

미분무수 소화설비 (Water mist fire extinguishing system) 의 선박용 기관실 적용에 관한 연구

김기욱 | 방재설비부 선임연구원

김영한 | 탱크테크(주)

1. 서 론
2. 시험조건 및 방법
3. 시험결과 및 고찰
4. 결론

1. 서 론

미분무수(water mist)라 함은 화재 발생시 고압으로 가압된 물이 노즐을 통하여 내뿜어져 분산됨으로써 수분 입자 중 99%가 1,000 μm 이하인 수막을 형성하면서 소화기능을 갖도록 하는 분무라고 KS V 4006¹⁾에서 정의하고 있다. 미분무수 소화설비의 소화원리는 미세한 물방울을 사용하는 소화설비로서 미분무수 노즐로부터 방사된 미분무수 입자의 증발잠열에 의한 냉각효과, 기화한 수증기의 생성과 체적팽창으로 인한 산소농도 감소 효과, 화염 주위의 미분무수 입자에 의하여 연소물질로부터 주변 가연물로의 복사열 차폐효과 그리고 이러한 소화효과가 복합적으로 작용함으로써 화재를 제어 또는 소화한다. 미분무수 소화설비는 방출방식에 따라 전역방출(total flooding)방식과 국소방출(local application)방식으로 분류되며 사용압력에 따라 고압(300 psi 이상), 중압(175psi 이상 300 psi 미만), 저압(175psi 미만)으로 분류된다. 선박에서의 화재안전에 관한 IMO 규약은 해상인명안전협약(SOLAS : Safety Of Life At Sea)으로 2000년에 개정된 해상인명안전협약에서는 2002년 7월 이후에 건조하는 여객선 및 화물선(기존 선박은 2005년 7월까지) 기관구역의 소화설비를 강화시켰다. 즉, SOLAS II-2 Reg. 10.5.6에 따라 기관실 국부화재 진압설비용로 고정식 미분무수 소화설비를 강제화하였고 SOLAS II-2 Reg. 10.5.1-3에 준하여 기관구역의 전역 소화설비로서 고정식 가스 화재진압설비, 고팽창 폼 화재진압설비, 미분무수 소화설비 중 한 가지 소화설비를 선택하여 전역방출방식의 고정식 소화설비 설치를 의무화하고 있다. 또한 오존층 파괴물질인 할로겐화물이 1987년의 몬트리올 의정서(Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer)에 의해 그 생산이 중지됨에 따라 액체 위험물의 B급 화재 및 전기·전자의

C급 화재에 널리 사용되어온 할로겐화물 소화설비의 대체설비로서 미분무수 소화설비의 기술개발이 선박 분야에서 가속화 되고 있다. 이러한 미분무수 소화설비는 해상인명안전협약(SOLAS) Regulation II-2/10(fire fighting)의 요건 하에 승인되고 있으며 미분무수 노즐자체의 성능시험과 시스템 전체의 화재 진압 성능시험을 통해 소화성능을 확인하고 있다.

본 연구에서는 전역방출방식 미분무 소화설비의 선박용 기관실 적용의 소화 유효성 입증을 위해 IMO MSC/Circ.668&728^{2),3)}에서 정하는 A급 화재(class A fire) 및 고입화재(pool fire), 분무화재(spray fire), 흐름화재(cascade fire)에 대한 B급 화재시험을 수행하였다.

2. 시험조건 및 방법

2.1 시험실

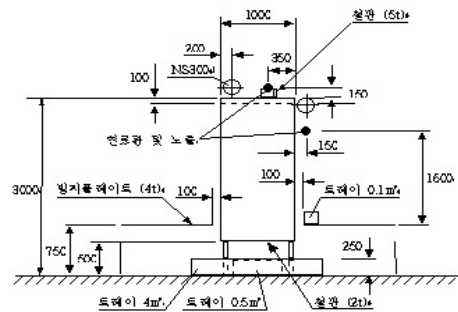
본 미분무수 소화설비의 화재시험을 수행하기 위한 시험실은 체적이 1,000m³[10m(L)×10m(W)×10m(H)]이며 화재시험 중 원활한 공기 공급을 위한 개구부(2m×2m)를 가지고 있다. 시험실 중앙의 미분무수 노즐 사이에 선박 기관실의 엔진을 가상의 모형엔진을 설치한다.

2.2 모형엔진(Engine mock-up)

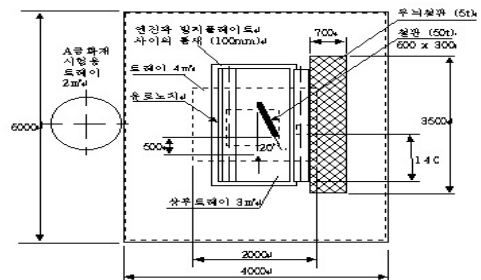
모형엔진은 두께 5mm의 철판으로 3m(L)×1m(W)×3m(H)의 크기로 제작한다. 엔진 상부는 배기관(exhaust manifold)을 모사하는 직경 0.3m, 길이 3m로 된 2개의 원통(steel tube)과 무늬철판 등으로 만들고, 엔진하부는 6m(L)×4m(W)×0.75m(H)의 빌지(bilge: 엔진실의 바닥플레이트와 엔진실 바닥 사이의 공간)가 엔진을 둘러싸게 한다. [그림 1]은 시험실 중앙의 미분무수 노즐 사이에 위치한 모형엔진이며 [그림 2]에서 [그림 5]까지는 모형엔진의 개략도이다.



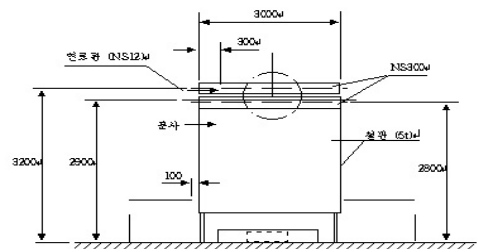
(그림 1) Photo of engine mock-up



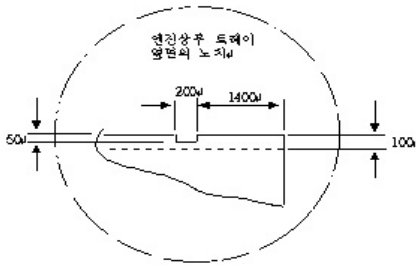
(그림 2) Front view of engine mock-up



(그림 3) Plan view of engine mock-up



(그림 4) Side view of engine mock-up



(그림 5) Notch on side of top tray

2.3 연소가연물

연소가연물은 아래와 같은 크기의 연료 트레이(tray)에 주입한 경유, 헵탄 및 윤활유와 그리고 헵탄 트레이 내부에 위치한 목재 크립(wood crib)으로 구성되며 각 화재 시나리오에 따라 모형엔진의 상부와 바닥 등에 위치한다.

- 모형엔진 상부 트레이(3m²) : 3m(L)×1m(W)×0.25m(H)
- 모형엔진 바닥 트레이(4m²) : 2m(L)×2m(W)×0.25m(H)
- 모형엔진 바닥 트레이(0.5m²) : 0.71m(L)×0.71m(W)×0.25m(H)
- 빌지 플레이트 상부 트레이(0.1m²) : 0.31m(L)×0.31m(W)×0.25m(H)
- A급 화재용 원형 트레이(2m²) : 직경 1.6 m×0.25m(H)

f. 목재 크립 : 목재 크립은 무게 (5.4~5.9)kg, 치수 305mm×305mm×305mm 이며, 인공 건조된 전나무로 된 38.1mm×38.1mm×305mm 크기의 각 목재를 한 층으로 나란히 놓고 이런 층을 교대로 여덟층으로 쌓아 올린다. 교대로 쌓아 올린 목재층은 인접한 층과는 직각이 되도록 쌓는다. 각층의 목재는 앞에 쌓은 목재의 길이 방향으로 균등한 간격을 유지하도록 하여 고정시킨다. 목재가 조립되면 수분함량이 화재시험 전에 5%를

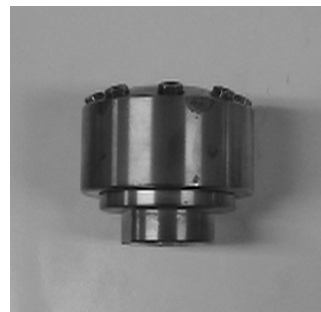
초과하지 않도록적어도 16시간 이상 온도 49±5℃로 건조시킨다.

2.4 미분무수 시스템

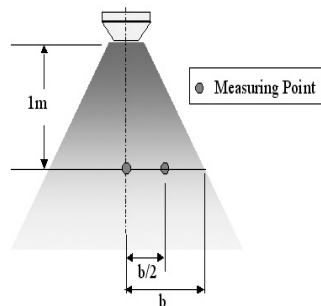
본 연구의 미분무수 소화설비는 격자형(4m×4m)의 배관에 [그림 6]의 단일 유체(single fluid) 방식의 미분무수 노즐을 설치하여 시험실 전체에 균일하게 미분무수가 방사되도록 한다.

2.4.1 미분무수 노즐 방출특성

미분무수 입자크기 분포 등을 측정할 수 있는 시험장치(PDPA)에 미분무수 노즐을 수직 하향으로 설치한 후, 정격작동압력 50bar로 방사한다. 미분무수 입자 크기의 측정위치는 노즐의 분무특성(Solid Cone)에 따라 [그림 7]과 같이 노즐의 중심축을 기준으로 노즐 하단부로부터 1m 아래 및 이 위치에서의 분무제트 폭(b)의 1/2지점에서 측정한다. 측정된 결과 방출계수 K값이 12.7 lpm/bar^{1/2}, 측정된 물방울군의 체적을 물방울군의 총 표면적으로 나눈 값인 SMD(Sauter Mean Diameter)는 50으로 나타났다.



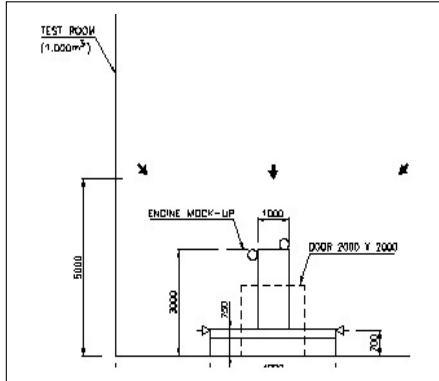
(그림 6) Photo of water mist nozzle



(그림 7) Measuring point of water droplet size

2.4.2 노즐 배치

미분무수 소화설비의 노즐배치는 좌우 대칭방식이며 [그림 8]과 같이 엔진모형 상부 및 밑지구역에 미분무수 노즐을 설치한다.



(그림 8) Schematic of the water mist nozzles

2.5 시험조건

2.5.1 분무 화재(spray fire) 조건

화재시나리오 중 분무 화재의 분사압력에 따른 조건은 아래 <표 1>과 같다.

<표 1> Oil spray fire test parameter

Category A 엔진룸 Class 1-3			
화재 유형	저압	저압, 저유량	고압
분무 노즐	광폭 분무 각도 (120-125도) 완전 콘형	광폭 분무 각도 (80도) 완전 콘형	표준 각도 (6 bar에서) 완전 콘형
공칭 연료 압력	8 bar	8.5 bar	150 bar
연료 유량	0.16 ± 0.01 kg/s	0.03 ± 0.005 kg/s	0.050 ± 0.002 kg/s
연료 온도	20 ± 5℃	20 ± 5℃	20 ± 5℃
공칭 열 방출률	5.8 ± 0.6 MW	1.1 ± 0.1 MW	1.8 ± 0.2 MW

2.5.2 미분무수 유량 및 압력 측정

모형엔진에 의하여 방해를 받는 분무 화재(spray

fire), 흐름 화재(cascade fire), 고임 화재(pool fire) 및 A급 화재(class A fire)에 대해 물을 주성분으로 하는 미분무수 소화 설비의 소화 성능을 평가하기 위하여 시험 중 미분무수 방수압력 및 유량을 펌프의 토출측에서 5초 이내의 시간 간격으로 연속적으로 측정한다.

2.5.3 시험 지속시간

연료 점화 후 고임 화재(tray fire)는 2분간, 분무 화재(spray fire) 및 헵탄 화재는 5~15초간 그리고 A급 화재시험은 30초간 자유연소(pre-burn) 시킨 다음, 미분무수를 방사시킨다. 미분무수는 제조사 시방의 방출 시간의 50% 또는 15분 중 짧은 시간동안 방출 한다. 연료 분무의 경우 미분무수 방출이 끝난 후 15초 후에 차단시킨다.

2.6 화재시나리오 및 시험연료

선박 화재안전을 위한 Category A의 기관구역 및 화물선 펌프실의 수계소화설비에 상당하는 화재시험방법은 IMO MSC/Circ. 668 Appendix B에서 규정하고 있으며 엔진화재를 가정한 13개의 화재시나리오로 구성되어 있고 시험연료는 경유, 헵탄, 윤활유 및 목재크립을 사용한다. 각각의 화재시나리오와 시험연료는 <표 2>와 같다.

3. 시험결과 및 고찰

각 화재 시나리오에 대한 소화시스템 작동 후 소화시간은 <표 3>과 같이 기준에서 정하는 15분 이내에 소화성능을 갖는 것으로 확인되었으며 또한 시험 후 시스템 구성요소에 대한 손상은 발생하지 않았다. 각 화재 시나리오별 소화특성은 다음과 같다.

3.1 고임화재(pool fire)

모형엔진 아래 중앙에 위치한 고임화재(Test

〈표 2〉 Test program

시험 번호	화재시나리오	시험용 연료
1	미분무수 노즐 사이에 있는 모형엔진상부의 저압 수평방향분무 화재	경유
2	모형엔진 상부의 45도 상향 연료노즐에 의해 1 m 이격된 지름 (12~15) mm 강관에 화염이 부딪히는 저압 분무 화재	경유
3	모형엔진 측면 위치의 엔진 말단에서 0.1m 안쪽에 위치한 연료 분무 노즐에서 발생하는 저압 은폐형 수평 방향 분무 화재	경유
4	상기 시험의 1~3 시험 중 최악의 분무 화재와 하부의 트레이 (4 m ²)와 모형 엔진 상부 (3m ²) 화재 모두를 혼합한 화재	경유
5	모형엔진 상부의 고압 수평 분무 화재	경유
6	모형엔진 측면 위치의 엔진 말단으로부터 0.1m 안쪽의 연료 분무 노즐에서 발생하는 저압 저유량 은폐형 수평 방향 분무 화재 및 바닥판 내부에 위치한엔진 말단으로부터 1.4m 안쪽에 위치한 0.1m ² 트레이 화재	경유
7	모형엔진 아래 중앙부 0.5m ² 화재	헵탄
8	모형엔진 아래 중앙부 0.5m ² 화재	SAE 10W30 미네랄 윤활유
9	엔진 배기판의 중앙부 아래의 밀지판 상부 0.5m ² 화재	헵탄
10	모형엔진 상부로부터의 흐름화재(0.25kg/s). 그림 4 참조	헵탄
11	30초간 자유 연소를 갖는 2m ² 고임(pool)화재 내부의 A급(목재 크립) 화재. 시험용 트레이는 그림 3과 같이 바닥면으로부터 0.75 m 상부에 위치	헵탄
12	엔진 상부에 20도 기울어져 설치된 철판(30cm×60cm×5cm) 의 앞면 끝으로부터 수평방향으로 0.5m 위치에서 저압 저유량 분무 노즐로 철판을 350℃까지 가열하는 화재	헵탄
13	모형엔진 아래 4m ² 트레이 화재	경유

No.7, 8, 13)는 밀지 노즐의 화염에 대한 직접분사에 의해 26초 이내에 소화(그림 16, 17, 22 참조)됨으로써 화염에 대한 미분무수의 직접분사방법이 소화효과가 가장 큰 것으로 나타났으나, 밀지 플레이트 위에 위치한 헵탄 연소면적 0.1m²의 고임화재(Test No.9)는 소화시간이 5분 48초(그림 18 참조)로 Test No. 6 다음으로 소화시간이 늦은 것으로 나타남으로서 화재 크기가 시험실의 체적에 비하여 작은 것이 소화시간 지연의 주요 원인으로 판단되며 미국해안경비대(U.S Coast Guard) Test report (Report No.: CG-D-26-98)⁴⁾에서도 동일한 결과를 나타내고 있다.

3.2 흐름화재(cascade fire)

모형엔진 상부의 연료배관이 누설되는 것을 모사하여 엔진 측면을 따라 흐르는 헵탄화재(Test No.10)로서 실제 화재현상은 다음과 같은 모형엔진 상부와 은폐된 바닥의 고임화재 및 측면의 흐름화재가 조합된 화재:

- 모형엔진 상부 트레이의 연소면적 3m²의 고임화재
- 모형엔진 측면을 따라 0.25kg/s로 흐르는 흐름화재
- 측면에서 미연소된 헵탄이 모형엔진 바닥의 밀지 구역에 놓인 연소면적 4m²의 고임화재로서

13개의 화재시나리오 중 가장 큰 화재이다. 미분무수 소화시스템이 작동된 후 소화시간은 21초(그림 19)로서 다른 화재시나리오에 비하여 소화시간이 빠른 것은 시험실 체적의 크기에 비하여 화재의 크기가 커 많은 미분무수 입자가 화염에 의해 기화되어 산소농도 감소에 의한 질식 효과 및 냉각효과의 영향이 큰 것으로 판단된다.

3.3 분무화재(spray fire)

가압된 연료배관으로부터의 다음과 같은 분무화재:

- a) 모형엔진 상부의 수평분무 경유화재(Test No.1 : 6MW, Test No. 5 : 2MW)
- b) 모형엔진 상부의 45도 상향 분무 경유화재 (Test No.2 : 6MW)
- c) 모형엔진 측면 배기플레이트 아래 은폐된 위치의 수평 분무 경유화재(Test No.3 : 6MW)
- d) 모형엔진 상부에 위치한 350℃로 가열된 잠열체(철판 크기 30cmW×60cmL×5cm)에 대한 수평 분무 헵탄화재(Test No.12 : 1MW)로서 미분무수에 노출된 분무화재 및 화재크기가 큰 (6MW) 은폐된 분무화재 모두 3분 이내의 소화시간(그림 10, 11, 12, 14, 21 참조)을 갖는 것으로 나타났다. 특히, d)의 화재 시나리오의 경우 350℃로 가열된 잠열체에 의해 미분무수가 기화됨으로써 대량의 수증기 발생과 체적팽창으로 인한 산소농도 감소의 영향이 주 소화효과로 판단된다.

3.4 분무화재(spray fire) 및 고임화재(pool fire)의 조합

모형엔진 측면에 위치한 배기 플레이트(exhaust plate) 아래의 수평 분무 경유화재(Test No.3 : 6MW)와 모형엔진 상부 트레이의 경유 연소면적 3㎡의 고임화재 그리고 모형엔진 바닥의 빌지 구역에

놓인 경우 연소면적 4㎡의 고임화재가 조합된 화재 (Test No.4)로서 소화시스템 작동 후 21초(그림 13)의 소화시간을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 모형엔진 측면의 배기 플레이트(exhaust plate) 아래의 수평 분무 경유화재(1MW)와 빌지 플레이트(bilge plate) 위에 놓인 경우 연소면적 0.1㎡의 고임 화재 (1MW)를 조합한 화재(Test No.6)의 경우, 소화시스템 작동 후 11분 7초에 소화(그림 15)되어 13개의 화재시나리오 중 가장 늦게 소화된 것으로 나타났다. 이는 미분무수 입자가 모형엔진의 배기판(exhaust plate)에 의해 차폐되는 것과 화재의 크기(heat release rate)가 1MW로서 시험실의 체적에 비하여 작은 것이 소화시간 지연의 주요 원인으로 판단되며 U.S Coast Guard의 Test report (Report No.: CG-D-26-98)⁴⁾에서도 동일한 결과를 나타내고 있다.

화재 구획실의 체적당 최소 화재크기에 있어서 U.S Coast Guard는 소화를 위한 최소 화재 크기를 구획실의 단위 체적(㎡)당 (1~2)kW의 비율로 IMO에 제안하였으며 선박 기관실의 화재를 15분 이내에 소화하기 위한 임계화재(critical fire) 크기는 1kW/㎡의 비율로 방호 구역 체적에 증가주⁴⁾하는 것으로 알려지고 있다.

3.5 목재 가연물 화재(Class A fire)

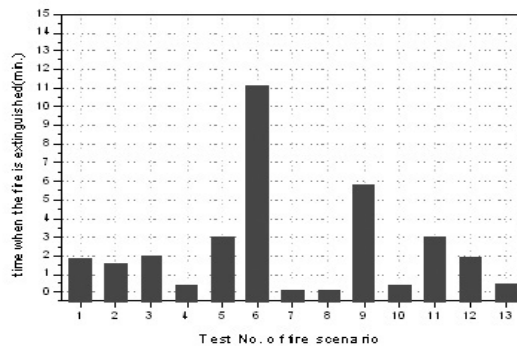
빌지 플레이트에 인접하여 바닥면으로부터 0.75 m 상부에 위치(그림 3 참조)한 연소면적 2㎡의 헵탄 트레이 내부의 목재크립 화재(Test No. 11)로서 헵탄연소에 의한 화염과 목재연소에 의한 화염은 37초에 소화되었으며 목재 내부의 잔염(ember)은 3분 0초(그림 20)의 소화시간을 나타냄으로써 미분무수가 목재크립의 심부화재에도 소화성능을 갖는 것으로 확인되었다.

각 화재 시나리오별 미분무수 방사에 따른 온도 변화는 [그림 9]에서 [그림 22]와 같다.

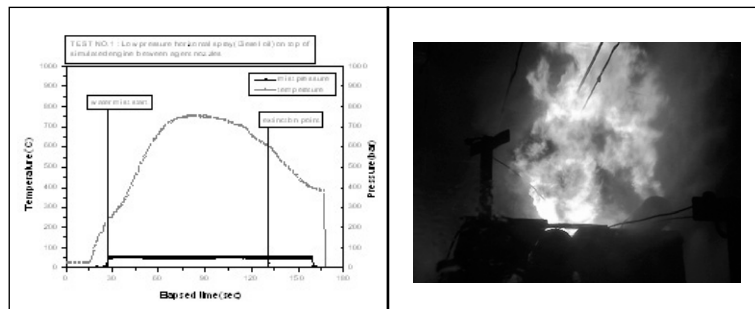
〈표 3〉 The time when the fire is extinguished since the extinguishing system is activated

Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
소화시간 (분:초)	1:46	1:34	2:00	0:21	3:00	11:07	0:09	0:09	5:48	0:21	3:00	1:54	0:26

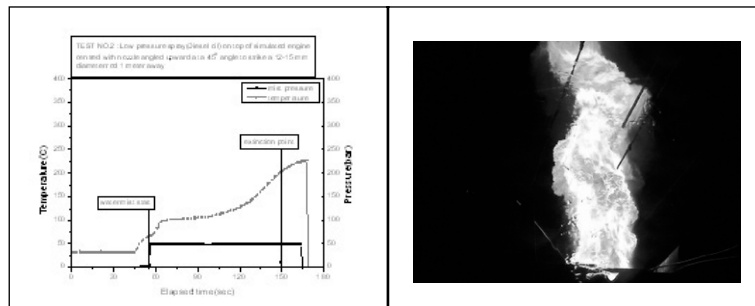
[주] Test No.11의 소화시간은 목재크립(wood crib) 내부의 잔염(ember) 소화시간임.



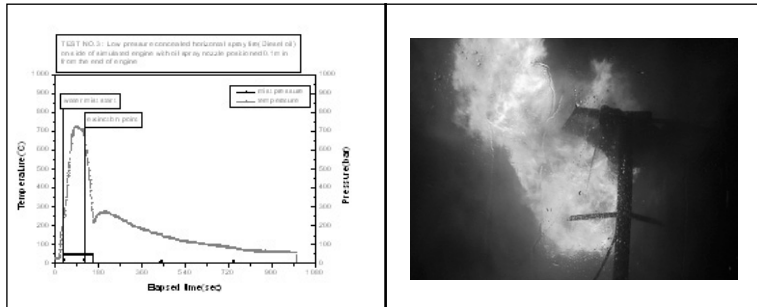
〔그림 9〕The time when the fire is extinguished since the extinguishing system is activated



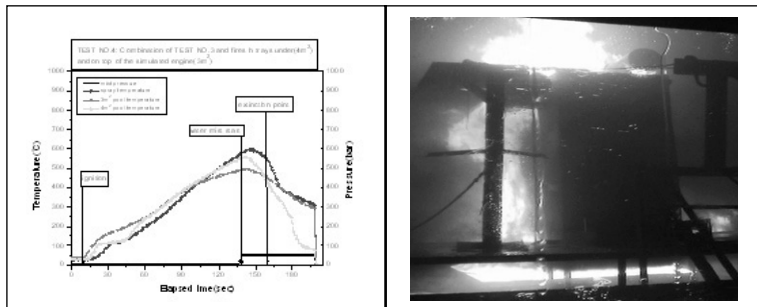
〔그림 10〕Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.1



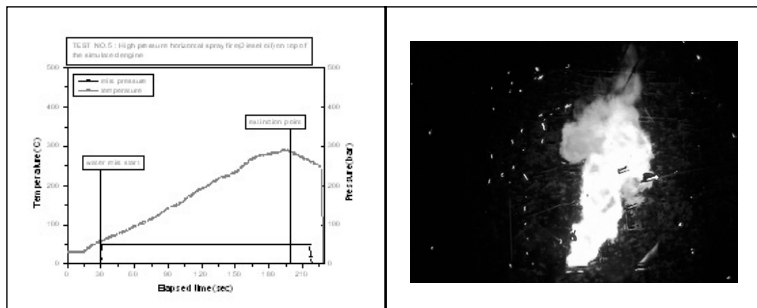
〔그림 11〕Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.2



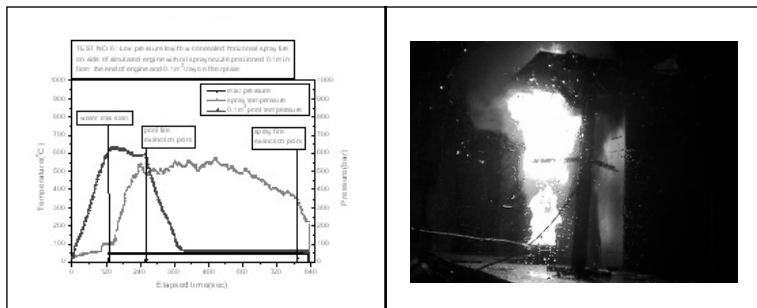
[그림 12] Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.3



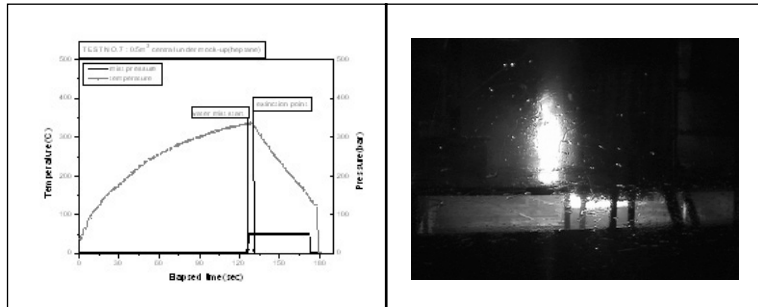
[그림 13] Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.4



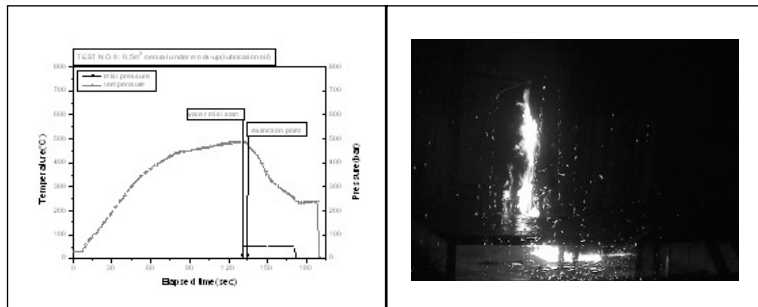
[그림 14] Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.5



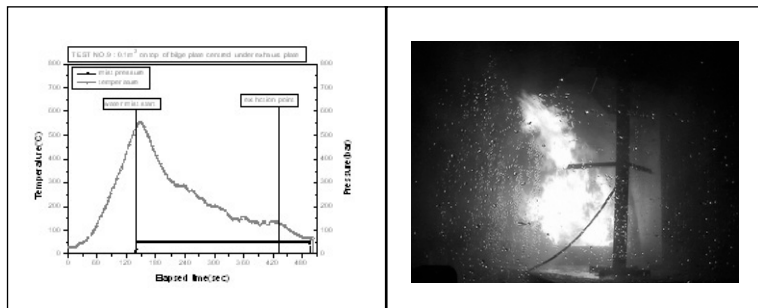
[그림 15] Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.6



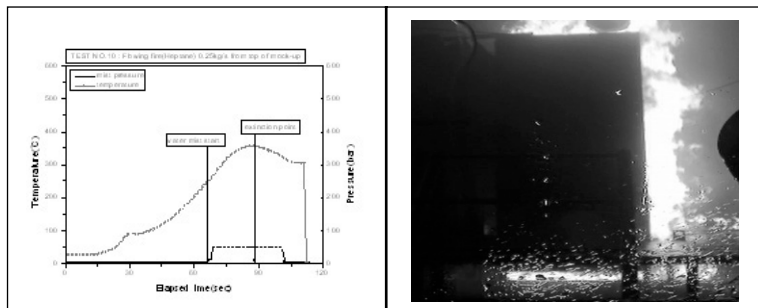
(그림 16) Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.7



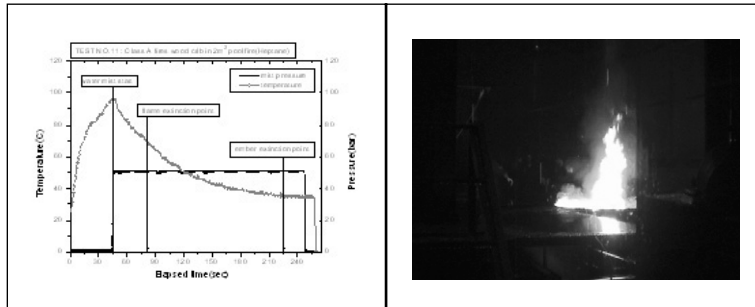
(그림 17) Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.8



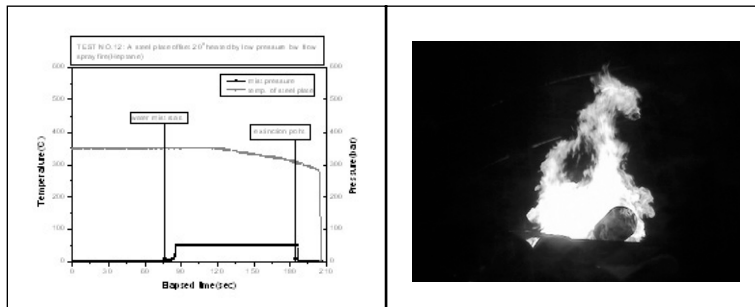
(그림 18) Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.9



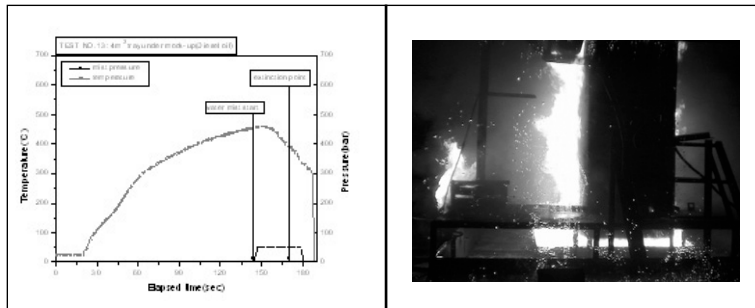
(그림 19) Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.10



(그림 20) Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.11



(그림 21) Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.12



(그림 22) Temperature vs pressure graph and fire test scene of Test No.13

4. 결론

미분무수 소화설비에 대한 소화성능 평가를 위하여 MSC/Circ. 668 Appendix B의 화재시험방법을 기반으로 시험방법을 정립하여 화재시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 고임 화재(pool fire), 분무 화재(spray fire),

흐름 화재(cascade fire) 및 A급 화재(class A fire)에 대한 13개의 화재시나리오 모두 기준에서 정하는 15분 이내에 소화되었으며 또한 재발화가 일어나지 않았으므로 본 연구의 미분무수 소화설비는 선박용 기관실에 분포된 목재류 가연물과 같은 A급 화재뿐만 아니라 경유, 헵탄, 윤활유와 같은 B급 화재에도 소화성능을 갖는 것으로 나타났다.

나. 화재의 크기가 클수록 소화시간이 빠르게 나타남으로서 미분무수 소화설비의 소화성능은 화재구획실의 단위 체적당 화재크기에 영향을 받는 것을 시험을 통하여 확인하였다.

다. 모형엔진 측면의 은폐된 구역을 방호하기 위하여 미분무수 노즐의 설치 각도를 화원을 향하여 경사시켰으며 또한 모형엔진 하부의 은폐된 빌지구역의 방호를 위하여 빌지 노즐을 설치함으로써 배기 플레이트 하부의 은폐화재 및 모형엔진 하부의 은폐된 빌지 화재를 소화하였다. 미분무수 입자가 화염에 도달하지 못하는 은폐화재의 경우 노즐의 설치 위치와 설치각도가 소화성능에 큰 영향을 미치는 것을 시험을 통하여 확인하였다.

라. 본 연구에서는 미분무수 소화설비의 선박용 기관실 적용에 대하여 정립된 시험방법에 따라 화재시험을 실시하여 각 화재시나리오에 대한 화염온도 변화, 화원 위치에 대한 소화시간 등을 확보하여 데이터화 하였다. 이를 통해 향후 다양한 종류의 선박에 대한 미분무수 소화설비 개발에 기반기술로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. **FILK**

pump-rooms

3. IMO MSC/Circ. 728, Amendments to the test method for equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of category A and cargo pump-rooms contained in MSC/Circ.668, Annex, Appendix B
4. USCG, Report No. CG-D-26-98, Full-scale testing of water mist fire suppression systems in machinery spaces, 1998
5. www.iwma.net, Minutes IMO MSC/Circ. 668/728 Meeting, January 17, 2001 Hamburg, Germany
6. NFPA 750, Standard on water mist fire protection system, 2003
7. IMO MSC/Circ.1165 Appendix B, Test method for fire testing equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of category A and cargo pump-rooms, 2005
8. IMO SOLAS Chapter II -2 Regulation 10 Fire Fighting, 2000

【참고문헌】

1. 한국산업규격, KS V 4006, 선박용 미수 분무 소화장치, 2003
2. IMO MSC/Circ.668 Appendix B, Test method for fire testing equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of category A and cargo