

총 설

친환경 건축물 단열재 최근 연구 동향

박종문, 김동환, 서동진^{†*}

고려대학교-한국과학기술연구원 에너지환경정책기술대학원, 그린스쿨
서울특별시 성북구 인촌로 7길 16-1
[†]한국과학기술연구원 청정에너지연구센터
서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

(2011년 12월 26일 접수; 2012년 1월 18일 수정본 접수; 2012년 1월 18일 채택)

Recent Research Trends for Green Building Thermal Insulation Materials

Jong-Moon Park, Dong-Hwan Kim, and Dong Jin Suh^{†*}

Green School, Korea University-Korea Institute of Science and Technology
5-Ga, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul, Korea
[†]Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology
Hwarangno 14-gil 5, Seongbuk-gu, Seoul, Korea

(Received for review December 26, 2011; Revision received January 18, 2012; Accepted January 18, 2012)

요 약

친환경 건축물에 사용되는 미네랄울, 폴리우레탄 등 전통적인 단열재로부터 최근에 주목받고 있는 VIP (Vacuum Insulation Panel), 에어로젤, 그리고 미래기술로 연구되고 있는 VIM (Vacuum Insulation Material), DIM (Dynamic Insulation Material) 등 단열재 및 단열 시스템의 특성과 장단점을 비교하였다. 매우 낮은 열전도율을 지닌 VIP 및 에어로젤은 기존 단열재에 비해 에너지 소모를 줄일 수 있으므로 주거면적을 크게 확대할 수 있는 장점이 있으며, 특히 에어로젤은 반투명 및 투명재질로 만들 수 있어 건물에 응용될 수 있는 가능성이 매우 크다. 단열재는 낮은 열전도율뿐만 아니라, 건설현장 응용성, 기계적강도, 내화성, 비용 및 환경영향 등을 고려하여야 하므로, 전통적인 단열재 및 최신 단열재를 활용하고 지속적으로 개선시키는 노력을 해야 할 것이다.

주제어 : 단열재, 그린빌딩, 에어로젤

Abstract : The pros and cons of green building thermal insulation materials and systems have been reviewed from traditional thermal insulation materials such as mineral wool and polyurethane to new thermal insulation materials like VIP and aerogel and future insulating VIM and DIM. VIPs and aerogels with very low thermal conductivity can use for green buildings to significantly increase residential area by reducing energy consumption. Aerogels can be produced as not only opaque and but also translucent forms, thus enabling a wide range of possible building application. For building applications, there are many properties to consider like building site adaptability and mechanical strength, fire protection, cost and environmental impact.

Keywords : Thermal insulation materials, Green building, Aerogel

1. 개 요

우리나라는 인구의 90%가 도시에 거주하고, 산업, 건물 등 도시민의 생활과 관련된 온실가스 배출량이 대부분이다. 특히 건축물 분야는 국가 온실가스 배출량의 25.6%를 차지하며, 녹색건축물 보급을 통한 온실가스 감축여력이 크다[1].

미국의 경우, 건축물은 미국 내 전체 에너지의 36%를 소비하고, 전력소비의 65%, 이산화탄소 배출의 30%를 점유하고 있

다[2]. 미국 내 그린빌딩 시장은 2010년부터 2015년까지 연간 19.5%의 성장이 전망되고 있다(Figure 2).

유럽의 경우 에너지 사용의 40%를 건축물이 차지하고 있으며, 단열을 보강하는 것과 같은 에너지효율화를 한다면 연간 이산화탄소 4억6천만톤을 감축할 수 있다고 한다. 2007년까지 유럽에서는 8,000개 이상의 건축물이 저에너지기준에 의해 건설되었다[3]. 또한 2010년 5월 19일 유럽연합은 “건물 에너지 성능 지침(EPBD, Directive on the Energy Performance of Buildings)”을 통과시켰는데, 이는 회원국들에게 2020년까지 신규로 지어지는 건물은 에너지사용 제로 근사기준(nearly zero en-

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: djsuh@kist.re.kr

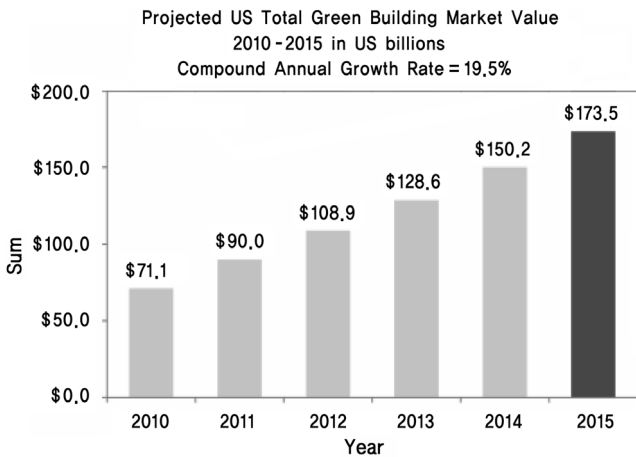


Figure 1. Projected US total green building market (www.EnvironmentalLeader.com).

ergy standard)을 만족시키는 것을 촉진하는 안을 담고 있다[4].

세계 건설시장에서도 녹색건축물(그린홈/그린빌딩) 기술 비중은 2008년 5%에서 2030년 60%까지 상승할 것으로 전망하고 있다[5].

정부는 신규 건축물의 에너지기준 강화, 기존 건축물의 에너지효율개선 촉진 등 녹색 건축물 활성화를 통해 2020년까지 건축물 온실가스 배출량을 31% 감축하는 목표를 제시한 바 있다[1]. 이 중 초단열 원천소재의 개발, 제조, 공정기술 확보는 에너지절약형 건물 보급의 근간이 되는 것으로 매우 중요하다고 할 수 있다.

본지에서는 전통적인 단열재에서부터 최근 주목받고 있는 단열재를 소개하고 그 특성을 비교해 보고자 한다.

2. 단열재 국내현황

우리나라 단열재 구성비는 65%가 발포폴리스티렌, 발포폴리우레탄, 압출발포폴리스티렌, 폴리에틸렌 등 유기단열재가 차지하고 있으며, 나머지 35%가 유리면(glass wool), 광질면(mineral wool) 등 무기 단열재가 차지하고 있다[6]. VIP, 에어로젤 같은 최신 단열재는 대형건설사 위주로 일부 건물에 활용되고 있으며, 아직 대중화되지 못한 상태이다.

2010년 7월 지식경제부와 에너지관리공단이 국립과천과학관에 준공한 그린홈 제로하우스에는 200 mm 두께로 성형된 고압축 발포폴리스티렌 제품인 인슈블럭을 활용하여 블록간 접합부위와 모서리 접합부위 등에 대한 열손실을 최소화했다[7].

2009년 11월 개관한 S사의 그린투모로우에는 진공단열보드, 에어로젤 등이 활용되었다.

서재에 활용된 진공단열보드는 단열재료(심재)를 외피로 봉합하고 진공상태로 유지하여 두께가 얇고 열전달 차단성을 개선한 단열재이며, 에어로젤은 나노 사이즈의 이산화규소를 실로 성형한 고체상태 입자로, 가벼우며 단열성능이 우수하다.

현관에는 내외부 판을 분리구조로 하여 단열 및 기밀성을 향상한 고기밀/고단열 방화문을 설치하여 소음차단, 결로

Table 1. Thermal conductivity of green tomorrow's insulation materials

Area	Thermal insulation material	Thermal conductivity
Bedroom	Vacuum Insulation	4.5 mW/mK
	Aerogel	15 mW/mK
Livingroom	Triple glazing	(U-value) 0.85 W/m ² K

방지 성능을 개선하였으며, 두개의 유리 사이에 설치한 블라인드로 실내유입 일사를 차단하고 외피 사이의 중공층을 외부와의 완충공간으로 활용하여 열적성능과 환기성능을 향상한 이중외피시스템을 적용하였다.

거실에는 삼중유리와 열교방지프레임 설계로 단열을 강화한 삼중창호시스템을 설치하였는데, 이는 내/외부 Low-E 유리와 중간유리사이 아르곤 가스를 충전하여 열손실을 저감하고 결로 발생 및 차음 성능을 개선하였다[8].

사용된 단열재의 열전도도는 Table 1과 같다.

3. 전통적인 단열재

기존의 단열재의 경우 공사현장에서의 유연성은 높으나, 30~40 mW/mK의 비교적 높은 열전도율을 갖는다. 때문에 제로에너지건물(zero energy building)이나 패시브하우스(passive house) 기준을 충족시키기 위해서는 외피의 두께가 너무 두꺼워질 수 있으며, 수분함량에 따라 열전도율이 높아질 수 있다. 폴리우레탄은 20~30 mW/mK의 낮은 열전도율을 가지나, 화재 시 독성가스가 발생하는 문제점이 있다[9].

3.1. 광질면(Mineral wool)

유리면과 암면(rock wool)도 보통 매트 및 보드 형태로 생산되는데, 충전재로도 활용된다. 광질면의 열전도율은 30~40 mW/mK인데, 온도, 수분함량, 밀도에 따라 변화한다. 예를 들어 수분함량이 0~10 vol%로 증가함에 따라 열전도율은 37~55 mW/mK로 증가하게 된다[9].

3.2. 발포폴리스티렌

발포폴리스티렌(EPS: Expanded Polystyrene)은 원유에서 추출한 폴리스티렌 알갱이로부터 만들어진다. EPS의 열전도율은 30~40 mW/mK인데, 온도, 수분함량, 밀도에 따라 변화한다. 예



Figure 2. Mineral wool (Board) and rock wool (Roll).



Figure 3. EPS and XPS.

를 들어 수분함량이 0~10 vol%로 증가함에 따라 열전도율은 36 mW/mK에서 54 mW/mK로 증가하게 된다[9].

3.3. 압출발포폴리스티렌

발포폴리스티렌(EPS)이 부분적인 열린 기공 구조인데 비해, 압출발포폴리스티렌(XPS: Extruded Polystyrene)은 막힌 기공 구조이다. EPS의 열전도율은 30~40 mW/mK인데, 온도, 수분함량, 밀도에 따라 변화한다. 예를 들어 수분함량이 0~10 vol%로 증가함에 따라 열전도율은 34~44 mW/mK로 증가하게 된다[9].

3.4. 셀룰로오스

셀룰로오스(Polysaccharide, $(C_6H_{10}O_5)_n$)는 재생종이나 목재 섬유에서 얻어지는 단열재이다. 셀룰로오스는 충전재로 많이 활용되나, 보드 및 매트 형태로도 생산될 수 있다.

셀룰로오스의 열전도율은 40~50 mW/mK인데, 온도, 수분함량, 밀도에 따라 변화한다. 예를 들어 수분함량이 0~5 vol%로 증가함에 따라 열전도율은 40~66 mW/mK로 증가하게 된다[9].

3.5. 코르크

코르크(cork)는 코르크나무에서 얻어지며, 충전재 혹은 보드형태로 생산될 수 있다. 코르크의 열전도율은 40~50 mW/mK이다[9].

3.6. 폴리우레탄

폴리우레탄(PUR: Polyurethane)은 이소시아나염(isocyanates), 폴리올(polyols)의 반응에 의해 형성된다. 보드 형태로 생산되지만, 또한 창호나 출입문의 기밀유지재나 빈 공간의 충전재



Figure 4. Cellulose insulation materials.

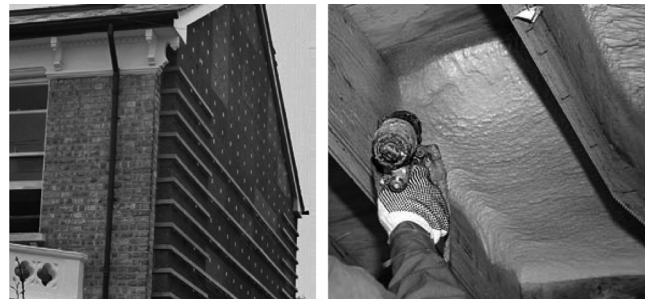


Figure 5. Cork insulation and Polyurethane insulation (expanding foam).

로도 사용된다. 폴리우레탄의 열전도율은 20~30 mW/mK으로, 광질면, 폴리스티렌, 셀룰로오스보다는 꽤 낮은 편에 속한다.

열전도율은 온도, 수분함량, 밀도에 따라 변화한다. 예를 들어 수분함량이 0~10 vol%로 증가함에 따라 열전도율은 25~46 mW/mK로 증가하게 된다[9].

그러나 폴리우레탄은 화재 시에는 심각한 건강상의 우려 및 위험을 가져올 수 있다. 화재 시 폴리우레탄은 시안화물(HCN) 및 이소시아나염과 같은 매우 유독한 물질을 배출한다.

3.7. 기타

이외에도 목재(열전도율 100~200 mW/mK), 카본스틸(55,000 mW/mK), 스테인레스스틸(17,000 mW/mK), 알루미늄(220,000 mW/mK), 콘크리트(150~2,500 mW/mK), 경량골재(100~700 mW/mK), 벽돌(400~800 mW/mK), 석재(1,000~2,000 mW/mK) 및 유리(800 mW/mK) 등이 있다[9].

4. 최신 단열재

전통적인 단열재에 비해 낮은 열전도율을 갖는 최근의 단열재들은 아래와 같다.

4.1. Vacuum insulation panels (VIPs)

VIP는 흡드실리카(fumed silical) 등 심재(core)가 외피로 감싸여진 형태이다. 열전도율은 3~4 mW/mK로, 25년 정도 후에는 8 mW/mK로 증가하는데 이는 수분 및 공기가 VIP 외피 및 내부 공극으로 침투하기 때문이다. 노후된 VIP의 열전도율은 50~100년 후에는 크게 증가하게 되는데, 이는 VIP의 가장 큰 단점으로 꼽히고 있다.

못과 같은 것에 의해 VIP 외피에 구멍이 생길 경우에도 열전도율이 20 mW/mK 이상 증가할 수 있다. 이로 인해 VIP는 공사현장에서 절단되거나 단열성능의 손실 없이 구멍을 뚫을 수 없으며, 이 또한 VIP의 확산에 걸림돌이 되고 있다.

이러한 단점에도 불구하고 전통적인 단열재에 비해 5~10배의 높은 단열성능으로 인해 패시브하우스나 제로 에너지/이산화탄소배출 건물(zero energy/emission building)의 단열성능을 충족시키는 단열재로 활용되고 있다.

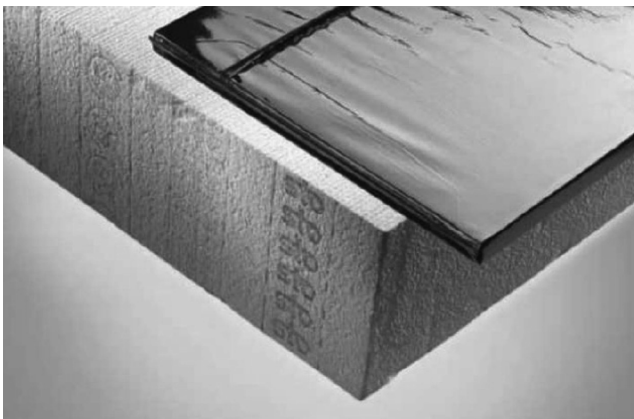
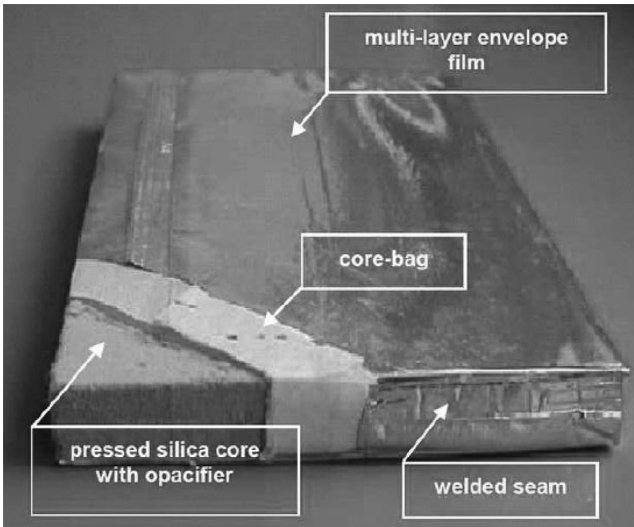


Figure 6. Typical VIP (Vacuum Insulation Panel) structure[9] and a comparison of equivalent thermal resistance thickness of traditional thermal insulation material and VIP[10].

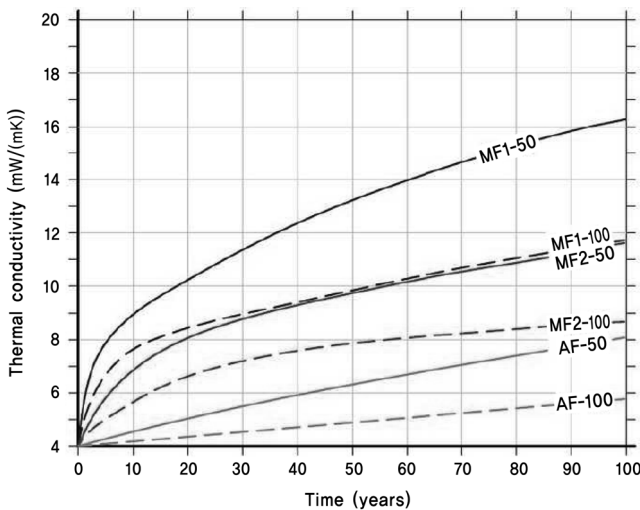


Figure 7. Thermal conductivity for VIP (fumed silica core) as a function of elapsed time[11], Panel size $50 \times 50 \times 1$ cm, $100 \times 100 \times 2$ cm, fo-il type AF (a metal film)/ MF1 (a single layer metallized film)/MF2 (both three-layer metallized films).

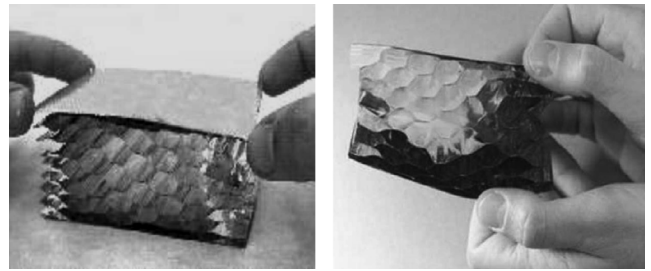


Figure 8. GFP (foil and baffle structure)[11].

고도제한이나 기존 건물의 개보수와 같이 공간의 제약이 있을 경우, 친환경건축물 규제를 만족시키기 위해 얇은 단열재가 필요하다. 또한 벽체 두께의 감소는 주거공간의 확대를 가능하게 하여 부동산의 가치를 증가시킬 수도 있는 장점이 있다.

VIP의 열교현상 및 전도도의 수학적 모델, 공기 및 수분의 침투, 서비스기간, 품질관리 등 다양한 분야의 연구가 이루어져 왔으며, 미래의 궁극적인 해결책이 되기는 어렵다고 해도, 현재 및 가까운 미래의 에너지절약 및 경제적인 관점에서 최적의 해결책이 될 수 있다.

VIP 연구는 최소 50~100년의 장기간 동안 수분 및 공기의 침투를 막을 수 있는 외피의 개발에 초점을 맞추고 있다[9].

4.2. Gas-filled panels (GFPs)

VIP와 유사한 기술로 VIP의 진공대신에 공기보다 열전도율이 낮은 아르곤(Ar), 크립톤(Kr) 및 제논(Xe)을 적용한 것이다. GFP 내의 저전도율 가스농도를 유지시켜주는 것과 공기 및 수분의 침투를 피하는 것이 단열 성능에 결정적이다.

GFP에 적용된 가스보다는 진공상태가 단열 성능이 더 좋다. 반면에 격자구조는 VIP와 같이 내부 진공에 견디지 않아도 된다. GFP 내부의 낮은 방사율 표면은 복사열 전달을 감소시킨다.

GFP 프로토타입의 열전도율은 40 mW/mK 정도로 이론적으로 계산된 것보다는 꽤 높은 편이다. GFP 역시 VIP의 단점과 장점을 가지지만, VIP와 비교해서 현재나 가까운 미래에 이를 대신할 수 있을지는 의문이다[11].

4.3. 에어로젤

에어로젤(aerogel)은 잠재력이 있는 가장 각광받는 최신 단열재이다. 지난 5년 동안 전 세계 에어로젤 시장은 3배 성장하여 2008년 83 M\$에 달했으며, 2013년까지 616 M\$에 달할 것으로 전망하고 있다[12]. 따라서 에어로젤 제조사들은 비용절감과 새로운 형태의 에어로젤을 생산하기 위한 노력을 기울이고 있다.

복사전달을 억제하기 위해 카본블랙(carbon black)을 사용하면, 열전도율을 50 mbar 압력에서 4 mW/mK까지 낮출 수 있다. 아스펜에어로젤과 같은 상업용 에어로젤의 열전도율은 상온에서 13~14 mW/mK로 보고되고 있다. 에어로젤 생산비용은 아직 매우 높으며, 비교적 높은 압축강도를 갖지만, 낮은 인장강도



Figure 9. Aerogel insulation performance (KIST).

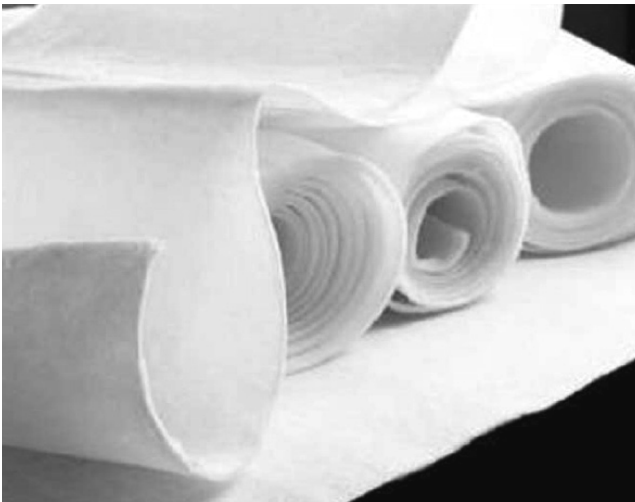


Figure 10. An example of aerogel as a high performance thermal insulation material for building application (Aspen Aerogels, Inc).



Figure 11. Translucent aerogel insulation used in a curtain wall at the sculpture building and gallery of Yale University[12].



Figure 12. Two examples of translucent aerogel insulation as a high performance thermal insulation solution for daylighting[12].

로 매우 깨지기 쉽다. 인장강도는 카본섬유매트릭스(carbon fibre matrix)와 결합을 통해 증가시킬 수 있다[9].

에어로젤의 매우 흥미로운 특징은 불투명(opaque), 반투명(translucent) 혹은 투명(transparent)하게 만들 수 있어 건축물에 광범위하게 응용될 수 있다는 점이다. 다만, 유리와 같이 투명한 에어로젤은 현재 기술적인 한계로 인해 만들지 못하고 있다. 에어로젤이 단열재로 광범위하게 응용되어 수요가 급증한다면, 가격은 충분히 낮아질 수 있을 것이다.

제한된 범위이지만 현재 대표적인 에어로젤 상용회사로서는, 아스펜에어로젤(Aspen Aerogel)사의 블랑켓(blanket) 형태의 에어로젤을 화학공장 파이프, 용기등의 단열에 사용한 경우와 캐봇(Cabot)사의 반투명 비드(bead) 형태의 에어로젤을 건축물 채광창에 활용한 경우를 들 수 있다.

4.4. 상변화물질

상변화물질(PCM, phase change materials)은 가열할 경우 흡열반응에 의해 에너지를 흡수하여 고상에서 액상으로 변화된다. 주위 온도가 떨어지면 액상 PCM은 다시 고상으로 변화되며, 발열반응에 의해 기 흡수했던 열을 발산하게 된다. 이러한 상변화 주기는 건물 내부 온도에 의해 안정화되며, 냉난방 부하를 감소시킨다[9].

5. 미래 단열재

5.1. Vacuum Insulation Materials (VIMs)

VIM은 초기 열전도율이 4 mW/mK 이하인 진공상태로 채워진 닫힌 기공 구조를 가진 균질의 물질이다. VIM은 공사 현장

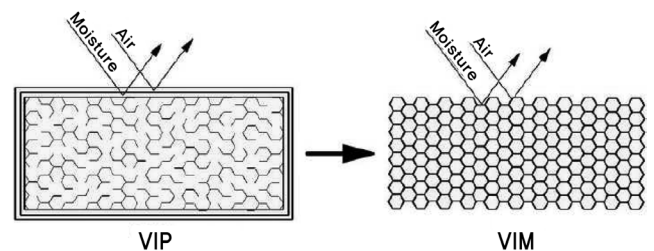


Figure 13. Development from VIPs to VIMs[11].

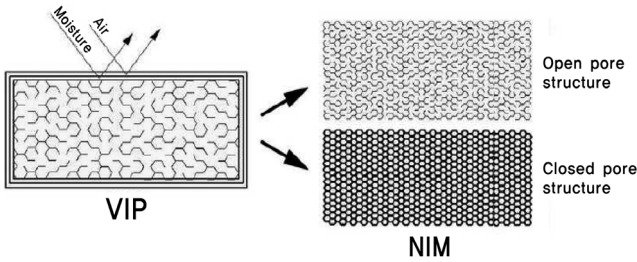


Figure 14. Development from VIPs to NIMs[11].

에서 낮은 열전도율의 손실 없이 절단 및 시공될 수 있으며, 못과 같은 것에 의한 손상역시 국부적인 열교현상을 가져올 뿐이다[11].

5.2. Gas Insulation Materials (GIMs)

GIM은 초기 열전도율이 4 mW/mK 이하인 아르곤, 크립톤 및 제논과 같은 저 전도도 물질로 채워진 닫힌 기공 구조의 균질 물질이다.

GIM은 VIM과 기본적으로 동일하며, 단지 VIM이 진공으로 채워져 있는 닫힌 기공 구조라면, GIM은 저 전도도 물질로 채워져 있는 것이 다르다[11].

5.3. Nano Insulation Materials (NIMs)

초기 상태에서 열전도율이 4 mW/mK 이하인 열린 혹은 닫힌 나노 기공 구조의 균질물질이다.

NIM은 VIM이나 GIMs과 다르게 최소 100년의 서비스 기간 동안 공기와 수분의 침투를 예방할 필요가 없다. 공극사이즈가 40 nm 이하로 작아질 경우 열전도율이 매우 작아진다. 이는 knudsen effect때문인데, 가스분자의 평균자유행정(mean free path)이 공극직경보다 크기 때문이다[11].

5.4. Dynamic Insulation Materials (DIMs)

열전도율이 원하는 범위 내로 제어될 수 있는 물질을 DIM이라고 하는데, 가스분자의 평균자유행정 및 가스 표면작용(surface interaction)을 포함한 공극 내부의 가스 함유량 및 농도, 공극의 내부표면의 복사율, 격자구조의 고체 열전도율을 통해 열전도율을 제어할 수 있다[11].

5.5. 콘크리트 단열 NIMs

단열재의 열전도율이 낮아지는 것과 동시에, 건축물 외피의 하중을 견디는 요소도 고려해야 한다.

콘크리트의 예를 들면, NIM과 콘크리트를 복합적으로 사용하여 열전도율을 낮추고 동시에 건물하중을 견디는 기계적 강도를 확보할 수 있다. 콘크리트는 1,700~2,500 mW/mK의 높은 열전도율을 가지므로, 콘크리트 건축물의 외피는 낮은 열관류율(U-value)을 만족시키기 위해 다양한 단열재를 사용해야 한다. 때문에 제로에너지건물기준이나 패시브하우스 기준에 부합하기 위해서는 필요 이상으로 외피가 두꺼워질 수 있다. 더구나 시멘트의 생산에는 많은 양의 이산화탄소가 발생하므로

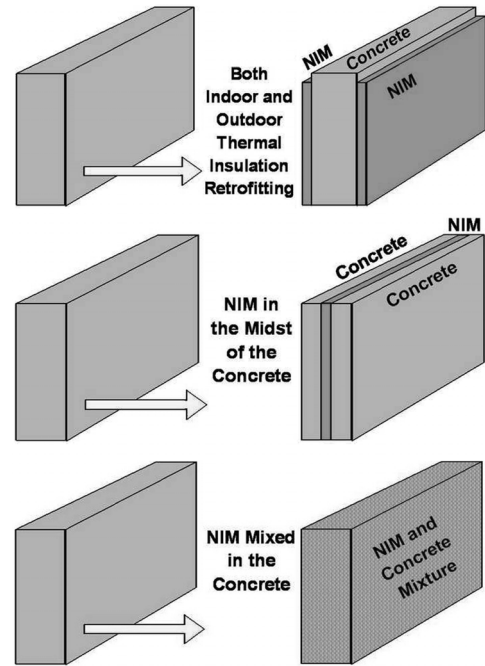


Figure 15. NIMs as a thermal insulation for concrete[9].

부정적인 환경영향을 가져오게 된다. 시멘트산업은 인위적인 이산화탄소 배출의 5%를 차지한다[13].

5.6. 나노콘

나노콘(NanoCon)은 원칙적으로 철, 목재, 콘크리트 등과 같은 건축자재가 아니다. 콘크리트가 건축자재로서 가지는 특징과 같거나 더 좋은 특성을 가지면서 열전도율은 낮은, 이산화탄소 배출과 같은 부정적인 환경영향이 낮은 개념적인 물질이다[9]. 나노콘은 열전도율이 4 mW/mK 이하인 열린 혹은 닫힌 나노 기공 구조의 균질물질로 콘크리트보다 더 좋은 건축자재로서의 특징을 가지는 물질이다.

나노콘은 콘크리트보다 더 좋은 건축자재로서의 특징을 가지는 NIM이라고 생각할 수 있다. 예를 들어 NIM과 카본나노튜브를 하나의 물질로 만들면, NIM으로 인해 매우 낮은 열전도율을 가지게 되고, 카본나노튜브에 의해 매우 큰 인장강도를 가질 수 있다. 카본나노튜브의 인장강도는 63,000 MPa로 측정되며, 이론적으로는 300,000 MPa에 달한다. 철근의 경우 500 MPa, 철근/보강재 없는 콘크리트의 경우 인장강도 3 MPa, 압축강도는 30 MPa이다. 따라서 나노콘의 잠재력은 매우 크다고 할 수 있다[9].

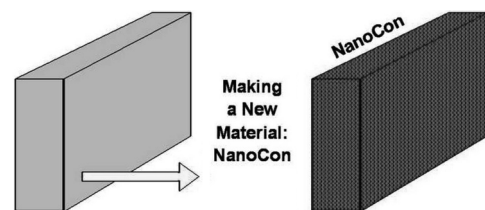


Figure 16. NanoCon[9].

6. 최신 단열재의 비교

단열재로서 낮은 열전도율이 가장 중요한 특성이지만, 아울러 기계적 강도, 내화성, 내구성 등 건축자재가 가져야 하는 특성도 필요하다. 이를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Requirements for future insulation materials[9]

Properties	Requirement
Thermal conductivity (Pristine)	< 4 mW/mK
Thermal conductivity (After 100 years)	< 5 mW/mK
Thermal conductivity (After modest perforation)	< 4 mW/mK
Perforation vulnerability	not to be influenced significantly
Possible to cut for adaption at building site	yes
Mechanical strength (E.g. compression and tensile)	may vary
Fire protection	may vary, depends on other protection
Fume emission during fire	any toxic gases to be identified
Climate ageing durability	resistant
Freezing/thawing cycles	resistant
Water resistant	resistant
Water permeability	may vary
Costs vs. other thermal insulation materials	competitive
Environmental impact (Including energy and material use in production, emission of polluting agents and recycling issues)	low negative impact

전통적인, 최신 단열재 및 미래 가능한 단열재를 비교해 보면, 최근 단열재로서는 에어로젤이 낮은 열전도도 및 공사현장 적용성, 천공에 대한 영향성 측면에서 많은 장점이 있으며, 미래 단열재로서는 NIMs의 잠재성이 가장 높은 것을 알 수 있다(Table 3).

DIMs, 나노콘의 경우 단열성능 및 내 하중 능력으로 인해 매우 큰 잠재력을 가지고 있다고 할 수 있다[9].

7. 결론

광질면, 폴리우레탄 등 전통적인 단열재로부터 최근에 주목 받고 있는 VIP, 에어로젤, 그리고 미래기술로 연구되고 있는 NIM, DIM, 나노콘 등 단열재의 특성과 장단점을 비교해 보았다. 향후 연구방향은 전통적인 단열재 및 최신 단열재의 개선과 현재의 모든 단열재 성능을 증가하는 새로운 단열재의 연구가 될 것이다.

초단열 원천소재의 개발, 제조, 공정기술 확보는 친환경건축물 확산보급의 근간이 되는 것으로 매우 중요하지만, 국내 최신단열재 및 미래 단열재 연구 및 상용화는 선진국에 비해 부족한 수준이다.

최근 각광받는 단열재로서 VIP와 에어로젤이 있다. 열전도율은 VIP가 4 mW/mK로 가장 낮으나, 수분 및 공기의 침투, 외피가 손상을 입을 경우 20 mW/mK 이상 증가될 수 있다. 또한 건설현장에서 절단 및 활용될 수 없는 단점이 있다. 에어로젤은 13 mW/mK의 열전도율을 가지며, 시간에 흐름에 따라 증가하지 않으며, 천공에 대한 영향성이 낮고 공사현장 적용성이 VIP에 비해 높다. VIP 및 에어로젤은 아직 고가(高價)이나 VIP는 기존 단열재에 비해 주거면적을 크게 확대할 수 있어

Table 3. The potential of the traditional, new and future thermal insulation materials and solutions for tomorrow[9]

Materials		Low pristine/aged thermal conductivity	Perforation robustness	Possible building site adaption cutting	Load-bearing capabilities	Solution for tomorrow?
Traditional	Mineral wool	×	○	○	×	×
	EPS	×	○	○	×	×
	XPS	×	○	○	×	×
	Cellulose	×	○	○	×	×
	Cork	×	○	○	×	×
	Polyurethane	×	○	○	×	×
New	VIP	○/△	×	×	×	○
	GFP	△	×	×	×	×△
	Aerogel	△	○	○	×	△
	PCM	-	-	-	-	*heat storage and release
Future	VIM	○/△	○	○	×△	○
	GIM	○/△	○	○	×△	△
	NIM	○	○○	○○	×△	○○
	DIM	△	N/A	N/A	×△	○○
	NanoCon	○	○	○	○	○○

※ ○ yes, △ maybe, ○○ excellent, × no

경제성을 기대할 수 있으며, 에어로젤은 불투명, 반투명 및 투명재질로 만들 수 있어 건물에 응용될 가능성이 매우 크다[12].

단열재의 선택은 낮은 열전도율, 천공에 대한 강건성, 건설 현장 절단 및 적용성, 기계적 강도, 내화성, 화재 시 흡 발생, 기후에 대한 내구성, 외기 변화에 대한 저항력, 방수성, 비용 및 환경영향을 모두 고려해야 한다. 이 모든 것을 만족시키는 단열재는 현재 존재하지 않으므로, 목적에 맞게 전통적인 단열재 및 최신 단열재를 활용하고 지속적으로 개선시키는 노력을 해야 할 것이다.

참고문헌

1. Ministry of Environment and Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Green Cities and Green Buildings Activation Plan," 3-4 (2009)
2. <http://www.bccresearch.com/report/green-building-materials-us-market-env007b.html>
3. EURIMA(www.eurima.org), "Aim High, Go Low Insulate," 4-5 (2009).
4. Sven Schimschar, "Germany's Path Towards Nearly Buildings-enabling the Greenhouse Gas Mitigation Potential in the Building Stock," *Ecofys Germany GmbH, Energy Policy*, **39**, 3346-3360 (2011).
5. Ministry of Knowledge and Economy, "Green Energy Strategy Roadmap," 42-43 (2011).
6. HanmiGlobal, "Current Status and Future Trend of Domestic Insulation Materials," 9-10 (2010).
7. Korean Energy Management Corporation, "Greenhome a Million Supply Plan," 6-8 (2009).
8. Samsung Corporation, "Green Tomorrow," 8-25 (2009).
9. Bjorn, Petter, Jelle, "Traditional, State-of-the-Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions-Properties, Requirements and Possibilities," *Energy and Buildings*, **43**(10), 2549-2563 (2011).
10. M. Zwerger, and H. Klein, "Integration of VIP's into External Wall Insulation Systems," *Presentations of the 7th International Vacuum Insulation Symposium*, 7 (2005).
11. R. Baetens, et al., "Vacuum Insulation Panels for Building Application: A Review and Beyond," *Energy and Buildings*, **42**, 147-172 (2010).
12. Ruben, Baetens, et al., "Aerogel Insulation for Building A State-of-the-art Review," *Energy and Buildings*, **43**, 761-769, (2010).
13. WBCSD, "Toward A Sustainable Cement Industry," 11 (2002).