

실험계획법을 이용한 진공유리 패널 모서리 용융 접합 강도실험 분석

김승종¹, 전의식^{*}
¹공주대학교 기계공학과

Analysis of the Edge Sealing Strength for Vacuum Glass Panel Using Design of Experiment

Seung-Jong Kim¹ and Euy-Sik Jeon^{*}

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju National University

요 약 건축물 에너지 효율등급제도, 건축물 에너지 소비증명제 등 건축물 에너지 관련 법·제도가 지속적으로 강화되면서, 이에 대응하기 위한 고성능 단열재, 기능성 유리를 적용한 창호의 개발이 활발히 진행되고 있다. 에너지 절약을 위한 기능성 유리의 중요성이 크게 부각되고 있음에 따라 진공유리에 대한 관심이 높아지고 있다. 진공유리의 핵심공정 중 모서리 접합공정은 진공유리의 기밀성, 강도, 형상에 있어 매우 중요한 공정이다. 본 논문에서는 수소혼합가스를 이용하여 전기로 내부에서 두 장의 유리를 접합하였다. 공정변수에 따른 접합유리의 강도와 형상을 측정 및 분석 하였으며, 다구치 실험계획법을 이용하여 접합유리의 강도를 예측하였다. 추가실험을 통해 예측 값과의 오차율을 확인함으로써 실험의 타당성을 검증하였다.

Abstract The vacuum-glazing panel is a panel that keeps two glasses completely sealed in a vacuum condition. It is the high function insulation material of having the wall level minimizing the heat loss by the conduction and convection heat transmission coefficient. The edge sealing is a very important process of vacuum glass on the strength, thickness and air tightness. In this study, by using the hydrogen mixture gas torch, two sheets of glass was sealing in the furnace. The thickness and strength of the glass according to the process parameters is measurement and analysis, and predicting the edge sealing strength of glass by using taguchi method of experiment. We verified the validity of the experiment by checking the error rate through additional experiment.

Key Words : Bending strength, Edge sealing, Process parameters, Taguchi method, Vacuum glazing

1. 서론

국내의 건축물 에너지 소비는 국가 총 에너지 소비의 약 20.5%를 차지하며, 건물 수의 증가 및 대형화, 생활수준의 향상 등으로 인하여 지속적인 에너지 소비가 증가하고 있다[1].

에너지문제가 현실화되면서 정부는 '저탄소 녹색성장'이라는 목표 하에 건축물 유형별 연간 에너지 소비량 기

준을 단계적으로 강화할 것을 발표하였다. 그 주요내용으로 주거용건물의 연간 에너지소비량을 2017년에는 패시브주택 수준인 60%로 감축하고 2025년에는 제로에너지주택으로 의무화하는 것을 국가 로드맵으로 수립하였다[2].

창호는 건축물에서 열손실이 발생하는 대표적인 부위로 벽체나 지붕 등에 비해 단열능성이 낮아 에너지 손실의 주요 원인이다. 겨울에는 열관류에 의한 주요 열손실

본 연구는 2013년도 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(No.2011-12-대-06-047)과 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20134030200230)입니다.

*Corresponding Author : Euy-Sik Jeon(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9284 email: osjun@kongju.ac.kr

Received March 11, 2014

Revised April 9, 2014

Accepted April 10, 2014

경로가 되고 여름에는 과다한 일사확득 경로가 되며, 창을 통한 열손실량은 전체 건물의 약 37%를 차지하고 있다[3].

현재 국내에서는 건축물 에너지 효율등급제도, 건축물 에너지 소비증명제 등 건축물 에너지 관련 법·제도가 지속적으로 강화되는 추세로, 이에 대응하기 위한 고성능 단열재, 기능성 유리를 적용한 창호의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 진공유리에 대한 관심 또한 높아지고 있다.

진공유리 패널은 두 장의 유리 사이에 지지대를 배치한 후 모서리를 접합하여 진공상태를 유지하는 패널을 말하며 진도 및 대류에 의한 열손실을 최소화 할 수 있는 벽체수준의 열관류율을 갖는 고기능 단열재이다.

모서리 접합공정은 진공유리의 진공상태 유지를 위해 높은 신뢰도를 요하는 핵심기술이며, 대표적으로 프릿(Frit)을 이용한 모서리 접합과 수소혼합가스토치를 이용한 접합이 있다.

프릿을 이용한 접합은 열강화가 불가능하며 열팽창계수의 차이로 인한 접합기밀도의 저하라는 단점이 있으나, 수소혼합가스토치를 이용한 모서리 접합은 프릿을 이용한 접합과는 다르게 유리를 용융시켜 모서리를 접합하기 때문에 열강화가 가능할 뿐만 아니라 생산성 증가와 단가 절감에도 효과가 높다. 수소혼합가스토치를 이용하여 유리 모서리를 용융 접합 할 경우 공정변수에 따라 모서리 형상이 결정되며 유리 패널의 강도에 영향을 미친다.

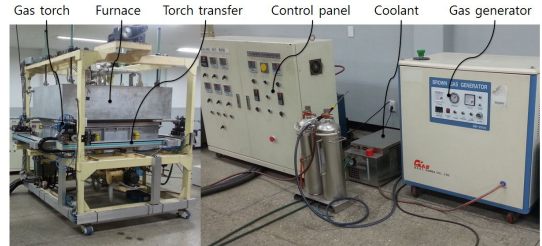
본 논문에서는 수소혼합가스토치를 이용하여 두 장의 소다라임유리 모서리 접합 실험을 실시하고, 모서리 용융 접합 형상의 주효과를 분석하였다. 또한, 접합 강도를 최대화하기 위한 공정조건을 도출하기 위해 공정변수에 따른 강도시험 분석을 수행 하였다. 최적공정의 강도를 예측한 후 추가실험을 통해 예측값과의 오차율을 확인함으로써 실험의 타당성을 검증하였다.

2. 모서리 접합

2.1 모서리 접합 장치의 구성

모서리 접합 장치는 수소혼합가스를 이용하여 두 장의 유리 모서리를 접합하며, 전기로 내부의 일정한 분위기 온도에서 가스토치의 열과 이송을 통해 이루어진다. 장치의 구성은 전기로의 온도를 조절하는 제어패널, 수소혼합가스를 생성하는 가스 발생기, 수소혼합가스토치,

토치 이송기, 냉각기, 전기로 내부에 유리를 지지하는 세트(Setter)등으로 구성되어있다. Fig. 1은 모서리 접합 장치를 나타낸다.



[Fig. 1] The system for glass edge sealing

2.2 공정변수 설정

모서리 접합에 영향을 미치는 변수는 토치의 이송속도, 토치와 유리사이의 거리, 가스유량, 토치의 각도, 전기로의 내부온도 등이 있다. 이중 제어가 용이하고 모서리 접합에 많은 영향을 미치는 변수를 공정변수로 설정하고, 모서리 접합에 영향이 미비한 변수는 동일한 조건으로 설정하였다.[4]

기초실험을 통해 모서리 접합에 영향을 미치는 공정변수를 확인하여, 수소혼합가스유량(Q), 토치의 이송속도(V), 토치와 유리사이의 거리(D)를 공정변수로 설정하였다. 공정변수의 수준은 최소접합조건부터 용융된 유리가 흘러내리지 않는 최대조건까지의 수준으로 정하였다. Table 1 은 3요인 3수준의 공정변수를 나타낸 것이다.

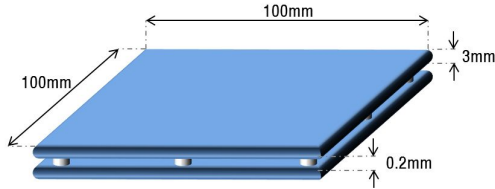
[Table 1] Process parameters for edge sealing

Parameters	Level		
	1	2	3
$Q(\ell/\text{min})$	11	12	13
$V(\text{mm}/\text{min})$	3.0	3.5	4.0
$D(\text{mm})$	3	4	5

2.3 모서리 접합 실험

모서리 접합 실험은 두 장의 소다라임유리를 사용하였으며, 유리 사이에 0.2mm의 높이를 갖는 지지대를 일정 간격으로 형성하였고, 동일한 조건의 온도 프로파일 에 따라 전기로 내에서 일정시간 소결하였다. 접합 시 수소혼합가스토치의 열로 인한 유리의 파손 및 변형을 방지하기 위해 로 내 분위기 온도를 570℃ 로 설정하였고,

유리를 지지해주는 세터(Setter)와 토치사이의 거리는 8mm, 토치의 각도는 유리와 수평으로 설정하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 유리 시편의 개념도를 나타낸 것이다.



[Fig. 2] Conceptual diagram of glass specimen

직교배열표를 이용하여 총 9가지 조건의 실험 계획을 수립하였고, 모서리 접합 실험은 각 유리의 한쪽 모서리씩 접합하여 총 4번의 접합과정을 거쳐 접합을 실시하였다. 공정조건별 3회의 반복실험을 실시하였고, Table 3은 3요인 3수준계의 직교배열표를 나타낸다.

[Table 2] $L_9(3^3)$ Orthogonal array

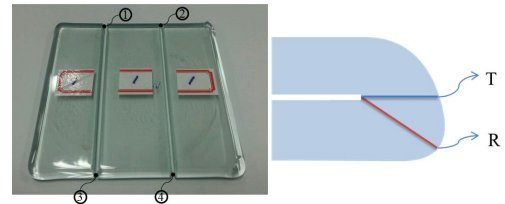
No.	Q	V	D
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

3. 모서리 접합형상

3.1 모서리 단면 측정

접합된 유리의 모서리 단면을 측정하기 위해 워터젯(Water-jet)을 이용하여 단면을 절단하였다. 단면 측정 방법은 유리 접합부의 측면을 디지털 현미경을 사용하여 접합된 유리의 수평선상 두께(T)와 밑면 유리의 최대 두께(R)를 측정하였다.

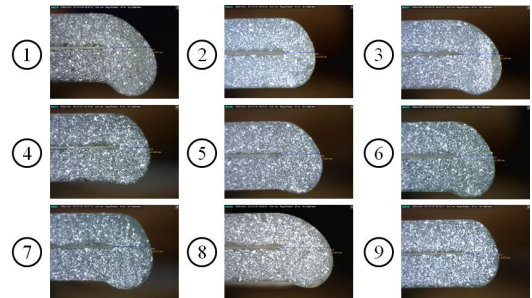
Fig. 3과 같이 각 공정별 절단된 4부분의 단면을 측정 한 후 평균두께를 구하였다.



[Fig. 3] Point of cross-section measurement

3.2 단면 측정 결과 및 분석

절단된 단면을 디지털 현미경으로 측정한 결과 Fig. 4와 같은 단면을 확인 할 수 있었고, 측정된 값을 Table 3에 나타내었다.

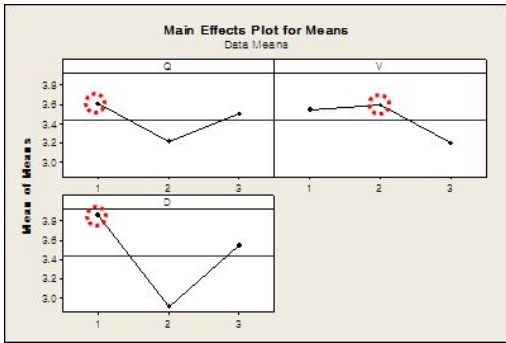


[Fig. 4] Measurements of variables of glass edge sealing

[Table 3] Results of edge sealing shape

No.	Q	V	D	T_1	T_2	T_3	T_4	R_1	R_2	R_3	R_4
1	1	1	1	3.56	3.60	3.81	3.69	4.50	4.53	4.96	4.95
2	1	2	2	2.55	2.64	3.00	2.74	3.11	3.16	3.61	3.43
3	1	3	3	3.06	3.23	3.39	3.04	3.93	4.02	4.07	3.85
4	2	1	2	2.55	2.58	2.64	2.64	3.12	2.98	3.30	3.35
5	2	2	3	3.20	3.25	3.10	3.52	3.67	3.72	3.68	4.07
6	2	3	1	3.36	3.26	3.14	3.06	3.36	3.26	3.14	3.06
7	3	1	3	3.10	3.10	3.18	3.11	3.90	3.89	3.94	3.84
8	3	2	1	4.00	3.81	3.90	3.76	4.63	4.44	4.44	4.50
9	3	3	2	2.47	2.48	2.48	2.50	3.06	3.09	3.09	3.12

다구치 실험법을 사용하는 상용Tool인 Minitab을 이용하여 주효과 분석을 실시한 결과 Fig. 5와 같이 두께에 영향을 미치는 요인은 토치와 유리사이의 거리(D), 수소혼합가스유량(Q), 토치의 이송속도(V)순으로 나타났다.



[Fig. 5] Main effects plots for edge sealing shape

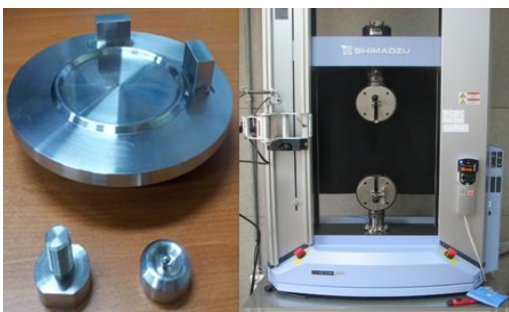


[Fig. 7] Experiment of bending strength

4. 강도실험 및 분석

4.1 강도실험

유리는 취성이 약하기 때문에 접합된 유리의 굽힘강도를 측정하기 위해 ring-on-ring test를 사용하였다. 시험평가는 Euro-standard 규격인 EN-1288-5(Glass in building determination of the bending strength of glass)에 의하여 실시하였고, 규격에 따라 지그를 제작한 후 만능재료시험기(SHIMADZU / AG-X)를 사용하여 굽힘강도 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 지그는 상부의 압력을 가하는 링과 하부의 링의 비율이 1:5이며, 상·하부 링의 반지름은 2.5mm로 구성되었다. Fig. 6은 강도실험에 사용된 지그와 만능재료시험기를 나타낸 것이다.



[Fig. 6] Jig and universal testing machine

강도실험은 Fig. 7과 같이 하부의 링과 접합된 유리시험편 사이에 경도(40±10)를 갖는 실리콘 고무를 배치하였고, 지그와 유리의 접촉으로 인한 균열 및 손상을 방지하기 위해 종이를 사용하였다. 2개의 사각 블록을 이용하여 지그와 유리의 중심을 맞춘 후 강도실험을 공정별 각 2회 실시하였다.

4.2 강도측정 결과 및 분석

만능재료시험기를 사용하여 2N/s의 힘으로 접합된 유리에 하중을 주어 실험을 하였고, 굽힘 강도의 결과는 다음 식(1)에 의해 나타낼 수 있다. Table 4는 강도실험 결과를 나타낸다.

$$\sigma_{bh} = K_2 \frac{F_{max}}{h^2} \quad (1)$$

여기서,

σ_{bh} = 굽힘강도(Mpa)

h = 시편의 두께(mm)

K = 시편의 푸아송비(소다라임유리의 경우 1.04)

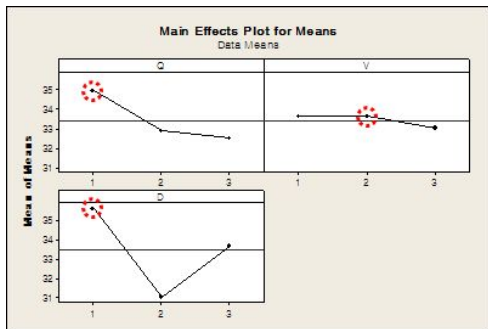
[Table 4] Results of bending strength

No.	Strength ₁ (N)	Strength ₂ (N)	σ_{bh1}	σ_{bh2}
1	1227.5	1120.1	38.47	35.11
2	1035.6	1044.6	32.46	32.74
3	1062.1	1198	33.29	37.55
4	1122.5	1122.5	35.18	27.61
5	1047.5	1044.6	32.83	32.74
6	1127.4	1074.5	35.33	33.68
7	1120.9	968.3	35.13	30.35
8	1238.9	1026.9	38.83	32.18
9	1077.5	784.7	33.77	24.59

접합된 유리의 강도실험 결과를 Minitab의 다구치 실험법을 통하여, 공정변수의 변화에 따른 강도의 주효과 및 분산분석을 실시하였다.

Fig. 8은 유리강도의 주효과도를 나타낸 것으로, 강도에 영향을 미치는 요인은 토치와 유리사이의 거리(D), 수소혼합가스유량(Q), 토치의 이송속도(V)순으로 나타났다.

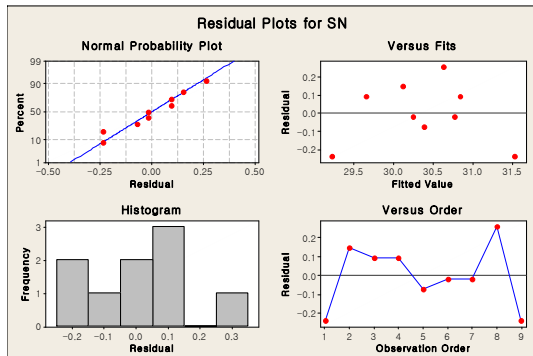
강도실험 결과에 대한 분산분석을 실시한 결과 Table 5와 같이 토치의 이송속도(V)의 P-value값은 0.439로 유의성이 다소 미비하지만, 토치와 유리사이의 거리(D)와 수소혼합가스유량(Q)의 P-value값이 0.022, 0.080으로 유의성이 높게 나타났으며, R-Sq = 94.19%, R-Sq(adj) = 84.52%로 나타나 실험 결과가 유의함을 확인하였다. 이에 따라, 강도에 영향을 많이 미치는 공정변수는 토치와 유리사이의 거리(D)와 수소혼합가스유량(Q)임을 알 수 있다. Fig. 9에 나타낸 잔차 플롯(residual plot)은 잔차가 정규분포를 보임을 나타낸다.



[Fig. 8] Main effects plots for strength

[Table 5] Analysis of variance

No.	SS	MS	F	P
$Q(\ell/\text{min})$	1.000	0.500	6.57	0.080
$V(\text{mm}/\text{min})$	0.060	0.060	0.79	0.439
$D(\text{mm})$	2.645	1.322	17.37	0.022
Error	0.228	0.076	-	-
Total	3.934	-	-	-
S=0.27593	R-Sq = 94.19%	R-Sq(adj) = 84.52%		



[Fig. 9] Residual plots for strength

4.3 접합강도 예측

Minitab의 다구치 예측을 통한 분석 결과 접합 유리의 최대 강도를 갖는 접합공정은 Table 6과 같이 $Q = 11 \ell/\text{min}$, $V = 3.5 \text{mm}/\text{min}$, $D = 4 \text{mm}$ 임을 알 수 있었으며, 유리의 강도에 가장 많은 영향을 미치는 수소혼합가스유량(Q) 1수준, 토치의 이송속도(V) 2수준, 토치와 유리사이의 거리(D) 1수준일 경우의 강도 값을 예측할 수 있다.

예측 결과 최대 강도를 갖는 공정조건의 강도가 37.30 Mpa로 분석되었다. Table 7은 예측된 강도를 나타낸다.

[Table 6] Factor values for Predictions

$Q(\ell/\text{min})$	$V(\text{mm}/\text{min})$	$D(\text{mm})$
11	3.5	3

[Table 7] Predict results of strength

S/N Ratio	Mean	StDev	Ln(StDev)
31.54	37.30	0.32	-0.87

예측된 강도결과의 확인을 위해 최대 강도를 갖는 공정조건 $Q = 11 \ell/\text{min}$, $V = 3.5 \text{mm}/\text{min}$, $D = 4 \text{mm}$ 으로 모서리 접합 실험을 3회 실시하였다. 추가 실험 결과 Table 8과 같이 $\sigma_1 = 37.49 \text{Mpa}$, $\sigma_2 = 35.44 \text{Mpa}$, $\sigma_3 = 38.60 \text{Mpa}$ 로 측정되었다. 최적조건의 접합 유리의 강도는 평균 37.18 Mpa로 예측한 강도와 0.33%의 오차율로 높은 신뢰도를 확인하였다.

[Table 8] Results of prediction experiment

σ_1	σ_2	σ_3
37.49 Mpa	35.44 Mpa	38.60 Mpa

5. 결론

본 논문에서는 수소혼합가스토치를 이용하여 두 장의 소다라임유리 모서리 접합 실험을 실시하고, 모서리 용융 접합 형상의 주효과를 분석하였다. 또한, 접합 강도를 최대화하기 위한 공정조건을 도출하기 위해 공정변수에 따른 강도시험 분석을 수행 하였다.

실험결과 유리 모서리 강도와 접합두께에 영향을 미

치는 요인은 토치와 유리사이의 거리(D), 수소혼합가스 유량(Q), 토치의 이송속도(V) 순으로 나타났다.

다구치 예측을 통해 모서리 접합 유리의 최대 강도를 갖는 공정조건은 $Q = 11\ell/\text{min}$, $V = 3.5\text{mm}/\text{min}$, $D = 4\text{mm}$ 임을 알 수 있었으며, 예측 강도는 37.30Mpa 로 분석되었다. 실험의 타당성을 검증하기 위해 추가 실험을 실시한 결과 평균 강도가 37.18Mpa 로 예측한 강도와 0.33%의 오차율을 보임을 확인하였다.

향후 모서리 접합 방법과 유리의 두께, 종류에 따른 모서리 접합부의 형상과 강도에 대한 실험 및 시뮬레이션을 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] S. S. Kim, "Energy-saving Measures Construction Plan" The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigeration Engineering of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 40-48, 2013
- [2] M. J. Lee, W. S. Kim, W. J. Lee, W. T. Lee, "A Study about Reduction Rates of Building Energy Demand for a Betached House according to Building Energy Efficient Methods" Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 28, No. 5, pp. 275-282, 2012
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Building design guidelines for Energy saving Windows" 2012
- [4] Y. S. Kim, E. S. Jeon, "Mathematical Model of the Edge Sealing Regression Method" Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.13, No. 3, pp. 961-966, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.961>
- [5] J. K. Kim, E. S. Jeon, "Optimization of Ingredients for Vacuum Glazing Pillar Using DOE", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 3, pp. 1002-1007, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.1002>

김 승 종(Seung-Jong Kim)

[준회원]



- 2013년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학 (공학학사)
- 2013년 3월 : 공주대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

진공유리 공정기술, 구조재료공학

전 의 식(Euy-Sik Jeon)

[정회원]



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

<관심분야>

진공유리 공정기술, 구조재료공학, 반도체·자동차공학