

2mm^t 알루미늄합금재의 겹치기이음을 위한 마찰교반용접의 실험적 연구

장 석 기[†]

(원고접수일 : 2002년 11월 26일, 심사완료일 : 2003년 7월 6일)

An Experimental Study on Lap Joint using FSW with 2mm^t Aluminum Alloy Plate

Seok-Ki, Jang[†]

Key words : Friction stir welding(FSW:마찰교반용접), Backing plate(배판), Guide plate,
(안내판), Lap joint(겹치기이음), Butt joint(맞대기이음)

Abstract

This paper shows the possibility of performing Lap joint using the friction stir welding with 2mm^t aluminum alloy plate and the determination of tool-dimensions for FSW in milling machine. This research also is reported on obtaining the tensile-shear strength, 91.3 (MPa) and the energy absorption, 26.3 (J) for Lap jointed specimen. The optimal tool-dimensions and method for Lap joint using FSW is as follows: each diameter of shoulder and pin is 9 φ(mm) and 3 φ(mm), the length of pin is 3.6(mm). Pressing the shoulder of tool into original base metal is not reasonable.

1. 서 론

얇은 강판재의 겹치기 이음(Lap joint)에는 두 부재의 일부를 겹쳐서 부재의 표면을 용접하는 저항 점 용접(Resistance spot welding) 과 두께의 면에 필릿 용접한 것이 있다. 겹치기 이음은 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 겹치기

이음이 실용적인 면에서 거의 전무한 상태이다.

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

[†] 책임저자(목포해양대학교 기관시스템공학부) E-mail:jangsk@mmu.ac.kr, T:061)240-7093

가스메탈 아크용접(GMAW)이나 일반적인 용접으로 알루미늄을 접합하는 경우에는 용접속도가 느리고 생산성이 낮으며 용접성이 저하한다. 반면에, 마찰 교반용접(FSW)은 최근에 발명되고 개발되어 잠재적으로 유용한 새로운 용접기술이며, 이전에는 공동(voids), 균열 또는 뒤틀림(distortion)없이 신뢰할만한 용접을 한다는 것이 대단히 어려웠던 많은 재료들에 대해서 용접이 가능하게 되었다^{1~7)}. 따라서 생산현장에는 이 기술을 적용할 수 있도록 다방면에서 시험적인 연구가 수행되고 있다⁴⁾.

본 논문에서는 밀링 머신을 이용하여 겹치기 이음에 대한 마찰교반용접을 실시하고 2mm^t 알루미늄 합금 판재에 대한 용접용 최적공구의 치수를 실험적으로 결정하고 겹치기 이음의 가능성을 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 마찰교반용접법의 원리 및 실험장치

가. 마찰교반용접의 원리

겹치기 이음에 대한 교반용접을 수행하기 위하여, 두 개의 2mm^t 박판 알루미늄 판재를 필요한 용접 폭 만큼 겹쳐서 백킹플레이트(backing plate)위에 놓는다. 이 때 판재 상하부 공간에는 모재판재가 지지되고 용접선이 유지되도록하기 위해 모재판재와 두께가 같은 안내판(guide plate)을 장착한다. 접합될 면들이 마찰 교반용접 중에 공구의 회전력을 받을 때 분리되지 않도록 단단히 고정한다. 특별한 형상의 돌출 핀을 갖춘 원통-계단형 특수용접공구가 회전하면서 천천히 이음선상으로 나아가게 한다. 핀의 길이는 대체로 용접 깊이와 거의 같게 제작한다. 회전 핀이 피용접재 표면을 접촉하자마자, 회전 핀이 밀착 접촉된 재료에 대단히 큰 마찰열을 발생하게 된다. 따라서, 자연스럽게 재료의 기계적인 강도는 낮아지게 된다. 적용된 하중 하에서 특수공구 핀의 경로 위에 있는 재료를 단조하고 밀어내게 된다. 피용접재 표면과 특수공구의 Shoulder가 거의 밀접한 접촉상태에서 이러한 현상이 계속된다. 이 접합에서, 특수공구의

회전부 Shoulder와 핀에 의해 발생한 마찰열은 공구 Shoulder 바로 아래와 핀 근방에 크게 소성화(plasticized)된 층(layer)을 만들게 된다. 밀링 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 추적면(trailing face)으로 운반된다. 결론적으로, 마찰용접 공구가 용접선을 따라 진행됨으로서, 연질의 소성상태(soft plastic state)로 공구 바로 앞에 있는 인접한 접합면을 마찰 가열하게 된다. 공구는 계속적으로 산화 막을 깨뜨리면서 접합선을 분쇄하고 교반한다. 그리고 공구의 추적 쪽(trailing side)에 있는 분쇄되었던 재료를 재결합시킨다. 공구 추적 면에서 재료는 냉각되어 고상 용접부(solid-phase weld)를 형성한다. 이 모든 것이 합금의 용점보다 훨씬 낮은 온도에서 일어난다.

본 실험에 사용된 재료는 알루미늄합금A1050의 두께가 2(mm) 인 판재로서, 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition (wt%) for 1050 aluminum alloy

Element	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti	Al
Wt(%)	0.15	0.14	0.029	0.06	0.018	0.36	0.017	98.99

나. 실험장치

Fig. 1은 밀링머신(Milling machine)에 교반용접용 공구가 장착된 사진이며, Fig. 2는 밀링척(milling chuck)에 장착된 용접공구 및 실험장치의 구성을 보여준다. 실험을 위하여 본 장비의 최저 이송속도를 35(mm/min)으로 선정하고 회전속도는 최대의 마찰열을 발생시키기 위하여 2240(rpm)으로 고속회전 시켰으며 용접을 위한 두 판재의 수평을 바르게 유지하며 열전달의 효과를 고려하여 적절한 백킹플레이트를 선택하였다. 또한 적절한 용접선을 확보하기 위하여 모재와 두께가 같은 안내판을 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.



Fig. 1 Picture of Milling machine fixed tool for FSW

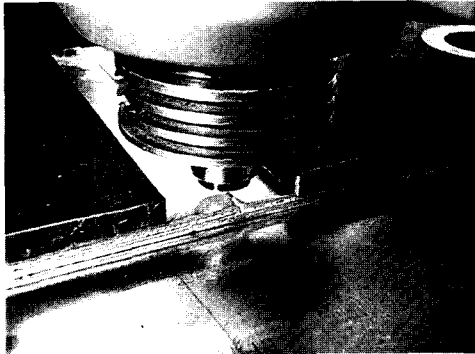


Fig. 2 Experimental set-up with a milling chuck

2.2 마찰교반용접용 공구 제작

마찰교반용접용 특수공구의 측면형상 및 각부의 명칭은 Fig. 3에 나타낸 것과 같다. 공구의 형상은 밀링 척에 고정하기 위하여 원형 단면봉을 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 전길이에 중 아래쪽으로부터 1/4

지점에 해당하는 곳에 방열판(radiation fins)을 가공하여 공구 봉에 끼워 고정하였다. 용접면을 깨끗하게 하기 위해 공구의 Shoulder부분을 연마 가공하고 마찰용접 공구의 Shoulder 직경과 핀의 직경 및 길이를 Table 2와 같이 다양하게 가공 제작하였다.

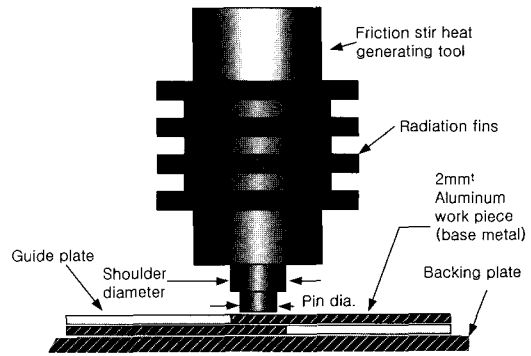


Fig. 3 Schematic for tool and base metal

2.3 실험방법

가. 접이기 이음을 위한 마찰교반용접과 리벳(Rivet)접합

Fig. 3과 같이 밀링 머신의 베드 위에 2mm^t 알루미늄 판재인 두 모재(work piece)를 강재(steel plate)의 접이기 이음에 대한 점 용접의 경우와 같이 가지런히 백킹플레이트 위에 올려놓은 뒤 적절한 용접선을 확보하기 위하여 모재와 두께가 같은 2mm^t 안내판을 상하에 어긋나게 모재와 함께 배열한 다음, 이 안내판을 모재와 단단히 밀착시킨다. 그리고 클램프를 사용하여 가고정(假固定) 하고 밀링 베드를 움직여 용접공구의 핀 중심과 겹침 용접시 공구의 Shoulder가 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 마찰 교반용 공구를 밀어 넣고 공구의 Shoulder가 모재 표면에 완전히 밀착될 때까지 아래 방향으로 공구를

움직여 준다. 이 때 밀링 베드 속도, 즉 용접 이송 속도를 35(mm/min)으로 이송시키면 접합될 선을 따라 겹치기 이음을 위한 마찰 교반이 진행된다.

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

Tool	Shoulder ϕ (mm)	Pin length (mm)	Pin diameter ϕ (mm)	Pressing depth (mm)
AL01	7 ϕ	3.6	5 ϕ	0.0
AL02		3.5	4 ϕ	0.0
AL03				0.2
AL04		2	4 ϕ	0.0
AL05				0.2
AL06		1.8	4 ϕ	0.0
AL07				0.2
AL08		3.5	3 ϕ	0.0
AL09				0.2
AL10		2	3 ϕ	0.0
AL11				0.2
AL12		1.8	3 ϕ	0.0
AL13				0.2
AL14	8 ϕ	3.5	5 ϕ	0.0
AL15				0.2
AL16		2	5 ϕ	0.0
AL17				0.2
AL18		1.8	5 ϕ	0.0
AL19				0.2
AL20		3.6	4 ϕ	0.0
AL21			3 ϕ	0.0
AL22	9 ϕ	3.6	5 ϕ	0.0
AL23			4 ϕ	0.0
AL24			3 ϕ	0.0

최적공구를 선정하기 위하여 Table 2와 같이 핀의 직경(ϕ), 핀의 길이 (mm), Shoulder의 직경(ϕ), 모재 속으로 Shoulder를 0.2(mm) 압입시키는 것 등의 유무를 변수로 하여 각 조건에 대해 2회씩 이상 실험적 겹치기 이음 마찰교반용접을 실시하였다. 마찰교반용접에 의한 겹치기 이음의 상대적 강도비교를 평가하기 위하여 1점, 2점 및 4점의 리벳 접합을 핸드 리벳터의 공구를 사용하여 실시하였다.

나. 시편 제작

겹치기 이음에 대하여, 용접성이 양호한 최적공

구의 치수 및 방법을 비교 확인하기 위해 다음과 같은 시험편을 제작하였다. 즉, 2mm^t 박판 알루미늄 모재의 인장시편, 마찰교반 용접법으로 가공된 맞대기이음⁸⁾ 및 겹치기이음의 인장시편, 그리고 3종의 리벳(1점, 2점, 4점) 접합된 인장시편 등이다.

Fig.4는 겹치기 이음 인장 시편의 치수 및 경도 측정위치를 그린 그림이다.

다. 경도 및 인장 진단시험

경도 시험에 사용된 마이크로 경도시험기는 SHIMADZU사의 HMV-2시험기로서 배율은 X40으로, 136°의 다이아몬드 피라미드 압자를 사용하고 하중과 하중시간을 각각 1.961(N) 및 10(sec)로하여 겹치기이음 용접부위의 용접금속부, HAZ 및 모재 등에 대한 경도를 측정하였다 (JIS Z2244).

또한, 겹치기이음된 시편과 리벳 접합된 시편의 강도를 평가하기 위하여 인장-전단시험을 실시하였다. 이 시험에 사용된 인장시험기는 동적 재료시험기로서 유압식 인스트롱(INSTRON 8516)이며, 9시리즈(IX series) 프로그램을 이용하여 컴퓨터 제어로 준정적 상태에서 인장이 이루어지도록 3(mm/min)의 속도로 변위 제어하였다.

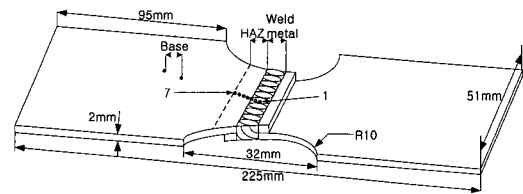


Fig. 4 Dimension of tensile test specimen and Vickers hardness measuring points of welding zone on Lap joint specimen

Table 3 Vickers hardness of weld metal, HAZ and base metal on Lap joint specimen

Measuring point	Bead			HAZ				Base metal	
	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. 실험결과 및 고찰

3.1 겹치기 및 리벳 이음부의 외형특성

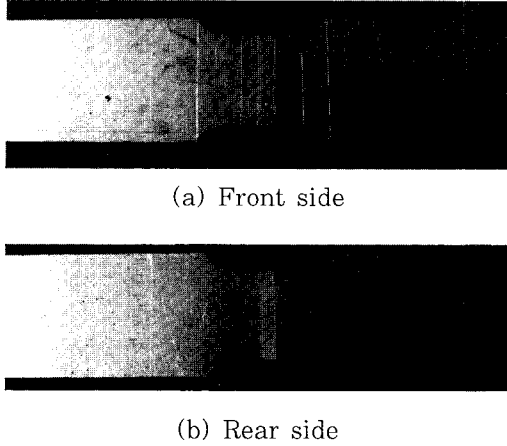


Fig. 5 Example of tensile test specimens Butt-jointed by FSW

Fig. 5는 맞대기이음 인장시편⁸⁾의 전면과 후면을 보여준다. 용접면이 매끄러운 것을 볼 수 있다.

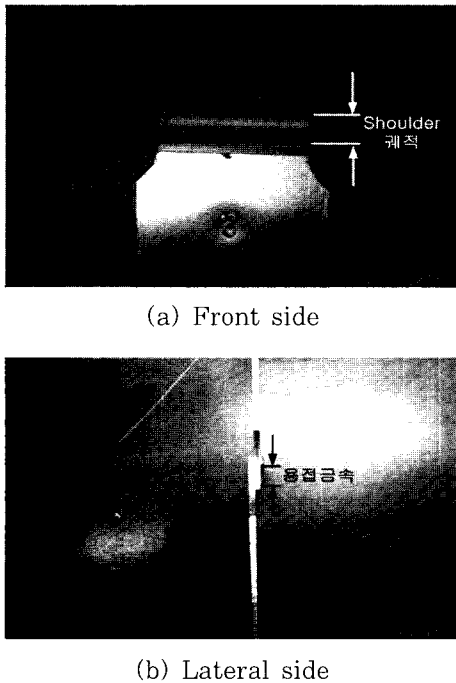


Fig. 6 Example of test specimens Lap-jointed by FSW

Fig. 6은 겹치기이음 인장시편의 전면과 측면(lateral side)을 보여준다. 전면의 사진에서는 공구의 Shoulder로 모재를 압입하여 발생된 비드 및 용접금속의 모양과 Shoulder가 지나간 케적을 볼 수 있다. 측면의 사진은 Shoulder의 케적과 모재가 압입되어 전체 두께 4.0(mm)가 0.2(mm)만큼 얇아진 상태와 용접금속부를 확인할 수 있는 사진이다.

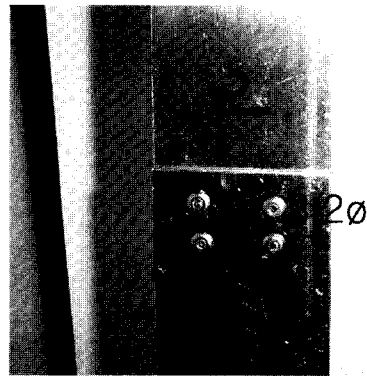


Fig. 7 Example of specimen jointed by 4 point rivet

Fig. 7은 4점 리벳 접합의 인장시편을 보여준 사진이다. 리벳접합의 하나로서 겹치기이음에 사용된 알루미늄 판재에 핀의 지름이 3.2φ(mm)인 리벳을 접합한 시편이다.

3.2 겹치기이음 시편의 용접부 경도

Fig. 4에서는 용접부의 비커스 경도측정 위치를 점으로 나타내고 있다. 겹치기이음 시편의 용접금속 중심을 기준점으로 하여 순차적으로 2(mm)씩 떨어진 위치, 즉 용접금속에 3점, HAZ에 4점 및 모재에 2점에 대한 비커스 경도값을 Table 3에 나타내었다. 각 측정구간에서의 용접부위의 평균 경도값을 비교해 보면 모재에 대한 경도값 Hv 40.2에 비해 열영향부의 경도 Hv32.4는 19%정도 경도가 낮고 반면에 용접금속 경도값 Hv41.8 보다는 4%정도 경도가 낮다.

열영향부에서 가장 낮은 경도 값을 나타내며 용접금속부가 큰 경도값을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.3 최고하중, 인장-전단강도 및 흡수에너지의 비교

가. 시편 종류에 따른 최고하중

마찰 교반용접법에 의한 맞대기 이음⁸⁾과 겹치기 이음 시편, 그리고 1점 리벳, 2점 리벳과 4점 리벳접합 시편에 대한 인장시험의 결과인 하중-변위 선도로부터 최고 하중을 구하였다.

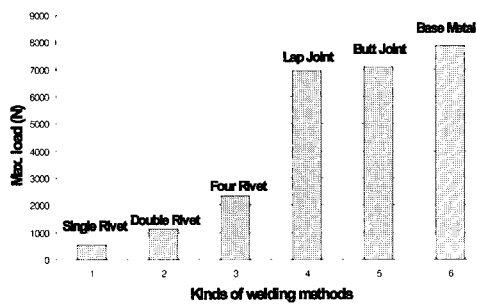


Fig. 8 Comparison of maximum loads for tensile specimens welded using different joint methods

Fig. 8은 서로 다른 접합 방법으로 용접된 시편에 대한 하중-변위의 선도에서 최고 하중만을 비교한 그래프이다. 상기의 그래프에서 모재의 최고 하중 7869(N)을 100%라 했을 때, 맞대기이음 7085(N)은 90.0%, 겹치기이음 7040(N)은 89.5% 그리고 4점 리벳 접합 2480(N)은 31.5%를 보였다. 즉 4점 리벳 접합 시편의 최고 하중은 약 2480(N)이고, 교반용접에 의한 겹치기이음 시편의 최고 하중은 7040(N)으로서, 4점 리벳 접합의 약 3배 정도로 마찰 교반용접에 의한 겹치기이음의 이음성은 맞대기이음과 함께 양호한 것으로 판단할 수 있다.

나. 겹치기이음 시편들에 대한 극한응력과 흡수된 에너지

Fig. 9는 마찰교반용접용 특수공구를 Table 2와 같이 여러 가지 치수로 가공하여 용접된 겹치기이음 시편에 대한 극한응력(ultimate stress)의 비교를 통하여 겹치기이음에 적합한 공구치수를 선정하기 위한 그래프이다. 모재의 인장강도인 103.6(MPa)과 비교하여 85%인 88.0(MPa)이

상의 강도를 갖는 시편을 가공한 공구의 부호를 Fig.9에서 선택하면 다음과 같다. 즉, AL05, AL07, AL08, AL10, AL11, AL19, AL21 및 AL24가 여기에 해당된다.

여기서 각 부호는 Table 2에서 공구의 치수와 압입정도를 나타낸다. 예로서 AL05는 Shoulder 7φ(mm)와 핀의 직경 4φ(mm) 및 길이 2(mm)인 공구치수를 나타내며, 0.2(mm)를 압입하여 마찰교반용접을 실시한 것을 말한다. 또한 AL은 용접에 사용한 재료인 알루미늄합금을 표시한다.

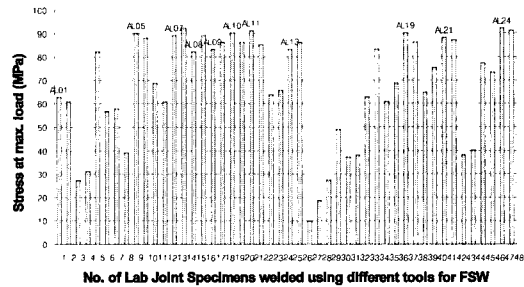


Fig. 9 Comparison of ultimate stresses of Lap joint specimens using different tools for FSW

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 목적으로 각각의 공구치수를 사용하여 마찰교반용접법으로 겹치기이음된 시편에서 인장시험중 흡수된 에너지를 비교한 그래프이다. 모재로 제작된 시편의 흡수에너지 34.1(J)과 비교하여 에너지 흡수율이 75%인 25.6(J) 이상을 갖는 시편을 가공한 공구의 부호만을 선택하면 다음과 같다. 즉, AL01, AL05, AL08, AL10, AL19 및 AL24가 해당된다.

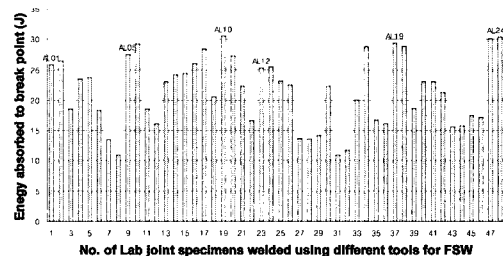


Fig. 10 Comparison of energy absorption levels for Lab jointed specimens using different tools for FSW

Fig. 9와 Fig. 10을 통하여 선택된 공구에 의한 실험결과만을 Fig.11에 나타내었다. 선택된 공구에 의한 각 시편의 최고 인장전단응력과 흡수에너지를 함께 표시하여 값을 비교하고 가장 적절한 공구의 치수를 결정하기 위한 그래프이다. Fig. 11에서 최고 인장전단응력 및 흡수에너지가 동시에 양호한 시편으로서 가장 바람직한 공구는 강도가 91.3 (MPa)이고 흡수에너지는 26.3 (J)인 AL24 임을 알 수 있다. 부호 AL24 인 공구의 치수는 Shoulder가 9 ϕ(mm), 편의 지름 및 길이가 각각 3 ϕ(mm), 및 3.6(mm)이다.

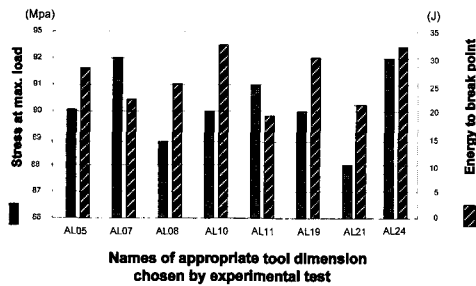


Fig. 11 Comparison of both stress and energy on specimens for selecting relevant tool dimensions for FSW

3.4 겹치기이음 시편의 파괴 거동

Fig. 13은 맞대기이음⁸⁾, 인장-전단시험 후 시편의 파괴 모습을 보여준 사진이다.

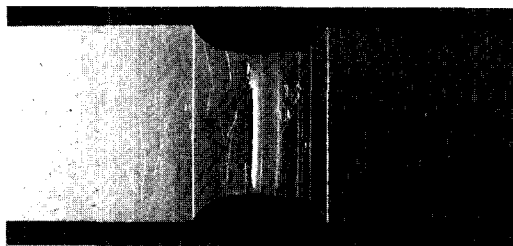
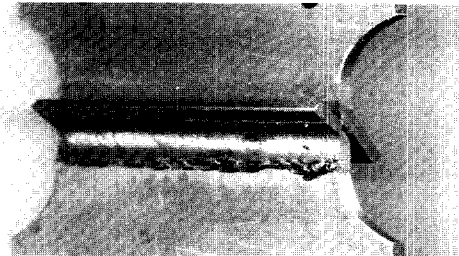


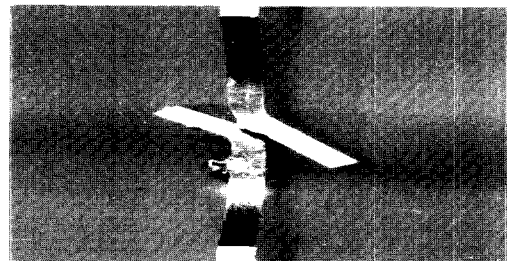
Fig. 13 Fracture appearance of the tensile test specimen Butt jointed by FSW⁸⁾

시편의 파괴는 공구 Shoulder가 지나간 바로 옆인 열영향부에서 발생하였다⁸⁾. 즉, 용접금속 및 모재의 경도에 비해 상대적으로 낮은 경도를 나타낸 HAZ에서 파괴가 일어났다.

Fig. 14는 겹치기이음 시편에 대해 인장전단시험한 후에 용접금속의 대변형의 모습과 분리 파괴된 상태의 사진이다. 인장시험중 겹치기이음부는 하중선과 시편의 두께 정도의 거리 2(mm)의 편심이 존재하므로 하중이 가해지면 겹치기이음부 위에 시편의 두께 방향으로 굽힘 모멘트가 발생한다. 겹치기이음된 시편이 모멘트를 받아 인장선상에 대해 수직방향으로 크게 변형되고 또한 점차 하중선과 일치해 가면서 용접금속이 대변형된 것으로 사료된다. 또한 인장하중에 의하여 시편에 가해지는 인장력과 모멘트의 합력으로 겹치기이음부의 용접금속부가 분리 파괴 되어가는 것으로 사료된다.



(a) Fracture of front face



(b) Fracture of lateral face

Fig. 14 Photograph of Fracture appearance of tensile shear test specimen Lap jointed by FSW

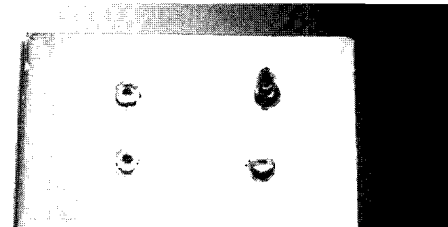


Fig. 15 Fracture appearance for 4 points Rivet joint

Fig. 15는 4점 리벳 접합의 시편에 대한 인장시험 후 파단 모습으로 리벳 핀이 전단하중에 의해 파괴된 사진이다. 시편에 인장력을 가하면 리벳접합된 부분은 인장력과 모멘트의 합력이 작용한다. 시편접합부에 가해지는 이들 합력이 하중인장선에 대해 직각방향으로 작용하는 모멘트에 의해 변형되기 전에 리벳 핀이 건널 수 있는 전단강도가 작아 전단력에 의해 핀들이 전단파괴된 것으로 사료된다.

4. 결 론

2mm^t의 알루미늄합금 판재의 겹치기이음에 대한 시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모재의 경도 Hv40.2에 비해 HAZ부가 가장 낮은 Hv32.4를, 용접금속부에서 가장 큰 Hv41.8의 경도 값을 보였다.
2. 겹치기이음 인장시편의 최고 하중, 인장 강도 및 최대 흡수에너지는 모재의 것들과 비교하여 각각 89.5%, 88% 및 77%를 나타내었다. 따라서 마찰교반용접법에 의한 겹치기이음용접에 대한 실용성이 있다고 사료된다.
3. 최적공구의 치수는 Shoulder의 지름이 9φ(mm)이고 핀의 지름과 길이는 3φ(mm)와 3.6(mm)이다.
4. 파단의 거동은 용접금속부 위에 발생한 굽힘 모멘트의 영향으로 추정되는 하중에 의해 겹치기이음 용접부위가 상하 양면에서 두께 방향으로 큰 굽힘변형과 함께 인장되어 용접금속부가 전단분리된 것으로 사료된다.

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 pp.41-45, 1996.
- [5] Hinrichs, J. F., Noruk, J. S., McDonald, W. M., and Heideman, R. J., "Welding Method for Aluminum", Esab AB, Sweden, Svetsaren, No. 3, 1995.
- [6] Knipstrom, K-E., Friction Stir Welding Process Goes Commercial, Welding Journal, Vol.76, No.9 pp.55-57, 1997.
- [7] Midling, O. T., "Material Flow Behaviour and Micro-structural 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 Thick Aluminum Alloy using a Milling Machine", Journal of The Korean Society of Marine Engineers, Vol.25, No.4, pp.791-796, 2001

저 자 소 개



장석기 (張石基)

1951년생, 1973년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1988년 전남대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1998. 1~1999년 2 University of South Carolina 연수 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수