

금속 박판재 접합을 위한 표면마찰용접 기술

이창길* · 김성준* · 임창동* · 한홍남**

Surface Friction Welding Technology for Joining of Metal Sheets

C. G. Lee*, S. J. Kim*, C. D. Yim*, and H. N. Han**

Abstract

Surface friction welding, SFW, is a newly developed solid state welding technology for joining of thin metal sheets. Workpieces are joined by frictional heat, shear deformation and plastic flow generated by friction between the rotating tool and surface of the workpiece. The SFW is an economical and environmentally conscious technology with high joining speed and excellent properties, and is expected to be used widely in various industries in the near future.

Key Words : Surface Friction Welding, Solid State Welding, Thin Metal Sheet Welding

1. 서 론

1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 발표한 마찰교반용접(Friction Stir Welding, 이하 FSW) 기술은 새로운 고상접합 방법으로서 많은 관심과 주목의 대상이 되고 있다.⁽¹⁾ FSW 기술은 기존의 용융용접 기술들과는 달리 별도의 열원, 용접봉, 용가제 등이 필요치 않으며, 접합재 특성이 매우 우수하고 고속 자동화 공정의 구현이 용이하다. 무엇보다도 지금까지 난용접성 소재로 분류되었던 Al 합금, Mg 합금, Ti 합금, 스테인레강, 금속기지 복합재료 등의 접합이 가능하게 된 점이 FSW 기술의 가장 큰 장점 중의 하나이다. 그러나, 이와 같은 장점과 함께 FSW 기술은 단점도 가지고 있다. FSW 기술의 접합원리상 접합용 공구(tool)에는 접합부재의 내부로 삽입되는 이른 바 probe가 반드시 필요하다. 이로 인해 접합 말단에 항상 probe가 빠져나간 흔적인 key-hole이 남는데, 경

우에 따라 key-hole은 심각한 용접결함으로 작용하게 된다. 또한 맞대기 접합의 경우 두께 1.2 mm 이하의 박판재에는 FSW 기술을 적용할 수 없는 것으로 알려져 있다.

이와 같은 FSW 기술의 단점을 극복하면서 박판재를 접합할 수 있는 기술로서 표면마찰용접(Surface Friction Welding, 이하 SFW) 기술이 최근 한국기계연구원에서 제안되었다.⁽²⁾ SFW 기술은 접합원리의 측면에서는 FSW 기술과 유사하나 접합부재 내부로 삽입되는 probe가 존재하지 않는 점이 FSW 기술과의 가장 큰 차이이다. 따라서, SFW 기술은 FSW 기술이 가지는 기술적 장점과 함께 박판재의 접합과 자유로운 폐곡선 형태의 접합이 가능하다는 장점을 가진다. SFW 기술은 현재 한국을 포함한 일본, 미국, 영국 등 4개국에 특허로서 출원되어 있다.⁽²⁾

본 논문에서는 SFW 기술의 원리와 특징을 소개하고 기술적 가능성에 관해 알아 보고자 한다.

* 한국기계연구원 재료기술연구소

** 서울대학교 재료공학부

2. SFW 기술의 접합원리와 특징

그림 1(a)와 (b)는 SFW 기술의 접합원리와 접합 공정을 나타낸 것이다. 그림 1(a)에서 1과 2는 피접합재, 3은 tool, 4와 6은 접합부, 5는 접합선을 각각 표시한다. 고속으로 회전하는 tool이 피접합재의 표면과 접촉하면 마찰열의 발생으로 피접합재의 연화와 소성유동이 발생하며, 재차 소성유동에 의한 가공발열이 더해져 피접합재의 연화가 촉진된다. 이 때 그림 1(b)에서 보듯이 피접합재 내부로 삽입되는 probe가 없기 때문에 마찰은 tool과 피접합재 접촉면에서만 발생한다. 소성유동에 의한 가공발열에 의해 피접합재 내부의 재료 역시 연화되고 가공발열이 발생하는 과정을 반복하게 되어, 소성유동은 점차 내부로 침투하며 접합선 양쪽의 재료가 강제적으로 혼합되는 과정을 거쳐 접합이 이루어진다. Tool의 회전에 의해 형성되는 소성영역의 폭은 접합재 표면 부위에서는 대략 tool의 지름과 같으나, 접합재 내부로 갈수록 그 폭은 점차 감소한다.

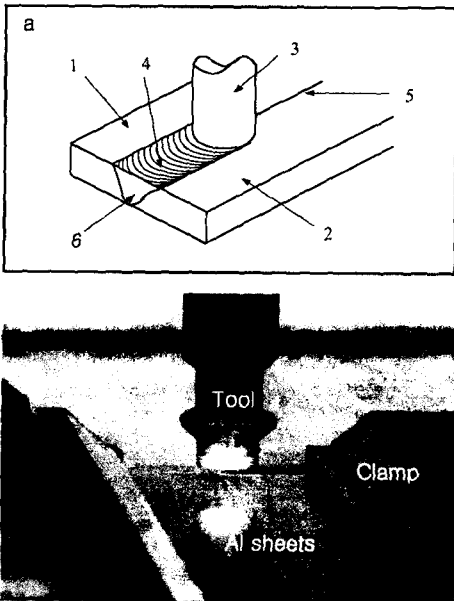


Fig. 1 (a) Concept of SFW Technology and (b) SFW process.

SFW 기술이 가지는 장점들을 열거하여 보면 다음과 같다.

- 1) 고상 상태에서 접합하기 때문에 접합에 따른 변형이 매우 적다.
- 2) 별도의 열원, 용접봉, 용가제, flux, 분위기 gas 등이 불필요하다.
- 3) 용융 용접에서 발생하기 쉬운 기공, 균열 등의 결함이 거의 발생하지 않는다.
- 4) 접합재의 기계적 강도는 모재의 70% 수준 이상을 나타낸다.
- 5) 접합 중 유해 gas나 유해 광선이 발생하지 않아 작업환경이 친환경적이다.
- 6) 작업자의 숙련도나 기량에 크게 의존하지 않기 때문에 공정의 표준화와 자동화가 가능하다.

3. Tool과 Back-up Plate

SFW 기술은 tool과 피접합재와의 마찰과 소성 유동 및 가공발열을 이용하여 접합한다는 점에서 FSW 기술의 접합원리와 유사하다. 따라서, tool의 선단부 표면은 극심한 마찰이 가해지기 때문에 내마모성, 인성과 함께 고온 강도가 우수한 재질의 tool을 사용하여야 한다. SFW 기술의 예를 살펴보면, Al 합금과 Mg 합금이 피접합재일 경우 주로 공구강 또는 고속도강 계통의 합금강재 tool을 사용하고 있다.⁽³⁾ 이러한 tool 재료들은 SFW 기술에도 그대로 적용할 수 있으며, 저자들은 합금공구강인 SKD 강종을 사용하고 있다. 접합용 tool은 그림 1(b)에서 볼 수 있듯이 단순한 환봉형의 형상을 가진다. 피접합재와 접촉하는 tool의 선단면은 평면이거나 약간 오목하며, 마찰을 더욱 촉진시키기 위하여 표면에 특수한 형상의 돌기 또는 요철 등을 형성시켜 사용할 수도 있다.

Tool과 함께 SFW 기술에 있어 중요한 사항은 back-up plate의 재질이다. 그림 2는 back-up plate 재료에 따른 소성영역의 깊이를 측정하여 나타낸 것이다. 두께 1.5mm의 5052 Al 판재와 직경 5mm의 tool를 사용하여 tool 회전속도 1600RPM, 이송 속도 100mm/min. 조건으로 시험하였다. 그림 2에서 back-up plate 재료가 Al을 사용하였을 경우 소성영역의 깊이가 0.475mm로 가장 얇고 S45C, SUS304, ceramic의 순서로 깊어지며, SUS304와 ceramic의 경우에는 소성영역 깊이가 유사함을 볼 수 있다. Tool과 피접합재와의 마찰과 소성가공에 의해 발생한 열의 일부는 피접합재 배면과 접촉하고 있는 back-up plate를 통하여 외부로 손실된다. 이 때 back-up plate 재료의 열전도율이 낮으면 열이 외부로 손실되는 정도가 낮아짐으로써 소성영

역 내에 보다 많은 양의 열이 축적될 수 있다. 이에 따라 tool과 피접합재 접촉면으로부터 배면까지의 온도구배가 작아지게 되어 보다 깊은 영역까지 소성유동이 일어날 수 있게 된다.

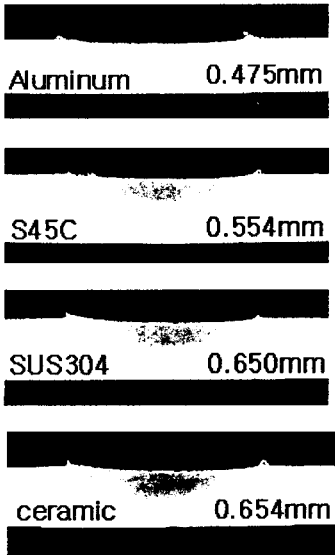


Fig. 2 Depth of deformed zone as concerned with back-up plate materials. (5052 Al, 1.5mmt, tool rotating speed 1600RPM, traveling speed 100mm/min.)

4. Al 합금 SFW 접합재의 특성

SFW 접합재를 기존의 용융용접 기술과 비교하여 보면 여러 가지의 차이점을 발견할 수 있다. 그림 3은 두께 1mm의 1050 Al 판재를 각각 SFW 기술과 TIG 용접법으로 접합한 후 비파괴 X-ray 검사한 결과이다. SFW 접합재의 접합부에서는 접합결함이 발견되지 않는데 반해, TIG 용접재에서는 그림에 나타난 바와 같이 기공(void)이나 미세 균열(micro crack) 등과 같은 결함들이 많이 발견된다. 용융용접재에서 결함들이 형성되는 이유는 용융된 금속 내부에 gas 성분이 포집되거나 용융금속의 응고시 수축 등에 의해 발생하는 것이다. SFW는 고상접합법으로서 gas의 포집이나 응고수축 등이 발생하지 않기 때문에 결함발생의 가능성이 TIG 용접 등에 비해 극히 낮다. 그리고, SFW와 비교하여도 결함발생 가능성이 낮다. SFW의 경우에는 피접합재 내부에서 전진하는 probe의 후방을 재료가 채워주지 못하면 결함이 발생하게

되는데, SFW는 피접합재 내부로 삽입되는 probe가 없이 tool이 피접합재의 표면에 접촉하여 이동하므로 SFW에서의 결함발생과 같은 현상은 일어나지 않는다.

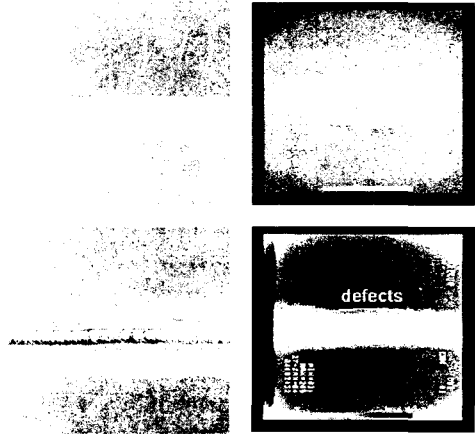


Fig. 3 Results of non-destructive X-ray Test.

SFW는 접합 후의 변형 역시 기존 용융용접법에 비해 작다. 그림 4는 두께 1.5mm인 5052 Al 합금 판재를 각각 SFW 기술과 TIG 용접법으로 접합한 후 변형의 정도를 비교한 것이다. 그림에 나타난 두 가지 판재에서 접합 길이는 300mm 이다. 두 접합재의 변형 정도를 비교하여 보면, SFW 접합재의 경우 TIG 용접재의 1/5 미만으로 접합 후 변형이 매우 작음을 알 수 있다. 이는 SFW 기술이 tool 과 접합재의 표면에서 발생하는 마찰열과 재료의 소성유동에 의한 가공발열을 이용하는 관계로 접합시의 입열량이 TIG 용접시보다 현저하게 작기 때문이다.

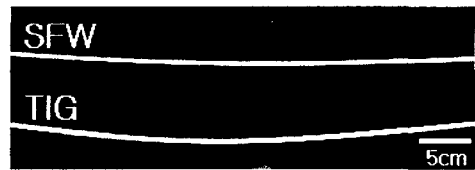


Fig. 4. Welding distortion. (5052 Al, 1.5mmt)

최근 합금성분이나 치수의 변화없이 강도와 연성이 우수한 금속 판재의 제조를 위해 결정립을 미세화시키는 기술이 꾸준히 개발되고 있다. 그러나, 기존의 용융용접법으로는 접합부위의 금속이 일차적으로 용융되었다가 응고되는 과정을 거치게 되어 미세결정립 구조를 유지하는 것이 불가

능하다. 그러므로 미세결정립 구조를 가지는 금속 판재의 실제적인 활용을 위해서는 미세립 구조의 손실 없이 접합할 수 있는 기술이 필수적이다.

그림 5는 반복접침압연법(ARB process)으로 제조된 두께 1mm의 1050 Al 합금 판재를 각각 SFW 기술과 TIG 용접법으로 접합한 후의 미세조직을 비교한 것이다. 원소재의 평균 결정립 크기는 $2.17\mu\text{m}$ 이다. SFW 접합재의 경우 접합부의 평균 결정립 크기는 원소재와 유사하거나 더욱 미세화되었음을 볼 수 있다. 반면, TIG 용접재의 경우에는 용접시의 높은 입열량으로 인한 온도상승으로 D로 표시된 열영향부의 결정립 크기가 무려 $60\mu\text{m}$ 정도로 조대하게 성장하여 원소재의 미세립 구조가 완전하게 사라졌음을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 SFW 기술은 미세결정립 구조를 가지는 금속 판재를 효과적으로 접합할 수 있음을 알 수 있다.

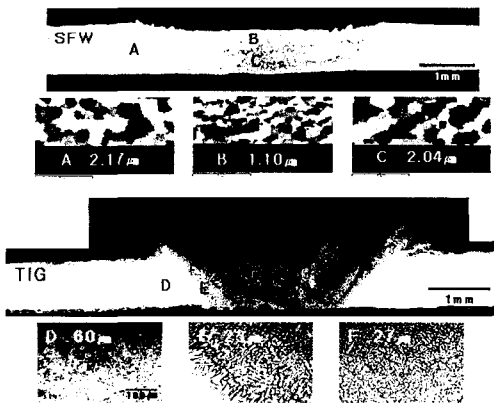


Fig. 5 Grain sizes of the SFWed and TIG welded 1050 Al alloy sheets (1.0mmt) fabricated by ARB process.

그림 6은 다양한 조건으로 접합된 두께 1.0mm 5052 Al 합금 SFW 접합재의 인장강도를 나타낸 것이다. 그림 6의 점선은 원소재 인장강도인 232MPa를 표시한 것이다. 접합재의 인장강도가 접합속도가 증가하면서 약간 감소하고 있으나 전체적으로 원소재 인장강도의 80% 이상으로 기존 용접법과 비교하여 매우 우수한 접합강도를 나타냄을 확인할 수 있다.

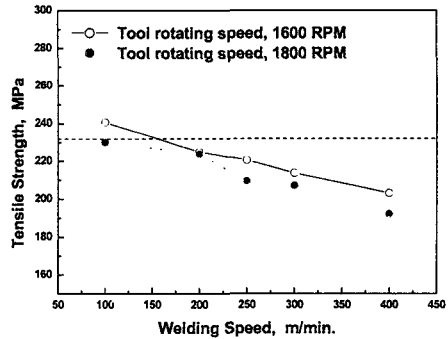


Fig. 6 Tensile strength of the SFWed 5052 Al alloy sheets (1.0mmt) under various welding conditions.

5. 결론

SFW 기술은 새로운 개념의 고상접합기술로서 결합발생 및 접합 후 변형의 최소화, 우수한 접합 특성, 경제성, 환경친화성 등의 장점을 가지고 있어 향후 다양한 산업분야에서 중요 접합기술로서의 위치를 차지할 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 차세대 소재성형 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) T. Shinoda, 2002, "마찰교반접합의 특장과 금후의 전망", 마찰교반접합기술의 최신동향과 실용예, 일간공업신문사, 일본, pp. 7~15.
- (2) 일체화성형용 튜브 제조 및 부품 개발, 2004, 차세대소재성형 기술개발 사업, pp. 36~43.
- (3) T. Shinoda, 2001, "Friction Stir Welding의 기초와 실제", 용접기술, 6월호, 일본, pp. 16~21.