세탁소 유기용제 회수건조기의 폭발 위험성에 관한 실험적 연구

최정민 · 손봉세*[†] · 김동석

한국화재보험협회 부설 방재시험연구원, *가천대학교 소방방재학과

An Experimental Study on Explosion Hazard of Dry Cleaning Solvent Recovery Machine in Laundry

Jung-Min Choi · Bong-Se Son*[†] · Dong-Suk Kim

Fire Insurers Laboratories of Korea

*Fire Research Division, Gacheon Univ.

(Received December 5, 2012; Revised February 1, 2013; Accepted February 1, 2013)

요 약

공중위생관리법 시행규칙에 의해 설치가 의무화된 세탁소 회수건조기의 폭발 위험성을 가연물과 점화원의 두 가지 측면에서 분석하고 실제 현장에 설치되는 유기용제 회수기와 건조기를 사용하여 실험모형 폭발실험을 실시하여 폭발이 발생하는 조건을 확인하였다. 가연물인 세탁용제는 우리나라에서 널리 사용되는 국산 제품 2종으로 선정하여 인화점, 폭발하한계 및 포화증기압 등의 특성치를 실험을 통해 구하여 각 온도에 따라 폭발 위험성 여부를 판단할 수 있는 폭발특성곡선을 도출하였다. 점화원은 세탁물 간의 마찰과 금속 이물질과 세탁물 간의 접촉으로 발생할 수 있는 정전위로 가정을 하였고 실제 세탁물의 온도, 습도 및 대전방지제 사용 여부에 따라 발생하는 정전위를 측정하였다. 유기용제 회수건조기에 투입하는 세탁용제의 양과 농도, 운전온도 등을 변화시키면서 실험폭발실험을 수행하여 세탁소 유기용제 회수건조기의 폭발 발생조건을 확인하였다.

ABSTRACT

This study analyzes the explosion hazard of dry cleaning solvent recovery machine in laundry shop in two aspects, i.e. combustible and ignition source, and determines the explosive conditions of this machine by conducting mockup explosion tests repeatedly, varying conditions and using real dry cleaning solvent recovery machines. As to combustibles, two kinds of combustibles used widely in Korea have been selected and tested. The flash points, LEL's, and saturation vapor pressures of those combustibles have been measured, and their explosion specific curves have been drawn, based on the results of the measurements, so that the explosion risks of those materials may be determined, depending on the temperatures. Potential voltages generated from materials for laundry and foreign materials of metals have been assumed to be the ignition sources in this application, and their potential voltages have been measured, depending on temperature, humidity, and antistatic agent, by using real materials for laundry and a potential voltage measuring device. Tests have been conducted, varying the quantities, concentrations, and operating temperatures of materials for laundry. As a result, explosions have not been generated with potential voltages of materials for laundry, but explosions have been observed when applying artificial spark energy of 2.0 mJ.

Keywords : Dry cleaning solvent, Combustible, Ignition source, Explosion, Laundry shop

1. 서 론

회수건조기는 회수기와 건조기를 줄여 부르는 말로써 세탁소 드라이클리닝 과정에서 세탁물에 잔존하는 세탁용제를 증발시켜 제거하는 건조기와 증발된 세탁용제의 유증기를 냉각기를 통과시켜 응축시킨 후 이를 회수하여 재활용하는 회수기로 구성되어 있다. 회수건조기 사용 이전

의 세탁소에서는 회수기 없이 건조기만을 사용하였으나 최근 국내 대부분의 세탁소에서는 석유계 용제를 사용함에 따라 발생하는 유증기를 대기로 방출시킴에 따른 인명 안전 및 환경유해성 등의 문제가 대두되고 있는 실정이었다⁽¹⁾. 따라서 2005년 11월 1일 개정되어 2006년 11월 2일부터 시행된 공중위생관리법 시행규칙 제6조에 의해 세탁용제로 석유계 용제를 사용하는 경우에는 회수건조기가

[†] Corresponding Author, E-Mail: bsson@gachon.ar.kr
TEL: +82-31-750-5713, FAX: +82-31-750-8749

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.1.039>

부착된 세탁용 기계를 사용하도록 되어 있다⁽²⁾.

동 시행규칙 이후 2012년 5월 현재까지 64건의 세탁소 화재·폭발사고가 보고⁽³⁾되어 회수건조기의 위험성이 심각한 문제로 대두되었으며, 최근 시행규칙이 개정되어 세탁업자의 경제적인 부담을 덜기 위해 세탁 처리용량의 합계가 30 kg 이상인 경우에만 세탁물의 건조 시 용제 회수기능이 있는 기계를 설치·사용하도록 되었다⁽⁴⁾. 그러나 이와 관련하여 체계적인 연구는 아직 미흡한 실정이며, 본 연구에서는 세탁소에서 사용하는 세탁용제의 폭발 위험성을 분석하고 실험모형 폭발실험을 통해 폭발이 발생하는 조건을 확인하고자 하였다.

2. 선행연구 분석

박은주는 2011년 세탁소 회수건조기 발화가능성 연구⁽⁵⁾에서 세탁용제 자체의 위험성, 그리고 접촉 불량, 방전, 합선, 트래킹, 과부하·과전류와 같은 전기적인 위험성 등 잠재적인 위험요인을 제시하였다. 또한 2008년부터 2010년까지의 회수건조기 화재발생사례를 분석하고 9가지 서로 다른 조건의 화재재현 실험을 반복 실시하였다. 정전기방지제 투입 유무에 따른 정전위를 측정하였고 건조기 드럼 내부에 라이터만을 넣고 가동시켜 불꽃 발생 여부를 관찰하였으며, 세탁용제, 신나 그리고 전기스파크 발생장치를 이용하여 인위적인 폭발현상을 관찰하였다. 그 결과를 종합하여 회수건조기 화재조사의 방향을 제시한 바 있다.

3. 연구범위 및 연구방법

3.1 가연물의 폭발위험성 분석

현재 우리나라 세탁소에서 사용되는 석유계 용제는 파라핀 계열, 올리핀 계열, 방향족 계열, 그리고 납센 계열의 C₈~C₁₂ 사이의 탄화수소로 구성된 혼합물로써⁽⁶⁾ 대부분 국내 정유사에서 생산하고 중간 유통업자가 각 세탁소로 판매하는 제품을 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 대표적 제품으로는 ‘유크린’과 ‘키크솔’이 있으며, 일부 유통업자는 외국 정유사에서 제조하는 ‘엑솔디’를 수입하여 판매하거나, 여러 세탁용제를 혼합하여 판매하고 있다. 제품의 물

성은 각 제조사 홈페이지에 게시된 물질안전정보(MSDS)를 통해 확인할 수 있다. 본 연구에서는 앞에 언급한 국내 제품 2종과 외산 1종, 그리고 일선 세탁소를 통해 구입한 세탁용제 3종을 실험 대상으로 하였다. 인화점은 6종에 대해 모두 측정하였고, 증기압곡선과 폭발한계농도는 국내 제품 2종에 대해서만 측정하였다. 국내 제품 2종의 주요 물리화학적 특성을 MSDS에 근거하여 Table 1에 일부 발췌하였다.

3.1.1 인화점측정

액상 시료의 인화점 측정은 시료의 종류, 예상 인화점 및 점도 등에 따라 여러 가지 시험방법이 있으나, KS M 2010 : 2008 원유 및 석유 제품 인화점 시험방법-태그 밀폐식 시험방법⁽⁷⁾을 적용, (50±0.5) ml의 시료를 취하여 1 °C/(60±6)초의 승온 속도로 매 0.5초마다 시험 불꽃을 대어 시료의 증기가 인화하는 최저 온도를 측정하였다.

3.1.2 폭발한계농도 측정

폭발한계농도는 폭발에 관련된 가장 밀접한 물성이므로 국내 제품 A와 B에 대해 각 제조사 MSDS 자료를 확인하였고, 국내 제품 2종에 대해 산업안전보건연구원에 의뢰하여 ASTM E 681-04 Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals⁽⁸⁾을 적용하여 폭발한계농도를 측정하였다. 측정의 결과는 mg/L 단위로 산출되며, 물질의 정확한 분자량을 알면 이상기체로 가정하여 % 단위로 변환이 가능하다. 제품 A의 분자량은 MSDS에 근거하여 142 g/mol로, 제품 B의 분자량은 110 g/mol~160 g/mol임을 감안하여 중간값인 135 g/mol로 가정하였다.

3.1.3 포화증기압 측정

세탁용제 회수건조기 내의 온도가 올라감에 따라 의류에 묻어 있던 세탁용제가 증발하여 일정 농도의 유증기를 형성한다. 회수건조기 내에서 증발한 유증기는 직접적으로 폭발의 위험성을 가지고 있으므로 국내 제품 A와 B에 대해 온도 증가에 따라 각각 어떠한 포화증기압 특성을 갖는지 OECD Guideline for the testing of chemicals No. 104: Vapor pressure에 따른 동적방법⁽⁹⁾으로 20 °C부터 120 °C까지 10 °C 간격으로 포화증기압을 측정하였다. 결과는 Pa 등 압력 단위로 얻어지는데 이를 대기압의 분압으로 가정하여 % 단위로 환산하였다.

3.2 점화원의 폭발위험성 분석

세탁소 회수건조기 화재·폭발사고에서 점화원 역할을 할 가능성이 있는 요인은 선행 연구에 따르면 접촉 불량에 의한 국부적 온도상승, 드럼과 옷 등의 마찰에 의한 방전, 합선에 의한 발열, 표백제 내 염소가루가 황동전극에 고착되어 통전불량을 일으키고 통전 시 발생하는 스파크, 필터에 과다한 먼지가 축적되어 모터의 과부하 운전을 유발함에 따른 과전류 등이 있다.

Table 1. Physical and Chemical Properties of Product A and Product B

Solvents	Product A	Product B
Molecular weight (g/mol)	142	110~160
Specific gravity	0.778 (15.6 °C)	0.78~0.82
Boiling point range (°C)	155~205	165~265
Flash point (°C)	44	40.5
Auto ignition point (°C)	240	220
UFL/LEL (vol%)	1.0/8.0	0.7/5.0

Table 2. Clothing Used for Measuring of Static Potential

Type	Main material	Type	Main material
Top 1	Wool 100 %	Top 6	Cotton 100 %
Top 2	Cotton 100 %	Pants 1	Polyester 65 %, Rayon 35 %
Top 3	Polyester 100 %	Pants 2	Polyester 90 %, Span 10 %
Top 4	Polyester 100 %	Pants 3	Polyester 65 %, Rayon 35 %
Top 5	Cotton 65 %, Nylon 35 %	Scarf	Wool 100 %

이번 연구에서는 이들 중 세탁물 등에 의해 발생하는 정전위가 조건에 따라 어떤 변화를 보이는지 실측하였다. 즉 동일 세탁물에 대해 건조기 드럼 내부의 온도, 습도, 건조기의 접지 유무 및 대전방지제의 사용 유무에 따라 발생하는 정전위를 측정하였다. 온도는 25℃~55℃ 실시하였고, 습도는 인위적인 조건 설정이 어려워 분무기를 이용하여 가동 중간에 물을 분무 후 가동을 재개하였다. 대전방지제는 ‘바운스(Bounce)’라고 하는 고품의 필름 형 제품과 일반적인 액상의 대전방지제를 사용하였다. 액상의 대전방지제는 제조사 지침대로 물에 200 : 1의 비율로 희석하여 사용하였다. 실험에 사용한 합성섬유는 Table 2에 나타내었고 총 중량은 5.92 kg이었다.

정전위 측정실험에 사용한 정전위 측정장치는 실시간으로 측정되는 정전기 전압(voltage)을 모니터링 및 저장이 가능하다. 측정장치의 감지부를 지름 300 mm의 원형 동판에 약 25 mm 이격시켜 스탠드에 고정 설치하고, 이 원형 동판은 회수건조기 드럼 내부에 삽입할 동관과 연결하였다. 회수건조기 드럼은 계속 중심축을 중심으로 회전하고 있으므로, 드럼 중앙부에 구멍을 내어 동관을 약 15 cm 가량 내부로 삽입하였다.

3.3 실물모형 폭발실험

실제 세탁소에서 사용하는 장치와 동일한 회수건조기에 대하여 안전한 조건으로부터 위험한 조건을 주었을 때 어느 조건에서 폭발이 발생하는지를 확인하고 그 결과를 관찰하기 위하여 실물모형 폭발실험을 실시하였다. 유기용제는 국내 제품 A와 B 가운데 MSDS에 보고된 인화점이 상대적으로 더 낮은 제품 B를 사용하였다.

3.3.1 실험장치 구성

실제 세탁소에서 사용하는 건조기와 회수기, 스팀보일러를 사용하여 실험장치를 구성하였다. 건조기는 세탁소에서 일반적으로 사용되는 15 kg 용량의 건조기를 사용하였으며 건조기 내부에 장착된 회전드럼은 직경 0.72 m, 깊이 0.57 m의 실린더 모양으로써 옆면에 유증기 통과를 위한 구멍이 다수 뚫려 있는 형상을 가지고 있다. 실험에 사용

한 회수기는 분리탑재형 및 밀폐순환식 구조를 가지고 있는 제품으로서, 회수기 입구 측 덕트 부분과 건조기 상단 스팀라디에이터(Steam radiator) 부분에 열전대가 설치되어 있어 해당 지점의 온도를 모니터링할 수 있고, 사용자가 설정한 온도 이상으로 각 온도가 상승하면, 회수기에 설치된 에어댐퍼가 개폐하여 내부 유증기를 외부로 바로 배출할 수 있도록 프로그램 된 기능을 갖추고 있었다. 15 kg 용량의 스팀보일러(Steam Boiler)로서 흔히 사용되고 있는 제품 중 하나를 선정하였다. 전기적 방식으로 고온의 스팀을 발생시킨 후 배관을 통해 건조기 상단 부분으로 인입되어 접촉 열교환을 통해 건조기 내부의 온도를 높인다.

세탁물은 합성섬유로 이루어진 것으로써 동일한 의류 제품을 2벌씩 준비하여 대전방지제 사용 유무에 따른 결과를 알아보고자 하였다. 세탁용제는 ‘제품 B’를 대전방지제는 국내 제품 중 하나를 사용하였으며, 분무기를 사용하여 세탁물에 고르게 도포하여 스며들도록 하였다.

안전한 조건으로부터 위험한 조건으로 순차적인 실험 진행 시 세탁물에 의한 정전기에 의해 폭발을 일으키지 못할 경우 인위적인 전기 스파크를 발생시키기 위한 정전기 방사장치는 NoiseKen 사의 ESS-200AX를 사용하고 실험용 점화플러그를 건조기 문 부분에 구멍을 뚫어 설치하여

Figure 1. Apparatus for electric spark. **Figure 2.** Electrode for ignition.

Figure 3. Experimental apparatus.

사용하였다. 이 실험용 점화플러그 전극의 간격은 약 2 mm로 주었다.

3.3.2 실험변수

위험요인을 크게 가연물 조건과 점화원 조건으로 대별하고, 가연물에 있어서는 건조기의 온도와 세탁용제의 농도를 변수로 설정하였다. 건조기의 온도가 높을수록 세탁용제의 점화에너지가 감소하여 폭발 위험성이 증가하며, 더 많은 양의 세탁용제가 기화하여 폭발하한계를 초과하는 충분한 농도의 유증기를 형성하기 쉽기 때문이다. 이때 세탁용제의 농도에 대한 위험도를 ‘높은’, ‘중간’, ‘낮음’의 세 가지로 구분하였다. 세탁용제 투입량 대비 건조기 내부의 유증기 농도를 직접 측정할 수 없었으므로, 유증기가 회수기에 의해 원활히 회수되는 경우는 건조기 내부 유증기 농도가 낮게 유지될 것이라고 가정하였고 반대의 극단적인 경우로 회수기의 냉매 압축기 등이 고장을 일으켜 증발한 유증기가 전혀 회수되지 않고 다시 건조기로 재 유입되는 경우에는 시간이 감에 따라 건조기 내부 유증기 농도가 포화농도에 다다를 때까지 계속 증가할 것이라고 가정하였다. 전자와 후자의 중간 경우로 회수기는 정상 작동하고 있으나 필터 부분에 과도한 양의 먼지 등이 쌓여 내부 증기의 흐름에 일부 막힘이 생길 경우에는 유증기 농도가 ‘중간’ 수준이라고 가정하였다.

점화원은 처음에는 세탁물과 금속 이물질로부터 발생하는 정전위에만 한정하였으나, 폭발이 관찰되지 않아 정전기 방사장치를 사용하여 정전기 방사장치에서 발생이 가능한 2.0 mJ 등 작은 크기의 에너지로부터 큰 에너지 순으로 인가하였다.

4. 연구결과 및 분석

4.1 가연물의 폭발위험성 분석

6종의 석유계 세탁용제에 대한 물성 측정 결과를 Table

Table 3. Flash Point and Explosion Limit of Solvents

Solvents		Flash Point (°C)	Flammable Limit (%)	
			UFL	LEL
Product of major company	A	44.0	8.0*	0.9
	B	40.5	5.0*	0.9
	C	46.0	5.6*	0.8*
Product of random sampling	D	39.5	**	-
	E	43.5	**	-
	F	42.5	**	-

*These UFLs and LELs are excerpts from MSDSs provided by each manufacturer.

**Flammable limit tests were not conducted or there doesn't exit MSDSs from manufacturers.

3에 나타내었다. 인화점은 외산 제품 C가 가장 높은 값을 보였으며, 임의수거 제품 D를 제외하면 모두 40.0 °C 이상의 값을 보였다.

폭발하한계의 경우 제품 A의 MSDS 제시값은 1.0 %,

Figure 4. Hazard characteristic curve of product A.

Figure 5. Hazard characteristic curve of product B.

제품 B의 MSDS 제시값은 0.7 %로 측정결과와 약간의 차이를 보였다. 이 차이는 세탁용제는 수습 중의 탄화수소 혼합물로서 시료의 불균질성에 기인한 것으로 보인다.

위 시험결과와 포화증기압 시험결과를 종합하면 위험특성곡선을 얻을 수 있다. 아래 Figure 4와 Figure 5는 각각 제품 A와 제품 B에 대한 시험결과를 종합하여 나타낸 것이다. 40 °C~50 °C 구간의 포화증기압이 온도에 따른 일차함수라고 가정하면 45 °C에서 형성될 수 있는 유증기 농도는 모두 1 % 이상으로 예상되며 이는 폭발하한농도 0.9 %를 상회하여 폭발위험범위에 들어간다고 판단할 수 있다. 실제 세탁소 회수건조기는 세탁물의 종류와 양에 따라 가변적이기는 하지만 일반적으로 40 °C~60 °C 범위에서 운전되고 있음을 고려할 때, 가연물 측면에서는 항상 폭발의 위험성이 존재한다고 볼 수 있다.

4.2 점화원의 폭발위험성 분석

실험결과를 Table 4에 나타내었다. 실험 결과로 보아 회수건조기의 접지는 최대 전위를 낮추어 주는 효과가 미미하였다. 이는 회수건조기 본체에 접지를 하더라도, 직접적인 정전기는 드럼 내부에서 회전 및 마찰을 계속하는 세탁물 등에 의해 일차적으로 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 회수건조기의 구조적 한계로 드럼 내부에 접지를 위한 장치를 추가하는 것이 좀 더 효과 면에서 향상을 기대할 수 있겠지만, 이 방법은 현실적으로 어려움이 많을 것으로 생각된다. 회수건조기 드럼 내 수분을 첨가하여 습도를 높임으로써 정전위를 감소시키는 방법은 실제로 작게는 36.6 %에서 크게는 60.8 %의 최대 정전위 감소 효과를 불러왔고 첨가 전후의 평균 정전위도 분명 감소하는 효과를 보였다. 일부 외산 회수건조기에 장착된 생증기(moisture) 분무장치는 이러한 효과를 적용한 것으로 보인다. 그러나

이 경우 일시적인 감소 효과만 있기 때문에 일정한 시간 간격을 두어 계속적인 생증기 분무가 이루어져야 할 것이다. 대전방지제의 효과로는 고품의 대전방지제보다 액상의 대전방지제의 기능이 더욱 우수한 것으로 나타났다. 실제 액상의 대전방지제는 회수건조기에 세탁물 투입 시 적용하는 것이 아니라, 세탁기에서 세탁 단계에서 세탁용제와 함께 일정한 비율로 첨가되어 세탁물 전반에 고르게 분포되게 되기 때문에 실제 효과는 수동으로 세탁물 일부에 분무했던 이 실험에서보다 양호할 것으로 판단된다. 또한 이 실험에서 보고자 하였던 회수건조기 온도에 따른 정전위 발생의 크기는 일정한 경향성을 보이지는 않았다.

최대 측정 전위는 9,590 V로 측정되었다. 이 정전위가 방전되었을 때의 에너지는 도전된 물체의 정전용량과 전위 또는 방출되는 전하의 양으로 결정되며, 다음 식(1)과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \quad (1)$$

여기서 C는 대전체의 정전용량(F)을 의미한다. Randeberg에 의해 보고된 일반 산업계에서 발생할 수 있는 이론적인 스파크 에너지⁽¹⁰⁾는 Table 5와 같다.

세탁물에 대전되는 정전용량은 세탁물 간의 접촉 면적, 접촉 횟수, 재료특성 등 여러 요인에 의해 결정되므로 이를 직접 측정하는 일은 간단한 일이 아니다. 차선택으로 합성섬유가 금속류에 비해 정전용량이 작다는 전제하에 최대 10 pF 이하일 것이라고 추정하면, 세탁물 간의 방전 에너지는 식(1)에 C=10, V=9,590를 대입하여 0.46 mJ이다.

K.S. Choi 등은 세탁용제는 아니지만 이와 유사한 물질인 등유(Kerosene)에 대하여 밀폐된 용기가 아닌 일부 개방된 공간에 등유와 공기를 최적의 당량비로 혼합하여 분무(spraying)하며 일정 범위 크기의 점화에너지를 주어 그

Table 4. Measured Voltage in Drying Machine

Conditions				Measured value(V)		
Antistatic agent	Water spray	Bonding	Av. Temp. (°C)	Max.	Av.	Dev.
Not applied	Not applied	Applied	25.7	7,730	1,972	2,518
Not applied	Applied	Applied		4,510	2,178	1,166
Not applied	Not applied	Not applied	25.7	7,820	2,818	1,732
Not applied	Applied	Not applied		4,960	1,534	1,161
Not applied	Not applied	Not applied	33.6	8,020	2,958	1,934
Not applied	Applied	Not applied		3,140	594	619
Not applied	Not applied	Not applied	55.2	7,370	2,541	1,837
Not applied	Applied	Not applied		4,260	901	1,136
Not applied	Not applied	Not applied	25.8	9,590	3,150	2,315
Applied (film)	Not applied	Not applied		7,540	2,267	1,915
Applied (Liq.)	Not applied	Not applied	28.2	1,540	313	285
Applied (Liq.)	Not applied	Not applied	34.5	1,120	307	245
Applied (Liq.)	Not applied	Not applied	50.3	1,970	339	259

Table 5. Examples of Spark Energies Generated in General Industries

Charged object	Capacitance (pF)	Potential (kV)	Approx. energy (mJ)
Single screw	1	5	0.01
Flange (width 100 mm)	10	10	0.5
Shovel	20	15	2
Small container (~50 L)	50	8	2
Funnel	50	15	6
Person	300	10	15

특성을 연구하였다⁽¹¹⁾. 이 연구에 따르면 등유의 최소점화 에너지는 온도와 압력에 의존하는데, 30 °C~150 °C 온도 범위에서 0.37 mJ~7.2 mJ의 최소점화에너지를 가진다. 등유와 공기 혼합기체 상태에서 50 °C 이하에서는 폭발이 일어나지 않았으며, 100 °C 조건에서 점화에너지 1.20 mJ를 인가하였을 때 폭발이 일어났다. 이 결과로 보아 본 연구의 대상인 세탁용제는 ‘50 °C~100 °C의 온도’에서 ‘1.2 mJ 보다는 큰 점화에너지’가 주어질 때 폭발할 수 있다고 예상할 수 있다.

이렇게 볼 때, 이번 실험 과정 중에 측정된 9,590 V는 0.46 mJ의 에너지를 방전할 수 있는 정전위 수준으로, 폭발을 일으키기에는 충분하지 않다고 판단되며, 역시 정전용량 $C=10$ pF이라고 가정하면 식(1)에 따라 1.2 mJ 이상의 에너지가 방전되기 위해서는 계산상으로 적어도 약 15,500 V 이상의 정전위가 필요하다.

4.3 실험모형 폭발실험 분석

1.5 L의 세탁용제를 투입하고 회수건조기 운전조건 및 덕트 막힘 정도를 이용하여 유증기의 농도를 정성적으로

Table 6. Result of Explosion Test

Conditions				No. of Repeating	Explosion
Antistatic agent	Temp (°C)	Solvent (L)	Spark (mJ)		
Applied	40	1.5	-	6	No
Not applied	40			12	No
Applied	50			6	No
Not applied	50			12	No
Applied	70			6	No
Not applied	70			12	No
Not applied	80			5	No
Not applied	80	0.20, 0.30	2.0~7.5	20	No
Not applied	80	0.40	2.0	1	Yes

Figure 6. Explosion of drying and recovery machine.

낮음, 중간, 높음의 세 단계로 조절한 상태에서 59회의 실험을 반복하였다. 그러나 제한된 횟수의 반복실험 결과 세탁물과 금속 이물질로부터 발생하는 정전위로는 폭발을 관찰하지 못하였고, 유증기 농도를 ‘높음’으로 유지한 후 인위적인 전기 스파크를 인가하여 폭발을 관찰했다. 먼저 세탁용제의 양 0.2 L~0.3 L에서 스파크 에너지를 2.0 mJ~7.5 mJ까지 인가 시 폭발은 발생하지 않았고, 세탁용제의 양을 0.40 L 투입 후 2.0 mJ의 스파크를 인가하였을 때 폭발이 발생하였다.

결국 실제 현장에서 있음직한 조건, 즉 유기용제 회수건조기를 운전하는 온도 범위에서 합성섬유 의류와 대전방지제를 넣지 않은 유기용제 및 금속 이물질만으로는 폭발을 일으키는데 실패하였다. 이는 유기용제 폭발에 필요한 정전기 방전이 쉽게 일어나지 않음을 의미하나, 동시에 이 조건에서는 폭발이 일어나지 않는다고 선불리 판단할 수도 없다는 점에서 본 연구는 한계점을 지닌다. 그러나 유기용제 회수건조기의 온도제어장치가 정상적으로 작동하지 않아 80 °C까지 온도가 상승한 경우에는 2.0 mJ의 작은 에너지 방전에 의해서도 폭발이 발생한다는 사실을 규명했다는 데 의미가 있다할 수 있다. 후속 연구로써 40 °C에서 60 °C 범위에서 방전 에너지를 높여가면서 폭발이 최초로 발생하는 점화원의 경계조건을 실험적으로 규명하는 연구가 필요하다.

5. 결 론

세탁소 드라이클리닝 작업과정에서 사용하는 회수건조기가 갖는 폭발위험성을 가연물과 점화원 측면에서 실험 분석하고 실험모형 폭발실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 세탁용제 A와 B 2종의 인화점, 폭발하한계, 그리고 포화증기압 특성을 고려했을 때 45 °C에서는 A와 B 모두 폭발하한계 이상의 유증기 농도를 형성할 수 있다. 회수건

조기를 높은 건조온도로 운전할수록 세탁용제가 가질 수 있는 유증기 농도도 증가하여 위험성이 높아진다.

(2) 합성섬유로 이루어진 세탁물 간의 마찰에 의해 발생하는 정전위는 최대 9,590 V가 측정되었으며, 필름형 대전방지제 보다는 액상 대전방지제의 정전위 감소효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

(3) 세탁물의 정전용량(C)을 10 pF이라고 가정하면, 최대 정전위 측정값인 9,590 V이 방전될 경우 0.46 mJ의 에너지에 상응한다. 이는 선행연구로부터 추정된 최소점화에너지(MIE)보다 작은 값으로 폭발을 일으키기 힘들며, 최소 15,500 V 이상의 정전위가 방전되어야 할 것으로 판단된다.

(4) 실물모형 폭발실험 결과, 세탁물 간 정전위에 의한 폭발은 59회의 실험 중에는 관찰하지 못하였고, 80 °C에서 2.0 mJ의 인위적인 스파크를 인가하였을 때 폭발이 발생하였다. 이는 세탁물 간 통상 발생하는 정전위가 폭발에 충분한 수준까지 도달하지 않았기 때문이다.

(5) 실제 유기용제 회수건조기가 운전되는 온도 영역에서 폭발을 일으키는 점화원 에너지의 최소값은 찾아내지 못하였으나, 온도제어장치의 고장으로 내부 온도가 80 °C 까지 높아지면 2.0 mJ의 작은 에너지로도 폭발이 발생한다는 점을 실험적으로 규명하였다.

참고문헌

1. Ministry of Health and Welfare, "Study on Safety Criteria and Management of Solvent Recovery Unit" (2010).
2. Enforcement Regulation Clauses 6 of Public Health Control Act, Ministry of Health and Welfare (2005).
3. J. W. Park, J. H. Jung, and D. H. Hwang, "Risk Analysis and Safety Guideline Proposal on Solvent Recovery Machine in Laundry", Korea Testing Laboratory (2012).
4. Amendment to Enforcement Regulation Clauses 6 of Public Health Control Act, Ministry of Health and Welfare (2013).
5. E. J. Park, "The Study on the Possibility of Ignition in a Solvent Recycling Machine at the Laundry", Proceedings of 2010 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Investigation (2011).
6. J. Y. Jung, N. R. Lee, H. J. Jyeon, K. Y. Lee and J. K. Park, "Evaluating the Harmful Factor of Laundry Work and Management of Work Environment", Occupational Safety and Health Research Institute (2002).
7. KS M 2010 : 2008 "Testing Methods for Flash Point of Crude Oil and Petroleum Products - Determination of Flash Point - Tag Closed Cup Method".
8. ASTM E 681-04 Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals.
9. OECD, "OECD Guideline for Testing of Chemicals Section 1:Physical-Chemical Properties", OECD Publishing (2006).
10. E. Randeberg, "Electric Spark Ignition of Sensitive Dust Clouds in the sub 1 mJ range, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor Scientiarum", University of Bergen, Norway, p. 2 (2006).
11. K. S. Choi, M. Yamaguma and A. Ohsawa, "Ignitability of Sprayed Liquids due to an Electrostatic Spark", Advanced Powder Technology, Vol. 18, No. 1 (2007).