

냉장고 파쇄 공정에서의 화재 위험성 및 예방에 관한 연구 A Study on the Fire Risk Assessment and Prevention in the Recycling Process of Used Refrigerators

이수경[†] · 송동우 · 배정애

Su-Kyung Lee[†] · Dong-Woo Song · Jeong-Ae Bae

서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지안전공학과
(2009. 08. 05. 접수/2009. 10. 9. 채택)

요 약

본 연구에서는 냉장고 리사이클링 공정에서 잦은 화재가 일어나는 것에 대해 정확한 화재 원인을 규명하고자 한다. 이를 위하여 공정 내에서 발생하는 물질의 성분 및 농도를 분석을 통한 공정 시스템의 문제점을 파악하여 근원적인 화재 및 폭발의 발생을 차단할 수 있는 예방대책을 제시하여 보았다. 연구를 수행하면서 얻은 결과들은 파쇄공정의 가연물로 폴리우레탄, 폴리우레탄 분진 및 가연성기체 혼합물인 사이클로펜탄과 메탄의 존재 확인이며 점화원은 기계적 스파크인 마찰, 충격, 마찰열이라는 사실을 알 수 있었다. 아울러 화재 양상은 폴리우레탄의 표면의 가연성 혼합 가스는 주로 사이클로펜탄의 점화, 폴리우레탄 분진의 혼소 및 가연성혼합가스의 flash fire 임을 알 수 있었다. 가연물인 폴리우레탄과 가연성가스를 제거하는 방법, 점화원을 제거하는 방법 및 산소농도를 최소산소농도로 낮춰서 연소가 일어나지 않도록 하는 방법 등의 예방대책과 화재 시 피해를 줄이기 위한 방호대책을 제시해 보았다.

ABSTRACT

In the recycling procedure of the refrigerator, the fire frequently breaks out. In this study, to clarify the exact cause of the fire, the components and concentration of the materials produced in the process are analysed as well as the problems in the process system, and the protective measure to prevent the fire and the explosion fundamentally is proposed. In this procedure, the preventive measures of fire by removing the combustible materials such as polyurethane and inflammable gases, by removing the ignition sources and by reducing the oxygen concentration to the minimum are proposed along with the protective measures to reduce the damage in the fire. In the crushing procedure where the fire or explosion can break out in diverse ways, the forced ventilation or exhaust system applied to the small partial ventilation facility are installed to reduce the concentration of inflammable gas mixture to lower than the inflammable limit by injecting and exhausting the air forcibly.

Key words : Refrigerator, Recycling procedure, Fire, Cyclopentane, Polyurethane

1. 서 론

선진국을 중심으로 폐자원의 재활용에 많은 관심을 두고 있으며, 국내에서도 이에 발맞추어 리사이클링 산업에 많은 관심을 보이고 이를 확충하고 있다. 이와 함께 제품이 다양화 되고 제품을 만들기 위한 사용물질의 종류도 변화함에 따라 리사이클링 공정 중에 일어날 수 있는 위험도 변화되고 있는 실정이다.

리사이클링 공정에서의 안전문제는 원자재의 회수와 더불어 가장 중요하다. 특히 최근 들어 오존층의 보호를 위해 냉장고의 발포제로 사용하던 CFC의 대체품으로 싸이클로펜탄을 사용하고 있으나 싸이클로펜탄이 친환경적인 물질임에도 불구하고 안전적 차원에서 처리 폭발과 화재위험을 내포하고 있어 이에 공정에서 일어날 수 있는 위험을 줄이기 위한 사전 안전대책이 충분히 검토되어야 한다.

본 연구에서는 냉장고 리사이클링 공정에서 잦은 화재가 일어나는 것에 대해 정확한 화재 원인을 규명하

[†]E-mail: lsk@snu.ac.kr

기 위하여 공정에서 사용되어지는 물질의 성분과 농도를 분석하고 공정 시스템의 문제점을 분석하여 근원적인 화재와 폭발의 발생을 차단할 수 있는 예방대책을 제시하고자 한다.

2. 리사이클링 공정에서의 화재 발생원인 분석

2.1 리사이클링 공정 개요

냉장고 리사이클링의 공정은 Figure 1에서 보여지는 바와 같다.

- 1) 수 작업으로 CFCs, 파워코드, 포장, 컴프레서 등을 분해.
- 2) 파쇄기로 파쇄를 하고 공기 분해기로 분해.
- 3) 자석 분해기로 철재금속을 붙이는 등의 공정을 거쳐 냉장고를 구성하고 있는 물질을 각각 분해.

2.2 공정에서의 화재 발생 사례 조사

현재 국내에서 사용하는 리사이클링 공정 중의 파쇄기로 파쇄하는 공정에서는 두차례의 파쇄를 거친다. 이

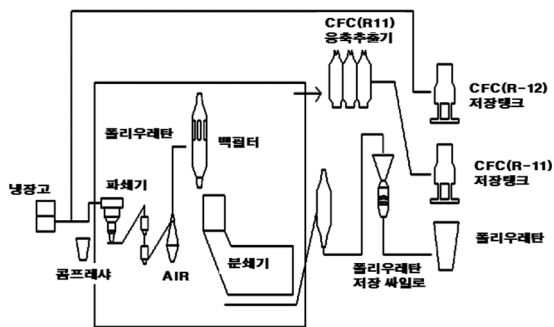


Figure 1. Refrigerator recycling process.

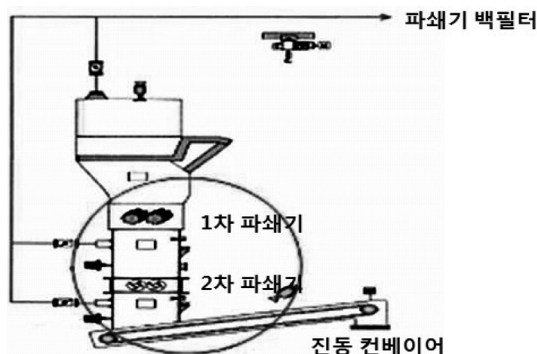


Figure 2. Crushing process.

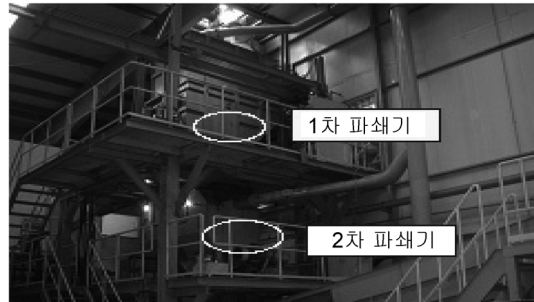


Figure 3. Integral crusher.

과정에서는 Figure 2에서와 같이 1차 파쇄기로 크게 파쇄 후 2차 파쇄기로 더욱 작게 파쇄하는 과정을 거치고 있다.

공정에서의 화재 발생사례를 조사한 결과 2차 파쇄기 호퍼와 커터 하단에서의 발생률이 가장 높다. 위 사진 Figure 3은 일체형파쇄기로 1차 파쇄기 하부와 2차 파쇄기 상부 즉, 상하가 바로 연결되는 밀폐식 공정으로 화재 위험을 초래한다. Table 1과 Figure 2, 3은 국내 리사이클링 사업장에서의 화재 사고사례의 리스트이며 현장의 화재사고사례의 사진이다.

이는 공정 내에서의 발화가 파쇄기커터와 호퍼에서 빈번히 발생하고 있음을 보여주고 있다.

2.3 냉장고 구성 요소를 통한 가연물 분석

냉장고를 구성하는 물질은 주로 철재 금속과 플라스틱이 대부분을 차지하고 있으며 냉장고의 단열을 위해 우레탄 폼이 10% 정도로 적지 않은 부분을 차지하고 있다. 이러한 냉장고를 구성하는 물질 중에서 파쇄공정에서 화재·폭발의 원인이 될 수 있는 가연성 물질에는 폴리우레탄, 가연성 증기(Cyclo Pentane을 비롯하여 HCFC-141b, HFC-365mf의 발포제와 메탄, 프



Figure 4. In the recycling-center of fire accident.

Table 1. In the Recycling-center of Fire Factor

No	발화장소	시간	비고(투입제품)
1	냉장고 Line 2차 파쇄기 호퍼	16:30~17:00	김치냉장고
2	냉장고 Line 2차 파쇄기 커터 하단	14:30~15:10	대형냉장고
3	냉장고 Line 2차 파쇄기 호퍼	14:30~14:40	세탁기
4	냉장고 Line 2차 파쇄기 호퍼	08:20~17:00	김치냉장고
5	냉장고 Line 2차 파쇄기 호퍼	10:30~11:30	세탁기
6	냉장고 Line 2차 파쇄기 호퍼	15:50~16:20	대형냉장고
7	냉장고 Line 2차 파쇄기 호퍼	13:30~13:45	김치냉장고
8	냉장고 Line 2차 파쇄기 커터 하단	17:40~17:50	김치냉장고
9	냉장고 Line 2차 파쇄기 커터 하단	17:40~17:50	김치냉장고
10	냉장고 Line 2차 파쇄기 커터 상단	10:40~10:50	대형냉장고
11	냉장고 Line 2차 파쇄기 커터 하단	13:15~14:00	대형냉장고

로판, 부탄, 이소부탄 등의 냉매제) 등이 있다.

2.4 발화 가능 물질 성분 분석

파쇄공정 중 발화 가능한 가연성기체의 성분을 분석하였다. 먼저, 혼합기체의 양을 알고자 가스 detector를 사용하여 시간대 별로 측정하였다. 측정 data에 근거하여 농도가 높은 구간에서의 혼합 gas 포집을 실시하였다.

GC/MS분석을 통하여 cyclopentane의 존재를 확인하였으며 메탄분석기를 통하여 메탄의 존재를 확인하였다. 아울러 채취한 시료를 통하여 기타 gas 성분을 분석하였다.

2.4.1 혼합기체의 가스 Detector 감지

파쇄공정에서 발생된 폭발성 가스의 양을 측정하기 위해서 Table 2와 같은 사양의 Detector를 파쇄기에 설치하고 여기서 출력되는 아날로그 신호로 NI DAQ Board를 통해서 받은 데이터를 처리 및 저장하고 이를 이용하여 가스 발생량을 조사 분석하였다.

냉장고에서의 혼합기체를 정량 분석한 것으로 각 파쇄공정에 가스 Detector를 설치하여 Figure 5에서 보여

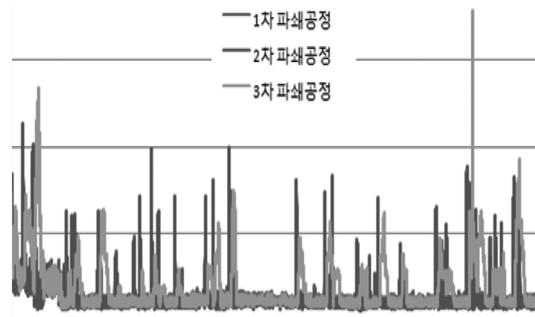
Table 2. Gas Detection System

감지 시스템	사양
데이터획득에 사용된 시스템사양	IBM PC (Intel Core2 Quad) NI PCI-6014 DAQ Board LabVIEW 8.5
가스 Detector Unit	와이즈콘트롤 AM-2000
Detector 출력	4~20mA (Arbitrary Scale)

지는 바와 같이 Data의 흐름을 감지하였다. 여기서 그래프의 가로축은 시간, 세로축은 임의의 값으로 표시된 가스양(Detector의 전류출력 값)을 나타낸다. 농도에 따라 1차에서 2차로 갈수록 파쇄기에서의 혼합가스 농도가 더 높게 변화함을 알 수 있다. 이는 2차 파쇄기에서의 위험이 더 높다는 것을 유추할 수 있는 근거자료가 된다.

2.4.2 사이클로펜탄(C_5H_{10})

사이클로펜탄(C_5H_{10})의 존재확인 은 보다 농도가 높은 가스 포집을 위하여 파쇄공정에 삽입 하기 전의 우레탄폼을 실험실의 밀폐된 공간에서 분쇄하여 발생되는 가연성 가스를 포집하였다. gas를 포집하여 GC/MS로 측정 한 결과 m/e 값이 42, 55, 70으로 최종 분자량이 70 이었으며, cyclopentane의 표준시료와 m/e 값이 동일하므로 cyclopentane이 존재함을 확인할 수 있다.

**Figure 5.** Combustible gas flow in the recycling-center.

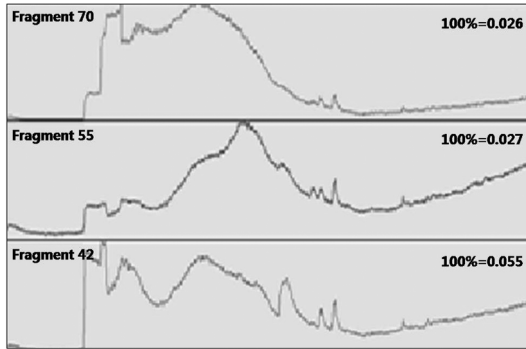


Figure 6. First lower part of gas mass spectrum.

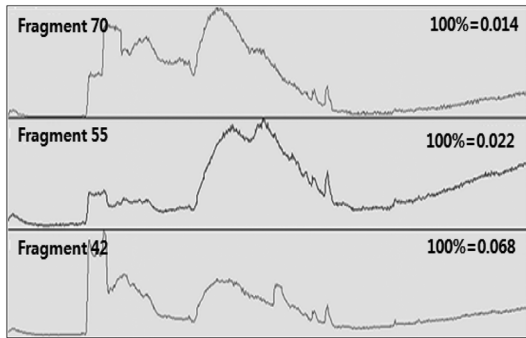


Figure 7. Second lower part of gas mass spectrum.

분석결과, cyclopentane의 존재량은 m/e값 70, 55, 42 기준으로 100%를 기준으로 1차 하부(0.026, 0.027, 0.055), 2차 하부(0.014, 0.027, 0.055) 공정 내에 존재한다. 따라서 파쇄공정 내에서 cyclopentane은 가연성 기체로 존재한다.

2.4.3 메탄(CH₄)

메탄(CH₄)의 측정은 기체 크로마토그래피(TCD 검출기)와 GA2000(메탄(CH₄) gas 전용 분석 장비)를 이용하여 측정하였다.

기체 크로마토그래피를 이용하여 CH₄ 표준물질을 측정 한 결과 크로마토그램의 RT(머무름 시간) 값이 11.4583min에 CH₄이 존재함을 확인할 수 있다.

또한 GA2000를 이용하여 사업장에서 채취한 시료를 측정 한 결과(메탄 gas의 측정) 대부분의 시료에서 메탄 gas가 최소 0.1%에서 최대 3.0%가 존재함을 확인하였다. 1차 하부2차 상부 파쇄공정 상부 층에서 채취한 혼합가스를 측정 한 결과, CH₄=0.03%으로 존재 함을 알 수 있었다.

2.4.4 기타 gas의 정성분석

채취한 시료의 기타 gas 성분을 분석하기 위하여 GC/MS(US, Varian, 2200 Ion Trap GC/MS)를 이용하여 분석한 결과 cyclopentane을 제외한 나머지 gas 화합물은 대부분 CFC 화합물인 냉매인 것으로 확인되었다.

gas 화합물을 분석한 결과 기타 gas 성분으로는 Trichloromonofluoromethane(CCl₃F)이 96.64%로 가장 높으며, Chloroform(CHCl₃) 87.55%, Pentaborane(CC₂F₂) 82.57%의 높은 순으로 나타났다.

2.5 점화원의 형태 고찰

점화원의 형태로는 파쇄공정 내 쌓여있는 우레탄 폼 위의 가연성 gas와 분쇄된 우레탄 분진이 분쇄기의 마찰 불꽃에 의해 점화되어 화재를 일으키는 형태와 공정 설비 내 체류되어 있는 가연성 gas가 조업 시작 후 발생한 마찰 불꽃에 의해 점화되어 화재를 일으키는 형태, 우레탄 분진이 축적되어 불완전 연소를 일으켜 연기 및 불꽃(화염)의 발생으로 화재를 일으키는 형태임을 알 수 있었다.

2.5.1 파쇄기 내부 온도 측정

파쇄 공정의 파쇄기 부분을 적외선(열화상)카메라(모델: TH 9100MV-Pro)로 온도를 측정 한 결과 아래보이는 사진과 같이 온도상승치가 최고 40.1도 임을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

따라서, 마찰열에 의한 착화로 보기는 어렵다.

2.5.2 화재양상

파쇄공정에서 발생하는 화재양상은 다음과 같이 추론할 수 있다.

1) 마찰 스파크로 인한 화재

파쇄공정 내 쌓여있는 우레탄 폼 위로 마찰 스파크가 일어나 가연성 gas 위로 점화되어 우레탄 폼에 불

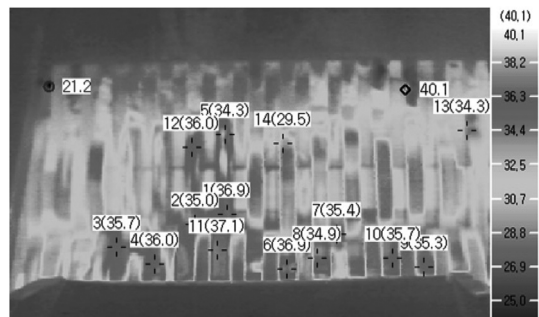


Figure 8. Infrared photography in crusher.

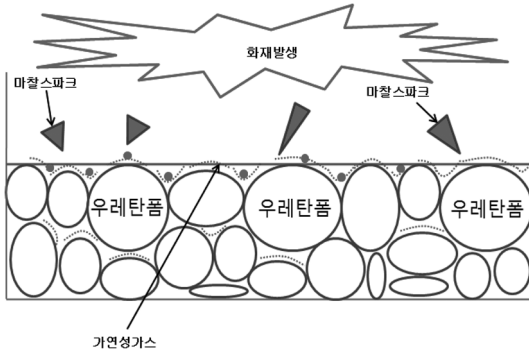


Figure 9. Fire of combustible gas mixture surrounding polyurethane foam by friction spark.

이 붙어 화재가 발생하는 양상이다.

Figure 9에서와 같이 사이클로펜탄을 주성분으로 하는 가연성혼합 기체들이 파쇄공정 내에 쌓여있는 우레탄폼 위로 폴리우레탄 표면 주위를 둘러 싸고 있다. 그 위에 마찰 스파크 등의 점화원에 의해서 혼합기체가 점화된 후에 폴리우레탄에 불이 계속 확산되어 화재가 발생하는 양상이다. 이 화재의 가능성은 매우 높다고 할 수 있으며 마치 분진폭발이 발생하는 양상과 비슷하다.

2) 불완전 연소로 인한 화재

고분자의 분진의 축적으로 인하여 불완전 연소를 일으킨다. 이로 인해 연기가 발생되고 불꽃(화염)을 일으켜 화재를 일으키는 양상이다.

폴리우레탄의 파쇄기의 밑 부분이나 옆의 모서리 부분에 축적되어 있다가 점화원에 노출되면 점화되면서 표면연소를 일으킨다. 표면연소를 훈소(그을음 연소, Smoldering combustion)라고 하는데 불완전연소를 하기 때문에 많은 연기를 발생시킨다. 훈소를 일으키다가 시간이 지나면 연소조건이 충족되면 불꽃을 형성하는 화염으로 발전하게 된다. 실제로 현장에서 연기가 많이 발생하다가 화재로 성장하는 경우가 있으므로 이의 가

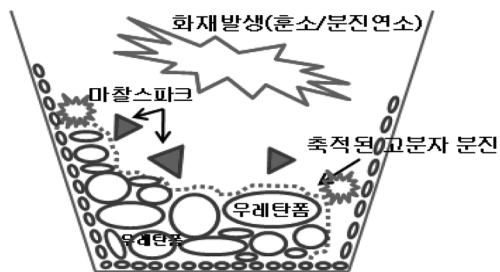


Figure 10. Fire of accumulated polyurethane in bottom.

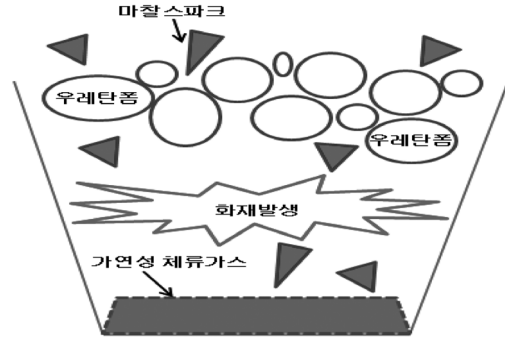


Figure 11. Flash fire of mixed combustible gases in bottom.

능성도 매우 높다.

3) 가연성가스로 인한 화재

공정 설비 내 체류되어 있는 가연성 가스로 화재가 발생하는 양상 파쇄 공정 중에 발생한 공기 중의 가연성혼합가스(사이클로펜탄과 탄화수소계 냉매인 메탄, 에탄, 이소부탄 등)가 파쇄기의 하부에 체적되어 있다가 점화원(마찰열, 금속용융 물질 등)에 의하여 점화되어서 Flash fire가 일어나는 양상이다. 이러한 현상(Flash fire)은 아침에 첫 파쇄공정을 시작할 때 발생하는데 이는 공기보다 무거운 가연성혼합기체가 파쇄기 하부에 체류하고 있다가 점화원에 노출되면 발생한다. 보통 현장에서 도깨비불이라고 불리며, 현장에서 목격되었기 때문에 화재의 가능성이 매우 높다.

3. 리사이클링 공정에서의 화재 예방 및 방호대책

파쇄공정에서 화재를 예방 및 방호를 하기 위한 방법으로는 다음과 같다.

- 1) 자동 불활성가스 공급시스템을 사용함으로써 파쇄기 호퍼 내 가연성가스를 배기를 시키면서 불활성가스를 주입하는 방법
- 2) 화재·폭발 위험분위기가 다양한 형태로 일어날 수 있을 것으로 예측되는 파쇄공정은 작은 국소 환기 설비에 적용되는 공기를 분사하고 배기구로 강제흡입 시스템을 갖춘 화재분위기의 조성을 가연한계 농도이하로 깨뜨리기 위한 강제 환기 또는 배기설비 설치
- 3) 파쇄공정의 점화원인 기계적 스파크로 인한 화재를 방지하기 위한 대책으로는 mist 형태의 수분을 계속적으로 주입.
- 4) 프레스, 펀칭 등의 과정을 통해 파쇄 공정 시의 우레탄 폼 내에 잔존하는 사이클로펜탄을 최소화

5) 적절한 가연성가스 농도 측정 자치에 의한 가연성가스 농도 측정

6) 파쇄공정을 1차 파쇄기 하부와 2차 파쇄기 상부가 바로 연결되는 밀폐식 공정(일체형)을 개방식(분리형) 파쇄 공정 채택을 하는 방법.

7) 1차 파쇄기의 파쇄날 사이가 벌어져 있어 이 틈새로 제품의 잔해물이 파쇄날에 눌러 붙어 철 고드름이 형성되는 결과를 초래한다. 이 철 고드름은 hot surface를 형성해서 점화원이 될 수 있다. 따라서 설비의 철저한 관리 요망.

8) 파쇄기 내부 배기구의 주기적인 관리와 작업환경의 개선으로 배기 능력의 저하를 막음으로써 환기 능력을 높임.

9) 방호대책으로는 화재발생에 대비하여 자동 살수 시설을 설치하는 방법과 화재의 감지를 위한 열감지기 및 선감지기를 설치.

전자제품의 리사이클링 공정에서 원자재의 회수와 더불어 가장 중요한 것이 안전문제이다. 특히 최근 들어 오존층의 보호를 위해 냉장고의 발포제로 사용하던 CFC의 대체품으로 사이클로펜탄을 사용하고 있으나 사이클로펜탄이 친환경적인 물질임에도 불구하고 안전적 차원에서는 처리 시 화재와 폭발의 위험을 내포하고 있어 사이클로펜탄의 위험성에 대한 사전 안전대책이 충분히 검토되어야 할 것이다.

4. 결 론

근본적인 화재·폭발 예방(prevention)하는 방법은 연소의 3요소인 가연물·점화원·산소를 적절하게 제거하여 화재가 근본적으로 일어나지 않도록 하는 방법이다. 즉 예방은 위험의 원인인 Hazard를 근본적으로 제거하는 것이다. 따라서 예방대책은 가연물, 점화원 및 산소를 제거하는 방법이다.

- 파쇄공정에 가스 Detector를 설치하여 Data의 흐름을 감지결과, 1차에서 2차로 갈수록 파쇄기에서의 혼합가스 농도가 더 높게 변화함을 알 수 있었다.
- cyclopentane은 2차 하부(m/e값 70 기준), 1차 하부, 실험실에서 분쇄한 우레탄 폼에 존재하며 파쇄공정 내에서 사이클로펜탄은 가연성 기체로 존재한다.
- 메탄(CH₄)은 기체 크로마토그래피(TCD 검출기)와 GA2000(메탄(CH₄) gas 전용 분석 장비)를 이용

하여 크로마토그램의 RT(머무름 시간) 값이 11.4583min에 CH₄이 존재했다. 사업장에서 채취한 시료를 측정 한 결과 메탄 gas가 최소 0.1%에서 최대 3.0%가 존재함을 확인하였다.

- 기타 gas 성분으로는 Trichloromonofluorom
- ethane(CCl₃F)이 96.64%로 가장 높으며, Chloroform (CHCl₃) 87.55%, Pentaborane(CCl₂F₂) 82.57%의 높은 순으로 나타났다.

본 연구를 수행하면서 얻은 결과들은 파쇄공정의 가연물은 폴리우레탄, 폴리우레탄 분진 및 가연성기체 혼합물(사이클로펜탄과 메탄의 존재 확인)이며 점화원은 기계적 스파크(마찰, 충격, 마찰열 및 철 고드름의 hot surface)라는 사실을 알 수 있었다. 아울러 화재 양상은 폴리우레탄의 표면의 가연성혼합가스(주로 사이클로펜탄)의 점화, 폴리우레탄 분진의 혼소(표면연소) 및 가연성혼합가스의 flash fire(도깨비 불)임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 오재현, “금속자원 리사이클링의 필요성”, 환경교육, pp.128-132(1994).
2. 이근원, 김관용, “콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.17, No.1 (2003).
3. 정종환, “냉장고 리사이클링 공정에서의 싸이클로펜탄 안전대책”, e-리사이클링(2008).
4. Factory Mutual, “Caution-Plastics in construction, Part 1. Foamed Insulation”, Record, 3rd Quarter, pp. 6-11(1997).
5. Masaharu Nifuku, Hiroshi Tsujita, Kenji Fujino, Kenji Takaichi, Cyrille Barre, Makiko Hatori, Shuzo Fujiwara, Sadashige Horiguchi and Elsa Paya, “A Study on the Ignition Characteristics for dust explosion of Industrial Wastes”, Journal of Electrostatics, Vol.19, pp.128-132(2005).
6. National Institute of Standards and Technology (NIST), NIST Chemistry WebBook.
7. National Fire Protection Association (NFPA), “FIRE PROTECTION HANDBOOK (Nineteenth Edition)”, NFPA, pp.8-210-8-219(2003).
8. Society of Fire Protection Engineers (SFPE), “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Third Edition)”, SFPE, pp.2-229-2-245(2003).