

소형형광등(Compact Fluorescent Lamp)의 파쇄에 따른 기상에서의 수은농도 특성

이승희[†]

경기대학교 공과대학 환경에너지공학과
443-760 경기도 수원시 영통구 광교산로 142-42
(2014년 3월 6일 접수, 2014년 4월 27일 수정본 접수, 2014년 4월 29일 채택)

Characteristics of Mercury Concentration in Vapor Phase from Compact Fluorescent Lamp

Seung-Whee Rhee[†]

Department of Environmental Energy Engineering, College of Engineering, Kyonggi University,
154-42 Gwanggyosan-ro, Youngtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi, 443-760 Korea
(Received 6 March 2014; Received in revised form 27 April 2014; accepted 29 April 2014)

요 약

소형형광등(Compact fluorescent Lamp; CFL) 3종류를 파쇄할 때 발생하는 수은의 기상농도와 대기로 방출되는 수은 양을 평가하였다. CFL 파쇄 시 배출되는 수은 농도는 초기에 매우 급격하게 감소되었으나 24시간 이후에는 수은 농도의 변화가 점차 작아졌으며, 이 후 42시간까지 일정 농도를 유지되었다. 이러한 일정한 농도를 안정화 농도(Stabilized concentration)로 나타내었고 안정화 농도는 기체상 수은이 거의 배출되어 파쇄장치에 잔류하는 액체상 수은이 온도와 기압에 의한 영향으로 기화되어 배출되는 것으로 판단되었다. 소형형광등에서 발생하는 수은농도는 회사별로 A사 < B사 < C사 순으로 나타났으며, 회사별로 수은의 안정화 농도와 안정화 시간은 A사 < B사 < C사 순으로 높았다. 공기유량이 증가함에 따라 수은 부분압은 감소하였으며, 이는 대기 중 수은의 양이 낮아짐을 의미하고 안정화 농도도 감소하는 것으로 나타났다. CFL 파쇄 시 초기의 수은 농도는 공기유량에 관계없이 0.1mg/m³인 지정시설의 환경기준보다 매우 높으므로 소형형광등을 파쇄할 때 기상의 수은을 관리하는 것이 절대적으로 필요하다.

Abstract – Mercury amount in vapor phase from 3 types of CFL(compact fluorescent lamp) are estimated by measuring mercury concentration in vapor phase. The mercury concentration in vapor phase from CFL is sharply decreased during initial time and then the change in the mercury concentration is slightly decreased up to 24 hours. The mercury concentration in vapor phase is almost constant after 42 hours, which can be called by stabilized concentration. It can be estimated that the stabilized concentration is caused by the evaporation of mercury in the residues of broken CFL and can be affected by temperature and pressure in crushing apparatus. The mercury concentration for CFL manufactures are in the order of A < B < C as the same results of the initial mercury concentration and the stabilized concentration in vapor phase. As increased air flow rate, the partial pressure of mercury is decreased and the amount of mercury is reduced. Initially, the mercury concentration in vapor phase emitted from CFLs is higher than the regulatory level of 0.1 mg/m³ in the specific facilities regardless of air flow rate. Hence, it is absolutely necessary that mercury in vapor phase should be controlled at the point of crushing compact fluorescent lamp.

Key words: CFL, Mercury Concentration, Vapor Phase, Flow Rate, Characteristics

1. 서 론

최근 국제적으로 수은의 장거리 이동과 생체 축적성으로 인해 사람과 환경 위해성에 대한 관심이 매우 높아졌으며 이를 줄이기 위해 수은의 생산부터 저장, 사용, 배출, 폐기까지 관리하는 Mercury Life-

cycle인 미나마타 협약이 2013년 말에 채택되었다. 미나마타 협약은 2009년 UNEP(유엔환경계획)에서 협약 제정을 결정한 이후 5차례의 정부간협상위원회를 거쳐서 올 2013년 초 스위스 제네바에서 협약문이 완성되었으며, 이는 수은 공급과 교역, 수은첨가제품, 대기·물·토양 배출, 저장과 폐기 등을 주요 내용으로 하고 있다[1,2]. 또한 수은은 임시저장장이 가능하고 궁극적으로는 친환경적인 처리를 통해 서만 폐기하며, 대상 수은첨가제품은 제품군에 따라 단계적 금지 또는 저감화로 구분되어 배출시 엄격한 시설관리 이행 및 관리현황을 당사국총회에 보고하도록 하였다[3].

이러한 수은을 함유한 대표적인 폐기물은 폐형광등으로 일반 직

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: swrhee@kyonggi.ac.kr

이 논문은 한양대학교 배성열 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다. 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.

관 형광등(40W 기준)에는 수은이 약 25mg 정도 함유되어 있고, EU에서는 소형형광등(Compact Fluorescent Lamp; CFL)에 포함될 수 있는 수은의 양을 비교적 적은 5mg 이하로 규정하고 있다. 보통 형광등에는 수은과 아르곤(또는 헬륨) 가스가 포함되어 있으며, 전위차에 의해 가속된 전자가 수은에 충돌하여 가시광선을 발생시키면 그 빛이 형광체를 통과하면서 발광을 하는 원리를 사용하고 있다. 그러므로 형광등에 수은을 사용하지 않으면 빛의 발광이 이루어지지 않으므로 수은의 사용은 필수적이라 할 수 있다[4,5].

국내에서 폐형광등 재활용은 2000년대 초 서울시에서 재활용 시범사업을 시작하여 2004년부터 전국적인 처리 시스템으로 확대되었다. 2004년부터 폐형광등은 EPR(생산자책임재활용제도) 제도에 포함되어 지금까지 한국조명재활용협회를 중심으로 재활용에 노력을 하고 있다. 폐형광등 발생량은 2011년에 146,000,000개이며 재활용되는 폐형광등은 37,950,000개로 재활용 비율은 약 26%로 나타났다. 폐형광등 종류 중 CFL(Compact fluorescent Lamp)은 14,600,000개가 발생하여 전체 폐형광등 발생량의 약 10%를 차지하고, 이 중 재활용되는 CFL은 3,795,000개로 약 26%로 나타났다[6].

국내의 수은에 대한 규제농도는 폐기물관리법 시행규칙과 대기환경보존법 시행규칙(별표8 제15조)에 규정되어 있다. 폐기물에 대한 수은의 배출 허용기준은 폐기물 용출액의 경우 0.005 mg/L(5 ppb)로 규정하고 있으며, 대기에 대해서는 배출시설에서의 배출허용기준에 따라 기상 수은농도는 0.1 mg/Sm³과 5.0 mg/Sm³으로 규정되어 있다[7,8]. 배출시설은 폐수·폐기물·폐가스 소각처리시설 및 고형연료제품 사용시설(0.1 mg/Sm³이하), 발전시설(고체연료 사용시설, 0.1 mg/Sm³이하), 제1차 금속제조시설 중 소결로(0.1 mg/Sm³이하), 시멘트·석회·플라스터 및 그 제품 제조시설 중 시멘트 소성시설(0.1 mg/Sm³이하), 그 밖의 배출시설(5 mg/Sm³이하) 등 5 종류의 시설에만 국한되어 규정하고 있다.

시설에서 발생하는 수은을 안전하게 처리하거나 재활용하지 못하면 수은이 대기 또는 토양으로 배출됨에 따라 사람 인체와 환경에 영향을 미치게 된다. 인체에 미치는 수은의 영향은 적은 양으로도 영향력이 크며, 주로 만성중독과 급성중독으로 분류되고 기상 수은의 흡입으로 인하여 만성중독이 일반적으로 나타나나 특이한 경우 급성중독으로 호흡기 증상이 주로 나타난다. 인체로 흡수된 수은은 신장과 간에 가장 많이 축적되고, 뇌와 중추신경에 악영향을 주는 유해성 중금속이다. 수은 중독 사례로는 1950년대 미나마타에서 메틸수은이 축적된 어패류를 섭취하여 유기수은중독현상이 발생하여 2,000명 이상의 인명피해가 발생하였다[9-11].

본 연구에서는 소형형광등(Compact fluorescent Lamp; CFL) 파쇄 시 발생하는 수은의 기상농도와 대기로 방출되는 수은 양을 평가하고자 한다. 이를 위하여 3종류의 CFL을 사용하여 파쇄 시 시간과 온도에 따른 기상 수은농도를 측정하고 이러한 농도에 기인하여 대기로 방출되는 수은 양을 시간과 유량에 따른 Integration 방법으로 평가하고자 하였다. 그리고 CFL 파쇄 시 파쇄 잔류물에 포함되어 있는 수은에 의해 증발되는 수은의 농도를 검토하고자 하였다[12-14].

2. 이론적 배경

수은 증기압은 온도에 의해 영향을 받으며 온도가 증가할수록 증기압도 증가하는 것으로 나타나는데 수은 증기압을 온도의 함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln(P_{vp}) = A - \frac{B}{C+T} \quad (1)$$

여기서 P_{vp} 는 증기압(mmHg), T 는 온도(K), A 와 B 와 C 는 상수를 나타내므로 수은 증기압은 온도만의 함수로 나타난다.

폐형광등 파쇄 실험에서 수은의 기상압력은 Rault의 법칙 식 (2)에 의해 수은 포화증기압과 수은 몰분율에 의해 표현할 수 있다.

$$P_a = P_{vp} X_a \quad (2)$$

여기서 P_a 는 수은의 부분압, P_{vp} 는 수은의 포화증기압, 그리고 X_a 는 수은의 몰분율을 나타낸다. 이러한 수은의 부분압과 이상기체법칙에 의해 대기에서의 수은농도를 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_a = \frac{n}{V} = \frac{P_a}{RT} \quad (3)$$

여기서 P_a 는 수은의 부분압, V 는 장치의 부피, n 은 몰수, R 은 기체상수 그리고 T 는 온도를 나타내며, C_a 는 기상수은의 농도를 나타낸다. 이러한 식을 통하여 농도, 압력, 온도의 관계를 나타낼 수 있으며 대기 중의 수은농도를 측정하여 기상에서의 수은 압력을 온도변화에 따라 평가할 수 있다[15,16].

3. 실험재료와 방법

3-1. 실험재료

본 연구에서 파쇄 시 배출되는 대기 중 수은 농도를 검토하기 위해 활용한 소형형광등(Compact fluorescent Lamp; CFL)은 3개회사(A, B, C)에서 발생된 것을 무작위로 선택하여 실험재료로서 사용하였다. 본 연구에서 사용된 소형형광등(CFL)의 규격은 Table 1에 나타난 바와 같다.

소형형광등의 규격은 모두 같은 종류로 사용하여 전력 20 W, 직경 15.1 mm, 길이 165 mm로 사용한 3개 회사에서 모두 동일했고, CFL 무게는 약간의 차이가 있지만 거의 비슷한 것으로 나타났다.

3-2. 실험장치 및 방법

소형형광등(CFL)의 파쇄와 대기 중의 수은 측정에 사용한 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. CFL 파쇄실험 장치는 형광등이 투입되는 투입장치(Input Guide Assembly)와 형광등을 파쇄하는 파쇄장치(Roller cam cutting Assembly), 유리관을 수거하는 수거함(Tank Assembly)으로 구성되어 있다. 실험방법으로 1개의 CFL을 투입구에 유입한 후 투입구를 완전히 닫힌 상태에서 회전충격분쇄기(Rotary impact crusher)를 이용하여 파쇄하였고, 파쇄 시 발생하는 수은 증기는 진공펌프를 이용하여 기상 수은농도를 측정하고 활성탄에 의해 제거함으로써 실험장치의 외부로 수은 증기가 누출되는 것을 방지하였다. 기상수은 분석은 DMA 80(Direct Mercury Analyzer)의 분석장치와 흡수트랩을 사용하였다. 이 분석장치는 골드아말감법과 원자흡광광도계를 이용하는 원리로 구성되었고 USEPA 7473 방법에 적합하다.

Table 1. Specification of sample types of CFL

Types	Wattage (W)	Diameter (mm)	Length (mm)	Mass (g)
A	20	15.1	165	100.78
B	20	15.1	165	101.73
C	20	15.1	165	101.91

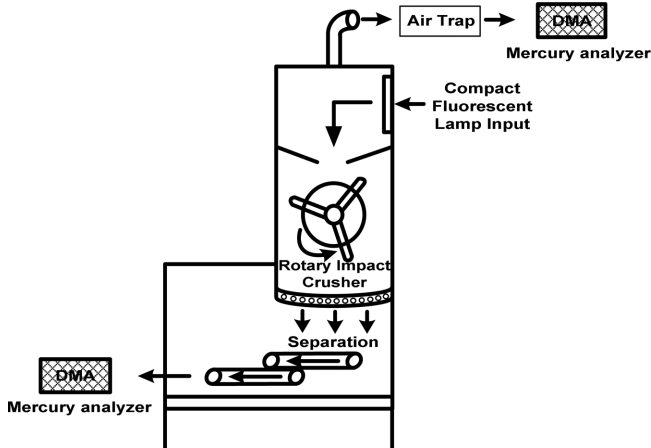


Fig. 1. A schematic diagram of an experimental apparatus of crushing compact fluorescent lamp.

록 되어있다[16]. CFL의 파쇄와 분석 실험은 3회를 실시하여 평균 기상 수은농도를 평가하였으며 기상 수은농도와 배출되는 수은 양을 파악하기 위하여 진공펌프와 유량계를 이용하여 0.7~1.3 L/min의 공기를 지속적으로 배출하였다. CFL의 파쇄 시 발생하는 기상수은 농도 측정은 CFL을 파쇄한 후 1시간 후에 시작하였고, 기상수은 측정 시간 간격에서 초기 2시간은 30분 간격으로 측정하였으며 이후에는 1시간 간격으로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. CFL 파쇄 시 측정 시간에 따른 수은 농도

소형형광등을 폐쇄된 파쇄실험장치에 투입하여 장치로부터 배출되는 기상 수은농도를 공기유량과 시간에 따라 검토하였으며, 그 결과를 Fig. 2로부터 Fig. 4에 나타내었다.

공기유량이 0.7 L/min 일 때 CFL 파쇄 시 기상 수은농도는 Fig. 2에 도시하였다. 초기 기상 수은농도는 $1,436 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 측정 시간 27시간까지 기상 수은농도는 $213 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 점차 감소하였으며, 이후 일정해지는 것으로 나타났다. 공기유량이 1.0 L/min인 경우, Fig. 3과 같이 CFL 파쇄 시 초기 기상 수은농도는 $1,137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약간 감소하였고, 기상 수은농도는 측정 시간이 25시간까지 $181 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 점차적으로 감소하였으며 이후 일정한 것으로 분석되었다. 공기유량이 1.3 L/min인 경우에는 Fig. 4와 같이 CFL 파쇄 시 초기 기

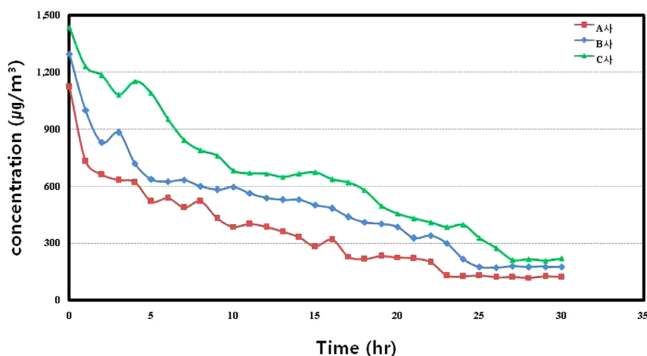


Fig. 2. The average concentration of mercury vapor with time at airflow rate of 0.7 L/min (CFL).

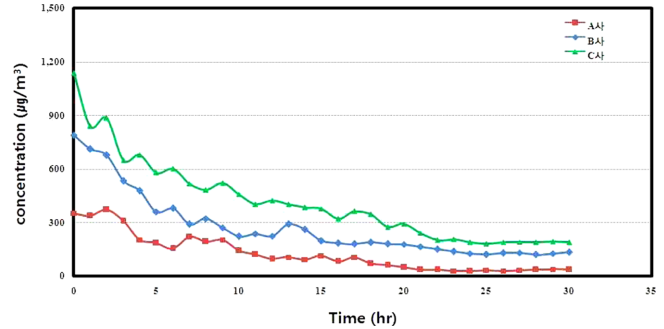


Fig. 3. The average concentration of mercury vapor with time at airflow rate of 1.0 L/min (CFL).

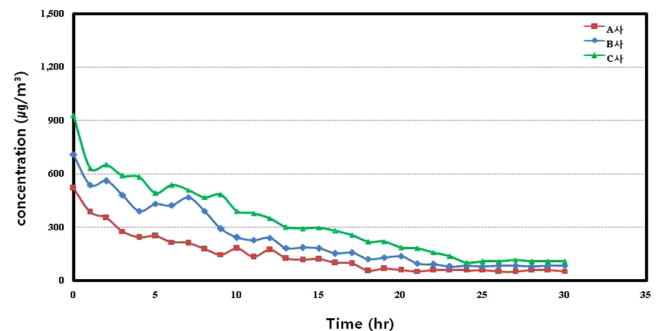


Fig. 4. The average concentration of mercury vapor with time at airflow rate of 1.3 L/min (CFL).

상 수은농도는 $929 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 좀 더 감소하였고, 기상 수은농도는 측정 시간이 24시간까지 $101 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 점점 감소하였으며 이후 일정해지는 것으로 평가되었다.

이러한 결과로 부터 소형형광등(CFL) 파쇄 시 초기 기상 수은농도는 공기 유량이 증가할수록 감소하였으며 측정시간 약 27시간까지 기상 수은농도가 지속적으로 감소하고 이후 일정해지는 것으로 보아 측정 시간 27시간 이후에 기상 수은농도가 안정되는 것으로 판단되었다. 기상 수은농도가 일정 농도를 유지하는 것은 초기 기상 수은이 공기 유량에 의해 거의 배출되어 파쇄장치에 잔류하는 액상 수은이 온도와 기압에 의한 영향으로 기화되어 배출되는 것으로 판단되었다. 이러한 일정 수은농도를 수은의 안정화 농도로 표현하였고, 이 안정화 농도도 공기 유량 0.7 L/min의 $213 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 공기유량 1.3 L/min의 $101 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 공기유량이 증가할수록 감소되는 것으로 나타났다.

또한, 회사별 소형형광등으로부터 배출되는 기상 수은농도는 공기 유량에 관계없이 A사가 가장 낮고 C사가 가장 높게 나타났으며, C사 형광등에 가장 많은 수은이 포함된 것으로 평가되었다.

4-2. 소형형광등(CFL) 파쇄 시 유량에 따른 수은 측정농도

소형형광등(CFL) 파쇄 27시간 이후 기상수은 농도는 일정하게 유지되고 있어 이를 안정화 농도라고 지칭하였고 그 농도를 60시간 까지 연장하여 측정하였으나 기상 수은농도가 감소되지 않았다. 수은 안정화 농도는 배출허용기준 $0.1 \text{ mg}/\text{Sm}^3$ (지정 배출시설)을 초과하나 $5.0 \text{ mg}/\text{Sm}^3$ (기타 배출시설)보다는 낮게 나타나고 있어 환경에 영향을 미칠 가능성이 낮다고 판단이 되며 이 기상 수은농도는 공기 유량에 직접적인 영향을 받을 수 있어 이에 대한 평가를 실시하였다[16]. 회사별 CFL 파쇄실험에서 공기유량과 시간에 따른 수은의 안정화

Table 2. Stabilized concentration and stabilized time of Hg for the crushing CFL

Flow (L/min)	A		B		C	
	Stabilized concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Stabilized time (hour)	Stabilized concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Stabilized time (hour)	Stabilized concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Stabilized time (hour)
0.7	131	23	176	25	213	27
1.0	97	21	129	24	190	24
1.3	56	18	89	21	96	24

*Average temperature: 20 °C

Table 3. Partial pressure and mole fraction of mercury from CFL with temperature

Temp. (°C)	A		B		C	
	Pa (mmHg)	Xa	Pa (mmHg)	Xa	Pa (mmHg)	Xa
10	4.92×10^{-6}	1.00×10^{-2}	7.83×10^{-6}	1.60×10^{-2}	8.44×10^{-6}	1.72×10^{-2}
20	5.10×10^{-6}	0.42×10^{-2}	8.10×10^{-6}	0.68×10^{-2}	8.74×10^{-6}	0.73×10^{-2}
30	5.27×10^{-6}	0.19×10^{-2}	8.38×10^{-6}	0.30×10^{-2}	9.04×10^{-6}	0.33×10^{-2}

*Pa: Partial pressure, Xa: Mole fraction

농도는 Table 2에 나타내었다.

기상 수은의 안정화 농도는 평균온도 20 °C에서 공기유량이 증가할수록 낮아졌으며, 안정화되는 시간도 감소되는 것으로 나타났다. 공기유량이 증가할수록 회사별 수은의 안정화 농도와 안정화 시간이 감소하였고, 안정화 농도와 안정화 시간이 A사, B사, C사 순으로 높았다. 이렇게 나타난 안정화 농도는 기상의 수은 배출허용기준인 $5.0 \text{ mg}/\text{Sm}^3$ (기타 배출시설)을 초과하지 않았고 60시간까지 유지되고 있으므로 폐형광등을 파쇄할 시점에서 기상수은을 관리하는 것이 가장 바람직하다고 판단되었다.

수은의 안정화 농도는 일정하게 나타나고 있으며 이는 파쇄장치에 있는 잔류수은의 증발에 의해 유지되고 있는 것으로 판단되었다. 따라서 파쇄 시 온도가 상승하면 안정화 농도도 증가할 것으로 평가되어 온도에 의한 안정화 농도를 검토하였다. 식 (1)에 의해 온도가 증가하면 수은 증기압이 증가하는 것으로 나타났으며 공기유량 1.3 L/min에서의 온도에 따른 기상 수은의 물분율과 측정기압은 Table 3에 나타난 바와 같다. 온도 10 °C일 경우, 수은의 부분압은 A사 $5.10 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$, B사 $8.10 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$, C사 $8.74 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ 으로 나타났으며 안정화 농도와 마찬가지로 A사에서 가장 낮고 C사에서 가장 높게 나타났다. 수은의 부분압을 그 온도에 대한 포화증기압으로 나누어 주면 기상 수은의 물분율이 산정될 수 있으며, 온도가 증가하면 수은의 측정기압인 부분압도 증가하고 수은의 물분율도 부분압과 비슷한 경향으로 증가되었다. 따라서 소형형광등 파쇄 시 잔류하는 수은의 양이 일정하다면 온도가 상승함에 따라 기상 수은의 부분압과 물분율이 증가하며, 배출되는 수은의 양도 증가할 것으로 평가되었다.

4.3. CFL 파쇄 시 기상으로 배출되는 수은양

소형형광등(CFL) 파쇄 후 기상 수은농도는 안정화 농도까지 지속적으로 감소하고 있으며 공기유량이 증가함에 따라 감소하고 있어 이러한 여러 결과를 이용하여 대기로 방출되는 수은의 양을 평가하였다. 수은 양의 평가는 측정 수은농도에 유량을 곱하고 이에 대한 측정시간을 곱하여 측정간격에 대한 수은의 양을 산정하였고 이러한 양을 전체적으로 통합하면 기상으로 방출되는 전체 수은의 양을 평가할 수 있다. 다만, 수은의 안정화 농도는 일반적으로 수은이 존재할 경우 발생할 수 있는 농도이므로 이 농도를 제외하면 소형형광등을

Table 4. Estimated amount of mercury in CFLs

Type	A	B	C
Hg [mg]	0.114	0.185	0.256

파쇄할 때 방출되는 수은의 양을 평가할 수 있다. 수은 전체 기상의 수은 양은 공기유량에 관계없이 일정하게 나타나야 하며 형광등을 제조하는 생산업체에 따라 달라질 수 있다. 소형형광등에서 기상으로 방출되는 수은의 양은 Table 4에 나타내었듯이 A사에서 가장 적고 C사에서 가장 많게 나타났다[17].

5. 결 론

(1) 소형형광등(CFL)에서 배출되는 기상의 수은농도는 회사별로 차이가 많이 있었으며, 기상의 수은농도는 회사별로 A사 < B사 < C사 순으로 나타났다.

(2) CFL 파쇄 시 배출되는 기상 수은농도는 초기에 가장 높고, 초기 수은농도는 회사별로 달라 A사 < B사 < C사 순으로 나타났으며 수은농도 변화가 시간에 따라 감소되어 파쇄 초기에 수은의 방출을 제어하는 것이 바람직하다.

(3) 소형형광등 파쇄 24시간 이후에 나타나는 일정 농도인 안정화 농도는 파쇄장치에 잔류하는 수은이 온도와 기압에 의한 영향으로 기화되어 나타났으며, 회사별로 수은의 안정화 농도와 안정화 시간도 A사 < B사 < C사 순으로 나타났다.

(4) 소형형광등(CFL) 1개 파쇄 시 배출되는 수은농도는 대기배출 허용기준보다 낮지만 대량으로 파쇄하였을 때는 기상으로의 수은방출을 방지하기 위해 이에 대한 관리방안이 필요하다.

감 사

존경하는 한양대학교 배성열 교수님의 명예로운 정년퇴임을 진심으로 축하드립니다. 본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐금속유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며(과제번호 GT-11-C-01-070-0) 이에 감사드립니다.

References

1. United Nations Environment Programme(UNEP) : Report on overall progress of the United Nations Global Mercury Partnership, <http://www.unep.org/hazardoussubstances/Mercury/GlobalMercuryPartnership/tabid/1253/Default.aspx> (October 2010).
2. Silveira, T. R. G and Chang, S. Y., "Fluorescent Lamp Recycling Initiatives in the United States and a Recycling Proposal Based on Extended Producer Responsibility and Product Stewardship Concepts," *Waste Manage. Res.*, **29**(6), 656-668(2011).
3. Yang, X., Zhuo, Y., Duan, Y., Chen, L., Yang, L., Zhang, L., Jiang, Y. and Xu, X., "Mercury Speciation and Its Emissions from a 220MW Pulverized Coal-fired Boiler Power Plant in Flue Gas," *Korean J. Chem. Eng.*, **24**(4), 711-715(2007).
4. Chen, A., Dietrich, K. N., Huo, X. and Ho, S. M., "Developmental Neurotoxicants in E-Waste," *An Emerging Health Concern, Environmental Health Perspectives*, **119**(4), 431-438(2011).
5. Choi, H. K., Lee, C., Lee, H. K. and Lee, S. H., "Gaseous Mercury Removal in a Hybrid Particulate Collector," *Korean J. Chem. Eng.*, **24**(2), 361-367(2006).
6. Hilke, C. and Friesen, K., "Background Study on Increasing Recycling of End-of-life Mercury-containing Lamps from Residential and Commercial Sources in Canada," *Action plan 2000 on climate change, Enhanced recycling program*(2005).
7. Ministry of Environment, "Notice No. 2012-239 and No. 2012-243," (2012).
8. Korea Institute of Lighting Recycling Association, "Recycling of Domestic Waste Fluorescent Lamps," (2011).
9. Schmechel, R., Kennedy, M., Seggern, von H., Winkler, H., Kolbe, M., Fischer, R. A., Xiaomao, L., Benker, A., Winterer, M. and Hahn, H., "Luminescence Properties of Nanocrystalline $Y_2O_3 : Eu^{3+}$ in Different Host Materials," *J. Appl. Phys.*, **89**(3), 1679-1686(2001).
10. Rey-Raap, N. and Gallardo, A., "Determination of Mercury Distribution Inside Spent Compact Fluorescent Lamps by Atomic Absorption Spectrometry," *Waste Manage.*, **32**(5), 944-948(2012).
11. Rey-Raap, N. and Gallardo, A., "Removal of Mercury Bonded in Residual Glass from Spent Fluorescent Lamps," *J. Environ. Manage.*, **115**, 175-178(2013).
12. Rhee, S. W. and Park, H. S., "Mercury Distribution of Major Components from 3-banded and General Spent Fluorescent Lamp," *Journal of Korea Society of Waste Management*, **30**(3), 265-271 (2013).
13. Rhee, S. W., Choi, H. H. and Park, H. S., "Performance Evaluation of Material Separation from Spent Fluorescent Lamps Using the Thermal End-cutting Method," *Springer*, **15**(4), 503-509(2013).
14. Jang, M., Hong, S. M. and Park, J. K., "Characterization and Recovery of Mercury from Spent Fluorescent Lamps," *Waste Manage.*, **25**(1), 5-14(2005).
15. Santos, É. J., Herrmann, A. B., Vieira, F., Sato, C. S., Corrêa, Q. B., Maranhão, T. A., Tormen, L. and Curtius, A. J., "Determination of Hg and Pb in Compact Fluorescent Lamp by Slurry Sampling Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry," *Microchem. J.*, **96**(1), 27-31(2010).
16. Milestone, "DMA-80 Direct mercury analyzer, Operator manual," (2011).