

## 비선형회귀분석을 이용한 진공유리 모서리 접합단면 형상예측

김영신<sup>1</sup>, 전의식<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계공학, <sup>2</sup>공주대학교 기계자동차공학부

### Prediction of the Edge Sealing Shape on the Vacuum Glazing Using the Nonlinear Regression Analysis

Youngshin Kim<sup>1</sup> and Euysik Jeon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

**요약** 수소혼합가스토치를 이용하여 유리 모서리 접합 시 접합부의 형상은 수소혼합가스의 유량, 토치의 이송속도, 토치와 유리사이의 거리 등 많은 공정변수들에 의해 영향을 받는다. 모서리 접합형상은 유리패널의 단열 및 기밀, 강도성능에 영향을 미치므로, 공정변수에 따른 접합부 형상예측에 대한 연구가 수행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 공정변수 설정 및 실험분석을 통하여, 공정변수에 따른 단면형상을 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 도출된 회귀식에 각 공정변수값을 적용하여 접합형상을 예측하고, 실제 모서리 접합 실험결과와 비교하여 회귀식의 타당성을 검증하였다.

**Abstract** While using the hydrogen mixture gas torch, the glass edge sealing and the shape of the edge sealing parts is affected by many parameters such as flow rate of gas, traveling speed of torch, distance between glass and torch. As the glass edge sealing shape have effects on the insulation and airtightness and strength of the glass panel; the sealing shapes are predicted according to the process parameters. The paper highlight the nonlinear regression equations of the cross-sectional shape of the sealing shape according to the parameters, that is experimentally predicted later compared and verified the equation with the experimental result.

**Key Words** : Vacuum glazing, Prediction of the Shape, Edge sealing, Nonlinear regression analysis, Piecewise cubic hermite interpolation polynomial

### 1. 서론

전세계적인 자원고갈 및 에너지 소비량 증가에 따라 신재생에너지 및 에너지 손실 절감에 대한 사회적 관심이 높아지고, 사회전반에 걸친 정부의 지원 및 규제가 강화되고 있는 실정이다. 특히 총에너지 사용량 중 20%가 가정과 상업용 건물에서 사용됨에 따라 최근 건축물에서 발생하는 에너지 손실을 완화하기 위하여 그린홈 100만

호 프로젝트, 사용에너지 및 온실가스 배출량 표시 의무화, 건물에너지 효율등급제 등 많은 정부정책 및 규제가 강화되고 있다[1-3]. 이에 따라 건축물에서 건물계획, 설비시스템계획으로 구분하여 에너지 저감요소를 선정하였다. 이중 건물계획부분의 에너지 저감 요소는 침기, 창면적비, 벽체 단열성능, 유리 열관류율 등 친환경외피에 대한 부문이 선정되었다[4,5]. 이런 친환경외피에 중창호는 2012년 7월부터 창호 에너지소비효율등급제가 적용되면

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업과 지식경제부의 사업화연계기술개발을 통해 수행된 연구 결과임

\*Corresponding Author : Euysik Jeon (Kongju National Univ.)

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

Received February 20, 2013

Revised March 6, 2013

Accepted March 7, 2013

서 로이유리의 적용 및 평가방법, BIPV 창호, 진공유리창호 등 많은 연구가 진행 중이다[6,7].

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

진공유리는 1893년 Dewar flask[8]로부터 기본적인 개념이 시작되었고, 1987년 Bachli[9]는 모서리 접합에서 열팽창, 진공 형성, 모서리접합의 여러 방법을 제시하여 진공유리에 대한 개발 가능성을 높였다. 1997년 Lenzen[10]은 진공유리의 모서리 접합을 위해 저용점 글라스(Frit)를 바른 후 약 500℃의 가열로에 넣어 유리를 접합하는 기술을 개발하였다.

최근 개발된 진공유리는 프리트를 이용하여 모서리를 접합하였으나, 프리트를 사용하여 모서리를 접합할 경우 진공유리패널의 열강화가 불가능할 뿐만 아니라 프리트와 유리의 열팽창계수 차이로 인해 접합기밀성이 저하되는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 수소혼합가스토치를 이용하여 유리 모서리부를 접합 하였으며 공정변수에 따른 접합부 형상을 예측하고자 하였다.

단열유리패널의 모서리 접합부는 진도에 의한 열손실이 발생하는 Heat bridge 역할을 하게 되므로 접합부 두께 및 처짐을 최소화 하여야 한다. 하지만 접합강도 및 기밀성을 고려하여 일정 두께 및 형상을 요하므로, 모서리 접합 공정변수에 따른 접합부 형상 예측이 선행되어야 한다.

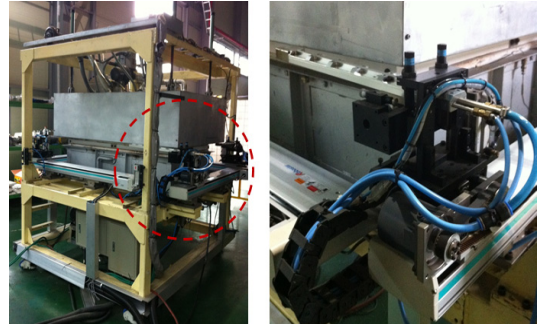
예비시험을 통해 공정변수를 설정하였으며, 모서리 접합부의 형상을 나타내기 위한 형상변수를 설정하였다. 직교배열표를 이용하여 접합시험을 수행하였으며, 접합된 단면을 절단하여 접합 모서리부 형상을 데이터화 하였다. 비선형회귀분석을 실시하여 공정변수와 형상간의 수학적 관계식을 모델링 하고 모서리 접합 단면 형상을 예측하였다. 또한 도출된 회귀식의 타당성 검증을 위해 추가시험을 실시하였으며, 추가시험 측정형상과 예측된 단면 형상과의 비교분석을 실시하였다.

## 2. 유리 모서리 접합 시험

### 2.1 장치구성

진공유리 모서리 접합을 위하여 수소혼합가스 토치를 이용하여 유리 모서리부를 용융 접합하였다. 열 충격에 의한 유리 파손 및 변형 방지를 위해 전기로 내에서 모서리

리 접합을 수행하였으며 Fig. 1은 모서리접합 시험장치 구성을 나타낸 것이다.



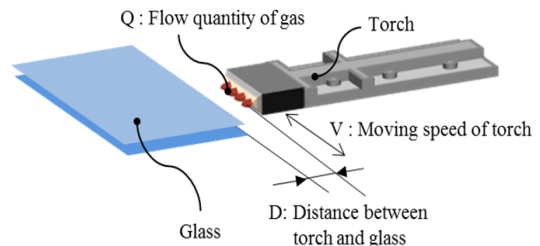
[Fig. 1] Equipment setting of furnace and hydrogen mixed gas torch

### 2.2 공정변수 설정

수소혼합가스토치를 이용하여 유리 모서리부에 열원을 가하면 두 장의 유리 모서리는 용융되며, 두 장의 유리사이 용융부는 표면장력에 의해 상·하 간극을 채우면서 유리 모서리부 접합이 이루어진다.

기초시험 결과 분위기 온도, 모서리 접합 속도, 가스유량 및 토치의 각도, 토치와 유리사이의 거리 등 여러 공정 변수가 유리모서리 접합에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이 중 모서리 접합 속도(V), 토치의 가스 유량(Q), 토치와 유리사이의 거리(D)를 공정변수로 설정하여 각 각에 대해 3수준으로 설정하였다.

이외의 공정변수들 중 로 내부의 분위기 온도는 570℃로 설정하고, 토치의 각도는 유리패널과 수평이 되도록 설정하였다. 시험 유리편의 두께는 상·하판 유리 모두 3mm로 설정하였으며, 상판과 하판 유리 사이의 간격은 0.2mm의 필러게이지를 이용하여 간격을 유지하였다. Fig. 2는 모서리 접합 공정변수에 대한 개념도를 나타낸 것이며, 설정된 공정변수들의 변수 값을 Table 1에 모두 나타내었다.



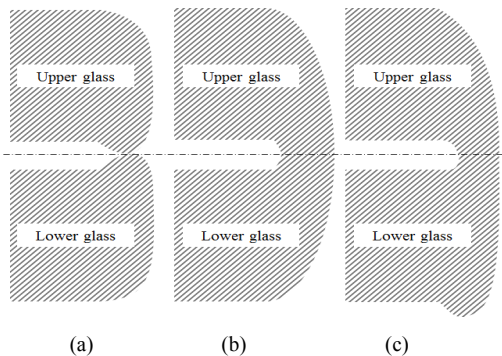
[Fig. 2] Process variables of glass edge sealing

[Table 1] Parameters condition of glass edge sealing

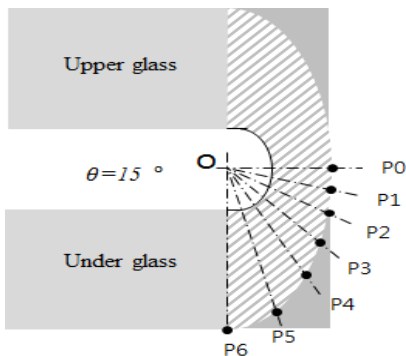
Process parameters	Level1	Level2	Level3
Flow rate of gas (ℓ/min)	10	11	12
Moving speed of torch (mm/sec)	3	4	5
Distance between torch and glass(mm)	3	4	5
Temperature profile of furnace(°C)	570		
Glass thickness(mm)	3		
Gap size of glass(mm)	0.2		

### 2.3 모서리 형상 변수 설정

진공유리패널의 모서리 접합부 형상은 모서리 접합공정변수에 따라 많은 영향을 받는다. 접합에너지의 총량이 적으면 Fig.3 (a)와 같이 모서리 부분이 일부만 용융되고 접합되지 않으며, 일정 에너지량에서 (b)와 같이 접합이 이루어지며, 또한 에너지 총량이 많으면 (c)와 같이 용융부가 흘러내리는 형상이 발생한다. 이런 접합부의 형상을 표현하기 위하여 fig. 4에 나타낸 바와 같이 용융부의 하부를 15°간격으로 6등분하였다. 6 등분 된 하부 P0~P6와 원점 O에서부터의 거리를 형상변수로 설정하였다.



[Fig. 3] Process variables of glass edge sealing



[Fig. 4] cross-sectional surface profile with specific parameters

## 3. 공정변수와 모서리 상관 관계식 도출

### 3.1 모서리 접합실험

Table 2에 나타낸 바와 같이 실험 Matrix를 설정하였다. 실험Matrix는 수소혼합가스의 유량과 토치의 이송속도, 토치와 유리사이의 거리를 각각 3가지 수준으로 설정하고 직교배열표를 이용하여 작성하였으며, 총 9가지의 조건으로 실험을 실시하였다. 직교배열표의 이용은 공정 조건 및 수준이 많을 경우 실험의 횟수를 증가시키지 않고 실험에 많은 인자를 넣을 수 있으며, 실험 데이터로부터 요인변동 계산 및 분산분석이 용이하다는 장점을 가지고 있다.

[Table 2] The L9(3<sup>3</sup>) orthogonal array for taguchi method

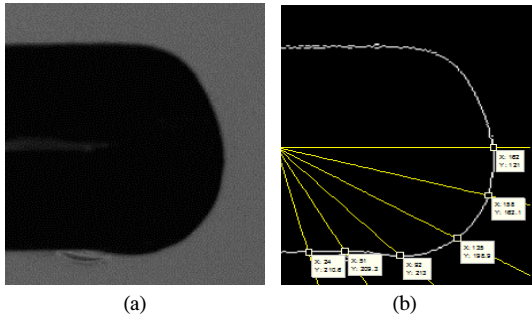
No	Q(ℓ /min)	V(mm/sec)	D(mm)
1	10	3	3
2	10	4	4
3	10	5	5
4	11	3	4
5	11	4	5
6	11	5	3
7	12	3	5
8	12	4	3
9	12	5	4

### 3.2 모서리 단면 분석

접합된 모서리의 단면을 분석하기 위하여 워터젯을 이용해 단면을 절단하였다. Fig. 5는 모서리 접합 시험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6 (a)는 접합된 실험편의 절단 단면을 나타낸 것이며, Fig. 6 (b)는 Matlab 프로그램을 이용하여 모서리 절단면의 이미지 처리를 수행한 후 모서리 좌표를 도출하였다. 도출된 좌표데이터를 원점과의 거리로 산출하여 Table 3에 나타내었다.



[Fig. 5] Result of glass edge sealing



[Fig. 6] Glass edge shape  
(a) Original image (b) Binary gradient mask of glass edge shape

[Table 3] The measurement data of the edge

NO	The measurement data						
	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	153.0	159.1	160.5	151.3	125.9	96.6	94.0
2	165.0	167.4	160.5	131.5	106.0	96.3	94.0
3	122.0	170.5	173.2	130.1	106.0	96.6	93.0
4	150.0	159.1	160.5	151.3	124.0	100.4	96.0
5	155.0	160.2	154.7	134.4	108.0	96.6	95.0
6	167.0	170.5	162.8	135.8	110.0	100.4	96.0
7	148.0	155.0	159.3	155.6	140.0	115.9	100.0
8	165.0	175.7	172.0	149.9	110.0	96.6	95.0
9	170.0	171.5	163.9	142.8	110.0	100.4	96.0

### 3.3 비선형 회귀식 도출

모서리 접합 형상은 매우 복잡한 비선형 관계로 이루어져 있으며 정확한 형상을 예측하는 것은 매우 어렵다. 그러나 수학적 모델링을 통해 근사한 형상예측은 가능하다[11]. 모서리 접합 공정변수와 유리 모서리 형상간의 상관관계를 식 (1)과 같이 나타내고자 하였다.

$$f_i(Q, V, D) = a_i Q^{b_i} V^{c_i} D^{d_i} \quad (1)$$

여기서,

Q ; 수소혼합가스 유량

V ; 토치의 이송속도

D ; 토치와 유리 사이의 거리

$a_i \sim d_i$ 는 토치의 유량, 토치의 이송속도, 토치와 유리 사이의 거리에 의해 영향을 받는 실험계수이며 상수 값을 갖는다. 공정변수와 모서리 접합부 형상간의 관계 도출을 위하여 비선형다중회귀분석법(Multiple regression analysis method)을 사용하였으며, 그 결과 원점에서 형상

변수로 설정한 P0~P6점까지의 거리를 각각 산출할 수 있는 식 7개를 식(2)~(8)와 같이 비선형회귀식으로 도출하였다. 도출된 관계식에 각 공정변수를 대입하여 원점 O에서부터 P0~P6까지의 거리 데이터를 예측할 수 있다.

$$P0 = 10^{2.137} Q^{-0.023} V^{0.216} D^{-0.063} \quad (2)$$

$$P1 = 10^{2.074} Q^{0.116} V^{-0.136} D^{-0.099} \quad (3)$$

$$P2 = 10^{2.025} Q^{0.240} V^{-0.002} D^{-0.113} \quad (4)$$

$$P3 = 10^{1.774} Q^{0.590} V^{-0.275} D^{-0.126} \quad (5)$$

$$P4 = 10^{1.828} Q^{0.461} V^{-0.406} D^{-0.017} \quad (6)$$

$$P5 = 10^{1.558} Q^{0.442} V^{-0.113} D^{0.082} \quad (7)$$

$$P6 = 10^{1.803} Q^{0.172} V^{-0.029} D^{0.026} \quad (8)$$

개발된 수학적 모델의 유의성 판단을 위해 분산분석을 수행하였으며 결정계수( $R^2$  : Coefficient of Determination), 수정결정계수( $AR^2$  : Adjusted Coefficient of Determination)와 유의성(P-value)을 산출하였다. Table 4는 도출된 회귀식의 분산분석 결과를 나타낸 것이다.

P0 ~ P3의 회귀식은 P4~P6에 비하여 높은  $R^2$ 값과 높은 유의 수준을 보인다. 이는 P0 ~ P3의 측정값은 공정변수에 따라 민감하게 변하는 반면, P4~P6는 일부실험조건에서 동일한 결과를 보였기 때문이다.

도출된 회귀식의 타당성 검증을 위하여 추가실험을 실시하였다. 추가실험은 직교배열표에 의해 실험조건으로 포함되지 않았던 3가지의 경우에 대하여 수행하였다. 토치의 유량 10,11,12 토치의 이송속도, 3,4,5 토치와 유리 사이의 거리 5,4,3의 각 조건으로 수행하였다. Table 5는 개발된 비선형회귀식에 공정변수를 적용하였을 경우 O점부터 P0~P6의 까지의 거리를 예측한 결과를 나타낸 것이고, Table 6은 각 공정변수를 적용하여 추가 실험한 후 측정된 결과값이다. 예측값과 실험값의 공정변수 별 평균 오차는 각 4%, 1%, 6%의 오차를 보인다.

[Table 4] Analysis of variance test for mathematical models

NO.	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Standard error of estimate	0.009	0.010	0.007	0.009	0.027	0.024	0.006
Coefficient of multiple correlation	0.946	0.915	0.889	0.967	0.870	0.735	0.804
Coefficient of determination	0.90	0.84	0.79	0.94	0.76	0.54	0.65
Adjusted coefficient of determination	0.81	0.71	0.63	0.88	0.58	0.19	0.38
P-value	0.01	0.04	0.07	0.07	0.1	0.3	0.2

[Table 5] Result of predicted data using regress model

No.	Input value			Prediction data						
	Q	V	D	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	10	3	5	149	153	153	140	121	100	95
2	11	4	4	160	165	161	140	113	100	96
3	12	5	3	171	177	169	144	108	99	96

[Table 6] Result from experiments

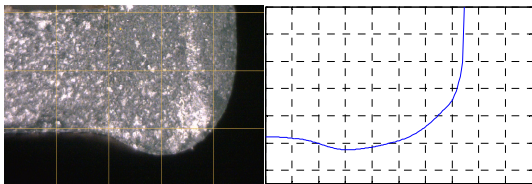
No.	Input value			Experimental data						
	Q	V	D	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	10	3	5	149	156	162	152	126	96	93
2	11	4	4	160	146	158	140	112	100	94
3	12	5	3	171	183	185	168	125	100	96

#### 4. 보간법을 이용한 형상 예측

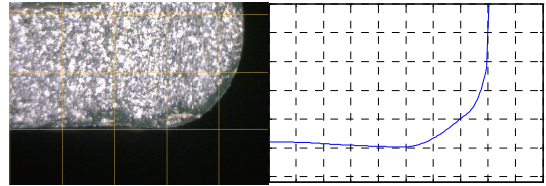
접합 단면의 형상 예측을 위해 공정변수들을 입력하여 P0~P6의 값을 도출하고 Piecewise Cubic Hermite Interpolation polynomial을 이용하여 접합형상을 예측하고, 실험결과 단면형상과 비교하였다.

Piecewise Cubic Hermite Interpolation은 주어진 점들로부터 해당 곡선 혹은 직선을 구하는 방법으로, x좌표와 y좌표를 각각 알면 주어진 점들과 기울기를 바탕으로 3차 이내의 방정식들로 곡선을 근사화 할 수 있다. 앞 절에서 도출된 회귀식으로부터 모서리부 형상변수 7점의 데이터를 산출 한 후 Piecewise Cubic Hermite Interpolation을 통하여 접합부 형상을 예측하였다. Fig. 7 - Fig. 9는 추가 실험결과 모서리 접합부 하부의 단면형상과 보간법을 통해 예측된 형상을 나타낸 것이다.

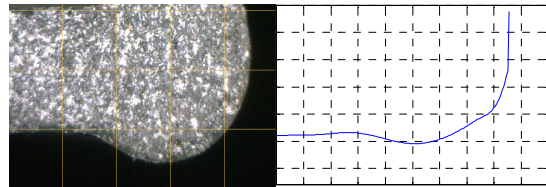
실험결과 얻은 데이터를 바탕으로 접합부 좌표를 설정하여 형상을 표현하였기 때문에 형상이 물리적으로 어떤 이유에 근거하여 형성된다는 것을 밝힐 수는 없다. 또한 3차 곡선으로 형상을 예측하였으며 복잡한 형상을 근사화하기 위해서는 고차항의 보간법을 활용하여 보다 정확한 예측이 가능할 것이다.



[Fig. 7] Comparison of experiment with piecewise cubic hermite interpolation with use experiment date (10l/min, 3mm/min, 5mm)



[Fig. 8] Comparison of experiment with piecewise cubic hermite interpolation with use experiment date (11 l/min, 4mm/min, 4mm)



[Fig. 9] Comparison of experiment with piecewise cubic hermite interpolation with use experiment date (12 l/min, 5mm/min, 3mm)

#### 5. 결론

본 논문에서는 진공유리패널의 진공도를 유지하기 위해 높은 신뢰도를 요하는 모서리 접합공정에 대해 수소 혼합가스토치를 이용하여 접합하는 방법을 제시하였다.

수소혼합가스토치를 이용하여 모서리 접합 시 공정변수에 따라 접합부 하부 형상의 관계분석을 위해 모서리 접합형상에 영향을 미치는 토치의 유량, 토치의 이송속도, 토치와 유리사이의 거리인 3가지 공정변수를 3수준으로 설정하고, 접합부 형상을 나타내기 위해 모서리부의 각 7점과 원점에서부터의 거리를 형상변수로 설정하였다.

접합부를 절단하여 설정한 형상변수의 데이터를 측정하였으며 측정된 결과를 바탕으로 회귀분석을 실시하여 형상변수 예측이 가능한 비선형회귀식을 도출하였다. 추가실험을 통하여 예측값과 실험값의 오차가 10%내임을 확인하였다.

비선형회귀식으로 예측된 데이터를 바탕으로 Piecewise Cubic Hermite Interpolation을 통해 모서리 접합부의 형상 예측이 가능함을 보였다.

#### References

- [1] T. Lee, Y. Son, and S. Yoon, "A study on ventilation and heat transfer coefficient of passive ventilation skin",

- SAREK, Vol 24, No. 9, Korea, pp. 679-684, 2012
- [2] C. Cheong, J. Kim, T. Kim, S. Leigh, "Analysis on the improvement factor of residential building energy rating system in the respect of passive house", AIK, Vol 26, No. 3, Korea, pp 235-243, 2010
- [3] S. Song, H. Yang, J. Lee, Y. Mun, "A Study on improving the building energy performance rating of a public office building using a dynamic energy simulation program", AIK, Vol. 27, No. 11, Korea, pp. 381-391, 2011
- [4] U. Sung, S. Cho, and K. song, "An analysis on theraml performance and economic of heat recovery ventilation system integrated with window", SARECK, Vol. 24, No. 8, 2012, Korea, pp. 646-655, 2012
- [5] J. Lee, S. Chang, "Systematic performance assessments for the design of high performance glazing", AIK, Vol. 28, No. 2, Korea, pp. 3-12, 2012
- [6] S. Sim, J. Yoon, and U. Shin, "A study on the application effect of DSSC BIPV window system in office build considering cooling-heating-lighting energy", KSES, Vol. 31, No. 3, Korea, pp. 67-72, 2011  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7836/kses.2011.31.3.067>
- [7] S. Cho, J. Seo, U. Sung, J. Park, H. Lim, and W. Hon, "Heating performance analysis of convergent system of vacuum window envelopes", SAREK, Korea, pp. 192-197, 2010
- [8] J. Dewar, Collected papers of Sir James Dewar, Cambridge University Press, Cambridge, 1927.
- [9] E. Bachli, Heat-insulating construction and lighting element, International Patent Application, No. PCT/CH86/00166, 1987
- [10] Lenzen, M, Collins, R.E, "Long-term field tests of vacuum glazing," Solar Energy 61, pp. 11-15, 1997  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00038-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00038-8)
- [11] J. Kim, I. kim, H. "Na, and H. Lee, An experimental study on prediction of back-bead geometry in pipeline using the GMA welding process", KSMTE, Vol. 20, No. 1, pp. 74-80, 2011

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