

실내 내장 벽지의 고온산소지수에 대한 연구 A Study on the Oxygen Index of Interior Wallpapers at Elevated Temperature

오규형[†] · 이성은* · 김황진**

Kyu-Hyung Oh[†] · Sung-Eun Lee* · Hwang-Jin Kim**

호서대학교 소방방재학과, *호서대학교 산업안전센터, **호서대학교 소방방재학과 대학원
(2008. 4. 14. 접수/2008. 4. 28. 채택)

요 약

한국의 실내장식재료는 대부분 벽지를 사용하고 있다. 이러한 주거공간에 화재발생시 화재 확대요인중의 하나는 벽지의 연소를 통해 이루어진다. 그동안 산소지수 관련연구들이 많이 이루어져 왔지만 상온에서의 연구가 많았다. 본 연구에서는 실내화재에서 화재의 확대요인이 될 수 있는 벽지의 산소지수가 상온과 고온에서 얼마나 차이가 발생하며 이러한 차이가 화재확대에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 실험을 통해 LOI 및 TOI 측정된 결과 벽지의 상온과 고온에서의 산소지수는 5~8% 정도의 차이가 나타났다. 실험에서 산소지수 0.1%의 차이로도 연소 길이에 현저한 차이가 나타나기 때문에 고온에서의 산소지수 감소가 화재확대에 큰 영향을 미치는 요인임을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Most of all the Korean home use a wallpaper as a decoration and finishing of interior. One of the fire spread factor in a house is a combustion of wall paper. There were some research concerning oxygen index in a ambient temperature. The purpose of this study is to investigate the difference of oxygen index of a wallpaper between ambient and high temperature and a effect on the fire spreading. Based on the result, the difference of oxygen index between ambient temperature and high temperature showed 5~8%. Difference of 0.1% of oxygen index show big differences in combustion length of sample. Therefore, it was found that the decrease of oxygen index at elevated temperature is a important factor in fire spread.

Keywords : Wall paper, Oxygen index, TOI, LOI, Combustion

1. 서 론

한국의 주거문화 특성상 실내 마감재로 벽지를 많이 사용하고 있으며 친환경적인 주거문화를 추구하는 현대사회의 특성에 맞추어 벽지의 종류도 다양화 되어가고 있다.¹⁾

실내 화재발생시 연소의 확대는 벽면을 통해 이루어지는 경향이 있기 때문에 벽면 가연물의 화염전파속도에 따라 화재확대속도 역시 크게 영향을 받게 된다.²⁾

이렇듯 벽지가 실내화재의 확대에 미치는 영향이 크기 때문에 그동안 내장벽지에 연소특성에 관한 연구들이 많이 이루어 졌다. 특히 가연물의 연소특성에 중요

한 요소인 산소지수측정에 관한 연구도 이루어졌지만 대부분이 상온에서의 산소지수를 측정한 연구였다.

화재시에 발생하는 연기와 열기류 등에 의해 고온 분위기가 형성되면 상온에서보다 빠른 속도로 화재가 확대 전파되는데, 이는 고온에서의 복사열의 증가와 함께 상온에서보다 고온 분위기에서 가연물의 산소지수가 낮아지므로 착화 및 연소지속성이 용이해지는 경향이 있기 때문으로 판단된다.²⁾ 또한 고온 분위기에서의 가연물의 상태는 상온에서보다 연소하기 용이해지는 경향이 있다. 이는 가연물 내에 함유되어 있는 수분 및 여러 불순물들이 상온상태에서보다 많이 증발하기 때문이다. 이러한 현상 때문에 고온상태에서는 상온에서보다 더 작은 산소량으로도 연소할 수 있을 것이라는 예측을 할 수 있다.

[†]E-mail: khoh@hoseo.edu

실내화재시에 가스계약제에 의한 질식소화 시 산소 지수가 중요하기 때문에 본 연구에서는 주거 공간에 사용되는 내장 마감재중 벽지에 대한 산소지수를 측정하였다. 산소지수측정은 <산소지수에 의한 연소거동의 측정>-KS M ISO-4589-2(제2부 상온 시험법)와 <산소지수에 의한 연소거동의 측정>-KS M ISO-4589-3(제3부 고온 시험법)에 기준하여 측정하고 결과를 비교하여 내장벽지의 산소지수가 화재확대에 미치는 위험성을 고찰하고자 하였다. 이와 관련된 기존의 연구들은 대부분 상온에서의 산소지수를 측정한 결과로써 실제 화재현상의 해석에 적용하는 데는 정확성에 한계가 있다. 또한 화재를 대비한 소화 약제의 저장량 산출과 농도가 상온에서의 산소지수를 기준으로 하고 있어 실험 결과를 통해 소화약제의 설계농도 및 저장량 기준에 대한 새로운 대안을 제시할 필요성이 있다고 판단되었다.

2. 이론적 배경

2.1 한계 산소 지수(Limited Oxygen Index, LOI)

산소지수란 산소와 질소의 혼합기체분위기에서 연소되기 위해 필요한 산소농도를 말한다. 가연물의 산소 지수가 크다고 하는 것은 가연물 연소에 필요한 산소의 농도가 크다는 것을 의미한다. 따라서 내장재의 산소지수가 클수록 난연성능이 우수하다고 볼 수 있다.

한계 산소 지수란 고분자 시료가 발화되어서 3분간 꺼지지 않고 타는데 필요한 산소-질소 혼합 공기 중 필요한 최소한 산소의 부피 퍼센트를 말한다.³⁾ 그러므로 한계 산소 지수가 높을수록, 난연성이 우수하다. KS M ISO-4589-2, KS M ISO-4589-3에 의한 한계 산소 지수 값은 다음 식을 이용하여 구한다.

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

C_F : 최종 test시 산소농도

k : 덕슨의 지수

d : 실험과정 산소농도의 step size(보통 0.2%)⁴⁾이다.

2.2 고체의 연소특성

고체물질의 연소형태로는 증발연소, 분해연소, 표면연소, 혼소연소가 있다. 벽지는 종이류로써 분해연소를 하는데 분해연소는 분해 온도가 증발 온도보다 낮은 경우, 가열에 의해서 열분해가 일어나 열분해된 가연성 가스가 공기와 혼합하여 가연성혼합기를 형성한 후 표면에서 떨어진 곳에서 연소하는 현상을 말한다. 일반적으로는 열분해 이후에 고정탄소가 남아서 표면 연소된다. 목재, 종이 석탄등 대부분의 고체는 이러한 연

소를 한다. 하지만 열분해 온도가 낮은 종지와 같은 물질에서 열분해로 발생한 휘발분이 점화되지 않으면 다량의 연기를 동반하는 열분해 발열반응을 일으키는 수가 있으며, 이를 혼소연소라고 한다.²⁾ 이것은 휘발분의 착화온도보다 낮은 온도에서 열분해 반응이 계속되기 때문에 연기를 강제 점화시키든가, 연기의 발화점보다 온도를 높이면 화염연소로 된다.

3. 실험

3.1 실험시료

3.1.1 합지벽지

종이위에 무늬와 색상을 프린팅한 가장 저렴하고 시공하기 손쉬운 벽지로서 우리나라에서 가장 많이 사용되었던 대중벽지였으나, 최근 비닐 실크 벽지류의 사용이 확대되면서 시장 점유율이 떨어지고 있지만 시공이 편리하고 가격이 저렴하여 가장 널리 사용되는 벽지의 원조라 할 수 있다. 종이 두 장을 배접해 엠보싱과 프린트공정을 거친 종이벽지로서 임대주택이나 소형 아파트에 많이 사용되고 있다.

3.1.2 실크벽지

종이 위에 비닐을 코팅 처리한 벽지로 일반적으로 실크벽지, PVC벽지라고도 한다. 실크벽지는 종이벽지와 함께 가장 흔하게 사용된다. 비닐 벽지에 특수처리를 가해 발포 벽지나 섬유벽지와 같은 효과를 낸 것, 또는 나뭇결이나 돌, 금속 질감을 표현한 것 등 패턴과 색상이 다양하다. 비닐벽지에 특수 처리를 가했기 때문에 마찰과 굽힘에 강하고 방수, 단열 효과가 뛰어나다. 다만 비닐성분이 코팅이 되어 있기 때문에 화재 시 쉽게 점화할 수 있으며 유독가스가 많이 발생할 수 있다.

3.1.3 실크방염벽지

실크벽지와 같은 공정이지만 제조과정에서 방염제를 첨가한 것으로 특수벽지라 할 수 있다. 하지만 방염제 또한 화학물질이기 때문에 화재 시 착화시간을 지연시킬 수 있으나 유독가스의 발생이 더욱 심각해질 우려가 있다.

도포하는 방염제의 종류에는 아크릴수지, 염화고무수지, 무기염류인계화합물 등이 있으며 특히 무기염류인계화합물의 경우 유독가스가 비교적 적게 나오는 장점이 있다.

3.1.4 천연벽지

자연에서 가져온 재료들을 사용해 원재료가 지닌 독

Table 1. List of experimental sample⁶⁾

Sample name	Sample No.	Manufacturer	Density (g/m ³)	Main component parts
Viny coating wall paper	S ₁	L	7.1069	paper + PEC
Hapji wall paper	S ₂	L	7.7600	paper
Green-tea coated wall paper	S ₃	L	7.3198	green-tea + paper
Char coated wall paper	S ₄	S	7.2363	char + paper
Vermiculite coated wall paper	S ₅	A	8.8688	Vermiculite + paper
Ocher&char coated	S ₆	D	7.4050	ocher + char + paper
Fire resistant treated vinyl coating wall paper	S ₇	S	8.2736	paper + PEC

특한 질감을 살린 고급벽지이다. PVC비닐벽지와는 달리 환경친화적이며 자연미가 돋보이는 제품이다. 자연 소재가 지닌 장점도 그대로 누릴 수 있다. 소리와 빛을 흡수하는 기능이 뛰어나 안정감을 준다. 소재에 따라 습도조절 기능을 갖기도 한다. 제조공정과 시공과정에서도 유해물질이 첨가되지 않아 환경친화적인 면에서 기존 PVC벽지보다 경쟁력이 높다. 고가의 제품이 많으며 경우에 따라서는 시공상의 주의가 요구된다.

국내 주거문화 환경 상 실내 마감재로 벽지를 많이 사용하고 있고, 이러한 벽지는 화재 시 화염전파의 중요한 역할을 하고 있다.

본 실험에서는 시편으로 Table 1과 같이 총 7가지의 벽지를 선택하였다. 2000년대 들어 벽지시장의 화두는 ‘친환경’과 ‘건강’이다. 이에 따라 가장 널리 사용되어지고 있는 합지벽지와 실크벽지를 비롯하여 녹차벽지, 숯벽지, 숯·황토벽지, 질석벽지와 같이 요즘 사용증가를 보이고 있는 기능성 친환경벽지를 선정하였고 그 밖에 화재 위험성 감소를 위한 기능성 벽지로 실크방염벽지를 시편으로 선택하였다.⁶⁾

시편의 크기는 실험규정에 따라 가로 52 mm, 세로 140 mm로서 실험 전 온도 23±2°C, 상대습도 50±5% 조건하에서 최소 88시간동안 상태 조절한 후 실험에 사용하였다.⁴⁾

3.2 실험장치

상온산소지수 및 고온산소지수 측정을 위한 실험장치는 Figure 1과 같이 LOI tester 본체, TOI tester 본체, 상온실험시 사용하는 100 mm 유리관(chimney), 고온실험시 사용하는 75 mm 유리관(75 mm heat glass chimney), PC(DAQ system), 시편홀더, 또한 질소(N₂) 가스와 산소(O₂) 가스, 가스의 공급압력을 조절하는 유량계, 규격에 맞는 불꽃크기를 내는 점화기 등으로 구성되어 있다.

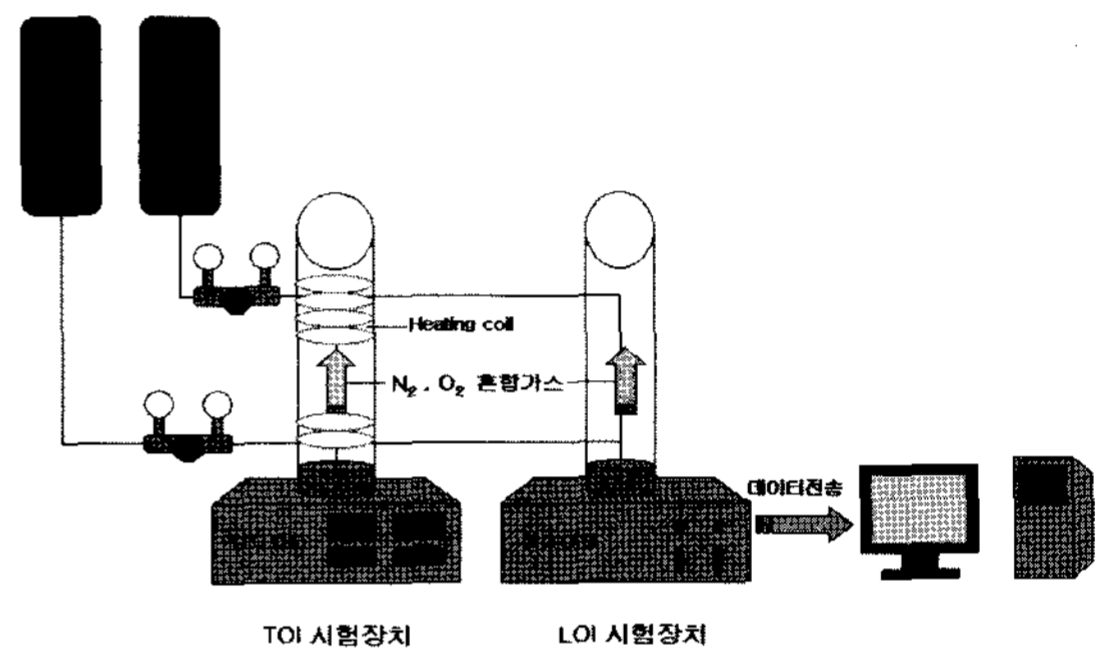


Figure 1. Experimental setup for oxygen index test.

Figure 1의 개략도에서 보이는 것과 같이 TOI 실험시 사용하는 chimney 내부에는 Heating coil이 감겨져 있어 본체 내 setting gage에서 원하는 온도를 입력하여 주면 chimney의 내부 온도가 입력치 만큼 상승하게 된다. 이때 TOI 실험장치 본체 내에는 preheater가 장착되어 있어 chimney 내부로 유입되는 혼합가스의 온도도 입력한 값에 맞추어 올려준다.

3.3 실험 방법

본 실험은 Table 2와 같은 조건하에서 실시하였다. 상온실험의 경우 KS M ISO 4589-2(산소지수에 의한 연소 거동의 측정-제2부 상온시험법)에 따라 실시하였고 고온실험의 경우 KS M ISO 4589-3(산소지수에 의한 연소 거동의 측정-제3부 고온 시험법)에 의거하여 실시하였다.

산소가스와 질소가스의 압력을 압력 조절기를 통해 ISO에서 규정하는 대로 상온실험은 2.75 bar, 고온실험은 ASTM 2863에서 규정하는 대로 2.0 bar로 맞추어 실험기기에 공급했다. 유량은 상온실험과 고온실험에 사용하는 chimney의 직경이 다르므로 그 조건을 동일하게 해주기 위해 상온 실험 시 18.8 l/min, 고온 실험

Table 2. Experimental conditions

	LOI test	TOI test
Applied std.	KS M ISO 4589-2	KS M ISO 4589-3
Inner temperature	23°C±2	(100,200,300)°C±2
Chimney diameter	100 mm	75 mm
Gas supply pressure	2.75 bar(ISO 4589)	2 bar(ASTM 2863)
Mixed gas flux	18.8 l/min(ISO 4589)	10.6 l/min (ASTM 2863)
Ignition method	Upside ignition method	

시 10.6 l/min으로 공급했다.

고온실험의 경우 온도조건은 각각 100°C, 200°C, 300°C로 하여 측정하였다. 실제 화재 시는 이보다 더 높은 온도로 올라가겠지만 chimney의 한계허용온도가 400°C이므로 최고 300°C까지 실험을 하였다.

다음 Figure 2는 산소지수 시험장치의 작동 흐름도를 나타낸 것이다.

최초 산소 및 질소가스의 모든 밸브를 열어 혼합가스를 투입하였을 때 산소지수가 50%가 되도록 맞추어 주고 두 가스의 유량을 일치시켜 보면서 실험 장치를 setting했다.

기기 내에 설치된 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 연소 시 공급될 유량 및 산소 농도를 조절한 후 규격에 명시된 Ignitor를 사용하여 시편을 착화시켰다. 이때 MFC를 사용하여 공급되는 유량 및 산소지수는 PC에 설치된 DAQ(상태 표시 및 제어 프로그램)시스템을 통해 관찰하였으며 chimney 내부에 투입되는 혼합가스의 온도와 대기온도 또한 PC를 통해 측정할 수 있었다. 고온실험의 경우 온도조건은 Heat glass

chimney 내부에 설치되어 있는 K-type의 열전대로 측정하여 안정화 된 후 실험을 시행하였다. 온도조건에 대한 오차범위가 실험규정에 정확히 명시되어 있지 않았기 때문에 상온실험 때와 동일하게 ±2°C를 유지하였다.

위와 같이 실험장치내의 혼합가스의 압력 및 유량, 온도 등의 실험조건을 원하는 대로 만족시킨 후 시편이 공기 중에서 연소가 원활하게 이루어진다면 산소지수를 21%에서 1%씩 낮추면서 실험하고 공기 중에서 원활하게 연소되지 않는다면 21%에서 1%씩 올려가면서 실험하여 개략적 상·하한계를 찾는다. 그 점에서부터 다시 산소지수를 0.2%씩 조절하면서 실험하여 오차범위 0.2%안에서 시편의 산소지수를 찾아내고 값의 정확성을 높이기 위해 다섯 차례 반복 실험하여 정확한 산소지수 값을 찾아내었다. 또한 산소지수는 실험실환경에도 민감하게 영향을 받기 때문에 각기 다른 날 세 차례 반복 실험하여 산소지수의 오차를 줄이기 위해 노력하였다.

4. 실험결과 및 고찰

각 시편에 대한 결과 값은 세 차례 반복실험 실시 후 그 평균값을 적용하였으며 각 시편 당 실험값의 오

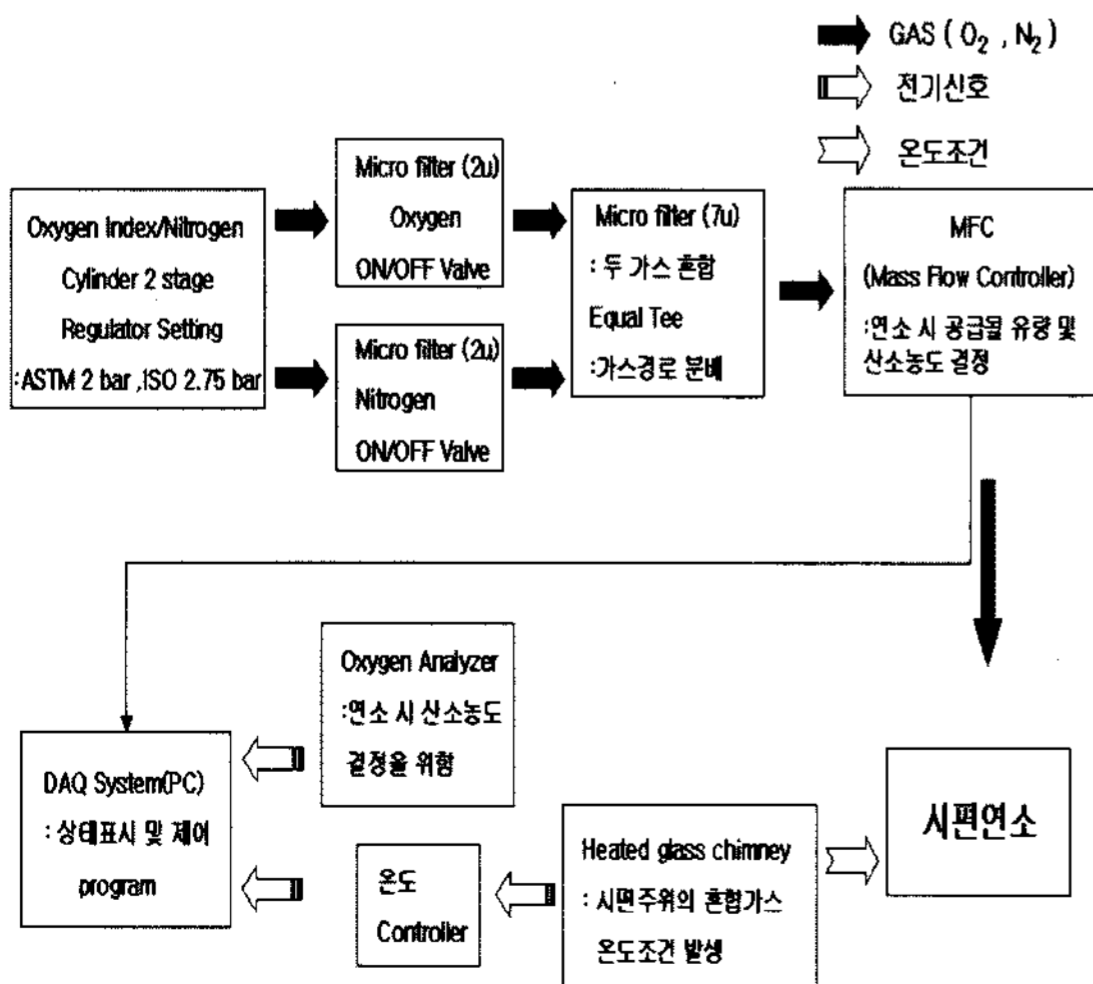


Figure 2. Experimental flow diagram of oxygen index test.

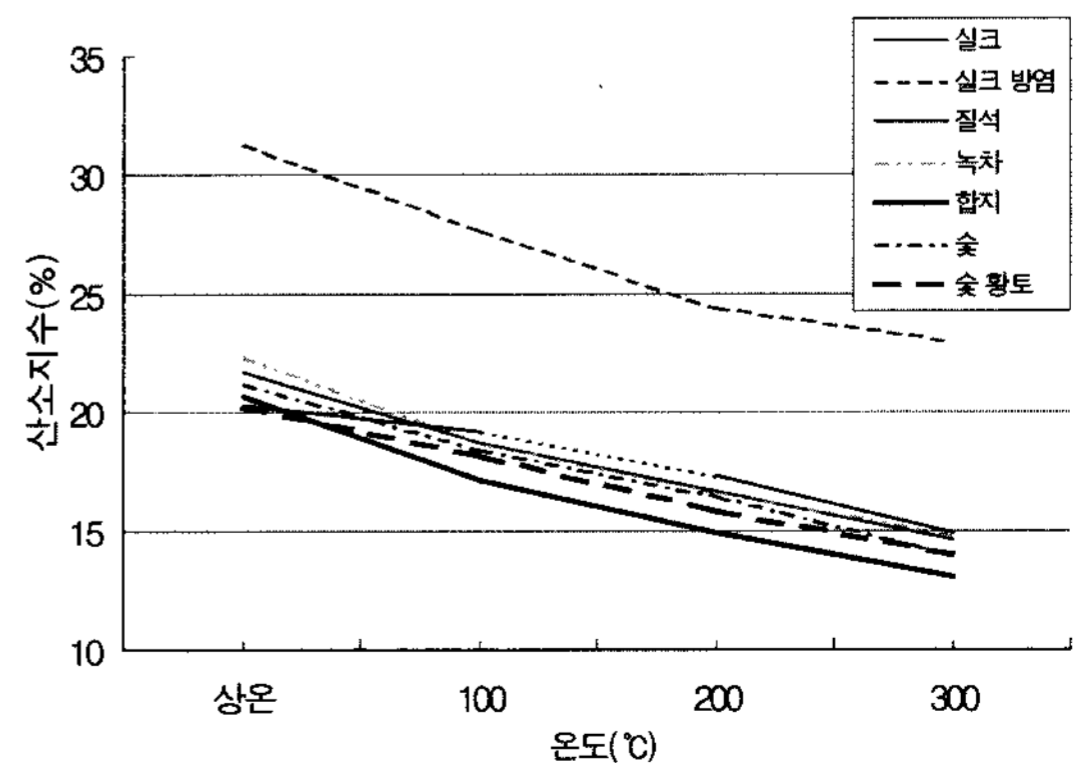


Figure 3. Oxygen index with elevated temperature.

차는 산소농도 ±0.2% 이내였다.

Figure 3은 각 시료에 대한 상온 및 고온(100°C, 200°C, 300°C) 실험에서의 각 시료의 산소지수의 변화를 나타낸 그래프이다.

7가지 시료 모두 온도가 높아질수록 산소지수가 낮아지고 있으며 산소지수의 감소 경향이 네 종류의 시료가 유사하다는 것을 파악할 수 있었다. 실크 방염벽지를 제외한 6가지 시료는 300°C일 경우 산소지수 15% 이하에서도 연소가 일어났다.

실제 화재 시에는 화재실의 온도가 300°C 이상이지만 본 실험에 사용된 chimney의 한계허용온도가 400°C이므로 300°C까지의 산소지수 값을 구한 후 상온에서와 고온에서의 산소지수 값의 변화추이를 관찰하고자 했다.

실크방염벽지의 경우 실험 시 다른 시료들과 다른 연소특성을 보였다. 방염처리 된 벽지의 앞면은 열에 의해 탄화가 될 뿐(무염연소) 화염은 발생하지 않았으며 방염처리가 되지 않은 뒷면에서 서서히 화염이 발생하였으며 다른 시료와 비교해 연소 길이도 아주 짧은 편이었다. 실크방염벽지의 경우 산소지수가 가장 높기 때문에 상온상태에서는 산소지수만으로 가장 안전한 벽지라 판단될 수 있으나 화재 시에는 300°C보다 온도가 더 올라갈 수 있기 때문에 방염실크벽지의 산소지수도 더 낮아지게 될 수 있으며 연소하게 될 때는

독성연기 배출의 위험성이 고려되어야 할 것이다. 고온 실험 시 chimney 내부의 온도가 300°C 이상이 되면 다음 Figure 4처럼 시료의 겉 표면이 탄화되어 연소특성이 달라지는 것을 관찰할 수 있었다.

200°C까지는 점화장치로 시료를 착화시킬 경우 서서히 연소되는 현상을 보였으나 300°C 이상에서는 시료는 순간적으로 연소하였다.

연소시간이 빨라지는 것은 시료의 수분증발 및 열분해 등으로 인해 연소 조건이 좋아졌기 때문으로 판단된다. 이론적으로 온도가 더 높을수록 이러한 현상은 더욱 가속화될 것으로 예상되었다.

본 실험을 통해 분위기의 온도에 따라 가연물의 산소지수 크게 달라짐을 확인할 수 있었다. Figure 5는 300°C일 때 황토·숯벽지의 산소지수별 연소 길이를

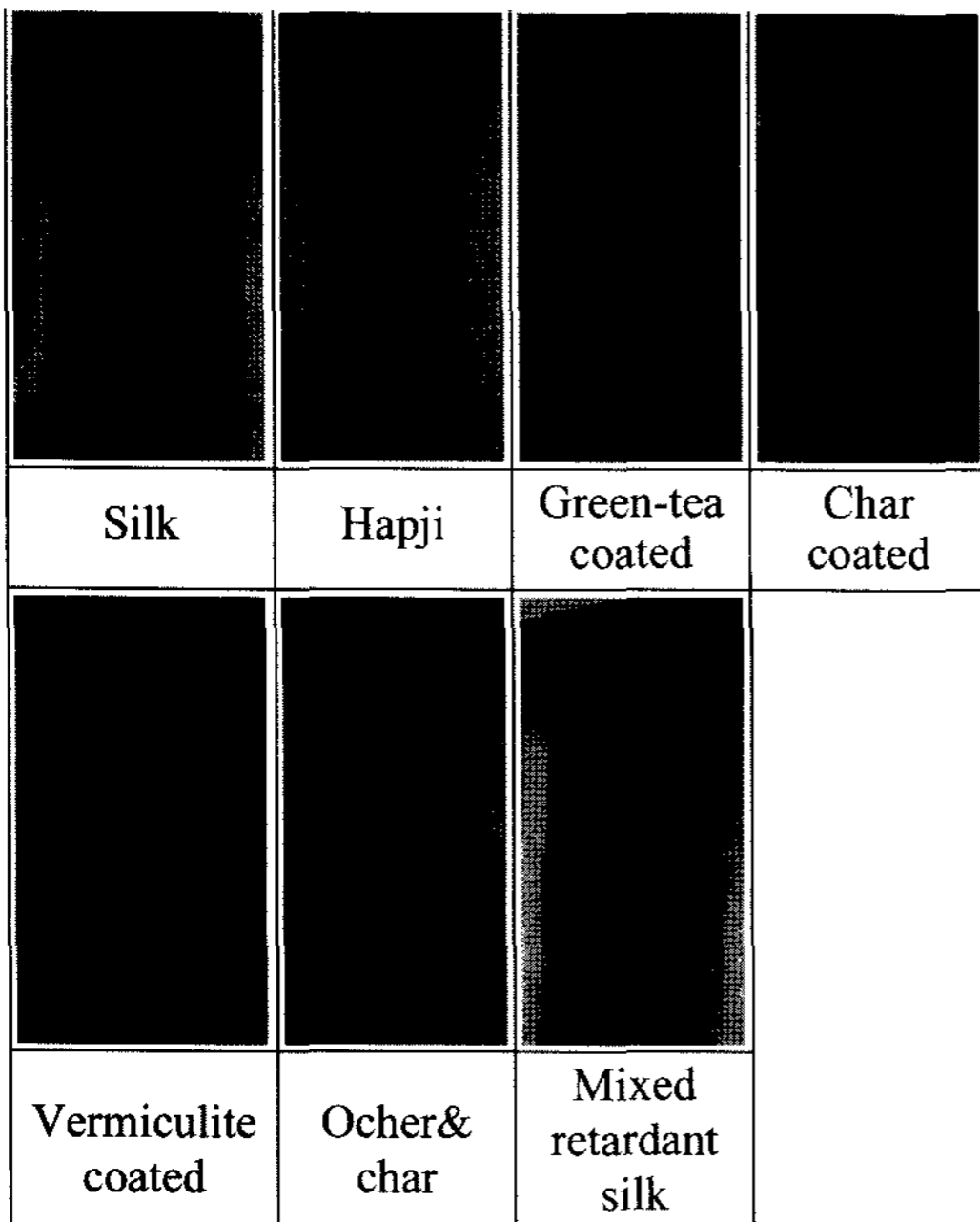


Figure 4. Test sample (300°C).

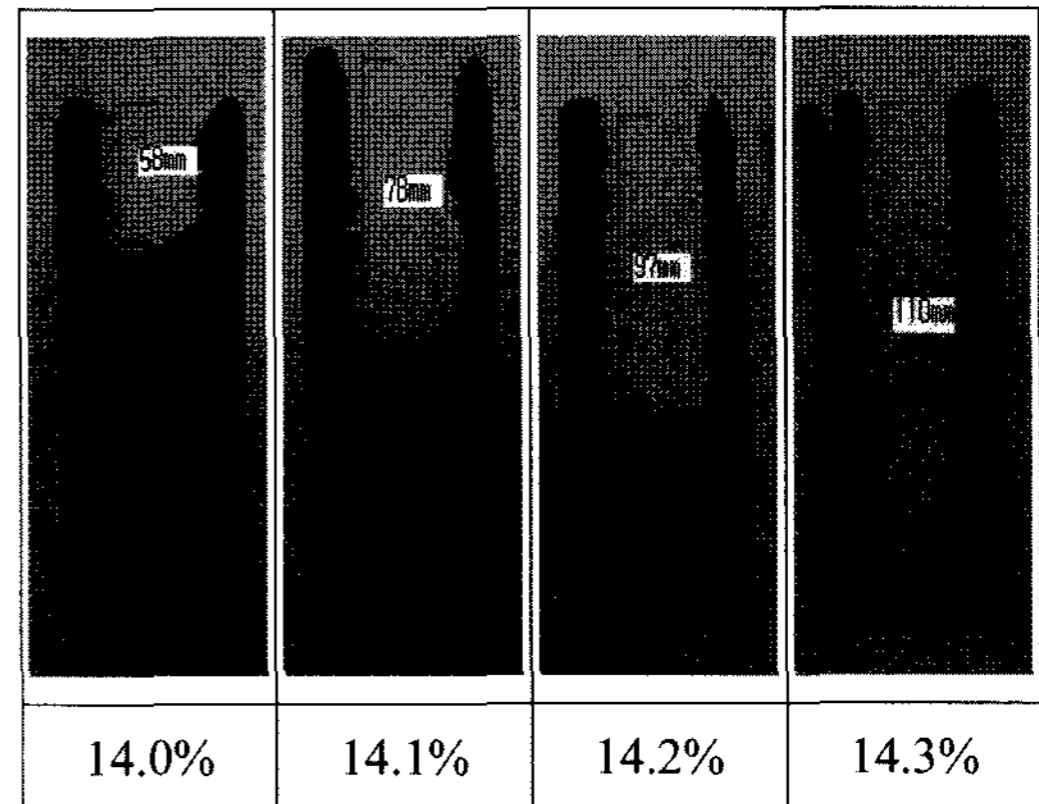


Figure 5. Combustion length of loess charcoal wall paper (300°C).

Table 3. Combustion length according to 0.1% oxygen index difference (100°C)

Sample No.	Oxygen index & burn length			
	OI(%)	19.1	19.2	19.3
S ₁	Combustion length(mm)	32	63	140
	OI(%)	17.0	17.1	17.2
S ₂	Combustion length(mm))	58	75	140
	OI(%)	18.6	18.7	18.8
S ₃	Combustion length(mm)	42	92	140
	OI(%)	18.4	18.5	18.6
S ₅	Combustion length(mm)	87	130	140
	OI(%)	27.8	27.9	28
S ₇	Combustion length(mm)	65	105	140

나타낸 것이다.

시료의 연소 시 시료보존상태가 양호한 황토·숯벽지의 경우 300°C에서 산소농도가 각각 14.0%일 때 58 mm, 14.1%일 때 78 mm였고 14.2%일 때 97 mm는 14.3%일 때는 시편이 전소되었다. 황토·숯벽지 뿐만 아니라 모든 시편이 산소지수 0.1% 차이로도 연소 길이의 현저한 차이를 보였다.

Table 3은 100°C에서 각 시료별로 0.1% 산소지수차이에 따른 연소 길이를 나타낸 것이다. 0.1% 산소지수차이에 따라 시료가 착화되지 않을 수도 있고 또는 시료가 전소할 수 있다. 140 mm의 연소 길이는 시편이 모두 전소한 것으로 실제 화재 시 연소 길이가 아닌 연소면적으로 비교하였을 경우는 그 차이가 더 커질 수 있다.

이러한 실험 결과는 산소지수가 화재확대에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있으며, 그동안 연구되어 온 상온에서의 가연물의 산소지수 값과 더불어 분위기 온도에 따른 산소지수 값의 측정과 연구가 필요함을 보여주었다.

또한 화재위험성 평가를 위해 가연물의 산소지수를 제시하여야 할 경우와 질식소화 시 가연물을 소멸시키기 위한 산소농도의 정확한 제시를 위해서는 고온상황 하에서의 정확한 가연물의 산소지수 측정이 매우 중요하다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 일반적으로 알려진 상온에서 측정된 산소지수와 고온에서 측정된 산소지수의 차이가 많이 난다는 것을 알 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시편의 종류에 따라 상온과 300°C에서의 산소지수 차이는 5.42~8.28%의 큰 차이를 보였으며 온도가 증가할수록 산소지수는 감소하였다.

2. 방염 처리된 실크벽지의 경우도 상온과 고온에서의 산소지수 차이가 크게 나타나지만 방염 처리되지 않은 일반 벽지에 비해 산소지수가 높아 상대적인 안전성을 확인할 수 있었다.

3. 벽지뿐만 아니라 실내장식물중 가연물에 관한 고온산소지수 연구가 더욱 확대될 필요성이 있다고 판단되어진다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 호서대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 오규형, 최연이, 이성은, “내장벽지의 연소특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.1, pp.90-97(2007).
2. J.G. Quintere, “Principles of Fire Behavior”, Delmar (2002).
3. 김현주, “건축내장재의 연소특성에 관한 연구”, 강원대학교 석사학위논문(2007).
4. KS M ISO 4589-2 : 산소지수에 의한 연소 거동의 측정, 제2부: 상온시험법.
5. KS M ISO 4589-3 : 산소지수에 의한 연소 거동의 측정, 제3부 고온시험법.
6. 최연이, “벽면 내장재로서의 벽지 연소특성에 관한 연구”, 호서대학교 석사학위논문(2006).
7. 박형주, 곽동일, “다중이용업소에서 사용하는 실내장식재에 방화 방염제도 개선에 관한 연구”, 한국화재소방학회, Vol.15, No.3, pp.47-54(2001).
8. 건축 재료의 연소가스 독성 및 평가방법의 고찰, 건축내장재료 기획 제1호, pp.25-30.
9. Wallpaper and Measuring Covering for Decorative Finish, KCM 7305(1994).
10. Eiji Yanai, “고분자재료의 연소생성가스 및 그 독성”, 火災, Vol.47, No.6(1997).
11. Marcelo M, Hirschler, “Fire Hazard and Toxic Poxic Potency the Smoke from Burning Materials”, Advances in Combustion Toxicology, Vol.2(1990).
12. 박미라, 김광일, 김태구, “벽지의 종합적 화재 위험성 평가에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문지, Vol.16, No.2, pp.33-39(2003).
13. NFPA, SFPE Handbook of Fire Protection Eng., 3rd Edition.