

특 집 : AI 합금의 용접기술

알루미늄합금에의 Friction Stir Welding의 적용

연운모·정승부·장용성

Application of Friction Stir Welding to Aluminium Alloys

Yun-Mo Yeon, Seung-Boo Jung and Woong-Seong Chang

1. 서 론

알루미늄(Al)합금은 경량으로 비강도가 우수하여 항공기, 철도차량, 선박, 건축 등의 분야에 폭넓게 사용되고 있다. 그러나, Al합금을 용융용접하여 구조물을 제작하는 경우, 용접열에 의한 변형 및 기공, 균열 등의 결함이 발생하기 쉬우며 고온균열감수성이 높은 시효성 Al합금에서는 이러한 용접결함 뿐만 아니라 접합부의 강도저하가 비교적 쉽게 발생한다고 알려져 있어 이에 대한 대책이 요구되어 왔다.

1991년, 영국의 TWI에서 이러한 Al합금의 용접상의 문제점을 획기적으로 해결할 수 있는 새로운 접합법 즉, 마찰에 의한 가열 및 소성유동을 응용한 Friction Stir Welding(FSW, 마찰교반접합)이 개발되었다³⁾. FSW 기술은 마찰용접에서 유래된 것으로서^{2,4)} 용접에 의한 변형이 극히 적고 용가재 및 실딩가스를 사용하지 않는 비소모성 접합방법일 뿐만 아니라 용접결함, 흠, 소음 및 유해광선의 발생없이 고품질의 접합부를 얻을 수 있는 환경친화적인 접합방법이기도 하다. 이러한 FSW기술은 철도, 선박, 우주항공 등의 수송기기 분야에서 급속히 주목을 받기 시작하여 이에 대한 적용이 미국, 일본, 유럽 등을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 FSW기술에 대한 관심은 증가되고 있으나 Al합금에의 적용에 대한 소개⁵⁻⁹⁾가 적다고 할 수 있다. 따라서, 본 보고에서는 Al합금의 FSW에 관한 이제까지의 보고를 정리하여 종합적으로 소개하고자 한다.

2. FSW의 원리 및 특징

2.1 원리

Fig. 1⁹⁾에서 나타내듯이 피접합재를 받힘판 위에

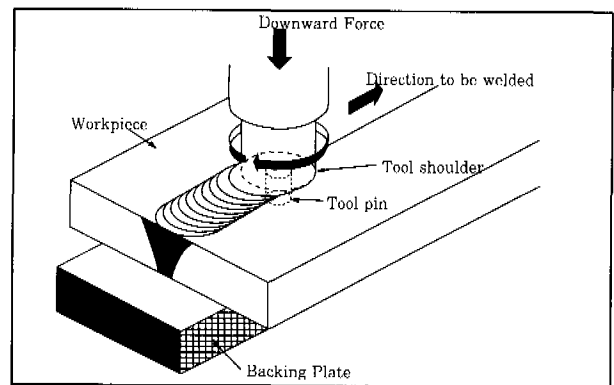


Fig. 1 Principle of friction stir welding(FSW)

강하게 고정시킨후, 접합틀을 일정속도로 회전시키면서 핀을 피접합재의 접합면에 압입하고 솔더의 밑면을 접합할 표면에 압착시키면 마찰열이 발생하게 된다. FSW는 이러한 마찰발열에 의해 피접합재를 연화시키는 동시에 접촉부를 이동시킴에 의해 2개의 부재를 혼합시켜 접합시키는 것으로 재료의 소성유동을 이용한 접합방법이라 할 수 있다. 즉, FSW의 원리는 피접합부를 편축면 및 솔더와의 마찰에 의해 가열하여 연화시키는 동시에 소성유동을 발생시켜 접합시키는 고상 접합방법이다. 접합틀은 솔더 및 핀으로 구성되어 있다. 솔더는 절삭상태의 연화된 피접합재가 외부로 배출되는 것을 방지하는 동시에 피접합재 표면과의 마찰열을 발생시키는 역할을 한다. 또한, 솔더는 약간의 전진각(약 3~5°)을 이루게 되는데 이는 솔더 및 핀의 수명개선 및 마찰에 의한 접합부의 소성유동을 촉진시켜 결함발생을 방지하기 위한 것이다¹⁰⁾. 솔더 및 핀의 재질로는 일반적으로 공구강(AISI H13, SKD11, SKD61 등) 및 마르텐사이트계 스테인리스강(STS 440C)이 사용되고 있다¹¹⁾.

핀의 개략적인 형상은 Fig. 2에 나타내듯이 스크류 타입의 나선형 형태이다¹²⁾. 이러한 나선형은 소성 변형된

피접합재가 접합된 주위로부터 완전히 빠질수 있도록 해주며 보이드가 없는 접합부를 형성하게 하여주는 역할을 한다. 또한, 핀의 길이는 피접합재의 판두께와 거의 같던가 약간 짧으며 루트부의 완전접합을 위해서는 핀이 받침판에 매우 가깝게 진행하도록 할 필요가 있다.

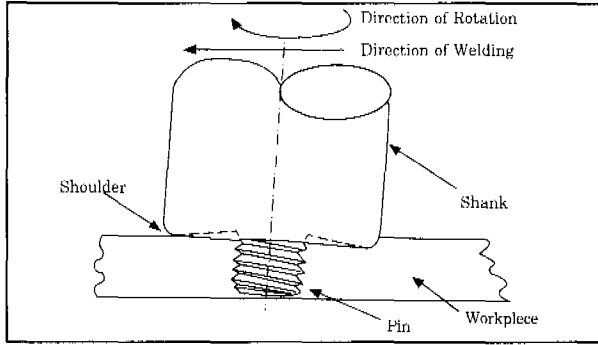


Fig. 2 Schematic of friction stir welding tool

2.2 특징

FSW는 Al합금의 경우, 용융용접에 비하여 3가지 야금학적 이점이 있다²⁾. 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 Al합금과 같이 용융용접이 어려운 재료에의 적용이 용이하여 향후 이들 재료를 접합할 수 있는 효과적인 방법으로 기대된다. FSW의 일반적인 특징을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Advantages and disadvantages of FSW technology.

장 점	
▶ 모든 Al합금을 용접이하의 저온에서 접합 가능하다.	
▶ 접합기구가 단순하고 접합인자가 적어 관리가 용이하다.	
▶ 용접입열이 작아 접합후의 변형이 아크용접에 비해 매우 작다.	
▶ 접합부에 덧살이 형성되지 않아 표면 및 이면이 평활하다.	
▶ 개선표면의 산화피막의 영향을 거의받지 않아 전처리가 필요없다.	
▶ 기포, 균열 등의 결함이 발생하지 않는다.	
▶ 접합부의 강도 및 접합속도가 MIG용접의 경우와 동등하거나 그 이상이다.	
▶ 스패터, 흠이 발생하지 않는다.	
▶ 용가재, 실딩가스가 필요없다.	
▶ 숙련이 필요없다.	
▶ 접합장치가 비교적 저렴하다.	
단 점	
▶ 접합재를 견고하게 구속할 지그가 필요하다.	
▶ 모서리 용접등이 곤란하고 이음부 구조가 제한된다.	
▶ 이음부 겹의 허용범위가 아크용접에 비해 작다.	
▶ 접합부 종단에 구멍이 남는다.	

3. Al 합금 및 기타 금속재료의 접합가능성 및 접합조건

FSW에 의한 각종 비철 금속재료의 접합가능성 및 접합범위는 Table 2¹³⁾에 나타내듯이 접합하려고 하는 재질, 두께 및 형상에 따라 접합조건 범위는 다르겠지만 Al합금, Mg합금 등과 같은 비철합금은 물론 최근에는 일부 철강재료도 접합가능하다고 보고¹⁴⁾되고 있다.

2024, 5083 및 7075 Al합금의 경우, 건전한 FSW 접합부가 얻어지는 톨 회전수와 접합속도의 관계를 Fig. 3¹⁵⁾에 나타낸다. 2024 및 7075 Al합금의 FSW 접합조건에 비해 5083Al합금의 경우, 건전한 접합부가 얻어지는 접합조건(톨 회전수/접합속도의 비)의 범

Table 2 Weldability of friction stir welded Al alloys(butt joint).

	재질	조성	두께 (mm)	접합성	
				접합여부	조건범위
일부 열처리재	1080 (O)	>99.8%Al	1~12.0	가능	◎ 매우넓음
	1100 (H14)	>99.0%Al			
	3004 (O)	Al-Mn계			
	5052 (O)	Al-Mg계	4~12.0	○	△ 좁음
	5083 (O)				
미열처리재	6061 (T6)	Al-Si-Mg계	4~6	○	◎
	6N01 (T5)	Al-Si-Mg계			
	2017 (T4)	Al-Cu-Mg계	6.0	○	△
	7075 (T6)	Al-Zn-Mg계	6.0	○	△
	7N01 (T6)	Al-Zn-Mg계	6.0	○	○
알루미늄 주물	1200FD	> 99%	4.0	○	△
	5083FD	Al-Mg계	6.0	○	△
Mg계	MC1	Al-Mn-Zn계	3.0	○	△
Cu계	부산소동	> 99.99%	5.0	○	△

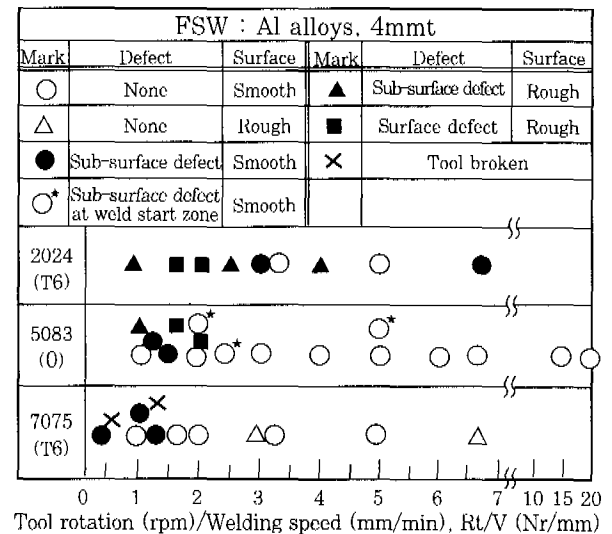


Fig. 3 Relationship of welding speed and rotation speed.

위가 매우 넓음을 알 수 있다. 반면에 시효경화성 2024 Al합금의 경우는 그 범위가 매우 좁다.

FSW는 고상접합이므로 용융용접에서 발생하는 균열 및 블로홀 등의 결함은 발생하지 않는다. 그러나 마찰교반이 부족하거나 과잉의 경우에는 결함이 발생한다. Fig. 4¹³⁾에 FSW부에 발생하는 대표적 결함의 예를 나타낸다. (a)는 마찰교반이 부족한 경우(톨의 회전수<접합속도, 갭이 큰 경우)에 발생하기 쉬운 결함이며 (b)는 마찰교반이 과잉인 경우(톨의 회전수>접합속도)에 발생하기 쉬운 결함이다.

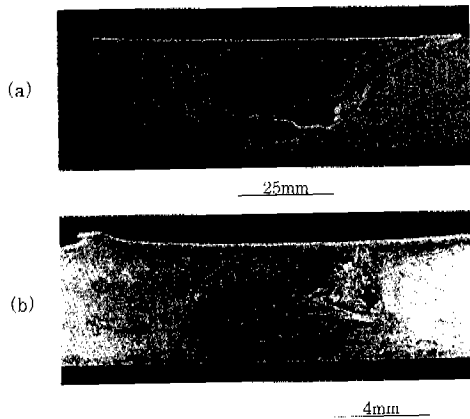


Fig. 4 Typical weld defects of FSW butt joints.

4. Al 합금 FSW 접합부의 조직 및 기계적 성질

4.1 접합부의 마크로 조직 및 소성영역의 분류

FSW접합부의 단면형상 및 그 소성영역의 개략도를 Fig. 5³⁾에 나타낸다. FSW접합부의 단면형상은 2가지 즉, onion ring 및 wine cup 형상으로 분류된다. Fig. 5의 단면에서 보이는 onion ring상을 좀 더 구체적으로 보면 중앙부(D)에서는 마찰열과 심한 소성유동에 의한 동적 재결정영역이 형성되고 그 주변(C)에서는 소성변형과 국부적인 재결정영역이 동반된 영역이 형성된다. 그리고, 이들 주변에 열 영향부(B) 및 모재부(A)가 존재한다. 이처럼 마찰열과 회전교반에 의해 FSW 접합부에서는 강한 소성유동이 생기게 되며 접합부의 최대폭은 솔더의 직경에 의해 결정된다. 경면처리한 접합부의 OIM(Orientation Imaging Microscopy) 사진, Fig. 6¹⁶⁾에 나타내듯이 접합부 중심에서 결정립이 미세한 것은 재결정에 의한 것임을 시사한다.

4.2 접합부의 경도분포와 미세조직

용접속도500mm/min, 회전속도1,000rpm, 톨직경 18mm, 톨재질 SKD11등의 접합조건으로 맞대기

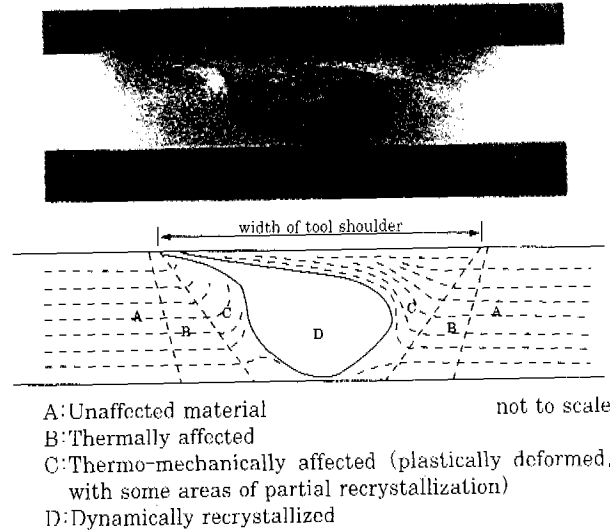


Fig. 5 A transverse cross section of an FSW butt joint(2014Al, 6.4t) and schematic representation of microstructural regions in FSW butt joint.

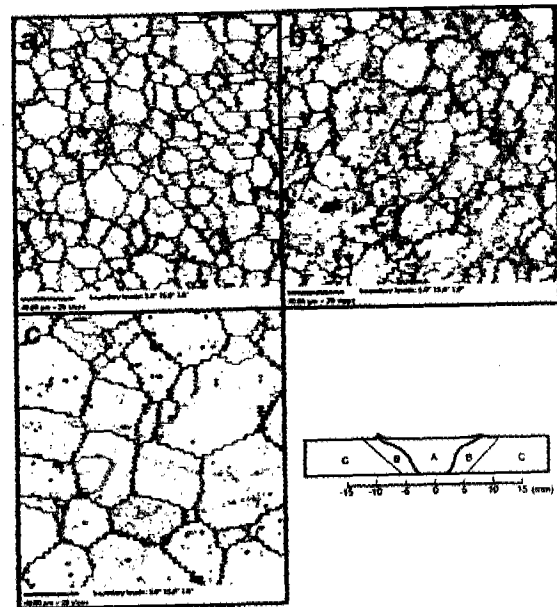


Fig. 6 OIM maps at location "a", "b", and "c"

FSW를 행한 6063 Al합금(두께6mm)의 두께의 측정 위치에 따른 경도분포를 Fig. 7¹⁶⁾에 나타낸다. 경도는 top, center, bottom 모두 접합부 중앙으로부터 10mm의 영역에서 최소치를 나타내어 접합부에서는 모재의 약 6할 정도로 현저히 저하한다. 한편, 단면 상하방향에 따른 경도 변화는 매우 적음을 알 수 있다.

Fig. 8¹⁶⁾에 FSW접합한 6063Al합금 접합부의 연화역(SOF, 0mm), 경도최소영역(MIN, 10mm), 경도저하영역(LOW, 12.5mm), 모재부(BM, 15mm)근방영역의 TEM사진을 나타낸다. BM근방영역에서는 다량의 미세한 침상석출물과 소량의 붕상석출물(β')이 관찰된다.

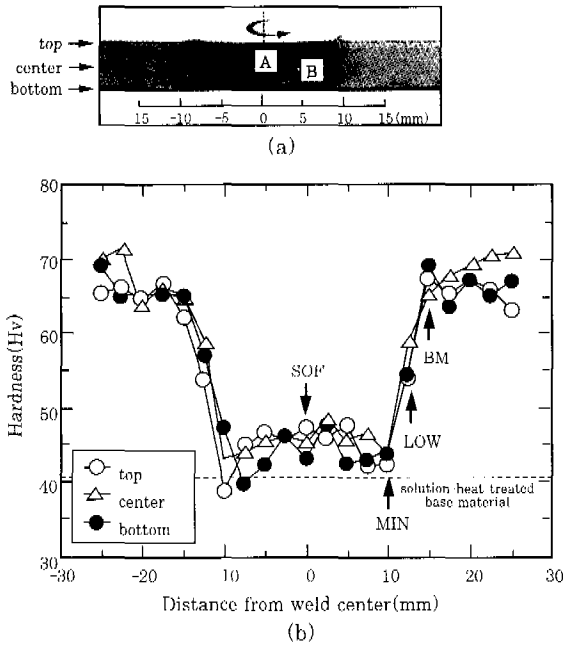


Fig. 7 Horizontal hardness profiles (a) Cross section perpendicular to the welding direction (b) Horizontal profiles of Vickers hardness in as-welded friction stir weld of 6063Al alloy

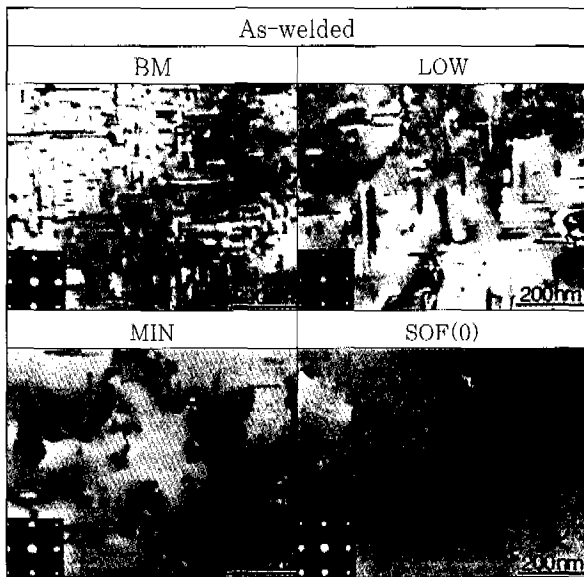


Fig. 8 TEM micrographs of the friction stir weld.

한편, LOW영역에서는 미세한 침상석출물과 β' 이 관찰되지만 침상석출물이 감소하면서 β' 이 증가함을 알 수 있다. MIN영역에서는 소량의 β' 만이 관찰되고 SOF(O)영역에서는 석출물이 전혀 관찰되지 않는다. 따라서 Fig. 7의 경도저하는 미세한 침상석출물의 양과 밀접한 관계가 있음을 보여준다. 또한 시효경화성 Al합금의 FSW접합부는 재결정에 의한 미세한 결정립

으로 구성되며 전위밀도도 크게 감소한다. 이에 따라 접합부와 열영향부에서 기계적 성질은 저하하는데 이는 강화 석출상의 밀도와 관련이 깊으며 석출물의 분포는 주로 열이력에 영향을 받게 된다¹⁶⁾. 즉, FSW과정 중, 발생하는 마찰열은 미세조직에 상당한 변화를 야기시켜 접합부에서의 기계적 성질에 변화를 주게 된다.

6063 Al합금의 FSW접합부의 시효시간의 변화에 따른 경도변화를 Fig. 9¹⁷⁾에 나타낸다. FSW접합한 상태 그대로의 경우는 접합 중심부 근방에서 경도가 저하하지만 시효처리를 행함에 의해 경도는 증가하여 448k에서 43.2ks 시효처리 하면 접합부의 모든 영역에서 모재 강도 이상의 수준으로 회복됨을 알 수 있다. 이와 같이 석출물이 분해된 영역을 접합후 시효처리하면 강화석출상의 밀도가 현저히 증가하여 경도변화에 영향을 주게 된다.

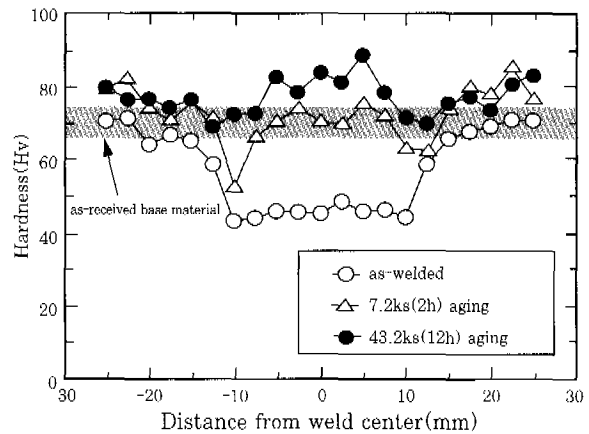


Fig. 9 Effect of postweld aging on horizontal hardness profiles in the weld.

7075 Al합금 FSW 접합부의 미세조직의 개략도를 Fig. 10¹⁸⁾에 나타내듯이 접합부중심에서는 재결정에 의해 결정립이 매우 미세해지며 전위밀도가 낮으며 미세한 석출물($MgZn_2$)이 관찰되지 않는다. 열영향부에서는 $MgZn_2$ 의 조대화가 일어나 인장시험시, 이 부분에서 파단하게 된다. 7075 Al합금에서의 이러한 경향은 시효성 Al합금에서 나타나는 공통된 현상이라 할 수 있다.

4.3 접합부의 기계적성질

FSW접합을 행한 각종 Al합금의 인장특성을 Table 3¹⁴⁾에 나타낸다. 대부분 모재측 열영향부에서 파단됨을 보여준다. 또한, FSW방법으로 접합한 5083 Al합금의 인장 및 굽힘시험(180°)후의 시편의 형상을 Fig. 11²⁾에 나타낸다.

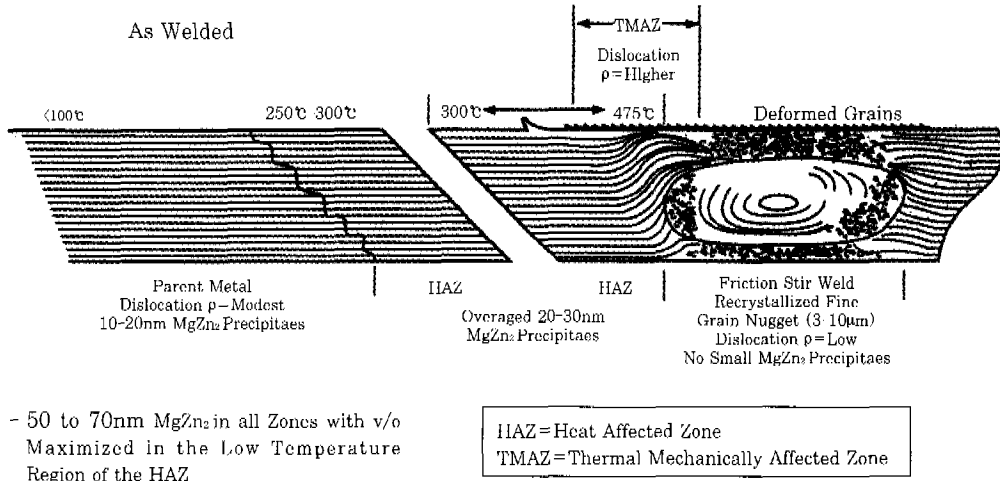


Fig. 10 Schematic illustration of friction-stir-weld zone microstructures, precipitate distributions, and temperature ranges for 7075 T651 Al.

Table 3 Tensile test results for FSW butt joints in Al alloys.

Alloy	Test Location	0.2% Proof Stress (MPa)	Maximum Tensile (MPa)	Elongation	Fracture Location
2014-T6	Weld	247	378	6.5	HAZ-P
	Parent	423	474	12.5	PM
2219-T87	Weld	-	305	8	HAZ-P
	Parent	-	457	14	PM
5083-O	Weld	142	299	23	PM
	Parent	148	298	23.5	PM
5083-H321	Weld	153	305	22.5	HAZ-W
	Parent	249	336	16.5	PM
7075-T7351	Weld	208	384	5.5	HAZ-P
	Parent	476	548	13	PM

호함을 보여준다. 이처럼 FSW접합부의 기계적 강도가 양호한 이유는 FSW의 접합온도가 낮아 변형이 작고 결함발생이 없기 때문¹⁹⁾이며 FSW영역의 미세한 5~10 μm 의 재결정조직의 형성과도 깊은 관련이 있다²⁰⁾고 할 수 있다.

5. Al합금 용접구조물에서의 적용 및 적용예상 분야

최근 FSW기술은 주로 고온균열의 발생위험성이 높은 시효성 Al합금과 같은 비철재료의 응용분야(선박, 항공우주, 철도차량 등)에서 적용되고 있다²⁾. 스웨덴에서는 Al선박(6m \times 16m)의 패널용접에 1996년도부터 적용되고 있으며 노르웨이(Marine Aluminium)에서는 수10m급 고속페리의 패널부재의 판이음에 FSW를 적용하여 접합하고 있다.

미국에서는 항공우주산업분야에서 듀랄루민의 용접에 FSW를 적용하고 있다. 보잉사는 델타 로켓 연료탱크에 이 방법을 적용하고 있다²¹⁾. 종래의 용접방법으로 용접이 곤란했던 듀랄루민(2014-T6)을 원통형의 연료탱크의 중심 이음부에 FSW기술이 적용되어 탱크의 경량화 및 생산코스트의 절감에 큰 효과를 발휘하고 있다²¹⁾.

일본에서는 철도수송기기 및 선박분야를 중심으로 FSW기술의 적용예가 증가하고 있다. 1997년 가을부터 700계 신칸선의 floor판넬의 접합에 적용된 이래 지하철 신차량의 측면부재의 접합 및 선박용 부재의 접합등에 적용시키고 있다. FSW를 적용하여 생산하고 있는 신칸선 차량구조, 각부의 사용재질 및 700계 신칸선의 적용예를 각각 Fig. 12⁹⁾ 및 Fig. 13²²⁾에 나타낸다. Fig. 12에 나타내듯이 철도차량의 경우

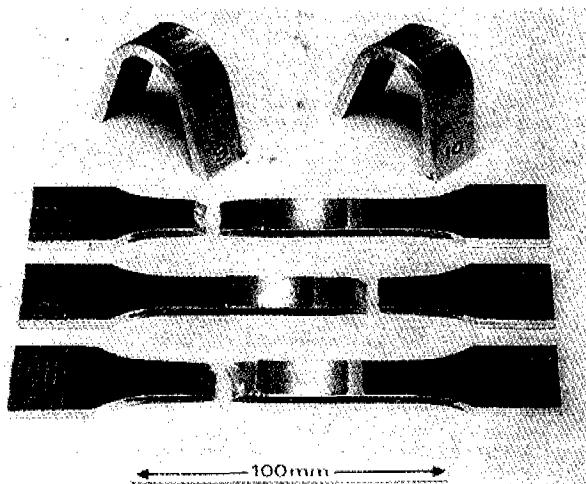


Fig. 11 A bend(180°) and tensile tested welds made in 5083Al welds.

인장시험후의 파단위치는 열영향부에서 어느 정도 떨어진 곳이며, 굽힘시험 결과에서도 FSW접합부는 양

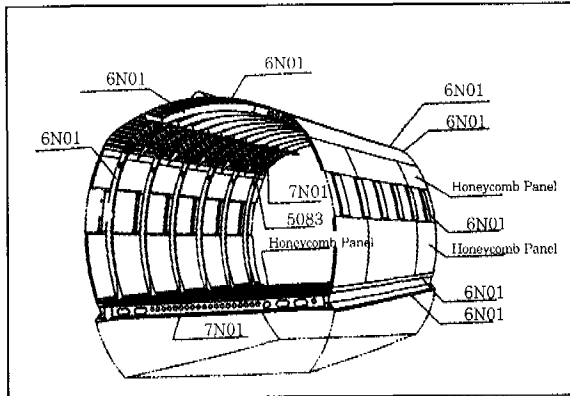


Fig. 12 Car body structure of type 500 high-speed train.

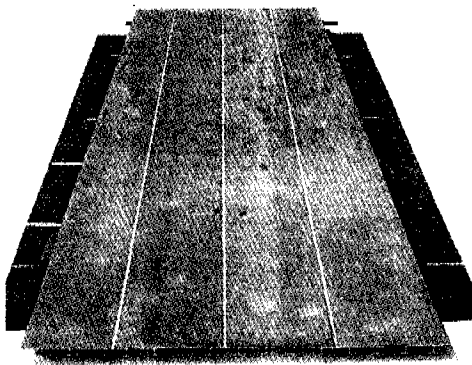


Fig. 13 Friction stir welded floor panel of type 700 high-speed train.

직선접합부가 많아 최근에는 FSW기술을 적용하여 제작하려는 시도가 활발하게 이루어져 일본에서는 이미 실용화되고 있는 상태이다. 대표적 용접구조용 Al재료인 6N01 및 5083합금을 FSW에 의해 접합하여 철도차량 및 선박용 광폭 형재를 제작하여 700계 신칸선(1300mm W, 5,000mmL)의 floor판넬(6N01-T5, 4t) 및 선박판넬(5083-H112, 4t)로 공급하고 있다²²⁾. 이 방법은 종래의 MIG용접방법에 비하여 변형이 적고 평탄하므로 조립시의 용접시공성이 양호하여 1997년 가을부터 주행되기 시작하여 현재까지 문제가 생기지 않고 있다²⁰⁾. 최근 일반 철도차량(지하철 및 기타의 객차)의 경우에도 경량화를 위해 구조재로서 Al합금이 많이 사용되고 있다. 어떠한 경우도 종래의 아크용접(MIG용접)으로 조립된 차량에 비하여 접합부뿐 만 아니라 차량 전체의 변형량이 약 1/5이하로 감소하여 미관이 좋은 차량의 제작이 가능하다고 알려지고 있다. 또한, Fig. 14²²⁾에 FSW방법으로 접합한 선박용 대형 π 섹션(5083-H112)을 나타낸다. 접합부에 결함도 없고 이면이 평탄하므로 덧살 및 변형의 제거가 필요치 않아 현장시공성이 양호하여 1997년부터 중형선박의 상부구조에

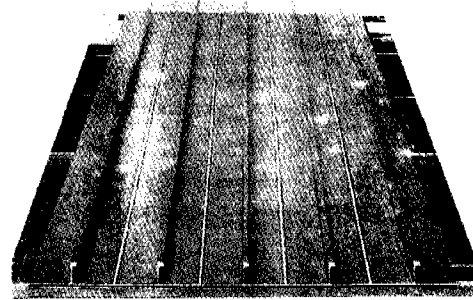


Fig. 14 Friction stir welded panels for ship.

사용되고 있으며 대폭적인 공정 삭감이 가능해지고 있다²²⁾. 이들 이외에도 FSW는 대형 열교환기(6063), 파라볼라 안테나용 광폭판(1100-0) 및 평탄도가 요구되는 교량상판(6N01)의 접합에 적용되고 있다.

6. 맺는 말

이상에서 기술했듯이 최근에 개발된 FSW기술의 사용에 의해 종래의 용접방법으로는 용접이 곤란하다고 알려졌던 시효경화형 Al합금의 접합이 가능하게 되었을 뿐만 아니라 접합부의 기계적 성질이 우수하여 주로 선박, 철도객차, 항공우주와 같은 수송기기 분야에서 경량화를 목적으로 Al합금 동종재의 맞대기 접합에 사용되고 있다. 향후에는 자동차의 스페이스 프레임 및 수송탱크, Al제조분야, 교량 및 해양편의시설, 컨테이너, 냉각계통, 압력용기, 데크 등에 적용가능하리라 보고²³⁾되고 있다. 또한, 고품질 저코스트에 의한 제조 코스트 면의 메리트도 있으며 이종재 접합도 가능하여 Al제품의 신규수요 개척에도 기여할 수 있으리라 보인다. 더 나아가 접합속도 증가에 의한 Al합금 용접 구조물의 생산성 향상 뿐만 아니라 접합물 재료의 개발을 통하여 Al합금 이외의 비철재료(Cu, Ti합금 등)에 적용될 수 있으리라 생각된다. 또한, 이러한 접합물의 재료개발과 함께 피접합재료에 대한 틀형상 및 적정접합조건이 확립된다면 재료의 적용범위도 용접균열 감수성이 높다고 알려진 스테인리스강, Ni기 합금 및 철강재료로도 확대시켜 검토 될 수 있을 것이다. 또한, 비직선형의 3차원 접합형상의 경우에도 로봇 이용에 의한 FSW적용이 기대된다하겠다. FSW기술은 기본적으로 에너지 절약 및 작업환경의 개선이라는 메리트도 있어 향후 자원의 보존 및 지구온난화문제 등으로 환경규제가 더욱 강화되어 갈 것이라고 본다면 FSW기술은 특히 경량화가 요구되는 분야에서 적용이 증대될 가능성이 매우 높은 기술중의 하나라고 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) C.J.Dawes : Welding & Metal Fabrication, 63(1995), pp.13-16
- 2) C.J.Dawes, W.M.Thomas : Welding J., 75-3(1996)pp.41-45
- 3) C.J.Dawes : Proc. of the 6th Int. Symp., JWS, (1996), Nagoya, pp.711-717
- 4) K.E.Knipstrom, B.Pekkari : Welding J., 76-9(1997)pp.55-57
- 5) 연윤모 : 대한용접학회지, 17-6(1999), pp.112
- 6) 연윤모, 정승부 : 제3회 국방과학 학술대회 논문집(2000.9), pp.A39-46
- 7) 장웅성, 최기용, 강문진, 권영각 : 대한용접학회지, 18-6(2000.12), pp.704-712
- 8) 연윤모, 정승부, 박종목 : 한국철도학회 추계학술대회 논문집(2000.11), pp.226-234
- 9) S.Yamada, K.Masubuchi : Welding J., 81-11(2000), pp.48-53
- 10) 條田 剛 : 輕金屬溶接, 37-9(1999), pp.406-412
- 11) 條田 剛 : 溶接學會誌, 67-4(1998), pp.60-63
- 12) K.Colligan : Welding J., July(1999), pp.229s-237s
- 13) 岡村 久宜 : 溶接學會誌, 69-7(2000), pp.565-571
- 14) 福田 哲夫 : 溶接學會誌, 69-7(2000), pp.560-564
- 15) 成願 茂利, 腹部 光男, 中田 一博 : 溶接技術, No.12(1999), pp.97-100
- 16) Y.Sato, H.Kokawa, M.Enomoto, S.Jogan : Metall. Mater. Transaction A,30-9(1999), pp.2429-2437
- 17) 佐藤 裕, 粉川 博之, 榎本 正敏, 成願 茂利, 橋本 武典 : 溶接學會全國大會概要, 第65集(1999-11), pp.560
- 18) M.W.Mahoney, C.G.Rhodes, J.G.Flintoff, R.A.Spurling, W.H.Bingel : Metall.Mater. Trans.A, 29A-7(1998), 1955-1964
- 19) 岡村 久宜, 青田 欽也, 江角 昌邦 : 輕金屬, 50-4(2000), pp.166-172
- 20) 古賀 信次 : 溶接學會誌, 69-3(2000), pp.17-21
- 21) M.R.Johnsen : Welding J., 78-2(1999), pp.35-39
- 22) 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



- 연윤모 (延倫模)
- 1953년생
- 수원과학대학 자동화용접과
- 마찰용접, 마찰교반접합
- e-mail : ymyeon@mail.suwon-sc.ac.kr



- 장웅성 (張雄成)
- 1959년생
- 포항산업과학연구원 접합가공연구팀
- 철강 및 비철재료 개발, 철강용접성 및 용접재료
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 정승부 (鄭承富)
- 1959년생
- 성균관대학교 금속재료공학부
- 마이크로 접합, 마찰용접, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.ac.kr