

◎ 論 文

超音波法에 의한 異種材料 摩擦熔接強度 解析法의 開發

吳 世 奎* · 金 東 祚**
(1988년 5월 4일 접수)

Development of Weld Strength Analysis System for Dissimilar Metal
Friction Welds by Ultrasonic Technique

Sae Kyoo Oh and Dong Jo Kim

Key Words: Friction Welding(마찰용접), Friction Weld Strength(마찰용접강도), Welding Condition(용접조건), Pulse-Echo Method(펄스파법), Ultrasonic Reflection Coefficient(초음파 반사계수), Quantitative Analysis(정량해석)

Abstract

Friction welding has been shown to have significant economic and technical advantages. However, one of the major concerns in using friction welding is the reliability of the weld quality. No reliable nondestructive test method is available at present for detecting weld quality, particularly in a production environment. Friction welds are formed by the mechanisms of diffusion as well as mechanical interlocking. The severe plastic flow at the interface by forge action of the process brings the subsurfaces so close together that detection of any unbonded area becomes very difficult.

This paper presents an attempt to determine the friction weld strength quantitatively using the ultrasonic pulse-echo method. Instead of detecting flaws or cracks at the interface, the new approach calculates the coefficient of reflection based on measured amplitudes of the echoes.

It has been finally confirmed that this coefficient could provide the quantitative relationship to the weld quality such as tensile strength, torsional strength, impact value, hardness, etc. So a new nondestructive analysis system of friction weld strength of dissimilar metals using an ultrasonic technique could be well developed.

Nomenclature

P_e	: Sound pressure of incident wave, [%]	R	: Ultrasonic reflection coefficient, [%]
P_d	: Sound pressure of transmitted wave, [%]	D_t	: Ultrasonic transmission coefficient, [%]
		Z_1, Z_2	: Acoustic impedance, [$kg/m^2 \cdot sec$]
		ρ_1, ρ_2	: Density of material, [kg/m^3]

* 正會員, 釜山水產大學 理工學部 船用機械工學科

** 正會員, 釜山工業大學 機械工學科

C_1, C_2 : Acoustic velocity, [kg/sec]
 A_1, A_2, A_3 : Echo amplitude, [%]
 μ_1, μ_2 : Attenuation coefficient, [dB]
 l_1, l_2 : Length of specimen, [mm]

1. 서 론

금속부재를 접속시켜 접속면에 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열을 이용하여 수행하는 마찰용접은 압접면 이외에서 전혀 열이 발생하지 않기 때문에 매우 이상적인 접합법이며 또한 격렬한 소성 운동 때문에 접합온도를 낮출수 있어 결정의 조대화나 급속한 화합물이 잘 생성되지 않는다는 특성을 가진다. 따라서 이음의 기계적 강도가 매우 높고, 용접 붕괴 용재, 용접축 가공등 소모재료가 필요치 않아 경제적이며, 이종금속의 접합이 가능하다는 것 등의 잇점 때문에, 여러분야에서 마찰용접이 이용되고 있다¹⁻³⁾. 그러나 마찰용접의 용접성을 비파괴적으로 평가하는 방법은 아직 미진하여 그 개발이 절실하다.

국내에서 마찰용접 및 평가에 관한 연구는 깃⁴⁻¹⁰⁾에 의해 발표된 논문이 대표적이며 'AE를 이용한 마찰 용접기계의 자동생산 품질제어 실시간 평가'¹¹⁾의 연구를 통하여 마찰 용접 품질의 비파괴적 평가방법을 발전시켰다. 그런데, AE법은 마찰 용접중 모니터링(monitoring)되므로 실시간 평가법으로서의 이용가치는 높지만 AE측측 장비가 고가이며 보다 효과적인 AE측측법의 개발이 문제로 남아 있어 그 활용이 아직 보편화 되지 못하고 있다.

초음파법에 의한 마찰 용접성 평가방법 연구에는 처음으로 1969년 Adams¹²⁾가 마찰용접 이음면의 결함을 찾기 위하여 용접면에 수직으로 초음파 펄스를 송수신하는 방법을 적용하였다.

그후 1975년 Wang¹³⁾등은 이종재 마찰용접 이음면(weld interface)에서의 초음파 반사계수(ultrasonic reflection coefficient)를 이용한 최초의 연구를 하였다. 용접면에 수직인 방향으로 초음파 펄스파(ultrasonic pulse echo)를 이용하여 3종류의 반사파(echo)를 측정하고 이들로 계산되는 반사계수와 마찰용접 이음면의 충격강도 사이에 어떤 연관성이 있는지 실험 연구하여 정성적인 연구성과는 있었으나 정량적 연관성을 찾지 못하였다. 그외 이와 유사한 연구는 최근까지 없는 것으로 보인다. 따라서 마찰용접이 각종 분야에서 활용되는 중요성에 비추어 보면 비파괴적으로 마찰용접의 용접성을 평가하는 방법의 개

발은 절실하다고 하겠다.

따라서, 본 연구는 마찰 용접면에서의 용접조건 변화에 따른 초음파 반사계수를 초음파 펄스파를 이용하여 구하고, 마찰용접부의 기계적 성질을 비파괴적으로 평가하는 방법을 개발하기 위한 연구이다. 이 방법은 초음파 펄스가 탄성체 매질을 통과할 때 마찰용접에 의한 열 영향과 조직의 변화에 따라 감쇠(attenuation)현상이 민감하다¹⁴⁻¹⁶⁾는데 근거를 둔 것이다. 마찰용접 이음면에서의 균열이나 결함을 찾는 대신 용접조건과 용접재료에 따라 감쇠되는 정도가 다른 반사파들을 정량적으로 측정하여 산출되는 마찰용접부에서의 초음파 반사계수를 용접성을 평가하는 척도로 이용하는 것이다.

그 결과 일부 이종재의 마찰용접에 있어서는 초음파 반사계수가 마찰 용접조건과 마찰 용접부의 기계적 특성을 평가하는데 유용하다는 결론을 얻을 수 있었고, 초음파 반사계수의 측정계산만으로 퍼스날 컴퓨터에 의해 마찰용접 품질을 평가할 수 있는 시스템을 최초로 개발하였으며 본 연구결과가 현장에서나 학문적으로 이종재의 마찰 용접 이음부 품질평가를 위한 기본적인 자료로 기여되도록 하였다.

2. 초음파 반사계수에 관한 이론적 고찰

초음파가 경계면을 가지는 두 물질의 한쪽에서 입사되었을 때 경계면에서 일부는 반사되고 나머지는 통과하는 현상이 있다.

입사파의 음압(sound pressure of incident wave, P_i)에 대한 반사파 음압(P_r)의 비를 반사계수(coefficient of reflection, R)라 하고 입사파 음압에 대한 통과파음압(P_t)의 비를 통과율(D_t)이라 한다¹⁷⁾. 그러나 반사계수의 크기를 구하기 위하여 $R = P_r/P_i$ 의 관계식을 직접 이용하는 것은 계기에서 입사파 음압과 반사파 음압의 크기를 정량적으로 얻을 수 없기 때문에 불가능하다. 한편 Schoch¹⁷⁾의 제안에 의하면 고유음향 임피던스(acoustic impedance, Z)를 이용하여 식(1)에서 반사계수를 계산할 수 있다.

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \quad (1)$$

$$Z_1 = \rho_1 C_1, \quad Z_2 = \rho_2 C_2$$

여기서

ρ : density of material

C : velocity of sound traveling in material

그러나 식(1)에 의한 반사계수의 크기는 일정한

값으로 재료의 조직변화 혹은 두 물질의 접촉상태에 대한 어떤 영향도 고려되지 않고 구해진다.

본 연구에서 활용한 반사계수의 계산방법은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 A_1, A_2, A_3 3가지의 음압을 이용한 것이다. 용접면(weld interface)에서 처음 반사되는 파(echo)의 음압을 A_1 , 용접면을 통과하여 반대쪽 단면에서 반사되어 오는 파의 음압을 A_2, A_2 가 되돌아 오면서 용접면을 통과할 때 일부 반사된 파가 다시 반대쪽 단면에서 반사되어 오는 파의 음압을 A_3 라 하면 이들은 다음 식으로 쓸 수 있다^{13,16)}.

$$A_1 = R \tag{2.1}$$

$$A_2 = (1 - R^2)e^{-2\mu_2 l_2} \tag{2.2}$$

$$A_3 = -R(1 - R^2)e^{-4\mu_2 l_2} \tag{2.3}$$

윗 식을 정리하여

$$R = [AC / (AC - 1)]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

여기서,

$$A = A_1/A_2, \quad C = A_3/A_2$$

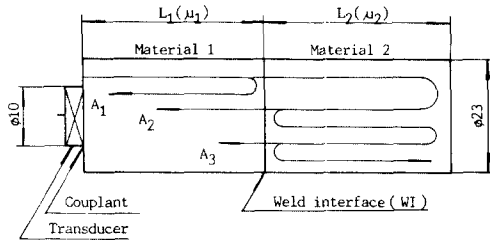
식 (3)은 초음파 반사계수를 측정산출하는 유일한 식이며 실험에서 두 물질의 접촉상태에 따라 반사계수가 변하게 되는 원인은 매우 다양하다. 매질의 초

음파 감쇠(attenuation) 정도가 반사파 크기에 주로 영향을 미치고 결과적으로 반사파 크기변화가 초음파 반사계수에 영향을 줄것으로 생각할 수 있다.

마찰용접 이음부에서는 감쇠영향외에 두 재료가 혼합되는 정도에 따라서도 초음파반사가 일정하게 일어나지 않기 때문에 반사계수의 변화가 일어난 것이다.

3. 시험편 및 실험방법

실험에 사용한 시험편은 대체로 마찰용접성이 우수하고 산업현장에서 실용되고 있는 재료들로서 알루미늄(AA1050), 銅(Cu 102), 스테인레스鋼(SUS 304), 黃銅(Brass7/3) 및 軟鋼(SM20C) 등이며, 재료의 성분들과 기계적 성질들은 Table 1에서 보는 바와 같다. 마찰용접 시험편의 형상과 치수는 棒材(bar)로서 Fig. 2(a)와 같이 지름을 24mm로 일정하게 하고 길이는 용접조건과 재료에 따른 업셋길이를 감안하여 50~80mm정도로 하였다. Fig. 2(b)는 마찰용접된 용접재를 나타낸다.



μ : Attenuation coefficient of material

Fig. 1 Wave reflections and transmission across a plane interface

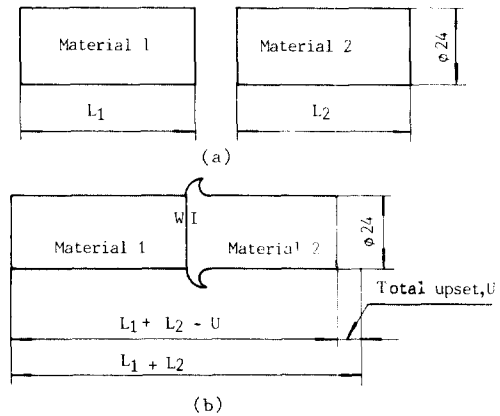


Fig. 2 (a) Welding workpieces
(b) Welded workpiece

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of welding materials.

Materials (bar)	Chemical compositions (Wt%)										Tensile strength (MPa)
	Si	Mn	S	C	P	Zn	Sn	Pb	Cr	Ni	
AA1050	0.24	0.05	—	—	—	0.20	0.10	0.05	—	—	166.3
Cu102	—	—	—	—	—	0.20	0.04	0.08	—	—	302.8
SUS304	0.47	1.45	0.03	0.08	0.04	—	—	—	18.3	8.36	519.4
Brass	—	—	—	—	—	30	—	—	—	—	319.5
SM20C	0.20	0.4	0.03	0.42	0.03	—	—	—	—	—	471.4

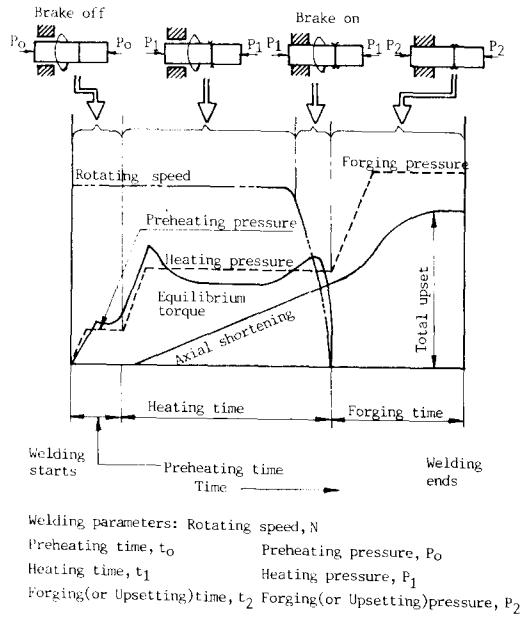


Fig. 3 Principle of continuous drive type friction welding process

마찰용접에 이용한 마찰용접기는 Toho Control Co.의 브레이크식 자동마찰 용접기(THFU-25HW)(Fig. 3)이며 초음파의 에코우 진폭 측정기는 Tokyo Keiki Co.의 초음파 탐상기(SM90)를 이용하였다. 마찰용접제의 기계적 성질은 시험하기 위한 기계는 Shimadzu Co.의 인장시험기(DCS-25T), Kawatetsu Instruments Co.의 비틀림 시험기(KTM-50), Tong

Kwang Mach. Co.의 충격 시험기(TMT-111) 및 Shimadzu Co.의 경도 시험기(Vickers Hardness Tester, No.3228)등이며, 용접제의 조직 검사는 금속 광학현미경을 이용하였다. 그의 초음파 측정시험편과 강도 및 경도시험편을 가공하기 위하여 Nagase Co.의 연삭기(SGH-6), 기타 범용선반 및 밀링머신(milling machine) 등을 이용하였다.

산업현장에서 실용되고 있는 각종 마찰용접 재료 중 Table 1의 재료들을 Table 2와 같이 이종재료들을 조합하여 용접조건을 변화시키면서 마찰 용접하였다. 용접조건에 따른 마찰용접부에서의 초음파 반사계수 측정용을 위한 에코우(echo)들의 측정은 Fig. 4에서와 같이 탐촉자(transducer)를 직접 부착하여 실시하는데 탐촉자의 주파수는 5MHz, 진동자 지름은 10mm의 수직탐사용 감쇠 피복형을 주로 이용하였다.

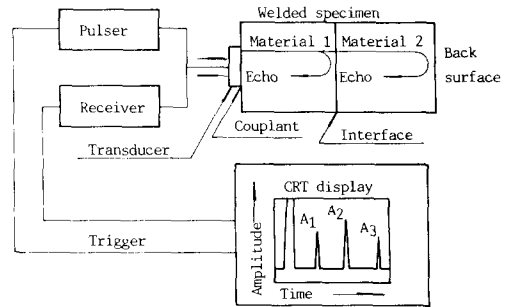


Fig. 4 Schematic representation of ultrasonic pulse-echo system

Table 2 Welding conditions of various bar-to-bar friction welds

Welding condition Case No.	Materials of friction welds (bar)	t_0	t_1	t_2	P_0	P_1	P_2
1	AA1050 to Cu102	0	*1-6.5	4	0	42.14	83.34
2	AA1050 to Cu102	1.5	*0.5-6	3	16.67	33.35	83.34
3	AA1050 to SUS304	1.5	2.5	3	18.13	36.35	*36.35-90.75
4	AA1050 to SUS304	0.5	*1-5	3	16.67	33.35	80.04
5	AA1050 to SM20C	0.5	*0.5-5.5	3	16.67	33.35	83.34
6	AA1050 to Brass	1.5	*1-10	4	11.67	36.68	100.04

$N = 2000rpm$

Remarks: t_0 ; Frictional preheating time[s]
 t_1 ; Frictional heating time[s]
 t_2 ; Upsetting time[s]
 P_0 ; Frictional preheating pressure[MPa]
 P_1 ; Frictional heating pressure[MPa]
 P_2 ; Upsetting pressure[MPa]
 N ; Running speed of main spindle of friction welding machine
 *; represent variables

탐촉자는 초음파의 속도가 낮은 재료쪽에 부착하게 되는데 그 이유는 에코우 A_2 , A_3 가 낮은 속도의 재료쪽에서 왕복하는 에코우들과의 중복현상을 피하기 위해서이다.

탐촉자와 재료사이의 접촉유(couplant)는 유압유(Shell Tellus #32)를 사용하였으며 유압유 온도는 상온($20\sim 25^\circ\text{C}$)을 유지하였다. 직접유층의 두께를 균일하게 유지하기 위하여는 정하중으로 5.9kPa 의 일정 압력을 중심 고정구(centering fixture)에 의해 가하였다. 에코우 A_1 , A_2 , A_3 에 의한 초음파 반사계수 계산은 식(3)으로 하였다.

초음파 에코우 측정을 하기 위해 시험편의 길이를 50mm 정도로 짧게 하는 것이 좋지만, 초음파 시험편을 직접 강도시험에 사용하기 위하여 마찰 용접된 시험편을 되도록 크게 가공하여 초음파 측정 시험편으로 하였다. Table 3과 같이 마찰 용접된 시험편들에 대하여 Fig.5~Fig.7의 형상으로 강도시험 시험편을 제작하고 비틀림강도(T_m), 인장강도(T_s) 및 충격강도(I_s) 등과 초음파 반사계수와 상관성을 도출하였다.

초음파 반사계수와 마찰용접 이음강도가 95% 이상의 높은 신뢰수준에서 상관관계가 존재한다면 마찰용접 품질 제어에 초음파법을 응용할 수 있을 것이다. 다량으로 생산되는 마찰용접 제품들에 대하여 비파괴적으로 품질을 평가할 수 있는 시스템개발은 목적으로 컴퓨터 응용의 가능성을 검토하였다.

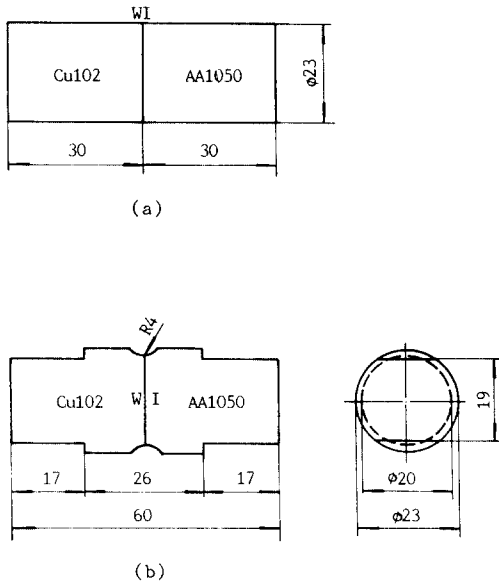


Fig.5 (a) Ultrasonic test specimen for torsion test
(b) Torsion test specimen

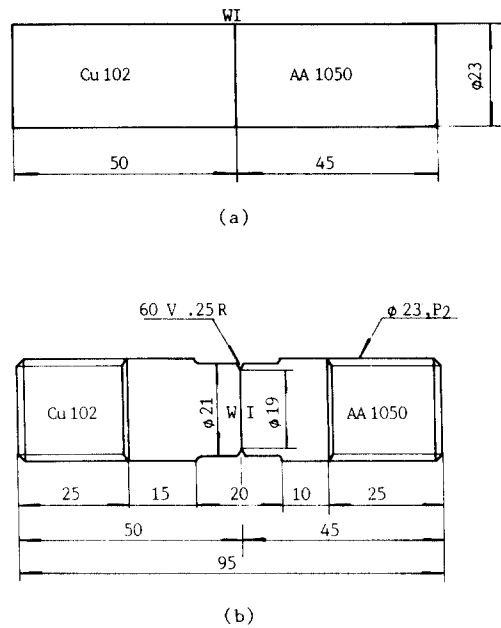


Fig.6 (a) Ultrasonic test specimen for tension test
(b) Tension test specimen

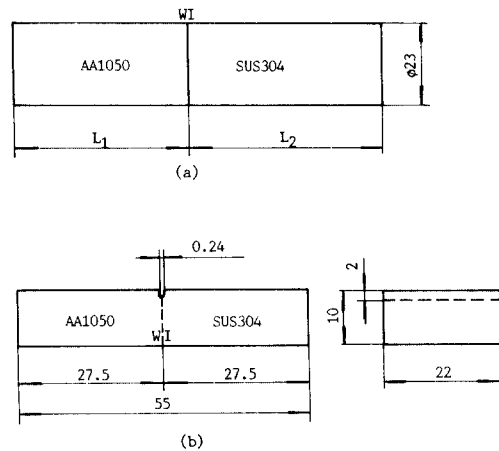


Fig.7 (a) Ultrasonic test specimen for Charpy impact test
(b) Charpy impact test specimen

마찰 용접성이 우수할 때와 용접조건이 적절치 못하여 용접 이음강도가 떨어질 때를 비교하여 용접부의 미시조직 및 매크로(macro) 조직을 검사하고 미시결함유무를 조사하였다. 마찰 용접 시험편 소재의 조직과 용접 후의 조직도 비교하여 어떠한 조직의 변화가 초음파 반사계수에 영향을 주게 되는지 검토

하였다. 그리고 초음파 비파괴 평가법 시스템의 시행 예와 미시조직적 고찰에서는 EPMA (electro probe micro analyzer)에 의하여 확산층(diffused zone)과 미시조직을 관찰하였다.

조직검사 시험편의 부식액은 **銅에 염화 제2철의 염산용액(염화 제2철 5g+염산 10cc+물 100cc)**, 알루미늄에 불화 수소수(불화수소 0.5cc+물99.5cc), 스테인레스강에 Marble 시약(황산용 4g+염산 20cc + 물 20cc) 및 연강에는 피크린산 4%(피크린산 4g +알콜 100cc)등을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 초음파 반사계수와 마찰용접부의 미시조직적 특성과의 상관성

Roderick과 Truell¹⁴⁾의 연구에 의하면 탄성체 매질을 통과하는 초음파의 감쇠는 매질의 화학적 성분과 결정 입자 크기에 영향을 받을뿐만 아니라 열처리 효과에도 민감한 감쇠반응을 보인다고 보고되어 있다. 그런데 마찰용접시에는 단조온도에 이르는 고온, 고압하에서 10s 이내의 짧은 시간에 금속간 고상 압접이 되므로 마찰용접 이음면에서 초음파 반사계수의 변화가 일어나는 원인은, 용접 열원이 되는 마찰 가열 시간의 변화에 따라 압접 이음면 부근(열영향부)의 조직변화가 각각 다르게 일어나고 열 영향부의 크기도 다르게 나타나기 때문일 것이다.

Fig. 8은 AA1050-SUS304의 마찰 용접재에 대하여 중심 축선을 포함하는 종단면에서의 현미경 조직을 나타낸 것이다. 미시조직 사진에서 보는 바와 같이 하나의 시험편에 있어서도 이음면 부근의 위치에 따라 조직 입자배열의 형상이 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 반사계수의 변화의 주 원인은 단조 온도하의 가압력에 의해 생기는 축방향에 경사진 방사선 방향(radial direction)으로 흘러 나가는 금속흐름(metal flow) 즉 섬유상조직(textile structure)의 걸쭉길쭉한 미세치밀한 입자흐름의 각도 변화에 기인하여(용접조건에 따라 각도가 변화함) 초음파의 산란, 회절 및 감쇠가 발생하기 때문이라 생각된다.

Fig. 9는 Cu102와 AA1050을 마찰 용접 시킨 시험편의 소성변형된 알루미늄측에서, 가압에 의하여 변형된 결정입자들의 형상과 그들의 변화된 선택방위(preferred orientation)의 결(texture)에 대한 조직을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 입사파가 경사진 결

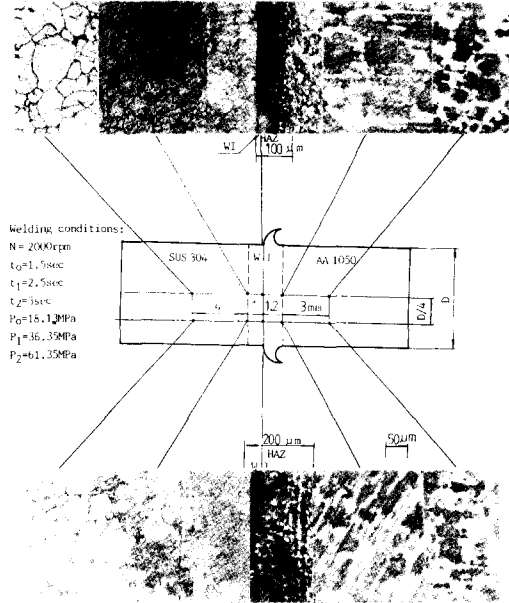


Fig. 8 Microstructure at welded zone and base metals of friction welded joints (AA1050-SUS304)

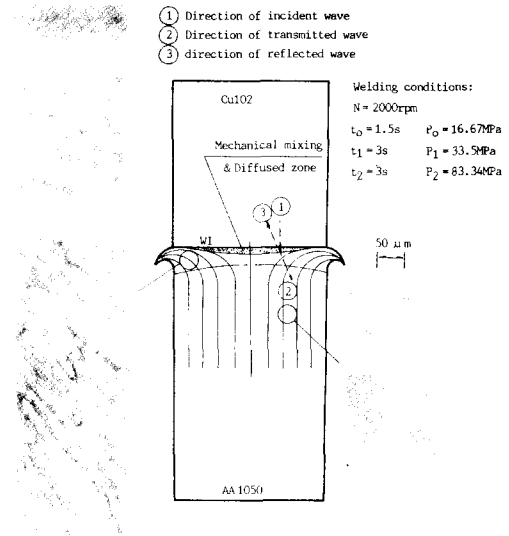


Fig. 9 Microstructure of misorientation at deformed zone (HAZ) of friction welded joints (AA 1050-Cu102)

(texture)에서 부분적으로 통과, 회절 또는 반사되면서 입사파의 방향과 다르게 됨으로써 산란(scattering) 효과가 일어난 것이고, 이러한 현상은 소성 변형층이 클수록 즉 마찰 가열시간이 클수록 심할

것이며 이에 따라 반사계수는 감소할 것이다.

한편 마찰 가열시간이 부족하여 용접 이음부에 미접합부가 존재하면, 초음파 펄스는 미접합부에서 투과되지 못하고 반사되기 때문에, 마찰 가열시간이 부족할 때는 초음파 반사계수가 크게 나타날 것으로 생각된다. 그리고 용접 이음부에 미접합부가 없는 경우에도 전 용접면이 초음파 입사파에 대해 직각 방향으로 평탄하므로 마찰 가열시간이 작을 때 초음파 반사계수가 크게 나타난다고 생각된다.

4.2 이종 마찰용접재의 재료 종류와 초음파 반사계수

Table 1에 제시된 용접재료에 대하여 Table 2의 용접조건에 따라 마찰용접을 실시하고, 용접된 시험편을 초음파 측정시험편으로 가공하여, 각 시험편에 대한 초음파 에코우 진폭특성을 측정하고 용접면에서의 초음파 반사계수를 계산한 결과 이종 마찰용접재로 AA1050과 Cu102, AA1050과 SUS304 및 AA1050과 SM20C는 마찰용접성도 좋으며 반사파측정에 의한 초음파 반사계수의 산출도 가능하였다. SUS304와 SM20C는 마찰용접성은 좋지만 용접부에서의 반사가 극히 미소하여 반사계수 산출이 곤란하였다. 그러나 AA1050과 Brass는 용접부에서의 반사파는 선명하게 나타나지만 마찰용접성이 극히 불량하였다.

SUS304와 SM20C의 경우 이종재료서의 성분에는 차이가 있지만 고유음향 임피던스(impedance)는 거의 비슷한 값($Z = 42 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)이기 때문에 용접면에서 초음파 펄스가 반사되지 않고 대부분 통과된다고 본다. AA1050과 Brass의 경우는 초음파 임피던스가 AA1050은 $17 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$, Brass는 $37 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이므로 용접면에서의 초음파 반사는 잘 일어나지 않지만, 마찰 용접중 마찰발열이 잘 일어나지 않고 용접 가공후 용접된 시험편이 쉽게 파단되거나 초음파 시험편 가공중 파단되는 경우가 많았다.

4.3 초음파 반사계수와 마찰용접 시간과의 상관성

AA1050과 Cu102에 대하여 마찰 가열압력(P_1)을 42.14MPa, 업셋 가압력(P_2)을 83.34MPa로 일정하게 두고 마찰 가열시간(t_1)을 1 s에서 6.5s까지 0.5 s 간격으로 변화 시켜서 (Table 2의 Case No. 1) 마찰 용접한 용접재에 대해 초음파 반사계수(R)의 변화를 조사한 결과는 Fig. 10(a)와 같다. 그리고, 역시 같은 재료 AA1050과 Cu102에 대하여 마찰 가

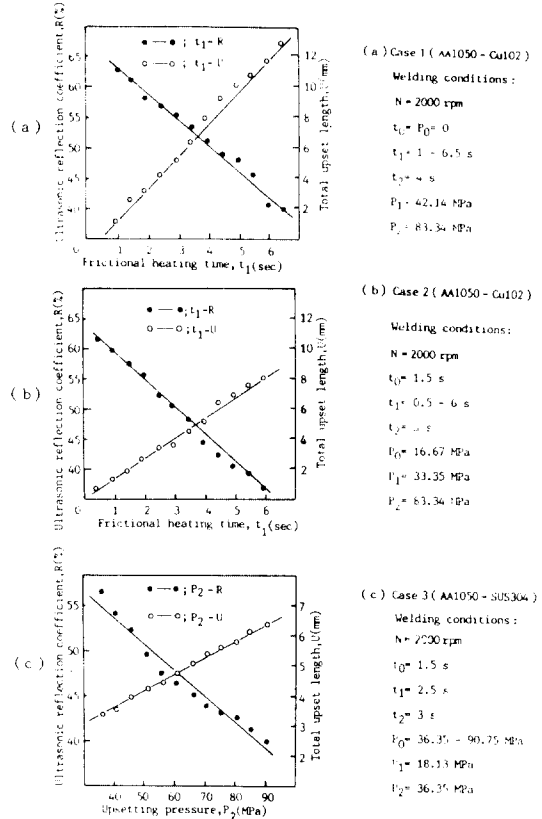


Fig. 10 Relationship between ultrasonic reflection coefficient and heating time or upsetting pressure of friction welded joints (AA1050-Cu102, AA1050-SUS304)

열압력(P_1)을 33.35MPa, 업셋 가압력(P_2)을 83.34MPa로 일정하게 두고 마찰 가열시간(t_1)을 0.5s에서 6s까지 변화시켜서 (Table 2의 Case No. 2) 마찰 용접한 용접재에 대해 초음파 반사계수(R)의 변화를 조사한 결과는 Fig. 10(b)와 같다. Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)에서 마찰용접시간(t_1)의 증가에 따라 초음파 반사계수(R)는 선형적으로 감소하는 경향으로 나타났다.

이들 관계를 최소 자승법에 의해 구한 상관 관계는 식(4)와 식(5)와 같다. 그리고 마찰 가열시간(t_1)에 따른 총업셋 셋길이(total upset length, U)의 변화관계를 각각 Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)에 반사계수(R)와 동시에 나타내었다. 이 때 마찰가열시간(t_1)의 증가에 따라 총 업셋길이(U)는 선형적으로 증가하는 경향이며 이들 관계를 정식화하면 식(6), 식(7)과 같다.

$$R = -4.2364t_1 + 67.2291$$

(상관계수 $r = -0.9924$)

$$(4)$$

$$R = -4.7124t_1 + 64.2655$$

(상관계수 $r = -0.9985$) (5)

$$U = 2.1189t_1 - 0.8458$$

(상관계수 $r = 0.9982$) (6)

$$U = 1.3559t_1 - 0.0818$$

(상관계수 $r = 0.9972$) (7)

4.4 초음파 반사계수와 마찰 용접부의 기계적 특성과의 상관성

4.4.1 초음파 반사계수와 마찰 용접부 경도와의 상관성 도출과 경량적 해석

마찰 가열시간(t_1)과 압력(P_1)을 각각 2.5s, 336.35 MPa로 일정하게 두고 업셋 가압력(P_2)을 36.35MPa에서 81.73MPa까지 변화 시키면서(Table 2의 Case No.2) 마찰 용접한 AA1050-SUS304 용접체의 시험편에 대하여 종단면상에서 용접이음면(weld interface)을 따라 누프(Knoop) 경도를 조사한 결과는 Fig.11과 같다. 이 때 업셋 가압력(P_2)과 평균경도(H_{kmean})와의 상관관계는 Fig.12와 같다. 마찰열 발생조건은 동일하게 하고 업셋 가압력만을 서로 다르게 하여 경도를 비교한 경우이므로, 업셋 가압력(P_2)이 클수록 평균경도(H_{kmean})가 높아진다. Fig.10(c)에서 P_2 가 증가하면 반사계수(R)가 감소하였으므로 H_{kmean} 이 증가하면 R 이 감소하는 상관성이 예측된다.

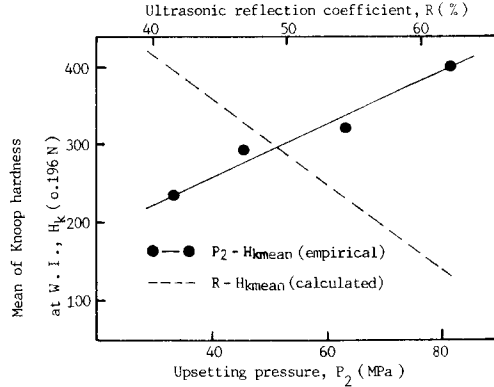


Fig.12 Relationship between mean of Knoop hardness at interface and upsetting pressures of dissimilar friction welded joints (AA 1050-SUS304) and $R-H_{kmean}$ graph

Fig.12의 평균경도와 업셋 가압력과의 상관관계를 정식화하면 식(8)과 같으며 이 관계식과 Fig.10(c)에서의 $R-P_2$ 관계식 ($R = -0.2905P_2 + 65.26.2654$)을 결부시켜 평균경도와 반사계수와의 상관관계식 ($R-H_{kmean}$)을 구하면 식(9)와 같고, 그 그래프는 Fig.12의 점선으로 나타나 있다.

$$H_{kmean} = 3.381P_2 + 127.303$$

(상관계수 $r = 0.948$) (8)

$$H_{kmean} = 11.8222R + 891.527$$

(9)

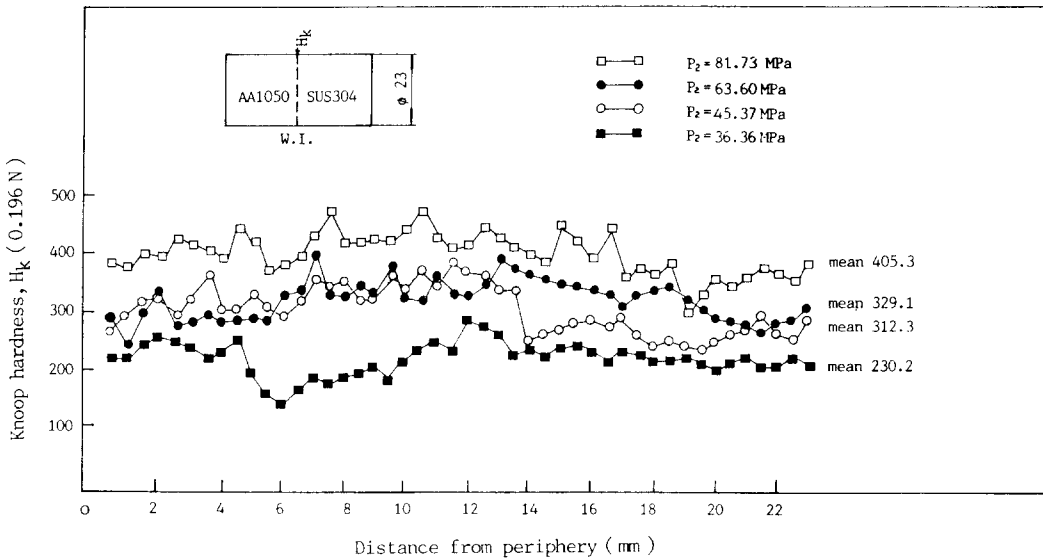


Fig.11 Typical transverse hardness distribution at weld interface of friction welded joints of dissimilar materials (AA1050-SUS304)

Welding conditions: $N = 2000rpm$, $t_0 = 1s$, $t_1 = 2.5s$, $t_2 = 3s$

$P_0 = 18.13MPa$, $P_1 = 36.36MPa$, $P_2 =$ as shown in figure

(12)와 같으며, 계산식 (12)와 실험식 (10)은 근사적으로 매우 일치함을 알 수 있다(Fig. 15).

$$T_m = 9646.41 - 572.817R + 12.2550R^2 - 0.086185R^3 \quad (12)$$

4.4.3 초음파 반사계수와 마찰 용접 이음부 인장강도와와의 상관성 도출과 정량적 해석

AA1050과 Cu102의 마찰 용접에서 마찰 가열시간(t_1)을 0.5s에서 6s까지 변화 시키면서 (Table 2의 Case No.2) 마찰 용접한 시험편에 대하여 초음파 반사계수(R)와 인장강도(T_s)간의 상관관계를 조사한 시험결과는 Fig. 16과 같다.

반사계수(R)가 약 55% 이상의 범위, 즉 마찰 가열시간(t_1)이 약 2s 보다 낮은 범위에서는 입열량 부족으로 인장강도(T_s)가 급격히 떨어지고 있으며, 반사계수가 50% 이하인 범위에서 T_s 가 peak로 부터 감소되어 마찰 가열시간(t_1)이 약 4s 이상일 경우는 T_s 가 완만한 감소 변수를 보이고 있다.

Fig. 16에서 T_s 와 R 의 상관관계를 정식화하면 식 (13)과 같다.

$$T_s(R) = 2644 - 168.8292R + 3.7321R^2 - 0.027036R^3 \quad (13)$$

용접재의 인장강도(T_s)가 알루미늄 모재강도(166.3 MPa)에 미치지 못하는 못하지만 이음효율 90% 이상인 T_s (149.7MPa) 범위를 R 의 최적범위로 보면 그 범위(ORZ)는 약 48~55%임을 알 수 있다. 그러나 T_s 의 스캐터 밴드(scatter band)를 $\pm 3MPa$ 로 고려하면 수

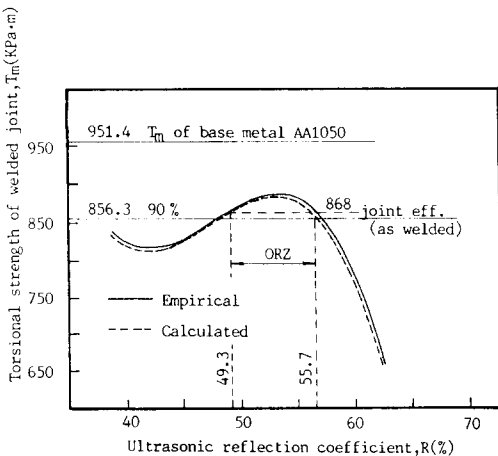


Fig. 15 Comparison between calculated and empirical equation for friction weld strength versus ultrasonic reflection coefficients of bar-to-bar welds(AA1050-Cu102)

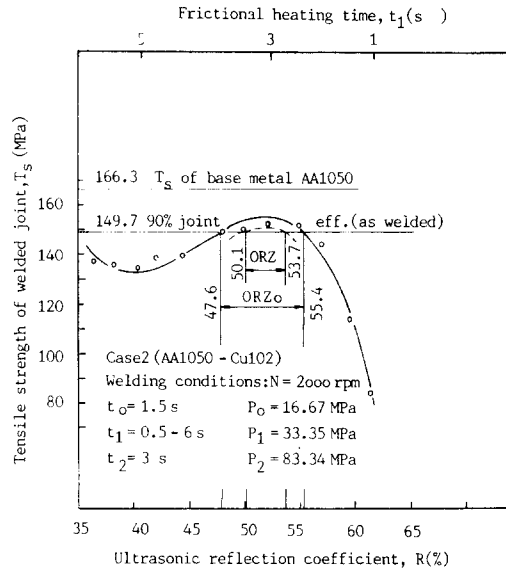


Fig. 16 Relationship between ultrasonic reflection coefficient and tensile strength of friction welded joints of dissimilar materials (AA 1050-Cu102)

정된 최적범위 ORZ의 하한은 $R_{c1} = 50.1\%$ 이고 상한은 $R_{c2} = 53.7\%$ 이다.

한편 마찰 가열시간(t_1)의 변화에 따른 인장강도(T_s)의 변화를 조사한 시험결과는 Fig. 14(b)와 같으며 t_1 과 T_s 의 상관관계를 정식화하면 식(14)와 같다.

$$T_s(t_1) = 39.1718 + 104.7818t_1 - 29.9059t_1^2 + 2.5341t_1^3 \quad (14)$$

위 식(14)와 앞서 구한 t_1 과 R 의 상관관계식 (15)를 결합시켜 T_s 와 R 의 상관관계식을 도출하여도 식(14)와 근사적으로 매우 일치함을 확인할 수 있었다 (앞절에서 T_m 과 R 의 상관관계 계산식과 실험식 비교와 같은 방법)

4.4.4 초음파 반사계수와 마찰용접 이음부 충격강도와와의 상관성 도출과 정량적 해석

AA1050과 SUS304의 마찰용접에서 압력 가압력(P_2)을 변화 시키면서(Table 2의 Case No.3) 용접한 시험편에 대하여 초음파 반사계수(R)와 충격강도(I_s)와의 상관관계를 조사한 시험결과는 Fig. 17과 같다. Fig14(c)에서와 같이 압력 가압력(P_2)이 이음강도에 크게 영향을 미친다는 사실대로 압력 가압력(P_2)이 부족할 때(R 이 클때)는 충격강도(I_s)가 매우 낮게 나타났고, P_2 의 증가(R 의 감소)에 따라 I_s 가

증가하다가 최대강도를 지나서는 I_s 가 약간 떨어지는 현상을 볼 수 있다. 그리고 최대 충격강도(78.8 kPa·m)가 알루미늄 소재의 충격강도(230.2kPa·m)에 훨씬 미치지 못하는 것은 역시 다찰 용접재가 충격강도에 약하다는 사실을 보여준다¹⁹⁾.

Fig. 17의 I_s 와 R 의 상관관계를 정식화하면 식(15)와 같다.

$$I_s(R) = -290.2895 + 6.3163R + 0.2939R^2 - 5.6229R^3 \quad (15)$$

충격강도(I_s)의 시험치가 모재강도에는 훨씬 미치지 못하지만 I_s 와 R 의 상관 관계 실험식(15)에서 모재 충격강도(230.2kPa·m)의 32% (73.7kPa·m) 이상인 I_s 의 범위를 최적 범위로 보면 반사계수(R)의 최적 범위 ORZ는 $40\% \leq R \leq 48\%$ 이며 스캐터밴드를 고려한 수정된 ORZ는 하한이 $R_{c1} = 41.6\%$ 이고 상한이 $R_{c2} = 46.5\%$ 이다. 한편 P_2 의 변화에 따라 I_s 의 변화를 조사한 시험결과는 Fig. 14(c)와 같으며 P_2 와 I_s 의 상관관계식은 식(16)과 같다.

$$I_s(P_2) = -563.6627 + 25.2965P_2 - 0.3280P_2^2 + 1.3961P_2^3 \quad (16)$$

위 식(16)과 앞서 구한 P_2 와 R 과의 상관관계식을 결부시켜 R 과 I_s 의 상관관계 계산식을 도출하여도 역시 R 과 I_s 의 상관관계 실험식(15)와 근사적으로 일치함을 확인할 수 있다.

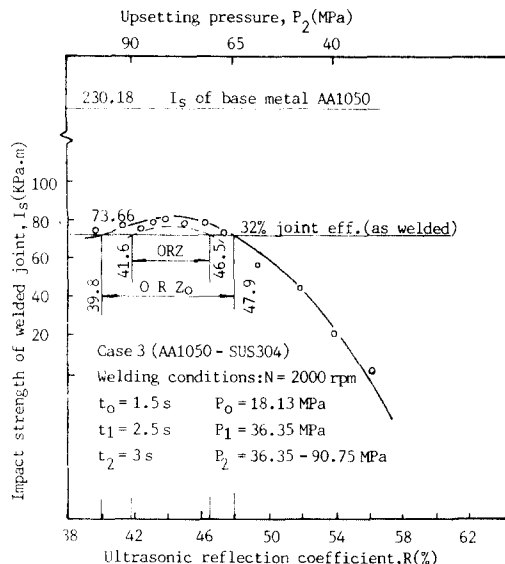


Fig. 17 Relationship between ultrasonic reflection coefficient and Charpy impact strength of friction welded joints of dissimilar materials(AA1050-SUS304)

4.4.5 상관성 관계식의 95% 신뢰성 검사

앞서 구한 여러가지 상관관계식들 중 회귀곡선의 적합성이 다소 의심스러워 보이는 관계식(10)에 대하여 유의 수준 95%의 신뢰성 검사를 실시하였다.

Table 3은 초음파 반사계수와 비틀림 강도의 관계를 나타내는 Fig. 13의 회귀곡선 즉 식(16)에 대하여 분산 분석에 의해 적합 결여 검정을 실시한 결과이다. 유의 수준 95%에서 적합 결여가 기각되고 회귀곡선의 適合이 有意함을 알 수 있었다.

Table 3 Analysis of variance for lack-of-fit test for Equation(10)

Source	Sum of squares	Degree of freedm	Mean squares	F-ratio
Residual	18.396	20	—	—
Pure error	11.392	16	0.7120	2.45
Lack of fit	6.977	4	1.7433	—
Remarks	From F-table: $F(4, 16; 0.95) = 3.29 > 2.45$ (95% confidence)			

4.4.6 마찰용접 품질의 초음파 비파괴 평가법 시스템 개발에 관한 고찰

마찰 용접에 의하여 생산되는 제품의 품질을 제어하고 평가하는 시스템 개발을 목적으로 소형 컴퓨터를 활용하는 방법을 검토하였다. Fig. 18은 컴퓨터 활용방법의 계통도이다. 먼저 작중 마찰 용접재의 종류와 크기, 형상, 재료의 조합에 따른 용접이음강도의 유효치, 그리고 초음파 반사계수에 의해 계산되는 강도-초음파 반사계수의 상관관계식을 입력 보관시킨다. 마찰 용접에 의해 생산되는 제품의 초음파 반사계수를 초음파 측정 장치에 연결된 컴퓨터에서 계산하게 하고 측정 계산된 초음파 반사계수로 재료에 따라 구해진 실험식(10), (13) 또는 (15) 등에서 용접 이음강도를 계산하여 보관시킨다. 평가할 제품의 재료종류와 크기에 따라 먼저 보관된 입력자료들로부터 희망하는 이음효율의 강도(유효강도)에 대한 정보를 얻고, 측정 산출된 반사 계수에 의해 구해지는 이음강도(계산강도)와 비교 평가하게 한다. Fig. 18의 계통도에서, 첫번째 판정으로 유효강도와 계산강도를 비교하여 계산강도(S)가 유효강도($S_{critical}$)에 미치지 못하면 'NO'판정을 출력하게 되고, 유효강도에서 'YES'판정을 받는 계산강도는 두번째 비교 판정에서 스캐터 밴드를 고려한 반사계수의 최적범위와 비교된다. 측정계산된 반사계수가 최

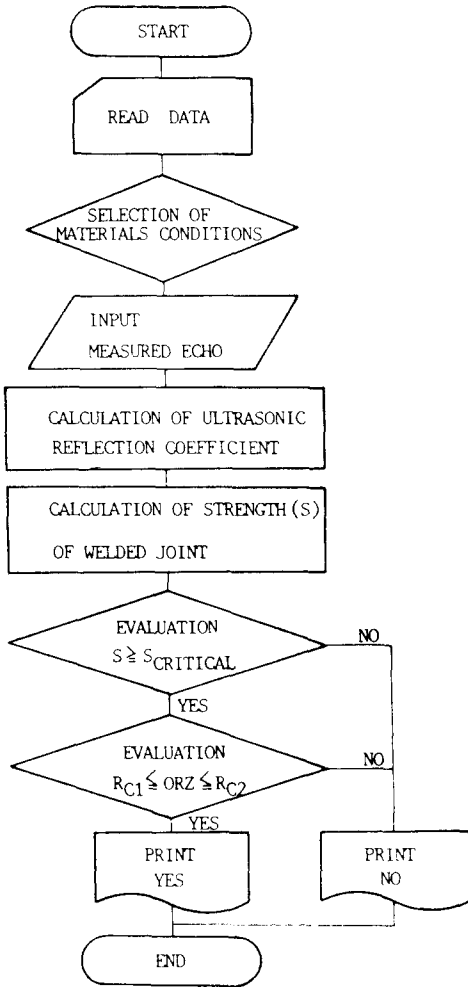


Fig. 18 Block diagram of evaluation process chart for nondestructive evaluation system of dissimilar materials friction welded joint quality by ultrasonic technique

적 반사계수 범위의 하한(R_{c1})보다 크고 상한(R_{c2})보다 작으면 비교 판정을 'YES'로 출력하게 될 것이다. 이러한 비파괴 평가법의 시스템 개발을 소형 컴퓨터의 활용으로 간단히 실행할 수 있다. 그러나 시스템 개발의 조건으로는 초음파 반사계수와 많은 종류의 용접 재료들에 대하여 용접 이음강도와 상관관계가 도출되어야 하며 그 신뢰 수준도 높아야 할 것이다. 서론에서 언급된 AE법에 의한 마찰용접 품질제어는 용접중의 실시간 평가법^{4,11)}으로서 매우 유용한 방법이다. 그러나 잡음 기타 예기치 못한 신호에 의하여 AE量에 변화를 주었을때의 착오로 인한 피해 등에 대비해서라도 실시간 평가가 아닌, 마찰 용접후

적당한 시간에 비파괴적으로 평가할 수 있는 초음파 펄스를 이용한 품질 평가법의 시스템 개발은 필요하며, AE장비는 매우 고가로서 구입하기가 힘든 반면 초음파 탐상기는 산업현장에서도 쉽게 접할 수 있는 잇점이 있다.

본 연구는 이와 같은 시스템 개발의 기초자료가 될 일부 상관관계식으로 AA1050-Cu102 마찰 용접부의 인장강도 및 비틀림 강도와 초음파 반사계수와와의 상관관계식, AA1050-SUS304 마찰 용접부의 충격강도와 초음파 반사계수와와의 상관관계식을 구한 단계이며, 재료에 따라 2종 이상의 강도를 만족시켜주는 최적 반사계수 범위도 도출할 수 있다.

따라서 초음파 탐상자의 다양한 개발과 많은 재료의 마찰 용접 이음강도 실험으로 초음파 반사계수와 용접 이음강도와의 상관관계식을 종합하여 각종 재료의 최적초음파 반사계수 범위(ORZ)에 관한 자료를 축적함으로써 마찰 용접 이음강도의 비파괴 평가법 시스템 개발이 실현될 것으로 본다.

4.4.7 초음파 비파괴 평가법 시스템 시행예와 평가 결과의 미시조직적 고찰

Table 4는 AA1050-Cu102 및 AA1050-SUS304의 마찰 용접에서 용접조건이 적절하거나 부적절하다고 생각되는 시험편들에 대하여 초음파를 이용하여 마찰 용접 강도 평가를 Fig. 18에 따라 실시한 결과이다.

Table 4의 case (1)은 AA1050-Cu102의 용접재에 대하여 평가한 결과로서 (a)와 (c)는 불합격 'NO'의 판정을, (b)는 합격 'YES'의 판정을 받은 경우이다. 이들 시험편의 이음면 부근 조직과 조성성분을 EPMA에 의해 분석한 결과는 각각 Fig. 19의 (a), (b)이다. 평가 시스템의 출력으로 'NO'의 판정을 받은 (a)의 경우는 반사계수(R)가 62.3%이고 계산된 비틀림강도(T_m)는 $655kPa \cdot m$ 로서, 62.3%, $R_{c2} = 55.7\%$ 이고 이음효율은 68.8%이므로 강도와 반사계수가 모두 90% 이음효율의 최적범위에 들지 못한다.

Fig. 19(a)를 보면 銅측에서 알루미늄의 확산층(diffused zone, DZ)이 거의 나타나지 않고 알루미늄측에는 약 $6\mu m$ 정도의 아주 얇은 銅확산층(DZ)이 나타나 있다. 그리고 시험편 종단면의 이음 경계부 중앙에는 미집합부가 매크로 조직으로도 확인되었는데 이러한 현상은 마찰 가열시간이 너무 짧아 용접 입열량이 부족하였기 때문이라 생각된다.

Fig. 19(b)는 $R = 55.3\%$, $T_m = 827kPa \cdot m$ 이고 합격 (YES) 판정을 받은 시험편에 대한 EPMA 그래프와

Table 4 Example of nondestructive evaluation

Test case	Pulse echo amplitudes			Reflection coefficients $R(\%)$	Calculated strength of welded joint	Final evaluation
	A_1	A_2	A_3			
(1)	(a)	55	65.5	50	$T_m = 655kPa \cdot m$	NO
	(b)	55	75	45	$872kPa \cdot m$	YES
	(c)	57	91	28	$816kPa \cdot m$	NO
(2)	(a)	53	72	46	$I_s = 7.1kPa \cdot m$	NO
	(b)	47	96	45	$77.6kPa \cdot m$	YES
	(c)	44	98	41	$72.0kPa \cdot m$	NO

Case (1): Torsion test of friction welded joints (AA1050-Cu102)

Case (2): Charpy impact test of friction welded joints (AA1050-SUS304)

T_m of base metal AA1050: 951.4 ($kPa \cdot m$)

I_s of base metal AA1050: 230.2 ($kPa \cdot m$)

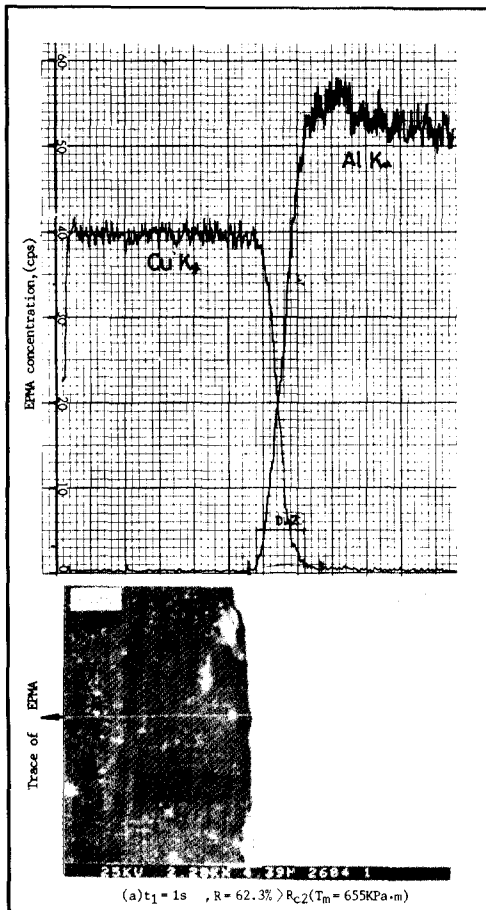


Fig.19 (a) Cu & Al concentration distribution diagram and microstructure through weld interface of friction welded joint (AA1050-Cu102). Welding conditions (in case of 'NO' evaluation): $N=2000rpm$, $t_0=P_0=0$, $P_1=42.14MPa$, $t_2=4s$, $P_2=83.34MPa$

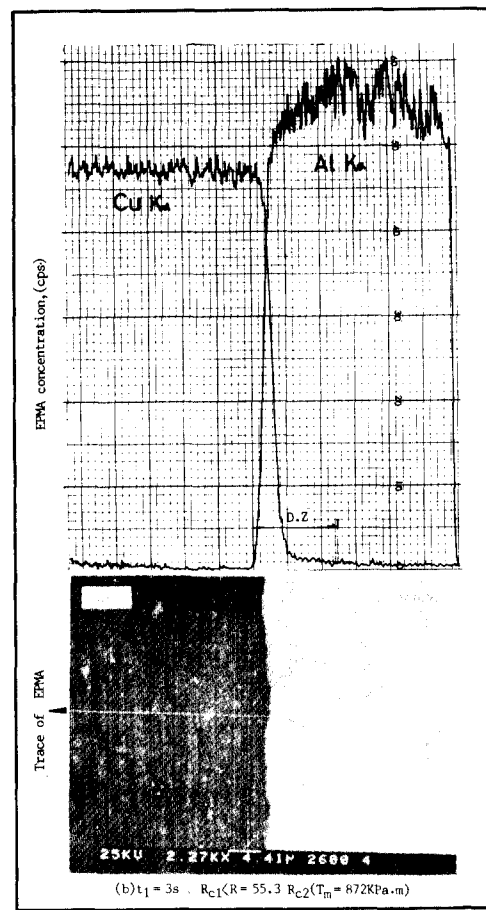


Fig.19 (b) Cu & Al concentration distribution diagram and microstructure through weld interface of friction welded joint (AA1050-Cu102). Welding conditions (in case of 'YES' evaluation): $N=2000rpm$, $t_0=P_0=0$, $P_1=42.14MPa$, $t_2=4s$, $P_2=83.34MPa$.

조직사진이다. 여기서는 용접 결합이 발견되지 않으며 약 12 μ m의 銅확산층이 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 銅층에 확산층(DZ)이 관찰되지 않은 이유는 銅의 용점이 알루미늄보다 훨씬 높은 이유도 있지만, 銅원자의 격자상수(lattice parameter)가 알루미늄의 원자보다 11.5%나 적기 때문인 것도 그 이유중의 하나라고 생각된다.

Table 4에서 case (2)는 AA1050-SUS304의 마찰 용접에서 엽셋 압력을 각각 다르게 용접한 3개의 시험편 (a), (b), (c)에 대하여 충격강도 (I_s)를 평가한 결과이다. 시험편(a)는 반사계수(R)가 56.56%으로 시 반사계수의 최적범위상한(R_{e2}) 46.5% 보다도 높기 때문에 불합격(NO) 판정을 받은 것이며 계산에

의한 충격강도(S)가 알루미늄 모재 충격강도의 3% 정도에 불과하다. 그리고 합격판정(YES)을 받은 (b) 시험편의 반사계수는 43.2%로 $R_{e1} \leq R \leq R_{e2}$ 의 조건을 만족하고, 충격 강도의 이용효율은 33.7%로 평가 시스템의 충격강도 입력 기준치 32%를 초과하므로 합격판정을 받은 것이다. 시험편 (c)의 경우는 반사계수 39.8%로 R_{e1} 보다 낮으며 이용효율 31.3%로 기준치에 미달하여 불합격 되었다. 이들 시험편의 EPMA 분석의 한 예가 Fig. 20이다.

Fig. 20은 엽셋 압력이 적정 압력보다 높은 불합격 경우로서 확산층이 약 4 μ m 정도로 더욱 좁은 폭이다. 이러한 현상은 엽셋 가압력이 높을 수록 마찰면에 생성된 합금층과 함께 확산층이 플래쉬(flash)로 밀려나기 때문이라 생각한다.

한편 case (1)의 AA1050-Cu102 용접재와 비교하면 조음과 반사계수가 확산층 두께에 의존하기 보다는 마찰열과 가압력에 의한 알루미늄층 결(texture)의 변화에 더욱 큰 영향을 받는다고 생각된다.

5. 결 론

AA1050, Cu102, SUS304, SM20C 및 Brass 등의 용접재료들에 대하여 조음과 펄스파를 이용한 이종재 마찰 용접 품질의 비파괴적 평가에 관한 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) AA050-Cu102, AA1050-SUS304, AA1050-SM 20C 및 AA1050-Brass의 마찰 용접 시험재에서는 용접면에서의 조음과 반사파 측정이 가능하고 반사계수의 산출이 가능하다.
- 2) 철 금속간의 이종재 마찰 용접에 있어서는 용접면에서의 조음과 반사가 극히 미소하여 반사계수 산출이 곤란하므로 이에 적절한 탐촉자의 개발이 필요하다.
- 3) 마찰 용접조건의 변화에 따라 이음면에서의 조음과 반사계수 변화의 주된 원인은 알루미늄층 방사성 결(texture)의 방향성(orientation) 변화 때문임이 확인되었다.
- 4) AA1050-Cu102의 마찰 용접재에서는 용접조건이 마찰 가열시간과 용접부에서의 조음과 반사계수가 상관관계를 가지며, AA1050-SUS304의 마찰 용접재에서는 엽셋 가압력과 조음과 반사계수가 상관관계를 가진다.
- 5) AA1050-Cu102와 AA1050-SUS304의 마찰 용접재에 있어서는 조음과 반사계수와 용접 이음부

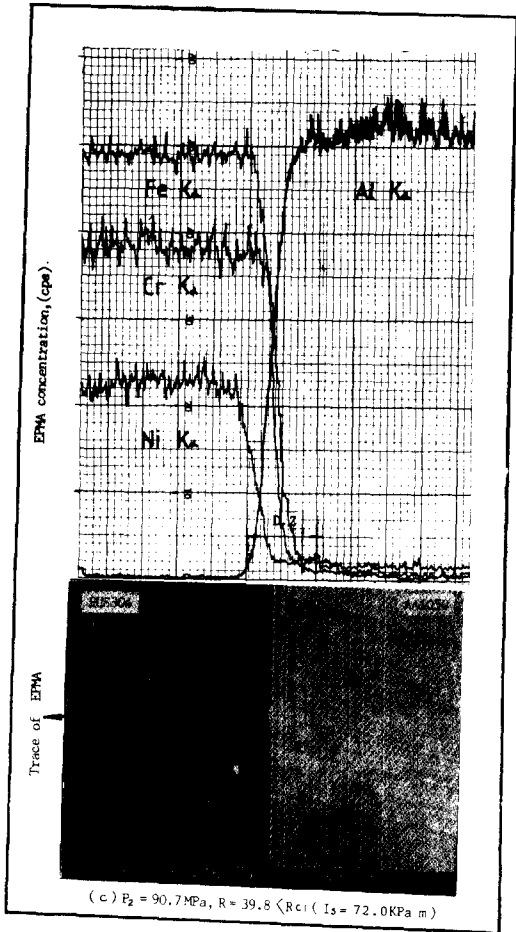


Fig. 20 Fe, Ni, Cr, & Al concentration distribution diagram and micro-structure through weld interface of friction welded joint (in case of 'NO' evaluation): $N = 2000\text{rpm}$, $t_0 = 1.5\text{s}$, $P_0 = 18.13\text{MPa}$, $t_1 = 2.5\text{s}$, $P_1 = 36.33\text{MPa}$, $t_2 = 3\text{s}$

의 기계적 특성과의 상관성 도출 및 정량적 해석이 가능하다.

- 6) 초음파 반사계수와 마찰 용접 이음강도 사이에도 상관관계가 있음이 밝혀졌으므로 초음파 탐촉자의 개발과 적절한 선택에 의하여 초음파 결스를 이용한 마찰 용접 품질의 비파괴적 평가가 가능하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 1986년도 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

參 考 文 獻

- 1) 摩擦壓接協會, “摩擦壓接協會 20年誌”. 摩擦壓接協會編, 東京, 1984
- 2) Oh, S.K. “Characteristics and Application of Inertia Welding”, J.KOSME, 3(1), 57-63, 1979.
- 3) Oh, S.K, “Consideration on Friction Welding”, J. KSME, 20(6), 434-441, 1980
- 4) Wang, K.K., S.K. Oh and G.R. Reif, “In-process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission Techniques”, Proc. of the 63rd AWS Convention Tech. Session 5, in Kansas City, USA (April, 1982), Welding Journal of AWS, 61(9), 312-316, 1982
- 5) Oh, S.K, A. Hasui, T. Kunio and K.K. Wang, “Effects of Initial Energy on Acoustic Emission Relating to Weld Strength in Friction Welding”, Proc. of 4th, Sym. JWS, in Osaka, 713-718, 1982 Trans. of JWS, 13(2), 15-26, 1982.
- 6) Oh, S.K, “Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission techniques”, Ph.D. Thesis, Keio University, Japan, 147-314, 1982
- 7) Oh, S.K. and K.K. Wang, “Effect of Welding Parameters on Weld Strength and Acoustic Emission in Friction Welding”, J. of Korean Soc. of Marine engineers. 7(1), 23-33, 1983
- 8) Oh, S.K, “Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission”, Transactions of KSME, 7(2), 226-232, 1983
- 9) 吳世奎, 金東祚, 鄭洛紀, “異種鋼管 摩擦熔接의 塑性變形중 發生된 初期 AE量이 熔接品質制御에 미치는 影響에 관한 研究”, 大韓熔接學會誌, 1(2), 69-75, 1983
- 10) 吳世奎, “어쿠우스틱 에미션법에 의한 摩擦熔接強度解析(I)”, 大韓機械學會誌, 22(3), 184-190, 1982
- 11) 오세규, 임우조, 김형자, “마찰용접기계의 자동생산 품질 제어 실시간 평가”, 大韓機械學會論文集, 9(6), 757-766, 1985
- 12) Adams, D.F and S.K. Taylor, “Detection of Faults in Friction Welded Studs by Ultrasonics”, Welding and Metal Fabrication, 412-421, 1969
- 13) Wang, K.K. and S. Ahmed, “Ultrasonic Detection of Weld Strength for Dissimilar Metal Friction Welds”, Fourth North American Metal Working Research Conference Proceedings, 384-389, 1976
- 14) Roderick, R.L. and Rohn Truell, “The Measurement of Ultrasonic Attenuation in Solids by the Pulse Technique and Some Results in Steel”, Journal of Applied Physics. 23(2), 267-279, 1952
- 15) Papadakis, E. P., “Traveling Wave Reflection Methods for Measuring Ultrasonic Attenuation and Velocity in Thin Rods and Wires”, Journal of Applied Physics, 42(7), 2990-2995, 1971
- 16) Papadakis, E. P., K.A. Fowler and L.C. Lyn-nworth, “Ultrasonic Attenuation by Spectrum Analysis of Pulses in Buffer Rods; Method and Diffraction Correction”, The Journal of the Acoustical Society of America, 53 (5), 1336-1343, 1973
- 17) Krautkramer, J. and H. Krautkramer, “Ultrasonic Testing of Materials”, 2nd ed., New York, p.23-26, 1977
- 18) 摩擦壓接研究會, “摩擦壓接”, コロナ社, 東京, 1979
- 19) Fukushima, S., “Study on Selection of Welding Conditions in Continuous Drive Friction Welding Process,” National Research Institute for Metals, 18(4), 139-151, 1976