

막재료의 설치높이와 발열량에 따른 화재연소특성

조승호¹, 최광호², 노영숙^{3*}

Fire Combustion Characteristics of Membrane Materials According to the Height and Heat Generation Rate

Seung-Ho Cho¹, Kwang-Ho Choi², Young-Sook Roh^{3*}

Abstract: Various form of membrane structures are being built in recent years. However, there is no appropriate fire proofing standards which can be applied each specific membrane structures. Therefore, existing fire protection standards are in establishment state and they need to be revised. In the current study, commonly used membrane materials(ETFE, PVF, PTFE) has been selected to investigate its fire resistance behavior with the change of fire duration time. In addition to this, heat generation rate of the membrane materials in correlation with the height of membrane has been investigated. And these fire combustion characteristics of membrane materials can be used in future practice for the fire prevention regulations of membrane structures.

Keywords: Membrane structures, Membrane material, Heat generation rate, Combustion characteristic

1. 서 론

최근 다양한 형태의 막구조물의 건설이 증가추세이지만 막구조물에 대한 내화기준이 없어 적합하지 않은 내화기준이 적용되어 막구조 활용성이 위축되고 있는 실정이다. 때문에 막구조물의 건설 활성화에 맞추어서 이에 대한 내화기준의 제·개정이 필요한 상황이다. 특히, 막구조물의 용도, 규모, 특성, 사용재료 및 공법기술별로 내화성능을 분류하여 체계적으로 정리할 필요성이 대두되고 있다.

또한 막구조물 공간의 경우 화재 시 높은 비중의 가연물량과 고온 화열에 의한 막재료의 취약성으로 막구조물의 피해는 일반 화재보다 더욱 큰 피해를 입는다. 이러한 상황에서 지금까지 막구조물은 별도의 내화 대책없이 건설되어 왔으며, 최근에서야 막구조물의 내화구조설계기준 제정의 필요성이 제기되었다. 그러므로 막구조물을 내화구조로 하기 위하여 현행 내화구조 성능기준을 적용하면, 외벽 중 비내력벽(연소할 수 있는 부분)은 1시간 내화, 지붕은 30분 내화가 되어야 한

다. 막구조의 경우 기존 내화구조 성능기준의 적용보다는 막구조물의 내화구조 성능평가에 근거한 성능기반 내화구조 기준을 적용할 수 있도록 되어야 한다.

따라서 막구조물에 사용되는 막재료와 화원과의 거리에 따라 성능을 구분할 수 있는 내화설계 기준이 요구되며, 막재료의 불꽃 온도 및 확산 등 화재특성의 규명기술이 중요하기 때문에 본 연구에서는 막재료의 화원과의 거리와 발열량에 따른 화재연소특성을 파악하고자 한다.

2. 막재료의 특성

연소실험에 적용한 막재료는 막구조물에 일반적으로 사용하고 있는 3종류(ETFE, PVF, PTFE)를 선정하였으며, 이에 대한 막재료의 특성은 Table 1과 같다.

2.1 ETFE(Ethylene Tetra Fluoride Ethylene)

ETFE는 열가소성 불소함유 고분자 재료로서 25%의 에틸렌과 75%의 테프론으로 구성된 막재료이다. 높은 내구성 및 내화학성을 가지며, 자연발화하지 않는다. 에어쿠션인 경우에는 통기량 및 차광, 투광 정도의 제어가 가능하여 자연광의 유효한 사용을 통해 에너지 절감을 가능하게 하는 동시에 보온단열작용과 빛이 번지는 매우 우수한 라이팅 효과를 제공한다. 시공 예로는 독일월드컵 결승전 경기장(알리안츠 아레

¹정회원, 단국대학교 부설 리모델링연구소 연구교수, 공학박사

²정회원, 남서울대학교 건축공학과 교수, 공학박사

³정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 건축공학과 교수, 공학박사, 교신저자

*Corresponding author: rohys@seoultech.ac.kr

School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

나), 베이징올림픽 주경기장(버즈 네스트) 등이 있다.

2.2 PVF(Poly Vinyl Fluoride)

PVF는 불소수지를 필름화 시킨 제품으로 수명은 15년 이상으로 보고 있으며, 정전기 발생 억제 작용이 강하여 오염이 잘 되지 않는 특성이 있어 제품의 수명이 길고 오염이 되지 않으므로 관리비가 들지 않고 항상 깨끗한 외관을 유지 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 일반 천막지에 사용하는 고주파 발생 기계를 이용하여 접합 할 수 없어, 불소층을 특수한 기계를 사용하여 깎아낸 후 접합을 해야 하므로 일반 공장에서 접합하기가 어려우며 원단의 가격 및 가공비가 다소 비싸다는 단점이 있다. 양산실내체육관 지붕, 성남중앙공원 야외무대 객석에 사용되었다.

2.3 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene)

PTFE는 필라멘트 유리섬유로 기본 원단을 용제에 녹인 액상의 불소를 수차례에 걸쳐 침투시켜 숙성시킨 원단으로 강한 인장강도를 가지고 있다. 원단 전체의 구성이 유리섬유와 불소로 이루어져 있어 불에 타지 않으며, 테프론코팅 표면에는 물이나 기름이 묻지 않아, 표면이 오염되지 않는 반면에 인열강도가 PVF 등의 원단보다 현저하게 약해 초기의 파열 후 연속하여 찢어지며, 유리섬유의 약점인 굴절성이 나빠 원단이 부러지는 경향을 보이는 단점이 있다. 삼암월드컵경기장, 제주월드컵경기장, 대구월드컵경기장 등에 사용되었다.

Table 1 Characteristics and performance of membrane materials

Item	ETFE	PVF	PTFE
Woven Fabrics	Thermoplasticity Fluoroplastic	Polyester	Glass Fiber
Coating Material	Teflon	PVC+PVF / PFLT	Teflon
Thickness	50~300 μm	0.8 mm or More	0.7 mm or More
Tensile Strength (MPa)	40~60	35~75	40~90
Persisting Period	20	15~20	25~30
Self-purification Capacity	Excellent	Excellent	Excellent
Color	Variety	Limit	White / Silver
Cost	Middle-low Price	Middle-high price	High Price

3. 막재료와 화원과의 거리에 따른 연소실험

3.1 실험계획

막구조물에 사용하는 막재료의 변형 시의 온도를 파악하기 위해서 막재료를 실험장치에 설치한 후, 화원과 막재료의 거리에 따른 막재료 표면의 변형 및 온도변화를 측정하였다. 실험변수로는 Table 2에서 보는 바와 같이 일반적으로 사용하는 ETFE, PVF, PTFE 3종류의 막재료를 0.5×0.5 m로 재단하여 실험장치에 고정하였고, 화원과 막재료의 거리는 100, 200, 300 mm로 설정하고, 화원으로는 부탄가스를 사용하였다. 막재료 표면의 변형 시 온도를 측정하기 위하여 열전대온도계를 설치하고 데이터로거로 온도 변화를 측정하였다.

3.2 실험결과 및 분석

육안으로 관찰된 실험진행 상황은 각 재료마다 특정온도에 도달하면 변형이 일어난 후 파단 되었다. Table 3과 같이 ETFE, PVF는 화원과의 거리가 멀어짐에 따라 시간이 지체되었지만 최종적으로는 변형 후 파단 되었다. PTFE는 100 mm에서만 파단되었으며, 200, 300 mm에서는 변형만 일어났다.

Fig. 1의 실험종료 후 상황에서 보는 바와 같이 막재료의 연소특성은 불꽃이 막재료에 직접 안 닿으면 변형이 일어나지 않았으나 불꽃이 직접 닿는 순간 빠르게 변형이 일어난 후에 파단 되었다. 또한 막재료에 불꽃이 닿는 곳에만 파단 되고 위로는 불이 번지지 않았다. 화원과 거리가 가까울수록 막재

Table 2 Experiment variable

Classification	Variable
Type of Membrane	ETFE, PVF, ETFE
Distance(mm)	100, 200, 300
Heat Source	Butane Gas(Torch)

Table 3 Temperature result at membrane fracture according to the distance

Type	Distance [mm]	Time [s]	Temperature [°C]
ETFE	100	2.5	411.7
	200	4	407.1
	300	15	480.3
PVF	100	5	871
	200	13	874.9
	300	17	827
PTFE	100	52	1,145.5
	200	-	-
	300	-	-

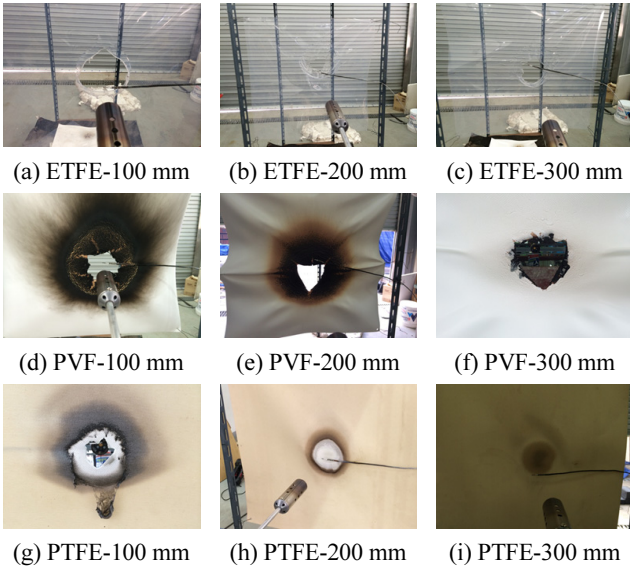


Fig. 1 Situation after the end of the experiment

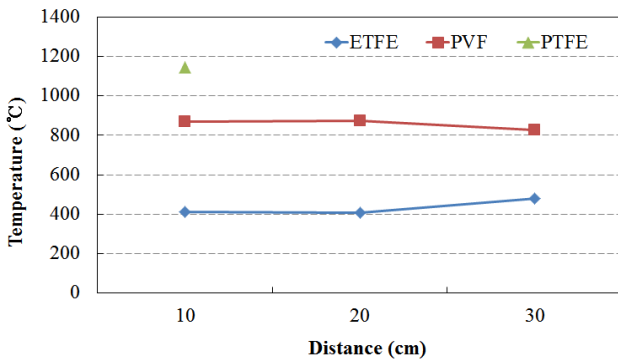


Fig. 2 Temperature at membrane fracture according to the distance

료가 더 빨리 변형 한 것을 알 수 있었으며, 실험을 수행하는 동안에 PVF, PTFE 막재료의 표면에서는 재가 떨어졌다. 각 재료별 파단온도는 Fig. 2와 같다.

4. 막재료의 설치높이와 발열량에 따른 연소실험

4.1 실험계획 및 방법

막재료의 설치높이와 발열량에 따른 막재료의 화재연소특성을 파악하고자 Table 4에서 보는 바와 같이 막재료의 종류는 ETFE, PVF, PTFE, 막재료의 설치높이는 1.0, 1.5 m, 발열재(등유)의 양은 1, 2 L로 선정하였다.

실물실험을 모사할 수 있는 장치를 Fig. 3과 같이 1.2×1.2×3.6 m의 크기로 제작하고 하부에 송풍을 위하여 간격을 이격

Table 4 Experiment variable

Classification	Variable
Type of Membrane	ETFE, PVF, PTFE
Installation height(m)	1.0, 1.5
Kerosene(L)	1, 2

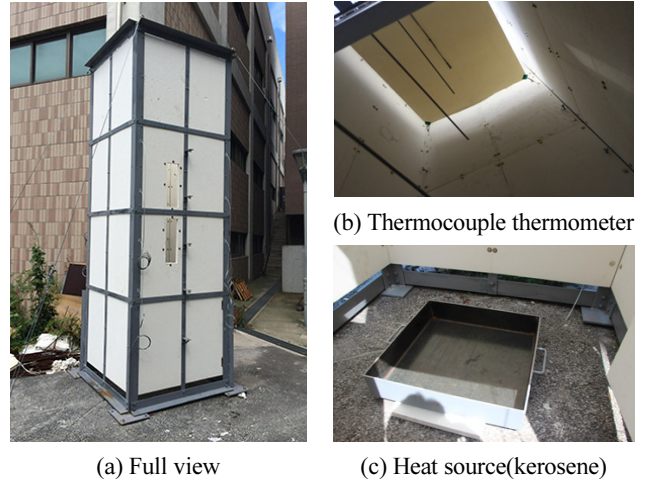


Fig. 3 Combustion experiment device

Table 5 Temperature and time at membrane fracture (installation height 1.0 m)

Type	ETFE		PVF		PTFE	
Kerosene(L)	1	2	1	2	1	2
Time(s)	148	144	102	172	126	146
Temperature(°C)	370	599	429	558	503	737

하고 바닥에 화원 용기를 배치하였다. 실험 중 막재료의 변화를 관찰하기 위하여 장치 가운데에 강화유리를 설치하였다.

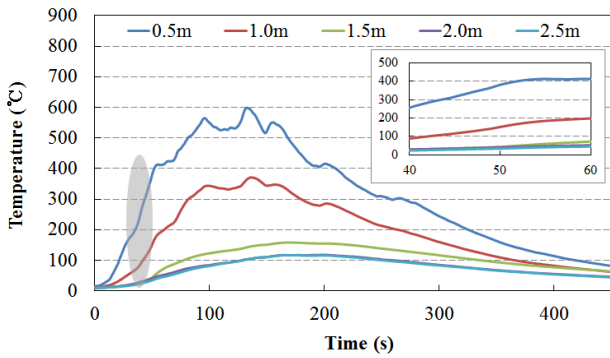
막재료의 표면 및 실험장치의 높이별 온도를 확인하기 위하여 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m 마다 열전대온도계를 설치하고 데이터로거를 통해서 온도를 측정하였다.

4.2 실험결과 및 분석

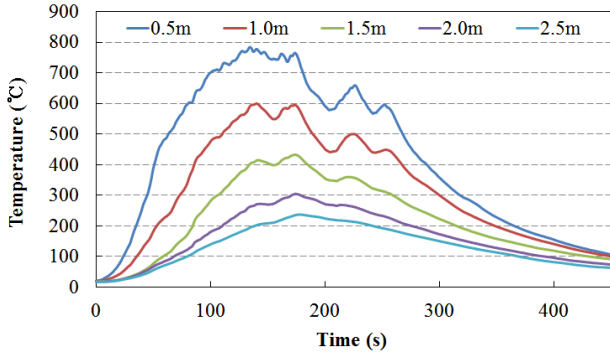
4.2.1 설치높이 1 m, 발열량 1, 2 L

ETFE, PVF, PTFE를 설치높이 1 m에서 발열량에 따른 온도변화를 분석해보면 앞선 실험에서 측정되었던 변형과 파단 온도를 볼 수 있었다. ETFE, PVF는 전체적인 그래프가 비슷하게 나타났지만, PTFE는 막 아래와 위에 설치된 열전대에서 측정된 온도가 확연히 차이가 나는 걸 알 수 있었다. Table 5는 막재료의 높이 1m에서 막재료의 종류에 따른 파단 온도 및 시간을 정리한 것이다.

Fig. 4(a)는 ETFE 막재료를 열원으로부터 1.0 m 떨어진 곳



(a) Temperature changes in the measured height(kerosene 1.0 L)

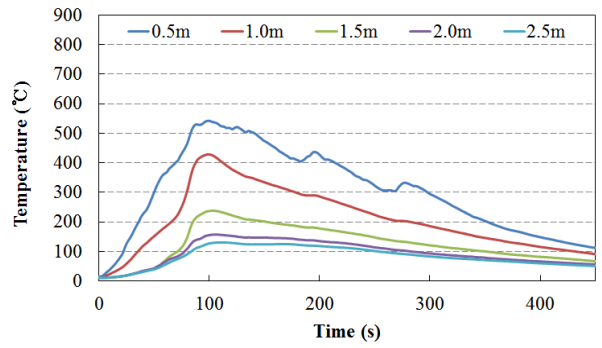


(b) Temperature changes in the measured height(kerosene 2.0 L)

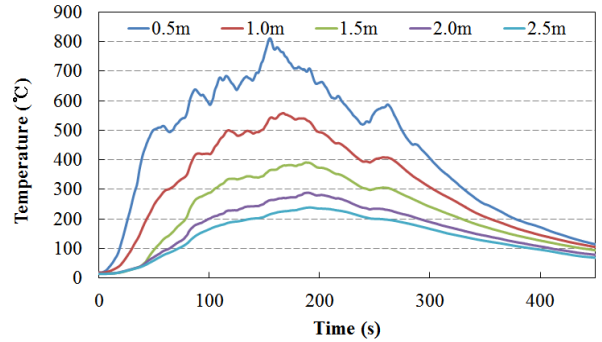
Fig. 4 Temperature changes on the heat source amount(ETFE - installation height 1.0 m)

에서 발열재양 1.0 L로 연소실험을 수행하여 열전대온도계 설치를 0.5~2.5 m에서 0.5 m 간격에서의 온도변화를 나타낸 것이다. 화재성상을 살펴보면 화염이 막에 닿아 변형하다가 54초 정도에서 찢어졌다. 이때 0.5 m에 설치된 열전대의 온도는 410~420°C이고 찢어지면서 막 위에 설치된 1.5 m 열전대의 온도가 갑자기 상승하는 것으로 나타났다. 동시에 0.5~1.0 m 열전대의 온도는 감소하였다. Fig. 4(b)는 발열재양을 2.0 L로 하여 연소실험을 수행하였으며 37초 정도에 0.5 m 열전대에서 측정된 온도가 400°C 이상에 도달하는 것이 관찰되었고, 찢어짐과 동시에 막 아래쪽에 설치된 열전대의 온도가 상승하였다. 찢어진 후에는 열전대 설치높이마다 그래프의 형상은 비슷하게 나타났다.

Fig. 5(a)는 PVF 막재료를 열원으로부터 1.0 m 떨어진 곳에서 발열재양 1.0L로 연소실험을 수행하여 얻은 온도변화이며, 앞선 실험을 통해 측정된 온도와는 다르게 찢어졌을 때의 온도가 감소하였다. 막재료를 고정하여 일부 면에만 실험한 것과는 다르게 불꽃 온도뿐만 아니라 발생하는 유독가스의 온도, 주변온도 또한 내화실험 시 고려해야 할 부분인 것으로 사료된다. Fig. 5(b)는 실험 시 그래프에 나타난 온도 양상이 더 빨리 기울기가 가파라지고 최고 온도도 높게 측정되었다.

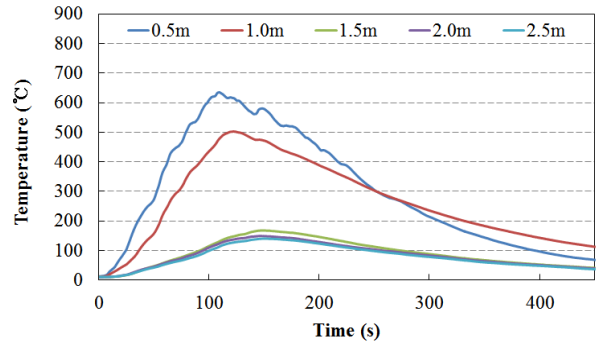


(a) Temperature changes in the measured height(kerosene 1.0 L)

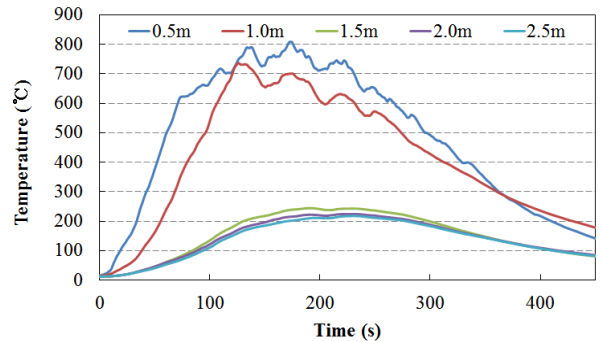


(b) Temperature changes in the measured height(kerosene 2.0 L)

Fig. 5 Temperature changes on the heat source amount(PVF - installation height 1.0 m)



(a) Temperature changes in the measured height(kerosene 1.0 L)



(b) Temperature changes in the measured height(kerosene 2.0 L)

Fig. 6 Temperature changes on the heat source amount(PTFE - installation height 1.0 m)

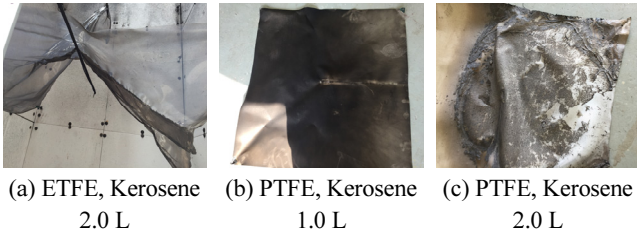


Fig. 7 Situation after the end of the combustion experiment (installation height 1.0 m)

하지만 전체적인 그래프의 양상은 발열재 1.0 L의 실험결과와 비슷하게 나타났다.

Fig. 6(a)는 PTFE 막재료를 열원으로부터 1.0 m 떨어진 곳에서 발열재량 1.0 L로 연소실험을 수행한 온도변화를 나타낸 것이다. 다른 ETFE, PVF 막재료의 온도변화와는 극명하게 다른 양상을 보였다. 우선 막재료에 약간의 변형만 있을 뿐 화염에 견뎠으며, 막 아래 열전대온도계와 막 위의 열전대온도계와는 온도차의 대비를 보여줬다. 또한 최고온도가 600°C 이상으로 증가하였고, 그 이유는 막이 화염을 견디면서 막 아래 부분의 열이 빠져나가지 않고 집중되었기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6(b)에서는 측정된 최고온도가 발열재량 1.0 L 보다 더 상승하였고, 막 아래, 위 열전대에서 측정된 온도 분포가 더욱 차이가 났다. 또한 변형된 시간이 발열재 1.0 L 실험 보다 오히려 늦어졌는데, 이것은 외기(바람)에 의한 영향이라고 사료된다. Fig. 7은 실험 후 ETFE, PTFE의 모습을 나타낸다.

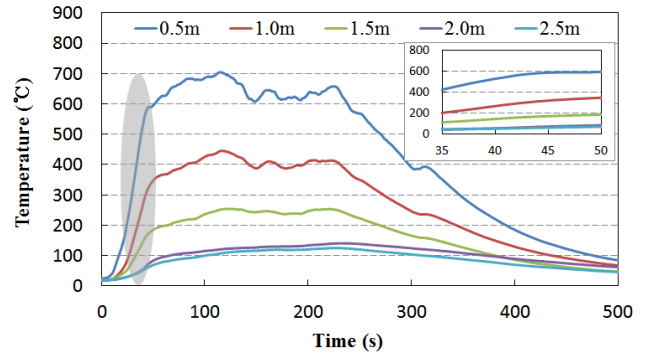
4.2.2 설치높이 1.5 m- 발열재량 1, 2 L

ETFE, PVF, PTFE를 설치높이 1.5 m에서 발열재량에 따른 온도변화를 분석해보면 ETFE, PVF는 전체적으로 온도변화가 비슷하게 나타났지만, PTFE는 막 아래와 위에 설치된 열전대온도계에서 측정된 온도가 확연하게 차이가 났다. 그리고 막재료의 설치높이 1.0 m보다 전체적인 온도분포가 높게 형성된 것을 알 수 있었다. Table 6은 막재료의 높이 1.5 m에서 막재료 종류에 따른 판단 시 온도 및 시간을 정리한 것이다.

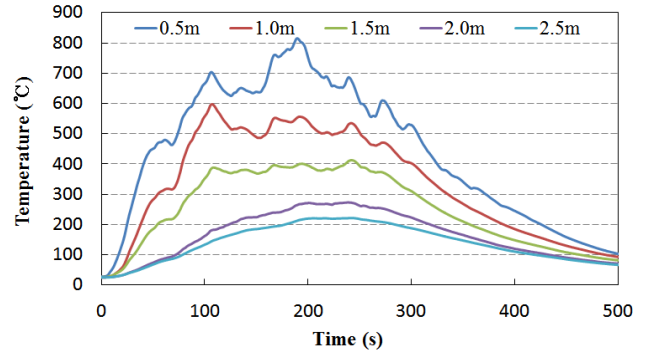
Fig. 8(a)는 ETFE 막재료를 열원으로부터 1.5 m 떨어진 곳에서 발열재량 1.0 L로 연소실험을 수행하여 온도변화를 나타낸 것이다. 화염의 열기가 올라가다 막이 찢어지는 58초를 경계로 막 아래 설치된 열전대의 온도가 순간 감소하였고, 막 위의 온도는 증가하였다. 설치높이 1.0 m 실험보다 오히려 최고 온도가 증가하였는데, 막재료가 1.0 m에 설치되었을 때는 오히려 화염을 가둬두고 산소를 차단하였지만, 막재료와 발열재와의 간격이 보다 넓어지면서 화염이 더 세지는 역할을 한 것으로 판단된다. Fig. 8(b)는 58초를 경계로 막재료 아래 열전대온도계의 온도는 순간 감소하다가 이내 증가하는 경향을 보였다. 그리고 발열재 2.0 L가 1.0 L보다 변형시간이 늦어

Table 6 Temperature and time at membrane fracture (installation height 1.5 m)

Type	ETFE		PVF		PTFE	
Kerosene(L)	1	2	1	2	1	2
Time(s)	128	252	143	157	158	138
Temperature(°C)	254	413	280	539	453	614



(a) Temperature changes in the measured height (kerosene 1.0 L)

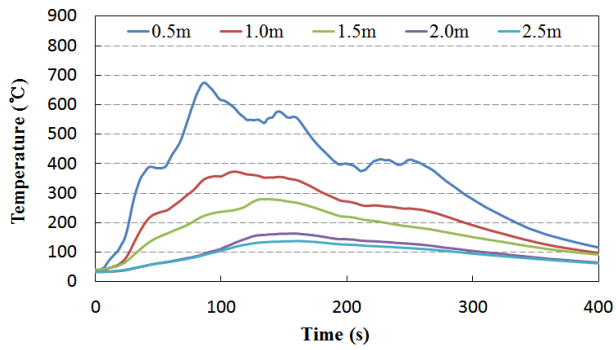


(b) Temperature changes in the measured height (kerosene 2.0 L)

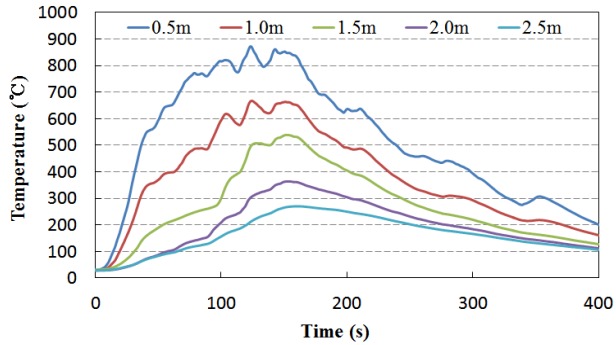
Fig. 8 Temperature changes on the heat source amount (ETFE - installation height 1.5 m)

진 이유는 그래프의 형상을 보면 알 수 있듯이, 외기의 영향으로 온도변화 곡선이 들쭉날쭉하게 보이듯이 화염이 집중되지 못한 것으로 사료된다. 최고온도는 발열재 1.0 L 실험보다 상승하였으며, 이내 시간이 지나면서 온도변화 곡선의 양상이 비슷하게 나타났다.

Fig. 9(a)는 PVF 막재료를 열원으로부터 1.5 m 떨어진 곳에서 발열재량 1.0 L로 연소실험을 수행하여 온도변화를 나타낸 것이다. 설치높이 1.0 m 실험보다 측정된 최고온도가 더 높았으며, 0.5, 1.0 m에 설치된 열전대온도계의 온도가 순간적으로 꺾이는 곳이 막재료가 변형되어 찢어진 순간으로 나타났다. Fig. 9(b)는 전체적인 온도변화가 발열재 1.0 L보다 상대적으로 조정되었고, 41초 부근에서 변형 후 찢어졌는데 이때 막재료 아래 설치된 열전대온도계의 온도의 기울기가 순간 감소하였다.

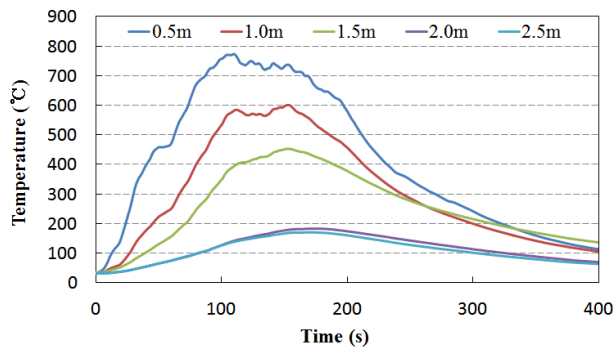


(a) Temperature changes in the measured height(kerosene 1.0 L)

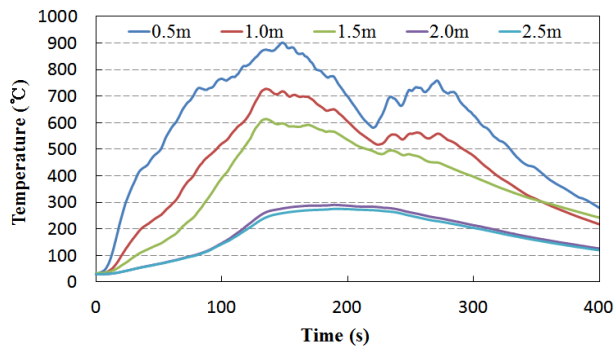


(b) Temperature changes in the measured height(kerosene 2.0 L)

Fig. 9 Temperature changes on the heat source amount(PVF - installation height 1.5 m)



(a) Temperature changes in the measured height(kerosene 1.0 L)



(b) Temperature changes in the measured height(kerosene 2.0 L)

Fig. 10 Temperature changes on the heat source amount(PTFE - installation height 1.5 m)



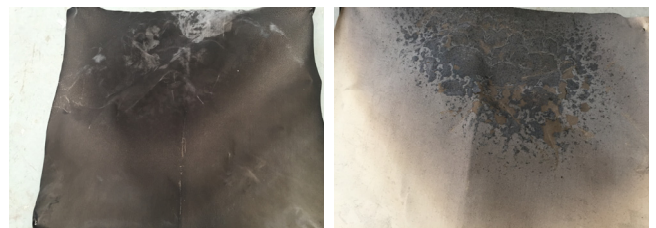
(a) ETFE, kerosene 1.0 L

(b) ETFE, kerosene 2.0 L



(c) PVF, kerosene 1.0 L

(d) PVF, kerosene 2.0 L



(e) PTFE, kerosene 1.0 L

(f) PTFE, kerosene 2.0 L

Fig. 11 Situation after the end of the combustion experiment(installation height 1.5 m)

Fig. 10(a)는 PTFE 막재료를 열원으로부터 1.5 m 떨어진 곳에서 발열재양 1.0 L로 연소실험을 수행하여 온도변화를 나타낸 것이다. 발열재 1.0 m 실험결과보다 최고온도가 높아졌다. 200°C 정도를 경계로 막재료 아래에 설치된 열전대온도계의 온도는 위에 위치하고, 나머지는 막재료 위에 설치된 열전대온도계의 온도이다. 전체적인 그래프 양상은 발열재 1.0 m와 비슷하게 나타났다. Fig. 10(b)는 발열재 2.0 L의 곡선은 설치높이 1.0 m 실험보다 최고온도가 높아졌다. 200°C 정도를 경계로 막재료 아래 설치된 열전대온도계의 온도는 위에 위치하고, 나머지는 막재료 위에 설치된 열전대온도계의 온도이다. 전체적인 그래프 양상은 발열재 1.0 m와 비슷하게 나타났다. Fig. 11은 화재실험 후 ETFE, PVF, PTFE 재료들의 손상 정도를 나타내는 사진이다.

5. 결론

막재료의 발열량에 따른 설치높이와 상관관계를 파악하기 위하여 연소실험을 한 결과를 정리하면 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 화염이 막재료에 닿기 전에는 온도만 상승할 뿐 막재료에 발생한 외형적인 변화 및 파괴현상은 관찰되지 않았다. 막재료의 파괴 및 변형은 화염에 직접적으로 접촉하는 순간 시작되며, 접촉과 동시에 빠르게 열분해하면서 찢어지는 변형이 발생하였다. 찢어짐에 따라 표면에 구멍이 발생하나 화염이 막재료 전체에 전달되지 않으며, 천공이 발생함에 따라 열이 구멍으로 방출되어 표면온도가 감소하였다.
- 2) 막재료 종류마다 화염전파속도를 알기 위해서 각 재료의 변형하는 모습을 동영상과 사진을 통해 시간에 따라 넓이의 변화를 관찰하여 분석해본 결과, ETFE, PVF보다 PTFE 막재료가 가장 화염전파속도가 낮았다. PTFE가 다른 재료보다 난연성능이 뛰어난 것으로 판단된다.
- 3) 막재료 중 ETFE는 연소실험 후, 화염에 의해 녹아서 떨어지는 잔존물이 없었다. 하지만 PTFE, PVF는 시간이 지나 화염에 의해 변형이 되면 막재료가 녹아 흘러내리며 PTFE는 유리섬유의 특징으로 조각조각 깨져서 떨어지는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원에 의해 일부 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Heo, J. E., Jeon, G. Y., and Hong, W. H. (2009), Study on the Fire Risk Assessment in CBD based on the Characteristic Features of Fire Damage, *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, 22(3), 87-93.
- Kang, J. W., and Lee, S. J. (2011), Deterioration Diagnosis of Surface and Coating Layer for Maintenance Managements of the Membrane Structure, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, 11(1), 97-104.
- Korean Association for Spatial Structures (2010), Design Code and Commentary for Membrane Structures, Kimoon dang.
- Tensinet Association (1984), European Design Guide for Tensile Surface Structures.
- Vincent, B. G., and Khan, M. M. (1994), Full-scale Fire Test of a Tension Supported Membrane Structure, Factory Mutual Research Corporation, Technical Report.
- Zhang, L., Zhu, G. Q., Zhu, G. W., and Han, R. S. (2013), Performance-based Fire Design of Air-supported Membrane Coal Storage Shed, *Procedia Engineering*, 52, 593-601.
- Zhang, Y. Y., Zhu, G. Q., and Yang, H. (2013), Experimental Research on Combustion Characteristics of Air-supported Membrane Materials, *Procedia Engineering*, 52, 624-629.

Received : 09/08/2016

Revised : 09/19/2016

Accepted : 09/27/2016

요 지 : 최근 다양한 형태의 막구조물의 건설이 증가 추세이지만 막구조물에 적합하지 않은 내화기준이 적용되어 활용성이 위축되고 있는 실정이다. 그렇기 때문에 막구조물의 건설 활성화에 맞추어서 이에 대한 내화기준의 제 개정이 필요한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 막재료(ETFE, PVF, PTFE)를 선정하여 막구조물에 화재가 일어났을 때, 시간이 변화함에 따라 온도가 올라가는 막재료의 물리적인 특성 변화와 발열량과 막재료 설치높이와의 상관관계를 파악하여 막구조 내화기준에 기초 자료로 활용하고자 한다.

핵심용어 : 막구조, 막재료, 발열량, 연소특성
