

저가형 실리콘 태양전지의 소재기술 개발

글 _ 장보윤, 김준수, 안영수
한국에너지기술연구원

1. 서론

화석연료 고갈에 대한 우려와 이산화탄소와 같은 연료 소모에 따른 환경오염 문제로 인해, 태양 에너지 같은 신재생 에너지에 대한 관심이 날로 증가하고 있다. 그린 에너지라고도 불리는 신재생 에너지는 태양, 풍력, 수소, 바이오, 수력 등의 에너지를 의미한다. 이와 같은 다양한 신재생 에너지원들 중에서도 태양에너지는 그 잠재력이 가장 높다고 할 수 있다. 에너지 잠재량의 관점에서 볼 때, 태양 표면의 복사에너지가 3.8×10^{23} kW에 달하며, 이 중 지구 지표면까지 도달하는 에너지가 1.25×10^{14} kW로

전 세계 에너지 소비량의 만 배에 해당하는 양이며, 화석 연료의 1,000배의 사용량에 해당한다. 이와 같은 태양 에너지를 효과적으로 사용하기 위한 핵심 기술은 바로 높은 광전변환효율을 갖는 태양전지를 개발하는 것이다.

1954년, 6% 셀 효율을 갖는 실리콘 태양전지가 미국 Bell Lab.에서 최초로 소개된 이후, 다양한 소재와 방식을 갖는 태양전지들이 개발되어 왔다. 이러한 개발의 결과로, 현재는 실리콘 이외에도 화합물 반도체, 염료 및 유기물 등을 이용한 신개념의 태양전지가 개발되고 있다. Fig. 1은 현재 개발되고 있는 태양전지의 종류를 정리한 것이다. 이 중에서도, 반도체 박막형성기술이 급격

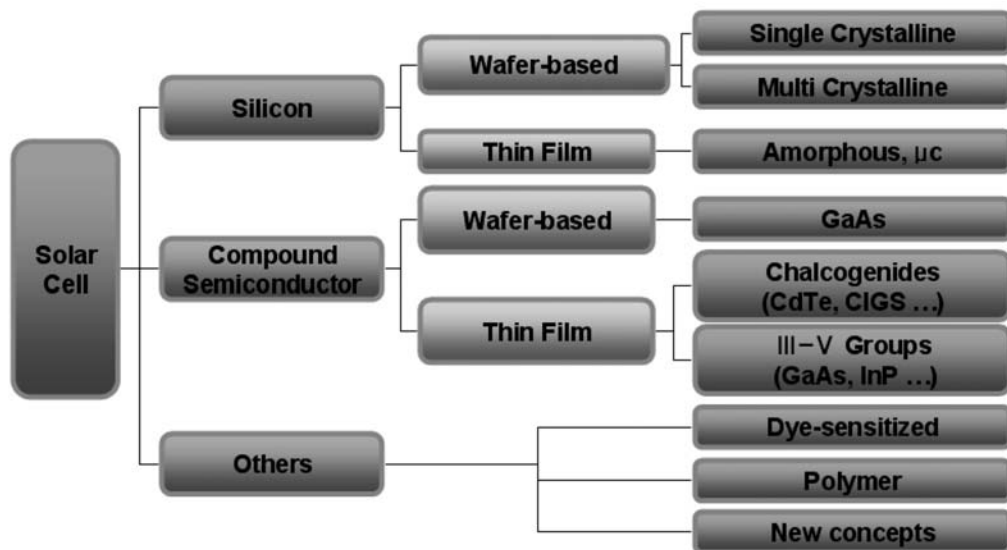


Fig. 1. 태양전지의 종류.

히 발전하면서, 이와 관련된 박막형 태양전지가 급격하게 성장하고 있다. 하지만, 아직까진 박막형이 아닌 웨이퍼 형태의 실리콘 태양전지가 세계 태양전지 시장의 약 80% 이상을 차지하고 있다. 실리콘 소재가 태양전지의 대부분을 차지하는 이유로는, 실리콘은 지구상에 산소 다음으로 풍부한 매장량을 나타내고 있으며, 다른 재료와는 달리 환경 친화적이라는 점에서 강점을 가지고 있기 때문이다.

실리콘을 중심으로 태양광 시장은 비약적으로 성장하여, 최근 몇 년 동안에는 연 평균 30% 이상의 경이로운 성장률을 보이고 있다. 하지만, 이러한 태양광 시장의 비약적인 성장에도 불구하고, 타 신재생에너지원에 비해 높은 발전단가와 초기 투자비가 산업화의 걸림돌이 되고 있는 실정이다. 태양광의 발전단가는 대략 25 ~ 40 cent/kWh 정도로, 기존 화석연료인 석유와 비교해 보면 4 ~ 5 배, 원자력에 비하면 10 배 이상이다. 또한, 태양광 발전을 위한 초기 투자비는 \$4,500 ~ \$7,000 /W로 타 신재생 에너지에 비해 평균 4배 이상 높은 것으로 알려져 있다. 이와 같은 높은 비용은 태양광산업의 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있으며, 이를 해결하기 위해서는 발전단가 절감기술이 필수적이다. 이는 결국 태양전지의 제조 단가를 절감하는데 그 핵심이 있다고 하겠다.

실리콘의 제조단가 절감을 위한 접근방식은 두 가지 방법으로 진행 중이다. 첫째는 태양광 에너지로부터 전기 에너지를 변환하는 변환효율을 향상시키는 방법이고, 두 번째는 태양전지 소재 및 제조공정의 단가를 절감하

는 것이다. 이 중에서, 변환효율 향상 기술은 표면 텍스처링에 의한 반사저감 등 다양한 기술개발로 지속적으로 향상되고 있다. 반면, 실리콘 소재의 경우, 반 세기 전에 개발된 기술이 현재에도 사용되고 있다. Fig. 2는 실리콘 태양전지의 모듈기준 제조단가 구성비를 나타낸 것이다. 물론, 제조방식과 생산 규모에 따라 그 비는 일부 바뀔 수 있다. 하지만, 일반적으로, 모듈 제조단가의 약 50%가 태양광급 실리콘과 이를 이용한 웨이퍼가 차지하고 있다. 특히, 실리콘 웨이퍼의 경우 제조단가의 1/3을 차지하고 있어 저가화가 절실한 기술이라 할 수 있다. 결론적으로, 실리콘 태양전지의 저가화를 위해서는 실리콘 소재의 저가화가 필수적이라 할 수 있다.

2. 실리콘 소재의 저가화 기술

실리콘 소재의 저가화는 다시 태양광급 폴리 실리콘의 저가화 기술과 실리콘 웨이퍼의 저가화 기술로 나눌 수 있다. 또한, 이러한 두 소재의 저가화 전략은 다음 Fig. 3과 같이 정리될 수 있겠다. 우선, 폴리실리콘의 저가화는 다시 세 가지 접근 방식으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 기존 기술의 효율 향상이며, 두 번째는 기존 기술의 단점을 보완할 수 있는 기존기술의 변형 기술, 그리고 마지막으로 신기술 개발방식이다. 지멘스법이라 불리는 폴리실리콘 제조 기술은 이미 50년의 역사를 가지고 있어, 그 효율향상은 거의 한계에 도달해 있다고 할 수 있다. 최근 이 기술의 이슈는 제품의 순도를 낮추면서 그 양산성을

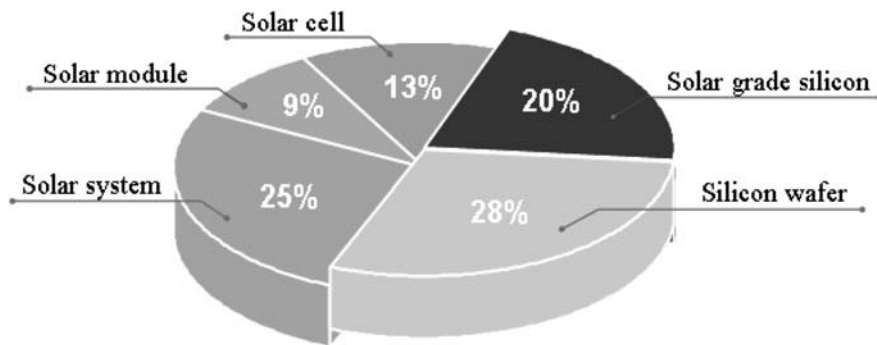


Fig. 2. 실리콘 태양전지 제조단가 구성비.

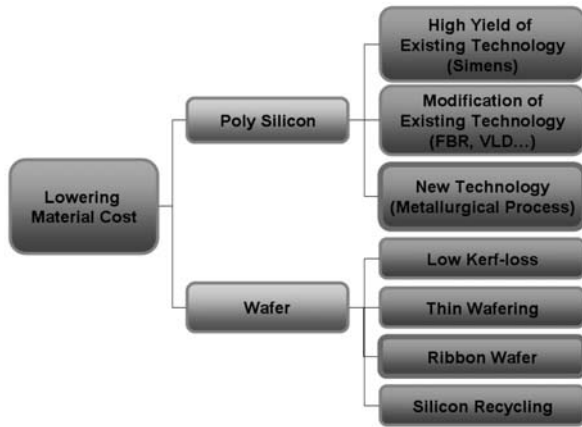


Fig. 3. 실리콘 태양전지 소재의 저가화 전략.

극대화하려는 공정개발에 있다. 하지만, 이러한 양산성 향상기술은 기존 메이저 제조업체를 중심으로 진행되고 있어, 제조기술개발의 성격 보다는 양산기술개발에 가깝다고 할 수 있다. 그 외에 유럽과 같은 태양광선진국들에서는 이미 20년 전부터 기존 기술의 변형기술이나 신기술에 대한 엄청난 연구를 진행해 왔다. 기존 기술의 변형기술이란 좀 더 구체적으로, 지멘스법과 같이 실란계 화합물의 기상반응법을 이용하되, 지멘스의 낮은 제조수율을 높이기 위한 기술로써 유동층법을 이용하는 Fludized Bed Reactor(FBR)법이나 일본 도쿠야마사의 Vapor to Liquid Deposition(VLD)법이 대표적이다. 기존의 기상반응법이 아닌 신기술로서, 고상반응법인 금속정련을 이용한 폴리실리콘 제조기술이 있다. 2000년대 중반 폴리실리콘 가격의 급격한 상승으로 인해 전 세계적으로 주목받았던, UMG(Upgraded Metallurgical Grade) 실리콘이 그 대표적인 예라 하겠다. 하지만, 이 UMG 실리콘은 기존 기상반응법에 비해 최대 60%의 단가절감이 가능한 것으로 알려져 있으나, 그 순도가 4N에서 5N 정도로 알려져 있어 태양전지 적용에 한계가 있다.

실리콘 소재의 두 번째 저가화 기술분야로, 실리콘 태양전지의 제조단가의 28% 정도를 차지하고 있는 웨이퍼의 저가화 기술 개발이 있겠다. 우선, 이러한 실리콘 웨이퍼의 제조단가가 높은 이유를 먼저 정리해야 할 것이다. 현재 사용되는 실리콘 웨이퍼의 대부분은 실리콘 잉곳을 초크랄스키법 또는 브릿지만법 등을 이용하여 성장

한 후, 이 잉곳을 얇은 웨이퍼 형태로 잘라서 사용하고 있다. 이 때, 웨이퍼로 자르는 공정은 다이아몬드 쏘(Saw)를 이용한 물리적 절단방식이다. 따라서, 이러한 절단 공정에서는 원료손실이 발생하게 된다. 이 공정에 사용되는 와이어 타입의 다이아몬드 쏘의 직경이 보통 150 um 정도 이니, 200um 두께의 웨이퍼 한 장을 절단하기 위해서는 최소 150 um 두께의 실리콘 원료손실이 발생한다는 것이다. 이러한 절단 중 발생하는 실리콘 원료 손실을 kerf-loss라 불리며, 최소 40%에서 50% 정도의 kerf-loss가 웨이퍼 제조 중 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 절단손실에 의해 웨이퍼의 제조단가가 급격하게 상승하는 것이다. 따라서, 이러한 kerf-loss를 낮추기 위한 기술개발이 기존 기술분야에서 그 주류를 이루고 있다. 이를 위한 구체적 기술로는 다이아몬드 와이어 쏘의 직경을 지속적으로 감소시키면서, 공정의 안정성을 확보하는 것이다. 하지만, 절단방식 자체를 바꾸지 않는 한 이러한 절단손실의 한계는 극복하기 어려울 것이다. 이러한 절단 손실을 극복하기 위해 기존 잉곳 성장방식은 동일하게 유지하면서, 절단을 위해 이온 빔 등을 이용하는 기존 기술의 변형기술이 유럽을 중심으로 소개되고 있으나 고가의 추가장비가 필요하여 아직까지 그 효용성을 입증하지 못하고 있다. 이 분야에서도 기존 기술의 한계를 break through할 수 있는 신기술이 개발되고 있으며, 가장 대표적인 기술이 리본형 웨이퍼 제조기술이다. 이는 기존 잉곳 성장 및 절단 모두를 제거하고, 실리콘 용탕으로부터 웨이퍼를 바로 제조하는 방식이다. 절단손실을 3% 이내로 줄일 수 있어, 그 효용성은 이미 입증된 상태이다. 또한, 기존 기술로 제조된 실리콘 웨이퍼에 비해 효율면에서도 큰 차이를 보이고 있지 않아 차세대 기술로 주목받고 있다. 다음 장에서는 저가형 실리콘 태양전지 소재 기술 중 위에서 언급한 두 분야의 대표적 신기술들을 소개할 것이다.

3. 실리콘 소재의 저가화를 위한 신기술 1(금속정련법을 이용한 폴리실리콘 제조기술)

태양전지에 사용되는 폴리 실리콘은 최소 6N 이상의

순도만 가져도 된다는 연구결과가 알려지면서, 이러한 순도를 위해 굳이 11N 이상 순도의 실리콘 제조용 기상 반응법을 사용하지 않아도 된다는 생각이 기술개발의 착안점이 되었다. 보통 2N 정도의 저순도 실리콘을 용융하여 실리콘 내부에 존재하는 불순물을 열역학적으로 제거하는 방식을 사용한다. 금속급(Metallurgical Grade) 실리콘이라 불리는 저순도 실리콘 내부에는 다양한 불순물이 존재하지만, 태양전지 적용의 관점에서 일반적으로 금속 불순물과 비금속 불순물로 구분한다. 금속급 실리콘의 제조방식과 그 원료가 되는 규석 또는 규사의 종류에 따라 다르긴 하지만, 대표적인 금속 불순물로는 Al, Ca, Fe, Ti, Mn 등을 들 수 있으며, 비금속 불순물로는 B, P, C, O 등이 있다. 금속 불순물을 제거하기 위해서는 주로 산세와 일방향응고 기술 등이 적용되고 있으며, 비금속 불순물을 제거하기 위해서는 진공정련이나 산화정련 기술 등이 적용되고 있다. UMG 실리콘이라 불리는 실리콘은 산세와 일방향응고정련을 통해 4N ~ 5N 정도의 순도를 나타내는 것으로 알려져 있으나, 공식적으로 확인된 바는 없다. 다음 Fig. 4는 금속정련기술 중 가장 최신 기술로 알려진 전자빔을 이용한 정련공법에 대한 것이다. 그림에서 보이는 것과 같이 고출력의 전자빔을 이용하여 수냉동에서 실리콘을 용융할 경우, 증기압이 상대적으로 높은 Al, Ca, Mn 등의 금속 불순물과 P, O, C의 비금속 불순물들이 제거되며, 마지막으로 하부 방향

으로 잉곳을 성장시켜면서 일방향응고하여 Fe, Al, Ti 등의 대부분의 금속 불순물을 제거한다. 특히, 태양전지 효율에 직접적인 영향을 주는 P의 제거는 매우 중요한데, P 제거를 위한 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다. 전자빔을 이용한 진공정련법은 기존 금속정련법에 비해 상대적으로 높은 제조단가를 보이고 있으나, 금속정련의 한계로 알려진 5N의 순도벽을 극복할 수 있는 차세대 기술이다.

4. 실리콘 소재의 저가화를 위한 신기술 (리본형 실리콘 웨이퍼 제조기술)

폴리실리콘의 저가화 기술과 더불어 웨이퍼의 저가제조기술로는 리본형 웨이퍼 제조기술이 있다. 이미 미국, 유럽에서는 양산화에 성공하여 제품이 전 세계에 판매되기 시작하였으며, 그 효율면에서도 어느 정도 검증이 완료된 상태이다. 리본형 웨이퍼제조기술은 기본적으로 잉곳 성장 및 절단 공정에서 발생하는 원료손실을 근본적으로 제거한다는 점에서 그 효과는 이미 입증되었다. 다만, 기존 실리콘 웨이퍼에 비해 불순물 혼입 등의 품질저하가 문제가 되고 있으나, 지속적인 기술 개발로 대부분 해결되어가고 있다. 하지만, 아직까지 이 기술은 전 세계적으로 시작단계의 기술로 다양한 기술개발여지가 남아 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 5는 실리콘 용탕으로부터 수직으로 성장하는 대표적인 성장기술인 String Ribbon(Evergreen, 미국)과 대표적인 수평 성장방식인 RGS (Ribbon Growth on Substrate, ECN, 네덜란드)의 공정 개념도이다. 수직성장방식은 상대적으로 고품질의 실리콘 웨이퍼를 제조할 수 있으나, 2 ~ 5 cm/min의 낮은 성장속도를 갖는다는 특징이 있다. 현재 판매되고 있는 대부분의 리본형 웨이퍼는 이와 같은 수직성장방식에 의해 제조된 것들이다. 반면, 수평성장법은 하부 기관으로 실리콘의 잠열을 제거하는 방식이므로, 최대 600 cm/min의 높은 성장속도 구현이 가능하다. 하지만, 하부 기관으로 부터의 오염과 급속응고에 의한 불안정한 미세구조 등의 품질 저하 문제가 있다. 따라서, 수직성장방식의 경우 성장속도를 극대화할 수 있는 기술들이 지속적

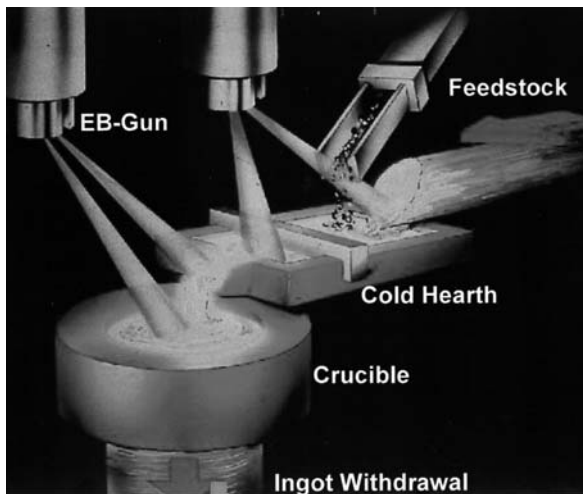


Fig. 4. 전자빔용융법을 이용한 실리콘 금속정련공법의 개념도.

으로 개발되고 있으며, 수평성장방식의 경우 오염방지 및 미세구조제어를 통한 품질향상 기술이 집중적으로 개발되고 있다. 아직까지 기술개발의 여지가 많이 남아있는 블루오션과 같은 분야이므로, 태양광소재의 후발주자인 한국과 같은 국가에서 빠른 독자기술 확보가 필요하겠다. 일본의 경우, 이미 2000년 초반부터 리본 기술에 집중투자한 결과, 2008년 Sharp에서 CDS(Crystallization on Dipped Substrate)라는 독자 기술을 발표하였다.

5. 결론

태양광산업의 발전을 위해 실리콘 태양전지 소재의 저가화 필요성과 저가화를 위한 구체적 기술개발 전략에 대해서 알아보았다. 또한, 이러한 기술 개발 중 기존 기술의 한계를 극복할 수 있는 break through 기술인 금속정

련법을 이용한 폴리실리콘 제조기술과 리본성장법을 이용한 실리콘 웨이퍼제조기술에 대하여 알아보았다. 국내의 대학과 연구기관들에서도 이러한 실리콘 태양전지 소재의 저가화를 위해 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 한국에너지기술연구원에서도 이에 대한 연구를 진행하고 있다. 자체 개발한 200 kW급 전자빔용융장치를 이용하여 현재 2N의 금속급실리콘을 5N 이상으로 순도를 향상하는 기술을 확보한 상태이며, 2010년까지 6N의 순도 향상 기술을 확보할 예정이다. 또한, 독자적인 수평성장방식의 리본형 웨이퍼 제조기술을 개발하여, 기존 성장속도의 최대 2 배인 1,200 cm/min로 실리콘 웨이퍼를 제조할 수 있다. Fig. 6은 한국에너지기술연구원에서 개발한 전자빔용융장치와 이를 이용한 5N의 실리콘 잉곳, 그리고 수평성장방식을 이용한 리본형 웨이퍼의 사진을 나타낸 것이다. 실리콘 태양전지 소재분야의 개발자 중

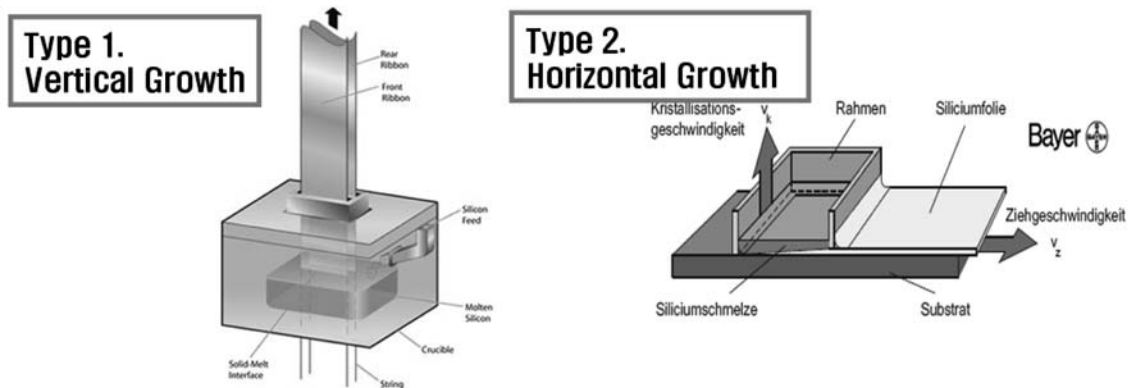


Fig. 5. 수직 및 수평성장방식의 대표적인 공법들의 개념도.

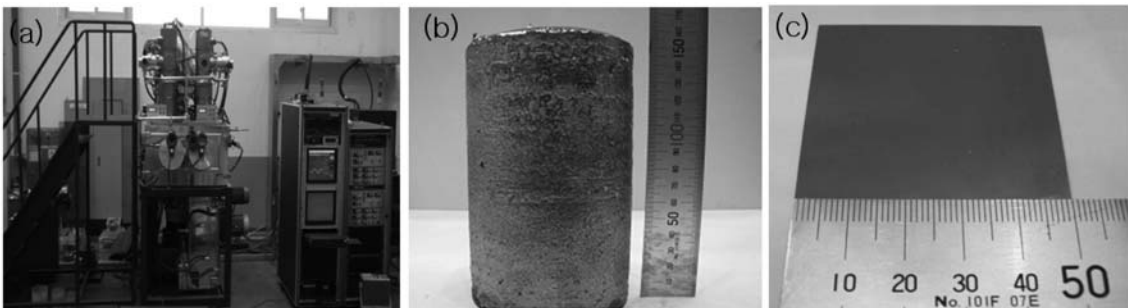


Fig. 6. (a) 전자빔용융장치 및 이를 이용하여 제조된 (b) 5N급 실리콘 잉곳, 그리고 (c) 수평성장방식으로 제조된 리본형 웨이퍼의 사진들.

한 사람으로서, 보다 막중한 책임감을 느끼며 독자기술 확보로 전 세계에 기술 선도국의 위상을 세울 수 있는 그 날까지 보다 열심히 연구개발에 몰두할 것이다.

●● 장보윤



- 고려대학교 재료공학과 공학사
- 고려대학교 공학석사
- 고려대학교 공학박사
- 현재 한국에너지기술연구원 효율소재융합 연구본부 선임연구원

●● 김준수



- 명지대학교 공과대학 요업공학과 학사
- 명지대학교 대학원 무기재료공학과 석사
- 명지대학교 대학원 무기재료공학과 박사
- 현재 한국에너지기술연구원 효율소재융합 연구본부 변환저장소재연구센터 센터장

●● 안영수



- 한양대학교 무기재료공학과 학사
- 한국과학기술원 재료공학 석사
- 충남대학교 재료공학 박사
- 한국에너지기술연구원 에너지신소재연구부장
- 한국에너지기술연구원 미래원천기술연구본부장
- 현재 한국에너지기술연구원 효율소재융합 연구본부 책임연구원