

研究論文

大韓熔接學會誌
第4卷, 第2號, 1986年 9月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 4 No. 2, Sept., 1986

超音波에 의한 異種材 摩擦熔接 强度解析 可能性에 관한 研究

吳世奎* · 金東祚**

A Feasibility Study on Dissimilar Metals Friction Weld Strength Analysis by Ultrasonic Techniques

S. K. Oh, D. J. Kim

Key words : Friction weld(마찰용접), Pulse-echo method(펄스波法), Reflection coefficient(반사 계수), Acoustic impedance(어코스틱 임피던스), Acoustic emission(어코스틱 에미션), Analysis of variance(分散分析)

Abstract

Friction Welds are formed by the mechanisms of diffusion as well as mechanical inter-locking. The severe plastic flow at the interface by the forge action of the process brings the subsurface so close together that detection of any unbonded area becomes very difficult. No reliable method is available so far to determine the weld quality nondestructively.

This paper presents an attempt to determine weld strength quantitatively using the ultrasonic pulse-echo method. The new approach calculates the coefficient of reflection based on measured amplitudes of the echoes. This coefficient provides a single quantitative measurement which involves both acoustic energy reflected at the welded interface as well as transmitted across the interface.

As a result, it was known that the quantitative relationship between the coefficient and the weld strength (torsional strength) could be drawn.

1. 서 론

超音波法은 주로 鑄造物, 鍛造物, 融接(fusion welding)部 등의 缺陷을 非破壞的으로 탐지하는데 광범위하게 응용되어 왔으며 특히 融接과정에서 흔히 발생하기 쉬운 표면균열이나 氣孔의 신속한 검출에 유용하게 쓰여왔다. 그러나 摩擦熔接에 의한 接合이나 다른 固狀接合物에 대해서는 非破壞的으로 그 接

합성을 조사하는 것이 비교적 어려운 일이다. 摩擦熔接部의 接합기구는 확산과 기계적 상호 결합이 각각 부분적으로 일어난 것이라고 한다.¹⁾ 확산되지 않고 치밀하게 밀착 接합된 마찰용접면은 超音波로 탐지할 수 있을 정도의 불연속성 결함을 갖지 않기 때문에, 용접에서의 대표적 비파괴검사법인 초음파탐상법은 마찰용접부의 검사에는 부적당하다.²⁾

Adams와 Taylor³⁾는 최초로 펄스波(pulse-echo me-

*釜山水產大學

**釜山開方大學

thod)를 利用하여 超音波에 의한 摩擦용접부 檢査法을 報告하였는데, 摩擦용접물의 軸方向으로 縱波를 보냄으로써 接合面 근처에서의 内部결함을 檢査하고저 한 것이었다. 그러나 그 結果는 이음면으로 부터의 反射波가 側面으로 부터의 散亂(scattering) 때문에 혼동되는 結점이 있었다. 또한 周波數가 12MHz인 超축소형 探觸子(transducer)를 사용하므로써 보다 좋은 感도와 反復性を 얻을 수 있었지만 CRT 스크린상에 나타난 反射波의 위치와 크기에 기초를 두고 豫定하여 해석한 結果는 定性的이었고, 이는 기대할만한 結果로 볼 수 없었다. 또한 최근에는 非破壞檢査法의 일종인 AE(acoustic emission)法에 의한 摩擦용접 強度해석^{4)~7)}도 연구된 발표가 있다. 그러나 아직 실용화 단계는 아니다.

本 研究는 摩擦용접 이음強度를 非破壞的으로 豫知할 수 있는 시스템 개발을 최종 목적으로하여, 초음파를 이용한 摩擦용접 이음면의 균열이나 기타 결함을 찾는 대신 異種材料의 摩擦용접斷面에서 반사 또는 통과되는 超音波에 대해 定量的으로 測定하여 반사계수를 계산하였고, 이 반사계수에 의한 용접강도해석의 가능성에 관해 조사한 실험적 연구이다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치 및 재료

실험에 이용된 機械와 計器는 Toho Control Co, LTD의 自動摩擦熔接機(THFU-25HW), Tokyo Keiki의 초음파탐상기(SM90), Kawa-Tetsu의 비틀림시험기(KTM-50) 등 이다. 용접에 사용한 異種材料는 Cu棒과 Al棒이며 材料의 成分은 Table 1과 같다.

2.2. 실험방법

摩擦용접을 하기 위하여 Cu棒과 Al棒을 Fig. 1(a)에서와 같이 선반가공 하였다. 이 試驗片을 摩擦熔接機에서, 회전수 2000rpm, 摩擦가열압력 $P_1 = 4.3 \text{ kg/mm}^2$, 업셋(upset)압력 $P_2 = 8.5 \text{ kg/mm}^2$, 업셋시간

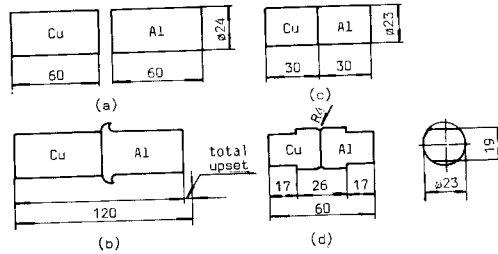


Fig. 1. (a) Welding workpieces (c) Ultrasonic test specimen (b) Welded workpiece (d) Torsion test specimen

$t_2 = 4 \text{ sec}$ 로 일정하게 하고 摩擦가열시간 t_1 을 1sec에서 6.5sec까지 0.5sec간격으로 변화시켜가면서 熔接하였고, 이때 예열압력 P_3 과 예열시간 t_3 은 0으로 하였으며, 용접후 총업셋량을 測定하였다(Fig. 1(b)). 그리고 초음파측정의 精밀성을 유지하기 위하여 熔接材에 대해 초음파탐상기로 반사계수(R)를 측정하기 위한 형상으로 선삭가공 하였는데 Cu側과 Al側의 길이를 각각 30mm, 지름 23mm로 하였다(Fig. 1(c)). 이때 兩側端面은 軸方向에 정확히 수직이 되도록 하였고 端面의 粗度는 均일하게 가공하였다.

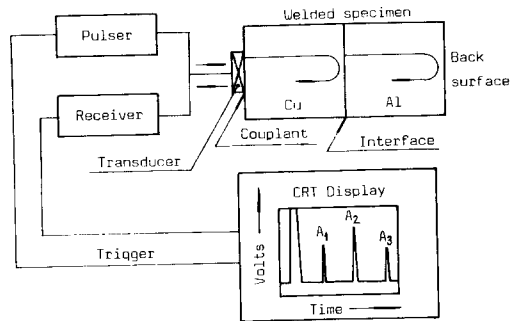


Fig. 2. Schematic representation of ultrasonic pulse-echo system

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of base metal.

Materials (bar)	Chemical compositions (Wt %)						Tm* kg·m
	Zn	Fe	Pb	Si	Sn	Mn	
AA 1050	3.20	0.40	0.30	0.40	0.50	0.40	30.5
Cu 102	0.20	0.20	0.01	—	—	—	41.3

* Tm: Maximum torsional moment of specimen with 1.5mm R notch on $\phi 23 \text{ mm}$ bar.

초음파 측정은 Fig. 2에서와 같이 Cu側の 端面에 탐촉자를 부착하여, 증압고정구를 이용하여 일정압력을 수직으로 가하고 반사파를 초음파탐상기의 CRT스크린상에서 읽도록 하였다. 이때 접착油(couplant)로서 油壓油(Shell Tellus #32)를 사용하였고 探觸子(Tokyo Keiki Co., 5Z10N-F)는 주파수가 5 MHz이고 지름은 10mm이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 일관성 있는 선형성을 갖게 하기 위하여 A_1 반사파의 진폭은 스크린상에서 55% 근처의 값이 되도록 게인(gain)을 조절하였다.

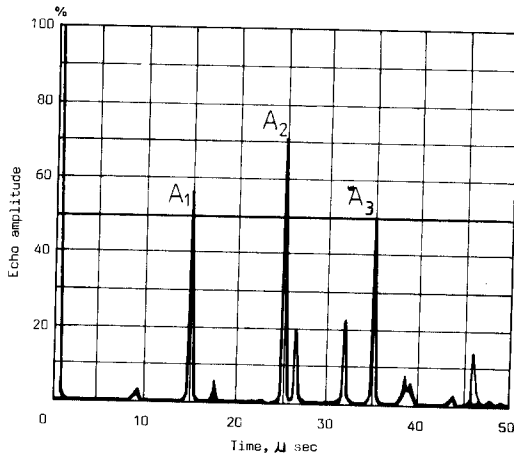


Fig. 3. Scope display of echoes obtained from a welded specimen

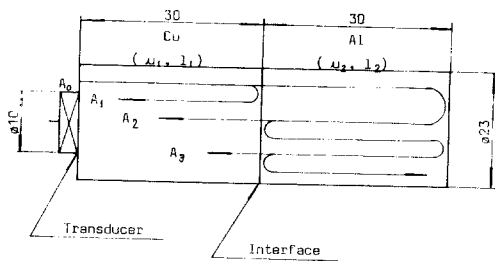


Fig. 4. Wave reflections and transmission across a plane interface

반사계수 (R)를 산출하는 이론적인 근거는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 Cu側 端面에서 A_0 펄스가 가 入射되었을 때, 溶接面(Welded interface)에서 되돌아오는 반사파의 진폭을 A_1 , 용접면을 통과하여 Al側의 端面에서 되돌아와 용접면을 통과한 반사파의 진폭을 A_2 , Al側 端面에서 되돌아오던 반사파가 용접단면에서 되돌아갔다가 다시 반사되어 용접면을 통과하는 波의 진폭을 A_3 라하면 A_1, A_2, A_3 는 다음과

같이 나타낼 수 있고 이들로 부터 반사계수 R 의 값을 산출할 수 있다.²⁾ 즉,

$$A_1 = A_0 R e^{-2\mu_1 l_1} \quad (1)$$

$$A_2 = A_0 (1 - R^2) e^{-2\mu_1 l_1} \cdot e^{-2\mu_2 l_2} \quad (2)$$

$$A_3 = -A_0 R (1 - R^2) e^{-2\mu_1 l_1} \cdot e^{-4\mu_2 l_2} \quad (3)$$

式(1), (2), (3)으로부터

$$R = \left(\frac{A_1 A_3}{A_1 A_3 - A_2^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서 μ_1, μ_2 는 재료의 초음파 감쇠율이며, l_1, l_2 는 재료의 길이이다.

반사파의 측정이 끝난 시험편은 용접이음강도를 알아보기 위해 다시 기계가공하여 비틀림시험을 하였다. 비틀림파괴시험편의 형상과 치수는 Fig. 1(d)와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰용접부에서의 초음파와 반사계수

초음파반사계수 R 은 어떤 물질에 入射된 波가 접촉하고 있는 다른 물질에 부딪혔을 때, 반사되어오는 波에서 측정된 音壓 P_r 의 入射波 자체가 가진 音壓 P_e 에 대한 비($R = P_r/P_e$)를 말한다.

매질의 감쇠계수 μ 와 입사파의 음압 P_e , 및 波가 통과하는 거리 l 을 알고 반사파의 音壓 P_r 을 측정하면, 다음 式⁸⁾ (5)에서 반사계수를 구할 수 있다.

$$P_r = P_e \cdot R \cdot e^{-\mu l} \quad (5)$$

그러나 式(5)에 의한 경우는 일반적으로 감쇠계수를 정확히 알 수 없으며 입사파의 크기도 계기에서 직접 읽을 수 있는 量이 아니므로, 작은 변화를 구별할 수 있는 반사계수의 정확한 측정은 매우 어렵다.

또한, 두 매질의 초음파 임피던스(impedance)를 Z_1, Z_2 라 하면 어떤 물질의 다른 물질에 대한 반사계수는 다음 式(6)에서도 구할 수 있다.⁸⁾

$$R = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2) \quad (6)$$

그러나 式(6)에 의한 경우도 동일재료에서 강도 또는 조직변화에 따른 초음파 임피던스를 측정하는 것은 실용성이 없으므로 R 값의 변화를 비교하는 데는 역시 有用하지 못함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

따라서, 本 研究에서는 앞서 설명한 A_1, A_2, A_3 세개의 반사파를 측정하므로써 式(4)에 의해 반사계수를 계산할 수 있었고 각 試驗片의 반사계수를 상대적으로 비교할 수 있었다.

3.2. 熔接條件과 反射係數

Fig.5는 마찰가열시간(t_1 , sec)의 증가에 따라 총업셋량(u , mm)이 비례적으로 증가하고 반사계수의 측정치가 선형적으로 감소하는 현상을 보여준다. 반사계수의 변화원인은 마찰열과 가압력에 의한 이음면 근처에서의 조직변화 때문인 것으로 생각되며, 조직변화지역의 크기에 따라 매질을 통과하는 음파

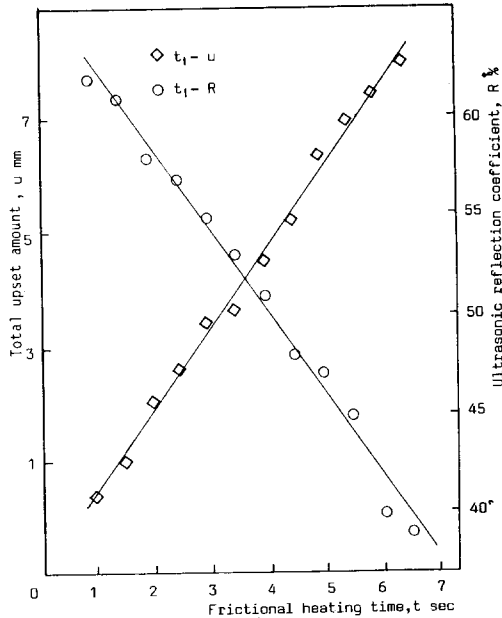


Fig.5. Effect of frictional heating time on total upset amount and ultrasonic reflection coefficient

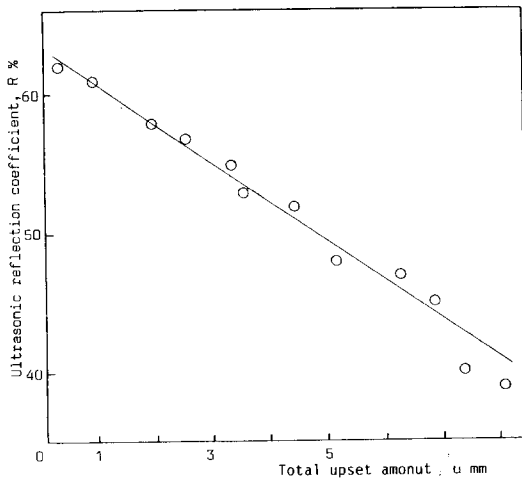


Fig.6. Relationship between ultrasonic reflection coefficient and total upset amount

의 감쇠정도가 달라질 것이고, 결과적으로 반사계수의 값이 변하게 될 것이다. 마찰가열시간 t_1 이 증가하면, 즉 총업셋량 u 가 증가하면 열영향부도 크게 되어 반사계수 R 의 값이 감소하는 현상을 보인다.

Fig.6은 반사계수와 총업셋량과의 선형적 상관성을 보여주며 그 실험식을 電算한 결과는 다음 식(7)과 같으며 分散分析 결과 신뢰도 95%수준에서 매우有意함을 알 수 있었다.

$$R = 0.632 - 0.028u \text{ (상관계수, } r = 0.98) \quad (7)$$

3.3. 초음파반사계수와 용접강도

용접이음강도가 총업셋량에 어떤 상관을 가지고 변화한다는 것은 이미 알려진 사실이다. 즉, 連井, 福島의 S25C熱間壓延鋼材에 대한 업셋량과 引張強度와의 상관성에 관한 연구보고¹⁰⁾에 의하면 업셋량의 증가에 따라 인장강도가 급격히 증가하다가 최고값에 달한 다음 약간 감소하는 경향으로 나타났다. 그런데 Fig.6에서 업셋량이 반사계수와 선형적으로 높은 상관성을 가진다는 사실이 밝혀졌으므로, 앞서의 報告¹⁰⁾와 비교해보면, 용접이음강도와 반사계수 사이에 어떤 상호관계가 있을 것으로 예측할 수 있다.

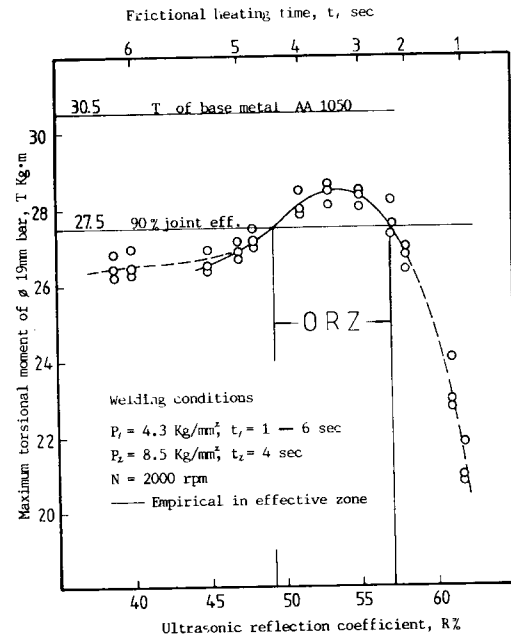


Fig.7. Relationship between ultrasonic reflection coefficient and strength of welded joint

Fig.7은 반사계수와 최대비틀림모멘트의 관계를 나타낸 시험 결과이다. 본 실험에서 용접이음강도를 인장시험에 의하지 않고 비틀림시험으로 한 것은 超

Table 2. Analysis of variance for lack of fit test

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F-ratio
Residual	1.562	20		
Pure error	1.033	16	0.06456	2.05
Lack of fit	0.529	4	0.13225	
Remarks	Frcm F-table: $F(4, 16; 0.95) = 3.29 > 2.05$ (95% confidence)			

音波측정을 실시한 시험편으로 직접 파단시험을 하려할 때 인장시험편을 제작하기에는 시험편길이가 짧았고 마찰용접부의 비틀림강도 특성의 조사도 필요하였기 때문이다.¹⁰⁾ 초음파測定 시험편의 全長을 60 mm 정도로 하게된 것은 시험편 兩側端面的 平行度 오차가 작더라도 길이가 길수록 반사波는 불안정하여 측정의 反覆性이 떨어지기 때문에 예비실험을 통해 대체로 측정의 안정성을 기대할 수 있는 시험편 길이로써 60mm를 택한 것이다.

Fig. 7에서 보는바와 같이 강도는 반사계수의 증가(마찰가열시간 t_1 의 감소 즉 용접입열량의 감소)와 더불어 점차 증가하다가 peak에 달한 다음 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 양호한 용접이음을 얻을 수 있는 반사계수의 최적범위(ORZ)를 구하기 위하여 peak부근에 해당되는, 반사계수 R 의 값이 45~58% 범위에서 강도 T -반사계수 R 의 분포에 적합되는 회귀곡선을 電算에 의해 구한 결과는 식(8)과 같으며, Table 2는 回歸曲線의 適合缺如檢定을 위한 分散分析表로서 그 결과는 信賴水準 95%에서 適合이 有意함을 알 수 있었다.

$$T = 64.311 - 38.143R + 7.8081 \times 10^{-1}R^2 - 5.02835 \times 10^{-3}R^3 \quad (45\% \leq R \leq 58\%) \quad (8)$$

그리고 비틀림 파단이 Al측 HAZ部이므로 이음효율 90%이상의 강도($T \geq 27.5 \text{ kg} \cdot \text{m}$)를 용접성이 양호한 반사계수의 최적범위로 고려하면 그 범위는 $R = 49 \sim 57\%$ 로 나타남을 알 수 있었다.

4. 결 론

異種材料 Cu系과 Al系の 마찰용접에서 超音波에 의한 용접이음강도해석 가능성에 대하여 연구한 결과는 다음과 같다.

(1) 超音波探傷器를 이용하여 摩擦熔接 이음면에서의 超音波反射係數를 測定 算出할 수 있다.

(2) 마찰용접시간의 증가에 따라 총열생량은 비례적으로 증가하지만 초음파반사계수는 선형적으로 감

소하는 경향을 보인다.

(3) 반사계수값의 감소에 따라 용접강도(최대 비틀림 모우멘트)는 급격히 증가하다가 서서히 감소하는 경향을 나타낸다.

(4) 超音波反射係數의 測定에 의하여 非破壞的으로 熔接性을 判定할 수 있는 반사계수의 最適範圍를 推定할 수 있고 摩擦熔接 強度解析이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. K.K. Wang, *Friction Welding*, Welding Research Council Bulletin, No.204, April(1975), pp.1-21.
2. K.K. Wang and S. Ahmed, *Ultrasonic Detection of Weld Strength for Dissimilar-Metal Friction Welds*, Fourth North American Metal Working Research Conference, (1976), pp.384-389.
3. D.F. Adams and S.K. Taylor, *Detection of Faults in Friction Welded Study by Ultrasonics*, Welding and Metal Fabrication, Oct. (1969), pp.412-421.
4. K.K. Wang, S.K. Oh and G.R. Reif, *In-Process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission Techniques*, Welding Journal of AWS, Vol.61, No.9, (1982), pp.312-316.
5. S.K. Oh, et al., *Effects of Initial Energy on Acoustic Emission Relating to Weld Strength in Friction Welding*, Trans., Japan Welding Society, Vol.13, No.2, pp.15-26.
6. S.K. Oh, *Quantitative Analysis of Friction Weld Strength by Acoustic Emission*, Trans., Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.7, No.2., (1983), pp.226-232.
7. 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 영향에 관한 研究, 大韓熔接學會誌, Vol. 1, No. 2, (1982), pp.15-26.
8. J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Second Edition. New York, (1977), pp.23-26.
9. C. A. Hogrth and J. Blits, *Techniques of Non-Destructive Testing*, London, Butter Worths, (1960).
10. 日本, 摩擦壓接研究會編, 摩擦壓接, 코로나社, (1979), pp.57-58.

(원) (고) (모) (집)

당 학회지는 여러분의 정성으로 이루어집니다. 알찬 학회지로 성장할 수 있도록 귀중한 체험과 연구를 담아 보내주시기 바랍니다. 원고 작성은 본 학회지 끝에 있는 대한용접학회지 집필요강을 준수하여 주십시오.

채택된 원고는 당 학회지에 게재되며 저자에게는 별책본 20부를 증정합니다.

- 모집 분야 : 연구논문, 기술보고, 강좌, 해설 및 전망
- 원 고 : 수시 접수
- 보내실 곳 : 300-32 충남 대덕 연구단지 사서함 6호
대한용접학회
전화 (042) 822-7401 (교) 228, 256