

공동주택 습식 진공 외단열시스템 성능 평가

Performance Evaluation of Adhesively Fixed External Insulation and Finish System Using Vacuum Insulation Panels for Apartment Buildings

박 시 현*
Park, Si Hyun

임 재 한**
Lim, Jae Han

송 승 영***
Song, Seung Yeong

Abstract

For the target goal of Zero-energy House construction in 2025, the government announced that the insulation regulations will be continuously enhanced. It has been predicted that high-performance insulation materials, such as vacuum insulation panel (VIP), should be used to decrease the thickness of outer walls. The aim of this study was to evaluate the performance of adhesively fixed external insulation and finish system (EIFS) with VIP. The energy performance of a base model with conventional internal insulation system and three alternatives of EIFS with VIP were analyzed by three-dimensional heat transfer simulation. Construction cost and convenience of each alternative were also evaluated and compared. As results, effective alternatives in terms of each performance as well as overall performance considering the weighting factors of each performance were suggested.

키워드 : 습식 외단열, 진공단열재, 에너지성능, 시공비용, 시공성

Keywords : Adhesively Fixed EIFS(External Insulation and Finish System), VIPs(Vacuum Insulation Panels), Energy Performance, Construction Cost, Construction Convenience

1. 서 론

2008년 기준, 국내 건물 에너지소비는 국가 전체 에너지소비의 22.2%를 차지하고 있으며, 주거용 건물의 에너지소비 비중은 53%, 2000~2006년간의 연평균 에너지소비 증가율은 주요 선진국에 비해 훨씬 높은 3.9%(독일 0.0%, 일본 -0.2%, 미국 -1.6%)에 달해, 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위해서는 주거용 건물에서의 에너지절약이 필요함을 알 수 있다. 이러한 상황을 반영, 정부에서는 주거용 건물의 연간 에너지소비량을 2009년 수준 대비 2017년에 60% 감축(패시브 하우스 수준), 2025년에 제로에너지 의무화를 정책 목표로 보고한 바 있어, 이제 저에너지 주거용 건물은 선택사항이 아닌 국가 정책으로 강제되는 필수사항이 되었다[1].

한편 선진 외국에서는 열교부위의 선형 열관류율(Linear Thermal Transmittance) 상한치 규정 혹은 건물 거래시 첨부되는 에너지효율등급인증서(Energy Performance Certificate) 발급을 위한 건물 에너지성능 평가시 열교를 통한 손실열량 포함 등과 같은 방법으로 건물 외피에서의 열교 제거를 의무화하거나 강화해 가고 있다. 반면 국내 대표적 주거용 건물인 공동주택에는 거의 대부분 내단열시스템이

적용되고 있어 외벽-바닥, 외벽-내벽 접합부 등에서 단열재가 불연속되어 다수 열교부위가 반복적으로 발생하고 있다. 이에 정부에서도 인허가를 위한 EPI(Energy Performance Index, 에너지성능지표) 점수 계산시 가점 부여, 건축물에너지효율등급인증서 발급을 위한 에너지성능 평가시 가점 부여, 녹색건축인증제(G-SEED)상에 외피 열교제거 항목 신설을 통한 점수 부여 등의 방법으로 외피 열교제거에 대한 요구를 강화해 가고 있어, 외단열시스템 적용이 거의 유일한 대안으로 고려되고 있는 상황이다.

국내 대표적 주거용 건물인 공동주택은 거의 대부분 고층이며, 따라서 국가 정책 목표로 삼고 있는 패시브 및 제로에너지 공동주택을 효과적으로 구현하기 위해서는, 일반단열재 적용시 300~400mm에 달하는 외벽두께를 줄일 수 있는, 고성능 외단열시스템 적용이 필수적인 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 진공단열재 적용으로 단열두께를 현저히 감소시키고, 기존 공동주택의 설계 시공조건 수용이 가능하며, 열교제거가 가능할 것으로 기대되는 진공 외단열시스템의 성능을 평가해 봄으로써, 향후 고성능 외단열시스템이 좀 더 효과적으로 활용될 수 있게 하고자 하였다. 이를 위해, 건식 시스템¹⁾에 비해 국내 시공사태가 많아 현장에서의 시공노하우 확보 측면에서 유리하고, 시공비용 절감 측면에서도 이점이 있는 습식 시스템²⁾을 대상으로 단열재 레이어 구성에 따른 대안들

* Dept. of Architectural Engineering, Ewha Womans Univ., South Korea (sxp922@gmail.com)

** Dept. of Architectural Engineering, Ewha Womans Univ., South Korea (limit0@ewha.ac.kr)

*** Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Ewha Womans Univ., South Korea (archssy@ewha.ac.kr)

1) 주로 메탈 혹은 PVC 레일을 이용하여 바탕면에 외단열시스템을 고정하는 방식

을 설정한 후, 기존안과 대안들에 대한 3차원 정상상태 전열해석을 통해 에너지성능을 평가하고, 시공비용 및 시공성능을 함께 평가하였다. 그리고 각 성능항목들에 대한 가중치 조합별로 가장 우수한 대안을 결정하였다.

2. 진공단열재 개요

진공단열재는 이미 오래 전부터 냉장고와 같은 가전제품 등에 적용되어 왔으며, 건물의 경우 벽, 지붕, 바닥, 문 등 여러 부위에 적용되고 있다. 국내에서는 저에너지 시범건물³⁾ 뿐만 아니라 일반 건물⁴⁾에서도 적용사례가 증가하고 있으며, 국외의 경우 진공단열재 1 혹은 2레이어, 진공단열재+일반단열재 2레이어, 일반단열재+진공단열재+일반단열재 3레이어 등 다양한 방식으로 다수 건물에 적용되고 있음을 확인할 수 있다[2], [3], [4].

진공단열재의 중앙부 열전도율은 0.0045W/mK 수준으로 매우 낮아, 일반단열재 적용시 패시브 및 재료에너지 하우스에 요구되는 외벽두께(300~400mm)를 약 1/10 수준으로 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 진공 처리 후 내부 형태 유지를 위한 심재(Core)에는 흙드실리카, 침강실리카, 글라스울, 우레탄 폼, 폴리스티렌 폼 등이 있으며, 이 중 흙드실리카와 글라스울이 주로 사용되고 있다 (Fig. 1 참조). 진공단열재는 고가이고, 경년변화에 따른 틈 발생시 내부 압력 높아지고 열저항 낮아지게 되므로 취급시 파손에 대한 주의가 필요하다. 또한 단열재 외부를 방사율은 매우 낮지만 열전도율은 매우 높은 알루미늄 박막 등으로 감싸게 되므로 단열재간 조인트에서 열교가 발생할 수 있어, 이에 대한 주의가 필요하다.

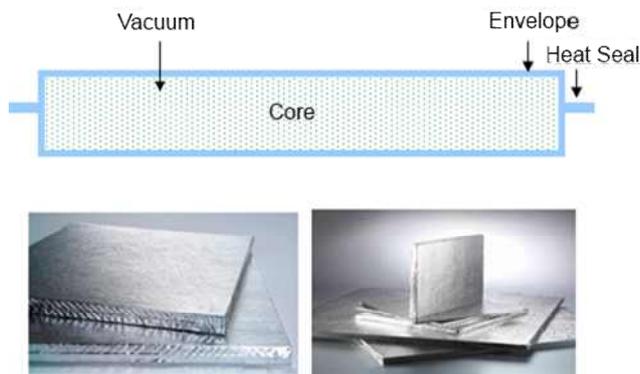


Fig. 1. Composition of VIPs(Vacuum Insulation Panels)

3. 습식 진공 외단열시스템 성능평가 개요 및 방법

3.1. 성능평가 개요

국내 고층 공동주택 외벽은 주로 콘크리트 벽체와 창호로 구성되는 Punched Window 외벽 혹은 메탈 프레임/시트 및 유리로 구성되는 Curtain Wall 외벽 등으로 시공되고 있다. 본 연구에서는 시공사례가 훨씬 더 많은 Punched Window 외벽인 경우를 대상으로 보편적 시공법인 습식 진공 외단열시스템 대안들을 설정하고, 일반단열

재를 내단열로 적용한 기존안 대비 각 대안들의 에너지 성능, 시공비용, 시공성능을 평가하고자 하였다.

이를 위해, 기존안 및 모든 대안들은 서로 유사한 외벽 열관류율을 갖도록 모델링한 후 3차원 정상상태 전열해석으로 손실열량을 산출하여, 기존안 대비 대안들의 에너지 성능 증감 정도 및 대안간 우열을 평가하였다. 그리고 재료비 및 노무비로 구분 시공비용을 산출하고, 단열재 유닛 생산성 및 취급성, 시공 공정수, 시공 난이도로 구분 시공성능을 분석하여, 기존안 대비 대안들의 시공비용 및 시공성능 증감 정도와 대안간 우열을 평가하였다.

또한 에너지성능, 시공비용, 시공성능의 각 성능항목별로 순위에 따른 점수를 각 대안들에 부여, 대안별 종합성능을 계수화하였다. 그리고 에너지성능, 시공비용, 시공성능의 각 성능항목에 대해 동일한 가중치를 부여한 경우, 에너지성능에 높은 가중치를 부여한 경우, 시공비용에 높은 가중치를 부여한 경우로 구분, 각 경우에 대해 가장 우수한 대안을 결정하였다.

3.2. 진공 외단열시스템 대안 설정 및 구성

1) 대안 설정

진공단열재는 가격이 고가이고 외부 충격에 의한 파손시 단열능력이 급격히 저하될 수 있으므로, 단열층은 진공단열재와 일반단열재의 복수 레이어 구성을 원칙으로 함으로써 시공비용 절감 및 진공단열재 파손 방식을 도모하고자 하였다. 이 경우 진공단열재간 조인트 열교현상 저감에도 이점이 있게 되며, 설정 대안은 Table 1에서와 같이 진공단열재 외측에 일반단열재를 추가 설치하는 2레이어 안(P-B-1), 진공단열재 전체를 일반단열재로 감싸는 Encapsulated Type 3레이어 안(P-B-2), 진공단열재 내외측에 일반단열재를 추가 설치하는 Covered Type 3레이어 안(P-B-3)의 세가지로 하였다. 여기에서 진공단열재와 일반단열재로 구성되는 단열재 유닛은, 시공을 용이하게 하기 위해 모두 사전 공장 제작을 원칙으로 하였다. 단열재 유닛은 콘크리트 외벽 외표면에 접착제로 고정하며, 고정력 추가를 위해 일반적으로 사용되는 Bobbin 앵커를 단열재 유닛 각 코너에 설치하는 것으로 하였다. 설정 대안 구성은 Table 1과 같고, Bobbin 앵커 상세는 Fig. 2와 같다.

2) 성능평가를 위한 외벽 열관류율 설정

2017년의 60% 감축(패시브 하우스 수준), 2025년의 제로에너지 의무화라고 하는 국가 정책 목표를 감안, 성능평가를 위한 외벽 열관류율은 60% 및 100% 절감형으로 구분하였다. 60% 절감형의 경우 유럽의 패시브하우스 기준에서 요구하는 0.15W/m²K, 100% 절감형의 경우 P사의 공동주택 성능기준을 참고하여 0.11W/m²K로 각각 외벽 열관류율을 설정하였다.

- 2) 주로 접착제를 이용하여 바탕면에 외단열시스템을 고정하는 방식
- 3) LH미래주택체험관, 명륜보육원 리모델링, 강화도 한옥 등(출처: O사 시공자료)
- 4) 한국은행 제주지사, 익산시 오산면 상업용 건물, 부천시 대림아파트, Nexolon 등(출처: O사 시공자료)

Table 1. Alternatives of adhesively fixed EIFS(External Insulation and Finish System) using VIPs

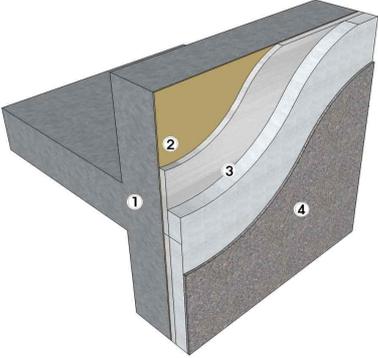
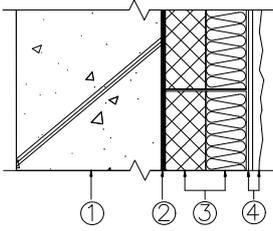
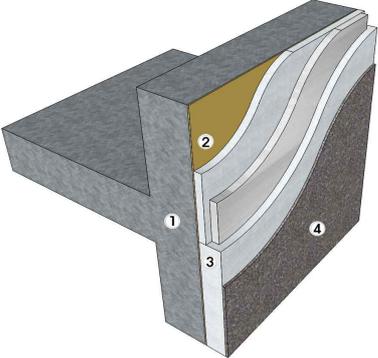
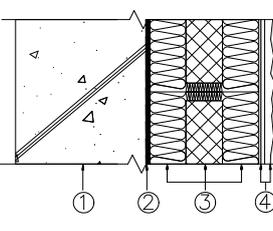
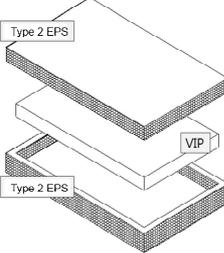
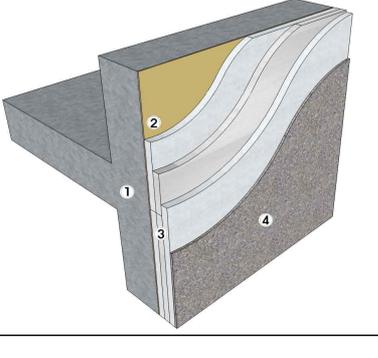
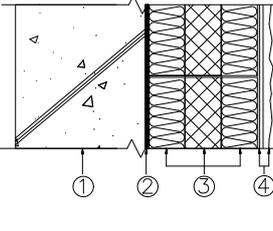
No.	Image	Vertical section including insulation unit joint	Wall composition	Remark
P-B-1			① Concrete structure ② Adhesive, anchor ③ 2 layer insulation unit (VIP + Type 2 EPS) ④ Reinforced base plaster + finish plaster	③ : Factory-built EPS : Expanded polystyrene, molded beads
P-B-2			① Concrete structure ② Adhesive, anchor ③ Encapsulated type 3 layer insulation unit (Type 2 EPS + VIP + Type 2 EPS) ④ Reinforced base plaster + finish plaster	③ : Factory-built 
P-B-3			① Concrete structure ② Adhesive, anchor ③ Covered type 3 layer insulation unit (Type 2 EPS + VIP + Type 2 EPS) ④ Reinforced base plaster + finish plaster	③ : Factory-built



Fig. 2. Bobbin anchor

3) 외벽 열관류율 수준별 대안별 단열재 구성, 두께
 설정 외벽 열관류율을 만족하는 대안별 단열재 두께를 산정하기 위한 열관류율 계산시, 콘크리트 벽체 두께는 200mm로 하였고, 실내의 표면열전달 저항은 건축물의 에너지절약설계기준[5], [별표4]에서 정하고 있는 값을 적용하였다. 일반단열재의 경우 건축물의 에너지절약설계기준, [별표1]의 단열재 등급 분류상 가 등급에 해당하는 것으로 하였고, 진공단열재의 경우 중앙부 열전도율(λ_{cop})을 적용하였다 (에너지성능 평가를 위한 3차원 정상상태 전

열해석시에는 진공단열재간 조인트, 즉 진공단열재 Edge에서의 열교현상을 반영한 유효 열전도율, λ_{eff} 를 적용함). 열관류율 계산에 적용된 각 재료별 열전도율 값은 Table 5와 같고, Table 2는 기존안 및 대안의 설정 외벽 열관류율 수준별 진공단열재와 일반단열재 구성 및 두께를 나타낸 것이며, 시중 단열재 제품 두께를 적용한 관계로 모든 대안에서 열관류율이 일치하지는 않는다. 진공단열재 외측에 일반단열재를 추가 설치하는 2레이어 안(P-B-1)의 경우 진공단열재와 일반단열재 두께를 서로 달리하여 두 개 대안(P-B-1-①, P-B-1-②)을 설정하였다.

3.3. 성능평가 방법

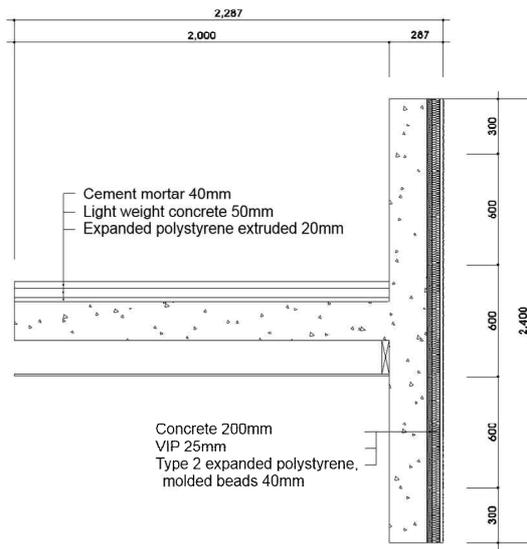
1) 에너지성능

① 전열해석 모델

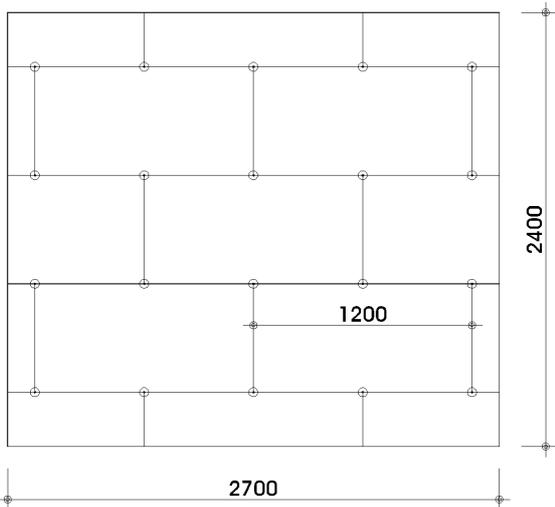
3차원 정상상태 전열해석 프로그램으로 Physibel TRISCO v.11.0w를 사용하였다. TRISCO는 2, 3차원 정상상태

Table 2. Insulation unit composition and thickness by U-value

	60% reduction type(set U-value 0.15W/m ² K)			100% reduction type(set U-value 0.11W/m ² K)		
	Insulation unit composition(thickness)	Total thickness of insulation unit(mm)	Modeled U-value (W/m ² K)	Insulation unit composition(thickness)	Total thickness of insulation unit(mm)	Modeled U-value (W/m ² K)
Existing case	Type 2 EPS(230mm)	230	0.141	Type 2 EPS(300mm)	300	0.109
P-B-1	① VIP(25mm) + Type 2 EPS(40mm)	65	0.141	① VIP(35mm) + Type 2 EPS(40mm)	75	0.107
	② VIP(20mm) + Type 2 EPS(70mm)	90	0.144	② VIP(30mm) + Type 2 EPS(75mm)	105	0.108
P-B-2	Type 2 EPS(30mm) + VIP(20mm) + Type 2 EPS(40mm)	90	0.144	Type 2 EPS(35mm) + VIP(30mm) + Type 2 EPS(40mm)	105	0.108
P-B-3	Type 2 EPS(30mm) + VIP(20mm) + Type 2 EPS(40mm)	90	0.144	Type 2 EPS(35mm) + VIP(30mm) + Type 2 EPS(40mm)	105	0.108



a) Vertical section(P-B-1-①)

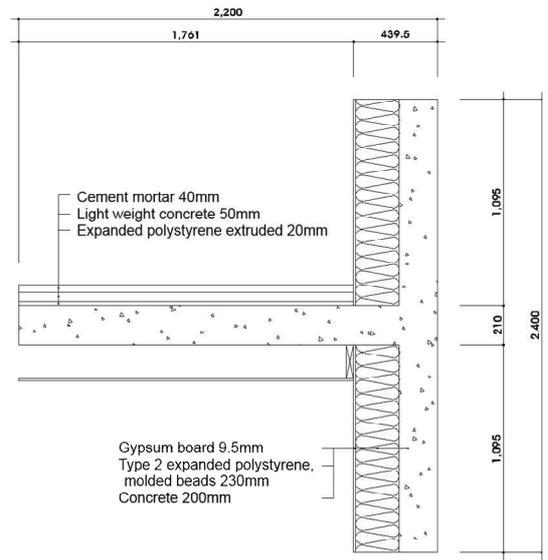


b) Elevation of insulation unit installation (○ indicates Bobbin anchor)

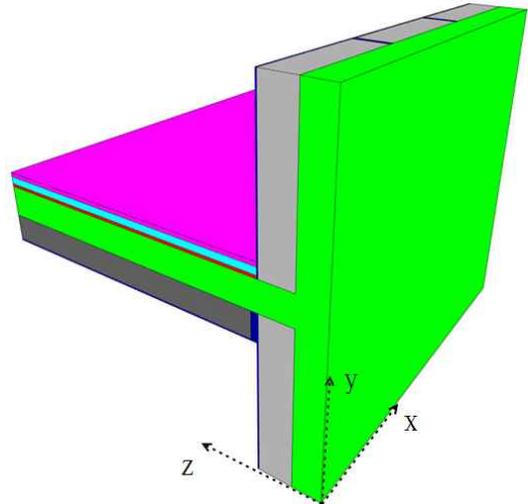
Fig. 3. Evaluated domain for heat transfer simulation

전열해석이 가능하며, 열평형 방정식을 유한차분법에 의해 이산화하여 풀어줌으로써 복잡한 건물 부위에서 정밀도 높은 계산이 가능한 프로그램이다.

전열해석 부위는 기준층 외벽-바닥 접합부를 대상으로



a) Vertical section



b) Simulation model

Fig. 4. Vertical section and simulation model of existing case for 60% reduction type

하였고, Fig. 3에서와 같이 전열해석 모델의 외벽 범위는 진공단열재 크기(너비 1,200mm, 높이 600mm)를 고려, 너비(Fig. 4, x축 방향) 2,700mm, 높이(Fig. 4, y축 방향) 2,400mm로 설정하고, 실 깊이(Fig. 4, z축 방향)는 외벽 실내측 마

감선으로부터 실내측으로 2,000mm로 하였다. 기존안 및 모든 대안에서 전열해석 모델의 전체 깊이는 외벽 두께에 따라 달라지나, 실내 공간의 너비, 높이, 깊이는 동일하다. 전열해석 모델에서 바닥은 일반적으로 적용되는 마감 몰탈 40mm, 기포콘크리트 50mm, 압출법 보온판 20mm, 콘크리트 슬래브 210mm로 구성하였고, 자재 고정을 위한 앵커 등은 실제 시공사와 동일하게 모델링하였으며 일부 형상을 단순화하였다. Bobbin 앵커(Fig. 2 참조) 설치 위치는 Fig. 3 b)와 같고, Fig. 4는 지면관계상 60% 절감형 기존안에 대해서만 단면도 및 전열해석 모델을 나타낸 것이다.

② 전열해석 경계조건, 해석조건 및 물성치

전열해석에 적용된 실내외 경계조건은 Table 3, 해석조건은 Table 4, 재료 물성치는 Table 5와 같다. 실내외 설정온도는 건축물의 에너지절약설계기준[5], [별표6], [별표7]을 근거로 공동주택의 난방 설정온도 20℃, 서울의 난방 설계 외기온도 -11.3℃로 하였고, 실내외 표면 열전달율은 건축물의 에너지절약설계기준, [별표4]의 값을 적용하였다.

전열해석 모델 내 중공층은 Physibel 프로그램 내의 EQUIMAT 조건으로 설정, 유효 열전도율로 모델링하였다. 진공단열재 열전도율은, IEA/ECBCS Annex 39[2]에 명시된 흡드실리카 심재와 알루미늄 증착 필름 진공단열재의 유효 열전도율(Effective Thermal Conductivity, λ_{eff}) 계산법(식 (1) 참조)으로 유효 열전도율을 산출하여 적용하였다. 유효 열전도율 계산시, 진공단열재 크기는 O사의 E제품을 참고, 1,200×600mm로 하였고, 300nm 두께의 Metallized Barrier로 감싼 B Type 진공단열재의 선형 열관류율($\psi_{VIP} = (9.19 \pm 1.63) \times 10^{-3} \text{W/mK}$)을 적용하였다. 이상의 과정을 거쳐 산출한 두께별 진공단열재 유효 열전도율은 Table 6과 같다.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{cop} + \psi_{VIP} \cdot d \cdot p/A \quad (1)$$

- 여기에서, λ_{eff} : 유효 열전도율(W/mK)
- λ_{cop} : 중앙부 열전도율(W/mK)
- ψ_{VIP} : 선형 열관류율(W/mK)
- d : 진공단열재 두께(m)
- p : 면적 A의 둘레(m)
- A : 진공단열재 면적(m²)

Table 3. Boundary condition

	Temperature(°C)	Surface heat transfer coefficient(W/m ² K)
Inside	20.0	9.09
Outside	-11.3	23.25

Table 4. Simulation condition

Item	Value
Maximum number of iteration cycles	5
Maximum number of iterations within each iteration cycle	10,000
Maximum temperature difference within each iteration cycle	0.0001℃
Maximum temperature difference between iteration cycles	0.001℃
Max. heat flow divergence for total object	0.001%
Max. heat flow divergence for any node	1%

Table 5. Material property

Material	Thermal conductivity (W/mK)	Remark
Concrete	1.600	2011 Manual of design criteria for building energy conservation
Light weight concrete	0.130	
Cement mortar	1.400	
Gypsun board	0.180	
Type 2 expanded polystyrene, molded beads	0.034	
Expanded polystyrene extruded	0.029	
Glass wool	0.034	
Wood	0.170	
Steel	45.3	2005 ASHRAE Handbook Fundamentals
VIP	λ_{cop} 0.0045	Test result, OCI
	λ_{eff} Var.	IEA/ECBCS Annex 39
Adhesive	0.353	Test result, Korea
Reinforced plaster	0.181	Testing & Research Institute
Finish plaster	0.196	
Silicon	0.146	FACET, CWCT
Bobbin(PVC)	0.170	

Table 6. Effective thermal conductivity of VIP by thickness

Thickness(mm)	λ_{eff} (W/mK)	Thickness(mm)	λ_{eff} (W/mK)
15	5.189×10-3	30	5.878×10-3
20	5.419×10-3	35	6.108×10-3
25	5.648×10-3	-	-

2) 시공비용 및 시공성능

시공비용의 경우, 에너지성능 평가를 위한 전열해석 모델을 기준으로 하여, 10×10m 벽체 시공시에 대한 재료비와 노무비 합계를 구해, 외벽 단위면적당 시공비용을 산출하였다. 시공비용 산출 조건을 요약 정리하면 다음과 같다.

- 재료비의 경우, 최종 소비자가격 기준으로 진공단열재는 O사 사내기준, 일반자재는 물가정보(2012.8), 특수자재는 전문업체 유통가격에 근거하여 산출
- 노무비의 경우, 표준품셈, 전문업체 일위대가 등에 근거하여 직종별 노임단가로 산출
- VAT 별도, 공과잡비 및 안전관리비 별도, 가설공사 별도(쌍줄비계 및 안전발판), 현장용전·용수 및 자재 적재용지 지급 조건 적용

시공성능의 경우, 각 대안들에서 진공단열재 노출 여부, 공정수와 시공 난이도가 달라지게 되므로, 단열재 유닛 생산성 및 취급성, 시공 공정수, 시공 난이도로 구분하여 각각에 대한 시공성능을 평가하였다.

4. 습식 진공 외단열시스템 성능평가 결과

4.1. 에너지성능

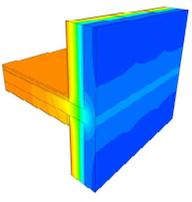
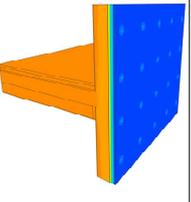
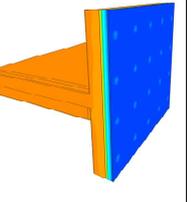
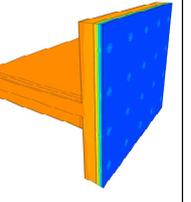
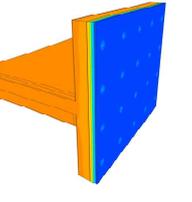
60% 및 100% 절감형에 대한 기존안 및 대안들의 에너지성능 평가 결과는 Table 7, Table 8과 같다. 대안 온도

Table 7. Performance evaluation result of 60% reduction type

		Existing case	P-B-1-①	P-B-1-②	P-B-2	P-B-3	
Temperature distribution 25°C -15°C							
Energy performance	Composition of insulation unit	Type 2 EPS(230mm)	VIP(25mm) Type 2 EPS(40mm)	VIP(20mm) Type 2 EPS(70mm)	Type 2 EPS(30mm) VIP(20mm) Type 2 EPS(40mm)	Type 2 EPS(30mm) VIP(20mm) Type 2 EPS(40mm)	
	Heat loss(W/m)	80.3	36.7	35.7	36.7	34.0	
	Variation rate(%)	0.0	-54.3	-55.5	-54.3	-57.7	
	Performance	-	★★	★★★	★	★★★★	
Construction cost	Material cost (Won/m ²)	Insulation	25,600	91,155	80,655	88,834	85,534
		Finish	9,976	21,470	21,470	21,470	21,470
		Sum	35,576	112,625	102,125	110,304	107,004
	Labour cost (Won/m ²)	Insulation	4,877	13,615	14,371	8,645	12,102
		Finish	8,953	10,673	10,673	10,673	10,673
		Sum	13,830	24,288	25,044	19,318	22,775
	Total cost(Won/m ²)	49,406	136,913	127,169	129,622	129,779	
	Variation rate(%)	0.0	+177	+157	+162	+163	
Performance	-	★	★★★★	★★★★	★★		
Construction convenience	Manufacturing and handling of insulation unit	<ul style="list-style-type: none"> •EPS is very thick(thickness 230mm). 	<ul style="list-style-type: none"> •One side of VIP is covered with EPS (VIP+EPS) •Requiring care to make insulation unit with VIP and EPS of same size •Requiring care in handling of insulation unit because one side and edge of VIP are exposed 	<ul style="list-style-type: none"> •One side of VIP is covered with EPS (VIP+EPS) •Requiring care to make insulation unit with VIP and EPS of same size •EPS is relatively thick •Requiring care in handling of insulation unit because one side and edge of VIP are exposed 	<ul style="list-style-type: none"> •Manufacturing cost of EPS mold is high •No risk of VIP damage 	<ul style="list-style-type: none"> •Two sides of VIP are covered with EPS (EPS+VIP+EPS) •Requiring care to make insulation unit with VIP and EPS of same size •Requiring care in handling of insulation unit because edge of VIP is exposed 	
		-	★★	★	★★★★	★★★	
	Construction process	<ol style="list-style-type: none"> 1. Insulation fixing 2. Gypsun board installation 3. Finish 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concrete surface cleaning 2. Insulation fixing 3. Anchoring 4. Finish 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concrete surface cleaning 2. Insulation fixing 3. Anchoring 4. Finish 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Insulation fixing 2. Anchoring 3. Finish 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Insulation fixing 2. Anchoring 3. Finish 	
		-	★	★	★★★★	★★★	
Difficulty of construction	<ul style="list-style-type: none"> •Commonly-applied construction method •Easy to construct 	<ul style="list-style-type: none"> •Requiring cleaning of concrete surface contact with VIP •Requiring care in installation of insulation unit because one side and edge of VIP are exposed •Silicon sealant and hot melt are used when fixing insulation unit to concrete surface •Difficult to adjust level 	<ul style="list-style-type: none"> •Requiring cleaning of concrete surface contact with VIP •Requiring care in installation of insulation unit because one side and edge of VIP are exposed •Silicon sealant and hot melt are used when fixing insulation unit to concrete surface •Difficult to adjust level 	<ul style="list-style-type: none"> •Identical with construction method of existing EIFS 	<ul style="list-style-type: none"> •Identical with construction method of existing EIFS •Requiring care in installation of insulation unit because edge of VIP is exposed 		
	-	★	★	★★★★	★★		
Performance	-	★★	★	★★★★	★★★		

※ ★ Poor, ★★ Common, ★★★ Good, ★★★★ Very good

Table 8. Performance evaluation result of 100% reduction type

		Existing case	P-B-1-①	P-B-1-②	P-B-2	P-B-3	
Temperature distribution 25℃  -15℃							
Energy performance	Composition of insulation unit	Type 2 EPS(300mm)	VIP(35mm) Type 2 EPS(40mm)	VIP(30mm) Type 2 EPS(75mm)	Type 2 EPS(35mm) VIP(30mm) Type 2 EPS(40mm)	Type 2 EPS(35mm) VIP(30mm) Type 2 EPS(40mm)	
	Heat loss(W/m)	68.5	30.8	29.2	31.1	29.0	
	Variation rate(%)	0.0	-55.0	-57.4	-54.6	-57.7	
	Performance	-	★★	★★★	★	★★★★	
Construction cost	Material cost (Won/m ²)	Insulation	33,300	118,455	108,480	116,659	113,359
		Finish	9,976	21,470	21,470	21,470	21,470
		Sum	43,276	139,925	129,950	138,129	134,829
	Labour cost (Won/m ²)	Insulation	4,877	13,615	14,371	8,645	12,102
		Finish	8,953	10,673	10,673	10,673	10,673
		Sum	13,830	24,288	25,044	19,318	22,775
	Total cost(Won/m ²)	57,106	164,213	154,994	157,447	157,604	
	Variation rate(%)	0.0	+188	+171	+176	+176	
Performance	-	★	★★★★	★★★	★★		
Construction convenience	Manufacturing and handling of insulation unit	<ul style="list-style-type: none"> •EPS is very thick(thickness 300mm) 	<ul style="list-style-type: none"> •One side of VIP is covered with EPS (VIP+EPS) •Requiring care to make insulation unit with VIP and EPS of same size •Requiring care in handling of insulation unit because one side and edge of VIP are exposed 	<ul style="list-style-type: none"> •One side of VIP is covered with EPS (VIP+EPS) •Requiring care to make insulation unit with VIP and EPS of same size •EPS is relatively thick •Requiring care in handling of insulation unit because one side and edge of VIP are exposed 	<ul style="list-style-type: none"> •Manufacturing cost of EPS mold is high •No risk of VIP damage 	<ul style="list-style-type: none"> •Two sides of VIP are covered with EPS (EPS+VIP+EPS) •Requiring care to make insulation unit with VIP and EPS of same size •Requiring care in handling of insulation unit because edge of VIP is exposed 	
		-	★★	★	★★★★	★★★	
	Construction process	<ol style="list-style-type: none"> 1. Insulation fixing 2. Gypsun board installation 3. Finish 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concrete surface cleaning 2. Insulation fixing 3. Anchoring 4. Finish 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concrete surface cleaning 2. Insulation fixing 3. Anchoring 4. Finish 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Insulation fixing 2. Anchoring 3. Finish 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Insulation fixing 2. Anchoring 3. Finish 	
		-	★	★	★★★★	★★★	
Difficulty of construction	<ul style="list-style-type: none"> •Commonly-applied construction method •Easy to construct 	<ul style="list-style-type: none"> •Requiring cleaning of concrete surface contact with VIP •Requiring care in installation of insulation unit because one side and edge of VIP are exposed •Silicon sealant and hot melt are used when fixing insulation unit to concrete surface •Difficult to adjust level 	<ul style="list-style-type: none"> •Requiring cleaning of concrete surface contact with VIP •Requiring care in installation of insulation unit because one side and edge of VIP are exposed •Silicon sealant and hot melt are used when fixing insulation unit to concrete surface •Difficult to adjust level 	<ul style="list-style-type: none"> •Identical with construction method of existing EIFS 	<ul style="list-style-type: none"> •Identical with construction method of existing EIFS •Requiring care in installation of insulation unit because edge of VIP is exposed 		
	-	★	★	★★★★	★★		
Performance	-	★★	★	★★★★	★★★		

※ ★ Poor, ★★ Common, ★★★ Good, ★★★★ Very good

분포 외표면에서 원형으로 나타나는 부위들은 단열재 유닛 고정용을 위한 Bobbin 앵커(Fig. 2, Fig. 3 b) 참조) 설치 부위들이다. 대안별 성능(Performance)에 기재된 별은 개수에 따라 미흡, 보통, 우수, 매우 우수의 의미를 의도하였으며, 대안간 순위가 반영된 결과라고 할 수 있다. 단, 시공성능과 같은 정성적 항목에서 대안간 순위를 1~4등으로 명확히 구분하기 곤란한 경우는, 개수별 의미에 부합하게 별 개수를 부여하는 것으로 하였다.

기존안과 대안들의 외벽 열관류율이 유사함에도 불구하고, 대안들은 기존안에 비해 손실열량이, 60% 절감형의 경우 54.3~57.7%, 100% 절감형의 경우 54.6~57.7% 감소되는 것으로 나타났다. 이는 주로 외벽-바닥 접합부 열교가 제거되어 나타난 결과이다. 이를 통해 60%, 100% 절감형과 같이 외벽 단열성능이 매우 높을 경우, 기존안의 외벽-바닥 접합부 열교를 통한 손실열량 비중이 매우 클 수 있고, 따라서 외단열 적용이 필수적임을 확인할 수 있다.

60% 및 100% 절감형 모두에서 손실열량은 P-B-3 < P-B-1-② < P-B-1-① < P-B-2로, P-B-3의 에너지성능이 가장 우수하게 나타났다. 진공-일반단열재의 2레이어 단열재 유닛을 적용하고, 각각의 두께만 달린 P-B-1-①과 P-B-1-②의 경우, 진공단열재 두께를 줄이고 일반단열재 두께를 크게 한 P-B-1-②가 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서 진공단열재와 일반단열재의 단열재 유닛 적용시에는 전체 단열두께를 두껍게 하여 열류경로가 길어지게 하는 편이 좀 더 유리함을 알 수 있다.

동일 두께의 일반-진공-일반단열재로 구성된 3레이어 단열재 유닛을 적용하고, 일반단열재가 진공단열재를 감싸는 방식만 달린 P-B-2와 P-B-3의 경우, 진공단열재의 내외측만 일반단열재로 감싼 P-B-3(Covered Type)가 더 우수한 것으로 나타났다. 이는 진공단열재 전체를 일반단열재로 감싸는 P-B-2(Encapsulated Type)의 경우 Table 1에서와 같이 단열재 유닛간 조인트에서 진공단열재가 불연속되어 국부적으로 열저항이 낮아져 나타난 결과이다. 진공단열재와 일반단열재로 구성된 단열재 유닛 두께가 서로 같은 P-B-1-②, P-B-2, P-B-3의 경우, P-B-3이 가장 우수하게 나타났다.

4.2. 시공비용 및 시공성능

60% 및 100% 절감형에 대한 기존안 및 대안들의 시공비용 및 시공성능 평가 결과는 Table 7, Table 8과 같다.

대안들은 기존안에 비해 시공비용이, 60% 절감형의 경우 157~177%, 100% 절감형의 경우 171~188% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 주로 진공단열재 가격이 높아 나타난 결과이다.

60% 및 100% 절감형 모두에서 시공비용은 P-B-1-② < P-B-2 < P-B-3 < P-B-1-①로, P-B-1-②의 시공비용이 가장 낮게 나타났다. 시공비용에서 재료비 비중은 노무비에 비해 훨씬 크며, 재료비는 주로 진공단열재 두께, 진공단열재를 감싸기 위한 일반단열재 몰드 필요 여부, 단

열재 레이어 개수, Bobbin 앵커를 설치하기 위한 단열재 유닛 코너 가공 필요 여부, 단열재 유닛 고정 접착제 종류, 노무비는 주로 시공 난이도 등에 의해 영향을 받게 된다. P-B-1-②의 경우 진공단열재 두께가 얇고, P-B-2에서와 같은 일반단열재 몰드 필요 없으며, 2레이어로 단열재 유닛이 구성되어 제작비용이 저렴해지고, 단열재 유닛 고정 접착제(실리콘 실런트, 핫멜트)가 저렴한 등의 장점으로 시공비용이 가장 낮게 나타났다.

시공성능의 경우, 단열재 유닛 생산성 및 취급성은 일반 단열재 몰드 제작비용이 비싸다는 단점은 있으나 일반단열재 몰드로 진공단열재 전체를 감싸는 P-B-2가 가장 우수하다고 할 수 있다. 시공 공정수는 콘크리트 벽체에 일반 단열재가 부착되어 특별한 바탕처리가 필요없는 P-B-2 및 P-B-3가 가장 우수하다고 할 수 있다. 시공 난이도는 외관상 단열재 유닛이 일반단열재와 동일하여 기존 외단열시스템과 동일한 방식으로 시공 가능한 P-B-2가 가장 우수하다고 할 수 있다. 이상 각 성능항목별 평가결과에 의한 종합 시공성능은 P-B-2가 가장 우수한 것으로 나타났다.

4.3. 성능항목 가중치 조합별 우수 대안

에너지성능, 시공비용, 시공성능의 각 성능항목별로 순위에 따른 점수(1위 4점, 2위 3점, 3위 2점, 4위 1점)를 각 대안에 부여하여 대안별 종합성능을 계수화 하였다.

에너지성능, 시공비용, 시공성능의 각 성능항목별 가중치를 33.3%로 모두 동일하게 한 경우(Total A), 50%, 30%, 20%로 에너지성능에 높은 가중치를 부여한 경우(Total B), 30%, 50%, 20%로 시공비용에 높은 가중치를 부여한 경우(Total C)로 구분, Table 9와 같이 각 대안별 총점을 산출한 결과, Total A, B의 경우 P-B-3이 가장 높고, Total C의 경우 P-B-1-②가 가장 높게 나타났다. 따라서 습식의 경우 동일 가중치를 부여하거나 에너지성능을 중

Table 9. Scores by combinations of weighting factors

	60% reduction type				100% reduction type			
	P-B-1-①	P-B-1-②	P-B-2	P-B-3	P-B-1-①	P-B-1-②	P-B-2	P-B-3
EP (Energy performance)	2	3	1	4	2	3	1	4
CCS (Construction cost)	1	4	3	2	1	4	3	2
CCV (Construction convenience)	2	1	4	3	2	1	4	3
Total A	1.7	2.7	2.7	3.0	1.7	2.7	2.7	3.0
Total B	1.7	2.9	2.2	3.2	1.7	2.9	2.2	3.2
Total C	1.5	3.1	2.6	2.8	1.5	3.1	2.6	2.8

※ Weighting factors by evaluated performances
 Total A: EP 33.3%, CCS 33.3%, CCV 33.3%
 Total B: EP 50.0%, CCS 30.0%, CCV 20.0%
 Total C: EP 30.0%, CCS 50.0%, CCV 20.0%

시할 경우는 P-B-3, 시공비용을 중시할 경우에는 P-B-1-②가 효과적인 진공 외단열시스템이라고 할 수 있다.

5. 결론

국내 대표적 주거용 건물인 고층 공동주택에서 2017년 60% 감축(패시브 하우스 수준), 2025년 제로에너지 의무화라고 하는 국가 정책 목표를 효과적으로 달성하기 위해서는, 일반단열재 적용시 300~400mm에 달하는 외벽두께를 줄이고 열교를 제거할 수 있는, 고성능 외단열시스템 적용이 필수적일 것으로 판단된다. 이에, 진공단열재 적용으로 단열두께를 현저히 감소시키고, 기존 공동주택의 설계 시공조건 수용이 가능하며, 열교제거가 가능할 것으로 기대되는 습식 진공 외단열시스템 대안들을 설정하고, 기존안과 대안들에 대한 에너지성능, 시공비용 및 시공성능 평가 후, 각 성능항목들에 대한 가중치 조합별로 가장 우수한 대안을 결정함으로써, 향후 고성능 외단열시스템이 효과적으로 활용될 수 있게 하고자 한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 기존안과 대안들의 외벽 열관류율이 유사함에도 불구하고, 대안들은 기존안에 비해 손실열량이, 60% 절감형의 경우 54.3~57.7%, 100% 절감형의 경우 54.6~57.7% 감소되는 것으로 나타났다. 이는 주로 외벽-바닥 접합부 열교가 제거되어 나타난 결과이다. 이를 통해 60%, 100% 절감형과 같이 외벽 단열성능이 매우 높을 경우, 기존안의 외벽-바닥 접합부 열교를 통한 손실열량 비중이 매우 큼을 알 수 있었고, 따라서 외단열 적용이 필수적임을 확인할 수 있었다. 60% 및 100% 절감형 모두에서 손실열량은 P-B-3 < P-B-1-② < P-B-1-① < P-B-2로, P-B-3(60% 절감형 비드벙2중 보온판 30mm + 진공단열재 20mm + 비드벙2중 보온판 40mm, 100% 절감형 비드벙2중 보온판 35mm + 진공단열재 30mm + 비드벙2중 보온판 40mm, Covered Type 3레이어)의 에너지성능이 가장 우수하게 나타났다.

(2) 대안들은 기존안에 비해 시공비용이, 60% 절감형의 경우 157~177%, 100% 절감형의 경우 171~188% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 주로 진공단열재 가격이 높아 나타난 결과이다. 60% 및 100% 절감형 모두에서 시공비용은 P-B-1-② < P-B-2 < P-B-3 < P-B-1-①로, P-B-1-②(60% 절감형 진공단열재 20mm + 비드벙2중 보온판 70mm, 100% 절감형 진공단열재 30mm + 비드벙2중 보온판 75mm, 2레이어)의 시공비용이 가장 낮게 나타났다. 한편, 단열재 생산성 및 취급성, 시공 공정수, 시공 난이도 등의 시공성능 측면에서는 P-B-2(60% 절감형 비드벙2중 보온판 30mm + 진공단열재 20mm + 비드벙2중 보온판 40mm, 100% 절감형 비드벙2중 보온판 35mm + 진공단열재 30mm + 비드벙2중 보온판 40mm, Encapsulated Type 3레이어)가 가장 우수하게 나타났다.

(3) 에너지성능, 시공비용, 시공성능의 각 성능항목별 가중치를 달리하여 각 대안들을 종합 평가한 결과, 성능항목별 가중치를 동일하게 한 경우와 에너지성능에 높은 가중치 부여한 경우는 P-B-3, 시공비용에 높은 가중치를 부여한 경우는 P-B-1-②가 우수한 것으로 나타났다.

에너지성능, 시공비용, 시공성능의 각 성능항목별 가중치를 달리하여 각 대안들을 종합 평가한 결과는, 각 성능항목별 순위에 따라 단순히 1점 간격으로 부여한 점수에 근거한 것으로, 순위별 적정 점수 간격까지 고려된 것은 아님을 밝힌다. 그리고 진공 외단열시스템의 경우 에너지성능 측면에서는 매우 우수하나, 아직까지는 진공단열재 가격이 고가인 관계로 시공비용 상승폭이 큼을 확인할 수 있었으며, 따라서 향후 진공단열재 가격을 낮출 수 있는 기술개발 및 시장형성 등이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgements

This work was supported by the POSCO E&C (No. Architecture-141). This work was supported by the Ewha Global Top 5 Grant 2013 of Ewha Womans University.

References

- [1] Activation plan for green city and building, The 6th conference of green growth committee, Ministry of Construction and Transport, 2009.
- [2] Armin Binz et al, Vacuum insulation in the building sector: Systems and applications, IEA/ECBCS Annex 39 High performance thermal insulation systems(HIPTI), 2005.
- [3] Pär Johansson, Retrofitting of old exterior wall with vacuum insulation panels, Chalmers Univeristy of Technology, 2012.
- [4] Markus Erb and Will Symons edited, Vacuum insulation panel properties and building applications, ECBCS Annex 39 Project summary report, 2010.
- [5] Design criteria for building energy conservation, Ministry of Construction and Transport, Announcement 2012-69, 2012.
- [6] Manual of design criteria for building energy conservation, Korea Energy Management Corporation, 2011.
- [7] S. Y. Song, B. K. Koo, B. H. Chio, Insulation performances of the typical floor's front wall-slab and side wall-slab joints of apartment buildings with internal and external insulation systems, Journal of Architectural Institute of Korea, 24(8), 2008, pp.277-284.

Received October 7, 2013;

Final revision received December 10, 2013;

Accepted December 16, 2013