

청정소화약제 및 설비

1992년 제4차 몬트리올의정서에 따라 선진국은 1994년 1월부터, 개발도상국(우리나라 포함)은 2010년 1월부터 할론의 사용이 금지된다. 대체물질로 개발되고 있는 청정소화약제 및 설비에 대하여 간략하게 소개한다.

지상으로부터 25 km~30 km 부근의 상층권이라고 부르는 층에 오존층을 이루고 있으며, 오존(O₃)은 성층권 내의 산소(O₂)가 태양빛 에너지에 의해 생성과 파괴를 반복해서 발생, 균형을 이루고 있으나, 할로겐화합물 및 프레온가스 등에 의해 이 균형이 무너지고 오존층이 파괴되어 지구의 환경적 변화를 일으키게 되자 1992년 11월 덴마크의 코펜하겐에서 열린 제4차 몬트리올의정서에서 할론불질에 대해서는 선진국의 경우 1994년 1월 1일부터 생산 중지되었으며 개발도상국(우리나라 포함)의 경우는 2010년 1월 1일 이후부터 생산을 중지하도록 하고 있다. 할론 1301에 대한 대체 약제로서 청정소화약제, 미분무수(water mist) 등과 같은 새로운 기술들이 개발되었다. 본 고에서는 청정소화약제(Clean agents)에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

1. 청정소화약제의 종류

청정소화약제(표 1 참조)는 전기적으로 비전도

성이며 증발하기 쉽고 방사시 잔유물이 없는 가스 상태의 소화약제로 두가지의 큰 범주로 나누어지는데 하나는 할로젠(Halocarbon)화합물 소화약제이며 다른 하나는 불활성가스(Inert gas) 소화약제이다. 할로젠화합물 소화약제는 탄소(C), 수소(H), 브롬(Br), 염소(Cl), 불소(F), 요오드(I)의 성분을 포함한 것으로 ① 불화탄화수소(HFC), ② 브롬불화탄화수소(HBFC), ③ 염화불화탄화수소(HCFC), ④ 불화탄소(FC 또는 PFC), ⑤ 불화요드화탄소(FIC)로 구분된다.

할로젠화합물 소화약제의 일반적인 특징은 ① 전기적으로 부도체이며, ② 증발하기 쉽고 방사시 잔유물이 없고, ③ 액화가스 또는 압축성 액체이고, ④ Halon 1301과 유사한 저장 및 방사 시간을 갖으며(HFC-23을 제외, Halon과 거의 유사한 40 bar(600 psig)로 축압), ⑤ HFC-23을 제외하고는 방사압력을 가장 적절하게 유지하기 위하여 질소가스(N₂)로 축압하며, ⑥ 단위 저장 체적 또는 약제중량의 관점에서 Halon 1301보다 소화효과가 떨어진다. 따라서 필요 저장량이 Halon 1301보다 많으며, ⑦ 전역방출방

[표 1] 청정소화약제 종류

화 학 식 명	상 품 명	약 제 명	화 학 식
Perfluorobutane	PFC-410	FC-3-1-10	C ₄ F ₁₀
Heptafluoropropane	FM-200	HFC-227ea	CH ₃ CHFCF ₃
Trifluoromethane	FE-13	HFC-23	CHF ₃
Chlorotetrafluoromethane	FE-24	HCFC-124	CHClFCF ₃
Pentafluoroethane	FE-25	HCFC-125	C ₂ HF ₅
Hydrochlorofluoro carbon 혼합제	NAF S-III	HCFC Blend A	CHClF ₂ (82%) CHClFCF ₃ (9.5%) CHCl ₂ CF ₃ (4.75%) C ₁₀ H ₁₆ (3.75%)
Trifluoroiodide	Tiodide	FIC-1311	CF ₃ I
N ₂ /Ar/CO ₂	Inergen	IG-541	N ₂ (52%) Ar (40%) CO ₂ (8%)
N ₂ /Ar	Argonite	IG-55	N ₂ (50%) Ar (50%)
Argon	Argon	IG-01	Ar (100%)
Nitrogen	Nitrogen	IG-100	N ₂ (100%)
Hexafluoropropane	-	HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃
Perfluoropropane	-	FC-2-1-8	C ₃ F ₈

식의 경우 노출설계 및 공기 혼합시 주의를 요구하며, ⑧ 주어진 화재모형, 화재크기, 방사시간에서 Halon 1301보다 열분해 생성물(기본적으로 불화수소(HF))이 더 발생하며, ⑨ 모든 소화약제는 단위 중량당 할론 1301보다 현재 더 비싸다. 불활성가스 소화약제는 소화약제의 주성분으로 헬륨, 네온, 아르곤, 질소 또는 이산화탄소 등의 가스 가운데 한가지 또는 그 이상을 함유한 소화약제를 말하는 것으로 불활성가스 원소 중 하나인 이산화탄소(CO₂)는 적은 소량을 포함하는데 이는 저농도에서 생리학 영향 및 독성(약 9%)을 갖고 있기 때문이다. 불활성가스 소화약제는 압축가스로서 저장되며, 전기적으로 비전도

성이며 공기와의 혼합이 안정적이며 방사시 잔유물이 없다.

2. 소화 메커니즘

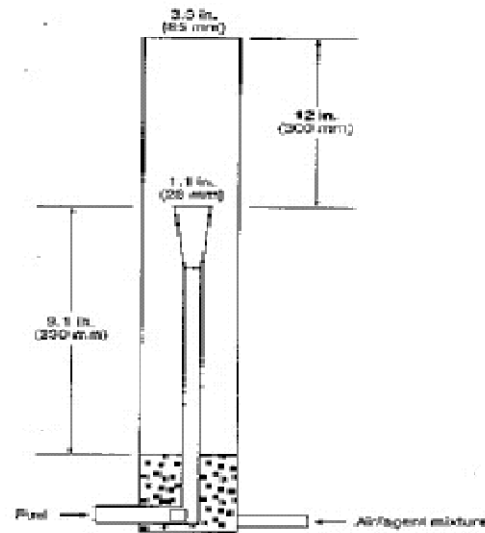
할로젠화합물 소화약제는 구성물과 관련하여 화학적, 물리적인 메커니즘의 조합에 의해서 소화를 한다. HBFC와 HFIC의 화학적 소화 메커니즘은 할론 1301과 비슷하다. 즉, 브롬(Br)과 요오드(I) 원소는 불꽃의 연쇄반응을 차단하는 화학적 소화를 한다. 다른 원소를 포함한 소화약제들은 불꽃이 반응하는 지역으로부터 증발열의 조합과 열용량 및 소화약제의 분해에 의해 흡수

된 에너지에 의해서 높은 반응 비율로 충분히 유지되는데 필요한 수준 이하로 불꽃 온도를 내리면서 화재를 소화하는 물리적 냉각소화를 한다. Burgess 등은 플루오르 화합물의 화학적 소화 효과에 대한 플루오르 화합물(CF₄, CF₃H, CF₃-CF₃, CF₃-CF₂H 및 CF₃-CF₂)에 대한 운동 시뮬레이션을 수행하였다. 조사된 소화약제 중에서 오직 CF₃H 만이 불꽃을 차단하는 화학적 소화 효과를 보였다. Battin-LeClerc 등은 FC와 HFC 화합물에서는 불꽃의 연쇄반응을 차단하는 부촉매 효과가 낮다고 설명하였다. Richter 등은 브롬(Br)이 그런 것처럼 불꽃 속에서 다시 돌아가는 플루오르 원소의 결합 때문이라고 같은 결론을 내렸다. 산소농도 저하는 또한 불꽃 온도를 내리는데 중요한 역할을 한다. 소화약제의 플루오르(F)와 염소(Cl) 고리가 분리되는 과정에서 에너지를 흡수한다. 할로젠 원소를 갖는 불꽃 라디칼 연소에서 어느 정도의 "화학적" 연소는 의심할 여지가 없으나 촉매역할을 하지 않기 때문에 그리 중요치 않다.(예를 들어 하나의 F는 하나의 H 불꽃라디칼과 조합된다.) HCFC, HFC 및 FC 화합물은 불꽃에서 화학반응을 차단하는 소화로 할론 1301에 상대적으로 높은 소화농도를 갖는다. 불활성가스 소화약제는 공기 중의 산소농도를 15 % 이하로 낮춤으로써 화재를 소화시킨다.

3. 불꽃 소화효과

전역방출방식 청정소화약제에서 다양한 방법

으로 효과적인 소화효과를 측정한다. 액체와 가스연료에 대한 불꽃소화를 측정하는 small-scale 시험은 ICI 컵 버너 또는 다양한 방법이 있다. 화염을 소화하는데 소화약제의 최소농도를 최소소화농도(Minimum extinguishing concentration, MEC)라 하며, MEC를 측정하기 위하여 그림 1의 ICI 컵 버너를 사용하여 다양한 연료에서 소화농도를 측정한다



【그림 1】ICI 컵 버너 장치 개략도

4. 특성

독물학적 검사는 ① 노출시간과 빈도수, ② 특별한 생물학적 효과에 대한 검사로 나눌 수 있으며, 노출기간과 빈도수를 조사하는 연구는 ① 민감성 : 24시간 이하의 노출 ② 약간 민감성 : 1월 이하의 노출 ③ 약간 만성적 : 1월~3월 노출 ④ 만성적 : 3월 이상의 노출로 이루어진다. 할로젠 화합물 소화약제에 사용하기 위하여 ① 흡입독

성, ② 발진적인 독성, ③ 재생산성의 독성, ④ 포괄적인 독성, ⑤ 심장의 독성, ⑥ 중추신경계(CNS)에 대한 생물학적 효과에 대하여 시험한다. 미국환경청(EPA)의 중요 세대체정책((SNAP, Singificant new alternative policy) 프로그램에서 요구되는 최소의 시험은 ① 발진적이고 재생산적인 독성시험, ② 4~13주간의 약간 만성적인 시험, ③ 포괄적인 독성시험(아메스시험¹⁾, 마이크로핵시험²⁾ 등), ④ 독성지사율시험(예, LC₅₀³⁾, ALC⁴⁾), ⑤ 심장민감도시험(NOAEL⁵⁾, LOAEL⁶⁾) ⑥ 열분해 생성물시험을 포함하고 있다. 할로겐화합물 소화약제는 장기 또는 짧은 노출에서 민감한 독성시험은 심장민감도시험이며, 불활성기체에 대해서 기본적인 생리학적 고려사항인 산소결핍에 대한 연구이다.

5. 환경적 요소

할로겐화합물 소화약제의 환경적 평가 항목으로 ① 오존 파괴지수와 ② 지구온난화지수 ③ 대기잔존수명시간이 고려될 수 있다.

가. 오존파괴지수

(Ozone Depletion Potential, ODP)

오존은 산소와 태양에서 오는 자외선(UV)과의 반응에서 만들어지는데 과정은 아래와 같다. $O_2 + UV \rightarrow O + O$, $O + O_2 \rightarrow O_3$

오존은 태양에서의 전체 자외선 중에서 많은 부분을 흡수하고 대기로 들어오는 것을 막는다. 오존층(ozone layer)은 ① 식물과 동물에게 해가 되는 유해한 UV-b를 낮추고, ② 대류권에서 자연스럽게 더욱 많은 오존이 만들어지는 것을 막는 두 가지 효과가 있다. 염소(Cl) 또는 브롬(Br)을 포함하는 할론, HCFC와 다른 할로겐화합물 소화약제는 성층권의 오존을 파괴하는 것으로 알려졌다. ODP는 CFC-11 1 kg에 의해 파괴되는 오존량에 대한 상대적 효과에 관계하는 다른 할로겐화합물 소화약제의 물질 1kg에 의해 파괴되는 오존의 할당량이다.

나. 대기잔존수명시간(Atmospheric Life Times, ALT)

대기에서 온실가스가 파괴되는 값은 다음 식에 따라 산출된다.

$$C = C_0 e^{-kt}, \text{ 여기서 } C = \text{시간 } t \text{에서의 농도,}$$

$$C_0 = \text{시간 } t=0 \text{에서의 초기농도}$$

$$k = \text{실험적으로 결정되는 상수(단위 1/시간).}$$

대기잔존수명시간(L)은 e^{-1} 접는 잔존수명시간으로 또는 C/C_0 의 비율을 $1/e$ 로 같게 정의 함으로써 수행된다.(e 는 자연로그로서 2.718의 값을 갖는다.) 대기잔존수명시간은 다음 식에 의해서 결정되어진다.

$$C = C_0 e^{-t/L}$$

할로겐화합물 소화약제 물질이 방사된 후

1) 아메스시험은 세포의 유전자에서의 변화를 일으키거나 또는 돌연변이를 일으키는 화학물질의 능력을 확인하는 시험을 말한다.

2) 마이크로핵시험은 입(입체적 이상)을 유발하는 잠재능력을 확인하는 시험을 말한다.

3) LC(Lethal Concentration)이란 4시간 동안 쥐에게 노출했을 때 그 중 50%가 사망하는 농도를 말한다.

4) ALC(Approximate Lethal Concentration)는 사망에 이르게 할 수 있는 최소 농도를 말한다.

5) NOAEL(No Observed Adverse Effect Level)는 예로운 생리학적 또는 독성학적 영향이 관측되지 않는 최저농도를 말한다.

6) LOAEL(Lowest Observed Adverse Effect Level)는 예로운 생리학적 또는 독성학적 영향이 관측되는 최저농도를 말한다.

대기권 내에서 분해되지 않고 체류하는 잔류기간 (단위 : 년)을 대기잔존수명시간 (ALT)라 말한다.

다. 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)

GWP는 CFC-11 1 kg이 영향을 주는 지구 온난화 정도에 대한 상대적 효과에 관계하는 할로겐화합물 소화약제의 물질 1kg이 영향을 주는 지구온난화 정도의 값으로 나타낸다.

라. 환경적 요소

할로겐화합물 소화약제에 대한 환경영향 자료는 표 3과 같으며, FC와 HFC 혼합물은 제로(zero)의 오존파괴지수를 보여주며 HCFC 혼합물은 상당히 낮은 ODP를 갖는 것으로 나타나

HCFC 화합물은 CFC(Chloro Fluoro Carbon) 대응으로서 넓게 사용이 된다. 미국에서는 미국환경청(EPA)에서 SNAP 프로그램을 통해서 환경적 요소와 독성에 관하여 평가하는데 평가항목은 ODP, GWP, ALT, NOAEL, LOAEL 등이다.(표2,3 참조)

6. 열물리적 특성

청정소화약제의 열물리적 특성은 표 4, 5와 같다

7. 청정소화약제설비 사용 고려사항

전역방출방식 청정소화약제설비의 일반적인

[표2] 할로겐화합물 소화약제의 환경적 요소

상품명	약제명	NOAEL %	LOAEL %	LC50/ALC
CEA-410	FC-3-1-10	40	>40	>80%
FM-200	HFC-227ea	9.0	>10.5	>80%
FE-13	HFC-23	30	>50	>65%
FE-24	HCFC-124	1	2.5	23~29%
FE-25	HFC-125	7.5	10.0	>80%
NAF S-III	HCFC Blend A	10	>10	>64%
Tiodide	FIC-1311	0.2	-	-
-	FC-2-1-8	30	>30	>8
-	HFC-236fa	10	15	>18.9

[표3] 불활성가스 소화약제의 환경적 요소

상품명	약제명	ODP	GWP(100yr)	ALT(yr)
Halon 1301	Halon 1301	16	5,800	100
CEA-410	FC-3-1-10	0	5,500	2,600
FM-200	HFC-227ea	0	2,050	31
FE-13	HFC-23	0	9,000	280
FE-24	HCFC-124	0.22	440	7
FE-25	HFC-125	0	3,400	41
NAF S-III	HCFC Blend A	0.05	1,600	16
Tiodide	FIC-1311	<0.2	-	-

[표4] 할로겐화합물 소화약제의 열물리적 특성

항 목	단 위	FC-3-1-10	FC-2-1-8	HCFC Blend A	HCFC-124	HFC-125	HFC-227ea	HFC-23	HFC-236ea	FIC-1311
분자량		238.03	188	92.90	136.5	120.02	170.03	70.01	152	195.91
비등점 (760 mmHg)	℃	-2.0	-37.0	-38.3	-11.0	-48.5	-16.4	-82.1	-1.4	-22.5
빙 점	℃	-128.2	-183.0	<-107.2	-198.9	-102.8	-131	-155.2	-103	-110
임계온도	℃	113.2	71.9	124.4	122.2	66.0	101.7	25.9	124.9	122
임계압력	kPa	2,323	2,680	6,647	3,614	3,595	2,912	4,836	3,200	4,041
임계부피	cc/mole	371	300.8	162	241.6	210	274	133	274	235
임계밀도	kg/m³	629	629	577	565	571	621	525	555.3	871
비열, 액체(25℃)	kJ/kg℃	1.047	1.099	1.256	1.13	1.260	1.184	1.549	1.283	0.592
비열증기(760 mmHg)	kJ/kg℃	0.804	0.794	0.67	0.741	0.800	0.808	0.731	0.844	0.3618
기화열(비등점)	kJ/kg	96.3	104.8	225.6	194	164.7	132.6	238.8	160.1	112.4
액체의 열전도율(25℃)	W/m℃	0.0537	0.0138	0.0900	0.0746	0.0634	0.069	0.0527	0.0745	0.07
점도, 액체(25℃)	centipoise	0.324	0.297	0.21	0.299	0.145	0.226	0.083	0.363	0.196
액체에 녹는 물의 용해도(21℃)	중량비%	0.001	<0.005	0.12	0.07	0.07	0.06	500ppm	740	1.0062

[표5] 불활성가스 소화약제의 열물리적 특성

항 목	단 위	IG-01	IG-100	IG-55	IG-541
분자량		39.9	28	33.95	34.0
비등점 (760 mmHg)	℃	-189.85	-195.8	-190.1	-196
빙 점	℃	-189.35	-210.0	-199.7	-78.5
비열, 증기(760 mmHg)	kJ/kg℃	0.519	1.04	0.574	0.574
기화열(비등점)	kJ/kg	163	199	220	220
상대질연도(1기압 25℃)	질소=1	1.01	1.0	1.03	1.03
액체에 녹는 물의 용해도(21℃)	중량비%	0.006	0.0013	0.006	0.015

장점은 ① 소화능력, ② 직간접적인 화재/연기로 인한 피해를 입기 전 초기에 빠른 소화를 위해 적당한 감지활동을 통한 능력, ③ 소화약제로 인하여 피연소물에 손상을 일으키지 않는다는 것이다. 이러한 3가지 이유로 청정소화약제는 가연성 및 인화성액체 위험물(선박엔진실, 펌프실 등), 전기설비에 사용이 증가되고 있으며, 반면 단점으로는 ① 소화약제가 방사되기 전에 개구부 및 통기구의 완전한 폐쇄 상태를 요구한다. ② 소화약제는 냉각효과가 떨어지므로 대형 심

부화재에 적용하는 경우 심각하게 고려되어야 한다. ③ 전선/케이블 및 전기설비를 방호하여야 할 경우 또는 전기케이블에서 고방출열을 갖는 전기화재 소화를 하기 위하여 고농도의 소화약제 및 설계농도유지시간이 제공되어야 한다. ④ 모든 감지, 조작, 약제누설을 설비에 반영하여야 하며 이것들을 확인하기 위하여 적합한 시험 또는 사전에 성능시험을 실시하여야 한다.

8. 청정소화약제설비 설계

가스계소화설비를 설계하는 기본적인 절차는 다음과 같다. ① 설계농도를 결정한다. ② 전체 소화약제 양을 결정한다. ③ 최대 방사시간을 결정한다. ④ 설비에 맞는 압력을 갖는 두 배관 두께(스케줄)를 선택한다. ⑤ 배관 배치를 설계하

고 혼합을 보장하기 위해서 요구된 방사시간에서 요구되는 설계농도에 이르게 하기 위한 노즐을 선택한다. ⑥ 과압/저압 방호구역을 평가하고 필요하다면 배출구를 만든다. ⑦ 최소 소화약제 유지 요구를 설계하고 방호구역에서 소화약제 누설을 평가한다. 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 방호구역의 확실한 기밀(Enclosure Integrity) 유지하기 위하여 ① 소화약제를 방사하는 동안에 소화약제의 손실을 방지하여야 하며 ② 방사 후에 소화약제/공기 혼합 손실이 이루어진다면 적합한 설계농도유지시간(holding time)을 유지하여야 한다는 2가지 사항을 만족하는 경우이다.

일반적으로 모든 개구부 및 통기구능 감지기와 경보장치과 연계하여 소화약제 방사하기 전에 폐쇄되도록 하여야한다.

9. 설계농도

가연물에 대한 소화약제의 설계농도는 컵 버너 소화농도(MEC)를 실시하여 얻은 소화농도(MEC)에 20 % 안전율을 합한 것으로 설정한다.

10. 안전율

발전적인 설계농도에 대해서 사용되는 NFPA 2001에서는 최소한의 안전율을 20%로 고려하고 있다. 설계와 설치 과정에서 일어나는 최소의

오차, 예를 들면 거실 체적 계산에서의 에러, 용기에 충전된 소화약제 중량과 컵 버너 MEC 값들과 같은지를 고려하여야 한다. 최소설계농도를 유지하기 위하여 다음 조건일 때에 안전율을 증가시킬 수 있다. ① 노즐이 설치된 최고 천장 높이 또는 방호면적이 설치된 노즐 위치 ② 가연성 또는 인화성액체 위험물을 방호하기 위하여 열분해 생성물(할로겐화합물 소화약제)을 제한하거나 15초 이하의 빠른 소화시간을 필요로 장소 ③ 크고 작은 방호구역을 동시에 방호하는 배관 배치에서 많은 수의 높은 비균형 유속이 일어나는 장소 ④ 방호구역에서 가연물의 변화가 많이 발생하기 쉬운 장소(예를 들어 자료실/기록 저장소) ⑤ 닫히지 않는 출입구가 존재하거나 또는 압력이 자유로운 틈이 제공되어 약제 방사시 엄청난 소화약제 손실이 유도되는 장소 ⑥ 많은 사전 방사(post-discharge) 약제누설이 발생될 수 있는 장소.

안전율 또는 설계농도를 증가시키는 것은 확실한 소화를 보장시켜주는 것은 아니며, 설비의 성능 또는 신뢰성을 향상시켜주는 것 또한 아니다.

11. 소화약제 양

할로겐화합물 소화약제의 양은 다음 식을 이용하여 산출한다.

$$W = \frac{V}{S} \left(\frac{C}{100-C} \right)$$
 W= 요구되는 소화약제의 무게(kg), S=소화약제별 비체적(m³/kg) (k₁+k₂(T)), 여기에서 T = 방호구역의 최저주요온도(°C),

k_1, k_2 는 선형상수이고(표 6 참조), V = 방호구역의 체적 (m^3), C = 설계농도(%)

[표6] 할로겐화합물 소화약제의 k_1, k_2 상수

소 화 약 제	k_1	k_2
FC-2-1-8	0.11712	0.00047
FC-3-1-10	0.094104	0.00034455
HCFC BLEND A	0.2413	0.00088
HCFC-124	0.1575	0.0006
HFC-125	0.1825	0.0007
HFC-227ea	0.1269	0.0005
HFC-23	0.3164	0.0012
HFC-236fa	0.1413	0.0006
HIC-13II	0.1138	0.0005

불활성가스 소화약제 양은 다음 식을 이용하여 산출한다.

$$X = 2.303 \frac{V}{S} \log \left(\frac{100}{100-C} \right) V_s, \quad X = 21^\circ\text{C} \text{에서}$$

요구되는 불활성가스의 부피(m^3),

$V_s = 21^\circ\text{C}$ 에서의 불활성가스의 비체적(m^3/kg),
 V = 방호구역의 체적(m^3), S = 소화약제별 비체적(m^3/kg)($k_1+k_2(T)$)(표 7참조), V = 방호구역의 체적(m^3), C = 설계농도(%), T = 방호구역의 최저 주의 온도($^\circ\text{C}$), C = 설계농도(%)

[표7] 불활성가스 소화약제의 k_1, k_2 상수

소화약제	k_1	k_2
IG-01	0.5685	0.00208
IG-100	0.7997	0.00293
IG-55	0.6598	0.00242
IG-541	0.65799	0.00239

12. 방사시간

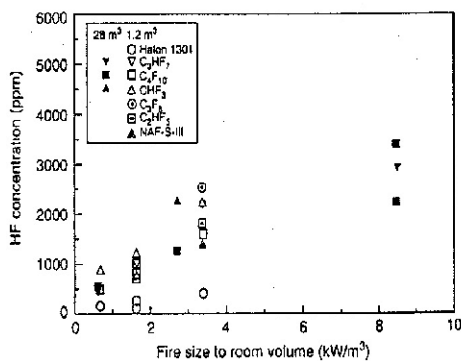
할로겐화합물 소화약제의 방사시간은 10초 이내이다. 할로겐화합물 소화약제에 대하여 방사시간을 10초 이내로 한 이유는 ① 방사노즐을 통하여 방사되는 약제의 유량을 크게 하여 방호구역내의 공기와 확실한 혼합을 얻기 위하여, ② 배관 내에서 액상과 기상의 균일한 흐름에 필요한 충분한 유속을 얻기 위하여, ③ 소화약제의 열분해 생성물의 생성을 줄이기 위하여, ④ 화재의 신속한 진행으로 인한 직접 또는 간접적인 피해를 최소화하기 위해서이다.

방사시간과 관련된 이들 이유에서 가장 중요한 것은 소화약제에서 열분해 생성물 발생의 최소화이다. ①과 ②는 배관 설계에 의해서 결정된다. 불활성기체에 대한 방사시간은 현재 60초이다. 불활성기체의 방사시간을 한정짓는 주요 이유는 직접, 간접적으로 화재손실을 한정짓기 위해서이고 질식소화에서의 시간을 최소화하기 위함이다.

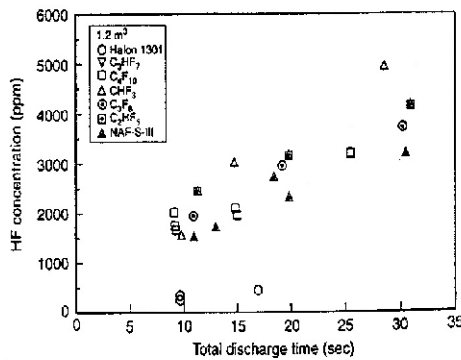
13. 열분해생성물

비슷한 조건에서 청정소화약제는 할론 1301보다 높은 열분해 생성물이 발생하는 것으로 나타났다. 주어진 연료에서 분해생성물의 발생량을 결정하는 변수는 ① 방사시간에서의 화재의 크기, ② 방호구역에서 소화농도에 이르는 데 필요한 시간, ③ 소화약제 설계농도를 들 수 있다. 그림 2는 미국해안경비대(USCG)에서 시험한

1.2m³ 및 29m³ 방호구역에서의 10분 동안 발생된 평균 HF 농도를 나타낸 것이다. 그림 3은 방사시간에 발생된 분해생성물 양의 관계를 나타낸 것이다. 할론 1301에 비하여 할로겐화합물 소화약제에서의 HF 양은 3배에서 8배까지 많은 것으로 나타났다.



[그림 2] n-헵탄화제에 15초 동안 방사 소화시의 평균 HF 농도



[그림 3] 4.0 kW n-헵탄화제에 소화시 최대 HF 농도

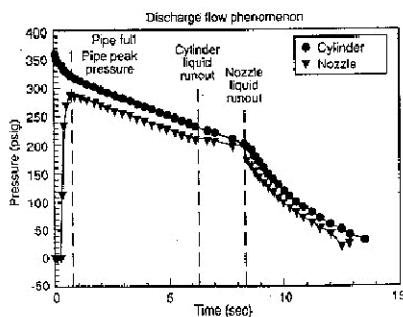
분해생성물이 전자기기에 미칠 수 있는 영향은 항상 관심의 대상이 되는 문제이다. 현재로서는 모든 전자기기가 HF 농도에 노출되었을 때 발생할 수 있는 문제점을 예측 할만한 자료가 충

분치 않은 실정이다. HF 농도가 전자기기에 미치는 영향을 평가하기 위하여 분해생성물 중 HF, HBr를 포함하는 할론 1301의 분해와 관련하여 몇 차례 시험이 실시되었다. 그중 우주선 Orbiter에 탑재된 전자기기를 HF, HBr 농도 700 ppm과 7,000 ppm 및 70,000 ppm에 노출시키는 시험을 실시한 미국항공우주국(NASA)의 연구가 주목할 만하다. NASA의 시험에서 HF 및 HBr 농도 700 ppm에 노출된 전자기기의 경우 아무런 문제가 없었으나 7,000 ppm으로 높이자 심각한 부식이 나타났으며, 일부 전자기기는 작동상 오류가 일으키기도 하였다. Dumayas는 IBM-PC 호환용 다기능 카드를 청정소화약제의 열분해 생성물의 환경에 노출시켰다. HF 농도 5,000 ppm까지의 소화 후 분위기에 15분 동안의 노출시킨 다음 주위 온도와 습도 조건에서 30일 동안 보관하였을 때 손실이 없음을 발견하였다. Forssell 등은 소화 후 분위기에 다기능 보드판을 30분 동안 노출시켰을 때 시험 후 90일 동안 고장이 발생하지 않았다. 이때 HF 농도는 550 ppm이었다. 이 시험에서 일반적인 특성이나 규칙을 이끌어 낼 수는 없었지만 HF 농도 500 ppm까지의 30분 동안 노출에서는 전자기기의 기능 불량을 일으키는 단기간(90일 이하)의 손상은 없는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 손상은 노출된 장치의 특성, 노출 후 처리, 다른 연소생성물에서의 노출 및 상대습도 등 여러 가지의 요인들에 달려있다. 장치의 중요한 설치에는 해당 공간 내의 장치의 위치, 장치 외함의 존재 및 손상에 대한 장치의 민감성 등을 포함해야 한다. HCFC, PFC 및 HFC의 청정소화약제는 할론 1301과 같은 화재크기

및 방사시간에서 할론 1301보다 많은 분해생성물을 발생시켰다. 분해생성물의 양을 조절하는 1차적인 요소는 소화약제의 방사시간에서의 화재 크기에 영향이 있음을 발견하였다.

14. 축압과 방사특성

할로겐화합물 소화약제는 두상(two-phase)의 유동 상태를 갖는다. HFC-23을 제외한 소화약제는 질소가스를 축압하여 2,482 kPa(360 psig) 또는 4,137 kPa(600 psig)가 유지된 상태의 용기를 사용하며 또한 여러 혼합물의 유동을 갖는다. 불활성기체 소화약제는 저장 중 또는 방출 중 어느 때나 단상(one-phase)의 압축 유체 유동을 한다. 유체 유동의 대부분은 단상으로 흐르지 않는다. 정확한 유속 예측을 하기 위해서는 아래의 세가지 사항이 설계에 반영되어야 한다. ① 소화약제 방사시간 조절, ② 정해진 방호구역에서 소화약제의 적절한 분포 확인을 위하여 적절한 노즐 방향과 적절한 방사압력 유지, ③ 적절한 소화약제량의 방사, 방사시 정해진 방호구역에서 타 방호구역으로 누설되지 않아야 하며,



[그림 4] 할로겐화합물 소화약제의 방사시간에 따른 용기압력 및 방사압력 곡선

과압되지 않은 상태로 방사되는 사항을 설계에 반영되어야 한다. 그림 4는 방사시간에 따른 용기압력과 방사압력을 나타낸 곡선이다.

가. 흐름영역

만일 배관 내의 소화약제의 유속이 충분히 높지 않다면 흐름은 배관 속에서 두 개의 다른 상(phase)으로 분리될 수 있다. 이렇게 되면 터 분할(tee splits) 및 압력강하를 구하는 데 몇몇 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 소화약제와 증기/질소가스 균일한 혼합을 확보하기 위해 최소 유속을 유지되어야 한다.

나. 마찰손실로 인한 압력강하

배관 내에서 마찰력에 의해 발생하는 압력강하는 두상(two-phase) 유체에 대해서는 달리 계산된다. 소화약제 증기 및 가스 존재는 배관의 단위 길이 당 압력강하에 영향을 미친다.

다. 방사에 미칠 수 있는 변수의 영향

용기와 설비 변수를 가진 중요 설비 방사 특성들(방사시간, 노즐압력, 유속)의 변화는 약간의 설비 문제를 야기할 수 있다.

라. 설계방법 시험 및 승인

설계방법 제한은 열가지의 매개변수에 의해 설명되며, 시험은 이러한 모든 매개변수 제한들에서 계산 절차의 정확도를 확인하기 위해 필요하다.

아래의 매개변수 중 일부는 불활성가스 설비들에 적용되지 않는다. ① 배관 내 소화약제의

% (최대값), ② 최대 및 최소방사시간, ③ 배관내에서의 최소유속, ④ 각 노즐에 대한 배관 체적의 편차, ⑤ 배관 배열에서 노즐 압력의 최대 편차, ⑥ 노즐 지름 대 배관 안 지름의 최대비, ⑦ 노즐에서 가스시간 - 불균형 조건을 가장 잘 나타내는 배열, ⑧ 터, bullhead 터 및 터배열(세로와 가로)를 포함한 모든 형태의 터 분할(tee splits), ⑨ 용기의 최대 및 최소 충전밀도, ⑩ 터의 각 형태에 분리되어 최대 및 최소 유량의 열가지의 매개 변수에 의해 설명되며, 시험은 이러한 모든 한계들에서 계산 절차의 정확도를 확인하기 위해 필요하다. 특별한 제작자의 기계설비와 관련한 중요한 2가지 기계적 시험으로 ① 특별한 밸브 조립을 통하여 압력강하를 적절하게 확인되어야 하며 ② 노즐 오리피스 방출계수를 평가하는 것이다.

15. 노즐 배치와 높이 한계

전역방출방식의 가스계소화설비에서 가장 중요한 사항 중의 하나는 방호구역 내에서 소화약제의 균일한 분포이다. 노즐 설계 및 최저 노즐 압력은 방호구역 내에서 소화약제의 분포를 결정한다. 노즐의 성능은 예를 들어 UL 1058과 같은 full-scale 시험에 의해 평가된다. 노즐평가의 일반적인 시험은 다음과 같이 실시한다. ① 지정된 방호구역에서의 n-헵탄 소화를 위한 최저 노즐압력과 최대 노즐 높이를 정한다. ② 최대노즐의 설치 범위는 최저높이(일반적으로 0.5 m(1.6 ft) 미만), 최대 노즐 설치 범위 100 mm²

(1,076 ft²) 및 최대 노즐 방사압력으로 소화시험을 통해서 정한다. 제조사 간에 따라 최저 노즐 압력, 최대 천장높이 및 최대 평균 적용 범위의 많은 차이가 있다. 일반적으로 최대 노즐 높이는 4~5 m(13~16 ft), 9~10 m²(97~108 ft²)의 노즐 영역 범위 및 3~6 bar 의 최저 노즐 압력을 가진다. 노즐의 간격, 높이, 최저 압력을 제조사가 제시하여야 하는데 이는 컴퓨터 프로그램을 사용하여 노즐로부터 흐름, 혼합 및 분포를 컴퓨터 프로그램을 사용하여 예측하여 노즐을 배치 할 수 있다.

16. 압력배출

전역방출방식에서 가스계소화약제가 방사노즐을 통하여 방사구역에 방사되는 경우에 방호구역 내에서는 압력의 변화가 발생하며 할로젠화합물 소화약제와 이산화탄소 소화약제의 경우에 초기에는 부압(negative pressure)이 걸리다 압력이 상승하게 되고 불활성가스 소화약제의 경우에는 초기부터 정압(positive pressure)이 걸린다. 따라서 이런 압력변화는 구조물의 변형 또는 파손을 줄일 수 있으며 압력배출구의 크기는 소화약제, 설계농도 또는 구조물의 내압강도에 따라 달라질 수 있으므로 설계시 세심한 고려가 필요하다. 소화약제가 방사되는 동안 방호구역의 최대 및 최저 압력은 ① 노즐에서 소화약제의 열역학적 상태(소화약제와 배관 배치에 의해 결정된다), ② 노즐 설계, ③ 방호구역 체적 및 벽 표면적, ④ 화재의 규모, ⑤ 방호구역의 초기

조건, ⑥ 방호구역에서의 누출 면적, ⑦ 소화약제 유속에 영향을 받는다

17. 설계농도유지시간과 방호구역의 누출

할로겐화합물 소화약제는 일반적으로 방사 이후에 특정한 시간동안(10분에서 20분) 최소설계농도를 유지하여야 한다. 설계농도유지시간(Soaking time/holding time)이 필요한 이유로 다음 3가지 사항을 들 수 있다. ① 보통 A급의 심부화재는 설계농도유지시간이 필요하며, ② 비상조치반의 반응(활동)시간을 고려하기 위함이며, ③ 특히 가연성 및 인화성액체 위험물의 경우 고온표면과 다른 요인들에 의한 재점화, 재착화를 방지하기 위한 시간을 갖기 위함이다. 대체로 설계농도유지시간은 일반적으로 최저 10분이 대개 권고된다. 방호구역에 적절한 소화농도를 유지하는 능력은 방호구역 누출의 함수이다. 전통적인 방출시험은 할론 1301을 가지고 실시하였으나 1980년대 후반에 활발히 검토되어 최근에는 도어팬(Door fan) 가압법에 의한 방출시험을 실시한다. 이유로 저비용, 편리성, 연소시간 및 환경오염방지 등을 들 수 있다. NFPA 2001의 부록C에서 소화약제 설계농도유지시간을 도어팬 가압법(pressurization method)을 통해 누출함수를 구하는 절차에 대해 설명하고 있다.

【참고문헌】

1. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 6/Chapter 19, Direct halon replacement agents and systems, 2nd Edition.
2. NFPA 2001, Standard on clean agent fire extinguishing system, 2000. ☞

- 정리: 방재설비부 과장 박영근