

Smoldering 연소로 인한 화재사고 조사보고 소개 및 이론적 해석

Investigation and Theoretical Analysis of a Fire Accident Caused by Smoldering Combustion

김 연 승* · 변 영 철* · 황 정 호**

Yone-Seung Kim, Young-Cheol Byun and Jung-Ho Hwang

Abstract

Smoldering is a non-flaming combustion mode, characterized by thermal degradation and charring of the virgin material, evolution of smoke and emission of visible glow. A big fire may occur even in a confined environment having a limited amount of oxygen, due to smoldering combustion through a porous solid material. This paper presents a theoretical analysis on the effect of smoldering combustion on fire occurrence based on a report about fire investigation of a real fire accident. It is assumed that the propagation of the smolder wave is one-dimensional, downward, opposing an upward forced flow and steady in a frame of reference moving with the smolder wave. Smoldering combustion is modeled by a one-step reaction mechanism, without considering pyrolysis. It is found that dominant parameters controlling smoldering combustion include mass flux of oxidizer entering the reaction zone and void fraction of solid fuel. It is also found that the mechanism of transition to flaming is critically influenced by these two parameters.

Key Words : fire investigation, smoldering combustion, wave propagation, mass flux of oxidizer, void fraction of solid fuel

국문 요약

산화제의 양이 충분치 못한 밀폐된 공간에서는 화재가 발생하지 않으리라는 기대를 깨고, 다공성 물질내부에서 공극안에 있는 산화제를 이용하여 서서히 연소되는 smoldering 반응을 통하여 대형 화재가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 하나의 실제 화재 사건을 화재 조사 방법에 의하여 기술한 보고서를 바탕으로 하여 smoldering 연소가 화재의 발생에 미치는 영향을 예시하였으며, 예시된 사고의 smoldering 연소를 강제대류에 의한 하향식 역방향 smoldering으로 모델링하였다. 화학반응으로는 열분해가 없는 1 단계 반응이 채택되어, 온도 및 산화제의 공간적 분포와 smoldering의 전파속도를 수치적으로 모사하였다. 수치결과로서 유입되는 산화제의 양과 연료의 공극률이 반응지역의 전파속도를 결정하는 가장 우세한 인자로 파악되었다. 그러므로 smoldering에 의한 화재 발생시 유입되는 산화제의 양과 연료의 공극률과의 관계를 알고 있다면 주어진 연료의 공극률에 대하여 유입되는 산화제의 양을 제어함으로써 불길로의 천이를 억제할 수 있음을 제시하고 있다.

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

1. 서론

현재 국내에서 가동중인 일부 공장은 기기나 설비, 운행측면에서 20년 이상 노후화 되어있어 기본적인 폐기물 처리나 대기오염 등 환경오염 측면에서 외국 선진국에 비해 미비하며 현 기준치를 훨씬 초과하는 경우가 많다. 또한 시설낙후로 인한 전기합선, 화학반응 등의 화재위험에 대비한 기본적인 방재설비나 대체설비조차 마련하지 못하고 있으며, 화재의 근본 원인에 대한 인식조차 부재한 실정이므로 예방적 차원에서의 화재에 대한 현실적인 접근과 원인규명 시도가 필요하다.

화재의 원인에는 가스 폭발 등 여러 요인이 있을 수 있으나, Smoldering 연소반응(서서히 타들어 가는 현상)은 최근 들어 잠재적인 화재 발생 원인으로써 화재 안전 영역의 관점에서 특별한 관심을 가지고 연구가 시작되고 있는 분야이다. Smoldering 연소반응은 밀폐된 장소에 나무나 종이 등이 쌓인 곳, 기자재 창고, 셀룰로즈 등의 화학분말 저장소, 과부하가 걸릴 수 있는 전력선 및 컴퓨터 케이블 등에서 일어난다. 이와 같은 재료에 있어 smoldering 연소반응 과정은 일단 지속되면, 반응 구역이 넓어짐에 따라 갑작스럽게 불길(flaming)로 천이될 수 있다. Smoldering 연소반응은 공기기포를 포함하고 있는 다공성 물질에서 주로 발생하므로, 연소과정이 대류 열전달이나 지속된 산화제의 공급없이 전파될 수가 있어, 외부로부터의 공기의 유입이 차단된 공간에서도 smoldering이 발생할 수 있다. 더우기 smoldering 연소반응은 화학반응의 불완전성이 높아 인체에 매우 해로운 유독성 가스를 다량으로 배출하므로, 기체상태의 연소 작용인 화염보다 훨씬 더 위험할 수 있다.

1986년 4월의 광양만 부두에서 발생한 황산 분진에 의한 화재사고, 1988년 11월과 1990년 12월의 여천공단의 호남 화력발전소에서 발생

한 미분탄 버너 폭발 사고, 1994년 6월의 대림 산업 공장에서 발생한 분진에 의한 폭발사고 등을 보면 처음 점화되어 화염 및 폭발로 진행되기 전에 smoldering 연소와 유사한 현상이 발생할 수 있으며, 특히 1996년 여천환경의 폐기물 창고 화재 사고 등은 관계부처에서 아직 원인불명이라 규정하고 있으나, 일련의 상황으로 미루어 보면 smoldering 연소반응에 의하여 점화된 폭발/화재사고라 조심스럽게 짐작할 수 있을 것이다. 이러한 smoldering 연소반응은 일부공장의 기기나 설비, 운행측면에서 20년 이상 노후화 되어있고, 시설낙후로 인한 전기합선, 화학반응 등의 환경에서 쉽게 발생할 수 있다.⁽¹⁾

이러한 화재 특성의 규명을 위해서는 기존의 화재에 대한 전체 시나리오를 설명하는 화재 조사(fire investigation)가 필요하다. 이러한 화재 조사 방법은 단순한 화재 원인을 설명하는 것에만 국한되지 않고 화재의 전과 특성 등의 화재 공학적 설명을 요구한다. 본 논문에서는 먼저 실제 발생한 화재사고를 화재 조사 방법에 의해, 초기 점화단계에서 smoldering 연소를 거쳐 건물 전체에 화염이 전파되는 과정을 분석한, Quintiere⁽²⁾의 보고서 내용을 소개한다. 그런 뒤에 smoldering 연소를 설명하고 이론을 도입시켜 화재 사고를 분석하기로 한다.

2. 화재조사 (Fire Investigation)

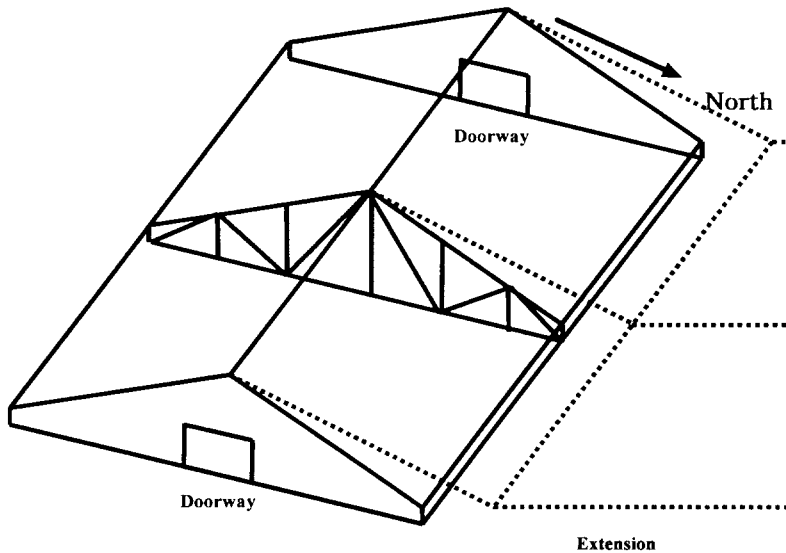
화재 사고는 1978년 8월 3일, 뉴욕 브록클린의 한 슈퍼마켓에서 건물의 확장공사 중에 발생하였다. 이 건물은 그림 1 (a)와 같이 북쪽 벽 부분을 따라서 2층으로 연결되는 전형적인 슈퍼마켓으로 트러스 버팀목과 거실, 지붕으로 되어있는 가장 위층(loft)은 모두 목조 구조물로 이루어져있다. 그리고 북쪽으로는 건축물 확장공사를 위해서 새로운 지붕 연결

부분이 기존의 지붕 위로 벽을 따라서 연결되어있고 사이에 비어있는 공간에 목재 잔재 등이 존재하고 있었다(그림 1 (b)). 슈퍼마켓이 오전 8시에 영업을 시작하므로 공사는 일반적으로 오전 7시까지 진행되는데 조사에 의하면, 화재는 오전 6시경에 시작되어 오전 9시 30분에 건물이 붕괴되었다. 그 원인으로는 기존의 지붕과 신축중인 지붕사이의 공간에서 인위적인 발화에 의해서 점화가 이루어진 것으로 추정되었다.

이 화재 사건을 각 단계별로 구분 지어 특징을 요약하면 다음과 같다.

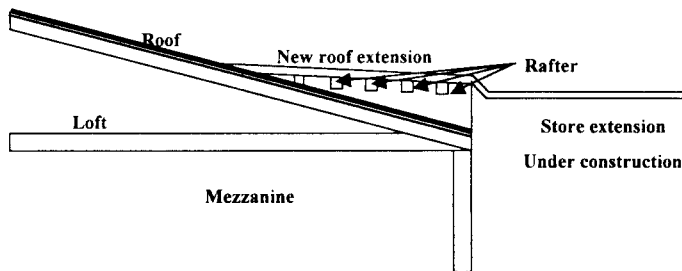
2.1. 점화 단계 (오전 6:00 경)

확장부분 구조물에 인접한 지붕 부분에서 불씨가 지붕 연결부에 있는 구멍을 통해서 종이류와 함께 인위적으로 유입되어 화재가 시작되었다(그림 2 (a)).



(a)

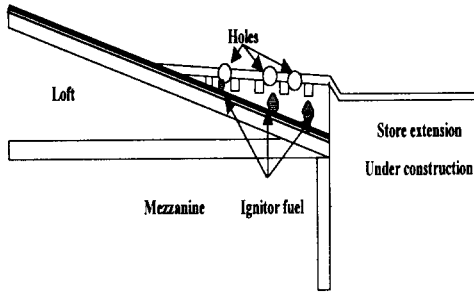
(a) 화재가 발생했던 건물의 구조



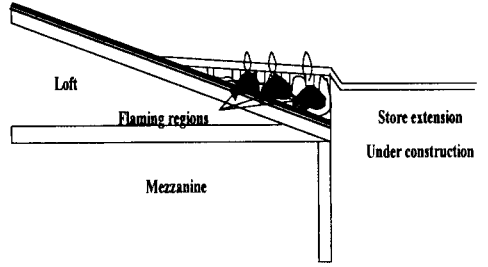
(b)

(b) 건물의 지붕부와 신축중인 지붕의 연결부 구조

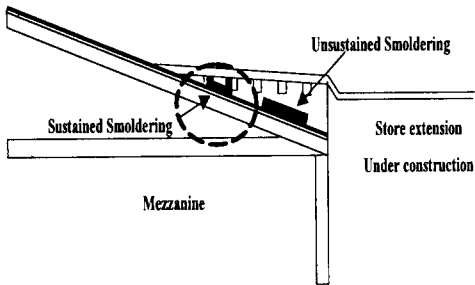
그림 1



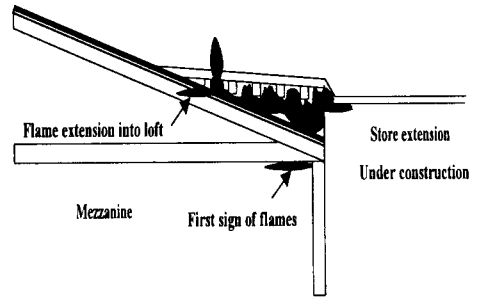
(a)



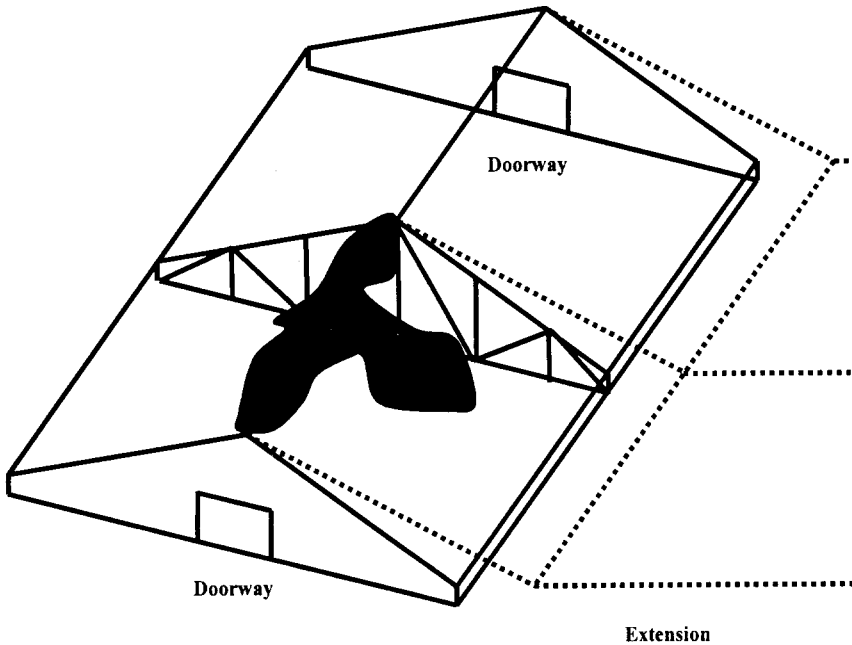
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 2

- (a) 점화되는 과정 (b) 초기 화염의 성장단계 (c) Smoldering 연소반응 과정
 (d) Smoldering 연소반응에서 성장한 화염의 형태 (e) 성장한 화재의 전체적인 개략도

그 후 화염은 트러스 버팀목 사이의 새 지붕을 받치고 있는 서까래들을 통해서 약 30초~1분 경과된 후에 100~500 kW의 열용량을 가지면서 연기와 함께 전파되어 약 2분 후 1000 kW까지 확장된다(그림 2 (b)). 이때 서까래 아래 부분에 공기가 들어와서 화염이 형성될 만한 공간이 존재하지만 이 부분은 임시 칸막이에 의해 둘러싸여져 있어서, 부족한 공기와 연소 생성물 때문에 화염 성장의 한계에 다다르게 된다.

2.2. smoldering 연소 단계

밀폐된 공간에서의 산화제의 결핍으로 인하여 기체상에서 화염 전파는 이루어지지 못하지만 일단 연소가 시작된 지붕 널빤지는 서서히 타들어 간다. 더욱이 새 지붕 위쪽의 서까래 부분(그림 2 (c)에서 원으로 표시)에 의해 발생하는 비교적 강한 복사열이 약 2 cm 두께의 인접한 지붕 널빤지로 전달되어, smoldering 연소를 도와준다. 이와같은 지속적인 연소는 나무 공극을 통하여 1~6 cm/min의 전파속도⁽³⁾로 약 2시간 동안 유지된다. 이러한 smoldering 연소반응으로 인해 대략 오전 8:30 전에 맨 위층과 새 지붕에 의해 형성된 공간사이에 존재하는 널빤지에 구멍이 형성되었으며, 그 구멍을 통하여 약 25 cm/sec의 속도⁽³⁾로 공기가 유입되면 smoldering 연소가 불길로 갑자기 천이될 수 있다.

2.3 화염시작 단계 (오전 8:30 경)

2층 북쪽 벽과 천장에서 화염이 관찰되며, smoldering 연소반응 단계에서 생성되었던 맨 위층과 지붕 공간 사이의 구멍은 공기 유입 속도 증가와 함께 커지면서 화염 연소의 세기와 전파속도를 증가시키게 된다(그림 2 (d)). 따라서, 밀폐된 공간에서의 갑작스런 열에너지 상승으로 인한 화염분출로 인해서 약

오전 8:30 경, 거실부분의 벽과 천장에서 처음으로 화염이 관찰된다. 그러나 이 시기에 이르기 전까지는 공기의 흐름으로 인해서 연기가 맨 위층의 천장을 통과하지 못하므로 맨 위층에 있던 사람도 화재의 증후를 알 수 없었다.

2.4 화재 성장

구멍으로부터의 화염 전파가 맨 위층의 나무 천장 위, 아래 부분에서 급격하게 이루어져서 2~3분 경과된 8:35 경에는 그림 2 (e)와 같이 화염이 다음 트러스 버팀목으로 이동한다. 이 시간은 30초의 점화시간과 150 kW/m²의 에너지 발산율을 가정하여 대략 1분 후에 발생하는 플래시오버를 고려하였을 경우의 화염 전파 모델⁽⁴⁾에서 나온 결과이며 맨 위층 전체 부분에 화염이 전파되는데는 대략 5~10분 정도 소요된다. 결국 두께 7 cm의 트러스 버팀목은 단위 면적당 질량 연소율 11 g/m²sec을 사용할 경우 대략 35분 경과된 오전 9:30 경 다 타서 결국 건물이 붕괴된다.

3. Smoldering 연소

Smoldering 연소반응이란 화재의 전 단계로, 다공성 물질을 통과하면서, 화염없이 다공성물질의 연료 표면에서 반응하며 전파되는 연소의 한 형태로 정의된다.⁽⁵⁾ 다공성 물질에서는 각각의 공극에 산화제가 존재하여 연소반응이 외부로부터의 산화제 공급이 없이도 스스로 전파되고, 연료의 내부에서 발열반응이 일어나므로 일단 반응이 시작되면, 발견하거나 소멸시키기 어렵다. 따라서 smoldering 연소반응은 주로 공극이 있고, 산화제의 공급이 제한된 지역이나 외부에서 유입되는 미량의 산화제로 연소되는 환경에서 발생할 가능성이 높다.⁽⁶⁾ Smoldering 연소에는 산화제의 유입방향과 반응면의 전파방향에 따라 그 특성이 달라지며,

이때 부력의 존재 역시 영향을 미치게 된다. Smoldering 연소는 또한 산화제의 유입이 자연대류에 의해서 발생하는지 아니면 강제대류에 의해서 발생하는지에 따라 구분될 수도 있다.

기존의 대부분의 연구들은 산화제의 조성과 유입속도, 압력이 smoldering 반응에 미치는 영향에 중점을 두고 실험 및 계산을 실시하였으며, 최근에 smoldering 연소시 발생하는 CO, CO₂, HC 등의 수준과 이에 대한 화재 감지 실험이 수행되었다.⁽³⁾⁽⁵⁻⁸⁾ 한편 smoldering 연소반응에 대한 연구는 우주공간에서의 화재방지 차원에서 적용할 수 있는 방향으로 NASA와 U. C. Berkeley에서 다음과 같은 4가지 주제에 대해 활발히 진행중이기도 하다. 그 내용은 먼저 미소 중력 하에서의 smoldering,⁽⁹⁻¹⁰⁾ 정방향 진행 (자연, 강제) smoldering,⁽¹¹⁻¹²⁾ 역방향 진행 (자연, 강제) smoldering,⁽¹³⁾ 그리고 2차원 smoldering 연소에서 화염으로의 천이⁽¹⁴⁻¹⁵⁾ 등이며 이러한 주제들은 일반 중력 하에서 또는 미소 중력 하에서 발생할 수 있는 smoldering 연소 반응을 예측하고 방지할 수 있도록 기본적인 특성을 파악하는데 중점을 두고 있다. 특히 연료를 반드시 다공성 물질 뿐 만 아니라 연소 가능한 재료, 복합재료 등 산화제의 공급이 제한적인 경우의 모든 상황에 관하여 연구가 진행중이다.

4. 모델링

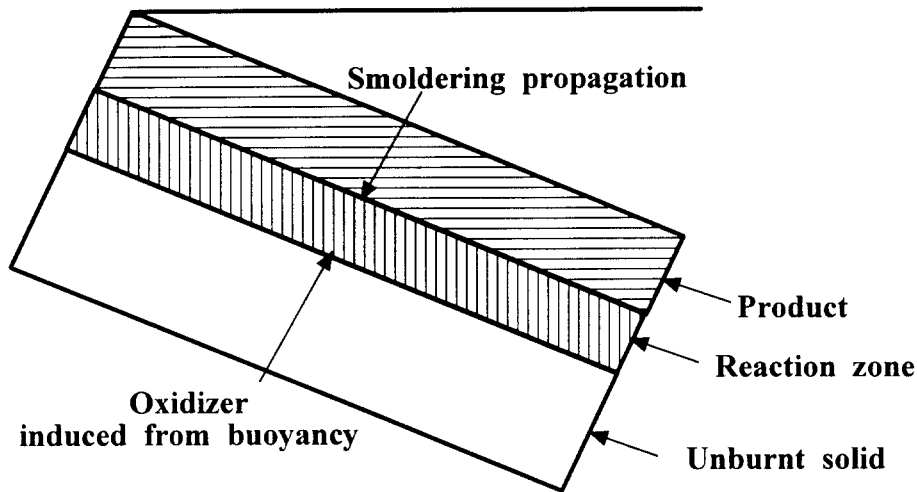
앞 절에서 언급한 화재사례 조사에서도 볼 수 있듯이, 화재 발생에 대한 징후도 없이 약 2 시간 동안이나 진행되었던 smoldering 연소 현상의 위험성과 중요성을 인식할 수 있고 이 연소 현상에 대한 보다 근본적인 연구가 필요하다고 할 수 있다. 본 논문에서 고려된 화재사건 경우에서의 smoldering 연소를 구분하면, 그림 3 (a)와 같이 연료로 나무를 사용하며, 자

연대류에 의한 하향식, 역방향 smoldering 전파라고 볼 수 있다.

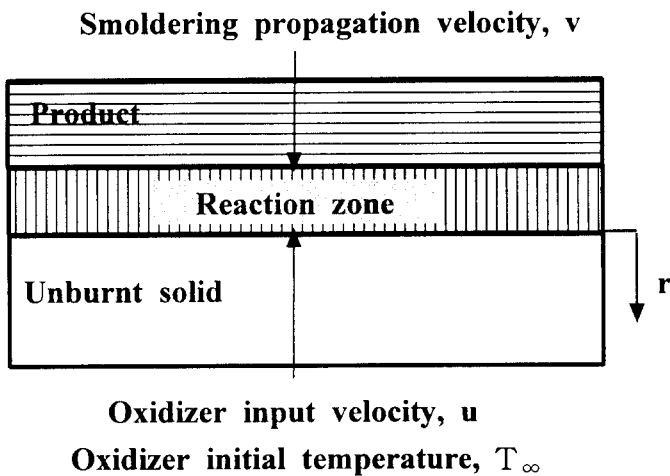
본 연구에서 채택된 smoldering의 모델이 그림 3 (b)에 제시되었다. Smoldering 반응지역이 아래 방향의 미연연료로 전파되고 있으며, 이 때 부력의 영향을 고려하지 않는 대신 일정속도의 산화제가 미연연료쪽에서 반응지역으로 유입된다는 가정으로 대체하였다. 따라서 본 연구에서 채택된 smoldering은 하향식 역방향 강제대류 smoldering이다. 연료로는 나무 대신에 물성치가 알려져 있는 폴리우레탄⁽⁶⁾을 사용하였다. Ohlemiller⁽⁵⁾는 폴리우레탄 폼에서의 smoldering 연소과정을 크게 2가지 반응, 즉, char와 가스를 먼저 생성하는 열분해과정과 그 후 ash를 생성하는 char의 산화과정으로 모델링하였다. 여기서 Ohlemiller와 Lucca⁽¹⁶⁾는 역방향 smoldering 연소과정에서 첫 번째 반응인 열분해 과정은 전체 반응과정에서 생략될 수 있다고 하였으며 또한 Dosanjh 등⁽⁶⁾도 여기서 두 번째 반응인 char의 산화과정만을 고려한 식(1)과 같은 1 단계 반응 구조로 가정, 수정하여 해석할 수 있다고 하였다. 이러한 가정은 반응지역에서 방출되는 에너지에 비해서 열분해에 의한 에너지 소비량이 매우 작기 때문에 열분해 과정은 전체적인 온도 분포에 거의 영향을 미치지 못한다고 볼 수 있다.

Dosanjh 등⁽⁶⁾은 산화제의 밀도와 다공성 연료의 물질의 차이가 주위압력에 비례한다는 사실을 착안해, 주위압력을 변화시켜 부력의 크기를 변화시켜 smoldering 연소반응의 일반적인 성격을 실험과 수치계산을 수행하였다. 수치계산을 위해서 smoldering 연소반응을 부력의 효과를 고려한 역방향, 1차원, quasi-steady로 가정하였다.

그리고 기체상태의 산화제와 고체상태의 연료는 부분적으로 열적 평형상태에 있으며 열적 상태량들은 일정하다고 보고 1단계,



(a)



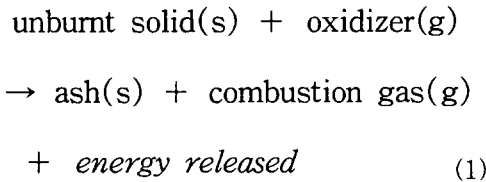
(b)

그림 3. Smoldering 연소반응 구조 (a) 실제 화재 사례 (b) 단순화된 모델링

finite rate 화학 반응으로 모델링하여 활성화 에너지 점근법(activation energy asymptotic method)에 의해 온도분포와 smolder 전파속도에 대한 해석해를 구하였다. Schult 등⁽¹⁴⁾은 Dosanjh 등⁽⁶⁾에 의한 결과를 확장하는 연구로서 Dosanjh 등이 사용한 가정하에서 소화 조건에 대한 예측과 특히 재점화 및 화염천이의

결과를 야기할 수 있는 고체연료의 열분해 정도를 고려한, 화학적 변형 정도(연료 부족 조건 및 산화제 부족 조건)에 중점을 두고 활성화에너지 점근법을 이용하여 일정하게 전파되는 smolder 전파해를 구하였으며 기체 유속, 산화제 농도, 온도 분포와 고체연료의 분해정도를 수학적으로 예측하였다.

이러한 Schult 등⁽¹⁴⁾과 Dosanjh 등⁽⁶⁾은 복잡한 수식전개와 수많은 무차원수를 도입하여 반응속도와 온도분포를 구했지만, 본 논문에서는 반응면의 온도를 안다고 가정하여 반응면 후류로의 온도분포 등을 구하였다. 즉, 1단계 반응 구조가 열분해 과정이 없다는 가정이므로 반응면 뒷부분의 온도분포는 후류의 산화제 유동과 공극에 존재하는 산화제에 의해서 결정된다.⁽¹⁷⁾ 따라서 그림 3 (b)와 같은 역방향 smoldering 연소반응의 구조는 다음과 같이 단순화된다.



4.1 지배방정식

Smoldering 전파속도 v 와 같이 움직이는 좌표계를 선택할 때, 고체 유입속도는 v 가 된다. 그리고 산소의 유입속도와 밀도를 u, ρ_g , 고체의 공극률과 밀도를 ϕ, ρ_s 라고 하면, 반응면으로 유입되는 고체의 질량유속 \dot{m}_s'' 와 산소와 연소가스의 혼합기체의 질량유속 \dot{m}_g'' 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_s'' &= (1 - \phi) \rho_s v, \quad \dot{m}_g'' \\ &= \phi \rho_g (u + v) \end{aligned} \quad (2)$$

이 때 질량 보존의 법칙에 의해

$$\begin{aligned} \dot{m}'' &= \dot{m}_s'' + \dot{m}_g'' \\ &= (1 - \phi) \rho_s v + \phi \rho_g (u + v) \\ &= \text{const} \end{aligned} \quad (3)$$

Smoldering 전파속도 v 는

$$v = - \frac{1}{Y_o} D \frac{dY_o}{dr} \quad (4)$$

로 정의되는데 Y_o 는 산화제의 질량분률이고 D 는 산소의 질량확산율을 나타낸다.

미소구간 dr 에 대하여 에너지 보존 법칙을 적용하면

$$\frac{d\dot{Q}_{cv}}{dr} = \dot{m} C_{eff} \frac{dT}{dr} \quad (5)$$

가 된다. C_{eff} 란 반응면의 연료와 산화제의 평균 열용량으로서 $C_{eff} = \epsilon_{us} C_{us} + \epsilon_o C_o$ 이다. ϵ_{us} 와 ϵ_o 는 각각 연료와 산화제의 질량 유속분률로 다음과 같다.

$$\epsilon_{us} = \frac{Y_{us} \dot{m}_s''}{\dot{m}''}, \quad \epsilon_o = \frac{\dot{m}_o''}{\dot{m}''} \quad (6)$$

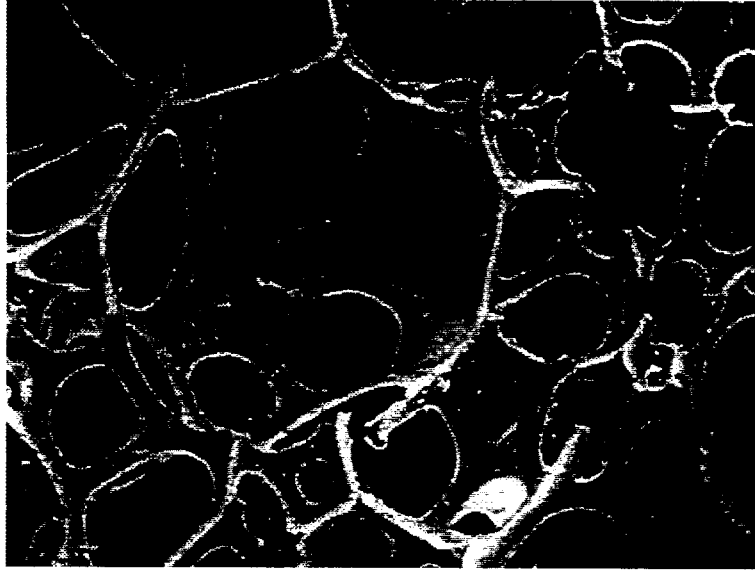
이 때 Y_{us} 는 미연소된 연료의 질량분률이다. 또한 \dot{Q}_{cv} 는 전도와 대류에 의한 열량과 산화제에서 발생하는 열량의 합으로 표시되고

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cv} &= A \left(k_{eff} \frac{dT}{dr} + \right. \\ & \left. k_{rad} \frac{dT}{dr} - \dot{Q}_o'' \right) \end{aligned} \quad (7)$$

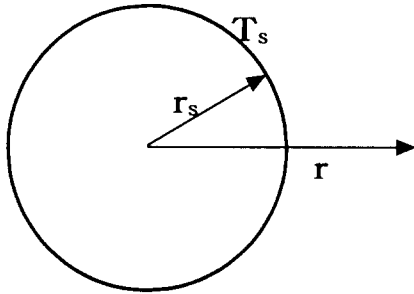
와 같이 된다. A 는 단면적, k_{eff} 는 연료와 산화제의 평균 열전도 계수로써

$k_{eff} = \phi k_o + (1 - \phi) k_{us}$, k_{rad} 는 연료와 산화제의 평균 열복사 계수이다.

산화제에서 발생하는 단위 면적당 열량, \dot{Q}_o'' 은 단위 질량당 에너지인 q_o 를 도입하여, $\dot{m}_o'' q_o$ 라 표시할 수 있으므로, 결국 식 (5)는 에너지 보존의 법칙의 최종 형태는



(a) Electron microscope photograph of a polyurethane foam



(b) 산화제의 형상

그림 4

$$\begin{aligned} \dot{m}'' C_{\text{eff}} \frac{dT}{dr} - (k_{\text{eff}} + k_{\text{rad}}) \frac{d^2T}{dr^2} = \\ - q_o \frac{d\dot{m}_o''}{dr} \end{aligned} \quad (8)$$

가 된다. 이를 적분하고 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{m}'' C_{\text{eff}} (T - T_{\infty}) - (k_{\text{eff}} + k_{\text{rad}}) \frac{dT}{dr} = \\ q_o \dot{m}'' (\epsilon_{o\infty} - \epsilon_o) \end{aligned} \quad (9)$$

라고 표현할 수 있다. 즉, 이 식에서 온도분포를 알면, 질량유속분포의 분포를 알 수 있게 된다.

4.2 smoldering 반응의 온도 분포

polyurethane을 전자현미경으로 관찰하면 공극의 형상은 그림 4(a)와 같이 타원체⁽⁶⁾이나, 이 공극에 차있는 산화제를 구로 가정하였으며, 공극의 유효직경을 산화제 구의 직경으로 가정하였다. 또한 반응면에 존재하는 무수한 구형의 산화제들 중에서 하나의 구형 산화제에서 후류로의 열전달이 전체 온도분포를 대표할 수 있다고 가정하였다.

그림 4 (b)처럼 산화제의 형상이 구형이고 물성치가 일정하고 Lewis 수는 1이라는 가정 아래 1차원 에너지 방정식은

$$\frac{d(r^2 \frac{dT}{dr})}{dr} = \frac{\dot{m}c_o}{4\pi k_o} \frac{dT}{dr} \quad (10)$$

으로 표현되며 여기서 k_0 는 산화제의 열전도 계수이다. 경계조건은 $r = r_s$ 에서

$$T = T_s \text{ (반응면 온도), } r \rightarrow \infty \text{에서}$$

$$T = T_\infty \text{ (산화제 유입온도) 이다.}$$

편의상 $\frac{C_0}{4\pi k_0} \equiv Z$ 라고 두고 적분,

경계조건을 적용시키면, 다음과 같은 결과를 얻게된다.

$$T = \frac{(T_\infty - T_s)\exp(-Z\dot{m}/r) - T_\infty \exp(-Z\dot{m}/r_s) + T_s}{1 - \exp(-Z\dot{m}/r_s)} \quad (11)$$

4.3 질량 유속 분률

식 (9)에서 유도된 에너지 방정식에서 온도 구배를 알면, 질량 유속 분률의 분포를 예측할 수 있다. 온도구배는 식 (11)에서 유도된다.

$$\frac{dT}{dr} = \frac{(T_\infty - T_s)\exp(-Z\dot{m}/r)}{1 - \exp(-Z\dot{m}/r_s)} Z\dot{m} \frac{1}{r^2} \quad (12)$$

이 식을 식 (9)에 대입하면

$$\epsilon_0 = \epsilon_\infty - \frac{C_{eff}(T - T_\infty)}{[1 - \exp(-Z\dot{m}/r_s)]q_0}$$

$$= \frac{[\dot{m} C_{eff}(T - T_\infty)r^2 + Z\dot{m}(k_{eff} - k_{rad})(T_\infty - T_s)]\exp(-Z\dot{m}/r)}{r^2[1 - \exp(-Z\dot{m}/r_s)]q_0}$$

이 유도된다.

4.4 전파속도 분포

식(9)에서 반응면의 조건인 $T = T_s$, $\epsilon_0 = 0$, $dT/dr = 0$ 을 적용시키고,

$$\epsilon_\infty = \frac{\dot{m}_\infty}{\dot{m}} \text{에 식 (2)를 대입시켜 다시}$$

전개시키면, smoldering 전파 속도가 유도된다.

$$|v| = \frac{q_0 \dot{m}_\infty}{(1 - \phi)\rho_{us}C_{eff}(T_s - T_\infty)} - \frac{\phi\rho_0 u_\infty}{(1 - \phi)\rho_{us}} \quad (14)$$

5. 결과 및 고찰

표 1과 같은 물성치⁽⁶⁾를 기본으로 식 (11)을 이용하여 반응면에서 후류의 온도분포를 그래프로 표현하면 그림 5와 같다.

표 1 수치계산에 사용된 물성치

유입되는 산화제의 초기 온도, T_∞	300 K
반응면의 온도, T_s	800 K
반응면으로 유입되는 고체의 mass flux, \dot{m}_s	0.004 kg/m ² s
반응면으로 유입되는 기체의 mass flux, \dot{m}_g	0.001 kg/m ² s
고체의 mass flux fraction, ϵ_s	0.8
기체의 mass flux fraction, ϵ_g	0.2
연료의 void volume fraction, ϕ	0.97
연료의 밀도, ρ_{us}	1150 kg/m ³
산화제의 밀도, ρ_g	1.205 kg/m ³
연료의 열용량, C_s	1.7 kJ/kg K
산화제의 열용량, C_g	1.002 kJ/kg K
산화제의 열전도 계수, k_g	0.12 W/mK
연료와 산화제의 평균 열전도 계수, k_{eff}	0.047 W/mK
연료와 산화제의 평균 열복사 계수, k_{rad}	0.005 W/mK
산화제의 단위 질량당 발생 에너지, q_0	12,300 kJ/kg
공극에 존재하는 산화제의 평균직경, d_s	250 μ m

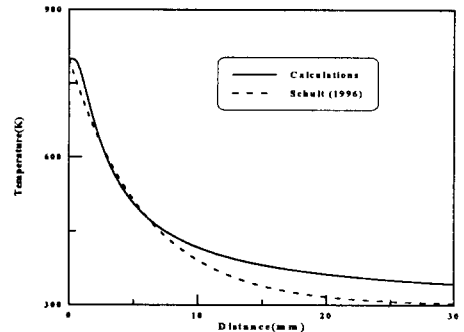


그림 5 거리에 따른 온도 분포

반응면의 온도는 Torero 등에서의 실험치를 이용하여 약 800 K라고 가정하고,⁽¹²⁾ 유입되는 산화제의 온도는 상온인 300 K로 하였다. 참고로 Schult 등⁽¹⁴⁾에서 수행한 온도 분포식으로 그린 그래프와 비교할 때, 서로 잘 일치하고 있다. 반응면에서의 반응속도와 후류의 고체생성물과 기체생성물의 열전달 효과를 모두 고려하였다. 온도는 반응면에서 급격한 기울기로 떨어지다가 상온으로 수렴하는 모양을 띤다. Schult 등의 온도분포와 크게 차이가 나지 않으므로 열분해를 고려하지 않을 경우, 열전달의 주된 매개체가 후류의 산화제라고 결론지을 수 있다. 이는 열전도 계수를 표현할 때, $k_{eff} = \phi k_o + (1 - \phi)k_{us}$ 로 표현되고, 공극률인 ϕ 가 0.97이므로 k_{eff} 는 거의 산화제의 열전도계수와 거의 비슷하다고 볼 수 있기 때문이다. 그러므로 char의 산화과정을 고려하지 않는다면 반응면의 후류는 산화제에 의해서 대부분의 열전달이 일어난다고 가정할 수 있다.

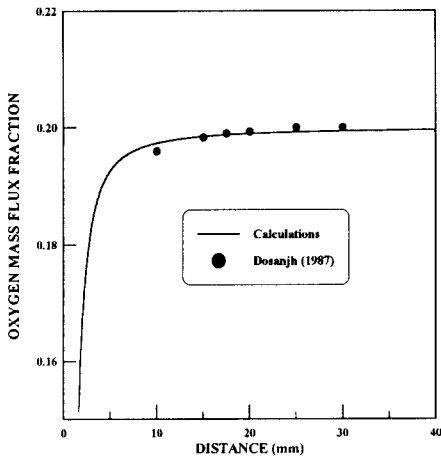


그림 6 산화제의 질량 유속 분률의 거리에 따른 분포

그림 6은 식 (13)을 이용하여 반응면 후류의 산화제 질량유속분률의 분포를 나타낸다. 그

래프상에서 보면 반응면 근처에서 급격한 산화제의 소비가 발생되는데 이는 열분해 과정을 생략하였으므로 반응면 후류에서는 산화제의 소비가 없다가 반응면 근처에서만 집중적으로 소비되는 것으로 볼 수 있다. 그리고 char의 산화과정을 고려해 볼 때 char의 길이에 관계되어 산화제의 질량 유속 분률 분포가 바뀌게 될 것이다. char의 길이가 길수록 산화제의 사용이 반응면 먼 곳에서부터 시작되어 그래프가 좀 더 매끄러운 분포를 이룰 수 있을 것이다.

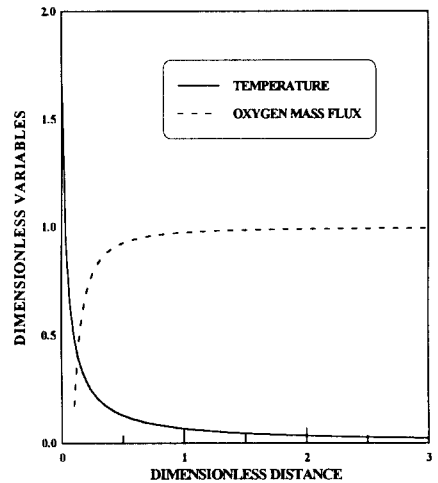


그림 7 온도분포와 산화제의 질량 유속 분률과의 관계

그림 7에서는 온도분포와 질량 유속 분률의 분포를 무차원화 시켜서 함께 도시하였다. 온도가 급격히 증가하는 부분과 산화제가 급격히 소비되는 구간이 서로 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 산화제의 소비가 급격히 증가하면서 유입되는 산화제 모두가 반응에 사용되어 온도가 급격히 상승하는 과정으로 파악할 수 있다. 식 (14)를 이용하여 smoldering 반응의 전파속도와 유입되는 산화제의 양의 관계를 그래프로 도시하면 그림 8과 같다. 산화제의 질량 유속이 클수록 smoldering 반응의 전파속도가 증가하는 경향을 살펴볼 수 있다.

Smoldering 반응이 산화제의 공급이 제한적이므로 반응면으로 유입되는 산화제의 양이 모두 사용되어, 반응의 성격은 공급되는 산화제의 양에 절대적으로 영향이 미친다는 결론을 내릴 수 있다. 앞서 언급된 화재조사에서의 smoldering 연소 단계의 경우도 마찬가지로 smoldering 연소반응이 진행될수록 산화제가 유입되는 구멍의 크기가 증가하게 되어 유입되는 산화제의 유량은 증가하게 되고 시간이 증가할수록 smoldering 연소반응의 전파속도는 증가하게 된다. 또한 유입되는 산화제의 양이 증가할수록 산화제와 연료의 비가 증가하여 산화제가 존재하는 부분이 증가하고 결국 공극률을 크게 만드는 결과를 초래하게 되어 smoldering 연소반응이 진행될수록 전파속도는 급격히 증가하게 된다.

여기서 임의의 산화제 양에 관계되어 smoldering 전파속도가 한 값으로 표현되는 것은 반응면의 온도를 800 K로 가정하였기 때문이다. 일정한 산화제의 양이 유입될 때 smoldering의 반응속도는 초기 점화가 이루어진 부분에서 멀어질수록 증가하게 될 것이다. 이는 반응면의 온도가 일정한 값을 갖는 것이 아니라, 반응면이 전파됨에 따라 미반응 연료로 열전달이 계속 이루어지게 되고, 이는 반응면의 온도를 상승하게 되어 반응속도가 증가하게 되고 결국 속도도 증가하게 된다. 또한 공극률이 감소할수록 smoldering 반응의 전파속도가 감소하는 경향도 살펴볼 수 있다. 이때 일반적으로 실험에 자주 사용되는 polyurethane과 α -cellulose를 비교할 경우 공극률이 0.97인 polyurethane의 경우 smoldering 반응 전파속도가 매우 크지만 0.83인 α -cellulose의 경우 속도가 적어진다. 특이한 사항으로는 연료의 공극률이 증가함에 따라 선형적으로 속도가 증가하는 것이 아니라 공극률이 1 근

처에서 급격히 상승한다는 사실이다.

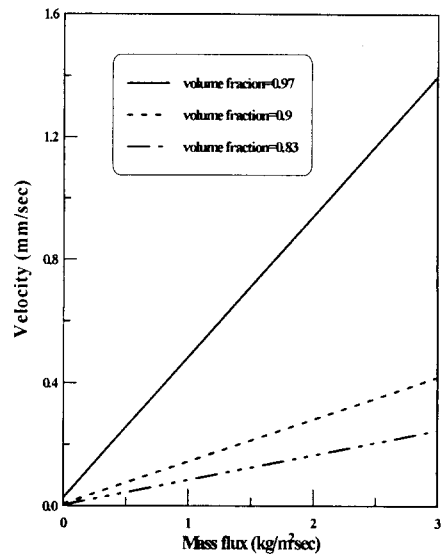


그림 8 초기 유입되는 산화제의 양에 따른 속도분포와 공극률과의 관계

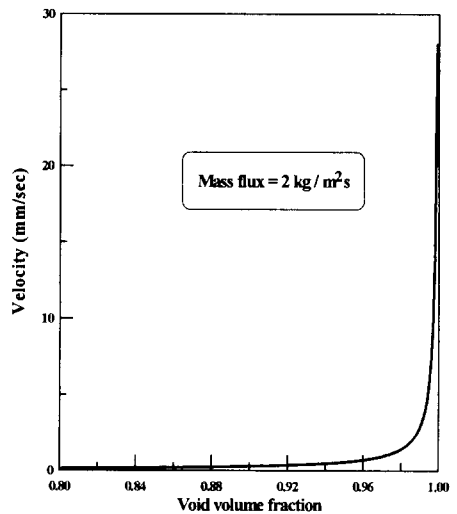


그림 9 연료의 공극률과 반응 속도와의 관계

그림 9에서는 산화제의 질량 유속을 $2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ 로 고정시키고 공극률을 변화시켜가며 smoldering의 전파속도를 관찰한 결

과이다. 급격히 변화하는 구간은 공극률이 0.96 이상이며 여기서는 사실상 공간에서 화염이 전파되는 속도라고 할 수 있다. 즉, smoldering 연소반응은 연료의 공극률이 증가할수록 전파속도는 임의의 지점에서 급격히 증가하게 되고 결국 폭발을 동반한 화염으로 변환된다. 그러므로 앞의 화재조사 보고⁽²⁾에서와 같이 약 2시간 동안의 smoldering 전파를 거친 오전 8:30 경에 맨 위층과 지붕 공간 사이에 구멍에 증가하게 되며 공기 유입 속도가 25 cm/s로 증가되어 smoldering 연소반응이 전파속도가 급격히 증가하여 화염 연소로 변하게 된다고 볼 수 있다.

6. 결론

화재 시나리오는 화재연구 분야에서는 일반적으로 이해하기 힘든 복잡하고 연쇄적인 현상으로 전문적인 화재 관찰자조차 추론하기 힘든 상황일 지도 모른다. 그럼에도 불구하고 상대적으로 단순화한 과학적인 분석에 의한 결과는 실제로 발생한 화재 기록들(사진, 시간 등)과 상당한 일치율을 보이고 있다. 특히 일반적으로 생각할 수 있는 산화제의 양이 충분치 못한 밀폐된 공간에서는 화재가 발생하지 않으리라는 기대를 깨고 smoldering 연소반응을 통하여 대형 화재로 발전될 수 있다는 사실에 관심을 가져야 할 것이다. 그러나 smoldering 연소반응의 특성상 발견하기가 어렵고, 발견할지라도 소멸하기에 많은 어려움이 따르기 때문에 앞으로의 많은 연구가 필요한 분야이다.

본 논문에서는 강제대류에 의한 하향식 역반응 smoldering 연소반응을 모델링하였다. 반응면 후류에서는 1 단계 반응 모델을 설정하여 초기의 열분해 과정을 생략하고, 반응면에서는 구 형상의 산화제에서 후류에 존재하는 산화제로 열전달 된다고 가정하여 기초적

인 smoldering 연소과정의 속성을 수치적으로 고찰하였으며, smoldering의 기초적인 물성치들의 공간적인 분포와 전파속도의 변화를 다음과 같이 파악하였다.

- ◆ 반응면 후류로의 열전달은 산화제에 의한 열전달이 주요인자이다. 특히 공극률이 클수록 고체생성물이 열전달 계수에 미치는 영향은 작아지고 산화제의 열전달 계수가 상대적으로 크기 때문에 공극률이 클수록 산화제에 의한 열전달이 우세해 진다.
- ◆ 산산화제가 반응면 근처로 유입되면서, 소비가 증가할수록 온도는 상승하고 그 구간은 서로 일치한다.
- ◆ 산화제의 질량 유속이 증가함에 따라 smoldering 반응의 전파속도는 상승하게 된다.
- ◆ 산화제의 질량 유속이 일정하다고 할 경우에는 공극률이 증가할수록 smoldering 반응의 전파속도는 증가하게 되고 공극률이 1 근처가 되면 급격히 속도가 증가한다.

위에서 살펴본 바와 같이 smoldering반응을 제어하는 주요 인자로는 유입되는 산화제의 양과 연료의 공극률이며, 특히 이 두 가지의 인자에 의하여 smoldering 반응의 전파속도는 결정지어지므로 smoldering이 화염으로 천이되는 과정과 스스로 소멸되는 과정을 조절하는데 이용할 수 있을 것이다.

즉 smoldering에 의한 화재발생시 유입되는 산화제의 양과 연료의 공극률과의 관계를 알고 있다면, 연료의 공극률에 관계하여 유입되는 산화제의 양을 제어함으로써 화염으로의 천이를 저지할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 방재기술개발사업 과제 의 일부이며 한국과학기술연구원 위탁과

제(과제번호 96HN-154, 97HN-172)로 진행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

〈기호설명〉

C	열용량
d_s	산화제의 평균직경
k	열전도 계수
\dot{m}	질량유속
\dot{m}''	단위면적당 질량유속
T	유입되는 산화제의 초기 온도
q_o	산화제의 단위 질량당 발생 에너지
u	유입되는 산화제의 속도
v	smoldering 전파속도
Z	$\frac{c_o}{4\pi k_o}$

그리스 문자

ϵ	질량유속분률
ρ	밀도
ϕ	공극률

하첨자

eff	평균값
g	기체상태
∞	초기조건
rad	복사
s	고체상태
us	미연소된 연료

1. 여천서, "여천공단사고 및 분쟁사례", (1997)
2. Quintiere, J. G., "Fire Investigation", 13th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, Vol. 1, pp. 331-340 (1996)
3. Ohlemiller, T. J., "Smoldering Combustion Propagation on Solid Wood", Fire Safety Science-Proc. of the 3th Internat. Symp., pp. 565-574 (1991)
4. Quintiere, J. G., "Estimating the Fire Growth in Compartment Interior Finish Materials", SFPE Seminar (1994)
5. Ohlemiller, T. J., "Modeling of Smoldering Combustion Propagation", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 11, pp. 277-310 (1985)
6. Dosanjh, S. S., Pagni, P. J. and Fernandez-Pello, A. C., "Forced Cocurrent Smoldering Combustion", Combust. Flame, Vol. 68, pp. 131-142 (1987)
7. Buckmaster, J., Lozinski, D., "An Elementary Discussion of Forward Smoldering", Combust. Flame, Vol. 104, pp. 300-310 (1996)
8. Grosshandler, W., Cleary, T., Nyden, M. and Rinkinen, W., "Signatures of Smoldering/Pyrolyzing Fires for Multi-element Detector Evaluation", Intl. Interflam '96 Conf., 7th Proc., pp. 487-506 (1996)
9. Dosanjh, S.S., Peterson, J., Fernandez-Pello, A.C., and Pagni, P.J., "Buoyancy Effects on Smoldering Combustion", Acta Astronautica, Vol. 13, No. 11/22, pp. 689-696 (1987)

10. Torero, J.L., and Fernandez-Pello, A.C., Urban, D., "Experimental Observations of the Effect of Gravity Changes on Smoldering Combustion", AIAA J., Vol. 32, No. 5, pp. 409-420 (1994)
11. Schult, D.A., Matkowsy, B.J., Volpert, V. and Fernandez-Pello, A.C., "Forced Forward Smolder Combustion ", Combust. Flame, Vol. 104, pp. 1-26 (1996)
12. Torero, J.L., and Fernandez-Pello, A.C., "Forward Smolder of Polyurethane Foam in a Forced Air Flow", Combust. Flame, Vol. 106, pp. 89-109 (1996)
13. Torero, J.L., Fernandez-Pello, A.C. and Kitano. M, "Opposed Forced Flow Smoldering of Polyurethane Foam", Comb. Sci. and Tech., Vol. 91, pp. 95-117 (1992)
14. Schult, D.A., Matkowsy, B.J., Volpert, V. and Fernandez-Pello, A.C., "Propagation and Extinction of Forced Opposed Flow Smolder Waves", Combust. Flame, Vol. 101, pp. 471-490 (1995)
15. Tse, S. D., Fernandez-Pello, A. C. and Miyasaka, K., "Controlling Mechanisms in the Transition from Smoldering to Flaming of Flexible Polyurethane Foam", Twenty-Sixth Symp. on Combustion, pp. 1505-1513 (1996)
16. Ohlemiller, T. J., and Lucca, D. A., "An Experimental Comparison of Forward and Reverse Combustion", Combust. Flame, Vol. 54, pp. 131-147 (1983)
17. Turns, S. R., An Introduction to Combustion, McGraw-Hill (1996)