

노후화된 대학 건물의 단열성능 향상 실험 및 경제성 평가

이정민, 소원호, 조경찬, 최동녘, 이권영*
한동대학교 기계제어공학과

An Experimental Study on the Improvement of Insulation Performance in Old University Buildings and Economic Evaluation

Jeongmin Lee, Wonho So, Kyungchan Cho, Dongnyeok Choi, Kwon-yeong Lee*
Department of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

요약 본 연구는 노후화된 대학 건물의 내부 단열 성능 향상에 대한 것으로, 대학교 건물 내 재실자의 생산성을 높이고 노후화된 건물의 단열효과를 높이기 위해 진행됐다. 본 논문은 한동대학교 느헤미야홀 건물 내 오피스 재실자의 단열 성능 향상에 대한 지속적인 요청에 응답하여 문제해결을 위해 진행된 연구라는 차별성을 가지고 있으며, 내부온도가 인접건물의 내부온도와 비교했을 때 낮음을 확인하여 연구 필요성에 대한 타당성을 검증하였다. 학교라는 건물의 특성을 고려해 내외부 단열 중 내부 단열을 주제로 단열재를 선택했다. 대학교 교수 오피스를 소형화시킨 모형 방을 만들어 시장에서 사용되는 내부 벽면 단열재를 설치해 실험을 진행했다. 실험 결과를 바탕으로 가열 시간과 실제 열전달 계수를 측정하여 단열효과를 분석하는 경제성 평가를 실시했다. 경제성 평가는 실험과 이론에 의해, 겨울철과 여름철 기준으로 각각 실시되었다. 연구결과, 느헤미야홀 60 개의 오피스에 아이소핑크(30 T)를 내 단열재로 도입하였을 때, 한 달에 겨울철에는 최대 총 1,071,600 원을 절약 할 수 있으며, 여름철에는 총 109,200 원을 절약할 수 있다.

Abstract This study examined ways of improving the internal insulation performance of aging university buildings, and to enhance the convenience of occupants in university buildings and the insulation effect of aging buildings. This research was conducted to solve the problem of continuous requests for improving the insulation performance of office workers in the Nehemiah Hall building of Handong University. The results showed that the internal temperature of Nehemiah Hall was low compared to the internal temperature of the adjacent building. Considering the characteristics of the building, the university chose insulating materials under the theme of internal insulation. The experiment was conducted by installing internal wall insulation used in the market by producing a model room that miniaturized the university professor's office. Based on the experimental results, an economic evaluation was conducted to analyze the insulation effect by measuring the heating time and actual heat transmission coefficient. An economic evaluation was conducted by experiment and theory and on a winter and summer basis. According to the research, when an Isopink (30 T) was introduced as an internal insulation material in 60 offices of Nehemiah Hall, it could save up to 1,071,600 won in total during the winter season and 109,200 won during the summer season.

Keywords : Economic efficiency, Energy saving, Internal insulation, Heat transmission coefficient, Heat transfer

*Corresponding Author : Kwon-yeong Lee(Handong Global Univ.)

email: kylee@handong.edu

Received May 15, 2020

Accepted August 7, 2020

Revised July 13, 2020

Published August 31, 2020

1. 서론

전 세계적으로 건물의 단열과 에너지 절약 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 에너지 수입과 사용은 나라의 경제에 큰 영향을 미치고 있으며, 건물 단열성능 향상과 에너지 절약 기준 제고를 위한 노력이 이루어지고 있다. 국내에서는 2018년 9월 1일 시행된 "건축에너지절약설계기준"으로 건축물의 단열기준을 독일의 에너지 절약형 주택 모델인 패시브하우스 수준으로 높이고, 지역을 보다 더 세부적으로 구분하여 지역 요건에 맞게 설계할 수 있도록 하였다[1]. 이것은 건물 단열재를 통한 에너지 절약을 위한 국가적 노력이 이루어지고 있음을 보여준다. 또한, 2020년까지 온실가스를 30% 감축하기 위해 2009년 11월 '온실가스 에너지 목표 관리 시스템'을 시행했다[2]. 이러한 측면에서, 에너지 손실을 줄이기 위해 난방방기기를 제한하여 재실자의 편의성을 저해하기보다, 노후화된 단열재를 재조정하여 편의성과 에너지 손실을 동시에 해결하는 방안이 추진되고 있다[3]. 이러한 배경에서 노후화된 대학 건물 거주자들의 난방 및 단열 문제 해결 요청도 증가하고 있어 최적 단열 연구가 필요하게 되었다.

포항시 한동대학교 느헤미야홀의 단열 문제는 지속해서 제기됐다. 느헤미야홀은 Fig. 1.과 같고, 한동대학교(1994년) 개교 당시 건설되었으며, 현재의 건물 에너지 절약 설계 기준이 적용되던 2013년보다 20년 이상 오래된 단열 설계 구조로 건설되었다. 건물 내 재실자가 난방을 위해 여러 개의 난방기를 사용했음에도, 단열이 되지 않았을 때는 그 효과는 저조하고 에너지 소비율이 매우 높았다[4]. 또한, Fig. 2.에서 알 수 있듯이 느헤미야홀은 복도가 건물에 차지하는 비중이 높아서 느헤미야홀 내부 온도는 복도 온도의 영향을 많이 받는다. 하지만, 복도에 햇빛이 들어오지 않아서 인접한 뉴턴홀과 비교해 보았을 때, 3℃가량 온도가 낮았고, 낮은 복도 온도의 영향을 받아 교수 오피스 역시 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 이유를 바탕으로 느헤미야 홀 단열재의 필요성에 의해 연구를 제안한다. 기존 연구[5]에서는 공공 건축물 외벽의 단열 성능을 분석하고 단열 리모델링 시기를 제공하는 연구가 주로 진행되었다. 외벽의 재질을 분석하고 재구성하는 방향으로 연구를 진행하려 했지만, 대학교 특성상 수업이 계속 진행되어야 했기 때문에 외벽의 재건설과 같은 큰 공사가 수반되는 방법으로는 문제해결에 어려움이 있다고 판단되었다. 또한 천장(지붕)과 바닥의 공사는 내벽 단열 공사보다 비교적 복잡하다. 따라서, 외벽, 천장, 그리고 바닥의 단열 공사보다는 내벽 단열 시공

을 통해 벽체 단열의 효율성을 높이는 연구가 가장 타당하다고 판단하였다. 이에 본 연구는 실제 사용되는 단열재로 내벽 단열 공사를 할 때, 단열 성능과 경제성을 판단하는데에 도움이 되는 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.



Fig. 1. Exterior of Nehemiah Hall



Fig. 2. the inner corridor of the Nehemiah Hall.

2. 단열 평가 기준

2.1 건축 단열기준

한동대학교 개교 당시 건립된 느헤미야홀은 현재의 '건축에너지 절약설계기준'에 비해 20년 정도 이전의 설계구조로 구성되어 있다. 따라서, 느헤미야 홀의 최적 단열 설계는 현재의 에너지 절약 설계 기준에 따라 연구되

어야 한다. 이에 앞서, 느헤미야 홀의 기존 단열 시공 계획도와 단열 성능이 파악되어야 한다. 그러나 20여 년 전 준공된 건물이라 단열 성능 기준표와 단열계획이 기록되어 있지 않았다. 따라서 2019년 건설된 한동대학교의 Ban Ki-moon Global Education Institute in Support of UNAI(GEI) 건물 단열 성능기준표와 단열 계획표를 참조하여 현재의 연구·실험 기준 조건을 선정했다[6].

Table 1. Thermal Flow Rate Table for Building Exterior Walls by Region[1]

		(W/m ² ·K)	Central 1 st area	Central 2 nd area	Southern region	Jeju island
The outer wall of the living room	Direct exposure to the open air	an apartment house	Less than 0.150	Less than 0.170	Less than 0.220	Less than 0.290
		Not an apartment house	Less than 0.170	Less than 0.240	Less than 0.320	Less than 0.410
	Indirect exposure to the open air	an apartment house	Less than 0.210	Less than 0.240	Less than 0.310	Less than 0.410
		Not an apartment house	Less than 0.240	Less than 0.340	Less than 0.450	Less than 0.560

Table 2. Thickness of Insulation Material in Southern Korea[1]

Insulation grade			Allowable thickness by insulation grade (mm)			
			1	2	3	4
The outer wall of the living room	Direct exposure to the open air	an apartment house	145	170	200	220
		Not an apartment house	100	115	130	145
	Indirect exposure to the open air	an apartment house	100	115	135	150
		Not an apartment house	65	75	90	95

Table 1. 에는 지역별 건물의 열전달 계수가 표시되어 있다. 허용 열전달 계수는 지역마다 다르며, 포항은 남부 지역에 속한다. 현재의 단열 표준은 외부 공기에 직접 노출되는 것과 외부 공기에 간접 노출되는 것으로 구분되며, 단열재의 허용 두께와 열전달 계수의 값은 서로 다르다. Table 2. 와 같이 단열재의 허용 두께는 법적으로 정의된 표준에 기초하여야 하지만, 이 실험에서는 단열의

효과를 알아보는 것이 목표이기 때문에 시중에서 구할 수 있는 단열재를 이용하여 실험한 뒤 경제성 평가를 진행하였다.

다음은 건물 단열기준에 사용되는 열전도율 및 열전달 계수에 대한 계산 방법이다. Eq. (1)에서 \dot{Q} 는 재료에 가해지는 열의 총량을 의미하며, L은 재료의 두께를 의미하며, A는 재료의 단면적을 의미한다. 마지막으로, ΔT 는 온도의 변화를 의미한다.

$$k = \dot{Q} \cdot L / (A \cdot \Delta T) \quad (1)$$

Eq. (2)는 열전도율(U)을 계산하는 데 사용된다. 열전도도 k는 열전달을 나타내는 물질의 고유한 성질이며, 일정 기간 동안 고온에서 저온으로 물질 안에서 이동하는 에너지의 양을 말한다. 열전도율은 재료의 온도에 따라 달라지기 때문에 동일한 물질이라도 온도에 따라 열전도도가 다르다.

$$U = k / L \quad (2)$$

Eq. (3)은 열 저항(R)을 계산하는 데 사용된다. 열 저항은 열전달 계수의 역 값이며, 복합재료의 총 열전달 계수를 계산할 때 열 저항 총합(Eq. (4))의 역 값으로 계산한다[7].

$$R = 1 / U \quad (3)$$

$$U_{total} = 1 / \sum_1^n R_n \quad (4)$$

Eq. (5)는 벽(\dot{Q})을 통한 열 손실률을 계산하는 데 사용된다. 열 손실률은 열전달 계수, 벽면 면적, 그리고 내외부의 온도 차를 곱하여 나타낼 수 있다. 사용된 열전달 계수는 총합 열전달 계수다(U_{total}).

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$$

Table 3. 은 실제 건물 단열재 기준으로 열전달 계수를 계산한 예시이다[6]. 먼저 벽을 구성하는 재료의 두께와 열전도도를 확인하고, 각 재료의 열전달 계수를 계산하여 열전달 계수의 역 값을 도출하여 열 저항을 도출한다. 각 재료의 총 열 저항 수치와 실내-외 측 열전달 저항 수치를 더한 값의 역 값은 벽의 총합 열전달 계수이다.

Table 3. Example of the calculation of total heat perfusion rate

Material	Thickness (m)	k (W/m·K)	R_{cond} ($m^2 \cdot k/W$)	Note
External R_{cond}	-	-	0.043	
Decked brick	0.100	0.990	0.101	Fireproof brick (Red brick)
Hard Uretan Board type 1 no.3	0.070	0.020	3.500	Attach test report
Concrete	0.200	1.600	0.125	
Internal R_{cond}	-	-	0.110	
Total	-	-	3.879	
Application $U(W/m^2 \cdot K)$	0.258			
Standard $U(W/m^2 \cdot K)$	Less than 0.320			

3. 실험

3.1 실험 장치 설계

본 실험은 앞서 언급했듯이 느헤미야 홀 교수 오피스의 단열성능저하 및 재실자의 편의성을 개선시키기 위해 교수 오피스를 실험 대상으로 선정하였다. 실험은 작은 크기의 모형 방으로 구현하여 진행하였다. 제조상의 한계로 느헤미야 홀의 외벽 부분은 벽돌과 콘크리트가 아닌 10 T 폼 보드 재료로 교체되었다. 폼 보드의 열전도율은 약 0.020 W/m·K로 낮은 열전도율을 가지고 있기 때문에 단열재로 많이 사용되며, 소형 챔버 제작과정에서의 열손실을 충분히 방지할 수 있다고 판단되어 실제 오피스 내벽인 콘크리트의 역할을 충분히 수행할 수 있다고 결론 내었다. 실존 느헤미야 홀의 기본 용적량의 1/311로 축소되어 실제 크기는 60×90×45 cm³로 결정되었다(Fig. 3). 실험 환경과 실제 객실 환경을 일치시키기 위해 유리(20T) 20×40 cm²을 설치하여 창을 만들었다. 실제 크기의 축소를 통해 천장, 바닥, 창문의 비율과 영향을 실제와 동일하게 하여 내벽 단열이 미치는 영향을 파악할 수 있다. 실제 크기의 축소 비율과 비례한 히터가 존재하지 않아 가열시간이 실제와 차이가 발생하지만, 내벽 단열효과의 여부를 측정하는데 문제가 없다고 판단되어진다. 내부 단열재로는 스티로폼(40 T)와 아이소핑크(30 T)로 선정하였다. 그 이유는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 단열 재료이며, 이 실험은 내부 단열의 타당성과 에너지 저감 효과를 확인하기 위함이므로 두께 선정에는 의의를 두지 않았기 때문에 당시 시중에서 구할 수 있는 두께로 선정하였다. 우레탄 폼보드는 해당 실험과 같이 소형 챔버에 적용하기에는 같은 단열재 수급에 있어 비용과 공급에 한계가 존재하여 본 실험 대상에서 제외하였다. 스티로폼의 열 전도율은 0.036 W/m·K이고, 아이소핑크의 열 전도율은 0.027 W/m·K이다. 사용되는 히터는 0.75 kW의 리모컨 작동식 히터이다. 또 실내 공기, 바닥, 단열재 표면, 내벽 표면 등에 온도를 측정하는 K형 열전대를 설치하였다. 열전대를 통해 측정된 온도 데이터는 DAS(데이터 수집 시스템)를 통해 저장된다.

크(30 T)로 선정하였다. 그 이유는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 단열 재료이며, 이 실험은 내부 단열의 타당성과 에너지 저감 효과를 확인하기 위함이므로 두께 선정에는 의의를 두지 않았기 때문에 당시 시중에서 구할 수 있는 두께로 선정하였다. 우레탄 폼보드는 해당 실험과 같이 소형 챔버에 적용하기에는 같은 단열재 수급에 있어 비용과 공급에 한계가 존재하여 본 실험 대상에서 제외하였다. 스티로폼의 열 전도율은 0.036 W/m·K이고, 아이소핑크의 열 전도율은 0.027 W/m·K이다. 사용되는 히터는 0.75 kW의 리모컨 작동식 히터이다. 또 실내 공기, 바닥, 단열재 표면, 내벽 표면 등에 온도를 측정하는 K형 열전대를 설치하였다. 열전대를 통해 측정된 온도 데이터는 DAS(데이터 수집 시스템)를 통해 저장된다.

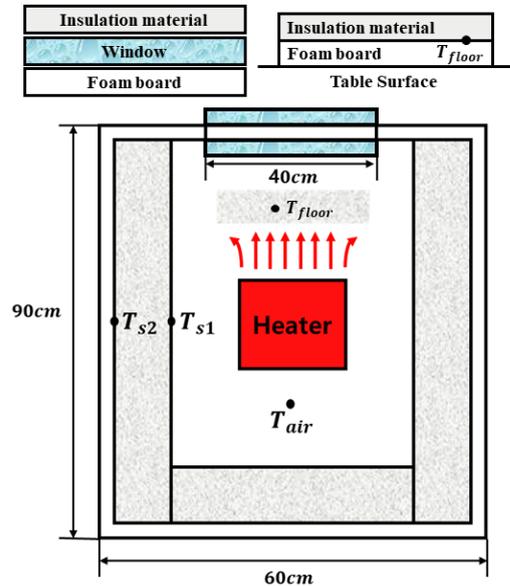


Fig. 3. Small sized model room design for insulation testing

3.2 실험 방법

본 실험에서는 3 개의 챔버를 제조하고 2 개의 챔버를 각각 아이소 핑크(30 T)와 스티로폼(40 T)로 단열하여 3 개의 챔버 사이의 온도 변화를 비교하였다. 기본 챔버는 Fig. 3. 에서 Insulation material이 제거된 챔버이며, 아이소핑크와 스티로폼으로 단열된 챔버는 Insulation material이 아이소핑크와 스티로폼으로 적용된 챔버이다. 느헤미야 홀을 구현하기 위해 3 개의 챔버를 나란히 배치하고 히터를 중간 챔버에 배치하여 Fig. 4. 와 같은

단열 실험을 진행하였으며, 이때의 실험 변수는 Table 4. 에 명시되어 있다.



Fig. 4. Figure of chambers under experiments

Table 4. Experimental variables

Variations	Values
Insulation Materials	Styrofoam(40 T)/Isopink(30 T)
Room temperature	13℃
Heater off temperature	60℃
Heater on temperature	20℃
T_{air}	Air temperature
T_{floor}	Floor temperature
T_{s1}	Insulation material surface temperature
T_{s2}	Inner foamboard temperature
t_{heat}	Heater on time
Period	Time of 1 cycle experiment

선택된 단열재는 아이소 핑크(30 T)와 스티로폼(40 T)이다. 두 재료 모두 저렴한 가격에 상업적으로 이용할 수 있는 단열재이다. 실험실의 실내 온도는 13 ℃이고 실험은 항상 같은 환경에서 진행되었다. 히터 꺼짐 온도는 60 ℃이고 히터 켜짐 온도는 20 ℃로 설정하였다. T_{air} , T_{floor} , T_{s1} , T_{s2} 는 측정값이며, t_{heat} 은 공기 온도가 60 ℃에 이를 때까지 히터를 켜 시간이며, 기간은 공기 온도가 20 ℃에 도달할 때까지의 시간이다. T_{air} , t_{heat} 의 여러 주기를 측정하고, 평균 가열 시간(\bar{t}_{heat})과 평균 주기를 계산한다. 실험 결과를 바탕으로 경제성 평가를 위해 에너지 절약 계수(Eq. (6))을 도입 하였다. 기본 챔버의 c_{saving} 는 1이라고 가정하였다. c_{saving} 은 단열이 된 챔버의 측정된 \bar{t}_{heat} 을 단열이 되지 않은 기본 챔버의 \bar{t}_{heat} 의 값으로 나눈 값으로 정의한다.

$$c_{saving} = \frac{\bar{t}_{heat.measured}}{\bar{t}_{heat.no\ insulation}} \quad (6)$$

4. 실험 결과

4.1 기본 챔버에 대한 단열 실험

기본 챔버 실험에서는 단열이 되어 있지 않은 느헤미야 홀을 가정하였기 때문에 기본 챔버에 단열재가 설치되지 않았다. T_{air} , t_{heat} 와 주기를 측정하면서 총 4 주기의 실험을 수행하였고, 평균 가열 시간(\bar{t}_{heat})과 평균 주

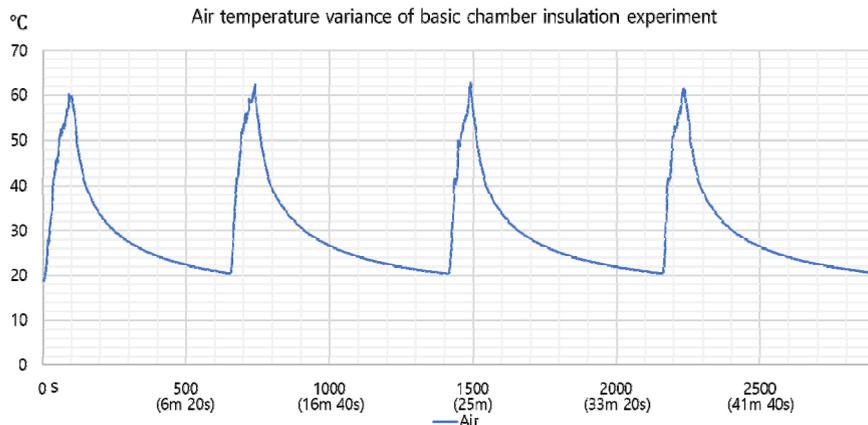


Fig. 5. Variation of T_{air} in the basic chamber

기를 계산할 수 있었다. Fig. 5.의 가로축은 실험 시간을 나타내며, 세로축은 온도를 나타낸다. 또한, 내부 공기 온도의 정점이 각 주기의 t_{heat} 을 나타낸다. Fig. 5.와 Table 5.에 따르면 기본 챔버의 T_{air} 를 60 °C로 가열시키는데 필요한 \bar{t}_{heat} 는 82 초이며 자연적으로 20 °C로 냉각되는 평균 시간은 726 초가 소요되었다.

Table 5. Results of basic chamber insulation experiment

Average of cycle	Values
$\bar{t}_{heat}(s)$	82
Period(s)	726
c_{saving}	1

4.2 스티로폼(40T) 챔버의 단열 실험

이번 실험에서는 40 T 스티로폼을 챔버의 내벽 및 바닥에 부착하고 T_{air} , T_{floor} , T_{s1} , T_{s2} , \bar{t}_{heat} 를 3 주기 동안 측정하였다. 3 주기를 측정한 이유는 외부 온도 조건과 실험 시간을 최대한 동일하게 구현하기 위해 4 주기가 아닌 3 주기의 실험을 진행하였다. Fig. 6. 와 Table 6.를 보면 알 수 있듯이, 스티로폼 챔버를 60 °C로 가열시키는데 필요한 평균 시간은 54 초이며, 자연적으로 20 °C로 냉각되는 평균 시간은 1153 초이다. c_{saving} 은 Eq. (6)에 따라 0.66이다.

Table 6. Results of the Styrofoam(40 T) insulation chamber experiment

Average of cycle	Values
$\bar{t}_{heat}(s)$	54
Period(s)	1153
c_{saving}	0.66

4.3 아이소 핑크(30 T) 챔버의 단열 실험

30 T 아이소 핑크를 챔버의 내벽과 바닥에 부착하고 T_{air} , T_{floor} , T_{s1} , T_{s2} , t_{heat} 를 측정하면서 3주기의 실험을 수행하였다. Fig. 7. 와 Table 7.에서 알 수 있듯이, 아이소 핑크 챔버의 T_{air} 를 60 °C로 가열시키는데 필요한 t_{heat} 은 52 초이며 자연적으로 20 °C로 냉각 되는 평균 시간은 1287 초이다. c_{saving} 은 Eq. (6)에 따라 0.63이다.

Table 7. Results of the Isopink(30 T) insulation chamber experiment

Average of cycle	Values
$\bar{t}_{heat}(s)$	52
Period(s)	1287
c_{saving}	0.63

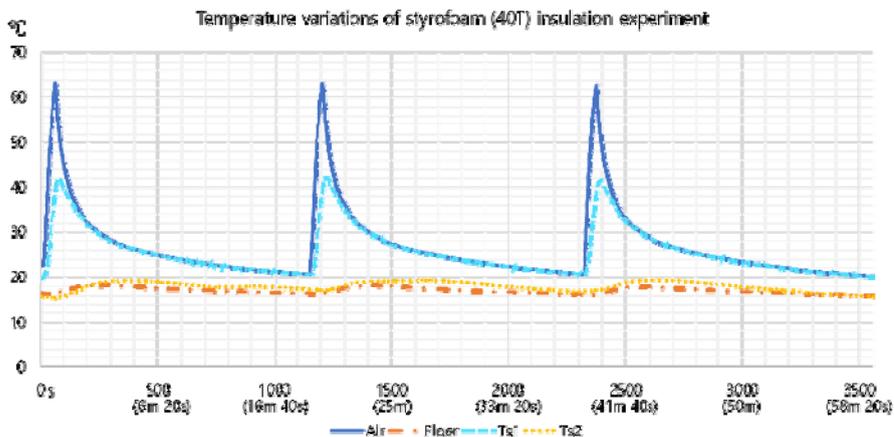


Fig. 6. Variation of T_{air} , T_{floor} , T_{s1} , T_{s2} in the Styrofoam(40 T) insulation chamber

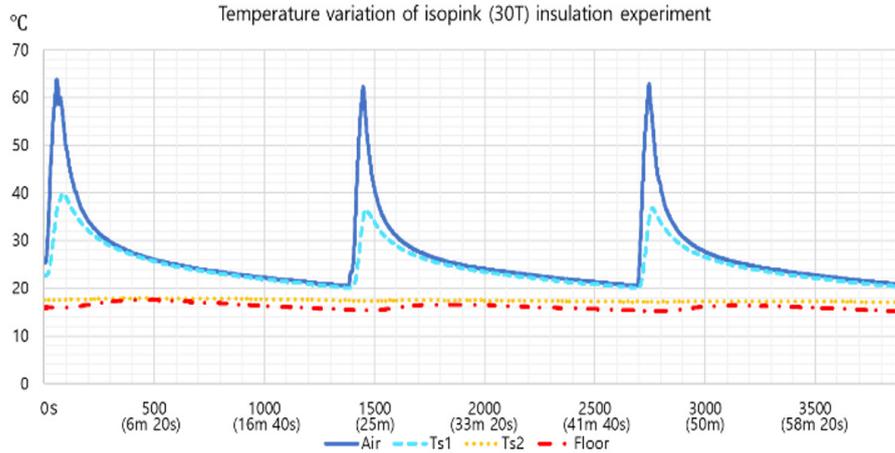


Fig. 7. Variation of T_{air} , T_{floor} , T_{s1} , T_{s2} in the Isopink(30T) insulation chamber

5. 실험 결과 평가 및 경제성 평가

5.1 단열 실험에 대한 평가

단열재를 부착하지 않은 기본 챔버와, 스티로폼(40 T), 아이소 핑크(30 T)로 단열한 챔버로 각 3~4회의 주기를 가지고 실험을 진행하여 단열재가 챔버의 미치는 단열 효과를 확인하였다. \bar{t}_{heat} 는 아이소 핑크(30 T), 스티로폼(40 T), 기본 챔버 순서대로 짧았고, 주기는 아이소 핑크(30 T), 스티로폼(40 T), 기본 챔버 순서대로 시간이 길었다. 결과적으로 아이소 핑크(30 T)가 실험군 중 가장 좋은 단열 효과를 나타낸다는 것을 확인하였다. 본래 아이소 핑크(30 T)와 스티로폼(40 T)의 열전달 계수는 동일하지만, 실험에서는 약간의 차이가 발생했다. 하지만 스티로폼과 아이소핑크 실험의 c_{saving} 값의 차이가 아이소핑크를 기준으로 4.55 %의 작은 오차를 보여주기 때문에, 실험 결과가 유효하다고 평가할 수 있다.

5.2 경제성 평가

아래와 같은 몇 가지 가정을 바탕으로 경제성 평가를 수행하였다.

1. 벽의 균열을 통한 열 손실이 없다고 가정한다.
2. 실내의 초기 온도는 10 °C 이고 목표 온도는 25 °C 이다.
3. 실외 온도는 0 °C로 가정한다.
4. 히터의 효율을 100%라고 가정한다.

5. 옆 방의 실내 온도는 10 °C이며, 외부 공기에 영향을 받지 않는 단열 상태로 가정한다.

6. 실제 열전달 계수를 통한 경제성 평가 시, 내벽을 구성하는 재료를 최소한으로 가정한다.

또한, 경제성 평가를 위해 느헤미야 홀의 실제 부피와 목표 온도까지 공기의 부피를 높이는 데 필요한 열량을 구해야 한다. 필요열량은 앞서 언급된 가정을 바탕으로 Eq. (7)과 같이 오피스 내부 공기의 질량, 공기의 비열, 온도차를 이용하여 구할 수 있다. 대응되는 변수는 다음과 같다. 느헤미야 홀 사무실의 실제 규모의 $V = 4.2 \times 6 \times 3 \text{ m}^3 (75.6 \text{ m}^3)$, $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $c_{p,air} = 1004.832 \text{ J/kg} \cdot \text{°C}$, $\Delta T = 15 \text{ °C}$ 이다. 따라서, 필요한 열량은 1395.862 KJ이다.

$$Q = c_{p,air} \cdot \rho_{air} \cdot V \cdot \Delta T \quad (7)$$

Table 8. Types and areas of walls of Nehemiah Hall's office

Types	Quantity	Areas
External air indirect wall	3	63
External air direct wall	1	6.3
Window	1	6.3
Floor	1	25.2
Ceiling	1	25.2

Table 9. Heat transmission coefficient of no insulation Nehemiah Hall's office

Type	Material	Thickness (m)	k (W/m·K)	R_{cond} (m ² ·k/W)	U (W/m ² ·K)
External air indirect wall	Concrete	0.2	1.6	0.125	4.255
	Internal R_{cond}			0.110	
External air direct wall	Concrete	0.2	1.6	0.125	2.639
	Brick	0.1	0.99	0.101	
	In/External R_{cond}			0.153	
Window					1.509
Floor	Concrete slab	0.7	1.6	0.438	1.484
	In/External R_{cond}			0.236	
Ceiling	Concrete slab	0.15	1.6	0.0938	5.562
	Internal R_{cond}			0.086	

Table 8. 은 벽을 통한 열 손실 계산을 하기 위해 각 벽의 면적을 나타낸 것이고, Table 9. 는 각 벽의 유형 및 재료를 이용해 도출한 총 열전달 계수를 나타낸다. 벽을 통한 열 손실은 Eq. (5)에 따라 열전달 면적, 열전달 계수, 그리고 $\Delta \bar{T}$ 를 통해 계산할 수 있다. 25 °C의 실내 목표 온도로 가열한다고 할 때, 외부 공기와 맞닿는 외벽과 창문, 바닥을 통해 외부 공기(0 °C)와 열전달이 이루어져 열 손실이 일어난다. 이러한 경우에, 가열 중 $\Delta \bar{T}$ 는 Log Mean Temperature Difference 방법을 사용하여 도출된다. 따라서 ΔT 는 16.37 °C이다. 공기와 맞닿지 않는 내벽과 천장은 접한 방의 실내 온도(10 °C)와 열전달이 이루어진다. 이 경우, ΔT 는 산술 평균을 이용하여 도출하였고, 따라서 온도 차 ΔT 는 7.5 °C이다. 입력 열량은 히터의 입력 열량에서 전체 벽을 통한 열 손실을 빼서 계산할 수 있다. 가정된 히터의 소비 전력은 4.5 KW 이다. 느헤미야 홀의 단열성능이 최소로 가정되어 많은 열 손실이 있기 때문에 히터의 용량은 계산의 편의를 위해 4.5 KW로 크게 설정하였다. 단열이 되지 않은 경우, 느헤미야 홀 사무실의 열 손실량과 실제 입력 열량은 Table 10. 에 정리되어 있다. 단열이 되지 않은 경우의 입력 열량은 398.321 W이다.

Table 10. Heat loss rate according to types at no insulation

Types	Heat loss rate(W)
External air indirect wall	2010.487
External air direct wall	272.163
Window	155.625
Floor	612.186
Ceiling	1051.218
Total loss	4101.679
Heating input	398.321

5.2.1 실험을 통한 경제성 평가

단열이 되지 않은 경우의 t_{heat} 와 실험에서 얻은 c_{saving} 을 이용하여 경제성 평가를 진행하였다. Table 11. 에 경제성 평가에 대한 계산 값들이 도출되어있다. 단열이 되지 않은 경우 t_{heat} 는 3504 초이다. 스티로폼(40 T)로 단열한 경우 t_{heat} 는 2313 초이고, 에너지 절약 값은 5.832 MJ/Day이며, 절감 비용은 357 Won/day이다. 아이소 핑크(30 T)로 단열할 경우, t_{heat} 는 2208 초이며, 에너지 절약 값은 5.832MJ/Day, 절감 비용은 389 Won/Day이다. 결과적으로 겨울철 단열재로 아이소 핑크(30T)를 사용하면 느헤미야홀의 한 사무실에서 한 달(히터 가동 일수 : 20 일)에 약 7780 원을 절약 할 수 있다.

Table 11. Economic evaluation table by experiment

Insulation materials	C_{saving}	t_{heat}	Saving energy	Saving money
No insulation	1	3504s	-	-
Styrofoam(40T)	0.66	2313s	5.36 MJ/day	357 Won/day
Isopink(30T)	0.63	2208s	5.832 MJ/day	389 Won/day

5.2.2 단열재의 실제 열전달 계수를 통한 경제성 평가 (겨울철)

실험에 의한 경제성 평가와 동시에 단열재의 실제 열전달 계수를 이용하여 벽의 총 열전달 계수를 도출한 뒤 경제성 평가를 다시 수행하였다. Table 12. 은 아이소 핑크(30 T)의 실제 열전달 계수가 있는 벽의 총 열전달 계수를 보여 주며 열 손실과 입력 열량의 결과는 Table 13. 에 명시되어 있다. 아이소 핑크(30 T)로 단열할 경우 입력 열량은 2641.875 W이다. t_{heat} 는 528 초이고, 에너

지 절약 값은 13.392 MJ/Day이며, 비용 절약은 Table 14. 에 명시되어 있듯이, 893 Won/Day이다. 그 결과, 느헤미야홀의 한 사무실에서 한 달에(히터 가동일 수 : 20 일) 약 17,860원을 절약 할 수 있다. 실험을 통해 도출한 경제성 평가 결과보다 실제 열전달 계수를 통한 경제성 평가의 결과가 더 이롭게 나온 이유는 실험 장치의 한계로 인해 실험 시 heat loss가 더 크게 측정되었기 때문이다.

Table 12. Heat transmission coefficient table of Isopink(30 T) insulated in Nehemiah Hall's office

Type	Material	Thickness (m)	k (W/m·K)	R_{cond} ($m^2 \cdot k/W$)	U ($W/m^2 \cdot K$)
External air indirect wall	Concrete	0.2	1.6	0.125	0.743
	Iso pink	0.03	0.027	1.111	
	Internal R_{cond}			0.110	
External air direct wall	Concrete	0.2	1.6	0.125	0.671
	Brick	0.1	0.99	0.101	
	Iso pink	0.03	0.036	1.111	
	In/External R_{cond}			0.153	
Window					1.509
Floor	Concrete slab	0.7	1.6	0.438	0.56
	Iso pink	0.03	0.036	1.111	
	In/External R_{cond}			0.236	
Ceiling	Concrete slab	0.15	1.6	0.0938	5.562
	Internal R_{cond}			0.086	

Table 13. Heat loss rate according to types at Isopink(30 T) insulated

Types	Heat loss rate(W)
External air indirect wall	351.068
External air direct wall	69.201
Window	155.625
Floor	231.013
Ceiling	1051.218
Total loss	1858.125
Heating input	2641.875

Table 14. Economic evaluation table by substituting actual heat transmission coefficient of insulation materials

Insulation materials	t_{heat}	Saving energy	Saving money
No insulation	3504 s	-	-
Isopink(30 T)	528 s	13.392MJ/day	893 Won/day

5.2.3 단열재의 실제 열전달 계수를 통한 경제성 평가 (여름철)

기본적으로 경제성 평가 방법은 앞의 5.2.1과 5.2.2와 동일하다. 변경된 변수는 실내 온도가 30 °C 이고, 목표 온도가 20 °C 이며, 외부 온도가 35 °C로 변경되었다. 20 °C의 목표 실내 온도에서 외부 공기와 직접 맞닿는 외벽, 창문, 바닥을 통해 외부 공기 온도(35 °C)와 열전달이 된다. 이 경우, 냉각 중 $\Delta \bar{T}$ 는 Log Mean Temperature Difference 방법을 사용하여 도출된다. 계산 결과, 냉각 중 $\Delta \bar{T}$ 는 9.1 K이다. 외부 공기와 맞닿지 않는 내벽과 천장은 접한 방의 실내 온도 (30 °C)와 열전달이 이루어진다. 이 경우, $\Delta \bar{T}$ 는 산술 평균을 이용하여 도출하였고, 따라서 냉각 열 손실의 $\Delta \bar{T}$ 는 5 K이다. 냉각기의 소비 전력은 4 KW이다. 느헤미야 홀의 열 성능이 최소로 가정되므로 많은 열 손실이 있기에 냉각기의 용량을 계산의 편의를 위해 4 KW로 크게 설정되었다. 냉각을 위한 Q는 930.575 KJ(Eq. 7)이며 단열이 되지 않은 경우의 $t_{cooling}$ 은 674 초이다. 아이소 핑크(30 T)로 단열할 경우 입력 열량은 2811.689 W이다. $t_{cooling}$ 은 311 초, 에너지 절약 값은 1.372 MJ/Day, 비용 절감은 91 Won/Day이다. 결과적으로 여름철에 아이소 핑크(30 T)로 단열할 경우 사무실에서 한 달에(냉각기 가동일 수 : 20 일) 1,820원을 절약할 수 있다. 계산 결과는 Table 15. 와 Table 16. 에 도출되어 있다.

Table 16. Economic evaluation table by substituting actual heat transmission coefficient of insulation materials in the summer season

Insulation materials	$t_{cooling}$	Saving energy	Saving money
No insulation	674 s	-	-
Styrofoam(40 T) Isopink(30 T)	331 s	1.372 MJ/day	91 Won/day

Table 15. Heat loss rate according to insulation in the summer season

Types	Heat loss rate(W) / No Insulation	Heat loss rate(W) / Isopink Insulation (30 T)
External air indirect wall	1340.325	234.045
External air direct wall	151.327	38.447
Window	86.53	86.53
Floor	340.386	128.447
Ceiling	700.812	700.812
Total loss	2619.38	1188.311
Cooling input	1380.62	2811.689

6. 결론

느헤미야 홀을 실현할 수 있는 챔버를 설계하여 단열 실험을 진행하였다. 스티로폼(40 T)와 아이소 핑크(30 T)를 단열재로 사용하였다. 실험 결과, 단열효과는 아이소 핑크(30 T)가 가장 좋았다.

경제성 평가는 실험과 이론, 겨울과 여름 시즌에 의해 수행되었다. 아이소 핑크(30 T) 사용하여 단열할 경우 한 달에 최대 17,860 원을 절약 할 수 있다. 느헤미야 홀에 있는 사무실의 수는 약 60 개이므로 겨울에는 월 총 1,071,600 원을 절약 할 수 있다. 여름철에는 총 109,200 원을 한 달에 절약할 수 있다. 사무실과 더불어 강의실도 함께 단열한다면 절약 비용이 증가할 것이다. 실험 및 분석이 주어진 실험실 조건에 대해 간단하게 이루어졌지만, 단열재의 필요성은 사무실을 사용하는 재실자에게 미치는 편의성과 학교가 얻을 수 있는 경제적인 이익을 충분히 도출함을 통해, 확인할 수 있었다. 하지만, 본 논문은 에너지 저감 효과만을 연구의 범위로 한정된 한계가 존재하여 추후 연구의 실용성을 위해 단열재별의 재료, 시공비 등의 요소가 고려된 경제성 평가가 이루어져야 할 것이다. 또한, 실제 단열 시공을 할 때, 지역별 허용 열 관류율 표를 확인하고 단열재의 두께와 종류를 선정할 필요가 있으며, 바닥 단열에 적합한 단열제도 선택해야 한다.

References

[1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Green Architecture), "Standard for Energy Saving Design of Buildings", Notice No. 2014-520 of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014.

[2] Ministry of Environment, "Guidelines for the operation of greenhouse gas and energy target management in the public sector", January. 2018.

[3] M-S. Mohsen, B-A. Akash, "Some prospects of energy savings in buildings", Journal of Energy Conversion and Management, vol. 42, no.11, pp. 1307-1315, July. 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00140-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00140-0)

[4] R. Lollint, B. Barozzi, G. Fasano, I. Meroni, M. Zinzi, "Optimization of opaque components of the building envelope Energy economic and environmental issues", Journal of Building and Environment, vol. 41, no.8, pp. 1001-1013, August. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.011>

[5] S-H. Ryu, J-H. Ryu, W-H. Hong, "A Study on Timing Estimation for the Thermal Insulation Remodeling by Analyzing Annual Variation of Exterior Walls Thermal Insulation Performance in Public Buildings", Journal of the architectural institute of Korea, vol. 31, no.7, 8, pp. 163-171, July. 2015.
DOI: https://doi.org/10.5659/JAIK_PD.2015.31.7.163

[6] M four Architecture, "Standard table of insulation performance1", Handong Global University GEI New Construction, Drawing number. A0.43-44, 2018.

[7] E-J. Huh, H-G. Jeong, D-S. Song, "A Study on the Field Test Method for Thermal Performance of Building Envelope", Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers 2012 Summer Conference, pp. 185-189, May. 2012

이 정 민(Jungmin Lee)

[준회원]



• 2015년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부

〈관심분야〉
기계공학, 열유체

소 원 호(Wonho So)

[준회원]



- 2015년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부

<관심분야>
기계공학, 열유체

이 권 영(Kwon-yeong Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 포항공과대학교 기계공학(공학사)
- 2008년 2월 : 포항공과대학원 기계공학(공학박사)
- 2008년 8월 ~ 2010년 6월 : 삼성 엔지니어링 과장
- 2010년 7월 ~ 2015년 2월 : 한국 원자력연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 교수

<관심분야>
기계공학, 원자력공학, 열유체

조 경 찬(Kyungchan Cho)

[준회원]



- 2015년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부

<관심분야>
기계공학, 열유체

최 동 녅(Dongnyeok Choi)

[준회원]



- 2010년 3월 ~ 2017년 2월 : 한동대학교 기계제어공학부 (공학사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 한동대학교 일반대학원 기계제어공학부

<관심분야>
기계공학, 열유체