. Thermal cycle test profile.....	(22)
Figure 17. a) Non-spherical shape of galinstan due to gallium oxide, b) Non-spherical shape of carrier vehicle due to yield stress, c) Dispersed galinstan and d) galinstan paste on the silver bus bar.....	(24)
Figure 18. Illustration of cone-plate viscometer.....	(25)
Figure 19. Measured viscosity of galinstan paste, carrier vehicle and galinstan. (26)	
Figure 20. a) SEM and b) line EDS analysis of galinstan droplets	(27)
Figure 21. Element mapping image of galinstan droplets	(28)

Figure 22. Schematic illustration and optical image of galinstan paste a) after dispensed, b) after dried and c) after mechanically sintered	(29)
Figure 23. a) Measured contact resistivity with different galinstan content, b) Image of contact resistivity measurement method.....	(30)
Figure 24. a) galinstan leaking while lamination process, b) shunt problem caused by galinstan leaking.....	(31)
Figure 25. a) Bubble formation of unit module using liquid silicone, b) Bubble formation due to insufficient application of liquid silicone, c) Central deviations due to excessive application of liquid silicone	(32)
Figure 26. Electroluminescence image of a),b) conventional soldering and c) galinstan paste	(34)
Figure 27. Comparison of the best unit module efficiencies using EVA encapsulation.....	(36)
Figure 28. Comparison of the best unit module efficiencies using liquid silicone encapsulation.....	(37)
Figure 29. Parameters of EVA encapsulation unit modules after 100 thermal cycle test	(38)
Figure 30. Comparison of the liquid silicone used unit module efficiency before and after thermal cycling	(39)
Figure 31. Parameters of liquid silicone encapsulation unit modules after 100 thermal cycle test.....	(40)
Figure 32. a) SEM image and b) EDS analysis of the rear silver and aluminum electrode boundaries.....	(41)
Figure 33. SEM and elementary mapping image of cross-sectioned Ag busbar.	(43)
Figure 34. Poor bonding problems between back sheet and liquid silicone.....	(44)
Figure 35. Spreading and shrinking of galinstan droplets along with applied pressure a) before applying pressure b), c) apply pressure d) after pressure removed.....	(45)

List of Tables

Table 1. Melting temperature and resistivity data of lead-free solder alloys (4)

Table 2. Properties of galinstan..... (10)

Table 3. Composition of galinstan paste..... (13)

Table 4. Bulk resistivities of the alloyed forms of silver, indium and tin (42)



Study on Room-Temperature Interconnection for a Silicon Photovoltaic Module Using a Liquid Metal

Hae wook Chung

Dept. of Graphic Arts Engineering, Graduate school,

Pukyong National University

Abstract

In order to connect solar cells in series in the production of a crystalline silicon solar cell module, a tabbing and string process is performed to interconnect the metal ribbon with the bus electrode of the solar cell. During the high temperature soldering, the difference in thermal expansion coefficient between the metal and the silicon causes the solar cell bowing problem or breakage. In particular, since the cost structure of solar cell modules is large in proportion to the cost of silicon, the thickness of solar cell wafers is gradually decreasing in order to reduce costs. As the thickness of the solar cell wafer becomes thinner, the damage of the solar cell is expected to increase. In this study, we present a new interconnection method for thin solar cells. It can be done at a room temperature and hence no mechanical stress is developed between the metal ribbons and the solar cell. Also, the efficiencies between the conventional soldering method and the room-temperature interconnection method has no big differences. Thus, the room-temperature interconnection method can be an alternative to conventional soldering methods for thin solar cell wafers.

I. 서론

1. 연구 배경

1.1 결정질 실리콘 태양전지 모듈 제작공정 및 구조

종래의 태양전지 모듈 제작 공정은 개별의 태양전지를 전기적으로 연결하기 위하여 솔더가 코팅 된 구리 리본을 납땜 하는 태빙(tabbing) 공정을 수행한다. 태빙 공정에 의해 직렬로 연결된 태양전지를 스트링(string) 이라고 하며, 스트링을 병렬 연결시켜주어 요구되는 전력을 얻는다. 그 다음 외부 환경으로부터 태양전지를 보호하기 위하여 태양전지를 중심으로 양쪽에 봉지재를 넣고 후면은 백시트, 전면은 유리로 덮어준다. 적층 된 모듈은 라미네이션 장비를 이용하여 고온, 고압 조건에서 합착 공정을 수행한다. 마지막으로, 프레임과 정션 박스(junction box)를 부착하여 Figure 1 과 같이 완성한다.⁽¹⁾

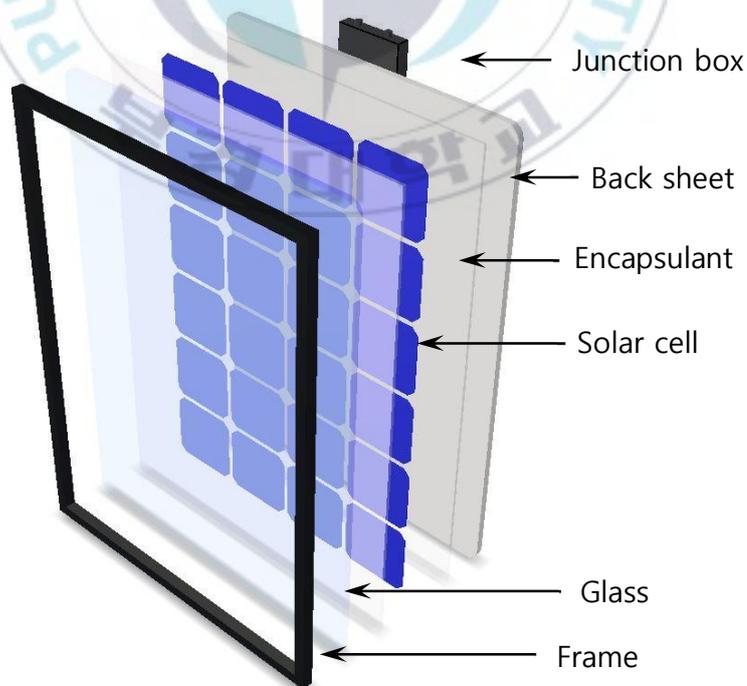


Figure 1. Configuration of crystalline silicon solar cell module

1.2. 태양전지 모듈 태빙 (tabbing) 공정 방법

P-type 기반에 N-type 이미터 구조를 가지는 일반적인 결정질 실리콘 태양전지는 Figure 2와 같이 전면에서 전자를 포집하고, 후면에서 정공을 포집한다. 따라서 대략 0.6 V 생산하는 단위 셀을 직렬로 연결하기 위해서는 Figure 2와 같이 전면에 솔더링된 메탈리본의 연장 된 부분이 인접한 셀의 후면과 연결된다.

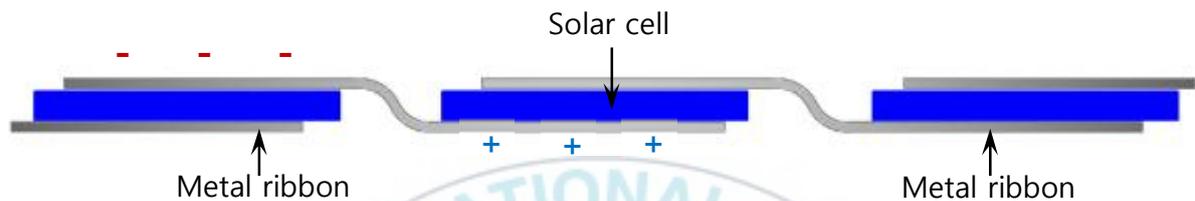


Figure 2. Series interconnection between silicon solar cell and metal ribbon

이와 같이 태양전지와 메탈리본을 전기적으로 연결하는 태빙 공정은 가장 많은 시간이 소비되는 활동이며 가장 많은 공정 불량 발생 가능성이 있는 작업이기 때문에 열원에 따라 다양한 방식이 도입된다.⁽²⁾

첫째, 소프트 터치 솔더링 방식은 가장 널리 사용되는 접촉식 솔더링 방법으로, 예열된 솔더링 핀을 메탈리본에 직접 접촉하여 열을 가해 솔더링 하는 방식이다. 하지만 태양전지 셀의 두께가 점점 얇아지는 추세이기 때문에 셀 및 메탈리본에 직접적인 핀의 접촉은 열충격에 의한 파손 등 불량발생률이 높아질 우려가 있다.⁽³⁾

둘째, 열풍을 사용하여 솔더링 하는 열풍 방식이 있다. 열풍 방식은 비 접촉 솔더링 방식이며 솔더링 속도가 빠르다. 하지만 유량 조절이 어려운 단점이 있으며, 솔더링 이외의 부분에도 열이 집중되어 열응력 발생 우려가 있다.⁽⁴⁾

셋째, 레이저를 이용한 솔더링 방식이 있다. 레이저 솔더링을 이용할 경우, 열을 빨리 전달 할 수 있기 때문에 500 ms 이내에 솔더링 가능하며, 온도 제어가 용이하다. 또한 스캐닝 도구를 사용하여 셀의 크기 및 버스바 수에 구애 받지 않고 선택적으로 솔더링 가능한 장점을 가진다. 그러나, 여러 장점에도 불구하고 설비 가격이 고가이기 때문에 현재 널리 이용되지 못하고 있다.⁽⁵⁾

이외에도 IR 램프를 이용하는 방식, 유도 전류를 이용한 용접전류 방식 등이 있다.⁽⁶⁾ 하지만 소개한 방식들 전부 구리 리본에 코팅된 Sn60Pb40 솔더를 녹이기 위해 200℃ 근처의 고온에서 공정이 이루어 진다. 200℃ 근처의 고온에서 작업할 경우 태양전지와 금속간의 열팽창 계수 차이로 인해 웨이퍼 휨(bowing) 현상이 발생하는데⁽⁷⁾, 이러한 휨 현상은 공정의 어려움을 발생할 뿐 아니라 잔류응력으로 인해 태양전지에 지속적인 스트레스를 유발하여 Figure 3 와 같이 파손을 야기한다.^{(8), (9)}

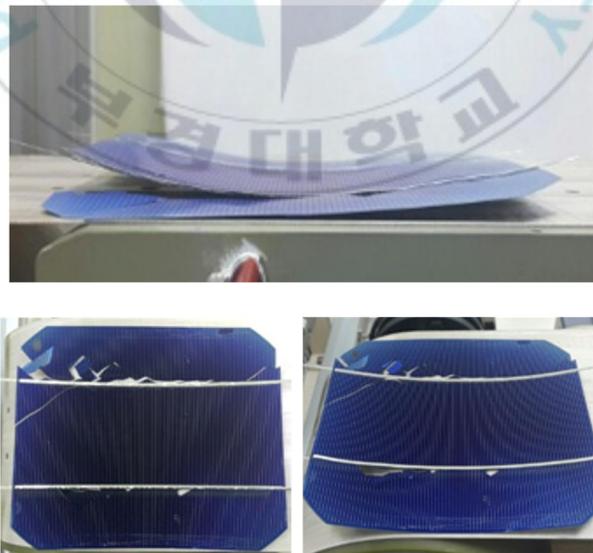


Figure 3. Solar cell damage due to high temperature soldering process⁽¹⁰⁾

공정 온도를 낮추기 위한 방법으로 Table 1 에 제시 되어있는 Bi58Sn42과 같은 저 융점 무연 솔더 가 코팅된 리본 혹은 페이스트를 이용하여 태빙 작업을 수행하기도 한다. 융점 191℃ 를 가지는 Sn60Pb40 솔더 에 비해 공정 온도를 대략 40℃이상 낮출 수 있지만 여전히 100℃ 이상의 열을 가해 주어야 하기 때문에 열팽창 계수 차이로 인한 휨 현상은 불가피하다.

Table 1. Melting temperature and resistivity data of lead-free solder alloys ^(1 1)

Solder alloy	Melting point(Ω) (solidus/liquidus)	Bulk resistivity(μΩ·cm)
Bi58Sn42	138/138	38.3
Sn60Bi40	138/170	34.5
In52Sn48	118 / 118	14.7
Sn77.2In20Ag2.8	175/187	17.6
In97Ag03	143 / 143	7.5

1.3 결정질 실리콘 태양전지의 박형화

특히 태양전지 모듈의 원가 구조에서 실리콘의 가격 비중이 크기 때문에 Figure 4에 나타나 있는 바와 같이, 원가절감을 위해 태양전지 웨이퍼의 두께가 점차 감소하고 있으며 10년 후에는 100 μm 초반대의 두께를 가질 것으로 예상된다. 태양전지 웨이퍼가 박형화 될 수록 열팽창 계수 차이 때문에 발생하는 열 및 기계적 스트레스로 인해 태양전지의 파손율이 증대 한다. Figure 5는 100 μm 두께 웨이퍼를 저 융점 솔더 페이스 트를 이용하여 태빙 작업한 스트링 샘플이다. 종래의 고온 솔더링 방식보다 온도가 낮은 저 융점 솔더를 사용하였음에도 불구하고, 육안으로도 식별 가능한 파손이 발생할 정도로 파손이 심각하다. 이와 같이 웨이퍼의 두께가 박형화 됨에 따라 파손에 매우 취약함을 볼 수 있다.

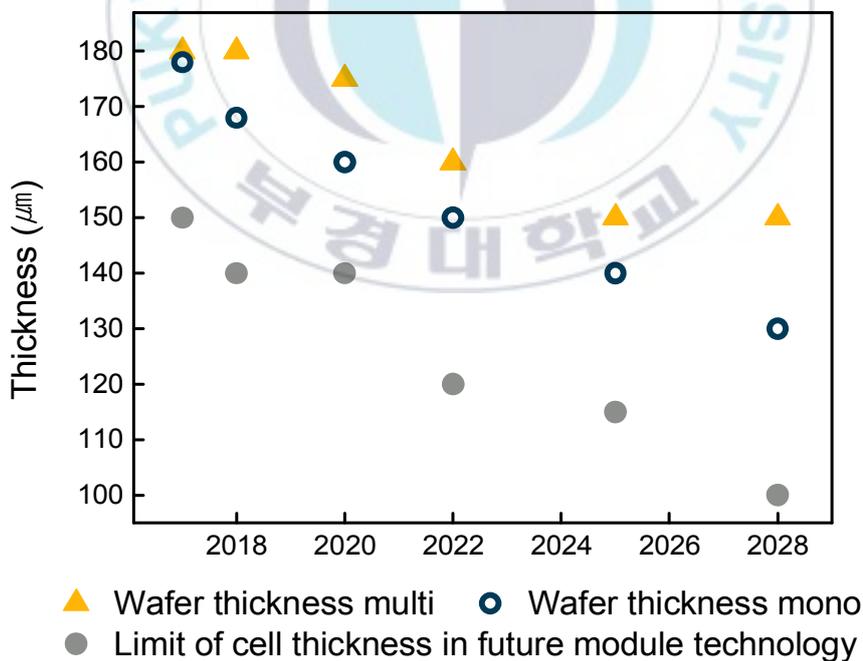


Figure 4. Trend for minimum as-cut wafer thickness and cell thickness^(1,2)

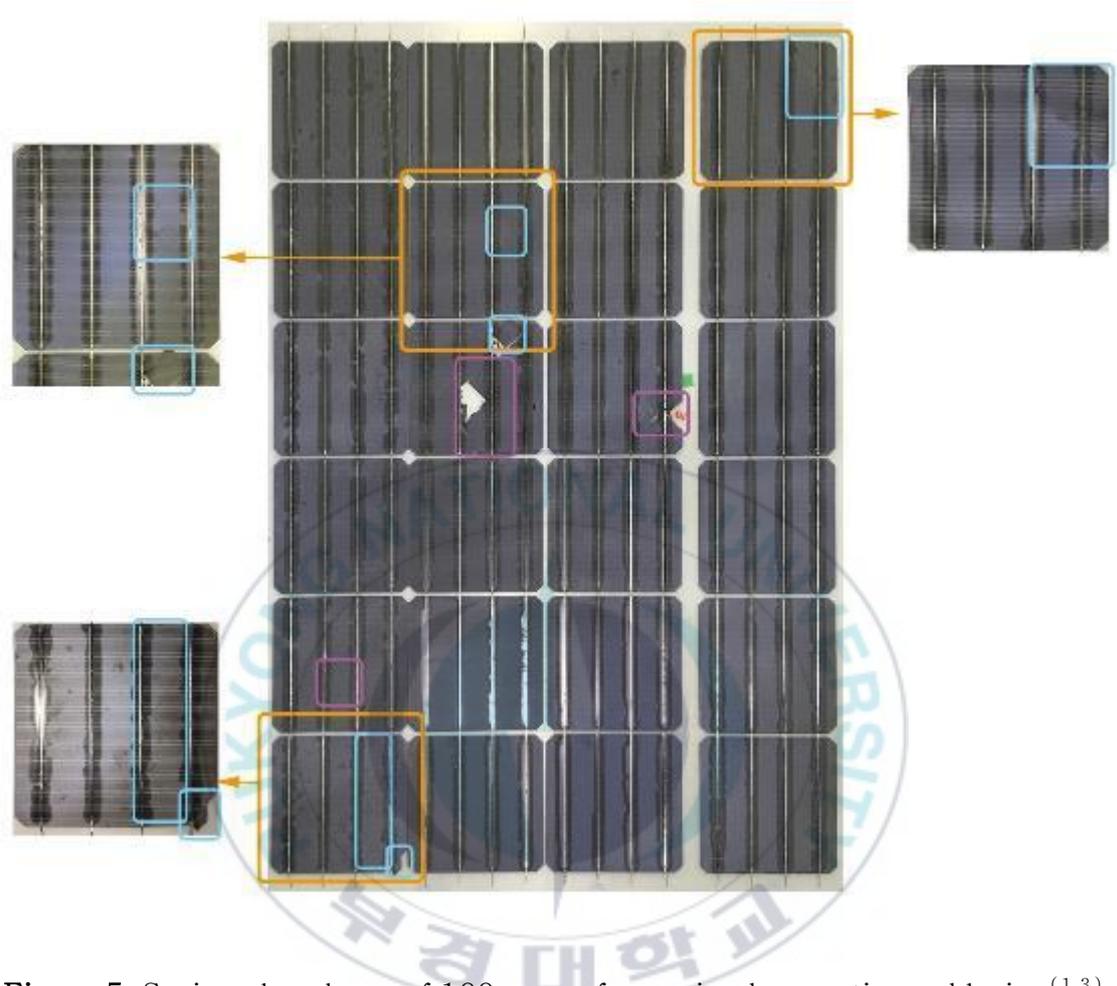


Figure 5. Serious breakage of 100 μm wafers using low melting soldering⁽¹³⁾

따라서, 박형 실리콘 태양전지 모듈을 제작할 때 열 및 기계적 스트레스, 그리고 변환 효율 손실을 최소화할 수 있는 상온 인터커넥션 소재 및 공정에 대한 연구 수행이 필요하다.

2. 새로운 인터커넥션 소재의 도입

2.1 액체금속을 이용한 선행연구

현재 차세대전자소자로 주목 받고 있는 유연전자소자(flexible electronic devices)는 구부리거나(bending) 말 수 있는(rollable) 신축성을 가지기 위해 단단한 유리 기판 대신 PET(polyethylene terephthalate), PEN(polyethylene naphthalate), PDMS(polydimethylsiloxane)등을 사용한다.^{(14), (15)} 하지만 PET, PEN 등과 같은 기판들은 열 성능이 제한 적이기 때문에, 고온 소성 및 고온 용융이 필요한 금속을 적용할 경우 열변형으로 인한 성능 저하가 우려된다.⁽¹⁶⁾ 또한 유연성 있는 기판과 달리 금속은 단단한 성질을 가지 때문에 기판을 구부렸다 피기를 반복할 경우 접합면에 피로가 쌓여 탈락 문제(debonding)가 발생한다.⁽¹⁷⁾

반면 액체금속은 일반적인 금속과 달리 상온에서 액체이기 때문에 변형이 자유로워 응력이나 스트레스로 인한 파손 및 탈락 문제가 발생하지 않으며, 솔더와 같이 용융을 위한 열처리 공정이 필요하지 않아 기판의 열변형이 문제되지 않는다. 따라서 Figure 6 와 같이 구부리거나 접을 수 있는 유연안테나(flexible antenna) 및 유연센서(flexible sensor)의 주 전극으로 액체금속을 적용한 선행 연구가 활발히 진행되고 있다.^{(18), (19)}

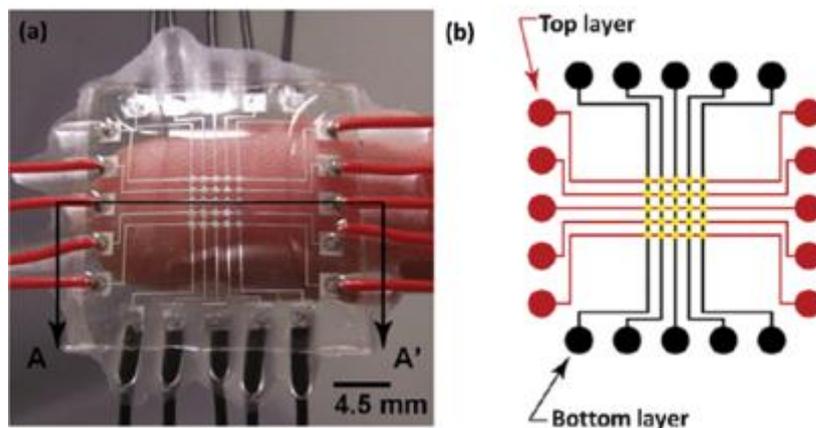


Figure 6. Application of liquid metal to flexible sensors⁽²⁰⁾

2.2 액체금속을 이용한 태양전지 모듈 인터커넥션

태양전지 셀에서 버스전극이 인쇄된 부분을 대략 2 cm폭으로 자른 후 메탈리본을 기존 솔더링 방식으로 인터커넥션한 스트립과, 액체금속을 이용하여 인터커넥션한 스트립을 각각 준비하여 비교해보았다. 기존 솔더링 방식으로 인터커넥션한 스트립의 경우 Figure 7 a) 와 같이 스트립이 많이 흰 것을 볼 수 있는데, 실리콘 웨이퍼와 열팽창 계수 차이로 인하여 고온에서 늘어난 메탈리본이 상온에서 다시 식으면서 수축할 때 태양전지 셀이 휘어졌다. 셀이 휘어지면 라미네이션 장비로 합착할 때 셀에 파손이 발생하거나, Figure 7 c)와 같이 버스전극과 메탈리본 접합부에 지속적인 스트레스가 가해져서 프랙처가 발생하거나 탈락 문제(debonding)가 발생한다.⁽²¹⁾

반면에 액체금속을 이용하여 인터커넥션한 스트립은 Figure 7 b)와 같이 열 및 기계적 응력이 없기 때문에 일체 구부러짐이 없었다. 또한 액체금속으로 인터커넥션한 경우 접합부가 액체 상태로 존재하기 때문에 외부충격에 의해 접합부에 프랙처가 발생하거나 탈락 문제(debonding)가 발생하지 않는다. 겨울철 외부 기온이 낮아짐에 따라 액체금속이 고형화 되어 프랙처가 발생하더라도, 융점 이상의 온도에서 다시 액상화 되면서 스스로 프랙처를 메꿔주는 ‘자기 복구’가 가능하다.

본 논문에서는 유연전자소자의 주 전극으로 사용된 액체금속을 태양전지의 새로운 인터커넥션 소재로 도입하여 열 및 기계 스트레스, 전기 저항의 손실 없이 버스전극과 메탈리본을 인터커넥션할 수 있는 실험을 수행하였다.

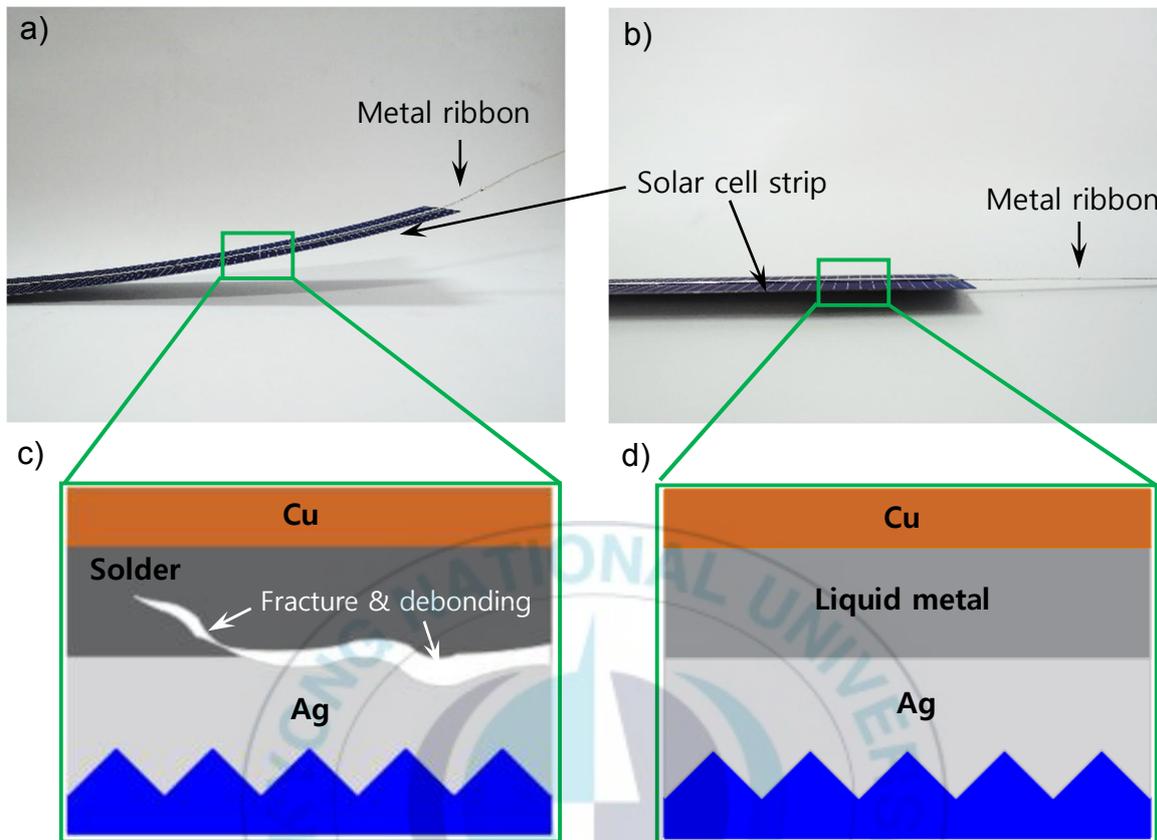


Figure 7. a) A strip of interconnection using a conventional soldering method, b) A strip of interconnection using a liquid metal, Illustration of c) solder joint fracture and debonding, d) cross-section of junction using liquid metal

II. 실험

1. 갈린스탄 페이스트 제조

1.1 갈린스탄

본 연구에서는 열 및 기계적 스트레스 없이 인터커넥션이 가능한 새로운 방식으로 액체금속을 접목하였다. 대표적인 액체 금속으로는 수은이 있으나, 환경적 및 수은중독에 대한 우려로 인하여 사용에 크게 제한 받는 반면, 갈린스탄 은 갈륨(68.5% Ga), 인듐(21.5% In), 주석(10% Sn)의 합금으로 인체에 무해하며 용융온도 -19°C 를 가지고 상온에서 액체 상태인 금속이다.

Table 2. Properties of galinstan^(2,2)

Property	Galinstan
Color	Silver
Odor	Odorless
Boiling point	$>1300^{\circ}\text{C}$
Melting point	-19°C
Vapor pressure	$<10^{-6}$ Pa at 500°C
Density	6440 kg/m^3
Solubility	Insoluble
Viscosity	2.4×10^{-3} Pa·s at 20°C
Thermal conductivity	$16.5\text{ W/m}\cdot\text{k}$
Electrical Conductivity	2.30×10^6 S/m

1.2 캐리어비이클 제조

본 연구에서는 갈린스탄의 인쇄성을 향상 시키기 위해 캐리어비이클과 혼합하여 페이스트화 하였다. 캐리어비이클은 유기용매 α -terpineol(CAS No. 98-55-5, Kanto Chemical Co., Inc., Japan) 과 2-(2-butoxyethoxy) ethyl acetate (CAS No. 124-17-4, Samchun Pure Chemical Co., Ltd., Republic of Korea) 를 7:3 비율로 혼합한 복합용매로 사용하였고, 분산제 (Zephyrym™ PD 2246, Croda International Plc., UK), 유기바인더(Ethyl cellulose,CAS No. 9004-57-3, Sigma-Aldrich Corp., USA), 유변물성조절제(Thixatrol® Max, Elememtis Specialties, Inc., USA)를 첨가하여 제작하였다.

Figure 8 은 갈린스탄 페이스트 제조 순서를 도식화한 그림이며, 캐리어비이클 제조 순서는 다음과 같다. 첫째, 비이커 하단에 분산제를 퍼 발라준 후 복합용매를 함량만큼 첨가한다. 이후 비이커를 히팅 멘틀(DMB 601, Misung Scientific Co., Ltd., Republic of Korea)에 장착하고, 오버헤드 스테러(DH.WOS01026, DAIHAN Scientific Co., Ltd., Republic of Korea)를 담귀 80℃ 설정온도를 맞추고 열이 충분히 전달 되도록 10분 기다린다. 10분 경과 후 오버헤드 스테러 교반 속도를 500 rpm으로 설정하여 유기바인더와 유변물성조절제를 차례대로 소량씩 첨가하여 교반 한다. 마지막으로 유변물성조절제를 활성화 시키기 위하여 오버헤드 스테러 교반속도를 1000 rpm으로 속도를 올린 후 3시간 동안 교반 한다. 3시간후 활성화가 완료된 캐리어비이클은 교반 탈포기(ARE-310, Thinky Corp., Japan)를 이용하여 2200 rpm 에서 10분동안 탈포한다.

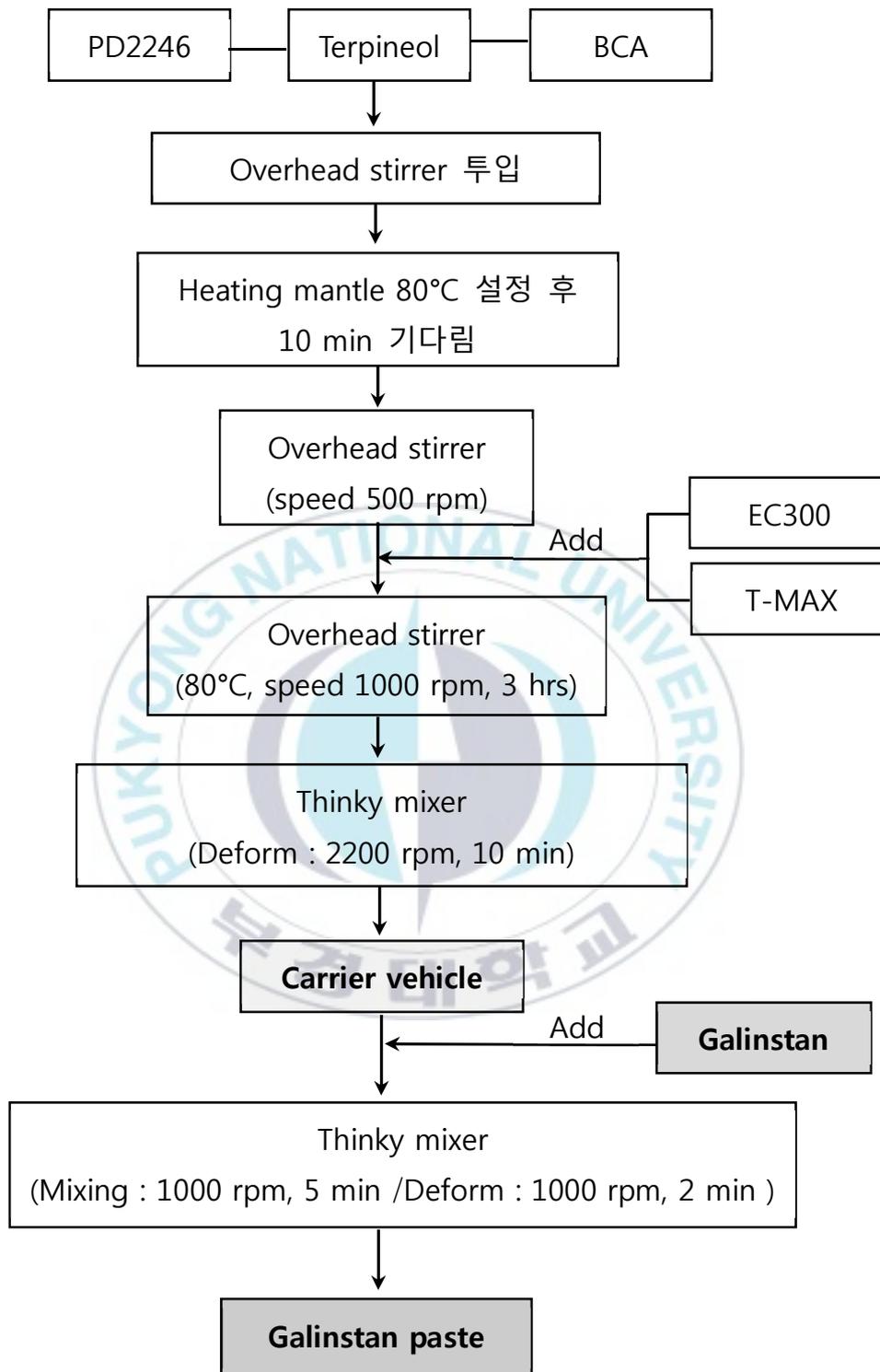


Figure 8. Procedure of carrier vehicle and galinstan paste

완성된 캐리어비이클은 교반 탈포기를 이용하여 갈린스탄과 함께 1000 rpm 에서 5 분간 교반 시켜준 후, 1000 rpm 에서 2 분간 탈포 공정을 거친다. 완성된 갈린스탄 페이스트의 조성은 Table 3 와 같다

Table 3. Composition of galinstan paste

Composition	Filler	Carrier vehicle				
	Galinstan	Dispersant	Binder	Rheological modifier	Co-solvent	
		PD-2246	Ethyl cellulose	Thixatrol Max	Terpineol	Butyl carbitol acetate
wt%	95	0.95	0.28	0.48	2.3	0.99

2. 단위 모듈 제작

기존 고온 솔더링 인터커넥션 방식을 대체할 모듈화 본딩 소재로 갈린스탄 페이스트를 사용하여 단위 모듈을 제작하였다. 이때, 봉지재로 EVA(Ethylene-vinyl acetate)를 사용한 단위 모듈과, 액상실리콘(PV-6212, Dow Corning Co., USA)을 사용하여 합착한 단위 모듈을 각각 제작하여 비교해보았다. 태양전지는 Al-BSF 에 세그먼트 3 버스바 전극 구조를 가지는 상용 셀(SH-1900S-M(T02), SHINSUNG E&G Co., Ltd., Republic of Korea)을 사용하였고, 메탈리본은 SnPb 솔더 합금이 코팅되어 있는 리본(ETP-Cu Sn60Pb40, KOS Ltd.)을 사용하였다. 후면재는 반사율이 높고 EVA가 코팅되어있는 흰 백시트(BQ3RE35(W), SKC Co., Ltd.)를 사용하였다.

2.1 EVA를 이용한 단위모듈 제작 과정

갈린스탄 페이스트로 인터커넥션 후 봉지재로 EVA를 사용하여 합착한 단위 모듈의 제작 순서는 Figure 9과 같다. 먼저 디스펜서(EzROBO-5 GX ST2520, Iwashita Engineering, Inc., Japan)를 이용하여 태양전지 전면 버스전극에 갈린스탄 페이스트를 도포 후, 150℃ 에서 2~3분간 건조 시켜준다. 그 다음 메탈리본을 올리고, UV 본드(UV-8800, Skycare Co.)를 양단부 및 중앙에 소량 도포 후 경화시켜 일시적으로 리본을 고정시킨다. 갈린스탄 페이스트 그 자체로는 전도성을 가지지 않는데, 메탈리본을 올리는 과정에서 가해지는 압력에 의해 갈린스탄 페이스트가 기계적으로 소결되고 도전 상태가 된다. 후면 실버 버스전극도 전면 버스전극과 동일한 방법으로 갈린스탄 페이스트 도포 후 메탈리본을 UV본드를 사용하여 고정시켜준다. 이후 후면재, 봉지재, 갈린스탄으로 인터커넥션된 태양전지, 봉지재, 유리 순으로 적층시켜 진공 라미네이터 장비(480-1222S, Nisshinbo Mechatronics, Inc.)에 로딩한다.

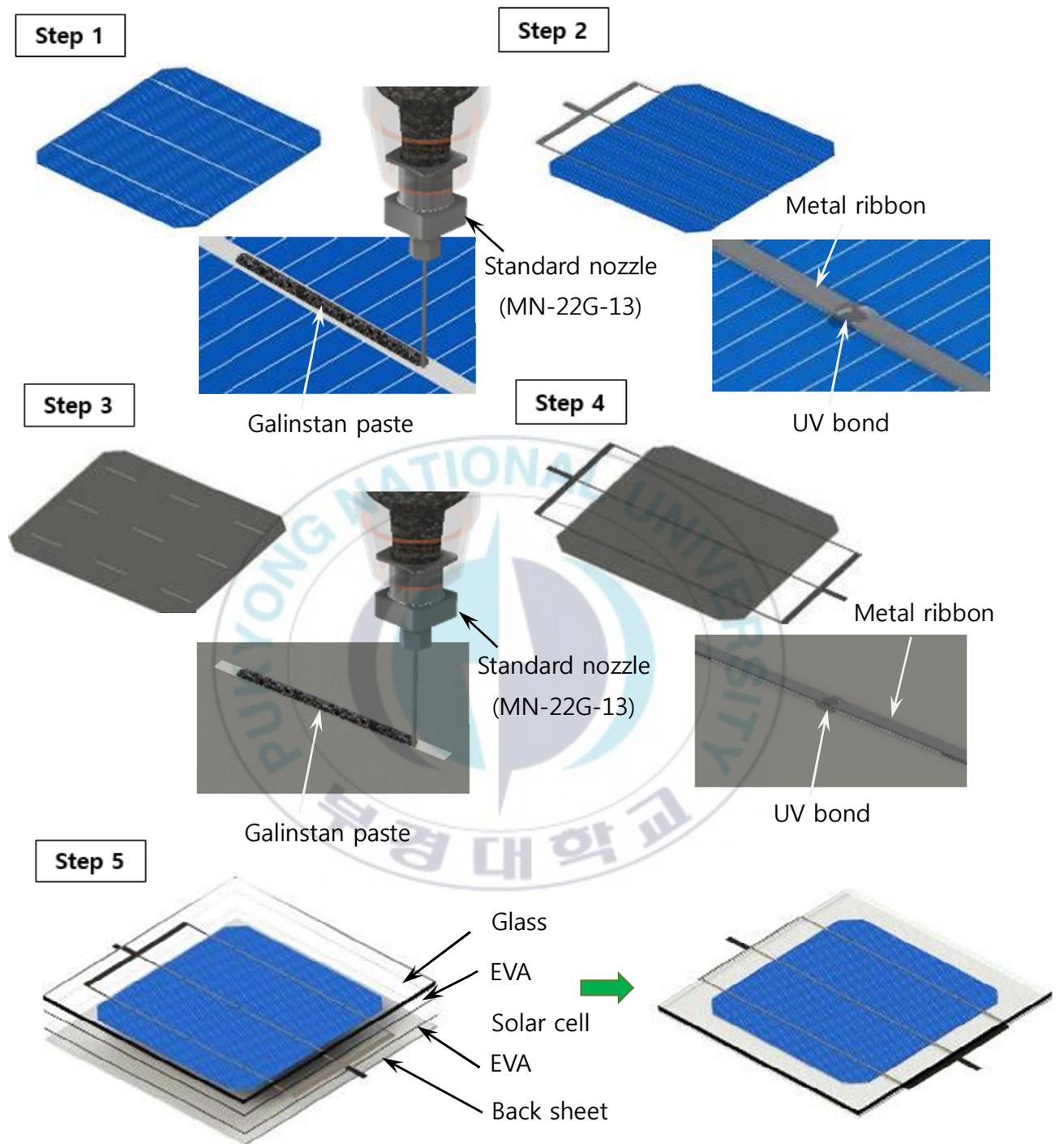


Figure 9. Schematic illustration of the fabrication steps of a unit module using EVA

Figure 10 은 진공 라미네이터 장비의 설정 온도와 압력을 나타낸 그래프이며 진공상태에서 110℃, 9 분동안 예열 시켜준 후, 150℃ 에서 760 mmHg 압력으로 5 분 동안 열과 압력을 부여해 봉지재를 가교시켜 합착한다. 최종적으로 갈린스탄 페이스트를 사용하여 인터커넥션한 후, EVA 봉지재로 합착하여 완성한 단위모듈은 Figure 11 와 같다

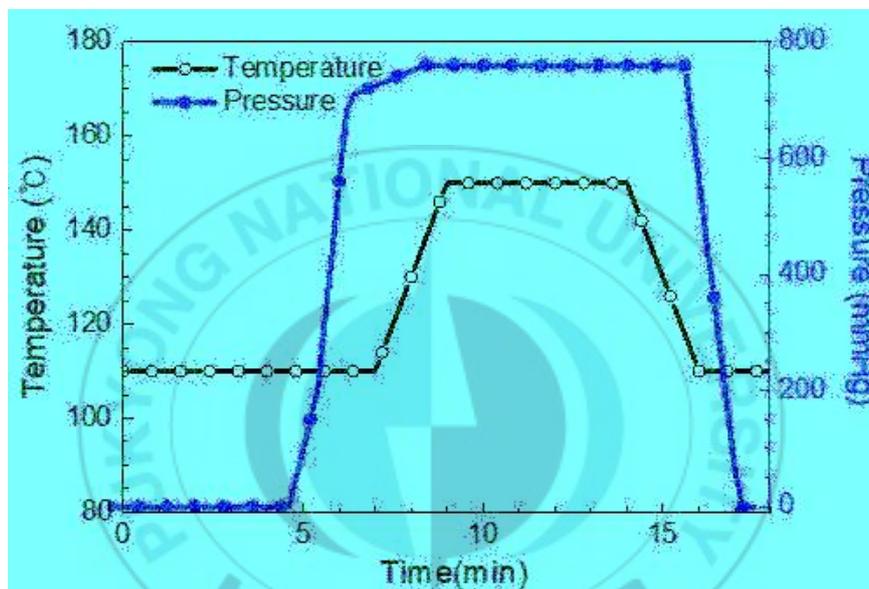


Figure 10. Temperature and pressure conditions of lamination process

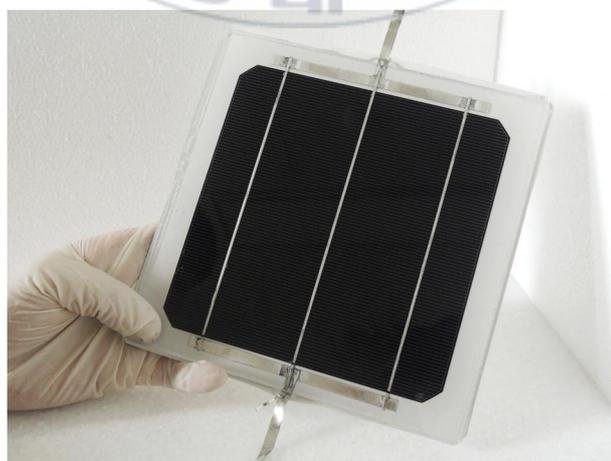


Figure 11. Image of unit module fabricated using a galinstan paste

2.2 액상실리콘을 이용한 단위모듈 제작 과정

EVA 는 물 또는 자외선에 노출되면 분해되어 아세트산을 생성하고 전극 부식을 증가시키는 문제를 가진다.⁽²³⁾ 또한, 고체상태이기 때문에 라미네이션 공정 중 고압으로 합착할 때 태양전지 셀이 부서질 우려가 있다. 반면에 액상실리콘은 변형이 자유로운 액상 형태이기 때문에 고압조건에서 합착할 때 태양전지 셀의 파손을 줄일 수 있다. 또한 UV-가시광 영역에서 높은 투과율을 가지며, 낮은 유리전이온도를 가지기 때문에 우수한 열 안전성 및 내성을 가진다.⁽²⁴⁾

인터커넥션 공정은 Figure 9의 Step1~4 와 같이 EVA로 합착하는 단위모듈과 공정이 동일하며 액상실리콘으로 합착한 단위모듈 제작 공정은 Figure 12 에 제시되어있다. 액상실리콘은 베이스인 파트 A 와 경화제인 파트 B 2액형으로 구성되어 있기 때문에 사용 전 1:1 부피 비로 혼합한다. 파트 A와 파트 B 를 균질하게 혼합하기 위해서 교반탈포기를 이용하여 2000 rpm 에서 2분 30초 동안 교반 후, 2000 rpm 에서 2분 30초 동안 탈포 공정을 거친다. 믹싱이 완료된 액상실리콘의 절반을 백시트에 도포 후 스펙츨러를 이용하여 퍼준다. 그 다음 진공 데시케이터(VDC-31, Jeio tech. Co., Ltd, Republic of Korea) 에서 7분동안 탈포 공정을 거쳐 육안으로 보이지 않는 기포들까지 제거한다. 남은 액상실리콘의 절반은 유리에 도포하여 백시트와 동일한 과정을 반복한다. 액상실리콘이 도포된 백시트 위에 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션이 완료된 태양전지를 올린 후, Figure 12 의 Step 2 와 같이 액상실리콘이 도포된 유리를 하단부부터 닿도록 서서히 덮어준다. 최종적으로 액상실리콘이 충분히 빠져나올 수 있도록 2 kg 정도를 올린 후, 110℃ 설정된 핫플레이트 위에서 10분동안 액상실리콘을 경화시켜 합착한다.

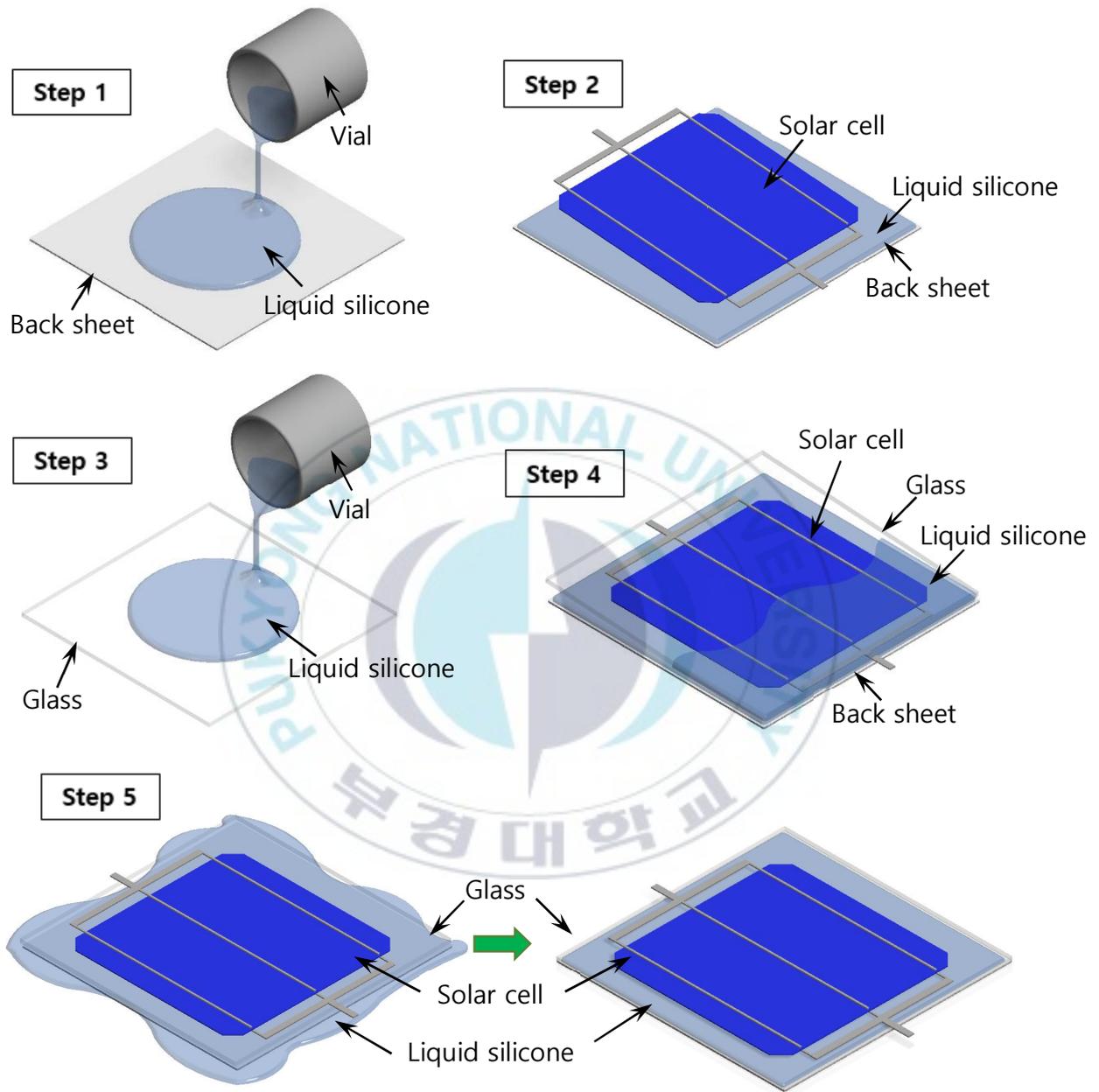


Figure 12. Schematic illustration of the fabrication steps of a unit module using liquid silicone

3. 효율 측정

태양전지 효율은 태양으로부터 입사된 에너지 대비 생성된 에너지의 비로 정의되는데, 태양전지 성능을 나타내는 가장 중요한 척도이다. 따라서, 갈린스탄 페이스트를 사용하여 상온에서 인터커넥션한 단위 모듈의 효율을 I-V 테스트 시스템(K3000, McScience, Inc., Republic of Korea)을 이용 하여 측정하였고, 기존 고온 솔더링 방식으로 인터커넥션한 단위 모듈의 효율과 비교, 분석 하였다.

태양전지 효율⁽²⁵⁾을 산출하기 위해서는 여러 파라미터들이 필요한데, 대표적으로 단락전류, 개방전압 그리고 충전율이 있다. 단락전류(short-circuit current: I_{sc})는 Figure 13 와 같이 태양전지에 걸린 전압이 '0' 일 때 얻을 수 있는 최대 전류이며, 빛에 의해 발생한 캐리어의 생성 및 수집에 의존하므로 빛의 세기에 영향을 받는다.

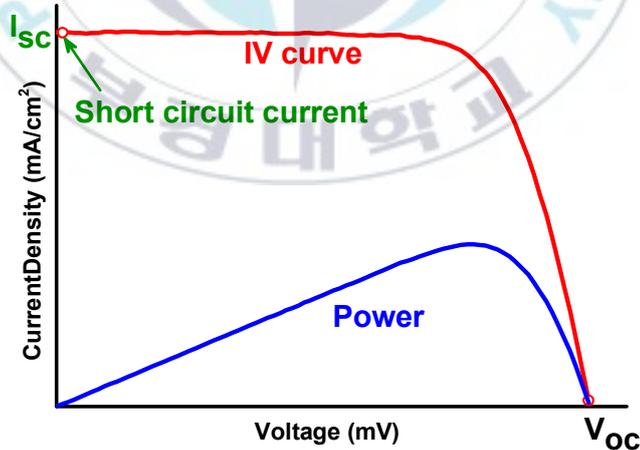


Figure 13. Short-circuit current (I_{sc}) in solar cell I-V curve

개방전압(open-circuit current: V_{oc})은 Figure 14과 같이 태양전지에 흐르는 전류가 '0' 일 때 얻을 수 있는 최대 전압이며, Equation 1 에 명시 되어있는 바와 같이 포화전류 (Saturation current: I_0)와 광생성 전류(light generated current: I_L)에 의존 한다. 그러나, 광생성 전류(light generated current: I_L)는 값이 거의 일정하고 변하기 힘든 수치 이므로 포화전류 (Saturation current: I_0)의 영향을 크게 받는다. 포화전류는 태양전지에서 재결합에 의존하므로, 개방전압은 재결합의 척도로 볼 수 있다.

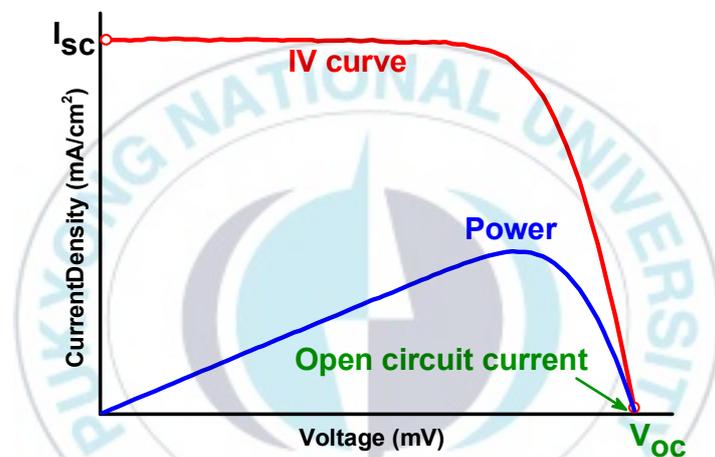


Figure 14. Open-circuit current (V_{oc}) in solar cell I-V curve

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \dots \dots \dots \text{Equation 1}$$

Boltzmann constant (points to k)
 Temperature (points to T)
 Ideality factor (points to n)
 Light generated current (points to I_L)
 Saturation current (points to I_0)

충진율은 (fill factor : FF) 태양전지 최대 출력(power)을 결정하는 인자 로 Figure 15 와 Equation 2 에 나와있는 바와 같이 면적 A 와 B의 면적 비를 나타낸다. 충진율은 1에 가까울수록 좋으나, 태양전지의 고유 저항 때문에 충진율=1이 되기는 어렵다.

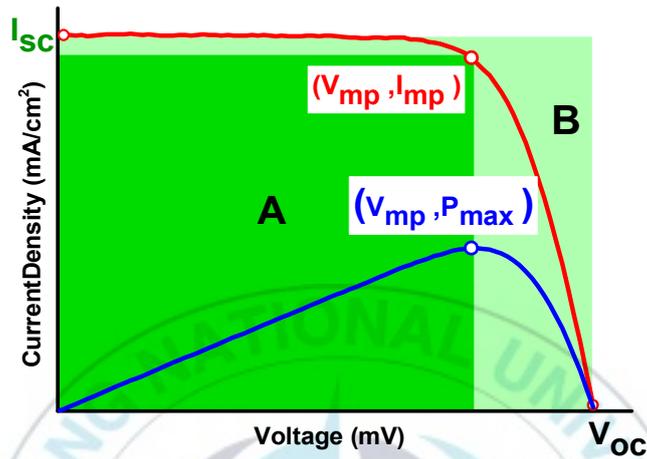


Figure 15. Fill factor (FF) in solar cell I-V curve

$$FF = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{\text{area A}}{\text{area B}} \dots \dots \dots \text{Equation 2}$$

최종적으로 효율(η)은, 위에서 설명한 단락전류, 개방전압, 충진율 파라미터를 통해 아래 Equation 3 와 같이 산출할 수 있다.

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

4. 신뢰성 테스트

태양전지 모듈은 외부 환경에 많은 영향을 받으므로 가속화 테스트를 통해 숨겨진 결함이나 문제를 발견하고 해결방안을 모색하여야 한다. 따라서 새로운 인터커넥션 소재인 갈린스탄 페이스트를 사용하였을 때 발생하는 여러 문제를 파악하기 위해서 한국에너지기술연구원에서 열 사이클 (DYR-222P, Daeyang ETS Co., Ltd., Republic of Korea) 환경테스트를 진행하였다. 열 사이클 실험은 Figure 16 와 같이 -45°C 에서 80°C 까지 저온과 고온에 반복적으로 노출 시키면서 빠른 온도 변화에 따른 내성을 판단할 수 있는 시험이다. 급격한 온도 변화는 태양전지 모듈 의 다양한 열팽창 계수 에 따라 납땜 불량, 균열, 박리 등을 유발하기 때문이다. Figure 16 과 같이 -45°C 에서 80°C 까지 의 온도변화를 1 사이클로 설정하였고, 1 사이클을 5 시간동안 진행하였다. 5 시간 중에서 최저온도 와 최고 온도에서 10분동안 유지하였고, 총 500 시간 동안 100 사이클 열 환경 시험을 진행하였다.

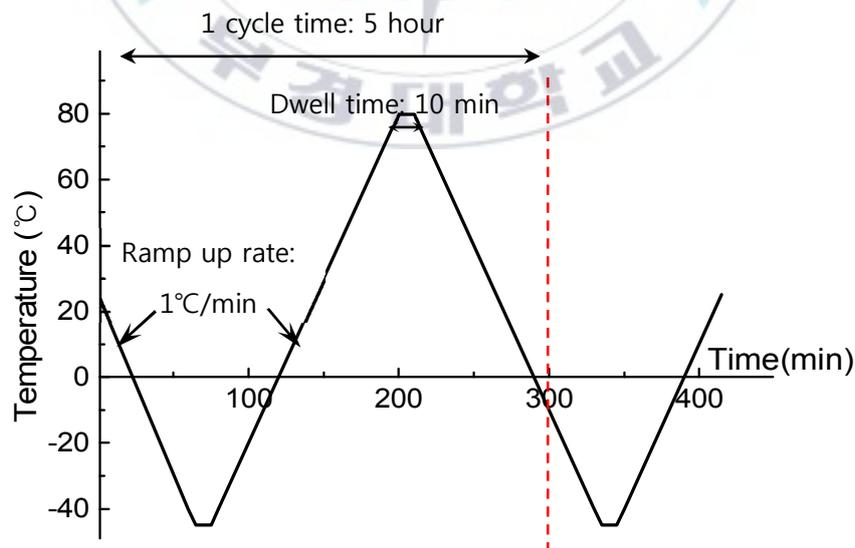


Figure 16. Thermal cycle test profile

III. 결과 및 고찰

1. 갈린스탄 페이스트

1.1 갈린스탄 페이스트 제작에 따른 인쇄성 향상

갈린스탄의 합금 성분들 중 하나인 갈륨(Ga)은 대기 중 산소에 의하여 산소 층이 빠르게 형성된다. 표면장력을 최소화 하기 위하여 구형으로 뭉치는 액체 성분과는 달리, 갈린스탄은 형성된 산소 층으로 인하여 기계적으로 안정화 되기 때문에, Figure 17 a)와 같이 비구면 형태를 유지 할 수 있다.⁽²⁶⁾ 하지만 갈린스탄의 표면장력은 534.6 mN/m으로, 물의 7배에 해당하는 높은 표면장력으로 인하여 버스전극을 잘 적시지 못한다. 또한 디스펜서를 이용하여 도포하였을 때, 노즐 끝 단에 뭉친 갈린스탄을 통해 갈린스탄이 끊임 없이 세어 나와 일정량을 선택적으로 도포하는데 어려움이 있다.

반면 캐리어비이클은 일정 이상 힘을 가하지 않으면 변형이 일어나지 않는 항복응력을 가지기 때문에 일정량을 균일하게 도포 가능하다. 이러한 항복응력은 캐리어비이클의 성분 중 하나인 유변물성조절제에 의한 것으로 Figure 17 b)와 같이 불규칙한 형태를 가진다. 또한, 캐리어비이클 성분 중 에틸 셀룰로오스(ethyl cellulose)는 유기바인더 역할을 하여 태양전지 버스전극에 도포가 용이하다.

따라서 항복응력을 가지며 바인더 성분이 포함되어있는 캐리어비이클을 갈린스탄과 함께 교반 함으로써 갈린스탄의 인쇄성을 향상시킬 수 있었고, Figure 17 d)와 같이 버스전극에 선택적으로 도포가 가능하였다.

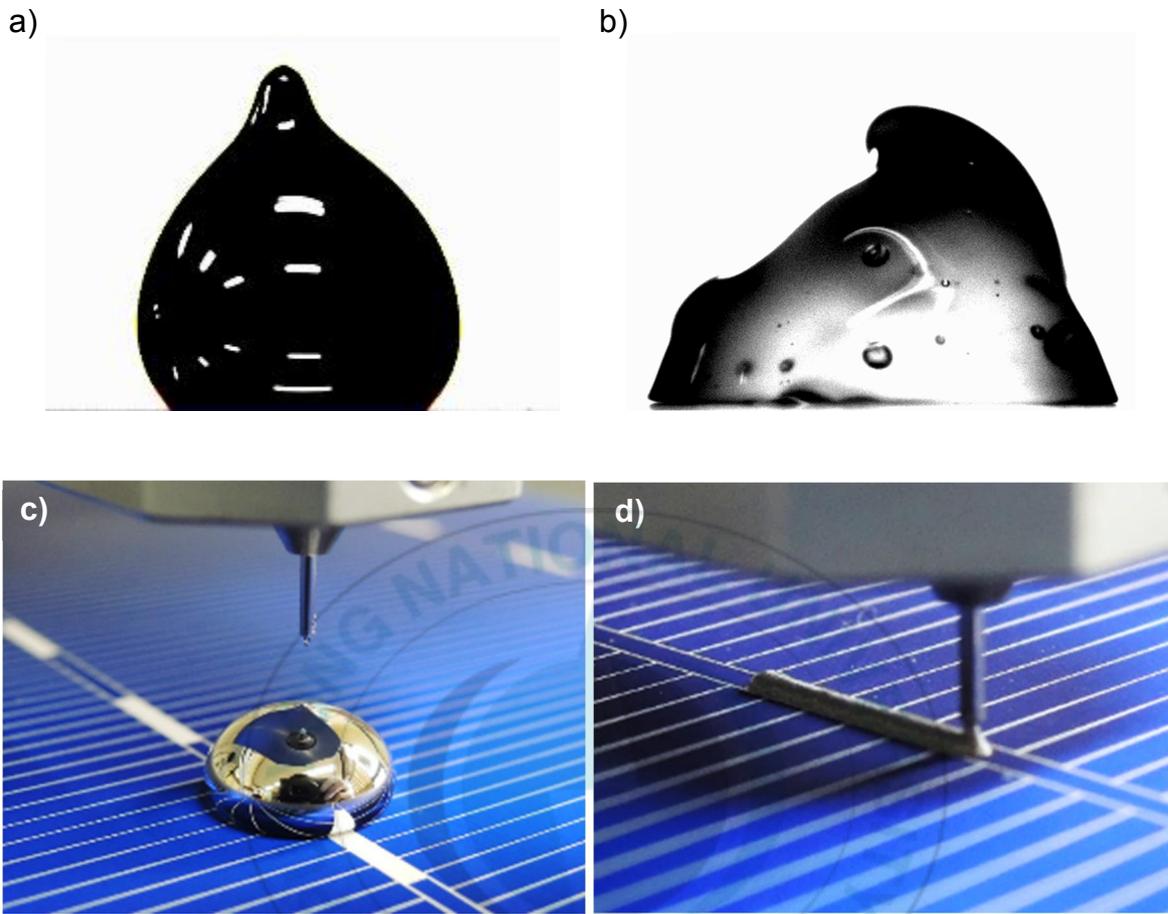


Figure 17. a) Non-spherical shape of galinstan due to gallium oxide, b) Non-spherical shape of carrier vehicle due to yield stress, c) Dispersed galinstan and d) galinstan paste on the silver bus bar

1.2. 갈린스탄 페이스트 유체특성

기존 원추형(coaxial cylinder) 점도계의 경우 세척이 불편하고 센터링이 어려워 전단 속도가 일정하지 못한 단점이 있다. 반면, cone-plate 점도계는 시료 전체가 균일한 전단 응력을 받고, 소량의 잉크로도 점도를 측정할 수 있기 때문에 정확하고 신속한

데이터를 산출할 수 있다.⁽²⁷⁾ 따라서 갈린스탄 페이스트의 점도 및 항복 응력 등 레올로지 특성을 분석하기 위하여 cone-plate 점도계를(HAAKE Mars Rheometer, Thermo Fisher Scientific, Inc., Germany) 를 사용하여 측정하였다.

Cone-plate 점도계는 Figure 18 과 같이 일반적으로 고정 된 plate 와 회전 하는 cone 으로 구성되어 있으며, 측정하고자 하는 샘플은 plate 와 cone 사이 갭에 채워진다. 회전체인 cone 이 회전하면 유체의 흐름이 발생하고, 유체의 흐름에 저항하는 값(토크)이 측정되어 점도로 산출 가능하다.⁽²⁸⁾

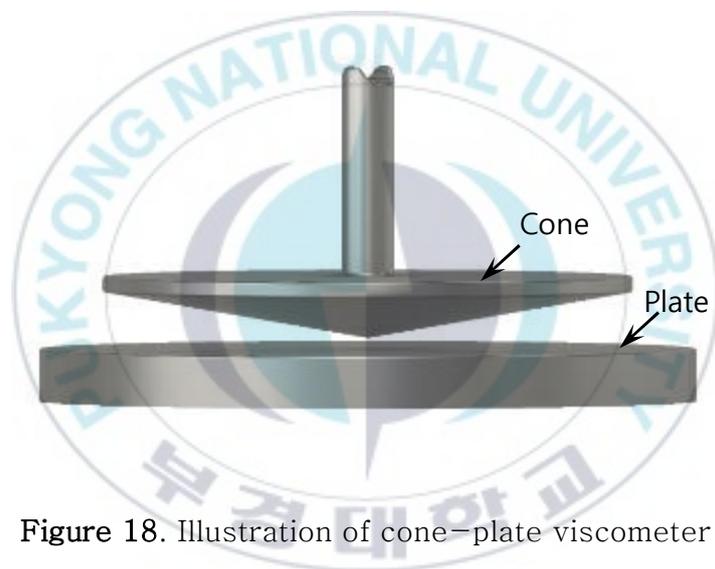


Figure 18. Illustration of cone-plate viscometer

Cone-plate 점도 측정기를 이용하여 캐리어비이클, 순수 갈린스탄, 갈린스탄 페이스트의 점도를 측정하였다. 그 결과, Figure 19에 나와있는 바와 같이 원료인 갈린스탄과 캐리어비이클의 점도보다 완성된 페이스트의 점도가 더 높은 것을 확인하였다. 이는 갈린스탄과 캐리어비이클을 교반시킬때, 연속상인 캐리어비이클에 수백 마이크로미터 사이즈의 갈린스탄 액적이 분산되면서 에멀션 형태가 되기 때문이다.

갈린스탄 페이스트의 점도가 가장 높음에도 불구하고, 전단속도가 증가함에 따라 점도가 감소하는 Bingham pseudoplastic 유체특성을 가지므로 디스펜서를 이용하여 도포하는데 무리가 없었다..

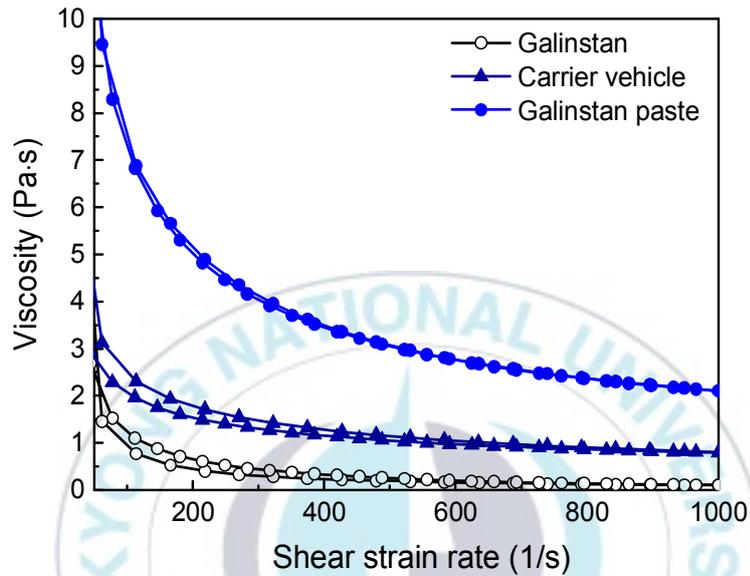


Figure 19. Measured viscosity of galinstan paste, carrier vehicle and galinstan

1.3 갈린스탄 페이스트 성분 분석

Toluene 에 갈린스탄 페이스트를 소량 첨가하여 희석 후 Ultrasonic homogenizer(SH-750s, YTK Corporation., Republic of Korea)를 이용하여 분산시켰다. 그리고 전계방사 주사전자현미경(FE-SEM S-4800, Hitachi, Ltd., Japan)을 이용하여 EDS 및 element mapping 을 통한 성분 분석을 진행하였다.

분석 결과, Figure 20 a), b) 에 나와 있는 바와 같이 갈린스탄의 주성분인 갈륨(68.5% Ga), 인듐(21.5% In), 주석(10% Sn)이 주로 발견되었고, 캐리어비이클로 추정되는 유기물의 탄소(C) 성분이 갈린스탄 입자 외곽에서 발견되는 것을 볼 수 있다.

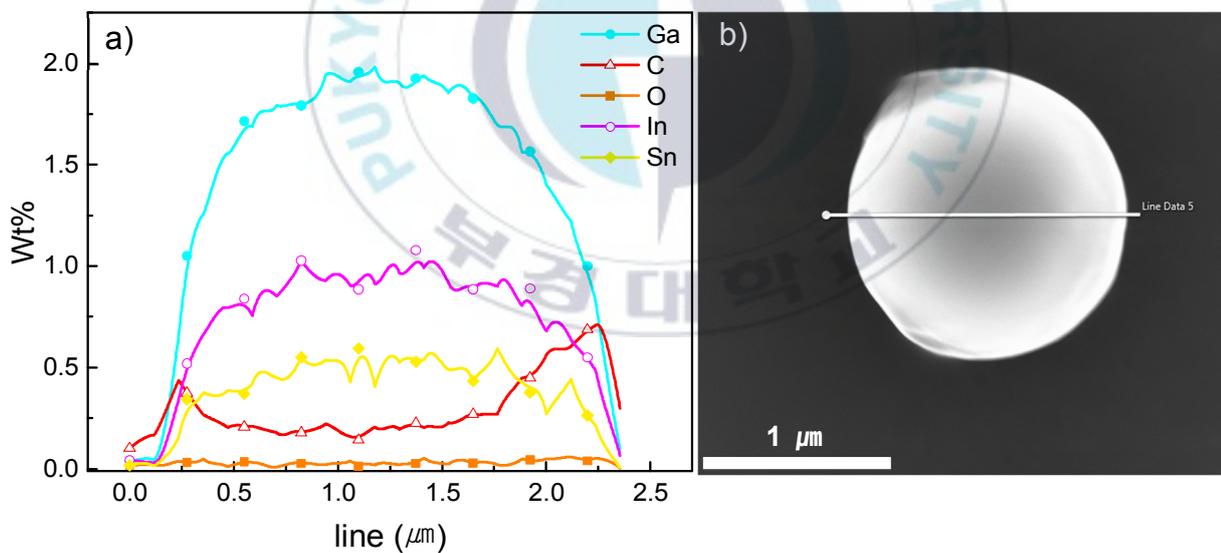


Figure 20. a) SEM and b) line EDS analysis of galinstan droplets

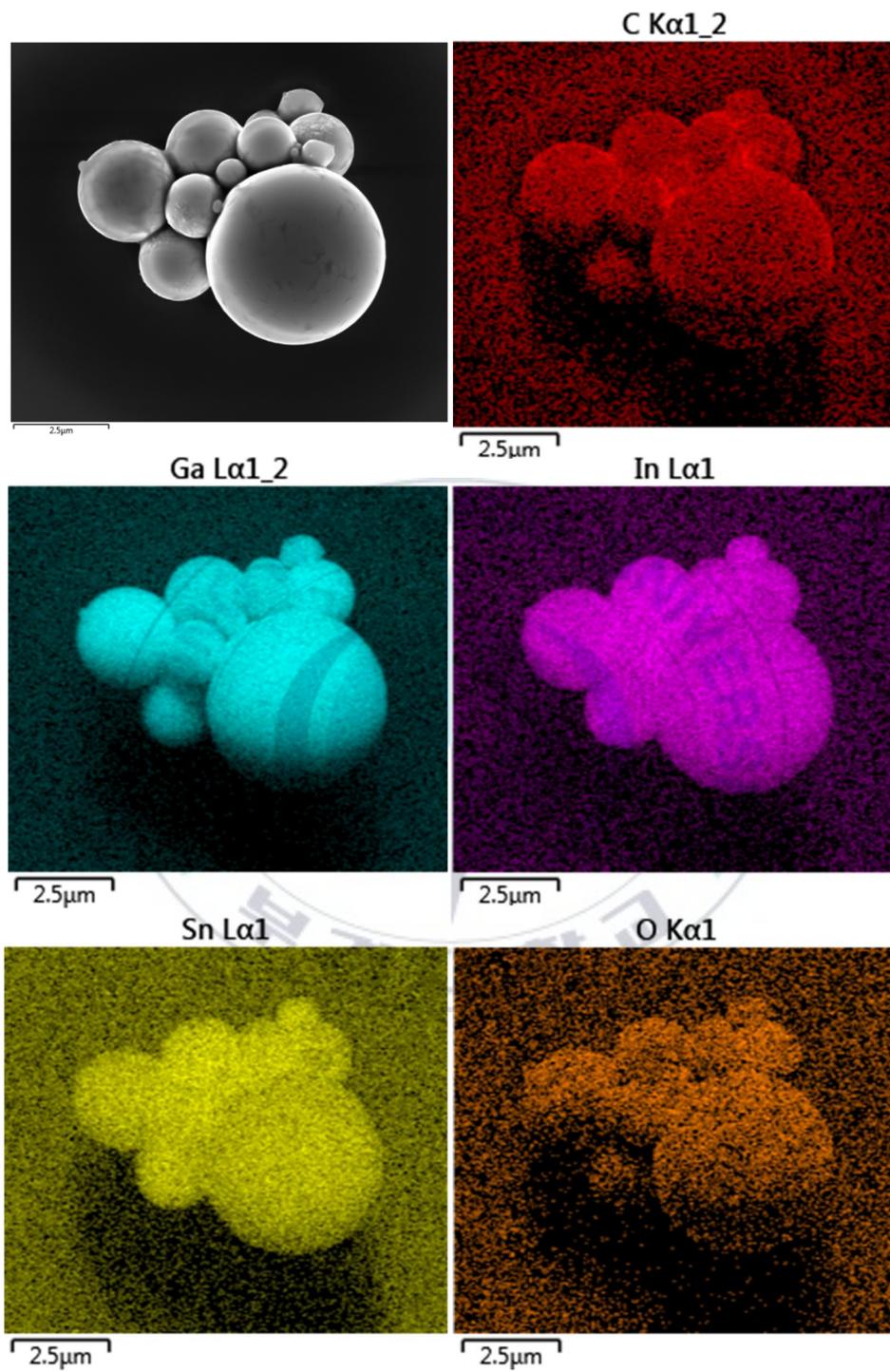


Figure 21. Element mapping image of galinstan droplets

1.4 갈린스탄 페이스트 기계적 소결

최종적으로 완성된 갈린스탄 페이스트는 비 전도성의 캐리어비이클에 갈린스탄이 분산되어 있는 형태 이므로 페이스트 그 자체로는 전도성을 가지지 않는다. 따라서, 갈린스탄 페이스트에 전도성을 부여하기 위하여 150℃ 에서 2~3 분동안 열처리를 하여 캐리어비이클 속 용매를 건조시킨다.

Figure 22 b)와 같이 갈린스탄 액적들 사이에 존재하던 캐리어비이클의 용매들이 증발하면서 갈린스탄 액적들이 가까워 지는 것을 볼 수 있다.

가까워진 갈린스탄 액적들을 메탈리본으로 합착을 할 경우, 산화막으로 분리되어 있던 갈린스탄 액적들이 기계적 소결에 의해 갈륨산화막이 벗겨지면서 전도성을 가지게 된다.^{(29),(30)}

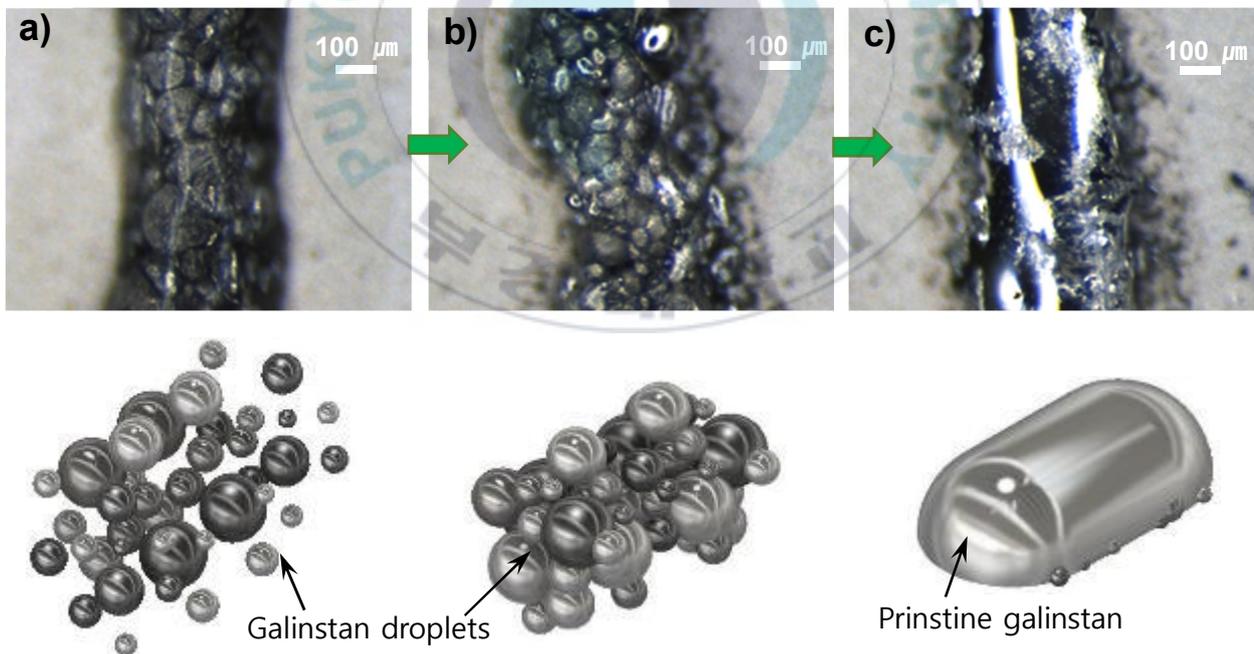


Figure 22. Schematic illustration and optical image of galinstan paste a) after dispensed, b) after dried and c) after mechanically sintered

1.5 갈린스탄 함량에 따른 접촉 비저항 변화

갈린스탄과 캐리어비이클의 최적 배합 조건을 찾기 위하여 갈린스탄을 30 wt% 에서 95 wt%까지 함량을 늘려가며 접촉 저항을 측정하였다. Figure 23 b)와 같이 폭 1 cm, 길이 3cm 인 구리 테이프가 서로 교차되어 접촉면적이 1cm^2 이 될 수 있도록 슬라이드 글라스 에 부착시킨 후, 접촉 면적에 갈린스탄 페이스트를 도포 하여 샘플을 합착 시켜준다. 이때, 갈린스탄 페이스트가 1cm^2 영역에 전체적으로 퍼질 수 있도록 접합부를 손으로 살짝 눌러준다. 동일한 방식으로 저융점 무연 솔더페이스트 BiSnAg (Bi57.6 Sn42Ag0.4, OM-520, Alpha Assembly Solutions, Inc., USA)를 접촉면적에 도포 후, 160°C 에서 3 분동안 합착 시켜 레퍼런스 샘플을 제작하였다.

그 결과, Figure 23 a)와 같이 갈린스탄 함량이 증가함에 따라 접촉 비저항은 감소하였다. 갈린스탄 함량이 95 wt%인 갈린스탄 페이스트의 접촉 비저항은 대략 $1.2\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 으로, 기존 솔더링 접촉 비저항 값에 견주어도 될 수준의 우수한 전기적 특성을 가진다.

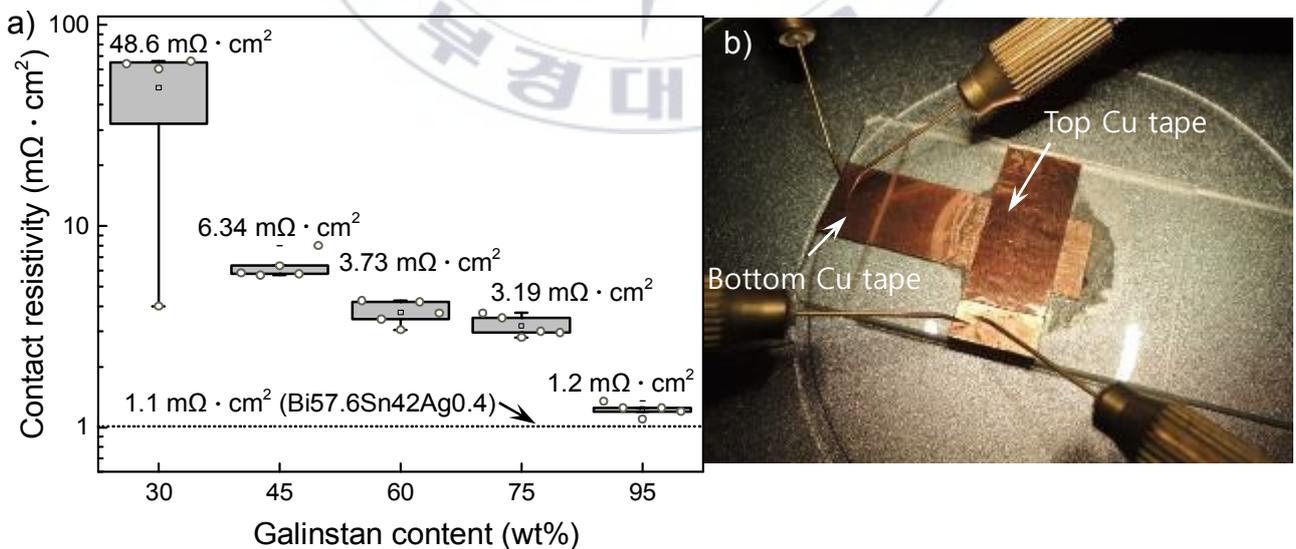


Figure 23. a) Measured contact resistivity with different galinstan content, b) Image of contact resistivity measurement method

2. 단위모듈 제작 시 발생한 문제

2.1 갈린스탄 누설 문제

갈린스탄 페이스트 건조 후 메탈리본 부착 시 갈린스탄 입자들이 기계적 소결에 의하여 뭉치면서 퓨어한 상태의 갈린스탄 형태로 돌아오기 때문에, 라미네이션 장비로 EVA를 합착할 때 버스전극과 메탈리본 사이에 존재하던 갈린스탄이 새어 나오는 문제가 발생한다. 새어 나온 갈린스탄은 수광 면적을 줄일 뿐 아니라, Figure 24 b) 와 같이 전면 갈린스탄이 후면 전극과 연결된 메탈리본으로 흘러가 Shunt가 발생한다. 하지만 이와 같은 문제는 갈린스탄 페이스트 도포량을 조절함으로써 해결 가능할 것으로 판단된다.

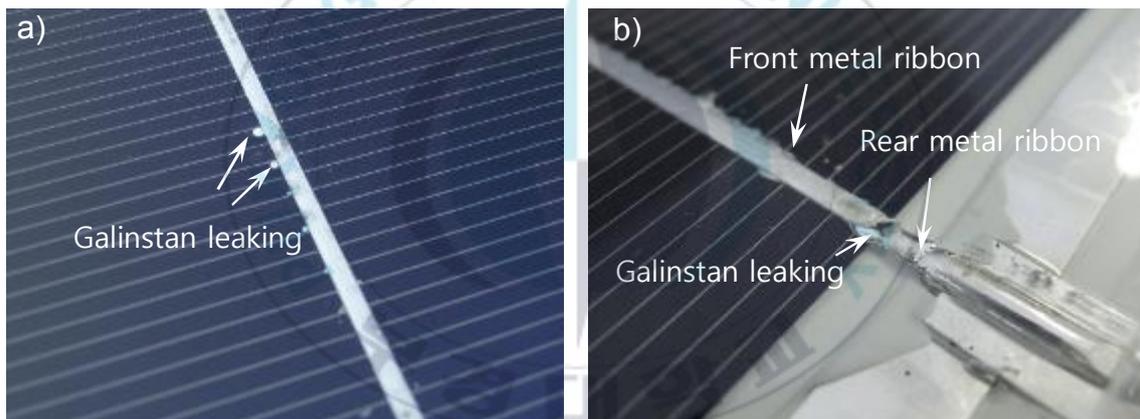


Figure 24. a) galinstan leaking while lamination process, b) shunt problem caused by galinstan leaking

2.2 액상실리콘

액상실리콘을 이용하여 단위 모듈 제작 시 진공데시케이터 에서 탈포공정을 7분동안 거치지만 수작업으로 작업이 이루어지다 보니 Figure 25 a) 와 같이 간혹 기포가 생성되는 문제가 발생하였다. 또한 액상실리콘의 도포량이 적을 경우 Figure 25 b) 와 같이 기

포가 간혀 빠져 나오지 못하거나 셀 중심부가 액상실리콘으로 덮이지 못하는 문제가 발생한다. 반면에 액상실리콘의 도포량이 많을 경우, Figure 25 c) 와 같이 액상실리콘이 흘러나오면서 태양전지 셀이 치우치는 문제가 발생한다. 상기 기포 문제들은 공정 및 도포량을 조절함으로써 해결 가능하며, 셀이 치우치는 문제는 단위 모듈 양측으로 나온 버스리본을 고정시킴으로써 해결하였다.

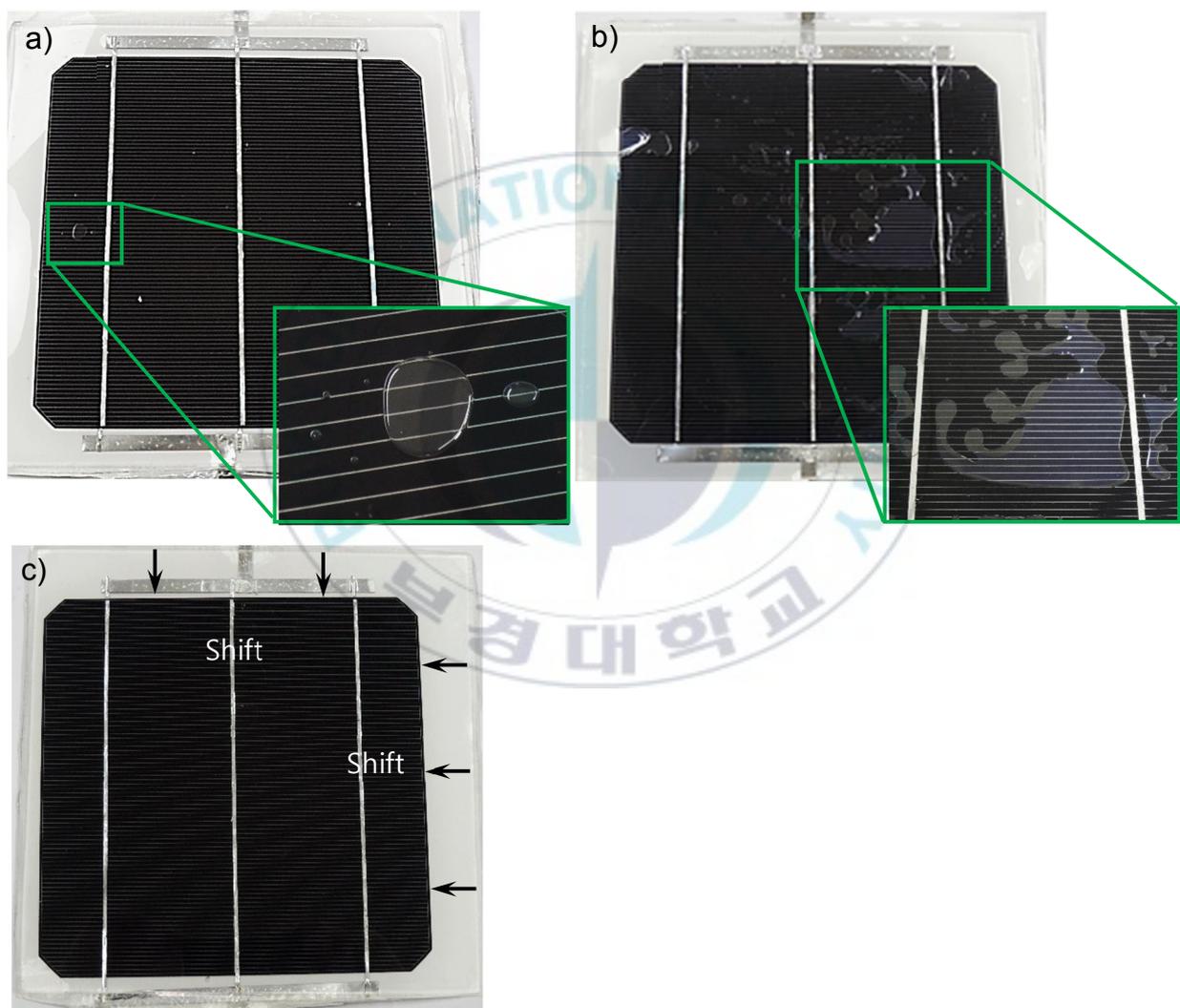


Figure 25. a) Bubble formation of unit module using liquid silicone, b) Bubble formation due to insufficient application of liquid silicone, c) Central deviations due to excessive application of liquid silicone

3. EL 측정 및 분석 결과

태양전지는 빛 에너지에 의해 엑시톤이 전자와 정공으로 분리되고 전력 생산을 위한 전압과 전류를 생산한다. 반대로 태양전지에 전류를 공급할 경우 전자와 정공의 재결합에 의하여 태양전지가 발광하는데, 발광에너지를 적외선 CCD 카메라(charge coupled device camera)로 포착하여 품질 보증의 도구로 사용하고 있다. 발광은 전압에 비례하기 때문에 접합 불량이나 파손이 발생한 부분은 발광을 하지 않아 어둡게 표시된다. 따라서, Electroluminescence 이미징 측정(EL 측정)을 통해 가시광 영역에서 쉽게 발견되지 않은 미세크랙(microcrack)이나 접합불량 문제로 인한 직렬저항(R_s) 증가 데이터를 제공한다. 태양전지에 연결된 메탈리본 금속을 통해 전류를 흘려주면 외부 카메라에 의해 발광에너지를 감지하기 때문에 태양전지에 무리를 주지 않으며, 1 초 이내의 빠른 시간에 측정이 가능한 효율적인 품질 보증 도구이다. ^{(31),(32), (33)}

Figure 26 는 솔더링으로 인터커넥션한 샘플과 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션한 샘플의 EL 측정 이미지 이다. 솔더링으로 인터커넥션한 5 개의 샘플은 5 개 전부 크랙이 발생하였으며, 그 중 2 개의 샘플은 열 사이클 실험 전에는 없던 미세크랙이 발견되었다. 그러나 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션한 샘플은 7 개 중 2 개만 크랙이 발생하였다.

샘플들을 수작업으로 제작하는 과정에서 다수 크랙이 발생하였지만, EL 측정 결과는 100 μm 급 박형 웨이퍼를 인터커넥션 할 때에는 열 및 기계적 스트레스가 없는 방법이 필수적임을 의미한다.

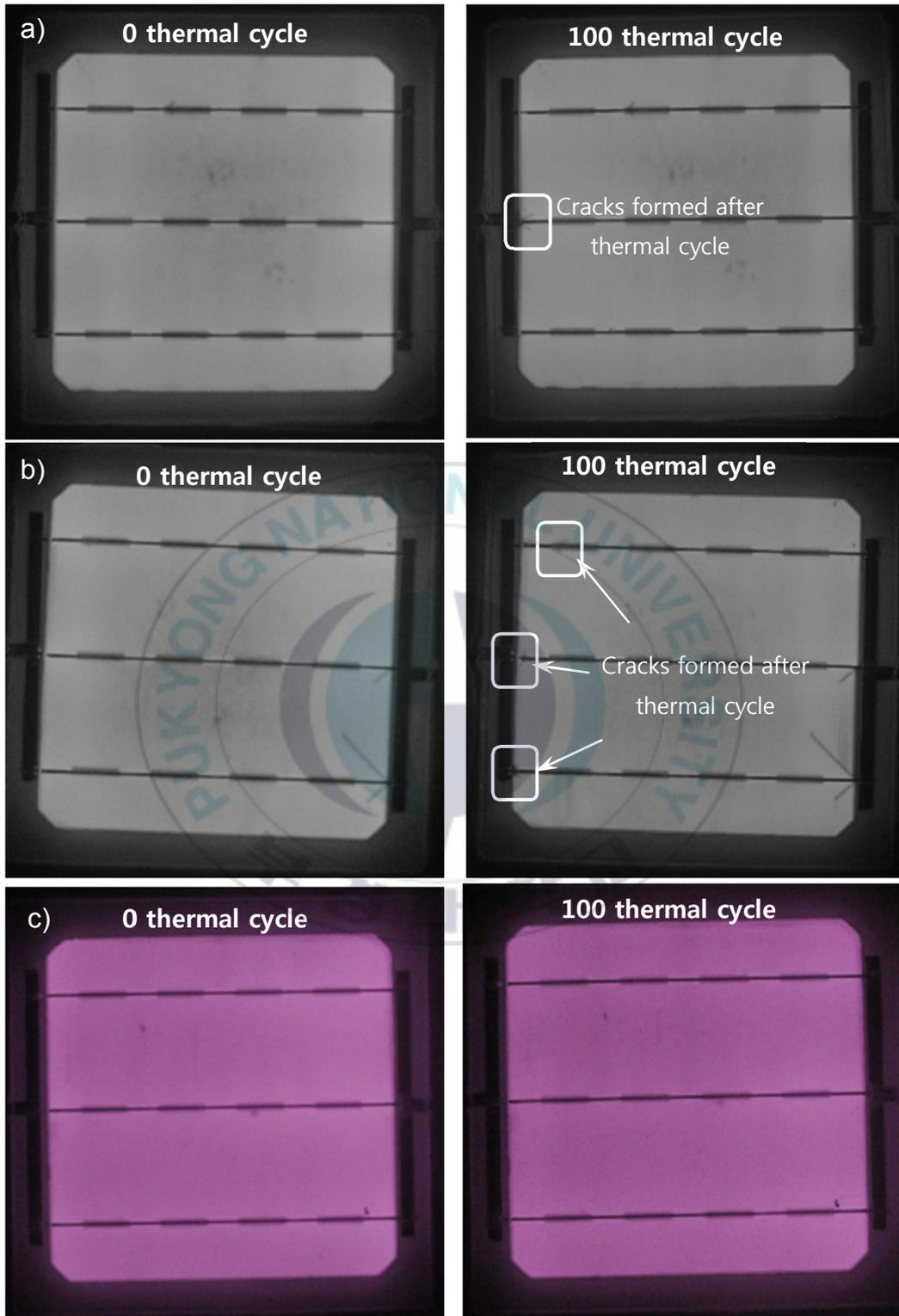


Figure 26. Electroluminescence image of a),b) conventional soldering and c) galinstan paste

4. 단위 모듈 효율측정 결과

4.1 갈린스탄 페이스트 인터커넥션 방식 과 솔더링 인터커넥션 방식 비교

갈린스탄 페이스트를 사용하여 상온에서 인터커넥션한 단위 모듈과 함께, 납땀 인두기 (FX-888D, Hakko Corp.)를 사용하여 수동으로 솔더링한 단위 모듈도 제작하여 효율을 비교해보았다. 메탈리본을 신속하고 원활하게 납땀 하기 위하여 납땀 인두기의 온도를 450℃로 설정하였고, 봉지재, 백시트 및 유리는 전부 동일한 제품을 사용하였다. 솔더링 방식을 이용한 샘플 또한 EVA 와 액상실리콘 2종류의 봉지재를 이용하여 합착하였으며, 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션한 샘플과 동일한 조건에서 합착하였다.

4.1.1 EVA 합착 단위 모듈

EVA로 합착한 단위 모듈 중 기존 고온 솔더링 방식으로 인터커넥션한 단위모듈과 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션한 2종류의 단위모듈들의 효율을 비교해 보았다. 그 결과, 솔더링 방식을 이용하여 인터커넥션한 단위모듈의 평균효율은 17.52% 이며, 갈린스탄페이스트를 사용하여 인터커넥션한 단위모듈의 평균효율은 17.49%이다. Figure 27 는 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션 후 EVA 합착 샘플과, 솔더링 방식으로 인터커넥션 후 EVA 합착 샘플들 중에서 최고효율을 가지는 단위 모듈의 전류-전압곡선을 상대적으로 비교한 그래프이다. 기존 솔더링 방식 대비 갈린스탄 페이스트를 사용한 샘플은 인터커넥션시 일체 열을 사용하지 않았음에도 불구하고 솔더링 샘플과 초기효율에 큰 차이가 없음을 확인하였다.

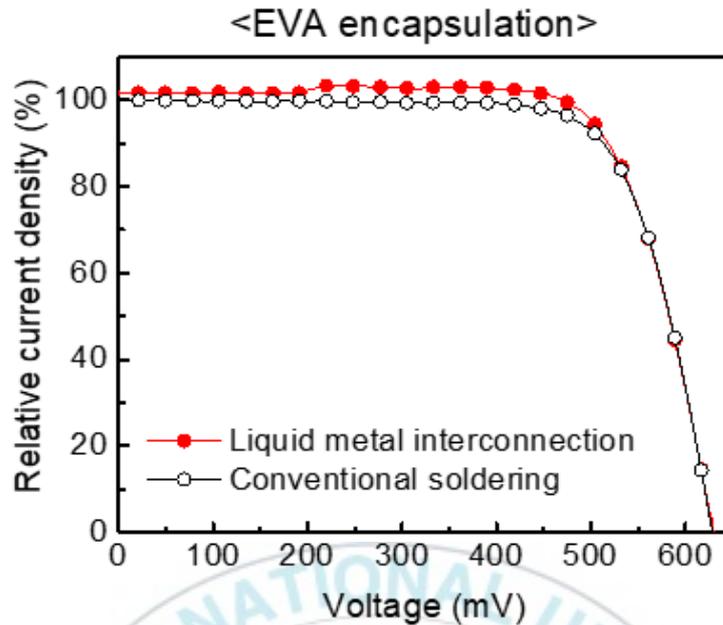


Figure 27. Comparison of the best unit module efficiencies using EVA encapsulation.

4.1.2 액상실리콘 합착 단위 모듈

액상실리콘으로 합착한 단위 모듈의 경우, EVA로 합착한 샘플과 다르게 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션한 단위 모듈의 초기 효율이 낮다. 기존 솔더링 방식으로 인터커넥션 후 액상실리콘으로 합착한 단위 모듈의 경우 평균 효율이 18.29% 이지만, 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션 후 액상실리콘으로 합착한 단위 모듈의 평균 효율은 17.25% 로 1.04%p 낮은 값을 가진다. Figure 28 은 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션 후 액상실리콘 합착 샘플과 솔더링 방식으로 인터커넥션 후 액상실리콘 합착 샘플들 중에서 최고 효율을 가지는 단위 모듈의 전류-전압곡선을 상대적으로 비교한 그래프이다.

솔더링으로 인터커넥션 후 액상실리콘으로 합착한 단위 모듈의 효율이 EVA로 합착한 단위 모듈보다 효율이 높다. 그 이유는, EVA 합착 샘플의 경우 4월~5월에 제작 및 측정을 한 반면, 액상실리콘으로 합착한 샘플의 경우 11월~12월에 제작 및 측정을 하였기 때문에 겨울철 실험실 내부 기온이 떨어지면서 개방전압 증가로 인한 효율 상승으로

판단하고 있다. 겨울철 기온 저하로 인한 개방전압 증가에도 불구하고 액상실리콘의 효율이 떨어진 이유를 5장 에서 다루도록 하겠다.

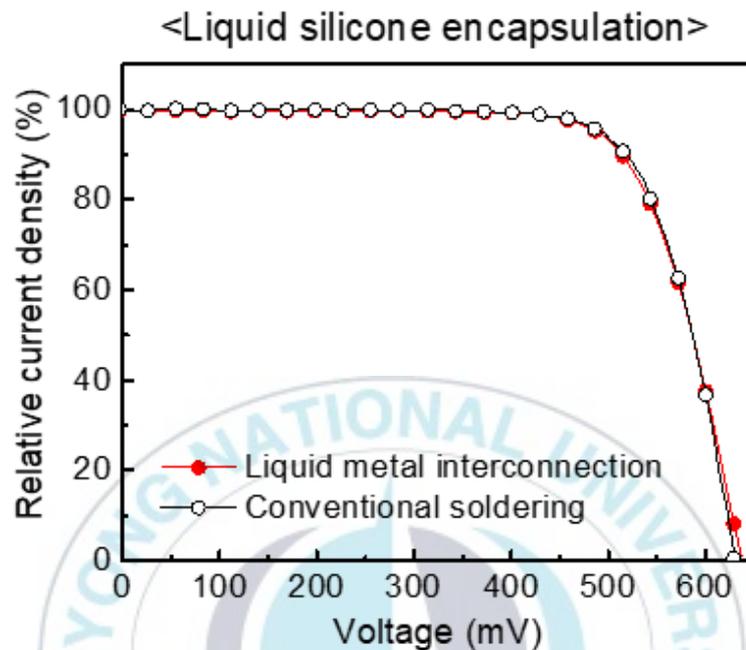


Figure 28. Comparison of the best unit module efficiencies using liquid silicone encapsulation.

4.2 열 사이클 실험 후 전기적 특성 변화

4.2.1 EVA 합착 단위 모듈 효율변화

갈린스탄 페이스트를 사용하여 제작한 단위모듈의 열안정성을 확인하기 위해 열 사이클 실험을 100 사이클 진행 후 효율을 비교해보았다. 솔더링으로 인터커넥션한 단위모듈의 평균효율은 17.46%로 0.06%p 떨어진 반면, 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션한 샘플의 효율은 평균이 16.95%로 환경테스트 이전 대비 0.5%p 떨어진 것을 확인하였다. 효율 저하의 원인을 분석하기 위해 열 사이클 테스트 전 후 파라미터들을 비교 하였다. Figure 29 에 나와있는 바와 같이 개방전압(V_{oc})과 단락전류(I_{sc})는 솔더링 샘플과 비교

하였을 때 크게 하락하지 않았지만, 직렬저항(R_s)은 대폭 증가한 것을 볼 수 있다. 또한 직렬저항(R_s)이 증가함에 따라 충진율(FF)이 대폭 감소하였다.

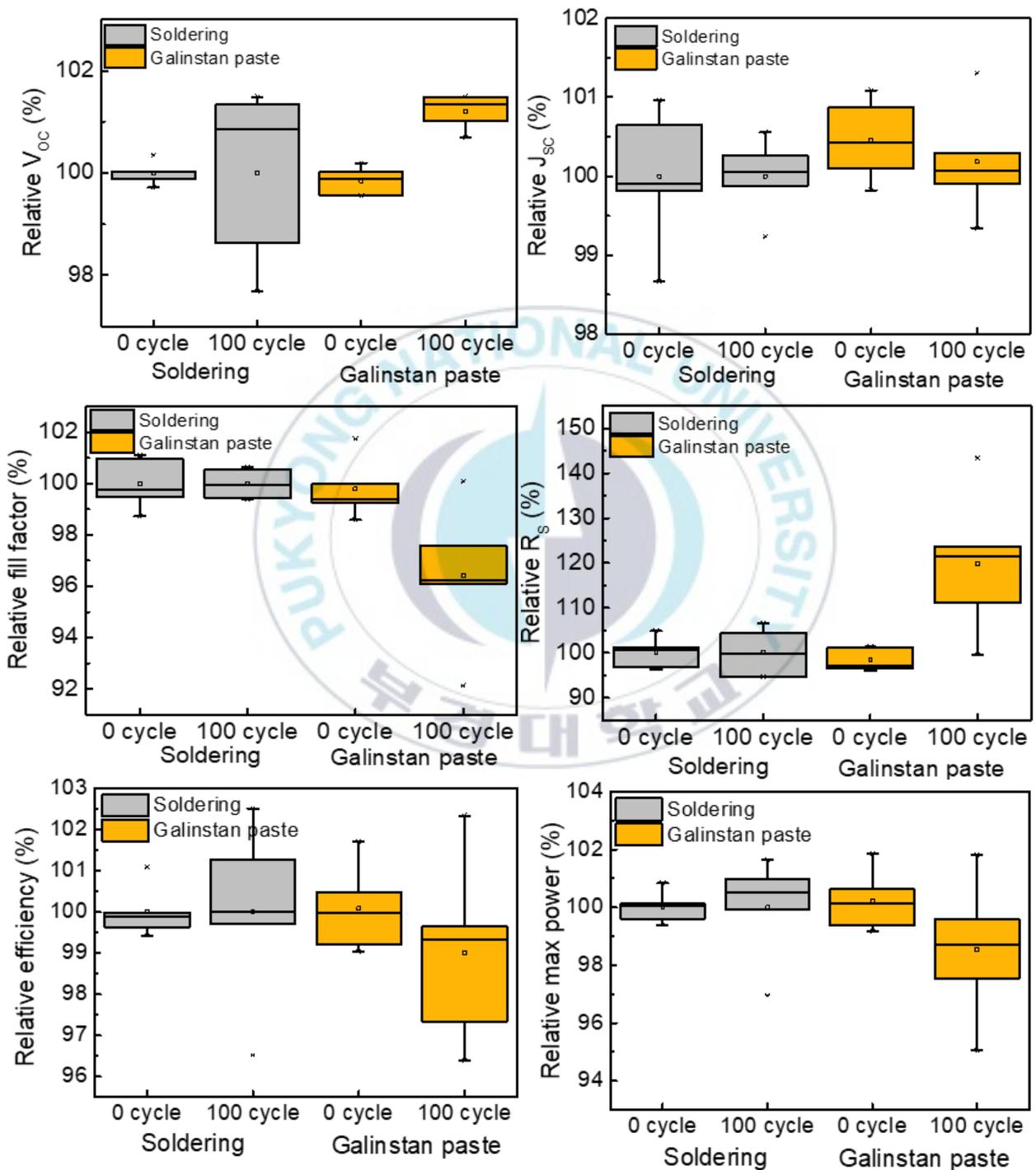


Figure 29. Parameters of EVA encapsulation unit modules after 100 thermal cycle test

4.2.2 액상실리콘 합착 단위 모듈 효율변화

갈린스탄 페이스트로 인터커넥션 후 액상실리콘을 이용하여 합착한 단위 모듈의 경우, 열 사이클 실험을 100 사이클 진행 후 효율이 급격히 감소하였다. 기존 고온 솔더링 방식을 이용하여 인터커넥션한 단위 모듈의 평균효율은 18.29% 에서 17.70%로 대략 0.6%p 감소한 반면, 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션한 단위 모듈은 평균효율은 17.25% 에서 7.98%로 대략 9.3%p 대폭 감소하였다.

Figure 30 은 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션 후 액상실리콘으로 합착한 샘플들 중 최대 효율을 가졌던 단위 모듈의 열 사이클 전, 후 전압-전류 곡선을 비교한 그래프이다. 그래프에서 개방전압(V_{oc})값은 일정한 반면, 단락전류(I_{sc})는 대폭 감소한것으로 보아 직렬저항(R_s)이 과도하게 증가함에 따라 효율이 감소한것으로 판단된다. Figure 31 은 열 사이클 전, 후 파라미터를 비교한 데이터 이다.

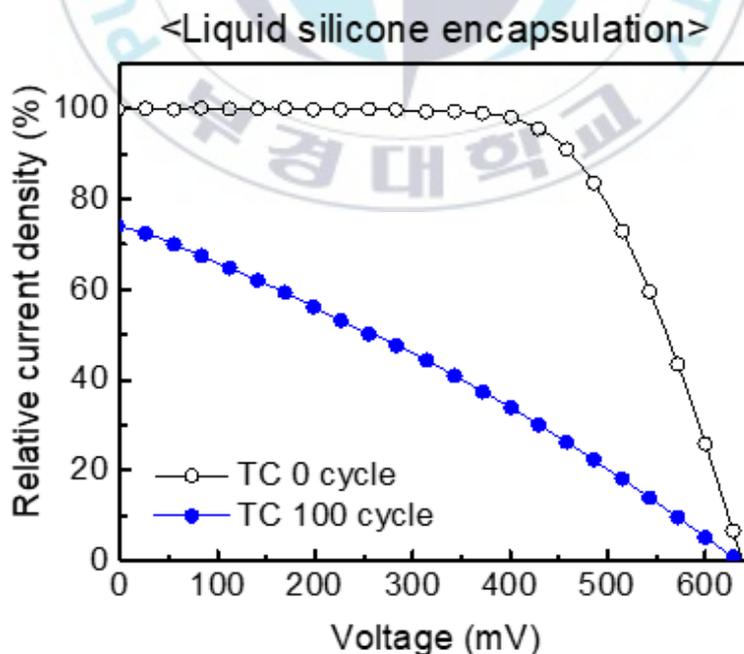


Figure 30. Comparison of the liquid silicone used unit module efficiency before and after thermal cycling

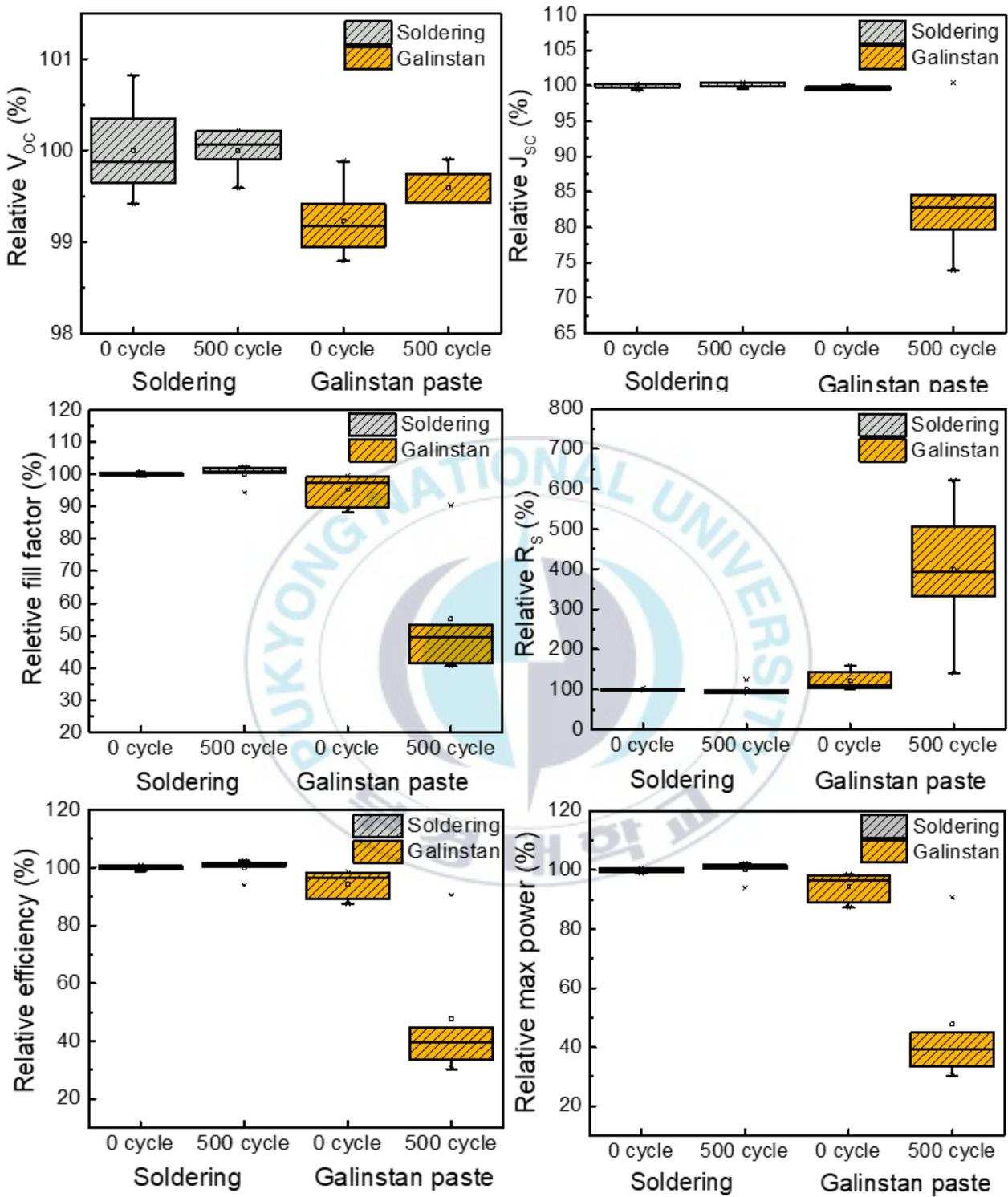


Figure 31. Parameters of liquid silicone encapsulation unit modules after 100 thermal cycle test

5. 효율 저하 원인 분석

5.1 갈린스탄 확산에 의한 전극 부식 여부 확인

갈린스탄 성분들 중 하나인 갈륨은 알루미늄 금속 격자로 빠르게 확산되기 때문에 알루미늄을 단시간에 용해시켜 취성이 높아지고 부식을 발생시킨다. 따라서, 갈린스탄 확산으로 인한 알루미늄 전극의 부식여부를 확인하기 위해, 후면 실버 버스전극 위에 갈린스탄 페이스트를 도포 하여 기계적 소결을 진행 한 후 100℃에서 500시간 동안 열처리 하였다. 열처리 완료된 후면 실버 버스전극 과 알루미늄 전극의 경계 면을 Figure 32 과 같이 EDS 분석 진행한 결과, 알루미늄 전극에서 0 wt%에 근접한 함량으로 갈륨 인듐 주석이 발견되었으며, 갈린스탄을 일체 사용 하지 않은 알루미늄 전극과 동일 한 수준으로 발견되었기 때문에 노이즈로 판단 된다.

고온에서 장시간 열처리를 진행 하였음에도 불구하고 갈린스탄 확산으로 인한 알루미늄 전극의 부식은 진행되지 않음을 확인하였다. 따라서 갈린스탄 페이스트로 인터커넥션한 단위모듈의 직렬저항(R_s) 증가는 알루미늄 전극의 부식이 원인이 아님을 증명하였다.

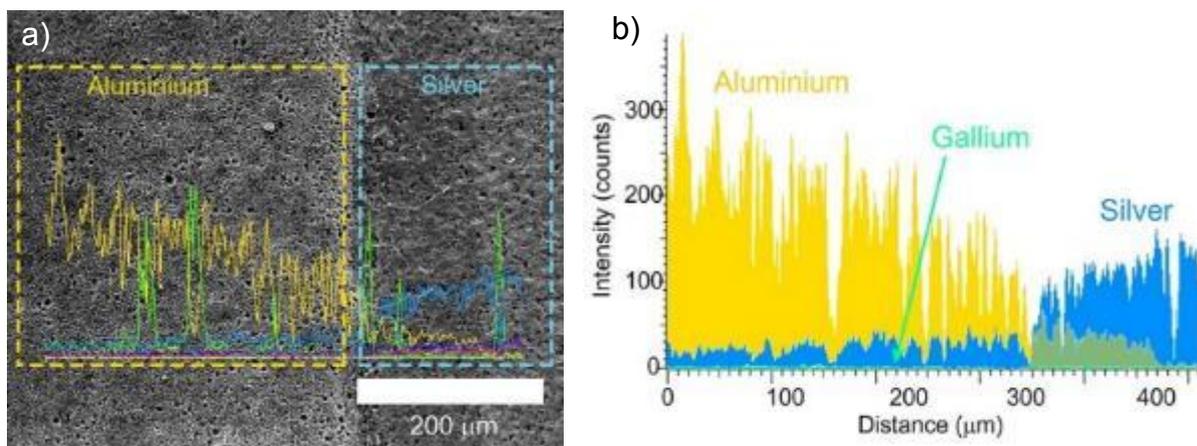


Figure 32. a) SEM image and b) EDS analysis of the rear silver and aluminum electrode boundaries

5.2 갈린스탄 확산에 의한 금속 간 화합물 형성

선행 연구에 따르면 고온 솔더링 공정 시 메탈 리본의 솔더가 녹으면서 구리 혹은 실버 버스 전극과 반응하여 금속 간 화합물(Intermetallic compounds)이 생성 된다.⁽³⁴⁾ 구리 코어와 솔더 계면 사이에서는 Cu_6Sn_5 과 Cu_3Sn 층이 형성되고, 솔더와 실버 버스 전극 계면에서는 Ag_3Sn 층 이 형성된다. 특히, 솔더와 실버 버스전극 계면에서 더 두꺼운 금속 간 화합물이 형성되는데, 이는 다공성의 실버 전극으로 주석(Sn) 성분이 더 많이 확산 되기 때문이다. Ag_3Sn 금속 간 화합물은 취성이 약할 뿐 아니라 Table 4 와 같이 비저항이 높기 때문에 태양전지 모듈의 전기적 특성을 저하 시키는 원인이 된다.

Table 4. Bulk resistivities of the alloyed forms of silver, indium and tin

Solder alloy	Melting point(Ω) (solidus/liquidus)	Bulk resistivity($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
Sn96.5Ag3.5	221 / 221	12.3
Sn95Ag05	221 / 240	13.7
In50Sn50	118 / 125	14.7
In97Ag03	143 / 143	7.5
In90Ag10	143 / 237	7.8
Sn77.2In20Ag2.8	175 / 187	17.6
In	157 / 157	8.37
Sn	232 / 232	12.4
Ag	960 / 960	1.63

갈린스탄 또한 주석(Sn) 성분이 포함되어 있기 때문에 금속 간 화합물 형성 여부를 확인하기 위해 실버 버스 전극 위에 갈린스탄을 도포 후 100°C 에서 100 시간 동안 열처리하였다.

Figure 33 와 같이 실버 버스 전극을 Ion milling 하여 단면을 elementary mapping 한 결과, 주석(Sn) 과 인듐(In) 이 버스 전극 단면에 전반적으로 발견 되었다. 따라서, 갈린스탄의 Sn 성분의 확산으로 형성된 금속 간 화합물로 인하여 직렬저항(R_s)이 증가 하였으며 효율 저하의 원인으로 판단된다.

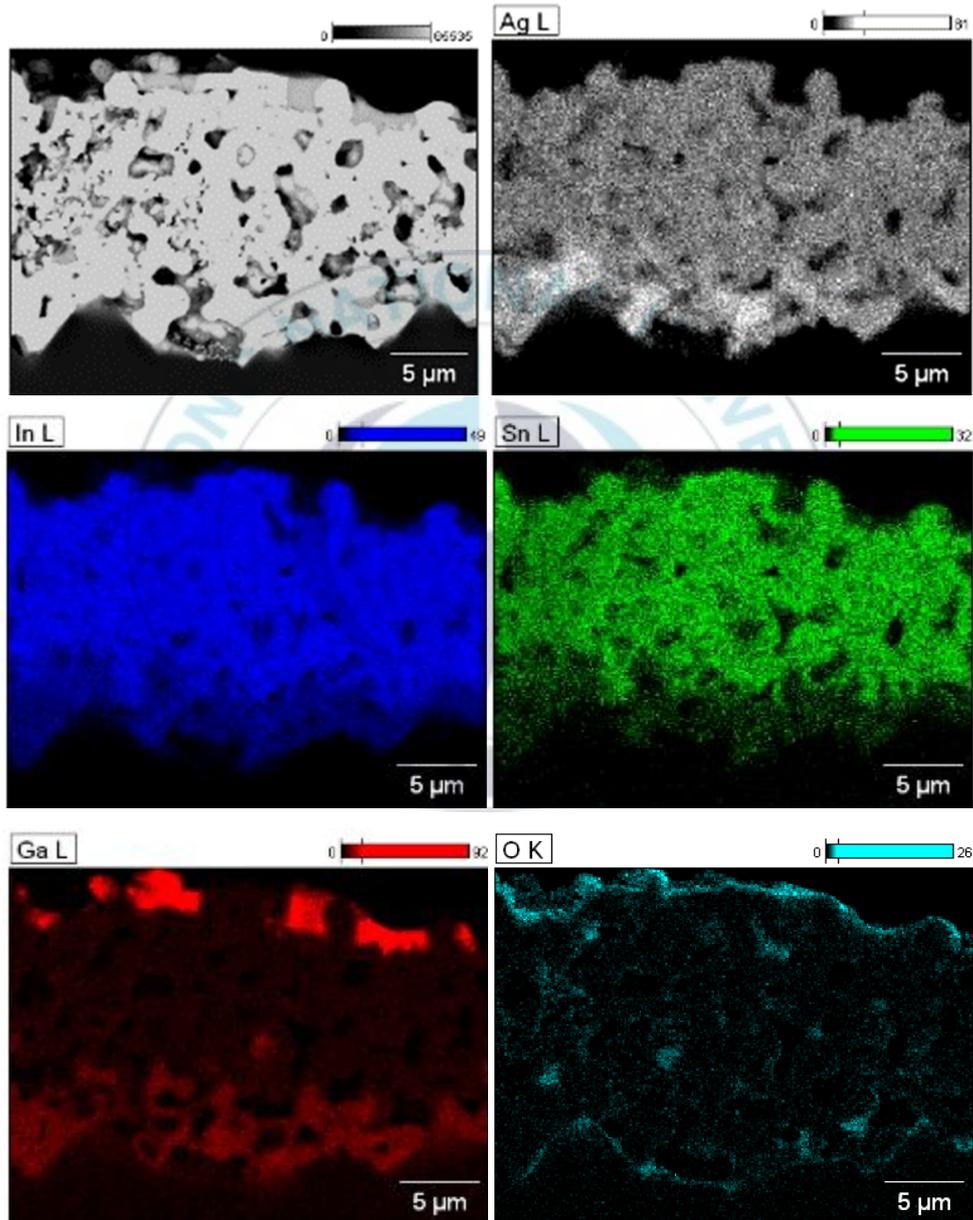


Figure 33. SEM and elementary mapping image of cross-sectioned Ag busbar

5.3 액상실리콘 접합문제

액상실리콘은 유리 및 태양전지와와의 접합력은 우수하지만, 백시트와의 접합력은 EVA와 비교하였을 때 많이 미흡하다. Figure 34 는 100 열사이클 진행 후 백시트와 액상실리콘의 접합 불량 이미지 이다. Figure 34 a)와 같이 모서리 부분에서 주로 박리가 시작되며, 많은 힘을 가하지 않아도 손쉽게 분리가 가능할 정도로 접합이 미흡하다. 또한 Figure 34 b) 와 같이 외력이 가해지는 버스리본 부분에 들뜸 현상이 많이 발생한다.

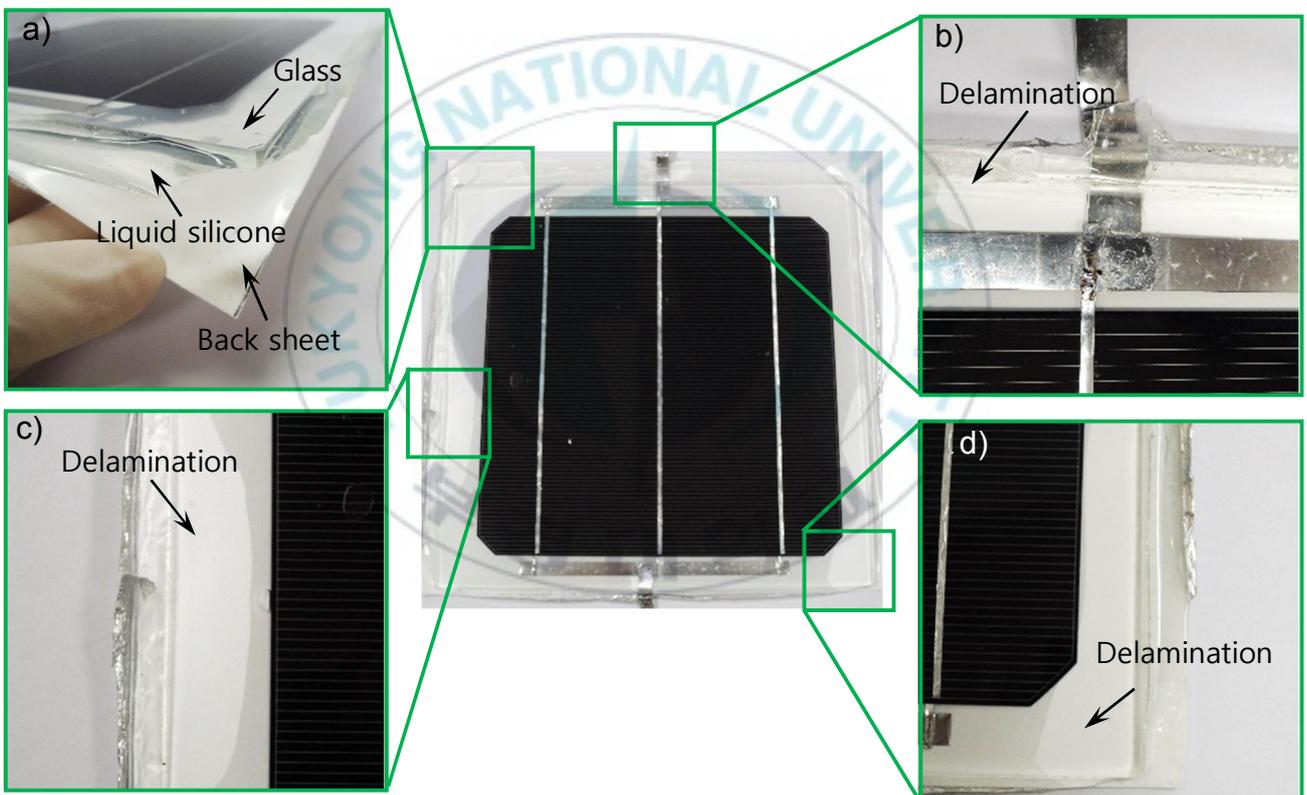


Figure 34. Poor bonding problems between back sheet and liquid silicone

특히 갈린스탄 페이스트는 버스전극과 메탈리본을 물리적으로 접합시키는 접합제가 별도로 포함되어 있지 않기 때문에 봉지재로 접합력을 부여시킨다. 메탈리본과 버스전극

사이의 접합이 잘 이루어지지 않을 경우 접합 부가 들뜨면서 Figure 35 d)와 같이 갈린스탄의 접합 면적이 줄어들게 되고 저항이 증가하게 된다. 따라서 갈린스탄으로 인터커넥션 후 액상실리콘으로 합착한 단위모듈은 접합이 원활히 이루어지지 않아 메탈리본과 버스전극 사이 간극이 발생하여 시리즈 저항이 크게 증가한 것으로 판단하고 있다.

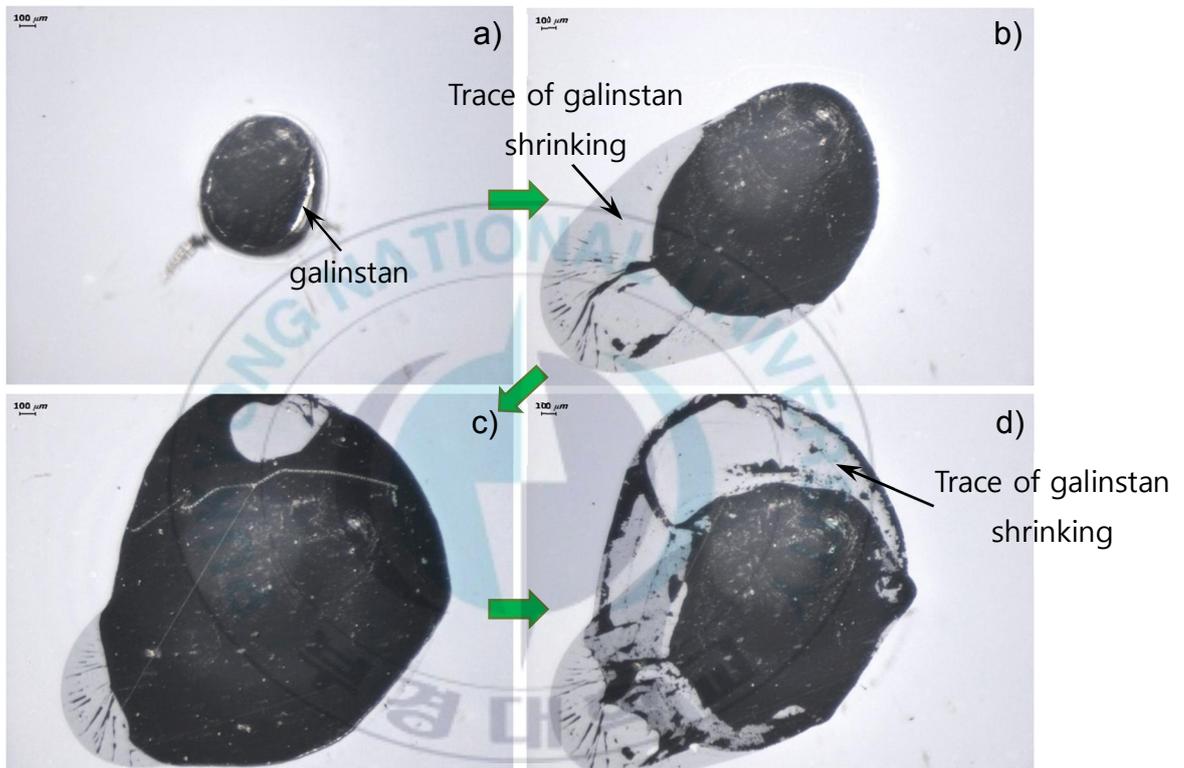


Figure 35. Spreading and shrinking of galinstan droplets along with applied pressure
a) before applying pressure b), c) apply pressure d) after pressure removed

IV. 결론

태양전지 셀의 두께가 점차 감소함에 따라 모듈 인터커넥션 공정 시 많은 파손을 야기할 것으로 예상하였고, 본 연구에서는 갈린스탄을 새로운 인터커넥션 소재로 제시하여 파손 및 전력손실을 최소화할 수 있는 모듈 제작 방법에 대해 연구하였다.

갈린스탄은 금속이면서 액체상태이기 때문에 높은 전도도를 가지는 동시에 변형이나 스트레스에 자유롭다. 그러나 갈린스탄은 높은 표면장력으로 인하여 균일하게 도포가 어려우며 버스전극을 잘 적시지 않는다. 따라서 항복응력을 가지는 캐리어비이클과 함께 교반시켜 균일하게 도포가 가능한 페이스트 형태로 제조하였고, 버스전극과 메탈리본을 인터커넥션 시키는데 성공하였다.

갈린스탄 페이스트를 이용하여 상온에서 인터커넥션 후 EVA 합착 단위모듈을 기존 고온 솔더링 방법으로 인터커넥션한 단위모듈과 비교하였을 때, 초기 효율 및 출력은 유의미한 차이가 없었다. 하지만 열안정성 테스트를 위하여 열 사이클 실험을 100 cycle 진행한 후에는 직렬저항(R_s) 증가로 인하여 충전률(fillfactor)이 감소하게 되었고 최종적으로 효율이 0.5%p 감소하였다. 직렬저항(R_s) 증가 원인으로는 갈린스탄의 주석(Sn) 인듐(In) 성분 확산으로 인한 금속간화합물 형성으로 판단된다. 금속간화합물 Ag_3Sn 및 Ag_3In 의 비저항 값은 순수 Ag 보다 거의 10 배 가까이 높기 때문에 전기적 특성이 저하된다.

갈린스탄 페이스트를 사용하여 인터커넥션한 모듈의 장기 안전성에 대한 문제를 아직 완전히 해결하지는 못하였지만 Graphene 과 같은 전도성 고분자 물질을 배리어층으로 형성하여 갈린스탄 확산을 방지할 수 있을 것으로 예상하고 있으며³⁵, 미래의 박형 실리콘 태양전지 모듈 인터커넥션 방법의 대안을 제공한다.

참고문헌

-
- ¹ Amrani, A., Mahrane, A., Moussa, F. Y., & Boukennous, Y. (2007). Solar module fabrication. *International Journal of Photoenergy*, 2007.
- ² Zemen, Y., Schulz, S. C., Trommler, H., Buschhorn, S. T., Bauhofer, W., & 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.
- ³ 노태정, 김선진, & 박민용. (2013). 적외선 램프를 이용한 비접촉식 태양전지셀 솔더링 장치 개발에 관한 연구. *한국산학기술학회 논문지*, 14(1), 45–50.
- ⁴ Lin, K. M., Lee, Y. H., Huang, W. Y., Chen, G. T., Kuo, Y. W., Wang, L. K., & Yang, S. Y. (2015). Detection of soldering induced damages on crystalline silicon solar modules fabricated by hot-air soldering method. *Renewable Energy*, 83, 749–758.
- ⁵ Wirth, H. (2010). Lasers in Wafer based PV Module Production. *Laser Technik Journal*, 7(4), 36–38.
- ⁶ Zarmai, M. T., Ekere, N. N., Oduoza, C. F., & Amalu, E. H. (2015). A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module assembly. *Applied energy*, 154, 173–182.
- ⁷ Zemen, Y., Prewitz, T., Geipel, T., Pingel, S., & Berghold, J. (2010, September). The impact of yield strength of the interconnector on the internal stress of the solar cell within a module. In *5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (pp. 4073–4078).
- ⁸ . Gabor, A. M., Ralli, M., Montminy, S., Alegria, L., Bordonaro, C., Woods, J., ... & Williams, T. (2006, September). Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules. In *21st European Photovoltaic Solar Energy*

Conference, Dresden, Germany, September (pp. 4–8).

⁹ Bennett, I. J., De Jong, P. C., Kloos, M. J. H., Stam, C. N. J., Henckens, A., Schuermans, J., ... & Schmidt, H. (2007). Low-stress interconnection of solar cells. *22nd EUPVSEC Milan*

¹⁰ 강민구, 최선호, 장보윤, 강기환, 이정인, & 송희은. (2016). 박형 결정질 실리콘 태양전지 기술 동향. *한국태양광발전학회지*, 2(1), 6–17.

¹¹ Solder Alloys: Physical and Mechanical Properties, (http://alasir.com/reference/solder_alloys/), last accessed on the 5th of January, 2018.

¹² SEMI PV Group, International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV.net), Results 2017, (<http://www.itrpv.net>), last accessed on the 17th August 2018.

¹³ Shin, D. Y., Chung, H. W., Song, H. J., Lee, J. I., Kim, K. H., & Kang, G. H. (2018). Thermomechanical-stress-free interconnection of solar cells using a liquid metal. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180, 10–18.

¹⁴ Choi, M. C., Kim, Y., & Ha, C. S. (2008). Polymers for flexible displays: From material selection to device applications. *Progress in Polymer Science*, 33(6), 581–630.

¹⁵ Logothetidis, S. (2008). Flexible organic electronic devices: materials, process and applications. *Materials Science and Engineering: B*, 152(1–3), 96–104.

¹⁶ Zardetto, V., Brown, T. M., Reale, A., & Di Carlo, A. (2011). Substrates for flexible electronics: A practical investigation on the electrical, film flexibility, optical, temperature, and solvent resistance properties. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 49(9), 638–648.

¹⁷ Lewis, J. (2006). Material challenge for flexible organic devices. *Materials today*, 9(4), 38–45.

¹⁸ Li, G., Wu, X., & Lee, D. W. (2015). Selectively plated stretchable liquid metal wires for transparent electronics. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 1114–1119.

¹⁹ Ota, H., Chen, K., Lin, Y., Kiriya, D., Shiraki, H., Yu, Z., ... & Javey, A. (2014). Highly deformable liquid–state heterojunction sensors. *Nature communications*, 5, 5032.

²⁰ Nawaz, A. A., Mao, X., Stratton, Z. S., & Huang, T. J. (2013). Unconventional microfluidics: expanding the discipline. *Lab on a Chip*, 13(8), 1457–1463.

²¹ Jeong, J. S., Park, N., & Han, C. (2012). Field failure mechanism study of solder interconnection for crystalline silicon photovoltaic module. *Microelectronics Reliability*, 52(9–10), 2326–2330.

²² Liu, T., Sen, P., & Kim, C. J. (2012). Characterization of nontoxic liquid–metal alloy galinstan for applications in microdevices. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21(2), 443–450.

²³ Kempe, M. D., Jorgensen, G. J., Terwilliger, K. M., McMahon, T. J., Kennedy, C. E., & Borek, T. T. (2007). Acetic acid production and glass transition concerns with ethylene–vinyl acetate used in photovoltaic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(4), 315–329.

²⁴ Ketola, B., McIntosh, K. R., Norris, A., & Tomalia, M. K. (2008). Silicones for photovoltaic encapsulation. *Proc 23rd EU PVSEC, Valencia, Spain*, 2969–2973.

^{2 5} Photovoltaic Education Network, (<http://www.pveducation.org/pvcdrom>), last accessed on the 13th February 2017

^{2 6} Dickey, M. D. (2014). Emerging applications of liquid metals featuring surface oxides. *ACS applied materials & interfaces*, 6(21), 18369–18379.

^{2 7} McKennell, R. (1956). Cone–plate viscometer. *Analytical Chemistry*, 28(11), 1710–1714.

^{2 8} Slattery, J. C. (1961). Analysis of the cone–plate viscometer. *Journal of Colloid Science*, 16(4), 431–437.

^{2 9} Boley, J. W., White, E. L., & Kramer, R. K. (2015). Mechanically sintered gallium–indium nanoparticles. *Advanced Materials*, 27(14), 2355–2360.

^{3 0} Lin, Y., Cooper, C., Wang, M., Adams, J. J., Genzer, J., & Dickey, M. D. (2015). Handwritten, soft circuit boards and antennas using liquid metal nanoparticles. *Small*, 11(48), 6397–6403.

^{3 1} Fuyuki, T., Kondo, H., Yamazaki, T., Takahashi, Y., & Uraoka, Y. (2005). Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence. *Applied Physics Letters*, 86(26), 262108.

^{3 2} Haunschild, J., Glatthaar, M., Kasemann, M., Rein, S., & Weber, E. R. (2009). Fast series resistance imaging for silicon solar cells using electroluminescence. *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 3(7–8), 227–229.

^{3 3} Breitenstein, O., Bauer, J., Trupke, T., & Bardos, R. A. (2008). On the detection of shunts in silicon solar cells by photo and electroluminescence imaging. *Progress in Photovoltaics: research and Applications*, 16(4), 325–330.

^{3 4} Yang, T. L., Huang, K. Y., Yang, S., Hsieh, H. H., & Kao, C. R. (2014). Growth kinetics of Ag₃Sn in silicon solar cells with a sintered Ag metallization layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 123,

^{3 5} Ahlberg, P., Jeong, S. H., Jiao, M., Wu, Z., Jansson, U., Zhang, S. L., & Zhang, Z. B. (2014). Graphene as a diffusion barrier in galinstan–solid metal contacts. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 61(8), 2996–3000.

