



## 터보냉동기의 HCFC-123 누출에 대한 수치해석 연구

서희경 · <sup>†</sup>송세욱 · 황양인 · 하현철\*

한국산업안전보건공단, \*(주)벤틱

(2014년 9월 26일 접수, 2014년 10월 27일 수정, 2014년 10월 28일 채택)

## Numerical Study on the HCFC-123 Leak in Turbo Chiller by using CFD

Hoekyeong Seo · <sup>†</sup>Sewook Song · Yangin Hwang · Hyunchul Ha\*

Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA)

\*Ventech Corp

(Received September 26, 2014; Revised October 27, 2014; Accepted October 28, 2014)

### 요 약

대용량의 공기조화용으로 널리 사용되는 터보냉동기는 냉매로 HCFC-123 가스를 주로 사용하며, HCFC-123 은 CFC계 프레온의 대체 냉매제로 독성은 낮으나 환기가 원활하지 않는 밀폐공간이나 작업공간에서 산소결핍으로 인한 질식재해를 유발할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 2011년 대형할인마트 기계실 내부 터보냉동기 냉매 누출로 인해 작업자 4명이 질식 등의 사유로 사망한 재해 사례를 대상으로 전산유체역학을 이용하여 HCFC-123 누출에 따른 산소농도를 예측함으로써 프레온 가스 누출사고에 대한 원인을 조사하고 대응책을 제시하여 동종 재해의 재발 방지에 도움이 되고자 한다.

**Abstract** - Turbo chiller is widely used for the air conditioner and uses hydrochlorofluorocarbon 123 (HCFC-123) as a refrigerant. HCFC-123 is one of the chemicals being considered as a replacement for the chlorofluorocarbons. High concentrations of HCFC-123 cause a deficiency of oxygen with the risk of unconsciousness or death, the vapour is heavier than air and may accumulate in low ceiling spaces causing deficiency of oxygen. In this study, the concentration distribution of oxygen indoor was investigated by using computational fluid dynamics(CFD) as four workers were killed in HCFC-123 gas leaks at machine room of hypermarket in 2011.

**Key words** : turbo chiller, HCFC-123, computational fluid dynamics(CFD), ventilation

### 1. 서 론

터보냉동기는 회전하는 날개차의 원심력으로 냉매 가스를 압축하는 냉동기로 압축효율이 높고 제어성이 뛰어나다는 장점이 있어 주로 대용량의 공기조화용, 산업설비의 온도제어용 또는 원전용으로 사용된다[1]. 터보냉동기의 운전은 냉매를 작동유체로 하여 증발-압축-응축-팽창과정으로 동작하는데, 이

때 사용되는 CFC-11과 같은 CFCs 냉매는 환경오염 및 오존층 파괴문제로 1987년 몬트리올의정서 채택 이후 세계 각국에서 규제되고 있다.

HCFC-123(2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane,  $CF_3CHCl_2$ )은 수소화염화플루오린화탄소(HCFC)계 물질로서 성층권의 오존층 파괴와 지구온난화 원인 물질로 밝혀진 염화플루오린화탄소(CFC)계 물질인 프레온의 대체 냉매제로 대기 중에서 수명이 2년 정도로 비교적 안정성이 낮아 전 세계적으로 널리 사용되고 있으며[2], 주로 저압터보냉동기 냉매, 우레탄 발포 분사제 등으로 사용된다. 국내에서는 저압 터보

<sup>†</sup>Corresponding author:s88903@kosha.net

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

냉동기의 냉매제로 사용되던 CFC-11의 생산 및 소비가 2010년부터 전면 금지되도록 규제되었으며, CFC-11과 물리·화학적으로 성질이 유사하고 오존층파괴지수(ODP : Ozone Depletion Potential) 및 지구온난화지수(GWP : Global Warming Potential)가 0.02로 CFC-11의 1/50 수준으로 낮은 HCFC-123이 CFC-11의 대체제로 사용되어 왔다. 하지만 HCFC가 오존층을 파괴하는 물질인 염소를 포함하고 있어 오존층 파괴물질로 추가 지정되면서 선진국에서는 2030년, 개발도상국은 2040년 생산 및 사용이 전면 금지될 예정이다[3].

제조사인 DuPont에 따르면 HCFC-123은 CFC-11과 같이 독성이 낮고 인화성이 없으나 고농도의 HCFC-123 증기를 장기간 흡입하게 되면 신경계통에 일시적으로 현기증, 두통, 의식소실 등을 동반한 마취작용을 일으킬 수 있고, 20,000 ppm 이상의 증기 흡입 시 심장장해를 유발할 수 있으며 이는 3,500 ppm 이상의 CFC-11에 노출되었을 때와 그 증상이 유사하다고 보고되어 있다[4]. 또한 상온에서 쉽게 증발(끓는점 28℃, 25℃에서 증기압 91 kPa(683 mm Hg))하고 공기 중 비중이 5.4로 환기가 원활하지 않는 밀폐공간이나 작업공간에서 쉽게 체류할 수 있는 특성이 있어 물질안전보건자료나 미국 NIOSH에서는 냉매 교체 및 설비 유지·보수 등의 작업 시 심장 부정맥 또는 산소결핍으로 인한 질식에 의해 사망할 수 있다고 경고하고 있다. HCFC-123 등 HCFC계 물질이나 CFC계 물질에 의한 재해로 2007년 경기도 소재 무인기지국 냉방기 점검 작업자가 산소결핍으로 사망한 사례가 있으며 미국 NIOSH에서는 1983년부터 1986년까지 10건의 사고 사례에서 4명의 심장 부정맥과 8명의 질식 사망사례를 보고하였다[5]. 그 밖에 쥐를 이용한 동물실험에서 10% Freon-22와 18% 산소농도에서는 하지의 힘이 약해져 비틀거림이, 15~20% Freon-22와 16~17% 산소농도에서 쓰러짐, 20% Freon-22에서 입과 코에서 다량의 점액 분출이 동반되면서 달리기와 같이 몸통과 사지의 격렬한 움직임이 관찰되었고, 30~35% Freon-22와 13~14% 산소농도에서는 호흡정지가 일어났다고 보고하였다[6].

「산업안전보건기준에 관한 규칙」에서 산소농도의 적정범위를 18% 이상 23.5% 미만으로 공기 중 산소농도가 18% 미만인 상태를 산소결핍이라고 정의하고 있고, 환기가 부족한 상태에서 산소가 부족하거나 유해가스에 노출될 경우 산소결핍에 의한 질식 또는 급성중독에 의한 건강장해가 발생할 가능성이 높아지게 된다. Henderson과 Haggard의 산소농도에 따른 증상으로 산소농도 12~16%에서는 맥박과

호흡수 증가, 집중력 저하, 근력 저하, 두통, 귀울림, 메스꺼움 등이 나타나고, 9~14%에서는 판단력 저하, 안면 창백, 불안정한 정신상태, 심한 두통, 귀울림, 구토, 의식몽롱 등이 있으며, 6~10%에서는 의식 상실, 중추신경장애, 전신근육경련 등이 나타나며, 6% 이하에서는 실신이나 혼수상태, 호흡정지로 사망에 이를 수 있다고 보고하고 있다. 터보냉동기와 같은 설비는 기계실과 같이 한정된 공간에 위치하는 경우가 많아 환기가 원활하지 않은 조건에서 터보냉동기의 냉매로 사용되는 프레온 가스가 누출될 시 산소결핍 등으로 인한 질식 재해가 발생할 우려가 있으며 이에 관련한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 2011년 발생한 대형할인마트의 지하 기계실 터보냉동기 수리작업 중 HCFC-123 가스 누출로 4명의 설치작업자가 모두 질식 등의 사유로 사망한 재해를 모델로 선정하여 전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 HCFC-123의 유동 및 확산 특성을 해석하고자 한다. 특히 본 연구 대상의 재해 사례와 같이 작업자 전원이 사망하여 현장의 특성을 반영한 실험이 불가능한 경우 시뮬레이션을 그 대안으로 이용할 수 있다[7]. 수치해석 시뮬레이션을 이용하여 작업장 내부조건에 따른 산소농도를 평가함으로써 프레온 가스 누출사고에 대한 원인을 조사하고 대응책을 제시하는데 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## II. 연구내용 및 방법

터보냉동기 냉매(HCFC-123) 가스 누출 현상을 해석하고 사고 원인을 분석하기 위하여 현장실태조사와 FLUENT를 이용한 전산유체역학 시뮬레이션을 수행하였다. 현장실태 파악은 재해발생 현장조사와 재해조사보고서를 참조하여 프레온 가스 발생원과 발생경로, 환기실태 등을 파악하였고, 재해 당시 상황에 대한 의견을 청취하여 재해자의 작업 실태를 파악하고자 하였다. 수집된 기초자료를 활용하여 재해발생 상황과 유사한 시뮬레이션 모델링을 구축하고 프레온 가스 누출 시간에 따른 작업장 내부 산소농도를 예측함으로써 사고 원인을 분석하고 동종 재해의 재발방지 대책을 수립하고자 하였다.

### 2.1. 연구대상

대형할인마트 지하 기계실 터보냉동기 수리작업 중 발생한 냉매가스(HCFC-123) 누출에 따른 질식 재해가 발생한 사례를 연구대상으로 하였으며, 재해 발생 당시 재해자는 보호구를 착용하지 않은 상태에서

터보냉동기 수리작업을 위해 냉동기 냉매 회수작업 및 이코노마이저(저압부) 등 설비배관 분리·내부 점검 등의 작업을 쪼그려 앉은 상태에서 수행했던 것으로 파악되었다[8]. 기계실의 건축면적은 132 m<sup>2</sup>, 높이 5.6 m이고 내부에는 터보냉동기 1기, 냉온수기 2기, 보일러용축탱크 1기, 보일러 1기가 설치·가동 중이었으며, 입구 출입문과 측면 장비운반용 출입문이 설치되어 있으며 평소 장비운반용 출입문은 닫혀 있는 상황이었다.

기계실 내부는 전체환기를 위하여 4.5 m 높이에 급·배기팬이 가동 중이며 측정결과 배기용량은 약 1,500 m<sup>3</sup>/hr로 정격사양(12,000 m<sup>3</sup>/hr)의 12.5% 정도의 성능을 보였다. 기계실에서 필요로 하는 전체 환기량 산정 결과 약 14,000 m<sup>3</sup>/hr로 현재 배풍량은 필요환기량의 약 1/10 수준인 것으로 파악되었다. 실제 터보냉동기 설치장소 부근 기류흐름을 측정 한 결과, 기류속도가 0~0.1 m/sec로 거의 정체되어 있는 상태로 급·배기구 위치가 너무 높아(바닥으로부터 4.5 m 지점) 작업자 호흡기 주변의 공기 흐름에 전혀 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 작업장 내 온도는 26 °C로 재해 당시 환기가 거의 이루어지지 않은 상태임을 감안할 때, 기계실 내부 공기 중 프레온 가스의 농도는 매우 높았을 것으로 사료된다.

**2.2. 수치해석 조건**

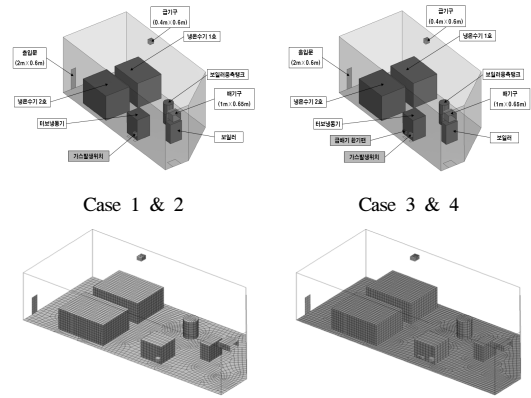
전산유체역학을 활용하기 위하여 유체동역학은 비압축성 유동과 비정상상태라는 가정 하에서 난류 유동에 대한 일반적인 지배방정식을 활용하였으며 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였다.

현장에서 발견된 냉매(HCFC-123) 용기에서 회수된 냉매량은 약 300 kg으로 터보냉동기의 냉매 저장용량이 최대 330 kg인 것을 감안할 때 최대 30 kg의 냉매가 회수되지 못한 것으로 추정하였다. 프레온 가스 발생 지속시간은 사망재해 원인을 밝히는데 매우 중요한 인자이며, 냉매 교체 작업 시 배관을 해체할 때 고압의 프레온 가스가 순식간에 누출되는 것이 일반적이라는 업체 관계자의 증언에 따라 냉동기 후면 하부에서 프레온 가스 30 kg이 증발기 내부에 기화된 상태에서 빠른 속도로 배출된 것으로 가정하였다.

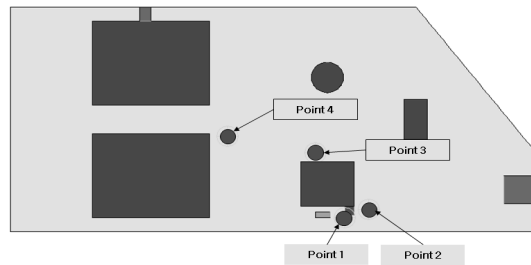
수치해석을 위하여 30 kg의 프레온 가스 배출시간을 5초와 10초로 가정하고 작업장 내부 환기 조건은 재해 당시 상황과 동일한 급·배기팬(용량 : 각 10 m<sup>3</sup>/min)을 이용한 전체환기만을 실시하는 것으로 하여 재해 당시 상황(Case 1, 2)을 예측하였고, Case 1과 동일한 상황에서 동종 재해의 재발방지를 위하

**Table 1.** Conditions for computational modeling

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Gas leak time	5 sec	10 sec	5 sec	5 sec
Local ventilation type	-	-	supply	exhaust



**Fig. 1.** Model and grid configuration for simulation.



**Fig. 2.** Measurement location of simulation results(Z=1 m).

여 40 m<sup>3</sup>/min 용량의 이동식 송풍기를 이용하여 0.5 m 높이에서 급·배기를 실시할 경우(Case 3, 4)를 구분하여 총 4가지 Case에 대한 작업장 내부 유동을 예측하였다(Table 1). 시뮬레이션 모델은 기계실 설비면적(34 m<sup>2</sup>)을 제외한 유효면적 98 m<sup>2</sup>, 높이 5.6 m의 작업공간에 작업장 내부 설비 및 기기 등의 형상을 단순화하여 격자를 형성하였다(Fig. 1). 시뮬레이션 결과는 재해자가 발견된 4개의 위치에서 프레온 가스 누출 지점 및 작업 시 쪼그려 앉은 작업 자세를 고려하여 1 m 높이에서 각 Case별로 확인하였다 (Fig. 2).

### III. 연구결과 및 고찰

재해자가 발견된 4개의 지점을 선정하여 각 위치 (높이 1 m)에서 산소 및 프레온 가스 농도의 변화를 시간대별(1초~60분)로 확인한 결과 프레온 가스가 5 초간 발생한 Case 1의 경우, 산소농도가 Fig. 3에서 보는 바와 같이 밸브 해체 후 약 10초 경과 후 18% 미만으로 떨어지기 시작하여 약 20~40초 정도의 시간 경과 후 14% 이하로 도달하였으며 약 40초 정도에는 두 개 지점에서 12.55%~12.69%까지 산소농도가 떨어진 것으로 확인되었다. 산소농도가 18% 미만으로 떨어지기 시작한 10초 이후 약 15분이 지나서야 산소농도가 18% 이상으로 회복되었다. 30 kg의 프레온 가스가 5초 이내 빠르게 누출되었다면 발생 후 약 1분 이내 모든 작업자가 질식으로 사망했을 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

Case 2는 프레온 가스 발생 지속시간이 10초로 밸브 해체 후 약 10초 경과 후 산소농도가 18% 미만으로 떨어져 약 20초~60초 시간 경과 후에 산소농도가 14% 이하로 도달하였으며 40초 정도에는 두 개 지점에서 산소농도가 13.23%~13.45%로 예측되었다. Case 1과 마찬가지로 약 15분이 지난 후 산소농도가 18% 이상으로 회복되었다(Fig. 4). Case 2의 경

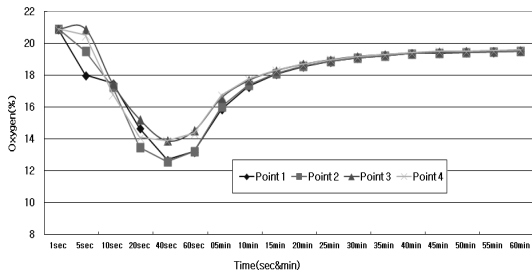


Fig. 3. Distributions of oxygen concentrations at Z=1 m(Case 1).

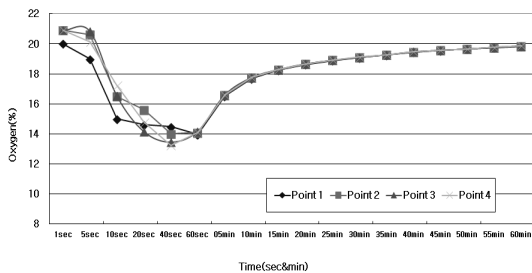


Fig. 4. Distributions of oxygen concentrations at Z=1 m(Case 2).

우도 30 kg의 프레온 가스가 10초 이내 빠른 속도로 누출되었다면 발생 후 약 1분 이내 모든 작업자가 질식으로 사망했을 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

Case 3은 5초 동안 프레온 가스가 발생하고 발생 원 근처에 40 m<sup>3</sup>/min 용량의 송풍기를 이용하여 급기를 실시할 경우를 예측한 것으로, 20초 뒤 모든 측정지점에서 산소농도가 18% 미만으로 떨어졌다가 40초 뒤 14.67%~18.10%의 범위에서 5분 후 18% 이상으로 회복되어 20분 후부터는 급기 효과에 의해 산소농도가 20% 이상으로 유지되는 것으로 예측되었다(Fig. 5). 프레온 가스 발생지점 근처 급기를 실시함으로써 산소농도 감소가 일부 해소되기는 하였으나 프레온 가스 발생량이 많을 경우에는 큰 효과가 없을 것으로 판단된다.

Case 4는 5초 동안 프레온 가스가 발생하고 발생 원 근처에 40 m<sup>3</sup>/min 용량의 송풍기를 이용하여 배기를 실시할 경우를 예측한 것으로, 약 10초가 지난 뒤 산소농도가 18% 이하로 측정되는 지점이 관찰되기 시작하여 20초 이후 산소농도가 오히려 약 12% 수준으로 감소되는 것으로 예측되었다(Fig. 6). 이는 빠른 속도로 분출되는 프레온 가스를 배기 기류가 확산되지 못하도록 방해하여 일부 구간에 고농도의

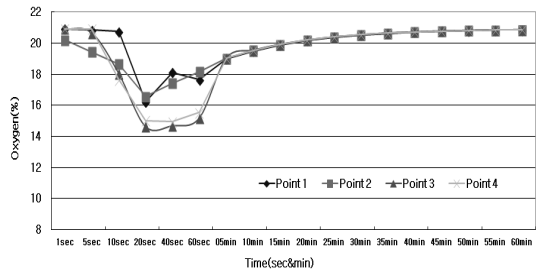


Fig. 5. Distributions of oxygen concentrations at Z=1 m(Case 3).

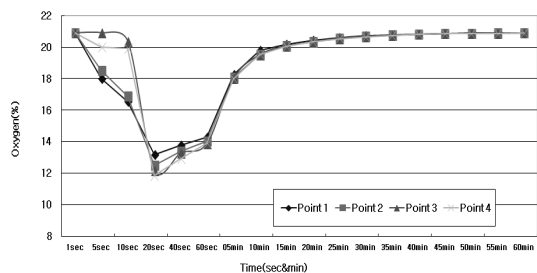


Fig. 6. Distributions of oxygen concentrations at Z=1 m(Case 4).

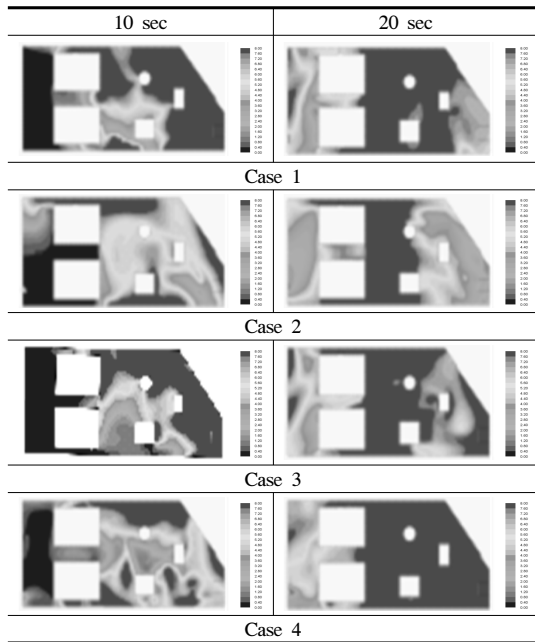


Fig. 7. Contours of HCFC-123 concentrations of all cases at Z=1.0 m.

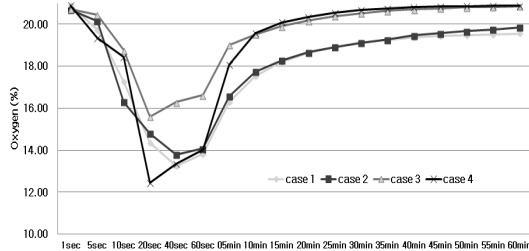


Fig. 8. Comparison of the oxygen concentration distribution of all cases at Z=1 m.

정체대가 형성된 것으로 판단된다. 배기효과에 의해 15분 이후에는 산소농도가 20% 이상으로 회복되는 것을 확인할 수 있었다.

각 조건별 시뮬레이션 예측결과를 보면 프레온 가스 누출 10초 이후 산소농도가 18% 미만으로 감소하기 시작하여 20초 이후 14% 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있었는데 이는 20초 이후 프레온 가스가 최대 8%(80,000 ppm)의 농도로 급속도로 확산되면서 산소농도가 급격히 감소된 것으로 판단된다(Fig. 7). 프레온 가스 누출 시간에 따른 산소농도 변화는 크지 않았고, 모든 조건에서 약 10분 이후에는 산소

농도 변화가 거의 없었으며 이는 급·배기에 의한 전체환기 효과인 것으로 판단된다. 환기 조건에 따른 산소농도 변화를 살펴보면 Case 3과 4에서처럼 이동식 송풍기를 이용해 급·배기를 실시할 경우 전체환기만 실시하는 경우보다 산소농도 회복 속도가 빠르다는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 8). 이동식 송풍기로 급기를 할 경우 순간적인 산소 결핍 수준이 해소되어 환기 효과가 나타나는 반면 배기를 할 경우 프레온 가스 확산을 방해하여 산소농도가 오히려 저하되는 것으로 예측되어 이동식 배기팬 사용은 자제하는 것이 바람직하다고 판단된다.

#### IV. 결론

재해자 사망원인 분석 결과 터보냉동기 증발기 등 장비 내부에 30 kg의 프레온 가스가 잔류하였고, 28 °C에서 증발하는 프레온 가스 특성상 작업장 내부 온도(26 °C)에서는 대부분 기화하여 가스상으로 존재하였을 가능성이 높다. 증발기 밸브를 열 경우 장비 내부에 기화된 가스 형태의 프레온 가스가 빠른 속도로 배출되었을 것으로 판단하여 프레온 가스가 5초 또는 10초 동안 빠르게 누출된다는 가정 하에 실시한 시뮬레이션 결과 약 1분 이내 재해자가 작업하는 위치에서의 산소농도가 14% 이하로 도달하는 것으로 확인되었다. 이는 빠른 속도로 배출된 프레온 가스가 약 20초 이후 바닥면을 따라 급속도로 작업장 내부로 확산되면서 작업장 주변 산소농도가 급격히 감소되어 작업자 모두가 사망하는 질식 재해를 유발한 것으로 판단된다. 또 작업장 내부 환기 상태가 불량하여 프레온 가스 누출 이후 약 60분 정도까지 산소농도가 20% 이하로 유지되는 것으로 예측되었다.

동종 재해의 재발 방지를 위해 프레온 가스가 회수되지 않고 배출되어 산소결핍에 의한 질식사를 초래하였으므로 프레온 가스 회수를 철저히 해야 한다. 전체환기가 이루어졌지만 프레온 가스의 비중이 높고 밸브를 열 때 빠른 속도로 분출되기 때문에 전체환기 만으로는 제대로 환기시킬 수 없어 국소배기가 필요하다. 시뮬레이션 결과 배기유량이 부족할 경우 프레온 가스 확산을 방해하여 산소농도가 오히려 감소되는 것으로 예측되어 배기보다는 밸브 주변에서 급기를 실시하는 것이 훨씬 효과적이라 볼 수 있다. 또한 프레온 가스가 20초 이내의 시차를 두고 급속도로 확산되기 때문에 순간적인 배기가 어려울 수 있으므로 밸브 해체 순간에는 소형팬을 이용하여 밸브 주변에 외기를 급기시키고, 풍하지역에 고농도의 프레온 가스 정체 및 산소결핍 지역이 발생할 우려가 있으므로 풍하지역으로 작업자가 위치하지 않도록 하는

것이 바람직하다.

## 감사의 글

본 연구는 2011년도 한국산업안전보건공단의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] KY Lee, YS Choi, WJ Park, "Numerical Study on the Performance Characteristics of a Centrifugal Compressor for a R134a Turbo-Chiller", *Journal of Fluid Machinery*, 7(2), 14-20, (2004)
- [2] BH Ha, SY Baik, TJ Park, KY Park, "Synthesis of HCFC-123 by Isomerization and Hydrogenation of CFC-113", *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, 37(5), 646-651, (1999)
- [3] SD Lee, HG Kim, GT Gong, "Regulations and Development Trends of HCFCs", *Journal of the Korean Society of Industrial Engineering Chemistry : Prospectives of Industrial Chemistry*, 8(2), 1-10, (2005)
- [4] DuPont Bulletin P-123, *HCFC-123 Properties, Uses, Storage, and Handling*, DuPont
- [5] NIOSH ALERT, *Preventing Death from Excessive Exposure to Chlorofluorocarbon 113(CFC-113)*, National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), (1989)
- [6] Toshifumi Watanabe, Masahiko Morita, "Asphyxia due to oxygen deficiency by gaseous substances", *Forensic Science International*, 96, 47-59, (1998)
- [7] HC Ha, TH Kim, KJ Shim, "Applicability of Computational Fluid Dynamics on Industrial Ventilation Engineering", *Journal of the Korean Industrial Hygiene Association*, 8(2), 163-177, (1998)
- [8] SY Kim, SH Jeon, JT Lee, YN Shin, YI Hwang, WJ Jung, JK Woo, JW Lee, Accident investigation report, *Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA)*, (2011)
- [9] HY Kim, "A Study on the Mortality in Oxygen and Toxic Gas Concentration Accorking using Experimental Animals", *KIGAS*, 17(4), 18-25, (2013)
- [10] Rusch, G. M., Trochimowicz, H. J., Malley, L. J., Kelly, D. P., Peckham, J., Hansen, J., and Charm, J. B., "Subchronic Inhalation Toxicity Studies with Hydrochlorofluorocarbon 123 (HCFC 123)", *Fundamental and applied toxicology : Official journal of the Society of Toxicology*, 23(2), 169-178, (1994)
- [11] Malley, L. A., Carakostas, M., Hansen, J. F., Rusch, G. M., Kelly, D. P., and Trochimowicz, H. J., "Two-Year Inhalation Toxicity Study in Rats with Hydrochlorofluorocarbon 123", *Fundamental and applied toxicology : Official journal of the Society of Toxicology*, 25(1), 101-114, (1995)
- [12] SK Lee, HY Shin, "A Study on the Consequences of Underground High Pressure Natural Gas Pipelines", *KIGAS*, 17(2), 44-49, (2013)
- [13] NIOSH, *Criteria for a Recommended Standard: Working in Confined Spaces*, National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), (1997)
- [14] JW Lee, CH Yeo, CO Park, CI Park, "A Study on Accident Cases of Gas Boiler Carbon monoxide", *Journal of Korean Institute of Fire Investigation*, 10(1), 29-35, (2007)
- [15] Hoet P, Buchet JP, Sempoux C, Nomiyama T, Rahier J, Lison D, "Investigations on the liver toxicity of a blend of HCFC-123(2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane) and HCFC-124(2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoroethane) in guinea-pigs", *Archives of Toxicology*, 75(5), 274-283, (2001)
- [16] Zhang Bo, Chen Guo-ming, "Quantitative risk analysis of toxic gas release caused poisoning-A CFD and dose-response model combined approach", *Process Safety and Environmental Protection*, 88, 253-262, (2010)
- [17] Prankul Middha, Olav R. Hansen, Joachim Grune, Alexei Kotchourko, "CFD calculations of gas leak dispersion and subsequent gas explosions: Validation against ignited impinging hydrogen jet experiments", *Journal of Hazardous Materials*, 179, 84-94, (2010)
- [18] S. Gilham, D.M. Deaves, P. Woodburn, "Mitigation of dense gas releases within buildings: validation of CFD modelling", *Journal of Hazardous Materials*, 71, 193-218, (2000)
- [19] Zhirong Wang, Yuanyuan Hu, Juncheng Jiang, "Numerical investigation of leaking and dispersion of carbon dioxide indoor under ventilation condition", *Energy and Buildings*, 66, 461-466, (2013)