

# 진공유리의 설계 조건에 따른 단열 성능 연구

황일선<sup>+</sup>, 이영림<sup>\*</sup>

(Manuscript received: Jan, 28, 2012 / Revised: Apr, 14, 2012 / Accepted: Apr, 18, 2012)

## A Study of Adiabatic Performance for Vacuum Glazing with Design Conditions

Il Sun Hwang<sup>+</sup>, Young Lim Lee<sup>\*</sup>

### Abstract

Recently, the low-emissivity glass has been used to reduce the energy loss through building windows. However, it simply reduces the inflow of solar rays and has a relatively high heat transmission coefficient. To solve the problems, a high-efficiency vacuum glazing has been under development but it has not been actively used due to its high price and insufficient performance. In this paper, the effects of internal pressure, pillar (spacer) height, pillar diameter, pillar interval, emissivity etc. on the performance of vacuum glazing have been analyzed with three-dimensional computational fluid dynamics and structural analysis. As a result, the performance of vacuum glazing was predicted more accurately and major factors that determine the performance of vacuum glazing were optimized.

**Key Words :** Vacuum glazing(진공유리), Adiabatic performance(단열성능), Heat transmission coefficient(열관류율), Spacer(지지기둥), Numerical analysis(수치해석)

## 1. 서론

인구증가와 지속적인 산업발전으로 인하여 에너지 소비가 급증하게 되면서 효율적인 에너지 사용의 필요성이 크게 대두되었다. 특히 냉난방을 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 최근 들어 에너지 손실

을 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<sup>(1)</sup>. 진공유리를 개발하기 위해서는 두 장의 유리를 접합해야 하는데 현재 레이저 빔을 이용한 유리용접과, 저융점 유리인 Frit를 사용한 유리접합이 사용되고 있다<sup>(2)</sup>.

진공유리에 대한 연구는 1893년 Dewar Flask<sup>(3)</sup>로부터 시작되었으나 동심원 형상의 구조였다. 하지만 Zoller<sup>(4)</sup>가 평판 유리 사이에 구조물을 끼워 넣어 압력차를 극복하는 방법을 제안한 이후로 평판 진공유리에 대한 연구가 이루어지고 있다. Bachli<sup>(5)</sup>는 진공유리 접합시 주로 모서리에서 열팽창과 관련된 문제점을

<sup>+</sup> 공주대 대학원 기계공학과

<sup>\*</sup> 교신저자, 공주대학교 기계설계공학전공 (ylee@kongju.ac.kr)

주소: 331-717 충청남도 천안시 서북구 천안대로 1223-24

지적하였다. 1989년 Robinson과 Collins<sup>(6)</sup>는 진공유리 제작을 위하여 저융점 유리인 Frit를 사용하여 접합시킨 후 진공튜브를 이용하여 진공을 생성하였다. 국내에서는 이보화 등<sup>(7)</sup>이 모서리를 통한 열전달 손실을 최소화할 수 있도록 고무 가스킷을 유리사이에 끼우고 진공 그리스를 이용하여 접합하는 방법을 제시하였다.

진공유리 설계에 있어서 이론적인 해석 역시 수행되어 왔는데 모서리를 통한 열전도<sup>(7)</sup>, 지지기둥을 통한 열전도<sup>(8)</sup>, 복사열전달<sup>(9)</sup>, 잔류가스 전도<sup>(10)</sup> 등이 대표적인 예이다. 하지만 이러한 해석은 대부분 1차원 혹은 여러 가정을 통해 단순화 과정을 거친 이론 해석이 대부분이어서 전도, 대류, 복사를 모두 고려한 3차원 수치해석의 필요성이 대두되었다.

따라서, 본 연구에서는 진공유리의 단열성능을 최적화하기 위해 주요 인자인 유리 간격, 내부 압력 및 방사율, 지지기둥(spacer)의 지름과 배치 간격에 따른 열관류율 변화를 3차원 CFD(Computational Fluid Mechanics)를 이용하여 고찰하였다. 이를 위해 전도, 대류 및 복사를 포함하는 복합 열전달 현상을 고려하였다. 또한, 구조해석을 실시하여 열성능을 최적화하는 제한조건으로 사용하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석

본 연구에서 고려된 유체유동은 3차원, 정상상태, 압축성, 층류유동을 가정하였고 Table 1에 수치해석을 위해 고려한 주요 인자들의 범위를 나타냈다. 복사열전달은 DO(Discrete Ordinate) 모델<sup>(11)</sup>을 사용하였다. Fig. 1은 내부압력, 지지기둥의 지름 및 배치간격, 유리사이 간격 등의 변화에 따른 진공유리 성능 예측을 위한 모델을 보여주고 Fig. 2는 해석에 사용한 격자 시스템이다.

Table 1 Range of major factors for numerical analysis

glass gap (mm)	0.2~1
pressure (torr)	$10^{-4}$ ~760
spacer interval (mm)	13~33
spacer diameter (mm)	0.1~0.4

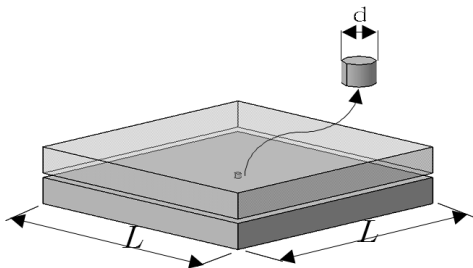


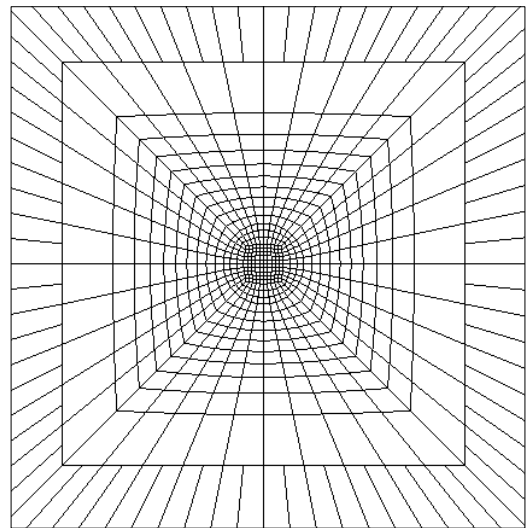
Fig. 1 Schematic of Heat transfer model

육면체 격자를 사용하였고 격자수를 줄이기 위하여 지지기둥에서 일정거리 떨어진 곳에서 격자수가 다른 임의의 계면(arbitrary interface)를 사용하였다. Fig. 3은 내부압력, 지지기둥의 지름 및 배치간격, 유리사이 간격 등의 변화에 따른 진공유리 성능 예측을 위한 모델을 보여준다.

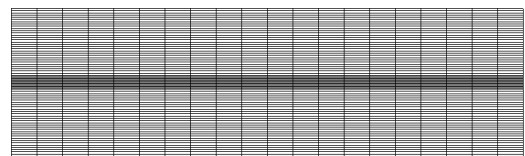
전형적인 국내 동절기 상황을 모사하기 위해 실내 유리표면에는 20℃와 대류열전달계수  $7W/m^2K$ 를 가정하였고, 실외 유리표면에는 3℃와 대류열전달계수  $13W/m^2K$ 를 주었다.

CFD에 사용된 격자 수는 약 32만개이고 3차원 형상 설계에는 Catia<sup>(12)</sup>, 격자 생성에는 Gambit<sup>(13)</sup>, 3차원 CFD 해석에는 상용 프로그램인 Fluent<sup>(11)</sup>를 사용하였다.

진공유리의 간격 즉, 지지기둥 높이가 유리 응력에 미치는 영



(a) top view



(b) front view

Fig. 2 Mesh system for CFD

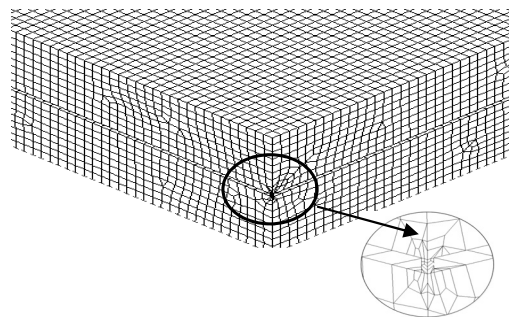


Fig. 3 Mesh system for structural analysis

향을 해석하기 위하여 구조해석을 수행하였는데 우리는 소다 라임(soda lime) 유리, 지지기둥은 지르코니아(zirconia)를 가정하였고 물성치는 Table 2에 나타냈다. 구조해석에 사용된 격자 수는 Fig. 3과 같이 약 4만개이고 Ansys Workbench<sup>(14)</sup>를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 진공유리 내부압력 변화에 따른 열관류율

Fig. 4는 소다 라임 유리에서 유리간격 0.2mm, 지지기둥 간격 23mm일 때 내부압력에 따른 실내외 유리 표면 온도 변화를 보여준다. 고려되어진 압력 범위에서 내부 공기속도는 매우 미

Table 2 Material properties for structural analysis

	soda lime glass	zirconia
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.44	5.75
Young's modulus (GPa)	70	205
Poisson's Ratio	0.23	0.23
Compressive Strength (MPa)	325	2000

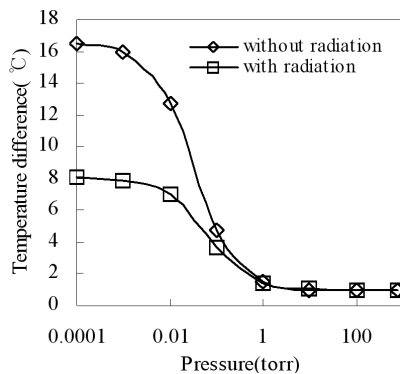


Fig. 4 Temperature change of indoor and outdoor glass surface with internal pressure

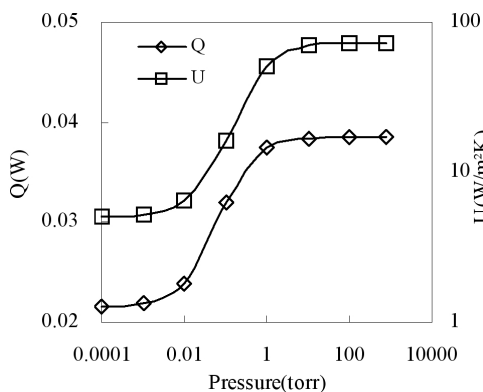


Fig. 5 Variations of heat transmission coefficient with internal pressure

미하여 공기의 대류로 인한 열전달 현상은 나타나지 않았다. 공기의 열전도율은 압력 감소에 따라 낮아지므로 실내외 유리 온도차는 압력이 감소할수록 점차 증가하였다. 복사효과는 유리 사이의 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<sup>-4</sup>torr에서는 약 8°C 정도로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5에 내부 압력변화에 따른 열관류율을 나타냈다. 이 때 Q는 유리 통과 열량, U는 열관류율을 의미한다. 내부압력이 대기압일 때 열관류율은 약 73W/m<sup>2</sup>K로 예측되었고 10<sup>-4</sup>torr에서는 약 5W/m<sup>2</sup>K로 예측되었다. 따라서 내부압력이 0.01torr 이하인 진공유리에서는 복사가 중요한 열전달 모드이므로 저방사율 코팅 등을 이용한 단열 효과 증대가 효율적임을 알 수 있다.

#### 3.2 유리 간격에 따른 열관류율

Fig. 6에 소다 라임 유리에서 내부압력 10<sup>-4</sup>torr, 지지기둥 간격 23mm일 때 유리 간격에 따른 열관류율을 나타냈다. 유리 간격이 1mm일 때 열관류율은 약 4.88W/m<sup>2</sup>K로 예측되었다. 이는 유리 간격이 0.2mm일 때의 열관류율 5.0W/m<sup>2</sup>K와 거의 차이가 없다. 따라서, 유리 간격에 따른 단열 성능은 거의 변화가

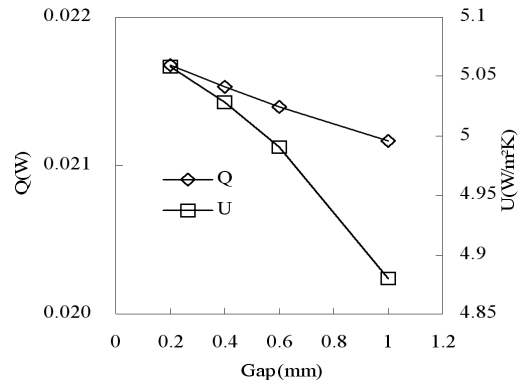


Fig. 6 Variations of heat transmission coefficient with glass gap

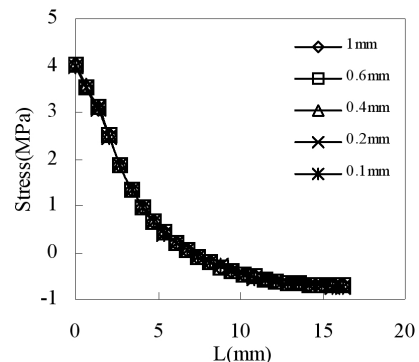


Fig. 7 Variations of stress of vacuum glass surface

없고 이는 제조시 유리한 유리 간격을 선택하는 것이 최선임을 의미한다.

유리 간격 즉, 지지기둥의 높이에 따라 유리 파괴 여부를 검토하기 위하여 Fig. 7에 유리 간격에 따른 유리 표면의 응력 변화를 나타냈다. 보통 유리의 인장강도는 수증기에 민감하며 진공 유리 내부의 경우는 수증기가 존재하지 않아 유리 강도가 크게 증가하므로 유리 외부 표면의 인장응력만 고려하면 된다<sup>(15)</sup>. 지지기둥 중심 위치에 해당하는 진공유리 외부 표면 지점에서 인장응력은 최대치를 보이고 이 곳으로부터 멀어질수록 급격히 감소하다 일정해지는데 이 때는 상대적으로 약한 압축응력으로 변화함을 알 수 있다. 유리 간격이 0.2mm일 때 최대 인장응력은 약 4MPa이고 지지기둥 중심부로부터 15mm 이상 멀어지게 되면 약 0.7MPa의 압축응력으로 일정하게 된다. 한편, 유리 간격을 0.1~1.0mm 사이로 변화시켜도 응력의 변화는 거의 관찰되지 않아 구조적인 측면에서 유리 간격은 문제가 되지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 유리 방사율에 따른 열관류율

진공유리의 열전달은 주로 복사에 의해 일어나는데 저방사율 코팅에 따른 열관류율 변화를 Fig. 8에 나타냈다. 이 때  $\epsilon$ 은 방사율을 의미하며 진공유리 내부압력은  $10^{-4}$  torr로 가정하였고 점선은 유리 표면의 방사율이 1인 경우의 열관류율을 보여준다. 저방사율 물질을 표면에 코팅하였다고 가정하면서 방사율을 임의로 0.2 혹은 0.1이 되도록 변화시켰는데 방사율 감소에 따라 열관류율이 획기적으로 감소함을 알 수 있다. 진공에 노출되어 있는 두 유리 표면 중 어느 쪽에 저방사율 코팅을 하더라도 효과는 거의 동일하며 양쪽 면에 저방사율 코팅을 한 것이 가장 효율적이다. 본 연구에서 고려한 진공유리의 경우 방사율 0.1을 양쪽 면에 가정한다면 열관류율을 약 0.43까지 감소시킬 수 있다. 이는 열전도율 약 0.003W/mK에 해당하는 값으로 스티로폼(styro-foam)의 0.033W/mK보다 단열 성능이 훨씬 우수하다는 것을 의미한다.

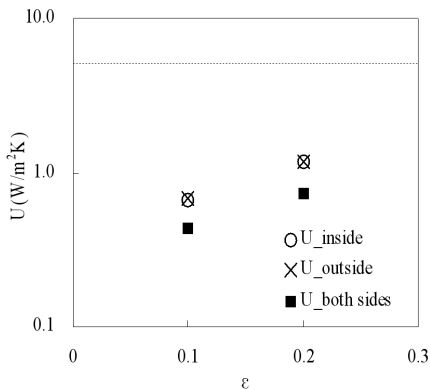


Fig. 8 Variations of heat transmission coefficient with emissivity

### 3.4 지지기둥을 통한 열관류율

Fig. 9는 소다 라임 유리에서 내부압력  $10^{-4}$  torr, 지지기둥 간격 23mm, 유리 간격 0.2mm일 때 지지기둥의 지름에 따른 열관류율 및 지지기둥을 통해 전도되는 열량 변화를 나타낸다. 지름이 0.2mm일 때 전도되는 열량이 1.7mW인데 지름이 0.6mm로 커지면 열전달량도 8.7mW로 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 예측

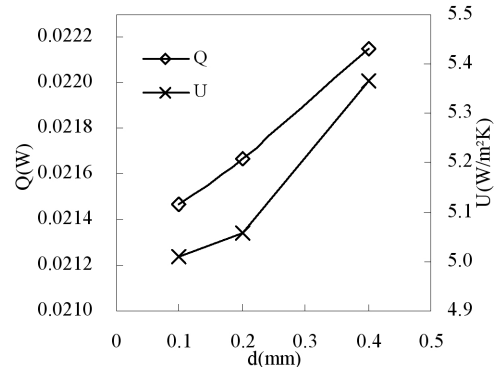


Fig. 9 Variations of heat transmission coefficient with spacer diameter

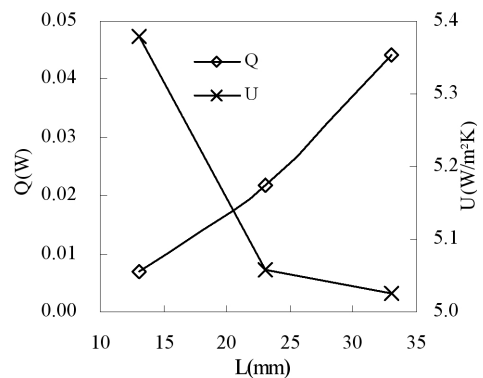


Fig. 10 Variations of heat transmission coefficient with spacer array distance

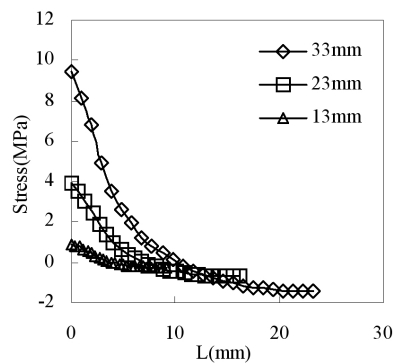


Fig. 11 Variations of stress of glass surface with spacer array distance

되어 지지기둥의 지름이 커질수록 단열성능이 악화됨을 알 수 있다. 지름이 0.6mm일 때 지지기둥을 통한 열관류율은  $10^{-4}$  torr의 진공유리에 있어서 기체 전도와 복사 전도에 의한 열관류율 합이 25%를 초과하게 된다.

Fig. 10에 진공유리의 지지기둥 배치 간격에 따른 열관류율 및 지지기둥을 통해 전도되는 열량변화를 나타내었다. 배치 간격이 증가하면 지지기둥을 통해 전도되는 열량은 증가하나 열관류율은 감소하는 경향을 보인다. 간격이 13mm, 23mm, 33mm로 변화할 때 열관류율은 조금씩 감소하여 단열성능이 다소 우수해짐을 알 수 있다. 하지만 Fig. 11에 의하면 배치간격이 33mm 정도 되면 유리 인장응력이 허용응력인 8MPa 이상이 되어 내구성에 문제가 발생할 수 있으므로 23mm 정도가 이상적임을 알 수 있다.

### 3.5 진공유리 단열성능 최적화 조건

열전달 및 구조적 측면을 동시에 고려할 때 최적의 진공유리

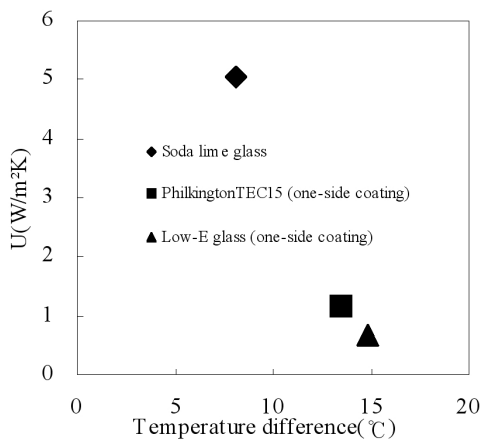


Fig. 12 Variations of heat transmission coefficient with glass type

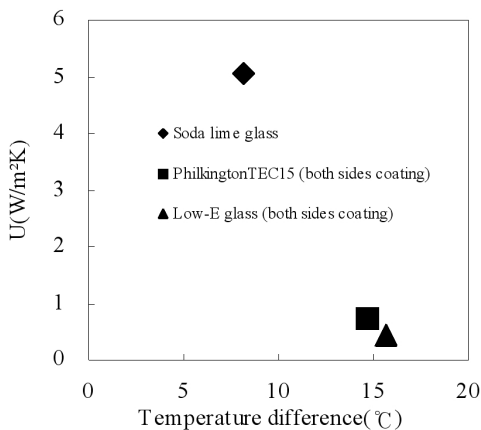


Fig. 13 Variations of heat transmission coefficient with glass type

성능을 위한 진공압력, 유리간격, 지지기둥 지름 및 배치간격은  $10^{-4}$  torr, 0.2mm, 0.2mm, 23mm로 판명되었다. 따라서, 이러한 최적화된 조건으로 방사율이 각각 0.84, 0.20, 0.1인 소다 라임 유리, Philkington TEC15 유리, Low-E 유리를 사용해서 진공유리를 제작할 경우 그에 따른 단열성능을 비교하여 보았다. 이는 실제 구현 가능한 유리의 조합으로 얻을 수 있는 최적의 열관류율을 얻고자 함이다.

Fig. 12는 소다 라임 유리, Philkington TEC15 유리, Low-E 유리에 대해 실내외 온도차에 따른 열관류율 변화를 보여준다. 이 때 Philkington TEC15 유리와 Low-E 유리는 한쪽면만 코팅 되었다고 가정하였다. 무코팅인 소다 라임 유리에 비해 저방사율코팅 유리가 획기적으로 열관류율이 낮았고 방사율이 낮을수록 열관류율이 감소하여 방사율이 0.1인 Low-E 유리의 경우 약  $0.7W/m^2K$ 의 열관류율을 나타냈다. Fig. 13에서와 같이 양쪽면 모두를 코팅하였을 경우 열관류율은  $0.43W/m^2K$  까지 저감이 가능하다. 이 경우 실내외 온도차는 약  $15.6^{\circ}C$ 로써 단열성능이 매우 우수함을 의미한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 진공유리의 성능을 결정짓는 주요 인자들의 변화에 따른 단열성능을 3차원 CFD 및 구조해석 모델을 이용하여 분석하였다. 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 진공 유리 내부압력을  $10^{-4}$  torr 이하로 유지하면 기체의 전도를 통한 열전달은 무시할 수 있다. 또한, 진공유리 내부에는 자연 대류를 형성되지 않아 대류에 인한 열전달은 매우 미미하고 복사만이 주요 열전달 모드가 된다.
- (2) 유리 간격에 따른 단열 성능은 거의 변화가 없고 구조적으로도 문제가 없으므로 이는 제조시 경제적인 유리 간격을 선택하는 것이 최선임을 의미한다. 유리 표면의 방사율은 낮을수록 단열성능에 유리하고 특히 양면 저방사율 코팅을 통해 유효 방사율을 더욱 낮출 수 있다.
- (3) 열전달 및 구조적 측면을 동시에 고려할 때 최적의 진공유리 성능을 위한 진공압력, 유리간격, 지지기둥 지름 및 배치간격은  $10^{-4}$  torr, 0.2mm, 0.2mm, 23mm로 판명되었는데 0.1 이하의 낮은 저방사율 양면 코팅을 이용하면 최고의 단열 성능을 얻을 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업을 통해 연구된 결과임.

## References

- (1) Schaefer, C., Brauer, G., Szczyrbowski, J., 1997, "Low emissivity coatings on architectural glass," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 93, No. 1, pp. 37~45.
- (2) Funley, J. J., 1999, "Heat Treatment and Bending of Low-E Glass," *Thin Solid Films*, Vol. 351, No. 1~2, pp. 264~273.
- (3) Dewar, J., and Dewar, L., 1927, *Collected Papers of Sir James Dewar*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (4) Zoller, A., 1913, *Hohle Glasscheibe*, Deutsches Reich Patenschrift: No.387655.
- (5) Bachli, E., 1987, *Heat-insulating Construction and/or Lighting Element*, International Patent Application No: PCT/CH 86/00166.
- (6) Robinson, S. J., and Collins, R. E., 1986, "Evacuated Windows-theory and Practice, ISES Solar World Congress," *International Solar Energy Society*, Kobe, Japan.
- (7) Lee, B. H., Yoon, I. S., Song, T. H., and Kwak, H. Sang., 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.
- (8) Wilson, C. F., Simko, T. M., and Collins, R. E., 1998, "Heat Conduction Through the Support Pillars in Vacuum Glazing," *Solar Energy*, Vol. 63, No. 6, pp. 393~406.
- (9) Geotti-Bianchini, F., and Lohrengel, J., 1989, "Measured angular distribution of the emissivity and calculated radiation heat transfer of architectural coated flat glass, Part 1, Theory," *Glastechnische Berichte*, Vol. 62, No. 9, pp. 312~319.
- (10) Springer, G. S., 1971, *Heat Transfer in Rarefied Gases, Advances in Heat Transfer*, Academic Press, New York, Vol. 7, pp. 163~218.
- (11) Ansys, 2005, *Fluent 6.1*, Fluent Inc.
- (12) Catia, 2006, *Catia V5 R17*, Dassault Systems.
- (13) Gambit, 2005, *Gambit Version 2.3.16*, Fluent Inc.
- (14) Ansys Workbench version 12.1, 2009, *User's Manual version12.1*, Ansys inc.
- (15) Collins, R. E., Fischer-cripps, A. C., 1991, "Desin of Support Pillar Arrays in Flat Evacuated Windows," *Australian Journal of Physics*, Vol. 44, No. 5, pp. 545~563.