

선박화재 적용 단백질 소화약제의 안정제에 따른 소화특성

이응우 · 신창섭*

현대중공업(주) · *충북대학교 안전공학과

(2015. 5. 24. 접수 / 2015. 8. 3. 수정 / 2015. 8. 18. 채택)

Characteristics of Protein Foam Agent by Stabilizer on the Ship Fire Extinguishment

Eungwoo Lee · Changsub Shin**

Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

*Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received May 24, 2015 / Revised August 3, 2015 / Accepted August 18, 2015)

Abstract : Onboard fire extinguishing system is important to protect cargo and human lives and every oil tanker has foam type fire extinguishing system. Because of environmental problem, agent which contains materials such as Perfluorinated compounds are regulated and the development of the environmental friendly agent is required. The protein foam has less environmental pollution problem and has an excellent fire extinguish performance to oil fire. In the research, bivalency metal salts were added as stabilizer to increase fire resistance and stability of the foam. Ferrous sulfate, Iron chloride and Nickel chloride were used and to adjust to vessel, sea water was applied. As a stabilizer increased, the expansion ratio was raised. However 25% drainage time was decreased over 2.0 wt.% which is knowable that the foam brokes easily. The amount of generated foam was measured to check fluidity of foam and it appeared that when FeSO_4 1.2 wt.% was added, the amount of generated foam reached large and also the 25% drainage time was high. To evaluate the fire extinguishing performance for oil fire, the small scale oil fire test was executed. When FeSO_4 1.2 wt.% was added, fire extinguishing time was in its shortest which informs fluidity of foam and stability are important factors on fire extinguishing efficiency.

Key Words : protein foam, foam stabilizer, ship fire

1. 서론

선박화재는 육상의 화재와 달리 항해 중에 외부로부터 소방 활동 지원을 기대하기 어려우므로 자력으로 처리하지 않으면 안된다. 선박용 화재진압시스템은 선적 화물 및 인명의 보호에 있어서 없어서는 안 될 중요한 설비이며, 해상인명안전협약(SOLAS), FSS 및 IMO 등과 같은 국제 규정으로 엄격하게 관리되고 있다. 이 중 IMO MSC/Circ. 1312¹⁾에서는 유조선 및 화학제품 운반선 등의 카고 탱크에 대한 고정 포 소화시스템에 대하여 규정하고 있다.

포 소화약제는 포가 화재에 발포되어 사용되면 유류 표면에 거품이 전개되면서 공기 중 산소의 공급을 차단하는 질식소화작용이 주도적으로 발휘되며 포 수용액 내의 물에 의해 주위의 열을 흡수하는 냉각소화작

용이 발생되어 유류화재에 대해 효과적인 소화능력을 발휘 한다. 그러나 최근 들어 포 소화약제의 환경 문제가 이슈로 떠오르고 있는데 그 주된 내용은 지난 2007년의 스톡홀름 협약에서 확인할 수 있다. 스톡홀름 협약에서는 수성막포, 불화단백포, 내알코올포 등의 불소계 계면활성제를 사용하는 포 소화약제에 함유된 과불화옥탄술폰산(PFOS, Perfluoro-octanoic Sulfonate)을 포함한 9가지 물질을 규제 대상으로 추가하였으며 선진국에서는 2000년대 중반부터 이미 점진적으로 친환경 포 소화약제로의 교체가 시작되었다.²⁻³⁾ 유럽연합(EU)에서는 관련 지침을 통해 유기 환경오염물질이 함유된 포 소화약제에 대한 간접적인 규제를 시작하였으며 2011년 6월부터는 PFOS가 포함된 포 소화약제를 전면적으로 규제하고 있다.

포 소화약제는 화재발생시 대량으로 발포되어 자연

* Corresponding Author : Changsub Shin, Tel: +82-43-261-2461, E-mail: csshin@chungbuk.ac.kr

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea

생태계로 방류되는 것이 불가피하므로 유독성을 지닌 경우 환경에 치명적인 피해를 끼칠 수 있다. 과불화옥탄술폰산의 독성은 출생 직후 사망하는 생식독성과 발암유발, 호르몬계 및 면역체계교란, 기형아 출산 등의 유해성을 지닌 것으로 알려지고 있으며, 지속성에 있어서도 가수분해나 광분해, 생분해가 일어나지 않기 때문에 고온에서 소각할 경우에만 분해가 가능하며 노출되면 혈액과 간의 단백질과 결합해 높은 농도로 축적되는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 유독성을 지닌 유기 오염물질이 포함된 포 소화약제가 환경에 더욱 치명적인 피해를 끼칠 수 있게 되기 때문에 환경 친화적이고 소화능이 높은 소화약제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁴⁾

포 소화약제 중 단백질포 소화약제는 동물성 단백질을 가수분해하여 제조한 것을 주원료로 사용하는 소화약제를 말하며, 환경오염 문제가 적으며 고온에서 연소하는 유류화재에 탁월한 내유성(耐油性), 내화성(耐火性)을 가지고 있다. 또한 구매가격이 저렴하고 유면봉쇄성이 좋아 재연 방지효과가 우수한 장점을 가지고 있으나 특이한 냄새가 있으며 유동성(流動性)이 나쁘고 저장기간이 다른 포소화약제에 비하여 짧은 단점이 있다.⁵⁻⁸⁾

포의 내화성을 증가시키기 위해 2가 금속염의 안정제를 첨가할 수 있다. 금속염의 첨가로 내화성과 내열성을 증가시킬 수 있어 단백질포의 소화성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 많은 양의 안정제를 첨가할 경우 포의 유동성을 감소시키고 포 액의 침전물을 증가시킬 수 있다. 포의 유동성이 나빠지면 유류화재에서 유류표면에 포가 전개되는 시간이 길어지기 때문에 소화가 신속하게 진행되지 못한다. 반대로 안정제를 적게 첨가하면 포의 유동성과 포 원액의 저장성은 향상될 수 있으나 포의 내화성이 감소하기 때문에 적당량의 안정제를 첨가하는 것이 좋다.⁹⁻¹¹⁾

본 논문에서는 과불화옥탄술폰산을 포함하지 않은 환경친화적인 단백질포 소화약제를 개발하기 위하여 소화약제에 첨가되는 안정제의 종류와 농도에 따른 소화특성을 분석하였다. 이를 위하여 단백질포 소화약제 시료의 25% 환원시간, 발포배율, 총 방출량을 측정하여 포의 유동성을 평가하였으며, 소규모 유류화재의 소화특성을 평가하였다.

2. 실험

2.1 실험시료

단백포 소화약제에 첨가되는 안정제는 2가의 금속

염으로 철(Fe), 아연(Zn), 마그네슘(Mg), 니켈(Ni) 등이 사용될 수 있다. 철염 중에서 황산제1철(FeSO₄)과 염화철(FeCl₂)을 사용하였다. 그리고 2가의 다른 금속 중 아연은 교반시 침전이 발생하고 마그네슘은 포의 내화성이 니켈보다 낮다고 알려져 염화니켈(NiCl₂)을 안정제로 택하였다. 그리고 국내외에서 사용되고 있는 단백질포 소화약제 조성을 파악하고 문헌조사를 통하여 안정제 이외의 첨가제인 발포제, 유동제, 부동제의 조성비를 고정하였다. 발포제 역할을 하는 가수분해단백질은 85 wt.%로, 유동제 역할을 하는 Urea는 2 wt.%로, 부동제 역할을 하는 Ethylene glycol은 5 wt.%로 고정하고, 안정제는 0.4 wt.%에서 2.8 wt.%로 변화를 주며 용해제의 조성비를 달리하였다. 실험에 사용된 단백질포 소화약제의 조성비에 따른 배율을 Table 1에 나타내었다.

포 원액의 물성을 측정하였으며 Table 2에 나타내었으며 포 소화약제 제조 시 시료는 가열식 교반기(MS300)를 이용하여 1시간 동안 교반하였다.

본 실험은 선박화재를 대상으로 실시한 것으로 실험은 해수로 진행하였는데 해수를 사용하는 경우의 성능은 담수 때보다 좋은 것으로 알려져 있다. 이는 해수에 포함된 칼슘, 마그네슘 등의 금속염이 안정제와 같은 역할을 하는 것으로, 화재 시 금속이온이 산화에 의해 3가로 되면서 고체화된 막이 형성되어 유면 위를 봉쇄하여 재발화를 방지하는데 도움을 주기 때문이다. IMO MSC/Circ. 1312에 따라 해수(海水)를 제조하였고 여기에 교반한 포 원액 3%를 첨가하여 포수용액으로 제조하였다.

Table 1. Characteristics of extinguishing agent

Component	Type	Ferrous salt		Metallic salt	Function
		Ferrous Sulfate heptahydrate (FeSO ₄ · 7H ₂ O)	Iron(II) chloride tetrahydrate (FeCl ₂ · 4H ₂ O)	Nickel(II) chloride hexahydrate (NiCl ₂ · 6H ₂ O)	
Hydrolyzed Protein		85 wt. %	85 wt. %	85 wt. %	Forming agent
Stabilizer		0.4 wt. %	0.4 wt. %	0.4 wt. %	Stabilizer
		1.2 wt. %	1.2 wt. %	1.2 wt. %	
		2.0 wt. %	2.0 wt. %	2.0 wt. %	
		2.8 wt. %	2.8 wt. %	2.8 wt. %	
Urea		2 wt. %	2 wt. %	2 wt. %	Viscosity
Ethylene Glycol		5 wt. %	5 wt. %	5 wt. %	Antifreezing
Water		balance	balance	balance	Solvent

Table 2. Physical properties of extinguishing agent

Density	Viscosity	Surface tension (The Plate Method)
1.146 g/mL	17.1 CP	30.36 mN/m

Table 3. Composition of simulated sea water

Composition	wt.%
Sodium chloride (NaCl)	2.5
Magnesium chloride (MgCl ₂ · 6H ₂ O)	1.1
Calcium chloride (CaCl ₂ · 2H ₂ O)	0.16
Sodium sulphate (Na ₂ SO ₄)	0.4
Potable water (H ₂ O)	95.84
TOTAL	100

주위 온도, 포 원액, 포 수용액 온도는 25 ~ 27°C였으며 인공해수의 온도는 22 ~ 26°C였다. 해수의 조성비는 Table 3에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 방법

단백포 소화약제의 조성에 따른 25% 환원시험은 발포된 거품이 본래의 포 수용액의 25%로 환원되는데 걸리는 시간을 측정한다. 포의 거품이 원래의 포 수용액으로 환원하는 데에 걸리는 시간을 측정하는 것으로 이를 통하여 포의 안정성을 확인할 수 있다. 포 수집용기를 Fig. 1에 나타내었다.

방출된 포 하부에 수직방향으로 밸브가 부착된 용기를 위치시킨 후 포를 수집하여 용기에 가득 채운다. 수집된 거품의 면을 고르고 포 수집 용기의 외면에 부착된 거품을 천으로 닦은 후 포 방출 전·후의 무게 차이를 측정하고 밸브를 개방하여 25%에 해당하는 무게가 환원될 때까지의 시간을 측정한다. 실험은 7회 측정하여 산술 평균값으로 구하였으며, 다음 식을 이용하여 포의 발포배율을 계산하였다.

$$E = \frac{V}{W_2 - W_1}$$

E : 발포배율

V : 포 수집용기의 내용적(mL)

W₁ : 포 수집용기의 중량(g)

W₂ : 포 수집용기에 거품이 충만했을 때의 총중량(g)

포 방출량 측정실험은 단위 시간당 방출된 포의 양을 측정하는 실험으로써 방출된 포 하부에 수직방향으로 비커를 위치시킨 후 포 소화약제를 수집하여 약제가 모두 방출될 때까지의 양과 시간을 측정하였다.

단백포 소화약제에 의한 유류화재의 소화특성을 실험하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 이용하여 소규모의 화재 실험을 실시하였다. 실험장치는 공기 공급부, 약제 공급부, 연소실, 데이터 수집장치로 나뉜다.

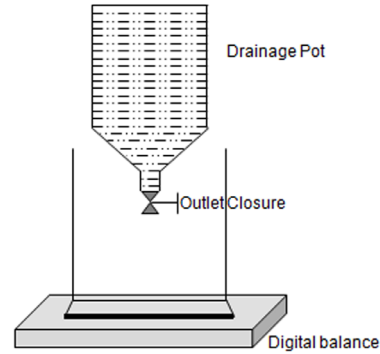


Fig. 1. Schematic diagram of collecting vessel.

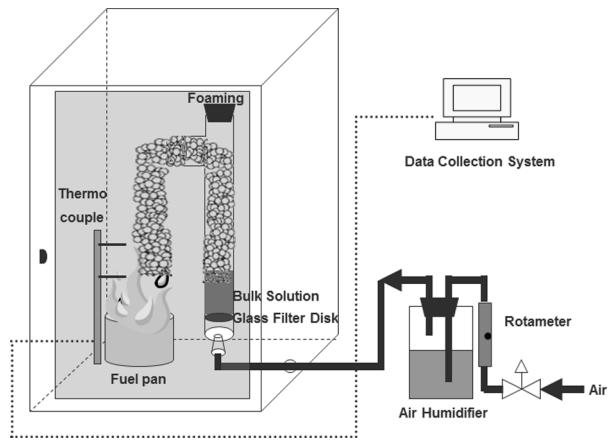


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for extinguishing performance.

공기 공급부는 콤프레샤, 유량 조절기로 구성되어 있으며 약제 공급부는 3%형 단백질 수용액이 들어 있는 파이렉스와 유리여과기 등으로 구성된다. 실험에서는 3%형 포 수용액 50g을 사용하였으며 공기의 유량은 0.5 L/min으로 공급하였다.

소화실험을 위한 연료는 n-heptane을 사용하였다. 연료팬의 크기는 56.7cm²이며, 이 연료팬을 포 방출구 하부에 위치하였다. 화염의 온도 측정을 위해 연료팬 상부에 열전대를 설치하였다. 본 연구에서의 화염온도는 A/D 컨버터를 통해서 컴퓨터에 1초마다 저장되었다. 연소실험은 연료 50mL를 점화 후 60초 동안 자유연소 시간을 두어 화염이 최성기에 도달했을 때 포를 방출하기 시작하였으며, 포의 방출 후 화염이 완전히 소화되기까지의 소화시간을 측정하였다. 연소실의 전면은 소화현상을 관찰할 수 있도록 강화유리로 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 안정제에 따른 25% 환원시간

안정제의 종류 및 농도를 달리하여 안정제에 따른

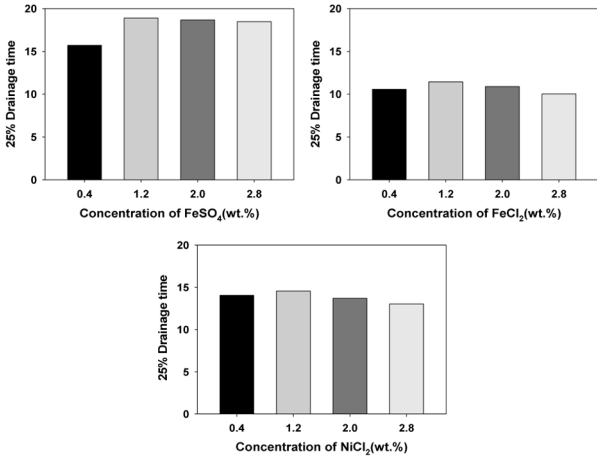


Fig. 3. 25% drainage time by the stabilizer concentration.

25% 환원시간을 측정하였다. 25% 환원시간은 포의 안정성의 척도가 되는 것으로 안정제에 따른 25% 환원시간을 Fig. 3에 나타냈다. 25% 환원시간은 안정제의 농도가 증가함에 따라 환원시간도 길어지다가 어느 농도 이상에서는 다시 환원시간이 짧아지는 경향을 보였다. 이는 안정제가 첨가됨에 따라 안정되고 균일한 기포가 생성되어 기포가 잘 깨지지 않아 환원시간이 길어지지만, 많은 양의 안정제를 첨가하게 되면 포 액의 침전물을 증가시켜 25% 환원시간이 다시 감소하는 것을 알 수 있다.

첨가된 안정제 중에서는 황산제1철이 1.2 wt.% 첨가되었을 때 25% 환원시간이 18.9초로 가장 길었다. 그리고 염화철과 염화니켈도 1.2wt.% 첨가되었을 때 25% 환원시간이 각각 11.4초와 14.6초로 나타났으나 황산제1철 보다는 25% 환원시간이 훨씬 짧았다.

3.2 안정제에 따른 발포배율

안정제의 종류 및 농도를 달리하여 안정제에 따른 발포배율을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 첨가된 안정제의 종류별로 11~16배 범위에서 발포되었다. 안정제의 첨가량이 많아질수록 발포배율이 증가하다가 첨가제의 농도 2.0 wt.% 이상에서는 발포배율이 변하지 않거나 감소하는 것으로 나타났다.

25% 환원시간이 가장 좋았던 황산제1철의 발포배율과 환원시간 비교 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 안정제의 농도가 증가함에 따라 발포배율도 증가하였으며 발포배율이 크게 증가하는 농도구간에서는 25% 환원시간은 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 일정농도 이상에서는 발포배율이 커질수록 포가 약해져 쉽게 깨져서 원래의 포 수용액으로 되돌아가는 시간이 짧아짐을 확인할 수 있다.

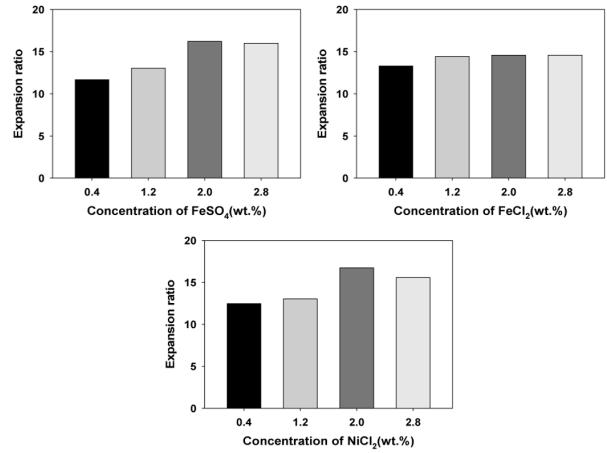


Fig. 4. Expansion ratio by the stabilizer concentration.

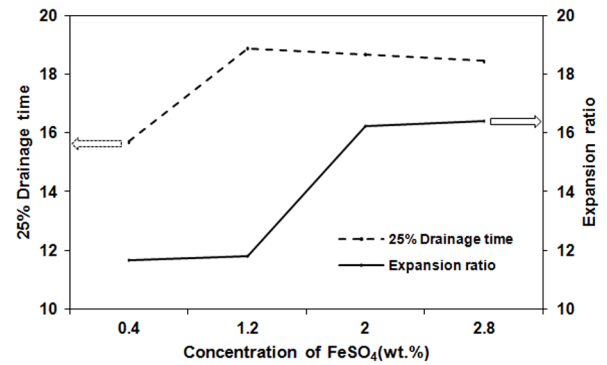


Fig. 5. Expansion ratio and 25% drainage time by the stabilizer concentration.

3.3 안정제에 따른 방출량

포의 유동성은 방출량을 측정하여 확인할 수 있다. 안정제의 종류 및 농도를 달리하여 안정제에 따른 방출량을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 실험결과 안정

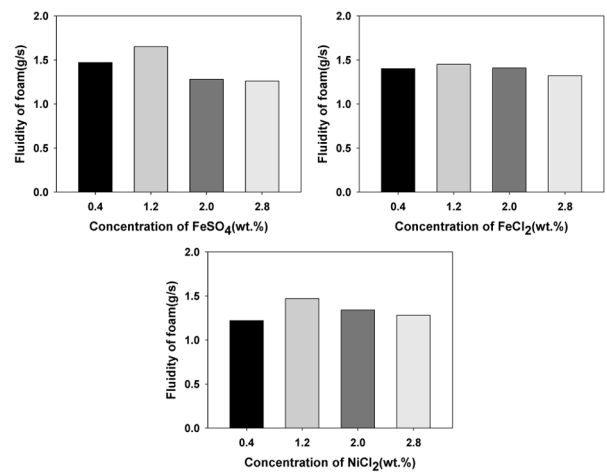


Fig. 6. Generated amount of foam by the stabilizer concentration.

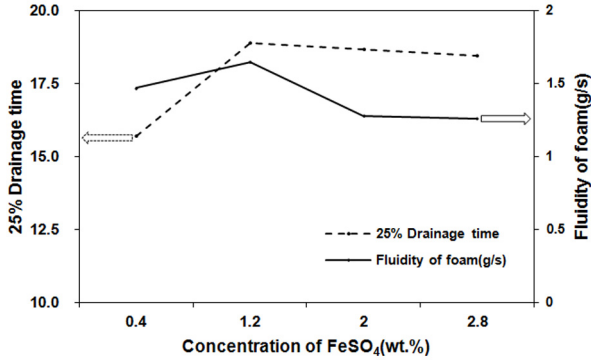


Fig. 7. Fluidity and 25% drainage time by the stabilizer concentration.

제의 첨가량이 많아질수록 발포배율이 증가하다가 첨가제 농도 2.0 wt.% 이상에서는 안정제의 종류에 따라 발포배율을 같게 유지하거나 감소하는 경향을 나타내었다.

황산제1철이 1.2 wt.% 첨가되었을 때 단위 시간당 방출량이 1.65 g/s로 가장 좋은 특성을 보였으며, 더 높은 농도에서는 유동성이 떨어졌다. 첨가된 세 종류의 안정제 모두에서 농도가 1.2 wt.% 첨가되었을 때 포의 유동성이 가장 좋음을 확인할 수 있고 그 이상에서는 유동성이 나빠졌다. 포의 유동성이 좋다는 것은 화재 표면을 빠르게 포로 덮어 버리기 때문에 소화 효율의 향상과 관계가 있다. 황산제1철의 25% 환원시간에 따른 방출량 비교 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 25% 환원시간과 방출량은 같은 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다.

3.4 안정제에 따른 소규모 유류화재 소화특성

안정제를 첨가한 단백질의 소화성능을 확인하기 위하여 소규모 유류화재 소화실험을 실시하였다. Fig. 8은 포의 물성측정에서 가장 좋은 성능을 보였던 황산제1철을 첨가한 약제로 소화실험을 실시한 결과로 황산제1철을 1.2 wt.% 첨가하였을 때 소화시간이 13.2초로 가장 짧았다. 1.2 wt.%는 포의 물성실험에서도 25% 환원시간이 가장 길고 포의 방출량도 많았던 농도로 화재진압에 포의 안정성과 유동성이 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다. Fig. 9에는 소화실험시 시간에 따른 화염의 온도변화를 나타내었다. 금속염은 화재 시 열에 의해서 산화되어 3가로 변하면서 화재의 표면에서 서로 얽혀있는 분자와 작용하고, 이들 분자를 서로 연결하여 고정함으로써 유류표면에 접촉되고 고체화된 막을 형성하여 안정된 기포가 된다. 금속이온의 산화는 화재 시 열에 의해서 더욱 촉진 된다. 이미 만들어진

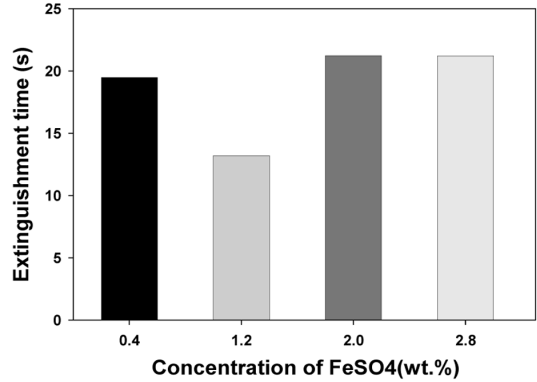


Fig. 8. Fire extinguishing time by concentration of FeSO₄.

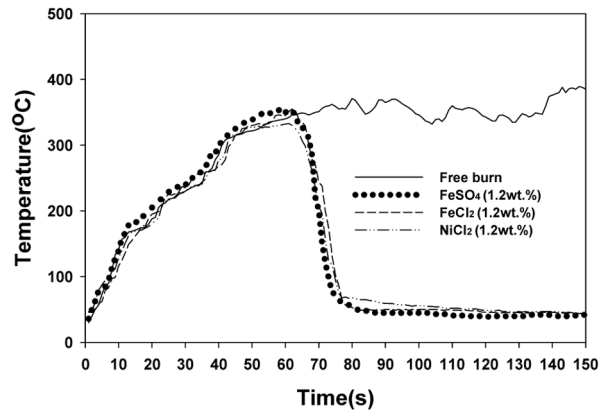


Fig. 9. Flame temperature variation over time(FeSO₄).

고체막이 열을 받으면 단백질이 열변성에 의해 경화되어 내화·내열성이 큰 포가 되는 것이다. 이는 단백질 소화약제가 다른 포 소화약제 보다 강한 내화성을 나타내는 것을 보여주며 불길을 받아도 포가 쉽게 소멸되지 않는 것은 고체막이 경화되어 늘어붙을 때 까지 그 모양을 바꾸지 않기 때문이다. 포로 유류화재를 소화하는 데는 일반적으로 포층을 유면의 한쪽으로부터 순차적으로 전개시켜 유면 전체를 덮어 버리기 때문에 전개되는 포층의 앞부분은 항상 화염에 노출된다. 따라서 유류화재에서의 소화는 포의 내화성이 중요한 요소가 된다.

안정제로 염화철과 염화니켈을 첨가하였을 때도 1.2 wt.% 농도에서 25% 환원시간과 포의 방출량이 가장 좋았으며, 소화실험에서도 소화시간이 가장 짧게 나타났다. 이 때 각각의 소화시간은 염화철의 경우 15.8초이고 염화니켈은 16.2초로 이들을 Fig. 10에 나타내었다. 25% 환원시간이 길어 포가 안정적이고 방출량이 많아 유동성이 좋았던 농도에서 소화시간도 짧음을 확인할 수 있었다. 그리고 본 실험결과를 현장에 적용하여 단백질 소화약제를 선박화재에 사용할 경우 소화약

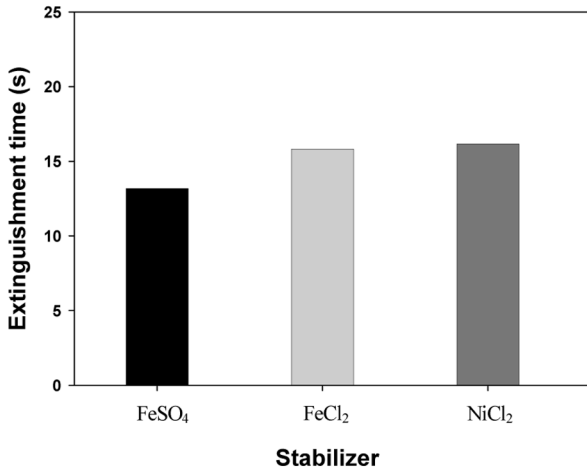


Fig. 10. Fire extinguishing time by stabilizer concentration at 1.2wt.%.

제의 안정제로 황산제1철을 1.2 wt.% 첨가할 경우 가장 빠른 소화시간을 얻을 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 단백포 소화약제에 첨가하는 안정제의 종류와 농도에 따른 포의 특성 및 소화특성을 분석하고자 하였으며, 이를 위하여 25% 환원시간, 발포배율, 방출량, 소화시간을 측정하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 소규모 유류화재 소화실험 결과 25%환원시간으로 평가되는 포의 안정성과 방출량으로 측정되는 포의 유동성이 좋은 안정제의 농도에서 좋은 소화특성을 나타내었다. 황산제1철 1.2 wt.% 를 안정제로 첨가한 경우 소화특성이 가장 좋았다.

2) 안정제로 황산제1철, 염화철, 염화니켈을 첨가하였을 때 농도 1.2 wt.%에서 25% 환원시간이 길게 나타났으며, 그 중 황산제1철이 18.9초로 다른 안정제에 비해 포의 안정성이 좋았다.

3) 안정제의 첨가량을 증가시킨 경우 25% 환원시간은 증가하였으나 2.0 wt.% 이상에서는 감소하는 것으로 나타나 일정농도 이상에서는 포의 안정성이 떨어져 쉽게 포가 물로 환원됨을 확인하였다.

4) 포의 유동성의 척도가 되는 방출량은 안정제 농도 1.2 wt.%에서 단위시간당 방출되는 포의 양이 가장 많았고 그 이상의 농도에서는 떨어져 유동성이 나빠졌다. 안정제 중 황산제1철을 첨가하였을 때 가장 많은 방출량을 보였다.

5) 포는 11~16배의 저팽창포로 발포되었으며, 안정제의 농도가 증가함에 따라 발포배율도 증가하였으나

발포배율이 크게 증가하는 농도에서 25% 환원시간은 감소하여 발포배율이 적정수준 이상 되면 포가 약해짐을 확인하였다.

감사의 글: 이 논문은 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- 1) IMO MSC/Circ. 1312, Revised Guidelines for the Performance and Testing Criteria, and Surveys of Foam Concentrates for Fixed Fire-Extinguishing System, 2009.
- 2) T. H. Schaefer, B. Z. Dlugogorski and E. M. Kennedy, "Sealability Properties of Fluorine-free Fire Fighting Foams", *Fire Technology*, Vol. 44, No. 3, pp. 297-309. 2006.
- 3) B. Williams, T. Murray, C. Butterworth, Z. Burger, R. Sheinson, J. Fleming, C. Whitehurst and J. Farley, "Extinguishment and Burnback Tests of Fluorinated and Fluorine-free Fire Fighting Foams with and without Film Formation", *Suppression, Detection and Signaling Research and Applications- A Technical Working Conference (SUPDET)*, Orlando, Florida, 2011.
- 4) H. Y. Kim, J. S. Nam and D. H. Lee, "Analysis of Performance and Development of Environment-friendly High Expansion Foam Concentrate", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 25, No. 4, pp. 25-29, 2010.
- 5) Technical Standards for Type Approval and Product Tests of Fire Extinguishing Agent, Ministry of Public Safety and Security Bulletin, No. 2015-68, 2015.
- 6) H. J. Jeong and C. S. Shin, "The Extinguishing Characteristics by Fluidity Variation of Protein Foam Extinguishing Agent", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 29, No. 2, pp. 18-23, 2014.
- 7) A.M. Tafreshi and M. D. Marzo, "Foams and Gels as Fire Protection Agents", *Fire Safety Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 295-305, 1999.
- 8) H. J. Kim, "Study on Storage Properties of the Protein Foam Agent", Korea Fire Institute, 1987.
- 9) B. Z. Dlugogorski, A. J. Laundress, M. S. Rayson and E. M. Kennedy, "Small Scale Test Protocol for Fire Fighting Foams DEF(AUST)5706: Effect of Bubble Size Distribution and Expansion Ratio", *Fire Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 149-162, 2011.
- 10) H. A. Alsaati, D. Dizler, V. Burapatana and R. D. Tanner, "using Egg Albumin Foam to Extinguishing Fires", *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Vol. 46, No.

- 4, pp. 735-740. 2003.
- 11) R. Ananth, E. A. Fallows, J. P. Farley and J. W. Fleming, "Suppression Mechanism of High Expansion Aqueous Foams: A Comparison between Numerical Simulations

and Cup Burner Experiments", Suppression, Detection and Signaling Research and Applications- A Technical Working Conference(SUPDET), Orlando, Florida, 2011.