

수치해석을 통한 진공유리 제작 및 성능실험에 관한 연구

A Study on Performance Test and Fabrication of Vacuum Glazing with Numerical Analysis

황일선(II Sun Hwang)¹, 이영림(Young Lim Lee)^{2*}

¹공주대학교 대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University, Republic of Korea

²Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Republic of Korea

(Received January 25, 2013; revision received March 26, 2013)

Abstract For air-tight modern buildings, secondary damage is likely to occur due to condensation in the relatively high heat-transmission windows since water vapor is not easy to discharge. Therefore, in this study, condensation performance of vacuum glazing was numerically analysed, compared with that of ordinary glass and confirmed experimentally by three sheets of vacuum glazing manufactured. The results show that the heat transmission coefficient of the vacuum glazing whose internal pressure is 10^{-3} torr was as low as about $5.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Thus, the condensation performance as well as the adiabatic performance was greatly improved compared to that of the ordinary glass.

Key words Vacuum glazing(진공유리), Condensation(결로), Relative humidity(상대습도)

* Corresponding author, E-mail: ylee@kongju.ac.kr

기호설명

h : 대류열전달계수 [$\text{W/m}^2\text{K}$]
 ϕ : 상대습도 [%]
 T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 U : 열관류율 [$\text{W/m}^2\text{K}$]

하첨자

id : 실내
 od : 실외
 s : 유리표면

1. 서 론

일반적으로 건축물에서 손실되는 에너지는 벽체나 지붕, 창호 등을 통하여 이루어지는데, 최근 인구증가와 지속적인 산업발전으로 인한 건축물 증가로 에너지 소비가 급증하게 되면서 건축물 에너지 손실량이 증가하고 있다. 이로 인해 효율적인 에너지 사용의 필요성이 크게 대두되어 건축물에서 다양한 에너지 절감 방법이 제시되고 있다. 그중 건축물에서 가장 많은 열손실이 일어나는 창호의 단열성능을 높이는 다양한 연구

들이 진행 중이다.

창호를 통한 열전달은 전도, 대류, 복사가 있는데 전도는 유리 및 공기를 통해 일어나고 복사는 전자기파의 형태로 전달된다. 현재 전도 및 대류에 의한 열전달을 최소화하기 위하여 유리층 사이에 공기보다 밀도가 높은 아르곤, 크립톤 가스를 주입한 복층유리와 두 장의 유리사이에 진공을 만들어 전도 및 대류에 의한 열전달을 차단하는 진공유리가 개발 및 판매되고 있으며 복사에 의한 열전달은 유리표면에 방사율이 낮은 입자를 코팅하여 방사율을 낮추는 로우이(Low-emissivity) 코팅으로 방사율을 낮출 수 있다. 이중 진공유리에 로우이 코팅을 한 유리는 현재 가장 단열성능이 높은 방법으로 평가되고 있으며 이에 따라 많은 연구가 진행되고 있다.

진공유리에 대한 연구는 1893년 Flask⁽¹⁾로부터 시작되었으나 동심원 형상의 구조였다. 하지만 Zoller⁽²⁾가 평판 유리 사이에 구조물을 끼워 넣어 압력차를 극복하는 방법을 제안한 이후로 평판 진공유리에 대한 연구가 이루어지고 있다. Bachli⁽³⁾는 진공유리 접합시 주로 모서리에서 열팽창과 관련된 문제점을 지적하였다. 1989년 Robinson and Collins⁽⁴⁾는 진공유리 제작을 위하여 저

용접 유리인 프리트(Frit)를 사용하여 접합시킨 후 진공 튜브를 이용하여 진공을 생성하였다. 국내에서는 Lee et al.⁽⁵⁾ 이 모서리를 통한 열전달 손실을 최소화할 수 있도록 고무 가스킷을 유리사이에 끼우고 진공 그리스를 이용하여 접합하는 방법을 제시하였다.^(6, 7)

현재 냉난방의 효율을 높이기 위하여 기밀화된 현대 건축물에서 수증기 배출이 용이하지 않아 상대적으로 열관류율이 높은 창호에서 결로발생으로 인한 2차 피해가 발생할 가능성이 높다. 이로 인하여 미국, 일본, 독일 등의 선진국들은 단열뿐만 아니라 결로방지 성능이 높은 창호시스템을 개발하기 위하여 연구를 진행해왔다.^(8, 9)

또한 창호에서의 열손실을 줄이기 위해 개발한 진공 유리는 기존의 단열재를 뛰어넘는 열관류율로 인하여 가정용 및 업소용 냉장고, 건조기 등 다양한 분야에 적용하여 편의성 확보 및 에너지 저감의 목적으로 연구중에 있다.

따라서 본 연구에서는 창호시스템 뿐만 아니라 냉장고, 냉동고, 건조기 등에 쓰이는 진공유리의 결로 성능을 비교 분석하기 위하여 열관류율 및 유리 표면온도 변화를 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 해석을 실시하였고, EES⁽¹⁰⁾(Engineering Equation Solver)를 이용 결로 성능을 평가하였다. 또한, 진공유리를 실제 제작하여 결로성능을 분석하였다.

2. 해석방법 및 조건

2.1 유리 열관류율 및 표면온도 해석

일반유리와 진공유리의 열관류율 및 유리표면 온도 해석을 위해 고려된 유체유동은 3차원, 정상상태, 압축성, 층류유동을 가정하였고 복사열전달은 DO(Discrete Ordinate) 모델을 사용하였다. Table 1에 수치해석을 위해 고려한 주요 인자들의 범위를 나타냈고 Table 2에 수치해석에서 고려한 진공유리 및 일반유리의 종류를 정의하였다. 유리의 열물성 값은 ANSYS CFX⁽¹¹⁾ 내장 물성을 사용하였고 방사율은 0.86으로 가정하였다. 국내 건축물의 실내 환경에 맞추기 위하여 내부온도는 겨울철 20℃, 여름철 26℃로 가정하였고 h_{out} 은 바람에 의한 강제대류를 고려하여 30 W/m²K, h_{in} 은 8.3 W/m²K⁽¹²⁾로 해석을 실시하였다. Fig. 1은 해석에 사용한 격자 시스템이며, 진공유리의 지지기둥의 배치간격, 지름, 유리사이 간격은 각각 23 mm, 0.5 mm, 0.15 mm로 가정하였다.

2.2 결로 성능 해석

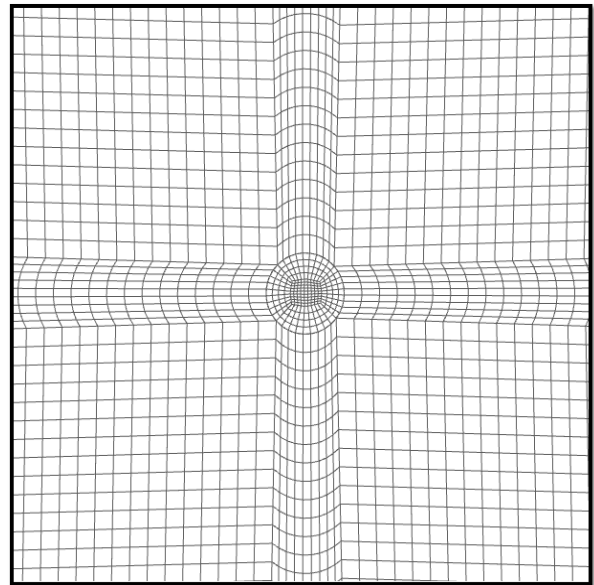
습공기의 물성은 EES⁽¹⁰⁾의 내장물성을 사용하였고 유리표면의 온도는 CFD 해석의 결과값을 이용하였다. 결

Table 1 Major factors for numerical analysis

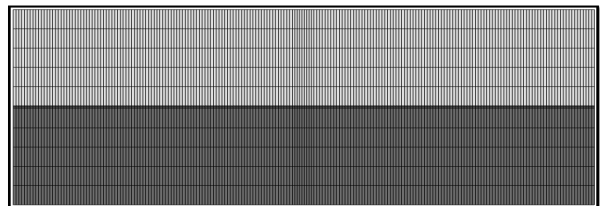
Factors	Values
Ambient temperature	-20~10℃ in winter 28~40℃ in summer
Glass gap(mm)	0.15
Spacer interval(mm)	23
Spacer diameter(mm)	0.5
Internal pressure(torr)	10 ⁻³ ~10 ⁻¹
Glass thickness(mm)	10.15 for vacuum glazing 5 or 10 for sheet glass

Table 2 Glass type for numerical analysis

glass type	glass characteristics
vacuum glazing 1	internal pressure 10 ⁻³ torr
vacuum glazing 2	internal pressure 10 ⁻² torr
vacuum glazing 3	internal pressure 10 ⁻¹ torr
sheet glass 1	thickness 10 mm
sheet glass 2	thickness 5 mm



(a) top view(zoomed around a spacer)



(b) front view

Fig. 1 Mesh system for CFD.

로는 동계에는 실내측 유리표면, 하계에는 실외측 유리표면에서 발생한다. 결로 해석을 위해 동계에는 실내 습도가 40~70%,⁽¹¹⁾ 하계에는 실외습도가 40~90% 범위 내에서 변화한다고 가정하였다.

3. 실험장치 및 방법

진공유리의 결로 성능을 알아보기 위하여 먼저 진공유리 열관류율을 측정된 후 습도가 제어되는 챔버 내에서 결로실험을 진행하였다. Fig. 2는 결로 실험장치를 보여준다. 실외공기 온도를 조절하기보다는 냉각수가 순환하는 구리블록의 온도를 조절하였고 구리블록 위에 진공유리를 올려놓고 상대습도를 변화시키며 결로 발생 여부를 확인하였다. 이 때 챔버내 공기는 20℃를 유지하였다. 한편, 실험값을 검증하기 위하여 유리표면 온도를 측정된 후 결로가 발생하는 습도를 이론적으로 계산하여 실험값과 비교하였다.

Fig. 3은 실험용으로 제작한 진공유리이며 지지기둥의 배치간격, 지름, 유리사이 간격은 각각 23 mm, 0.5 mm, 0.15 mm로 하였고 내부압력은 10^{-3} torr 로 제작하였으며 Low-E 코팅은 하지 않았다.

4. 결과 및 토론

4.1 유리 단열성능 비교 수치해석

Fig. 4에 하계 실외온도 변화에 따른 실내외 유리표면의 온도 차이를 나타냈다. 이때 실내온도는 26℃이고 외기온도는 28~40℃로 변화한다. 유리 종류에 관계없이 실외온도가 증가하면 실내외 유리표면 온도차는 선형적으로 증가한다. 하지만, 진공유리는 단열성능이 우

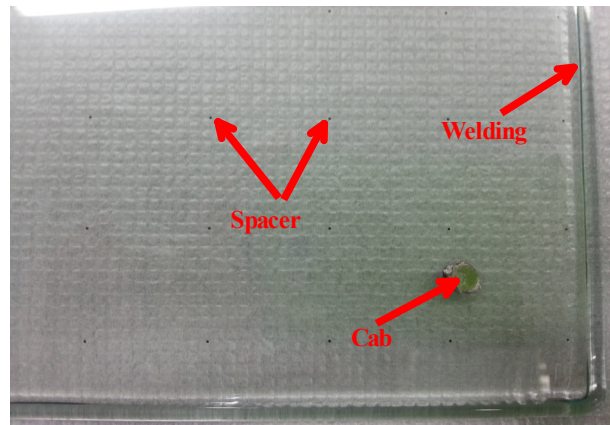
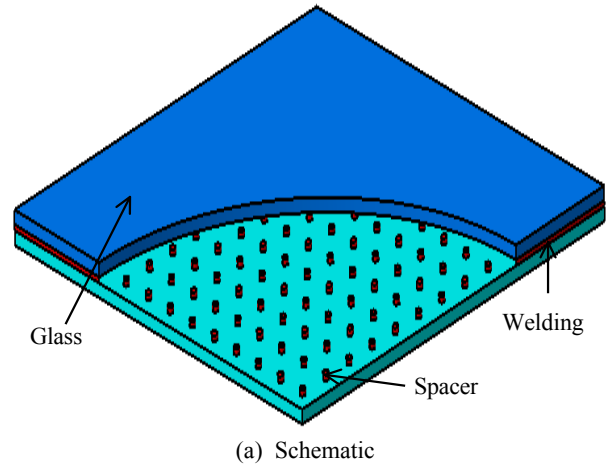


Fig. 3 Vacuum glazing.

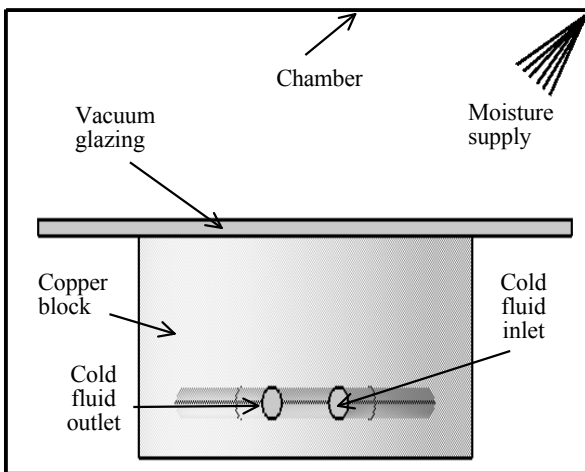


Fig. 2 Schematic of condensation test equipment.

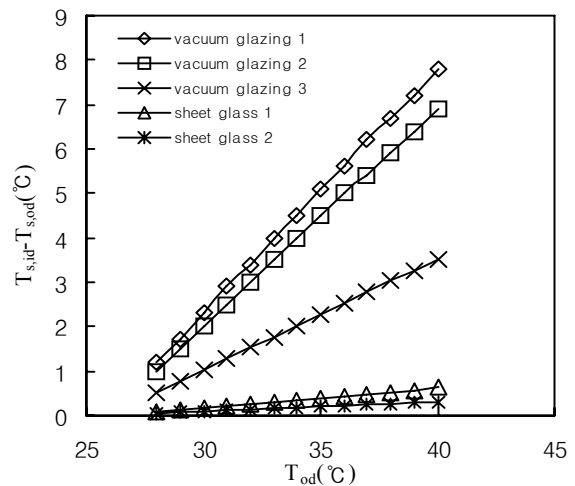


Fig. 4 Variations of temperature difference between outdoor glass surface and indoor glass surface with outdoor temperature in summer.

수하여 일반유리 대비 실내의 유리표면 온도차의 기울기가 훨씬 크다. 외기온도가 40°C일 때 단열성능이 가장 좋은 진공유리 1의 경우 실내의 유리표면 온도차가 약 8°C인 반면 단열성능이 가장 나쁜 판유리 2의 경우 약 0.5°C로 나타났다.

한편 진공유리 내부압력에 따른 단열성능은 내부압력이 감소할수록 단열성능이 향상되나 10⁻³ torr에 근접할수록 증가 폭이 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 동계 실외온도 변화에 따른 실내의 유리표면 온도차를 보여준다. 이때 실내온도는 20°C이고, 실

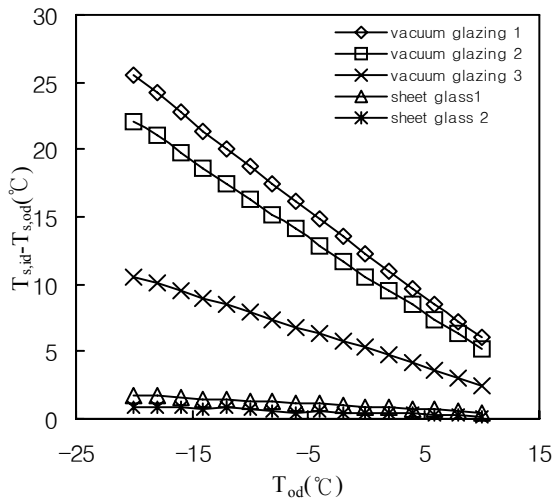


Fig. 5 Variations of temperature difference between indoor glass surface and outdoor glass surface with outdoor temperature in winter.

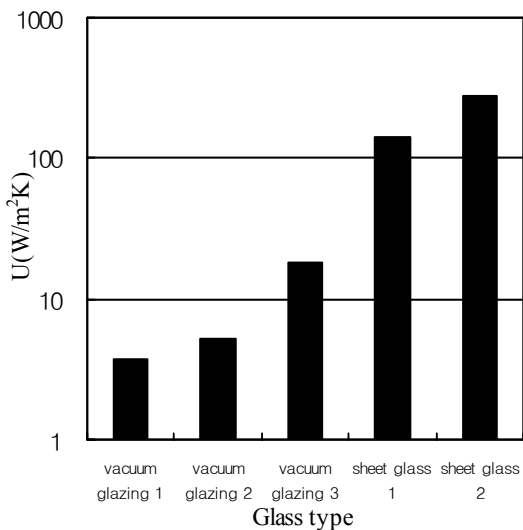


Fig. 6 Variation of heat transmission rate with glasses.

외온도는 -20~10°C로 변화한다. 실외온도가 낮아져 실내온도와의 차이가 커질수록 실내의 유리표면 온도는 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 이는 하계와 유사하며 실내의 온도차가 커질수록 온도차이가 더욱 커져 진공유리의 단열효과가 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

진공유리 및 판유리 종류별 열관류율을 Fig. 6에 나타냈다. 단열성능이 가장 높은 진공유리 1의 열관류율은 3.7 W/m²K, 단열성능이 가장 낮은 판유리 2의 열관류율은 280 W/m²K로 진공유리 1이 판유리 2 대비 단열성능이 약 75배 우수함을 알 수 있다. 만약 진공유리 내부압력을 진공유리 1의 10⁻³ torr보다 더욱 낮춘다면 단열성능이 더욱 향상되리라 사료된다.

4.2 결론 수치해석

Fig. 7에 하계 실외온도에 따른 실외측 유리 표면 온도 차이 변화를 나타냈다. 이때 실내온도는 26°C이고 외기온도는 28~40°C로 변화한다. 실외온도 40°C에서 실외측 표면온도는 단열성능이 가장 높은 진공유리 1이 38.6°C, 단열성능이 가장 낮은 판유리 2가 37.0°C로 약 1.6°C의 차이밖에 나지 않는다. 또한 단열성능이 가장 낮은 판유리 2의 경우 유리표면 온도와 실외기 온도의 차이가 약 3°C로 결로 발생 확률이 비교적 낮음을 예측할 수 있다.

실제 결로 발생 조건을 확인하기 위하여 Fig. 8에 하계 실외온도에 따른 실외 유리표면에서 절대습도 변화를 나타냈다. 또한 외기 상대습도를 40~90%로 변화시키면서 응결이 발생하는 절대습도 경계선도 각각 나

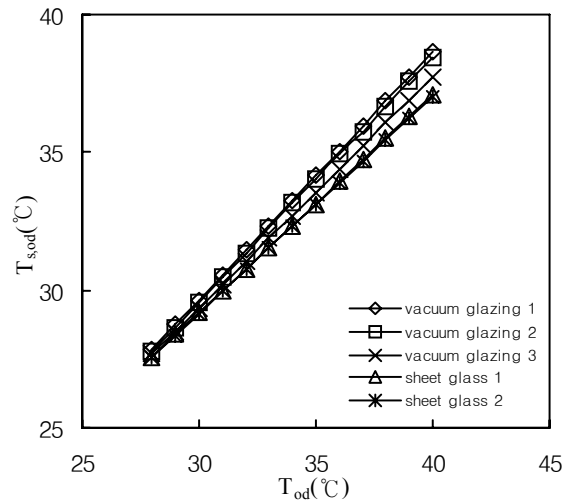


Fig. 7 Variations of outdoor glass surface temperature with outdoor temperature in summer.

타냈다. 따라서 유리표면의 절대습도가 이러한 경계선 위에 위치하면 응결이 발생하지 않고 아래에 위치하면 응결이 발생한다는 것을 의미한다. 하계에는 만약 외기 상대습도가 80% 이하라면 모든 유리에서 결로가 발생하지 않는다. 외기 상대습도가 90%에서는 일반유리 1, 2는 외기온도 약 35°C, 진공유리 3은 약 38°C에서 결로가 시작되는 반면 진공유리 1과 2는 결로가 발생하지 않는다. 따라서 여름철의 경우 결로의 발생이 상대적으로 쉽지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9에 동계 실외온도에 따른 실내측 유리 표면온도 차이 변화를 나타냈다. 이때 실내온도는 20°C이고

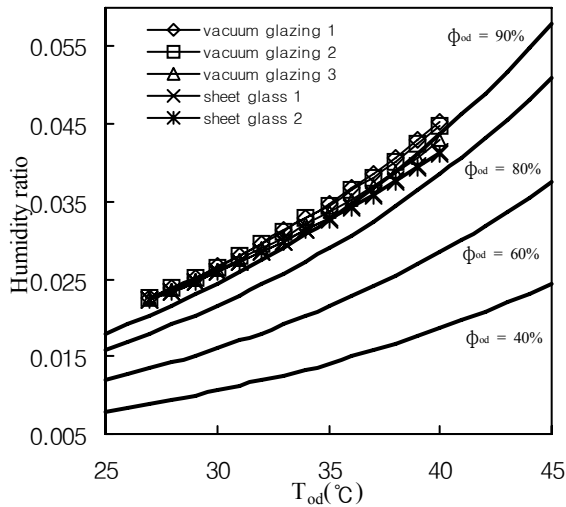


Fig. 8 Variations of humidity ratio on outdoor glass surface with outdoor temperature in summer.

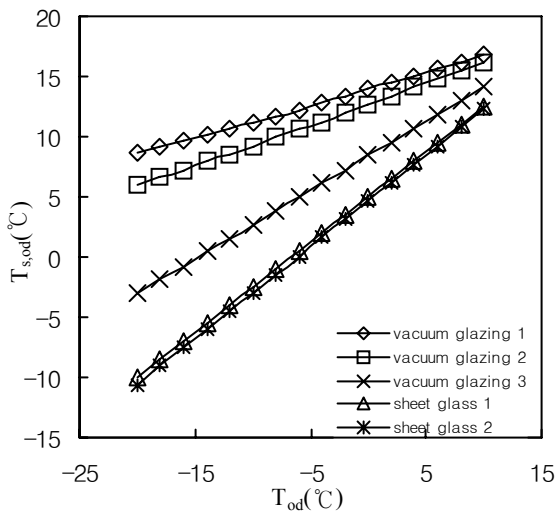


Fig. 9 Variations of indoor glass surface temperature with outdoor temperature in winter.

외기온도는 -20~10°C로 변화한다. 실외온도 -20°C에서 실내측 표면온도는 단열성능이 가장 높은 진공유리 1이 약 8.6°C, 단열성능이 가장 낮은 판유리 2가 약 -10°C로 약 18.6°C의 큰 차이가 난다. 따라서, 단열성능이 가장 높은 진공유리 1의 경우도 실내 유리표면 온도와 실내 공기온도의 차이가 약 11.4°C로 열악한 상황에서 결로가 발생할 가능성이 있다.

실제 결로 발생 조건을 확인하기 위하여 Fig. 10에 동계 실외온도에 따른 실내 유리표면에서 절대습도 변화를 나타냈다. 또한 실내공기 상대습도를 40~70%로 변화시키면서 응결이 발생하는 절대습도 경계선도 각각 나타냈다. 동계에는 만약 실내공기 상대습도가 50% 이상이라면 모든 유리에서 결로가 발생할 수 있다. 실내공기 상대습도 40%에서 일반유리 1, 2는 외기온도 약 2°C, 진공유리 3은 약 -5°C, 진공유리 2는 약 -20°C에서 결로가 발생된다. 진공유리 3은 실외공기 -20°C에서 상대습도가 50% 이상이어야 결로가 발생하기 시작한다. 따라서 동계에 진공유리 결로 방지 성능이 더욱 효과적이 된다.

4.3 결로 성능 실험

진공유리의 단열 및 결로 성능을 알아보기 위하여 3개의 200 mm(W)×200 mm(D)×10.15 mm(H) 크기 진공유리 샘플을 제작하였다. 먼저 이 3개의 샘플에 대해 열관류율을 측정하고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 제작한 진공유리 중 샘플 2의 열관류율이 5.7 W/m²K로 가장 뛰어난 단열성능을 보여주었는데 두께 10 mm인 일반유리 114 W/m²K 대비 약 1/20배 작음을 알 수

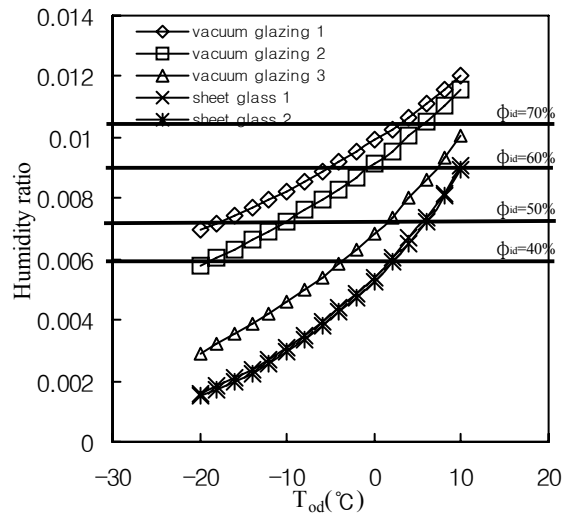


Fig. 10 Variations of humidity ratio on indoor glass surface with outdoor temperature in winter.

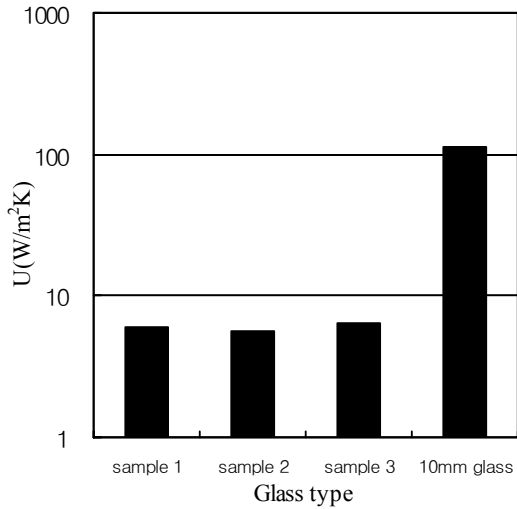


Fig. 11 Measure of heat transmission rate with glasses.

Table 3 Condensation Performance

Glass type	Ts[°C] (measured)	ΦCondensation[%] (calculated)	ΦCondensation[%] (observed)
Sample 1	13.6	67	72
Sample 2	15.6	74	79
Sample 3	14.2	69	73
10 mm sheet glass	2.5	32	26

있다. 향후 내부압력이 10^{-4} torr 이하인 진공유리를 제작한다면 어떤 단열재보다도 우수한 단열성능 확보가 가능할 것이다.

다음으로 3개의 진공유리 샘플을 이용하여 결로 실험을 수행하였는데 진공유리는 구리블럭 온도를 -8.0°C , 일반유리는 약 -3.3°C 를 맞추어 사용하였다. 이 구리블럭 온도는 실외온도로 환산하면 약 6°C 및 -2°C 에 해당한다. Table 3에 각 유리의 표면온도 측정 결과 및 결로발생 관찰 결과를 정리하였다. 열관류율이 가장 낮은 샘플 2의 경우 표면온도가 15.6°C , 샘플 1과 샘플 3의 경우는 각각 13.6°C , 14.2°C 로 측정되었다. 따라서 이론적으로 샘플 2가 챔버내 공기 상대습도 74%, 샘플 1이 67%, 샘플 3이 69%에서 결로가 발생함을 의미한다. 결로 발생 여부를 실험으로 직접 관찰한 결과 샘플 2의 경우 상대습도 79%, 샘플 1과 샘플 3의 경우 각각 72%, 73%에서 관찰되었다. 한편, 10mm 일반유리의 경우 구리블럭 온도가 상대적으로 높은 -3.3°C 인데도 불구하고 상대습도 약 24%일 때 결로가 발생하여 진공유리의 결로성능이 월등히 우수함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 외기온도 및 습도에 따른 진공유리의 단열 및 결로 성능을 수치해석하였고, 진공유리 시차품의 성능실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치해석 결과에 의하면 내부압력 10^{-3} torr인 진공유리 1의 열관류율은 일반유리에 비해 1/20정도 작아 단열 및 결로 성능이 획기적으로 개선된다. 진공유리 1의 경우 실외온도 40°C 일 때는 실외공기 상대습도 90% 이상에서도 결로가 발생하지 않고 실외온도 -20°C 에서도 실내공기 상대습도가 50% 이상이어야만 결로가 시작된다. 만약 10^{-3} torr 미만의 진공유리를 사용한다면 더욱 단열 및 결로 성능을 개선할 수 있을 것이다.

(2) 10^{-3} torr 진공 챔버에서 제작한 진공유리 중 샘플 2의 열관류율은 약 $5.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 나타났는데 이러한 수치는 내부압력 10^{-2} torr인 진공유리 2와 비슷한 수준이다. 동계를 가정하고 냉수블럭을 이용하여 결로실험을 수행한 결과 실내 측 유리표면 온도가 약 15.4°C 로 측정되어 결로 발생 상대습도는 약 74%로 나타났다.

향후 Low-E 코팅 및 복층형식의 진공유리 개발을 통해 단열 및 결로 성능을 더욱 획기적으로 개선하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- Dewar, J. and Dewar, L., 1927, Collected papers of sir james dewar, Cambridge University Press, Cambridge.
- Zoller, A., 1913, Hohle glassscheibe, deutsches reich patenschrift : No. 387655.
- Bachli, E., 1987, Heat-insulating construction and/or lighting element, International Patent Application No : PCT/CH 86/00166.
- Robinson, S. J. and Collins, R. E., 1986, Evacuated windows-theory and practice, ISES solar world congress, International Solar Energy Society, Kobe, Japan.
- Lee, B. H., Yoon, I. S., Song, T. H., and Kwak, H. S., 2006, Experimental study on manufacturing of insulation vacuum glazing and measurement of the thermal conductance, Journal of KSME, Vol. 30, No. 251, pp. 715-828.
- Fang, Y., Hyde, T. J., and Hewitt, N., 2010, Predicted thermal performance of triple vacuum glazing, Solar

- Energy, Vol. 84, No. 12, pp. 2132-2139.
7. Kim, J. M., Lee, J. H., and Song, T. H., 2012, Vacuum insulation properties of phenolic foam, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, No. 19-20, pp. 5343-5349.
 8. Bernardi, A., Becherini, F., Bassato, G., and Bellio, M., 2006, Condensation on ancient stained glass windows and efficiency of protective glazing systems : two French case studies, Sainte-Chapelle(Paris) and Saint-Urbain Basilica(Troyes), Journal of Cultural Heritage, Vol. 7, No. 1, pp. 71-78.
 9. Werner, A. and Roos, A., 2007, Condensation tests on glass samples for energy efficient windows, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 91, No. 7, pp. 609-615.
 10. EES, 2012, F-chart Software LLC., V9.100-3D.
 11. Ansys CFX version 14, 2012, Ansys inc., User's Manual version 14.
 12. Determining the steady state thermal transmittance of fenestration systems, ASTM Standard.
 13. Lee, J. W. and Lim, J. M., 2004, The experimental study on a effect of Korean Paper(Hanji) on indoor humidity control, Korean J. Air-Conditioning and Ref. Eng, Vol. 16, No. 6, pp. 599-607.