

# 태양광 폐 패널의 재활용을 통한 유가금속의 회수 및 환경부하저감

Recycling valuable metals and reducing environmental load through recycling solar photovoltaic panels

배수용, 조형우, 한지우

School of Environmental Engineering, University of Seoul, 163 Siripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

## Introduction

- 과거에는 폐기물을 잘 처리하는데 초점이 맞춰져 있었다면 이제는 폐기물 발생자체를 줄이는 자원순환에 초점이 맞춰지고 있다.
- 우리나라는 광물자원의 90%를 해외에서 수입하여 원자재 수입량이 하루 평균 1조원에 이른다(2013년 환경부 기준).
- 자원순환이 이루어지면 원자재 수입량을 감소시켜 자원의 해외의존도가 줄어들 것으로 기대된다.
- 태양광 발전 산업은 빠르고 안정적인 성장률을 보이고 있으며 앞으로도 지속적으로 성장할 것으로 예상된다. 에너지 발전 규모 또한 차세대 대체에너지로 불릴 만큼 발전량이 적지 않다.
- 평균수명이 20년 내외인 패널의 폐기물화는 빠르게 증가하고 있다. 세계 폐 태양광 패널의 발생량은 2016년, 2020년과 2030년에 294,000톤, 950,000톤, 2,500,000톤에 도달할 것으로 보인다. 한국의 폐 패널 발생량은 2016년 39톤, 2022년 1,612톤, 2027년에는 5,802톤에 달할 것으로 전망된다.
- 태양광 패널에는 알루미늄, 유리 등 재활용이 원활한 물질 뿐만 아니라 은, 실리콘과 같은 분리추출이 난해하지만 가치가 높은 유가물질이 포함되어 있다.
- 이러한 태양광 폐 패널의 재활용 시스템이 잘 갖추어 진다면 국내의 폐 패널에 대한 경제적 이득을 얻고 환경적 부담은 덜 수 있을 것이다.

## State-of-art

### 유가물질의 추출



- 분쇄된 패널을 유기용매에 용해할 경우 실리콘 성분은 아래로 가라앉게 되어 필터링을 통해 추출할 수 있다.
- 재형에서 일정한 온도와 압력을 가하고 1단계에서 소다를 2단계에서 산을 이용하여 실리콘을 침출시킨다.
- 그 뒤엔 금속 성분이 남는데, 구리와 은을 추출하기 위해서는 각각 다른 전압이 요구된다. 구리의 경우에는 200V, 은의 경우에는 100V의 전압이 필요하므로 각각 따로 추출이 가능하다.

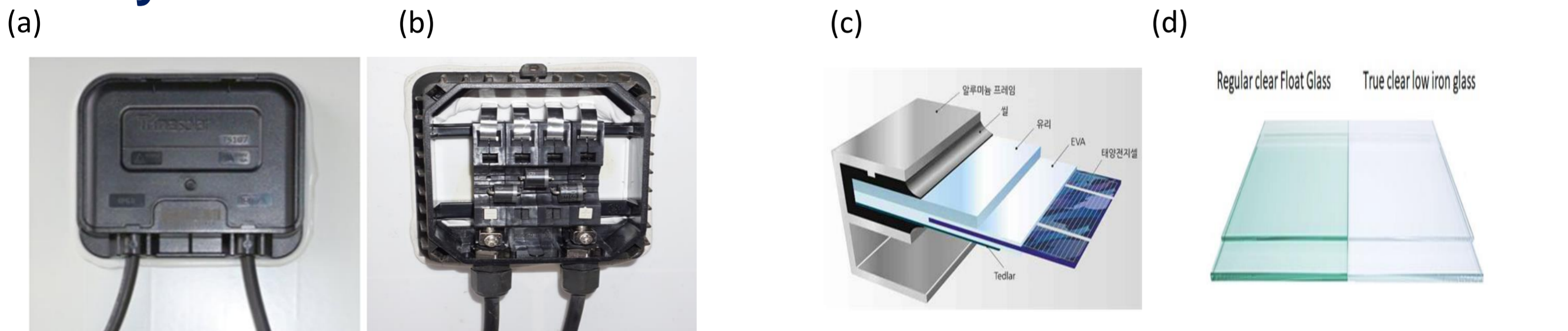
### 기술로드맵(환경부 진행)

연구목표	폐자원 실리콘 및 유가금속의 자원회수					
년도	2011	2012	2013	2014	2015	2020
실리콘 추출공정	태양전지 폐모듈로부터 실리콘 및 유가금속 회수기술 개발					
	백그라운드 Si솔리드로부터 실리콘 기반 개발					
	반도체 / 태양전지용 실리콘 칩팅 솔리드로부터 초고순도 Si 제조기술 개발					
금속 추출공정	전기전자 폐자재로부터 유가금속 회수 상용화 기술개발					
	태양전지 폐자재로부터 유가금속 회수 상용화 기술개발					

- 주요 기술 두 가지 중 실리콘 추출에 관한 공정이 빠르게 발전 했으며 그 숫자도 다양하게 개발되었다 2011년부터 각종 반도체와 태양전지에 있는 실리콘을 추출하기 위한 기술들이 개발되기 시작했다. 이 개발들은 모두 4개년에 걸쳐 진행되었으며 2014년에 완료되었다.
- 금속추출공정의 경우 실리콘과 같이 2011년에 개발을 시작한 기술은 E-waste로부터 유가금속 회수를 상용화하는 기술 하나였으며 20년 단위 계획으로 지금도 진행중에 있다.

## Conceptual Design

### Physical Process



- 정선 박스는 패널 뒷면의 상단 근처에 위치한 작은 방수 케이스이다.
- 패널과 케이블을 연결하는 지점이며 일부 셀이 음영되거나 오염되면 발생하는 전류의 역류를 방지하는 데 필요한 바이패스 다이오드가 들어있다.
- 일반적으로 패널 하나당 하나의 정선박스가 장착되어 있으며 고장 시 교체를 위해 탈부착이 가능하다.

- 알루미늄 프레임은 셀을 수용하는 라미네이트 섹션의 가장자리를 보호하고 태양광 패널을 제 위치에 장착하기 위해 사용되며 패널의 외각을 감싸는 구조를 가지고 있다.
- 알루미늄 프레임은 나사로 고정된 구조이기 때문에 폐 패널로부터 비교적 단순한 공정으로 분리가 가능하다.
- 유리를 태양광 셀에서 분리하기 위해서 높은 온도처리를 통해서 EVA를 녹인 후 유리를 깨지지 않게 태양광 셀로부터 분리한다. 분리된 유리에는 아직 EVA와 태양광 셀의 조각들과 같은 불순물이 붙어있는 상태이므로 용매제를 이용해 세척하여야 한다.

## Detailed Design

### Capacity Calculation

#### 실리콘 추출 공정 반응조 용량 (침출공정)

1000kg/h의 처리효율을 목표로 설계 진행하였다. 폐 패널 1000kg의 구성으로는 판유리가 700kg, 알루미늄이 180kg 그리고 커넥터가 10kg 정도 차지하고 있으며 그 외의 다양한 소량의 금속들이 포함되어 있다. 순수 태양광 셀의 질량은 약 110kg이며 순수 금속 질량은 약 44kg이다.

- 순수 태양광 셀의 밀도 : 2.96g/cm<sup>3</sup>
- 순수 태양광 셀의 부피 : 14.86L
- 순수 태양광 셀의 총 처리 부피 : 178.32L

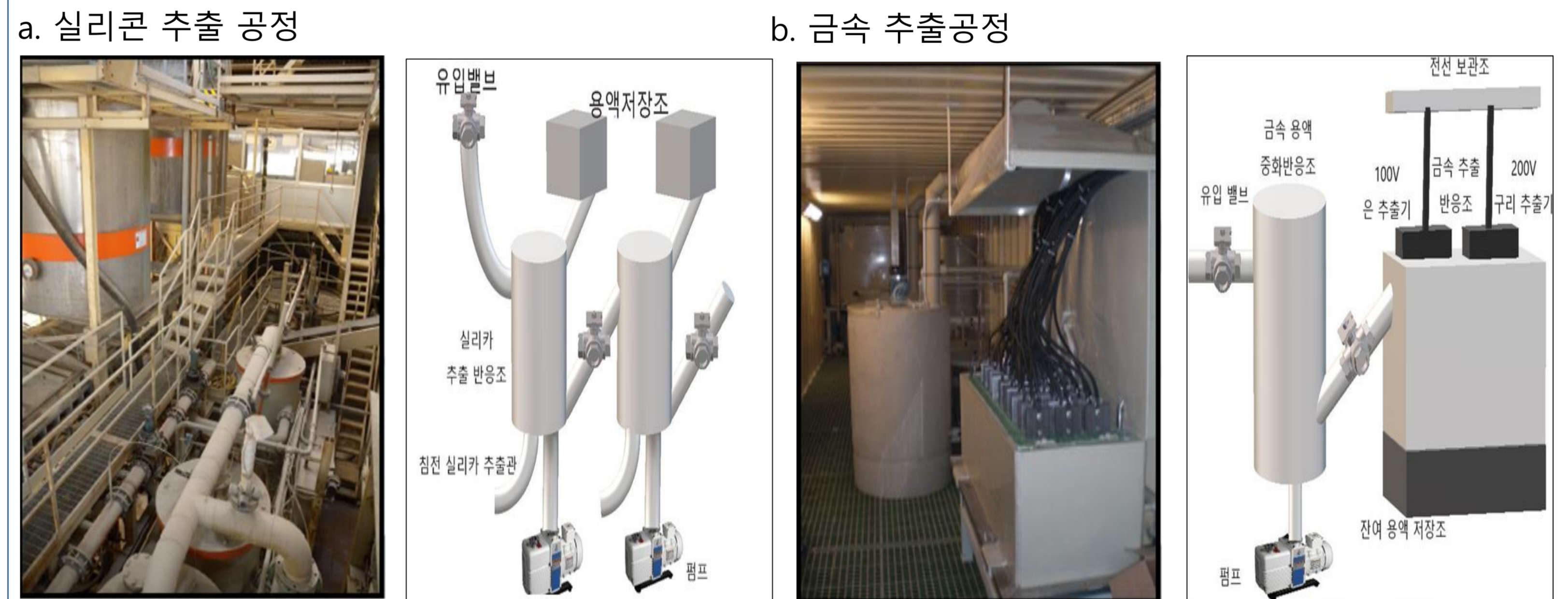
반응조 총 부피 계산  
 1. (156.1+32.9)L/h x 8hr = 1512L  
 2. 여유율 1.5배 고려 = 2268L  
 3. 태양광 셀 부피 합산 = 2446L  
 4. 공정의 편의성 = 2500L

1단계	SiO2	2KOH	→	K2SiO3	H2O	
물수(mol)	608	1216		608	608	
투입 용액 몰부피(mol/L)	-	8		-	-	
총 부피(L/h)	-	156.1		-	-	
2단계	K2SiO3	2HNO3	→	SiO3	2KNO3	H2O
물수(mol)	608	1216		608	1216	608
투입 용액 몰부피(mol/L)	-	37		-	-	-
총 부피(L/h)	-	32.9		-	-	-

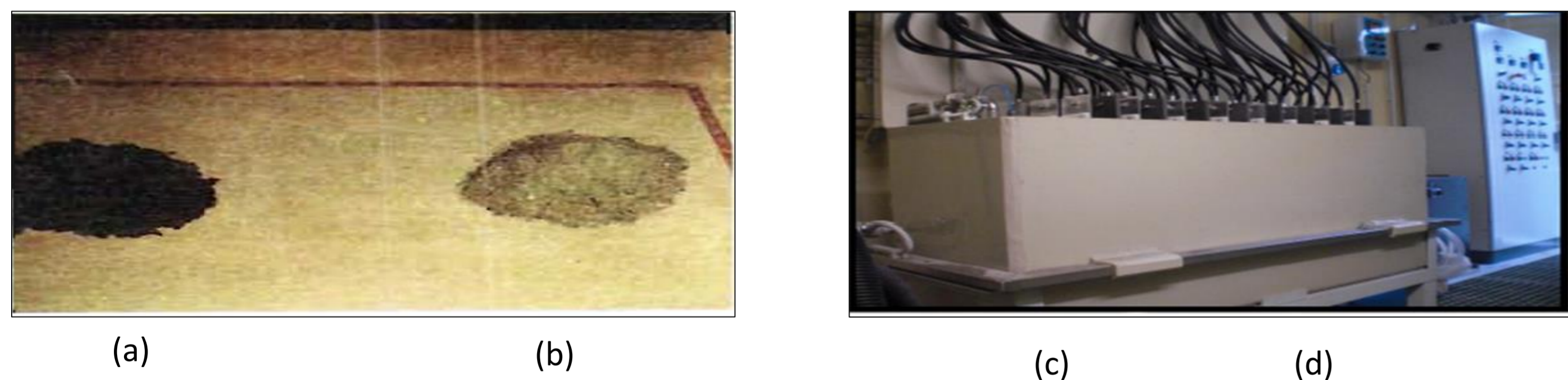
#### 금속추출 반응조 용량

실리콘 추출 반응조에서 처리되고 남은 용액 내부에 녹아있는 금속을 추출하는 것을 목표로 설계 진행  
 실리콘 추출반응조에서 배출되는 용액의 부피 = 금속추출 반응조 초기 투입 원료의 부피 = 2500L

### Assembly diagram and parts diagram



## Chemical Process

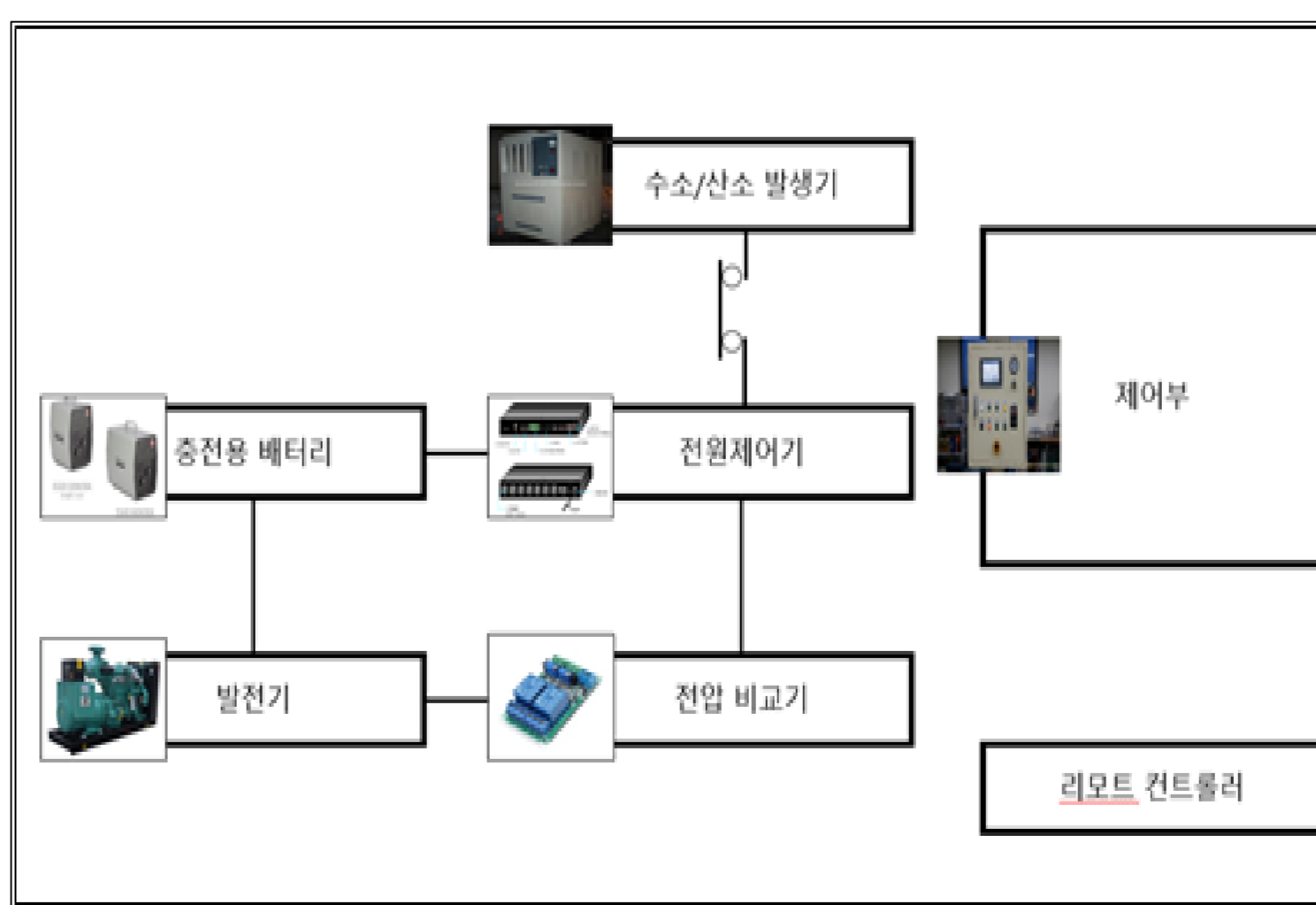


- 회분 내부에 있는 실리콘을 실리카(SiO<sub>2</sub>)형태로 추출해 내기 위해 두 가지 화학적 단계를 거친다. 첫 번째 단계는 회분형태의 실리콘을 6-8atm, 180~200°C의 상황에서 수산화 칼륨(KOH, potassium Hydrate)과 반응시켜 규산칼륨(potassium Silicate)을 얻는 과정이다.
- 이때 얻어진 규산나트륨(potassium Silicate)을 1atm, 90~100°C의 상황에서 황산( nitrate acid)과 반응시키면 실리카()형태의 실리콘을 추출 할 수 있다.
- 황산을 첨가할 때 급격한 반응으로 인해 물리적 화학적 성질이 변할 수 있으므로 황산을 천천히 첨가해야 한다. 산성조건에 도달하면 규산나트륨(potassium Silicate)에 있는 거의 모든 실리콘이 침전된다. 그 후 용액 중의 백색 침전물(실리카)을 수득한다.

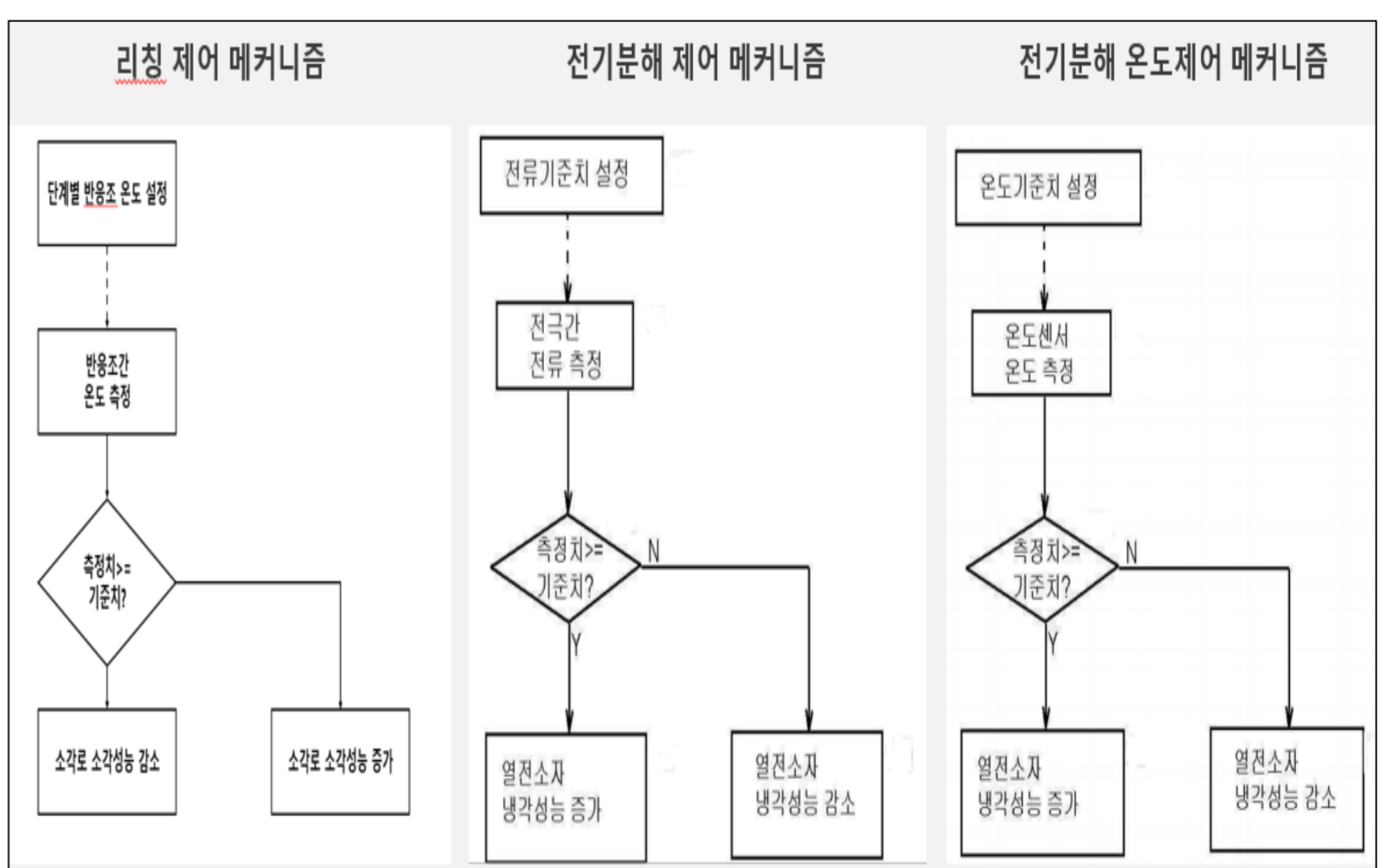
- 실리콘을 추출하고 난 뒤 황산용액 안에 남아있는 은과 구리는 전기분해를 이용해 추출 할 수 있다. 중화작업을 거친 후 은과 구리는 각각 100V와 200V의 전압으로 따로 추출 할 수 있다. 은과 구리를 추출한 이후 남은 용액 내부에는 미량의 수산화 금속이 포함되어 있다. 이는 압력여과처리를 통해 걸러내어 최종 부산물로서 처리된다.

## Control and software design

### a. 제어부 및 회로 설계



### b. 소프트웨어 설계



## Conclusion

### Conclusion

- 시뮬레이션을 통해 패널 1톤에서 프레임 알루미늄 180kg, 셀알루미늄 2.7kg, 실리콘 36.5kg, 구리 1.14kg, 은 0.53kg을 추출하였다.
- 250W 생산 모듈 1개를 제작하는데 소모되는 전력량은 약 750kWh인데, 같은 모듈 내 소재를 회수하는데 필요한 전력은 약 5kWh이다. 따라서 제안기술이 개발되면 모듈을 제작할 때마다 원자재를 새로 수입할 필요가 없어 환경적은 물론 경제적으로도 유익할 것이다.
- 2022년 국내 폐 패널 발생량은 1,622톤에 달할 것으로 추정된다. 1,622톤을 전량 처리시에 발생하는 순수 매립량은 32.44톤으로 약 98%까지 감소될 것으로 전망된다. 따라서 제안기술이 상용화되면 폐패널의 매립량 감소로 매립 시 소요될 약 6500만원을 약 130만원까지 절감시킬 수 있다.
- 폐 패널은 적당한 조치가 취해지지 않아 그대로 방치되는 경우가 많은데 제안기술로 방치 패널을 처리하면 유휴부지를 다시 사용할 수 있다.
- 폐 패널의 성분이 수계 또는 토양계에 유출되면 환경적 부담을 초래하는데 제안기술을 활용한다면 환경부하를 줄일 수 있다.