論文 9-2-2

셀룰로오스 단열재의 연기발생에 관한 연구

Studies of the Smoke Emission from Cellulose Fiber Insulation

김 홍* · 강 영 구*
Hong-Kim · Young-Goo Kang

ABSTRACT

Smoke evolved from burning cellulose insulation treated with boric acid-borax-alum as combustion retardants has been studied using a light absorption method. It has been shown that the quantity of smoke are decreased with the increase of oxygen concentration. Applied fire retardants did not increase smoke generation from investigated cellulose insulation in range of themal degradation without flaming. These same fire retardants increased from in the range of flaming combustion. The results of this work have been analysed using imperical equation, which correlated the smoke density at oxygen content of combustion transition. This equation may be.

$\sigma = \sigma_T \exp\{-7.24\times10^{-7}(O_2O_{2.T})\}$

Where O_2 is the concentration of oxygen in the oxidizing gas, and $O_{2.T}$ refers to oxygen concentration of combustion transition.

1. 서 론

셀룰로오스계 고체 물질의 연소 방법에는 훈소와 유염연소로 구분되며 조건에 따라 상호 전이한다. 훈소는 초기 화재의 성상을 특정짓는 경우가 많고, 그로 인하여 발생되는 유독가스나 연기로 인하여 인명 피해가 커지게 된다. 셀룰로오스 단열재 및 셀룰로오스계 고체 물질에 대한 훈소의 발생[1),2)], 훈소 전파[3)] 및 유염연소로의 전이[4),5)]의 연구결과가 발표되었으나 연소 특성에 따른 셀룰로오스 단열재의 연기 발생에 대한 연구 결과를 찾아볼 수 없다.

한편, 가연성 고체 물질의 연소시 발생되는 연기 발생에 대한 연구는 목재에 금속 복합물등의 난연제의 첨가에 따른 연기 특성[6),7)]에 대한 결과와 우레탄 폼[8)], PVC[9)] 등 각종 플라스틱[10),11)]의 연기 발생의 특성에 대한 연구결과가 발표되었다. 이들 결과의 일반적인 경향은 난연제의 첨가에 따라 플라스틱의 연소성은 감소되나 연기 발생량은 증가한다는 것이며, 연기 발생에 영향을 미치는 파라메타는 난

* 호서대학교 산업안전공학과

연재의 함량, 시료의 크기, 연소 거동, 분위기의 산소 농도 등으로 나타났다[6].

본 연구는 셀룰로오스 단열재의 연기 발생 특성을 난연재의 조성과 함량, 산소농도 및 연소특성의 변화에 따라 고찰하기로 하였다.

2. 실 험

2.1 시료

실험에 사용된 셀룰로오스 단열재는(주) 대룡셀룰로오스에서 제조된 밀도가 29kg/m^{3}인 것을 사용하였고, 난연재는 현재 공업적으로 많이 사용되고 있는 Boric acid, Borax, Alum(Aluminium Potassium Sulfate)을 각각 혼합하여 사용하였다. 난연재는 100mesh 이하로 분쇄하여 건조시킨 후 단열재와의 혼합 비율을 6, 12, 18, 24 무게 %로 하여 건식 방법으로 혼합하였고 시료의 조성과 혼합비를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Treated cellulose insulation investigated

Sample No.	Boric acid : Borax : Alum	% Add on
A-6	2 : 1	6
A-12		12
A-18		18
A-24		24
B-6	6 : 3 : 1	6
B-12		12
B-18		18
B-24		24
C-6	2 : 1 : 1	6
C-12		12
C-18		18
C-24		24
D-6	2 : 1 : 2	6
D-12		12
D-18		18
D-24		24

2.2 실험방법

실험에 사용한 연기밀도 측정 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며, 이 장치는 LOI(Limiting Oxygen Index) 측정 장치에 연기 포집 박스(Smoke Collection Chamber)를 부착시켜 제작하였다.

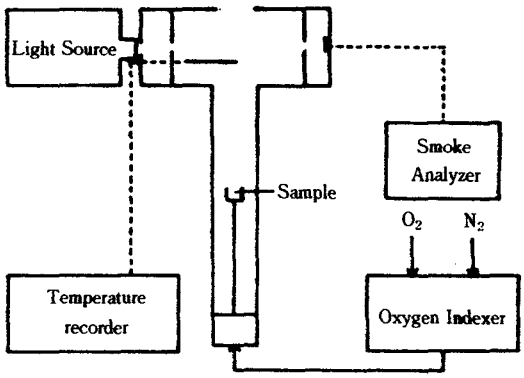

Fig. 1 Schematic diagram of smoke apparatus

연기밀도는 이 연기 포집 박스를 연속적으로 통과될 때 측정되고, 광원은 150W 할로겐 램프가 내장된 슬라이드 프로젝트를 사용하였으며 수광부는 30mm 직경의 셀레니움 포토셀을 사용하였다. 장치에 유입되는 산소와 질소의 농도는 조절 밸브에서 각각 조정되어 혼합된 후 10ℓ/min의 일정한 유량으로 공급되었다.

시료 용기는 시료의 형상이 섬유상이므로 직경 40mm, 높이 40mm인 스테인레스 스틸망으로 제작하여 사용하였다. 연기 밀도 측정실험은 시료에 작은 화염을 이용하여 10초동안 점화시켜 연소시킨 후 연기 포집 박스의 온도를 기록하고 임의의 시간동안 수광부의 투과율을 측정, 기록하였다. 이때 측정된 온도와 투과율 값을 Beer-Lambert 법칙에 대입하여 연기 밀도(σ)를 구하였다.

$$\sigma = \frac{2.303}{l} \frac{\theta}{\theta_0} \log_{10} \frac{100}{T}$$

여기서 l은 광원의 통과길이(cm), θ는 연기의 절대 온도, θ_0는 주위 온도, T는 투과율(%)를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 산소농도의 영향

셀룰로오스 단열재를 산업 현장에 적용하기 위한 조건으로 산화 분위기에서의 산소농도에 대한 연기밀도를 측정한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 전체적으로 연기밀도는 산소농도가 증가함에 따라 감소

하는 결과를 나타내었고 난연제를 첨가한 경우의 연기 밀도가 같은 산소 농도에서 더 큰 값을 나타내었으며 이는 난연제의 첨가에 따라 불완전 연소 현상이 더 심해지기 때문이다. 또한 같은 이유로 낮은 산소농도에서 난연제를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우의 연기 밀도는 큰 차이가 없으나, 산소농도가 증가할수록 큰 차이를 나타내었다.

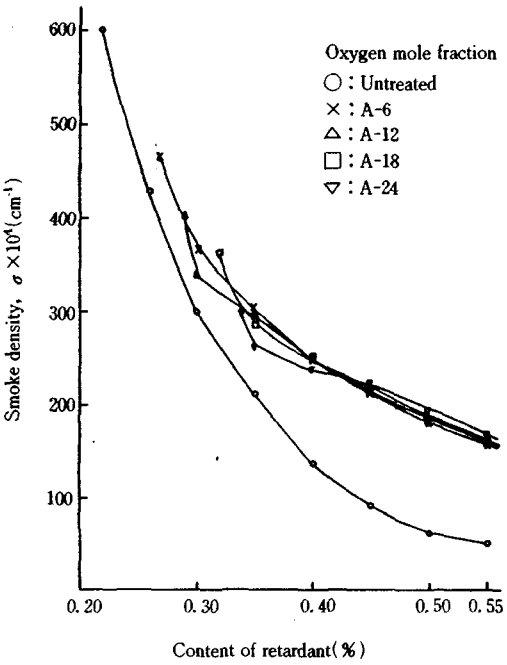

Fig. 2 Dependance of smoke density on oxygen concentration

이 결과를 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해 난연제의 함량에 대한 연기 밀도 값을 각각의 산소 농도로 나타내 본 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 연기 밀도 값은 연소현상이 무염과 유염 연소일 때 각각 다른 양상을 나타내었으며 연소 전이 산소농도를 기점으로 그래프의 기울기가 달라지는 것을 알 수 있다. 즉 A-6, A-12, A-18, A-24의 연소전이 산소농도는 각각 35, 36, 41, 51%이며[2], 이 값을 기점으로 기울기가 변하는 것을 알 수 있다.

위의 결과를 토대로 연소 현상에 따른 연기 발생의 양상을 고찰해 보면, 첫째, 연소 전이 산소 농도 이하에서는 화염이 없이 열분해가 일어나는 훈소 연소 영역으로 연기 발생의 양상은 난연제의 함량이 증가함에 따라 연기 밀도가 감소하였고 이는 난연재를 첨가한 경우 열분해량과 연소열의 발생량이 감소하여 열분해 가스가 발화점에 도달하지 못하고 대부분 연기로서 방출되기 때문인 것으로 사료된다.

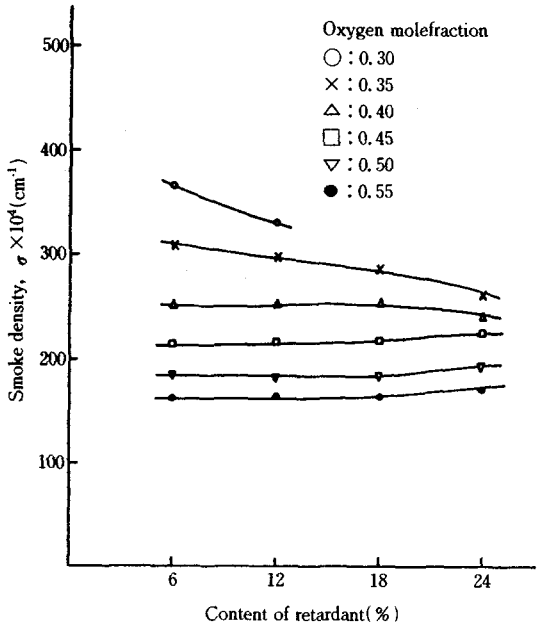

Fig. 3 Dependence of smoke density on retardant content of Cellulose insulation treated with Boric acid-Borax system

둘째, 연소전이 산소농도 이상에서는 화염이 발생되면서 연소되는 유염 연소 영역으로 연기 발생의 양상은 난연제의 함량이 증가함에 따라 연기 밀도가 증가하였고 이는 고농도 산소 분위기하에서 대부분의 열분해 가스는 연소하게 되는데 이때 발생되는 연기는 난연제의 연소 억제 효과로 인하여 생성된 것이 주를 이루기 때문인 것으로 판단되어진다.

3.2 유염 연소 영역에서의 상관 관계식

앞의 Fig. 2와 Fig. 3에서 고찰한 결과를 토대로 하여 유염 연소 영역에서의 연기밀도를 산소농도와 연소전이 산소농도의 차이를 변수로 하여 log σ 를

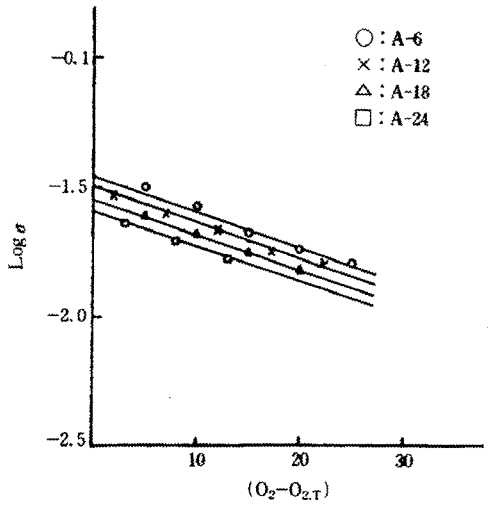

Fig. 4 Plot of Log σ vs(O_2-O_{2T})

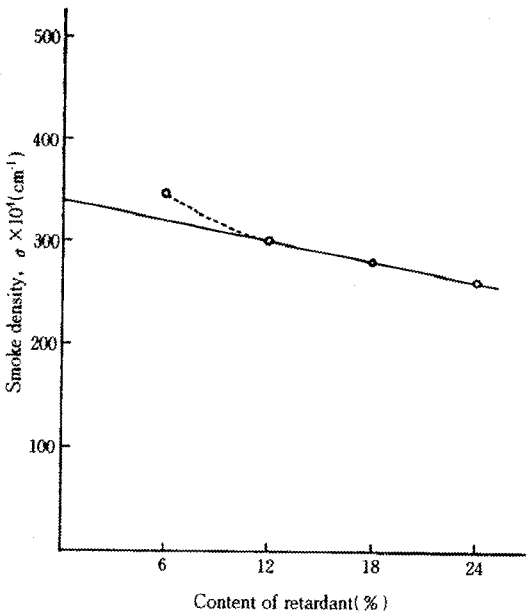

Fig. 5 Theoretical interpretation and evaluation of σ_T.

Fig. 4에 나타내었으며 이 그림으로부터 다음과 같은 상관 관계식을 유도하였다.

$$\sigma = \sigma_T \cdot \exp\{-k(O_2-O_{2T})\}$$

로그를 취하면

$$\log \sigma = \log \sigma_T - k(O_2-O_{2T})$$

여기서 σ_T는 연소전이 산소 농도에서의 연기 밀도(cm^{-1}), O_2는 산소농도, O_{2T} 연소전이 산소농도, k는 상수이며, 본 실험에서 구한 k값은 -7.24×10^{-7}이었다.

Fig. 5에 위의 상관 관계식을 이용하여 구한 연소전이 산소농도의 연기 밀도를 실험치와 비교하여 나타내었다. 전체적으로 잘 일치하였고 난연제의 함량이 낮을때 약간의 오차가 발생된 것은 시료의 점화에 사용된 불꽃의 연소열과 시료의 열분해 속도 등에 기인한 연기 발생 메카니즘의 차이로 볼 수 있다.

3.3 연소 특성의 영향

셀룰로오스 단열재의 연소 특성은 산소 농도를 증가시켰을 때 산소 농도에 따라 훈소→무염-유염 혼합 연소영역(연소전이)→유염연소로 변화된다[2].

또한 난연제의 함량이 증가할수록 전이되는 산소 농도가 높은 값을 나타내고, 전이되는 산소 농도의 차이가 증가하는 것으로 나타났다[2]. Fig. 6에 연소전이되는 각각의 산소 농도에서의 연기 밀도값을 난연제 함량을 변수로 하여 나타내었다.

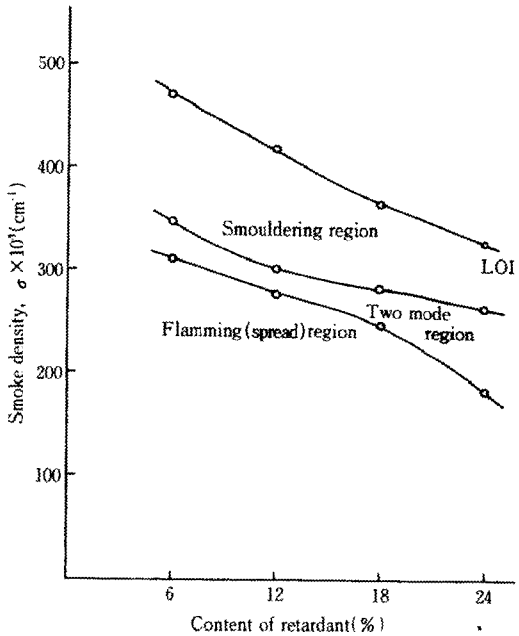

Fig. 6 Dependence of smoke density on combustion tranistion region of Cellulose insulation

LIO(한계산소농도)→훈소→무염-유염 연소영역→유염연소로 전이될 수록 연기밀도는 감소하였으며, 전체적으로 난연제의 함량이 증가할수록 연기밀도값이 감소하였다. 이는 난연제의 함량이 증가될수록 연소전이 산소 농도가 증가되었기 때문으로, 산소농도가 증가될수록 열분해 가스가 공기중의 산소와 혼합되어 가연성 혼합기를 형성시키는데 걸리는 시간이 짧아지므로 유염연소가 활발히 진행될 수 있기 때문이다.

한편, 훈소-Two mode 영역의 연기 밀도차가 Two mode-유염 연소 영역의 연기 밀도차보다 큰 값을 나타내었는데, 이는 훈소시에는 연소속도가 상대적으로 느려서 많은 연기가 발생되다가 유염연소시에는 연소가 활발히 진행되어 연기 발생량이 많이 감소되기 때문이다.

3.4 난연제 조성의 영향

난연제의 조성변화에 따른 연기 밀도 변화를 Fig. 7에 나타내었으며 낮은 산소농도(연소전이 산소농도 이하)에서는 A계(BA-B)보다 B, C, D계(BA-B-Alum)의 연기 밀도가 낮은 값을 나타내다가 높은 산소농도(연소전이 산소농도 이상)에서는 A계보다, B, C, D계의 연기밀도가 높은 값을 나타내었다. 이는 Alum의 첨가에 따른 훈소 영역 연소 억제 효과가 크기 때문에[2] 나타나는 현상이며, 연소 초기(낮은 산소농도)에 Alum을 첨가한 경우 연기 밀도가 오히려 감소하게 되므로 연소 후반부(높은 산소 농도, 유염 연소 영역)에 약간의 연기 밀도의 증가는 있으나 연기에 중독될 위험성은 주로 연소의 초기 단계에 나타나므로 실용화를 고려해 볼 때 큰 문제가 없는 것으로 사료 되어진다. 따라서 Alum이 제3의 난연재로서 별 문제없이 사용될 수 있다는 것을 다른 결과[2,5]와 종합해서 판단할 수 있다.

난연제의 조성변화에 따른 유염 연소전이 산소농도에서의 연기 밀도를 Fig. 8에 나타내었다. A계보다 B, C, D계가 낮은 연기밀도 값을 나타내었으며, 이는 Alum의 첨가에 다른 유염연소 억제 효과에 따라 고농도 산소 분위기에서 유염연소가 발생되므로 생기는 현상이다.

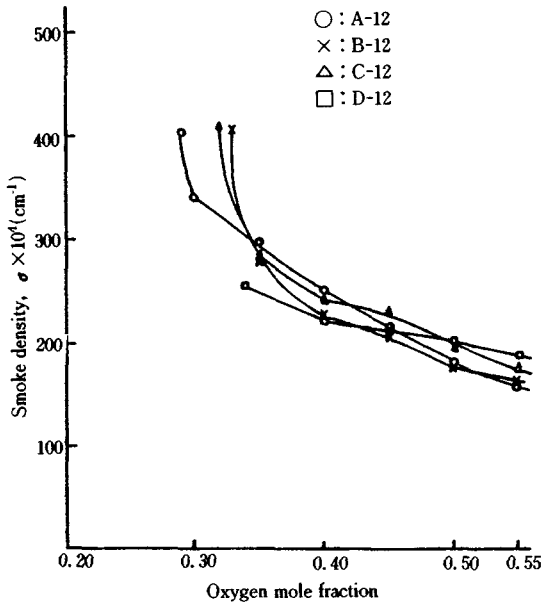

Fig. 7 Effect of treatment composition on smoke density of Cellulose insulation.

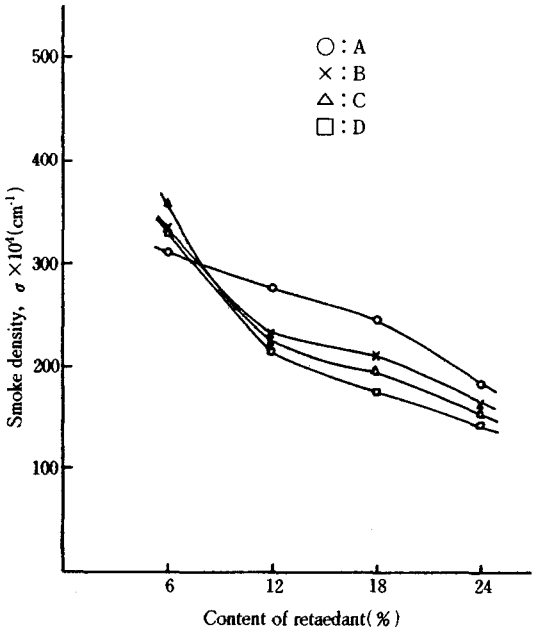

Fig. 8 Dependence of smoke density at critical oxygen mole fraction of flamming spread combustion

4. 결 론

셀룰로오스 단열재의 난연제 첨가에 따른 연기 발생을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 난연제의 첨가에 따른 연기 발생의 양상은 무염 연소영역과 유염 연소영역으로 구분할 수 있었으며, 무염 연소영역에서는 난연제의 함량의 증가에 따라 연기 밀도가 감소하는 반면에 유염 연소영역에서는 증가하는 현상을 나타내었다.
2) 유염 연소영역에서의 연기 밀도는 다음 식으로 나타낼 수 있었다.

$$\sigma = \sigma_T \exp\{-7.24\times10^{-7}(O_2-O_{2,T})\}$$

3) 훈소 영역에서 훈소-유염 연소전이 영역, 유염 연소로 전이됨에 따라 열분해 가스의 가연성 혼합기 형성 속도의 상승으로 인하여 연기 밀도가 감소하는 현상을 나타내었다.
4) 난연제에 Alum을 첨가한 경우 낮은 산소 농도 영역에서는 훈소 연소 억제효과로 인하여 연기 밀도가 감소하는 현상을 나타낸 반면, 높은 산소농도 영역에서는 유염 연소 억제 효과로 인하여 연기 밀도가 증가하는 현상을 나타내었다.

참 고 문 헌

1) T. Ohlemiller, Combustion Science Technology, Vol. 26, p. 89, 1981.
2) H. Kim, J. Korean Institute Industrial Safty, Vol. 6, No. 1, p. 14, 1991.
3) T. Ohlemiller and D. Lucca, J. Fire Science, Vol. 54, p. 131, 1985.
4) K. Sato and S. Sega, J. Fire Science, Vol. 3, p. 26, 1985.
5) H. Kim, J. Korean Institute Industrial Safty, Vol. 7, No. 3, p. 4, 1992.
6) T. Cisek and P. Tacek, Fire Technology, Vol. 21, No. 2, p. 122, 1985.
7) L. Benisek and W. A. Phillips, J. Fire Flammbility, Vol. 9, No. 3, p. 308, 1981.
8) R. W. Mickelson and R. M. Traicoff, Fire Technology, Vol. 7, No. 4, p. 301, 1972.
9) I. Spilda and J. Pavlik, J. fire flammability, Vol. 1, p. 43, 1976.
10) C. J. Hilado, J. Fire Flammability, No. 1, p. 217, 1970.
11) H. Stepniczka, J. Fire Flammability, No. 5, p. 16, 1974.