

## 2tmm AL-합금재의 겹침이음을 위한 교반용접의 실험적 연구

장석기\* 이돈출\* 김상진\*\* 전정일\*\*

### An experiment of optimizing tools for Lap joint with 2tmm Aluminum alloy plate using FSW

SK,JANG\* DC,LEE\* SJ,KIM\*\* JI,JEON\*\*

\* 목포해양대학교 기관공학부

\*\* 목포해양대학교 대학원

**Abstract** : This paper shows the possibility of performing Lap joint using the friction stir welding and the determination of tool's dimensions for FSW in Milling machine. This research also is reported on obtaining the tensile-shear strength, 9.319 [ $kgf/mm^2$ ] and the energy absorption, 2,682 [ $kgf-mm$ ] under this experiment. The optimal tool's dimensions and method for Lap joint in 2tmm aluminum alloy plate using FSW is as follows; The diameter of shoulder and pin are 9  $\phi$ mm and 3  $\phi$ mm, the length of pin is 3.6mm. The conditions of shoulder of tool is not pressed into original base metal.

**Key words** : Friction stir welding(FSW), Milling machine, Tool, Pin, Shoulder, Backing plate, Guide plate, Lap joint, Butt joint, Rivet

### 1. 서론

얇은 강판재(thin steel plate)의 겹침이음(Lap joint)에는 두 부재의 일부를 겹쳐서 부재의 표면을 용접하는 저항 점 용접(resistance spot welding) 과 두께의 면에 필릿 용접한 것이 있다. 겹침이음은 맞대기용접이 어려운 강재 박판의 접합에 많이 사용되고 있다. 하지만 비철금속인 알루미늄 박판 합금에 저항 점 용접법 등을 적용하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 박판 알루미늄 판재에 대한 겹침이음이 실용적인 면에서 거의 전무한 상태이다.

한편, 최근 산업의 급격한 발전과 더불어 항공기, 자동차 등 각종 기관이나 기기 등의 관련 부품 등의 경량화, 고속화, 고출력화를 추진

하는 추세에 있다. 알루미늄 합금은 무게가 가볍고 가공하기 쉬우며 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 저하된다는 것은 상식화되어 있다<sup>1-5)</sup>. 반면에, 마찰 교반용접은<sup>1-7)</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 간단

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

본 논문에서는 밀링머신을 이용하여 겹침이음 교반용접을 실시하여 알루미늄 합금에 대한 용접용 최적공구의 치수를 실험적으로 결정하고 2tmm 박판 알루미늄 합금재의 겹침이음의 가능성을 확립하고자 한다.

이를 위해 첫째, 다양한 치수의 공구를 제작하여 겹침이음 교반용접을 시행한 후, 인장시험편을 제작하여 인장-전단응력을 구한다. 그리고 모재의 시험편, 교반용접에 의한 맞대기 용접용 시험편 및 리벳 접합 등의 시험편을 제작하여 각 시험편에 대하여 하중-변위 곡선을 그리고, 이들 결과로부터 인장시험 결과의 최고하중을 비교하여 교반용접에 의한 겹침이음의 가능성을 얻고자 한다.

둘째, 공구의 치수에 따라 나타나는 각각의 겹침이음 시험편의 인장-전단강도 및 시험편에 흡수 되는 에너지를 고찰하여 최적 용접 공구의 치수를 결정한다.

셋째, 이 실험에서 사용된 범위 안에서 용접된 결과물들의 비드 상태, 즉, 용접상태의 결보기와 인장-전단시험(Tensile shear test) 후, 시험편의 파괴 상태를 거시적으로 고찰한다. 결론적으로, 이 실험법이 강재의 점 용접(spot welding)처럼 2tmm 박판 알루미늄 합금의 겹침이음을 실현함으로써 실제 산업체의 적용에 대한 가능성을 알아보겠다. 즉, 용접하기가 까다로운 박판 알루미늄 합금의 겹침이음(Lap joint)에 대해 교반 마찰용접의 수행 가능성과 공구치수를 개발하고 평가하는데 목적이 있다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 원리 및 장치

1) 원리 : 겹침이음 교반용접을 수행하기 위하여, 겹침이음(Lap joint)될 부분의 개소를 받침 판(backing plate)위에 안내 판(guide plate)과 모재를 공구 어깨지름 이상의 넓이 만큼 어긋나게 겹쳐서 용접될 수 있도록 얹혀 놓는다. 접합될 면들이 교반용접 중에 힘을 받아 분리되지 않도록 단단히 고정한다. 특별한 형상의 들출 핀을 갖춘 원통-계단형 특수공구가 회전

하면서 천천히 이음(용접)선상으로 나아가게 한다. 핀의 길이는 대체로 소용되는 용접 깊이와 거의 같게 한다. 회전 핀이 작업 대상면(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 교반과 단조 작용으로 추적 면(trailing face)으로 운반된다. 결론적으로, 마찰용접 공구가 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, 교반한다. 그리고 공구의 추적 쪽(trailing side)에 있는 분쇄되었던 재료를 재결합시킨다. 공구 추적 면에서 재료는 냉각되어 고상 용접(solid-phase weld)을 형성한다. 이 모든 것이 합금의 용접보다 훨씬 낮은 온도에서 일어난다. 즉, 고상 접합(solid-phase joint)인 것이다.

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

Table 1. Chemical composition (wt%) for 1050 Aluminum Alloy

Chemical composition (wt%)	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti	Al
	0.15	0.14	0.029	0.06	0.018	0.36	0.017	98.99

2) Fig. 1은 밀링머신에 교반용접용 공구가 장착된 사진이며, 실험장치의 구성은 Fig. 2에

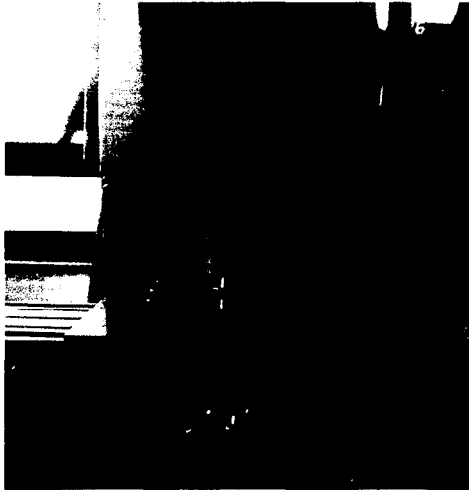


Fig. 1 Picture of Milling Machine fixed tool for FSW

나타내었다. 실험을 위하여 본 장비의 최저 이송속도를 35mm/min 으로 선정하고 회전속도는 최대의 마찰열을 발생시키기 위하여 고속회전 2240 rpm으로 실시하였으며 용접을 위한 두 판재의 수평을 바르게 유지하며 열전달의 효과를 고려하여 적절한 배판(backing plate)을 선택하였다. 또한 적절한 용접선을 확보하기 위하여 모재와 두께가 같은 안내판(guide plate)을 상하에 15~20(mm) 어긋나게 모재와 나란히 붙여 장착한 다음 안내판을 모재와 밀착시킨 뒤, 여러 개의 클램프를 사용하여 두 판재인 안내판과 모재 평판이 움직이지 않도록 단단히 고정하였다.

### 2.2 교반용접용 공구 제작

교반 마찰용접 특수공구 형상 및 각부 명칭은 Fig. 3에 나타낸 것과 같다. 공구의 형상은 밀링 척에 고정하기 위하여 원형 단면 봉을 사용하였으며 내열 및 내마모성을 위하여 고속도강의 재질을 선정하였다. 특수공구가 고속회전할 때 마찰열로 인하여 공구 및 공구 핀이 변형되거나 마멸되는 것을 방지 또는 감소시키기 위하여 용접 공구 밀링 척 전길이 중 아래쪽으로부터 1/4 지점에 해당하는 곳에 방열판(radiation fins)을 가공하여 끼워 맞춤(shrinkage fitness)을 실시하였다. 용접면을 깨끗하게 하기 위해 공구의 어깨(shoulder)부분을

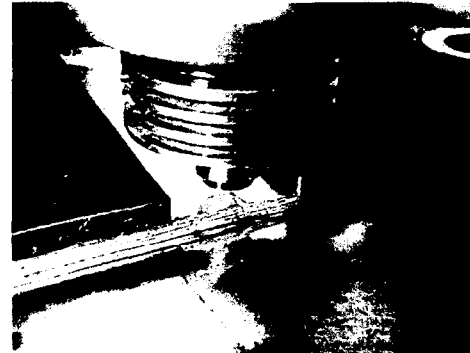


Fig. 2 Experimental Set-up with a Milling Chuck

연마 가공(polishing)하고 마찰용접 공구의 어깨의 직경, 핀의 길이와 직경을 Table 2와 같이 다양하게 가공 제작하여 용접용 공구의 어깨로 모재를 0.2(mm) 압입(pressure inserting)시킨 유무에 따라 반복적으로 겹침이음 용접을 실험 실시한다.

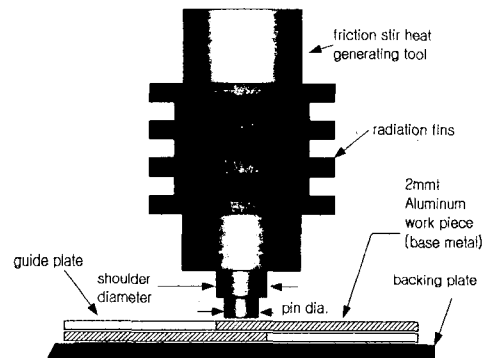


Fig. 3 Schematic for Tool and Base Metal

### 2.3 실험방법

1) 겹침이음을 위한 교반용접 및 리벳(rivet) 접합

Fig. 3과 같이 밀링 머신의 베드 위에 2mm 알루미늄 판재인 두 모재(work piece)를 강재(steel plate)의 점 용접(spot welding)의 겹침이음을 실시할 때와 같이 가지런히 배판(backing plate) 위에 올려놓은 뒤 적절한 용접선을 확보하기 위하여 모재와 두께가 같은

2mm 안내판(guide plate)을 상하에 어긋나게 모재와 함께 배열한 다음, 이 안내판을 모재와 단단히 밀착시킨다. 그리고 클램프를 사용하여 가고정(假固定) 하고 밀링 베드를 움직여 용접 공구의 핀 중심과 겹침 용접시 공구의 어깨가 모재의 전길이에 걸쳐 가장자리를 벗어나지 않도록 확인한 뒤, 모든 클램프를 사용하여 모재가 움직이지 않도록 단단히 고정시킨다. 교반용 공구가 부착된 밀링 모터를 고속으로 회전시킨 뒤, 다시 한번, 밀링의 베드를 좌우로 움직이면서 용접선의 정확성을 확인하고, 상하로 움직이면서 용접되어야 할 접합선 중앙의 두 모재 두께방향으로 교반용 공구를 밀어 넣고 공구의 어깨가 모재 표면에 완전히 밀착될 때까지 아래 방향으로 공구를 움직여 준다. 이때 밀링 베드 속도, 즉 용접 이송속도를 35mm/min으로 이송시키면 접합될 선을 따라 교반마찰은 진행된다.

최적공구를 선정하기 위하여 Table 2와 같이 핀의 직경( $\phi$ ), 핀의 길이(mm), 어깨의 직경( $\phi$ ), 모재 속으로 어깨를 0.2mm 압입시키는 것 등의 유무를 변수로 하여 각 조건에 대해 2회씩 이상 실험적 겹침이음(Lap joint) 교반용접을 실시하였다. 교반용접에 의한 겹침이음의 신뢰성을 확인하기 위하여 Fig. 4(c)와 같이 겹침이음용 모재와 같은 두께의 알루미늄판에 핀의 지름이 3.2 $\phi$ mm인 리벳을 가지고 1점, 2점, 4점의 리벳 접합을 핸드 리벳터의 공구를 사용하여 실시하였다.

2) 경도 및 인장 전단시험

비커스 경도시험기를 이용하여 용접선, 열영향부 및 모재 등에 대한 경도를 비교하였다. Table 3은 이들 경도의 값을 비교한 것이다. 또한, 겹침이음된 시편과 리벳 접합된 시편의 강도를 평가하기 위하여 인장-전단시험을 하였다. 이 시험에 사용된 인장시험기는 동적 재료 시험기로서 유압식 INSTRON8516이며, IX series 프로그램을 이용하여 컴퓨터 제어로 준정적 상태에서 인장이 이루어지도록 3mm/min의 속도로 인장하였다.

Table 3은 공구 어깨에 의해 단조된 면상의 용접선 중심을 기준점으로 하여 순차적으로 2mm씩 떨어진 위치에서의 경도값을 나타낸 것이다.

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

공구	어깨지름 $\phi$ (mm)	핀의 길이 (mm)	핀의지름 $\phi$ (mm)	압입깊이 (mm)	
AL01	7 $\phi$	3.6	5 $\phi$	0.0	
AL02				0.0	
AL03				0.2	
AL04		2	4 $\phi$	0.0	
AL05				0.2	
AL06		1.8	4 $\phi$	0.0	
AL07				0.2	
AL08		3.5	3 $\phi$	0.0	
AL09				0.2	
AL10		2	3 $\phi$	0.0	
AL11				0.2	
AL12		1.8	3 $\phi$	0.0	
AL13				0.2	
AL14	8 $\phi$	3.5	5 $\phi$	0.0	
AL15				0.2	
AL16		2	5 $\phi$	0.0	
AL17				0.2	
AL18		1.8	5 $\phi$	0.0	
AL19				0.2	
AL20		3.6	4 $\phi$	0.0	
AL21			3 $\phi$	0.0	
AL22		9 $\phi$	3.6	5 $\phi$	0.0
AL23				4 $\phi$	0.0
AL24	3 $\phi$			0.0	

Table 3. Vickers Hardness of welding line, HAZ and Base Metal on Lap joint specimen

측정 위치	용접선			열영향부				모재	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hv	42.6	42.2	40.7	37.2	36.0	30.7	25.7	40.4	40.1

3. 고찰

하중-변위선도에서 최고 하중, 인장-전단강도, 시편에 흡수된 에너지 등의 결과들을 이용하여 거시적으로 이들 값을 서로 비교 분석함으로써 용접 공구에 대한 최적의 핀 및 어깨 직경의 결정, 그리고 핀의 길이 등에 대한 치

수 및 형상을 선정한다.

겹침이음에 대하여, 용접성이 양호한 최적공구의 치수 및 방법을 확인하기 위하여 다음과 같은 시험편을 제작하였다. 즉, 2mm 박판 알루미늄 모재의 인장시험편<sup>9)</sup>, 교반 마찰용접으로 가공된 맞대기이음 및 겹침이음의 인장시험편, 그리고 3종의 리벳(1점, 2점, 4점) 접합된 인장시험편 등이다.

Fig. 4(a)은 맞대기이음, Fig. 4(b)는 겹침이음의 인장시험편을 보여준다. Fig. 4(c)는 1점, 2점, 4점 리벳 접합의 인장시험편을 보여준 사진이다.

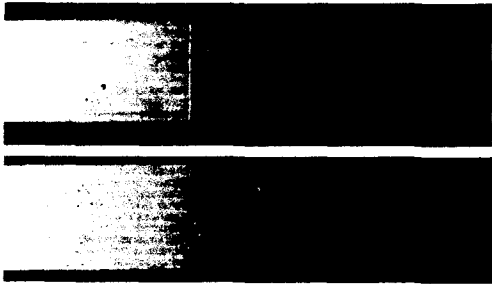


Fig. 4(a) Tensile test specimens Butt-jointed by FSW (the above, front face, the below, rear face)

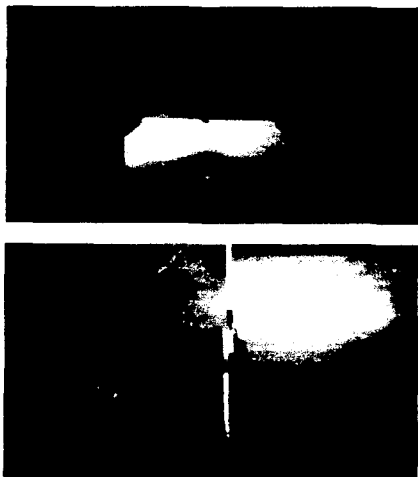


Fig. 4(b) Front face and side of tensile specimen Lap-jointed



Fig. 4(c-1) Picture of one point Rivet joint

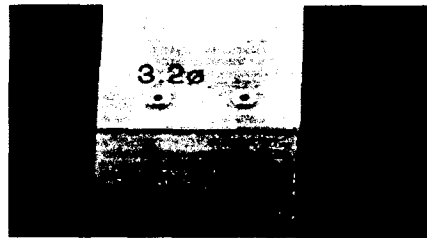


Fig. 4(c-2) Picture of two points Rivet joint



Fig. 4(c-3) Picture of four points Rivet joint

Fig. 5는 서로 다른 종류의 시험편에 대하여 인장하중이 부하된 하중-변위의 선도에서 최고 하중만을 비교한 그림이다. 그림에서 모재를 100%라 했을 때, 맞대기이음은 90.04%, 겹침이음은 88.3%, 4점 리벳 접합은 29.76%정도이다. 최고 하중의 경우만을 비교하였을 때, 교반용접에 의한 겹침이음의 이음성은 맞대기이음과 함께 양호한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 6는 교반용접용 특수공구를 Table 2와 같이 여러 가지 형상치수로 가공하여 용접된 겹

2mm AL-합금재의 겹침이음을 위한 교반용접의 실험적 연구

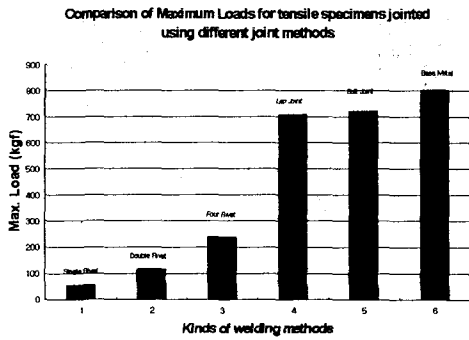


Fig. 5 Maximum Loads for tensile specimens jointed using different welding methods

침이음 시편에 대한 극한 응력(ultimate stress)의 비교를 통하여 겹침이음에 적합한 공구치수를 선정하기 위한 그림이다. 모재의 인장강도(tensile strength),  $10.571 \text{ kgf/mm}^2$ 의 85% 이상의 응력을 나타내는 시편에 대한 공구치수를 선택하면 다음과 같다.

AL05, AL07, AL08, AL10, AL11, AL19, AL21, AL24

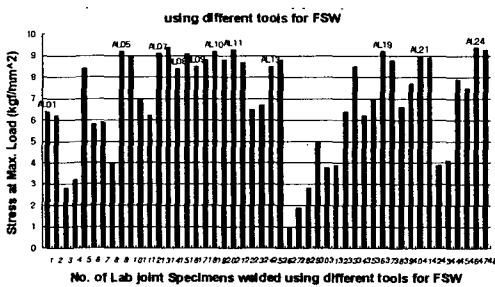


Fig. 6 Tensile-Shear Stresses of Lap joint specimens welded using different tools in size for FSW

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 목적으로 각각의 공구치수에 따른 시편에 흡수된 전에너지를 비교한 그림이다. 모재 시편에 대한 에너지 흡수율이

양호한 시편만을 선정하면 다음과 같다.

AL05, AL07, AL08, AL10, AL11, AL19, AL21, AL24

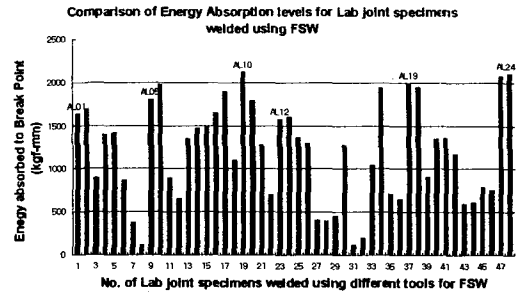


Fig. 7 Energy Absorption levels for Lap joint specimens welded using FSW

Fig. 8은 Fig. 6과 Fig. 7에서 선정된 양호한 시편에 대한 인장-전단응력 및 흡수 에너지를 함께 도시한 것이다. 강도 및 흡수 에너지가 동시에 양호한 시편에 대한 가장 바람직한 공구는 AL24임을 알 수 있다.

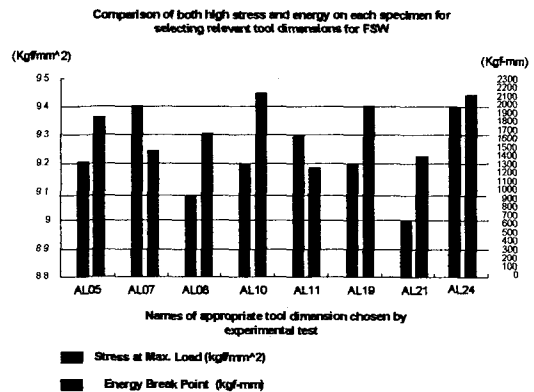


Fig. 8 Comparison of both stress and energy on specimens for selecting relevant tool dimensions for FSW

Fig. 9(a)는 맞대기이음<sup>8)</sup>, Fig. 9(b)는 겹침이음, Fig. 9(c)는 4점 리벳 접합의 인장-전단시험 후 시편의 파단 형태 등을 보여준 사진이다.

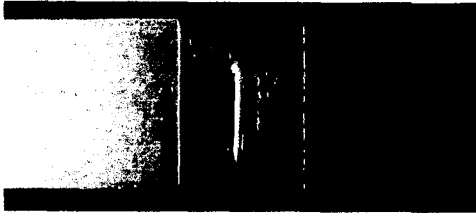


Fig. 9(a) Fracture appearance of the tensile test specimen Butt-jointed by FSW<sup>8)</sup>

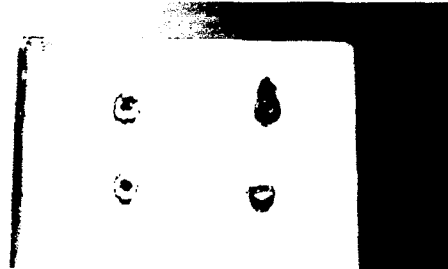


Fig. 9(c) Fracture appearance for 4 points Rivet joint



Fig. 9(b) Fracture appearance of tensile-shear test specimen welded by Lap joint FSW

Fig. 9(b)는 겹침이음 인장시편을 인장-전단시험한 뒤의 사진이다. 인장하중에 의하여 용접부 위에 굽힘 모멘트가 발생하여 겹침이음된 시편이 인장선상으로 수직하게 변형된 모습과 공구 어깨에 의해 단조된 용접선이 변형·파괴된 모습을 보여 준다.

Fig. 9(c)는 4점 리벳 접합의 시편에 대한 인장 시험한 결과이다. 리벳핀이 전단하중에 의해 파괴된 모습을 보여준다.

#### 4. 결론

2mm의 박판 알루미늄합금의 마찰 교반용접(Friction Stir Welding)기법을 이용하여 겹침이음(Lap joint)을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 4점 리벳 접합 시편의 최고 하중은 약 242.9 kgf이고 교반용접에 의한 겹침이음 시편의 최고 하중은 718.336 kgf로서 리벳 접합의 약 3배 이상이다. 따라서 교반용접에 의한 겹침이음의 실용성이 가능하다고 사료된다.

2) 겹침이음 용접 시편의 최대 인장-전단응력은  $9.319 \text{ kgf/mm}^2$ 로서, 모재 인장강도  $10.571 \text{ kgf/mm}^2$ 의 88% 정도였다. 시편의 파단까지 흡수된 최대 에너지는  $2,682 \text{ kgf-mm}$ 로서 모재의 77 %였다.

3) 겹침이음 용접에서 최고 인장-전단강도 및 흡수된 전에너지를 나타내는 공구는 AL24로서 어깨의 지름  $9 \phi \text{mm}$ , 핀의 지름  $3 \phi \text{mm}$ , 핀의 길이 3.6mm 였다.

4) 파단의 양상은 박판 강철재의 점 용접과 유사하며 모재 속으로 압입이 없는 경우의 시편에서 인장축 방향의 인장하중에 의해 용접선 위에 발생한 굽힘 모멘트의 영향으로 추정되는 하중에 의해 겹침이음 용접부위가 상하 양면에

서 시편의 처짐과 함께 용접면의 전단분리가 이루어 졌다.

### 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 commecial, 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.
- 8) S.K.Jang and S.H.Shin, "A Development  
of Optimizing Tools for Friction Stir  
Welding with 2mm Tick Aluminum Alloy  
using a Milling Machine", Journal of The  
Korean Society of Marine Engineers,  
Vol.25, No.4, pp.791-796, 2001