

초음파 용접을 이용한 전선의 접합

이철구*, 황병주**, 허인호**

Bonding of Electric Wire by Ultrasonic Welding

Chul Ku Lee*, Byung Ju Hwang**, In Ho Heu**

Abstract

In this study, the purpose finds out the best welding conditions for bonding of electric wire by ultrasonic welding. The material was plastic-insulating low-voltage cables for automobiles. The experiment varied the values of welding time and welding pressure and fixed the values of amplitude and energy.

With the facts, the best condition for ultrasonic welding to achieve bonding exactly is gained according to the size of the cross-sectional area of the cable, and the adhesive intensity is greatly influenced by the variables of welding time and welding pressure. Also when the welding time and welding pressure increase as the cross-sectional areas of the cable increase, the welding result is gained exactly.

Key Words : welding pressure (용접압력), welding times (용접시간), ultrasonic welding (초음파용접), tensile strength(전단강도)

1. 서 론

초음파 용접은 통상의 방법으로는 용접하기 어려운 동종금속이나 이종금속의 용접에 널리 사용되는 것으로 알루미늄, 구리, 황동 등 많은 재료들을 접합할 수 있다.⁽¹⁾ 초음파 용접이 가장 효과적으로 이용되고 있는 분야는 박판이나 박(foil)과 같이 매우 얇은 층을 부품에 접합할 때 또는 전선류를 터미널이나 경납땜으로 접합하지 않고 용접하는 경우로 최근에는 자동차산업, 중화학공업, 조선, 우주

항공 분야의 구조체 용접용으로 활용되고 있으며 금속의 초음파 용접은 독일의 Siemens와 Halske 사에 의해 1936년에 개발되었다.⁽²⁾

초음파 금속용접은 두 개의 용접하고자 하는 부품이 일정한 압력 하에 서로 눌러 있는 동안 한 개의 부품이 다른 고정된 한 개의 부품에 진동을 함으로써 산화물이 제거됨과 동시에 용접부위의 분자 사이에 혼합(mingle)과 확산(diffusion)이 일어남으로서 실질적인 금속용접이 이루어진다.⁽³⁾

* 서울산업대학교 기계공학과
** 서울산업대학교 산업대학원

Table 1 Mechanical property of electric wire

nominal cross-sectional area(mm ²)	outer diameter (mm)	insulator thickness (mm)	completion outer diameter (mm)	conductor resistance (Ω/km)	weight (kg/km)	tensile strength (MPa)	hardness
0.75	1.1	0.6	1.4~2.0	24.4	11.9	153	89.14
1.0	1.3	0.6	2.4~2.6	17.6	14	230	89.15
1.5	1.6	0.6	2.8~3.0	12.5	20	288	89.17
2.0	1.9	0.7	3.3~3.6	8.81	27	341	89.20
3.0	2.4	0.8	4.0~4.3	5.59	41	375	89.30

Table 2 Chemical compositions of material

material	chemical composition(%)							
	Cu	Sb	As	Sn	Pb	Fe	Ni	S
electric wire	99.96	0.008	0.001	0.009	0.004	0.006	0.001	0.011

Table 3 Welding conditions

cross-sectional area(mm ²)	parameter	welding conditions		amplitude (μm)	energy (J)
		weld time(sec)	weld pressure(MPa)		
0.75		0.1/0.15, 0.1/0.20, 0.1/0.25	0.2/0.15, 0.2/0.20, 0.2/0.25	14.5	165
		0.3/0.15, 0.3/0.20, 0.3/0.25	0.4/0.15, 0.4/0.20, 0.4/0.25		
1.0		0.4/0.20, 0.4/0.25, 0.4/0.30	0.5/0.20, 0.5/0.25, 0.5/0.30	15.0	250
		0.6/0.20, 0.6/0.25, 0.6/0.30	0.7/0.20, 0.7/0.25, 0.7/0.30		
1.5		0.60/0.25, 0.60/0.30, 0.60/0.35	0.65/0.25, 0.65/0.30, 0.65/0.35	15.3	360
		0.70/0.25, 0.70/0.30, 0.70/0.35	0.75/0.25, 0.75/0.30, 0.75/0.35		
2.0		0.65/0.30, 0.65/0.35, 0.65/0.40	0.70/0.30, 0.70/0.35, 0.70/0.40	16.2	440
		0.75/0.30, 0.75/0.35, 0.75/0.40	0.80/0.30, 0.80/0.35, 0.80/0.40		
3.0		0.70/0.35, 0.70/0.40, 0.70/0.45	0.75/0.35, 0.75/0.40, 0.75/0.45	17	560
		0.80/0.35, 0.80/0.40, 0.80/0.45	0.85/0.35, 0.85/0.40, 0.85/0.45		

플라스틱 용접은 용접부위에 초음파 진동이 수직으로 적용되거나 금속 용접은 용접 부위에 수평으로 적용된다. 또한 두 부품에 가해지는 용접압력이 플라스틱 용접보다 금속용접에서는 더 크게 작용된다.⁽⁴⁾

또한 초음파 금속 용접은 재질이 녹지 않는 냉간 가공 방법(cold working process)으로 두 표면이 서로 마찰되는 가운데 일어나는 겔링(galling) 즉, 마찰에 의한 고체상태의 금속결합(solid state metallurgical bond)을 일으킨다.

초음파 용접에서 적용되는 중요한 용접변수(welding parameter)는 용접압력(welding pressure), 용접시간(weld-

ing time), 진폭(amplitude), 에너지이며, 건전한 용접을 얻기 위해서는 이 변수들이 최적으로 이루어져야만 한다.⁽⁵⁾

본 실험에서는 자동차에 사용되는 저압 전선을 초음파를 이용하여 진폭과 에너지는 일정하게 하고 용접압력과 시간을 변수로 최적의 용접 조건을 얻고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 초음파 용접에서의 각 조건별 용접상태 등을

검토 분석하기 위한 실험으로 독일의STAPLA Ultrasonic-Technik GmbH사가 제작한 초음파 용접기(ultrasonic welding machine)를 사용하였다. 접합강도의 측정을 위하여 만능재료 시험기를 사용하였으며, 용접상태 및 조직의 관찰에는 금속현미경을 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 용접시험편

본 실험에 사용된 용접시험편은 자동차분야에서 많이 사용되는 비닐 절연 저압 전선(low-voltage cables for automobile)의 단면적을 기준으로 하여 선정하였으며 초음파의 전달 거리를 고려하여 제작하였다. 전선의 재료 구조 및 기계적 성질은 Table 1에 나타내었으며, 화학적 성분은 Table 2와 같다.

2.2.2 용접조건 설정

최적의 조건으로 용접하기 위해 초음파 용접의 가장 중요한 변수인 용접시간, 용접 압력을 용접시험편의 단면적에 따라 변화를 주었으며 모든 조건에서 진폭, 에너지는 지금까지 연구된 연구자들의 최적 용접 조건을 토대로 하여 용접을 실시하였다. Table 3은 용접 조건을 나타내었다.

2.2.3 실험방법

초음파 용접한 시험편의 시험은 현재 외국의 자동차업계에서 요구하고 있는 시험방법 및 합격기준으로 정하고 있는 데이터를 기준으로 하였다. 초음파 용접한 피용접물을 만능 시험기를 이용하여 인장시험을 실시하였으며, 용접시험편의 인장시험 데이터는 미국에서 제작한 SFM-20 만능재료 시험기에서 사용되고 있는 소프트웨어인 ASTM D638에서 나온 값을 EXCEL로 변환하여 데이터를 처리하였다. 인장속도는 10mm/min으로 설정하였다.

경도를 측정하기 위하여 마이크로 비커스 경도기(Micro vickers hardness tester)를 사용하였다.

용접시험편은 최적의 용접조건으로 용접하였을 때 용접시험편의 단면적이 2mm²(용접변수 : 압력 - 0.35MPa, 용접시간 - 0.70sec), 3mm²(용접변수 : 압력 - 0.40MPa, 용접시간 - 0.75sec)인 시험편을 가지고 측정하였으며 측정부위는 용착금속부를 기점으로하여 모재방향으로 1mm 간격으로 시험편 단면의 경도 값을 구하였다.

2.2.4 용접부 조직

용접부의 강도 및 조직을 관찰하기 위하여 용접시험편

의 단면적이 2mm², 3mm²인 용접시험편을 추출하여 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접조건과 접합강도와의 관계

시험편 제작에 필요한 최적의 용접조건은 용접변수인 용접압력, 용접시간, 진폭, 에너지를 조정함으로써 얻어지는데, SONICS(주)에서 제공한 평균 데이터를 기준으로 하여 진폭과 에너지는 일정한 값으로 주어지고 용접압력과 용접시간만을 변수로 하여 테스트하면서 용접압력과 용접시간과의 관계를 고찰하였다. 그림 1에서의 같이 용접시험편의 단면적이 0.75mm²일때 용접압력을 0.15, 0.20, 0.25MPa로, 용접시간을 0.1, 0.2, 0.3, 0.4초로 하였을 경우 용접압력이 0.15MPa 용접시간이 0.1초일때

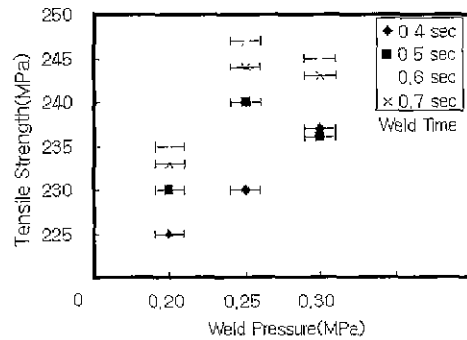


Fig. 1 The relation between welding pressure and tensile strength (cross-sectional area : 0.75mm²)

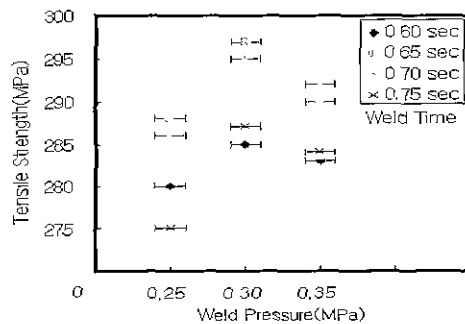


Fig. 2 The relation between welding pressure and tensile strength (cross-sectional area : 1.0mm²)

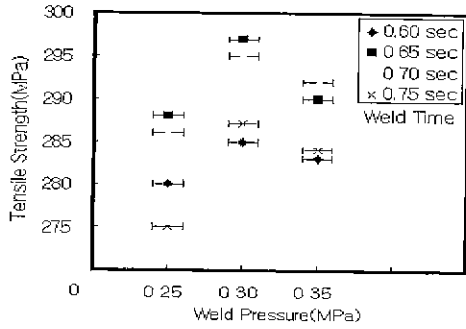


Fig. 3 The relation between welding pressure and tensile strength (cross-sectional area : 1.5mm²)

접합강도가 148MPa로 아주 낮게 나타났으나, 용접압력을 0.20MPa, 용접시간을 0.3초로 하여 초음파 용접을 하였을 때 양호한 용접이 이루어져 접합강도가 200MPa로 증가하였다.

그러나, 용접압력을 0.25MPa로 하여 용접시간을 상승시켰더니 접합강도가 증가하다 용접시간이 0.4초일 때 185MPa로 저하되는 현상을 보였다. 이러한 현상은 용접압력과 용접시간이 최적용접조건에 맞지않아 조직의 유동상태가 고르지 않게되어 접합강도가 저하되는 현상으로 볼 수 있다.

용접압력 0.20MPa, 용접시간 0.3초일 때 접합강도가 200MPa로 증가되는 현상을 보이다가 용접압력 0.25MPa일 때 접합강도가 195MPa로 저하되는 현상을 볼 수 있는데 이는 용접하고자 하는 용접시험편의 단면적에 따라 적정하지 못한 용접압력과 용접시간이 접합강도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

그림 2는 용접시험편의 단면적이 1.0mm²일 때 용접압력을 0.20, 0.25, 0.30MPa로 용접시간을 0.4, 0.5, 0.6, 0.7초로 하였을 경우 용접압력이 0.20MPa 용접시간이 0.4초일 때 접합강도가 225MPa로 아주 낮게 나타났으나, 용접압력을 0.25MPa, 용접시간을 0.6초로 하여 초음파 용접을 하였을 때 양호한 용접이 이루어져 접합강도가 247MPa로 나타났다.

그러나 용접압력을 0.30MPa로 하여 용접시간을 상승시켰더니 접합강도가 245MPa까지 증가하다 0.7초일 때는 243MPa로 저하되는 현상을 보였다. 이는 용접시간의 증가와 더불어 접합강도가 비례하여 증가하는 것이 아니고 용접변수인 용접시간과 용접압력이 적절한 용접조건

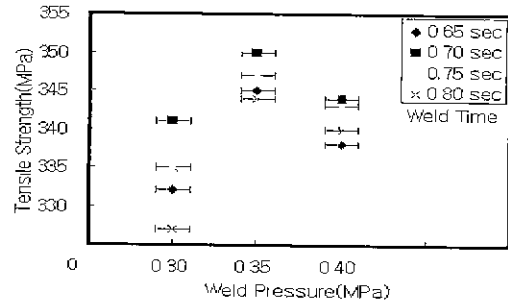


Fig. 4 The relation between welding pressure and tensile strength (cross-sectional area : 2.0mm²)

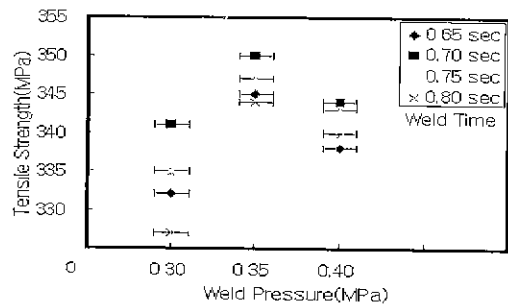
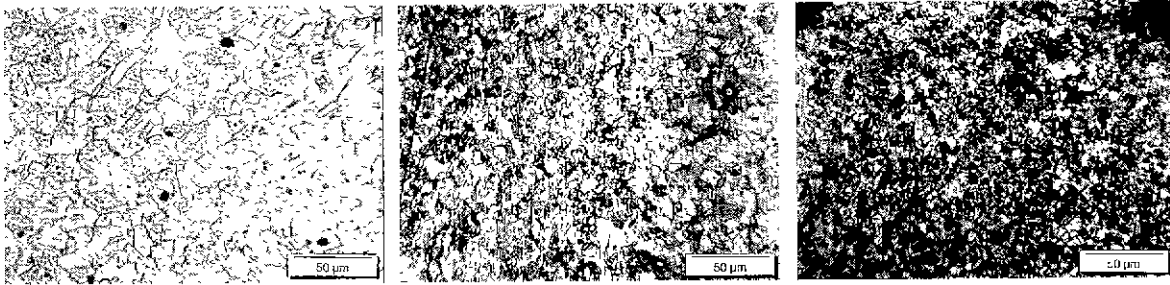


Fig. 5 The relation between welding pressure and tensile strength (cross-sectional area : 3.0mm²)

이 되어야만 양호한 용접이 이루어져 접합강도가 양호하게 나타남을 알 수 있다. 그림 3은 용접시험편의 단면적이 1.5mm²일 때 용접압력을 0.25, 0.30, 0.35MPa로 용접시간을 0.6, 0.65, 0.70, 0.75초로 하였을 경우 용접압력이 0.25MPa, 용접시간을 0.75초일 때 접합강도가 275MPa로 낮게 나타났으나, 용접압력을 0.30MPa, 용접시간이 0.65초일 때 양호한 용접이 이루어져 접합강도가 297MPa로 증가하였다.

또한 용접압력을 0.35MPa로 하여 용접시간을 상승시켰더니 용접시간이 0.75초일 때 접합강도가 284MPa로 저하되는 현상을 보였다. 이는 용접조건에서 무리한 용접압력과 용접시간을 주었을 때 접합강도가 비례적으로 상승되지 않음을 보여주고 있다.

그림 4는 용접시험편의 단면적이 2.0mm²일 때 용접압력을 0.30, 0.35, 0.40MPa로 용접시간을 0.65, 0.70,

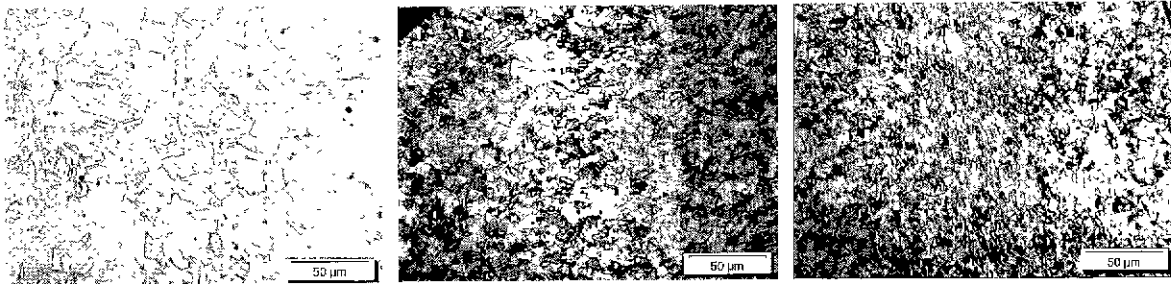


(a) weld time : 0.65sec
weld pressure : 0.30MPa

(b) weld time : 0.70sec
weld pressure : 0.35MPa

(c) weld time : 0.80sec
weld pressure : 0.40MPa

Photo. 1 Micrographs of welding interface (2.0mm²)



(a) weld time : 0.70sec
weld pressure : 0.35MPa

(b) weld time : 0.75sec
weld pressure : 0.40MPa

(c) weld time : 0.85sec
weld pressure : 0.45MPa

Photo. 2 Micrographs of welding interface (3.0mm²)

0.75, 0.80초로 하였을 경우 용접압력이 0.30MPa, 용접시간이 0.80초일 때 접합강도가 327MPa로 낮게 나타났으나, 용접압력이 0.35MPa, 용접시간이 0.70초일 때 양호한 용접이 이루어져 접합강도가 350MPa로 증가 하였다.

용접압력이 0.40MPa일때와 0.35MPa일 때 접합강도를 살펴보면 용접압력이 높을 때 접합강도가 저하되는 현상을 보았다. 이는 용접시 용접시험편 단면적이 커질때 용접압력을 높게하여도 접합강도에는 커다란 영향을 입히지 않음을 보여주고 있다.

그림 5는 용접시험편의 단면적이 3.0mm²일 때 용접압력을 0.35, 0.40, 0.45MPa로 용접시간을 0.70, 0.75, 0.80, 0.85초로 하였을 경우 용접압력이 0.35MPa, 용접시간이 0.70초일 때 접합강도가 375MPa로 낮게 나타났으나, 용접압력이 0.40MPa, 용접시간이 0.75초일 때 최적의 용접 조건으로 접합강도가 390MPa로 양호하게 나타났다.

용접압력이 0.40MPa일 때 접합강도를 살펴보면 용접시간이 0.70초일 때 접합강도가 378MPa, 0.85초일 때 384MPa로 나타났다. 이는 일반적으로 용접재료의 단면적이 커질수록 용접시간을 다소 길게 주는 것이 접합강도에 좋은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

일반적으로 용접압력과 용접시간을 일정한 값으로 변화시켜 접합강도를 알아본 결과 어느 순간에 가서는 접합강도가 저하되는 현상을 볼 수 있다.

이는 용접압력과 용접시간을 일정한 값으로 변화시켰을 때 접합강도가 다양하게 변화하는 것을 볼 수 있는데 초음파 용접에서 가장 중요한 용접변수인 용접압력과 용접시간이 접합 강도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.2 경도측정

용접되어진 용접시험편의 경도를 측정하기 위하여 용접하기 전 용접재료의 경도 값과 용접 후 용착금속부와 열

영향부를 측정하여 경도 값을 비교 분석하였다.

시험결과 용접시험편 단면적이 2mm²일 때 용착부의 경도 값이 Hv87.90으로 나타났으며, 단면적이 3mm²일 때 경도 값은 Hv88.00으로 나타났다.

용착부에서 열 영향부 범위로 진행할수록 경도 값이 저하되다 열을 받지 않은 모재 부분에서는 경도값(단면적 : 2mm² - Hv89.20, 단면적 : 3mm² - Hv89.30)이 상승하였다. 경도값을 비교 분석해보면 용접 전 경도 값이 용접 후의 경도 값보다 낮게 나타났다. 이는 용접 중 발생하는 높은 에너지에 의한 풀림 처리 현상으로 인해 경도 값이 낮게 나온 것으로 판단된다.

3.3 조직관찰

사진 1은 용접시험편의 단면적이 2.0mm²이고 진폭을 16.2 μ m로 고정된 상태에서 용접시간을 0.65, 0.70, 0.80초로 주어지고 용접압력을 0.30MPa, 0.35MPa, 0.40MPa로 변화시켜 용접된 용접시험편의 조직변화를 나타낸 것이다.

사진 1의 (a)와 같이 용접시간 0.65초, 용접압력을 0.30MPa로 하여 용접후 조직을 관찰해보면 사진과 같이 검은 점으로 나타나는 부분이 있는데 이 부분은 완전 용접이 안되어 기공과 같은 결함으로서 용접상태가 불량하게 나타났다. 또한 조직의 일부가 넓게 나타난 부분은 용접압력이 너무 낮다는 것을 보여주고 있는 부분이다.

사진 1의 (b)와 같이 용접시간 0.70초, 용접압력이 0.35MPa에서는 최적의 용접조건으로 유동이 좋아 용접이 잘 이루어졌음을 볼 수 있다. 이와 같이 양호한 용접조건은 인장강도와 용접성도 비교적 우수하였다.

그러나 사진 1의 (c)와 같이 용접시간 0.80초, 용접압력이 0.40MPa로 높아지면서 조직이 너무 치밀해지는 현상을 볼 수 있었다.

사진 2는 용접시험편의 단면적이 3.0mm²이고 진폭을 17.0 μ m로 고정된 상태에서, 용접시간을 0.70, 0.75, 0.85초로 주어지고, 용접압력을 0.35MPa, 0.40MPa, 0.45MPa로 용접된 시험편의 용접조직을 나타내었다.

사진 2의 (a)와 같이 용접시간 0.70초, 용접압력 0.35MPa로 용접조건을 주어 용접후에 조직을 관찰해보면 안정된 조직의 모습을 볼 수가 없었다, 그러나 사진 2의 (b)와 같이 용접시간 0.75초, 용접압력 0.40MPa일때는 최적의 용접조건이 되어 안정된 조직을 나타내었다.

사진 2의 (c)와 같이 용접시간 0.85초, 용접압력 0.45MPa에서는 용접시간과 용접압력이 너무 높아 용접

조건이 불량하여 조직이 치밀하게 나타났으며 기계적 성질도 좋지 않았다. 현미경에 의한 조직 관찰을 통하여 용접부의 용접 상태를 볼 수 있는데 인장시험과의 결과와도 대부분 일치하고 있으며 조직 관찰을 통하여 용접의 양·부를 올바르게 판단할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 자동차에서 사용되는 비닐 절연 저압 전선을 용접하는데 있어서 용접변수에 따른 최적의 용접조건을 찾기 위한 실험으로 진폭과 에너지는 일정한 값으로 하고 용접시간, 용접압력을 변환시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초음파 용접에서 양호한 용접을 이루기 위해 전선 단면적에 따라 최적의 용접조건을 얻었으며 초음파 용접에서 용접변수인 용접압력과 용접시간이 결합 강도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 전선의 단면적이 커질수록 용접시간과 용접압력이 커져야만 용접결과가 양호하게 나타났다.

이러한 결과로부터 여러 가지 재료에 따른 최적의 용접 조건들이 용접강도에 큰 영향을 미치기 때문에 앞으로 이 부분에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 서울산업대학교 기성희 연구비로 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) 정 호신, "고성용접의 원리와 응용", 대한용접학회 지 제 6권, 제6호, pp. 24~31, 1997.
- (2) S.W. Choi, "A study of bonding formation in the ultrasonic welding of aluminum and copper", Ohio State University, 석사학위논문, pp. 1~20, 1981.
- (3) 이 철구, 용접공학, 서울산업대학 출판부 pp. 291~326, 1992.
- (4) 이 철구, "이종 플라스틱의 초음파 용접성에 관한 연구" 대한용접학회지, 제9권, 제1호, p. 49, 1991.
- (5) STAPLA Ultrasonicall - Technik HmbH, ultrasonic metal welding, STAPLA ultrasonics corporation, pp. 1~49, 1998.

- (6) 超音波研究會, 쉬운 超音波의 應用, 機電研究社, pp. 19~20, 1992.
- (7) 손 병준, "초음파 응용 예(Ⅱ)", 電子科學 誌, pp. 55~59, 1989.
- (8) 上田光, 초음파입문, 동경도서, pp. 10~34, 46~61, 145~149, 1984.
- (9) W.H. Kearns, Welding Handbook, American Welding Society, vol. 3, pp. 280~310, 1984.
- (10) U.I. Chang, J.Frisch, "An optimization of some parameters in ultrasonic metal welding", Welding Journal, vol. 53-1, pp. 24~35, 1978.
- (11) C.L. Estes, P.W.Turner, "Ultrasonic closure welding of small aluminium tubes", Welding Journal, vol. 52-8, pp. 19~25, 1978.
- (12) T.H. Hazlett, S.M.Ambeker, "Additional studies of interface temperature and bonding mechanism of ultrasonic welds", Welding Journal. vol. 49-5, pp. 19~25, 1978.
- (13) K.C. Joshi, "The formation of ultrasonic bonds between metal". Welding Journal. vol. 50, pp. 840~848, 1971.
- (14) J.H. Alden, "Ultrasonic sealing of foil", modern packing, 34-7, pp. 129~133, 1961.
- (15) T.H. Hazlett, and S.M. Ambekar. "Additional studies of interface temperature and bonding mechanisms of ultrasonic welds". Welding Journal, vol. 49-5, pp. 196~200, 1970.
- (16) J.B. Jones, and F.R. Meyer, "Certain structural properties of ultrasonic welds in aluminum alloys", Welding Journal, vol. 38-7, pp. 282~288, 1959.
- (17) F.R. Meyer, "Assembling electronic devices by ultrasonic ring welding", electronic packaging and production, vol. 16-7, pp. 27~29, 1976.
- (18) G. Flood, "Ultrasonic energy welds copper to aluminum", Welding Journal, vol. 76-1 pp. 43~45, 1997.
- (19) 이 철구, "초음파 용접을 이용한 폴리에틸렌 수지의 접합" 한국공작기계기술학회지, 제6권, 제3호, pp. 73~81, 1997.