

마찰교반 점용접기술 및 Al 접합부 특성

연운모 · 이창용 · 이원배 · 정승부 · 장웅성

Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminium Alloys

Yun-Mo Yeon, Chang-Yong Lee, Won-Bae Lee, Seung-Boo Jung and Woong-Seong Chang

1. 서 론

최근 지구 온난화 문제로 환경보존의 중요성이 부각되면서 연료소비를 절감시키고 CO₂가스 배출을 저감시키기 위한 방안의 하나로 수송기기의 경량화가 추진됨에 따라 자동차, 철도차량, 선박 등의 분야에서 Al합금의 사용이 확대되고 있다.

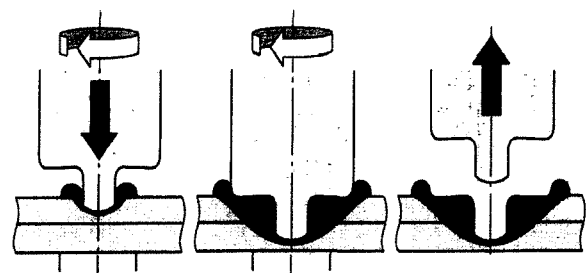
Al합금을 접합하는 고상접합방법중의 하나인 Friction Stir Welding(FSW)은 회전마찰에 의한 가열 및 재료의 소성유동을 응용한 접합방법으로 용융용접에 비하여 접합온도가 낮고 변형이 매우 적으며 흠, 소음 등이 발생하지 않는 등 환경 친화적 특징이 있어¹⁻⁴⁾ Al합금의 butt용접에 매우 적합하여 경량화가 요구되는 철도차량, 선박, 항공우주기기 등의 수송기기 분야에서 이미 수년 전부터 적용되고 있다⁵⁻¹²⁾. 그러나, 자동차 차체에 Al을 적용하는 경우, 연비성능향상은 매우 현저하나 재료비가 높고 프레스 성형성 및 용접성이 기존의 강판에 비하여 현저히 낮은 것이 큰 문제로 지적되어 자동차 차체에의 Al적용이 늦어져 왔다. 특히, 이들 기기에 Al합금을 적용하는 경우 Al합금의 Lap용접은 매우 중요하다. 최근, Al합금 스폿용접의 문제점을 획기적으로 해결할 수 있는 Spot Friction Stir Welding(Spot FSW:마찰교반점용접)¹³⁻¹⁵⁾기술이 새롭게 개발되어 자동차 분야의 Al합금 점용접에서 주목을 받고 있다. Spot FSW는 접합틀을 회전시키면서 겹치기로 점용접하고자하는 부분의 상판에 압입시켜 소성유동시킴에 의해 접합계면을 활성화시켜 접합하는 방법이다. 이러한 Spot FSW기술은 선진국의 경우, Al합금 박판재의 Lap용접에 적용되어 자동차분야에서 실용화되고 있다. 그러나, 국내에서는 이에 관하여 거의 보고되지 않고 있다. 따라서, 본 보고에서는 최근의 Spot FSW에 관한 기술을 정리하여 소개하고자 한다.

2. Spot FSW의 원리 및 특징

2.1 원 리

Spot FSW의 개략도를 Fig. 1^{13,14)}에 나타낸다. Fig. 1(a)에 나타내듯이 상하로 겹쳐진 피접합체에 대해 선단에 핀이 있는 접합용 틀을 고속으로 회전시키면서 압입하면 틀과 피접합체 사이에 고속회전과 압입에 의해 마찰열이 발생된다. 이러한 마찰열로 인해 핀 주변 상하의 피접합체는 연화되고 소성유동현상에 의해 계면이 교반됨으로서 상하 2개의 면이 Fig. 1(b)에 나타내듯이 점접합된다. 이때, 피접합체는 용융되지 않고 고상상태로 유지되며 Fig. 1(c)에 나타내듯이 최종적으로 접합틀을 후퇴시켜 핀을 제거하면 겹치기 이음의 점접합이 완료된다. Spot FSW공정의 접합인자에는 틀 회전수, 틀 가압력, 접합시간, 틀 압입깊이, 틀 삼입속도 및 틀 형상 등이 있으며 접합중에는 틀 회전수 및 틀 가압력이 일정하도록 제어되고 틀 압입깊이는 모니터링되고 일반적으로 틀 가압력이 증가하면 접합시간은 짧아지며 6000계 Al합금(1t)을 틀회전 속도 2500rpm의 조건에서 겹치기 접합의 경우, 가압시간은 약 1초이다^{15,16)}.

솔더 및 핀의 재질로는 일반적으로 공구강이 사용되고 있다. 핀의 개략적인 형상은 스크류 타입의 나선형



(a) Plunging (b) Bonding (c) Drawing out

Fig. 1 Schematic illustration of Spot FSW

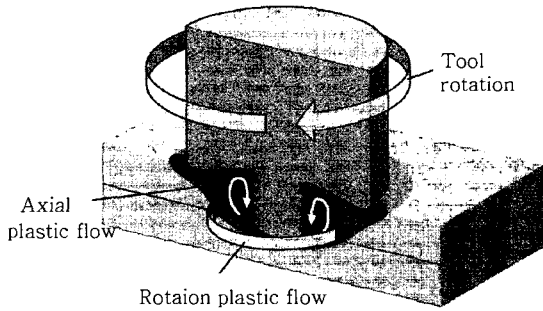


Fig. 2 Schematic illustration of plastic flow

형태이다. 이러한 나선형은 소성 변형된 피접합재가 접합된 주위로부터 완전히 빠질수 있도록 해주며 보이드가 없는 접합부를 형성하게 하는 역할을 한다.

Fig. 2은 접합핀 주위에 발생하는 소성유동현상을 개략적으로 나타낸다¹⁴⁾. 소성유동은 핀회전에 의해 유발되어 판재표면과 평행하게 회전상으로 발생하는 것과 핀축면의 나선작용에 의해 판재표면과 직교하는 면내에서 핀 축방향에 대류상으로 일어나는 것이 복합되어 있다.

2.2 특 징

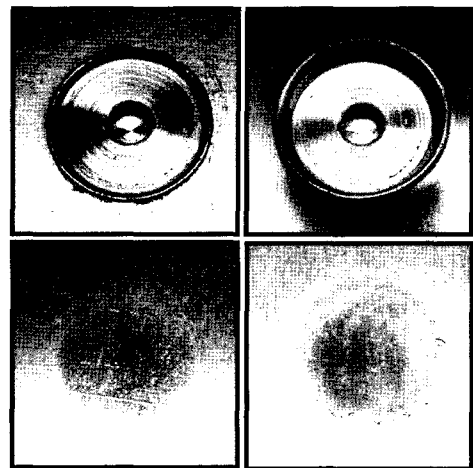
Spot FSW는 FSW의 경우와 마찬가지로 접합후 표면에 압흔자국이 남는다는 단점은 있지만 AI합금의 경우, 다음과 같은 이점이 있다^{14,15)}.

1. 소비전력이 매우 적다(저항용접의 약 1/20 이하).
2. 장비 시스템이 매우 간단하여 설비비용이 적게 든다.
3. 접합공정이 완전자동이므로 작업자의 숙련과 경험이 요구되지 않는다.
4. 고상접합방법이므로 입열량이 작아 저항용접의 경우에 비해 변형이 적다.
5. 틀수명(수십만 점)이 매우 길어 접합부의 품질저하가 없으며 저항용접의 경우에 비해 유지보수에 시간이 걸리지 않는다.
6. 환경 친화적 이다(흄, 소음, 전자기 노이즈 등이 발생하지 않음).

3. Spot FSW 접합부의 조직 및 기계적 성질

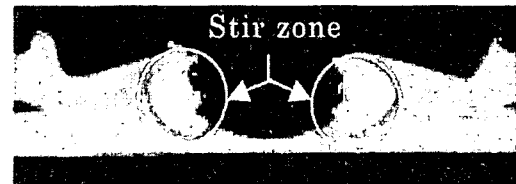
3.1 접합부의 마크로 조직 및 소성영역

5052AI합금(1t)을 2500rpm에서 Spot FSW를 행한 경우의 접합부외관은 Fig. 3¹⁷⁾에 나타내듯이 틀 삽입깊이가 작은 경우(a)에 비해, 삽입깊이가 큰 경우(b)에는 표면에 틀 압흔이 비교적 깊게 남지만 이면은 어떠한 경우도 평평한 상태를 나타낸다. 6000계 AI합금(1t)의 Spot FSW접합부 단면 마크로 조직을 Fig. 4



(a) 1.45 (b) 1.65
(Pin inserting depth : mm)

Fig. 3 Appearance of Spot FSW joint



Joining time : 2.0s
Tool force : 3920N
Tool rotation speed : 2500rpm

Fig. 4 Cross section of Spot FSW joint

에 나타낸다¹⁸⁾. 핀이 있었던 양측에 교반영역이 존재하며 상하판의 계면은 소멸된다. 그 상하판의 계면은 Fig. 5에 나타내듯이 틀 솔더 외주부의 약간 내측으로부터 상판측으로 진전하지만 서서히 불명료해지고 교반영역의 외측부근에서는 분단되어 불연속으로 된다¹⁸⁾.

상기의 내용을 기초하여 Spot FSW접합부의 영역을 분류한 것을 Fig. 6에 개략적으로 나타낸다¹⁴⁾. Spot FSW접합부의 중심을 이루는 것은 교반영역(stir zone)이며 이것은 핀 구멍을 둘러싸는 형태로 도너츠 상으로 형성된다. 그 외측에는 재결정이 수반되는 소성유동역(plastic flow zone) 및 열영향부(HAZ)가 형성된다.

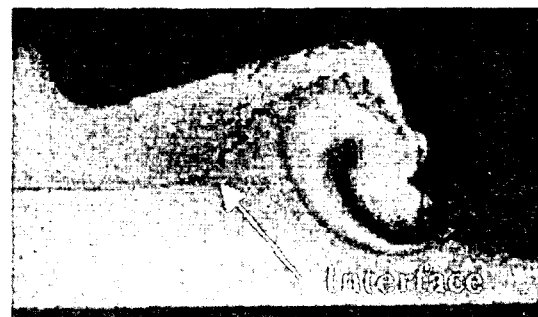


Fig. 5 Motion of interface between plates

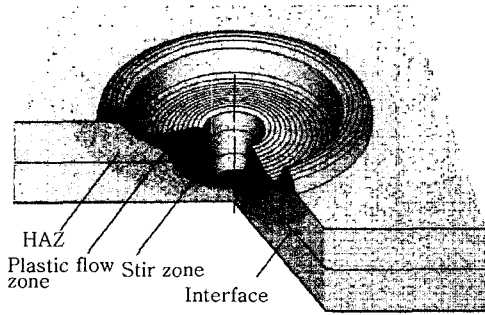


Fig. 6 Schematic illustration of spot FSW joint

3.2 접합부의 경도분포 및 미세조직

Fig. 7에 6000계 Al합금(1t) 및 Spot FSW를 행한 교반영역의 마이크로 조직을 나타낸다¹⁸⁾. 그림에 나타내듯이 모재(a)의 평균입경은 거의 50 μ m이지만 교반영역(b)에서는 평균입경이 거의 10 μ m의 등방적인 미세립이며 마찰교반접합(FSW)의 경우와 마찬가지로 동적 재결정이 생긴다. 교반영역 및 그 주변에서의 상판의 판두께 중심부의 경도분포를 Fig. 8에 나타낸다¹⁸⁾. 모재경도(Hv65)에 비해 열영향부의 경도저하는 적으며

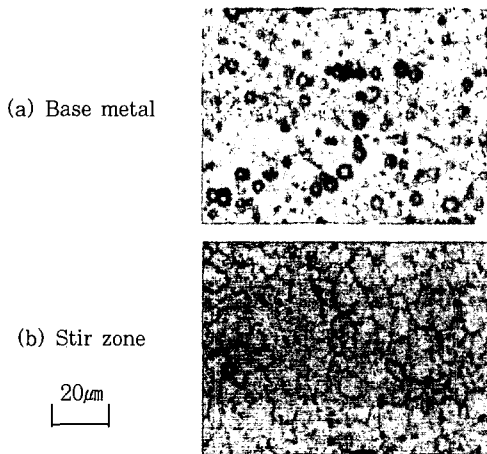


Fig. 7 Microstructure of spot FSW joint

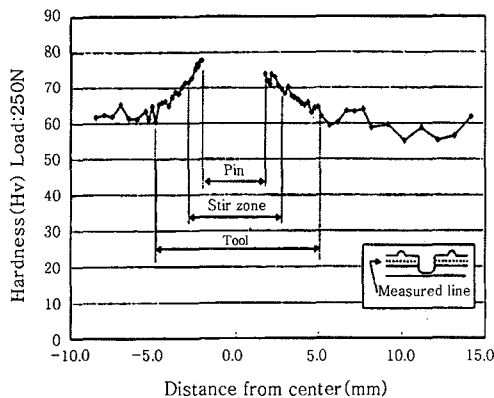


Fig. 8 Hardness distribution of spot FSW joint

솔더아래의 소성유동영역 및 교반영역에서는 역으로 가공변형에 의한 경도 상승이 나타난다.

3.3 접합부의 기계적 성질

Fig. 9¹⁷⁾는 5052Al합금(1t)을 2500rpm에서 Spot FSW를 행한 경우의 접합틀 핀의 삽입깊이 증가에 따른 인장전단 파단하중을 나타낸다. 인장전단 파단하중은 핀 삽입깊이가 증가함에 따라 증가하여 삽입깊이 1.6mm에서 약 3.4kN으로 최대치를 나타내지만 핀 삽입깊이가 더 증가하면 오히려 저하한다.

인장전단시험 후, Lap이음부의 파단상태를 Fig. 10에 나타낸다¹⁷⁾. 인장전단 파단하중이 비교적 낮았던 핀 삽입깊이 1.45mm의 경우는 Fig.10(a)에 나타내듯이 핀 근방에서 파단되나 핀 주변에서 솔더부에 이르기까지는 접합되지 않았음을 보여준다. 그러나 인장전단 파단하중이 높았던 삽입깊이 1.6mm의 경우는 Fig. 10(b)에 나타내듯이 솔더부에서 파단된다.

핀 삽입깊이 1.45mm의 경우, Fig. 11¹⁷⁾에 나타내듯이 접합면상에 미접합부로 추정되는 계면이 존재하여 인장전단 파단하중을 저하시키는 것으로 판단된다. 접합시간변화에 따른 인장전단시험후의 시험편 외관 및

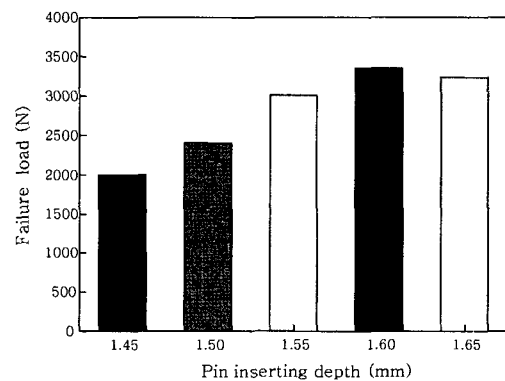


Fig. 9 Relation between tensile shear strength and process time

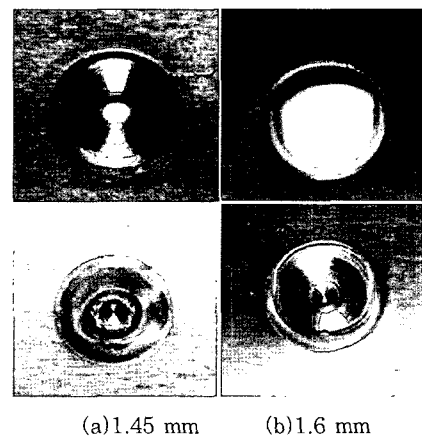


Fig. 10 Appearance of joints after tensile shear test

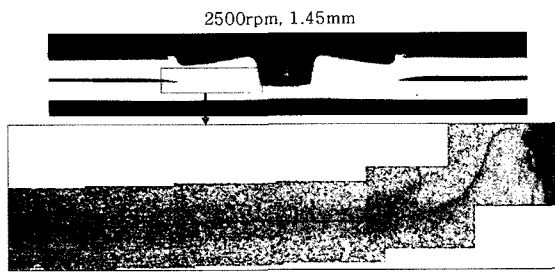


Fig. 11 Cross section of spot FSW

단면 마크로 조직을 Fig. 12에 나타낸다¹⁸⁾. 접합시간이 짧은 경우에는 교반영역(접합영역)의 폭이 좁고, 접합영역을 판재의 길이방향으로 파단하는 전단파단형태로 된다. 또한 접합시간이 길어짐에 따라 접합영역이 확대되고 판두께 방향으로 파단하는 프라그 파단으로 된다.

최대인장전단하중이 얻어진 조건(1.2s:적정조건) 및 접합시간이 부족한 조건(0.8s)에서의 균열의 기점 및 전진방향을 확인하기위하여 각각의 시험편을 인장전단 시험하여 균열이 발생한 직후에 하중을 제거하여 균열이 생긴 시험편의 단면 마크로 사진을 Fig. 13¹⁸⁾에 나타낸다. Fig. 13(a)에 나타내듯이 적정조건인 경우, 균열은 상하시험편 계면의 선단부로부터 발생하지 않고 상판의 두께가 슬더에 의해 얇아진 부분에서 발생한다. 또한, 적정 접합조건에서 접합한 경우에는 교반영역 외 주부에 존재하는 판간 계면의 흔적을 나타내는 부분에 대해서도 인장전단시에 개구되는 일이 없이 견고히 접

	Fractured specimen	Cross section
0.4s		
0.8s		
1.2s		
1.6s		
2.0s		

Fig. 12 Fractured specimens and cross sections of spot FSW joint

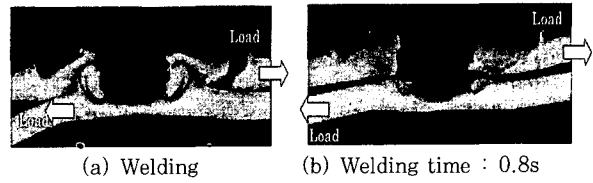


Fig. 13 Cross section of fractured specimens

합되어 있음을 알 수 있다. 한편, 접합시간이 부족한 경우에는 Fig. 13(b)에 나타내듯이 교반영역이 충분히 형성되어 있지 않으므로 상하 시험편의 계면의 선단으로부터 균열이 생겨 교반영역을 횡단하는 형태로 파단된다¹⁸⁾.

4. 알루미늄 합금 마찰교반 점용접의 적용 분야

자동차 차체의 경량화를 위해 유럽에서는 Audi(A8,A2), Jaguar(XJ)등 을 바다에 AI합금을 적용하고 있고 일본에서는 Honda(인사이트, NSX), Mazda(RX-8) 등의 본네트 및 리어도어에 AI합금이 사용되고 있다. 이러한 AI합금 판재를 고상상태로 점용접하는 새로운 개념의 Spot FSW기술은 Fig. 14에 나타내듯이 일본의 Mazda 승용차(RX-8)에 2003년 4월부터 처음으로 적용되기 시작하였다¹⁵⁾.

5. 맺는 말

마찰교반 점용접 기술이 2001년에 처음 소개된 이래, 본 기술은 AI합금 승용차 생산에 적용되고 있으며 최근에는 동종 알루미늄 뿐 만 아니라 이종재료의 점용접에 대한 연구로 그 적용가능성이 확대되고 있다. 이러한 마찰교반 점용접을 이용한 알루미늄의 점용접기술은 기존의 알루미늄의 점용접방법의 경우에 비하여 여러 가지 메리트가 있어 경제적인 뿐만 아니라 친환경적 점접합 방법이므로 환경문제 개선에도 기여하리라 기대된다.

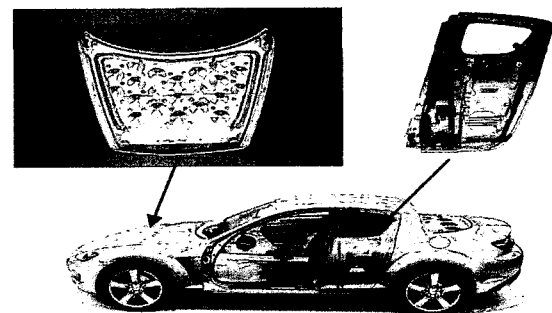


Fig. 14 Application of spot FSW

또한, FSW와 같은 라이선스 문제가 거의 없어¹⁴⁾ 알루미늄이 사용되는 자동차 등의 수송기기분야 뿐 만 아니라 기타 산업분야의 알루미늄 판재의 접용접에도 그 적용이 증대될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. C.J.Dawes : Welding & Metal Fabrication, 63(1995), 13-16
2. C.J.Dawes, W.M.Thomas : Welding J., 3. C.J.Dawes : Proc. of the 6th Int. Symp., JWS, (175-3(1996) 41-45
3. C.J.Dawes : Proc. of the 6th Int. Symp., JWS, (1996), Nagoya, 711-717
4. K.E.Knipstrom, B.Pekkari : Welding J., 76-9 (1997), 55-57
5. M.R.Johnsen : Welding J., 78-2(1999), 35-39
6. 岡村 久宣, 青田 炊也, 江角 昌邦 : 輕金屬, 50-4 (2000), 166-172
7. 연윤모, 정승부, 장웅성 : 대한용접학회지, 19-2 (2001,4), 160-166
8. 연윤모, 이원배, 정승부 : 대한용접학회지, 19-6 (2001,12), 584-590

9. W.B.Lee, Y.M.Yeon, S.B.Jung : Material Science and Engineering A355(2003), 154-159
10. W.S.Chang, H.S.Bang, S.B.Jung, Y.M.Yeon, H.J.Kim, W.B.Lee : Material Science Forum Vols.426-432 (2003), 2953-2958
11. W.B.Lee, Y.M.Yeon, S.B.Jung : J. of Materials Science, 38(2003), 4183-4191
12. W.B.Lee, C.Y.Lee, W.S.Chang, Y.M.Yeon, S.B.Jung : Materials Letters, Accepted for publications(2005)
13. R.Sakano, K.Murakami, K.Yamashita, T.Hyoe, M.Fujimoto, M.Inuzuka, Y.Nagao, H.Kashiki: Proceeding of 3th International Friction Stir Welding symposium, Kobe(2001,9), Japan
14. 古賀信次: 輕金屬溶接, 42(2004), 523-529
15. 坂野 律男, 加藤 喜久生: 溶接技術, 2004-2, 99-103
16. T.Y.Pan, A.Joaquin, D.E.Wilkosz, L.Reatherford, J.M.Nicholson: Proceeding of 5th International Friction Stir Welding Symposium, Metz (2004,9), France
17. 연윤모, 이창용, 이원배, 정승부: 대한용접학회 춘계 학술발표대회 개요집 제44권(2005,6), 235-237
18. 藤本 光生, 大塚 雅之, 西尾 護, 中島 康雅 : 溶接學會全國大會講演概要 第74集(2004,4), 4-7



- 연윤모(延倫模)
- 1953년생
- 수원과대학 자동차용접과
- 마찰교반접합·마찰용접
- e-mail : ymyeon@ssc.ac.kr



- 정승부(鄭承富)
- 1959년생
- 성균관대학교 신소재공학과
- 마이크로조이닝, 금속간화합물 생성 및 성장, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.ac.kr



- 이창용(李暢鎔)
- 1974년생
- 성균관대학교 신소재공학과
- 마찰교반접합 및 마이크로접합
- E-mail : lcy011@skku.edu



- 장웅성(張雄成)
- 1959년생
- RIST 용접센터
- 철강 및 비철 용접성, 신용접응용기술
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 이원배(李阮培)
- 1973년생
- 성균관대학교 신소재공학과
- 마찰교반접합, 마찰용접
- e-mail : saba38@mail.skku.ac.kr