

이종재 마찰용접부 강도특성과 초음파 반사계수와의 상관성에 관한 연구

오 세 규 · 김 동 조 · 한 상 덕
부산수산대학 부산개방대학 한국중공업
(1987년 4월 30일 접수)

A Study on the Relationship between Dissimilar Metals Friction Welded Joints Strength Properties and Ultrasonic Reflection Coefficients

S. K. Oh

National Fisheries University of Pusan

D. J. Kim

National Pusan Open University

S. D. Han

Korea Heavy Industries, Construction Co., LTD

(Received on April 30, 1987)

Friction welding has emerged as a reliable process for high-production commercial application with significant economic and technical advantages. But nondestructive test in friction weld was not clearly developed. Therefore the experimental verification is necessary in order to understand the characteristics of the pulse echo effects according to various change in welding conditions.

This paper presents a new attempt to detect the bond strength of friction welds by ultrasonic. Instead of looking for a flaw or cracks at the interface, the new approach evaluates the coefficient by reflection which provides a single quantitative indicator involving the acoustic energy reflected at the interface. The objective of this study is to find the relationship between the reflection coefficients and the weld strength.

Results of the bar-to-bar friction welding of aluminum to copper and stainless steel and such relationship investigation are presented and interpreted.

서 론

異種材摩擦熔接部の非破壊検査는 플래시(flash)의 형상과 量에 따라 경험적으로 진단을 내리거나 플래시 제거 후 도료침투법(dye penetrant inspection)에 의하여 표면의 균열 기타 결함을 찾는 방법 정도로서, 마찰용접 이음면 근처의 내부 용접성을 규명하는 비파괴검사는 아직 충분히 확립되어 있지 않은 실정이다.

Adam 와 Taylor¹⁾는 스테인레스鋼과 軟鋼의 마찰용접물에 대하여 최초로 초음파를 이용한 검사를 실시하였으나 그것은 이음단면(welded interface)에서의 결함을 찾는 연구로서, 초음파 反射波를 이용하여 결함의 위치와 크기를 찾으려 하였지만 이음단면으로부터의 반사파와 결함에 의한 반사파가 혼돈되기 때문에 이를 해결하기 위하여 탐촉자(transducer)의

크기와 주파수를 선정하는 연구에 그친 것이었다. 그러나 마찰용접은 별도의 용입층이 없이 밀착되는 접합²⁾이기 때문에 양호한 용접이 아니더라도 용접면 근처에 결함이 나타나지 않는 것이 일반적이다.³⁾ 따라서 균열 기타 결함을 찾기 위한 앞의 방법은 마찰용접성을 판정하는 방법으로서 충분치 못하다.

그 후 Wang⁴⁾은 스테인레스鋼과 알루미늄을 재료로 관성마찰용접(inertia friction welding)을 실시하고 새로운 방법으로 이음단면에서의 超音波反射係數(ultrasonic reflection coefficient)와 충격강도와 의 관계를 조사하였으나 반사계수와 강도 사이에 정량적 상관관계를 찾지는 못하였다. 이 방법은 초음파가 탄성체 媒質을 통과할 때 열영향과 조직의 변화에 따라 감쇠(attenuation)현상이 민감하게 변화⁵⁾한다는데 근거를 둔 것으로써 마찰용접 이음면 근처에서의 결함을 찾는 대신, 용접조건에 따라 감쇠 정도

가 다른 反射波(pulse echo)를 定量的으로 측정하여 반사계수를 算出하고 용접성(weld quality)을 판정하는 척도로 반사계수를 이용하려는 것이었다.

本 研究는 이와 같은 방법으로 구리와 알루미늄, 스테인레스鋼과 알루미늄의 마찰용접에 대하여 실험을 실시한 것이다. 여기서는 제동식 마찰용접기(brake type friction welder)를 이용하여 용접조건을 변수로 여러가지 시험편을 제작하였고, 각 시험편의 초음파 반사계수를 定量的으로 측정한 반사파로부터 계산하였다. 그리고 반사계수의 유용성을 검토하기 위하여 용접음부의 강도시험을 실시하고 용접 조건과 반사계수, 용접조건과 이음강도, 반사계수와 이음강도와의 상관성을 각각 조사 연구하였다.

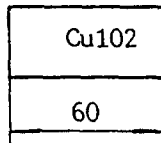
실 험

1. 실험機器 및 材料

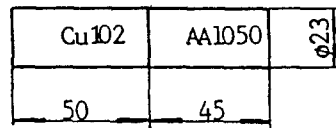
실험에 사용한 主要機器는 제동식 自動摩擦熔接機(Toho Control Co., THFU-25HW), 超音波探傷機

Table 1. Chemical composition of welding materials

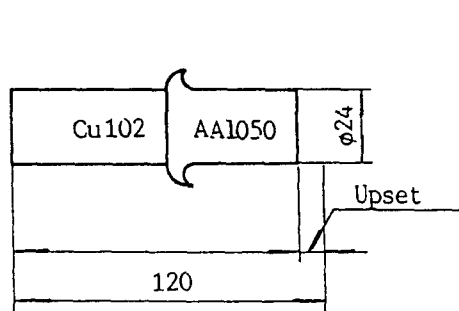
Materials (bar)	Chemical compositions (Wt %)							
	Si	Mn	Cr	Ni	Zn	Sn	Pb	C
AA1050	0.24	0.05	—	—	0.20	0.10	0.05	—
Cu102	—	—	—	—	0.20	0.04	0.08	—
SUS304	0.47	1.45	18.3	8.36	—	—	—	0.08



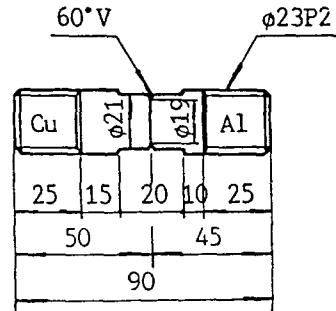
(a)



(c)



(b)



(d)

Fig.1. (a) Welded workpieces, (b) Welded workpiece, (c) Ultrasonic test specimen, (d) Tension test specimen

(Tokyo Keiki Co., SM90), 引張시험기(Shimadzu Co., DCS-25T) 등이며 마찰용접에 사용한 異種材料는 알루미늄(AA1050), 구리(Cu102), 스테인레스(SUS304) 棒材로서 재료의 성분은 Table 1과 같다.

2. 摩擦溶接

Fig. 1(a)와 같이 마찰용접할 棒材를 길이 60 mm, 지름 24 mm의 같은 치수로 가공하여 일차적으로 초음파 탐상기에 의하여, 재료의 내부결함에 의한 반사파가 없음을 확인하고 마찰용접을 실시하였다. 용접조건은 Table 2에서 보는 바와 같이, 알루미늄과 구리의 마찰용접에서는 마찰가열시간(frictional heating time)을 변수로 하고 알루미늄과 스테인레스鋼의 마찰용접에서는 업셋加壓力(upsetting pressure)을 변수로 하였다.

3. 초음파 반사계수

반사파 측정을 위한 시험편 형상은 Fig. 1(c)와 같

Table 2. Welding conditions of bar-to-bar friction weld

Materials (bar)	Welding conditions					
	t_1	t_2	t_3	p_1	p_2	p_3
AA1050 to Cu102	0.5-6	4	0.5	42.14	83.34	18.13
AA1050 to SUS304	2.5	3	1.5	36.35	36.35-90.75	18.13

Remarks;

N = 2000 rpm

- t_1 ; Frictional heating time (sec)
- t_2 ; Upsetting time (sec)
- t_3 ; Frictional preheating time (sec)
- N ; Running speed of main spindle of friction welding machine
- p_1 ; Frictional heating pressure (MPa)
- p_2 ; Upsetting pressure (MPa)
- p_3 ; Frictional preheating pressure (MPa)

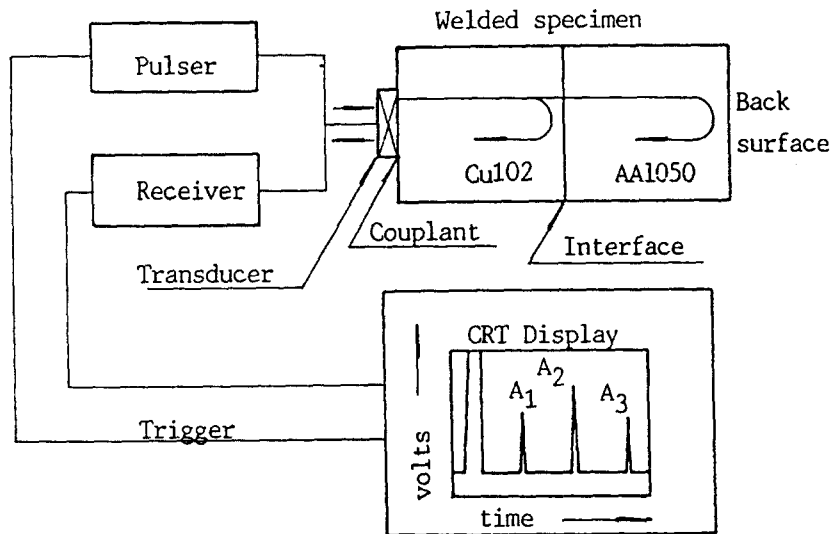


Fig. 2. Schematic representation of ultrasonic pulse-echo system

다. 시험편 兩側의 길이를 각각 다르게 한 것은 반사파들의 중첩현상을 줄이고 波의 크기를 쉽게 구분하여 읽을 수 있도록 예비실험을 통하여 얻은 결과를 이용하여 선택한 것이다. 兩側端面은 軸方向에 수직이고 단면의 표면조도는 기준길이 2.4 mm에서 최대높이 $R_{max} = 10 \sim 15 \mu m$ 정도로 균일하게 가공하였다.

Fig. 2는 초음파 탐상기를 이용한 반사적 측정의 系統圖이다. 탐촉자와 시험편 사이의 접촉압력이 각 시험편에 따라 균등하도록 중심고정구 (centering fixture)를 이용하여 일정압력 0.06 MPa을 수직으로 가한 상태에서 반사파(pulse echo)의 크기를 초음파 탐상기의 CRT 스크린에서 읽도록 하였다. Fig. 3은 스크린에 나타난 반사파들의 모형을 보여주고 있다. 반사파들로부터 반사계수(R)를 산출하는 계산식은 식(1)과 같다.⁶⁾ Fig.4에서 보는 바와 같이 용접면에서 최초로 반사되는 波의 크기를 A_1 , 반대

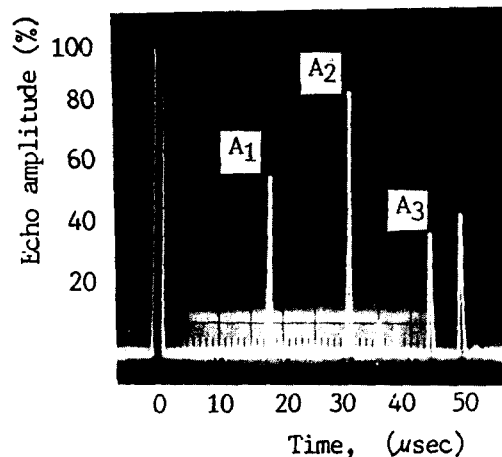


Fig. 3. Scope display of echoes obtained from a welded specimen

면 端面에서 반사되어 오는 波를 A_2 , A_2 가 두 번째로 용접면을 통과할 때 반사되는 波가 다시 반대

면 端面에서 반사되어 오는 波를 A_3 로 하여 반사계수를 계산한다.

$$R = \left(\frac{A_1 A_3}{A_1 A_3 - A_2^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

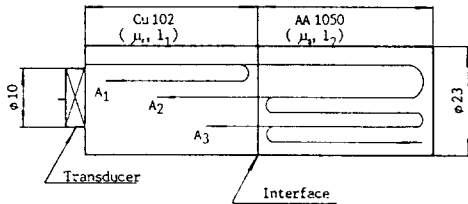


Fig. 4. Wave reflection and transmission across a plane interface

4. 용접부의 이음강도시험

반사파측정을 실시한 시험편으로 용접이음강도를 시험하기 위하여 Fig.1(d)와 같이 인장시험편을 제작하였다. 시험편의 길이가 짧은 편이기 때문에 양쪽에 피치(pitch) 2의 나사부로 가공하고 Nut부의 지름도 19 mm로 용접단면적을 되도록이면 작게 줄이려 하였다.

결과 및 고찰

1. 용접조건과 초음파 반사계수

알루미늄(AA1050)과 구리(Cu102)의 마찰용접에서 마찰가열시간 t_1 (sec)의 변화에 따라 초음파반사계수 R (%)의 변화를 조사한 결과는 Fig.5와 같다. 가열시간의 증가에 따라 반사계수는 선형적으로 감소하고 있음을 보여준다. 이들 관계를 식으로 나타내면 식(2)와 같다.

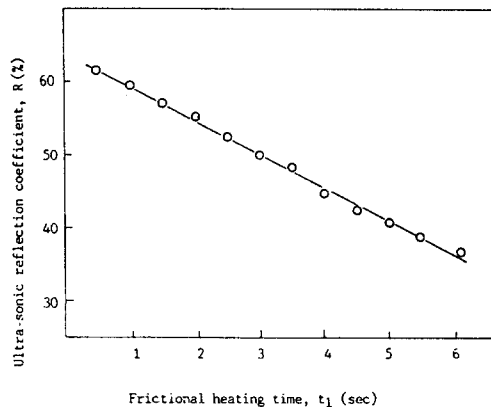


Fig. 5. Effect of frictional heating time on ultrasonic reflection coefficient

$$R = -4.717t_1 + 64.288 \text{ (상관계수 } r = -0.968) \quad (2)$$

Roderick 과 Truell 의 연구⁷⁾에 의하면, 탄성체를 통과하는 초음파의 감쇠는 물질의 화학적 성분과 입자 크기에 영향을 받을 뿐만 아니라 열처리 효과에도 민감한 감쇠반응을 보인다고 한다.

따라서 마찰 용접에서 반사계수의 변화가 일어나는 원인은 가열시간의 변화에 따라 이음면 근처의 조직변화가 각각 다르게 일어나고 열영향부의 크기와 섬유조직의 흐름도 달라지기 때문으로 보인다.

반사계수의 이론적 계산식은 다음과 같다.

$$R = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2) \quad (3)$$

여기서 Z_1 , Z_2 는 각각 구리, 알루미늄의 초음파 임피던스

식 (3)에 의하면, 구리의 초음파 임피던스(impedance) Z_1 은 $42 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sec}$, 알루미늄의 임피던스 Z_2 는 $17 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ 로 할 때 $R = 0.42\%$ 가 되는데 본 실험에서 R 가 0.37~0.62%까지의 분포를 보이므로 이들 평균 0.49%는 이론값보다 약간 높게 나타났다. 이러한 현상은 R 값을 계산할 때 반사파의 크기를 矯正하지 않고 사용했기 때문으로 생각되며 회절(diffraction)을 고려한 교정을 실시하면 약간 낮은 R 값을 얻을 수 있을 것으로 본다. 그러나 여기서 교정을 실시하지 않은 것은 본 研究가 R 값의 절대적인 크기를 구하려는 것이 아니고 단지 하나의 척도로 활용하기 위하여 용접조건에 따라 R 가 변화하는 상대적인 크기를 필요로 하였기 때문이다.

알루미늄과 스테인레스鋼(SUS304)의 마찰용접에

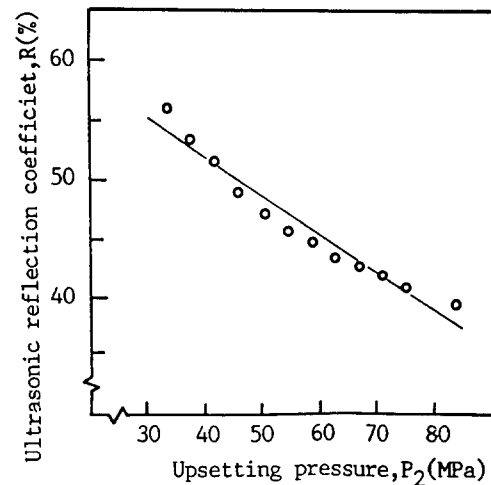


Fig. 6. Relationship between ultrasonic reflection coefficient and upsetting pressure. Welding condition; as shown in Table 2(AA1050-SUS 304)

서는 용접조건중 업셋가압력을 변수로 하였을 때 반사계수의 변화가 용접조건과 상관관계가 있음을 실험에 의해 알 수 있었다. Fig.6은 이들 실험의 결과이며 그 관계식은 다음 식(4)와 같다.

$$R = -0.286 p_2 + 64.65 \text{ (상관계수 } r = -0.955) \text{ (4)}$$

2. 반사계수와 이음강도

알루미늄과 구리의 마찰용접에서 Fig. 7은 용접조건 t_1 에 따른 인장강도(T_s)를 시험한 결과이며 Fig. 8은 반사계수(R)와 인장강도(T_s)와의 관계를 보여주고 있다. 마찰용접후 열처리를 실시하지 않은채 인장시험을 하였기 때문에 알루미늄의 母材강도에 미치지 못하는 강도로 나타났다. 반사계수(R)의 증가에 따라 인장강도의 값은 서서히 증가하다가 피크(peak)에 달한 후 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉 마찰가열시간 t_1 이 증가함에 따라 반사계수 R 는 감소하며 용접이음 인장강도(T_s)는 피크에 도달한 후 점차 감소하는 경향이다. t_1 과 T_s 의 실험식은 식(5)이며 식(2)와 (5)로부터 R 와 T_s 의 관계식을 구하면 식(6)과 같다.

$$T_s = 79.709 + 68.769 t_1 - 19.9632 t_1^2 + 1.68377 t_1^3 \text{ (5)}$$

$$T_s = 1571.42 - 98.133 R + 2.1969 R^2 - 1.6043 \times 10^{-2} R^3 \text{ (6)}$$

Table 3은 식(6)의 적합결여검정을 위한 분산분석이

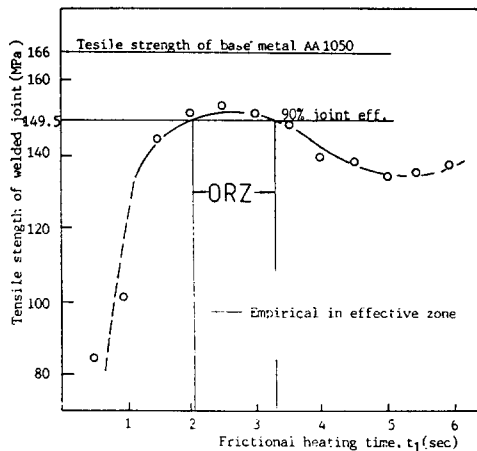


Fig.7. Relationship between frictional heating time and tensile strength of friction welded joint of dissimilar materials(AA1050, Cu102). Welding conditions; $p_1 = 33.1$ MPa, $p_2 = 83.3$ MPa, $p_3 = 16.7$ MPa, $t_1 = 0.5-6$ sec, $t_2 = 3$ sec, $t_3 = 1$ sec, $N = 2000$ rpm

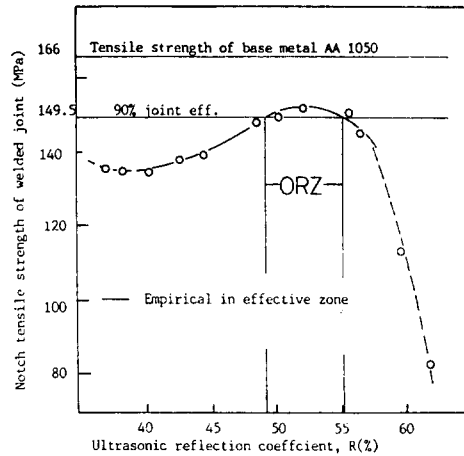


Fig.8. Relationship between ultrasonic reflection coefficient and tensile strength of friction welded joint of dissimilar materials(AA1050, Cu102).

Welding conditions; $p_1 = 33.3$ MPa, $t_1 = 5-6$ sec, $p_2 = 83.3$ MPa, $t_2 = 3$ sec, $p_3 = 16.7$ MPa, $t_3 = 1$ sec, $N = 2000$ rpm

Table 3. Analysis of variance for lack-of-fit test

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F-ratio
Residual	18.396	20	—	—
Pure error	11.392	16	0.7120	2.45
Lack of fit	6.977	4	1.7443	—
Remarks	From F-table : F (4, 16; 0.95) = 3.29 > 2.45 (95% confidence)			

다. 그 결과 신뢰수준 95%에서 관계식의 적합이 유의함을 알 수 있었다. 60°V notch(notch)시험편의 인장시험 결과에서 알루미늄 母材의 인장강도(166.34 MPa)에 가까운 149.5 MPa 이상의 강도범위에 해당되는 반사계수의 범위는 49~55%(ORZ, optimum reflection zone)임을 알 수 있다.

요 약

이종재 마찰용접재 강도특성과 초음파 반사계수와 상관성에 관하여 실험적으로 연구한 결과의 요약은 다음과 같다.

1. 이종재 마찰용접 이음면에서의 초음파 반사계수를 펄스반사파법에 의하여 측정산출할 수 있다.
2. 5 MHz의 비교적 낮은 주파수의 탐촉자를 사용하므로써 시험편의 표면가공 오차를 무시할 수 있다.

3. 알루미늄과 스테인레스의 마찰용접에서는 용접조건으로 마찰가열시간이나 가열압력을 변수로 하였을 때보다 엽셋가압력을 변수로 하였을 때 반사계수의 변화가 뚜렷하다.
4. 엽셋가압력을 변수로 한 용접조건과 반사계수 사이에는 선형적 상관관계가 있다.
5. 용접이음면에서의 이음인장강도와 반사계수와 상관관계식을 정량적으로 도출할 수 있다.
6. 초음파 반사계수에 의해 이종재 마찰용접 품질의 비파괴적 평가가 가능하다.

참 고 문 헌

1. Adams, D.F. and S.K. Taylor(1969): Detection of Faults in Friction Welded Stud by Ultrasonics, Welding and Metal Fabrication, Oct, p. 412-421.
2. Wang, K.K.(1975): Friction Welding, Research Council Bulletin, No. 204, April, p.1-21.
3. 日本摩擦壓接研究會編(1979): 摩擦壓接, コロナ社, p.57-58.
4. Wang, K.K. and S. Ahmed(1976): Ultrasonic Detection of Weld Strength for Dissimilar-Metal Friction Welds, Fourth North American Metal Working Research Conference, p.384-389.
5. Reynolds, W.N. and R.L. Smith(1984): Ultrasonic Wave Attenuation Spectra in Steels, Applied Physics 14(17), p.109-116.
6. Papadakis, E.P. and K.A. Fower(1979): Ultrasonic Attenuation by Spectrum Analysis of Pulses in Buffer Rods, Journal of the Acoustical Society of America 53(5), p.1336-1343.
7. Roderick, R.L. and R. Truell(1952): The Measurement of Ultrasonic Attenuation in Solid by the Pulse Technique and Some Results in Attenuation in Solid by the Pulse Technique and Some Results in Steel, Journal of Applied Physics 23(2).
8. Krautkramer, J. and H. Krautkramer(1977): Ultrasonic Testing of Materials, Second Edition, New York, p.23-26.