

## 극박 다이어프램의 펄스 GTAW 공정 최적화에 관한 연구

박형진\* · 황인성\*\* · 강문진\*\* · 이세현\*

\*한양대학교 대학원 기계공학과

\*\*한국생산기술연구원 정밀접합팀

### Study on the Optimization of Pulse GTAW Process for Diaphragm with Thin Thickness

Hyoung-Jin Park\*, In-Sung Hwang\*\*, Munjin Kang\*\* and Sehun Rhee\*

\*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

\*\*Advanced Welding & Joining Research Team, KITECH, Incheon, Korea

#### Abstract

This paper has aimed to prevent excessive heat input by controlling arc distribution and heat input capacity with pulse GTAW in order to improve weld quality in 0.08mm pressure gauge diaphragm and flange welding parts. A design of experiment was designed using Box-Behnken method to optimize a welding process. The pulse GTAW parameters such as pulse current, base current, pulse duty, frequency and welding speed were set to input variables while hydraulic pressure that represents welding characteristics in diaphragm and flange joint were set to output variables. Based on the test result, a second regression equation was obtained between input and output variables and turned out significant. Besides, an influence of parameters has been confirmed through response surface analysis using the second-order regression equation and optimum welding condition was obtained through a grid-search method. The optimum welding condition was set to pulse current 84.4(A), base current 29.6(A), pulse duty 58.8(%), frequency 10(%), and welding speed 596(mm/min). Then, decent bead shape was acquired with no excessive heat input under the 2.3kgf/cm<sup>2</sup> of hydrostatic pressure.

\* Corresponding author : moonjin@kitech.re.kr

(Received October 24, 2007)

Key Words: Pulse GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), 0.08mm Diaphragm, Parameter optimization, Hydraulic pressure, Box-Behnken method, Response surface method, Grid search method

#### 1. 서 론

다이어프램형 압력계이지는 화학섬유, 석유, 제지, 시멘트 및 식품 등의 화학공업에서의 압력측정에 많이 사용되고 있다. 다이어프램형 압력계이지의 구동방식은 피 측정유체와 플랜지 사이에 다이어프램을 부착시키고 다이어프램을 통해 압력이 전달되는 방식으로 되어있다. 다이어프램이 받은 압력은 다이어프램과 연결되어 있는 링크를 작동시키게 되고 링크에 연결된 섹터가 움직이게 되며 이에 따라 지침이 압력 값을 가리키게 된다. 이때, 다이어프램은 피 측정유체가 유입되는 플랜

지와 용접이 이루어지며 이 용접부의 용접품질이 압력계이지의 성능에 중요한 영향을 미치게 된다.

Fig. 1은 다이어프램형 압력계이지의 외형과 내부구조를 보여주고 있다.

다이어프램과 플랜지 용접부의 용접불량은 용접 후 다이어프램이 용착부에서 떨어지는 유형과 비이드 불균일의 불량이 대부분으로서, 이러한 용접불량이 발생시키는 원인은 다음과 같이 추정할 수 있다.

(1) 아크의 분포불량(다이어프램부와 플랜지의 아크 분포부적절 또는 불균형)

(2) 과입열(플랜지 부분을 용융시키기 위하여 다이아

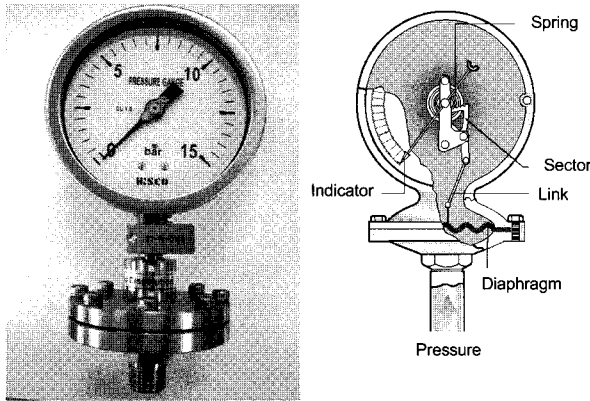


Fig. 1 Shape and inner structure of diaphragm pressure gauge

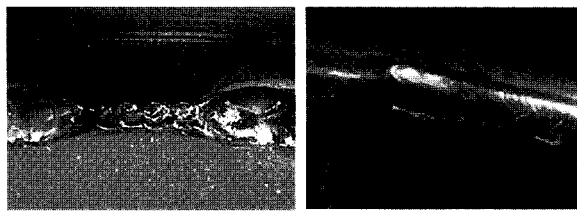


Fig. 2 Fail type of diaphragm pressure gauge

프램에 과한 입열이 집중되는 경우)

Fig. 2는 다이어프램형 압력게이지 용접부 불량을 나타내고 있다.

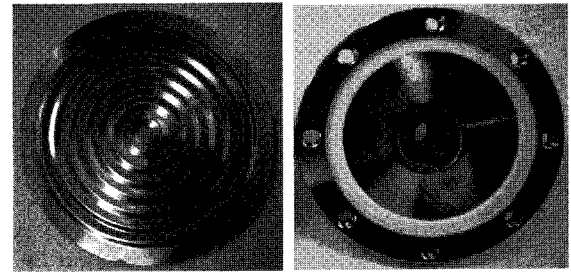
본 연구에서는 다이어프램형 압력게이지의 다이어프램과 플랜지 용접부의 용접 품질을 향상시키기 위하여 기존의 사용된 DC GTAW 대신 펄스 GTAW를 사용함으로써 아크의 분포 및 입열량을 제어하여 과입열을 방지하고자 하였다. 일반적으로 펄스 GTAW 용접부의 품질은 많은 인자들이 서로 연관되어 작용하므로 양호한 용접 품질을 얻는 일은 쉽지 않다. 그러므로 적은 실험으로 최적의 용접품질을 얻을 수 있는 최적 용접조건을 찾을 필요가 있다.

본 연구에서는 Box-Behnken 방법을 사용하여 펄스 전류(Pulse current), 베이스 전류(Base current, Pulse duty), 주파수(Frequency), 용접 속도(Welding speed) 와 같은 펄스 GTAW의 공정 변수(parameter)를 이용하여 실험계획법을 설계하고 실험 결과로 얻어진 2차 회귀식을 이용하여 반응표면분석법<sup>1,2)</sup>을 통해 최적 용접공정 조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서 사용한 다이어프램과 플랜지는 Fig. 3



(a) Diaphragm (b) Flange

Fig. 3 Shape of diaphragm and flange

과 같은 형상을 가지고 있다.

Table 1은 다이어프램과 플랜지의 두께 및 재질을 나타내며 Table 2는 STS316의 화학 조성비를 나타낸다.

### 2.2 실험방법

Fig. 4는 펄스 GTAW를 이용한 다이어프램과 플랜지의 용접방법을 나타내고 있다. Fig. 4에서와 같이 플랜지의 윗부분에 다이어프램이 놓이게 되고 플랜지와 다이어프램의 접합부를 펄스 GTAW를 사용하여 용접하였다. 아크 길이(Arc length)는 1mm, 토치 각도(Torch angle)는 15°로 고정하였다.

Table 1 Thickness and diameter of components

Component	Material	Thickness(mm)	Diameter(mm)
Diaphragm	STS316	0.08	70
Flange	STS316	9	90

Table 2 Chemical composition of STS316(wt %)

STS316								
C	Cr	Fe	Mn	Mo	Mi	P	S	Si
0.08	<18	62	2	<3	<4	0.045	0.03	1

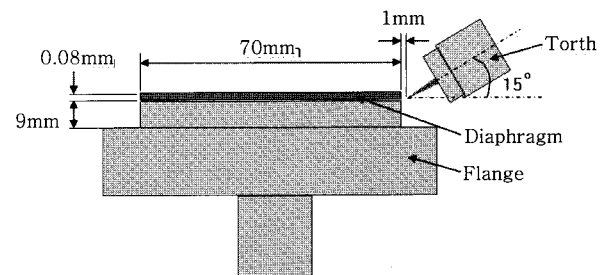


Fig. 4 Experiment set-up for pulse GTAW

### 3. 공정변수 및 실험계획

#### 3.1 펄스 GTAW 공정변수

다이아프램과 플랜지의 용접은 다이아프램의 두께가 0.08mm 인 반면에 두께가 9mm 인 플랜지는 매우 두꺼워 다이아프램과 플랜지를 동시에 가열할 경우 다이아프램의 과용융이 일어나거나 또는 플랜지만을 가열하여 미용융을 야기 시키는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 용융지의 크기를 제어하여 과용융에 의한 용락현상을 피하고 미려한 비드외관을 얻기 위해 펄스 GTAW 용접을 적용하였다<sup>3,4)</sup>.

펄스 GTAW 공정은 다중 입력력 공정이고, 용접 공정 입력변수들은 서로 커플되어 작용하기 때문에 시행착오법에 의해 용접 공정 입력변수를 조정하여 원하는 용접 품질을 얻기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 이런 문제점을 해결하기 위해 용접 공정의 입력변수와 출력변수 사이의 모델을 구하고 이것을 이용하여 최적 용접 공정변수를 결정할 필요가 있다.

극박 다이아프램 용접을 위한 공정변수는 다음과 같다.

- 펄스 전류(Pulse current)
- 베이스 전류(Base current)
- 펄스폭(Pulse duty)
- 주파수(Frequency)
- 용접 속도(Welding speed)

Fig. 5는 극박 다이아프램 용접을 위한 펄스 전류 파형<sup>4,5)</sup>을 나타내고 있다.

본 연구에서는 펄스 전류, 베이스 전류, 펄스폭, 주파수, 용접 속도를 입력 변수로 선정하였으며, 출력변수로는 다이아프램과 플랜지의 용접부가 견딜 수 있는 정수압(Hydraulic pressure)으로 선정하였다. 식 (1), (2)는 펄스폭과 주파수를 구하는 식을 나타내고 있다.

$$\text{Pulse duty} = \frac{T_p}{T_p + T_b} \times 100 [\%] \quad (1)$$

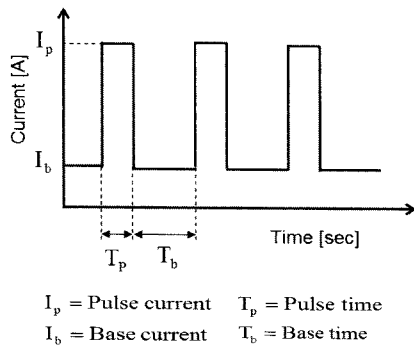


Fig. 5 Parameters of pulse GTAW process

$$\text{Frequency} = \frac{1}{T_p + T_b} [\text{Hz}] \quad (2)$$

#### 3.2 Box-Behnken 방법에 의한 실험계획

실험계획을 위해 각 용접 공정변수를 3수준으로 나누었으며 각 용접 공정변수별 수준 값은 선행 실험을 수행하여 설정하였다. Table 3은 공정변수에 따른 수준 값을 나타내고 있다.

Box-Behnken 방법은 Box와 Behnken에 의하여 제안된 실험계획으로 인자가 계량인자이고 3수준인 경우에 2차 회귀방정식을 구하면서 최적조건을 찾을 수 있는 계획법이다. 이 계획법은 인자의 수가 k 개인 경우에 3<sup>k</sup> 요인배치법보다 실험점의 수가 많지 않으면서도 직교블록(Orthogonal blocking)을 만들기 용이하고, 2차 회귀방정식을 구할 수 있기 때문에 반응표면분석에서 사용되고 있다. Fig. 6은 Box-Behnken 방법에 의해 제안된 실험영역을 나타낸다.

본 연구에서는 인자별 수준을 적용하여 Box-Behnken 방법에 의해 Table 4와 같이 실험계획을 수립하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 정수압(Hydraulic pressure) 실험

다이아프램과 플랜지 용접부의 용접성을 평가하기 위해 정수압 실험을 수행하였다.

Table 3 Factors and levels for experimental design

Level	Pulse Current (A)	Base Current (A)	Pulse Duty (%)	Frequency (Hz)	Welding Speed (mm/min)
-1	70	20	30	10	500
0	80	30	50	20	600
1	90	40	70	30	700

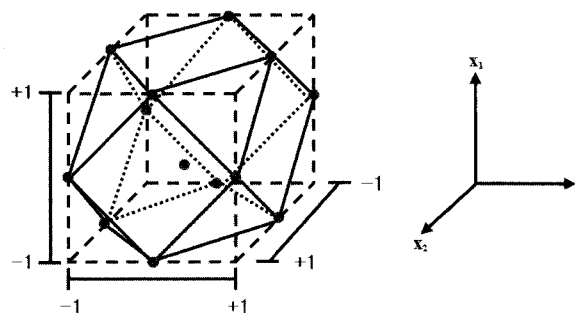


Fig. 6 Box-Behnken design

**Table 4** Experimental design of Box-Behnken method

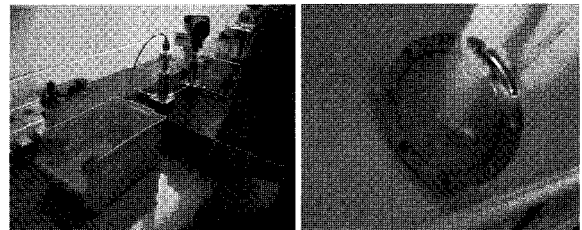
NO.	Pulse Current	Base Current	Pulse Duty	Frequency	Welding Speed
	(A)	(A)	(%)	(Hz)	(mm/min)
1	80	20	50	10	600
2	80	30	50	10	700
3	80	30	50	20	600
4	80	40	50	10	600
5	90	40	50	20	600
6	80	30	50	30	500
7	70	30	50	20	700
8	80	30	30	20	700
9	80	40	50	20	700
10	80	20	70	20	600
11	80	30	30	20	500
12	80	20	50	20	700
13	70	30	50	10	600
14	90	30	50	30	600
15	80	30	70	10	600
16	80	40	50	20	500
17	80	30	50	20	600
18	70	30	50	30	600
19	90	30	50	20	700
20	90	30	70	20	600
21	80	30	70	20	500
22	80	40	50	30	600
23	80	40	30	20	600
24	90	30	50	20	500
25	90	30	30	20	600
26	80	30	30	10	600
27	70	30	70	20	600
28	80	30	50	20	600
29	70	30	50	20	500
30	80	30	50	20	600
31	70	20	50	20	600
32	80	30	50	30	700
33	80	30	70	30	600
34	80	30	50	20	600
35	80	20	30	20	600
36	80	30	70	20	700
37	70	40	50	20	600
38	80	30	30	30	600
39	80	20	50	20	500
40	90	20	50	20	600
41	80	20	50	30	600
42	80	30	50	10	500
43	70	30	30	20	600
44	80	40	70	20	600
45	80	30	50	20	600
46	90	30	50	10	600

본 연구에서는 Fig. 7과 같이 수압 시험기를 사용하여 다이아프램과 플랜지의 접합부가 견디는 압력을 측정하였다. 다이아프램과 플랜지 접합부를 물속에 넣은 후 다이아프램과 플랜지 접합부에 0.01kgf/cm<sup>2</sup>의 간격으로 정수압을 증가시켜 다이아프램과 플랜지 용접부의 파손 시에 정수압을 측정하였다.

Table 5는 정수압 시험의 결과를 보여주고 있다.

## 4.2 회귀분석

Box-Behnken 방법에 의한 정수압 시험결과를 이용하여 입력변수인 펄스 전류, 베이스 전류, 펄스폭, 주파수, 용접 속도와 출력변수인 0.08mm 다이아프램과 플랜지 접합부가 견디는 정수압에 대한 회귀식을 구하였다. 식(3)은 정수압에 대한 추정된 2차 회귀식을 나타내고 있다. 여기에서  $x_1$ 은 펄스 전류,  $x_2$ 는 베이스 전류,  $x_3$ 는 펄스폭,  $x_4$ 는 주파수,  $x_5$ 는 용접 속도를 의미한다.

**Fig. 7** Hydraulic pressure test**Table 5** Result of hydraulic pressure test

NO.	Hydraulic Pressure	NO.	Hydraulic Pressure	NO.	Hydraulic Pressure
	(kgf/cm <sup>2</sup> )		(kgf/cm <sup>2</sup> )		(kgf/cm <sup>2</sup> )
1	1.89	17	1.88	33	1.65
2	2.37	18	1.75	34	2.37
3	1.73	19	1.55	35	2.04
4	1.71	20	1.87	36	1.57
5	1.63	21	1.58	37	1.49
6	1.95	22	1.71	38	1.92
7	1.62	23	1.87	39	1.54
8	1.39	24	1.67	40	1.87
9	1.78	25	1.59	41	2.01
10	1.68	26	1.73	42	2.07
11	2.01	27	1.23	43	1.41
12	1.27	28	1.92	44	1.73
13	1.98	29	1.09	45	1.89
14	1.64	30	2.23	46	2.03
15	2.17	31	1.74		
16	1.25	32	2.37		

$$\begin{aligned}
 P = & 2.00333 + 0.09625x_1 - 0.05437x_2 - 0.03x_3 \\
 & - 0.05938x_4 + 0.0475x_5 - 0.26792x_1^2 \\
 & - 0.18042x_2^2 - 0.16125x_3^2 + 0.13125x_4^2 \\
 & - 0.1912x_5^2 + 0.0025x_1x_2 + 0.115x_1x_3 \\
 & - 0.04x_1x_4 - 0.1625x_1x_5 + 0.055x_2x_3 \\
 & - 0.03x_2x_4 + 0.2x_2x_5 - 0.1775x_3x_4 \\
 & + 0.1525x_3x_5 + 0.03x_4x_5
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Table 6은 식(3)의 2차 회귀식에 대한 분산분석의 결과를 나타낸다. 이러한 2차 회귀 모델의 타당성은 분산분석의 F검정(F test)에 의해 판단 할 수 있다. 분산분석에서  $F_0$ 는 회귀의 평균제곱합(sum of mean squares from regression)을 잔차의 평균제곱합(sum of residual mean regression)과의 비율로 나타낸 지수로써, 이 비율이 크면 회귀에 대한 평균제곱합이 잔차의 평균제곱합보다 커서 입력과 출력과의 관계를 설명하는데 유의하다는 의미를 가진다. F 분포표를 이용하여 주어진 유의수준(level of significant)과 자유도(degree of freedom) ( $\phi_R, \phi_E$ )에 따른 기각치 ( $\phi_R, \phi_E ; a$ )(critical)를 구하여,  $F_0 > F(\phi_R, \phi_E ; a)$ 이면 회귀식이 유의하다고 할 수 있다. 위 회귀식에 대해서 유의수준을 0.05로 선택하면, 기각치는  $F(\phi_R, \phi_E ; a) > F(20, 25 ; 0.05) = 2.03$ 이다. 이 기각치와 Table 6의  $F_0$ 값을 비교해 보면, (3)의 회귀식이 유의함을 알 수 있다.

### 4.3 반응표면분석

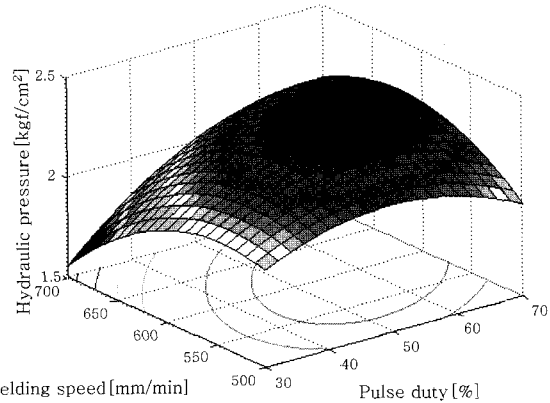
반응표면분석법은 하나 또는 그 이상의 반응변수와 정량적인 실험변수 또는 인자의 집합과의 관계를 규명하는데 사용하는 분석법으로 반응변수를 최적화할 수 있는 인자의 조건을 찾는데 목적을 두고 있다.

Fig. 8은 펄스 전류와 펄스폭 사이의 반응표면을 나타낸다. 반응표면에서 펄스 전류는 85A, 펄스폭은 약 45% 정도에서 최고의 정수압 값을 나타내고 있다. 또한, 반응표면을 통해 펄스폭의 영향보다 펄스 전류의 영향을 많이 받음을 확인할 수 있다.

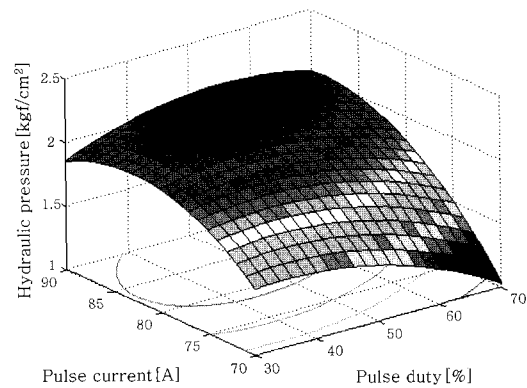
Fig. 9는 용접 속도와 펄스폭 사이의 반응표면을 나

**Table 6** ANOVA of hydraulic pressure

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	mean squares	F0	F
Regression	20	2.702	0.1351	2.14	2.03
Error	25	1.5761	0.06305		
Total	45	4.2781			



**Fig. 8** Response surface of pulse duty and pulse current



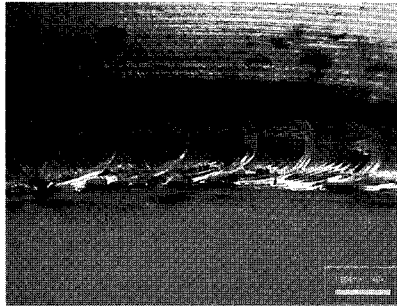
**Fig. 9** Response surface of welding speed and pulse duty

타내고 있다. 반응표면에서 용접 속도가 590 mm/min, 펄스폭이 55% 일때 최고의 정수압 값을 나타내고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 용접 속도가 증가하면 반응표면이 급격한 경사를 보이므로 다이아프램과 플랜지의 접합부가 견디는 최고 정수압 값이 급격한 떨어짐을 예측할 수 있다.

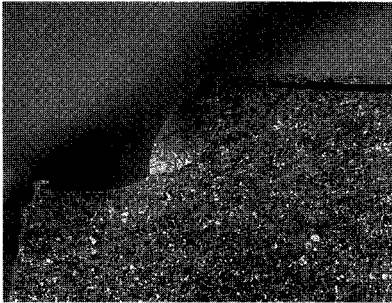
식(3)의 2차 회귀식을 이용하여 관심 실험영역에서 0.08mm 다이아프램과 플랜지의 접합부가 견디는 최고 정수압 값을 구하였다. 그 방법으로 관심실험영역을 작은 격자(Grid)로 나누어 각 격자에서 최고 정수압 값을 구하는 격자탐색법(Grid-search method)을 이용하였다. Table 7은 관심실험영역 구간에서 격자탐색법<sup>6)</sup>을 이용하여 구한 최적 용접 조건을 나타낸다.

**Table 7** Optimal condition of pulse GTAW

Pulse Current	Base Current	Pulse Duty	Frequency	Welding Speed	Hydraulic Pressure
(A)	(A)	(%)	(Hz)	(mm/min)	(kgf/cm²)
84.4	29.6	58.8	10	596	2.388



(a) Shape of bead



(b) Bead section

**Fig. 10** Bead shape and bead section of optimal condition

Fig. 10은 격자탐색법을 이용하여 구한 최적 용접 조건에서의 비드 형상 및 단면 형상을 나타낸다. 비드의 형상을 보면, 과입열이 일어나지 않아 과용융부가 발생하지 않았고 용융 형상이 일정하여 비드 형상이 미려함을 알 수 있다. 또한, 비드의 단면 형상을 보면 다이아프램과 플랜지의 용접부가 완전하게 용입되어 접합되었음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

0.08mm 극박 다이아프램 용접부의 용접 품질 향상을 위하여 펄스 GTAW를 사용하였으며 펄스 GTAW 공정변수를 최적화 하였다.

1) 적은 횟수의 실험으로 펄스 GTAW 공정을 표현할 수 있는 회귀 모델을 구하기 위해 Box-Behnken 방법을 이용하여 실험계획을 수립하였다.

2) 각 조건별 정수압 실험을 통하여 용접성을 평가하였고 그 결과로 0.08mm 다이아프램과 플랜지 접합부가 견디는 정수압에 대한 회귀식을 구하였다.

3) 마지막으로 격자탐색법을 이용하여 최적 용접 조건을 구하였으며 실제 실험을 통해 격자탐색법에 의한 최적 용접 조건을 검증하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 부품소재 전문기업 기술지원 사업에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. R.H. Myers and D.C. Montgomery : Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments, John Wiley & Sons, Inc., 1995
2. D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments 5<sup>th</sup> Ed, John Wiley & Sons, Inc., 2001
3. S. Kim, M. Kim and S. Cho : Application of TIG pulse wave form for clean and beautiful welding bead, Proceedings of the 2003 Spring Annual Meeting of KWS, **Vol.3**(2003), p165-168
4. H. Jung, S. Hong and Y. Park : The study on the weldability of STS 304 thin sheet by GTAW process, Proceedings of the KWS Conference, **Vol.1**(1998), p150-154
5. K. Tseng and C. Chou : The effect of pulsed GTA welding on the residual stress of a stainless steel weldment, Journal of Materials Processing Technology, **Vol.123**(2002), 346-353
6. H. Park, T. Kim & S. Rhee : Optimization of welding parameters for resistance spot welding of TRIP steel using response surface methodology, Journal of KWS, **Vol.21**(2003), 206-211