

신재생에너지 산업 I - 태양광 발전 산업

영남대학교 태양에너지연구센터 센터장 정재학 교수

1. 태양광 발전산업의 전망

태양광발전은 무한정, 무공해의 햇빛을 직접 전기로 바꿀 수 있는 첨단 기술이다. 따라서 햇빛이 비치는 곳에서는 어디서나 전기를 얻을 수 있으며, 다른 발전방식과는 달리 대기 오염, 소음, 발열, 진동 등의 공해가 전혀 없는 깨끗한 에너지원이다. 또한 연료의 수송과 발전설비의 유지관리가 거의 불필요하며, 수명이 길고, 설비규모의 선택과 설치공사가 쉬운 장점이 있다. 그러나 태양에너지의 밀도와 태양광발전시스템의 변환효율이 낮아 넓은 설치면적이 필요하고, 발전단가가 상대적으로 높은 단점이 있기 때문에, 태양광발전기술의 궁극적인 실용화를 위해서는 기존발전방식과 경쟁 가능한 가격수준의 저가·고효율 기술개발 및 대량보급이 선행되어야 한다. 이러한 태양광발전기술은 1954년 미국의 Bell Lab에서 단결정 Si를 사용한 태양전지가 개발되어 1958년 인공위성 Vanguard I 호의 보조전원으로 사용됨으로써, 1960년대의 미·소 냉전시대에 우주용 전원으로 실용화되었다. 1970년대에 들어 두 차례 석유파동을 거치면서 석유자원의 제한된 부존양과 지역편중성에 따른 위기를 극복하기 위하여, 석유를 대체할 수 있는 새로운 미래에너지원으로서의 지상용 태양광발전시스템이 선진국을 중심으로 개발되기 시작하였으며, 그 결과 상용전원의 송전이 불가능한 외딴 지역의 전원 또는 휴대용, 군사용 전원 등 특수한 용도의 시장이 형성되었다. 1980년대에는 유가하락에 따른 상대적인 경제성의 열세 때문에 태양광발전의 개발과 보급 열기가 한때 주춤하였으나, 1990년대에 들어서 기후변화협약에 따른 환경문제가 범세계적으로 심각하게 대두됨에 따라 삶의 질을 향상시킬 수 있는 환경 친화적 에너지 기술로서 새롭게 각광을 받게 되었으며, 그 동안 계속된 기술 개발을 통해 저가·고효율 태양전지의 개발과 최근의 급격한 유가의 상승에 따른 상대적 경제성 증가로 태양광발전의 개념이 석유를 대체할 수 있는 미래에너지로 인식 되었으며, 지구 환경을 보전할 대체방안으로 인식이 전환되었다.

2000년 이후 태양광발전이 틈새시장을 거쳐 하나의 산업으로 자리 잡아 가고 있는 단계로써 최근 수년간 시장이 30% 이상의 가파른 규모로 상승하고 있다. 일본을 선두로 유럽과 미국이 뒤따르고 있는 상황이며, 아직까지 정부주도 지원 사업으로 시장이 확대되고 있는 상황이다.

이들 산업이 대부분 다국적 대기업에 의해 선점되어 가고 있고 이에 우리나라도 빠른 대응이 필요하다. 빠르게 발전하는 이 분야의 산업에 화학공학은 매우 깊게 연관되어 있고 또 기술개발 및 공급에 대한 책임도 크게 느껴야 한다고 생각한다.

2. 태양광 발전 산업분야에서의 공정시스템

태양광 발전 산업분야는 첫째 소재산업, 둘째 광전지기판, Cell, Module산업 그리고 셋째 PCS(Power Conversion System) 및 발전소 설계 산업으로 나눌 수 있다. 소재산업은 기관재료로서 Silicon을 비롯한 반도체 재료 및 그 Pre-Cursor 화합물의 제조 산업이며 이 분야는 전통적 화학공학인 반응, 분리시스템 기술이 주를 이루는 산업이다. 광전지기판, Cell, Module 산업은 반도체 소자공정과 흡사한 광전지 Cell제조 산업과 고분자 필름산업 및 조립 Laminating 공정이 주를 이룬다. 이 분야 역시 기존의 화학공학 기술 없이 발전하기 어려운 분야라 하겠다. PCS산업은 태양광으로부터 발전된 전기는 DC Volt로서 이것을 AC Volt로 바꾸고 또 기존의 전력계통선에 송전하는 송전 및 안전설비에 관계한 산업으로

다소 화학공학과 거리감이 있으나, 발전소 최적설계 산업은 화학공학의 공정시스템분야와 밀접한 관계가 있다.

태양전지의 전기발전 원리는 그림 1에서와 같이 태양광의 광자가 광전효과에 의해 반도체의 P-N접합 층에서 전자와 정공쌍이 생성되어 이들이 전력 수집양극으로 끌려 나가 전기를 생성하게 된다. 즉 충분히 작은 Band Gap을 갖는 P-N접합을 이룰 한 쌍의 반도체 물질이 태양전지의 소재라고 할 수 있다. 효율이 높은 Si계열의 태양전지는 그 동안 많은 연구가 있어 왔으며 효율 증가가 더 이상 개선되기 어려운 반면 현재 최고 효율을 나타내고 있어 산업에서 가장 많이 사용화 되었고 그 외의 재료들은 세계적으로 연구가 10년 이내에서 시작된 것들로 우리나라도 이 분야의 연구에 박차를 가하고 있다. 적절한 Band Gap 특성을 갖는 P-N접합 반도체 재료에 따라 아직도 발견되어 있지 않은 여러 가지 반도체 화합물을 새로운 태양전지 소재로 개발이 가능하고 그 종류는 무궁무진할 것이다.

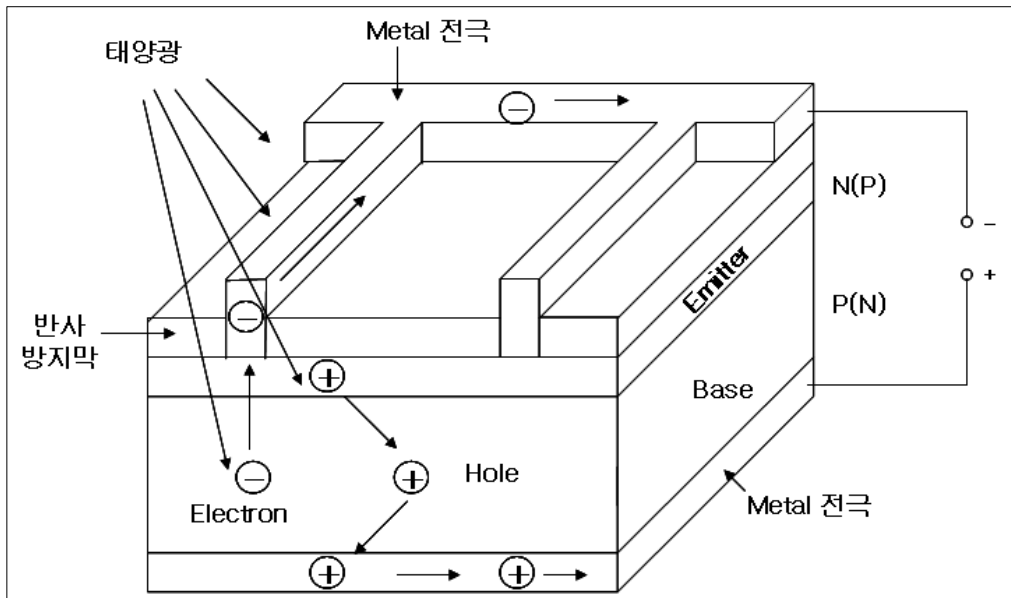
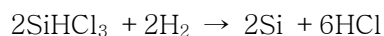
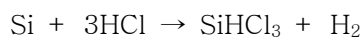
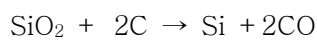


그림 1. 태양전지의 구조와 광발전 원리

2-1. Bulk 실리콘 태양전지를 위한 고순도 Poly-Silicon 산업

실리콘은 가장 흔한 재료이며 가장 잘 알려진 반도체 소재이다. 그렇기 때문에 태양전지도 상용화된 것의 대다수가 실리콘을 소재로 한 것이다. 실리콘을 소재로 하는 태양전지의 경우 모래로부터 고순도 실리콘을 분리해내는 Poly-Silicon 제조가 매우 중요한 산업 중 하나이다. 최근 태양광발전 산업이 크게 증가하면서 전자산업으로만 소요되었던 Poly-Silicon 품귀현상으로 인하여 가격이 폭등하고 있고 현재로서는 국내생산이 전혀 없는 Poly-Silicon의 공급장애로 전자산업마저 크나큰 영향을 받고 있다. Poly-Silicon 정제공정은 크게 용융 환원공정과 실란 Gas의 distillation을 포함한 Siemens Process로 나눌 수 있다. 주된 화학 반응은 다음과 같다.



이러한 반응을 일으키고 불순물을 분리해내기 위해 탄소아크로에 의한 용융환원공정, 금속류 Silica의 정제를 위한 염산처리공정, 고순도 실란 Gas 분리를 위한 증류공정, Poly-Silicon 으로 다시 환원시키기 위한 수소첨가공정으로 나누어 공정이 진행된다. 이 공정들은 모두 전형적인 화학공정으로 공저의 설계 및 최적인전, 공정제어가 반드시 필수적인 공정이다. 국내에서는 아직 산업화하고 있지 않으나 KCC(주)와 동양제철화학이 해외투자를 유치하고 사업을 시작하였다. 약 99%~99.5% 정도의 Silicon 순도를 갖는 것이 주로 Metallurgical-Grade(MG)실리콘이라 하고 태양전지기관용으로 이용된다. Electronic-Grade(EG)실리콘은 99.999%이상의 Silicon 순도를 갖는다고 한다. 가격은 대략 \$1.5~2.5/kg정도이며 전 세계적으로 연간 약 1백만톤 가량 생산되고 있다.

2-2. Bulk Silicon 전지 기관제조 산업

앞서 설명한 MG급 Poly-Silicon을 원료로 실리콘 전지기관을 제조하는 공정은 Bulk Silicon 기관은 Silicon Base 자체가 기관이 되므로 그 강도를 어느 정도 유지해 주어야 한다. 강도를유지하는 두께가 300~150 μ m정도로 알려져 있으며 재료의 Silicon 결정 구조에 따라 단결정 Silicon 기관과 다결정 Silicon 기관으로 나뉜다.

단결정 Silicon 기관은 말 그대로 Si-결정이 한 분자 layer씩 결정을 매우 규칙적으로 결정화를 이루어야 한다. 현재 단결정 성장로는 Czochralski(CZ) 공정을 가장 많이 사용한다. CZ공정은 전기로 내부에서 Poly-Silicon을 녹여 서서히 냉각시키면서 Ingot 형태의 원기둥 모양 Silicon 단결정을 로 도가니와 Ingot이 서로 다른 방향으로 돌면서 결정을 성장시키는 공정이다. 단결정 Ingot을 기관으로 만들기 위해 Slicing하는 공정과 Wafering 하는 공정이 요구된다. 단결정 실리콘을 사용한 전지는 집광장치를 사용하지 않은 경우 최고 변환 효율은 호주의 UNSW(University of New South Wales)대학이 발표한 24%(4cm²)이며, 집광장치를 사용한 전지는 28% 이상의 효율이 발표되었다. Silicon 계 태양전지의 한계 효율 도달치는 단결정이 35%정도라고 예측된 바 있다. 지상용으로 가장 널리 사용되고 있는 결정질 실리콘 태양전지는 스크린 인쇄법에 의한 전극을 갖는 구조로서 광변환 효율이 12%~17%정도이다.

다결정 Silicon 기관제조는 상대적으로 시간이 오래 걸리고 제조단가가 높은 단결정 Silicon 기관에 비해 비교적 빠른 시간 내에 만들고자 결정구조가 일정하지 않게 된다. 용융된 Poly-Silicon을 욕면체 틀에서 굳혀 원하는 크기로 Slicing하는 방법으로 전기변환 효율이 단결정기관보다 약 4~5% 낮으나 경제성 측면에서 경쟁하고 있다.

2-3. 박막 Si 태양전지

박막형 비정질 태양 전지는 대량·연속생산이 가능하며, 실리콘의 사용량도 적어 저비용화가 기대 되고 있으며, 한 층의 고품질화, 고 신뢰도화, 대면적화를 위해 개발이 지속되고 있다. 비정질 실리콘 태양전지의 경우 주로 일본 회사들에 의해 연구가 진행 되어 산업화 되었다. 또한 여러 박막 태양전지 기술 중 가장 산업화에 성공한 것으로 평가 되고 있다. 비정질 실리콘 태양전지는 1978년 Carlson 등에 의해 변환효율 2.4%인 최초의 비정질 실리콘 p-i-n 태양전지가 제작 되었으며, 이론적 계산에 의하면 최대 변환효율은 15% 정도이다. 현재 초기 변환효율 약 12%(안정화 효율 9%) 내외에서 달성이 가능하다. 또 결정질 실리콘 태양전지는 높은 변환효율과 비유독성, 재료의 풍부함으로 인해 현재 태양전지

시장의 80%를 차지하고 있다. 하지만 태양전지 제조가격의 50%이상을 차지하고 있는 실리콘 기관으로 인한 높은 제조 단가와 대면적화가 불가능하다는 단점이 있다. 박막 실리콘 태양전지 기술의 경우 아직 성능의 재현성 문제 및 낮은 효율 등의 문제를 가지고 있지만, 재료의 비용이 낮기 때문에 제조 단가를 크게 낮출 수 있고, 대면적화가 용이하기 때문에, 태양전지 시장을 주도하는 기술이 결국에는 박막형 실리콘 태양전지로 바뀌어 갈 것으로 예상된다.

2-4. 화합물 반도체 태양전지

실리콘 이외에 반도체 특성을 갖는 화합물은 이미 알려진 Ga-As 이외에도 여러 가지 화합물이 존재한다. N(4)족 원소의 반도체 특성은 III-V족, II-VI족, I-III-VI족 화합물 등 많은 종류의 화합물에서 나타난다. 태양광 발전도 마찬가지이며 이러한 화합물들은 아직도 발견되고 있다. 가장 각광을 받고 있는 화합물 반도체가 CuInSe_2 , CuGaS_2 그리고 CuGaSe 의 Chakopyrite 계 화합물이다. 반도체 특성의 Band Gap이 낮아야하지만 이상적인 Band Gap은 1.4eV 정도로 알려져 있다. CuInSe 는 1.04eV의 Band Gap을 나타내 이를 다소 보완하기 위해 여러 화합물이 개발되었고 CuGaSe_2 의 경우 1.6eV, CuGaS_2 는 2.5eV이다. 또 CdTe 와 CdSe 가 II-VI족 반도체 화합물로 Band Gap이 1.45eV로 나타나 이론적으로 매우 이상적인 화합물이 될 수 있다. III-V족 화합물 화합물로는 GaAs, InP 등이 알려져 있고 GaAs의 Band Gap은 1.4eV 정도로 최적변환 효율을 가져올 수 있으나 가격이 비싸 인공위성용으로 많이 사용되고 있다. 이러한 화합물이 기관위에서 적층 구조로 결정성장을 하기 위해 현재 반도체 제조공정에 쓰이는 CVD 공정이 주로 사용되어진다. 또 이들이 CVD 반응기 내에서 반응의 결과를 만들어져야 하므로 이들 반도체 화합물이 만들어지기 위해서는 그 반응 전조물질인 Pre-Cursor 화합물의 제조 산업이 이 산업분야의 원료산업이 될 수 있다. 이 분야 역시 한국이 매우 취약한 분야이나 최초 국내의 대기업 및 Venture 기업이 많이 참여하기 시작하였다.

화합물 반도체 중 가장 상업화가 가능성이 높은 CuInSe_2 를 사용한 태양전지는 1980년대 미국 Boeing사가 기존의 단결정실리콘(20 W/kg) 태양전지를 대체할 수 있는 우주용의 경량 고효율 태양전지로 처음 연구되었을 만큼 효율이 높고 안정성이 우수한데, 우주용 태양전지에서 가장 중요한 요소인 단위중량당의 발전량이 현재 단일접합에서도 약 100 W/kg으로 기존의 Si이나 GaAs 태양전지의 20~40 W/kg에 비해 월등히 우수하다.

또한 1980년대 말부터는 저가 고효율의 지상발전용 박막태양전지를 목표로 선진국에서 집중적으로 기술개발이 추진되고 있는데, Band Gap 1.2 eV의 단일접합 CuInGaSe_2 태양전지에서 최고 변환효율 19.2% 달성하여 기존 웨이퍼 형태의 다결정실리콘 태양전지의 최고효율(19.8%)에 근접하고 있다.

화합물 반도체는 광흡수가 뛰어나 매우 얇은 두께로도 실용 가능한 변환효율을 나타내고 있어 차세대 태양전지로 각광 받고 있다.

이 밖에도 염료 감응형 유기 태양전지 소재를 이용한 flexible 태양전지와 나노 크기의 화합물 반도체를 제조해 flexible Base 물질(Polymer 혹은 Tape, Film 등)에 코팅하여 사용할 수 있는 태양전지가 개발되어지고 있다. 반도체 특성을 지닌 π 전자 결합이 있는 고분자나 metallic-organic 물질을 이용한 태양전지 등이 개발되고 있어 형태가 자유자재로 바뀌는 태양전지의 개발에도 화학공학이 깊숙이 관여하고 있다.

태양전지의 원료에 따라 그 공정이 달라지겠으나 전지로 완성되기 위해서는 전기

Fabrication 공정이 반드시 필요하다. 전지의 Fabrication은 전면에서 받아들여지는 태양광의 반사율을 감소시키고 태양전지 내에서 빛의 통과 길이를 길게 하며, 후면으로부터의 내부반사를 이용하여 흡수된 빛의 양을 증가시키는 것이다 Polishing 처리도나 Wafer의 표면은 태양빛의 30% 정도를 반사하는데 표면을 조직화(Texturing)하면 빛의 반사율을 10% 정도로 감소시키며, 여기에 반사방지막(Anti-Reflection Coating)을 추가하면 태양전지의 빛 반사율을 약 3%까지 감소시킬 수 있다. 이 밖에 전면부에 전류를 수집할 수 있는 전극을 최소 면적으로 구현하여야 한다. 전극은 Print 방식으로 형성시킬 수 있으나 미세선쪽으로 금속을 CVD공정에 의해 증착하거나 투명전극을 인쇄, 건조 혹은 laser를 이용하여 홈을 그리고 그 홈에 전극을 메우는 여러 가지 Fabrication 공정이 개발되어 사용되고 있다.

2-5. 태양전지 Module 제조

지금까지 설명한 태양전지는 Cell이라는 최소 단위의 태양전지이다. 그러나 태양전지를 실제로 이용하는 경우 지금까지 설명한 것처럼 태양전지 셀을 그대로 사용하는 경우는 거의 없다. 왜냐하면 태양전지 셀은 하나의 셀이 아무리 크다고 해도 전압이 약 0.5V밖에 발생하지 않기 때문이다. 일반적으로 전자계산기, 라디오 등의 전자 제품은 1.5V에서 12V의 전압으로 작동되므로 건전지를 직렬로 연결하듯이 태양전지 셀을 직렬로 연결하여 사용해야 한다. 태양전지를 가정에서 전력용으로 사용하는 경우에도 마찬가지로 직렬로 연결해야 한다. 또 다른 하나의 요소로서 발생 전류를 고려해야 한다. 발생 전류는 태양전지 셀의 면적과 거의 비례한다. 예를 들어 10cm x 10cm크기의 태양전지를 이용할 경우 큰 태양전지가 필요하면 10cm x 10cm의 셀을 병렬로 리본 모양의 금속박으로 배선한 다음 고정시킨다. 태양전지를 외부환경으로부터 보호하기 위해 잘 투과되면서도 전기적으로는 절연 특성을 가지는 재료(예를 들어 유리, 절연막이 코팅된 알루미늄 호일 혹은 플라스틱 등)를 사용하여 봉인해야 한다. 이와 같이 여러 개의 셀을 묶은 단위를 태양전지 모듈(Module)이라고 한다. 태양전지의 빛을 받은 면은 유리등의 투명 기판을 놓아 모듈의 지지판으로 하고 그 밑에 투명한 충전재료와 내면 코팅을 이용하여 태양전지를 고정시킨다. 투명기판으로는 유리가 적당하다. 특히 빛의 투과율과 내충격 강도가 뛰어나다는 점에서 저철분 열강화 유리가 자주 이용되고 있다. 충전 재료로는 빛의 투과율 저하가 적은 PVB(Poly Vinyl Butylo)나 내습성이 뛰어난 EVA(Ethylene Vinyl Acetate) 등이 주로 이용된다. 또 내면 코팅으로는 알루미늄과 같은 금속을 PVF('테트라'라는 상품명)로 샌드위치 층 구조를 만들어 내습성과 내열성을 높이고 있다.

3. 결론

태양전지산업은 지극히 화학공학에 그 기반을 두고 있음을 설명하였다. 세계적으로 에너지 문제를 해결하려는 노력과 함께 태양전지시장은 기하급수적으로 커지고 있고 선진국들은 이미 이 시장을 선점하고자 박차를 가하고 있다. 한 산업분야의 소재로부터 조립공정까지 전 공정을 고루 발달시켜야 한다는 것은 이미 전자산업 등에서 우리가 얻은 교훈이다. 원재료로부터 완제품에 이르기까지 화학반응, 분리 및 제조공정에 이르기까지 태양광산업은 화학공학의 기술 없이는 그 발전이 어려울 뿐만 아니라 무기소재 및 유기, 고분자 소재에 이르기까지 화학공학적 소재산업이 뒷받침되지 않고서는 기술 선점이 어려운 분야라 하겠다. 이제 새로운 태양광산업 시장의 도전에 화학공학이 기여해야 할 때이며 많은 화학공학자의

노력이 요구되어지고 있으며 특히 화학공학 중 공정시스템 분야의 기여가 절대적이라 할 수 있다. 첫 번째 기고로서는 신재생에너지 중 태양광발전산업의 전반을 요약하였다. 계속 연재될 1, 2편의 정보에는 국내의 산업에서 생산이 임박한 재료중심의 태양광산업 중심으로 보다 상세한 정보를 올리도록 하겠다.