

구획실의 Backdraft 수치 시뮬레이션을 위한 연소모델 검토

박지웅 · 오창보[†]

부경대학교, 안전공학과

“백드래프트(Backdraft; 역류)”는 플래시오버(Flash over)와 함께 건물내부의 밀폐공간 또는 구획실(Compartment) 화재에서 발생하는 위험한 화재현상 중의 하나이다. 또한 백드래프트는 화재구(Fireball)를 동반하는 폭발성 화재로서 건물 내 거주자나 소방활동을 하는 소방관의 생명을 위협하는 특이한 화재현상이다. 이 때문에 미국에서는 이를 “소방관 살인현상”이라고 부르기도 한다. 구획실 내부에서 화재가 발생하게 되면 가연 연료량에 비해 산소의 양이 부족한 환기부족상태의 화재(Under-Ventilated Fire)로 진행되며 산소가 점차 고갈되게 되면 훈소(Smouldering) 상태를 유지하며 고온 미연가스가 구획실 내부를 채우게 된다. 이 후, 열팽창으로 인해 창문이 깨지거나 혹은 거주자나 소방관이 화재진압을 위해 출입문을 개방되게 되면, 유입되는 공기와 구획실 내부의 고온의 과농한 연료성분이나 미연가스와 혼합되어 가연상태(Flammable condition)에 이르게 되고, 임의의 점화원에 의해 점화가 되면 급격한 온도상승과 열팽창에 기인하여 불이 출입문 쪽으로 급속도로 전파하는 특징을 보이게 된다. 이러한 백드래프트는 현재까지 다른 화재현상들에 비해 상대적으로 많은 연구가 진행되지 못하였으며, 공학적으로도 현상규명이 충분하게 검토되지 못한 상태이기 때문에, 건물내부의 화재안전 관리와 진압을 위한 대책을 마련하는 데에도 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

Fleischmann 등(1994)은 축소 스케일의 밀폐공간 내부에서 백드래프트를 재현한 실험을 성공하였다. 이 후 Gottuk 등(1999)과 Weng 과 Fan(2003)은 실험 혹은 축소규모의 백드래프트 실험과 수치해석적 연구를 통하여, 백드래프트 생성에 중요한 인자는 연료의 질량분율임을 제안하였고, 다양한 연료에 따른 임계 질량분율(Critical Mass Fraction)에 대한 연구가 진행되었으며, 개구부 형상에 따라서 백드래프트 개시조건이 달라질 수 있음을 밝혔다. 그리고 실내공간에 미분무수(Water-mist)를 분사하는 것이 백드래프트를 줄일 수 있는 방안이 될 수 있음을 실험과 수치해석적 연구를 통하여 규명하였다. 백드래프트의 개시조건 및 완화조건을 좀 더 구체적으로 검토하기 위해서 Yang 등(2005)와 Ferraris 등(2009)은 대와동모사(Large Eddy Simulation; LES)로 Subgrid 스케일의 층류 화염편모델(Laminar Flamelet Model)을 적용하여 백드래프트에 대한 전산해석을 수행하였다. 이러한 연구는 백드래프트의 화염전파 과정 해석을 위해 고급 연소모델을 전산해석에 최초로 도입한 점에서 중요한 의의를 가진다. 전산해석 측면에서는 최근 들어 많은 시도가 이루어지고 있으며 큰 발전을 이루어 졌지만, 아직까지 이러한 연구가 실험과의 비교를 통해 충분히 검증된 상태가 아니며, 주로 백드래프트의 전개과정의 합리적인 모사여부에 대해서만 초점을 맞추고 있다. 그 이유는 백드래프트의 전산해석에 사용될 연소모델의 측면에서의 어려움이 있기 때문인데, 이에 대한 해결책으로는 근본적으로 유한화학반응(Finite Chemistry) 효과를 반영한 전산해석연구가 필요하다고 볼 수 있다.

이러한 배경 하에, 본 연구에서는 전산해석을 적용하여 백드래프트의 재현 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 전산해석에는 화재현상의 해석에 많이 이용되는 FDS(Fire Dynamics Simulator) 5.5.3을 적용하였으며, FDS에서 기본적으로 제공하는 혼합분율(Mixture Fraction) 연소모델과, 화염

[†] 연락저자 : cboh@pknu.ac.kr TEL : (051)629-6472 FAX : (051)629-6463

의 전파를 모사할 수 있도록 유한화학반응 효과를 반영할 수 있는 1, 2, 그리고 3단계 총괄반응기구(Global reaction mechanism)를 이용하여 백드래프트의 초기 전개과정을 비교, 검토하였다.

전산해석은 Weng과 Fan(2003)에 의해 수행되었던 축소된 규모의 구획실(1.2 m × 0.6 m × 0.6 m)을 대상으로 하였다. 계산은 FDS를 이용하여 OpenMP 병렬기법으로 수행하였으며, Intel(R) Core(TM) i5 CPU 2.80 GHz 에서 4개의 Core를 사용하여 수행하였다. 공기 유입구는 0.6 m × 0.2 m의 너비를 가지는 가로로 긴 창문을 설치하였으며, 초기($t = 0$ s)에 창문이 깨지며 공기가 고온의 구획실 내부로 유입되는 시나리오로 계산을 진행하였다. 초기 구획실 내부의 연료의 조성은 Weng의 실험에서 백드래프트가 발생하는 조건으로 선정하였으며, 구획실 내부의 온도는 300°C로 공급하였다. Figure 1은 본 연구에서 고려한 기하학적 형상 및 계산영역의 크기를 나타낸 것이다. 계산에 사용된 격자는 총 1,152,000 개가 사용되었으며, 최소 격자크기는 균일격자계로서 1 cm으로 선정하였다.

Figure 2는 혼합분율 모델과 유한화학반응 모델을 각각 사용한 조건에서 개구부 개방($t = 0$ s) 이후 $t = 1.5$ s 시간에서의 온도분포를 도시한 것이다. 먼저, 3단계 총괄반응기구를 고려한 경우는 출입구 개방 이후 구획실 내부의 과농의 연료와 공급되는 산소가 가연상태에서 점화되어 화염이 급속도로 폭발적으로 전파하며 출입구를 통과하는 것을 볼 수 있다. 그리고 1단계 그리고 2단계 총괄 화학반응 메커니즘을 적용한 조건에서도 정성적으로 동일하게 백드래프트 현상을 재현할 수 있었다. 이에 반해, 혼합분율 모델을 적용한 조건에서는 출입구 개방 이후 유입되는 공기가 구획실 내부의 연료성분과 만나 충분한 혼합이 되었음에도 불구하고 국소적인 점화는 발생하지만, 급격한 속도로 화염이 전파하는 현상은 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이 혼합분율 연소모델은 화염전파 과정을 고려할 수 없는 것에 기인하는 것으로서, 백드래프트를 수치적으로 재현하기 위해서 총괄반응기구를 적용하는 것도 충분한 의미를 가질 수 있음을 확인하였다.

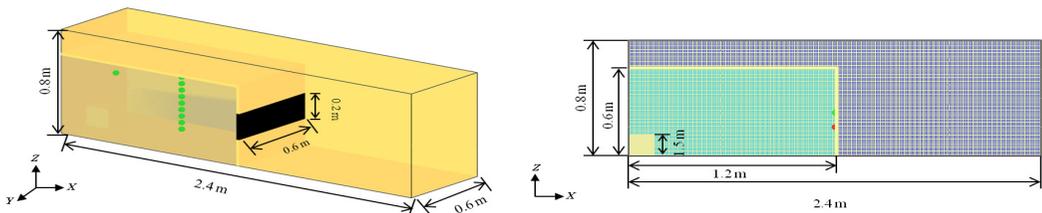


Figure 1. The geometry of reduced scale compartment and computational domain.

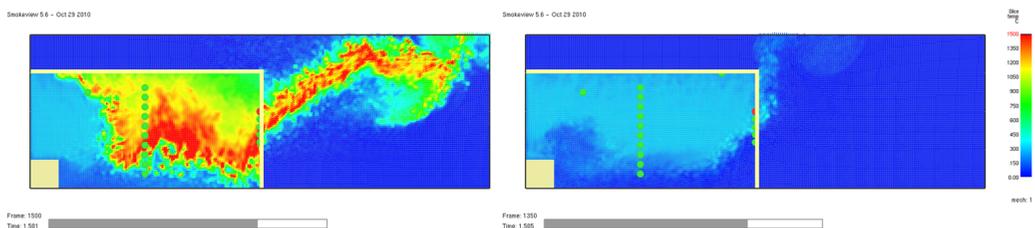


Figure 2. Temperature distribution at 1.5 s after window breaking; finite chemistry (3-step global reaction mechanism) (left) and mixture fraction model (right).

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 : 2010-0012480).