

## 디스플레이 투명전극용 인듐-주석-산화물의 전기화학적 재활용 공정에 관한 전과정 평가

김경일, 이나리, 이수선, 이영상, 홍성제<sup>†</sup>, 손용근<sup>‡</sup>, 홍태환\*

한국교통대학교 신소재공학과 나노소재연구실

380-702 충북 충주시 대소원면 대학로 50번지

<sup>†</sup>전자부품연구원 에너지디스플레이연구본부

463-816 경기 성남시 분당구 새나리로 25

<sup>‡</sup>성균관대학교 화학과

440-746 경기 수원시 장안구 서부로 2066

(2013년 8월 2일 접수; 2013년 9월 5일 수정본 접수; 2013년 10월 18일 채택)

## Evaluations of Life Cycle Assessment on Indium-Tin-Oxide Electrochemical Recycling Process

Raymund K.-I. Kim, Na-Ri Lee, Soo-Sun Lee, Young-Sang Lee, Sung-Jei Hong<sup>†</sup>  
Young-Keun Son<sup>‡</sup>, and Tae-Whan Hong\*

Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation

50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk 380-702, Korea

<sup>†</sup>Division of Energy-Display R&D, Korea Electronics Technology Institute

68 Yatap-dong, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 463-816, Korea

<sup>‡</sup>Department of Chemistry, Sungkyunkwan University, Natural Science Campus

300 Cheongcheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi 463-816, Korea

(Received for review August 2, 2013; Revision received September 5, 2013; Accepted October 18, 2013)

### 요 약

현재 인듐-주석-산화물(Indium-Tin-Oxide, ITO)은 디스플레이 제품에 투명 전극으로 사용된다. 하지만 인듐과 주석의 자원 고갈 문제와 ITO 제조 공정에 많은 에너지가 소비되어 최근에는 ITO 대체물질의 개발과 ITO 재사용 및 재활용에 관한 연구가 요구되고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 ITO를 재활용 하게 되면 수치상으로 환경부하 값의 변화 추이를 확인하기 위해서는 전과정 평가 기법을 이용한 전과정 평가가 매우 적절하다. 따라서 전과정 평가 수행을 위해 공정상에서 투입물질과 생성물질을 구분하고, 데이터 베이스(DB)를 적용하여 환경성 평가 결과를 영향 범주별로 계산하였으며, 34%를 폐기함에 따라 각각 해당하는 환경부하 값이 계산되었다. 화학당량적으로 ITO의 양을 계산하여 환경부하 값을 결정할 경우, 산성 물질과 자원고갈에 해당하는 값들이 계산되었고, ITO를 1 ton 생산하여 34%를 폐기할 경우 \$ 476를 땅에 묻는 결과가 도출되었다.

**주제어** : 전과정 평가, ITO, 재활용, 재사용, 환경부하 값

**Abstract** : Indium-tin-oxide (ITO) material was had to use in display application as transparent electrode. However it would be problems comes up, the depletion of indium, tin and energy consumption of production process. Therefore recently trend was demanded alternative ITO material and recycling/reused ITO. In this conditions, the environmental impact have to express correct value about recycling/reused ITO process. The life cycle assessment was valuable method in this process. Thus first step was carried out separating in/out put (material) sources and then, exactive data base (DB) was applied. The result of environment impact was calculated by affect categories and recycling rate was set to 34% (This value was measured in previous project). The rate (g) of ITO material was calculated by chemical equivalent. In result, environmental impact were revealed acidification potential and abiotic depletion and if do not recycle/reuse ITO, \$ 476 per 1 ton waste in land.

**Keywords** : LCA, ITO, Recycling, Reuse, Environmental impact

### 1. 서 론

현 시대는 정보화 시대로써 많은 디지털 정보기기를 사용하고 있다. 이에 따라 많은 소비자들은 전자기기를 구매하고 폐기시키고 있다. 또한, 정보기기들은 디자인 및 기능 변경에

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: twhong@ut.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2013.19.4.388

다른 개인적 변심과 고장 및 기능장애, 사용주기가 다한 제품들에 대해 폐기가 되는 실정이다. 현재 전자기기의 수명을 최대 10년 정도로 보고 있다.

한편, 전자기기에는 철, 구리, 알루미늄 및 비철재료, 유가금속 등을 포함하고 있다. 따라서 단순 폐기할 경우 환경적, 경제적 손실을 부담하게 된다. 또한, 디지털 정보기기의 디스플레이 부분을 살펴보면 금, 은, 구리 등을 포함한 유가금속이 주요 부품으로 사용되어 지고 있고, 특히 인듐-주석-산화물 (Indium-Tin-Oxide, ITO)이라는 물질이 투명전극으로 사용되어 지고 있는데 인듐과 주석에 대한 자원고갈 문제와 제조 공정상에 생성되는 각종 화학 폐기물들 때문에 ITO를 대체하는 물질 개발에 대한 노력들을 하고 있다[1].

ITO는 디스플레이 제품에 핵심적으로 사용되는 물질이다. 이러한 이유는 적외선을 반사시키고 자외선과 가시광선은 투과하여 가시광선 영역에서는 투명한 광학적 성질과  $10^{-3} \Omega/\text{cm}$ 의 낮은 비저항 때문이다. 디스플레이 제품은 구조상 적층 형태로 제조되는데 색구현 장치로부터 만들어진 여러 가지 가시광선들이 브라운관을 통해 나타나야하기 때문에 투명전극이 반드시 필요하다. 현재 디스플레이 제품에서 ITO의 사용은 강제적이며 이로 인해 자원 고갈에 대한 부담을 제조사 및 소비자들에게 전가되고 있다. 또한, 폐기에 따른 환경적, 경제적 부담도 제조사와 소비자들에게 돌아가고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 ITO 대체물질 개발이 반드시 필요하다. 하지만 대체물질에 대한 신뢰성 확보와 경제적 요건을 갖추기 위해 즉흥적 도입이 불가능한 상태이다. 그러므로 현재는 ITO를 재활용 및 재사용하는 공정 개발이 반드시 필요한 상황이다 [2].

따라서 본 연구에서는 전과정 평가 방법(life cycle assessment, LCA)을 통하여 ITO 재활용 및 재사용에 따른 환경적, 경제적 변화를 고찰하고 이 결과를 통하여 ITO 재활용 및 재사용 공정의 필요성에 대해 표출하고자한다[2,3].

## 2. 실험 방법

### 2.1. 디스플레이 구조

현재 디스플레이 제품은 백라이트 구성에 따라 크게 플라즈마 디스플레이 패널(plasma display panel, PDP)과 초박막 트랜지스터를 사용하는 액정표시장치(thin film transistor-liquid crystal display, TFT-LCD)로 구분된다. 각각의 디스플레이 제품에 대한 구조를 Figure 1과 2에서 나타내고 있다. 적층 방식과 리소그래피 방식을 이용하여 디스플레이의 배선 및 기판을 형성하므로 ITO 전극역시 코팅 공정을 이용하여 제조한다. 또한 구조상 상/하판으로 구분할 수 있는데 상판에는 유리와 ITO 층 등으로 간단한 구조로 되어 있는 반면 하판은 색구현 장치를 포함한 각종 배선 및 패턴들이 있어 ITO 분리가 매우 어렵다. 따라서 디스플레이 제품의 복잡한 구조와 ITO의 사용량이 극히 제한적이므로 폐기된 ITO 타겟 분말을 이용하여 평가 물질을 선정하였다[6]. ITO 재활용 공정 개발은 성균관대학교에서 전기화학적 재활용 공정[7]을 최적화하였고, 폐기상태의 0.50 g의 ITO 분말을 0.33 g 재활용하는데 성공하였다.

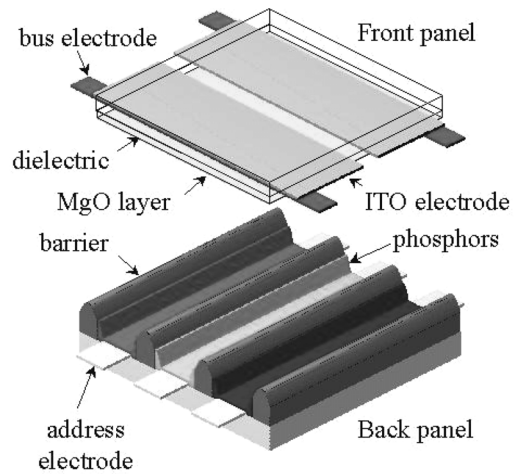


Figure 1. The structure of PDP[4].

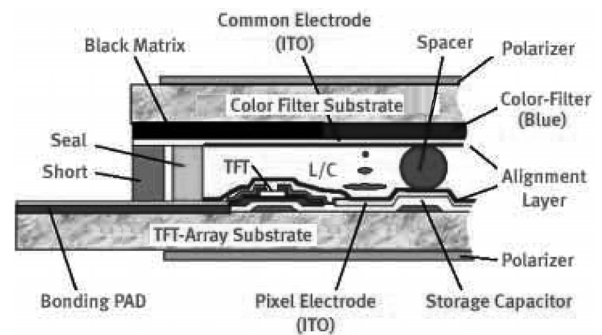


Figure 2. The structure of TFT-LCD[5].

### 2.2. LCA 평가 프로그램 선정

유럽에 속한 기업들은 대부분 환경성 평가에 대한 이해와 지식수준은 유럽 국가를 제외한 경제협력개발기구 국가에 비해 월등히 높은 상황이다. 그렇기 때문에 유럽에 속한 기업들에서 이미 많은 전과정 평가 결과들을 보고하고 있으며 특히, Gabi와 SimaPro라는 전과정 평가툴을 많이 사용되어지고 있다 [8]. 이러한 이유는 본래 전과정 평가에서 데이터 베이스(DB)가 차지하는 비율이 80% 이상인데 이 두 가지 프로그램은 전문적이고 지속적으로 업데이트가 가능한 예코인벤트 DB를 사용하고 있다. 따라서 다른 프로그램에 비해 이용가치 및 적용분야가 다양하다고 볼 수 있다. 본 연구를 수행함에 있어 최신 데이터베이스와 추가적인 데이터베이스를 보유한 Gabi program을 이용하였으며 평가툴의 정확한 버전은 Gabi 6이다.

### 2.3. 데이터베이스 적용 방법

데이터베이스에서 해당 물질인 ITO 재료를 검색하면 실질적인 환경부하 값을 제공하지 않는다. 따라서 프로그램 상에서 ITO에 대한 데이터베이스를 공정에 적용하여도 환경 부하 값은 계산되지 않는다. 이러한 이유는 전과정 평가 툴 대부분이 데이터베이스 중심으로 설계가 되어 있기 때문이다. 일반적인 화학물질, 재료, 공정에 대한 환경 부하 값은 계산되어

있는 반면 특수성이 포함된 화학물질, 재료, 공정에 관한 정보는 없다. 따라서 아래의 두 가지 방법으로 평가 하였다.

1) ITO의 조성비를 9:1을 설정하고 원자량을 이용하여 화학당량적으로 계산하였다( $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{SnO}_2 = 9 : 1$ ).

2) 상용화 ITO 제품 공정에 따른 환경부하 값을 재활용 비율에 맞게 계산하였다(ITO target powder/ ITO sintered target).

### 3. 결과 및 고찰

Figure 3은 ITO 조성비로부터 화학당량적으로 계산하였다. 계산된 ITO의 양을 설정하여 성균관대학교에서 개발한 전기화학적 재활용 공정[7]을 통해 폐기되는 재료에 대한 환경성 평가결과 값이다. ISO 14404에 의거 7가지의 환경영향 범주에 대한 결과 값이 도출되어야 하는데 Centre of Environmental Science (CML 2001, Nov. 2010) 기법을 이용하여 정규화 과정을 통해 계산한 결과 산성화(acidification potential, ADP)와 자원고갈(abiotic depletion, AD)에 대한 영향범주 값만 도출되었다. 이는 CML 기법에 따른 계산 결과이지만 공정상에 다른 환경문제를 야기시키는 재료들이 포함되지 않는 것으로 판단된다. 공정상에서 산/알칼리성 화학물질을 사용함에 따라 ADP가 99.98%로 높게 나타났으며, 인듐과 주석에 따른 AD 문제가 0.02%로 계산되었다. 공정상에서 대부분의 산/알칼리성 물질을 환원이나 식각, 세척 등에 사용되어 한번 사용하여 폐수로 처리가 되는 데에 반해 인듐과 주석은 재활용 공정을 통하여 34% 밖에 폐기가 되지 않아 환경영향 범주 값이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한 인듐과 주석은 자연 상태에서 산화물형태로 존재하여 열역학적으로 안정한 상태이므로 산소를 포함한 기타 가스등에 노출되어도 반응이 일어나지 않으므로 2차적인 환경부하 요소를 지니지 않은 것으로 판단되며 이에 따른 다른 영향범주에 해당하는 값들이 계산결과 나타나지 않았다.

Figure 4는 AD를 차지하는 비율을 실질적으로 계산한 결과 값이다. 통상적으로 사용되는 ITO는  $\text{In}_2\text{O}_3$ 과  $\text{SnO}_2$ 의 비율이 9:1이다. 하지만 결과 값은 8:2로 나타났다. 이 결과 실질적으로 자원고갈 측면에서 인듐보다 주석에 민감하다는 결과가 도출되었다. 하지만 전 세계적으로 각종 정보화 기기를 보급 및 시장이 확대됨에 따라 핵심 부품 재료로 사용되는 인듐과 주석 모두 자원이 국지적으로 매장되어 있고 매장량이 한정

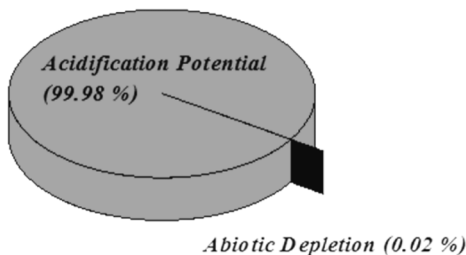


Figure 3. The result of impact assessment (categories, CML 2001; Nov. 2010).

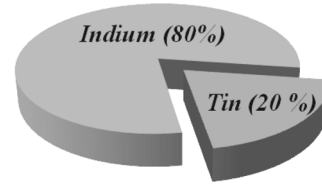


Figure 4. The level of contribution on abiotic depletion.

됨에 따라 인듐과 주석 모두 자원고갈 문제에 심각하게 당면하고 있다고 판단된다.

실험 공정상에서 0.17 g만을 폐기할 경우  $\text{SO}_2$  화학 물질로 환산하게 되면 0.01 kg의  $\text{SO}_2$ 를 폐기하게 된다. 공정이 랩스케일이라 환경오염 물질 배출이 적은 듯하나 공장이나 상업용으로 ITO를 재활용하게 되면 1 ton 이상의 ITO를 배출할 가능성이 높다. 단순히 폐기 비율로 봤을 때 1 ton 기반으로 계산할 경우 3,400 kg  $\text{SO}_2$ 가 대기나 물 형태로 버려지게 되는 것이다. 또한 자원고갈 측면에서 달러로 환산하게 되면 본 공정은 \$ 0.0014로 계산되며 1 ton 기반으로 계산하게 되면 \$ 476, Fe 기준으로 살펴보면 6,800 kg을 땅에 파묻는 꼴이 된다. 따라서 단순히 전과정 평가 결과를 살펴보더라도 ITO 재사용 및 재활용 공정 최적화가 우선시 된다. 또한 ITO 생산 공정 역시 친환경적인 공정 개발이 요구되고 있는 실정이다.

Figure 5는 ITO양을 화학당량적으로 계산한 후 성균관대학교에서 개발한 전기화학적 공정을 통하여 ITO를 재활용하고 34%를 폐기하였을 때 소비자가 부담해야 하는 환경 부하 값을 나라별로 정리한 그래프이다. 국가별 차이는 대륙별 나라별 인구차이, 에너지 생산 방식, 에너지 소비 구조, 산업 구조, 사회 구조, 경제 구조 등 종합적이고 복합적인 차이에 의해서 판단된다. 통상적으로 유럽의 경우 국내총생산(gross domestic product, GDP) 기준으로 계산하는 반면 대한민국의 경우 수출형 산업구조를 가지고 있어 국민총생산(gross national product, GNP)을 기준으로 계산되어 지고 있다. 한편 네덜란드의 경우 유럽 대륙에 속해 있음에도 불구하고 유달리 환경 부하 값이 높게 나타났는데 이는 네덜란드의 지리적 영토 면적

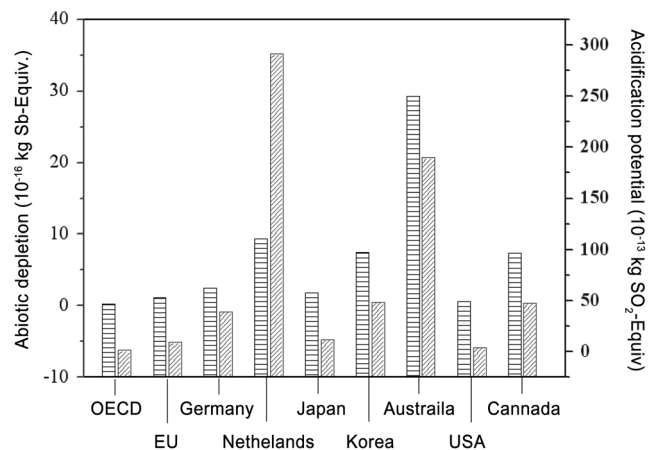


Figure 5. The result of CML 2001 (Dec. 2007) on country by country.

이 작고 낮은 자원 매장량 그리고 적은 인구에 기인한 것으로 판단된다. 또한 아시아 지역에서는 대표적으로 물 부족 국가로 알려진 호주의 경우 유달리 높게 AD에 해당하는 환경 부하 값이 높게 나타났다. 앞서 언급했던바와 같이 산/알칼리성 물질의 경우 공정상에 사용된 후 폐수로서 처리되기 때문에 물 부족 국가인 호주의 경우 산성화 영향범주에 다른 국가 및 대륙에 비해 민감할 수밖에 없다. 또한 희토류 금속의 경우 호주에 많은 매장량이 없고 산업구조상 공산품 생산이 어려워 자원고갈측면에 해당하는 AD도 상대적으로 민감한 결과가 도출되었다.

Table 1은 상용화된 ITO target 용 powder 1 kg을 범용 공정을 통해 제조하여 66%는 사용하고 34%를 폐기하였을 때 발생하는 환경 부하 값을 나타낸다. 위 결과 각각에 해당하는 환경부하 값은 해당 범주 지역이 커질수록 줄어드는 경향을 나타냈다. 또한 EU 중에서도 네덜란드의 경우 앞서 언급했던 결과와 마찬가지로 인구, 산업적, 경제적 형태 등에 의해 상당히 환경적으로 민감하게 나타났다. 한편, 해당 범위가 늘어날수록 환경 부담을 인공으로 나눠줄 수 있기 때문에 그 영향 값들이 감소해야 하는데 HTP는 오히려 증가하는 경향이 나타났다. 이는 경제협력개발기구 국가와 같이 경제적으로 부유한 나라들의 경우 기후변화에 민감하게 대응할 뿐만 아니라 대기오염 물질을 배출하는데 필터기술 등을 적용하여 배출 가스를 최소한으로 줄여서 배출하는 반면 개발도상국들의 경우 경제협력개발기구 가입국과 달리 기술 및 환경적 가치에 대한 인지가 낮아 비교적 쉽게 환경오염 물질에 노출되기 쉽다. 따라서 영향 범주가 늘어나면 개발도상국들이나 아프리카와 같은 미개발 지역의 거주민들과 산업적 경제적 구조가 포함되기 때문에 HTP 영향 범주 한에서는 증가하는 결과가 도출되었다. 환산되기 때문이다.

Table 2 역시 상용화 제품 ITO target을 범용 공정을 이용하여 1 kg으로 생산하여 사용한 후 34%를 폐기할 경우 배출되는 환경부하 값에 대한 결과 값들이다. Table 1과 같이 영향범

주가 늘어남에 따라 환경부하 값이 줄어드는 비슷한 경향을 나타냈으며 HTP의 경우 Table 1과 같이 동일한 이유에서 증가하는 경향을 나타냈다. 실질적으로 ITO 분말에서 target으로 성형 및 열처리 공정이 추가적으로 실시되기 때문에 이에 따라 모든 환경영향범주 값들이 ITO target powder에 비해 증가하는 경향이 나타났다.

#### 4. 결론

성균관대학교에서 개발한 전기화학적 공정을 이용하여 ITO를 재활용할 경우 다음과 같은 전과정 평가 결과를 도출하였다.

대륙별 환경성 평가결과 유럽에서는 네덜란드, 아시아에서는 호주가 자원 매장량, 인구, 자원, 산업구조, 에너지 순환 및 경제 구조 등에 의해 AD와 ADP 영향범주에 민감한 결과를 얻었다. 또한 수출형태의 산업구조를 지닌 국내의 경우 다른 국가와 달리 GNP 기준으로 계산하기 때문에 국가별 상이한 결과가 도출되었다. 이는 단순한 산업구조에 의한 차이가 아니라 복합적인 차이에 의해 환경부하 값이 결정됨을 확인하였다. 또한 현재 상업용 ITO 재료에 대해 평가한 결과 ET의 경우 영향범주가 거칠수록 값이 늘어나는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 경제협력개발기구를 제외한 개발도상국들의 경우 자국민들의 환경적 가치의 이해도와 산업구조 및 경제 구조, 인구 등의 차에 의한 것으로 판단된다. 특히 ET의 경우 경제협력개발기구 국가의 대부분의 기후변화대응에 적극적으로 대응하고 있는 상황이라 대기오염 물질 배출을 저감에 적극적이며 다른 한편으로는 필터 등과 같은 대기 정화 기술적 수준이 높아 그런 것으로 판단된다.

비록 폐기되는 ITO의 양은 적으나 ITO 폐기에 따라 경제적, 환경적 손실을 소비자나 생산자가 부담하는 상황에서 ITO 재활용 공정 최적화나 재사용 또는 재활용을 한다면 그 만큼의 환경/경제적 부담을 줄일 수 있다.

**Table 1.** The results of LCA about ITO target powder ( $1 \times 10^{-12}$ )

	ADP (e)	ADP (f)	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP
	kg sb	MJ	kg SO <sub>2</sub>	kg P	kg DCB	kg CO <sub>2</sub>	kg DCB	kg DCB	kg R11	kg ethene	kg DCB
Netherlands	76,809.61	92.63	341.04	213.40	2,988.30	83.03	277.70	21,293.38	1.47	142.89	970.60
EU	157.48	10.44	8.21	8.43	43.43	4.26	6.72	579.59	0.02	3.07	18.38
World	63.74	0.87	0.95	0.70	9.53	0.51	20.28	349.19	0.01	0.71	0.82

**Table 2.** The results of LCA about ITO sintered target ( $1 \times 10^{-12}$ )

	ADP (e)	ADP (f)	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP
	kg sb	MJ	kg SO <sub>2</sub>	kg P	kg DCB	kg CO <sub>2</sub>	kg DCB	kg DCB	kg R11	kg ethene	kg DCB
Netherlands	103,550.05	141.15	1,081.06	1,087.80	18,426.47	129.88	3,011.27	124,737.51	2.56	289.03	2,991.29
EU	212.31	15.91	25.73	42.98	267.78	6.66	72.91	3,395.28	0.03	6.21	56.64
World	85.93	1.332	3.03	3.58	58.77	0.08	219.96	2,045.57	0.01	1.43	2.52

### 감사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 재원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2010501010002B).

### 참고문헌

1. Choi, E. Y., Seo, J. H., Choi, H. B., Je, J.-T., and Kim, Y. K., "Study on the ITO Pre-treatment for the Highly Efficient Solution Processed Organic Light-emitting Diodes," *KIEEME*, **23**(1), 18-23 (2010).
2. Lee, S.-S., Lee, N.-R., Kim, K.-I., and Hong, T.-W., "Environmental Impacts Assessment of ITO (Indium Tin Oxide) Using Material Life Cycle Assessment," *Clean Tech.*, **18**(1), 69-75 (2012).
3. Lee, S.-S., Lee, N.-R., Kim, K.-I., and Hong, T.-W., "Environmental Assessment of Chemically Strengthened Glass for Touch Screen Panel by Material Life Cycle Assessment," *Clean Tech.*, **18**(3), 301-306 (2012).
4. [http://invent.patyellow.com/in\\_story/view.asp?num=204](http://invent.patyellow.com/in_story/view.asp?num=204)
5. <http://jinhwanlee.egloos.com/10457417>
6. Yoo, K. K., Hong, H. S., and Cho, B. G., "Recycling Technologies of spent Liquid Crystal Display: A Review," *Korean J. LCA*, **12**, 20-36 (2011).
7. Son, Y. K., and Choi, D. C., "Low Current Electrolysis Method for Separation and Recovery of ITO form LCD",
8. Jeong, S.-J., Lee, J.-Y., Sohn, J.-S., and Hur, T., "Life Cycle Assessments of Long-term and Short-term Environmental Impacts for the Incineration of Spent Li-ion Batteries (LIBs)," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **17**(2), 163-169 (2006).