

## 폐 LCD (Liquid Crystal Display) 해체 후 분리된 CCFL (Cold Cathode Fluorescence Light) 내 수은의 건식 제거 공정

박재량 · \*이성규 · 강이승 · 이찬기 · 조성수 · 홍명환 · \*홍현선

고등기술연구원 신소재공정센터

### Decontamination of Mercury Contained in CCFLs (Cold Cathode Fluorescence Light) Disassembled from Waste LCDs (Liquid Crystal Display)

Jae Layng Park, \*Sungkyu Lee, Leeseung Kang, Chan Gi Lee, Sung-Su Cho,  
Myung Hwan Hong and \*Hyun Seon Hong

Advanced Materials & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 449-863, Korea

#### 요 약

LCD TV와 컴퓨터 모니터에는 스크린을 밝게 할 목적으로 냉음극관이 장치되어 있는데 이러한 냉음극관 대부분에는 수은이 포함되어 있으므로 폐 LCD의 재활용 시 적절히 취급되어야 한다. 아울러 이러한 폐 LCD내의 냉음극관의 처리는 2002년에 채택된 EU의 WEEE 와 RoHS 지침에 따라 취급되고 제거되어야만 한다. 본 연구에서는 폐 LCD의 몰드 프레임에 장착된 CCFL을 안전하고 효율적으로 제거한 다음 여기 함유된 수은과 형광체 화합물을 환경친화적으로 분리하여 무해화 처리할 수 있는 건식 공정을 개발하였다. 이를 통해서 실용적이고 경제성 있는 폐디스플레이 자원 재활용 통합공정 개발에 기여할 목적으로 CCFL 무해화 시스템의 설계 및 제작, 이를 운용한 수은/형광체 화합물의 환경친화적 무해화 처리 효율을 평가해 보았다. CCFL 무해화 시스템을 이용하여 처리된 CCFL내 잔류 수은의 양을 정량적으로 평가해 본 결과 무해화율 99% 이상을 달성하였다.

**주제어** : 폐 액정디스플레이, 재료 재활용, 냉음극관 형광램프, 수은화합물, 유해물질 제한지침 (RoHS)

#### Abstract

LCD televisions and monitors use cold cathode fluorescence lamps (CCFLs) to illuminate the screen. Most CCFLs contain mercury and they have to be carefully handled at the end of their lives as per minimum treatment standards under the Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) and Restriction of Hazardous Substances (RoHS) directives. CCFLs were carefully separated from mold frames of waste LCD units for primary decontamination of mercury/fluorescent compound mixture using CCFL decontamination system designed and fabricated in the present research. Residual mercury was further removed by employing a pyro-process, where crushed CCFL tubes transferred from primary decontamination process were subject to heat treatment at 550°C in a box furnace: more than 99% of mercury was removable from waste CCFLs.

**Key words** : waste LCDs, materials recycling, CCFL, mercury compound, RoHS

\* Received : March 22, 2013 · 1st Revised : May 2, 2013 · 2nd Revised : September 24, 2013  
· 3rd Revised : December 26, 2013 · Accepted : January 28, 2014

\*Corresponding Author : Sungkyu Lee (E-mail : sklee@ajou.ac.kr) and Hyun Seon Hong (E-mail : hshong@iae.re.kr)  
Advanced Materials & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, 633-2 Goan-ri, Baegam-myeon, Cheoin-gu,  
Yongin-si, Gyeonggi-do, 449-863, Korea  
Tel : +82-31-330-7318 / Fax : +82-31-330-7116

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

LCD 패널은 빛을 통과시킬 수 있지만 스스로 빛을 발산하지 못하기 때문에 발광을 위한 냉음극관 (Cold Cathode Fluorescence Light: CCFL) 백라이트가 있어야 한다. 일반적으로 LCD의 백라이트 유닛 (Back Light Unit: BLU)은 상업용 오버헤드 형광등에 사용되는 종류와 비슷한 얇은 튜브 기반의 냉음극관을 발광체로 사용한다. CCFL은 초자관과 이의 양 끝에 전극이 붙어있는 구조로 내부에는 일정량의 수은, 아르곤, 네온의 혼합 기체가 봉입되어 있다<sup>1)</sup>.

CCFL이 LCD의 스크린을 조명하는 방식은 컴퓨터와 모니터의 경우 각각 다르다. 그 이유는 TV에는 CCFL 묶음이 LCD 스크린 바로 뒤에 고정되어 있지만 모니터의 CCFL은 스크린의 윗부분과 아랫부분의 금속 캐리어에 고정되어 있다. 그러므로 LCD TV에는 일반적으로 더 많은 CCFL이 배치되어 있고 스크린의 크기가 클수록 배열되어 있는 CCFL의 수가 증가한다<sup>1)</sup>. 참고 문헌 2에 의거 LCD TV 1대당 평균 10개의 냉음극관이 들어있고 냉음극관 1개당 수은이 대략 2 mg 함유되어 있다면 2010년 기준 폐 LCD 발생량은 약 157만대로 추산된다.<sup>3)</sup> 이에 따라 2010년도의 폐 냉음극관 (CCFL) 폐기물은 약 1570만개, 여기에 함유된 수은의 양은 대략 31.4 kg에 이른다.

LCD 스크린 패널의 제조방법이 너무도 다양해서 이의 해체/분리 방식도 나사식 램프 해체 방식과 스크린 전체 해체 방식 등 여러 가지인데 이에 비추어 해체/분리 작업이나 램프 제거 작업도 점차 어려워지고 난이도가 높아질 수 있다. 문제는 이로 인해서 CCFL이 해체 중 파손되어 수은이 대기 중에 방출될 가능성도 높아진다는 것이다. 인체가 수은에 노출 시 100 mg의 유기수은만 작업자의 호흡기관이나 소화기관에 흡입되어도 건강에 치명적인 영향을 미칠 수 있고 이보다 적은 양을 흡입 시 경련, 무기력증, 신경계통 반응 지연 등의 증상이 나타날 수 있다. 그러므로 대다수 국가에서 수은 함유율을 제한하고 있다<sup>1)</sup>.

예를 들어 2002년 제정된 EU의 RoHS (Restriction of Hazardous Substances) 지침에 의하면 특수용도로 사용되는 CCFL내 수은의 허용치는 정해지지 않았지만 2010년에 개정된 RoHS에 의하면 CCFL의 길이와 크기에 따라 수은 허용치가 다양해졌다. 향후 수은의 사용량은 RoHS 기술자문위원회에서 지정한 중장기 계획

(time table)에 의거 차후 점진적으로 감소하여야만 한다<sup>1)</sup>. 2005년 8월 이후 적용되고 있는 RoHS 규정에 의하면 전기 전자 제품에 사용되는 수은의 함량은 균질한 상태의 물질로 0.1% 이하이어야만 한다. 그러나 문제는 CCFL의 제조 시 봉입시키는 수은의 양을 재현성 있게 구현하는 것이 어려우므로 폐 LCD의 통합 재활용 공정 설계 시 이러한 점을 감안, 수은의 적절한 제거 및 처리를 목적으로 하는 단위 공정을 포함해서 전반적인 공정효율을 높일 필요가 있는 것이다<sup>1)</sup>.

현재까지 수은을 함유한 다양한 LCD 모니터와 TV를 처리할 수 있는 재활용 공정은 제한적이고 잘 알려지지 않았다. 그 이유는 지금까지의 재활용 기술 대부분은 LCD의 액정, 인듐, 유리 등에 포함된 유기 소재를 회수하는 기술에 국한되어 왔기 때문이다<sup>4,5)</sup>. 아울러 CCFL을 유효하게 제거하는 방법도 거의 알려지지 않았다. 노트북 모니터의 재활용 특성평가 결과 CCFL이 내장된 폐 LCD를 대량 처리하려면 수은 증기를 효과적으로 배기시킬 수 있는 분쇄 장치를 사용해야만 한다는 것이 밝혀졌다<sup>6)</sup>. 또한 다른 연구자들이 발견한 사실은 LCD 디스플레이를 분쇄할 때 환경에 어떠한 (악) 영향을 미칠지 제대로 규명되지 않은 상태에서 폐 LCD를 기계로 분쇄하는 공정이 적절한 선택이라고 결론 내릴 수 없다고 하였다<sup>1)</sup>. 이에 비추어 볼 때 수작업 해체가 더 선호되는 방법이라는 잠정적 결론을 내리게 되어, 본 연구에서는 환기가 원활하게 잘 이루어지고 있는 후드 안에서 폐 LCD에 내장된 CCFL의 해체/분리를 시행하였다.

그러므로 본 연구에서는 lab scale 기초 실험을 하여 수은/형광체 혼합 분말의 회수 공정 최적화를 위한 기초 실험 data를 수집하였다. 이 과정에서 문헌 조사도 병행하여 LCD 기종별로 내장된 CCFL의 수량과 크기, LCD 패널 내 CCFL의 배치 및 배열 상태, CCFL내의 형광체 성분과 수은 함량 등을 알아보았다. 이러한 결과를 토대로 CCFL 내의 수은 처리를 위한 pilot scale 시스템 설계를 위한 제반 고려사항과 CCFL 처리 시스템 공정도를 결정하였다. 아울러 수은/형광체 분말을 포집하여 이 중 수은을 친환경적으로 처리할 수 있는 CCFL 무해화 처리 시스템을 활성화한 집진 장치를 이용, 설계 제작하는 데 성공하였다. 마지막으로 CCFL 형광등을 유리소재로 재활용하기 위해서 회수한 수은/형광체 혼합체 내 잔류수은의 함량을 정량적으로 평가하였다.

## 2. 실 험

### 2.1. Lab scale 기초실험

#### 2.1.1. CCFL 분리 작업

LCD 패널 몰드 프레임의 고정핀으로부터 CCFL을 분리 시 작업자와 작업장의 안전을 위해서 CCFL이 파손되지 않게 상당한 주의를 하면서 분리하였다. 전동 드릴, 스크루 드라이버, 펜치 등의 연장을 사용하여 폐 LCD를 분해 후 CCFL의 전극 부위를 프레임에서 제거 할 때 CCFL을 파손시키지 않도록 세심한 주의를 기울였다. 이렇게 수작업으로 CCFL을 LCD 패널에서 분리, 회수하여 수집된 폐 CCFL의 개수를 세고 무게를 측정하여 기록해 두었는데 수은 제거 공정에 투입할 때까지 투명한 플라스틱 백에 밀봉시켜 보관하였다. 그 이유는 CCFL 파손 시 수은이 작업자의 손, 피복, 대기 분위기에 누출되는 것을 방지하기 위한 것이다. 그러므로 CCFL 분리 작업 시 라텍스 장갑, 핀셋, 테이프와 플라스틱 용기를 작업 공간에 비치하였는데 이는 수납 용기에 저장된 CCFL이 파손되는 경우의 오염 방지를 위해서도 필요하였다.

#### 2.1.2. CCFL의 절단, 형광체/수은 혼합체 제거 및 수은 함량 분석

길이가 각각 743, 904 mm되는 CCFL을 참고문헌 1에서 제시한 방법을 적용하여 SiC 유리 절단기를 써서 절단 후 튜브의 분말 성분을 제거하였다. 이 과정을 반복하여 CCFL에 존재하는 형광체/수은 혼합 분말을 얻을 수 있었다. 시편 내에 존재하고 있는 수은의 함량을 측정하기 위해서 역시 참고문헌 1에서 제시한 방법을 적용하여 HCl 용액에 수은을 현탁액 상태로 용해시킨 다음 용액 내의 수은을 제거시켜 수은의 무게를 측정하였다. 이 작업은 CCFL의 내부 전체와 CCFL에서 제거시킨 전극 2개에 대해서 실시하여 전체의 평균을 얻었다.

### 2.2. Pilot-scale CCFL 무해화 처리 시스템의 제작 및 평가

CCFL 무해화 처리 시스템은 7개의 기본 단위로 구성되어 있는데 각각의 기능은 중앙 조절 패널 (Main panel & control), 절단 (Cutting), 이송 (Conveyor), 분쇄 (Crushing), 냉각 (Cooling), 분진 포집 (Dirt collector)이며 이외에도 전기로가 있다. 이는 수은 회수 공정을 일반적으로 전처리 ⇒ 배소 공정 ⇒ 정제의 세 가지 과정으로 구성됨을 염두에 두고 설계, 제작한 것인데 한

가지 예를 들어보면 전처리 단계에서는 유리관과 전극부, 수은/형광체 혼합 분말로 분리한다. 이때 발생하는 기체 수은은 집진기에서 활성탄을 이용해서 포집시킨 후 제거한다. 유리관과 수은/형광체 분말에 함유된 고형 수은은 기계적 분리 후 전기로 안에서 열처리하여 건식으로 제거시킨다.

#### 2.2.1. Pilot-scale 설비를 이용한 CCFL 절단 작업

2.1.1절에서 기술한 절차에 따라 분리된 CCFL에서 전극 부위를 절단해 내는 작업을 Fig. 1의 CCFL 무해화 처리 시스템 안에서 실시하였다. 먼저 2.1.1의 방법을 써서 수작업에 의한 해체/분리 후 분리시킨 CCFL을 pilot-scale 무해화 처리 시스템의 절단 부위로 이송하였다. 이때 밀폐 상태를 유지하면서 유리관과 전극부, 수은/형광체 혼합 분말로 분리시켰는데 유리관 끝의 전극부 제거와 유리관의 절단을 위해서 커팅부 유리관 블록을 설계/제작하였다. 또한 다양한 형상의 CCFL 전극부의 절단을 위해서 절단 블록의 형태를 U자형으로 하였다. 절단부에서는 다양한 형태의 전극부를 제거하고 유리관과 수은/형광체 혼합 분말을 회수하는데 적절한 크기인 300 mm 길이로 절단한다. 현 공정에서 절단된 전극 부위는 회수 후 폐기하고 유리관은 유리관 이송장치를 이용하여 수은/형광체 혼합분말 분리부로 이송한다. Fig. 2에 절단기와 전극부 절단 장면을 나타내었다.

#### 2.2.2. Pilot-scale 설비를 이용한 수은/형광체 혼합 분말 분리작업

자동화 프로그램을 이용하여 유리관이 수은/형광체 혼



Fig. 1. CCFL decontamination system.



Fig. 2. Cutting apparatus and cutting operation in the CCFL decontamination system of Fig. 1.



Fig. 3. Apparatus for CCFL tube transfer, mercury/fluorescence compound separation.

합 분말 분리 공정으로 이송되게 자동화하였는데 본 장비의 카트리지와 컨베이어는 지름 3.4 mm의 CCFL을 기준으로 설계/제작 되었으나 3mm 직경의 CCFL관도 처리 가능하다. 이때 이송되는 유리관을 감지하여 4개의관이 분말 분리부에 거치되었을 때 이송 컨베이어는 정지하고 압축 공기를 이용한 blower가 3회 작동된다. 이렇게 분리된 수은/형광체 분말은 분말 포집부에서 회수된다. 수은/형광체 분말 분리부에서 압축공기를 이용한 분리 실험 장면을 Fig. 3에 나타내었다.

### 2.2.3 Pilot-scale 설비를 이용한 CCFL 유리관의 파쇄, 수은제거 및 포집

이렇게 수은/형광체 혼합 분말이 분리된 유리관은 유리관 파쇄부로 이송되어 2축 파쇄기에 의해서 파쇄된다. 파쇄된 유리관과 수은/형광체 혼합 분말에서 수은을 제

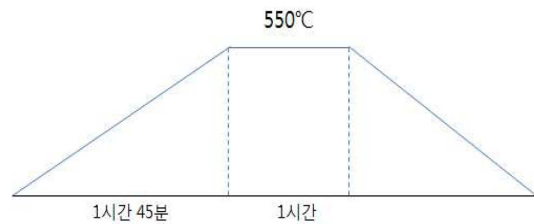


Fig. 4. Heat treatment cycle for residual mercury decontamination by pyro-processing.

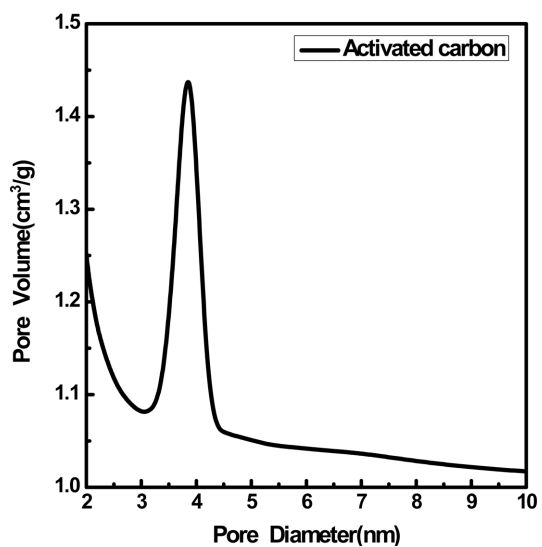
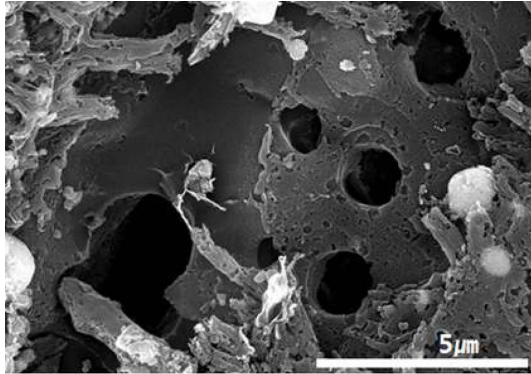


Fig. 5. Pore size distribution obtained by Barrett-Joyner-Halenda (BJH) analysis of adsorption isotherm.

거하기 위해 무해화 시스템 후단부의 열처리로에 넣고 550°C에서 열처리하는데 Fig. 4와 같은 열처리 조건하에서 잔류 수은을 제거하였다. 이렇게 제거된 수은은 일본 아지노모토 파인테크노사의 MA-G 활성탄을 이용하여 포집하였는데 가스 흡착식 비표면적, 기공분포 측정기 (Micromeritics ASAP2420)를 이용하여 300°C에서 2시간 동안 1.333 Pa 이하로 압력을 낮추어 탈기시킨 후 질소 가스를 이용하여 활성탄의 비표면적과 세공 분포를 측정, Fig. 5와 Table 1에 나타내었고 Fig. 6에 수은 포집용으로 사용된 활성탄의 미세 구조를 나타내었다. 참고로 기공분포 실험에서는 Meso-pore (20 ~ 1000 Å)를 갖는 물질의 기공분포를 해석하는 데 사용되는 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 방법을 이용하여 Fig. 5의 결과를 얻었다. 일련의 파쇄, 수은제거 및 포집 공정 장치를 Fig. 7에 나타내었다.

**Table 1.** Specific area (m<sup>2</sup>/g), total micro-porosity volume (cm<sup>3</sup>/g), and average diameter of a micro-pore

Sample	Test/Analysis Item	Test/Analysis Result	Test/Analysis Method
MA-G 활성화탄	비표면적 (m <sup>2</sup> /g)	1073	KS L ISO 18757 (KS A 0094)
	총 세공용적 (cm <sup>3</sup> /g)	0.47	
	평균 세공 직경 (Å)	17.7	



**Fig. 6.** Microstructure of activated graphite MA-G of Ajinomoto Finetechno, Japan for effective mercury adsorption.



**Fig. 7.** Apparatus for breaking CCFL tubes, removing and disposing of mercury.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Lab scale 기초실험

##### 3.1.1. CCFL 분리 및 절단

2.1.1의 절차에 준하여 분리한 CCFL을 “위험물: 수은 함유 CCFL 형광등”이라고 기재한 수납 용기에 넣고 수납날짜와 시간을 기록하여 가능한 한 24시간 이내에 처분하도록 하였다. CCFL내의 수은 제거 작업은 미국 버지니아주의 수은 봉입관 처리 규정<sup>7)</sup>에 준하여 다음과 같이 실시하였다.

CCFL을 밀봉 수납한다. 일반적으로 CCFL이 LCD 유닛에 부착되는 방법은 4가지로 대별되는데<sup>1)</sup> PCB, 2중 커넥터, 단일 커넥터와 회로판, 단일 U-tube와 커넥터 등이다. 게다가 LCD 스크린 패널의 제조 방법이 아주 다양해서 CCFL 해체 방식도 이에 비례하여 편차가 크므로 나사식 해체, 스크린 전체 해체 등 제품별 CCFL의 분리/해체 작업이 어려워지고 난이도가 높아지는 추세에 있다. 비례하여 CCFL의 해체 중 파손되어 수은이 대기 중에 노출 될 위험 또한 높아진다. 여기에 스크린의 대형화 추세 또한 CCFL의 해체/분리를 어렵게 하는 요인으로 작용하고 있는데 그 이유는 후부 tray에 배열되어 있는 backlights의 배치 때문이다<sup>1)</sup>.

예를 들어 대형 LCD 스크린의 backlights를 안전하게 제거하려면 패널을 완전히 해체해야 하는데 제조업체마다 다양한 BLU의 고정 및 유지 방법을 사용하고 있고 특별히 CCFL에 봉입된 전극을 전기적으로 접촉시키고자 CCFL 유리관 전체를 지지할 목적으로 다양한 고무질 몰드 지지체를 사용하고 있다. 이때 CCFL을 유지하고 있는 클립이 튜브의 삽입목적으로 부착되어 있으므로 CCFL의 제거를 더욱 어렵게 하는 요인으로 작용한다. 마지막으로 유리관과 수은/형광체 분말에 함유된 고형 수은은 기계적 분리 후 furnace 내부에서 열처리하여 제거시켜야 한다<sup>1)</sup>.

참고문헌 6에서 예로 들고 있는 폐 평판 디스플레이 재활용 실증화 실험 결과에 의하면 폐 FPD의 수작업 해체 과정에서 파손되는 CCFL의 비율은 LCD TV, 모니터, 노트북의 경우 모두 달랐는데 노트북의 경우 파손되는 CCFL의 비율이 가장 높았던 반면 LCD TV의 경우 가장 낮았다. 이는 평판 디스플레이의 크기와 CCFL의 파손 빈도 사이에 어떤 종류의 상관관계가 있음을 예시하고 있는데 크기가 작고 조립 과정이 보다 섬세한 노트북의 경우 스크린을 본체에서 분리시킬 때 어쩔 수 없이 일시적으로 가해지는 과도한 힘에 기인하는 것으로 설명되었다. 반면 LCD TV의 경우 CCFL이 복잡한 형태로 조립되어 있지만 수작업 해체 시 파손빈

Table 2. Constituents of LCD backlights

구 분		LCD Back-light			
		Short		Long	
		무게 [g]	비율 [%]	무게 [g]	비율 [%]
구성 성분	유리관	6.75	84.30	8.12	95.33
	형광체	0.01	0.09	0.01	0.12
	알루미늄	1.25	15.61	0.19	2.23
	금속류 (전선)	-	-	0.08	0.99
	피복	-	-	0.11	1.33
	합 계	8.01	100.00	8.52	100.00
크기	관직경 (외경)	3 mm			
	길이	904 mm		743 mm	

Table 3. Distribution of mercury in the components of LCD backlights

LCD Back-light	Short	Long
	수은 농도 [ppm]	수은 농도 [ppm]
유리관	1.86	7.21
형광체	991.17	540.32
알루미늄	39.81	8.64
금속류(전선)	-	1.91
피복	-	18.80

도는 낮은 것으로 관찰되었는데 이는 LCD TV 자체가 견고하게 제작되는데 연유하는 것이다<sup>6)</sup>.

### 3.1.2. 수은/형광체 혼합 분말 분리

참고문헌 1의 습식 수은 용출 공정에 준하여 LCD Backlights의 특성분석과 구성 성분별 수은분석 결과를 각각 Table 2, 3에 나타내었다. 여기서 주목할 점은 2.2.1의 절차에 의한 backlight 절단 시 기상수은은 모두 밀폐된 CCFL 무해화 처리 시스템 안으로 포집되고 고형수은만 형광체에 거의 대부분 집중되어 있음을 알 수 있다. 여기서 주목할 점은 중량비율이 0.09-0.12%에 지나지 않은 CCFL의 형광체 분말에 다량의 고형수은이 존재한다는 것이다. 이러한 고형수은은 전극 몸체에 부착되어 있거나 전극 주위에 존재하는 유리 파편 또는 유리관의 파손된 부위에 미량 존재할 수 있지만 그 대부분은 전극 주변에 인접한 변색된 분말로부터 방출된

것처럼 보이는 형광체 분말 잔류물로 존재하고 있다는 것이 밝혀져 있다<sup>1)</sup>. 이러한 고형수은은 주로 CCFL 내에서 원소 수은으로 혹은 부품에 결합되어 있는 화합물 수은으로 존재할 것으로 예측되는데 이러한 수은의 존재 형태에 따라서 취급을 달리 할 필요가 있다. 무엇보다도 이러한 미세 고형수은 입자들은 전극 내의 미립자 혹은 형광체 분말로 둘러싸여 있을 수 있는데 CCFL이 파손되는 경우 이러한 고형수은 미립자들로 인해서 환경 및 작업자가 오염될 수 있다. 이렇게 CCFL의 형광체에 의해서 수은 미립자들이 둘러싸이는 경우 수은이 기화되지 않는데 그 이유는 회토류 형광체가 고온에서 안정하므로 수은이 기화하는 것을 방지하는 보호막 역할을 하기 때문이다<sup>1)</sup>.

### 3.1.3. CCFL의 유해 물질 처리 시스템 필수 요건

CCFL은 약 80°C에서 작동되므로 이온도에서 수은의 증기압을 고려하면 750 mm 냉음극관에는 약 4.7 µg/개의 수은이 함유되어 있고 이의 대부분은 형광체에 분포하고 있다. 아울러 참고 문헌 1을 보면 수은을 함유하고 있는 물질이 CCFL과 같은 형광 램프에서 원소 수은으로 존재하는 넓은 온도 범위가 있음이 밝혀졌는데 이러한 온도 범위의 일부는 유리에 존재하고 있는 나트륨과 수은이 화합하는 온도 구간임이 알려져 있다<sup>1)</sup>.

참고문헌 1에 의하면 수은의 열 탈착은 350-525°C 구간에서 8-15시간에 걸쳐서 일어남을 알았다. 그 결과 CCFL에서 고형수은을 제거하는 최적의 조건은 예열 온도 525°C 부근에서 약 8시간에 걸쳐서 실시하는 경우 약 90%의 제거 효율을 얻을 수 있었다. 또 다른 연구에서는 소듐 보로 하이드라이드가 주입되기도 하였는데 이렇게 하면 300°C에서 2시간 탈착해도 93%의 수은 제거 효율을 얻었다<sup>1)</sup>. 보다 완벽한 수은의 제거를 위해서는 온도를 700-850°C로 올리는데 최적의 수은 제거 효율을 얻기 위해서는 이와 같은 건식 수은 제거 공정을 실시하기 전에 CCFL로부터 부품을 제거하면 더 낮은 온도에서도 유사한 공정효율을 얻을 수 있음이 밝혀졌다<sup>1)</sup>.

이러한 문헌 조사 결과를 종합해 볼 때 pilot-scale CCFL 처리 시스템 설계 시 500°C 정도의 온도에서 건식 처리하는 방식을 적용하면 향후 다양한 공정 변수를 채택할 수 있으므로 정당화 될 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 해체/분리된 CCFL로부터 형광 물질을 분리하기 위하여 고온 air-jet 방식을 도입하였으며 이를 위한 air-jet 노즐, 펌프, CCFL 장착 지그,





**Fig. 8.** (a) Booth for CCFL separation, (b) Array of CCFLs in the mold frame; (c) Mold frame after separation of CCFLs.

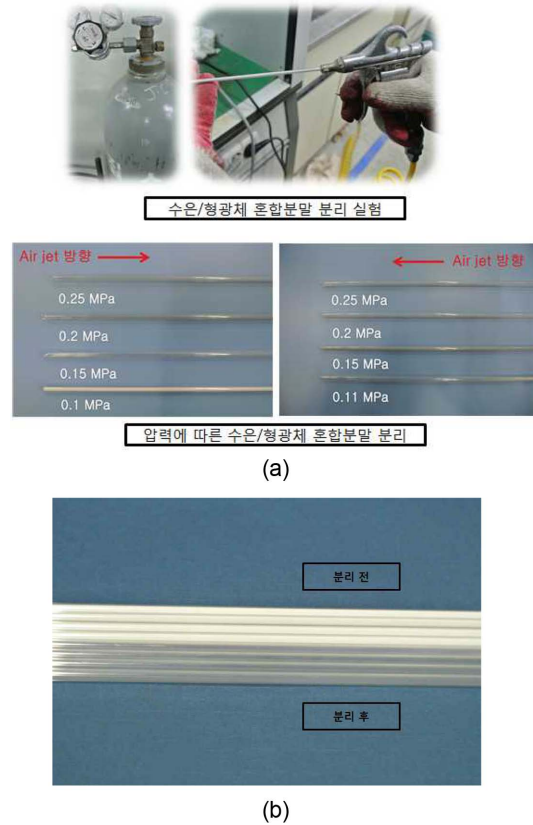
필터 등의 구성부위를 갖는 장치를 설계, 제작하여 CCFL의 무해화 처리 성능을 평가하였다.

### 3.2. Pilot-scale CCFL 무해화 처리 시스템의 제작 및 평가

3.1의 lab scale 기초 실험 결과에 준하여 LCD 해체 공정 후 CCFL과 몰드 프레임, 반사 시트를 분리하기 위한 독립 부스 (booth)를 Fig. 8과 같이 제작하였다. CCFL과 몰드 프레임의 분리 시 작업자와 작업장의 안전을 위해서 고정핀 으로부터 CCFL을 분리할 때 상당한 주의가 필요하다. 또한 전극부의 분리 시에도 CCFL의 파손 위험이 존재하는데 이 경우 작업자와 작업장이 수은 중독 위험에 그대로 노출되므로 작업자에 대한 안전 교육도 중요한 고려 사항이 될 수 있다.

#### 3.2.1. CCFL 분리 및 절단

Fig. 8(a)의 CCFL 분리 부스 안에서 CCFL을 회수하기 전과 후의 사진을 Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)에 나타내었다. 여기서 보듯이 32~42인치 LCD에 사용되는 CCFL은 대략 16~18개이다. 이렇게 분리된 CCFL은 절단부로 이송되어 다양한 형태의 전극부를 제거하고 유리 와 수은/형광체 혼합 분말 크기에 맞는 300 mm 정도의 길이로 절단되어 일정한 속도로 수은/형광체 혼합 분말 분리부로 이송되는데 분말제거 특성을 확인 할 목적으로 압축공기와 질소가스 압력을 변화시켜 수은/형광체 분말의 분리 정도를 정성적으로 조사하였다.



**Fig. 9.** (a) 0.2~0.25 MPa was optimal pressure of compressed air/nitrogen mixture for removal of mercury/fluorescent compound; (b) Schematic diagram of CCFLs before (top) and after (bottom) removal of mercury/fluorescent compound. The color visibly darkened after removal.

#### 3.2.2. 수은/형광체 혼합분말 분리

다양한 압력의 질소 가스를 분사한 결과 가스 압력이 더 높아질수록 더 많은 양의 수은/형광체 혼합 분말의 회수가 가능한 것을 확인할 수 있었다. 단 압력이 낮은 경우 가스 분사부의 반대쪽 분말은 분리되지만 분사부의 분말은 회수할 수 없었다. 0.2 MPa이상의 압력에서 CCFL 내부의 수은/형광체 혼합 분말을 상당부분 제거할 수 있었으나 압력이 과도하게 높아질 경우 유리관이 파손될 수 있으므로 0.2~0.25 MPa 범위의 압력이 분말 혼합체의 회수에 최적임을 알 수 있었다. Fig. 9(a)에 혼합 기체 압력에 따른 수은/형광체 혼합분말 분리 실험 결과를 정성적으로 나타내었다. 여기서 제거되지



Fig. 10. Recovered powders of mercury/fluorescent compound.

않고 CCFL 내부에 잔류한 수은의 함량을 정량적으로 측정하지는 않았는데 그 이유는 첫째로 본 공정에서 제거된 수은/형광체 분말 혼합체를 제외한 CCFL내 잔류 수은은 3.2.3의 후속 건식 공정에서 열처리하여 최종 수은제거 효율을 산출하였기 때문에 1차 제거 효율의 산정에 큰 의미를 부여하기 어려웠고 둘째로 Table 3의 결과에서 알 수 있듯이 backlights의 종류에 따라 유리관에 존재하는 수은의 최소 함량이 1.86 ~ 7.21 ppm으로 현저하게 달랐기 때문이다. Fig. 9(b)는 분리 공정 전/후의 CCFL 형상을 더 잘 도해하여 제시할 목적으로 수록하였다. 참고로 본 공정에서 회수된 수은/형광체 분말의 형상을 Fig. 10에 나타내었다.

### 3.2.3. CCFL 유리관 파쇄, 수은제거 및 포집

수은/형광체 분말을 제거시키고 난 CCFL관을 2축 파쇄기를 써서 파쇄시킨 CCFL 유리관 조각과 함께 열처리로 넣고 Fig. 4의 조건으로 잔류 수은을 제거하였다. 금속 수은의 원자량은 22.59이고 비중은 13.56 g/cm<sup>3</sup>, 용점은 38.87°C, 비등점은 356.58°C로 이러한 특성을 고려하여 550°C에서 열처리한 다음 활성탄 포집을 실시하였다. 산화물 형태의 수은은 수용성이므로 습식 탈황 설비나 스크러버 등에서 90%이상 제거 가능하지만 원소 수은의 경우 비수용성이고 증기상으로 존재하므로 활성탄을 사용해서 제거할 필요가 있었다.

### 3.2.4. CCFL 무해화 공정 종합평가

CCFL의 무해화 공정을 통해 처리 전의 무게 비율을 측정하여 Table 4에 나타내었다. 그 결과 전극부에 유리/수은/형광체의 혼합물이 포함되어 분리되는 단점이

Table 4. Weight of individual backlight components

	Glass	형광체	전극부	절단손실	계
무게 비율(%)	90.3	2.2	7.5	1.1	100
무게(g)	9.10	0.22	0.76	0.11	10.08

있어 전극부의 절단 및 처리 공정개선이 필요하였다. 마지막으로 CCFL 무해화 시스템을 이용하여 최종 처리한 CCFL의 잔류 수은의 양을 평가하였다. 스위스 연방 재료과학 기술시험소 (EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology)의 'FPD 모니터의 CCFL 내부 수은 함량 결정' 보고서<sup>2)</sup>에 따르면 유리관 내부의 수은량은 대략 1.33 ~ 2.63 µg/tube이다. 이 때 측정에 사용된 CCFL 유리관의 무게는 대략 9.1 g으로 간주하였으므로 유리관 1 g당 수은 함량은 146 ~ 289 µg으로 예상할 수 있다. CCFL 무해화 처리 후 유리관 내의 수은 함량은 본 연구 결과 약 0.487 µg으로 나타났는데 수은함량 분석결과와 EMPA 보고서를 종합해 볼 때 CCFL 무해화 시스템의 무해화 효율은 대략 99.67 ~ 99.83%로 계산된다.

본 공정을 써서 CCFL을 처리하기 전의 수은 함량을 정량적으로 계산하지 않았는데 그 이유는 3.2.2에 기술한 것처럼 backlights의 종류에 따라 유리관에 존재하는 수은의 최소 함량이 Table 3에 나타내었듯이 1.86 ~ 7.21 ppm으로 현저하게 달랐기 때문이다. 이는 CCFL에 봉입하는 수은의 양을 제조업체에서 재현성 있게 조절할 수 없다는데 기인하는데 참고문헌 1의 부록에 수록되어 있는 예를 인용하면 LCD 관련 장비 제조업체들은 RoHS 규정을 준수해야 하므로 CCFL 한 개 당 함유된 수은의 양은 5 mg 이하라고 주장한다. 그러나 미국 캘리포니아 주 독극물 통제부에서 2004년에 실시한 연구결과에 의하면 15개의 서로 다른 LCD 제품에 포함되어 있는 CCFL에서 32 ~ 660 mg/kg의 수은 함량이 측정되었다<sup>1)</sup>. 유사한 연구에서 밝혀진 CCFL내 함유된 평균 수은 함량은 391 ~ 546 mg/kg이었는데 이러한 사실에 비추어 CCFL에 함유되어 있는 수은의 양을 재현성 있게 측정하는 것이 매우 어렵다는 것을 알 수 있다<sup>1)</sup>.

Table 3의 CCFL내 수은 총 함량이 대략 577 ~ 1033 ppm임을 실험적으로 측정하였으므로 본 공정 처리 후 CCFL 유리관 내의 수은 함량이 대략 0.487 µg이라는 사실에 비추어 볼 때 무해화율 99% 이상을 달성하였다고 별 무리 없이 결론 내릴 수 있었다. 이상을 종합해 볼 때 CCFL 유리관 내의 잔류 수은을 고온에



서 활성탄 포집장치로 이동시켜 집진시키는 설비를 이용하여 제거하는 공정을 적용하는 것이 타당함을 알았다.

#### 4. 결 론

폐 LCD의 몰드 프레임에 장착된 CCFL을 안전하고 효율적으로 제거한 다음 여기 함유된 수은과 형광체 화합물을 환경친화적으로 무해화 처리할 수 있는 실용적이고 경제적인 시스템을 pilot scale로 설계/제작하여 수은/형광체 화합물의 환경친화적 무해화 처리 효율을 알아보았다. 본 연구에서 설계, 제작된 CCFL 무해화 시스템을 이용하여 처리된 CCFL내 잔류 수은의 양을 정량적으로 평가해 본 결과 무해화율 99% 이상을 달성하였다. 이러한 제반 사항을 고려해 볼 때 제품 제조 시 재활용에 용이한 설계가 적용되지 않은 현재의 LCD 폐기물 재활용 공정의 CCFL 제거 작업은 만족스러운 수준으로 이루어졌다고 판단된다.

#### References

본 연구는 환경부의 지원을 받는 글로벌 탑 환경기술 개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사드립니다 (GT-11-C-01-020-0). 아울러 Table 2, 3의 실험을 수행해 주신 경기대학교 환경공학과와 이승희 교수님에게 심심한 사의를 표하는 바입니다.

#### 참고문헌

1. T J McDonnell and K S Williams, 2010: The location and character of mercury in waste LCD backlights, WRAP (Waste & Resources Action Programme), Banbury, UK.
2. H Böni and R Widmer, 2011: Disposal of Flat Panel Display Monitors in Switzerland, Final Report, EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology), St. Gallen, Switzerland.
3. Hyun Seon Hong, Man Sik Kong, Sungkyu Lee, Hong Yoon Kang, 2010: Overview and Future Concerns for Recycling Display Wastes, Korea Industrial Chemistry News, 13 (1), pp. 10-19.
4. Sungkyu Lee, Leeseung Kang, Chan Gi Lee, Myung Hwan Hong, Sung-Su Cho, Hyun Seon Hong, 2013: Disassembly and Compositional Analysis of Waste LCD Displays, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 22 (2), pp. 29-36.
5. Sungkyu Lee, Sung-Su Cho, Soo-Young Lee, Jae Layng Park, Myung Hwan Hong, Hyun Seon Hong, 2013: Effects of PE (Polyethylene) and GF (Glass Fiber) Addition on Tensile Strength and Elongation of ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) Recovered from Waste LCDs, J. of Korean Resources Recycling, 22 (3), pp. 50-56.
6. John Cryan, Keith Freegard, Liz Morrish, Nicola Myles, 2010: Demonstration of Flat Panel Display Recycling Technologies, WRAP (Waste & Resources Action Programme), Banbury, UK
7. www.wm.edu/facman/safety/Documents/bulbs.doc

#### 박 재 량



- 충남대학교 바이오응용화학학과 공학석사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 청정소재 공정팀 선임연구원

#### 이 성 규



- 미국 미네소타 주립대 재료공학과 공학박사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 청정소재 공정팀 수석연구원

#### 강 이 승



- 고려대학교 신소재공학과 공학석사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 청정소재 공정팀 선임연구원

#### 이 찬 기



- 일본 큐슈대 물질이공학과 공학박사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 청정소재 공정팀 수석연구원



조 성 수

- 아주대학교 에너지시스템공학과 박사 과정
- 고등기술연구원 신소재공정센터 청정 소재 공정팀 수석연구원



홍 명 환

- 한양대학교 신소재공학과 공학석사
- 고등기술연구원 신소재 공정센터 연구원



홍 현 선

- 한양대학교 금속공학과 공학박사
- 고등기술연구원 신소재공정센터 센터장

### 學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技 術 報 告	實際的인 試驗, 調查의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外의 研究 幾關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 隨霜 등
Group 紹介	企業, 研究幾關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 揭載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.