Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 14, No. 2 pp. 511-516, 2013

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.2.511

공정변수간의 교호작용을 고려한 모서리 접합두께 및 처짐량 예측 회귀식 도출

김영신[1], 전의식[1*]
[1]공주대학교 기계공학

Derivation of predicting regression equations of bonding thickness and deflection of glass edge considering the interaction effects between the parameters

Youngshin Kim[1] and Euysik Jeon[1*]
[1]**Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju National University**

요 약 유리 모서리 접합은 디스플레이 및 건축, 가전 등 산업계의 다양한 분야에 활용되고 있으며, 패널 접합부의 두께 및 형상은 단열성능 및 강도 등 패널의 주요 성능에 큰 영향을 미치는 요인으로 작용한다. 이런 모서리 접합부의 단면은 수소혼합가스토치를 이용하여 모서리를 용융 접합 할 경우 공정변수에 의해 형상이 결정된다. 따라서 본 논문에서는 가스토치를 이용하여 모서리 접합 시 접합부에 영향을 미치는 공정변수를 설정하고, 접합단면의 형상변수를 설정하여 두 변수간의 상관관계를 분석하기 위한 회귀식을 도출하고자 하였다. 회귀식 도출을 위해 공정변수가 형상변수에 미치는 주효과 및 교호작용을 분석하였으며, 변수간의 교호작용을 고려한 다항회귀식을 도출하였다. 도출된 다항회귀식을 통해 각 공정변수 변화에 따라 모서리 접합 두께 예측 및 처짐량 예측이 가능하다.

Abstract The thickness and deflection of melting parts of the glass edge reach the biggest effect on the intensity and thermal insulation performance. During the sealing process using a hydrogen mixed gas torch, the thickness and the deflection effect of the edge part are affected by process parameters. In order to analyze the correlative relationship of the thickness prediction and the deflection of the edge part according to the process parameters, data was obtained by conducting sealing experiments. The main effects and interaction effects of process parameters for the thickness and the shape of the glass edge parts were analyzed through the design of experiment. A mathematical experiment equation that can predict the thickness and deflection of the edge part according to the process parameters was developed by conducting multiple regression equations.

Key Words : Vacuum glazing, Prediction of the Shape, Edge sealing, Regression Analysis, Interaction effects

1. 서론

두 장의 유리 모서리를 접합하는 기술은 디스플레이 및 건축, 가전 등 산업계의 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 적용분야 확대로 새로운 접합 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. [1-4]

접합 유리패널의 사용분야 중 단열을 요하는 진공유리 패널의 모서리 접합부는 Heat bridge 역할을 하게 되며, 접합두께 및 형상에 따라 패널의 기밀성 및 강도 등에 많은 영향을 미치게 된다.[5-6]

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업과 지식경제부의 사업화연계기술개발을 통해 수행된 연구결과임.
*Corresponding Author : Euysik Jeon (Kongju National University)
Tel: +82-41-521-9284 email: osjun@kongju.ac.kr
Received January 22, 2013 Revised February 4, 2013 Accepted February 6, 2013

본 논문에서는 수소혼합가스토치를 이용하여 유리 모서리부를 용융 접합 하고자 하였다. 모서리 접합부 단면의 두께 및 형상은 모서리를 용융 접합 할 경우 공정변수에 의해 결정된다. 따라서 모서리 접합 시 접합부에 영향을 미치는 공정변수를 설정하고 접합단면의 형상변수를 설정하였으며, 두 변수간의 상관관계를 분석하기 위한 회귀식을 도출하고자 하였다. 회귀식 도출을 위해 공정변수가 형상변수에 미치는 주효과 및 교호작용을 분석하였으며 변수간의 교호작용을 고려한 다항회귀식을 도출하였다. 다항회귀식의 계수값의 유의성을 확인하였으며 유의성이 낮은 경우 오차항으로 풀링하여 회귀식의 타당성을 높혔다. 또한 분산분석을 실시하여 회귀식의 타당성을 검증하였다.

2. 공정변수 및 형상변수 설정

2.1 장치구성

유리모서리 접합 시 열충격에 의한 파손 및 변형 방지를 위하여 전기로 내부의 분위기온도 설정 후 모서리부를 접합하였다. Fig. 1은 전기로와 수소혼합가스토치를 나타낸 것이다.[7]

[Fig. 1] Equipment setting of furnace and hydrogen mixed gas torch

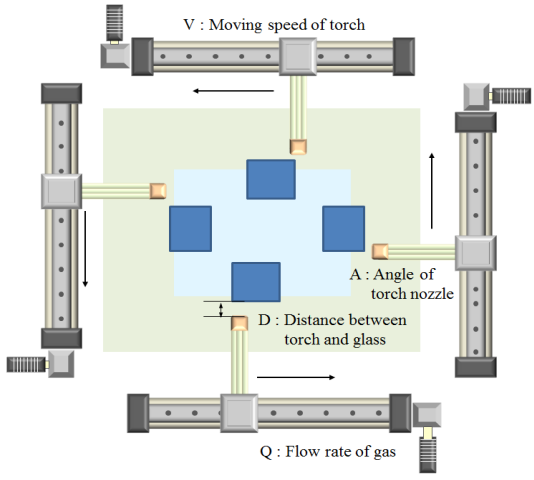
2.2 공정변수 설정

기초실험을 통해 모서리 접합에 영향을 미치는 변수들 중 주요 인자는 공정변수로 설정하여 수준을 설정하고 이외의 인자들은 동일한 조건으로 설정하였다.

수소혼합가스의 유량, 토치의 이송속도, 토치와 유리 사이의 거리, 토치 노즐의 각도, 토치의 높이, 전기로 내부의 분위기 온도, 등 많은 변수들이 유리 모서리 접합에 영향을 미친다. 여러 변수 들 중 지속적인 조절 및 제어가 용이한 가스의 유량, 토치의 이송속도, 토치와 유리사이의 거리, 토치 노즐의 각도 4가지의 변수들을 공정변수로 설정하였다. 선정된 공정변수는 각 2수준으로 설정하였으며 이외 변수 중 전기로의 분위기 온도는 570℃로 일정하게 설정하였으며, 유리의 두께는 3mm, 유리 사이의 간격은 0.2mm로 설정하였다. Table 1은 설정된 공정변수의 수준 및 조건을 나타낸 것이며, Fig. 2는 모서리 접합 공정변수의 개념도를 나타낸 것이다.

[Table 1] Variable conditions for glass edge sealing

Process parameters	Level 1	Level 2
Flow rate of gas(ℓ/min)	10	12
Moving speed of torch (mm/sec)	3	4
Distance between torch and glass(mm)	3	4
Angle of torch nozzle(°)	10	20
Temperature profile of furnace(℃)	570	
Glass thickness(mm)	3	
Gap size of glass(mm)	0.2	



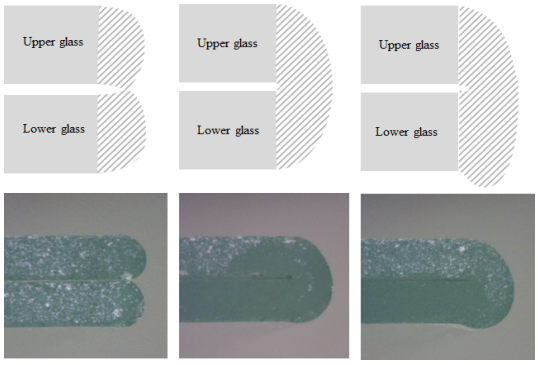
[Fig. 2] Process variables of glass edge sealing

2.3 모서리 형상 변수 설정

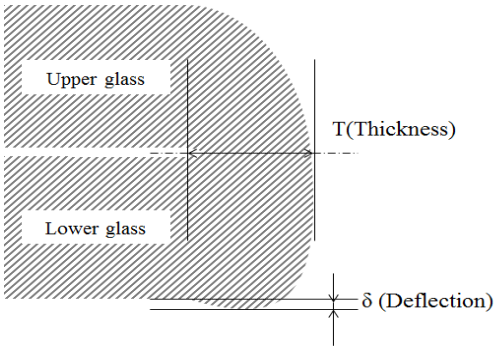
가스토치를 이용하여 유리 모서리 접합 시 접합부는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 크게 3가지의 형태로 분류가 가능하다.

Fig. 3의 a는 모서리부의 용융량이 부족하여 접합두께가 얇고 처짐이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 접합의 기밀성 및 강도 저하의 문제점이 발생한다. b의 경우 일정한 곡률을 갖으며 처짐량 또한 발생하지 않음을 확인할 수 있다. c는 a와 반대로 용융량이 많아 처짐

형상이 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 처짐은 모서리부를 통한 열교현상으로 단열성능을 저하시키며 모서리부의 응력집중으로 파손의 위험이 증가하게 된다. 기초실험 결과를 토대로 모서리 접합부의 형상 변수는 공정변수에 따라 큰 영향을 받는 접합 두께 및 처짐량 2개의 변수로 설정하였다. Fig. 4는 모서리 형상변수의 개념도를 나타낸 것이다.



[Fig. 3] Shapes of cross-section

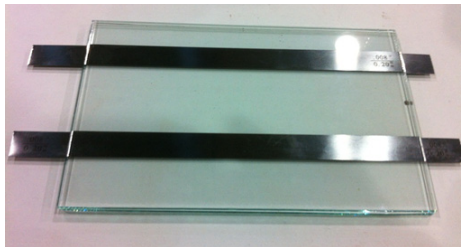


[Fig. 4] Cross-sectional surface with specific parameters

3. 모서리 접합시험 분석

3.1 모서리 접합시험

모서리 접합조건은 완전요인배치법을 이용하였으며, 수소혼합가스의 유량과 토치의 이송속도, 토치와 유리사이의 거리, 토치노즐의 각도를 각각 2가지 수준으로 설정하여 총 16가지의 조건으로 시험을 실시하였다. Table 3은 16가지의 실험조건을 나타낸 것이며, Fig. 5는 모서리 접합 시험 결과를 나타낸 것이다.



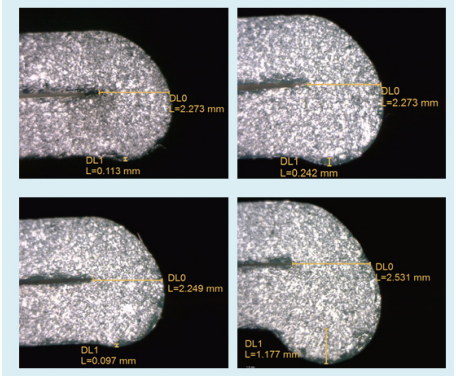
[Fig. 5] Experimental result of glass edge sealing

[Table 3] Conditions of the experiment

NO	Q(ℓ /min)	V(mm/sec)	D(mm)	A(°)
1	10	4	4	10
2	10	4	4	20
3	10	4	3	10
4	10	4	3	20
5	10	3	4	10
6	10	3	4	20
7	10	3	3	10
8	10	3	3	20
9	12	4	4	10
10	12	4	4	20
11	12	4	3	10
12	12	4	3	20
13	12	3	4	10
14	12	3	4	20
15	12	3	3	10
16	12	3	3	20

3.2 모서리 접합두께 및 처짐량 측정

접합된 모서리의 단면을 분석하기 위하여 워터젯을 이용하여 단면을 절단하였으며 각 실험 당 2면을 택하여 접합두께 및 처짐량을 측정 하였다. Fig. 6은 Digital microscope를 이용하여 모서리 접합 단면을 측정한 것을 나타낸 것이며 Table 4는 각 실험조건 별 결과를 나타낸 것이다.



[Fig. 6] Measurements of variables of glass edge sealing

[Table 4] Results of the experiment

NO	Results of experiments							
	T(mm)				δ(mm)			
1	2.04	-	-	-	0.01	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	2.02	2.26	2.11	-	0.27	0.15	0.04	-
4	1.91	2.13	2.32	-	0.08	0.31	0.33	-
5	2.47	2.56	2.46	2.52	0.12	0.27	0.33	0.09
6	1.98	2.03	-	-	0.05	0.07	-	-
7	2.77	2.66	2.67	2.73	0.52	0.73	0.82	0.70
8	2.66	2.3	2.28	-	0.17	0.15	0.23	-
9	2.18	2.48	2.13	-	0.19	0.09	0.22	-
10	2.32	2.26	2.31	2.41	0.31	0.36	0.36	0.33
11	2.39	2.44	2.35	2.43	0.44	0.51	0.52	0.59
12	2.32	2.2	2.31	2.39	0.59	0.59	0.70	0.65
13	2.72	2.85	2.73	2.86	0.25	0.4	0.51	0.48
14	2.61	2.59	2.61	2.87	0.42	0.5	0.62	0.53
15	2.85	2.82	2.74	2.94	0.59	0.67	0.94	0.94
16	2.66	2.6	2.52	2.73	0.84	0.89	1.26	1.29

4. 공정변수의 주효과도 및 교호작용 분석

완전요일배치법을 이용하여 실험한 결과에 대하여 공정변수의 변화에 따른 모서리 접합부의 처짐량에 대해 주효과 및 교호작용을 분석하였다. 주효과 및 교호작용 분석은 Minitab 상용 프로그램을 이용하여 수행하였다. 접합두께 및 처짐량을 예측하기 위하여 분석된 공정변수의 주효과 및 교호작용을 고려하여 실험식을 식(1), 식(2)와 같은 형태로 도출하였다.

$$T(Q,V,D,A) = a_t + b_tQ + c_tV + d_tD + e_tA + f_tQV + g_tQD + h_tQA... \quad (1)$$

$$\delta(Q,V,D,A) = a_\delta + b_\delta Q + c_\delta V + d_\delta D + e_\delta A + f_\delta QV + g_\delta QD + h_\delta QA.. \quad (2)$$

여기서,

a_t~h_t, a_δ~h_δ : 실험계수

Q : 수소혼합가스 유량

V : 토치의 이송속도

D : 토치와 유리 사이의 거리

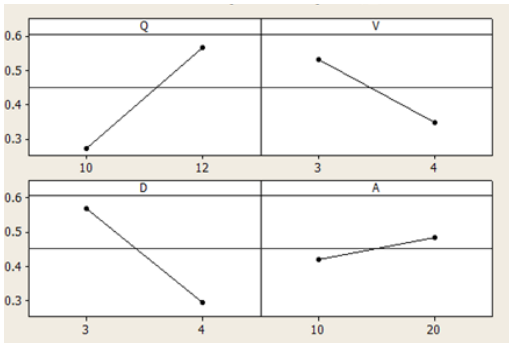
A : 토치노즐 각도

4.1 공정변수에 따른 처짐량의 주효과도 및 교호작용 분석

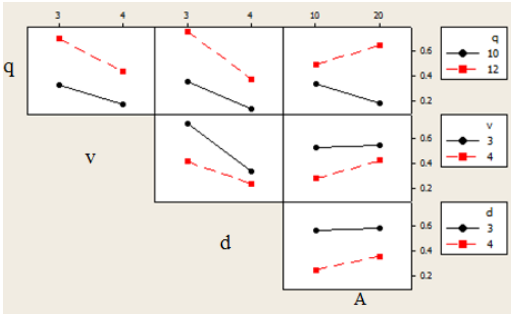
Fig. 7은 모서리 접합부 처짐량의 주효과도를 나타낸 것으로 모서리 접합부의 처짐량은 가스유량, 토치와 유리 사이의 거리, 토치의 이송속도, 토치노즐의 각도 순으로 나타났다. Fig. 8은 공정변수간의 교호작용을 나타낸 것으로 토치의 유량과 속도, 토치와 유리사이의 거리 등 일부 공정변수간의 교호작용은 적게 발생하나, 가스의 유량과 토치 노즐의 각도, 토치이송속도와 거리 사이에 교호작용에 따른 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

앞서 분석한 모서리 처짐량에 영향을 미치는 공정변수의 주효과 및 교호작용 분석을 통해 모서리 접합 시 처짐량을 예측할 수 있는 수학적 모델링을 도출하고자 다항회귀분석을 실시하였다. 공정변수 및 교호작용이 나타난 가스유량과 노즐각도, 이송속도와 토치와 유리 사이의 거리 항을 포함하는 다항회귀식을 도출하고자 하였다. 이때 각 계수의 유의성 분석결과토치의 이송속도와 토치와 유리사이의 거리에 대한 2인자 항에 대한 계수값의 유의성이 다소 떨어지는 것으로 분석되어 이 항은 오차항으로 풀링(pooling)하였으며, 유의한 효과들만 모델에 포함하여 식 (3)과 같은 분석 결과를 도출하였다. 분산분석결과 유의확률 P≤ 0.05이고, 수정결정계수는 78.1%로서 회귀모형이 적합하다고 볼 수 있다. 또한 Fig. 9에 나타낸 잔차 플롯(residual plot)은 잔차가 정규분포를 보이며 등분산성을 만족함을 확인할 수 있다. Table 5는 각 항의 계수값 및 계수값의 유의성을 나타낸 것이며, Table 6은 분산분석결과를 나타낸 것이다.

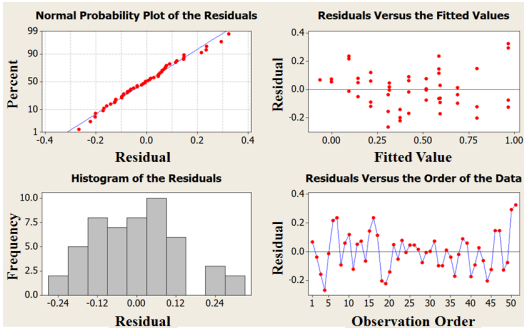
$$\delta = 3.643 - 0.089Q - 0.278V - 0.374D - 0.214A + 0.019QA \quad (3)$$



[Fig. 7] Main effects plots for deflection



[Fig. 8] Interaction plots for deflection



[Fig. 9] Residual plots for deflection

[Table 5] Coefficients of regression equation

Predictor constant	Coef,	Se Coef.	T	P
Constant	3.643	0.736	4.94	0.000
Q	-0.0882	0.0329	-1.41	0.165
V	-0.2780	0.0408	-6.82	0.000
D	-0.3740	0.0410	-9.13	0.000
A	-0.2144	0.0466	-4.60	0.000
QA	0.0193	0.0041	4.67	0.000

[Table 6] Analysis of variance test for mathematical models

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	3.6637	0.7327	36.60	0.000
Residual Error	45	0.9008	0.0200		
Toral	50	4.5645			

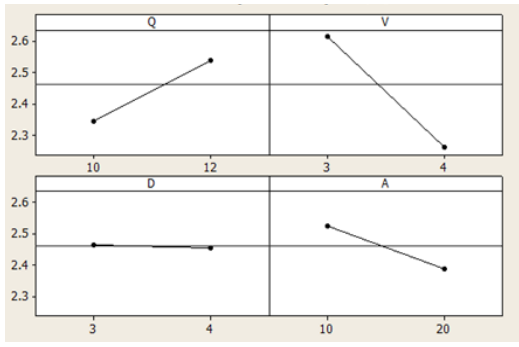
4.2 공정변수에 따른 접합두께의 주효과도 및 교호작용 분석

Fig. 10은 모서리 접합부 두께의 주효과도를 나타낸 것으로 모서리 접합부의 두께는 토치의 이송속도, 가스유량, 토치노즐의 각도, 토치와 유리사이의 거리 순으로 나타났다. Fig. 11은 공정변수간의 교호작용을 나타낸 것으로 토치의 속도와 노즐각도, 토치의 유량과 노즐각도 등 교호작용이 발생함을 알 수 있다.

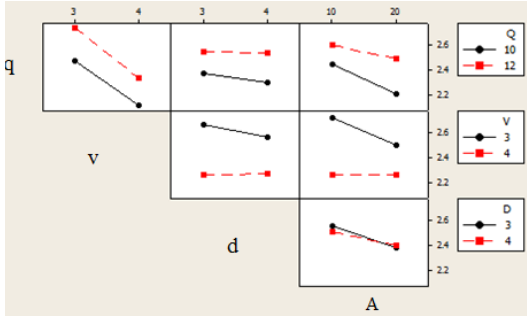
모서리 접합두께에 영향을 미치는 공정변수의 주효과 및 교호작용 을 통해 모서리 접합 두께를 예측할 수 있는 실험식을 도출하고자 다항회귀분석을 실시하여, 공정변수 및 2인자 교호작용이 발생한 항을 포함하는 회귀식을 도출하였다. 유의성이 낮은 항은 오차항으로 풀링하고 유의한 효과들만 모델에 포함하여 식 (4)와 같은 분석 결과를 도출하였다.

$$\delta=3.99-0.139Q-0.733V-0.101D-0.094A+0.0229VA \quad (4)$$

분산분석결과 유의확률 P≤ 0.05이고, 수정결정계수는 77.1%로서 회귀모형이 적합하다고 볼 수 있다. 또한 Fig. 12에 나타낸 잔차 플롯은 잔차가 정규분포를 보이며 등분산성을 만족함을 확인할 수 있다. Table 7은 각 항의 계수값 및 유의성을 나타낸 것이고, Table 8은 분산분석결과를 나타낸 것이다.



[Fig. 10] Main effects plots for thickness



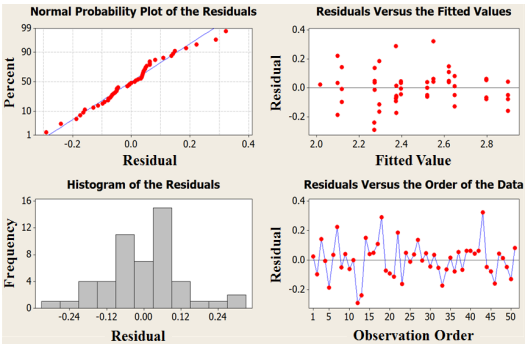
[Fig. 11] Interaction plots for thickness

[Table 7] Coefficients of regression equation

Predictor constant	Coef,	Se Coef.	T	P
Constant	3.9870	0.4466	8.93	0.000
Q	0.1387	0.0188	7.38	0.000
V	-0.7330	0.1132	-6.48	0.000
D	-0.1013	0.0368	-2.75	0.008
A	-0.0938	0.0251	-3.75	0.001
VA	0.0229	0.0072	3.17	0.003

[Table 8] Analysis of variance test for mathematical models

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	2.8258	0.5651	34.73	0.000
Residual Error	45	0.7322	0.0162		
Toral	50	3.5580			



[Fig. 12] Residual plots for thickness

5. 결론

본 논문에서는 유리모서리 접합 시 수소혼합가스토치를 이용하여 용융 접합 하였으며, 용융 접합 시 모서리부의 접합 두께 및 처짐량에 영향을 미치는 공정변수의 주효과 분석 및 교호작용을 분석하였다. 공정변수간의 2인자 교호작용을 고려하여 다중회귀분석을 실시하였으며, 모서리의 접합 두께 및 처짐량의 예측이 가능한 실험식을 도출하였다.

References

[1] Byeong-Kwon Ju, Duck-jung Lee, Jin-Wook Jeong, Gwon-Hin Moon, Young-Cho Kim, You=Hi Lee, PDP Tubeless packaging Process Using Glass-to-glass Vacuum-Electrostatic Bonding, KIEE. Vol 50C, No, 1, pp. 37-40, 2001

[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] G. Hwang, "A Study on the Sintering and Mechanical Properties of Glass Frit for Barrier rib materials of Plasma Display Panel," Hongik Univ., 2001

[4] Jeong Suh, Dongsig Shin, "Laser-Based Glass Soldering" KWIS, Vol. 27, No.4, pp, 1-5, 2009
DOI: http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2009.27.4.001

[5] Bo-Hwa Lee, Il Seob Yoon, Tae-Ho Song, Ho sang Kwak, "Experimental Study on Manufacturing of Insulation Vacuum Glazing and Measurement of the Thermal Conductance", KSME, Vol. 30, No. 8, pp. 772-779, 2006
DOI: http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2006.30.8.772

[6] Il Sun Hwang, Young Lim 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, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.4.582

[7] Youngshin Kim, Euysik Jeon, "Mathematical Model of the Edge Sealing Parameters for Vacuum Glazing Panel Using Multiple Regression Method" KAIS, Vol.13, No.3, pp.961-966, 2012
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.961

김 영 신(Youngshin Kim) **[준회원]**

- 2010년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 2012년 6월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 공학박사 수료

<관심분야>
진공유리 공정기술, 구조재료공학

전 의 식(Euysic Jeon) **[정회원]**

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

<관심분야>
진공유리 공정기술, 구조재료공학, 반도체·자동차공학