

제203호

2011. 03

위험관리정보

- 방재정보
 - ✓ 포(Foam)에 대해 바로 알기 / 1
 - ✓ 터널 화재 안전 / 10

- 신착자료 목록 / 16

- 안내
 - ✓ 판매도서 안내 / 19



WWW.KFPA.OR.KR

포(Foam)에 대해 바로 알기

Ted H. Schaefer

Bogdan Z. Dlugogorski

Eric M. Kennedy

지난 한 세기 동안 포소화약제의 형태는 가연성 액체용인 클래스B와 가연성 고체용인 클래스A의 여러 형태로 발전하여 현재도 사용중이다. 표 1을 보면 10개 이상의 소화약제가 있으며, 이는 소방분야에 도입된 순서에 따라 배열되었다. 다음의 표는 포의 분류, 용도 그리고 대표적인 적용 장비를 나타낸다.

분류	용도	적용 장비
단백포	가연성 액체	저팽창 노즐
고팽창포	가연성 고체, 가연성 액체, LNG, LPG	초고포 발생장치
중팽창포	가연성 고체	중팽창 노즐
수성막포	탄화수소 액체	저팽창, 중팽창 노즐
AFFF-ARF *	탄화수소와 극성용매 액체	저팽창, 중팽창 노즐
불소 단백질	탄화수소 액체	저팽창 노즐
불화단백 수성막포	탄화수소 액체	저팽창 노즐
FFFP-ARF *	탄화수소와 극성용매 액체	저팽창, 중팽창 노즐
HAZMAT포	특수 위험물	저팽창, 특수 장비
클래스A	클래스A 가연성 고체	저, 중, 고팽창 CAFS(압축공기포 설비)
불소 비합유	가연성 고체와 가연성 액체	저, 중, 고팽창 CAFS(압축공기포 설비)
불소 비합유-ARF	탄화수소와 극성용매 액체	저, 중, 고팽창 CAFS(압축공기포 설비)

표1. 포소화약제 분류

(* : 최근에는 극성용매 위험성으로 인해 저팽창 노즐을 사용한다.)

1960년대 이전에는 단백질이 가연성 액체에 사용된 주된 소화약제였다. 고팽창포

는 참고에서 사용되었고, LNG와 LPG 위험에 대한 특수한 화재진압 기술로 발전 해왔다. 또한 중팽창포는 유럽에서 지하공간 화재진압용으로 사용되며 인기를 끌 게 되었다. 표 2는 포소화약제 기술들의 화학 특성을 나타낸다.

포 기술	포소화약제의 주요 성분
단백포	단백질(가수분해)
고팽창포	탄화수소 계면활성제
중팽창포	탄화수소 계면활성제
수성막포	불소 화학물질* + 탄화수소 계면활성제
불화단백포	불소 화학물질* + 단백질
AFFP-ARF	불소 화학물질* + 탄화수소 계면활성제 + 폴리머***
불화단백 수성막포	불소 화학물질* + 단백질 + 탄화수소 계면활성제**
FFFP-ARF	불소 화학물질* + 단백질 + 탄화수소 계면활성제** + 폴리머***
HAZMAT포	불소 화학물질* + 탄화수소 계면활성제 + 폴리머*** + 중화제
클래스A포	탄화수소 계면활성제
불소 비함유	탄화수소 계면활성제 + 폴리머****
불소 비함유-ARF	탄화수소 계면활성제 + 폴리머****

표2. 현재의 포 기술과 화학적 구성

- (* : 불소 계면활성제와 불소 폴리머, 과불화 폴리머를 포함하는 불소 화학물질
- ** : 탄화수소 계면활성제는 수성포 형성을 돕는데 나타난다.
- *** : 폴리머는 거의 다당류 폴리머이지만, 점성을 줄이기 위해 과불화 폴리머로 대체되기도 함.
- **** : 폴리머는 다당류 폴리머이다.)

1960년대 중반 이후 수성막포(AFFF)는 가연성액체 화재 진화를 위한 주된 포소 화약제 기술 중의 하나로 쓰여 왔다. 수성막포는 미국 해군 연구소와 산업 협력체 간의 협동 연구의 결과물이었다. 수성막포 기술이 혁신적이었던 이유는 불소 계면 활성제의 사용 때문이었는데, 이로 인해 액체가연물 위에서의 빠른 이동, 유동성, 자체 복원력, 탁월한 화재진화성능을 얻었다. 이후의 수성막포(AFFF)의 조성은 불 소와 탄화수소 계면활성제의 혼합으로 이루어졌다. 불소 계면활성제는 고온 저항 성과 화학적 불활성을 가지고 있고, 공기와 AFFF 용액 경계면에서 낮은 표면 장 력을 만들어낸다. 탄화수소 계면활성제는 거품구조의 형성을 도와준다.

불소가 첨가된 계면활성제는 고성능의 박막 형성 소화약제의 중요한 구성요소가 되었고, 액체가연물 화재(클래스 B)를 진화하는 용도로 사용된다. 이러한 이유로, 액체가연물화재에 사용되는 모든 포들은 클래스 B 포를 의미하게 되었고, 보통 탄소질의 물질(클래스A 가연성 물질)을 사용한 소화활동에 쓰이는 클래스A포와

상반된다. 이 글은 주로 클래스B포에 이야기할 것이다.

전형적인 수성막포 용액은 여러 물질들로 이루어지는데, 물과 디에틸렌글리콜 일부틸 에테르, 알킬 황산염 계면활성제(나트륨 옥틸 황산염, 나트륨 데실 황산염, 나트륨 데실 에톡실기 황산염 등), 불소 계면활성제, 그리고 다른 첨가물이 들어간다. 다른 첨가물들 몇 가지는 포의 안정성과 pH의 조절, 부식 방지를 돕는다. 표 3은 문헌에 나온 수성막포 포소화약제 용액의 예를 보여주고 있다.

원료	중량비율(%)	기능
물	78-81	용액
디에틸렌글리콜 일부틸 에테르	10	용액, 포 안정제
알킬 황산염 계면활성제 - 옥틸 황산염 나트륨 - 데실 황산염 나트륨 - 데실 에톡실 황산염 나트륨	1-5	포 생성
불소 계면활성제	0.9-3	포 생성, 막 형성, 표면 장력 조절
트리에탄올아민	0.1-1.0	포 안정, pH
요소	3-7	포 안정

표3. 전형적인 PFOS 기반의 6% 수성막포 농축용액

알킬 황산염 계면활성제는 탄화수소 계면활성제로 불리기도 하는데, 수성막포의 형성에 주요한 역할을 하고 안정된 포를 만드는 데에 도움을 준다. 또한 디에틸렌글리콜 1-부틸 에테르와 그 요소는 포의 수명[배수시간(drainage time)으로 측정될 수 있음]을 연장시켜준다. 불소 첨가 계면활성제는 포 수용액의 표면장력을 상당히 감소시킨다. 다른 계면활성제들은 수성막포 제품들을 제조하는데 쓰이게 되는데, 알킬 아미도 베타인, 알킬 클루코시드, 알킬 코코 아미도글리씨네이트, 알킬 베타 아미노 디프로피온산, 에톡실 t-옥틸페놀, 기타의 제품들이다. 화합물에는 또한 크산타 검(xanthan gum)같은 다당류도 포함된다.

불소 계면활성제가 기본인 포들의 화재 진압능력을 결정하는 핵심적인 특성은 확산 계수이다. 확산 계수는 대기와의 경계면에서의 포 수용액 표면장력(σ_a)과, 포 수용액과 가연물 사이 경계면 장력(σ_i), 가연물의 표면장력(σ_f)으로 계산된다. 확산 계수는 식 1로 표현된다.

$$S_{a/f} = \sigma_f - (\sigma_a + \sigma_i) \quad (\text{식 1})$$

탄화수소 계면활성제가 자체로는 확산계수가 양수일 수 없는데, 불소 계면활성제는 확산 계수를 양수로 만들기 위해 필요한 낮은 표면장력을 만들 수 있다. 수성막포, 불화단백 수성막포, AFFF-ARF, FFFP-ARF 포소화약제들은 모두 불소 계면활성제와 탄화수소 계면활성제의 혼합물을 포함하고 있고, 또한 단백질 계열의 포들은 가수 분해된 단백질을 담고 있다. 실험에 의하면, 중성의 물은 표면장력이 $70mN/m^2$ 인 것과 달리, 6%의 수성막포 농축 용액이 대기와의 경계면에서 $16\sim 18mN/m^2$ 의 표면장력을 얻을 수 있다고 한다. 또한 탄화수소 계면활성제 혼합물은 대기 경계면에서 $24\sim 35 mN/m^2$ 의 표면장력을 얻을 수 있다.

수성포로 진화하는 탄화수소 가연물 화재의 경우 형성되는 대기-물-탄화수소의 3층 체계에서, 불소 첨가 계면활성제는 포 수용액-대기 경계면에 스스로 자리를 잡는다. 그림 1에서 보면, 수성포와 대기에 튀어 나와 있는 과불화탄소 띠의 머리 부분에 있다. 화학물질의 띠는 동시에 방수가 되고(소수성) 지방에도 끌리지 않는다(소유성). 다른 일반 계면활성제들은 이런 특징을 나타내지 않는다. 이는 탄화수소 액체물의 표면에 얇은 수성포 용액의 박막의 형성과 분포를 이끌게 된다. 이런 막들은 물질 전달에 장애물을 만들어서 가연물의 증기화를 제한하고 불꽃으로부터 가연물로 흐르는 열을 감소시킨다.

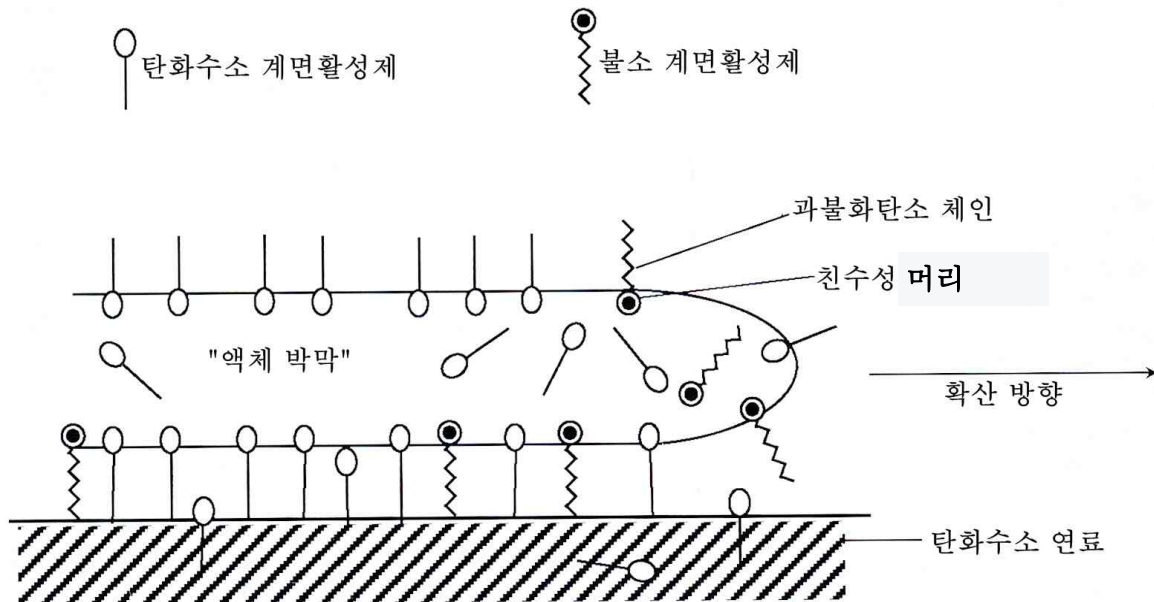


그림1. 박막이 탄화수소 표면으로 퍼지는 모습의 개념도.

계면활성제 분자는 박막 두께에 비해 매우 작지만 그림에는 과장되어 있다. 탄화수소 계면활성제는 매우 높은 농도를 갖고 일부는 탄화수소에 스며들기도 한다. 불소 계면활성제는 농도가 낮고, 탄화수소 가연물로의 침투를 방해한다.

불소 계면활성제는 독특한 구조를 보여주는데, 과불화 부분과 탄화수소 부분의 혼합과 관련된다. 결과는 물에 녹는 속성(친수성)을 가진 계면 활성적 물질과 물에 잘 녹지 않는 속성(소수성)을 가진 과불화 물질로 나타난다. 물에 반발하는 것 외에도, 과불화 계면활성제의 소수성 부분은 탄화수소 액체와 기름에도 반발한다. 다시 말해, 소수성도 지니고 있다는 말이다. 그 결과, 과불화성 물질은 공기 중에서 대기-물-기름의 3층으로 자리 잡는다.

불소 계면활성제를 사용한 가연성 액체 화재(클래스B) 소화의 발전으로 인해, 단백질 기반의 포에서도 변화가 일어나 불화단백포(FPF)를 도입한다. 새로운 포들은 1970년대를 거쳐 발전되었는데, AFFF-알코올포(AFFF-ARF), 불화단백막포(FFFP), 그리고 흔히 복합 당분의 고분자들을 함유한 알코올 저항 버전의 포(FFFP-AR)등이 있다. 그 결과, 모든 클래스B의 포들은 모두 불소 계면활성제를 포함하게 되었다. 표 1에서 현대 클래스B포의 기술과 그들의 기본 화학 성질을 요약해 놓았다. 과불화 계면활성제, 또는 계면 활성적 물질은 전통적인 불소 계면활성제($C_nF_{n+1}-R$)와 불소 고분자들(2001년에서 2009년 사이 문헌에 나타난 불소 고분자 계면 활성 분자들), 그리고 클래스B포가 포함된 현재 거의 모든 현대의 불소 화학물질에서 발견된 과불화 고분자들을 포함한다. 또한 특정 불소 고분자들은 낮은 점도의 화합물에서 복합 당분의 고분자들을 대신하기도 한다. 이러한 화합물들의 대부분은 용해와 진행을 돕기 위한 글리콜 기반의 용액을 포함한다.

불소 계면활성제를 제조하는 화학회사들은 과불화 텔로머 그룹을 기초로 사용한다. 현재, 클래스B 포소화약제에 쓰이는 가장 일반적인 불소 계면활성제는 다음의 식, $C_3F_{13}CH_2CH_2SO_3^-NH_4^+$ 의 텔로머 과정에서 나온 것이다. 모든 포소화약제 업체들은 불소 화학물질들을 공급하는 일련의 특정 화학 기업들에 의존해 왔다. 좀 더 최근에는 물에 잘 녹거나 잘 분산시키는 불소 고분자들이 포를 담고 있는 최신의 불소 화학물질에 첨가되고 있다. 최근에 개발된 불소 고분자들은 고도로 계면 활성적 성능을 가진 계면활성제로, 6:2 FTS기반의 계면활성제와 작용할 수 있다. 이 분자들은 폴리과불화로 표현될 수 있으며, 여전히 과불화 - C_6F_{13} 물질 그룹을 함유하고 있다.

불소 계면활성제와 화학적 불활성 및 열 저항성 같은 독특한 표면 화학성질을 가진 고분자들을 갖춘 것이 바로 계면활성제 분자의 과불화 부분이다. 분자의 과불화 부분의 열 저항성은 화재와 같은 강력한 환경에서 요구되는 특징으로 여겨

진다. 유기물인 부분은 비활동적이고 자연 분해가 되지 않는 사슬의 과불화 부분을 남겨두고 아주 급속도로 자연 분해되는 것으로 보인다. 그런 과불화 부분은 자연에서 저절로 발생되지 않는다. 그것들은 더 이상 광분해, 가수분해, 생물학적인 부패가 되지 않고 생태계에 잠재적으로 축적되어 남을 가능성이 높다.

불소 계면활성제는 물의 표면 장력을 $70mN/m^2$ 에서 약 $16mN/m^2$ 까지 낮출 수 있다. 이 특징은 대부분의 탄화수소 용액의 맨 위에 얇은 수성포를 만들어 준다. 이 얇은 막은 포를 확산시키고 탄화수소의 기화를 억제한다. 이러한 계면활성제 분자들의 과불화 속성은 화학적으로 불활성인데, 이는 화재 전단에서 막의 열 저항성을 강화시키고 포의 용해성을 줄여준다. 과불화 사슬의 불활성 특징은 환경에 노출되면 계면활성제 분자들이 완전히 저하되는 것을 방지한다. 연구에서 카르복실기를 포함한 유기질의 불소의 여러 종류가 존재한다는 것을 밝혀냈는데, 후에 PFOA로 밝혀졌다.

클라인은 $C_8F_{17}SO_3K$ 같은 단순한 PFOS 분자와 6:2 불소 텔로머 ($C_6F_{13}CH_2CH_2SO_3^-NH_4^+$) 사이의 구조적 차이점들이 중요하지 않다고 주장해왔다. 그것들은 유사한 길이를 가지며, 분자들이 지름에 있어서 동일하다. 그러므로 분자의 기하학 구조에 따른 열쇠-자물쇠 기작(key-lock mechanisms)이 작동하는 생물학적 시스템에서, 앞서 언급된 구조들은 활동적인 분야에서 유사하게 받아들여 질 수 있다. 그림 2는 단순한 PFOS와 6:2 불소텔로머의 구조를 나타낸다.

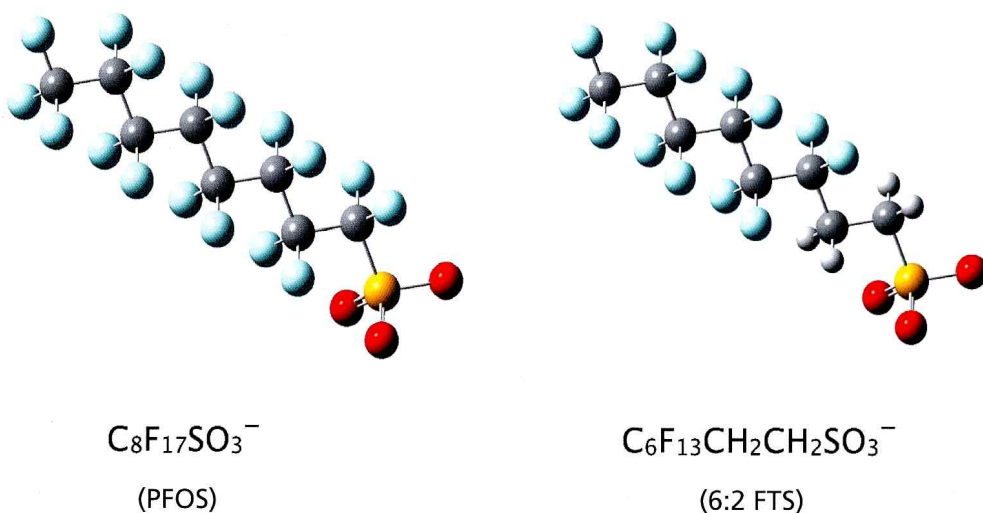


그림2. 두 가지 불소 계면활성제의 구조: PFOS($C_8F_{17}SO_3^-$), 6:2 불소 텔로머($C_6F_{13}CH_2CH_2SO_3^-$), 직접적인 비교를 위해 동일한 방향으로 위치시켰다.

이 글을 쓰는 지금도 어느 불소 화학물질 제조업자는 미국 환경보호국 2010/2015 PFOA 관리 프로그램에 맞추기 위해 포소화약제에 쓰인 성분 일부를 제거하고 있을 것이다. 규제 변화와 제조업자들의 새로운 발견을 파악하기 위해서 항상 주의를 기울여야 한다. 또한, 순수 6대2 FTS로의 변화는 성능 문제로 인해 복잡해졌다. 순수 6:2 FTS 불소텔로머의 재발화(burn back) 저항성이 6:2 FTS의 이전 형태보다 좋지 않은 것이 문제이다.

포소화약제 제조업자들이 맞게 된 최대의 문제는 불소 화학물질을 사용하지 않고 적절한 소화성능을 발휘하는 포 수용액을 설계하는 일이다. Dlugogorski et al. [2002]은 수성막포, FFFP 그리고 불화단백포와 동등한 소화성능을 발휘하는 탄화수소 계면활성제만을 함유한 포소화약제의 특징을 밝혀내고자 했다.

Dlugogorski et al. [2002]은 이런 특징들과 표면 장력, 표면 점성도, 포의 배수, 포의 굽기, 포의 덩어리 점성도, 포의 항복 응력 등의 계면활성제들과 포들의 기본적인 습성을 연결시켰다. 그들은 계면활성제들의 표면 특징들을 조정하고 복잡하게 분산된 거품 크기로 특징지어진 포를 만들어냄으로서 비불소 화학물질 화재 진압 기술을 개발하는 것이 가능하다고 주장했다. 다양한 크기의 거품들로 구성된 포들은 더 낮은 항복 응력과 더 낮은 덩어리 점성도를 지닐 것이고 단일 크기의 거품들로 구성된 포들보다 액체 가연물의 표면 위를 흐르는 것이 더 빠를 것이다.

성공적으로 막 형성 화합물을 없애고 적절한 성과를 얻으려면, 거품벽들의 막으로 수성막처럼 작용하도록 할 필요가 있다. 거품벽은 그 자체로 하나의 얇은 수성막이다. 그러므로 포 막이 충분한 속도로 움직여 준다면, 많은 거품 막들이 AFFF의 수성포와 다르지 않게 작용할 것이다. 복잡 분산된 거품 크기들을 구성하는 포는 AFFF보다 배수 시간이 상당히 길고 흐름이 빠르며 낮은 항복 응력의 포 구조를 만드는 원리에 따라 작용하게 된다.

고성능의 무불소 포들은 AFFF보다 상당히 긴 배수 시간이 걸리고 낮은 항복 응력의, 흐름이 있는 포 구조를 만드는 원리에 따라 작용한다. 발생된 포는 자유롭게 빠르게 움직이고, 열 저항성이 우수하여 빠른 소화작용이 가능하다. 만약 포 구조가 무너진다면, 구멍과 구조적인 피해를 메우고 자체 치유하기 위해서 비워진 포 구조를 메우러 거품들이 거꾸로 흐르게 된다. 포는 소화 테스트 동안 개방된 불이 붙은 상태인 가연물 표면을 향해 잘 움직이는지 관찰되는데, 이는 화재 면적

을 줄이거나 때때로 완전히 소화시키기도 한다. 이런 종류의 물질의 작용은 거품들의 기능 막의 존재 여부에 달려있다. 표 5는 Det Norske Veritas에 의해 입증된 FFreeF포의 테스트 결과를 나타내고, 다른 불소화합물 기술이 담긴 세 가지의 AFFF 제품들의 테스트 결과를 포함하고 있다.

	ICAO 레벨B 사양	FFeeF #1 (고성능)	AFFF #1	AFFF #2 (mil spec) ¹⁾	AFFF # (mil spec)
불소화학적 기술		없음	있음	있음	있음
용액 강도	3또는 6%				
90% 제어	-				
소화	<60초	46초	50초	46초	44초
재발화 (burn back) 시간	>5분	>8분 *	7.1분	>8분*	>8분*

표5. ICAO 레벨B 화재 테스트의 결과 (4.5m² pan)
(* : 테스트 중 8분 이후에는 어떠한 재점화나 포의 재발화는 없었음)

실험 결과는 테스트된 4개의 포가 불소 화합물질을 함유하고 있는지, 또는 고성능의 불소가 없는 제품인 FFreeF #1이든지간에 유사한 성과를 보여준다고 나타내고 있다.

결론

포소화약제는 클래스A와 클래스B의 위험을 다루기 위해 다양한 화학성질을 갖는다. 오늘날의 주된 클래스B 포들은 부패하지 않는 불소 화합물들을 함유하고 있다. 불소함유 제품들의 환경오염 특성 때문에, 포소화약제 같은 불소 화합물을 분사하는 행위에 대하여 환경단체들에게 엄격한 감시가 계속되고 있다. 이것은 더 나아가 불소 화합물을 함유하고 있는 포소화약제의 사용에 규제들과 제한을 야기할 것이다.

불소가 없는 포(FFreeF) 기술은 고성능 제품들의 도입으로 급속도로 발전해왔고 현재 전통적인 불소 화합물 기술에 도전장을 내고 있다. 이 글과 연계된 연구는 수성막포의 성능과 고성능의 FFreeF 기술과의 공통부분을 보여준다. 불소 화합물을 뺀 새로운 클래스B포 기술의 필수적인 특징들은 낮은 배수, 높은 열 저항성,

1) 미국 국방부 기준

느린 세기 변화, 낮은 전단 점도성, 낮은 항복 응력 등이 있다. 이러한 필수 특징들을 가진 포들은 신뢰할 수 있는 환경적인 모습을 보여주는 새로운 포소화약제 기술을 표적하고 있다. 그러나 모든 FFreeF포 제품들이 높은 수준의 소화성능을 발휘하는 것은 아니다. 이 기술은 전통적 수성막포와 불화단백 수성막포 제품들의 성능에 맞는 ICAO 레벨B 화재 수행 기준에 합격하였다. 이 새로운 기술은 소화성능의 수준을 충족시키는 첫 번째 무불소 포소화약제가 되었고, 미래의 이정표가 되어 줄 것이다.

출처 : ASIA PACIFIC FIRE DECEMBER 2010

번역 : 인천지부 사원 천기홍