반응표면분석법에 의한 알루미늄 다점 초음파용접 공정의 최적화 연구

A study on the optimization of the aluminum multi-point ultrasonic welding by response surface methodology

한규억*, 김대만**, 조상명***

* (주)상신EDP 품질경영팀
** 부경대학교 대학원 소재프로세스공학과
*** 부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공 (pnwcho@pknu.ac.kr)

1. 서 론

초음파용접은 60Hz의 교류를 Power supply를 통해 20~40kHz로 증가시킨 후 압전소자에서 초음파 진동 에너지로 변환하여 얇은 금속 sheet 및 foil류 등을 접합하는 것이다. 초음파용접은 PCB 기판 용접, Wire bonding, 2차 전지 foil 및 바닥 용접 등에 적용되고 있다. 기존의 초음파용접 공정에서는 많은 시간을 소비하여 수많은 시행착오를 통해 최적용접조건을 찾고 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 반응표면분석법을 적용하여 최소실험을 통해 최적의 초음파용접 조건을 찾는 방법을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 1단계로 용접 품질에 영향을 주는 6점 중 평균타점수가 최대가 되는 가압력을 찾은 후 2단계로 반응표면분석법을 써서 최대 인장강도를 얻기 위한 최적의 진폭과 용접시간을 찾아보았다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 피용접재와 초음파용접 장치 모식도를 나타낸 것이다. 두께 0.25mm의 Aluminum sheet와 두께 0.15mm의 Aluminum ribbon을 사용하여 6점의 용접점을 형성시켰다.

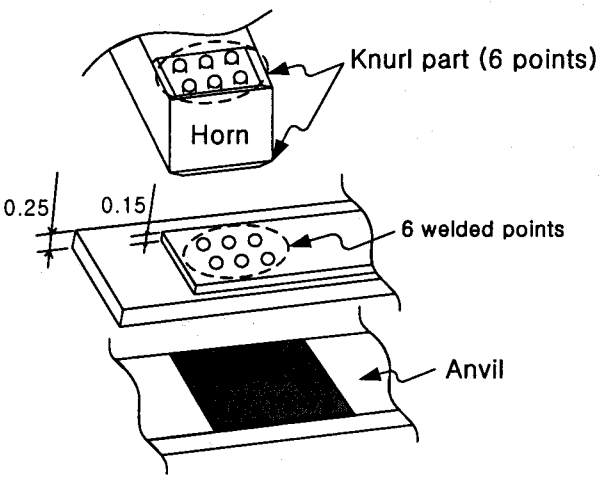

Fig. 1 Schematic for specimens(Al) and ultrasonic welding equipment

2.2 실험 방법

주파수 40kHz, 전류 3A, 전압 220V(Branson제품)의 초음파 용접기를 사용하고, Horn의 Knurl부는 6개로 하여 동시에 6점 용접이 이루어지도록 하였다. 가압장치는 air cylinder였다. 반응표면분석법은 통계 및 6σ 처리 S/W인 Minitab을

써서 처리하였다. Table 1은 실험설계를 위한 인자와 수준을 나타내고 있다. 독립변수는 가압력, 진폭, 용접시간으로 하였고, 종속변수는 평균타점수, 인장강도로 하였다. 용접 품질은 타점수가 3 이상, 인장강도가 12N 이상 일 때 양품이다.

용접 품질 인자 중 인장강도보다 평균타점수가 비중이 더 크다. 따라서, 1단계로 가압력에 따른 평균타점수의 최대치를 구한 후 회귀분석으로 최적 가압력을 선정하였다. 2단계로 반응표면분석법을 써서 최대 인장강도가 얻어지는 최적의 진폭과 용접시간을 찾아보았다.

Table 1 Factors and levels for experimental design

Factor	Factor name	Level		
		-1	0	1
x_1	Welding pressure(MPa)	0.1	0.2	0.3
x_2	Vibration amplitude	0.5	0.7	0.9
x_3	Welding time(sec)	0.14	0.17	0.20

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 가압력에 따른 평균타점수의 검토

본 연구의 용접부 평가에서 1단계로 고려되는 것이 평균타점수이다. Fig. 2는 진폭 0.7, 용접시간 0.17sec로 일정하게 유지하면서 가압력에 따른 평균타점수를 나타낸 것이다. 평균타점수의 최대치를 알기 위한 회귀분석 결과, 가압력 0.18MPa일 때 평균타점수가 약 5.4점으로 최대가 되는 것을 알 수 있었다.

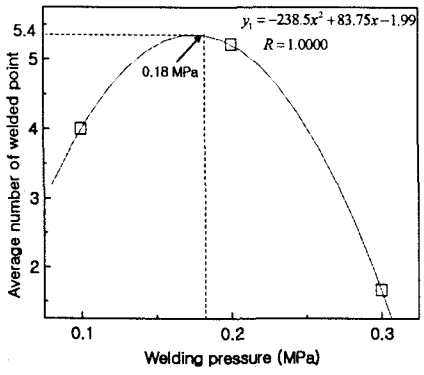

Fig. 2 Relation between welding pressure and average number of welded point

3.2 반응표면분석법을 통한 최적조건 검토

Table 2는 중심합성 계획법에 의해 얻은 각 변수와 반응(인장강도y_2)의 관계를 총 20번의 용접을 통해 나타낸 것이다.

Table 2 Coded variables and response by central composite design

	Coded variables			Response
No.	x_1	x_2	x_3	y_2
1	-1	-1	-1	7.4
2	1	-1	-1	2.0
3	-1	1	-1	23.4
4	1	1	-1	0.0
5	-1	-1	1	3.6
6	1	-1	1	2.2
7	-1	1	1	27.2
8	1	1	1	0.0
9	-1	0	0	15.8
10	1	0	0	7.4
11	0	-1	0	5.4
12	0	1	0	0.0
13	0	0	-1	12.0
14	0	0	1	15.8
15	0	0	0	14.8
16	0	0	0	15.9
17	0	0	0	16.7
18	0	0	0	14.3
19	0	0	0	11.1
20	0	0	0	13.9

Table 2의 결과를 이용하고, 식(1)의 회귀 모델을 사용하면 가압력, 진폭, 용접시간에 대한 인장강도y_2의 회귀식인 식(2)를 구할 수 있다. 식(2)의 타당성은 F 검정(F test)과 결정계수(Coefficient of determination, R^2)에 의해 판단하였다. 회귀식의 유의수준(α)을 0.05로 선택하면, 기각치는 식(3)이 되고, 기각치와 Table 3의 인장강도 반응변수(F_0)를 비교했을 때 식(2)의 회귀식이 유의함을 알 수 있다. 회귀식에 대한 결정계수는 식(4)에 의해 인장강도 변동의 86.3%가 되었다. F 검정과 결정계수 값으로 판단할 때 상기의 초음파용접 실험계획은 타당함을 알 수 있다.

Table 3 Analysis of variance for tensile strength

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean squares	F_0
Regression	9	1018.64	113.18	6.98
Linear	3	524.56	174.86	10.78
Square	3	247.42	82.47	5.08
Interaction	3	246.66	82.22	5.07
Residual error	10	162.61	16.22	
Total	19	1180.85		

$$y_2 = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i \le j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_2 = {} & 13.152 - 6.580x_1 + 3x_2 + 0.4x_3 \\ & + 0.396x_1^2 - 8.505x_2^2 + 2.696x_3^2 \\ & - 5.475x_1x_2 + 0.025x_1x_3 \\ & + 0.925x_2x_3 \end{aligned} \quad (2)$$

$$F(\phi_R, \phi_E; \alpha) = F(9, 10; 0.05) = 3.01 \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\text{Regression sum of squares}}{\text{Total sum of squares}} \times 100 \quad (4)$$

$\therefore F_0 > F$, 결정계수 86.3% : 실험 계획이 타당함

Fig. 3은 진폭과 용접시간에 의한 인장강도를 3차원 반응표면으로 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 12N 이상의 강도가 나타나는 영역이 상당부분 존재하므로 만족할 만한 결과가 얻어졌다고 할 수 있다.

Fig. 4는 가압력 0.18MPa로 먼저 결정한 후 얻어지는 결과로써 최대 인장강도를 얻기 위한 최적의 진폭과 용접시간을 나타낸 것이다. 이 때 얻어진 최대 인장강도는 18.3N이었고, 기준강도는 12N보다 충분히 높은 품질 수준임을 알 수 있다.

따라서, 용접타점수와 인장강도의 표준편차가 비교적 큰 경우도 품질 기준을 안전하게 통과할 수 있는 우수한 공정능력을 지닌 것으로 판단된다.

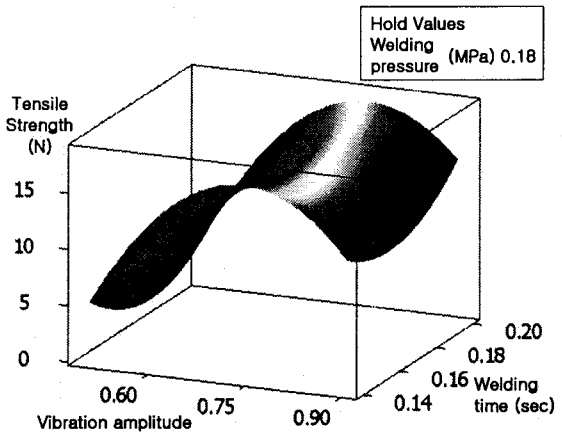

Fig. 3 Tensile strength to vibration amplitude and welding time

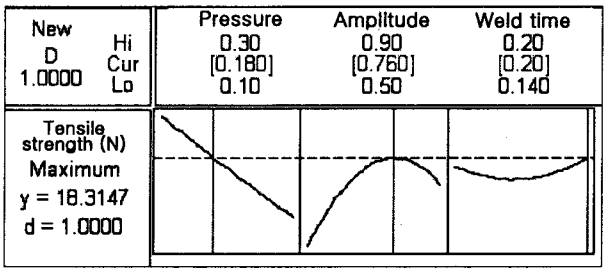

Fig. 4 Optimized welding condition by minitab

4. 결 론

반응표면분석법을 적용하여 알루미늄 박판에 대한 6점 초음파용접 조건의 최적화 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 1단계로 품질요소인 평균타점수를 고려하여 최적가압력을 결정하고서 2단계로 가압력을 고정한 후 최대 인장강도를 얻을 수 있는 진폭과 용접시간을 결정할 수 있는 방법을 개발하였다.

2) 본 연구에서 얻은 최적조건을 적용하면 용접타점수와 인장강도의 기준치보다 충분히 높은 품질 수준을 확보할 수 있고, 품질의 산포가 다소 커도 안정적인 양품이 얻어질 수 있는 우수한 공정능력을 가진 것으로 판단된다.

3) 상기와 같이 가압력, 진폭, 용접시간의 최적치를 적용하면 인장강도는 18.3N이 얻어짐으로써 기준강도 12N보다 충분히 높은 품질 수준을 확보 할 수 있었다.