

알루미늄합금의 마찰교반접합 및 그 적용 Friction Stir Welding of Aluminium alloys and Its Application

연윤모* , 정승부** , 박종목***
Yeon, Yun-Mo Jung, Seung-Boo Park, Jong-Mok

Abstract

The friction stir welding technique is a derivative of conventional friction welding, which enables the advantages of solid-phase welding to be applied to the fabrication of long butt and lap joints, with very little postweld distortion. Friction stir welding is a remarkable new welding technique for joining aluminum alloys and has the potential for welding other ferrous materials. It has already been developed beyond a laboratory curiosity and has been proved as a potential practical welding technique offering low-distortion, high-quality, low-cost welds from simple concept machine tool welding equipment.

To bring this remarkable method of welding aluminum alloys to the attention of industry, this article introduces the basic principle of friction stir welding, pointing out the practical advantages and most important of all, describes the exceptionally good metallurgical and mechanical properties.

1. 서론

FSW(마찰교반접합)기술은 1991년 영국용접연구소(TWI)에 의해 개발된 새로운 고상접합방법으로서 그 기술은 마찰용접(Friction Welding, FW)에서 유래되었다^{1,2)}고 할 수 있다. 마찰용접은 1957년 개발된 이래, 접합효율 및 작업효율이 우수하여 신뢰성있는 접합방법으로서 회전체(환봉 및 파이프)의 접합에 광범위하게 사용되어 왔으나³⁻⁶⁾ 마찰용접은 최소한 접합하려는 한쪽이 회전 가능하여야 한다는 제한이 있어 왔다. 한편, 종래의 용융용접 방법으로 고온균열감수성이 높은 알루미늄(Al)합금을 용접하는 경우에는 균열 및 기공의 발생 등으로 어려운 점이 많았다.

FSW기술은 이러한 여러 가지 문제점등을 개선한 획기적인 고상접합 방법으로서 용가재를 사용하지 않는 비소모성 접합방법일 뿐 아니라 균열발생 및 용접변형이 적고 흠 및 소음의 발생 없이 고품질의 접합부를 얻을 수 있는 환경 친화적 접합방법이기도 하다.

* 수원과학대학 자동차 용접과 교수, 정회원

** 성균관대학교 금속재료공학부 교수

*** 한국철도차량(주) 중앙연구소 수석연구원

2. 원리 및 방법

FSW기술의 원리는 Fig.1에 나타내듯이 피접합재를 받침판 위에 고정시킨 후, 회전하는 접합핀을 피접합재 중에 삽입하여 마찰발열에 의해 접합재를 연화시키고 접촉부를 이동시킴에 의해 2개의 부재를 혼합시켜 접합시키는 것으로 재료의 소성유동을 이용한 접합방법이다. 이 접합법은 Al합금의 경우, 용융용접에 비하여 3가지 야금학적 이점이 있다¹⁾. 첫째로 고상접합이므로 용융용접에서 생길 수 있는 균열(액화균열 또는 응고균열)을 방지할 수 있고 두번째로 용융금속의 증발과 같은 합금원소의 손실이 없으며 세번째로 접합부의 결정립이 모재의 경우보다 미세하다는 점이다. 따라서 알루미늄과 같이 용융용접이 어려운 재료에의 적용이 용이하여 향후 이들 재료를 접합할 수 있는 효과적인 방법으로 기대된다.

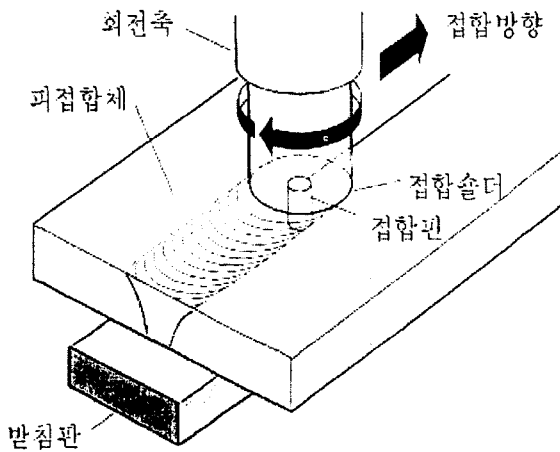


Fig.1 Schematic of friction stir welding tool

들의 형상 및 상세한 접합조건의 사용은 TWI의 특허를 사용하는 업체에만 제한되고 있다.

현재, 스웨덴의 ESAB사가 FSW용접기를 유일하게 생산, 판매하고 있다. 용접길이는 20m까지도 가능하고 주축모터는 상부에 놓고, 기어 및 벨트로 회전수(수100~약1500rpm) 및 접합속도를 변속하고 있다. 접합속도는 75mm/min로 비교적 빠르며 판두께 6mm의 5000계 Al합금의 경우, 회전수는 수100rpm이다. 장치중 제일 중요한 부분은 접합솔더 및 접합핀의 형상인데 그 제원은 잘 알려져 있지 않다. 교반을 행하는 접합솔더는 약간의 전진각(약5°)을 이루고 있는데⁸⁾ 이는 접합솔더 및 접합핀의 수명개선 및 마찰에 의한 접합부의 소성유동을 촉진시켜 결함발생을 방지하기 위한 것으로 보고되고 있다⁹⁾.

3. 접합부 형상

이제까지 FSW은 주로 맞대기 형상의 접합에 적용되어 왔으나 Fig.2¹⁾에 나타내듯이 겹치기 등 여러 가지 형상의 접합에도 적용 가능하게 되어 제품설계에도 변화를 주리라 생각된다.

FSW의 주요장치는 회전축, 접합솔더, 접합핀으로 구성되어 있다. 여기서 접합핀의 길이는 피접합재의 판두께와 거의 같던가, 약간 짧으며 접합솔더는 절삭상태의 피접합재가 외부로 다량 배출되는 것을 방지하는 동시에 피접합재 표면과의 마찰열을 발생시키는 역할을 한다. 접합할 재료가 Al합금 또는 Mg합금의 경우, 접합솔더 및 접합핀의 재질은 주로 공구강(AISI H13, SKD61 등), 마르텐사이트계 스테인리스 강(STS440C)이 사용되고 있다⁷⁾

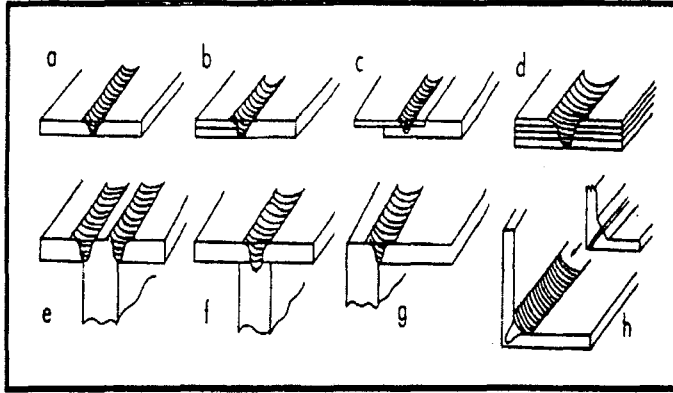


Fig.2 Joint configuration suited to friction welding

4. 접합조건 인자 및 접합부의 허용값, 온도이력, 용접입열

4.1 접합부의 온도이력 및 용접입열

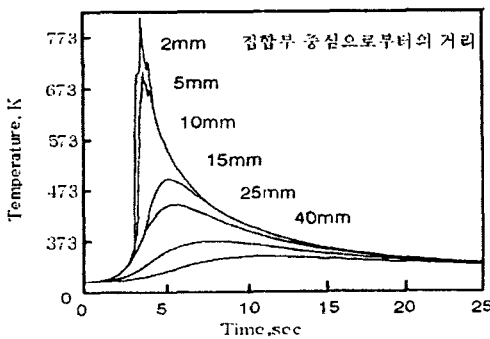


Fig.3 Thermal cycle of friction stir welding (welding speed: 0.5m/min, thickness: 4mm)

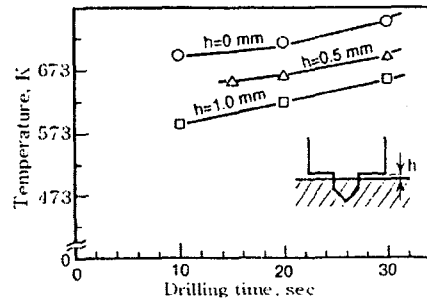


Fig.4 Relationship of drilling time and temperature during friction stir welding

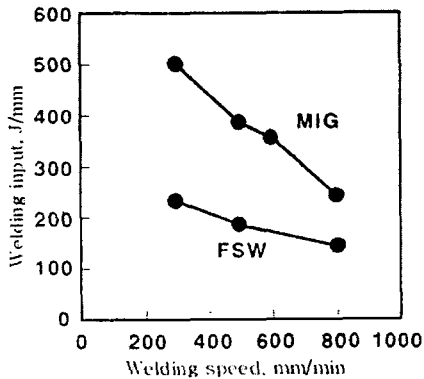


Fig.5 Relationship of welding speed and welding input

FSW접합부의 온도이력은 Fig.3¹⁰⁾에 나타내듯이 6063Al 합금의 경우, 최고온도가 500℃를 약간 넘고 있다. 또한, FSW개시시의 천공시간과 온도와 관계는 Fig.4⁹⁾에 나타내듯이 상기의 결과와 비슷한 최고 온도를 나타낸다. 따라서 이는 Al소재의 용점이하의 소성유동이 생길 수 있는 온도로 FSW은 고상접합공정임을 알 수 있다. FSW 접합시의 이러한 최고 온도(약500℃)는 MIG용접부의 온도(>660℃)에 비해 매우 낮은 편이다. FSW용접입열을 MIG의 경우와 비교한 것을 Fig.5¹⁰⁾에 나타낸다. 어떠한 용접속도에서도 FSW이 MIG의 경우에 비하여 용접입열이 거의

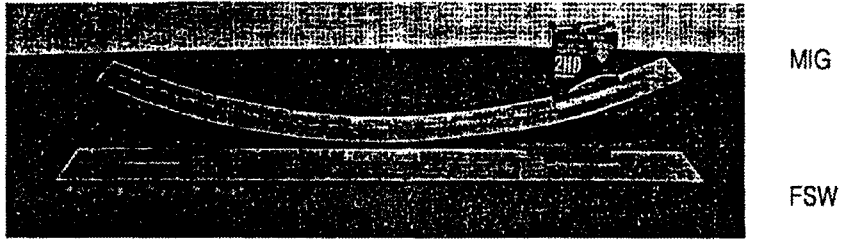


Fig.6 Comparison of FSW and MIG welds(6000 series, 2t)

절반 정도임을 알 수 있다. Fig.6¹¹⁾ 에 FSW와 동일한 조건으로 구속하여 MIG용접한 경우의 변형상태를 나타낸다. 재질, 두께 및 접합조건에 따라 약간차이는 있지만 FSW의 각 변형은 MIG 용접의 경우에 비해 약 1/5~1/7정도로 작으며 이는 Fig.3,4 및 5 에 나타냈듯이 접합부의 온도 및 용접 입열량이 낮기 때문일 것이다

4. 2 접합조건인자, 접합부의 이음부 형상 및 허용값

FSW의 접합조건인자를 Table.1¹¹⁾에 나타낸다. 기본적인 접합인자로는 회전수, 접합속도, 틀의 형상, 틀의 삽입깊이, 틀의 각도, 접합재의 구속방법 등이 있다. 이들의 조건을 접합재의 재질, 형상, 두께등에 따라 적절하게 결정된다.

Table Welding parameters of FSW

조건인자	선정 포인트	
틀의 형상 솔더 직경, 핀 직경 핀 길이	재질, 형상, 두께에 의해 결정	
틀의 삽입 깊이	핀 부	접합부의 두께와 동등하게 삽입
	솔더 부	접합재의 표면으로부터 약간 삽입하는 것이 바람직함
틀의 각도	약간의 전진각도를 설정하는 것이 바람직함	
틀의 회전수	재질, 형상, 두께에 의해 결정	
접합속도		
접합재의 구속		

6000계(Al-Mg-Si계) 및 5000계(Al-Mg계) 알루미늄 합금의 경우, 건전한 접합부가 얻어지는 접합속도와 틀의 회전수와의 관계를 Fig.7¹¹⁾에 나타낸다. 6000계 합금이 5000계의 경우에 비해 건전

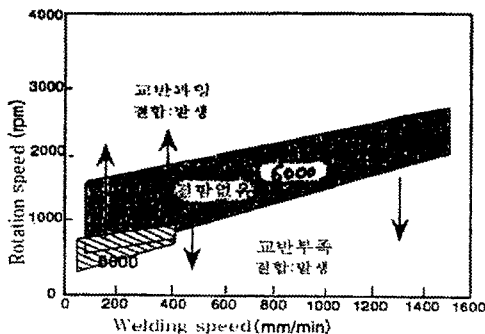


Fig.7 Relationship of welding speed and rotation speed (5t)

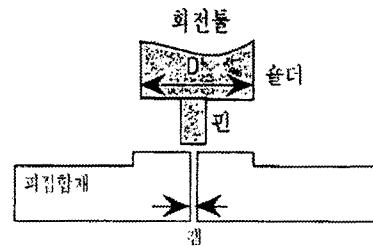


Fig.8 Configuration of FSW joints

한 접합부가 얻어지는 조건범위가 매우 넓음을 알 수 있다.

FSW 접합시 회전률의 편은 접합재중에 완전히 삽입되지만 솔더부는 약간만 삽입되기 때문에 접합재의 표면은 솔더부에 의해 절삭되고 약간 오목하게 되면 접합부의 기계적강도의 저하원인으로 될뿐만아니라 제품가치도 저하한다¹¹⁾. 따라서 Fig.8¹¹⁾에 나타내듯이 미리 접합부 근처를 약간 블록하게하여 접합중에 솔더에 의해 절삭되어 모재표면과 같은 높이로 평활하게 하는 것이 바람직하다. 이와 같이 약간 블록한 이음부 형상은 갭을 메우는 효과도 있다.

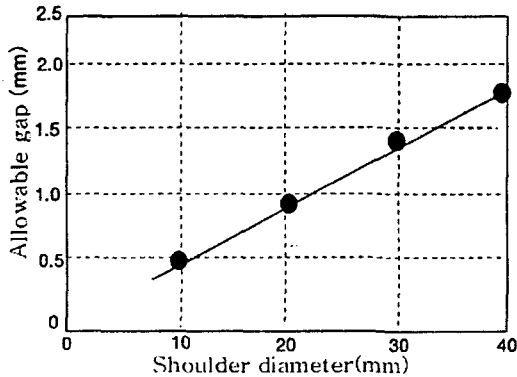


Fig.9 Relationship of shoulder diameter and allowable gap (6N01, 4t)

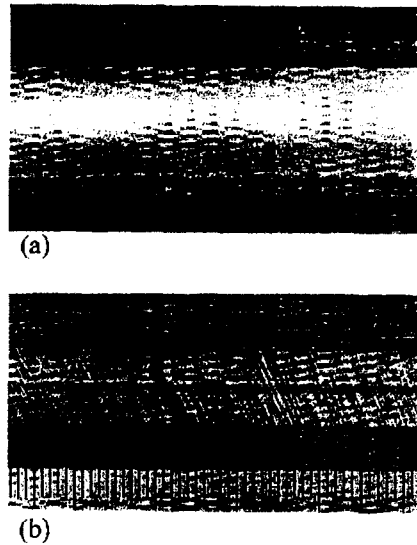


Fig.10 Surface of friction stir welded joints

FSW는 접합부의 갭이 없는 상태에서 접합하는 것이 이상적이지만 접합재가 길거나 가공정밀도가 좋지않은 경우에는 접합중에 갭이 생기는 경우가 있어 결합이 발생되기 쉬워진다.

Fig.9¹¹⁾ 에 결합이 발생하지 않는 접합부의 허용갭과 솔더의 직경과의 관계를 나타내듯이 솔더 직경이 커질수록 허용 갭도 커짐을 알 수 있다

5. 접합부의 특성

5.1 접합부의 조직

Fig.10¹²⁾은 6N01 Al합금(4.5t)을 FSW접합한 후의 표면 및 이면상태를 나타낸다. 표면에서는 리플선이, 이면에서는 접합핀에 의한 흔적이 보임을 알 수 있다.

Fig.11¹²⁾은 FSW접합한 7075 Al합금(3.2t)의 단면조직 및 소성영역의 개략도를 나타낸다. 중앙부(A)에서는 마찰가열과 심한 소성유동에 의한 동적 재결정영역이 형성되고 그 주변(B)에서는 소성 변형과 국부적인 재결정영역이 동반된 영역이 형성된다. 그리고, 이들 주변에 열 영향부(C)가 존재한다¹³⁾. FSW접합은 마찰열과 회전교반을 접합부에 주므로서 강한 소성유동이 생기며 접합부의 최대폭은 접합솔더의 직경에 의해 결정된다.

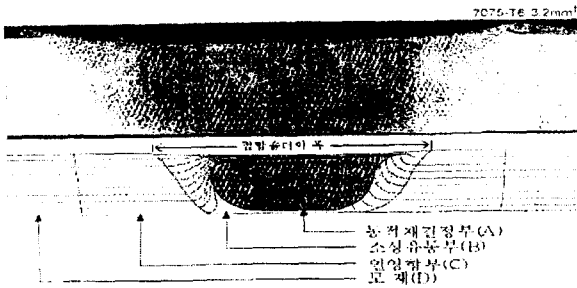


Fig.11 Typical cross-section of friction stir welded 7075(T6) alloy and schematic of the microstructural regions in a FSW butt joint.

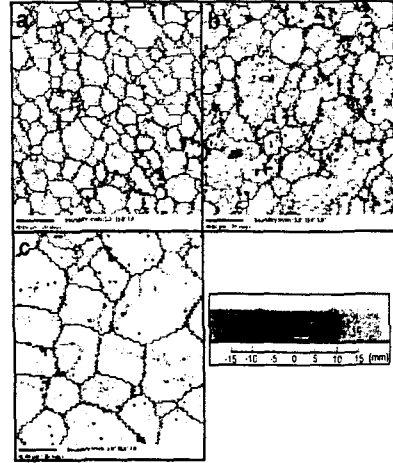


Fig.12 OIM maps at location "a" , "b" and "c"

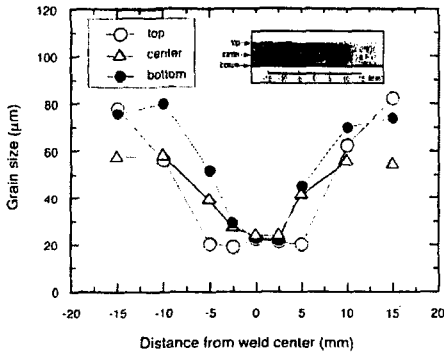


Fig.13 Horizontal grain size profiles obtained from OIM maps

5.2 접합부의 기계적성질

FSW접합부의 경도분포를 Fig.14¹³⁾에 나타낸다. 2014 및 7075 Al합금의 경우는 접합부 중앙부 근처의 열영향부에서 연화역이 형성되지만 비열처리성의 5083 Al합금의 경우는 연화현상이 발생하지 않는다.

FSW접합부의 충격값을 GMAW접합부 및 모재의 경우와 비교한 것을 Fig.15¹⁵⁾에 나타낸다. 충격 시험온도가 낮아 질수록 전반적으로 충격값은 감소하지만 FSW접합부의 충격값은 어떠한 시험온도에서도 GMAW 및 모재의 경우보다도 우수한 충격값을 나타내었다.

이러한 현상은 6N01 Al합금의 충격시험결과¹⁶⁾에서도 비슷하게 나타나고 있다. 이는 GMAW조적이 조대한 주상정으로 되는데 비하여 FSW접합부의 조직은 미세한 재결정 조직으로 되기 때문이라고 보고되고 있다¹⁵⁾.

접합핀 회전수 1500rpm, 접합속도 150mm/min으로 FSW을 행한 5083 Al합금 접합부의 피로강도는 Fig.16에 나타내듯이 MIG용접의 경우보다도 높았다. 또한, 접합핀 회전수 1500rpm, 접합속도 250~750mm/min으로 FSW을 행한 6N01(T5) Al합금(4t) 접합부의 피로강도도 Fig.17에 나타내듯이

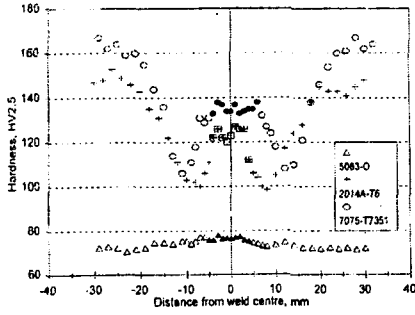


Fig.14 Hardness profiles of a FSW butt joint

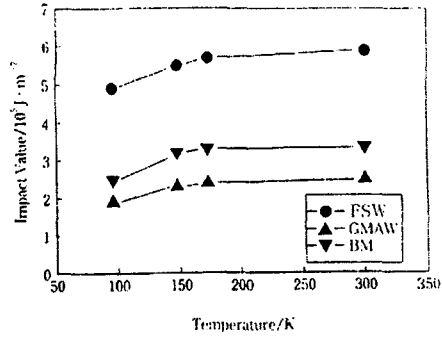


Fig.15 Impact properties at various temperature

모재와 MIG용접재의 중간정도 이었다. 이와 같은 현상은 FSW영역에서는 모재보다도 훨씬 미세한 5~10 μ m의 재결정조직의 형성에 기인하는 것으로 보고되고 있다¹⁷⁾.

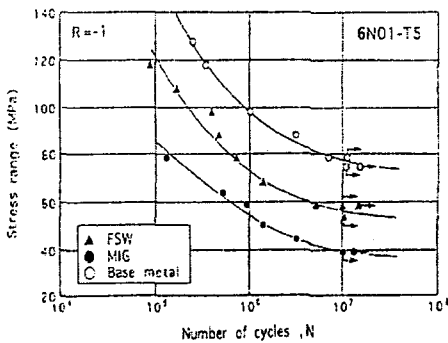


Fig.16 Fatigue properties of 6N01 welds

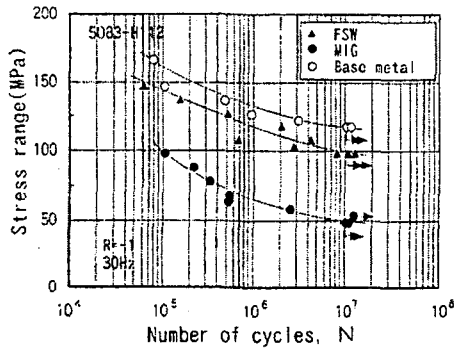


Fig.17 Fatigue properties of 5083 welds

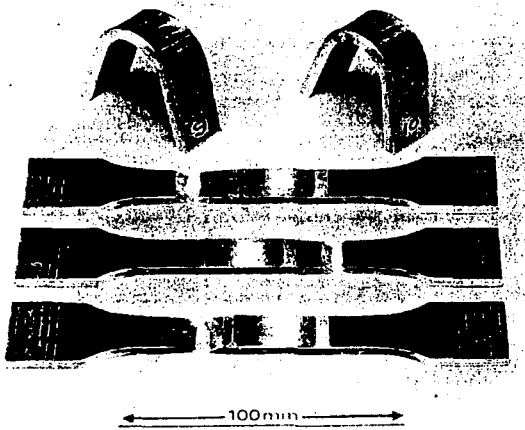


Fig.18 A bend (180°) and tensile tested welds made in 5083 alloy.

FSW방법으로 접합한 5083 Al 합금의 인장시험 및 굽힘시험(180°)후의 시편 형상을 Fig.18¹⁾에 나타낸다. 인장시험 후 파단위치는 열영향부에서 어느정도 떨어진 곳이며 굽힘시험 결과에서도 FSW접합부는 양호함을 보여준다. 또한 FSW를 행한 5083Al 합금의 강도 및 연성을 타 용접법(GMAW)의 경우와 비교한 경우¹⁵⁾에도 FSW 접합부가 어떠한 시험편 채취위치에서도 강도 및 연성이 GMAW용접법에 비하여 우수하였다. 이는 FSW방법에 의한 접합의 경우, 용접결함(기공 및 균열)의 문제가 거의 없기 때문이라 생각된다.

6. 적용분야

최근 FSW기술은 주로 고온균열의 발생위험성이 높은 석출경화형 AI합금과 같은 비철재료의 접합분야(선박, 항공우주, 고속철도객차 등)에서 적용되고 있다¹⁾.

스웨덴에서는 AI선박(6m×16m)의 패널부 용접에 1996년도부터 적용되고 있으며 노르웨이에서도 수10m급 고속페리의 패널부재의 판이음에 FSW를 적용하여 접합하고 있다¹²⁾. 미국에서는 항공우주산업분야에서 용접성이 좋지 않은 듀랄루민의 용접에 FSW를 적용하고 있다. 보잉사는 델타로켓 연료 탱크에 이 방법을 적용하고 있다¹⁸⁾. 일본에서는 철도수송기기 분야를 중심으로 FSW의 적용예가 증가하고 있다. 1997년 가을부터 7000계 신칸선의 floor판넬의 접합에 적용된 이래¹⁷⁾ 지하철 신 차량의 측면부재 및 선박용 부재 등의 접합에 적용시키고 있다.

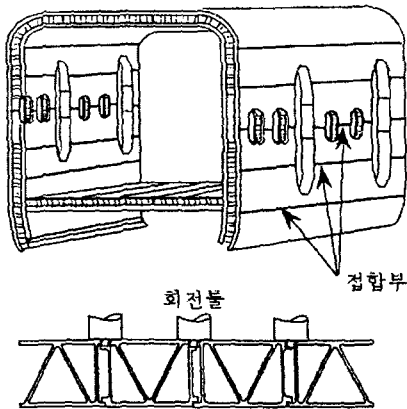
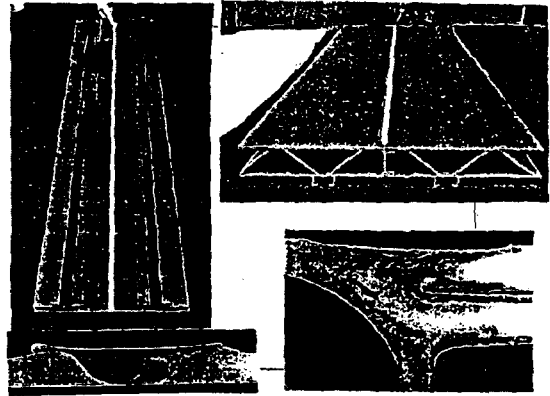


Fig. 19 Representation of friction stir welded train body and its welds



(a)single skin (L=2m) (b) double skin (L:2m)
Fig. 21 Friction stir welded body panels



Fig. 20 Train with friction stir welded body panels
(Hitachi)

루미늄합금제 차량부재(싱글스킨 및 더블스킨 구조)의 접합 예와 접합부의 단면을 나타낸다. 어떠

최근 철도차량의 구조재로서 경량화를 위해 알루미늄합금이 많이 사용되고 있다. 철도차량의 경우 긴 알루미늄형재(3~6t)를 종래에는 용융용접방법(MIG)에 의해 조립, 제작하여 왔으나 Fig.19¹¹⁾에 나타내듯이 직선 접합부가 많아 최근에는 FSW를 적용시켜 제작하려는 시도가 활발히 이뤄져 일본에서는 이미 실용화되고 있는 상태이다. Fig.20¹⁹⁾에 FSW를 적용하여 생산한 최근의 철도차량을 나타낸다.

Fig.21¹¹⁾에 FSW를 적용시킨 알

한 경우도 종래의 아크용접(MIG용접)으로 조립된 차량에 비하여 접합부뿐만 아니라 차량전체의 변형량이 약 1/5이하로 감소하여 미관이 좋은 차량의 제작이 가능하다고 알려지고 있다.

이상에서와 같이 철도차량산업에 FSW를 적용하는 주요한 장점 중에 하나는 비틀림변형이 극히 적고 종래의 용접방법을 사용한 경우에 비해 리플을 제거하는데 매우 효과적이라는 점이다.

7. 맺는말

이상에서와 같이 최근에 개발된 고상접합 방법중의 하나인 FSW의 사용에 의해 기존의 용융용접 방법으로는 용접이 곤란하다고 알려졌던 석출경화형 AI합금(특히 2000, 7000계)의 접합이 가능하게 되었을 뿐 아니라 접합부의 기계적 성질 등이 우수하여 주로 철도 객차, 선박, 항공우주와 같은 수송기기 분야를 중심으로 AI합금 동종재의 맞대기 접합에 사용되고 있다. 그러나 향후에는 자동차의 스페이스 후레임 및 수송탱크, AI제조분야, 교량 및 해양편의시설, 컨테이너, 냉각계통, 압력용기 등에 응용될 수 있으리라 보고되고 있다¹¹⁾. 더 나아가 향후에는 그 적용범위도 접합핀의 재질 및 그 형상의 개발 등으로 AI이외의 비철재료 뿐만 아니라 고온균열 감수성이 높은 철강재료로도 확대될 수 있을 것이라 생각된다¹⁸⁾.

8. 참고문헌

- 1) C.J.Dawes, W.M.Thomas : Welding J., 75-3(1996)pp.41-45
- 2) K.E.Knipstrom, B.Pekkari : Welding J., 76-9(1997)pp.55-57
- 3) 대한용접학회 : 용접.접합편람(1998)
- 4) 延 倫模, 中村 満: 추계 용접학회 발표 개요집 Vol.34 (1999)
- 5) 이 원배, 연 윤모, 정 승부: 춘계 용접 학회 개요집 Vol.35(2000) pp95-96
- 6) 이 원배, 연 윤모, 정 승부: 춘계 용접 학회 개요집 Vol.35(2000) pp97-98
- 7) 時末 光, 條田 剛 : 輕金屬, 49-6(1999), pp.258-262
- 8) K.Colligan : Welding Journal, July(1999), pp.229s-237s
- 9) 條田 剛 : 溶接學會誌, 67-4(1998), pp.60-63
- 10) 條田 剛 : 輕金屬溶接, 37-9(1999), pp.406-412
- 11) 岡村 久宣, 青田 也, 江角昌邦, 輕金屬, 50-4(2000), pp. 166-172
- 12) 古賀 信次 : 溶接學會誌, 69-3(2000), pp.17-21
- 13) C.J.Dawes : Proc. of the 6th Int. Symp., JWS, (1996), Nagoya
- 14) Y.Sato, H.Kokawa, M.Enomoto, S.Jogan : Metall. & Mater. Transaction A 30-9(1999), pp.2429-2437
- 15) 成願 茂利, 腹部 光男, 中田 一博 : 溶接技術, No.12(1999), pp.97-100
- 16) 夏木 正敏 : 輕金屬溶接, 36-2(1998), pp.25-79
- 17) 熊谷 正樹, 田中 直 : 溶接學會全國 大會概要, 第65集(1999-11), pp.554-555
- 18) Johnsen : Welding J., 78-2(1999), pp.35-39
- 19) J. G. Wylde: J. JILM 50 (2000.5) pp. 189-197
- 20) 연윤모: 대한용접학회지, 17-6(1999), pp.112