

[Research Paper]

고온에 노출된 커튼의 한계산소지수에 관한 연구

김황진

초당대학교 소방행정학과 교수

Study on the Limiting Oxygen Index of Curtain Exposed to High Temperature

Hwang-Jin Kim

Professor, Dept. of Fire Service Administration, Chodang Univ.

(Received June 7, 2018; Revised July 19, 2018; Accepted August 29, 2018)

요 약

창문이 설치된 대부분의 공간에서는 커튼을 사용한다. 이러한 커튼은 대부분 가연성 소재이며 수직 설치되어 있기 때문에 화염확대의 중요 요인이다. 따라서 커튼과 같은 가연성 실내장식물의 연소특성에 관한 연구는 화재성상을 예측하는데 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 실내장식재로 널리 사용되는 6종류 커튼의 연소특성을 분석하기 위해 상온과 고온에서의 산소지수를 측정하였다. 실험결과 모든 시료의 고온산소지수는 상온에서보다 약 3~7.5% 낮게 측정되었으며 약 0.2%의 산소농도 차이로도 시료별 연소현상이 큰 차이를 나타냈다. 따라서 가연성 내장재의 산소지수 값으로 난연성을 평가할 경우 고온산소지수 값에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

ABSTRACT

Curtains are used for shading in windows. Since most curtains are made of flammable materials and are installed vertically, curtains can be an important factor in fire spreading. Accordingly, it is important to predict fire behaviors in studies on the combustion characteristics of flammable interior decorations, such as curtains. In this study, to analyze the combustion characteristics of six kinds of curtains, which are widely used interior decorations, the oxygen index was measured at room temperature and higher temperature. As a result of the experiment, the oxygen index at higher temperature of all specimens was about 3%~7.5% lower than that at room temperature and difference of 0.2% of oxygen index show big differences in combustion phenomenon of specimens. Therefore, when flame retardancy is evaluated with the oxygen index value of flammable interior decorations, the oxygen index value at higher temperature should be sufficiently considered.

Keywords : Curtains, Oxygen index, Interior decorations, Flame retardancy

1. 서 론

기술발달에 따라 다양한 소재의 실내 장식재가 개발되어지고 있으며 주요소재는 섬유류, 합성수지류, 목재 및 합판과 같은 가연성 소재가 주를 이루고 있다. 국내에서 인명피해규모가 컸던 주요화재사례 등은 대부분 가연성 실내장식물이 화재확대의 주요 원인이 되었다. 대연각호텔화재(1972년 12월), 대아호텔화재(1984년 1월) 등은 널리 알려진 대로 최초 착화 이후 카펫과 같은 가연성 실내 장식물에 의해 화재가 건물전체로 확산되었으며 인천히트노래

방 화재사건(1999년 9월)을 계기로 다중이용시설에 대한 실내장식물의 방염기준이 강화되기 시작하였다. 또한 최근에는 11층 이상의 아파트와 모든 의료시설 등에도 방염성능기준 이상의 실내장식물을 사용하도록 하는 법률 개정안이 입법예고 되는 등 실내장식물에 대한 규제가 강화되고 있다. 화재확산의 주요원인이 되는 실내 장식물 중 커튼은 주거시설뿐만 아니라 창이 있는 모든 건축물에서 널리 사용되어지고 있는 대표적인 실내 장식물이다. 실내 화재 시 가연물의 수직 화염확산은 부력의 영향을 받으며 수평 확산에 비해 약 10~100배 빠른 속도를 나타낸다^(1,2). 따라서

대부분의 실내 화재 시 화염확산은 벽을 통해 빠르게 천정으로 확산되는 양상을 보이기 때문에 다중이용시설과 같이 화재 시 인명피해의 우려가 큰 장소의 커튼을 포함한 실내 장식물은 방염처리를 의무화하고 있으며 벽지 또는 커튼과 같이 수직으로 화재를 확대시킬 수 있는 실내 장식물의 연소특성에 대한 연구는 매우 중요하다. Kanury는 모든 방화(防火)전략에서 첫 번째 단계는 구조재, 마감재, 집기 등에 발화가 일어나기 어렵게 하는 것⁽²⁾으로 주장하며 가연물의 내화성능의 중요성을 언급했다. Lee (2007)⁽³⁾, Park (2010)⁽⁴⁾ 등은 주요 실내장식재인 카페트와 커튼, 바닥내장재인 장판의 연소특성을 분석하기 위해 발열량과 발연량을 측정하였으며 산소지수 시험을 통해 방염처리 시료의 난연 성능을 평가하였다. Ham (2001)⁽⁵⁾ 등도 산소지수 측정을 통해 아파트 마감재료인 벽지, 합판, 장판 등의 착화 용이성에 대해 분석하였으며, Song (2008)⁽⁶⁾ 등은 에폭시 수지에 점토질의 천연물질을 첨가하여 연소특성을 확인하면서 산소지수를 측정하였으며 특히 고분자 물질의 난연성 평가시 한계산소지수는 반드시 측정하여야 할 요소임을 언급하였다. Bae (2010)⁽⁷⁾ 또한 실내 장식재로 사용되는 벽지 및 시트지, 방염필름, 커튼의 상온 산소지수를 측정하여 연소특성을 평가하고 실내장식재에 대한 산소지수규제의 필요성을 주장하였다. 기존의 산소지수 측정연구는 대부분 상온에서 이루어져 왔지만 Oh (2008)⁽⁸⁾ 등은 주위온도가 높을 경우 가연물의 수분 및 여러 불순물의 증발이 일어나므로서 열분해가 촉진되어 연소하기 용이해지는 경향이 있다는 것에 착안하여 내장벽지의 고온산소지수에 관한 연구를 실시하였다. 연구결과 상온산소지수 측정값보다 시료별로 약 (5.4~8.2)% 정도 고온에서 낮게 측정되었으며 특히 방염처리를 한 벽지시료의 경우 상온에서 31.25%의 산소지수를 갖는 반면 고온(300 °C)에서는 22.97%의 산소지수를 나타내는 결과를 보임으로서 고온에서 시료의 난연성이 크게 저하되는 양상을 보였다. 실제 화재실의 온도는 300 °C보다 높기 때문에 실내화재시 산소지수는 더 감소할 수 있다. 이처럼 상온에서의 한계산소지수는 가연물의 초기 착화성을 확인하는데 유효할 수 있으나 실내화재 발화기 이후 화재 성장 시 고온상황에서의 연소특성을 예측하기에는 한계가 있는 것으로 판단되는바 본 논문에서는 벽지와 함께 수직으로 화염을 확대시킬 수 있는 대표 실내장식물인 커튼의 상온 산소지수와 고온 산소지수를 비교해보고 연소특성의 변화를 확인하고자 하였다.

2. 이론적 배경

관련 규격에서 정의하는 한계산소지수(Limited Oxygen Index, LOI)란 산소와 질소가 혼합된 상승 기류 내에서 착화된 가연물이 지속적으로 연소하기 위해 필요한 최소 산소농도를 말한다. 따라서 산소 지수 값이 높다는 것은 연소를 지속하는데 산소가 많이 필요하다는 의미이며 외부에서

산소의 공급이 없을 경우 빠른 시간 내에 산소부족으로 소화가 이루어질 수 있으므로 통상적으로 산소지수가 높을수록 난연성이 우수하다고 판단하며 가연물의 연소특성 및 난연성을 평가하는 지수로 사용되고 있다. 특히 대구지하철 화재참사 이후 한 때 ‘도시철도차량 안전기준에 관한 규칙’이 제정되면서 철도차량실내에 사용되는 내장판, 의자, 바닥재, 외장재 등에 대해 최소 28에서 최대 40 이상의 산소지수를 갖는 물품을 사용하도록 규제하는 등 실내장식물의 난연화 기준의 한 항목으로 활용되고 있다. ISO 4589-2, 4589-3에 의한 한계 산소지수 값은 다음 공식에 의해 구할 수 있다.

$$OI = C_F + k \cdot d \quad (1)$$

C_F = 소수점 첫째 자리까지 부피 퍼센트로 나타낸 산소농도의 최종값

k = 디슨의 “상승 및 하강” 방법에 의한 얻어진 인자

d = Test 과정에 산소농도의 간격(0.2%)

3. 실험

3.1 실험시료

고온에 노출된 커튼의 산소지수를 측정하기 위해 다음 Figure 1과 같이 커튼의 재료로 가장 많이 쓰이는 6가지 종류의 커튼을 사용하였다. 일반적으로 폴리에스테르는 구김성이 없고 내구성이 우수해 커튼의 재료로 가장 많이 사용되는 합성섬유이며, 난연성을 향상시키기 위해 폴리에스테르에 방염처리 한 커튼, 폴리에스테르와 면, 울의 혼합 섬유 및 마와 면의 혼합섬유와 같이 가장 많이 유통되는 커튼을 실험시료로 선정하였다. ISO 4589-2에 따라 길이 140 mm, 폭 52 mm의 시편을 제작하여 실험 전 (23 ± 2) °C, 상대습도 (50 ± 5) 조건하에 88시간 동안 항온 항습조에서 상태 조절 후 실험에 사용하였다.

3.2 실험장치 및 방법

플라스틱 등 고분자 물질의 산소지수 측정 규격은 상온 시험법(ISO 4589-2)과 고온시험법(ISO 4589-3)으로 구분되어지며 고온시험법에서는 150 °C까지의 온도범위 내에서 최소산소농도를 측정하도록 안내하고 있지만 본 연구에서

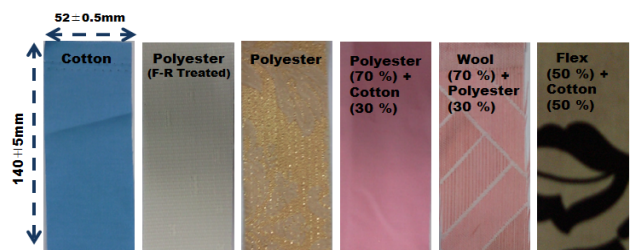


Figure 1. Photograph of specimen.

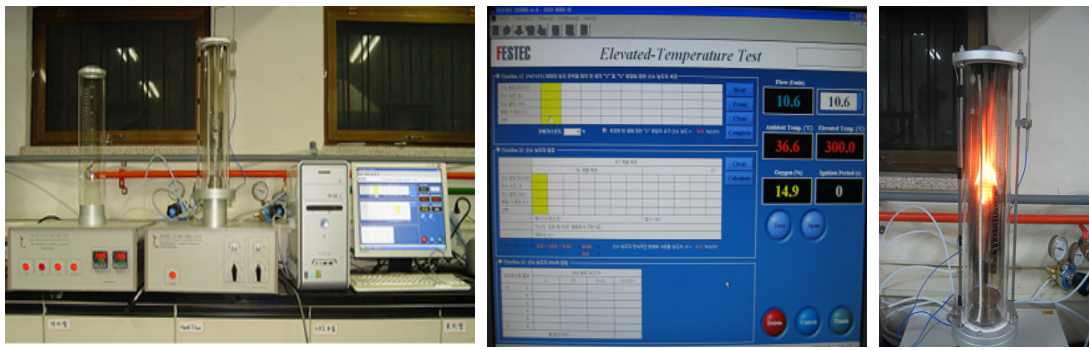


Figure 2. Photograph of LOI & TOI tester.

는 온도상승에 따른 산소지수의 변화 및 연소특성을 확인하기 위해 Figure 2와 같이 페스텍 코리아에서 제작한 LOI & TOI tester를 이용하여 동일 시료를 상온 및 100 °C, 200 °C, 300 °C의 온도조건하에서 각 시편의 산소지수를 측정하였다.

기기 내에 설치된 유량조절장치를 이용하여 산소 및 질소 혼합가스의 유량 및 농도를 조절한 후 시편에 착화시켜 각 온도상황에서의 산소지수를 측정하고 연소현상을 관찰하였다. 공기 중에서 시험편이 빠르게 연소할 경우 산소의 초기농도를 18%로 하고, 시험편이 불안정하게 연소할 경우 21%로 초기산소농도를 조절한 후 1%씩 산소농도를 조절하여 시료에 착화시켜 연소상태를 확인하였다. 180 s 동안 연소가 지속되거나 시료가 80 mm 이상 연소할 경우 산소지수를 감소시켜 산소지수의 상·하 한계를 계략적으로 확인하였으며 이후 0.2% 간격으로 정밀하게 한계 산소지수 값을 확인하였다. 측정값의 재현성 확보를 위해 규격에서 제시된 디슨의 ‘상승 및 하강’ 방법으로 해당 농도에서 최종 5회 반복 실험 후 얻어진 응답특성에 따라 수식(1)에 대입하여 오차범위에 대한 보정 값을 계산하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Table 1과 Figure 3은 각각 커튼의 재질별 상온 및 고온 산소지수를 나타낸 표 및 그래프이다. 주위온도가 높아질수록 모든 시료의 산소지수는 낮아지는 것을 확인할 수 있

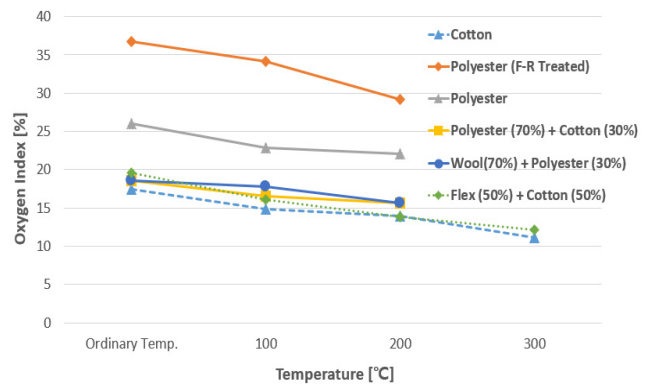


Figure 3. Oxygen index with ambient and elevated temperature.

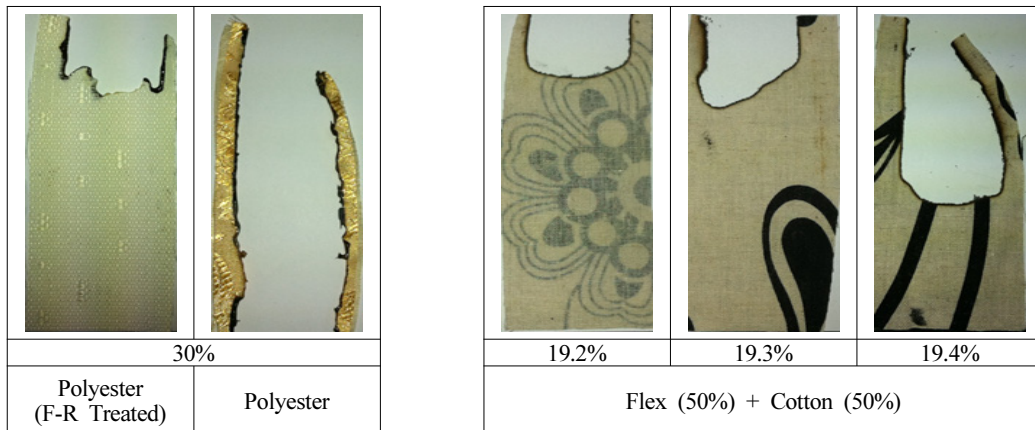
다. 폴리에스테르 수지가 함유된 4종류의 커튼의 경우 열가소성 성질에 따라 300 °C까지 온도를 높일 경우 연화점 (Softening point)에 도달해 시편이 녹아내려 착화시킬 수 없었다. 면을 소재로 한 커튼의 경우 가장 낮은 산소지수를 나타냈으며 상온과 300 °C에서의 산소지수차이는 6.3%로 측정되었다. 마와 면의 혼합 소재 커튼의 경우에는 상온과 300 °C에서의 산소 지수차가 7.5%로 크게 나타났다. 연화되어 300 °C에서의 측정이 불가능한 폴리에스테르 소재의 커튼의 경우 상온과 200 °C에서의 산소 지수는 3.9%, 방염 폴리에스테르 커튼은 7.5% 차이가 났으며 나머지 면과 폴리에스테르 혼합 및 울과 폴리에스테르 혼합 커튼은 모두 3.0%의 산

Table 1. Oxygen Index with Ambient and Elevated Temperature in each Specimen (unit : %)

Division	Ambient Temp.	100 °C	200 °C	300 °C
Cotton	17.4	14.8	13.9	11.1
Polyester (F-R Treated)	36.7	34.1	29.2	-
Polyester	26	22.9	22.1	-
Polyester (70%) Cotton (30%)	18.6	16.6	15.6	-
Wool (70%) Polyester (30%)	18.6	17.8	15.6	-
Flex (50%) Cotton (50%)	19.6	16.1	13.8	12.1

Table 2. Combustion Length according to Oxygen Concentration (Ambient Temp.)

Specimen	Oxygen Concentration & Length Burned			
	Oxygen concentration (%)	17.2	17.4	17.6
Cotton	Length burned (mm)	33	40	140 (burn out)
	Oxygen concentration (%)	35.6	35.8	36
Polyester (F-R Treated)	Length burned (mm)	20	22	140 (burn out)
	Oxygen concentration (%)	26.6	26.8	27
Polyester	Length burned (mm)	47	70	140 (burn out)
	Oxygen concentration (%)	18	18.2	18.4
Polyester (70%) Cotton (30%)	Length burned (mm)	20	27	140 (burn out)
	Oxygen concentration (%)	16.4	16.6	16.8
Wool(70%) Polyester (30%)	Length burned (mm)	49	65	140 (burn out)
	Oxygen concentration (%)	19.2	19.4	19.6
Flex (50%) Cotton (50%)	Length burned (mm)	29	69	140 (burn out)

**Figure 4.** Photograph of length burned of test specimen (ambient temp.).

소지수차이를 보였다. 면, 마와 면의 혼합소재 커튼의 경우 각각 상온에서의 산소농도의 약 63.8%, 61.7%의 산소로도 300 ℃에서 연소가 가능했으며 그 외 방염폴리에스터 및 폴리에스터 소재 등도 상온 산소농도의 약 (80~85)%의 산소로도 200 ℃에서 연소가 가능한 것으로 나타났다.

Figure 3에서와 같이 방염 처리된 폴리에스터 커튼은 상온에서 36.7%의 산소지수를 나타내 미방염 폴리에스터 커튼보다 10.7% 높게 측정되어 난연성이 매우 우수하게 나타났지만 온도가 높아질수록 산소지수가 하락하여 200 ℃ 온도조건에서는 방염유무에 따른 산소지수 차이가 7.1%로 좁혀졌다. 300 ℃에서 측정이 가능했던 면 소재의 커튼은 11.1%, 면과 마 혼합소재의 커튼의 경우 12.1%의 산소지수를 나타내 이론상 질식소화농도인 산소 농도 15% 이하에서도 고온상황에서는 연소가 가능한 것으로 나타났다.

Table 2는 상온에서 각 시료별 산소농도차이에 따른 180 초 동안의 연소 길이를 나타낸 표이다. 각 시료가 전소되기

직전 산소 농도 하에서 측정된 연소 길이를 나타낸 값으로 모든 시편이 산소지수 0.2%의 차이로도 연소 길이의 현저한 차이를 보였다. 산소지수 측정법은 산소농도에 따른 연소의 용이성을 판단할 수 있는 실험으로서 0.1%의 산소지수 차이에 따라 시료의 연소가 중단되거나 또는 전소할 수도 있으며 본 실험결과 커튼의 경우 상온에서와 고온에서의 산소지수 값은 크기는 7.5%까지 차이가 나기 때문에 화재실의 온도에 따라 가연물의 연소특성 및 난연성은 달라질 수 있다.

Figure 4는 폴리에스터 소재 커튼의 방염처리 유·무에 따른 연소 길이와 마와 면 혼합소재 커튼의 산소농도차이에 따른 연소 길이를 나타낸 그림이다. 방염처리 커튼의 경우 상온에서 점화원의 열에 의해 서서히 무연연소(탄화)가 이루어지는 경향을 보였지만 100 ℃ 이상의 온도상황에서는 유염 연소하였으며 모든 시료에서 온도가 상승할 경우 순간적으로 착화하는 양상을 나타내었다. 상온에서보다 높

은 온도조건하에서는 시료의 수분 및 불순물의 증발, 열분해의 가속화로 인해 착화 및 연소속도가 빨라진 것으로 판단되며 실제 화재실에서도 같이 온도가 더 상승할 경우 이러한 현상은 더욱 가속화 될 것이다. 본 연구를 통해 방염 처리한 커튼의 난연성은 상온에서 매우 우수하게 나타났지만 온도가 상승할수록 산소지수 차이는 줄어들고 있기 때문에 실제 화재가 발생하고 있는 공간에서의 난연성은 장담할 수 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

실내 장식재로 널리 사용되며 수직 배치 가연물로서 화재 시 수직 화염확산의 위험성이 큰 커튼의 산소지수를 측정하기 위해 시중에서 가장 많이 사용되는 6종류의 커튼을 이용하여 상온 및 고온 산소지수를 측정한 결과 모든 시료의 고온 산소지수가 상온에서보다 현저히 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

(1) 주위온도 300 °C까지 연화되지 않은 면 소재 커튼의 산소지수는 상온에서 17.4%, 300 °C 상황에서 11.1%로 측정되었으며 면과 마의 혼합소재 커튼의 경우 상온에서 19.6%, 300 °C 상황에서 12.1%로 측정되었다. 이는 각각 상온 산소농도의 약 63.8%, 61.7% 수준의 산소농도로도 온도가 상승할 경우 연소가 가능하다는 것을 의미한다.

(2) 주위온도 200 °C까지 산소지수 측정이 가능했던 폴리에스터, 방염폴리에스터, 폴리에스터와 면 혼합, 울과 폴리에스터 혼합소재 커튼의 산소 지수 값도 상온과 200 °C에서 약 (3.0~7.5)%의 차이를 보여 온도가 상승할수록 연소가 용이해지는 경향을 나타냈다.

(3) 폴리에스터 소재의 커튼에 방염처리 유·무에 따른 산소지수는 상온에서 10.7%, 100 °C에서 11.2%, 200 °C에서는 7.1%의 차이로 방염 처리한 소재의 산소지수가 높게 측정되었다. 다만 100 °C에서 200 °C로 온도가 상승할 경우 산소지수차이가 줄어드는 것으로 나타나 실제 화재가 발생한 공간에서 200°C 이상의 주위온도가 형성되었을 경우 방염처리로 인한 난연 효과는 크게 기대할 수 없을 것으로 판단된다. 다중이용시설에 설치하는 커튼 등의 실내장식물은 방염성능 이상의 것을 사용하도록 명시하고 있으며 방염성능검사는 45도 연소시험을 통해 착화지연효과 유·무를 판단하여 규제하도록 하고 있으므로 본 실험에서 사용한 방염커튼은 현행법상 다중이용시설에 사용해도 무방하다. 다만 연소의 용이성을 판단하는 지표인 한계산소지수 측정값이 상온에서와 고온에서 차이를 보이고 있으므로 화재의 성장과정에서 실내의 온도가 상승할 경우 현재 45도

연소시험만을 통한 규제로 실내장식물에 의한 화재확대 방지효과를 기대하기는 어려울 것으로 판단된다.

이와 같은 연구 결과를 바탕으로 기존의 연구에서와 같이 상온에서 측정한 실내 내장재의 산소지수 값은 초기 착화의 용이성을 평가하는 지표로 사용될 수는 있지만 화재가 성장하는 과정에서 실내의 온도가 상승하고 실내 내장재로 화염이 전파하는 상황에서는 상온산소지수 값으로 가연물의 난연성을 평가하고 화재성상을 예측하는 것은 타당하지 않다. 따라서 가연성 내장재의 산소지수 값으로 난연성을 평가하고 내장재의 연소성능을 판단할 경우 상온에서의 산소지수 뿐만 아니라 고온산소지수 값에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

References

1. J. G. Quintiere, "Principles of Fire Behavior", Second Edition, Taylor & Francis Ltd., Florida USA (2016)
2. NFPA, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd Edt, pp. 2-229, 251 (2002).
3. H. P. Lee and Y. J. Park, "A Study on the Fire Characteristics of Carpet and Curtain Treated or Untreated with Flame Retardant", Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 74-81 (2007).
4. Y. J. Park, H. P. Lee and H. J. Kim, "A Study on Analysis of Characteristics Combustion of Floor Covering Materials", J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 10, No. 3, pp. 77-83 (2010).
5. S. K. Ham, H. Kim, S. B. Han and W. H. Kim, "A Toxicity of Interior Upholstery in Apartment Housing", Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 36-43 (2001).
6. Y. H. Song and K. S. Chung, "Improvement the Flame Retardancy of Epoxy Resin by the Addition of Montmorillonite", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 300-304 (2008).
7. A. Bae, "Comparative Study on the Limited Oxygen Index of the Interior Materials", Master's Thesis, Seoul National University of Technolog (2010).
8. K. H. Oh, S. E. Lee and H. J. Kim, "A Study on the Oxygen Index of Interior Wallpapers at Elevated Temperature", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 57-62 (2008).