

박판 저항 용접부의 초음파 영상진단에 관한 연구

홍민성*, 김종민⁺, 김노유⁺⁺

(논문접수일 2005. 6. 2, 심사완료일 2005. 7. 20)

A Study on the Ultrasonic Diagnosis of Spot Welding in Thin Plates

Minsung Hong*, Jongmin Kim⁺, Nohyu Kim⁺⁺

Abstract

Spot welding widely used in automotive and aerospace industries has made it possible to produce more precise and smaller electric part by robotization and systemization of welding process. The quality of welding depends upon the size of nugget between the overlapped steel plates. Recently, the thickness of the steel plates becomes much thinner and hence, it introduces the smaller size of nugget. Therefore, it is necessary to develop the criterion to evaluate the quality of weld in order to obtain the optimal welding conditions for the better performance. In this paper, a thin steel plates, 0.1mm through 0.3mm thickness, have been spot-welded at different welding conditions and the nugget sizes are examined by defocused scanning microscopy. The relationships between nugget sizes and weldability have been investigated experimentally. The result of ultrasonic technique shows the good agreement with that of the tensile test.

Key Words : Spot welding(저항용접), Nugget(너겟), Defocused scanning microscopy(비초점 초음파 현미경 검사), Corona bond(코로나 본드), Ultrasonic technique(초음파 기술)

1. 서론

저항 용접은 자동차, 항공기, 가전 전기용품의 공업 분야에서 작업성이 높은 관계로 많이 사용되고 있다. 또한 최근에는 공정의 로봇화, 시스템화 과정에서 정밀 부품이나 전자제품의 정밀화, 미세화로 인하여 박판을 대상으로 하는 것이

많으며, 그 접합부도 전극 가압력과 용접열에 의한 변형, 손상이나 품질 기능의 약화를 이유로 용접조건이 제한되어 용접 부위나 형상은 더욱 작아지는 경향이 있다. 그러나 이에 반해 제품의 수명이나 신뢰성에 대한 요구는 지속적으로 증대되어 국내에서도 2002년 하반기부터는 제조자 책임법(Product Liability)이 발효되어 제품의 구조강도나 수명에

* 아주대학교 기계공학부 (mshong@ajou.ac.kr)
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지
+ 아주대학교 기계공학과
++ 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

절대적 영향을 미치는 용접부의 품질과 신뢰도 확보에 대한 산업체의 기술개발이 현안으로 대두되고 있다. 이러한 용접부의 품질을 평가하는 방법으로써 너겟의 직경을 측정하는데 복잡하고 시간이 많이 걸리는 파괴 시험방법을 사용하였다. 저항용접 시 접합부위의 용접품질을 확인하기 위하여 현재는 인장-전단시험, 박리 시험 등의 파괴시험을 통하여 일반적으로 이루어졌다. 그러나 저항용접시 압접 부위에의 너겟(nugget)의 크기를 측정하는 방법이 가장 정확하다고 알려져 있다. 그러나 이 경우 제품의 정밀화와 미세화에 의하여 육안으로 정확히 확인 할 수 없을 정도로 너겟의 크기가 작아지고 있어 박판 내부의 너겟 직경은 외부에서 육안으로 직접 측정할 수 없기 때문에, 더욱 더 작아진 너겟의 형상을 측정하기 위해서는 비파괴 검사방법이 필요하다^(1,2). 특히 미세저항용접은 미소부품의 접합을 목적으로 하고 있고 접합부를 시각으로 판단하기 어렵고, 정확한 접합이 이루어진 것에 대한 정량적 평가가 어렵기 때문에 비파괴 검사가 필수적이다. 이와 같은 비파괴 검사법 중에서도 미세 너겟과 같은 재료 내부의 미세 결합이나 불연속 경계면에 대해 민감도나 현장 적용성이 우수한 초음파 검사 방법이 가장 적절한 것으로 알려져 있다⁽³⁾.

현재 박판 저항용접(점, 심 용접)이 가장 많이 사용되는 분야는 자동차의 생산라인, 항공기, 가전제품 분야이다. 이제까지의 박판 저항용접은 두께가 대략 0.3mm 이상인 경우가 대부분이나 현재는 그 두께가 0.1mm까지 얇아지고 있는 추세이고 0.3mm 이하의 박판의 용접 및 검사는 아직 KS, JIS에 규정 되어 있지 않으므로 이에 대한 기술개발과 검사 방법을 개발할 필요성이 있다. 이러한 박판의 경우 너겟의 크기가 작아지는 것은 물론 열변형과 압력에 의해 박판이 상대적으로 심한 변형이 발생하여 표면상태가 불량해지는 문제가 있다. 이러한 이유로 박판에 대한 최적의 저항용접 조건을 설계하는 일이 필요하고 이를 위해서는 저항용접 상태를 평가할 수 있는 초음파 평가기술이 필요하다. 현재 사용되고 있는 초음파 방법중 너겟의 사이즈를 정량적으로 평가할 수 있는 초음파 기술은 초음파 현미경을 이용하는 방법이 제일 정확하다. 그러나 표면의 변형상태가 불량하고 박판이어서 100MHz 이상의 고주파 초음파를 사용할 경우 표면 반사파가 위치에 따라 많이 변하고 불량해져서 초음파 영상결과가 그리 만족스럽지 못하다. 표면거칠기가 불량할 경우 표면의 영향이 그대로 결과에 반영될 수 있어 너겟 크기와 함께 코로나 본드를 평가하기에는 부정확한 문제점이 있다.

본 논문에서는 너겟의 크기는 물론 너겟의 주변에 나타나는 코로나 본드(corona bond)를 비교적 정확히 식별할 수

있는 비초점 초음파 현미경 진단 기술을 제안하고 이를 이용하여 여러 가지 박판 저항용접 시편의 용접상태를 초음파 현미경 이미지와 인장시험 결과를 통해 평가하였다.

2. 박판의 저항 용접

저항(스폿) 용접법은 Fig. 1에 나타내는 것처럼 2매 또는 그 이상의 금속판을 겹치고, 이 표면을 수냉 금속 전극으로 가압하고, 상하 전극 간에 수천 ~ 수만 암페어의 대전류를 극히 단시간 흘려보내어 접합하는 방법이다. 통상 동합금제 전극이 채용되고, 판 표면을 강력하게 냉각해 판 사이만을 접합에 필요한 온도로 올리고 있다.

저항 용접은 발열원으로 모재 전체의 발열을 이용해 Fig. 1(a)에 보여진 것과 같은 두꺼운 너겟을 형성시키는 체적 저항 이용방법과 판-판 사이 계면의 접촉 저항을 주로 이용해 그림 Fig. 1(b)에서처럼 얇은 너겟을 형성시키는 접촉저항 이용형으로 나뉜다. 저항 용접법은 12mm 두께 정도의 두꺼운 강판에서도 적용 가능하지만, 보통은 두께가 3.2mm ~ 4.5mm 이하의 비교적 얇은 판이 접합의 대상이 되고 있다. 본 연구에서는 접촉 저항법을 이용하는 0.3mm 이하의 박판을 용접 대상으로 삼았고, 저항 용접기 또한 양질의 용접 품질을 얻을 수 있으며, 정밀한 제어가 가능한 인버터 제어식 용접기와 크롬 도금 용접봉을 사용하였다.

3. 비초점 초음파 현미경 장치

비초점 초음파 현미경은 종래에 사용되던 초음파 현미경과 기본적인 구조는 비슷하나 초점거리가 길고 검사부위에

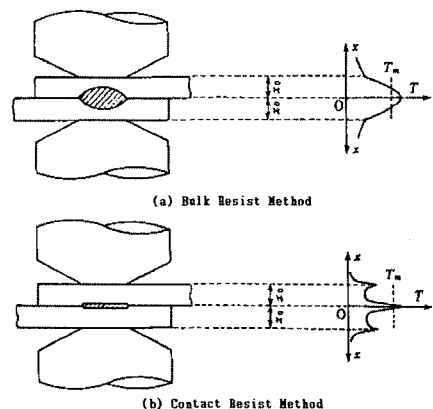


Fig. 1 nugget in spot welding

초음파를 집속(focus)시키지 않는 점이 크게 다르다. 일반적인 초음파 현미경은 고해상도와 고감도를 얻기 위해 재료내부의 특정 위치에 초음파를 음향렌즈를 이용해 집속하기 때문에 작은 부위의 결함이나 재료평가에 사용되고 있다⁽⁴⁾. 그러나 초음파현미경 기술은 검사부위에서의 초음파 반사특성만을 검출하기 때문에 재료의 불연속을 정밀하게 측정할 수는 있으나 이러한 재료의 불연속성이 급격하지 않은 경우에는 그리 효과적이지 못하다. 비초점 초음파 현미경은 검사부위의 초음파 반사특성을 직접 측정하는 대신 초음파가 박판에 경사입사를 할 때 발생하는 박판내부의 다중 모드 변환특성과 간섭을 이용하여 재료를 평가하는 장치이다. 이 기술을 이용하여 재료물성을 평가하는 기술은 본 연구실에서 개발되었으며 스폿 용접부의 너جت 크기와 코로나 본드를 보다 정확히 조사하고자 비초점 초음파 현미경장치를 사용하였다⁽⁵⁾. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 비초점 초음파 현미경 장치를 나타내고 있다.

비초점 현미경은 초점에 위치한 반사체로부터의 반사 신호를 측정하는 것이 아니고 박판 후면에서 반사되는 모드 변환된 종파 혹은 횡파를 이용한다. 이 변환 초음파를 음향렌즈를 통하여 검출함으로써 박판 후면의 경계면 상태 혹은 재료물성을 간접적으로 측정하는데 그 도식적 구조와 초음파 전달경로를 Fig. 3에서 보여주고 있다.

4. 용접 시편

두께가 0.1mm부터 0.3mm인 미세박판에 대한 스폿 용접 작업을 수행하였다. 현재 이러한 크기에 관한 저항용접에 관해서는 정확한 용접조건도 없을 뿐만 아니라 용접 후 용접

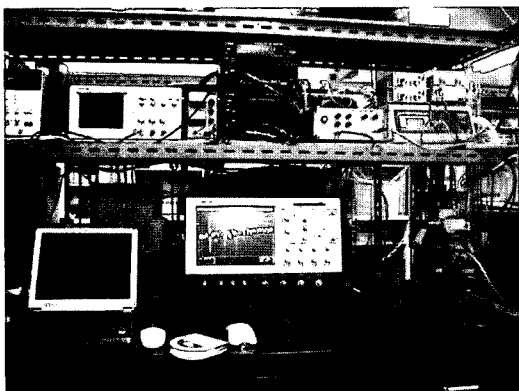


Fig. 2 Defocused ultrasonic microscopy

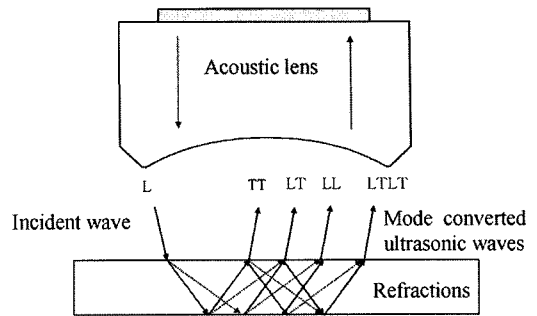
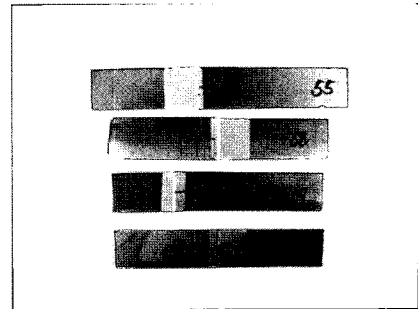


Fig. 3 Defocused ultrasonic paths

평가 방법도 없다.

본 연구에서는 여러 용접조건을 통한 미세박판을 용접하고 이 시편들을 초음파 현미경 그리고 인장 강도 테스트를 통해 용접성 평가를 수행하였다.

이를 위해 사용된 용접 시편의 두께는 각각 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm, 0.25mm, 0.3mm의 5개의 시편이며 박판의 폭은 20mm, 길이는 약 150mm 내외로서 각기 다른 용접 조건을 주어서 용접을 수행하였다. Fig. 4는 제작된 시편의 형상과 스폿 용접 조건을 보여주고 있다.



(a)

Thickness (mm)	Current (KA)	Time (ms)	Max. Load(N)
0.1	1.4	30	278.1
0.15	1.4	30	460.6
0.2	1.5	40	698.2
0.25	1.5	40	810.2
0.3	1.5	50	1044.4

(b)

Fig. 4 Thin plate specimen(a) and welding conditions (b) in spot welding

5. 초음파 현미경 실험 및 인장 시험 결과

일반 초음파 현미경 C-scan영상 측정 결과의 대표적 이미지를 Fig. 5에 나타내었다. 이미지의 전체 크기는 1mm × 1mm이며 세로축과 가로축의 scale은 픽셀당 10μm이다. 대체적으로 용접부위와 비용접부를 판단할 수 있으며 중심부의 짙은 색 부분은 너겟부와 코로나부를 나타내며 외부의 옅은 색은 비용접 부위로서 코로나 부를 감싸고 있는 것으로 판단된다. 또한 부분적으로 밝게 나타나는 점 부분들은 표면이 용융과정에서 심하게 변형되어 만들어내는 이상신호로 생각되어진다. 그러나 이 영상으로부터 너겟부의 크기를 정량적으로 판단하는 것은 오차가 많으며 더구나 코로나부를 너겟부와 구분하여 평가하기에는 무리가 따르는 것을 쉽게 알 수 있다. 본 연구에서는 200MHz의 비초점 초음파 현미경을 이용하여 너겟부와 코로나부를 분리하여 영상화하는데 성공하였는데 그 결과를 Fig. 6이 보여주고 있다. 이 결과는 두께 0.15mm의 시험편에 대한 초음파 검사 결과인데 두 박판 경계면에서의 반사파를 이용하지 않고 경계면에서 발생하는 다중 모우드 변환 초음파를 측정할 경우 너겟부는 경계면에서의 다중반사가 없으므로 그렇지 않은 부위(코로나, 비용접부위)와 쉽게 구별된다. 물론 일반 초음파 현미경에서도 그 현상 자체는 비슷하나 경계면에서의 직접적인 반사파를 측정하는 것이 아니므로 스폿용접부의 불규칙한 표면의 영향을 대폭 줄일 수 있어 Contrast가 매우 우수한 이미지를 얻을 수 있다.

또한 같은 이유에서 코로나 본드부위도 명확하게 영상화할 수 있었는데 그 결과는 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 7로부터 쉽게 너겟부의 크기를 정량적으로 측정할 수 있었으며 코로나 본드부의 범위와 크기도 측정하였다.

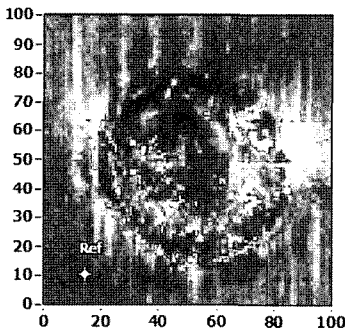


Fig. 5 Defocused ultrasonic image of thin plate specimen (0.15mm)

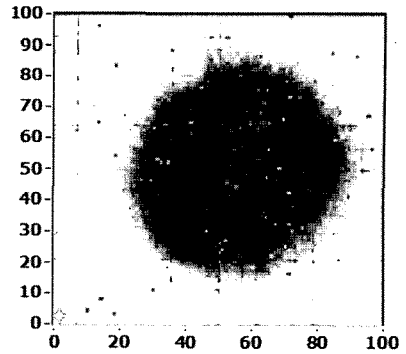


Fig. 6 Ultrasonic image of spot welded area

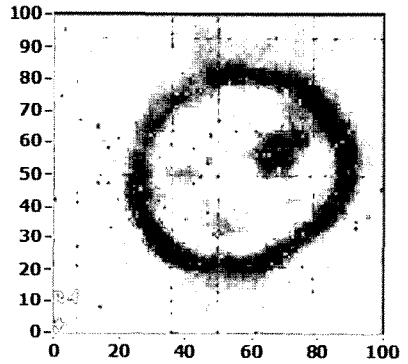


Fig. 7 Images of nugget and corona bond

앞에서의 결과를 검증하기 위해 같은 시험편을 뒤집어서 뒷면에서 같은 실험을 수행하였는데 그 결과가 Fig. 8과 9에 나타나있다. 결과는 앞서 얻은 결과와 같으며 앞뒷면에서의 이미지가 뒤집혀진 mirror 이미지로 나타남을 알 수 있다.

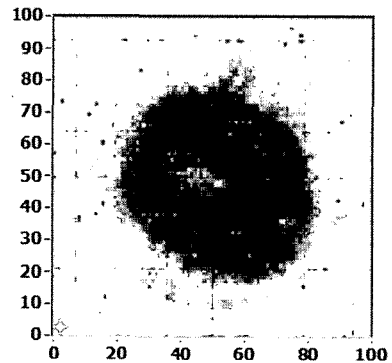


Fig. 8 Ultrasonic image of spot welded area (backside)

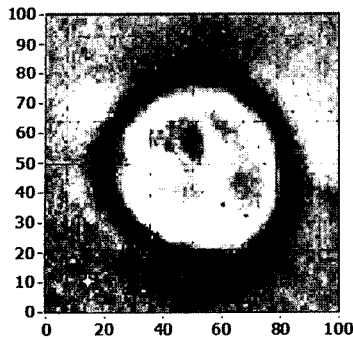


Fig. 9 Images of nugget and corona bond(backside)

Fig. 10은 이미지 생성에 이용된 다중 변환 초음파형을 나타내고 있는데 첫 번째 파형은 접합경계면에서의 첫 번째 반사파이고 그 이후의 연속된 파형들은 이 파형의 박판 내에서 여러 번 모드 변환된 초음파들이다.

Table 1은 다른 두께를 가지는 용접 시편들의 너겟 크기와 코로나 본드 크기를 초음파 현미경의 영상으로부터 측정 한 결과와 함께 나타내고 있다. Table 1의 오른쪽 끝 열에는 인장시험(Fig. 11참조)에서 얻어진 최대 인장 하중과 너겟 크기와와의 상관관계를 나타내었다. 이 표로부터 용접부위의 전체 외경보다는 코로나 본드와 너겟의 지름이 강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 이러한 데이터를 이용하면

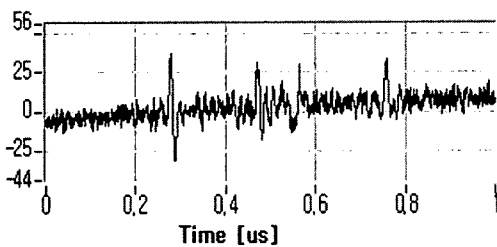


Fig. 10 Multi-modes ultrasonic signals in welded area

Table 1 Nugget size vs. tensile stresses

thick-ness (mm)	nugget dia. (μm)	corona bond I.D.(μm)	corona bond O.D.(μm)	Max. Load(N)
0.1	521	530	547	245.0
0.15	530	552	561	440.8
0.2	613	648	671	657.8
0.25	701	715	733	795.6
0.3	776	795	818	850.3

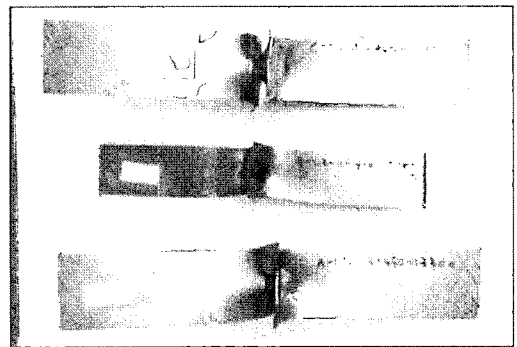
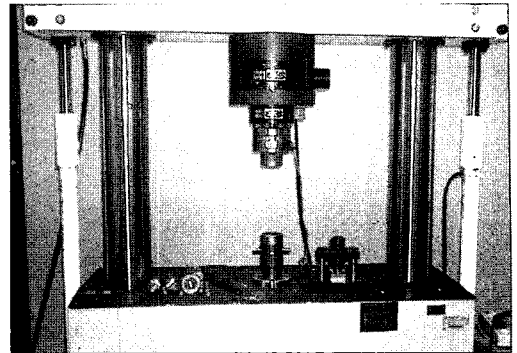


Fig. 11 Tensile tester and specimen

추후에 초음파 측정만으로 어느 정도 강도를 가질 수 있는지 예측이 가능함을 알 수 있다. 이러한 초음파 영상결과를 통해 용접상태를 정량적인 방법으로 평가할 수 있었으며 이에 따라 최적의 용접조건을 결정할 수 있으리라 기대된다.

6. 결론

본 연구에서는 박판에 대한 용접과 용접성의 평가 방법이 없는 환경에서 자동차 산업에서 많이 사용되는 저항용접의 너겟과 코로나 본드부의 크기를 비초점 초음파 현미경 기술을 이용하여 효과적으로 측정하였다.

- (1) 표준 규격의 두께 0.3mm 이하인 SM10C 박판의 용접성 평가를 위해 비초점 초음파 현미경기술을 이용하여 정확하고 대비도가 우수한 C-Scan 영상을 얻어내었다.
- (2) 초음파 현미경 검사를 통한 용접상태 평가 결과와 인장 시험을 통한 용접 품질과 너겟 크기의 상관관계를 정량적으로 제시하였다.
- (3) 0.3mm 이하의 박판의 경우 용접 부위가 매우 작기 때문에 인장 시험 등의 강도 시험을 수행하기 매우 까다로운

데, 얻어진 C-Scan 영상 이미지 결과와 인장시험의 결과의 경향이 일치하는 것으로부터 비초점 현미경 영상 결과가 용접성 평가에 신뢰할만한 방법으로 활용될 수 있음을 보여주었다.

참 고 문 헌

- (1) Murray, E. E., 1968, "Ultrasonics in process control of spot welding quality," *Ultrasonics*, Vol. 6, p. 63~67.
- (2) Arakawa, T., Hirose, S., and Senda, T., 1985, "The detection of weld cracks using ultrasonic testing," *NDT International*, Vol. 18, p. 9~16.
- (3) Graham, G. M., and Ume, I. C., 1997, "Automated system for laser ultrasonic sensing of weld penetration," *Mechatronics*, Vol. 7, p. 711~721.
- (4) Blitz, J., and Simpson, G., 1996, *Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing*, Chapman & Hall, Cambridge.
- (5) Kim, N., and Lee, C., 2004, "Ultrasonic Characterization of Elastic Moduli using Defocused Scanning Acoustic Microscopy," *2004 ASPE conference*, Fukuoka, Japan.
- (6) Hong, M., and Kim, J., 2004, "A Study on the Evaluation of Weldability Using Ultrasonic in Thin Spot Welding," *2004 KSMTE conference*, p. 49~53.