

## ASTM E681-04 표준에 따른 가연성 냉매의 희박가연 한계

박 기 정, 우 승 규, 정 동 수<sup>†\*</sup>  
인하대학교 대학원, \*인하대학교 기계공학과

### Lower Flammability Limits of Flammable Refrigerants According to ASTM E681-04 Standard

Ki-Jung Park, Seung-Gyoo Woo, Dongsoo Jung<sup>†\*</sup>

*Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*\*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*(Received June 29, 2007; revision received October 2, 2007)*

**ABSTRACT:** In this study, lower flammability limits (LFLs) of three hydrocarbon refrigerants (R600a, R290, R1270) and two hydrofluorocarbon refrigerants (R152a, R32) and DME (RE170) are measured by the method proposed by ASTM E681-04 Standard. Flammability tests are carried out at three temperatures of 23 °C, 60 °C and 100 °C and relative humidity 50%. Test results show that the present data for isobutane and propane obtained at 23 °C are similar to those found in the literature, confirming indirectly the reliability of the present test method and facility. For propylene, R152a, and R32, LFLs found in the literature differ considerably. Especially, the deviation of LFL of propylene is more than 30% among the literature data. The present data for propylene, R152a, and R32 agree with either of the data sets available. As the temperature increases from 23 °C to 100 °C, LFLs of all refrigerants tested decrease. LFLs of most refrigerants tested in this study at 60 °C decrease by 0.1~0.3% as compared to those at 23 °C. Also LFLs of most refrigerants tested in this study at 100 °C decrease by 0.1~0.3% as compared to those at 60 °C.

**Key words:** Flammability(가연성), Flammable refrigerants(가연성 냉매), Lower flammability limits(LFL, 희박 가연 한계)

#### 1. 서 론

1930년대 개발된 CFC는 뛰어난 화학적 안정성과 열역학적 특성으로 지난 수십 년 동안 다양한 냉동/공조기에서 폭넓게 사용되어 왔다. 그러나

1974년에 CFC가 오존층을 파괴한다는 보고가 있는 후 많은 연구가 진행되었고 드디어 1987년에는 CFC 폐기에 관한 몬트리올 의정서가 체결되었으며<sup>(1,2)</sup> 우리나라도 1992년에 몬트리올 의정서에 가입하였다. 의정서 출범 이후로 선진국의 경우 몬트리올 의정서에 따라 1996년부터 오존층을 파괴하지 않는 HFC 냉매 및 탄화수소 냉매가 자동차 에어컨, 가정용 에어컨, 가정용 냉장고, 저온용 냉동기 등에 사용되어 왔고 2010년 이후에

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7320; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: dsjung@inha.ac.kr

는 모든 적용 사례에 오존층을 파괴하지 않는 냉매들이 사용될 것이다.

최근 들어 오존층 붕괴와 더불어 지구 온난화가 가장 큰 지구환경문제로 떠오르고 있다. 냉동/공조 분야에서 지구 온난화를 완화시키기 위해서는 온난화 지수가 낮으면서 에너지 효율이 높은 냉매를 작동 유체로 채택하여야 한다.

탄화수소는 대개 오존층 붕괴 지수가 0이고 지구 온난화 지수가 3이하로 매우 낮으므로 오존층 붕괴나 온실 효과 측면에서 가장 우수한 물질 중 하나로 여겨지고 있다. 또한 탄화수소계 냉매들은 기존의 CFC, HCFC 그리고 HFC 냉매에 비해 잠열이 크고 증기 밀도 및 액체의 점성이 현저히 낮아서 우수한 열역학 및 열전달 성능을 제공하므로 에너지 변환기기의 성능을 대폭 향상시킬 수 있어 장기적으로 유망한 대체냉매라 할 수 있다.<sup>(3)</sup>

이런 장점에도 불구하고 탄화수소계 냉매는 가연성이라는 단점을 가지고 있다. 20세기 초반까지만 해도 프로판과 같은 가연성 냉매가 널리 사용되었으나 후에 CFC 및 HCFC 계열의 비가연성 냉매들이 개발된 이후에는 점차 사용이 줄어들어 지난 50여년 동안에는 대규모 산업용 냉동을 제외하고는 가정용 및 상업용 냉동/공조기에 거의 사용되지 않았다. 그러나 최근 들어 환경보호를 위해 탄화수소계 냉매들과 R152a, R32 같은 HFC 냉매들 그리고 DME(RE170) 같은 가연성 냉매들을 순수한 단일 냉매로 혹은 다른 냉매와 혼합된 혼합냉매로 냉동/공조 시스템에 적용하려는 시도들이 이루어지고 있다. 사실 기존의 공조/냉동기들의 다수가 밀폐식 압축기를 채용하고 있으므로 누출 가능성이 적고 또 가연성에 대비해서 냉동기를 최적으로 설계한다면 가연성 냉매로 인한 위험성을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

현재 유럽에서는 대부분의 냉장고에 탄화수소계 냉매인 이소부탄(R600a)이 적용되고 있으며<sup>(3)</sup> 일본, 한국, 인도, 중국 등도 이런 추세를 따라가고 있다. 또한 유럽에서는 가정용 에어컨이나 히트펌프 그리고 자판기에 탄화수소계 냉매를 넣은 제품이 널리 홍보되어 판매되고 있다. 최근에는 유럽에서 프로판(R290)과 프로필렌(R1270) 같은 탄화수소계 냉매들이 난방용 히트 펌프의 작동유

체로 제안되어 실증 실험을 거치고 있다.<sup>(4)</sup> 한편 Jung et al.<sup>(5)</sup>은 프로판(R290)과 이소부탄(R600a)의 혼합냉매가 에너지 성능 및 환경 측면에서 CFC12와 HFC134a를 대체할 수 있는 좋은 냉매임을 보였다.

한편 최근에 에테르 계열 냉매인 DME(RE170)와 HFC 계열 냉매인 R152a, R32 등도 우수한 물성으로 인해 혼합냉매의 한 성분으로 채택된 바 있다. DME(RE170)는 가연성이 있지만 열역학적 성질이 좋고 성능도 우수한 것으로 알려져 있다. Jung et al.<sup>(5)</sup>은 DME(RE170)가 CFC12의 대체물로 유용함을 보여 주었다. 이런 특성으로 인해 DME(RE170)는 현재 R419A라는 혼합냉매의 구성 성분으로 쓰이고 있다. R152a의 경우 증기 압축식 사이클에 적용했을 때 R134a의 대체 냉매로써 우수한 성능을 내는 것으로 알려져 있으며<sup>(6)</sup> 현재 공비혼합냉매인 R500과 비공비 혼합냉매인 R401A, R401B, R401C, R405A, R411A, R411B 등의 구성 성분으로 이용되고 있다. HFC인 R32의 경우 다른 탄화수소계 냉매와 혼합하였을 경우 우수한 열전달 특성을 가지며 또한 장비 소형화에 대한 가능성을 가지고 있어 환경 및 에너지 문제를 동시에 해결할 수 있는 것으로 평가된다.<sup>(7)</sup> 실제로 R32는 현재 R22 대체 냉매로 제시된 비공비 혼합냉매인 R407C와 R410A의 구성 성분으로 널리 이용되고 있다.

가연성 냉매의 가연성을 완화시키는 방법 중 하나는 비가연성 냉매와 혼합하여 사용하는 것이다. 이처럼 가연성 냉매가 포함된 혼합냉매가 냉동/공조기에 실제로 적용되기 위해서는 가연성 평가가 필수적이다. 냉매들의 가연성 평가 기준은 지난 30년간 꾸준히 개선되어 왔다. 특히 가연성 평가 기준에서 가장 중요한 부분은 실험에 사용되는 플라스크의 크기와 불꽃을 일으키는 점화 방법이다. 초기의 가연성 평가 기준은 1985년에 발표된 ASTM E681-85 표준이다.<sup>(8)</sup> 이 표준에서는 5L 크기의 플라스크에서 전기 스파크를 이용해 회박가연한계(LFL)를 결정했다. 그 이후 1994년에 미국의 Underwriters Laboratory(UL)에서 발표한 UL 2182 표준의 경우 초기에는 5L 크기의 플라스크를 사용하고 점화원으로는 전기를 이용한 종이 성냥을 사용하도록 규정하였다.<sup>(9)</sup> 그러나 이 표준은 냉동/공조기에 널리 쓰이는 할로겐화된 냉

매 등과 같이 점화에 높은 에너지가 필요한 매체의 경우 가연성을 구분하기가 어려운 단점을 가지고 있다. 이에 UL은 12L 크기의 플라스크에서 교류 스파크(AC-spark)를 이용하는 것을 골자로 하는 '수정된 표준'을 발표하였다. 또한 ASHRAE에서는 냉매의 가연성을 명확하게 구분할 수 있는 기준으로 ASTM E681-85 표준<sup>(8)</sup>을 근간으로 12L 크기의 플라스크에서 교류 스파크(AC-spark)를 이용하는 방법을 채택하였다.<sup>(10)</sup> 이처럼 지난 30년 동안 가연성 평가 기준은 많은 검토를 통해 몇 차례 수정되어 왔다. 따라서 문헌에 존재하는 몇몇 주요 냉매들의 회박가연한계는 어떤 표준을 사용해서 측정되었는가에 따라 편차를 보이고 있다. 예를 들어 프로필렌의 회박가연한계는 ASHRAE 자료의 경우 2.7%, ARTI 자료의 경우 2.0%이다.<sup>(11)</sup>

또한 현재까지의 회박가연한계 데이터는 대부분 플라스크 내의 온도를 표준 대기 온도인 23°C로 고정된 상태에서 취하여졌다. 그러나 냉매 번호 부여와 상관이 있는 ASHRAE Standard 34<sup>(12)</sup>는 혼합냉매의 조성 분리를 분석하는 경우 23°C 이외의 다른 온도에서 가연성을 측정할 것을 요구한다. 구성 성분 중 하나가 가연성이 있는 혼합냉매의 경우 먼저 혼합냉매를 제조할 때 생기는 생산/제조 오차를 반영한 '최악 생산 조성'(Worst case formulation, WCF)에서는 100°C의 회박가연한계를 측정해야 한다. 또한 혼합냉매 누출 실험을 통해 결정되는 '최악 분리 조성'(Worst case fractionated formulation, WCF)에서는 60°C의 회박가연한계를 측정해야 한다. 그러나 가연성을 띤 순수냉매들의 경우 이 두 온도에서의 회박가연한계는 문헌에서 찾아보기 어렵다.

탄화수소계 냉매와 R152a, R32, DME(RE170) 같은 가연성 냉매에 대한 관심이 증가함에 따라 그동안 이런 냉매들의 가연성에 대해 여러 연구가 진행되었음에도 불구하고<sup>(13, 14)</sup> 프로필렌 등과 같은 순수냉매의 경우 회박가연한계 데이터에 편차가 있어 실제로 데이터를 활용하기에 큰 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 ASTM E681-04 표준<sup>(15)</sup>에서 제시된 실험 방법을 이용하여 세 개의 탄화수소계 냉매(R600a, R290, R1270)와 두 개의 HFC계 냉매(R152a, R32) 그리고 DME(RE170)의 회박가연한계를 23°C, 60°C 그리고 100°C에서 측정

하고 기존 연구자들의 결과 값과 비교하려 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 실험 챔버

본 연구에서 사용된 가연성 실험 장치는 ASTM E681-04 표준<sup>(15)</sup>에 따라 제작되었으며 Fig. 1은 개략적인 장치도를 보여 준다. 실험 챔버는 12L 플라스크를 수용할 수 있도록 제작되었고 외부의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 500, 500, 410 mm이고 내부의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 440, 500, 340 mm이다. 또한 외부와 열교환이 생기지 않도록 하기 위해 두께 1.8mm의 단열재로 챔버의 외부를 처리하였다. 챔버 정면에는 플라스크를 챔버 내부에 넣고 빼기 쉽도록 문을 설치했고 이 문의 중앙 부위에는 지름 250 mm의 유리창을 설치하여 플라스크 내부를 쉽게 관찰할 수 있게 하였다.

챔버의 왼쪽 면 상단에는 지름 80 mm의 환기구를 만들고 덮개를 설치했다. 가연성 실험을 수행할 때 플라스크가 깨질 정도로 높은 압력이 발생하면 안전사고가 일어날 수 있으므로 이 경우 높은 압력의 가스는 환기구를 통해 챔버 정면이 아닌 챔버 측면으로 배출된다.

챔버의 오른쪽 면에는 챔버의 내부 온도를 원하는 실험 조건으로 만들기 위해 지름 70 mm의 통풍구 두 개를 설치하였고 챔버 외부의 송풍기와 히터를 여기에 연결시켰다.

챔버의 윗면에는 플라스크의 목 지름보다 약간 큰 70 mm의 구멍을 뚫고 챔버의 내부 아래쪽 면에는 플라스크가 흔들리지 않고 안정되게 고정되도록 지름 160 mm의 홈을 내었다. 또한 윗면에는 다기관, 압력계, 변압기를 설치하였다.

챔버에서 공기와 냉매 등을 넣거나 빼는 관들은 실험의 편의를 위해 다기관을 이용하여 모두 한쪽 끝에 설치되었다. 다기관은 다음과 같이 모두 5개의 포트에 연결되어 있다(진공펌프와 연결할 수 있는 관, 냉매를 주입하기 위한 관, 실험 조건에 맞게 공조된 공기를 주입하기 위한 관, 이 3개의 관을 하나로 합쳐 공기와 냉매의 혼합물을 플라스크로 주입하기 위한 관, 마지막으로 압력계에 연결된 관).

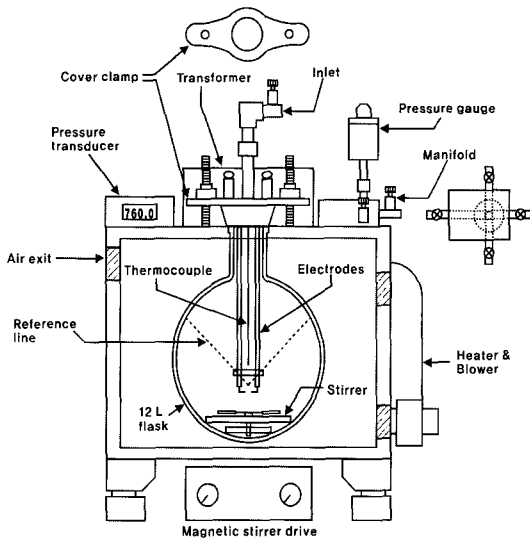


Fig. 1 Detailed view of the flammability test set up.

압력계에 연결된 관을 제외한 4개의 관 끝에는 유량을 조절하기 위해 밸브를 설치하였다. 이 중에서 플라스크와 연결된 관은 움직임을 고려해 동관이 아닌 플라스틱 관을 사용하였으며 관의 끝에는 고무 커버의 주입관에 쉽게 탈착할 수 있도록 킥 커플러를 부착하였다. 본 실험에서는 0.1 mmHg의 정밀도를 가진 절대 압력계(MKS Baratron type 626과 MKS PDR-D-2 세트)를 사용하여 대기압뿐만 아니라 주입되는 냉매의 진공 상태의 낮은 압력도 정확하게 측정하였다.

Fig. 1의 상부에 있는 변압기는 점화 스위치에 필요한 장치로써 교류(AC) 220V의 전원을 교류(AC) 15,000V, 30 mA로 변환시킨다. 끝으로 가연성 냉매와 공기의 혼합물이 플라스크 내에서 잘 혼합되도록 하기 위해 Fig. 1에서 보듯이 챔버의 외부 하단에는 마그네틱 교반기 세트를 설치하였다.

### 2.1.2 플라스크 커버

플라스크 입구 커버는 플라스크 내부의 냉매와 공기의 혼합물이 새나가는 것을 방지하기 위한 장치이다. 이것은 폭발에 의한 고열에서도 변형이 생기지 않아야 하므로 지름 95 mm의 불연성 고무로 제작하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 이 고무 커버에는 4개의 구멍을 내서 외부의 냉매와 공기를 플라스크 내부로 이송시키는 관과 플라스크 내부의 온도를 측정할 수 있는 T-type SUS

씨즈 열전대 그리고 점화를 일으키기 위한 두 개의 전극 봉을 부착하였다. 또한 고무 커버와 관이 연결된 부위로 혼합물이 새거나 진공 손실이 발생하는 것을 막기 위해 고무 커버 윗면에 에폭시 피막을 만들었다.

Fig. 1의 챔버 윗면에 있는 두 개의 전산볼트(규격 M8)는 커버 클램프를 끼우기 위한 것이다. 커버 클램프를 넣은 후에 조임 너트를 이용하여 조이면 고무 커버와 플라스크 사이의 기밀이 유지된다.

### 2.1.3 플라스크

Fig. 2는 가연성 장치의 플라스크 부분을 상세하게 보여 준다. 실험에서는 ASTM E681-04 표준<sup>(15)</sup>에 따라 12L 플라스크를 사용하였다. 이전까지는 가연성 실험에 5L 플라스크를 사용하였으나 화염이 플라스크 내벽에 부딪히면서 발생하는 에너지 손실과 제한적인 크기로 인해 화염 전파를 관찰하는 데 한계가 있었다.<sup>(16)</sup> 따라서 본 연구에서는 12L 플라스크를 사용하여 화염이 전파되는 양상을 확인하였다. 또한 회박가연한계를 결정하기 위해 플라스크 표면에 테이프로 90°를 이루는 부채꼴 모양의 경계선을 만들었으며 그 꼭짓점에 해당하는 부분은 전극 봉을 플라스크에 넣었을 때 두 전극 사이에 위치하게 했다.

### 2.1.4 점화원

ASTM E681-85 표준<sup>(8)</sup>은 냉매에 점화를 일으키기 위한 점화원으로 성냥을 사용할 것을 권장하였다. 그런데 일반적으로 할로카본 냉매는 전기 스파크나 전기 아크로는 점화시키기 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 냉매의 초기 점화에는 충분한 에너지가 필요하며 적합한 점화원으로 성냥이 사용되었다. 그러나 성냥을 이용한 점화에 문제점이 발생되기 시작했다. 필요 이상으로 발생된 에너지가 화염 전파에 영향을 미쳤기 때문이다. 따라서 신뢰성 있는 실험 결과를 위해 점화원으로 교류 스파크(AC-spark)를 채택하게 되었다.<sup>(16)</sup>

본 연구에서도 새로운 표준에 의거하여 점화원으로 교류 스파크(AC-spark)를 사용하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 두 개의 전극봉은 고무 커버와 같이 연결되어 있으며 화염에 반응하지 않도록 유리 튜브로 감싸져 있다. 전극은 L자 모양의

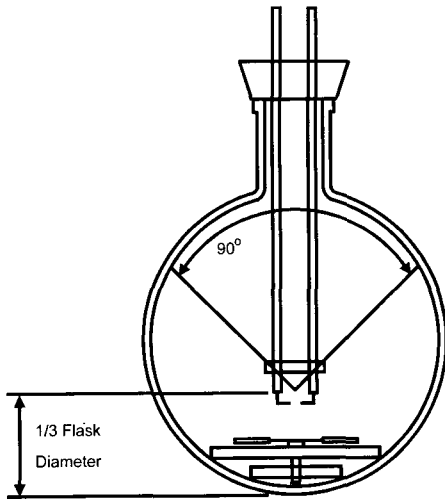


Fig. 2 Brief view of the flammability flask.

텅스텐 재질로 되어 있으며 전극끼리의 간격은 6.4 mm이고 플라스크 내부에 넣었을 때의 전극은 플라스크 바닥으로부터 지름의 1/3 높이에 위치하게 된다. 전기 스파크 점화를 위해 변압기에서 0.4초 동안 15,000 V, 30 mA의 교류(AC)를 제공하였다.

### 2.1.5 항온·항습기

플라스크에 주입되는 공기의 온도와 상대습도는 항상 각각 23 °C와 50%를 유지해야 한다. 이러한 공기를 제공하기 위해 본 연구에서는 가로, 세로, 높이가 각각 750, 450, 280 mm인 단열재 박스를 이용하여 항온/항습기로 사용하였다. 항온/항습기의 내부에는 열 저항 장치와 습도 조절 장치가 있고 또 팬이 있어서 내부의 온도와 습도를 균일하게 유지할 수 있다. 챔버 외부에는 내부의 온도와 습도를 측정할 수 있는 온습도계(OMEGA RH-70)를 설치하여 실험 조건에 맞는 공기를 제공할 수 있게 하였다.

## 2.2 실험 냉매와 조건

본 연구에서는 순수냉매와 혼합냉매의 구성 성분으로 사용될 수 있는 세 개의 탄화수소계 냉매(R600a, R290, R1270)와 두 개의 HFC계 냉매(R152a, R32) 그리고 DME(RE170)에 대한 가연성 실험을 수행하였다. 신뢰할 수 있는 회박가연한계를 결

정하기 위해서는 다음과 같이 몇 가지 조건을 충족시켜야 한다.

### (1) 온도

본 연구에서는 위에서 제시한 여섯 가지 냉매를 각각 플라스크 내부 온도 23 °C, 60 °C, 100 °C에서 실험하여 온도별로 회박가연한계를 구하였다.

### (2) 습도

회박가연한계는 냉매와 혼합되는 공기의 수분의 양에 따라 크게 변할 수 있다. 공기에 함유되는 수분의 양이 증가할수록 폭발하는 화염의 세기 또한 커진다.<sup>(17)</sup> 그러므로 냉매와 혼합되는 공기의 상대습도는 항상 일정하게 유지해야 한다. 본 실험에서는 일관성 있는 결과를 얻기 위해 상대습도를  $50 \pm 2.0\%$ 로 유지하였다.

### (3) 주입 압력

회박가연한계를 결정하기 위한 냉매 주입량은 표준 방법을 참고하여 체적비로 결정하였다. 본 연구에서는 안전하게 실험을 진행하기 위해서 낮은 체적비부터 시작하여 회박가연한계 값을 찾을 때까지 체적비를 0.1%씩 높여가며 실험을 수행하였다. 모든 실험에서는 돌턴(Dalton)의 법칙을 이용하여 체적비에 해당하는 분압만큼을 플라스크에 들어가는 냉매량으로 정하였다.

## 2.3 실험 방법

실험 방법은 ASTM E681-04 표준<sup>(15)</sup>에 제시된 내용을 따르며 다음과 같다.

(1) 플라스크를 챔버에 넣기 전에 전극말단의 간격이 6.4 mm인지 확인한다.

(2) 이물질이 없고 건조된 상태의 플라스크를 챔버 내부에 넣은 후 교반기를 회전하여 작동 여부를 확인한다.

(3) 고무 커버로 플라스크를 덮고 커버 클램프로 체결한다.

(4) 진공 펌프를 약 두 시간 정도 작동하여 플라스크 내부 압력을 0.2 torr(0.2 mmHg) 이하로 낮춘다.

(5) 충분히 진공이 유지된 상태에서 플라스크 내 온도를 실험 조건에 맞게 조절한다(23 °C, 60 °C, 100 °C).

(6) 실험 냉매를 주입할 때 문헌에서 알려진 회박가연한계보다 낮은 체적비부터 주입한다.

(7) 주입이 끝나면 온도 23 ℃, 상대습도 50 ± 2.0% 조건으로 공조된 공기를 플라스크 내부가 대기압이 될 때까지 주입한다.

(8) 냉매와 공기가 잘 섞이도록 교반기를 최소한 400 rpm으로 10분 이상 작동시킨다.

(9) 점화를 하기 전에 커버 클램프를 고정시킨 조임 너트를 약간 풀러 둔다. 폭발 시에 발생할 높은 압력을 틈새로 배출하기 위함이다.

(10) 점화 플러그를 전극에 연결한다.

(11) 플라스크와 압력계 사이에 연결된 밸브를 닫는다(점화 시에 급격한 압력상승으로 인한 압력계의 고장 방지를 위함).

(12) 교반기를 멈춘 후 냉매/공기 혼합물을 점화시키고 동시에 캠코더로 폭발 장면을 녹화한다. 실험을 마친 후에 촬영된 영상을 확인하여 가연성 유무 및 재실험 여부를 결정한다. 재실험의 경우 공기와 냉매의 체적비를 0.1%씩 변화시켜가면서 회박가연한계를 결정한다.

(13) 실험을 마친 후 다음 실험에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 곧바로 플라스크 내부를 세정제와 솔을 이용하여 깨끗하게 세척한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 가장 최근에 수정된 ASTM E681-04 표준<sup>(15)</sup>에 따라 세 온도에서 여섯 개 순수냉매의 회박가연한계(LFL)를 결정하였다.

#### 3.1 회박가연한계 결정

회박가연한계는 화염이 전파되는 양상을 시각적으로 확인함으로써 결정할 수 있다. 점화원에서 스파크가 일어나면 점화원을 중심으로 화염이 발생하는데 플라스크 내에서 가연성 냉매가 차지하고 있는 비율에 따라 화염 전파 양상은 다르게 나타난다. 플라스크 내에서 발생한 화염이 플라스크 표면에 90°를 이룬 원뿔 모양의 경계선을 벗어나는 경우 가연성이 있는 것으로 결정하였다.<sup>(18)</sup>

Fig. 3은 회박가연한계 근처의 체적비에 따른 화염의 전파 양상을 개략적으로 나타낸 것이다. (a)와 (b)의 경우는 가연성이 없는 것으로 판단하였고 (c)와 (d)의 경우는 가연성이 있는 것으로 판

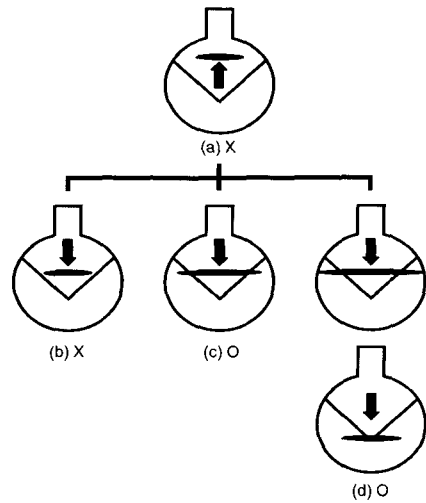


Fig. 3 Determination of LFL with flame propagation.

단하였다.

Fig. 3의 (a)처럼 점화원에서 발생한 화염이 수직으로 상승하는 도중에 소멸되는 경우 가연성이 없는 것으로 판단한다. 이보다 약간 높은 체적비에서 발생한 화염은 (b), (c), (d)와 같이 플라스크 목 부분까지 수직으로 상승한 뒤에 플라스크 내벽을 향해 하강하면서 수평으로 퍼지게 된다. Fig. 3의 (b)와 같이 화염이 경계선 안쪽에서 소멸됐을 경우 가연성이 없는 것으로 판단한다. 그러나 Fig. 3의 (c)와 같이 화염이 경계선을 벗어난 후 소멸됐을 경우에는 가연성이 있다고 할 수 있으며 이때 플라스크에 주입된 냉매의 체적비를 회박가연한계로 정하였다.

#### 3.2 실험결과 및 고찰

Table 1은 미국냉동공조학회(ASHRAE)와 미국냉동공조공업협회(ARTI)의 회박가연한계 데이터와 본 연구에서 실험을 수행한 세 개의 탄화수 소계 냉매(R600a, R290, R1270)와 두 개의 HFC계 냉매(R152a, R32) 그리고 DME(RE170)의 회박가연한계 데이터를 보여 준다.<sup>(11)</sup> 참고로 ASHRAE 자료는 ASHRAE 주관하에 UL에서 측정된 것이고 ARTI 자료는 다른 연구 데이터를 종합한 것이다. Table 1의 결과는 모두 23 ℃에서 취한 것인데 참고로 ARTI의 이소부탄, 프로판, R152a, R32 LFL 데이터는 LFL이 Table 1의 밑에 주어

Table 1 LFLs(%) of various pure refrigerants obtained at 23°C

| Refrigerants      | Flask Temp. | ASHRAE 34p-92 Results | ARTI database* | Present data |
|-------------------|-------------|-----------------------|----------------|--------------|
| Isobutane (R600a) | 23°C        | 1.6                   | 1.7-1.9        | 1.6          |
| Propane (R290)    | 23°C        | 2.1                   | 2.0-2.4        | 1.8          |
| Propylene (R1270) | 23°C        | 2.7                   | 2.0            | 1.9          |
| R152a             | 23°C        | 4.8                   | 3.7-4.8        | 4.3          |
| R32               | 23°C        | 14.4                  | 12.7-14.0      | 14.4         |
| DME (RE170)       | 23°C        | .                     | .              | 3.3          |

\* Isobutane : 1.7, 1.8, 1.9%  
 Propane : 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.37%  
 Propylene : 2.0%  
 R152a : 3.7, 3.9, 4.0, 4.5, 4.8%  
 R32 : 12.7, 13.3, 14.0%

진 값들처럼 실험자마다 다르므로 LFL 실험치의 하한치와 상한치를 망라하여 표시되어 있다.

ASHRAE와 ARTI 자료에서 나타난 이소부탄과 프로판의 회박가연한계를 살펴보면 오차 범위가  $\pm 10\%$  정도로 나타났으며 실험의 조건, 방법의 차이점 등을 고려할 때 이 정도는 큰 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.<sup>(11)</sup> 예를 들어 회박가연한계가 2.0%인 냉매의 경우  $\pm 10\%$ 의 오차를 적용하면 회박가연한계의 오차는  $\pm 0.2\%$ 가 된다. 따라서 이 냉매의 회박가연한계는 1.8~2.2% 사이에 존재한다. 한 가스전문회사의 핸드북은 이소부탄과 프로판의 회박가연한계를 각각 1.8%와 2.2%로 규정하고 있으며 이 데이터 역시 기존의 문헌 데이터를 뒷받침한다.<sup>(19)</sup>

그러나 프로필렌과 R152a, R32의 회박가연한계 데이터들은 ASHRAE와 ARTI 자료 사이에 상당한 차이가 있다. 특히 프로필렌의 경우 두 데이터의 회박가연한계 오차가 30% 이상이므로 데이터 신뢰성면에서 문제가 있다. 또한 DME(RE170)의 경우 ASHRAE와 ARTI 자료 모두 회박가연한계를 포함하고 있지 않다.<sup>(11)</sup>

기존의 데이터들과 본 실험 결과를 비교하면 이소부탄의 경우 ASHRAE 자료와 일치하고 프로판의 경우 ASHRAE와 ARTI 자료<sup>(11)</sup>의 회박가연한계 데이터와 약 10%의 오차를 보이고 있지만 이것은 앞에서 언급한 오차범위로 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 이로써 본 연구의 가연성 실험이 ASTM E681-04 표준<sup>(15)</sup>의 절차에 따라 잘 수행되었고 그 결과를 신뢰할 수 있음을 간접적으로 알 수 있다. 프로필렌의 경우에는 ARTI 자료와 본 실험의 결과와 큰 차이가 없다. 또한 가스회사의 핸드북 데이터 역시 프로필렌의 회박가연한계를 2.0%로 규정하고 있는데 이것은 본 실험의 데이터와 거의 차이가 없음을 보여 준다.<sup>(19)</sup> R152a의 경우 본 실험의 데이터는 ARTI 자료의 중간 값을 보인다. 그런데 R152a의 회박가연한계는 Du Pont사의 자료<sup>(20)</sup>와 Matheson사의 자료<sup>(21)</sup>가 각각 3.9%와 5.1%를 나타내며 큰 차이를 보이고 있으며 본 연구 결과는 이 두 데이터의 중간 값을 보이고 있다. 한편 R32의 경우에는 본 실험의 결과가 ASHRAE 자료와 일치하고 또 BOC사의 자료<sup>(22)</sup>는 14.0%로 역시 본 연구 결과와 비슷하였다. 끝으로 DME(RE170)의 경우 ASHRAE와 ARTI 자료에는 데이터가 없지만 가스핸드북<sup>(19)</sup>과 Du Pont사 자료<sup>(23)</sup>는 DME(RE170)의 회박가연한계를 3.4%로 규정하고 있어 본 데이터와 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

이런 결과들을 통해 실험의 방법, 실험 수행 기관에 따라 회박가연한계의 편차가 어느 정도 생

Table 2 Experimentally determined LFLs(%) of various pure refrigerants

| Flask Temperature | Isobutane (R600a) | Propane (R290) | Propylene (R1270) | R152a | R32  | DME (RE170) |
|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------|------|-------------|
| 23°C              | 1.6               | 1.8            | 1.9               | 4.3   | 14.4 | 3.3         |
| 60°C              | 1.4               | 1.7            | 1.7               | 4.1   | 14.1 | 2.6         |
| 100°C             | 1.3               | 1.5            | 1.4               | 3.9   | 13.5 | 2.3         |

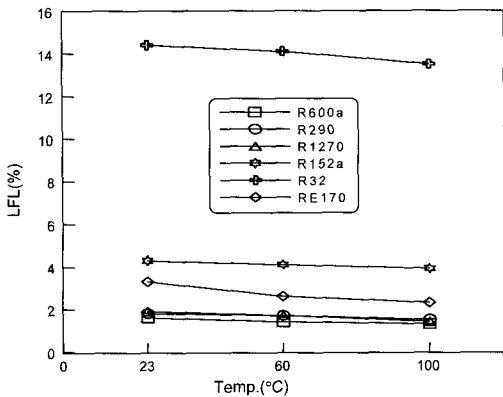


Fig. 4 Experimentally determined LFLs(%) of various refrigerants.

길 수밖에 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 또 다른 독립 기관에서 이런 냉매들의 가연성 한계를 측정함으로써 산업계에 도움을 주어야 할 것으로 판단된다.

위에서도 언급했듯이 ASHRAE Standard 34<sup>(12)</sup>에 따르면 가연성 냉매를 포함한 혼합냉매의 경우 '최악 생산 조성'에서 100 °C의 회박가연한계를 측정해야 하며 '최악 분리 조성'에서는 60 °C의 회박가연한계를 측정해야 한다. 예전까지는 혼합냉매들이 많이 사용되지 않았으므로 고온에서 순수냉매의 가연성이 어떻게 변하는가에 대한 연구 사례가 없었다. 이 같은 점을 염두에 두고 본 연구에서는 동일한 여섯 개 순수냉매의 회박가연한계를 60 °C와 100 °C에서도 측정하여 온도 변화에 따른 회박가연한계의 변화를 살펴보았다.

Table 2와 Fig. 4는 23 °C, 60 °C, 100 °C에서 가연성 실험을 통해 결정한 여섯 개 냉매의 회박가연한계를 보여 준다. Table 2와 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 온도가 높아질수록 회박가연한계는 낮아진다. 온도가 23 °C에서 60 °C로 상승할 때에 DME(RE170)를 제외한 나머지 냉매의 회박가연한계 하락폭은 대체로 0.1~0.3%였다. 반면, DME(RE170)의 회박가연한계 하락폭은 0.7%로 다른 냉매에 비해 큰 변화를 보였다. 온도가 60 °C에서 100 °C로 상승할 때에도 R32를 제외한 나머지 냉매의 회박가연한계는 60 °C 때보다 0.1~0.3% 낮아졌다. 반면, R32의 회박가연한계 하락폭은 0.6%로 다른 냉매에 비해 큰 변화를 보였다. 이는 플라스틱 내부의 온도가 상승할수록 냉매 분자의 운동량이 증가하여 반응성을 활발하게 하기 때문에 낮은

체적비에서도 화염이 발생하기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ASTM E681-04 표준<sup>(15)</sup>에 제시된 가연성 실험 방법을 이용하여 세 개의 탄화수소계 냉매(R600a, R290, R1270)와 두 개의 HFC계 냉매(R152a, R32) 그리고 DME(RE170)의 회박가연한계(LFL)를 23 °C, 60 °C, 100 °C에서 측정하였고 이를 근거로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이소부탄과 프로판의 경우 23 °C에서 취한 ASHRAE와 ARTI 자료의 회박가연한계 데이터와 본 연구에서 취한 데이터는 서로 잘 맞았다.

(2) 프로필렌과 R152a, R32의 회박가연한계는 ASHRAE와 ARTI 자료 사이에 상당한 차이를 보였다. 특히 프로필렌의 경우 두 자료의 회박가연한계 오차가 30% 이상이므로 데이터 신뢰성면에서 문제가 있다. 또한 DME(RE170)의 경우 ASHRAE와 ARTI 자료 모두 회박가연한계를 포함하고 있지 않다. 본 연구에서 취한 프로필렌과 R152a, R32의 회박가연한계는 기존의 데이터베이스 중 하나와 일치하는 것으로 나타났으며 가스 회사들의 데이터와 잘 일치하였다.

(3) 플라스틱 내부의 온도가 상승할수록 분자의 운동량이 증가하여 반응성이 활발해져서 순수냉매의 회박가연한계는 감소하는 것으로 나타났다. 좀 더 구체적으로는 23 °C에서 60 °C로 상승할 때에 실험에 사용된 대부분 냉매의 회박가연한계 하락폭은 대체로 0.1~0.3%였고 60 °C에서 100 °C로 상승할 때에도 대부분 냉매의 회박가연한계 하락폭은 0.1~0.3%였다.

#### 후 기

본 연구를 위해 지원해 주신 인하대학교와 인하대학교 대학원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Molina, M. J. and Rowland, F. S., 1974, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozones, Nature, Vol. 249, pp. 810-812.
2. Montreal protocol on substances that de-



- plete the ozone layer, 1989, Final Act, United Nations Environment Programme.
3. Kruse H., 1996, The stats of the art of the hydrocarbon technology in household refrigeration, Proc. of the Int. Conferences on Ozone Protection Technologies, Washington, DC, pp. 179-188.
  4. Int. Energy Agency's Heat Pump Center, Informative fact sheet, 2002, Hydrocarbons as refrigerants in residential heat pumps and air-conditioners.
  5. Jung, D., Park, B. and Lee, H., 1999, Evaluation of supplementary/retrofit refrigerants for automobile air-conditioners charged with CFC12, Int. J. Refrigeration, Vol. 22, pp. 558-568.
  6. Ghodbane, M., 1999, An investigation of R152a and hydrocarbon refrigerants in mobile air conditioning, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 1999-01-0874.
  7. Didion D. A., 1994, Private Communication, US National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
  8. ASTM, 1985, Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals, ASTM E681-85, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
  9. U. L., 1994, Standard for safety-refrigerants, UL Standard 2182, Northbrook, Ill.: Underwriters Laboratories.
  10. ASHRAE, 1989, Designation and safety classification of refrigerants, ASHRAE Standard, ANSI/ASHRAE Standard 34-1989.
  11. Wilson, D. P. and Richard, R. G., 2002, Determination of refrigerant lower flammability limits in compliance with proposed addendum p to standard 34, ASHRAE Transactions, Vol. 108, Part 2, pp. 739-756.
  12. ASHRAE, 1992, Number designation and safety classification of refrigerants, ASHRAE Standard, ANSI/ASHRAE Standard 34-1992.
  13. Richard, R. G. and Shankland, I. R., 1992, Flammability of alternative refrigerants. ASHRAE Journal, Vol. 34, No. 4, pp. 20-24.
  14. Choi, T. Y. and Kim, M. S., 1995, Flammability test of R32/R134a refrigerant mixture, Proceeding of the SAREK 1995 Summer Annual Conference, pp. 269-274.
  15. ASTM, 2004, Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals, ASTM E681-04, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
  16. Richard, R., 1998, Refrigerant flammability testing in large volume vessels, ARTI MCLR final Report, DOE/CE/23810-87, Arlington, Va.: Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute(ARTI).
  17. Smith, N. D., Ratanaphruks, K., Tufts, M. and Ng, A. S., 1993, R-245ca: A potential far-term alternative for R-11, ASHRAE Journal, Vol. 35, No. 2, pp. 19-23.
  18. Heinonen, E. W., Tapscott, R. E. and Crawford, F. R., 1994, Methods development for measuring and classifying flammability/com-bustibility of refrigerants, ARTI MCLR final Report, DOE/CE/23810-50, Albuquerque, Va.: Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute(ARTI).
  19. Braker, W. and Mossman, A., 1980, Matheson gas data book, sixth edition, Matheson company, Lyndhurst, NJ 07071, USA
  20. Du Pont, 2004, Material safety data sheet for HFC-152a, Du Pont Fluoroproducts, Wilmington, DE 19898, USA.
  21. Matheson, 2003, Material safety data sheet for 1,1-difluoroethane, Matheson Tri-Gas, Parsippany, NJ 07054, USA.
  22. BOC Gases, 2002, Material safety data sheet for, Halocarbon-32, BOC Group, Murray Hill, NJ 07974, USA.
  23. Du Pont, 2001, Material safety data sheet for Dymel, Du Pont Fluoroproducts, Wilmington, DE 19898, USA.