

밀링을 이용한 Al합금의 마찰 교반용접용 최적공구형상 및 치수개발에 관한 연구

장 석 기* 신 상 현**

A Development of Optimizing Tools for Friction Stir Welding with 2mm Thick Aluminum Alloy using a Milling Machine

S-K.Jang* S-H.Shin**

Key words : Friction stir welding(FSW), Milling machine, Heat generating tool, Backing plate.

Abstract

Friction stir welding is a solid phase welding process that does not melt the metal when welding. The FSW is the most remarkable and potentially useful new welding technique that is still in development. Friction stir butt welding process on 2 mm thick Al 1050 plates by utilizing a milling machine was experimentally studied. With the optimized heat generating tool welds could be achieved that are void and crack free. It was found that the friction stir welded tensile test specimens failed in the HAZ outside of the weld metal, and that the tensile strength was above 90% of that of the base metal.

1. 서 론

최근 산업의 급격한 발전과 더불어 우주선, 항공기, 선박, 저온체, 화학공장, 요리를 하기 위한 진공시스템, 자동차용 관련 부품 등의 경량화, 고속화, 고출력화를 도모하는 경향이 있다. 알루미늄 합금은 무게가 가볍고 가공하기 쉽다. 또한, 내부식성, 연성, 비강도(인장강도와 비중의 비)가 크고,

재활용할 수 있는 장점이 있으며, 모든 산업 영역에서는 이러한 특성 때문에 알루미늄 구조물의 사용이 증가해 가는 추세에 있다.

일반적으로, 가스금속 아크용접(GMAW)이나 일반적인 용접법으로 알루미늄을 접합하는 경우에는 용접속도가 느리고 생산성이 낮으며 용접성이 저하하는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 반면에, 최근에 개발된 마찰 교반용접은^{1,2)} 기존의 용접방법으로는

* 목포해양대학교 기관공학부 교수

** 목포해양대학교 기관공학부 조교수

공동이나 균열, 또는 비틀림의 문제로 용접이 매우 어려운 재료에도 쉽게 적용될 수 있는 유용한 용접 기술이다.

마찰 교반용접은 전통적인 마찰 용접에서 연유되었으며, 고체 상태(solid phase)에서 용접이 가능한 잇점이 있고, 또한 조작이 간편하다. 이 기법은 토마스에 의해 발명되었고³⁾ 영국의 캠브리지의 TWI^{4,5)}에 의해 발전되었으며, 현재는 미국의 USC 등의 여러 대학에서뿐만 아니라 생산현장에서도 이러한 기술을 적용하기 위해 다방면에 걸쳐 시험적인 연구를 수행하고 있는 것으로 보고되고 있다.^{6,7)}

알루미늄 합금의 용접에 있어서 이러한 우수한 기법에 대한 산업체의 관심을 이끌어 내기 위하여, 실제적인 마찰 교반용접법(Friction Stir Welding)에 관한 원리의 설명과 마찰열 발생공구의 형상과 치수에 따른 용접상태의 겉보기와 인장시험 결과들을 비교함으로써 이 실험법의 실제 산업체의 적용 가능성에 대하여 검토하였다. 즉, 이 논문은 용접하기가 까다로운 알루미늄 합금의 얇은 판재에 대해 마찰 교반용접의 수행 가능성과 마찰열 발생공구를 개발하고 평가하는데 일차적인 목적이 있다.

2. 사용재료와 실험방법

2.1 용접법의 원리, 사용재료 및 장치의 구성

마찰 교반용접법에 대한 개념도를 Fig.1에 나타내고 용접법의 원리에 대하여 설명하면 다음과 같다. 우선, 마찰 교반용접을 수행하기 위하여 맞대기(butt) 혹은 겹침(lap) 이음개소를 받침판(backing plate) 위에 놓는다.

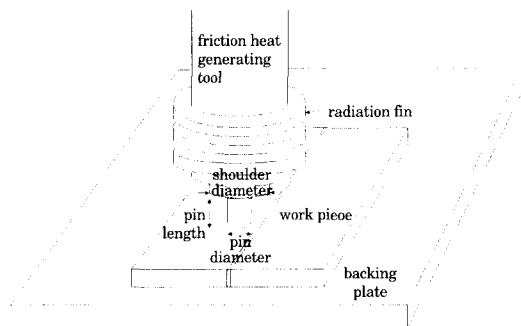


Fig. 1 Schematic of FSW process.

접합될 면이 용접중에 힘을 받아 분리되지 않도록 단단히 고정한다. 특별한 형상의 돌출 핀을 갖춘 원통-계단형 마찰열 발생공구가 회전하면서 천천히 이음(용접)선상으로 나아가게 한다. 회전 핀이 작업 대상 면(work surface)에 접촉하자마자, 접촉된 재료에 대단히 큰 마찰열을 발생하게 한다. 따라서, 자연스럽게 재료의 기계적인 강도는 낮아지게 되며 적용된 하중 하에서 공구 핀의 경로 위에 있는 재료를 단조하고(forge) 밀어내게(extrude)된다. 용접재 작용면(work surface)과 공구의 어깨(shoulder)가 거의 밀접한 접촉상태에서 이러한 현상이 계속된다. 이 접합에서, 마찰열 발생공구의 어깨(shoulder)와 핀에 의해 발생한 마찰열은 공구 어깨 바로 아래와 핀 근방에 큰 소성층(plasticized layer)을 만들게 된다. 작업대가 핀에 대해 상대적으로 움직여질 때, 소성화된 재료는 핀 측면의 선행 면(leading face)에 의해 분쇄되고 핀 측면과 핀의 회전 방향으로 가해진 기계적인 마찰 교반과 단조작용으로 추적면(trailing face)으로 운반된다. 결론적으로, 마찰용접공구가 용접선을 따라 진행됨으로서, 부드러운 소성상태(soft plastic state)로 공구 바로 앞에 있는 인접한 접합면을 마찰 가열하게 된다. 공구는 계속적으로 산화막(oxide film)을 깨뜨리면서 접합선을 분쇄하고, 그리고 교반하여 공구의 추적쪽(trailing side)에 있는 분쇄되었던 재료를 재결합시킨다. 공구 추적면에서 재료는 냉각되어 고상 용접(solid-phase weld)을 형성한다. 이 모든 것이 합금의 용접보다 훨씬 낮은 온도에서 일어나는 고상 접합(solid-phase joint)인 것이다.

본 실험에 사용된 재료는 1050 알루미늄의 두께가 2mm 인 박판을 사용하였으며, 화학성분은 Table 1과 같다.

실험장치의 구성은 Fig. 2에 나타낸다. 본 장비의 이송속도를 35mm/min으로 선정하고 회전속도는 최대의 마찰열을 발생시키기 위하여 고속회전 2,240 rpm으로 하였다. 용접을 위한 두 판재의

Table 1. Chemical composition of Al 1050

| Chemical composition (wt%) | Cu | Si | Mg | Zn | Mn | Fe | Ti | Al |
|----------------------------|------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| | 0.18 | 0.18 | 0.059 | 0.08 | 0.047 | 0.35 | 0.021 | 98.87 |

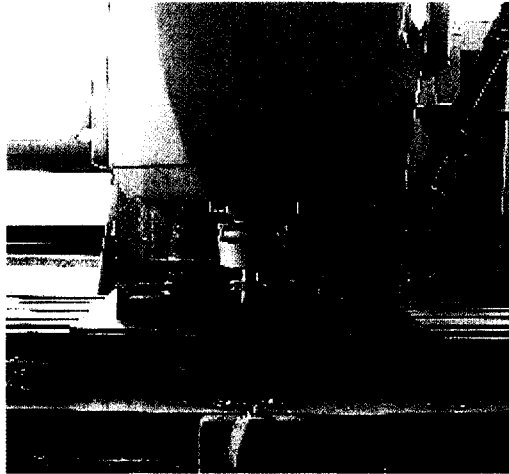


Fig. 2 Experimental set-up with a milling machine.

용접선 및 수평을 바르게 유지하고 열전달의 효과를 고려하여 적절한 받침판(backing plate)을 선택하였으며 여러 개의 클램프를 사용하여 두 판재가 움직이지 않도록 단단히 고정하였다.

2.2 마찰열 발생용 공구제작

밀링을 이용한 마찰 교반용접에 사용되는 마찰열 발생용 공구는 밀링 척에 고정하기 위하여 원형 단면 봉을 사용하였으며 내열 및 내마모성을 고려하여 고속도강의 재질을 선정하였다. 공구가 고속 회전할 때 마찰열로 인하여 공구 및 공구 핀이 변형되거나 마멸되는 것을 방지 또는 감소시키기 위하여 용접 공구 밀링 척 전길이의 아래쪽으로부터 1/4 지점에 해당하는 곳에 방열판을 그림과 같이 가공하여 기워 맞춤(shrinkage fitness)을 실시하였다. Fig.3은 방열판이 부착된 마찰열 발생용 공구를 나타낸다. 봉의 하단부에 용접면을 깨끗하게 하기 위해 공구의 어깨(shoulder)부분을 연마 가공(polishing)하고, 핀의 길이와 직경을 달리해서 반복 용접을 실험 실시하여 최적의 용접 공구의 핀과 어깨 등의 치수 및 형상을 선정하였다.

2.3 실험방법

Fig. 4와 같이 두 모재(work piece)를 맞대기 용접할 때와 같이 가지런히 받침판(backing plate)위에 올려놓은 뒤 클램프를 사용하여 가고정(假固

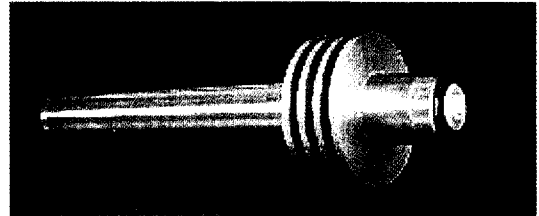


Fig. 3 Picture of the heat generating tool.

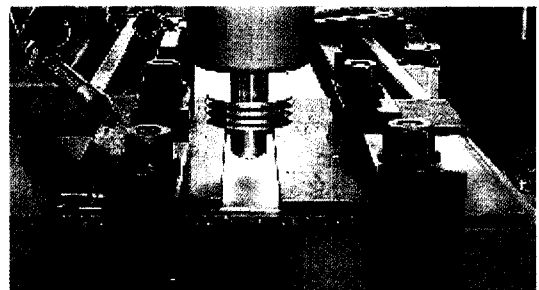


Fig. 4 FSW using a milling machine.

Table 2 Dimensions of pin and shoulder of the tool for the FSW experiment.

| Sample No. | Pin length (l,mm) | Pin diameter (Φ,mm) | Shoulder diameter (Ψ,mm) |
|------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 1.9 | 6,4,3 | 15,13,11 |
| 2 | 1.8 | 6,4,3 | 15,13,11 |
| 3 | 1.6 | 6,4,3 | 13, 11 |
| 4 | 1.4 | 4, 3 | 13, 11 |
| 5 | 1.2 | 4, 3 | 13, 11 |
| 6 | 1.0 | 4, 3 | 13, 11 |

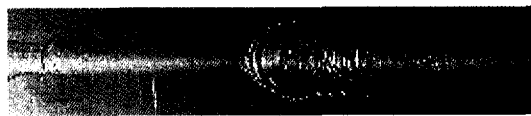
定) 하고 밀링 베드를 움직여 용접선과 용접공구의 핀 중심과의 일치를 확인한 뒤, 모든 클램프를 사용하여 모재가 움직이지 않도록 단단히 고정을 시킨다. 마찰열 발생공구를 밀링 척에 고정하여 회전시킨다. 마찰열 발생 공구를 용접되어야 할 접합선 중앙에 두 모재속으로 공구의 어깨가 완전히 밀착될 때까지 아래 방향으로 움직여 준다. 이 때 베드 속도, 즉 용접 이송속도를 35mm/min으로 이송시키면 접합선을 따라 마찰 교반용접은 진행된다.

최적공구를 선정하기 위하여 Table 2와 같이 핀의 직경(Φ), 핀의 길이 (mm), 어깨의 직경(Ψ)을 변수로 하여 각각 10-15회의 실험을 행하여 그 중에서 용접성이 가장 양호한 최적공구 및 형상을 찾았

다. 모재와 마찰 교반용접된 재료에 대한 인장시험을 실시하고, 인장강도 및 과단 형태를 서로 비교 평가함으로써 용접에 대한 신뢰성을 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 최적공구를 선정하기 위한 과정에서 적절치 못한 핀의 길이, 치수 및 어깨의 직경을 선정했을 경우에, 실패한 용접에 대한 여러 가지 대표적인 용접 비드 및 진행과정에 관한 형상을 보여주고 있다. (a)와 (b)는 핀의 길이가 모재의 두께에 비해 너무 길어서 공구의 어깨와 모재와의 밀착이 충분하지 못한 경우를 보여준다. (c)의 경우는 모재의 두께에 비해서 핀의 직경이 상대적으로 크게



(a) $1.9' \times 4\phi \times 11''$



(b) $1.8' \times 4\phi \times 13''$



(c) $1.6' \times 6\phi \times 11''$



(d) $1.2' \times 3\phi \times 13''$



(e) $1.0' \times 4\phi \times 11''$

Fig. 5 Undesirable friction stir weldments.

되어 과도한 양의 마찰교반과, 어깨의 넓이가 작아서 충분히 압연시키지 못한 결과이다. (d)와 (e)는 핀의 길이가 너무 짧은 경우, 모재의 밑 부분에까지 충분한 마찰열을 발생시키기 위하여 공구어깨가 모재를 과도하게 밀착시킬 때 발생하는 현상을 보여준다.

Fig. 6는 공동과 균열이 없는 양호한 용접상태를 나타낸다. 비드의 높이가 일정한 고운 형상을 가지고 있으며 용접된 부분의 앞 뒤 면에 기공이 보이지 않고 매끄러운 형상을 보이고 있다. 이때 사용된 공구핀 길이와 직경 그리고 어깨 직경은 각각 4 mm, 1.4 mm, 13 mm이었다. 이러한 공구의 형상 및 치수는 2 mm 두께의 알루미늄 판재에 마찰 교반용접을 적용할 경우 가장 적절한 것임을 알 수 있다.

위에서 얻은 최적공구의 조건으로 제작된 마찰열 발생공구로 마찰 교반용접을 실행한 후, 용접부에 대한 강도를 평가하기 위하여 인장 시험편을 제작하였다. 사용한 만능인장 시험기는 최대 부하가



(a)



(b)

Fig. 6 Front (a) and rear (b) faces of a friction stir butt weldment made in 2mm' Al 1050 plates with the optimized tool ($1.4' \times 4.0\phi \times 13\psi$).

Table 3 Tensile strength measurements of friction stir welded Al 1050

| Sample No. | Tensile strength (Kg/mm ²) | Sample No. | Tensile strength |
|------------|--|------------|------------------|
| 1 | 9.160 | 6 | 9.018 |
| 2 | 9.300 | 7 | 9.311 |
| 3 | 9.323 | 8 | 9.214 |
| 4 | 9.790 | 9 | 9.122 |
| 5 | 9.210 | 10 | 9.216 |

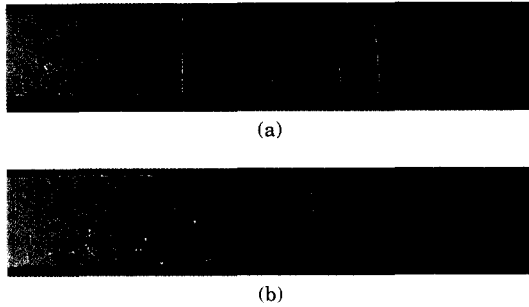


Fig. 7 Tensile test specimens welded by FSW ((a) front face, (b) rear face).

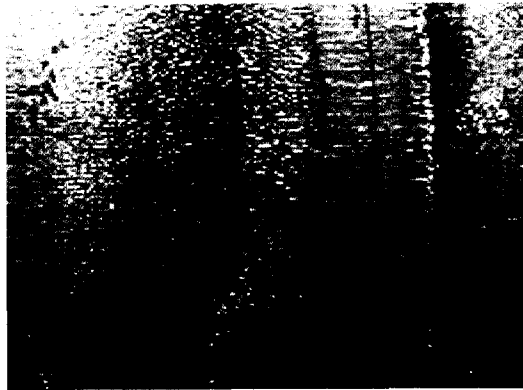


Fig. 8 Fracture appearance of the tensile test specimen welded by FSW, showing one in heat affected zone(HAZ).

10 톤인 INSTRON 8516 동적 시험기이며, 0.5mm/min의 준정적(quasi-static) 속도로 컴퓨터 프로그램을 이용하여 실험을 실시하였다. 실험 결과 모재의 인장강도는 10.198 이었다. Table 3 은 마찰 교반용접을 실시한 후 10개의 인장 시험편에 대한 인장강도 시험 결과이다.

실험 결과, 모재의 인장강도가 10.198 Kg/mm² 를 100%로 보았을 때, 테이블에 나타난 용접 시험편의 인장강도 값들이 90% 이상임을 알 수 있다. 즉, 두께 2 mm의 알루미늄 합금을 이용하여 마찰 교반용접을 행한 결과, 인장강도는 거의 감소되지 않았으며 용접면이 매우 매끄러웠다. Fig. 7은 마찰 교반용접된 시험편의 용접가공면인 전면과 받침판과 맞닿은 후면을 나타내고 있다. Fig. 8은 인장시험후의 열영향부에서의 파단형태를 보여준다.

4. 결론과 향후 과제

알루미늄 합금에 대한 용접에서 마찰 교반용접은 용접(fusion welding)에 비하여 중요한 몇 가지의 잇점이 있다. 첫째는 용접에서 자주 발생하는 균열로 인한 문제가 없는 것이고, 둘째는 용접금속의 기화로 인한 합금원소의 손실이 없으며, 셋째는 용접공구의 분쇄작용(crushing), 교반(stirring) 그리고 단조작용(forging)으로 인해 용접금속이 모재보다 더 고운 입자구조를 갖게 된다는 것이다.

본 논문에서는 밀링을 이용하여 비철금속인 Al 1050의 2mmt의 박판재에 대해 마찰 교반용접을 실시하여, 마찰 교반용접법의 알루미늄 합금 박판재에의 적용성에 대하여 실험적 연구를 하였다. 마찰열 발생공구의 편 길이와 직경 그리고 어깨 직경에 따라 용접형태가 상이하였으며, 편 길이와 어깨의 밀착상태가 매우 중요한 요소로써 작용하였다. 2mmt Al 1050의 마찰 교반용접에 사용된 마찰열 발생공구의 최적 편 길이는 1.4 mm 이었으며, 편과 어깨의 직경은 각각 4mm와 13mm가 가장 적합하였다. 이때의 마찰 교반용접된 시험편의 인장강도는 모재 인장강도의 90%이상으로 나타났다.

향후 과제는 다양한 두께의 여러 종류의 Al합금 판재를 용접할 수 있는 마찰 교반용접용 공구의 개발과 인장시험 외의 굽힘시험 및 피로시험 등을 실시하여 마찰 교반용접 기법의 신뢰성을 구축하는데 있다고 사료된다. 또한 가능하다면, 이동이 편리하고 현장에서 바로 이용 할 수 있는 마찰 교반용접기가 제작되어 산업 활동에 기여할 수 있어야 한다고 믿어진다.

참고문헌

- 1) Welding Handbook, Eighth Edition, American Welding Society, Miami, Fla.
- 2) Andrews, D., Friction surfacing tomorrow-industrial applications of cladding, TWI Bulletin, Nov./Dec. TWI, U.K. 1996.
- 3) Thomas, W. M., et al., Friction stir butt welding, International Patent Application No. PCT/GB 92/

02203 and GB patent application No 9125978.8. 1991.

- 4) Dawes, C. J, Friction stir process welds aluminum alloys, *Welding Journal*, vol.75, no.3, 1996.
- 5) Hinrichs, J. F., Noruk, J. S., McDonald, W. M., and Heideman, R. J., *Svetsaren*, No. 3, 1995.
- 6) Knipstrom, K-E., Friction stir welding process goes commercial, *Welding Journal*, vol.76, no.9, 1997.
- 7) Midling, O. T., Material flow behaviour and microstructural integrity of friction stir butt weldments, *Proc. of 4th Int. Conf. on Aluminum Alloys(ICAA4)*, 1994.

저 자 소 개



장석기

1951년 11월생 1973년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1988년 전남대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 목포해양대학교 기관공학부 교수, 당학회 정회원



신상현

1956년 7월생, 1979년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1995년 텍사스 주립대 기계공학과 졸업(박사), 목포해양대학교 기관공학부 조교수 당학회 증신회원