

사용 후 터치스크린 패널의 투명전극용 ITO의 폐기방법별 물질 전과정평가

이수선, 이나리, 김경일, *안중우, 홍태환

한국교통대학교 신소재공학과/친환경 에너지 변환 저장소재 및 부품개발 연구센터

*성신여자대학교 청정융합학과

Material Life Cycle Assessment for ITO Electrode of used Touch Screen Panel according to disposal methods

Soo Sun Lee, Na Ri Lee, Kyeong Il Kim, *Joong Woo Ahn, Tae Whan Hong

Department of Materials Science and Engineering/Research Center for Sustainable Eco-Devices and
Materials (ReSEM), Korea National University of Transportation

*Department of Interdisciplinary ECO Science, Sungshin Women's University

Received: 16 August 2012 / Accepted: 17 September 2012

Abstract

In this research, Material Life Cycle Assessment(MLCA) has been carried out to evaluate the environmental impacts about disposal of ITO(Indium Tin Oxide). ITO is often used for touch and flat screen of phone, PC, computer because of its electrical conductivity and optical transparency which it can be deposited as a thin film. Indium is one of the rare earth and used to ITO material. When demand of the ITO increases, shortage of indium have concerned. This is not only resources insufficient problem it is also environmental problem. Because ITO which did not recycle and landfill or incineration cloud be cause a environmental pollution.

According to waste treatment method, disposal about 1kg of ITO was used as the reference flow. There are difficulties for data collection about emissions from waste treatment in LCA. So there is a need to focusing landfill, incineration process for ITO. From this study, it is found out that landfill of ITO has the highest environmental impacts except GWP. But incineration is also high environment impact value by a little gap.

1. 서론

IT, 가전제품, mobile 산업의 발달로 디스플레이 제품의 수요와 공급은 지속적으로 증가하고 있다. 디스플레이 수명을 5~6년, 중고제품의 재활용을 고려해도 폐기되는 디스플레이 제품은 증가될 수밖에 없다. 그리고 이런 폐디스플레이 제품에는 희소금속자원이 포함되어 있다.

희소 금속이란 현대 산업에 반드시 필요하면서도 확보하기 어려운 금속(원소)을 말한다. 휴대전화나 컴퓨터뿐만 아니라 TV, 자동차 등에도 반드시 희소 금속이 사용된다. 금속 자원은 석유 등의 에너지 자원과 달리 사용하면 없어지는 것이 아니라 리사이클이 가능한 자원이지만 희토류의 경우 소비량은 석유나 석탄 등의 천연자원과 비교했을 때 적은 편이나 그 수요가 해마다 증가하고 있어 경제적으로도 중요한 위치에 놓여 있다.[1]

휴대폰, PC, TV의 액정 디스플레이의 경우 가시영역의 높은 투과율과 전기전도성을 가지고 있는 투명전도성 산화물 박막 ITO(Indium Tin Oxide : 산화인듐주석)는 LCD(Liquid Crystal Display), PDP(Plasma Display Panel), OLED(Organic Light Emitting Diodes) 등의 다양한 표시소자에 쓰이며 LCD의 경우 약 3%가 희토류 원소로 구성되어 있다.[2] ITO의 주재료로 희토류 중 하나인 인듐이 사용되는데 인듐의 경우 지각 1톤당 0.05g밖에 존재하지 않으며 단독으로 광산을 형성하지 않고 아연이나 주석, 납의 광석에 소량으로 포함되어 있으므로 부산물에 속하게 된다.[3] 일본의 경우 연간 약 900톤의 인듐이 소비되며 소비량의 약 90%는 투명전극의 제조에 쓰인다. 세계적으로 액정 디스플레이의 수요가 증가함에 따라 인듐의 필요성은 더욱 커지게 될 것이다.[4]

21세기에 희토류가 주목 받는 이유는 첫 번째, 대체 물질이 존재하지 않는 독특한 화학적, 물리적 성질을 가지고 있기 때문이다. 두 번째, 다른 물질과 혼합으로 물리적, 구조적 특징의 유지, 변경이 가능하며 성능을 향상시키는 특성을 갖고 있기 때문이다. 마지막으로 첨단기술 산업뿐만 아니라 미래 산업 및 녹색기술에 필수적인 자원이기 때문이다.[5] 온실가스와 환경오염을 최소화하는 중요 자원 중 하나가 희토류이다. 그러나 희토류의 환경적 측면을 고려하면 녹색 성장의 필수요인뿐만 아니라 환경 재앙의 요인이기도 하다. 희토류의 기본적인 생산과정을 보면 초기 채취, 분쇄, 가공 후 화학적 처리를 시행하는데 상당한 양의 화공 약품이 사용되며 이에 대응하는 규모의 공해 물질이 발생된다.[6] 1톤의 희토류 정제에 6,300만 리터의 황산과 플루오르화수소산이 혼합된 폐가스, 약 20만 리터의 산성성분 폐수, 1.4톤에 달하는 방사성 공업 폐수가 발생된다.[5] 때문에 보호 장비가 없다면 심각한 직업병이나 환경 재앙이 발생할 수도 있다.

희토류의 자원재활용은 1차적으로 야기 가능한 환경오염을 최소화하고, 자원고갈을 방지함은 물론 고순도 자원을 회수, 활용함으로써 지속가능 녹색성장의 한 축을 담당할 수 있는 자원 확보 방안이다. 그러므로 ITO의 자원재활용은 인듐, 주석의 자원 회수와 폐기 시 발생 가능한 환경오염을 감소시킬 수 있다. 그러나 우리나라의 실정상 디스플레이의 케이스와 프레임 등 일부분만이 기초적인 재활용이 되며 나머지는 폐기되고 있기 때문에[2] 투명전극 ITO의 매립, 소각 등의 폐기 단계에서 발생하는 환경 영향과 인체에 얼마나 유해한지를 알 필요가 있다.[7]

물질전과정평가(MLCA, Material Life Cycle Assessment)는 LCA가 전과정(원료채취, 제품 생산, 사용, 폐기) 프로세스에 대한 데이터에 대해 평가하는데 비해, 물질 즉 재료에 중점을 둔 환경 평가 방법으로 LCA의 전체 프로세스에 대해 모든 데이터를 필요한 제한을 극복할 수 있는 환경 평가 방법이다.

이에 본 연구에서는 투명전극 ITO의 폐기 단계인 매립, 소각의 2가지 방법에 대한 물질전과정평가(MLCA, Material Life Cycle Assessment)를 수행하여 환경영향 평가를 하고자 한다.

2. 전과정평가 수행

2.1 목적정의

본 연구에서는 페디스플레이의 ITO 분말의 폐기(disposal) 중 처리 방식에 따른 매립(landfill), 소각(incineration)에서 발생하는 환경부하 및 환경영향을 평가하고 결과를 비교하여 각 폐기 시스템의 환경 이슈를 확인하고자 한다.

2.2 범위정의

2.2.1 기능

TV나 PC, 휴대폰의 액정 디스플레이(LCD, PDP, OLED)와 같이 다양한 표시소자의 투명전극 ITO 분말의 매립, 소각.

2.2.2 기능단위 및 기준흐름

기능단위는 2년간 사용된 후 폐기된 2.7inch 터치스크린 패널의 투명전극 ITO를 표준으로 참고하였으며 ITO 1kg의 2가지 처리 방법에 따른 폐기이며 ITO 분말 1kg을 기준흐름으로 설정하였다.

2.3 시스템 경계

시스템 경계는 사용 후 폐기된 평면 디스플레이의 투명전극 ITO의 폐기 단계인 매립(landfill), 소각(incineration)로 정의하였다. 폐기물의 종류와 폐기 방법에 따라 환경에 미치는 영향의 정도가 다르기 때문에 ITO의 매립, 소각 각 경우의 환경부하를 정량적으로 분석할 필요가 있다.[8]

매립은 가정 쓰레기 및 산업고형 폐기물의 폐기물 처리 중 하나이며 폐기물의 매립은 지하수의 환경오염과 배출가스를 야기한다. 폐기물의 소각은 위생과 폐기물의 중량, 부피를 줄이고 발생하는 폐열을 에너지로 회수할 수 있는 장점을 가지고 있지만 대기오염물질이 배출된다는 단점을 가지고 있다.

Table 1. Scope definition

| | |
|------------------------|---|
| System | 투명전극 ITO의 처리단계 중 매립(landfill), 소각(incineration) |
| Function | 투명전극 ITO의 매립, 소각 |
| Functional unit | 2년간 사용된 후 폐기된 터치스크린 패널의 투명전극 ITO 1kg의 매립, 소각 |
| Reference flow | 처리 방법에 따른 ITO 분말 1kg의 폐기 |

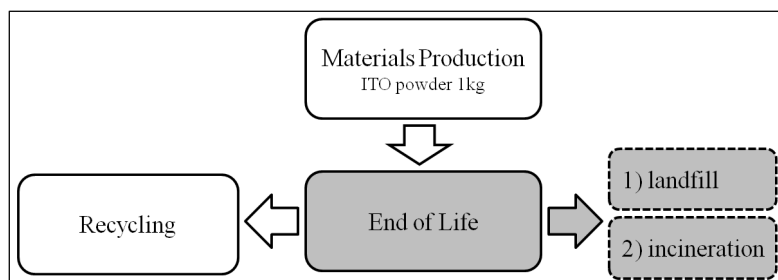


Fig.1. System boundary of disposal for ITO powder.

2.4 가정 및 제한사항

(1) 터치스크린 패널은 2.7inch 디스플레이 패널을 표준으로 하였으며 ITO의 양은 필름에 코팅되는 양을 0.09g으로 산정했으며, ITO의 기준흐름은 ITO의 양을 1kg으로 코팅 두께는 184nm로 가정하였다.

(2) 터치스크린의 사용기간은 2년으로 가정하였다.

(3) ITO의 폐기는 재료적 환경부하를 고려하기 위해 제조와 수송을 제외하였으며 data는 현장 data 수집을 원칙으로 하되 data 수집이 어려운 경우 ecoinvent database 등을 이용하였다.

2.5 데이터 및 영향평가 방법론

데이터 범주는 크게 자원, 수계 배출물, 대기 배출물, 폐기물 등으로 분류하였으며 데이터베이스는 Ecoinvent database (v.2.2)를 이용하였다.

전과정 영향평가는 분류화(Classification), 특성화(Characterization), 정규화(Normalization) 및 가중치 부여(Weighting) 단계로 수행했으며 CML 2001과 Eco-indicator 99 영향평가 방법론을 사용하였다. CML 2001 방법이 10가지 범주로, Eco-indicator99 방법론은 크게 3가지 범주를 고려하고 있으며 서로 유사한 항목으로 정리한 주요 환경영향범주와 단위는 아래 Table 2와 같다.[9]

Table 2. Environmental impact categories (CML 2001and Eco-indicator 99)

| CML 2001 category | Unit | Eco-indicator 99 category | Unit |
|---|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Abiotic resource depletion(ARD) | Kg Sb eq | Fossil fuels | MJ |
| | | Minerals | MJ |
| Acidification potential (ACP) | Kg SO ₂ eq | Acidification/Eutrophication | PDF*m ² *yr |
| Eutrophication potential (EUP) | Kg PO ₄ eq | | |
| Global warming potential (GWP) | Kg CO ₂ eq | Climate change | DALY |
| Ozone layer depletion potential (ODP) | Kg CFC-11eq | Ozone depletion | DALY |
| Photochemical oxidation potential (POCP) | Kg C ₂ H ₄ eq | Respiratory(organic) | DALY |
| Fresh-water aquatic ecotoxicity potential (FAETP) | Kg 1,4 DCBeq | Ecotoxicity | PDF*m ² *yr |
| Marine aquatic ecotoxicity potential (MAETP) | Kg 1,4 DCBeq | | |
| Terrestrial ecotoxicity potential(TETP) | Kg 1,4 DCBeq | | |
| Human toxicity potential (HTP) | Kg 1,4 DCBeq | Carcinogenic effect | DALY |
| | | Respiratory(inorganic) | DALY |
| | | Ionizing radiation | DALY |
| | | Land-use | PDF*m ² *yr |

3. 전과정 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis)

전과정 목록분석은 원료의 추출에서 제조 및 가공, 수송, 사용, 최종 폐기에 이르는 한 제품이나 시스템의 전과정 동안의 에너지 및 원료 소모량과 환경 배출물을 정량화하여 목록화 하는 과정이다.

3.1 데이터 수집

3.1.1 디스플레이 패널의 ITO

ITO의 함유량은 2.7inch 디스플레이 패널을 표준으로 하였으며 ITO는 전체 패널의 0.031%를 차지한다.

3.1.2 ITO의 폐기

사용 후 터치스크린 패널의 ITO 폐기, 매립, 소각 공정 데이터는 ecoinvent inventory database (v.2.2)를 적용한 SimaPro(v.7.0)와 Gabi(v.4.4) software에서 얻었다. 조사된 투입, 배출 자료를 Table 3에 나타냈으며, 이를 바탕으로 목록분석을 수행하였다.

Table 3. Data source and emission for LCA analysis.

| Parameter | | Materials |
|-----------|---------------|---|
| Input | Raw materials | methanol, water(deionised), ammonia, hydrochloric acid(30%), indium, sodium hydroxide(50%), tin |
| | Energy | electricity(medium voltage) |
| Output | Products | disposal of ITO powder 1kg |
| | Emissions | Ethanol (to water) |
| | | Waste heat (to air) |

4. 전과정영향평가

4.1 특성화(Characterization)

특성화는 영향범주로 분류된 항목들이 각각의 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 과정이다. 특성화된 영향평가는 목록분석 결과에 상응인자 값을 곱해줌으로써 정량화한 값이다.¹⁰⁾

Table 4. Results of Characterization about disposal of ITO powder. (CML 2001)

| Impact category | Unit | Landfill | Incineration |
|---|-------------------------------------|----------|--------------|
| Abiotic resource depletion (ARD) | kg Sb eq | 1.57E-05 | 1.95E-05 |
| Acidification (ACP) | kg SO ₂ eq | 1.30E-05 | 3.41E-05 |
| Eutrophication (EUP) | kg PO ₄ eq | 2.75E-04 | 6.70E-05 |
| Global warming (GWP100) | kg CO ₂ eq | 7.06E-02 | 1.32E-01 |
| Ozone layer depletion (ODP) | kg CFC-11 eq | 3.67E-10 | 3.10E-10 |
| Human toxicity (HTP) | kg 1,4-DB eq | 1.94E-02 | 2.81E-02 |
| Fresh water aquatic ecotoxicity (FAETP) | kg 1,4-DB eq | 2.09E-01 | 1.83E-01 |
| Marine aquatic ecotoxicity (MAETP) | kg 1,4-DB eq | 7.60E+01 | 7.12E+01 |
| Terrestrial ecotoxicity (TETP) | kg 1,4-DB eq | 1.60E-04 | 5.67E-05 |
| Photochemical oxidation (POCP) | kg C ₂ H ₄ eq | 1.44E-05 | 1.22E-06 |

4.2 정규화(Normalization) 및 가중치 부여(Weighting)

정규화는 영향범주별 환경영향을 일정지역, 일정기간, 인구수 등의 인자로 총 환경영향을 나누는

과정을 말하며 환경영향 범주간의 상대적인 비교를 가능하게 한다. 정규화 값을 도출하기 위한 인자는 국내에서 선정된 값을 사용하였다.[10] 전과정 영향평가 방법으로 CML 2001을 적용한 결과를 보면 ITO 분말을 매립한 경우, 전체 환경영향범주 중 수생태독성(FAETP)이 48.9%, 해양생태독성(MAETP)범주가 48.6%로 기여도가 가장 크며 부영양화(EU)와 지구온난화(GWP) 범주는 상대적으로 낮은 1%, 0.7%의 기여도를 보였다.(Fig.2) 생태독성과 부영양화 범주의 가장 큰 기여도는 ITO의 매립으로 인한 에탄올의 수계로 배출이다. 지구온난화의 경우 주석의 매립 때문이다. 소각의 경우, 해양생태독성(MAETP)범주와 수생태독성(FAETP)이 각각 50%, 47%로 높은 기여도를 보였다.(Fig.3) 소각공정이 매립공정과 같이 생태계 범주 값이 높은 이유는 소각재 매립으로 인한 에탄올의 수계배출이 주요 원인으로 보인다.

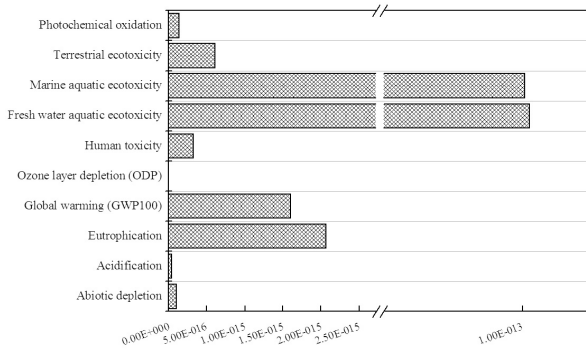


Fig.2. Normalization of landfill for ITO powder by CML method

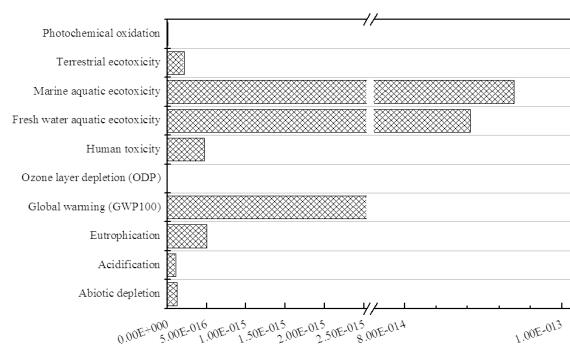


Fig.3. Normalization of incineration for ITO powder by CML method

CML 2001 방법외에 Eco-Indicator99(EI99) 방법론으로 분석한 결과, 매립으로 폐기할 경우 기여도는 발암물질(Carcinogens) 49%와 생태독성(Ecotoxicity) 37%로 가장 기여도가 높았으며 기후변화(Climate change) 7%와 화석연료(Fossil fuels) 4%로 규명되었다. 앞서 제시한 Table 2를 참고하여 비교하면, 두 방법 모두 생태독성 영향범주가 환경영향이 큰 비중을 보이고 있다. 발암물질 항목이 높은 이유는 토양 혹은 수중 환경 중에 존재하면서 발암물질이나 돌연변이물질로 생물에게 섭취되면 생체에 악영향을 미치는 PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons)가 높아졌기 때문이며 에탄올이 인체에 유해한 독성을 가지고 있기 때문이다. 소각은 생태독성(Ecotoxicity)가 54%로 가장 높으며 그 다음으로 기후변화(Climate change) 25%, 발암물질 (Carcinogens) 7%, 화석연료(Fossil fuels) 6.7%의 기여도를 보였으며 이는 CML 2001 방법론의 해양생태독성(MAETP), 수생태독성(FAETP) 범주와 같은 결과임을 보여준다.

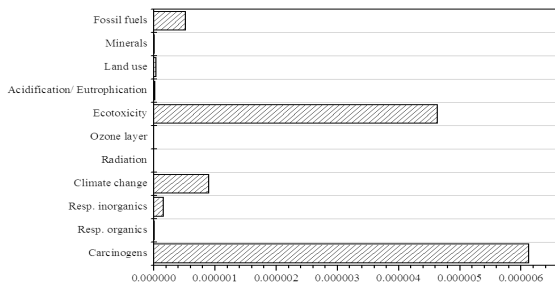


Fig.4. Normalization of landfill for ITO powder by EI'99 method

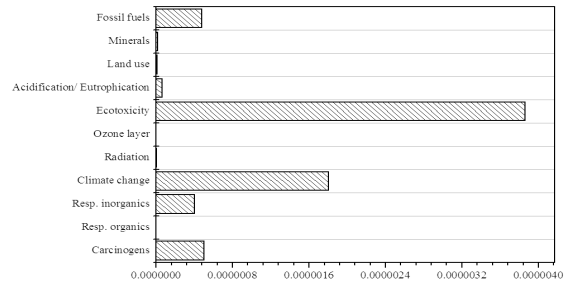


Fig.5. Normalization of incineration for ITO powder by EI'99 method

가중치 부여는 각각의 영향범주들이 환경 전에 미치는 영향을 고려하여 영향범주 간 상대적인 순위, 중요도를 결정하는 단계이다. 가중치 부여는 서로 다른 영향범주에 대한 주관적인 평가를 수반한다. 따라서 가중치 부여는 국가, 문화에 따라 다르다.

Figure 6은 폐기 단계인 매립, 소각의 처리 방법에 따른 영향 평가를 비교한 것이다. 지구온난화(GWP) 영향범주를 제외한 나머지 생태독성(ETP) 영향범주에서 매립이 소각보다 더 높은 환경 영향 값을 가지는 것을 볼 수 있다. ITO 분말의 소각이 매립보다 지구온난화 범주가 높은 것은 폐기물을 소각 처리하는 과정에서 발생하는 이산화탄소가 매립으로 인한 대기오염물 배출보다 높기 때문이다. 또한 매립이 지구온난화 범주에서는 다소 낮은 영향값을 가지지만 생태독성 3가지 범주에서는 땅에 묻음으로서 토양은 물론 수계 오염으로 인한 환경영향값이 더 큰 것을 알 수 있다.

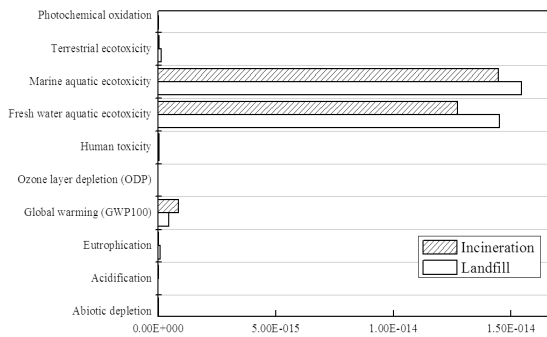


Fig.6. Weighting of disposal for ITO powder by CML method

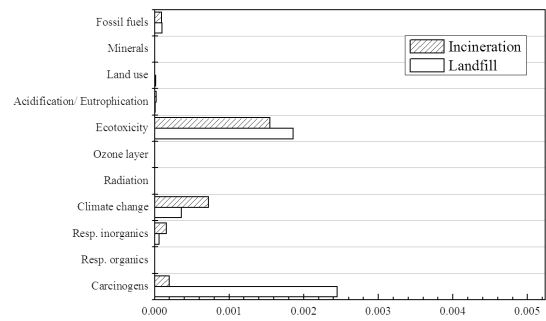


Fig.7. Weighting of disposal for ITO powder by EI'99 method

Eco-Indicator99(EI99) 방법론에서는 CML 2001 방법론과 유사한 결과로 기후변화(climate change)에서 소각이 더 높은 값을 가졌으며 그 외에 정규화에서와 같이 인간 독성에 포함되는 발암물질(Carcinogens), 생태독성이 높은 환경영향 값을 보였다. 발암물질의 경우 ITO의 매립이 소각보다 인체에 유해한 오염물질을 발생시키는 것으로 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 ITO투명전극의 폐기방법인 매립과 소각공정 두 가지로 나누어 환경성평가를 수행하였다. 영향평가 방법은 CML 2001 방법론과 Eco-Indicator99(EI99) 방법론을 사용하였으며 Software는 SimaPro 7.0과 Gabi 4.4를 사용하였으며 결론은 아래와 같다.

폐기 시스템의 환경성 평가는 공정 자체가 가지고 있는 제한으로 상대적으로 불확실한 결과를 내포하고 있다. 투명전극에 사용되는 ITO(Indium Tin Oxide)는 국내에서 페타겟, 스크랩, 에칭 폐액 등의 방법으로 인듐과 주석을 회수하고 있고 중금속이지만 인체에 무해한 주석과 신진대사를 촉진시키는 인듐으로 ITO가 인체에 무해할 수 있지만 페디스플레이의 폐기로 환경에 미치는 영향은 전무하다고 볼 수 있다. 위에 언급했듯이 재활용 공정은 개발 단계이며 폐기흐름 또한 정확한 통계가 없는 실정이다. 폐기물의 처리 방법에 따라 환경영향이 다르기 때문에 ITO의 폐기 방법에 따라 환경영향의 차이가 있을 수 있다.

정규화에서 CML 방법론을 사용한 결과 ITO 1kg의 매립은 수생태계독성(FAETP), 해양생태독성(MAETP) 범주가 가장 높았으며 그 다음으로 부영양화(EU), 지구온난화(GWP) 범주 차례로 나타

났다. 이는 매립으로 인해 수계로 배출되는 에탄올의 영향으로 보인다.

소각의 경우도 해양생태독성(MAETP)범주와 수생태독성(FAETP)이 가장 높았으며 지구온난화가 매립보다 높음을 보여줬다. EI99 방법론의 결과는 매립이 발암물질(Carcinogens), 생태독성(Ecotoxicity)이 가장 기여도가 높았으며 기후변화와 화석연료 순으로 규명되었다. 발암물질 항목이 높은 이유는 에탄올의 독성으로 PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons)가 높아졌기 때문이며 소각공정에서는 생태독성(Ecotoxicity) 다음으로 기후변화(Climate change), 발암물질 (Carcinogens), 화석 연료(Fossil fuels)의 기여도를 보였으며 이는 CML 2001 방법론과 같은 결과임을 보여준다.

가중치 부여에서 CML 방법은 정규화와 비슷한 결말로 매립공정이 소각공정보다 지구온난화(GWP)범주를 제외하고 환경영향 값이 컸으며 EI99 방법 또한 CML과 같은 결과로 생태독성 범주값이 높은 값을 가졌으며, 발암물질의 경우 ITO의 매립이 소각보다 인체에 유해한 오염물질을 발생시키는 것으로 볼 수 있다.

위와 같은 결과로 지구온난화(GWP)를 제외한 범주에서 매립이 높은 환경부하 값을 가졌으나 소각도 매립과 마찬가지로 높은 환경영향 값을 가지는 것으로 분석됐다. 차후 환경개선과 자원 회수 차원에서 ITO의 재활용으로 환경문제를 저감 할 수 있는 방향으로 가야될 것이다.

Reference

- [1] 최관규, “첨단산업 부품소재인 희토류의 가격파동에 대해서”, 한국자기학회지, 21(3), 116~119(2011).
- [2] 홍현선, 이희민, 공만식, 강홍윤, “폐 LCD 재활용 기술 현황과 전망”, 한국지구시스템공학회지, 47(5), 619~627(2010).
- [3] 가키모토 마사야키, 가토 야스히로, 다카하시 요시오, 다케모토 마사쓰구, 아리가 가쓰히코, 아베 히데키, 오카베 도루, 와타나베 야스시, 호노 가즈히로, 호소노 히데오, Newton HIGHLIGHT 희소 금속 희토류 원소, 1판, 뉴턴코리아, 최성호, pp.60~61(2012).
- [4] 최한신, 김용환, 지울권, “희유금속산업 및 자원순환 동향”, 공업화학 전망, 13(1), 20~29(2010).
- [5] 김동환, 희토류 자원전쟁, 2판, 미래의 창, 정의현, pp.31~32(2011).
- [6] 이진영, 전호석, 김준수, “희토류 광물의 분해 및 침출”, 한국광물학회, 22(3), 26~31(2010).
- [7] http://www.waste21.or.kr/board/board_content.asp?menu=3&sub=5&idx=4511&b_type=BOARD_10&page=3&b_kinds=&b_word=
- [8] 박필주, 노재성, 이건모, “LCA를 통한 가전제품 폐기단계의 환경부하 및 주요 환경영향 규명”, 한국전과정평가학회, 1(1), 43~51(1999).
- [9] Helena, M, Fausto, F, “Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods”, Energy and Buildings, 47, 572~583(2012).
- [10] 장성학, 전기압력발솔의 전과정평가, 아주대학교 산업대학원, pp.62~63(2007).