

다중회귀분석법을 이용한 진공유리패널 모서리 접합부와 공정변수간의 수학적 모델 개발

김영신¹, 전의식^{1*}
¹공주대학교 기계공학과

Mathematical Model of the Edge Sealing Parameters for Vacuum Glazing Panel Using Multiple Regression Method

Youngshin Kim¹ and Euysik Jeon^{1*}

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju National University

요 약 고유가 시대를 맞아 에너지 절약이 사회적으로 이슈화됨에 따라 진공유리에 대한 관심이 높아지고 있다. 진공유리 개발을 위한 핵심 공정 중 유리모서리 접합공정은 두 장의 유리 사이를 진공으로 유지하기 위해 높은 신뢰도를 요한다. 본 논문에서는 유리 모서리 접합 시 기존 프릿을 이용하여 접합하는 방법과 달리 고밀도열원인 수소혼합 가스를 이용하여 모서리를 접합하는 공정을 제시하였다. 또한 유리의 파손 및 변형방지를 위해 전기로내의 분위기 온도를 설정하고 균일도를 측정하였다. 기초시험을 통해 모서리접합 공정변수를 설정하고 공정변수에 따른 유리 모서리 접합부 면적과의 수학적관계식을 다중회귀분석으로 도출하였다.

Abstract The concern about vacuum glass is enhanced as society gets greener and becomes more concerned about energy savings due to the rising cost of oil. The glass edge sealing process needs the high reliability among the main process for the vacuum glass development in order to maintain between the two glass by the vacuum. In this paper, the process of the edge sealing was performed by using the hydrogen mixture gas which is the high density heat source unlike the traditional method glass edge sealing by using the frit as the soldering process. The ambient temperature in the electric furnace was set in the edge sealing to prevents the thermal impact and transformation of the glasses and the temperature distribution uniformity was measured. The parameter of the edge sealing was set through the basic test and the mathematical relation with the area of the glass edge parts according to the parameter was drawn using the multiple regression analysis method.

Key Words : Vacuum glazing, Process parameter, Edge sealing, Multiple regression analysis, Mathematical model

1. 서론

경제 성장 및 삶의 질 향상과 더불어 에너지 사용량이 증가함에 따라 에너지 절감에 대한 노력은 건축물에서만 아니라 산업, 경제 등 사회 전 부문에서 직면한 최우선의 과제라 할 수 있다. 특히 건축물에서 발생하는 에너지 손실을 완화하기 위해 건물효율등급제도 확대, 정부규제 강화와 더불어 신재생에너지의 개발, 에너지 절약을

위한 요소기술 개발 등 많은 연구가 활발히 수행되어지고 있다.

창은 에너지 손실에 큰 부분을 차지하기 때문에 건물의 에너지 절감을 위한 창호의 개발이 시급한 실정이다.[1] 건물에서 창을 통한 에너지 손실은 전체 건물 열손실의 20~45%를 차지하며, 현대 건축물의 건물 외피에서 유리 면적이 증가함에 따라 증가 추세를 보일 뿐 아니라, 벽체와의 단열성능을 비교하면 약 7배 낮은 단열특성을

본 논문은 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업과 지식경제부의 사업화연계기술개발을 통해 수행되었음.

*교신저자 : Euysik Jeon

Tel: +82-10-4910-9164 e-mail: osjun@kongju.ac.kr

접수일 12년 02월 09일 수정일 (1차 12년 02월 21일, 2차 12년 02월 24일, 3차 12년 03월 07일) 게재확정일 12년 03월 08일

갖는 것으로 발표된 바 있다.[2]

진공단열유리패널은 두 장의 유리사이 에 간극을 유지하고 모서리를 접합하여 내부에 진공을 유지함으로써 건물에서 창호를 통해 발생하는 에너지 손실을 효과적으로 저감시킬 수 있는 단열재이다.

진공유리는 1893년 Dewar flask[3]로부터 기본적인 개념이 시작되었고, Dewar flask는 가스에 의한 전도 및 대류에 의한 열손실을 방지하기 위하여 내부의 공간을 진공상태로 유지하는 방안을 제시하였다. 1913년 Zoller[4]는 두 장의 유리사이의 진공인 공간 내에 구조물을 두어 대기압을 견딜 수 있는 방법을 제시하였다. 1987년 Bachli[5]는 모서리 접합에서 열팽창, 진공 형성, 모서리 접합의 여러 방법을 제시하여 진공유리에 대한 개발 가능성을 높였다. 1987년 D.K. Benson[6]은 진공 챔버 안에서 레이저를 이용하여 모서리를 용접하여 진공유리를 제조하는 방식을 제안하였다. 1997년 Lenzen[7]은 진공유리의 모서리 접합을 위해 저융점 글라스(Frit)를 바른 후 약 500℃의 가열로에 넣어 유리를 접합하는 기술을 개발하였다.

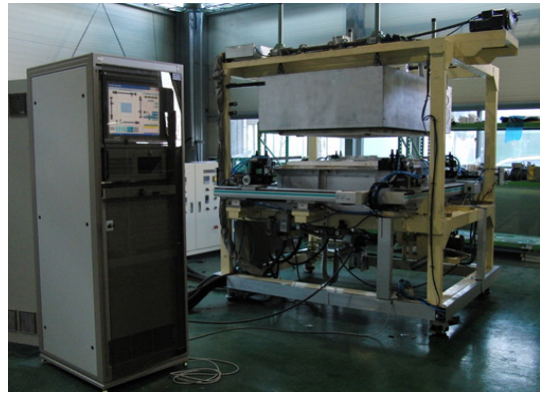
최근 개발된 진공유리의 모서리 접합은 프릿을 이용하여 모서리를 접합하는 방법으로 개발되었으나 프릿을 사용하여 모서리를 접합할 경우 진공유리패널의 열강화가 불가능할 뿐만 아니라 프릿과 유리와의 열팽창계수 차이로 인해 접합기밀도가 저하되는 단점을 가지고 있다.[8]

따라서 본 논문에서는 전기로 내에 두 장의 유리를 정렬하고 수소혼합가스토치를 이용하여 모서리를 접합하는 방법을 제시하였으며, 모서리 접합 시 유리의 열충격 완화를 위해 전기로 내부의 온도 분포가 균일하도록 설정하였다. 접합공정변수에 따른 용융부 면적과의 상호 관계를 규명하기 위하여 기초시험을 실시하고 모서리 접합에 영향을 미치는 공정변수를 설정하였으며, 다중회귀분석을 통하여 공정변수와 유리 모서리 접합부 용융 면적의 상관관계를 수학적 관계식으로 도출하였다.

2. 진공유리 모서리 접합 장치 및 공정변수

2.1 장치구성

수소혼합가스를 열원으로 하는 토치[9]를 이용하여 유리 모서리부를 용융 접합할 경우 열 충격에 의한 유리 파손을 방지하기 위하여 전기로 내에서 모서리 접합을 수행하였다. Fig. 1은 전기로 및 수소혼합가스 토치를 나타낸 것이다.

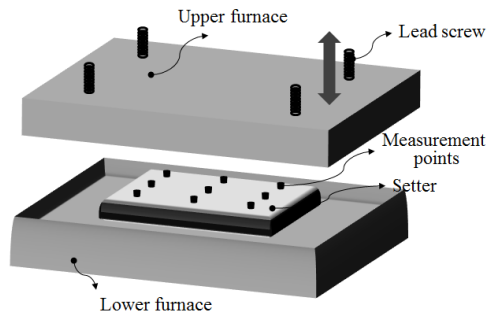


[그림 1] 로와 토치의 시험장치 구성
[Fig. 1] Equipment setting of furnace and torch

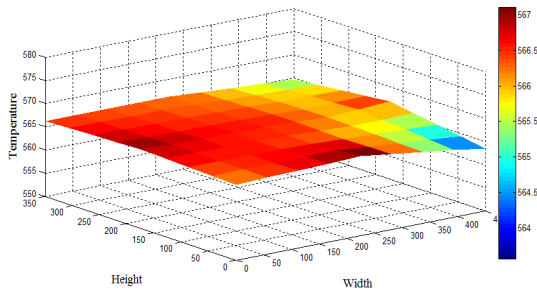
2.2 로 내부 온도 측정

전기로 내부의 분위기 온도는 유리 모서리 접합 시 큰 영향을 미친다. 로 내부의 분위기 온도 측정을 위하여 NI 9211 장치와 K Type 열전대를 사용하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 로 내부에 위치한 세터(Setter) 상부에 열전대를 설치하여 총 9곳의 온도를 측정하였다. 로의 분위기 온도는 570℃까지 1시간 동안 도달하도록 설정하였으며 10초 간격으로 온도를 측정하였다.

로 내부의 온도를 570℃로 설정하고 온도를 측정한 결과 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 로 내부의 온도는 567℃로 약 3℃ 낮게 측정되었으며, 내부 온도편차는 측정온도의 최고점과 최저점에서 약 3℃ 이내로 발생하는 것을 확인하였다.



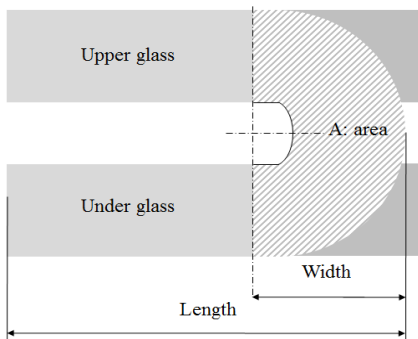
[그림 2] 세터 표면 온도 측정 위치
[Fig. 2] Locations of setter surface temperature measurement points



[그림 3] 로 내부의 온도 분포
[Fig. 3] Temperature profile of furnace

2.3 공정변수 설정

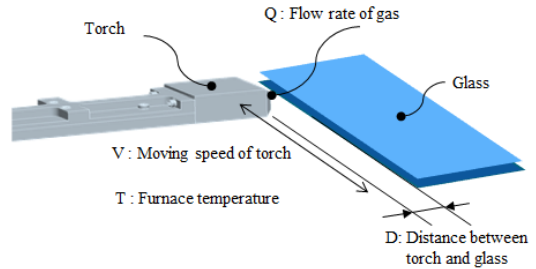
두 장의 유리가 로 내에서 예열된 상태로 수소혼합가스스토치를 이용하여 열원을 가하면 두 장의 유리 모서리는 용융되며, 두 장의 유리사이 용융부는 표면장력에 의해 상하 간극을 채우면서 유리 모서리 부 접합이 이루어진다. 모서리의 접합이 이루어진 경우 용융부의 면적은 진공유리의 단열성능을 좌우하는 요인으로 작용하게 되므로 모서리 접합 시 단면의 면적을 결정하는 공정변수를 설정하였다. Fig. 4는 모서리 접합부 단면의 개념도를 나타낸 것이다.



[그림 4] 단면 형상의 개념도
[Fig. 4] Schematic diagram of cross sectional shape

기초실험 결과[10] 로 내부의 분위기 온도, 토치의 이송속도, 유량 및 각도, 토치와 유리사이의 거리, 시험 유리편의 두께, 상판 유리와 하판유리 사이의 간격 등 여러 가지 변수가 유리모서리 접합에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이 중 토치의 이송속도(V) 및 토치의 유량(Q)이 모서리 접합에 큰 영향을 미치는 것으로 사료되어 두 가지의 공정변수에 대하여 각 각 3수준으로 설정하였다. 이외의 공정변수들은 로 내부의 주변 온도는 570°C로 설정하고, 토치의 각도는 유리패널과 평행하게 설정하였으

며, 토치와 유리사이의 거리는 4mm로 설정하였다. 또한 시험 유리편의 두께는 상 하판 유리 모두 3mm로 설정하였으며 상판과 하판 유리 사이의 간격은 0.2mm의 필터 게이지를 이용하여 간격을 유지하였다. Fig. 5는 모서리 접합 공정변수에 대한 개념도를 나타낸 것이며 설정된 공정변수들의 변수 값을 Table 1에 모두 나타내었다.



[그림 5] 모서리 접합 공정 변수
[Fig. 5] Process variables of glass edge sealing

[표 1] 유리 모서리 접합 공정변수 조건
[Table 1] Variable conditions for glass edge sealing

Process variables	Level 1	Level 2	Level 3
Flow rate of gas(ℓ /min)	12	13	14
Moving speed of torch (mm/sec)	3	4	5
Temperature profile of furnace($^{\circ}$ C)	570		
Distance between torch and glass(mm)	4		
Glass thickness(mm)	3		
Gap size of glass(mm)	0.2		

3. 유리 모서리 접합 시험 및 단면적 산출

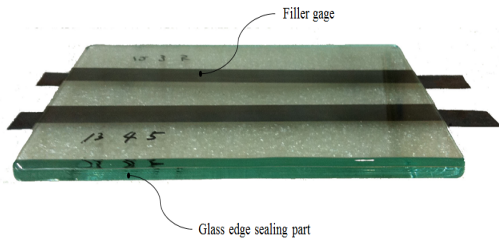
3.1 모서리 접합시험

진공유리 패널의 모서리 접합 시 패널의 간극유지를 위해 유리사이에 필터게이지를 배치하였으며, 준비된 시험편을 전기로 내부에 설치한 후 설정된 접합 분위기 온도에 도달하면 토치의 이송속도와 가스유량을 설정한 후 유리 모서리 부 접합을 실시하였다. 접합이 끝나고 유리의 변형 및 파손방지를 위하여 전기로를 닫아 서냉하였다. 모서리 접합조건은 Table 2와 같이 토치의 유량과 토치의 이송속도를 각각 3가지 수준으로 설정하여 총 9가지의 조건으로 3회 반복 시험을 실시하였다. Fig. 6은 모서리 접합시험 후 시험편을 나타낸 것이다.

[표 2] 유리 모서리 접합 시험 조건

[Table 2] Experimental conditions for glass edge sealing

No.	Gas (ℓ/min)	Torch speed (mm/sec)
1	12	3
2		4
3		5
4	13	3
5		4
6		5
7	14	3
8		4
9		5



[그림 6] 유리 모서리 접합 결과
[Fig. 6] Result of glass edge sealing

3.2 모서리 단면적 산출

수소혼합가스를 이용하여 접합된 모서리의 단면을 분석하기 위하여 워터젯을 이용해 단면을 절단하였다. Fig. 7은 절단 단면을 나타낸 것이며 Matlab프로그램을 이용하여 모서리 절단면을 Fig. 8과 같이 이미지 처리를 수행한 후 단면의 면적을 산출하였다. 이때 각 공정별 접합부의 단면 면적 산출결과를 Table 3에 나타내었다.



[그림 7] 유리 절단 및 단면형상
[Fig. 7] Cutting and cross sectional shape of glass



[그림 8] 유리 단면 형상
[Fig. 8] Cross sectional shape of glass

[표 3] 공정변수에 따른 단면 면적

[Table 3] Cross sectional area according to the process variables

No.	Gas (ℓ/min)	Torch speed (mm/sec)	Area(mm ²)
1	12	3	51
2		4	46
3		5	44
4	13	3	53
5		4	48
6		5	47
7	14	3	53
8		4	50
9		5	43

4. 상관관계식 도출

유리 모서리 접합부의 단면적과 그에 영향을 주는 공정변수의 상관관계를 알아보기 위하여 2.3절에서 언급한 두 가지의 접합공정 변수들을 독립변수로 하고 접합부의 면적을 종속변수로 한 관계는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$A=f(Q, V) \tag{1}$$

여기서, A ; 종속변수(모서리 접합부 단면 면적)

Q ; 수소혼합가스 유량

V ; 토치의 이송속도

공정변수와 모서리 접합부 단면의 면적과의 관계를 나타내는 수학적 관계식은 식 (2)와 같은 선형방정식으로

도출된다.

$$A = a_0 + a_1 Q + a_2 V \quad (2)$$

여기서 $a_0 \sim a_2$ 는 토치의 유량, 토치의 이송속도에 의해 영향을 받는 경험계수이며 상수 값을 갖는다. 토치의 유량(Q)과 이송속도(V)에 따른 접합부 면적(A)의 관계를 산출하기 위하여 다중회귀분석법(Multiple regression analysis method)을 사용하였으며 그 결과 식 (3)과 같은 관계식을 도출하였다.

$$A = 52.8 + 0.8Q - 3.8V \quad (3)$$

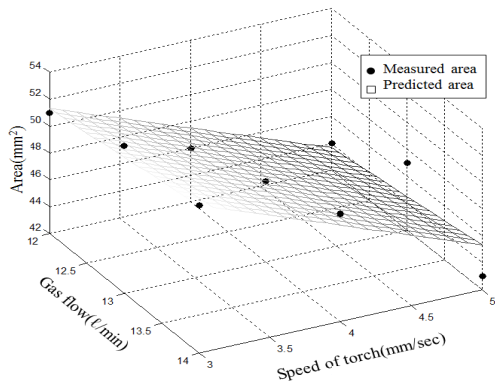
개발된 수학적 모델의 유의성 판단을 위해 결정계수 (R^2 : Coefficient of Determination), 수정결정계수(AR^2 : Adjusted Coefficient of Determination)와 F 검정통계량분석을 통한 F값과 유의성(P-value)을 산출하였다. Table 4 는 도출된 수학적식의 타당성을 나타낸 것이다.

Fig. 9는 토치의 이송속도와 가스 유량에 따른 모서리 접합부의 면적을 실험결과 측정된 값과 도출된 관계식에 의해 계산된 실험예측 값을 나타내었다.

[표 4] 수학적 관계식의 타당성 분석

[Table 4] Analysis of variance test for mathematical models

R^2 (Coefficient of Determination)	AR^2 (Adjusted Coefficient of Determination)	F	P-value
0.85	0.80	17.68	0.003



[그림 9] 유리 모서리 접합부의 측정 면적과 예측면적
[Fig. 9] Measured area and predicted area of glass edge sealing part

5. 결론

본 논문에서는 단열성능 향상을 위한 진공유리패널 개발 시 핵심공정인 모서리 접합공정에 대해 고밀도열원인 수소혼합가스를 이용하여 모서리를 접합하는 방법을 사용하였으며, 이에 따른 공정변수와 유리 접합부 면적간의 수학적 모델을 개발하였다.

유리 모서리 접합 시 유리의 파손 및 변형방지를 위해 전기로를 이용한 분위기 온도 분포의 균일도 측정을 수행하였다.

진공유리 패널의 모서리 접합 시 수소혼합가스토치를 이용하였으며 모서리 접합부에 영향을 미치는 공정변수 별(가스유량, 토치이송속도) 접합시험을 수행하였다.

공정변수에 따른 접합면적을 산출하기 위하여 수학적 관계식 $A = 52.8 + 0.8Q - 3.8V$ 를 다중회귀분석 방법을 이용하여 도출하였으며 통계적 분석을 통하여 관계식의 타당성을 검증하였다.

References

- [1] Ko, Dong-Hwan, "A Study on Building Energy Efficiency Requirements of LEED 2009 (Version 3.0) and Korea Green Building Rating System : Analysis and Comparison of Energy Saving and Annual Consumption," Architectural institute of korea, Vol. 6, 2010
- [2] Gyeong-Seok Choi, Jae-Sik Kang, Kwan-Seob Yang, Seung-Eon Lee "A Research on Air-tightness and Thermal performance of windows system classified by windows type," SAREK, pp. 120-123, 2009
- [3] J. Dewar, Collected papers of Sir James Dewar, edited by Lady Dewar, Cambridge University Press, Cambridge, 1927.
- [4] A. Zoller, Hohle Glasscheibe, German Patent Application No.387655, 1913.
- [5] E. Bachli, Heat-insulating construction and lighting element, International Patent Application No. PCT/CH86/00166, 1987.
- [6] D.K. Benson, C.E. Tracy, J. Susemihl, T. Potter and D.E. Soule, "Vacuum window glazing for energy-efficient buildings, International Report," PR-3159, Solar Energy Research Institute, Golden, CO, 1987.
- [7] Lenzen, M, Collins, R.E, "Long-term field tests of vacuum glazing," Solar Energy 61, pp. 11-15, 1997.
- [8] G. Hwang, "A Study on the Sintering and Mechanical Properties of Glass Frit for Barrier rib materials of

Plasma Display Panel," Hongik Univ., 2001

- [9] Soon Ho Hwang, Young Lim Lee and Euy Sik Jeon, "Development of hydrogen-oxygen mixed gas torch for joining of vacuum glazing," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 10, No. 11, pp. 3074-3079, 2009
- [10] Jong-gon Lee, Jong-sun Lee, Euy-Sik Jeon, 'A Study on the Glass Sealing for a Brown Gas Heat Source," Proceedings of the KAIS Fall Conference, pp. 439-441, 2008
-

김 영 신(Youngshin Kim)

[준회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 일반학
원 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 공주대학
교 일반학원 기계공학과 공학박
사 과정

<관심분야>

진공유리 공정기술, 구조재료공학

전 의 식(Euyasic Jeon)

[정회원]



- 1995년 2월 : 한양대학교 대학원
기계공학과 (공학박사)
- 1989년 4월 ~ 현재 : 공주대학
교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

진공유리 공정기술, 구조재료공학, 반도체·자동차공학