

진공유리 단열 성능 3차원 수치해석에 대한 연구

박상준, 이영림*

*공주대학교 기계자동차공학부

e-mail: ylee@kongju.ac.kr

A Study on 3-dimensional Numerical Analysis of Adiabatic Performance for Vacuum Glazing

Sang Jun Park, Young Lim Lee

*Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요 약

인구증가와 지속적인 산업발전으로 인하여 에너지 소비가 급증하게 되면서 효율적인 에너지 사용의 필요성이 크게 대두되었다. 특히 건물의 창문을 통해 많은 에너지 손실이 일어나 이를 해결하고자 현재 로우이(low-emissivity)유리를 사용하고 있으나 이는 태양광의 유입을 줄이는 단순한 방법으로 여전히 상대적으로 높은 열관류율을 갖고 있다. 이를 해결하고자 현재 단열성능이 좋은 고효율 진공유리가 개발 중이나 아직 가격 및 성능 등의 문제로 본격적인 보급은 이루어지지 않고 있다. 본 논문에서는 내부압력, 지지기둥(spacer)의 길이 및 지름 등이 진공유리 성능에 미치는 영향을 3차원 수치해석을 통하여 알아보았다.

1. 서론

인구증가와 지속적인 산업발전으로 인하여 에너지 소비가 급증하게 되면서 효율적인 에너지 사용의 필요성이 크게 대두되었다. 특히 냉·난방을 사용하는 차량 및 건물에 있어서 단열성능이 우수한 건물 외장재나 Low-E(low-emissivity)유리 또는 진공유리를 사용하여 에너지 손실을 줄이는 것이 필요하다. 건물에서 손실되는 에너지는 벽체나 지붕, 창문 등을 통해 이루어지는데 창문을 통한 열손실량은 전체 열손실량의 약 20~40%로 큰 비율을 차지하고 있다. 이는 건물 외벽에 비해 약 6배의 수준으로 열적으로 가장 취약한 부분이기 때문이다. 따라서 일반 유리의 경우 단열 효과가 높지 않으므로 에너지 손실을 줄일 수 있는 유리에 대한 연구가 진행되고 있다. 현재 개발되고 있는 Low-E 유리는 냉난방과 관련된 적외선을 반사하는 방식으로 에너지 손실을 줄이고 있으나 이는 태양광의 유입을 줄이는 단순한 방법이며 난방에는 취약한 단점을 가지고 있다[1]. 진공유리의 개발에 있어 가장 중요한 기술은 두 장의 유리를 접합하는 것인데 현재 레이저 빔을 이용한 유리용접과, 저융점 글라스인 Frit를 사용한 유리

접합이 사용되고 있다[2].

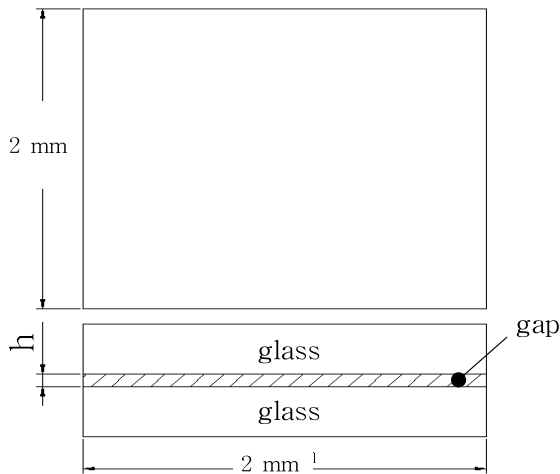
본 연구에서는 두 장의 유리 사이 간격과 압력에 따른 열관류율 변화를 살펴보고, 복사 효과도 알아보았다. 이를 위해 전도 및 대류, 복사를 고려한 복합 열전달 현상을 고려하였다. 한편, 지지기둥(spacer)의 길이와 지름에 따른 열관류율도 예측하였다.

2. 수치해석

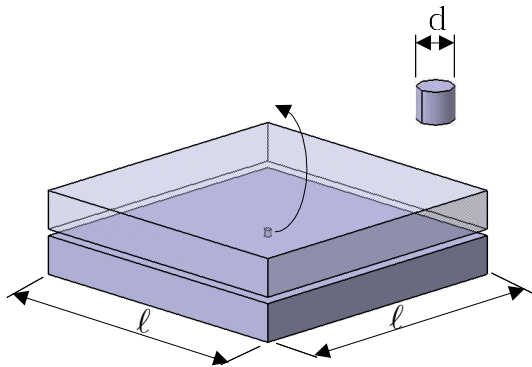
본 연구에서 고려된 유체유동은 3차원, 압축성, 정상상태, 층류유동을 가정하였다. 표 1은 수치해석에 사용된 모델의 조건을 보여주며, 그림 1은 유리사이 내부압력 변화에 따른 열전달 모델을 나타낸다. 유리는 고려하지 않고 내부 공기만 모델링하였다. 복사 유무와 유리 사이 내부 압력을 조절하여 열관류율을 예측하였다. 그림 2는 지지기둥의 지름과 사이 간격에 따른 모델을 나타냈다. 유리 두께는 무시하고 내부 공기만 모델링하였다. 지지기둥 지름 d 는 0.2, 0.4, 0.6 mm로 변화시켰고 지름을 0.4 mm로 고정하여 지지기둥 사이 간격 l 은 d 가 0.4 mm일 때 각각 13, 23, 33 mm인 경우로 가정하였다.

[표 1] 해석 모델 설정 조건

gap (mm)	pressure (torr)	Radiation
0.2	760	considered, not considered
	100,	
	10,	
	1,	
	10^{-1} ,	
	10^{-2} ,	
	10^{-3}	



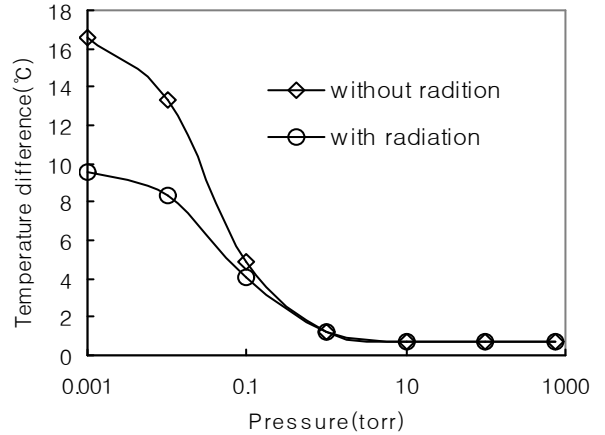
[그림 1] 내부압력 변화에 따른 열전달 해석 모델



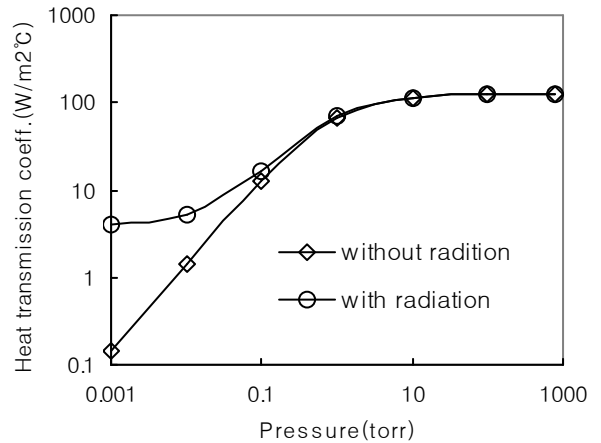
[그림 2] 지지기둥 지름 변화에 따른 열전달 해석 모델

실내 유리표면에는 20°C 와 대류열전달계수 $7 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 가정하였고, 실외 유리표면에는 3°C 와 대류열전달계수 $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 주었다.

해석에 사용된 격자 수는 약 32만개이고 3차원 형상 설계에는 Catia[3], 격자 생성에는 Gambit[4], 3차원 CFD 해석에는 상용 프로그램인 Fluent[5]를 사용하였다.



[그림 3] 내부압력에 따른 실내외 유리 표면 온도 변화



[그림 4] 내부압력에 따른 열관류율 변화

3. 결과 및 고찰

3.1. 진공유리 내부압력 변화에 따른 열관류율

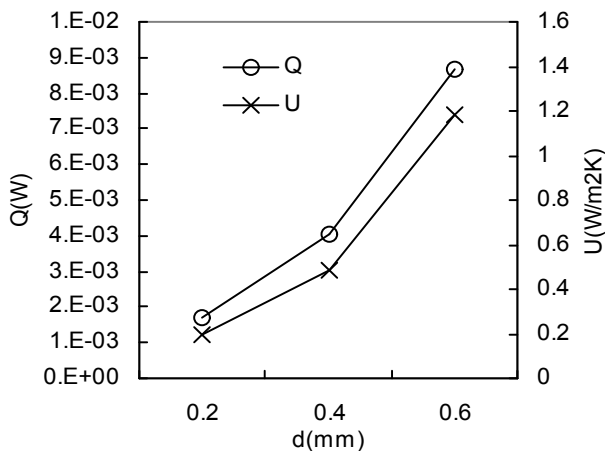
그림 3은 진공유리 간격이 0.2 mm일 때 내부압력에 따른 실내외 유리 표면 온도 변화를 나타냈다. 고려되어진 압력 범위에서 내부 공기속도는 매우 미미하여 공기의 대류로 인한 열전달 현상은 나타나지 않았다. 공기의 열전도율은 압력 감소에 따라 낮아지므로 실내외 유리 온도차는 압력이 감소할수록 점차 증가하였다. 복사효과는 유리사이의 압력이 대기압일 때는 거의 무시할 수 있지만 진공도가 강해질수록 상대적으로 중요해진다. 이는 완전 진공에서는 복사만이 유일한 열전달 수단이기 때문이다. 내부압력이 감소함에 따라 단열 효과가 증가하여 대기압에서는 1°C 이하이던 실내외 온도차가 10^{-3} torr에서는 약 10°C 정도로 증가함을 알 수 있다.

그림 4는 내부 압력변화에 따른 열관류율을 나타낸

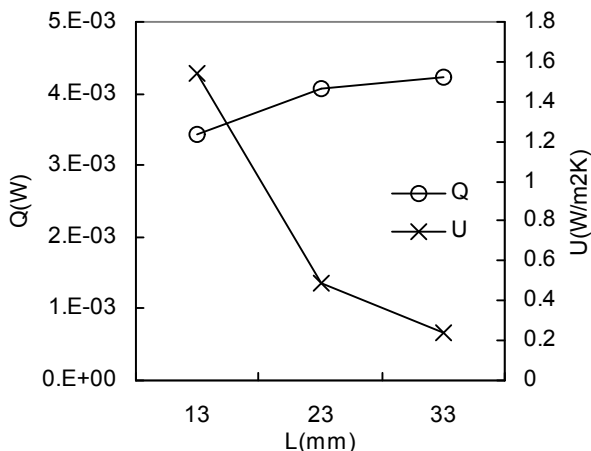
다. 내부압력이 대기압일 때 열관류율은 약 $124 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 예측되었고 10^{-3} torr에서는 약 $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 예측되었다. 따라서 내부압력이 0.01 torr 이하인 진공유리에서는 복사가 중요한 열전달 모드이므로 저방사율 코팅 등을 이용한 단열 효과 증대가 효율적임을 알 수 있다.

3.2. 지지기둥을 통한 열관류율

그림 5는 지지기둥의 지름에 따른 열관류율 및 지지기둥을 통해 전도되는 열량 변화를 나타낸다. 지름이 0.2 mm일 때 전도되는 열량이 1.7 mW인데 지름이 0.6 mm로 커지면 열전달량도 8.7 mW로 증가한다. 또한, 지름 0.2와 0.6 mm 일 때 열관류율은 각각 $0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$, $1.18 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 예측되어 지지기둥의 지름이 커질수록 단열성능이 악화됨을 알 수 있다. 지름이 0.6 mm 일때 지지기둥을 통한 열관류율은 10^{-3} torr의 진공유리에 있어서 기체 전도와 복사 전도에 의한 열관류율 합이 25 %를 초과하게 된다.



[그림 5] 지지기둥 지름에 따른 열관류율 변화



[그림 6] 지지기둥 사이 간격에 따른 열관류율 변화

그림 6에 진공유리의 지지기둥 사이 간격에 따른 열관류율 및 지지기둥을 통해 전도되는 열량변화를 나타내었다. 사이 간격이 증가하면 기둥을 통해 전도되는 열량의 증가는 크지 않으나 열관류율은 급속히 떨어지는 경향을 보인다. 간격이 13 mm와 33 mm 일 때 열관류율은 약 $1.54 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 예측되어 33 mm일 때가 단열성능이 약 6 배 이상 우수하다.

3. 결론

본 연구에서는 진공유리의 간격과 내부 지지기둥의 지름과 길이 변화에 따른 열관류율 변화를 3차원 수치해석 모델을 이용하여 예측하였다. 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다

1) 진공 유리 내부압력을 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ torr 사이로 가정하였을 경우 기체의 전도를 통한 열전달은 미미해지는 반면 복사 열전달은 매우 중요하게 된다. 10^{-3} torr에서 실내외 유리 온도 차는 복사를 고려하였을 때가 7°C 정도 더 감소하게 된다.

2) 진공유리 내부의 공기는 자연 대류가 형성되지 않아 대류에 인한 열전달은 무시할 수 있다.

3) 지지기둥의 지름이 커질수록 열관류율은 증가하였고 지지기둥의 사이 간격이 커질수록 열관류율은 감소하였다. 이는 우수한 단열성능 확보를 위해서는 지지기둥의 지름은 작고 사이 간격은 길어야 하지만 내외부 압력차를 견딜 수 있는 최소한의 지지기둥의 지름과 사이 간격 확보가 우선되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업을 통해 연구된 결과임

참고문헌

- [1] Hwan-Chul Lee, "Characteristics of H₂/O₂ gas mixture fabricated by water electrolysis," Journal of the New science Research, Vol. 1, pp. 43~55, 1998.
- [2] J. J. Funley, "Heat treatment and bending of low-E glass," Thin Solid Films, volume 351, Issues 1-2, pp. 264~273, 1999.
- [3] Catia V5 R17, Dassault Systems, 2006
- [4] Gambit, Fluent Inc., Lebanon, NH 2005
- [5] Fluent 6.1, Fluent Inc., Lebanon, NH 2005.