LHI Journal (2019) 10(3):23-32 http://dx.doi.org/10.5804/LHIJ.2019.10.3.023
http://lhi.lh.or.kr

고성능 진공단열재의 건축적인 적용에 관한 연구

Research on the Architectural Applications of High-Performance Vacuum Insulation Panel

권영철[1] · 김 석[2]
Young Cheol Kwon · Suk Kim

(Received September 6, 2019 / Revised September 25, 2019 / Accepted October 8, 2019)

요 약

현존하는 단열재 중 가장 열전도율이 낮은 진공단열재(VIP; Vacuum Insulation Panel)는 특수한 재질의 외피재(Envelope)와 외피재 내부의 심재(Core Material), 그리고 단열재 내부의 공기를 흡착하는 흡착제(Getter)로 구성되어 있고, 단열성능을 극대화하기 위해 내부를 진공처리한 제품이다. 진공단열재의 외피재는 알루미늄 박막 필름이 주로 사용되며, 진공단열재의 수명 및 신뢰성을 결정하는 중요한 소재이다. 본 연구를 통하여 불연성이 확보된 Fiber Glass 심재 진공단열재의 방화성능 및 단열성능 확인과 함께 건축적인 적용가능성을 검토하였으며 그 내용을 정리하면 다음과 같다. 1) 20mm 두께의 Fiber Glass 심재 진공단열재의 열전도율이 0.00177W/m·K로, 두께 20mm로 지역별, 부위별 강화된 단열기준을 모두 충족할 수 있음을 알 수 있었다. 2) 진공단열재에 대한 불연성능시험과 가스유해성시험 결과, 불연재료로 적합한 것으로 나타났다. 3) 불연 진공단열재의 장기내구성 시험결과, 25년이 지나더라도 스치로폼 및 유리섬유에 비해 10배 이상의 단열성능을 유지할 수 있음을 알 수 있었다. 4) 건물의 외벽 열관류율 0.12W/m^{2}K 이하를 만족하기 위해, 준불연성능이 확보된 단열재인 "가"등급의 비드법 보온판 2종 4호와 페놀폼을 사용한다면 각각 280mm, 170mm 이상을 써야하지만, 불연 진공단열재는 20mm 두께로 동일 단열기준을 만족할 수 있는 것으로 나타났다.5) 고성능 진공단열재는 열관류율 0.12W/m^{2}K 이하를 기준으로 가격경쟁력이 페놀폼 대비 약 1,500원/m^2 뛰어난 것으로 나타났다.

주제어: 진공단열재, 열전도율, 불연재료, 열관류율, 건축적인 적용

ABSTRACT

Vacuum Insulation Panel(VIP) has the lowest thermal conductivity among present insulations. It is composed of envelope, core material and getter. Aluminum film is usually used as the envelope of VIP, and it is important component to decide the useful life of VIP. In this research, the thermophysical properties of incombustible fiber glass core VIP were investigated with the possibility of its architectural applications. The results of this research can be summarized as follows: 1) The thermal conductivity of 20mm-thick fiber glass core VIP is resulted as 0.00177W/m·K, which means that 20mm-thick VIP can meet all the reinforced insulation guideline and it can be used in any envelope of any region in Korea. 2) As a result of the test of incombustion and gas toxicity, fiber glass core VIP was suitable for incombustible material. 3) As the test result for the long term thermal conductivity, fiber glass core VIP was found out that it would keep above 10 times insulating performance than polystyrene foam and glass fiber. 4) To meet the thermal transmittance of 0.12W/m^{2}K, limited-combustible insulation of expanded polystyrene foam and phenolic foam should be used respectively as thick as above 280mm and 170mm, incombustible VIP can meet the same insulation level with 20mm thickness. 5) The price competitiveness of incombustible VIP to meet the thermal transmittance of 0.12W/m^2·K was about 1,500won/m^2 higher than that of phenolic foam.

Key words: Vacuum Insulation Panel, Thermal Conductivity, Incombustible Material, Thermal Transmittance, Architectural Application

1. 서 론

2018년 9월 1일자로 건축물의 에너지 절약설계기준이 강화됨에 따라 외기에 직접 면하는 공동주택의 외벽과 지붕의 단열재 두께는 「가」등급 단열재라 하더라도 중부1지역은 220mm, 중부2지역은 외벽은 190mm, 지붕은 220mm를 사용하여야 한다.

또한 2019년 8월 6일자로 시행된 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙에 따라 건물외벽 마감재료를 불연 또는 준불연재료로 해야 하는 범위가 늘어났다.

단열성이 뛰어난 스치로폼, 우레탄 등의 유기질 단열재는 화재 안전성이 취약하고, 화재안전성이 뛰어난 무기질 단열재는 단열성이 상대적으로 약해 두껍게 시공해야하는 한계가 있다. 이러한 상황에서 고단열성의 준불연 단열재로 알려진 페놀폼이 단열대안으로 부각되어 건축물의 단열재로 많이 적용되어 왔으나, 최근 페놀폼 단열재에서 1급 발암물질인 포름알데하이드가 기준치 이상으로 방출된다는 JTBC 보도(JTBC, 2019)에 이어, 대한건축사협회에서도 회원들에게 페놀폼 사용을 자제해달라는 공문(대한건축사협회, 2019)을 보낸 것으로 알려졌다.

단열성능이 매우 뛰어난 진공단열재는 현장에서 재단이 불가능하여 현장시공성이 떨어진다는 단점을 지니고 있으나, 최근에는 현장의 단열시공부위를 정밀실측하여 현장여건에 맞는 단열패널을 맞춤 제작하고 시공을 간편하게 할 수 있는 진공단열재 전용 부자재를 적용하여 시공정밀도를 높인 기술이 개발되었다. 또한 화재 안전성을 갖춘 불연성의 진공단열재가 건설현장에 적용되고 있다.

따라서 본 논문에서는 불연성능을 지닌 고성능 진공단열재의 건축적인 적용 가능성을 검토해보고자 한다.

2. 주요 단열재들의 특성 고찰

2.1 비드법 보온판(EPS, Expanded Polystyrene Foam)

단열 성능이 뛰어나고, 경량으로 운반과 시공성이 우수하며, 최고 70℃까지 사용할 수 있다. 그러나 자외선에 약하고 화재시 불이 옮겨 붙어 유독가스가 발생할 위험이 있다. EPS 단열재는 비드법 1종과 2종으로 구분한다. 밀도에 따라 1호 30kg/㎥이상, 2호 25kg/㎥이상, 3호 20kg/㎥이상, 4호 15kg/㎥이상으로 분류하고 있으며, 밀도가 클수록 단단하며 열전도율이 낮은 특성을 갖고 있다. 열전도율은 0.031~0.043W/mK까지로 종류와 밀도에 따라 다르다(권영철, 2017).

2.2 압출법 보온판(XPS, Extruded Polystyrene Foam)

압출법 보온판은 원료를 가열·용융해 연속적으로 압출·발포시켜 성형한 제품으로, 압출 폴리스티렌폼을 말하며 보통 XPS로 불린다. 물리적 성질은 비드법 보온판과 비슷하나 단열성이 우수하며 어느 정도의 투습 저항을 지닌 것이 특징이다. “가”등급에 속하며, 열전도율은 특호 0.027W/mK, 1호 0.028W/mK, 2호 0.029W/mK, 3호 0.031W/mK로 비드법 보온판보다 낮다.

2.3 유리섬유(Glass Wool)와 미네랄울(Mineral Wool)

대표적인 무기질 단열재로 48K, 64K, 80K, 96K, 120K 유리섬유는 “가”등급에 속하며, 미네랄울 1호, 2호, 3호와 유리섬유 24K, 32K, 40K는 “나”등급에 속한다.

화재에 강한 특성을 지니고 있으며, 유리섬유는 350℃, 미네랄울은 600℃까지도 사용할 수 있다.

2.4 경질 우레탄폼(PU, Rigid Polyurethane Foam)

열전도율이 0.023~0.025W/mK로 단열 성능이 뛰어나 보온, 보냉에 사용하는 단열재로 PU라고도 한다. 단열성과 저온 특성이 좋으며, 판상형의 생산품을 붙이는 방법이 있으나 건축 현장에서는 주로 직접 발포해(뿜칠) 시공한다. 강한 내수성 및 내습성을 보인다. 화재 시 치명적인 맹독성의 시안가스가 발생하는 문제가 있다.

2.5 페놀폼(PF, Phenolic Foam)

페놀수지를 발포하여 만든 열경화성 수지로 난연2급의 준불연성을 지니고 있다. 열전도율은 0.019W/mK로 유기질 단열재 중 단열성능이 가장 뛰어나다. 90%이상 독립미세기포로 이루어진 Closed Cell 구조이다.

최근 1급 발암물질인 포름알데하이드가 기준치 이상 검출된다는 연구결과(박태성 외, 2019)와 함께 대한건축사협회 차원의 사용자제 권고가 이루어진 단열재이다.

2.6 저방사 복합 단열재(Low-Emissivity Hybrid Insulation)

저방사 복합 단열재는 반사형 단열재의 단열원리를 단열재 자체에 적용함으로써 단열재 내부에 별도의 반사공기층을 확보한 것이며, 내부 공기층에 면한 알루미늄 박판의 표면방사율이 0.03로 복사에 의한 열전달을 97% 차단할 수 있으며, 폴리에틸렌폼을 절개, 확장하여 만들어진 독립 공기셀로 인해 대류에 의한 열전달도 차단하는 효과가 있다. 저방사 복합 단열재는 범용 단열재인 스치로폼 및 유리섬

1) 한라대학교 건축학과 교수(yckwon@halla.ac.kr)
2) (주)그린인슐레이터 기술연구소(supervac3@gmail.com)

Table 1. Required U-value of Regional Building Envelopes in Korea(revised on Sep. 1, 2018) (Unit : W/㎡K)

Building Envelope \ Region			Central 1 Region*	Central 2 Region**	Southern Region***	Jeju Island
Exterior Wall	Adjacent to Outside directly	Apartment House	less than 0.150	less than 0.170	less than 0.220	less than 0.290
		Others	less than 0.170	less than 0.240	less than 0.320	less than 0.410
	Adjacent to Outside indirectly	Apartment House	less than 0.210	less than 0.240	less than 0.310	less than 0.410
		Others	less than 0.240	less than 0.340	less than 0.450	less than 0.560
Roof	Adjacent to Outside directly		less than 0.150		less than 0.180	less than 0.250
	Adjacent to Outside indirectly		less than 0.210		less than 0.260	less than 0.350
Floor of lowest floor	Adjacent to Outside directly	Floor heating	less than 0.150	less than 0.170	less than 0.220	less than 0.290
		No floor heating	less than 0.170	less than 0.200	less than 0.250	less than 0.330
	Adjacent to Outside indirectly	Floor heating	less than 0.210	less than 0.240	less than 0.310	less than 0.410
		No floor heating	less than 0.240	less than 0.290	less than 0.350	less than 0.470
Floor Slab with floor heating system			less than 0.810			
Window or Door	Adjacent to Outside directly	Apartment House	less than 0.900	less than 1.000	less than 1.200	less than 1.600
		Others	less than 1.200	less than 1.500	less than 1.800	less than 2.200
	Adjacent to Outside indirectly	Apartment House	less than 1.300	less than 1.500	less than 1.700	less than 2.000
		Others	less than 1.500	less than 1.900	less than 2.200	less than 2.800
Entrance Door of Apartment house	Adjacent to Outside directly		less than 1.400			
	Adjacent to Outside indirectly		less than 1.800			

* Gangwon-do(except Gosung, Sockcho, Yangyang, Gangneung, Donghae, Samcheok), Gyeonggi-do(Yeoncheon, Pocheon, Gapyeong, Namyangju, Yijeongbu, Yangju, Dongducheon, Paju), Chungcheongbuk-do(Jecheon), Gyeongsangbuk-do(Bongwha, Cheongsong)

** Seoul, Daejeon, Sejong, Incheon, Gangwon-do(Gosung, Sockcho, Yangyang, Gangneung, Donghae, Samcheok), Gyeonggi-do(except Yeoncheon, Pocheon, Gapyeong, Namyangju, Yijeongbu, Yangju, Dongducheon, Paju), Chungcheongbuk-do(except Jecheon), Gyeongsangbuk-do(except Bongwha, Cheongsong, Uljin, Yeongdeok, Pohang, Kyeongju, Cheongdo, Kyeongsan), Jeollabuk-do, Gyeongsangnam-do(Geochang, Hamyang)

*** Busan, Daegu, Ulsan, Gangju, Jeollanam-do, Chungcheongbuk-do(except Jecheon), Gyeongsangbuk-do(Uljin, Yeongdeok, Pohang, Kyeongju, Cheongdo, Kyeongsan), Gyeongsangnam-do(except Geochang, Hamyang)

유 대비 두 배 이상의 단열성능을 지니고 있으며, 최근에는 준불연성능을 지닌 제품도 사용되고 있다(권영철, 2016).

3. 강화된 단열 및 방화기준 검토

3.1 건축물 에너지절약 설계기준 상의 단열기준

2018년 9월 1일자로 강화된 “건축물에너지절약설계기준”상의 지역별, 부위별 건축물의 열관류율기준은 Table 1과 같다.

강화된 기준에서는 중부지역을 세분하여 중부1지역과 중부2지역으로 나누어 지역별, 부위별 열관류율을 다르게 적용하고 있다(국토교통부, 2017).

중부1지역의 외기에 직접면한 공동주택 외벽과 지붕의 열관류율은 모두 0.150W/m^{2}K 이하를 만족하여야 하며, 중부2지역의 외기에 직접면한 공동주택 외벽과 지붕의 열관류율은 각각 0.170W/m^{2}K 이하와 0.150W/m^{2}K 이하를 만족하여야 함을 알 수 있다.

3.2. 건축용 단열재의 화재안전 기준

2015년 1월 발생한 의정부 화재 이후, 공동주택과 준다중이용시설 및 6층 이상의 건축물의 외벽 마감재료의 방화성능이 2016년 4월 8일자로 강화되었다.

하지만 이후에도 2017년 12월 제천 스포츠센터 화재, 2018년 1월 밀양 세종병원 화재 등 단열재와 직간접적으로 연관된 대형화재가 잇따르면서 단열재의 화재안전기준은 더욱 강화되었다.

「건축법 시행령」에서 외벽의 마감재료를 방화에 지장이 없는 재료로 해야 하는 건축물에 3층 이상 5층 이하 또는 높이 9미터 이상 22미터 미만인 건축물을 추가함에 따라 마감재료를 원칙적으로 불연재료 또는 준불연재료로 하되, 국토교통부장관이 정하여 고시하는 화재 확산 방지구조 기준에 적합하게 설치하는 경우 등에는 난연재료 사용할 수 있도록 하되, 5층 이하이면서 높이 22미터 미만인 건축물의 경우에는 난연재료 등으로 할 수 있도록 하였다(국토교통부, 2019).

또한「건축법 시행령」에서 외벽의 마감재료를 방화에 지장이 없는 재료로 해야 하는 건축물에 1층의 전부 또는 일부를 필로티 구조로 설치하여 주차장으로 쓰는 건축물을 추가함에 따라 필로티 구조로 외기(外氣)에 면하는 천장 및 벽체를 포함하는 건축물의 외벽 중 1층과 2층 부분에는 마감재료를 불연재료 또는 준불연재료로 하되, 마감재료를 구성하는 재료 전체를 하나로 보아 국토교통부장관이

고시하는 기준에 따라 난연성능을 시험한 결과 불연재료 또는 준불연재료에 해당하는 경우에는 난연재료를 단열재로 할 수 있도록 하였다.

2019년 8월 6일자로 시행된 건축법 시행령 제61조제2항제1호와 국토교통부령 제641호인 “건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙”에 따르면, 상업지역의 제1종 근린생활시설, 제2종 근린생활시설, 문화 및 집회시설, 종교시설, 판매시설, 의료시설, 교육연구시설, 노유자시설, 운동시설 및 위락시설의 용도로 쓰는 건축물로서 그 용도로 쓰는 바닥면적의 합계가 2천제곱미터 이상인 건축물과 의료시설, 교육연구시설, 노유자시설 및 수련시설의 용도로 쓰는 건축물과 3층 이상 또는 높이 9미터 이상인 건축물과 1층의 전부 또는 일부를 필로티 구조로 설치하여 주차장으로 쓰는 건축물의 외벽(필로티 구조의 외기(外氣)에 면하는 천장 및 벽체를 포함)에는 불연재료 또는 준불연재료를 마감재료(단열재, 도장 등 코팅재료 및 그 밖에 마감재료를 구성하는 모든 재료를 포함)로 사용하여야 한다. 다만, 외벽 마감재료를 구성하는 재료 전체를 하나로 보아 불연재료 또는 준불연재료에 해당하는 경우 마감재료 중 단열재는 난연재료로 사용할 수 있다.

5층 이하 또는 높이 22미터 미만인 건축물의 외벽(필로티 구조의 외기(外氣)에 면하는 천장 및 벽체를 포함)을 국토교통부장관이 정하여 고시하는 화재 확산 방지구조 기준에 적합하게 설치하는 경우에는 난연재료를 마감재료로 사용할 수 있다(국토교통부, 2019).

이상의 내용을 간단히 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Reinforced Fire Safety on Insulation Application according to the Enforcement Ordinance and Regulations of Building Code

Exterior Finishing Insulation Requirements related to Fire Safety		Major Revision
Enforcement Ordinance of Building Code (enforced since Aug. 6, 2019)	Application target of exterior finishing materials for the protection of fire spread was broaden to the buildings over 3 stories and above 9m and buildings with piloti-structure parking lot on the ground floor.	Limited-combustible or incombustible insulations should be used as exterior insulations for buildings above 3 stories and above 9m and buildings with piloti-structure parking lot on the ground floor.
Enforcement Regulations on the Evacuation and Fireproof Construction Standards of Buildings (enforced since Aug. 6, 2019)	Exterior Finishing Insulation should be limited-combustible or incombustible. However it can be fire-retardant if it is installed as suitable for the protection of fire spread.	

3.3 강화된 단열 및 방화기준을 만족하는 단열 두께

강화된 건축물에너지절약기준과 화재 안전기준을 만족하는 건축물 부위별 단열재 종류별 두께는 Table 3과 같다.

Table 3. Required Thickness of Insulation to meet the revised insulation and fire safety standards for Central 1 Region (Unit : mm)

Building Envelope \ Insulation Type			Grade A*	Grade B**	Phenolic Foam***
Exterior Wall	Adjacent to Outside directly	Apartment House	220	255	130
		Others	190	225	120
	Adjacent to Outside indirectly	Apartment House	150	180	90
		Others	130	155	80
Roof	Adjacent to Outside directly		220	260	130
	Adjacent to Outside indirectly		155	180	90
Floor of lowest floor	Adjacent to Outside directly	Floor heating	215	250	130
		No floor heating	195	230	120
	Adjacent to Outside indirectly	Floor heating	145	170	90
		No floor heating	135	155	80

* Grade A : Glass Wool 48K, 64K, 80K, 96K, 120K
** Grade B : Glass Wool 24K, 32K, 40K
Mineral Wool 1, 2, 3
*** Thermal Conductivity of Phenolic Foam is 0.019W/mK

Table 3에서 볼 수 있듯이, 중부1지역의 외기에 직접 면한 공동주택 외벽의 경우, 준불연성능이 확보된 단열재인 “가”등급의 48K 이상의 유리섬유, “나”등급의 미네랄울, 페놀폼을 사용한다면 단열재 종류에 따라 220mm, 255mm, 130mm 이상을 써야함을 알 수 있다.

4. 고성능 진공단열재 단열재 고찰

현존하는 단열재 중 가장 열전도율이 낮은 진공단열재(VIPs; Vacuum Insulation Panels)는 특수한 재질의 외피재(Envelope)와 외피재 내부의 심재(Core Material), 그리고 단열재 내부의 공기와 수분을 흡착하는 흡착제(Getter)로 구성되어 있고, 단열성능을 극대화하기 위해 내부를 진공처리한 제품이다.



① Film ② Getter ③ Core
Fig. 1. Constitution of Vacuum Insulation Panel

진공단열재의 외피재는 알루미늄 박막 필름이 주로 사용되며, 진공단열재의 수명 및 신뢰성을 결정하는 중요한 소재이다.

진공단열재의 심재는 화이버글라스, 흄드실리카 등이 주로 사용되고 있으며, 외피재의 형태 유지 및 내부 가스 분자의 이동을 차단하여 열전달을 최소화한다. 뿐만 아니라, 진공단열재의 내부는 진공에 가까운 1mbar 전후의 극저압을 유지하기 때문에 심재는 진공단열재가 압착되지 않을 정도의 강성을 지니거나 저압상태에서 압축하여 심재의 복원력을 이용하여 진공단열재의 형상을 유지한다.

화이버글라스 심재를 사용한 진공단열재의 열전도율은 0.0018W/mK, 흄드실리카 심재를 사용한 진공단열재는 열전도율 0.0045W/mK을 갖고 있다. 진공단열재는 심재와 외피재 모두 불연성능을 지니고 있어 화재에 강한 불연자재로 유통되고 있다.

4.1 Fumed Silica 심재 진공단열재

나노미세입자인 Fumed Silica를 심재로 사용하여 만든 진공단열재로 주로 냉장고 단열재로 많이 사용되고 있다.

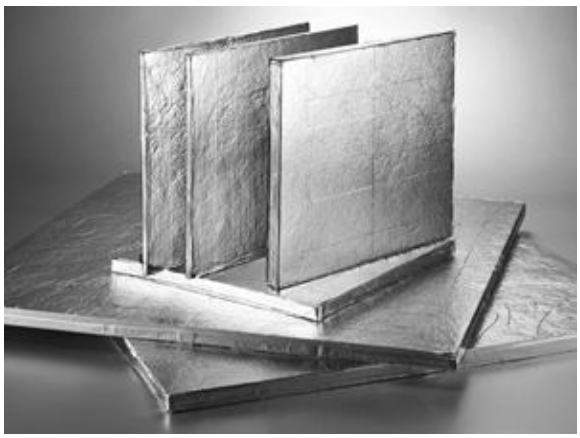


Fig. 2. Vacuum Insulation Panel using fumed silica as core material

Fumed Silica 심재를 사용한 진공단열재는 국내에서는 OCI와 경동원에서 생산 공급하고 있다.

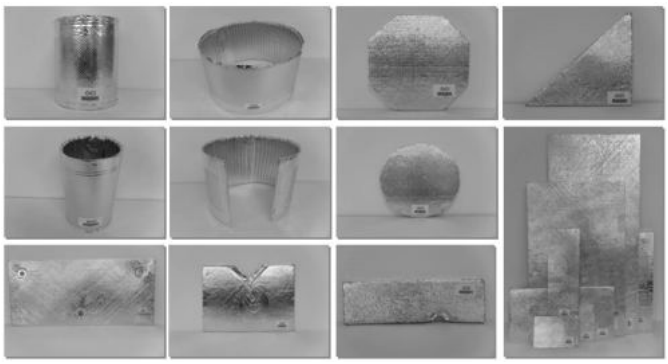


Fig. 3. Various shapes of Vacuum Insulation Panel according to the applied conditions

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 진공단열재는 현장재단이 불가능한 점을 고려하여 현장여건에 맞게 미리 필요한 형태로 공장생산하고 있다.

진공단열재는 규격화되어 있는 패널용 단열재로 많이 적용되고 있는데, Fig. 4는 진공단열재가 주로 사용되고 있는 적용처를 보여주고 있다(OCI, 2015).

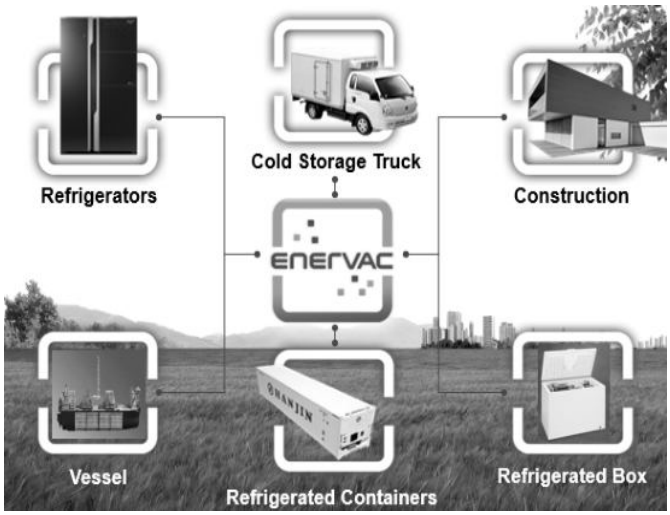


Fig. 4. Major applications of Vacuum Insulation Panel

Fig. 4에서 알 수 있듯이 진공단열재는 냉장고, 냉동트럭, 냉동 컨테이너, 냉동박스, 선박 및 건축용으로 사용되고 있다.

다음은 Passive House의 외피 및 국내 건축물에너지 절약기준상의 중부 1지역의 외피 열관류율 기준인 0.15W/m^{2}K이하를 충족하기 위한 각종 단열재들의 소요두께를 비교한 그림이다.

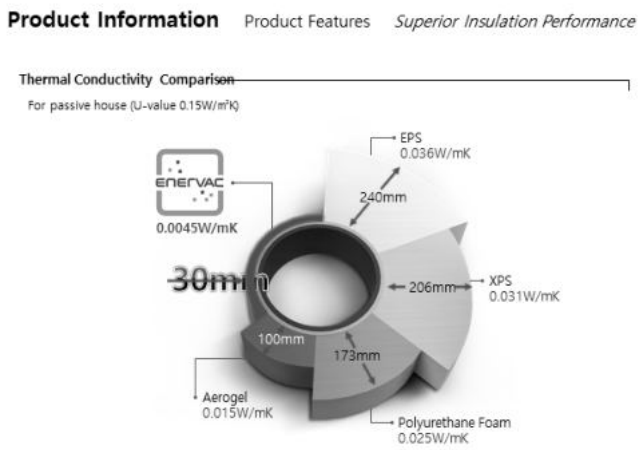


Fig. 5. Required Thickness of Insulation to meet the thermal transmittance of 0.15W/m2K

Fig. 5를 보면, 열관류율 0.15W/m^{2}K를 충족시키기 위해 Fumed Silica 심재를 사용한 진공단열재는 30mm, 에어로젤 블랭킷은 100mm, 비드법 보온판은 240mm가 소요되는 것을 알 수 있다.

4.2 Fiber Glass 심재 진공단열재

4.2.1 외피재인 필름(Film)

진공단열재에 적용되는 필름은 4가지 종류를 Dry Laminating시켜 제작된 특수한 필름으로 단열재를 보호하는 동시에 진공상태를 오랫동안 유지시켜 외부부로부터 유입될 수 있는 수분 및 기체를 차단시켜 단열재의 성능을 유지하는 중요한 역할을 한다.

Fig. 6은 진공단열재 외피재인 필름의 구성을 보여주고 있다.

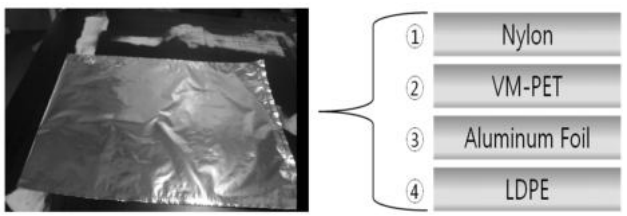


Fig. 6. Constitution of Film of Vacuum Insulation Panel

나일론은 멀티 필름에 유연성을 주어 필름이 접히거나 충격이 가해졌을 때 호일을 보호 하며, 호일의 변형을 방지하는 역할을 한다. VM-PET 필름에 특수 증착을 한 필름으로 외부에 투과하는 수분과 공기를 1차 차단하며, 호일의 깨짐을 보완하여 수명을 연장하는 역할을 하며, Aluminum Foil은 공기와 수분의 차단에 있어 현존하는 필름 중 가장 우수한 성능을 발휘하고 있으며, 외부와 내부의 공기와 수분의 교류를 차단한다. 마지막으로 LDPE는 제품의 파우치를 제작할 때 필름과 필름을 겹쳐서 열접착을 하여 실링을 하는데 실링 부위가 분리되지 않도록 잡아주는 역할을 한다.

4.2.2 Fiber Glass 심재(Core Material)

심재로 사용되는 Fiber Glass는 기본적인 단열 성능이 우수하며, 섬유의 두께는 3 ~ 5㎛으로 되어 있으며, 진공단열재 심재로 적용했을 때 우수한 단열성능을 가지며 불연재료에 속한다.

화염면 10%와 원심면 90%를 혼합하여 제작된 심재를 사용하며, 화염면은 심재강도를 높여 진공상태 시 유연성을 낮추고 모양을 유지시켜주는 역할을 하고 원심면은 단열성능을 높이기 위해 사용된다.

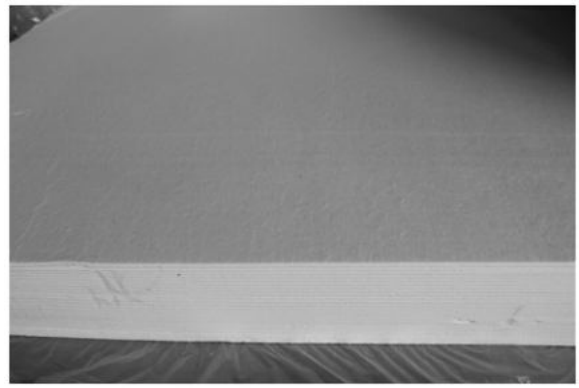


Fig. 7. Core material of Vacuum Insulation Panel

Fig. 7은 진공단열재의 심재로 사용되는 Glass Fiber를 보여주고 있다.

4.2.3 게터(Getter)

게터는 진공상태에서 잔류 기체 및 수분 흡착을 하는 역할로 제품의 성능을 유지시켜주는 제품이다. CaO 80%, Ba 5%, Zr 15% 로 구성되어 있으며, CaO는 수분을 흡착하는 역할을 하며 Ba는 질소를 흡착하는 역할, Zr은 산소를 흡착하는 역할을 한다.

Fig. 8은 진공단열재의 게터 형상을 보여주고 있다.

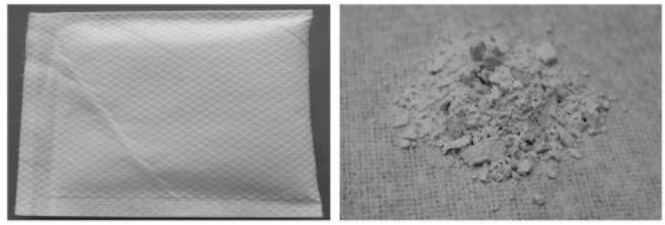
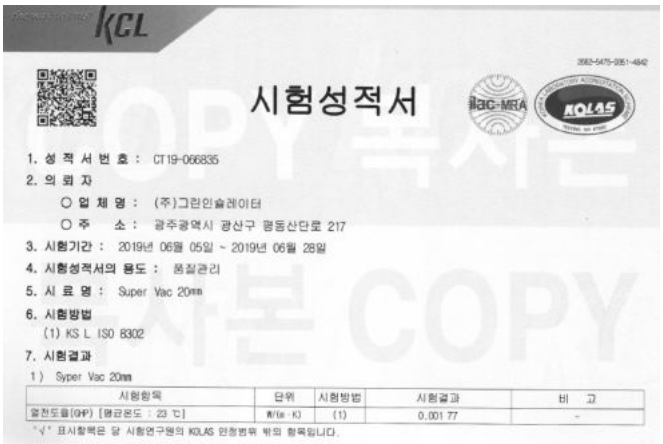


Fig. 8. Getter of Vacuum Insulation Panel

Fig. 9은 Fiber Glass 심재를 사용한 두께 20mm 진공단열재에 대한 KOLAS인증 시험기관으로부터의 열전도율 시험성적서를 보여주고 있다.



KCL

시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT19-066835
2. 의 뢰 자
   ○ 업 체 명 : (주)그린인슐레이터
   ○ 주 소 : 광주광역시 광산구 평동산단로 217
3. 시험기간 : 2019년 06월 05일 ~ 2019년 06월 28일
4. 시험성적서의 용도 : 품질관리
5. 시 료 명 : Super Vac 20mm
6. 시험방법
   (1) KS L ISO 8302
7. 시험결과
   1) Syper Vac 20mm

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비 고
열전도율(HF) [평균온도 : 23 ℃]	W/(m·K)	(1)	0.00177	-

"√" 표시항목은 당 시험연구원의 KOLAS 인정범위 밖의 항목입니다.

Fig. 9. Test result of Thermal Conductivity of Fiber Glass Core Vacuum Insulation Panel

Fig. 9의 시험결과로부터 Fiber Glass 심재 진공단열재의 열전도율은 0.00177W/m·K임을 알 수 있다. 따라서 Fumed Silica 심재를 사용한 진공단열재의 열전도율 0.0045W/m·K에 비해 2배 이상의 단열성능을 지니고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 Fiber Glass 심재를 사용한 진공단열재의 열물리적인 특성을 보여주고 있다.

Table 4. Thermophysical Property of Fiber Glass Core Vacuum Insulation Panel

Thermophysical Property	SUPER VAC
Core Material	Fiber Glass
Thermal Conductivity	0.00177W/m·K
Density	250~300kg/m^3
Thickness	20mm
Working Temperature	-80~100℃
Fire Resistance	Incombustible Material

Fiber Glass 심재 진공단열재의 열전도율이 0.00177W/m·K이므로 20mm 두께의 진공단열재의 열저항은 11.3m^2·K/W로 단열재의 저항만으로도 0.088W/m^2·K의 열관류율을 얻을 수 있어 중부1지역의 외기에 면한 공동주택 외벽과 지붕의 열관류율 기준인 0.150W/m^2·K이하를 만족함을 알 수 있다. 따라서 국내 모든 지역 건축물의 모든 부위의 외피 단열기준을 만족할 수 있다.

Fig. 10은 제로에너지건축물을 위한 외피 열관류율 0.12W/m^2·K를 얻기 위한 열전도율 0.00177W/m·K인 Fiber glass 심재 진공단열재와 열전도율 0.034W/m·K인 비드법 보온판 2종 4호의 소요두께를 비교한 것을 보여주고 있다.

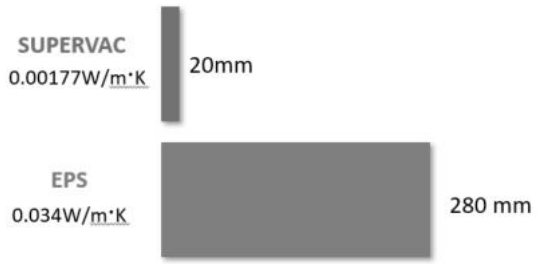


Fig. 10. Insulation thickness to get the thermal transmittance of 0.12W/m^2·K

Fig. 10으로부터 비드법 보온판 대비 1/14의 두께로 동일한 단열성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 진공단열재의 불연 자재 성능시험

5.1. 불연 재료의 요건

국토교통부고시 제2019-473호의 "건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준" 제2조에서 '불연재료는 다음 각호에 적합하여야 한다'라고 되어 있다.

1. 한국산업규격 KS F ISO 1182 (건축재료의 불연성 시험 방법)에 따른 시험결과, 가열시험 개시 후 20분간 가열로 내의 최고온도가 최종평형온도를 20K 초과 상승하지 않아야 하며(단, 20분 동안 평형에 도달하지 않으면 최종 1분간 평균온도를 최종평형온도로 한다), 가열종료 후 시험체의 질량 감소율이 30% 이하여야 한다.
2. 한국산업규격 KS F 2271(건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험방법) 중 가스유해성 시험 결과, 실험용 쥐의 평균행동정지 시간이 9분 이상이어야 한다.

5.2 불연성능 시험 개요

진공단열재의 불연 성능을 확인하기 위해, 두께 20mm 제품에 대한 불연 성능시험을 진행하였다.

제공된 시험체에 대해 국토교통부 고시 제 2019-473호(건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준)에 의한 시험을 실시하여 불연재료 성능을 평가하였다.

불연 시험을 위한 시험체 구성표는 Table 5와 같다.

Table 5. Constitution of Test Specimen

Test Name		Incombustion Test			Gas Toxicity	
No. of Specimen		1	2	3	1	2
Size of Specimen (mm)	Diameter	45	45	45	L220*W220	L220*W220
	Height	50	50	50	25	25
Curing Period		(23±2)℃, (50±5) % 48h, staying onstant(0.1g)			constant-temperature oven (40℃) 24h, desiccator 24h	

Table 5에서 알 수 있듯이 불연 시험용 시편 3개와 가스유해성 시험용 시편 2개를 준비하였다.

이들 시편의 구성은 0.1mm Aluminium Film + 25mm Fiber Glass + 0.1mm Aluminium Film 같다.

5.3 시험결과

KOLAS 시험 인증기관인 한국건설생활환경시험연구원에 의뢰하여 얻어진 진공단열재에 대한 불연 성능 시험 결과는 Table 6와 같다.

Table 6. Test Result of Incombustible Vacuum Insulation Panel

Test Item \ Specimen No.		1	2	3	Suitability	Criterion
Incombustion Test	Rate of decrease in mass (%)	1.6	1.6	1.8	suitable	Less than 30
	Difference between highest temp. and last balance temp. (℃)	5.2	6.0	7.6	suitable	Not more than 20
Gas Toxicity	Average action stop time (min:second)	13:02	14:28		suitable	more than 9:00

Table 6에서 볼 수 있듯이, 진공단열재에 대한 불연성능 시험과 가스유해성시험 결과, 불연재료로 적합한 것으로 나타났다.

6. 불연 진공단열재의 건축적인 적용

6.1 불연 진공단열재의 장기 내구성

진공단열재는 주로 외피재(Film), 심재(Core Material), 게터(Getter)로 이루어져 있으며, 진공단열재의 장기신뢰성능은 전적으로 외피재에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

외피재는 Nylon, VM-PET, Al Foil, LDPE를 다층으로 가공하여 인장력과 접착력을 유지하도록 만들어진다.

진공단열재의 장기신뢰성을 시험하는 공인시험규격은 미국의 ASTM C1484 (Standard Specification for Vacuum Insulation Panels)이 있다.

공인시험기관인 한국생활환경시험연구원에서 수행한 Green Insulator사의 Supervac 제품에 대한 장기신뢰성 시험 결과는 Fig. 11과 같다.

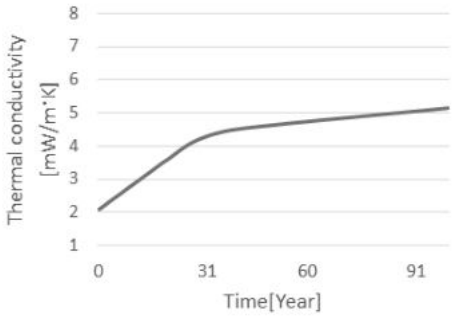


Fig. 11. Long term thermal conductivity of Vacuum Insulation Panel

장기신뢰성 평가 결과 25년 이후 초기 단열성능의 ½ 수준으로 단열성능 저하되는 것으로 나타났다. 내부압력 증가에 따라 열전도율(Thermal conductivity)이 증가하였고 25년 이후 초기 열전도율(Initial thermal conductivity)의 약 2배 수준으로 열전도율이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 진공단열재의 초기열전도율 0.0021W/mK에서 0.004W/mK로 떨어지기까지 약 25년이 걸린다는 의미이다. 25년 후에도 일반적인 단열재인 스치로폼이나 유리섬유(열전도율 0.04W/mK)에 비해 여전히 약 10배 이상의 단열성능을 지니고 있음을 알 수 있다.

6.2 불연 진공단열재의 현장 시공성

Fiber Glass 심재를 사용한 진공단열재는 건축적인 활용을 위해 그동안 매우 취약했던 현장시공성 향상을 위해 관련 마감 소재를 개발하고, 전문 시공팀을 관리하며, 현장의 단열시공부위를 정밀실측하여 현장여건에 맞는 단열패널을 맞춤 제작하여 현장시공성이 떨어졌던 한계를 극복하고 있어, 건축적인 적용이 지속적으로 증가가고 있다.

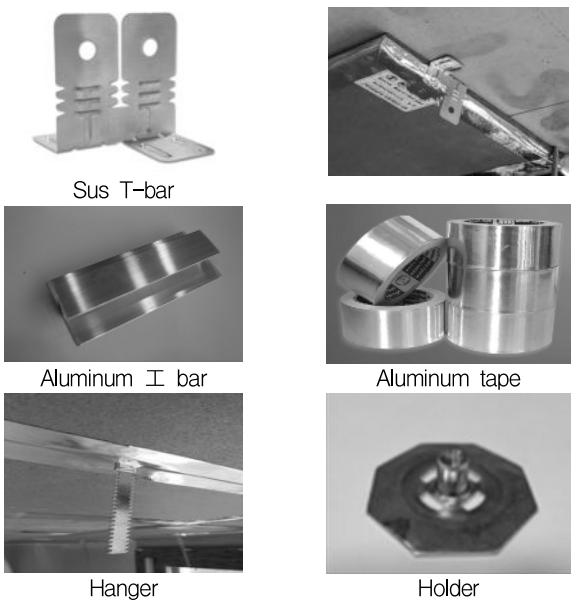


Fig. 12. Various fittings for easy attachment of Vacuum Insulation Panel

고성능 진공 단열재의 건축적인 적용이 지속적으로 증가하는 추세에 있으며, 내단열, 외단열, 천장 및 아파트 발코니 확장 부위 등에 주로 사용되고 있다.



Fig. 13. Vacuum Insulation Panel attached on the interior side of a wall using T-bar

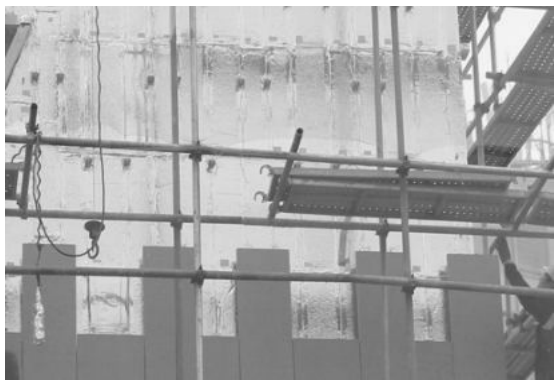


Fig. 14. Vacuum Insulation Panel attached on the exterior side of a wall using Holder

Fig. 13은 T-bar를 활용하여 진공단열재를 벽체의 내부에 설치한 장면이다.

Fig. 14는 석재마감의 외단열공사에 진공단열재가 적용되어 시공되고 있는 장면으로 고정 홀더를 사용하여 진공단열재를 고정시키고 있다.

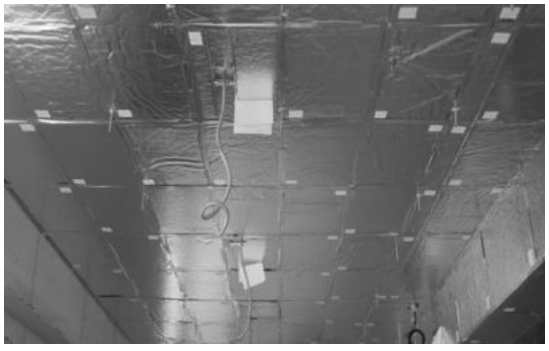


Fig. 15. Vacuum Insulation Panel attached on the ceiling using T-bar

Fig. 15는 T-bar를 활용하여 진공단열재를 천장에 설치한 장면이다.

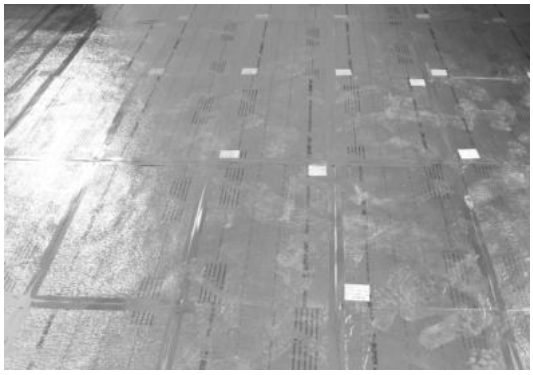


Fig. 16. Vacuum Insulation Panel attached on the floor using 工 bar and aluminum tape

Fig. 16은 工 bar와 알루미늄테이프를 활용하여 바닥에 시공된 진공단열재를 보여주고 있다.

6.3 불연 진공단열재의 가격경쟁력

고성능 진공단열재의 가격경쟁력을 알아보기 위해 2019년 4월 현재의 물가자료를 바탕으로 다른 단열재들과 공급가격을 비교해보았으며, 그 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. Price competitiveness of Incombustible Vacuum Insulation Panel to meet the thermal transmittance of 0.12W/m^2·K

Classification	VIP	PF board	EPS 2 class
Thermal Conductivity (W/mK)	0.00177	0.020	0.034
Fire Resistance	Incombustible	Limited-combustible	Limited-combustible
Thickness(mm)	20	170	280
Total Insulation Price(Won/m^2)	62,920	77,792	72,072

Table 7으로부터 불연성능을 지닌 진공단열재 20mm 사용으로 열관류율 0.12W/m^2·K를 충족할 수 있으며, 동일한 단열성능을 확보하기 위해서 페놀폼(PF보드)는 170mm가 필요하며 m^2 당 가격은 진공단열재가 약 15,000원 절감되는 것을 알 수 있다.

진공단열재를 건축물에 적용할 경우에는 시공현장에서의 세심한 시공노하우가 요구되므로 진공단열재 전문시공팀을 활용하는 것이 필요하다.

7. 결 론

본 연구를 통하여 불연성이 확보된 Fiber Glass 심재 진공단열재의 방화성능 및 단열성능 확인과 함께 건축적인 적용가능성을 검토하였으며 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 20mm 두께의 Fiber Glass 심재 진공단열재의 열전도율이 0.00177W/m·K로, 두께 20mm로 지역별, 부위별 강화된 단열기준을 모두 충족할 수 있음을 알 수 있었다.

2) 진공단열재에 대한 불연성능시험과 가스유해성시험 결과, 불연재료로 적합한 것으로 나타났다.

3) 불연 진공단열재의 장기내구성 시험결과, 25년이 지나더라도 스치로폼 및 유리섬유에 비해 10배 이상의 단열성능을 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

4) 건물의 외벽 열관류율 0.12W/m^2K 이하를 만족하기 위해, 준불연성능이 확보된 단열재인 "가"등급의 비드법 보온판 2종 4호와 페놀폼을 사용한다면 각각 280mm, 170mm 이상을 써야하지만, 불연 진공단열재는 20mm 두께로 동일 단열기준을 만족할 수 있는 것으로 나타났다.

5) 고성능 진공단열재는 열관류율 0.12W/m^2K 이하를 기준으로 가격경쟁력이 페놀폼 대비 약 15,000원/m^2 뛰어난 것으로 나타났다.

단열기준 및 화재안전기준 강화와 함께 유효공간 확보를 위한 소비자들의 요구에 따라 가격경쟁력까지 갖춘 고효율 진공단열재의 건축적인 적용이 급속히 증가할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2018년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호:2017R1D1A3B03028249

참고문헌

1. 국토교통부(2017), "건축물 에너지절약설계기준", 「국토교통부 고시」, 제 2017~1108호.
2. 국토교통부(2019), "건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산 방지구조 기준", 「국토교통부고시」, 제2019 ~473호.
3. 국토교통부(2019), 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙, 「국토교통부령」, 제641호.
4. 권영철, 박민수(2016). "준불연 저방사 복합 단열재 개발에 관한 연구", 「한국건축친환경설비학회논문집」, 제10권 6호, 135~141.
5. 권영철(2017), "건축물 에너지절약 설계기준에 따른 단열 Detail 연구", 「대한건축학회 2017년 춘계학술발표대회」.
6. 권영철(2017), "건축물 에너지 평가사-건축환경계획", 「한솔아카데미」, 120~122.
7. 대한건축사협회(2019), "페놀폼 단열재 사용자제 관련 알림", 알림 2019-026.
8. 박태성, 김경상(2019), "페놀폼 단열재의 물성 특성 및 성능 평가에 관한 연구", 「대한건축학회 2019 춘계학술발표대회」.
9. 서울건축산업연구원(2016), "단열재의 현장적용 방법에 관한 연구", 「서울시건축사회」.
10. OCI 기술자료(2015).
11. ASTM C1484, Standard Specification for Vacuum Insulation Panels.
12. JTBC 8시 뉴스(2019), JTBC 2019.9.25.
13. KS F 2271:2006, 건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법.
14. Richard T. Bynum, Jr.(2001), 「INSULATION HAND BOOK」, McGraw-Hill.