

FDS를 이용한 교번식 미분무방식의 소화 성능 분석

Analysis of Fire Suppression Efficiency for Intermittent Water Spray Pattern by Fire Dynamics Simulator

지문학* · 이병곤†

Moon-Hak Jee* · Byung-Kon Lee†

*한전 전력연구원 원자력발전연구소, 충북대학교 안전공학과 교수
(2008. 7. 11. 접수/2008. 9. 11. 채택)

요 약

물분무소화설비는 화원의 냉각, 주변공기의 희석, 미세한 물방울의 증발에 의한 열차단과 같은 소화특성을 이용한다. 미분무수의 운동량은 입자가 큰 물방울에 비해 상대적으로 낮으며 화원의 침투능력도 효과적이지 못하다. 증발된 수증기에 의한 기여는 무게가 가볍고 밀도가 희박하여 화원에 일부분으로 제한되는 경향이 있다. 반면, 사이클식 미분무 패턴은 성층화된 분무 특성에 의해 공기 배출능력과 침투력이 개선될 것으로 예상된다. 이 논문에서는 유체공학적 화재모델인 FDS를 사용하여 교번식 미분무 패턴에 대해 분석된 소화능력을 다룬다. 저자는 이 분석이 미분무 노즐의 표본을 개발하기 위한 기본 개념을 제공할 수 있기를 기대한다.

ABSTRACT

Water mist fire suppression system utilizes the fire suppression features such as cooling of fire source, dilution of ambient oxygen, and shielding of radiation heat with the evaporation of microscopic water droplets. The momentum of water mist is relatively lower than that of larger water droplet and the infiltration of water mist to the fire source is not effective. Contribution of evaporated water vapor is liable to decline to limited portion of fire source due to its light weight and sparse density. On the other hand, the cycling water mist pattern is expected to improve the penetration force of water mist as well as the air expelling capability with the stratified spray characteristics. At this paper, we present the analyzed fire suppression capability of intermittent water spray pattern by use of FDS which is computational fire dynamics fire model. We expect this analysis can support the basic concept to the development of the prototype of water mist nozzle.

Keywords : Water mist, FDS, Momentum of water mist, Intermittent water spray

1. 서 론

몬트리올 프로토콜 국제협약에 의해 우리나라의 경우 할론 소화약제 생산이 2010부터 금지되며 재고물량 또한 충분치 못한 실정이다. 할론을 대신한 소화약제로서 사람이 상주하지 않는 밀폐공간에는 이산화탄소를 사용할 수 있으며 사람이 상주하는 장소에는 청정 소화약제를 적용할 수 있다. 반면, 이들 소화약제는 일회성 소화의 특성을 갖거나 다량의 보충 약제를 구비하지 않는 한 재발화의 위험을 피할 수 없다. 최근 개

발된 청정약제는 구입과 유지 비용이 높으며 오존층 파괴와 지구온난화의 영향으로부터 완전하지 못하다. 이와 같은 상황에 따라 최근 국내외에서 최신기술을 이용하여 저가이며 재발화에 효과가 있으며 환경에 영향이 없는 수계소화설비를 개발하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

화재시 주요한 소화효과는 화원 냉각, 복사열 차단, 산소 희석이나 질식, 연쇄반응 차단을 들 수 있으며 대표적 수계소화설비인 스프링클러설비 또는 물분무설비는 이러한 소화효과를 이용한다. 해외에서 개발된 미분무소화설비는 NFPA-750에 의하여 기술기준이 마련되어 전기 및 제어설비에 적용하며 특히 선박에는 필

† E-mail: bklee@chungbuk.ac.kr

수 소화설비로 설치되어야 한다. 최근 해외 연구소에서는 특화된 노즐과 설비를 갖춘 미분무소화설비를 항공기, 우주선, 수소생산설비 등 특별한 용도로 활용하기 위한 연구에 박차를 가하고 있다. 미분무소화설비의 중요한 연구 분야는 냉각에 의한 소화, 미세 물방울의 기화에 의한 산소희석, 복사열 차단에 대한 기본 소화성능뿐만 아니라 소화수의 공급량과 소화효과에 대한 최적의 적용기법을 개발하는 것이다. 이의 한 분야로서 캐나다 국립화재연구원(NRC)은 미분무 노즐 연속분사(continuous spray)와 변동분사(cycling spray)에 대한 화재 실험시험¹⁾을 실시하고 그 결과를 1999년 미국화재방호협회 소방기술지(Fire Technology)에 발표하였다. 이에 따르면 대부분 실험에서 변동분사의 경우 연속분사에 비하여 소화시간이 단축되고 소화수의 공급량이 낮은 조건에서도 성공적으로 화재를 진압하는 결과를 제시하였다. 본 논문에서는 유류화재에 대한 연속분사와 교변분사에 의한 소화효과를 미국표준연구원에서 개발한 전산유체역학 화재모델 FDS^{2,3)}를 이용하여 소화시간과 소화수량 분석 결과를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 연구범위 및 제한사항

최근 개발된 전산유체역학 화재모델은 과거에 비하여 정량적 화재리스크를 깊이 있게 다루고 있으나 미분무의 수력학적 거동과 열적 특성은 많은 불확실성을 포함하고 있다. 이런 불확실성은 기술 발전에도 불구하고 제거가 어려운 근원적 요소와 실험장치의 오차 또는 적용방법에 따른 불확실성 요소에 기인한다. 반면 본 연구에서 사용한 정량적 수치는 모두 조건을 가정하였으며 화재모델에 사용한 그리드 크기는 특성길이 고려하여 결정하였다. 화재모델의 입력은 미국 Thunderhead사에서 개발한 FDS 입력 및 해석 전용 프로그램인 PyroSim⁴⁾을 사용하였고 프로그램 해석은 FDS를 사용하였다. 미분무수의 입자와 분포는 PyroSim의 입력 모듈에서 Rosin-Rammler 식을 이용하여 평균 100 마이크로미터의 직경과 감마 분포값으로 2.4로 결정하였다. Rosin-Rammler의 로그정규분포식은 다음과 같이 평균직경(dm)을 중심으로 분무수 입자 직경(d)의 분포값이 결정된다.

$$F(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{\sigma d'} \exp\left(-\frac{[\ln(d'/d_m)]^2}{2\sigma^2}\right) dd' \quad (d \leq dm)$$

$$F(d) = 1 - \exp\left(-0.693\left(\frac{d}{dm}\right)^y\right) \quad (dm \leq d)$$

여기서 σ 는 $2/(\sqrt{2\pi}(\ln 2)\tau)$ 이며 두 분포식이 $d = dm$ 의 경계에서 완만하게 연속되기 위한 조건을 정립하기 위한 변수이다. 한편, FDS 최신 버전(5.1.3)에서도 소화수의 입자 크기에 대한 분석이나 적용기준은 명확하지 않으며 미분무노즐과 물분무노즐의 거동⁵⁾은 유사하게 다루어지고 있으므로 화재모델링을 이용한 실용화 응용 과정에서 입자분포와 직경에 대한 불확실성과 민감도 해석이 필요할 것으로 판단된다. 반면, 본 연구결과에서 제시한 연속분무와 교변분무에 의한 소화시간 및 필요한 소화수량은 캐나다 국립화재연구원의 실험시험결과와 비교하기 위한 목적이며 입자분포와 직경에 대한 민감도 해석에 의한 결과를 비교하기 위한 목적이 아니므로 본 연구에 대한 독립적 분석은 수행하지 않았다.

2.2 기본조건

본 논문에서 화재구역은 공기 유입이 자유로운 자연 환기방식 화재공간으로 유류화재를 기준하였다. 화재의 크기는 온도함수의 성장곡선⁶⁾(t-square fast fire)을 갖는 3,516 kW이며 시뮬레이션 시간은 260초를 기준하였다. 화재실의 벽체, 바닥, 천정은 콘크리트 구조물이며 화원은 바닥에서 0.1 m 떨어져 위치한다. 사용된 연료는 변압기 절연유로서 10 kg을 기준하였으며 열발생율은 이 연료에 대한 질량감소율(연소율)과 유효발열량을 사용하였다. 노즐은 화재실의 중심에 1개를 배치하고 동, 서, 남, 북쪽의 사분면에 각각 1개씩 배치된 것을 가정하였다. 노즐의 유량은 3개의 시나리오는 분당 60리터를, 3개의 시나리오에는 분당 30리터를, 그리고 마지막 3개 시나리오에서는 10리터를 기준하였다. 이에 따라 화재위험 분석은 9개 시나리오에 대해

Table 1. condition of fire room and input variables

condition	input variables
fire room	6.0 × 6.0 × 4.0 [m]
fire source	1.4 × 1.4 = 1.96 [m ²]
opening	- 0.16 [m ²] at left wall - 0.16 [m ²] at right wall
HRR	3,516 [kW]
fire growth	fast t-square fire
duration time	260 [sec]
nozzle position (# : 5)	- at center : 1 nozzle - east, west, south, north : 1 nozzle at each position
flowrate condition	- case 1, 2, 3: 60 lpm/nozzle - case 4, 5, 6: 30 lpm/nozzle - case 7, 8, 9: 10 lpm/nozzle

Table 2. Water mist spray pattern

	case-1, 4, 7	case-2, 5, 8	case-3, 6, 9
#1 (center)			
#2 (east)			
#3 (west)			
#4 (south)			
#5 (north)			

수행하였으며 입력조건은 Table 1과 같으며 분사방식은 Table 2와 같다.

상기 표에서 case-1, 4, 7은 화재가 발생한 다음 30초가 경과한 시점에서 5개의 노즐에서 동시에 소화수가 분사되는 경우이며 case-1, case-4, case-7의 분당 유량은 각각 60리터, 30리터, 10리터이다. case-2, 5, 8의 경우 중앙에 설치된 노즐은 화재 발생후 30초에서 연속적으로 소화수가 방출되지만 나머지 노즐은 5초 방출후 5초 정지하는 연속적 교번분사의 패턴을 유지한다. case-3, 6, 9의 경우 앞의 시나리오와 유사하나 동쪽 노즐과 서쪽 노즐이 5초 방수하는 동안 남쪽과 북쪽 노즐은 정지하는 형태의 엇갈린 교번식 분사를 하게 된다.

2.3 화재모델 분석

미분무노즐의 분사 형태에 따른 소화성능은 FDS (Version 5.1.3)을 사용하여 분석하였다. 분석 대상시간은 미분무노즐이 동작한 시간부터 열발생율이 0이 되는 시간까지 화재진압시간으로 계산하였으며 실내의 대표 위치에 대한 온도와 복사열을 확인하기 위하여 화원 직상부에 설치된 목표대상물의 표면온도와 열속을 측정하였다. 분석결과 노즐 분당 유량이 60리터인 case 1, 2, 3의 경우 화재진압시간은 약 83초, 노즐 분당 유량이 30 리터인 case 4, 5, 6의 경우 약 85초, 그리고 노즐 분당 유량이 10리터인 case 7, 8, 9의 경우 약 99초가 소요되었다. 또한 화재진압시간은 연속분사의 경우 교번분사에 비하여 약 7~9초 단축되었으나 제

어체적(control volume)에 유입된 평균 유량을 기준할 경우 교번분사의 효과는 월등히 높은 것으로 평가된다. 한편, case-1, 2, 3에 비하여 분사유량이 절반으로 감소한 case-4, 5, 6의 경우와 약 16% 수준으로 감소한 case-7, 8, 9의 경우 모든 시나리오에서 화재는 진압되었으며 목표대상물의 표면온도와 열속은 분사유량이 감소할 경우 다소 증가하지만 유량 감소율만큼 역비례하여 증가하지는 않는 형태를 보였다.

각 시나리오별 온도와 열속을 비교하기 위하여 임의로 가정한 위치에 설치된 목표대상물의 온도분포는 노즐유량이 감소할 경우 시간에 따라 증가하는 모습을 보였으며 분당 유량이 10리터인 교번분사 형태의 case 8에서 125.1 °C의 최고온도와 19.8 kW/m²의 최대열속을 보였다. 이와 같은 현상은 교번분사에 따른 실내공기가 유동되고 화염이 심하게 흔들림에 따라 국부적으로 열속이 높게 나타난 것으로 판단된다. 한편 해당 시나리오별 화재모델링에 대한 결과 파일(확장자가 csv 인 파일)에서 온도와 열속 분포를 확인한 결과 일시적으로 온도와 열속이 상승하였으나 그 시간은 매우 짧은 기간이었으며 이와 같은 단시간 변화는 목표대상물의 기능에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. 아래의 Table 3은 각 시나리오의 평균 소화수 유량과 화재 진압시간을 보이고 있으며 Figure 1과 Figure 2는 목표대상물의 표면온도와 열속을 각 시나리오별 시간의 함수로 비교하여 표시한 것이다.

아래 표에서 유량과 시간의 단위는 L/min과 second 이다. 특히, flowrate flux는 제어체적에 유입된 유량을

Table 3. fire suppression at fire scenario

scenario	case-1	case-4	case-7	case-2	case-5	case-8	case-3	case-6	case-9
flowrate	60	30	10	60	30	10	60	30	10
spray pattern	continuous spray (5 nozzles)			continuous spray (1 nozzles) intermittent spray (4 nozzles)			continuous spray (1 nozzles) alternative spray (4 nozzles)		
flowrate flux	8.33	4.17	1.38	5.0	2.5	0.83	5.0	2.5	0.83
suppression time	74.5	76.1	92.5	81.8	84.9	99.2	82.8	82.5	96.4
maximum. temperature of target	38.8	44.6	70.5	46.9	52.2	125.1	42.4	58.7	94.5
maximum heatflux	1.8	3.4	7.5	4.0	3.3	19.8	2.1	7.2	11.5

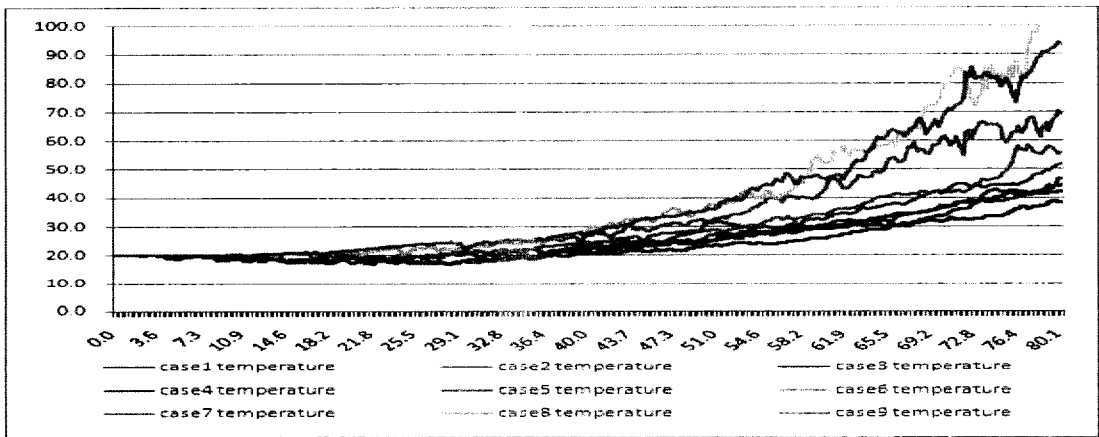


Figure 1. Temperature profiles at each fire scenario (X-second, Y-°C).

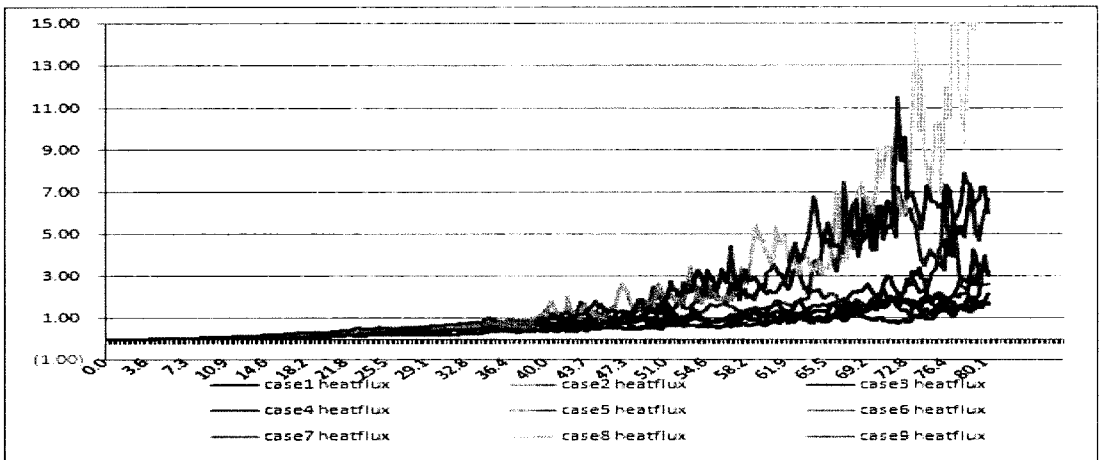


Figure 2. Heatflux profiles at each fire scenario (X-second, Y-kW/m²)

단위면적으로 나눈 값으로 최대 8.33 L/min/m²에서 최소 0.83 L/min/m²의 값을 가지며 교변분사의 엇갈린 방

식을 채택할 경우 약 10%의 유량에서도 화재 진압의 가능성을 예측할 수 있다.

3. 결 론

화재모델을 이용하여 교번식 미분무노즐의 소화특성을 검토한 결과 캐나다 국립화재연구원에서 발표한 화재 실증시험의 내용과 유사하게 화재 진압시간 및 소화수량이 감소하였다. 한편, 전산유체역학에 의한 미소 격자의 질량, 에너지, 화학종의 평형식을 이용한 화재 모델은 최신의 정량적 화재리스크 분석 기술을 사용하고 있으나 아직까지 여러 가지 적용상 제한사항이 있으며 열역학적 거동과 수치역학적 해석을 명확히 반영하지 못한 부분이 있다. 특히 미분무소화방식의 소화수 운동량 저하, 심부화원의 접근성 결여, 고도의 수처리설비, 전기 절연성 검증 등 여러 가지 해결한 사항이 사안들이 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 문제점들은 화재 실증시험에 의한 화재의 거동분석을 통해 점차 밝혀지고 있다. 이러한 특성을 감안할 때 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 연속소화방식에 비하여 적은 유량을 사용하는 교번분사방식에 의해서도 화재를 효과적으로 진압할 수 있음을 화재모델을 통하여 확인하였다.

둘째, 교번분사방식중 엇갈린 분사방식은 화원 부근의 공기 추출 능력이 뛰어나며 보다 적은 유량으로 소화의 가능성을 제시하였다.

셋째, 교번방식의 감소된 유량으로 화재를 진압할 수 있으며 상대적으로 목표 대상물의 온도와 열속은 크게 증가하지 않은 바 교번방식에 의해 화재위험요소의 제어도 가능하다.

한편, 이러한 결론은 소규모 공간에 대해 화재모델링에 의존하여 분석된 결과이므로 화재실증시험과 환

기효과를 고려한 불확실성을 고려한 실용적 평가와 화재성능평가를 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 본 연구에서 수행된 교번 분사방식은 소화수의 감소로 화재공간의 열적 오염을 줄일 수 있으며 밀폐된 공간에서의 소화는 더욱 효과적일 것으로 예상되는 바 이러한 평가가 향후 성능기준 화재방호기술의 개발에 도움이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Zhigang Liu, Andrew K. Kim, and Joseph Z. Su, "Examination of the extinguishment performance of a water mist system using continuous and cycling discharges", Fire Technology Vol. 35, No. 4, pp. 336-361(1999)
2. NIST, "FDS (Fire Dynamics Simulator) User's Guide and Technical Guide" (2007).
3. NIST, "Smokeview User's Guide" (2007).
4. Thunderhead Engineering, "Pyrosim User Manual" (2007).
5. NFPA 750, "Standard on water mist fire protection systems" (2006).
6. Fire Protection Handbook (18th edition), "Section 6/Chapter 15, Water mist fire suppression systems"
7. SFPE Handbook (3rd edition). "Section 4/Chapter 14, Water mist fire suppression systems".