

업무용 건축물에 적용된 단열재의 경년열화에 따른 열손실량 분석

이도형 · 나환선[†]

한국전력공사 전력연구원

Analysis of Heat Loss Due to Time Dependent Aging of Insulation Applied to Office Building

Lee Do-Hyung · Nah Hwan-Seon[†]

KEPCO Research institute

[†]Corresponding author: hsnah_kepri@kepco.co.kr

Abstract

In this study, the change of heat loss due to the degree of deterioration of the XPS insulation in KEPCO's office buildings is analyzed. The acceleration aging test of the XPS insulation was carried out according to the test method A of KS M ISO 11561: 2009. The performance of the insulation was analyzed by applying it to the three - dimensional steady state heat transfer analysis program. The acceleration aging test of the XPS insulation, show that the thermal resistance performance decreased by 1.44% at the A regional headquarters, 0.85% at the B regional headquarters, 6.41% at the C branch office, 7.76% at the D regional headquarters, 8.51% at the E branch office, and by 8.54% at the F branch office respectively. Using simulation, we determined that the thermal resistance value of E branch office decreased by 8.04%, while its heat loss increased by 8.52%. At A regional headquarters, the thermal resistance decreased by 1.38%, and the heat loss increased by 1.51%. At D regional headquarters, these value are 6.82% and 7.17%, respectively.

Keywords: 가속열화(Acceleration aging), 업무용 건물(Office building), 열손실량(Heat loss), 열전도율(Thermal conductivity), 열저항(Thermal resistance)

기호설명

- t : 상당시간 [일]
 P_d : 적용된 단열재의 경과 일수
 d_s : 시편의 두께 [mm]
 d_r : 적용된 단열재의 두께 [mm]
 R_p : 적용된 단열재의 열저항 [m^2K/W]



Journal of the Korean Solar Energy Society
 Vol.37, No.5, pp.65-75, October 2017
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.5.065>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 17 August 2017

Revised: 26 October 2017

Accepted: 30 October 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

기후변화에 대응하기 위해서 전 세계적으로 탄소배출권 거래제 도입 등 많은 노력을 하고 있다. 국내에서도 온실가스 감축 목표를 2030년 기준 배출전망치(BAU) 대비 37%로 줄이겠다고 2015년 프랑스 파리에서 개최된 유엔 기후변화협약 당사국총회에서 밝힌 바 있다. 국내에서는 2014년 기준 분야별 온실가스 배출량 중 제조업 및 건설업 분야가 194.1백만 톤 CO₂eq.으로 전체 분야 중 28%만큼 상당부분을 차지하고 있다¹. 온실가스 감축을 위해서는 화석연료의 사용량도 크게 줄여야 하기 때문에 건축 분야에서도 많은 노력이 필요한 실정이다. 이러한 국내 정책에 따라 건축물의 에너지 절감 정책도 강화되고 있다. 공공기관 건축물을 신축할 경우, 연면적 3,000 m² 이상의 건물은 건축물에너지효율등급 1등급 이상을 의무 취득하여야 하며, 공공기관의 기존 건축물에 대해서도 건물에너지 진단을 통해 성능개선을 이행해야 되는데 ‘그린리모델링’을 통한 에너지성능 개선이 증가하고 있는 추세이다. 현 상황으로 그린 리모델링을 하기 위해 건축물에서 액티브 요소 개선 이전 단계인 패시브요소 중 창호 교체에 대해서만 주요 사항으로 다루고 있는 현실이다. 이미 시공된 단열재는 벽체, 지붕, 바닥 구조체의 일부로서 단열재만 교체하기에는 큰 어려움이 있기 때문이다. 건축물이 노후화됨에 따른 단열재 열성능 저하와 같은 경년열화변화를 고려하여야 하는데, 현실은 법규상에 명시되어 있는 단열재의 열성능만을 만족시켜 건축물의 최초 시공시에 적용하고 있다.

본 연구에서는 공공기관 건축물인 한국전력공사 사옥 건물 벽체에 적용된 압출법 단열재의 초기 및 현재까지 진행된 열화 정도를 실험을 통해 파악하고자 하였으며, 초기 및 열화된 단열재의 성능에 따라 정상상태 3차원 열전달해석 프로그램에 적용하여 열손실량 변화를 분석하고자 하였다.

2. 실험 및 시뮬레이션 개요

실험에 따른 압출법 단열재의 열성능을 측정하였고, 정상상태 3차원 열전달해석 프로그램을 활용하여 열손실량을 분석하였다. 각 내용은 다음과 같다.

2.1 실험 개요

압출법 단열재의 경년열화평가를 위해 ‘KS M ISO 11561:2009(단열재의 경시변화-독립 기포 플라스틱의 열저항의 장기변화 결정(실험실 가속 시험법))’의 시험 방법 A를 활용하였다(Fig. 1 참조). 표준 환경 조건 시험은 ‘KS A 0006 : 2004(시험 장소의 표준 상태)’에서 규정하고 있는 온도 $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 의 항온항습 조건하에서 실시하였다. 시편의 전처리 조건으로 약 10 mm의 균질한 두께의 슬라이싱 시편을 준비하여 표준 환경 조건 하에 1일 이상 거치 후, 최초 열전도율을 측정하고 이후 표준 환경 조건에서 보관 및 주기적인 측정을 하였다.

¹ 2016 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 온실가스종합정보센터.

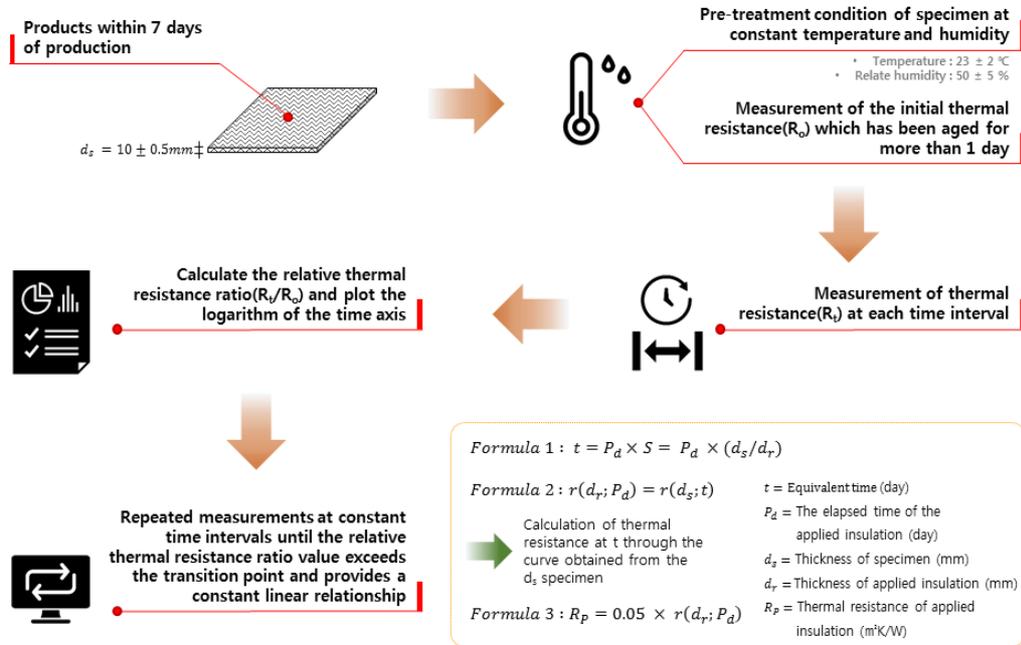


Fig. 1 Experimental flow chart

압출법 단열재 시편은 10 mm 두께로 생산된 지 일주일 이내의 제품을 확보하였다. 시편 두께 확인은 Fig. 2와 같고, 시편의 보관을 위한 항온항습기 및 열전도를 측정하기 위한 기기는 Figs. 3, 4와 같고, 각 사양은 Tables 1, 2와 같다.



Fig. 2 XPS Specimen



Fig. 3 Thermo-hygrostat



Fig. 4 Thermal conductivity measuring equipment

Table 1 Specification of thermo-hygrostat

Category	Specification
Outer diameter	1,150 mm × 1,230 mm × 1,930 mm
Temperature range	-40 ~ 150°C
Humidity range	10 ~ 98 % RH
Power	380 VAC 7 kW

Table 2 Specification of thermal conductivity equipment

Category	Specification
Plate temperature range	Variable, 0°C to 100°C
Cooling system	Forced air
Plate temperature control	Peltier system
Thermocouple precision	±0.01°C
Number of programmable temperature	10
Specimen size (L × W × H) mm	305 × 305 × 100
Thermal resistance range	0.05 to 8.0 m ² K/W
Thermal conductivity range	0.002 to 2.0 W/mK
Repeatability	0.25 %
Accuracy	± 1 to 3 %
Dimensions (L × W × H) mm	480 × 630 × 510

2.2 시뮬레이션 개요

한국전력공사 사옥 건물에 적용된 압출법 단열재의 열저항 성능 저하에 따른 열손실량 분석을 위해 벨기에 PHYSIBEL사에서 개발한 정상상태 3차원 열전달해석 프로그램인 TRISCO RADCON Module을 활용하였다. 사옥 건물별로 벽체 구성에 따른 열손실량 분석을 위해 실내 설정온도는 ‘공공기관 에너지이용 합리화 추진에 관한 규정’에 따라 22°C로 설정하였고, 외부 온도는 -10°C로 설정하여 단열재의 초기 열전도율 적용 및 경년 열화 시의 열전도율 적용에 따른 열손실량 분석을 수행하였다. 다음으로 압출법 단열재가 적용된 사옥 중 F 지사 사옥 건물에 대하여 일부 모델링을 하여 단열보강을 위해 SIP 패널을 적용한 경우를 분석하였다.

3. 압출법 단열재 경년열화변화 실험

단열재 시편의 측정을 위해 평균온도를 23°C로 하여 열전도율 측정기의 Hot plate 온도는 33°C, Cold plate의 온도는 13°C로 ΔT를 20°C로 설정했다. 항온항습상태 보관 전 최초 열저항 성능은 0.385m²K/W로 측정되었다. 측정 이후에 Fig. 5와 같이 단열재 시편을 온도 23°C, 상대습도 50% 조건의 항온항습상태에 보관하였다.



Fig. 5 Storage of thermo-hygroscopic state of insulation specimen

Fig. 1에서 Formula 1과 같이 노후화된 사육에 적용된 단열재의 경년열화변화가 발생한 시간에 상응하는 가속열화시간을 구하고, Formula 2에서는 시편의 주기적인 열성능 측정으로 얻어지는 곡선을 통하여, 가속열화 시간에 대한 열저항 값을 찾는다. 마지막으로 Formula 3에서 해당 곡선에서 찾은 열저항 값을 대입하여 계산하면 사육에 적용된 단열재의 경년열화에 따른 열저항 값을 추정할 수 있게 된다. 경년열화변화 실험 대상 한전 사육은 8개 사육으로 선정하였고, 수식에 따라 계산된 경년열화변화 확인 일자는 Table 3과 같다.

Table 3 Confirmation of change in aging deterioration change of XPS insulation applied to the KEPCO building

Business establishment	Completion year	Thickness of insulation	Date of confirmation of aging deterioration change
A regional headquarters	2016	120 mm	February 9, 2017
B regional headquarters	2016	100 mm	February 10, 2017
C branch office	2012	65 mm	March 21, 2017
D regional headquarters	2008	70 mm	April 14, 2017
E branch office	2007	65 mm	May 4, 2017
F branch office	1991	100 mm	May 12, 2017
G branch office	1993	50 mm	January 22, 2018
H branch office	2008	40 mm	August 30, 2017

현재까지 주기적으로 열저항 성능의 변화를 측정하고, 확인된 한전 사육건물 단열재의 열성능은 C 지사, E 지사, A 지역본부, F 지사, D 지역본부, B 지역본부로 총 6개소이다. 가속열화 방법에 따라 준공년도가 오래되지 않을수록, 사육에 적용된 단열재의 두께가 클수록 사육에 적용된 단열재의 열적 성능이 얼마나 저하되었는지를 확인할 수 있는 일자가 빠르다. 준공 당시 설치된 단열재와 동일한 단열재로 표준환경조건에 보관하였고 실험을 진행하여 가속열화 방법에 의해 일정 기간 경과시점의 경년변화를 추정하였다. Fig. 6은 현재까지 확인한 단열재 경년열화변화 실험 결과이다.

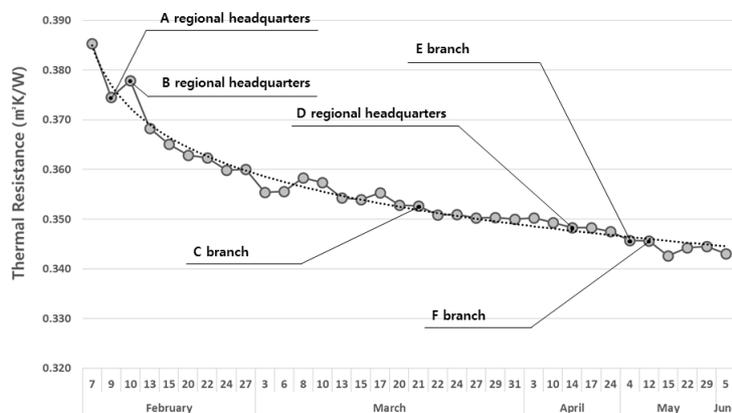


Fig. 6 Experimental results of acceleration aging of insulation

Fig. 6은 단열재 시편의 두께에 대한 열저항 값이므로 각 사육별 단열재 두께를 적용한 열저항 값을 확인한 결과, A 지역본부는 4.278 m²K/W에서 4.216 m²K/W로 1.44%, B 지역본부는 3.565 m²K/W에서 3.535 m²K/W로 0.85%, C 지사는 2.317 m²K/W에서 2.169 m²K/W로 6.41%, D 지역본부는 2.496 m²K/W에서 2.302 m²K/W로 7.76%, E 지사는 2.317 m²K/W에서 2.120 m²K/W로 8.51%, F 지사는 3.565 m²K/W에서 3.261 m²K/W로 8.54% 만큼 열저항 성능이 감소하였다. B 지역본부의 단열재 경년열화변화가 발생한 시점이 A 지역본부 이후임에도 불구하고 열저항 성능 값이 더 높은 것은 열전도율 측정 장비의 오차율로 인한 결과로 사료된다. 현재까지 측정된 데이터의 추세선에 따른 회귀분석 결과, 상관관계 값인 R²이 1에 가까울 만큼 신뢰도가 크다고 할 수 있다. 향후 장기적인 측정으로 도출된 수식을 통해 시뮬레이션에 반영하여 단열재의 열화 정도에 따른 건물에너지에 미치는 영향 정도에 따른 건물에너지에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

$$y = -0.011 \ln(x) + 0.385 \tag{1}$$

$$R^2 = 0.9726$$

선행 연구 A에서는 압출법 보온판의 최초 열전도율이 0.025 W/mK에서 365일 이상 경과함에 따라 측정된 열전도율이 0.033 W/mK으로 열전도 변화율 30.6%를 보이고 있다¹⁰⁾. 본 연구를 위해 확보한 압출법 단열재 시편의 최초 열전도율이 0.028 W/mK에서 약 4개월이 경과하였을 경우의 열전도율인 0.031 W/mK으로 변화함에 따라 10.05%의 열전도 변화율을 보이고 있는데, 현재도 열화가 진행 중에 있어 장기적인 측정을 통하여 열전도 변화율을 확인할 필요가 있다. 선행연구 B에서는 압출법 보온판 특호와 1호에 대해서 평가한 결과, 특호는 약 5개월이 지난 시점, 1호는 약 2개월이 경과된 시점에서 한국산업규격(KS)에서 명시된 열전도율을 넘어서는 것으로 분석되었다⁷⁾. 본 연구에서 사용된 압출법 보온판은 1호로 초기 열전도율은 한국산업규격인 0.028 W/mK을 만족하지만 약 10일이 경과한 시점부터는 규격을 만족하지 않는 것으로 분석되었다. 이는 선행연구 B에서는 가속 열화를 위한 단열재 두께가 50 mm로 본 연구를 위한 가속 열화 시험 조건과의 차이로 사료된다. 선행연구 C에서는 본 연구와 같은 시험 방법 A에 따라 압출법 보온판 1호의 경년 열화 변화를 분석하였다⁹⁾. 선행연구 C와 본 연구와의 비교를 한 결과, 선행연구 C는 초기 열전도율 0.031 W/mK에서 약 100일이 경과한 시점에 0.033 W/mK으로 0.002 W/mK만큼 증가하여 6.45%의 열전도율 증가율을 나타냈다. 본 연구에서는 초기 열전도율 0.028 W/mK에서 100일이 경과한 시점에 0.031 W/mK으로 약 0.003 W/mK만큼 증가하여 9.66%의 열전도율 증가율을 나타냈다(Fig. 7 참조). 이와 같이 압출법 단열재는 시간이 경과함에 따라 발포가스와 공기의 치환, 충전가스가 서서히 외부로 빠져나감으로서 단열성능 저하의 결과를 초래하게 된다.

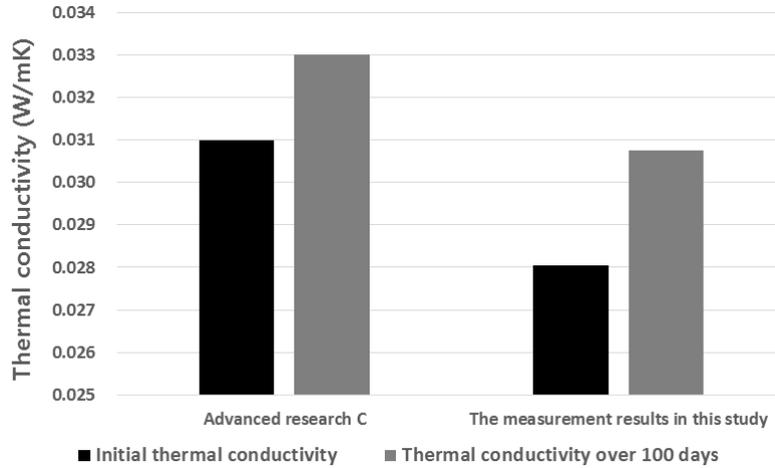


Fig. 7 Comparison of initial thermal conductivity and thermal conductivity over 100 days

4. 정상상태 3차원 열전달해석을 통한 사옥 열손실량 분석

최초 열전도율 값을 적용하였을 경우와 경년열화된 열전도율을 값을 적용하였을 경우에 열손실량을 분석하고자 사옥별 벽체 구성에 따른 모델링을 하였다. 사옥별 벽체의 구성이 확인 가능한 도면은 A 지역본부, B 지역본부, D 지역본부, E 지사로 4개소이다. F 지사 사옥 건물은 추가적으로 사무실 일부를 모델링하여 동절기 기간 동안에 사용한 전기에너지사용량과 열손실량을 비교 분석하였다.

4.1 사옥별 벽체 구성에 따른 열손실량 분석

사옥별 벽체 구성은 Table 4와 같으며, Fig. 8과 같이 모델을 구성하였다. 이때, ‘건축물의 에너지절약 설계기준’에 따라 실외표면열전달율은 23.25 W/m²K, 실내표면열전달율은 9.09 W/m²K로 적용하였다.

Table 4 Construction of wall applied to building of KEPCO

Business establishment	Composition of wall
E branch office	Granite(30 mm) + XPS(65 mm) + Concrete(150 mm)
A regional headquarters	Aluminum panel(3 mm) + XPS(120 mm) + Concrete(150 mm) + Plaster board(12.5 mm) + Plaster board(12.5 mm)
D regional headquarters	Granite(30 mm) + Cavity(20 mm) + XPS(70 mm) + Concrete(200 mm)
B regional headquarters	Aluminum sheet(3 mm) + Cavity(150 mm) + XPS(100 mm) + Concrete(180 mm)

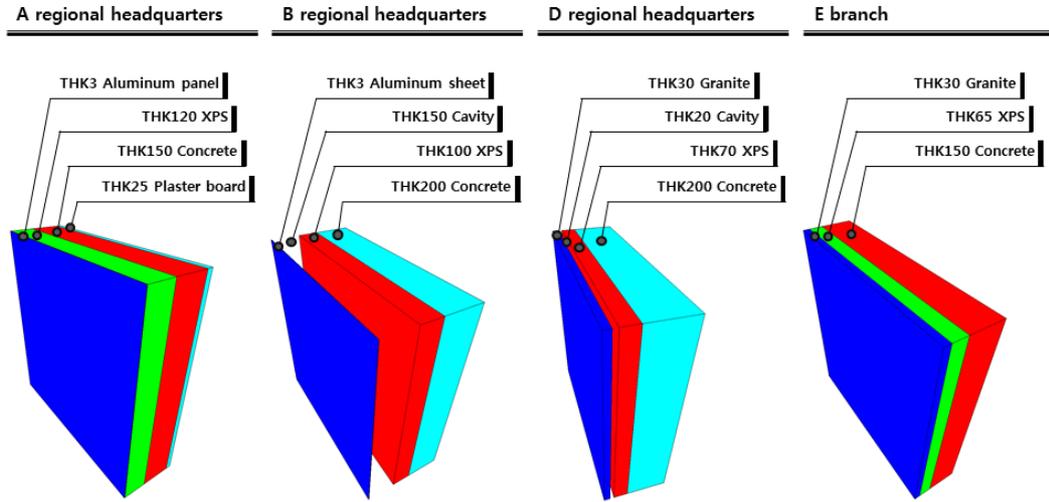


Fig. 8 Three-dimensional modeling of the steady-state heat transfer analysis

각 사옥 건물 벽체에 적용된 압출법 단열재의 초기 열전도율 및 경년열화가 발생하였을 경우의 열전도율을 적용하여 분석한 결과, E 지사의 열저항 값 8.04% 저하, 열손실량 m^2 당 8.52% 증가, A 지역본부의 열저항 값 1.38% 저하, 열손실량 m^2 당 1.51% 증가, D 지역본부의 열저항 값 6.82% 저하, 열손실량 m^2 당 7.17% 증가, B 지역본부의 열저항 값 0.75% 저하, 열손실량 m^2 당 1.45% 증가하였다(Table 5 참조).

Table 5 Analysis of thermal performance due to aging deterioration of insulation applied to building wall

Business establishment	Apply initial performance		Application of aging deteriorated performance	
	U-value	Heat loss	U-value	Heat loss
E branch office	0.389 W/m^2K	12.460 W/m^2	0.423 W/m^2K	13.521 W/m^2
A regional headquarters	0.214 W/m^2K	6.840 W/m^2	0.217 W/m^2K	6.943 W/m^2
D regional headquarters	0.205 W/m^2K	10.766 W/m^2	0.220 W/m^2K	11.538 W/m^2
B regional headquarters	0.133 W/m^2K	7.914 W/m^2	0.134 W/m^2K	8.029 W/m^2

4.2 F지사 사옥 적용 단열재의 경년열화에 따른 단열보강 방안 분석

일반적으로 건축물 내에서 단위 실당 벽체는 설비 배관, 조명 매립 등으로 활용하는 상부 공간과 동일선상에 있는 Spandrel zone과 창을 통한 일사획득, 재실자들의 가시적 공간인 Vision zone, Fan coil unit이 설치되는 FCU zone으로 구분할 수 있다(Fig. 9 참조). 한국전력공사 F 지사에 적용된 압출법 단열재는 FCU zone에 위치해 있다. TRISCO RADCON Module을 활용하여 F 지사의 단위 실을 모델링한 결과는 Fig. 10과 같다.

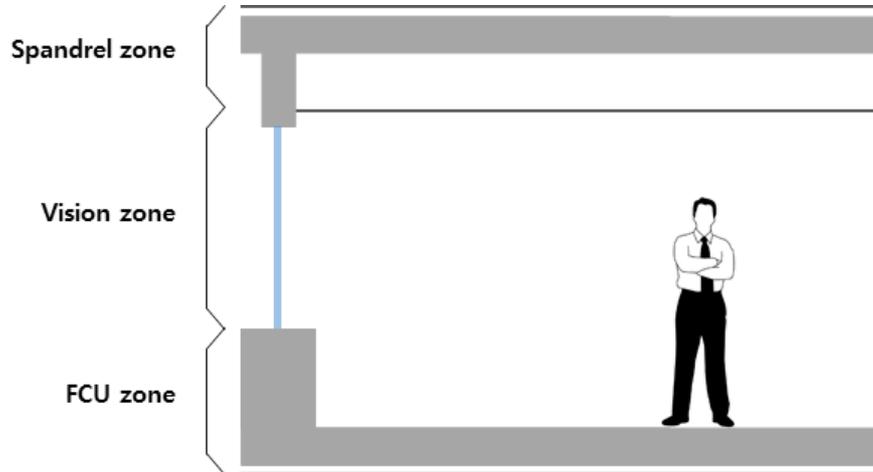


Fig. 9 Division along the area of the wall

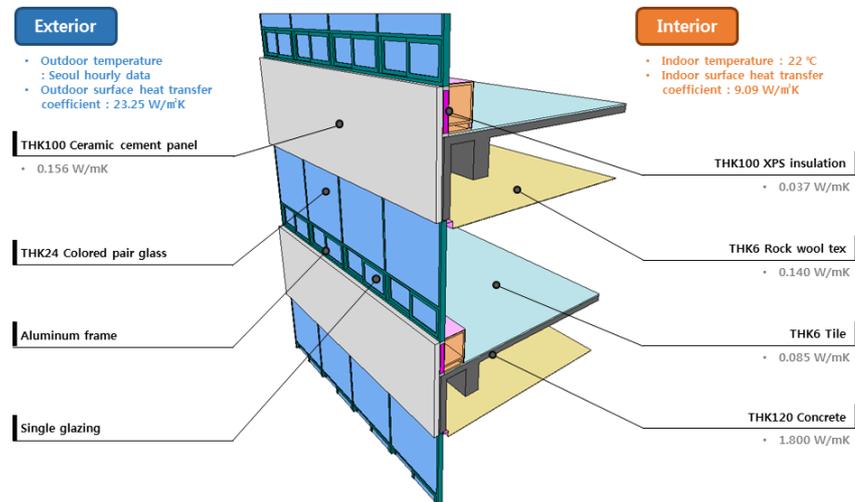


Fig. 10 Unit room modeling of F branch office

F지사 사옥에는 압출법 단열재로 시공되어 있고, Fan Coil 영역에 적은 면적으로 적용되어 있다. F 지사의 열손실량을 줄이기 위해서는 단열면적이 적은 압출법 단열재 보다는 외벽 중 면적이 크고 단열재로 대체가능한 부위인 세라믹 시멘트 패널을 성능이 우수한 단열재로 교체를 하면 성능개선이 더욱 효과적일 것으로 사료된다. 따라서 Fig. 11과 같이 세라믹 시멘트 패널 부분을 단열성능 개선을 위해 SIP 패널(11 mm OSB + 100 mm EPS + 11 mm OSB)로 교체하여 분석하였다. 이때, 압출법 단열재는 2017년 기준 열전도율을 적용하였다. 분석 결과, 열손실량이 350,049W로 압출법 단열재의 초기 열성능과 외벽에 세라믹 시멘트 패널이 적용된 경우 대비 7.007% 감소하였다(Fig. 12).

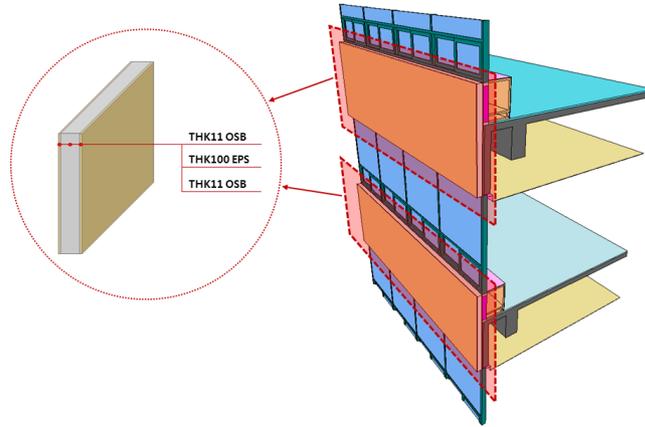


Fig. 11 Replacement from ceramic cement panel to SIP panel

Table 6 Conductivity applied by case

Apply initial conductivity	Apply 2017 year conductivity	Apply 2017 year conductivity & Replacement from ceramic cement panel to SIP panel
0.028 W/mK	0.031 W/mK	XPS : 0.031 W/mK EPS : 0.034 W/mK OSB : 0.160 W/mK

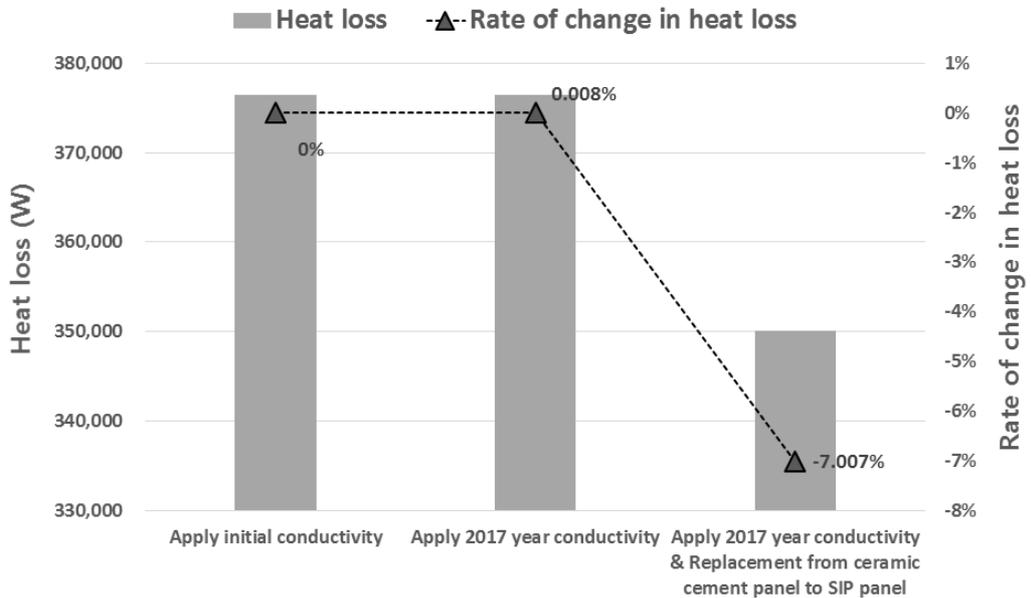


Fig. 12 Analysis of heat loss of F branch office

5. 결론

공공기관 건축물인 한국전력공사에 압출법 단열재가 적용된 사옥들에 대하여 단열재 경년열화에 따른 실험 및 시뮬레이션을 통한 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 한전 사옥 벽체에 적용된 압출법 단열재의 경년열화 실험 결과, A 지역본부는 1.44%, B 지역본부는 0.85%, C 지사는 6.41%, D 지역본부는 7.76%, E 지사는 8.51%, F 지사는 8.54%만큼 열저항 성능이 감소하였다. 압출법 단열재의 열저항 성능을 기간 별로 확인한 결과, 초기 열저항 0.385 m²K/W에서 10일이 경과한 시점에 0.364 m²K/W로 5.45% 성능 저하, 100일이 경과한 시점에 0.344 m²K/W로 10.65% 성능 저하가 진행되었다.
- (2) 압출법 단열재의 경년 열화 실험 결과 값을 정상상태 3차원 열전달해석 프로그램에 적용하여 사옥별 벽체 구성에 따른 열성능 분석 결과, 초기 대비 E 지사의 열저항 값 8.04% 저하, 열손실량 m²당 8.52% 증가, A 지역본부의 열저항 값 1.38% 저하, 열손실량 m²당 1.51% 증가, D 지역본부의 열저항 값 6.82% 저하, 열손실량 m²당 7.17% 증가, B 지역본부의 열저항 값 0.75% 저하, 열손실량은 m²당 1.45% 증가되었다.
- (3) F 지사에 적용된 압출법 단열재의 면적이 적기 때문에 외벽에서 단열재로 대체 가능한 부분인 세라믹 시멘트 패널을 SIP 패널로 교체하였을 경우 효과적으로 열손실량이 감소하는 것으로 분석되었다.

후기

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호: R16DA08).

REFERENCES

1. KS M ISO 11561 : 2009, Ageing of thermal insulation materials – Determination of the long-term change in thermal resistance of closed-cell plastics(accelerated laboratory test methods).
2. KS A 0006 : 2014, Standard atmospheric conditions for testing.
3. KS F 3808 : 2011, Cellular polystyrene(PS) for thermal insulation.
4. KS L ISO 8301 : 2006, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus.
5. KS L 9016 : 2010, Test methods for thermal transmission properties of thermal insulations.
6. ASTM C518, Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus.
7. Lee, S. E., Kang, J. S., Jeong, Y. S., and Choi, H. J., An experimental study on thermal conductivity change of building insulation materials with environmental condition and long-time elapse, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol 19, No. 12, pp. 235-241, 2003.
8. Hong, J. K. and Son, J. Y., An experimental study on thermal conductivity of building insulation materials, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol 29, No. 23, pp. 87-92, 1985.
9. Lim, S. H., A study on the insulating performance of organic insulating materials for building construction under accelerated durability conditions, Korea National University of Transportation, Master thesis, 2015.
10. Choi, H. J., Jeong, Y. S., Kim, G. W., Kang, J. S., and Lee, S. E., An experimental study on thermal conductivity change of building insulation materials with long-time elapse II, Journal of Architectural Institute of Korea, 2003.