

# 밀링을 이용한 AI합금 용접을 위한 최적공구형상 및 치수개발에 관한 연구

-마찰용접법에 의하여-  
장석기,\* 김인주,\*\* 박종식\*\*\*

## A development of optimizing tools for friction stir welding with 2mm aluminum alloy using milling machine

S.K.Jang,\* I.J.Kim,\*\* J.S.Park\*\*\*

**ABSTRACT** : This paper shows the possibility of performing the friction stir welding and the development of optimizing tools for FSW with 2mm thick plate of aluminum alloys using milling machine. This research can be reported on achieving above 90% of the tensile strength in 1050 aluminum alloys friction stir welded in the room temperature. This welding process is very simple, and does not require filler metal and weld pool shielding gas. FSW process generates almost no heat distortion, which eliminates straightening of the workpiece. It is currently attracting interest from different industries working with aluminum alloys.

**Key Words** : Friction stir welding(FSW), Milling machine, Tool, Pin, Shoulder, Butt, Lap, Backing plate,

### 1. 서론

최근 산업의 급격한 발전과 더불어 우주선, 항공기, 선박, 저온 체, 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) 및 재활용할 수 있는 장점이 있으며, 모든 산업 영역에서는 이러한 바람직한 특성 때문에 알루미늄 구조물의 사용이 증가해 가는 추세에 있다.

일반으로, 가스메탈 아크용접(GMAW)이나 일반적인 용접으로 알루미늄을 접합하는 경우에는 용접속도가 느리고 생산성이 낮으며 용접성이 저하되는 것을 알 수 있다. 반면에, 휘젓기 마찰용접은<sup>1,2)</sup> 최근에 발명되고 개발되어 잠재적으로 유용한 새로운 용접기술로서, 이전에는 공동(voids), 균열 또는 뒤틀림(distortion)없이 신뢰할만한 용접을 한다는 것이 대단히 어려운 많은 재료들에 대해서 간단한 기법으로

용접이 가능하게 할 것이다. 한편, 생산에 이 기술을 적용할 수 있도록 여러 산업현장에서 시험적인 연구를 수행하고 있는 것으로 알고 있다.

휘젓기 마찰용접 기법은 토마스에<sup>3)</sup> 의해 발명되었고 영국의 캠브리지의 TWI<sup>4,5)</sup>에 의해 발전되었으며, 현재는 미국의 USC의 실험실에서도 연구중이다. 이 기법은 전통적인 마찰용접에서 연유되었으며, 용접 후에 비틀림이 매우 적고, 긴 맞대기(butt)와 겹침(lap) 이음의 제작에 적용될 수 있는, 고체 상태(solid phase)에서 용접이 가능한 이점이 있다. 더욱이 조작이 간편하다.

알루미늄 합금에 대하여 이러한 우수한 기법에 대한 산업체의 관심을 이끌어 내기 위하여, 실제적인 휘젓기 마찰용접법(Friction Stir Welding)에 관한 자세한 설명과 공구제작 및 공구의 형상 그리고 치수에 따라 나타나는 결과를 기술하며, 용접된 결과물들의 비드 상태, 즉, 용접상태의 결보기와 인장실험 결과들을 비교함으로써 이 실험법의 실제 산업체의 적용에

\* 목포해양대학교 기관공학부 교수

\*\* 목포대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 동아인재대학교 자동차정비학과

대한 가능성을 알아보겠다. 즉, 이 논문은 용접하기가 까다로운 알루미늄 합금의 이음에 대해 휘젓기 마찰용접의 수행 가능성과 공구를 개발하고 평가하는데 일차적인 목적이 있다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 실험 원리 및 장치

1) 원리 : 마찰 용접을 수행하기 위하여, 맞대기 (butt) 혹은 겹침-이음 될 부분의 개소를 받침판(backing plate) 위에 얹혀 놓는다. 접합될 면들이 휘젓기 용접중에 힘을 받아 분리되지 않도록 단단히 고정한다. 특별한 형상의 돌출 핀을 갖춘 원통-계단형 특수공구가 회전하면서 천천히 이음(용접)선상으로 나아가게 한다. 핀의 길이는 대체로 소용되는 용접 깊이와 거의 같게 한다. 회전 핀이 작업 대상 면(work surface)을 접촉하자마자, 회전 핀이 밀착 접촉된 재료에 대단히 큰 마찰열을 발생하게 한다. 따라서, 자연스럽게 재료의 기계적인 강도는 낮아지게 된다. 적용된 하중 하에서 특수공구 핀의 경로 위에 있는 재료를 단조하고(forge) 밀어내게(extrude) 된다. 용접재 작용면(work surface)과 특수공구의 어깨(shoulder)가 거의 밀접한 접촉상태에서 이러한 현상이 계속된다. 이 접합에서, 특수공구의 회전 어깨(rotating shoulder)와 핀에 의해 발생한 마찰열은 공구 어깨 바로 아래와 핀 근방에 큰 소성화(plasticized)된 층(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 휘젓기와 단조 작용으로 추적 면(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 산화 막(oxide film)을 깨뜨리면서 접합선을 분쇄하고, 그리고 교반하고 공구의 추적쪽(trailing side)에 있는 분쇄되었던 재료를 재결합시킨다. 공구 추적 면에서 재료는 냉각되어 고상 용접(solid-phase weld)을 형성한다. 이 모든 것이 합금의 용점보다 훨씬 낮은 온도에서 일어난다. 즉, 고상 접합(solid-phase joint)인 것이다.

본 실험에 사용된 재료는 1050 알루미늄의 두께가 2mm 인 박판을 사용하였으며, 화학성분

은 표 1과 같다.

표 1 알루미늄 1050의 화학 성분

Chemical composition (wt%)	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti	Al
	0.05 이하	0.25 이하	0.05 이하	0.05 이하	0.05 이하	0.40 이하	0.03 이하	99.5

2) 실험장치의 구성은 사진 1에 나타내었다. 실험을 위하여 본 장비의 최저 이송속도를 35 mm/min으로 선정하고 회전속도는 최대의 마찰열을 발생시키기 위하여 고속회전 2240 rpm으로 실시하였으며 용접을 위한 두 판재의 용접선 및 수평을 바르게 유지하며 열전달의 효과를 고려하여 적절한 배판(backing plate)을 선택하였으며 여러 개의 클램프를 사용하여 두 판재가 움직이지 않도록 단단히 고정하였다.



사진 1 밀링을 이용한 실험장치

### 2.2 공구제작

휘젓기 마찰용접 특수공구형상은 사진 2에 나타낸 것과 같다. 공구의 구성은 밀링 척에 고정하기 위하여 원형 단면 봉을 사용하였으며 내열 및 내마모성을 위하여 고속도강의 재질을 선정하였다. 특수공구가 고속회전할 때 마찰열

로 인하여 공구 및 공구 핀이 변형되거나 마멸되는 것을 방지 또는 감소시키기 위하여 용접공구 밀링척 전길이 중 아래쪽으로부터 1/4 지점에 해당하는 곳에 방열판을 그림과 같이 가공하여 끼워 맞춤(shrinkage fitness)을 실시하였다. 봉의 하단부에 용접면을 깨끗하게 하기 위해 공구의 어깨(shoulder)부분을 연마 가공(polishing)하고 판재의 두께에 따라 핀의 길이와 직경을 달리하여 반복 용접을 실험 실시하여 최적의 용접 공구의 핀과 어깨 등의 치수 및 형상을 선정하였다.

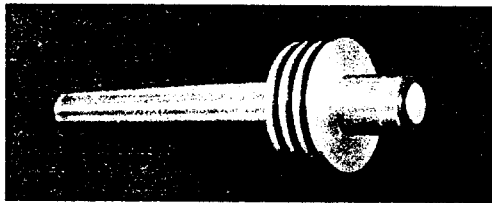


사진 2 공구형상

### 2.3 실험방법

사진 3과 같이 두 모재(work piece)를 맞대기 용접할 때와 같이 가지런히 배판(backing plate) 위에 올려놓은 뒤 클램프를 사용하여 가고정(假固定) 하고 밀링 베드를 움직여 용접선과 용접공구의 핀 중심과의 일치를 확인한 뒤, 전 클램프를 사용하여 모재가 움직이지 않도록 단단히 고정을 시킨다. 휘젓기 공구가 부착된 모터를 고속으로 회전시킨다. 다시 한번, 밀링의 베드를 좌우로 움직이면서 용접선의 정확성을 확인하고, 상하로 움직이면서 휘젓기 공구를 용접되어야 할 접합선 중앙에 두 모재속으로 밀어 넣고 공구의 어깨가 완전히 밀착될 때까지 아래 방향으로 움직여 준다. 이 때 베드 속도, 즉 용접 이송속도를 35mm/min으로 이송시키면 접합선을 따라 휘젓기 마찰은 진행된다.

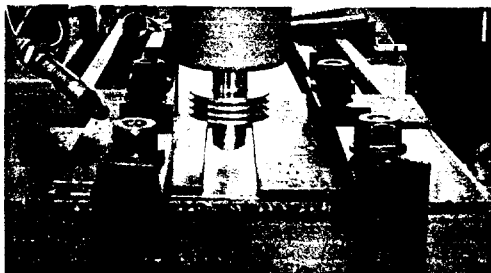


사진 3 밀링을 이용한 마찰용접의 실험방법

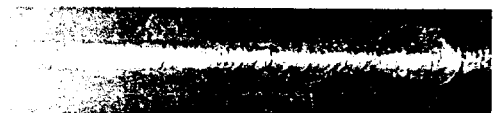
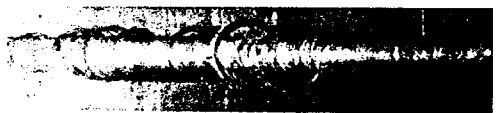
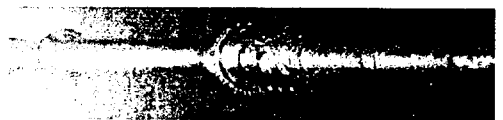
최적공구를 선정하기 위하여 표 2와 같이 핀의 직경( $\phi$ ), 핀의 길이(mm), 어깨의 직경( $\phi$ )을 변수로 하여 여러 번 실험한 후 용접성이 양호한 최적공구 및 형상을 찾고 알루미늄 판의 두께에 따라 최적공구로 선정된 공구를 가지고 휘젓기 마찰용접실험을 하였으며, 모재로 만든 시험편과 휘젓기 마찰용접으로 가공된 시험편에 대한 인장시험을 실시하고 서로 인장강도 및 파단 형태를 비교 평가함으로써 용접에 대한 신뢰성을 검증하였다.

표 2 최적공구를 선정하기 위한 데이터

No.	핀의 길이 (mm)	핀 직경 ( $\phi$ )mm	어깨 직경 ( $\Phi$ )mm
1	1.9	6,4,3	15,13,11
2	1.8	6,4,3	15,13,11
3	1.6	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

### 3. 결과 및 고찰

사진 4는 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 보여 주고 있다.



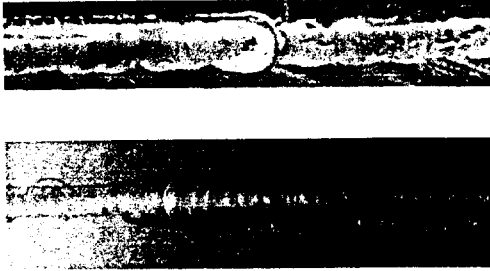


사진 4 용접이 불량된 형상

사진 5는 최적공구로 용접한 시험편을 나타낸다. 비드의 높이가 일정한 고운 형상을 가지고 있으며 용접된 부분의 앞 뒤 면에 기공이 보이지 않고 매끄러워 다듬질 할 필요가 없다는 것을 확인할 수 있으며, 전 두께에 걸친 횡단면적에 대해 맞대기 용접(butt joint weld)을 하였다. 그림은 전형적인 고상(solid-phase) 마찰 용접 형상을 보여주고 있다. 본질적으로 용접은 훨씬 정제된 그레인 치수를 갖으며 소성화되고 단조된 재료의 연속체의 강화된 너깃(nugget)을 구성하고 있다. 용접 금속의 타원형 환(rings)은 용접공구 측면의 산물이며 용접깊이에 걸친 용접 구배에 관하여 1회전당 앞으로 나아가는 이동량이다. 최적화된 용접조건에서는 공동과 균열이 전혀 없는 용접을 보여준다.

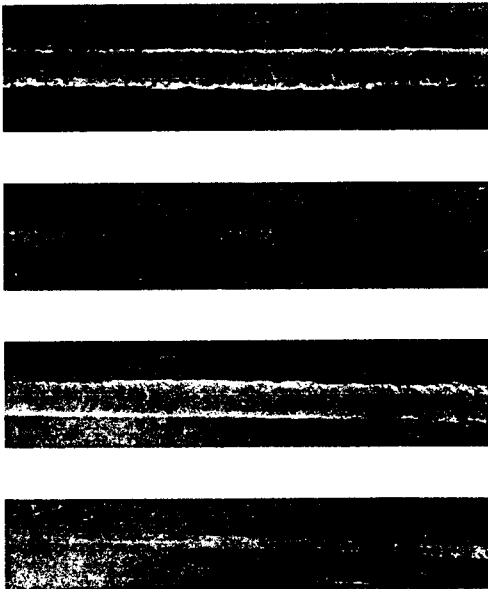


사진 5 최적공구로 용접한 형상

휘젓기 마찰용접으로 만들어진 고상 용접 형성물은 알루미늄 합금의 용접(fusion welding)과 비교하여 중요한 금속학적 잇점이 있다. 고상 용접 결합은 용접 방법에서 자주 예상되는 균열, 예로서, 용석(liquation) 또는 용고 균열이 없다. 용접금속의 기화로 인하여 발생할 수 있는 합금 원소의 손실이 없다. 용접공구의 분쇄 작용(crushing), 휘젓기(stirring) 그리고 단조(forging) 작용은 모재 보다도 더 정제된 입자(grain) 구조를 갖는 용접 금속을 만든다. 일반적으로 용접이 잘된 상태에서 후자는 용접금속 강도가 열 영향부(HAZ)의 강도를 초과하게 만든다. 인장파괴는 용접역 과 HAZ 에서 떨어진 모재에서 발생하는 것을 알 수 있다.

실험 결과 2mm의 알루미늄의 휘젓기 마찰용접을 위한 최적공구의 형상 및 치수는 핀의 직경 4φ, 핀의 길이 1.4 mm, 어깨 지름 13φ 인 경우에 용접성이 우수하다는 것을 볼 수 있었다.

위에서 얻은 최적공구의 조건으로 제작된 공구로 마찰용접을 실행한 후, 용접부에 대한 강도를 평가하기 위하여 인장 시험편을 제작하였으며, 사용한 만능인장 시험기는 최대 부하가 10 톤인 INSTRON 8516 동적 시험기이며, 0.5 mm/min의 준정적(quasi-static) 속도로 컴퓨터 프로그램을 이용하여 실험을 실시하였다. 실험 결과는 모재의 경우에는 인장강도가 10.198  $Kg_f/mm^2$  이었다. 표 3은 휘젓기 마찰용접을 실시한 후 10개의 인장 시험편에 대한 인장강도를 나타낸 것이다.

표 3 마찰용접 후의 인장강도

No.	인장강도( $Kg_f/mm^2$ )
1	9.160
2	9.300
3	9.323
4	9.790
5	9.210
6	9.018
7	9.311
8	9.214
9	9.122
10	9.216

실험 결과 모재의 인장강도가 10.198  $Kg/mm^2$  를 100%로 보았을 때, 테이블에 나타난 인장강도 값들이 90% 이상임을 알 수 있다. 즉, 알루미늄 합금 2mm 두께인 경우에도 휘젓기 마찰용접을 하여도 인장강도가 거의 감소하지 않았으며, 비드의 형성은 거의 없으며 용접면이 대단히 매끄러웠다. 사진 6은 휘젓기 마찰용접된 시험편의 용접 가공 면인 전면과 배면(backing plate)과 맞닿은 후면을 나타내고 사진 7은 인장시험을 실시한 후 열영향부에서 파단된 모습을 보여준다.



사진 6 마찰용접을 한 시험편의 전,후면의 형상



사진 7 인장시험에 의한 파단된 형상

#### 4. 결론

본 연구에서 다음과 같은 결론과 향후 발전 방향을 얻을 수 있었다.

1. 밀링을 이용하여 비철금속인 알루미늄 합금에 대한 휘젓기 마찰용접이 가능함을 알 수 있었다. 또한 박판 알루미늄 합금 2mm의 박판재에 대해 휘젓기 마찰용접을 실시하여 최적공구 형상 및 치수(핀의 직경 4  $\phi$ , 핀의 길이 1.4 mm, 어께 지름 13  $\phi$ )를 개발하였다.
2. 인장시험을 통하여 모재와 마찰용접후의 인장강도를 비교한 결과 모재의 인장강도에 비하여 90%이상의 강도를 얻음으로서 이 용접법의 신뢰성이 확보되었다고 사료된다.

3. 모재의 두께에 따른 공구의 형상 및 치수를 연구하면 다양한 두께에 대하여 공구개발이 가능하리라 사료된다.

4. 밀링을 사용함으로써 사용하기가 쉽고 조작이 간편하며, 고상용접이므로 용접후 열에 의한 변형이 생기지 않는다는 것을 알 수 있다.

향후 과제는 3mm, 6mm등의 판재를 용접할 수 있는 여러 가지 공구의 개발과 굽힘시험 및 피로시험 등을 실시하여 휘젓기 용접기법의 신뢰성 측적이 있어야 하리라 사료된다. 또한 가능하다면, 마찰용접기가 이동이 편리하고 현장에서 바로 이용 할 수 있는 기기가 제작되어 산업 활동에 기여되어야 한다.

일반적인 선박 및 항공기 재료로 쓰여지고 있는 듀랄루민 합금에 대하여 휘젓기 마찰용접을 적용 가능하게 함으로써 이 기법의 마찰용접을 발전 시켜야 할 것이다.

#### 참고문헌

- 1) Welding Handbook Eighth Edition, American Welding Society, Miami, Fla.
- 2) knipstrom, K-E. 1995. New welding method for aluminum, Esab AB, Sweden, Svetsaren, No. 3.
- 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. Friction Stir Welding TWI, U.K.
- 5) Andrews, D. Friction surfacing tomorrow - industrial applications of cladding, TWI Bulletin, Nov./Dec. TWI, U.K. 1996.
- 6) Hinrichs, J. F, Noruk, J. S., McDonald, W, M., and Heideman, R. J. Svetsaren, No. 3. 1995.
- 7) Midling, O. T. Material flow behaviour and microstructural integrity of friction stir butt weldments. proc. of 4th Int. Conf. on Aluminum Alloys(ICAA4). Atlanta. Ga. 1994.