

태양광 폐 모듈 처리의 실증화 기술



writer | 전연수 원광전력(주) 대표이사 · 공학박사

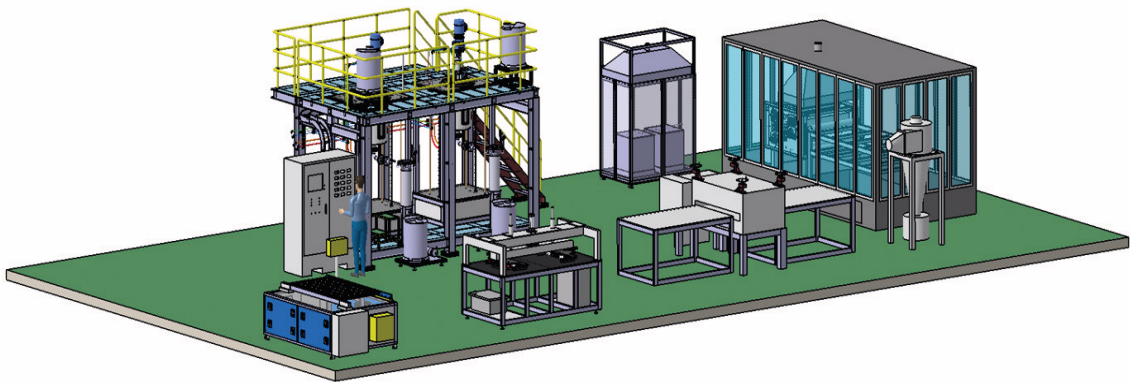
1. 머리말

태양광 발전 설비는 기대수명이 종료됨에 따라 폐기물 형태로 배출된다. 국내 태양광 발전 설비가 2005년부터 보급 확산된 것과 당시 태양광 모듈의 수명이 15년 정도인 것을 토대로 태양광 폐 패널은 2020년부터 발생하기 시작하여 지속적인 증가를 보일 것으로 여겨진다. 태양광 폐 패널에 대한 처리 방법으로 다양한 기술 개발이 이루어지고 있지만, 아직 만족할 만한 해답은 나오지 않았다. 이러한 문제를 조금이나마 완회시키고 근본적인 처리 방법을 찾기 위해서는 지속적이고 부단한 노력이 필요하다.

태양광 폐 패널의 효과적인 재활용을 위해서는 모듈의 구성과 특성 파악이 이루어져야 한다. 일반적인 태양광 패널은 얇은 태양전지가 외부의 충격으로부터 파손되는 것을 방지하고 견고성을 유지하기 위해 알루미

늄 프레임 내부에 강화유리, Ethylene vinyl acetate (EVA), PV cell, EVA, Back sheet 순으로 Laminating 된 샌드위치 구조이고, 패널의 하부에는 전기 결선을 위한 Junction box가 장착되어 있다. 단위 공정을 기반으로 기술 개발 후, 단위 공정 기술의 체계적인 조합을 통해 경제성 확보가 가능한 대단위 종합처리공정 확립이 바람직할 것이다.

대단위 처리기술은 태양광 폐 패널의 성능 검사, Junction box 분리, 알루미늄 프레임 분리, 강화유리 파·분쇄, 강화유리 박리, Back sheet 분리 제거, EVA 열처리 제거, PV cell 중 유가 금속의 추출, 폐 액의 환경친화적 처리 공정으로 구성된다. 이와 같은 처리 공정 기술은 경제성을 고려하여 단위 기술의 선택적 처리 또는 전체 공정 처리로 구분하여 수행하는 것이 바람직할 것이다.



〈그림 1〉 태양광 폐모듈 대단위 처리시스템

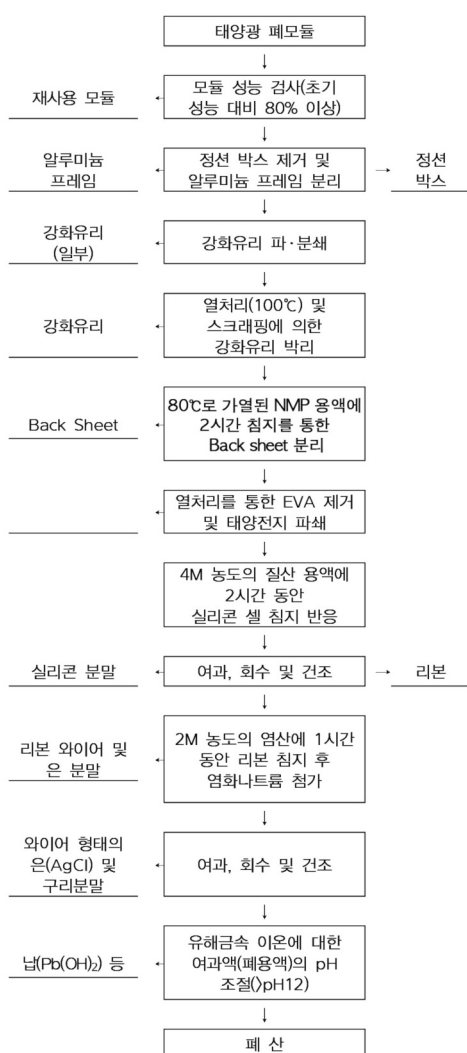


2. 태양광 폐 모듈의 처리공정 및 종류

가. 태양광 폐 모듈 처리의 주요 처리기술 개요

태양광 패널은 접착력이 강한 EVA로 강화유리, PV cell, Back sheet가 층상으로 이루어진 구조이다. 이와 같은 구조와 특성을 고려하여 태양광 발전용 폐 모듈 처리의 공정을 구성하였고, 각 재활용 공정의 개략적인 조건을 아래 그림 2에 나타내었다.

〈그림 2〉 태양광 폐 모듈 재활용 공정 계통도



나. 태양광 모듈의 종류 및 구성

태양광 모듈은 중국 Yingli Co., 한화큐셀 Co., LG 네온 클럽 Co. 및 JA Solar co. 등에서 제조하고 있으나, 제조사 및 제조 모델에 따라 크기 및 구성 성분이 약간 다를 뿐 대부분 비슷한 규격을 가지고 있다. 이 중 가장 널리 보급된 태양광 모듈은 Yingli Co.의 제품이다. 폐 모듈로 대량 발생이 예상되는, Yingli Co.의 제품을 대단위 처리 기술 개발 시료로 선정하였다. 선정 시료의 단위 셀 구성은 표 1과 같다.

〈표 1〉 Y사 태양광 모듈 구성 성분

		무게(g)	구성비(wt.%)
태양전지	강화유리	3.30	184.6
	상부 EVA 필름	0.50	11.2
	은 금속	0.5	0.01
	실리콘 층	0.17	9.5
	알루미늄 층	0.04	2.6
	금속 선	폭 : 0.11 두께 : 0.03(75ea)	0.4
	소계		13.0
	금속 리본	폭 : 1.93 두께 : 0.23(75ea)	2.5
	하부 EVA 필름	0.50	11.2
	Back Sheet	0.20	10.6
	총계	4.71	233.1

표 1에서 보는 바와 같이 선정 시료의 단위 셀은 80% 정도가 강화유리 성분이고, 나머지는 유가 금속, EVA film 및 back sheet로 구성되어 있다. 단, 가장 가치가 있는 은 성분은 포함되지 않거나 미량 함유되어 있었다.

단위 셀로 이루어진 모듈 패널 1개는 일반적으로 6×10 cell로 구성되어 있고, 이를 알루미늄 프레임이 감싸고 있는 형태이다. 패널의 조성 및 무게는 표 2와 같다.

표 2에서 보는 바와 같이 강화유리를 제외한 주

요 성분은 Al frame, back sheet 및 EVA 성분 이고, 알루미늄 프레임을 포함한 전체 패널 내 알루미늄 프레임의 무게 비중은 약 22%이다.

〈표 2〉 태양광 모듈의 성분비율(6×10 셀)

성분	무게(g)	구성비(%)	성분	무게(g)	구성비(%)
강화유리	11,100	79.4	구리	132	0.9
EVA	1,365	9.6	Lead	40	0.28
실리콘	571	4.1	주석	1	0.01
알루미늄	156	1.1	Back sheet	634	4.6
은	1	0.01	소계	14,000	100
알루미늄 프레임	4,000		총계	18,000	

3. 태양광 폐 모듈의 대단위 처리 공정

가. 태양광 폐 모듈의 성능검사

태양광 모듈에 대한 출력 성능시험은 설계의 적격성 확인과 형식 승인을 위한 것으로 KSC8561 (IEC 60904, JIS 8912) 규격에 명시되어 있으나, 이는 태양광 모듈 제작 기준에 관련된 것이다. 일부 사용 중인 장치는 정밀성능 분석용으로 매우 고가이기 때문에, 재활용 시험의 현장에서 사용 후 태양광 모듈의 성능검사에 적용하기는 어렵다. 이에 따라 폐 모듈의 전기 발생량 측정하고 해당 모델의 정격 성능 데이터를 확보·비교함으로써 재사용 및 재활용(recycling) 여부를 단순하게 판단하고자 모듈 성능검사기를 자체 제작하였다.

설비는 사용 후 태양광 모듈의 크기를 고려하였고, 설비 하부는 고가의 제논 램프 대신 할로겐램프를 장착 설비 상부는 투명평판으로 구성함으로써 램프의 빛이 상부로 조사되도록 하였다. 이때 측정을 위해 투명 평판과 사용 후 태양광 모듈의 강화유리가 평행이 되도록 하였고, 모듈의 투입 및 배출이 용이하도록 구성하였다. 성능 결과는 전류전압 커브로부터 환산 계산된 계기판의 결과

값으로 판단하였다. 폐 모듈 성능검사 장치의 구체적인 설비 사양은 표 3과 같다.

〈표 3〉 태양광 폐 모듈의 성능검사 설비 사양

구분	사양	구분	사양
측정 범위	최대 2,180 x 1,330mm ² 최소 2,180 x 510mm ²	전류 범위	0~150A DC
펄스 범위	1~100 초 설정 가능	전압 범위	0~50V DC
측정값 반복성	< 0.3%	램프	할로겐 1000W

운전에 의한 작업성 평가 결과 모듈 1장 당 처리 시간은 60초 이내로서, 1일 5시간 작업 시 약 300매(5.4ton) 이상 처리가 가능하다.

나. 폐 모듈 중의 알루미늄 프레임 해체공정

폐 모듈 중 접속상자(junction box)를 분리한 다음, 알루미늄 프레임이 분리 회수되어야 하는데, 이는 기계적 힘을 이용하여 연속적으로 처리하여야 한다. 해체 분리장치는 본체 구조물, up&down 컨베이어 테이블, 분리장치 및 구동을 위한 유압기로 구성되어 있다. 분리장치는 태양광 모듈의 크기가 제조사별로 상이한 점을 고려하여 모든 모듈 적용 범위를 설계에 반영함으로써 모든 제품에 사용 가능토록 하였다. 또한 프레임의 분리는 개체별 방식이 아닌 일체형으로 한 번에 해체 분리되도록 하였고, 설비구성은 본체, 테이블, 프로파일 분리, 유압유닛 및 control panel

〈표 4〉 ELP 모듈용 알루미늄 프레임 분리장치 규격

구분	사양	구분	사양
모듈 수용 범위	최대 2,180 x 1,330mm ² 최소 2,180 x 510mm ²	테이블 이동 거리	250mm
전기 전원	3Ø x 380V x 60Hz	프로파일 작동 방식	유압실린더/유압유닛
전기 동력	>2.2kW x 4P x 60Hz	프로파일 분리 이동거리	좌 우 각각 200m
테이블 롤러 직경	Ø60.5	형식	유압실린더 분리 방식
테이블 상면 높이	1,000mm	처리용량	1톤/일



등으로 되어있다. 구체적인 알루미늄 프레임의 해체 분리 장치의 설계 사양은 표 4와 같다.

AI frame 분리 공정은 다음과 같다. Base plate 위 중앙에 태양광 모듈을 위치시킨 뒤 설비를 작동하면, 상하 컨베이어에 의해 압착 플레이트가 아래 방향으로 이동한다. 압착 플레이트는 베이스 플레이트 위에 위치한 모듈에 수직 방향의 일정 압력을 가함으로써 모듈을 베이스 플레이트에 고정한다. 압착 플레이트의 분리 지그가 네 방향으로 이동하여 알루미늄 프레임을 바깥 방향으로 밀어내고 알루미늄 프레임은 모듈로부터 분리된다. 분리가 완료되면 분리 지그는 중앙으로 이동하고 압착 플레이트가 본래 위치로 이동하여 초기 상태가 된다.

다. 강화유리의 파쇄공정

폐 모듈 중 알루미늄 프레임을 분리한 다음, 태양광 폐 모듈에 부착된 강화유리를 분리 회수하기 위해 강화유리를 파쇄하였고, 파쇄 과정 중 일부 유리가 회수된다. 파쇄기는 기계 몸체, 기어박스, 드라이브 장치, 파쇄 및 압착 roller, 하부 hopper, 압착 roller 조정 및 control panel 등으로

구성되어 있다. 파쇄 roller는 하부 측에 고정되어 회전하되 좌우로 움직임이 없도록 하고, 압착 roller는 상하로 조정이 가능하게 함과 동시에 모듈 두께에 따라 조절이 가능하도록 설계되었다. 즉 상하부 roller는 2개소에 원기어와 축을 설치함으로써 상하 간격 조정이 가능하도록 하는 특징을 가지고 있다. 구체적인 강화유리 파쇄 장치의 설계 사양은 표 5와 같다.

〈표 5〉 강화유리 파쇄장치 규격

구분	사양	구분	사양
인, 아웃 라인	1,200mm	축 직경	1차 Ø100, 2차 Ø80
전원	3Ø x 380V x 60Hz	기어박스 및 몸체 연결	유니버설 조인트
동력	3.7kW x 4P x 60Hz 이상	역회전 동작 여부	가능
모터 설치 수량	1ea	속도	1축과 2축 회전속도 상이
롤러 폭	1차 12mm, 2차 25mm	형식	2축 파쇄 롤러
롤러 직경	1차 Ø250, 2차 Ø80	처리용량	1톤/일(60정)

파쇄기 작동은 다음과 같다. 태양광 모듈은 파쇄 roller와 정면으로 마주 보게 위치시킨 후, 상부 roller와 하부 roller 사이에 인입한다. 태양광 모듈은 1차 파쇄 roller가 회전하면서 2차 파쇄



roller부 방향으로 이동되는데, 2차 파쇄 roller의 상하부 틈으로 모듈이 들어가면서 본격적인 파쇄가 진행된다. 태양광 모듈의 두께에 따라 상하부 roller gap을 조절하여 원만한 파쇄가 이루어지도록 하고, 1차 파쇄만으로 충분하지 않을 때는 파쇄기에 모듈의 통과 횟수를 증가시켜 파쇄하는 것이 효과적이다.

라. 파·분쇄된 강화유리의 열분리 공정

강화유리가 파쇄된 태양광 폐 모듈 중의 유리 성분은 EVA 성분의 접착제에 의해 단단하게 부착되어 분리 회수가 용이하지 않기 때문에, 강화유리를 더 작게 분쇄하거나 모듈에 열을 가하여 EVA 성분을 이완시킨 뒤 강화유리를 분리해야 한다. 이와 같은 분쇄 및 열 박리 장치는 매우 복잡하고, 제작상에 많은 어려움이 예상되므로 설계에 신경을 써야 한다.

강화유리 열박리 장치는 크게 모듈 이송부, 가열부 및 탈각부로 구분하여 제작 설계를 진행하였다. 이송부는 상하 roller와 rail로 구성되어 있는데, 모듈은 상하부 roller 사이에 투입되고 하부 측면에 설치한 air cylinder에 의해 모듈 전면에 압력이 가해지게 하여 설비 내에서 모듈 이탈 방지 및 이동 방향을 일정하게 할 필요가 있다. 그리고 상하 roller 간의 충분한 이격거리를 조정함으로써 다양한 두께의 모듈을 수용할 수 있어야 한다. 가열부는 1차 및 2차 이송 rail 하부에 열원 장치를 각각 5개씩 설치하여 충분한 열을 공급할 수 있도록 하고, 온도조절 또한 가능하도록 하였으며, 균일한 온도 형성을 위해 가열부 측면에 공기 주입 장치를 부착하였다. 또한 강화유리 탈각부(scrapper)는 탈각 날이 부착된 톱니바퀴 형태의 탈각 roller가 장착되어 있는데, 탈각 날은 roller 외경에 총 6set로 구성되어 있고,

간격 조절은 물론 날의 교체가 가능하도록 설계하였다. 그리고 탈각 분리 시 발생한 미세한 유리 및 먼지 등의 분진을 제거하기 위해 집진기를 설치하였다. 강화유리의 열박리 장치의 구체적인 설계 사양은 표 6과 같다.

〈표 6〉 열원 적용 강화유리 탈각 분리 장치 규격

구분		사양
탈각기	크기	W2,400 x L5,000 x H2,500
	블레이드 크기	W50 x L524
	주행모터 용량	0.75kW, 4P, 220/380V, 60Hz
	탈각모터 용량	2.2kW, 4P, 220/380V, 60Hz
	송풍기 용량	155m ³ /h
집진기	크기	W1,000 x L980 x H2,212mm
	기류	80CMM
	압력	230mmAq
	모터	5.5kW
	동력	380V, 2P, 60Hz
공기 압축기	용량	235L/min, 40L
	압력	0.8Mpa

열 박리 장치의 일반적인 작동은 전술한 강화유리 파쇄 장치의 구동과 비슷하나, 설계 규격에서 설명한 바와 같이 열원 장치와 knife가 장착되어 있고, 진동 장치가 부착된 점에 큰 차이가 있다. 즉 강화유리가 파쇄된 모듈 상부(강화유리면)를 60~100℃로 가열하여 EVA의 접착력을 저하시킨 다음, 단단한 열원 knife로 유리 성분을 밀어내는 방식으로 모듈에서 강화유리를 탈각 분리한다. 그리고 열박리 장치에는 mock-up 장비가 장착되어 있는데, 장비는 원통형 투입 roller 및 톱니바퀴 구조로서 날을 형성한 탈각 roller가 있다. 본 장치에서 가열된 태양광 모듈은 열원 적용 탈각 분리 mock-up 장비에 일정 방향과 속도로 roller에 의해 이송되는데, 이송 중 회전하는 탈각 roller의 날이 강화유리에 접촉함으로써 강화유리는 접착력이 저하된 EVA



로부터 박리된다. 탈각 박리 시험 결과, 강화유리의 대부분이 제거됨을 확인할 수 있다. 즉 강화유리의 파쇄 및 분리 공정을 통해서 유리 성분의 98%가 회수되었다.

마. 태양광 폐 모듈에 부착된 back sheet의 제거 공정

강화유리가 분리된 모듈로부터 back sheet 및 EVA를 제거하기 위한 방법으로 고온 열처리법이 용이하나, 처리 대상의 부피가 크고, 연소 시 환경 유해가스 성분이 다량 방출되므로 유기용매를 사용하여 팽창 분리 및 제거하는 것이 바람직할 것이다. Back sheet 성분의 팽창 분리에는 Ethyl&Buthyl Acetate 등 여러 종류의 유기용매가 이용될 수 있으나, 비교적 낮은 온도와 짧은 시간 안에 침지시켜 팽창 분리하는 데는 환경친화적인 N-methyl-2-pyrrolidone(NMP) 유기용매가 가장 효과적이었다. NMP용액에 모듈을 침지시킬 수 있는 장치는 온도조절, 모듈의 투입과 배출 및 효과적인 팽창 분리를 위한 초음파 진동을 줄 수 있는 기능을 가지고 있어야 한다. Back sheet 성분을 팽창 분리시키기 위한 유기용매 침지 장치의 설계 사양은 표 7과 같다.

〈표 7〉 Back sheet 분리장치 규격

구분	사양	구분	사양
규격	W,1,550 × D,1,000 × H,2,358	모터	단상 220V, 55W
사용 온도	80℃	초음파	220V, Sonic power 50~1,800W
히터	3kW x 5ea	재질	SUS304
환풍기	3Hp	처리용량	0.5톤/일(cell)

Back sheet를 제거하기 위해서는 먼저 강화유리의 박리 후 소분한 모듈을 80℃ 정도로 가열된 NMP 용액 속에 침지시킨 다음, 1시간 이상 ultrasonic vibration 분위기에서 유지한다. 용액

중의 치구 속에 위치한 모듈의 back sheet가 충분히 팽창된 후, 용액 외부로 꺼낸 후 벗겨내면 back sheet는 비교적 간단히 제거된다. 이때 back sheet는 완전히 팽창 분리되지만, back sheet의 안쪽에 위치한 EVA는 일부만 제거되므로 유기금속 회수를 위한 후속 공정의 효율성을 위해서 열처리(500℃, 1hr)를 하여야 한다. 즉, back sheet가 팽창 분리된 태양광 모듈들은 현저히 부피와 양이 축소되어 열 처리 시 큰 비용을 들이지 않고도 EVA 물질을 제거할 수 있다. 이와 같이 처리하여 얻어진 셀 모듈은 분쇄 후 유기금속 회수의 후속 공정에 투입된다.

바. 태양광 셀 중의 유기금속 회수 공정

태양광 셀 중에는 표 1의 조성에서 보는 바와 같이 유기금속으로 회수할 수 있는 양이 많지 않지만, 은 성분을 포함한 일부 미량 금속의 용해 후 시료들의 입자크기 차이를 이용하여 1차 여과하면 metal wire 및 ribbon을 얻을 수 있고, 2차 여과하면 순도가 높은 실리콘 셀 성분의 분말과 유기금속이 용해된 여액을 얻을 수 있다.

이와 같이 질산 침출 여과 처리 후 얻어진 여액은 은을 회수하기 위해 염산 혹은 NaCl을 첨가하면, AgCl 침전물 형태로 은 성분을 회수할 수 있다. 이때 침출 및 침전 반응기로 사용하는 용기는 조

〈표 8〉 유기금속 회수 반응조 규격

구분	사양	구분	사양
반응조 크기	W,1,260 × D,1,000 × H,3,590	유리 부분 압력	Max, 20bar
반응조 타입	Jacket	밀봉 부분 압력	Max, 50bar
내부 용량	107L	설계 온도	Max, 300℃
반응조 압력	최대 50bar	사용 온도	Rt~200℃
유리 부분 압력	Max, 20bar	가열	간접 가열 방식
밀봉 부분 압력	Max, 50bar	처리용량	0.5ton/day(cell)



건 부여의 일부가 다를 뿐 크기와 용량 및 조작 방법이 동일하다. 이와 같은 특성을 가진 침출 및 침전 반응기는 표 8에 나타난 설계 규격에 의해서 2기 제작되었다.

태양광 셀 중에 함유된 유가 금속들을 회수하기 위해서는 먼저 100L 반응조에서 셀 분말의 질산 침출 후, 다단 여과를 통하여 1차 용해 침출되지 않고 고체 상태로 있는 조대한 금속 wire 및 ribbon 물질을 얻고, 2차 여과를 실시하여 미립의 순수한 실리콘 분말을 회수한 다음, 침전조에 이송된 2M HCl 혹은 NaCl을 가하여 용해된 은 성분을 AgCl 침전물 형태로 여과 회수하여야 한다. 특히 다단 여과 분리 회수를 위해서는 여과기기의 선정이 매우 중요한데, 본 시험에서는 각각의 조대한 금속 wire 및 ribbon과 실리콘 셀 분말을 효과적으로 분리하기 위한 1mm 및 0.1 μ m 크기의 여과포가 장치된 진공여과기를 이용하였다.

이때 침출조건은 광액농도 15vol. %(30kg, module 30ea., $\approx$ 65cells), 반응온도 80 $^{\circ}$ C, 반응시간 2hrs, 교반속도 500rpm, 침출제 4M HNO₃과 같고, 침전 조건은 반응온도 상온, 반응시간 1hr, 교반속도 500rpm, 침전제 2M HCl 농도로 하였다. 이상과 같은 조건에서 침출 및 침전 반응 후 얻어진 유가금속의 순도는 동 및 알루미늄 wire의 경우 99% 이상이었고, 실리콘 성분의 순도는 98% 이상임을 확인하였다. 그러나 유가 금속 회수 시 은 성분의 양과 금속 wire 및 ribbon 양이 매우 적어 경제성에 문제가 있다는 사실도 알 수 있었다.

사. 유가금속 회수 후 여액 중 유해 성분의 제거 공정

유가금속 회수 후 여액 중에는 미량의 금속 및 산 성분이 함유되어 있는데, 이를 회수 또는 제거하기 위해 이온교환 및 용매 추출법을 이용하기도



하나, 이와 같은 추출 분리 회수 방법은 효율과 비용면에서 많은 문제가 존재하므로 적용하기가 쉽지 않다. 그러므로 본 기술개발에서는 발생된 여액을 2,000L 규모의 용기에 모은 후, 산도를 조절하는 중화처리 과정을 거쳐 금속 수산화물 침전으로 정치시킨 다음 제거하는 것이 바람직할 것이다. 중화 침전 시 적당량의 NaOH 알칼리 시약을 가하면 폐기물 여액의 pH가 12 이상으로 증가되어 대부분의 금속이온이 수산화물 침전을 형성하므로 간단히 제거할 수 있다. 특히 여액 중에 함유된 유해 성분인 납 이온이 $Pb(OH)_2$ 침전물로 제거되므로 유해한 폐액 처리에 매우 효과적이다.

아. 태양광 셀 폐 모듈의 대단위 처리의 공정개요

전술한 그림 1의 자세한 기초공정과 대단위 처리 공정 내용을 참조하여 종합적으로 정리하면, 다음과 같이 요약할 수 있다. 하루 1ton/day 규모의 대단위 처리에서는 태양광 폐 모듈의 성능검사, 알루미늄 프레임의 해체 분리 회수, 강화유리의 파쇄, 강화유리의 열박리 회수, 실리콘 셀 모듈에 부착된 back sheet의 분리 제거, 실리콘 셀

모듈의 분쇄 및 체질, 실리콘 셀에 부착된 EVA 열처리, 열처리된 실리콘 셀 분말 중의 유기금속 침출 및 다단 여과에 의한 유기 물질회수, 침출 모액 중의 유기금속 성분의 침전회수 및 침전회수 후 폐액 중의 유해 금속 이온의 침전제거 공정을 거치게 되는데, 구체적인 조건과 효율 및 회수에 대해서는 기초연구와 대단위 시험 공정에서 상세히 설명하였다. **e**

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2017년 선정 사외 위탁 연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었습니다(과제번호 : R17EH01).

References

1. Kim, J.S., Cho, J.Y., Lee, J.K., et al., 2019 : Recycling of End-of Life Photovoltaic Silicon Modules, J.of Korean Inst. of Resoures Recycling, Vol. 28, No.5, 2019, 19-29
2. Kim, J. S., Cho, J.Y., Park, A.R., et al., 2020 : Development of Recycling Technology for PV Module Waste and Demonstration of Biz Model, Korean Electric Power Corporation Research Report, pp1-362