

진공챔버 내 프리트 이용 진공유리 봉지공정 최적화에 관한 연구

박상준¹, 이영림^{2*}

¹공주대학교 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

A Study on Optimization of Vacuum Glazing Encapsulating Process using Frit inside a Vacuum Chamber

Sang Jun Park¹ and Young Lim Lee^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Kongju National University

²Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 냉난방을 사용하는 가정에서는 대부분 창문을 통해 열손실이 이루어지고 있는데 이를 방지하기 위해 Low-E 유리, 복층유리 또는 진공유리가 사용되고 있다. 본 논문에서는 진공유리 제작공정의 최종공정인 봉지공정에 대한 연구가 수행되었는데 기존 상압 접합이 아닌 진공챔버 내 접합이 고려되었다. 봉지과정의 효율성을 위해 진공챔버 내에서 히터온도에 따른 프리트 용융온도 및 접합시간을 최적화하였고 열응력으로 인한 유리 파손을 방지하기 위해 유리 예열온도를 최적화하였다. 이러한 결과를 바탕으로 성공적으로 진공유리를 제작하였고 측정된 열관류율은 약 $5.7\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 로 진공유리 내부압력은 약 10^{-2} torr로 판명되었다.

Abstract In houses that use heating and cooling system, most of heat loss occurs through the windows, so that low-E glass, double-layered glass, and vacuum glazing are used to minimize the heat loss. In this paper, an encapsulating process that is a final process in manufacturing the vacuum glazing has been studied, and bonding in a vacuum chamber rather than atmospheric bonding was considered. For the efficiency of the encapsulating process, frit-melting temperature and bonding time were optimized with heater temperature, and the glass preheating temperature was optimized to prevent glass breakage due to thermal stress. Thus the vacuum glass was successfully manufactured based on these results and heat transmission coefficient measured was about $5.7\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ which indicates that the internal pressure of the vacuum glazing is 10^{-2} torr.

Key Words : Bonding temperature, Frit, Heat transmission coefficient, Vacuum glazing, Vacuum chamber

1. 서론

지속적인 산업발전으로 인해 화석연료의 고갈 및 대체에너지의 효율성 문제로 인해 에너지 절약의 필요성이 대두되고 있다. 따라서, 냉난방을 사용하는 가정이나 차량에서 우수한 건물 외장재나 복층유리를 사용하여 에너지 손실을 줄이고 있다. 건물에서 손실되는 에너지는 주로 창문, 벽체 그리고 지붕 등을 통해 일어나는데 창문

을 통한 열손실은 20~40 %로 상당히 큰 비율을 차지하고 있다. 열손실을 줄이기 위해 Low-E(Low emissivity)유리가 사용되고 있지만 Low-E 유리는 태양광의 유입을 줄이는 단순한 방법으로 난방에는 취약한 단점을 가지고 있다.[1] 진공유리는 두 장의 유리 사이의 잔류 공기를 제거하여 진공상태로 만들어 전도 및 복사를 통한 열전달을 최소화한 제품이다. 유리 모서리 접합은 내부의 진공상태를 유지 시켜주기 위하여 유리 접착제를 사용하며, 내부

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

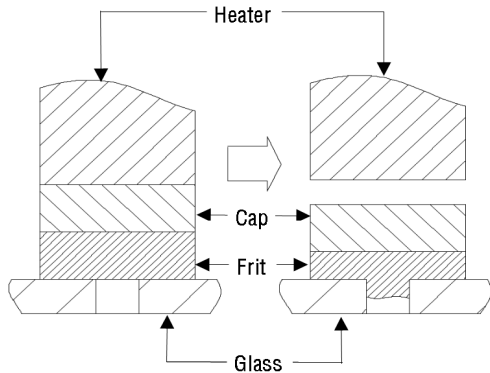
*Corresponding Author : Young Lim Lee (Kongju University)

Tel: +82-41-521-9261 email: ylee@kongju.ac.kr

Received January 22, 2013

Revised February 4, 2013

Accepted February 6, 2013



[Fig. 1] Schematic of an encapsulating process of vacuum glazing

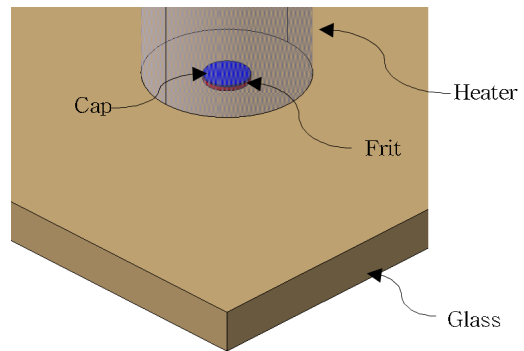
의 진공상태를 유지하는 구조를 갖는다.[2,3] 진공유리는 1893년 기본적인 개념이 시작되었으며 이 후 Zoller[4]는 대류 열전달 계수를 최소화할 수 있는 방법으로 두 장 유리 사이에 지지대를 설치하여 진공을 유지하며 대기압을 견딜 수 있는 방법을 제시하였다. 1976년 Falbel[5]에 의해 진공을 뽑기 위한 펌프배기튜브(Pump-out tube)가 제안되었으며 1987년 Benson[6]은 진공챔버 안에서 레이저를 이용하여 모서리를 용접하는 진공유리 제조방식을 제안하였다. 1997년에 이르러 Lenzen 등[7]은 진공유리 모서리 접합을 위해 저융점 글라스를 바른 후 약 500 °C의 가열로에 넣어 유리를 접합하는 기술을 개발하였다. Fang 등[8]은 3장의 유리를 이용한 진공유리의 열관류율을 수치해석 적으로 예측하였으며, Kim 등[9]은 단열성능을 높이기 위해 단열성능이 우수한 페놀 폼(Phenolic foam)을 유리사이에 위치시켜 열전도율을 향상시켰다.

진공유리를 상압에서 제작하려면 진공펌프로 내부공기를 배출하고 무연납, 구리캡, 초음파 혼(Ultrasonic horn)을 이용하여 봉지과정을 수행한다. 하지만, 초음파를 발생시키는 진동소자의 온도가 150 °C를 넘어가게 되면 수명이 단축되어 추가적인 방열시스템이 요구된다. 그러므로 Fig. 1과 같이 저융점 유리인 프리트(Frit)를 이용한 유리접합 역시 또 다른 봉지방법이다. 보통 프리트의 용융점은 450 °C로 유리의 용융점인 650 °C보다 낮아 유리에 영향을 미치지 않은 상태에서 봉지 작업을 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 프리트를 이용한 진공 챔버 내 봉지작업을 최적화하기 위해 프리트 용융온도 및 접합시간을 연구하고자 하였고 열응력으로 인한 유리 파손방지를 위해 유리표면 예열온도도 결정하고자 하였다. 한편, 이러한 결과를 바탕으로 진공유리를 제작한 후 열관류율 측정을 통한 진공유리 성능 역시 알아보하고자 하였다.

[Table 1] Sizes and material properties for a numerical model

Part	Size(mm)	Material	Thermal conductivity (W/m ² K)
Glass	60×60×5	Glass	1
Heater	∅16×280	STS	15.1
Cap	∅4.5×0.2	Ceramic	7.7
Frit	∅4.5×0.5	Frit	5



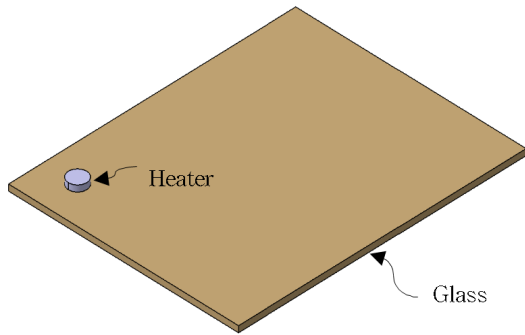
[Fig. 2] Schematic of a numerical model for boiling time of an encapsulating process

2. 수치해석 및 실험방법

2.1 수치해석

먼저 프리트의 접합시간을 알아보기 위한 수치해석을 수행하였는데 이 때 사용한 수치해석 모델 및 조건을 Fig. 2와 Table 1에 각각 나타냈다. 히터온도는 프리트 용융온도를 고려하여 450~480 °C 까지 10 °C 간격으로 변화시켰다. 보통 작업시간은 5s 이내로 이루어지는데 작업시간이 길어지면 내부압력으로 인해 프리트가 두 장의 유리 사이로 흘러들어가기 때문이다.

유리의 온도분포에 따른 열응력 변화를 알아보기 위해 Fig. 3과 같은 수치모델을 가정하였다. 히터에서 발생한 열은 캡과 프리트를 거쳐 유리로 전달되는데 유리는 열전도율이 낮아 온도차가 커지면 열응력으로 파손될 수 있다. 유리 사이즈는 250mm(W)*250mm(H)*5mm(T)이며 히터 사이즈는 ∅ 4.6 mm*6 mm(H)로 가정하였다. 유리의 압축강도는 325 MPa이며 히터 주변압력은 대기압으로 가정하였다. 유리표면 온도에 따른 유리표면의 온도는 25~250 °C 까지 고려하였다.



[Fig. 3] Schematic of a numerical model for thermal stress with preheating

수치해석을 위한 3차원 형상설계는 Catia[10], 격자 생성 및 3차원 전도해석은 Ansys[11]를 사용하였다.

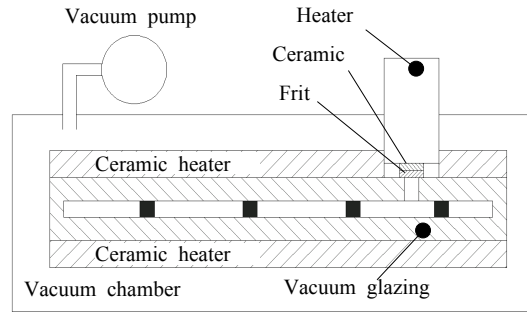
2.2 실험방법

수치해석을 통해 최적화된 히터온도 및 유리 예열온도를 구현할 수 있는 봉지시스템을 Fig. 4와 같이 제작하였다. 진공챔버에 10^{-3} torr까지 낮출 수 있는 진공펌프 및 유리표면 온도 조절용 히터를 장착하였다. 가열된 히터로부터 열은 세라믹 캡을 통해 프리트에 전달되고 이로 인해 프리트가 녹으면서 진공유리 홀(hole)로 유입되어 봉지과정을 마무리하게 된다.

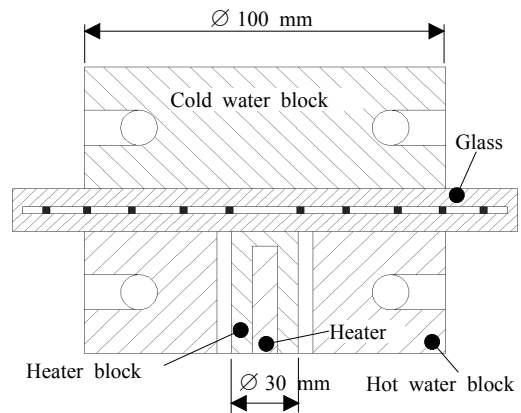
Fig. 5는 실험에 사용한 진공유리 열관류율 측정 장치를 보여준다. 온수블록 내부에는 $\varnothing 5$ mm*25mm(H)의 히터가 장착되어 있으며 $\varnothing 30$ mm*32mm(H)의 히터블록으로 감싸고 있다. 히터블록과 온수블록에는 1 mm의 공간에 공기로 채워져 있으며 열관류율은 식(1)과 (2)를 통해 계산 하였다. 여기서 U는 열관류율, Q는 히터에 공급되는 열량, A는 히터블록 단면적, T_h 는 온수블록 온도, T_c 는 냉수블록 온도를 의미한다. 열관류율 측정은 히터 온도와 온수블록 온도가 일치하였을 때 이루어졌는데, 이는 두 온도차가 없을 때 히터에서 발생하는 열량이 모두 유리를 거쳐 냉수블록으로 전달되었음을 의미하기 때문이다. 실험장치는 열전도율이 우수한 구리($k=401$ W/mK)로 제작하였다. 온수와 냉수의 온도는 항온수조를 통해 조절하였다.

$$Q = UA(T_h - T_c) \quad (1)$$

$$U = \frac{Q}{A(T_h - T_c)} \quad (2)$$



[Fig. 4] Schematic of an encapsulating equipment using frit

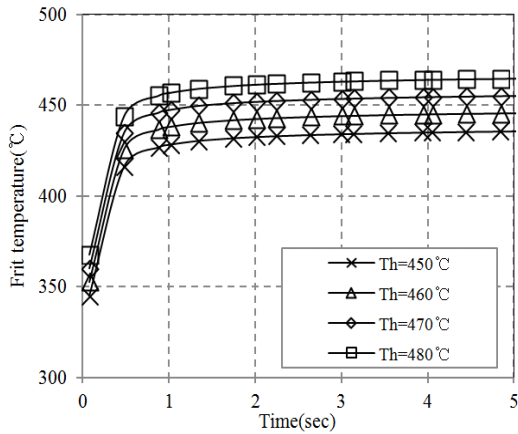


[Fig. 5] Schematic of an apparatus measuring heat transmission coefficient

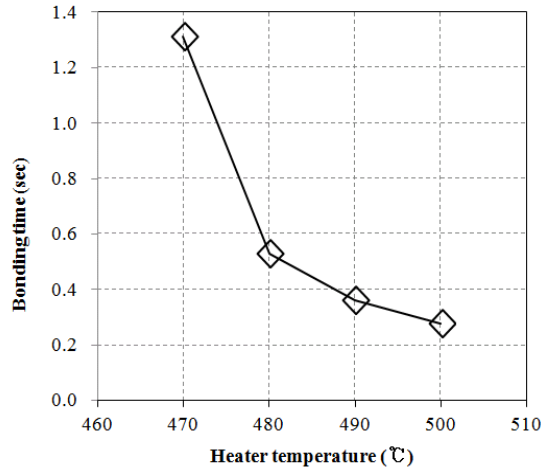
3. 결과 및 고찰

3.1 히터온도 및 접합시간에 따른 프리트 용융 온도

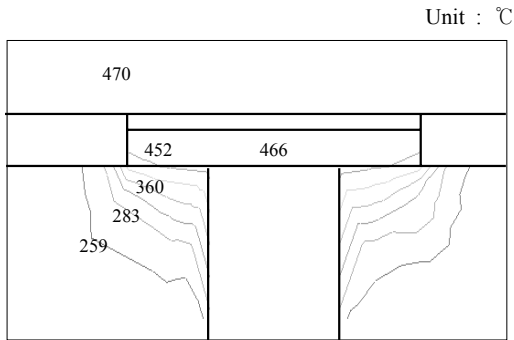
봉지작업에서 접합시간이 5초 이상일 경우 프리트가 녹아 유리내부로 흘러들어가 불량 발생하게 된다. 진공유리를 제작하기 전에 수치해석을 통해 히터온도가 접합시간에 미치는 영향과 프리트 용융온도인 450 °C 까지 고르게 전달되는지 알아보기 위해 Fig. 6에 히터온도 및 접합시간에 따른 프리트 용융온도를 나타냈다. 히터온도가 450 °C 인 경우 프리트 온도는 5초 만에 435 °C 에 도달하나 프리트 용융온도에는 미치지 못한다. 히터온도 460 °C 인 경우도 프리트 온도가 여전히 445 °C 로 예측되어 더 높은 히터온도가 필요하다. 히터온도를 470 °C 까지 승온 시키면 프리트 온도가 450 °C 이상 올라가 히터온도 470 °C 이상에서는 프리트 용융이 가능함을 알 수 있다.



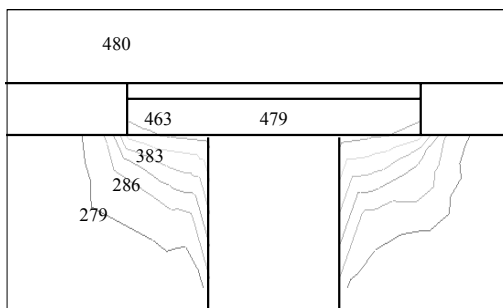
[Fig. 6] Variation of frit melting temperature with heater temperature and bonding time



[Fig. 8] Variation of bonding time with heater temperature



(a) 470 °C of heater temperature



(b) 480 °C of heater temperature

[Fig. 7] Temperature distribution of frit with heater temperature

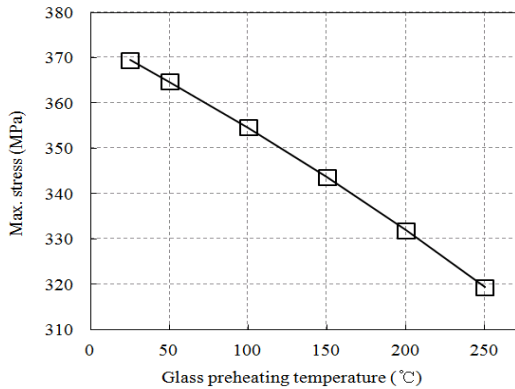
히터온도 470 °C 에서 프리트 내의 온도분포를 자세히 살펴보고자 Fig. 7(a)에 프리트 내의 온도 등고선을 나타냈다. 대부분 영역은 프리트 용융온도 450 °C 이상이나

양쪽 하단부 모서리 부분은 용융온도 이하여서 실제 히터온도는 470 °C 이상이 필요함을 알 수 있다. 프리트 내 모든 위치에서 용융온도 이상을 확보하기 위해 히터온도를 480 °C 로 올리고 이때의 프리트 온도분포를 Fig. 7(b)에 나타냈다. 이 경우 온도가 가장 낮은 부분에서도 450 °C 이상으로 예측되어 프리트를 녹이기 에 충분하리라 사료된다.

한편, 프리트 접합시간을 최적화하기 위해 히터온도를 470 °C 에서 500 °C 까지 변화시키며 이에 따른 접합시간 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 히터온도 470 °C 에서 프리트 용융온도까지 도달시간은 약 1.4s이고 히터온도 480 °C에서는 약 0.53s로 히터온도 470 °C 보다 약 40 % 정도 단축되었다. 히터온도 490 °C 와 500 °C에서는 0.36 s와 0.27 s로 480 °C 이후부터는 접합시간 단축이 크지 않음을 알 수 있다.

3.2 유리 예열온도에 따른 유리 내부응력

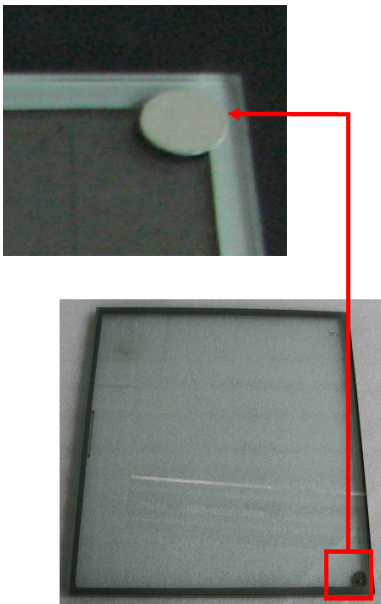
유리 예열온도가 봉지과정 중 유리 파손에 미치는 영향을 알아 보기위하여 Fig. 9와 같이 응력해석을 수행하였다. 이 때, 진공유리는 봉지를 수행하기 전 진공챔버 내에 충분한 시간동안 예열하여 유리 표면온도가 목표온도에 도달하게 하였다. 유리 표면온도 25 °C 에서 최대응력은 365 MPa로 유리 압축강도인 325 MPa보다 높아 유리 예열온도가 더욱 높아져야 한다. 계속해서 유리 예열온도를 승온 시키면서 최대응력 변화를 살펴 본 결과 챔버온도 250 °C 에서 약 319 MPa이 예측되었다. 따라서, 유리 예열온도를 250 °C 이상 유지한다면 진공유리 봉지과정에서 발생하는 열응력으로 인한 유리 파손은 피할 수 있다.



[Fig. 9] Variation of glass stress with glass preheating temperature

3.3 프리트 접합을 이용한 진공유리 제작

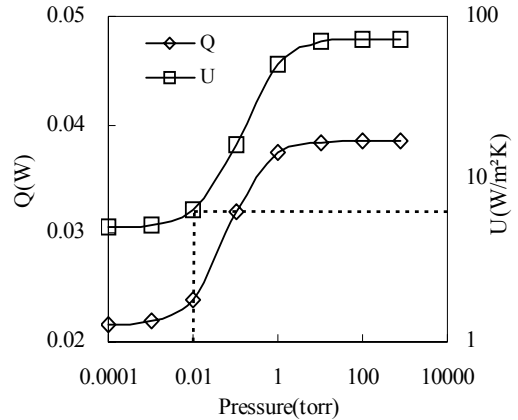
프리트를 녹이기 위한 히터를 목표온도인 480°C 를 유지하기 위하여 온도 제어장치를 통해 485 °C 이상일 경우 공급전원을 차단하였고 475 이하일 경우 공급전원을 재개하였다. 열응력으로 인한 진공유리 파손을 방지하기 위해 유리 예열온도 역시 250 °C 로 제어하였다. 한편, 진공챔버 내 압력은 10⁻³ torr 로 유지하였는데 이를 위해 4 시간동안 진공펌프를 이용하여 챔버 내공기를 배출하였다. 진공 챔버 내에서 150um 간격의 10mm(W) *100mm(H) *5mm(T)짜리 두 장의 유리 배기 및 봉지과정을 통해 성공적으로 제작한 진공유리를 Fig. 10에 나타냈다.



[Fig. 10] Vacuum glazing manufactured in a vacuum chamber with frit

[Table 2] Heat transmission coefficient of the vacuum glazing manufactured

Items	Value
Q (W)	0.096
Hot water temperature (°C)	30.2
Cold water temperature (°C)	6.4
Heat transmission coefficient (W/m ² K)	5.7



[Fig. 11] Variations of heat transfer rate and heat transmission coefficient with internal pressure[12]

3.4 진공유리 열관류율 측정

프리트 접합을 이용하여 제작한 진공유리 열관류율 측정 결과를 Table 2에 나타냈다. 히터 공급 열전달율은 약 0.16 W이고 약 30분 후 히터온도와 온수블록 온도가 30.2 °C로 열평형을 이룬 후 진공유리의 열관류율은 약 5.7 W/m²K로 측정되었다. 이를 열전도율로 환산하면 약 0.057 W/mK로 일반유리의 열전도율의 약 1/20에 해당하는 우수한 단열성능을 보여준다.

진공유리 내부의 진공도를 알아보기 위해 Fig. 11[12]와 같이 진공압력에 따른 열관류율변화를 인용하였다. 이 그래프로부터 열관류율 5.7 W/m²K에 해당하는 진공압력은 약 10⁻² torr로 예측되었다. 이는 진공챔버 내부압력이 10⁻³ torr것을 감안한다면 다소 높게 예측되어 이에 대한 추가적인 공정 최적화가 필요하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 진공챔버 내 프리트를 이용한 진공유리 봉지공정의 히터온도, 접합시간 및 챔버온도에 대한 최적화

를 수행하였고 실제 제작한 진공유리의 열관류율 측정을 통해 단열성능을 알아보았다. 이러한 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 프리트를 용융시켜 세라믹 캡과 유리를 접합시키기 적합한 히터온도는 480 °C 이상이고 승온시간은 약 0.5s다.
- (2) 상온에서 프리트 접합시 열응력으로 인한 내부응력이 발생하여 유리가 파손될 수 있다. 따라서, 진공챔버 내 유리 표면온도를 약 250 °C 이상 유지할 수 있는 히터를 장착하여 봉지과정 중 발생할 수 있는 유리 파손을 방지해야 한다.
- (3) 본 연구에서 개발된 진공유리의 열전도율은 일반 유리에 비해 약 1/20에 해당하여 우수한 단열 성능을 나타낸다. 하지만 진공유리 내부압력이 진공챔버 내 압력보다 다소 높은 것으로 나타나 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 진공챔버 내부 압력을 10⁻⁴ torr이하로 유지하면서 더욱 단열성능이 강화된 진공유리 제작에 관한 연구도 요구된다.

References

- [1] H. C. Lee, "Characteristics of H2/O2 gas mixture fabricated by water electrolysis", *Journal of the New Science Research*, Vol. 1, pp. 43-55, 1998.
- [2] L. Wullschleger, H. Manz and K. Ghazi Wakili "Finite element analysis of temperature-induced deflection of vacuum glazing" *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 3, pp.1378-1388, March, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.010>
- [3] A. C. Fischer-cripps, R. E. Collins, G. M. Turner and E. Bezzel "Stresses and Fracture Probability in Evacuated Glazing" *Building and Environment*, Vol. 30, No.1, pp.41-59, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)E0032-M](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(94)E0032-M)
- [4] A. Zoller, Hohle Glasscheibe, German Patent Application No.387655, 1913.
- [5] G. Falbel, Evacuated dual glazing system, U.S. Patent Application No. 502567, 1976.
- [6] D. K. Benson, C. E. Tracy, J. Susemihl, T. Potter and D. E. Soule, "Vacuum window glazings for energy-efficient buildings", *International Report PR-3159*, Solar Energy Research Institute, Golden, CO, 1987.
- [7] M. Lenzen, R. E Collins, "Long-term field tests of vacuum glazing" *Solar Energy*, Vol. 61, No. 1 pp.11-15,

July, 1997.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00038-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00038-8)

- [8] Y. Fang, T. K. Hyde and N. Hewitt "Predicted thermal performance of triple vacuum glazing" *Solar Energy*, Vol. 84, No. 12, pp. 2132-2139, December, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.09.002>
- [9] J. M. Kim, J. H. Lee and T. H. Song, "Vacuum insulation properties of phenolic foam" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No.19-20 pp. 5343-5349, September, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.051>
- [10] Catia V5 R17, Dassault Systems, 2006.
- [11] Ansys version 12.1. Ansys Inc
- [12] I. S. Hwang and Y. L. Lee, "A Study of Adiabatic Performance for Vacuum Glazing with Design Conditions", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol.21, No.4, pp. 582-587, August, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.4.582>

박 상 준(Sang Jun Park)

[준회원]



- 2012년 2월 : 공주대학교 기계공학전공 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 박사과정

<관심분야>

열유체공학, 에너지공학

이 영 림(Young Lim Lee)

[정회원]



- 1995년 5월 : U of Texas at Austin 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 2000년 2월 : 삼성전자-삼성전자 책임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

열유체공학, 에너지공학, 자동차공학