

# CdTe 와 CIS 박막 모듈의 운전시 건강, 안전 및 환경위험에 대한 고찰

이성래

전북대학교 대체에너지 공학과(srlee@utopiakorea.net)

## Development of Health, Safety and Environmental Risks from the Operation of CdTe and CIS Thin-Film Modules

Lee, Sung-Rae

Dept. of Renewable Energy, Chon-Bok University(srlee@utopiakorea.net)

### Abstract

Solar cells are renewable energy source which is not only environmentally friendly but also economically viable. For that matter, thin film materials are in observed with great in terest by a number of sources throughout the nations.

Among these, CdTe (Cadium telluride) and CIS (copper indium diselenide) are the latest commercial products that are gathering attention in the solar cells markets. However there are some downsides to this newly invention.

Since the materials are embedded, in the occasion of damage, certain amount of module residue can be released to water or soil.

This paper outlines the results of our outdoor leaching experiments on photovoltaic (PV) samples broken into small fragments and been observed for 1 year.

keyword ; 카드뮴 텔루라이드 ( Cadmium Telluride), 커퍼 인다움 디셀라이드 ( Copper Indium Diselenide), PV( photovoltaic, 광기전성의 )

### 1. 서 론

2003년경부터 미국과 유럽에서 상용화되기 시작한 박막필름 모듈을 이용한 태양광 발전소는 유럽의 선풍적인 인기로 힘입어 세계시

장에서 금년 소요분의 모듈을 구할 수 없을 정도로 널리 사용되고 있다. 이 박막 필름 모듈은 2010년에 이르면 약 4440MWp의 생산에 육박 할 것으로 예상되고 있으며, 현재는 다국적 기업인 First Solar사의 제품이 효율

투고일자 : 2008년 5월 7일, 심사일자 : 2008년 5월 9일, 게재확정일자 : 2008년 6월 14일

교신저자 : 이성래 (srlee@utopiakorea.net)

뿐만 아니라 시장 점유율 면에서도 세계 시장을 선점하고 있는 상황이다. 우리나라에는 아직 에너지 관리공단 등에서 모듈의 인준 설비가 준비되어있지 않아서, 시장에 활발하게 소개되고 있진 않지만, 2008년을 기점으로 변경된 발전지원차액제도 하에서 그 이점을 십분 살려 본격적으로 도입되기 시작할 것으로 보인다.

때맞춰, 국내 PV 관련 기업들도 일본과 독일에서 생산되는 실리콘 모듈의 높은 장벽을 인식하고, 반도체 5세대 라인의 기술을 최대한 이용한 박막 필름 모듈의 세계 시장 선점을 위한 공격적인 투자 계획이 발표되고 있어서 고무적이며, 이런 본격적인 박막 모듈의 한국 시장 상륙에 맞추어, 저자와 First Solar사는 독일의 First Solar workshop을 이용하여 박막필름 모듈이 가지는 논제의 위험성에 대해서 몇 가지 추정을 한 후, 시편을 이용한 독일 음용수 기준과 비교 실험 분석을 통해 얻은 분석치를 바탕으로 국내에서 발생 가능한 위험요소의 결과를 파악하여 추후에 국내의 발전사업자나 박막 필름 모듈로 건설된 PV발전소 관련 종사자와 전문가들이 CdTe나 CIS모듈의 위험성에 대해 의견한 대처 자세를 갖게 하고자 한다.

### I. 논제의 위험 고찰

이 고찰은 한 가지 형태의 CIS(copper indium diselenide)와 4가지 각기 다른 형태의 CdTe(cadmium telluride) 박막 모듈에 묻혀있는 물질들이 논제에 주는 영향을 작은 조각으로 쪼개진 태양전지 모듈을 통한 외부 용해 실험의 결과를 토대로 확인시켜 준다.

우선 거주하는 집의 지붕이나 정원에서 모듈사고가 발생하여 물이나 흙으로 위험 물질이 용해되었다고 추정한다. 이 추정은 용해사고로 적은양의 모듈 물성이 물이나 흙에 흘러 들어간 것을 뜻함을 명시해두는 바이다.

CdTe 모듈의 경우에 최악의 시나리오는

수집된 물에 용해된 카드뮴의 농도가 독일의 음용수 한계 농도 치 보다 높지 않다고 추정하고, CIS모듈의 경우에는 용해요소의 농도가 독일의 음용수 한계 농도 아래의 일 혹은 이 등급 정도로 추정한다.

우선, 땅에 떨어진 조각난 CIS나 CdTe 모듈이 일 년 동안 흙에 용해된 이후에도 자연요소 농도의 심각한 변화에 대한 증거가 관찰되지 않았다.

고효율 및 큰 용량의 CdTe나 CIS모듈은 회로기관 위에 붙여진 다양한 작용 층으로 구성 되어있다. 태양광 모듈의 저렴한 운전의 목적은 오랜 기간 동안에 모듈의 안정성과 제품의 질을 보증하도록 최적화된 재질 선택이 요구된다.

많은 태양광 모듈의 발전소 적용에 있어서, 모듈은 매우 험한 환경조건에 노출이 된다. 어떤 모듈들은 제한된 유지 보수 하에서 사용되며, 인간의 잘못된 취급이나 기후의 영향으로 운전 중에 기술적인 결함이 일어날 수도 있다. 이런 문제점들은 자연 환경 속으로 관련 물질이 투과되어 일어난다.

### II. 위험 요소 분류 방법

박막 필름 모듈이 환경과 인간에게 미치는 잠재적인 위험요소는 위험물질의 배출로 인해 발생할 지도 모른다. 그러므로 우리는 먼저 구매된 모듈에 들어있는 화학적 물질의 량과 형태를 확인해야 한다. 그 방법은 문헌을 참고하거나 제작회사에 의뢰하여 화학물질들의 질량상의 포함농도와 자재 선택을 조사하는 것이다.

위험한 물질의 투하는 깨지거나 부스러진 모듈조각들에 의해서만 일어날 수 있으며 이는 빗물이 모듈 작용 층에 근접 할 시나 모듈 파편의 물질들이 용해되었을 때를 의미한다.

우리는 깨진 모듈 조각을 가지고 실행한 외부 실험을 통해서, 독일의 뮌헨시에 위치하

여 정상 운전 중인 태양광 발전소의 모듈 물질의 용해율을 결정하였다.

실험에는 3개의 박스가 준비되었고, 한 박스에는 약 10mm 크기의 부서진 모듈 조각이 들어 있고, 다른 한 박스에는 깨지지 않은 모듈, 나머지 박스에는 모듈이 없었다. 그 후 폭우가 내린 후 각 박스를 지나온 빗물이 견본용 병에 모이게 했다.

이 병에 모인 빗물 중 용출액은 주말단위로 분석하였으며 3개의 박스는 48도의 기울기로 남향으로 놓아두었다.

실험상의 용해 자료와 이론적인 모델을 결합하여 우리는 지붕 위에 태양광 모듈을 설치한 주택을 선택하여, 모듈이 물과 흙의 농도에 영향을 미친다는 것을 가정하고 두 가지 시나리오로 나눠 실험을 진행하였다. 즉, 모듈 물질의 위해요소들이 인간의 건강과 환경에 미치는 잠재적 위험의 정도를 알아보기 위해 깨어진 모듈 조각 하나는 지붕 위에 두고 다른 하나는 땅으로 떨어지게 하여 예상되는 농도를 법적으로 지정 해놓은 지침 선의 한계 농도와 비교하였다.

### III. 물질(모듈의 물질 내용)

표 1은 모듈에 포함된 물질의 형태나 양이 연구의 틀 내에서 조사한 내용을 보여준다. 각 수치들은 박막필름 모듈이 운전 시에 존재하는 물질의 양을 나타낸다. 박막 필름을 부착 시에 사용하는 유리 회로기판의 중량은 4.7-12.4kg m<sup>-2</sup> 까지 변한다. 총 4개의 CdTe 및 CIS모듈의 유리의 앞뒤 덮개를 포함하여 전체의 케이스에 넣는데 들어가는 자재의 양은 총 10kg으로 결정했다. 그러나 실제로 케이싱 만드는데 들어가는 물질의 분담량은 상당히 변할 수 있다. 모듈 CdTe 3은 상업적으로 가능하나 스크린 복사 기술 때문에 오히려 두꺼운 CdTe와 CdS층을 사용한다,

## 2. 시나리오 I (모듈의 파편이나 알맹이가 정원수나 가정 용수에 물질의 인입 가능성)

원칙적으로, 용해된 알맹이의 경우는 미생물학적으로 가능성이 있으며, 인간에게 잠재적 영향을 준다. 이 단원에서 우리는 정원 용수나 가정 용수에 사용되는 주택 지붕 위의 태양광 모듈 파편을 가정하여 관찰한다.

표 1. Material content (in g m<sup>-2</sup>) of thin film modules.

	CdTe 1	CdTe 2	CdTe 3	CdTe 4	CIS
CdS	0.96	28.9	48.2	1.4	0.24
CdTe	12.4	37.2	62.0	15.5	-
Cd total	6.55	39.8	66.4	8.3	0.19
Te	6.6	19.8	33.0	8.3	-
Cu	-	-	-	-	1.95
In	-	-	-	-	3.75
Se	-	-	-	-	4.95
Mo	-	-	-	-	8.16
Zn	7	-	-	-	6.78
Glass substrate	4960	7400	4660	12400	4960
Encapsulation material	10000	10000	10000	10000	10000

표 2. Comparison of the elements concentrations of the broken CdTe and CIS modules and the German regulations on drinking water.

Element	Concentration in the outdoor test eluates	Concentration in the water collected from the roof	Limitation of the concentration of the German drinking water regulation
CIS			
Zinc	2.1mg l <sup>-1</sup>	10.5µg l <sup>-1</sup>	5mg l <sup>-1</sup> (guideline)

Molybdenum	2.5mg1 <sup>-1</sup>	12.5µg1 <sup>-1</sup>	-
Selenium	0.4mg1 <sup>-1</sup>	2µg1 <sup>-1</sup>	10µg1 <sup>-1</sup>
Cadmium	10µg1 <sup>-1</sup>	50ng1 <sup>-1</sup>	5µg1 <sup>-1</sup>
Indium	30µg1 <sup>-1</sup>	150ng1 <sup>-1</sup>	-
CdTe			
Cadmium	1mg1 <sup>-1</sup>	5µg1 <sup>-1</sup>	5µg1 <sup>-1</sup>
Tellurium	0.3mg1 <sup>-1</sup>	1.5µg1 <sup>-1</sup>	-
Nickel	0.1mg1 <sup>-1</sup>	5µg1 <sup>-1</sup>	50µg1 <sup>-1</sup>

아래의 가정들이 시나리오를 특정 하게 설명한다.

- i) 깨진 모듈의 면적이 0.5m<sup>2</sup>
- ii) 전체 태양광 지붕 면적이 100m<sup>2</sup>
- iii) 면적 비율이 1/200임.

음용수 2의 독일 규정은 음용수나 가정용수의 한계 농도를 제공한다, 그 목적은 상습적인 노출의 경우에도 인간에게 주는 부정적인 영향을 피하게 하기 위한 것이다. 가장 최악의 시나리오에서는 규칙적으로 지붕에서 모아져서 내려오는 오염된 물을 인간이 먹는다고 가정한다. 그러므로 독일 음용수 규정의 한계 농도는 상기 가정 하의 지붕에서 모아져 내려오는 물에 용해된 물질요소의 농도와 잘 비교된다.

표 2의 두 번째 칸은 외부 시험 시에 얻은 용출 액의 농도를 보여준다. 그 요소의 농도는 가장 열악한 시험조건 하에서 채취한 것이다. 다시 말하면, 의도적으로 모듈을 여러 개의 파편으로 깨는 경우이다. 더욱 자주 일어나는 사고는 기계적 응력이나 돌의 충격으로 깨지는 파편이며 이런 사건은 모듈에 조그마한 파괴를 가져온다.

표 2의 세 번째 칸은 지붕에서 모아진 물에서의 요소 농도를 나타낸다. 그 결과는 태양광 지붕 면적이 100 m<sup>2</sup>인 지붕 위에 떨어진 빗물과 면적이 0.5m<sup>2</sup>밖에 안 되는 모듈 파편

을 씻기고 나온 물의 요소 농도가 일치함을 보여준다.

표 2의 네 번째 칸은 독일 음용수 규정에 나타난 한계 농도를 나타낸다,

CIS모듈 형태에서, 아연과 카드뮴의 함량은 대략 2 정도이고, 셀레늄 농도는 독일 음용수 허용 농도 보다 아래인 일 이 등급 정도다. CdTe 모듈의 카드뮴 농도는 독일 규정치 내에 있고, 대체로 가장 최악의 시나리오 에서도 오직 인간에게는 경미한 위험만이 예견된다고 본다.

### 3. 시나리오 II (모듈의 파편 흙에 인입시)

박막 필름 태양광 모듈 조각의 방출로 인하여 위험한 물질이 물에 씻겨 내려가든지 혹은 그 외의 방법으로 흙으로 들어간다. 깨진 모듈을 통한 외부 시험에서 얻은 자료를 비교해보면, 표 3의 Kloke list 3에서와 같다. 이 리스트는 오차가 많은 개별적인 위험 요소들의 전체량에 대한 기본 자료가 상당함을 보여준다.

이 자료들은 폐수공장의 규정을 위한 기본적인 지침용이나 흙에 들어있는 중금속 오염에 대한 독일 일부 지역의 규정 지침으로도 사용되었다.

이 시나리오는 아래의 가정 하에 특정 지어진다.

- (i) 일 년 동안 정원에 남아있는 결함을 가진 모듈

표 3 . Broken CIS and CdTe modules; increase and natural concentrations in soil-comparison to Kloke list 3

Element	Increase of concentration in soil	Natural concentration in soil	Tolerable concentration(Kloke)
CIS			
Cadmium	83µgkg <sup>-1</sup>	0.1-1mgkg <sup>-1</sup>	3mgkg <sup>-1</sup>

Gallium	16 $\mu$ gkg <sup>-1</sup>	5x10 <sup>-4</sup> % <sup>a</sup>	10mgkg <sup>-1</sup>
Indium	20 $\mu$ gkg <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup> <sup>5</sup> mgkg <sup>-1a</sup>	-
Copper	10 $\mu$ gkg <sup>-1</sup>	1-20mgkg <sup>-1</sup>	100mgkg <sup>-1</sup>
Molybdenum	2.2mgkg <sup>-1</sup>	0.5-5mgkg <sup>-1</sup>	5mgkg <sup>-1</sup>
Selenium	0.3mgkg <sup>-1</sup>	0.1-4.3mgkg <sup>-1</sup>	10mgkg <sup>-1</sup>
Zinc	2.2mgkg <sup>-1</sup>	3-50mgkg <sup>-1</sup>	300mgkg <sup>-1</sup>
CdTe			
Cadmium	240 $\mu$ gkg <sup>-1</sup>	0.1-1mgkg <sup>-1</sup>	3mgkg <sup>-1</sup>
Nickel	30 $\mu$ gkg <sup>-1</sup>	2-50mgkg <sup>-1</sup>	50mgkg <sup>-1</sup>
Tellurium	160 $\mu$ gkg <sup>-1</sup>	10 $\mu$ gkg <sup>-1a</sup>	-

(ii) 씻긴 파편들이 모듈 면적 전체에 약 25cm깊이로 분산된 상태

(iii) 흙 량의 밀도가 1.2kg l-1( Ref. 6에 보면 흙의 밀도가 1.2-1.8kg l-1범주임)

자료를 보면 대부분의 경우 깨진 모듈에서 나오는 용출 액으로 인한 흙 속 요소의 자연적인 풍부함이 약간 증가함을 볼 수 있다. 더군다나, 흙 속에 거의 모든 요소들의 농도가 Klocke list의 허용농도 이하에 머물 또한 알 수 있다.

#### 4. 결 론

태양광 발전소의 정상적인 운전 하에서 지구 환경에 방출되는 위험한 요소가 인간에게는 최후에는 부정적인 사고를 일으킬 수 있다. 그러나 주거용 주택의 정원이나 지붕 등에 깨진 모듈을 이용한 용해 실험을 여러 가

지 시나리오를 통해서 시험 해본 결과 아직은 인간에게나 지구 환경에 심각한 피해를 주는 위험요소를 발견치 못했다.

그러나 오랜 기간 다량 생산 시에는, 모듈의 수명을 다할 시에 나타나는 거대한 물량의 결함 모듈을 예상치 않으면 안 된다. 이량은 새롭게 수명이 시작하는 모듈의 량과 맞먹고 그렇게 되면, 매립지에 버려지는 모듈은 두 가지 이유로 한정되기 때문이다. 즉, 금속이나 유리처럼 고품질 자재들의 손실과 매립지로 유출되는 침출수에 포함된 위험 물질의 증가로 용해 농도를 증가시켜 버리기 때문이다.

이러한 상황은 dumped module의 체적 농도가 시나리오 상의 땅에 버려지는 부서진 모듈의 량보다 월등히 많아질 때 일어난다. 결과적으로, 태양광 모듈 재활용은 개발노력과 미래의 제작에 필요한 중요한 주제가 될 것이다. Brookhaven 국가 실험실의 Vasilis Ftherakis가 주장한대로 박막필름 모듈은 운전 시에 인간과 환경에 위협이 되지 않으며, 모듈 사용 시에 어떤 분출물도 배출되지 않지만, 오직 주요한 Issue는 만일 모듈이 더 이상 불필요한 30년 후에 무엇을 할 것이며 기술적으로 상업적으로 타당한 재활용방법을 찾는 것이 지구 환경의 관심을 해결하는 길이 될 것이다. 이미 일부 제작회사들은 세계적인 보험사들과 제휴 하에 재활용 방법을 제시 하고 있으나 우리는 보다 적극적인 사고로 한국 시장에서의 취급방안과 재활용 연구에 몰두해야 할 것이다.

#### 후 기

본 고찰은 본인이 소속한 독일 본사의 주선으로 Thin-Film PV module 공급사인 First Solar사와 함께 지난 8월과 11월 Utrecht workshop에서 두 차례 실험된 내용을 근간으로 하고 있다. 또한 이를 한국시장에서의 예상 모델과 접합하여 First Solar Lab에서

공동으로 고찰하였다. 모든 실험 수행 과정에서 도움을 주신 독일 Colexon사의 상하이 아시아 본부장 Mr. Henning Schulze씨와 First Solar사의 독일 공장 부사장인 Mr. Jos van der Hyden씨에게 깊은 감사를 드린다. 추후에는 TF PV 모듈의 케이싱작업 시에 분출되는 emission과 운전시의 효율 저하 등을 다른 각도에서 고찰하여 보고자 한다.

hemistry, Vol.II/3, Springer Verlag, Heidelberg, 1972,1978.

### 참고 문헌

1. H.Schmid, 'Environmental and Health Aspects of some technologies to produce thin film modules', Diploma Thesis, Munich, 1995.
2. 'Regulation on drinking water and water for companies in the food-industry'(Drinking Water Regulation-Trinkw V) of December 5th, 1990, Federal Law Gazette 66, Part I, 2612-2529(1990).
3. A Kloke, 'Orientation booklet for acceptable contents of some elements in Kulturbden (Points of reference 1980)', Mitt. VDLUFA, Edition 1-3 (1980).
4. 'Regulation on Sewage Sludge AbfKlr V as of June 25th, 1982', Federal Law Gazette 21, Part I, 734-738 (1982).
5. Ordinance of the Ministry of Nutrition, Agriculture and Forest Management, Baden-Wrttemberg on heavy metal loads in grounds, GABl, AZ.:24-2310/3, (1980).
6. P.Schachtschabel, H.-P. Blume, G. Brummer, K.-H.Hartge and U. Schwertmann, in Textbook on Ground Studies, ed. by F.Scheffer and H.G. Schachtschabel, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1989, p.147.
7. K.H.Wedepohl(Ed.). Handbook of geoc