

최신 화재 모델링 및 실험 연구에 관한 국내외 기술 동향 파악

윤석구* · 이민욱** · 김호영***

1. 서 론

우리의 편의를 위해 실로 다양하게 사용되고 있는 불은 아직까지도 인간의 손에 쉽사리 길들여 지지 않은 채, 여전히 화마(火魔)에 의한 크고 작은 재난이 계속되고 있다. 우리나라의 경우 아직도 그 충격이 채 가시지 않은 국보 1호 숭례문의 전소에 이어, 정부종합청사 화재까지 올 초만 해도 벌써 몇 차례에 걸친 대규모 사고가 발생했다. 체계적인 방재시스템을 갖추지 못한 상태에서 발생한 화재는 오히려 인재의 성격이 강하다. 이러한 이유로 이미 오래전부터 미국, 일본 등의 선진국에서는 화재 방재에 관하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 미국의 경우, 911테러 이후 테러와 같은 예기치 못한 화재에 의한 제반 환경(건물 내부 철근, LNG 저장탱크 등)의 열 손상을 예측하기 위한 연구를 계속해 나가고 있다.

화재 발생시 1차적으로는 열 손상으로 인한 건물의 붕괴 등이 우려되나, 연기 같은 유해가스로

인한 인명 피해 또한 심각하게 고려되어야 한다. 화재 관련 사고 통계를 살펴보면 오히려 연기나 유해가스 등으로 인한 질식사자가 절반 이상을 차지하는 것을 볼 수 있는데, 이는 화재 연구에 있어 열 분포 예측만큼이나 연기의 유동 해석 또한 비중있게 다루어야함을 의미한다. 하지만 현실적으로 대부분의 화재 실험에 비용이 많이 들고 또한 매우 위험하기 때문에 실제로는 실험보다는 시뮬레이션을 이용한 연구가 주를 이루고 있다. 눈부시게 발전하는 CPU 처리속도와 함께 상용코드를 이용한 해석이 보편화되고 그 신뢰성 또한 실험을 대체할 만큼 꾸준히 발전하고 있다.

본 연구는 화재 연구시 가장 기본적으로 사용되는 풀 화염(pool fire)의 경우에 주목하여, 다양한 조건에 따른 실험과 함께 시뮬레이션을 이용하여 그 타당성을 검증하고, 일반적인 화재의 양상을 관찰하였다. 또한 관련 연구 동향을 철저히 분석함으로써 앞으로 화재 관련 연구가 나아갈 방향을 제시하고자 한다.

2. 관련 배경 이론 및 지식

어떤 물질을 연소시키기 위해서는 크게 연소물, 산소 그리고 발화점 이상의 온도가 필요하다. 이를 연소의 3요소라고 하는데, 이에 주목하여 화재 진압도 이 중 한 가지 이상의 요소를 제거하는

※ 교신저자(Corresponding Author) : 윤석구, 주소 : 서울특별시 성북구 안암동(136-701), 전화 : 02)3290-3376, FAX : 02)926-9290, E-mail : skyoon@korea.ac.kr

* 고려대학교 기계공학부

** 고려대학교 기계공학부

(E-mail : elanian@korea.ac.kr)

*** 고려대학교 기계공학부

(E-mail : kimhy@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 학술진흥재단(KRF-2007-331-D00061)지원으로 수행되었음.

것을 목표로 한다. 즉, 탈 물질을 제거하거나 산소의 유입을 차단 또는 온도를 떨어뜨리는 등의 과정을 필요로 한다. 이 때 보다 효율적인 화재의 진압을 위해 다양한 물질이 사용되는데, 그동안 널리 사용했던 할론(Halon) 가스가 오존층을 파괴하는 등 심각한 부작용이 보고됨에 따라 사용이 전면 금지되면서(몬트리올 의정서, 1987) 가장 오래 동안 사용되어 온 물에 대한 관심이 다시 늘어나기 시작했다. 물은 화염에 접촉시 수증기가 되어 기화하는 과정을 통해 1차적으로는 화염으로부터 열을 흡수하여 온도를 떨어뜨리고(잠열에 의한 냉각효과), 또한 주변의 산소를 차단하여 연소를 저지하는 것을 볼 수 있다. 이상의 기본조건을 바탕으로 이 장에서는 화염의 기본 형상과 함께 일반적인 화재의 양상을 살펴보기로 한다.

2.1 Pool Fire

Pool fire(이하 풀 화염)는 화재 연구의 가장 기초적인 모델로서 일정한 액체 표면에서 연료를 연소시키는 것을 의미한다. 보통 직경 3cm 이하의 화염을 층류(laminar)로 보고 일반적으로 소형

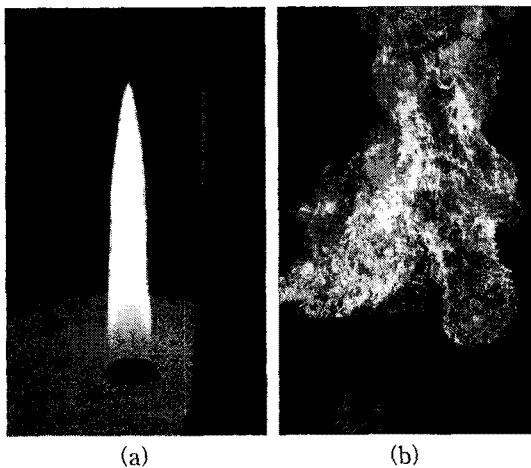


그림 1. (a) Laminar Flame (b) Turbulence Flame

스케일이라 함은 직경 약 1cm 이하의 경우를 말한다. 직경 50cm이상의 화염의 경우에는 난류로 가정하고 이때부터는 풀의 직경이 연소효율에 큰 영향을 미치지 않는다.

열의 3가지 전달 방법(전도, 대류, 복사) 중 직경 1m 이상의 대형 화염의 경우에는 복사에 의한 열전달이 지배적이다. 여기서 복사열은 화염의 방사율(ϵ), 풀의 크기(D), 그리고 화염(T_F)과 연료(T_i)의 온도차에 비례한다.

$$q_{rad}^* = k_3 \frac{\pi D^2}{4} (T_F^4 - T_i^4) \frac{(1 - \exp(-k_4 D))}{\epsilon : \text{emissivity}}$$

2.2 Fire Zone

- ① Buoyant Plume: 높이가 높아짐에 따라 속도와 온도가 감소하는 특성 영역
- ② Intermittent Flame: 간헐적인 화염과 거의 일정한 속도의 유동 영역
- ③ Persistent Flame: 버너 표면(지면에 인접한)에서 연소 가스의 유동이 가속화되고 지속적인 화염이 존재하는 영역

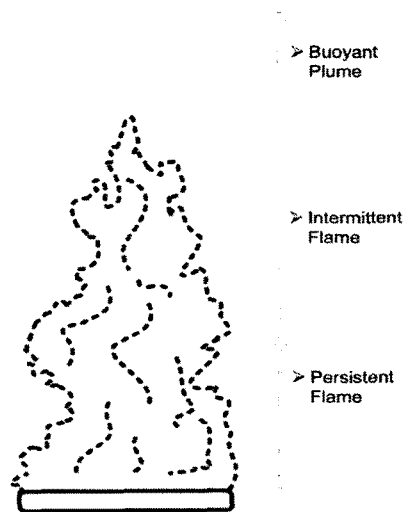


그림 2. 화염의 기본 구조

부력이 원동력이고 연료의 연소를 위한 공기가 화염 표면으로 유입된다고 가정한다. 이때 화염과 주변 공기 경계면에서의 불안정성으로 인해 진동하는 것을 볼 수 있다(RT Instability). 또한 화염의 크기가 화염이 어떤 식으로 주위 환경과 작용할 것인지를 결정하고, 열분해율과 에너지 방출율은 주변 환경이 아닌 오직 연료 자체의 연소에 의해 결정된다.

2.3 모델링 기법

최근 LES를 이용한 매우 세밀한 모델링 사례가 급증함에 따라, 지난 수십년간 대표적으로 사용되어 온 RANS 기법을 대체할 것이라는 기대가 커지고 있다. 하지만 LES는 물론 DNS 모델링은 현존하는 슈퍼컴퓨터로도 여전히 계산에 너무 많은 시간이 소요되는 등 현실적인 단점에 대한 보완이 필요하다.

2.3.1 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 모델
비정상, 대형 스케일의 유동을 보기 위한 모델로서, 실용적인 케이스의 계산에 적합하고 시간

절약에 효과적이다. 평범한 모델을 사용하더라도 LES를 이용한 SGS(Sub-Grid Scale)모델에 비해 크게 뒤지지 않는 결과를 보여주기 때문에, 앞으로 RANS 기법을 이용한 모델링이 지속적으로 사용될 전망이다.

2.3.2 LES(Large Eddy Simulation) 모델

3차원의 복잡한 난류 해석이 가능하고 DNS 모델에 비해 경제적이라는 장점이 있다. 원하는 만큼의 눈부신 CPU의 발달을 기다리는 동안 향후 최소 10년간은 LES를 사용한 모델링이 각광을 받을 것으로 예상된다. 격자가 충분히 조밀할 경우에는 RANS 모델에 비해 정확하지만, 유동의 특성에 대한 이해가 부족한 상태에서는 어느 정도의 격자가 충분한지 파악하기 어려운 단점이 있다.

2.3.3 DNS(Direct Numerical Simulation) 모델

복잡한 유동에 대해 정밀한 해석이 가능하므로 극도로 세밀한 물리현상을 포착하는데 유용하게 쓰인다. 또한 DNS 모델은 관련 모든 시간과 길이 스케일을 분석하기 때문에, 시뮬레이션의 검증을 위한 추가적인 실험이 필요 없다. 하지만 그런만



(a) 빠르고 간편한 계산 가능 → (b) 복잡하고 세밀한 해석 가능

그림 3. (a)RANS 모델을 이용한 JP-8 풀화염(1), (b)LES 모델을 이용한 헬륨 가스의 유동(2), (c)DNS 모델을 이용한 수소 제트 화염(3)

큼 비용이 많이 들고 극도로 조밀한 격자를 필요로 한다. 예를 들어 CPU의 속도가 무어의 법칙(Moore's law)에 따라 계속 증가한다는 가정하에, 10m × 10m × 10m 사이즈 풀 화염을 DNS를 이용해서 계산하려면 앞으로 100년은 더 있어야 가능할 것이라는 예상이다. DNS의 적용에 있어서 현재까지는 소형 스케일 화염(<10cm)의 화학 반응, 또는 더욱 세밀한 연소 메커니즘의 관찰 및 분석에 제한되어 있다.

2.3.4 Rayleigh-Taylor(RT) Instability

서로 다른 두 유체의 밀도차로 인해 발생하는 현상으로서, 상대적으로 가벼운(밀도가 작은) 유체가 주변 유체를 밀어내면서 올라가고, 반대로 무거운 유체는 중력으로 인해 하강하면서 생기는 소용돌이나 손가락 모양의(R.T. Fingers) 유동 등을 말한다. 대표적인 예로는 핵폭발 후 발생하는 버섯구름을 들 수 있다. 주로 난류 화염에서 쉽게 볼 수 있는 화염의 퍼핑(Puffing)은 이러한 RT현상으로 인해 발생되며, 퍼핑 주기는 모델 검증 절차에 있어서 가장 먼저 확인하는 데이터로 사용되고 있다.

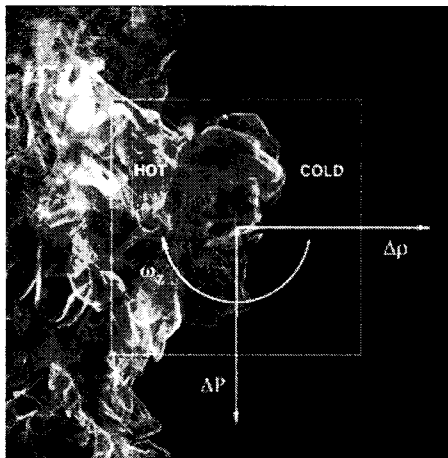


그림 4. 부력으로 인한 JP8 플룸의 RT Instability (4)

3. 관련 연구 동향

3.1 소형 스케일 화재

Lentati, Chelliah[5]는 층류 상태의 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 바탕으로 Eulerian-Lagrangian 이상(two-phase) 화염 모델을 개발하였다. 또한 water 스프레이와 메탄 플룸 사이의 역방향 유동(충돌 유동)을 연구했는데, 플룸(plume)의 부력을 이기면서 화염내로 침투하기 위해서는 액적의 크기가 최소 50 μ m 이상 되어야 한다는 것을 밝혔다.

Ndubizu 등[6]은 스프레이와 2차원 메탄 확산 화염 간의 병렬 동축-유동에 관한 실험을 수행하였다. 이 연구는 동축-유동 배열에서 스프레이의 효과가 화염에 대한 산소 차단보다 냉각에 의한 영향이 더 큰 것을 보여준다.

또한 Prasad 등[7]은 동축-유동 케이스를 연구하였다. 최적의 진압 조건을 찾기 위해 액적의 지름, 분무각, 입자 수 및 분사 속도에 대한 2차원 Eulerian-Eulerian 접근을 시도하였다. 이 연구를 통해 입자 수와 분사 속도가 커질수록 진압 효율이 증가한다는 것을 보여주었고, 이후 Prasad 등[8]의 추가 작업을 통해 더 구체적인 정보가 제공되었다.

Lazzarini 등[9]은 Lentati, Chelliah[1]의 연구 결과를 바탕으로 한 케이스 실험을 통해 계산 코드를 검증하였고, 모델링 결과와 실험 데이터가 부합하는 것을 확인하였다. 실험 연구는 또한 NaOH-water 혼합물을 사용할 경우, NaOH의 급속한 촉매 재결합 효과로 인하여 진압률이 더욱 향상되는 것을 보여준다.

Prasad 등[10]은 층류 메탄을 풀 화염(직경 1cm 이내)과 스프레이를 이용한 진압을 2차원 모델링하였다. 이 연구를 통해 스프레이가 풀 화염

의 하부에서 분사될 경우(base 분사) 액적의 크기가 작을수록 소화 효과가 증가하는 것을 증명하였다. 이는 작은 액적들이 기체에 비해 상대적으로 빠르게 연료 표면으로 퍼지기 때문으로 설명할 수 있다.[11] 화재 진압은 물이 증발하면서 수반하는 냉각효과(i.e., 기화시 잠열에 의한 열 흡수)와 주변 산소와의 차단효과 등의 메커니즘으로 이루어진다.

3.2 풀 화염 진압

연료 유출 사고 등에 바로 적용이 가능한 풀 화염에 관한 연구가 그 실용성으로 인해 가스 화염에 비해 더 큰 관심을 받는다. 대부분의 액체 연료의 경우 연소시 부력으로 인한 소용돌이 등으로 인해 일반적으로 가스 연료보다 더 많은 연기가 발생한다.[12] 초기 풀 화염 연구는 Rasvash, Rogowski[13]에 의해 진행되었다.

케로신을 사용한 풀 화염(직경 10cm 이하)을 위에서 발사되는 스프레이를 이용하여 냉각하였는데, 이는 냉각의 핵심 메커니즘을 액적을 통하여 연료로부터 열이 빠져나간다고 생각했기 때문이다. 이어 진행된 Rasvash 등[14]의 연구에서는, 화염보다 낮은 높이에서 60° 분사시 작은 크기의 액적을 사용하는 것이 더욱 효과적이라는 것을 보여주었다. 이후 연구에서 효율적인 화재 진압에 액적의 기화율 변화(크기에 따른)가 중요한 요인임을 제시하였다.

Jianghong 등[15]은 에탄올과 케로신을 사용한 직경 5cm 풀 화염을 이용하여 실험적으로 연구하였는데(스프레이를 풀 화염 30cm 상부에 설치하고 점화 100초 후에 작동), 스프레이의 질량 유량이 증가할수록 더 빨리 진압되는 것을 확인하였다. 또한 스프레이의 질량 유량이 감소함에 따라 연료와 공기가 혼합되어 유입되면서 화염이 더욱

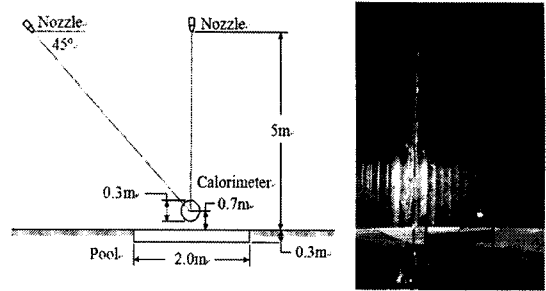


그림 5. 풀화염 실험 세팅- 풀화염이 실린더(Calorimeter)에 미치는 열손상을 측정하고, 빠른 화재 진압을 위해 고압력 스프레이를 90, 45° 위치에 설치 (1)

격렬해지고 진압이 되지 않는다고 보고하였다.

3.3 닫힌 공간 내 화재 진압 관련 모델링 연구

모델링 연구는 비용이 많이 들고 위험한 대형 화재 실험 연구에 매우 유용하다. 20년이 넘도록 대형 스케일 화재 진압에 대해 수치 해석 연구가 주목받는 것도 바로 이 때문이다. 이는 비단 비용 부담뿐만 아니라 화재 진압이 상대적으로 수치 계산에 새로운 영역이기 때문이라고 볼 수 있다 [16]. 또한 건물이나 차량 화재와 같은 현실적인 응용이 가능하기 때문에, 일반적으로 구획(닫힌 공간) 내 화재 진압에 큰 관심을 가진다.

Alpert[17]는 메탄가스의 구획화재 진압에 관한 2차원 계산 결과를 발표하였다. 이는 Jianghong 등[15]의 실험 관찰과 일치하는 것으로, 스프레이의 질량 유량이 증가함에 따라 스프레이에 의해 흡수되는 열도 증가하는 것을 보여주었다.

Hoffman, Galea[18,19]는 구획 화재 적용을 위한 3차원 모델링을 개발하였다. 이 연구에서는 50kW 이상의 화염을 가정하고 가스 온도가 부분적으로 Cooper, Stroup[20]의 실험 데이터와 비교하였다.

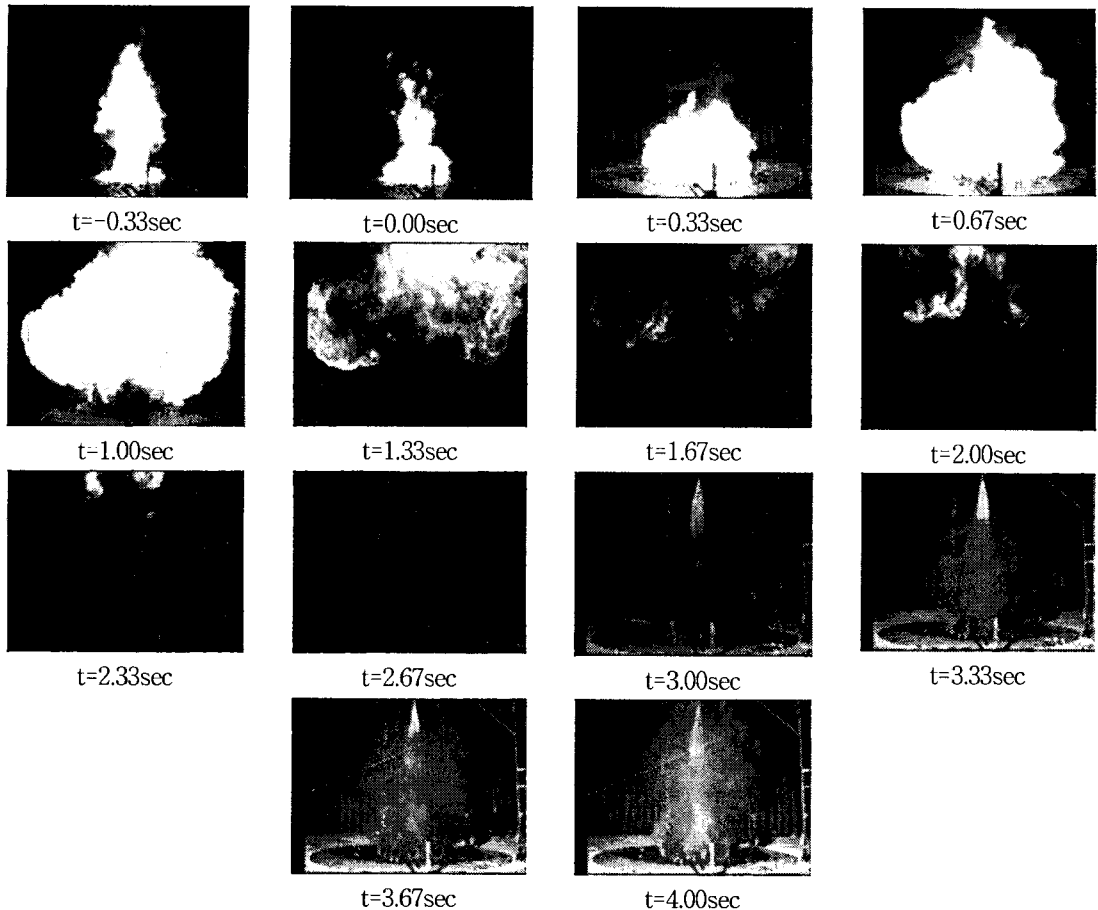


그림 6. 풀화염 실험- 90° 위치에 설치된 스프레이(물)의 수직 분무를 이용한 풀화염 진압 스냅샷 (1)

Chow, Fong[21]은 Dukowicz[22]의 액체 상태에 대한 Lagrangian 접근과 기체 상태에 대한 $k-\epsilon$ 난류 RANS 모델을 사용하여 더욱 완벽한 3차원 모델링을 보여주었다. 질량, 운동량 및 열전달 효과가 Crowe 등[23,24]의 PSI-CELL(Particle Source in Cell) 알고리즘에 반영되었다.

Nam[25]은 Crowe의 PSI-CELL 알고리즘[24]과 SIMPLE 알고리즘[26]을 활용한 축대칭 코드를 이용하여 스프레이의 질량 유량을 다양하게 변화시키면서 살펴보았다. 이를 통해 화재 진압이 액적 크기나 속도와 같은 스프레이의 초기 조건에 매우 민감함을 볼 수 있었다.

Hua 등[27]은 정사각형 버너(0.25m × 0.25m)의 메탄가스 플룸 진압의 최적화를 위해 여러 가지 변수 연구를 하였다. 초기 액적 크기, 스프레이 패턴(i.e., 솔리드 콘, 할로우 스프레이), 질량 유량 등을 변화하여 할로우 콘 패턴, 큰 액적 크기에 비해 솔리드 콘 패턴, 미세한 액적을 사용한 스프레이가 소화에 더욱 효과적이라는 것을 밝힐 수 있었다.

또한 Prasad 등[28]은 미스트 유입과 진압에 관해 액적 지름, 분사 밀도와 속도, 노즐 위치 등의 다양한 분사 특성을 최적화하기 위한 변수 연구를 수행하였다. 계산 결과, 비슷한 변수 수치를 사용

한 대형 스케일(0.61m × 1.22m) 난류 프로판 풀화염의 경우, 상부 분사 시에 가장 소화가 빠르다는(Prasad 등[10]에 의해 보고된 데이터와 상반되는) 결과를 내놓았다. 이와 같은 차이는 소형 스케일 화재 진압이 대형 스케일의 경우와 본질적으로 다르다는 것을 의미한다.

Vaari[29]는 미스트를 이용한 화재 진압을 위해 천이 단일 구역 모델을 제안하였다. 이 모델은 일정 공간 내 온도, 가스 밀도 및 조성과 함께 미스트 농도의 시간에 따른 변화를 풀어낸다.

Consalvi 등[30]은 새로운 버전의 k-ε 모델, 2-연속체 가정을 이용하여 가스와 액체를 모두 모델링하기 위해 Yakhot, Orszag[31]가 개발한 RNG k-ε 모델, Eulerian-Eulerian 모델을 사용하였다. 여기서는 100kW의 0.2m 길이 에틸렌 확산 화염의 2차원 시뮬레이션을 시연하였고, 열적 냉각(i.e., 증발을 통한 화염에서 액적으로의 흡열반응)이 진압의 주요 메커니즘인 것으로 드러났다. 또한 액적에 의해 화염에서 방출되는 복사 에너지가 감소하고, 에너지가 줄어드는 것을 발견했다. DesJardin 등[32]과 Jianghong 등[15]에 의해 보고된 것처럼, 스프레이 분사가 시작됨에 따라 격렬한 난류 혼합으로 인하여 순간적으로 화염이

활성화 되는 것도 관측되었다.

Li, Chow[33]는 Chow, Yao[34]와 Vaari[29]의 모델과 유사한 1차원 모델을 제안하였다. Li, Chow의 모델은 산소 결핍이 소화의 주요 메커니즘인 화재 시나리오-이전 Chow, Yao[34]와 Vaari[29]의 모델에 비해 더욱 강력한 drag 모델을 위해 개발되었다.

3.4 닫힌 공간 내 화재 진압 관련 실험 연구

Kung[35]은 hexan 풀 화염(직경 0.914m)을 실험하였다. 이 실험은 액적의 증발이 열 방사율과 질량 유량에 비례하는 것을 보여준다; 스프레이의 질량 유량, 액적의 크기, 열원의 열 방사율 등이 구획 화재 냉각시 제어 변수이다.

Cooper, Stroup[20]의 구획(3.66m × 2.44m × 2.44m) 화재실험(최고 65kW 열 방출)을 수행했고, Consalvi 등[30]은 모델의 검증에 위한 로컬 가스 온도와 열 플럭스의 효율적인 측정을 위해 이와 같은 실험 데이터를 사용했다. 이 실험은 일반적인 스프링클러 링크 배치 및 반응 문제의 주요 특성에 주목하였다. 연구를 통해 상부에 형성되는 연기층의 온도가 스프링클러 링크의 열 반응에 주로 영향을 끼치는 것으로 밝혀졌다.

Back 등[36]은 100m³ 규모의 기계장치 보호를 위한 진압 시스템을 개발하였다. 이 연구에서 가연물 경계에서 미스트 시스템에 의한 별다른 문제가 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 연소를 급격히 방해하는 수증기 형성으로 인한 산소 결핍이 진압의 주요 메커니즘인 것을 밝혀냈다.

Ndubizu 등[37]은 직경 0.5m의 헵탄, 탄화수소 풀 화염에 관한 실험을 통해 하부 스프레이가 상부 분사에 비해 더 효과적인 것을 보였다. 이는 상대적으로 작은 스케일(직경 1cm 이하)에 대한 Prasad 등[10]은 메탄올 풀 화염 시뮬레이션과 일

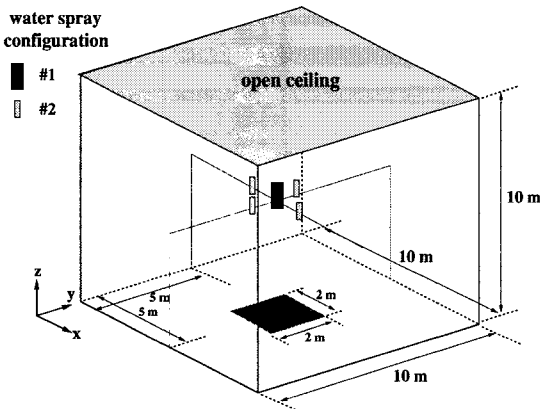


그림 7. 닫힌 공간 내 화재 시뮬레이션 모델 구조도 (4)

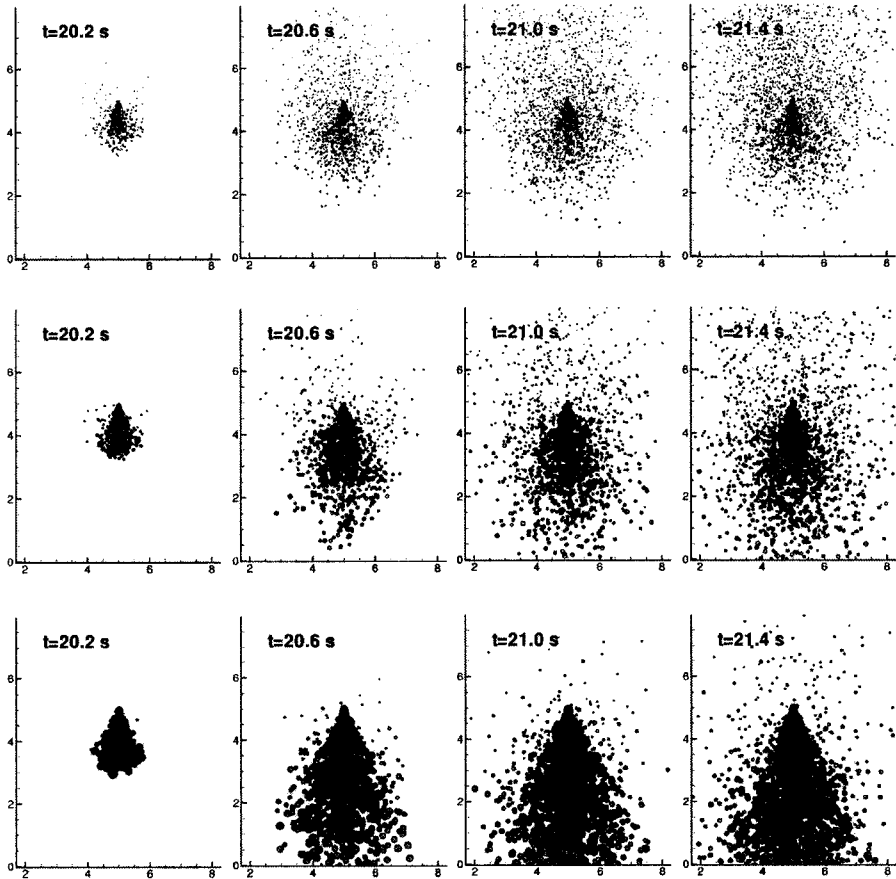


그림 8. 액적의 크기에 따른 스프레이 시뮬레이션($U_{inj}=20m/s$) (4) (위) $X = 200\mu m$, (중간) $X = 400\mu m$, (아래) $X = 800\mu m$ 작은 액적들은 풀화염의 부력에 의해 상승되고, 부력을 극복할만큼 충분한 운동량을 가진 큰 액적들은 바닥까지 도달한다

치한다. 그러나 Prasad 등[24]의 후속 작업을 통해 대형 스케일(0.61m × 1.22m)의 난류 프로판-폴 화염 진압 시스템의 경우에는 상부 분사가 더 나은 배열임을 밝혔다. Ndubizu 등[37]은 산소 결핍과 연료 표면의 직접적인 냉각이 주요 진압 메커니즘인 것에 주목했다.

Marker와 Reinhardt[38]는 비행중인 항공기 내 화재에 대한 다양한 스프레이 시스템의 효율성을 비교하기 위한 실제 스케일 실험을 보고하였다. 여기에서 몇 가지 스프레이 인젝터 타입이 개발되었고, 액적 기화시 흡열반응에 의한 직접 냉각이

주요 진압 메커니즘임을 밝혔다. 57m³ 크기의 항공기에 폐지를 연소시켜 실험하였다. 진압 시간(또는 화재 소요 시간)은 스프레이의 유량이 작아서 앞서 소개한 다른 실험에 비해 상대적으로 길었다.

Chow 등[39]은 열 방사율이 300kW에 달하는 가솔린 풀 구획 화재 실험을 수행하였다. Chow 등[39]은 화염의 형상 및 구조가 연료 표면으로 복사되는 열 플럭스를 제어하고, 수증기 생성량 또한 화염 형상에 영향을 받음을 강조하였다. 스프레이에 의해 화염 형상이 일그러지면서 급속한

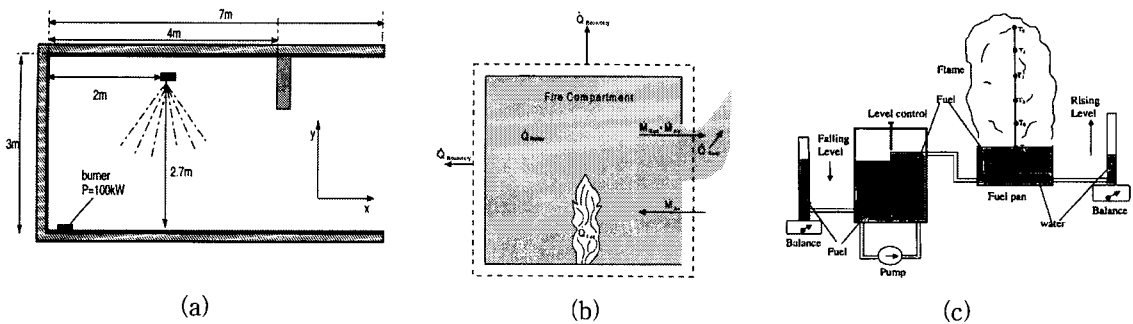


그림 9. 화재 진압 관련 기존 연구의 실험세팅. (a)실험 공간 구조도(40), (b)실험용 제어체적(41), (c)대형 풀화염 실험을 위한 실험장치 개념도(42)

진압이 가능하며, 본질적으로 화염 측면에 미스트를 방출하면 풀에 대한 수직 열 피드백을 감소시키면서 화재가 진압된다. 또한 Chow 등[39]은 풀의 지름/깊이 비율의 중요성을 강조하였다; 일반적으로 지름/깊이 비율이 작을수록 진압이 더욱 어렵다.

4. 국내,외 연구 동향 및 중요성

4.1 국제 동향

앞서 말했듯이 미국, 일본, 영국 등은 화재사고의 심각성을 인식하고 이미 오래전부터 체계적인 화재 연구를 진행해 왔다. 심지어 세계최대 화재보험회사인 FM Global 사는 정확한 리스크 평가를 위하여 자체 화재연구소를 보유하고 있다. 최근 들어 아트리움 형태의 복합 건물이 들어서고, 랜드마크타워의 상징성을 지니는 초고층 빌딩의 건설이 가속화되는 가운데 전 세계적으로 화재 발생에 대한 우려 또한 커지고 있다. 특히나 구조가 매우 복잡하고 인구유동 또한 많은 대형 건물에서의 화재(닫힌 공간 내 화재)에 대한 관심이 증가하고 있다.

이와 같은 시대 흐름을 바탕으로 미국의 NIST (National Institute of Standard & Technology),

Sandia National Laboratory 및 앞서 소개한 FM Global 등이 화재 방재에 관한 선진 연구기관으로 자리매김하는 가운데, 최근 들어서는 중국의 과학기술대학(University of Science & Technology of China)이 대규모 국가지원에 힘입어 급부상하고 있다. 가장 큰 규모의 연구시설을 자랑하는 NIST는 주로 공공의 안전에 관한 연구를 주로 수행하고 있으며, Sandia 국립연구소의 경우 핵무기 운반에 관한 안전 등에 대해 연구하고 있다. FM Global 사의 경우 건물 화재보험이 대부분을 차지하는데 세계무역센터 붕괴에 관한 모델링도 수행한바 있다.

4.2 국내 동향

국내 경우 1995년부터 과학기술부가 주관하는 국책연구사업의 일환으로 방재기술개발사업을 시작한 이래 2003년부터는 핵심연구개발사업으로 방재기술에 대한 연구개발을 추진해 왔다. 현재는 소방방재청에서 방재기술개발사업의 한 분야로서 소방재난에 관한 현장적용중심의 연구개발에 중점을 두고 기술을 개발하고 있다. 하지만 현재 국내 화재대비 방재기술의 필요성 및 그 중요성에 관한 전반적인 인식수준이 저조하고, 뚜렷한 중장기 계획 없이 개별적인 케이스에 대한 단

발적인 수준에 머물러 있다. 때때로 상용코드를 이용하나 대부분 토목/건축분야에 한정되어 있고, 사용된 코드에 대한 이론적 배경이 부족한 것을 볼 수 있다. 화염의 전파나 연기의 유동 등에 대한 해석은 열, 유체 기반 지식이 필요하기 때문에 공학/과학적인 접근이 필요하다. 또한 기본적으로 화재관련 연구를 위한 국내 인프라 기반이 매우 빈약하고, 이는 경제성장에 따른 국내 대규모 초고층 빌딩 건설 계획과 매우 대조적이다. 우리나라의 경우 현실적인 비용 부담으로 인해 활발한 실험 연구가 지연되고 있기 때문에, 결론적으로 저비용 고효율의 모델링을 수행하기 위한 국내 인프라 구축이 절실하다.

4.3 화재 연구의 중요성

국내 기존 연구의 경우 사례분석 수준의 연구는 물론 재난방지를 위한 벤치마킹 DB 자료가 매우 부족했다. 또한 소규모 화재실험의 데이터를 그대로 실제 크기의 케이스에 적용하기 어려운 스케일 문제와 함께 적잖은 비용 등으로 인해 연구 수행에 제약이 많았다. 이러한 이유로 대형화재 연구는 비용 및 시간 등의 경제적 측면에서 볼 때, 실험보다는 모델링 연구에 주력하는 것이

바람직하나 이를 위한 관련 모델링 국내 인프라가 전무한 상황이다.

이에 본 연구팀은 이러한 한계를 극복하고자 화재분야 최고 전문기관인 샌디아 국립연구소 및 NIST와 국제협력연구를 추진 중에 있으며, 국내 최초로 최첨단 화재모델 개발에 착수하여 현재 다양한 화재시나리오를 3차원 모델에 적용하고 있다. 시뮬레이션을 통해 화재 발생시 가장 큰 문제로 지적되는 복사열에 의한 열 손상을 정량적으로 예측 및 평가할 수 있고 더불어 건물 내의 연기 유동에 관한 해석이 가능하다.

5. 응용분야

(1) 고층빌딩 및 아트리움

현대화의 상징인 고층 빌딩의 경우 복잡한 내부구조나 불특정 다수의 인구유동 등의 특성상, 자칫 대형 참사로 번질 가능성이 크다. 화재시 발생하는 인명 피해나 재산 손실은 천문학적 수치에 달하기 때문에 백만분의 일의 확률도 높은 리스크로 간주된다. 일례로 1993년에 발생했던 세계무역센터 폭탄사건 때는 5억 1천만 달러의 보험금이 요청됐으며, 1995년 오클라호마시티 폭탄테러의 경우 보험사들이 1억 2천 500만 달러를 지급한바

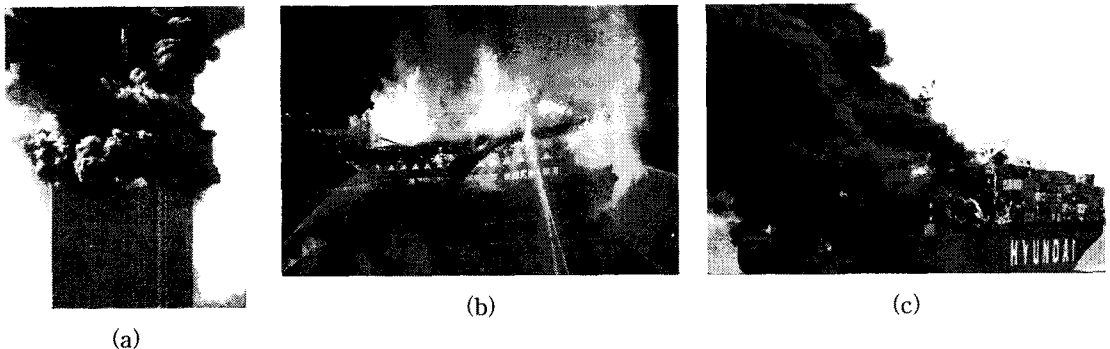


그림 10. (a) 뉴욕시 WTC에서 발생한 테러 관련 화재(2001.09.11), (b) 송레문 화재(2008.02.10), (c) 현대 컨테이너선 포춘호(5천 TEU급) 화재(2006.03.21)

있다. 2001년 발생한 World Trade Center 테러는 뉴욕 맨해튼의 부동산 가격과 더불어 건물내에서 근무하는 직원과 하루 방문객의 수가 각각 4만명과 15만명에 달하는데다, 다수의 비행기 공중납치 사건이 동시다발적으로 발생하는 등 전대미문의 인적, 물적 피해를 감안할 때 정확한 보험금 액수를 추산하기조차 불가능했다.

따라서 화재시 고층빌딩의 높은 리스크를 고려한 더욱 철저한 화재방재시스템의 개발이 절실히 요구되는 상황이다. 화재 발생시 건물 내 자체적인 진압 및 고립을 유도하고, 화재를 실시간으로 모니터링하여 최적의 대피로를 제시할 수 있는 화재대비 관련 기술 및 시스템을 구축시킬 필요가 있다.

(2) 상대적으로 크기는 작지만 화재의 위협에 더 노출되었다고 볼 수 있는, 식당이나 아파트 등에 적절한 방재설비 구비를 촉진함으로써 보험료의 절충안을 마련할 수도 있다.

(3) 화재 진압시 훼손의 우려가 큰 고건축물에 대한 보다 나은 진압환경을 위해서 최첨단 화재감지 및 진압 시스템(열/연기 감지기, 스프링클러)의 도입이 전격 검토되고 있다. 이 때 가장 대표적인 화재진압장비인 스프링클러의 위치, 작동환경 및 노즐의 개수와 타입 등을 고려한 최적의 시나리오를 제시할 수 있다.

(4) 선박의 경우 국제해사기구(IMO) 법규에 의거, 강력한 소방시설규정을 적용받고 있다. 하지만 방재설비의 대부분이 해외 시설에 의존하는 실정을 고려할 때 국내 기술 개발이 시급하다.

6. 결 론

국내 경우 기존 화재연구는 안전성에 대한 고려가 빈약하고 벤치마킹 DB가 턱없이 부족함 등 비용과 스케일 문제를 제외하더라도 그 문제가

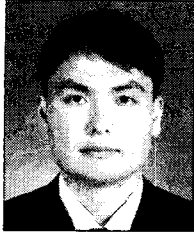
심각했다. 이와 같은 국내 사정을 감안할 때 실험 연구보다는 모델링 연구가 적합한데, 대형화재 모델링을 위한 기본 인프라 구축이 매우 시급한 상황이다. 국내 관련 기관들은 해외 우수 연구기관들과 국제공동연구를 통해 모델링 인프라를 구축함은 물론 풀 화염의 특성을 파악하고 연기유동을 예측할 수 있는 기초 모델링 연구부터 시작해야 할 것이다. 또한 RANS형 모델링을 이용한 실용성 높은 설계기술의 개발도 함께 추진해야 한다. 현대인들이 선호하는 거주 공간이 교외에서 점차 도심의 컴팩트한 수직 공간으로 급속히 바뀌는 추세임을 감안할 때, 이러한 변화에 부응하는 화재대비 안전기술의 필요성을 대중과 관련 정부기관이 함께 인식해야 한다. 이를 통해 우리는 갈수록 증가하는 수직 도시공간의 지속가능한 발전을 도모할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Suk Goo Yoon, and Thomas Blanchat, Alexander Brown, "Benchmark Enclosure Fire Suppression Experiments and Modeling", Suppression and Detection Research and Applications: A Technical Working Conference (SUPDET 2008), 2008.
- [2] P. E. DesJardin, T. J. O'Hern, and S. R. Tieszen, "Large Eddy Simulation and Experimental Measurements of the Near-Field of a Large Turbulent Helium Plume, Phys. Fluids, Vol.16, pp. 1866-1883, 2004.
- [3] Science-Based Prediction at LANL, SciDAC Review, pp33, Summer 2007.
- [4] Yoon SS, Kim HY, DesJardin PE, Hewson JC, Tieszen SR, Blanchat TK, "Unsteady RANS modeling of water-spray suppression for large-scale compartment pool fire", Atomization and Sprays, Vol.17, pp. 1-45, 2007.

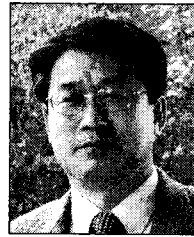
- [5] Lentati A. M. and Chelliah H. K., "Dynamics of water droplets in a counterflow field and their effect on flame extinction", *Combustion and Flame*, Vol.115, pp. 159-179, 1998.
- [6] Ndubizu, C.C., Ananth, R., Tatem, P.A. and Motevalli, V., "On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame", *Fire Safety Journal*, Vol.31, pp. 253-276, 1998.
- [7] Prasad K., Li C., and Kailasanath K., "Optimizing water-mist injection characteristics for suppression of coflow diffusion flames", *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 2847-2855, 1998.
- [8] Prasad K., Li C., Kailasanath K., Ndubizu C., Ananth R., and Tatem P.A., "Numerical modeling of water mist suppression of methane-air diffusion flames", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.132, pp. 325-364, 1998.
- [9] Lazzarini A. K., Krauss R. H., Chelliah H. K., and Linteris G.T., "Extinction conditions of non-premixed flames with fine droplets of water and water/NaOH solutions", *Proceedings of the Combustion Institute*, pp. 2939-2945, 2000.
- [10] Prasad K., Li C., and Kailasanath K., "Simulation of water mist suppression of small scale methanol liquid pool fires", *Fire Safety Journal*, Vol.33, pp. 185-212, 1999.
- [11] Crowe C. T., Sharma M. P., and Stock D.E., "The particle-source-in cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows", *Journal of Fluids Engineering*, pp. 325-332, June 1977.
- [12] Tieszen S. R., "On the fluid mechanics of fires", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.33, pp. 67-92, 2001.
- [13] Rasbash D. J., and Rogowski Z.W., "Extinction of fires in liquids by cooling with water mist", *Combustion and Flame*, Vol.1, pp. 453-466, 1957.
- [14] Rasbash D. J., Rogowski Z. W., and Stark G. W. V., "Mechanisms of extinction of liquid fires with water sprays", *Combustion and Flame*, Vol.4, pp. 223-234, 1960.
- [15] Jianghong L., Guangxuan L., Weicheng F., Bin Y., and Xiyun L., "Study of liquid pool fire suppression with water mists by cone calorimeter", *Journal of Fire Sciences*, Vol.20, pp. 465-477, 2002.
- [16] Grant G., Brenton J., and Drysdale D., "Fire suppression by water sprays", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.26, pp. 79-130, 2000.
- [17] Alpert R. L., "Calculated interaction of sprays with large-scale buoyant flows", *Journal of Heat Transfer*, Vol.106, pp. 310-317, 1984.
- [18] Hoffman N. A., and Galea E. R., "An extension of the fire-field modeling technique to include fire-sprinkler interaction-I. The mathematical basis", *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 1435-1444, 1993.
- [19] Hoffman N. A., and Galea E. R., "An extension of the fire-field modeling technique to include fire-sprinkler interaction-II. The simulations", *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.36, pp. 1445-1457, 1993.
- [20] Cooper L. Y., and Stroup D. W., "Test results and predictions for the response of near-ceiling sprinkler links in a full-scale compartment fire", *US Department of Commerce, National Bureau of Standards*, NBSIR 87-3633, 1987.
- [21] Chow W. K., and Fong N. K., "Application of field modeling technique to simulate interaction of sprinkler and fire-induced smoke layer", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.89, pp. 101-151, 1993.
- [22] Dukowicz J. K., "A particle-fluid numerical model for liquid sprays", *Journal of Computational Physics*, Vol.35, pp. 229-253, 1980.
- [23] Thomas G. O., "The quenching of laminar methane-air flames by water mists", *Combustion and Flame*, Vol.30, pp. 147-160, 2002.
- [24] Crowe C., Sommerfeld M., and Tsuji Y.,

- "Multiphase Flows with Droplets and Particles", CRC Press, 1998.
- [25] Nam S., "Numerical simulation of the penetration capability of sprinkler sprays", *Fire Safety Journal*, Vol.32, pp. 307-329, 1999.
- [26] Patankar S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Taylor & Francis, New York, 1980.
- [27] Hua J., Kumar K., Khoo B. C., and Xue H., "A numerical study of the interaction of water spray with a fire plume", *Fire Safety Journal*, Vol.37, pp. 631-657, 2002.
- [28] Prasad K., Patnaik G., and Kailasanath K., "A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires", *Fire Safety Journal*, Vol.37, pp. 569-589, 2002.
- [29] Vaari J., "A transient one-zone computer model for total flooding water mist fire suppression in ventilated enclosures", *Fire Safety Journal*, Vol.37, pp. 229-257, 2002.
- [30] Consalvi J. L., Porterie B., and Loraud J. C., "Dynamic and radiative aspects of fire-water mist interactions", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.176, pp. 721-752, 2004.
- [31] Yakhot V., and Orszag S., "Renormalization group analysis of turbulence", *Journal Scientific Computing*, Vol.1, pp. 3-51, 1986.
- [32] DesJardin P. E., Gritzo L. A., and Tieszen S. R., "Modeling the effect of water spray suppression on large scale pool fires", *Halon Options Technical Working Conference*, Albuquerque, NM, May 2000.
- [33] Li Y. F., and Chow W. K., "Modelling of water mist fire suppression systems by a one-zone model", *Combust. Theory Modelling*, Vol.8, pp. 567-592, 2004.
- [34] Chow W. K., and Yao B., "Numerical modeling for interaction of a water spray with smoke layer", *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 39, pp. 267-283, 2001.
- [35] Kung H. C., "Cooling of room fires by sprinkler spray", *Journal of Heat Transfer*, Vol.99, pp. 353-359, 1977.
- [36] Back G. G., Beyler C. L., DiNunno P. J., and Hansen R., "Full-scale water mist design parameters testing", *US Coast Guard, Report No. CG-D-03-99*, Groton, CT, 1999.
- [37] Ndubizu C. C., Ananth R., and Tatem P. A., "The effects of droplet size and injection orientation on water mist suppression of low and high boiling point liquid pool fires", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.157, pp. 63-86, 2000.
- [38] Marker T. R., and Reinhardt J. W., "Water spray as a fire suppression agent for aircraft cargo compartment fires", *US Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA), DOT/FAA/AR-TN01/1*, Washington DC, 2001.
- [39] Chow W. K., Gao YI, Dong H., Zou G., and Meng L., "Full-scale burning tests on heat release rate of gasoline fire with water mist", *Journal of Applied Fire Science*, Vol.11, pp. 21-40, 2003.
- [40] J. L Consalvi, B. Porterie, and J. C. Lor명, "Dynamic and Radiative Aspects of Fire-Water Mist Interactions", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.176, pp. 721-752, 2004.
- [41] Gerard G. Back, and Craig L. Beyler, Rich Hansen, "A quasi-steady-state model for predicting fire suppression in spaces protected by water mist systems", *Fire Safety Journal*, Vol. 35, pp. 327-362, 2000.
- [42] Chuka C. Ndubizu, Ramagopal Ananth, and Patricia A. Tatem, "The Effect of Droplet Size and Injection Orientation on Water Mist Suppression of Low and High Boiling Point Liquid Pool Fires", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.157, pp. 63-86, 2000.



윤 석 구

- 1997년 5월 B.S. Engineering, Colorado School of Mines
- 1999년 8월 M.S. Aeronautics & Astronautics, Purdue University
- 2002년 12월 Ph.D Aeronautics & Astronautics, Purdue University
- 1997년 8월~2002년 12월 Research Assistant, Purdue University
- 2001년 1월~2001년 5월 Graduate Instructor, School of Aero. & Astro., Purdue Univ.
- 2003년 1월~2005년 8월 Post Doctoral Fellow, Engineering Science Center, Fire Science & Technology, Sandia National Laboratories.
- 2005년 9월~현재 Assistant Professor, Mech. Eng. Dept., Korea University
- 관심분야 : Fluid mechanics, Two-phase flow, Computational fluid dynamics for both compressible/incompressible flows using finite difference/volume, boundary integral, vortex-particle, monte-carlo methods, Liquid impact physics for vulnerability assessment applications, Hydrodynamic instability



김 호 영

- 1972년 B.S. Mechanical Engineering, Korea University, Korea
- 1974년 M.S. Mechanical Engineering, Korea University. Korea
- 1980년 M.S. Mechanical Engineering, University of Illinois at Chicago, U.S.A.
- 1982년 Ph.D. Mechanical Engineering, University of Illinois at Chicago, U.S.A..
- 1982년 9월~1985년 8월 Associate Professor, Mech. Eng.Dept., Korea Univ.
- 1985년 9월~현재 Professor, Mech.Eng.Dept., Korea Univ.
- 1995년 4월~1997년 5월 Dean of student affairs, Korea Univ.
- 1998년 3월~현재 Director, Research Center for Energy Technology, Korea Univ.
- 2000년 1월~2002년 1월 Director, Korea Techno-complex, Korea Univ.
- 2000년 1월~2003년 12월 President, The Korean Society of Combustion
- 2004년 1월~2005년 12월 Vice President, The Korean Society of Mechanical Engineers
- 2006년 12월~2007년 2월 Vice President of academic affairs, Korea Univ.
- 2007년 2월~2007년 3월 Acting President, Korea Univ.
- 관심분야 : Ignition and combustion of liquid and solid fuels, Group combustion in high temperature environment, Atomization and interaction, Incineration of waste Energy utilization systems, Combustion of I.C. engine



이 민 옥

- 2008년 2월 고려대학교 기계공학과(공학사)
- 2008년 3월~현재 고려대학교 기계공학과 석사과정
- 관심분야: Fire Modeling, Fire Suppression