

실험계획법에 의한 진공유리의 모서리부 최적 접합공정조건 결정

이종곤*, 전의식⁺, 김영신⁺⁺, 박 호⁺⁺

(논문접수일 2011. 11. 17, 수정일 2011. 12. 30, 심사완료일 2011. 12. 30)

Determination on the Optimal Sealing Conditions of the Vacuum Glass Edge Parts using Design of Experiments Technique

Jong-gon Lee,* Euysik Jeon⁺, Youngshin Kim⁺⁺, Ho Park⁺⁺

Abstract

The glass edge sealing is one of the vacuum glazing core manufacturing process and it needs the high reliability for the vacuum keeping. Conventionally, the glass edge sealing had been being researched by the method that pasted the frit on the glass edge part and bonded two sheets of glass. But this way has the defect that can't make tempered glass. In order to remedy it's faults, in this paper, the glass edge was sealed by using the hydrogen mixture gas torch within the furnace. The parameter having an effect on the glass edge sealing through the basic test was set. And the correlation of the thickness of the glass edge and parameter were analyzed through the design of experiment. By using the Taguchi method, the optimal process condition for the glass edge sealing was drawn and the validity was verified.

Key Words : Glass sealing parameter(유리 접합 변수), Optimal condition(최적 조건), Hydrogen Mixed Gas Torch(수소혼합가스 토치), Taguchi method(다구찌 방법)

1. 서론

산업발전이 고도화됨에 따라 안락한 주거생활에 대한 요구가 높아지고 있으며, 이를 충족시키기 위한 에너지 관리를 위하여 실내의 냉난방에너지 손실을 최소화 할 수 있는 창호에 대한 연구개발이 지속되고 있다.

일반적으로 창호를 통한 열손실량은 주택의 경우 전체 열손실량의 20~40% 정도를 차지하며, 일반 사무소 건물인 경우에는 15~35% 정도를 차지하는 것으로 보고된 바 있다. 이는

창호의 열관류율이 벽체나 지붕의 6~7배 정도이므로 건물의 피 중 열적으로 가장 취약한 부위이기 때문이다. 이러한 창호에서의 문제점을 보완하기 위하여 진공유리의 개발이 시도되고 있다⁽¹⁾. 진공유리는 두 장의 유리사이에 간극을 띄워 진공을 유지할 경우 벽체수준의 단열상태를 유지하는 유리단열소재이다. 진공유리를 개발하기 위하여 많은 선행연구들이 수행되어 왔으며 이 중 두 장의 유리 모서리(glass edge) 부 접합(sealing)이 핵심기술 중 하나이므로 이에 대한 연구가 수행되어왔다. 1987년 Bachli⁽²⁾는 모서리 접합에서 열팽창, 진공 형성, 모서

* (주)알가

+ 교신저자, 공주대학교 기계자동차공학부 (osjun@kongju.ac.kr)
주소: 330-717 충남 천안시 부대동 275

++ 공주대학교 일반대학원 기계공학과

리접합 등 진공유리에 대한 개발 핵심공정을 제시하였다. 1987년 D.K. Benson⁽³⁾은 진공 챔버 안에서 레이저를 이용하여 모서리를 용접하여 진공유리를 제조하는 방식을 제안하였으며, 1997년 Lenzen⁽⁴⁾은 진공유리의 모서리 접합을 위해 유리접착제(Frit)를 바른 후 약 500°C의 가열로에 넣어 유리를 접합하는 기술을 개발하였다.

이 중 가장 많이 사용되는 방법은 유리 모서리 부에 유리접착제를 도포 후 가열하여 두 장의 유리를 접합하는 방법으로, 유리접착제의 제조 및 형상, 가열방법에 따라 분류된다^(5,6).

유리접착제를 이용한 방법은 다음과 같은 문제점들이 발생한다. 첫째, 유리접착제가 겔(gel)상에서 액상으로 액상에서 고상(solid state)으로 변화를 거쳐 접합되므로 공정속도가 느리다. 둘째, 유리접착제의 경우 400°C이상에서 녹아버리므로 700°C 이상 가열해야 하는 열강화 강화유리(tempered glass)의 제작이 불가능하다. 또한, 유리접착제가 고가이므로, 진공유리의 제조비용이 많이 소요되는 문제점을 안고 있다.

기존의 문제점을 해결하고자 로 안에서 고밀도 열원인 수소 혼합가스를 이용하여 두 장의 유리 모서리 부를 직접 용융시켜 접합하는 방안을 제시하였고 기초실험을 통해 공정변수의 공정조건 범위를 선정하였다. 공정 변수 결정을 위해 다구찌(Taguchi Method) 법을 이용하여 공정변수에 따른 영향도 및 최적의 공정조건을 도출하였다.

2. 유리 모서리 부 접합

2.1 시스템 구성

수소혼합가스를 이용하여 유리 모서리 부를 접합을 하고자

1. Torch transfer 2. Furnace 3. Gas torch 4. Gas generator 5. Control panel 6. Coolant

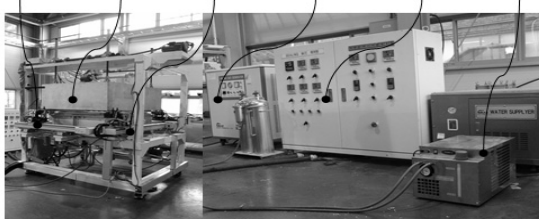


Fig. 1 The system for glass edge sealing

Table 1 The function of the equipment

| Name | Function |
|-------------------|--------------------------------------|
| 1. Torch transfer | Torch moving |
| 2. Furnace | Pre heating for glass |
| 3. Torch | Glass edge sealing |
| 4. Gas generator | Hydrogen mixed gas supply |
| 5. Control panel | Temperature control furnace |
| 6. Collant | Cooling for hydrogen mixed gas torch |

전기로, 고밀도열원용 토치 및 이송장치, 온도제어패널, 토치냉각장치 등으로 Fig. 1과 같이 시스템을 구성하였다. 각 장치의 기능은 Table 1과 같다.

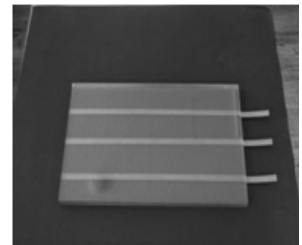
2.2 유리 모서리 접합공정

유리 모서리 부 접합 시 수소혼합가스 토치를 사용하였으며 두 장의 유리사이에 간극을 유지하기 위하여 필러게이지를 사용하였다. Fig. 2는 수소혼합가스를 이용하여 유리 모서리 부 접합 과정을 나타낸 것이다. 유리를 절단한 후 두 장의 유리사이에 필러게이지를 이용하여 0.2mm의 간격을 유지한다.

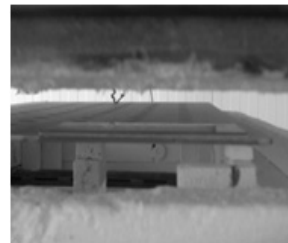
유리 시험편을 전기로 안의 유리 받침대에 정렬하고 토치와 시험편의 거리를 조절한다. 그리고 전기로 온도패널을 이용하여 접합 분위기 온도를 설정하며, 유리 접합 분위기가 설정되면



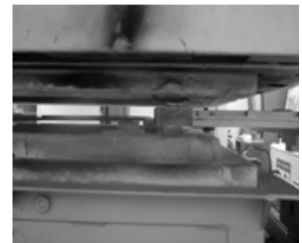
(a) Cutting of glass



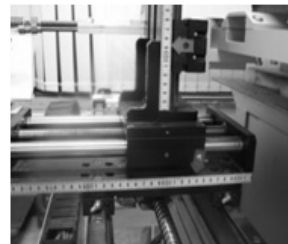
(b) Spacing of between glass



(c) Glass alignment



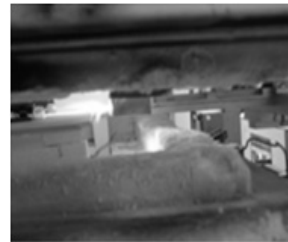
(d) Torch alignment



(e) Torch movement setup



(f) Make a heat source



(g) Glass edge sealing



(h) Cooling of glass

Fig. 2 Experimental procedure for glass edge sealing

전기로의 상부를 올려서 유리 모서리 부 접합이 가능 한 공간을 확보한다. 토치에 수소혼합가스를 열원으로 생성하고 토치의 이송속도와 가스유량을 설정 후 유리 모서리 부 접합을 실시하였다. 접합이 끝나고 유리의 변형 및 파손방지를 위하여 전기로 상부를 닫은 후 서냉하였다.

2.3 로내 온도분포 측정

수소혼합가스를 이용하여 유리 모서리 접합 시 열충격에 의한 유리 파손을 방지하기 위하여 전기를 이용하여 분위기 온도를 조성한 후 접합시험을 실시하였다. 전기로 내부에 유리 받침대(Setter)를 설치하여 유리시편을 지지하고, 전기로 상하부의 열흐름을 원활하게 하기 위하여 유리 받침대에 구멍을 만들었다. 유리 받침대는 유리 예열 시 열평형을 유지하여야 안정적인 접합이 가능하므로, 이를 확인하기 위하여 유리 받침대의

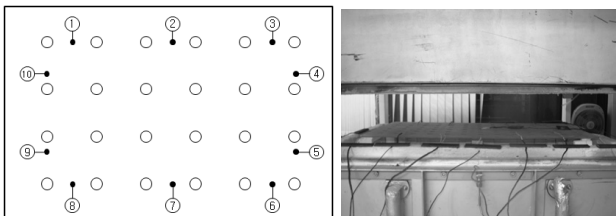


Fig. 3 Measure temperature of setter

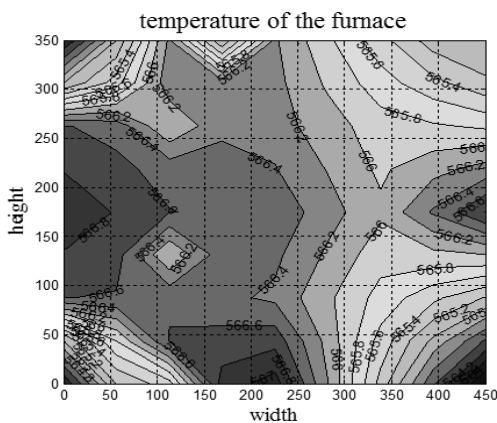
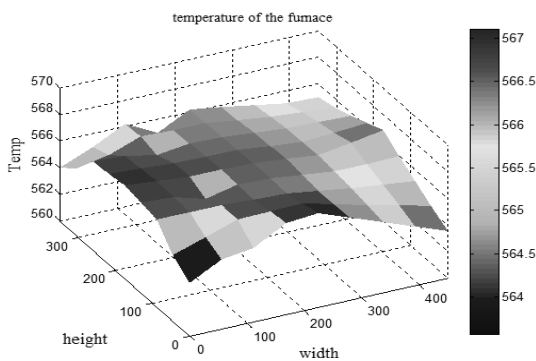


Fig. 4 Temperature profile of setter

온도 분포 측정을 하였다. 로 내부의 유리 받침대 온도 분포 측정은 NI 9211온도 계측장치와 K type 열전쌍을 이용하여 측정하였다. Fig. 3은 유리 받침대의 온도분포를 측정하기 위한 위치를 나타낸 것이다. 총 10곳에서의 온도분포를 측정한 결과 모서리부를 제외한 온도 분포 범위가 Fig. 4에 나타낸바와 같이 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 내외로 전기로 예열 시 유리 받침대에 의한 유리의 열평형에 문제가 되지 않는다는 것을 확인하였다.

3. 유리 모서리 접합시험

3.1 기초시험

Fig.5는 유리 접합 시 토치와 유리를 모식도로 나타낸 것이며, Fig. 6은 두 장의 유리 모서리 부가 용융되어 접합되는 과정을 모식도로 나타낸 것이다. 두 장의 유리가 예열된 상태에서 토치를 통해 열원이 가해져 두 장의 유리 모서리가 용융되며, 두 장의 유리사이 용융부는 표면장력에 의해 상·하 간극을 채우면서 유리 모서리 부 접합이 이루어진다.

토치의 상하위치는 두 장의 유리모서리부가 용융되어 접합될 때 단면의 형상을 결정하는 중요한 공정변수이며, 두 장의 유리 중앙에 정렬시키는 것이 매우 중요하다. 토치의 상하위치가 두 장의 유리 모서리 부의 중앙보다 높게 위치하는 경우 Fig. 7(a)와 같이 상부가 과다 용융되며, 중앙보다 낮게 위치하는 경우 Fig. 7(b)와 같이 하단부의 변형이 증대되는 현상을 보인다.

수소혼합가스량에 변화에 따른 기초 실험한 결과 가스량이

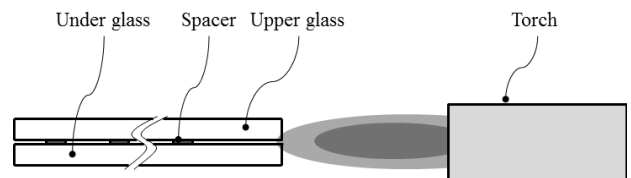


Fig. 5 The location of torch

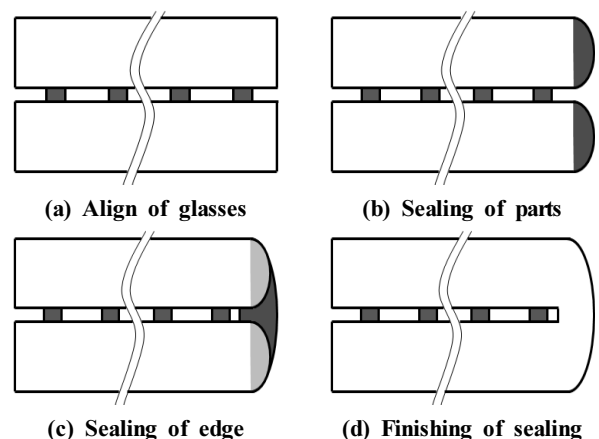


Fig. 6 Process of glass sealing

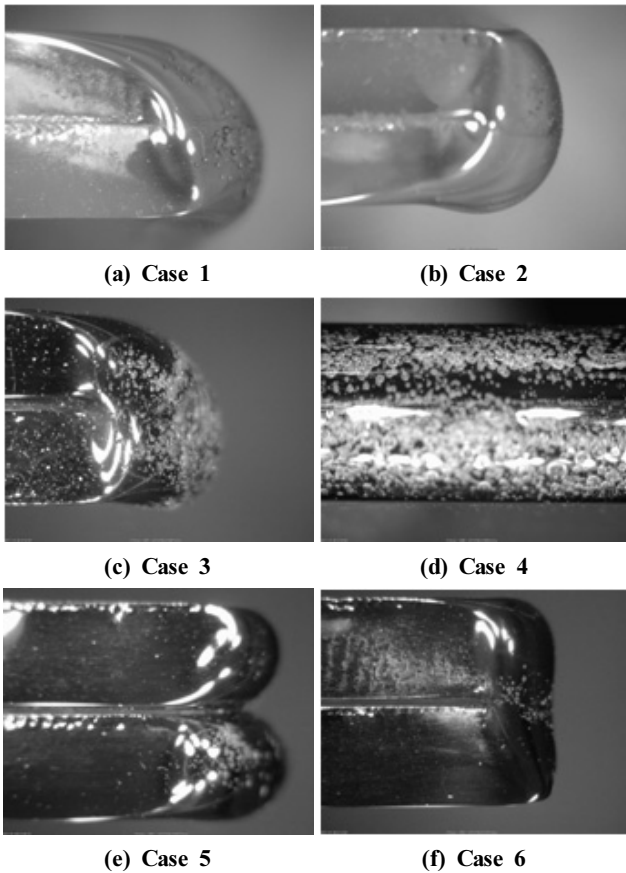


Fig. 7 The shape according to the process variables

많은 경우 Fig. 7(c), (d)와 같이 과도한 용융부를 타내며 기공이 많이 발생하고, 가스량이 부족할 경우 Fig. 7(e)와 같이 접합이 이루어지지 않는 현상이 발생한다.

토치와 유리사이의 거리가 가까우면 토치에 불순물이 많이 묻어 토치 및 유리에 악영향을 미치며, 일정간격 이상 멀어질 경우 모서리 접합이 이루어지지 않는 것을 확인하였다.

또한 토치 이송속도 변화에 따른 기초 실험한 결과 토치의 이송속도가 빠른 경우 접합이 되지 않거나(Fig. 7(f), Fig. 7(g))와 같이 두 장의 유리의 모서리부가 충분한 용융이 이루어지지 않아 목표했던 용융부 형상두께에 미치지 못하는 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

3.2 공정변수 설정

본 연구에서 제안한 방법은 전기로 내에서 유리를 예열하고 유리 모서리 부를 수소혼합가스토치를 이용하여 두 장의 유리 모서리 부를 용융 접합하는 방식으로서 Fig. 8에 나타낸바와 같이 공정변수를 설정하였다. 토치로부터 분사되는 수소혼합가스량(Q), 토치의 이송속도(V), 토치와 유리사이의 거리(D)를 주요 공정변수로 설정하였다.

두 장의 유리모서리부를 용융시켜 접합하므로, 공정변수의

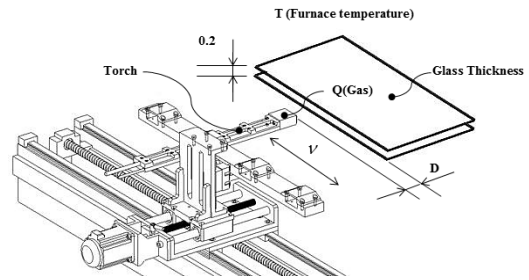


Fig. 8 Glass sealing set of process variables

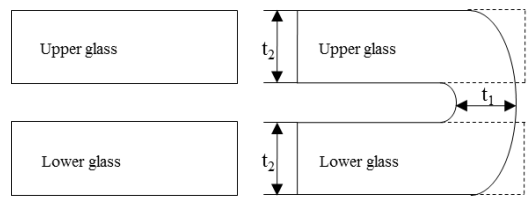


Fig. 9 Schematic diagram of glass sealing cross section

Table 2 Variable conditions for glass edge sealing

| Condition number | 1 | 2 | 3 |
|----------------------|-----|-----|-----|
| Torch speed (mm/min) | 300 | 350 | 400 |
| Distance (mm) | 3 | 4 | 5 |
| Gas (L/min) | 5 | 6 | 7 |

Table 3 L₉(3³) Orthogonal array

| No | Torch speed | Distance | Gas |
|----|-------------|----------|-----|
| 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 |

조건 값에 따라 용융부의 단면 두께가 변하게 된다. 용융부의 단면 두께가 두꺼울 경우, 접합된 모서리 부를 통한 열전도가 많이 발생하므로 열관류 효율이 떨어지게 된다. 상대적으로 형상 단면 두께가 작은 경우, 접합된 모서리 부의 강도가 낮아 응력에 의해 깨지거나, 균열이 생겨 진공을 유지 하지 못한다. 따라서 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 용융부 형상 단면 두께(t1)는 판 유리두께(t2)와 동일하도록 설정하였다.

기초실험을 통하여 전기로의 내부 온도는 600°C로 설정하였으며 각각의 공정변수는 토치 이송속도 300~400mm/min, 토치와 유리사이의 거리는 3~5mm, 가스 량은 5~7L/min으로

설정하였다. Table 2는 공정변수들의 수준을 나타낸 것이다. 유리 종류는 소다라임(soda lime) 유리를 사용하였으며, 두 장의 유리사이의 간격은 진공유리 지지대의 두께와 같은 0.2mm로 설정하였다. 유리 모서리 접합 실험은 Table 3과 같이 3수준 계 $L_9(3^3)$ 의 직교배열표(Orthogonal array)를 사용하여 총 9번을 실시하였다^(7,8).

3.3 유리 용융부 형상 단면 두께 측정

용융부 단면 두께 측정을 위하여 Fig. 10과 같이 절단하였다. Fig. 11은 워터젯 머신을 이용하여 모서리부를 4등분 한 것을 나타낸 것이며, Fig. 12은 시편의 절단면을 나타낸 것이다. 총 9번의 모서리 접합 시험을 통하여 각 공정변수에 따른 용융부 단면의 두께를 측정하였다.

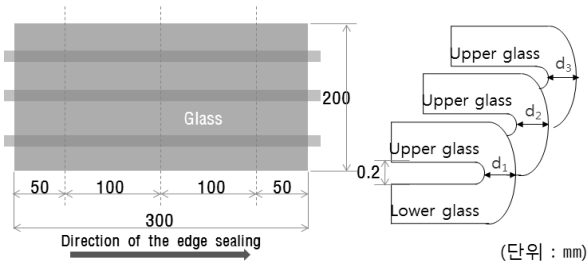


Fig. 10 Cross section of edge sealing

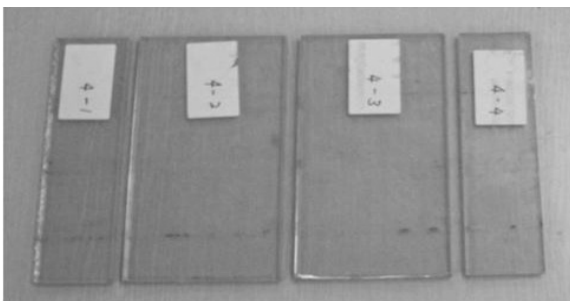


Fig. 11 Cutting specimen of edge sealing

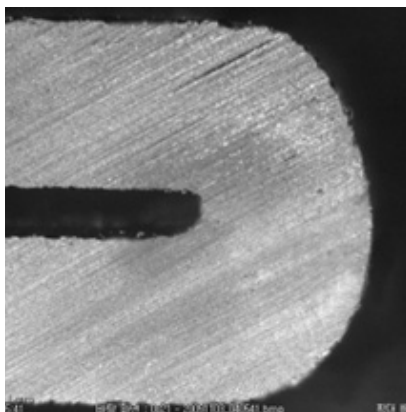


Fig. 12 Cross sections of edge sealing

3.4 최적 공정변수 설정

Table 4는 공정변수별 직교배열법에 따른 유리 모서리 단면 두께 측정 결과를 나타낸 것이다. 이 결과를 미니탭 프로그램을 이용하여 다구찌기법을 적용하였다⁽⁹⁾.

다구찌기법에서 개선을 위한 정도를 나타내는 측정치로 S/N 비를 제시한다. S/N비는 신호 대 잡음의 비율(Signal - to - noise)을 의미하는 것으로, 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향이 힘의 비율로서 나타내진다. 판유리 두께와 용융부의 형상 단면 두께가 같도록 하는 망목특성을 이용하여 S/N비는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S/N = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{n}(S_m - V)}{V} \right] \text{ (dB)} \quad (1)$$

신호 대 잡음 비(S/N ratio)에 대한 주효과도는 공정변수 별 유리 모서리 부 접합에 미치는 영향도를 나타내며, 평균에 대한 주효과도는 공정변수 별 최적의 공정조건을 나타낸다. 유리 두께 측정 결과를 바탕으로 Fig. 13에 신호 대 잡음비에 대한 주효과도를 나타내었다. 그래프의 기울기는 특성치에 미치는 영향을 나타내며 가장 영향을 미치는 공정변수는 가스 량, 토치 이송속도, 토치와 유리사이의 거리 순으로 영향을 미치는 것을 확인하였다.

각각의 인자 및 수준별 평균을 정리한 평균값에 의한 주효과도는 Fig. 14에 나타내었다. 최적의 공정조건은 A2B2C2로

Table 4 Results of the $L_9(3^3)$ orthogonal array for taguchi method

| No. | Torch speed | Distance | Gas | d1 (mm) | d2 (mm) | d3 (mm) |
|-----|-------------|----------|-----|---------|---------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2.79 | 2.90 | 2.92 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2.91 | 2.95 | 3.00 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3.62 | 3.50 | 3.48 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3.15 | 3.20 | 3.16 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 3.35 | 3.40 | 3.41 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2.61 | 2.59 | 2.49 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 3.30 | 3.19 | 3.2 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 2.70 | 2.5 | 2.53 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 2.65 | 2.69 | 2.60 |

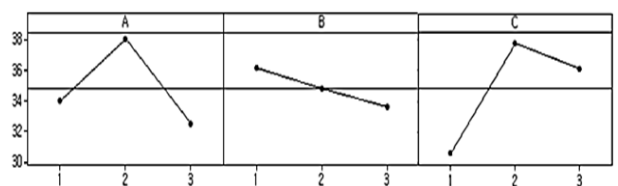


Fig. 13 Main effect plot(data means) for S/N ratios

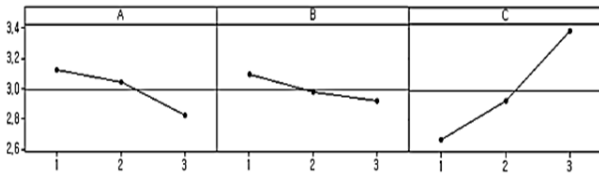


Fig. 14 Main effect plot(data means) for means

Table 5 Optimum conditions

| | |
|----------------------|-----|
| Condition number | 1 |
| Torch speed (mm/min) | 300 |
| Distance (mm) | 3 |
| Gas (L/min) | 5 |

Table 6 S/N ratio and slope in the current estimate of the optimum conditions

| classification | Present | Optimum |
|----------------|---------|---------|
| S/N ratio | 31.05 | 40.89 |
| Average | 2.89 | 2.95 |

Table 5와 같이 토치이송 속도는 350mm/min, 토치와 유리사이의 거리는 4mm, 가스 량은 6L/min이다. Table 6에 현재 조건과 최적 조건에서의 S/N비와 기울기 추정 값을 나타내었다. 이 최적 공정조건이 직교 배열표에 포함되어 있지 않으므로 이의 검증을 위하여 최적 공정조건을 적용하여 실험을 실시한 결과 유리 용융부의 단면 두께가 목표치3mm에 가까운 2.9mm로 측정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 진공유리 개발을 위한 유리 모서리 접합 공정에 대해 새로운 방안을 제시하였으며, 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

- (1) 기존의 진공유리에서 사용한 유리 모서리 접합은 유리 접착제를 사용하는 방식과는 달리, 고밀도 열원인 수소혼합 가스를 이용하여 토치에 열원을 형성하여 로 내에서 두 장의 유리의 모서리 부를 용융시켜 접합하는 방법을 제시하였다.
- (2) 실험계획법을 이용하여 유리 모서리 부 접합의 공정변수별 최적 공정조건을 도출하였다.
- (3) 다구찌 기법을 이용하여 도출된 토치의 속도, 토치와 유리사이의 거리, 가스유량의 최적의 공정변수를 적용하여 모서리 접합을 할 경우 S/N비는 31.05에서 40.89로 증가하

였으며 평균값은 2.89에서 2.95로 3에 가까운 값으로 나타났다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업과 교육과학기술부 (지역거점연구단육성사업/에너지자립형 그린빌리지 핵심기술 사업단)의 지원받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- (1) Cho, S., Jang, C., and Och, H., 1998, "Thermal Characteristic of Vacuum Window Glazing," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 14, No. 8, pp. 235~242.
- (2) Bachli, E., 1987, *Heat-insulating Construction and Lighting Element, International Patent Application*, PCT/CH86/00166.
- (3) Benson, D. K., Tracy, C. E., Susemihl, J., Potter, T., and Soule, D. E., 1990, *Vacuum Window Glazings for Energy-efficient Buildings*, Solar Energy Research Ins., USA.
- (4) Lenzen, M., and Collins, R. E., 1997, "Long-term Field Tests of Vacuum Glazing," *Solar Energy*, Vol. 61, No. 1, pp. 11~15.
- (5) Collins, R. E., 1995, "Vacuum Glazing-A New Component for Insulating Windows," *Building and Environment*, Vol. 30, No. 4, pp. 459~492.
- (6) Song, C. S., Ji, H. S., Kim, J., Kim, J. H., and Ahn, H. S., 2008, "A Study on the Optimization of IR Laser Flip-chip Bonding Process using Taguchi Methods," *Journal of KWJS*, Vol. 26, No. 3, pp. 30~36.
- (7) Kim, Y., and Kwon, W., 2011, "Determination of Optimal Cutting Conditions in Milling Process using Multiple Design of Experiments Technique," *KSMTE*, Vol. 20, No. 3, pp. 232~238.
- (8) Lee, S., 2006, *Utilizing Taguchi Method using Minitab*, Eretec, Korea, pp. 50~60.
- (9) Lee, S., Choi, B., Kang, E., Hong, W., and Chio, H., 2006, "Analysis on FIB-sputtering Process using Taguchi Method," *KSMTE*, Vol. 15, No. 6, pp. 71~75.