

304 스테인레스강 FSW부의 조직 및 특성

Microstructures and characteristics of friction stir welded 304 stainless steel

박 승환 (Seung Hwan C. Park)*, Yutaka S. Sato*, Hiroyuki Kokawa*,
Kazutaka Okamoto**, Satoshi Hirano**, Masahisa Inagaki**

* Department of Materials Processing, Graduate School of Engineering, Tohoku University

** Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.

ABSTRACT The microstructural evolution in a 304 stainless steel weld during FSW was examined. The SZ and TMAZ showed typical dynamically recrystallized and recovered microstructures, respectively. The microstructural observation revealed that sigma phase was formed at the advancing side of the stir zone. A possibility was suggested that the rapid formation of the sigma phase is related to the transformation of austenite to delta-ferrite in the stir zone, from introduction of high strain and dynamic recrystallization during FSW.

1. 서 론

Friction stir welding (FSW, 마찰교반접합)에 대한 대부분의 연구는 주로 알루미늄(Al)이나 마그네슘(Mg) 합금같은 저융점 재료에 치중되어왔다¹⁻¹⁴⁾. 특히, Al합금에 대한 FSW는 기존의 용융용접법에 비해 기계적 성질 및 코스트 효율을 향상시키기 때문에, 에너지절약 및 고속화가 요구되는 철도 차량, 선박, 항공기, 자동차 등의 수송구조물에 그 쓰임이 점차 확대되고 있다¹⁵⁻¹⁷⁾.

최근, FSW를 통한 Al합금 대형구조물의 실용화에 힘입어, 고용점 재료에 대해서도 FSW연구가 활발히 진행되고 있다. Al합금 뿐만아니라 철강재료에 대해서도, FSW에 의한 접합부에는 미세 결정립 조직이 형성되며, 용접변형은 작을 것이 예상되므로, 용융용접법에 비교해서 여러가지 이점이 예상된다. 실제로, 스테인레스강 등 몇몇 철강재료에 대한 FSW의 가능성이 다수의 문헌에 소개되었고, FSW부의 기계적 성질은 모재와 거의 동등한 것으로 보고되어 있다¹⁸⁻²²⁾. 그러나, 스테인레스강 FSW부의 상세한 미세조직과 그 특성에 대해서는 아직 보고되어 있지 않다. 본 연구는 대표적인 오스테나이트계 스테인레스강 SUS304에 FSW를 실시해, FSW중의 미세조직 형성에 대해서 조사하는 것을 목적으로 했다.

2. 실험방법

공시재는 두께 6mm의 SUS304 오스테나이트계 스테인레스강을 사용했다. 공시재에 대해 회전속

도 550rpm, 주행속도 1.33mm/s의 접합조건으로 FSW를 실시한후, 접합방향에 수직인 단면을 절단했다. FSW부 단면 마크로 조직관찰은 광학현미경을, 상세한 미세조직 관찰에는 투과전자현미경(TEM)을 사용했다. Advancing side에 관찰된 석출물에 대해서는 전자선 회절 패턴에 의한 관찰해석 및 TEM/EDS에 의한 조성분석을 실시했다. 또한, 접합부의 기계적 성질을 평가하기 위하여 경도측정과 인장시험을 했다.

3. 실험결과

3.1 접합부의 미세조직

Fig. 1은 304 스테인레스강의 FSW부 단면 마크로 조직을 나타낸다. FSW부에서는 용융용접시 나타날 수 있는 용접결함은 형성되지 않았다. 모재(BM), 접합부 중앙(SZ), 기계적 열 영향부(TMAZ)의 광학 현미경 사진 및 TEM 사진을 Fig. 2에 나타낸다. 모재는 저전위밀도를 지닌 결정립계 약 20.2 μm 의 재결정조직을 나타냈다. 반면, SZ는 비교적 전위밀도가 높고 결정립계 약 14.1 μm 의 등축결정립 조직을 나타냈다. 한편, TMAZ에 있어서의 결정립계는 약 11.2 μm 이고, 이들 결정립은 다수의 아결정립에 의해 형성되었다. 이러한 결과로부터, SZ 및 TMAZ는 각각 동적재결정 및 동적회복에 의해 형성된 것으로 생각되며, 304 스테인레스강 FSW부에 대한 미세조직 관찰 결과는 Al합금 FSW부의 전형적인 미세조직 특성과 일치하고 있다.

3.2 밴드조직의 특성과 형성

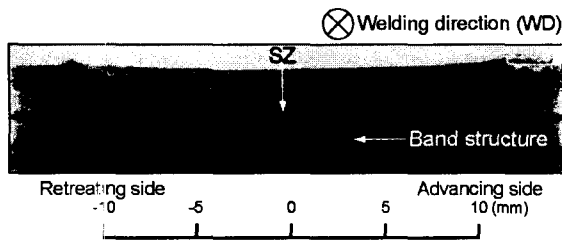


Fig. 1 Cross section perpendicular to the welding direction in a friction stir welded 304 stainless steel.

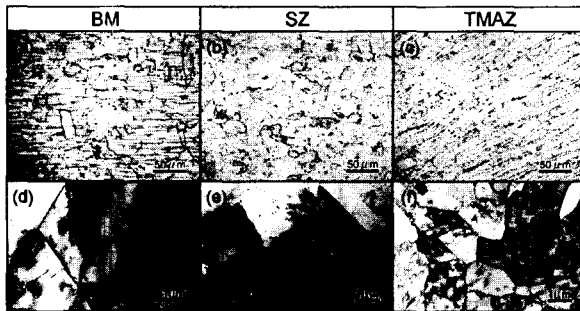


Fig. 2 Optical micrographs and TEM images in the base material, the stir zone and the thermomechanically affected zone.

Fig. 1에 검은 사각선으로 표시된 영역의 광학 현미경 사진을 Fig. 3(a)에 나타낸다. 사진에서 알 수 있듯이 이 부분에는 밴드형상의 조직이 형성되어 있으며 그 형상은 Fig. 3(a)의 A, B에 나타내듯이 두 영역으로 구분된다. 영역 A, B의 광학 현미경 사진을 각각 Fig. 3(b) 및 Fig. 3(c)에 나타내고 있다. 영역 A에는 엇칭에 의해 더욱 깊게 파진 라인이, 영역 B에는 피트가 생긴 영역과 생기지 않은 영역으로 형성된 라멜라 조직이 나타났다. 영역 A 및 B의 TEM 사진을 Fig. 4에 나타낸다. 영역 A에는 500에서 1000 nm 정도의 석출물이 결정립계에 형성되어 있는 것이 관찰되었다. 한편, 피트가 생긴 영역 B에 대해서는 200에서 400 nm의 석출물이 결정립계나 결정립내에 분산되어 있는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b) 및 Fig. 4(d)에 나타낸 TEM/EDS 분석 결과로부터, 영역 A에 관찰된 석출물은 Cr, Fe, Ni를 각각 54.6 wt%, 43.1 wt%, 1.0 wt% 함유하고 있고, 영역 B의 석출물은 33.8 wt%, 60.6 wt%, 5.0 wt% 함유하고 있음을 알 수 있다. 이것들의 석출물에 대한 전자 회절 패턴을 Fig. 5(d)에 나타내고 있다. 패턴해석에 의해, 각반부의 Advancing side에 형성된 밴드조직은 격자 상수 $a = 10.9221 \text{ \AA}$, $c = 5.6403 \text{ \AA}$ 을 지니는 정방정의 시그마상인 것으로 생각된다.

이렇게 시그마상의 형성은 각반부의 Advancing

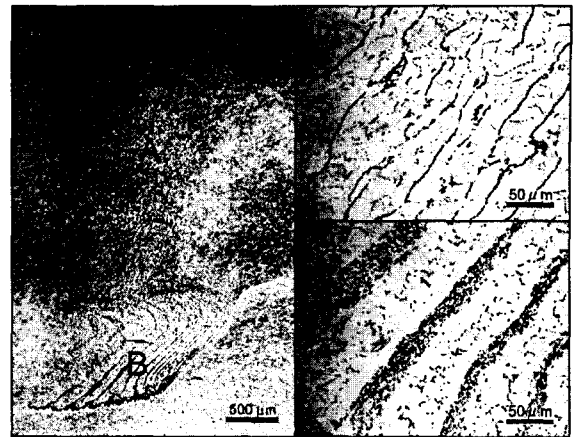


Fig. 3 (a) Low magnification overview of the stir zone at the advancing side. The detailed microstructure of regions "A" and "B" are shown in (b) and (c), respectively.

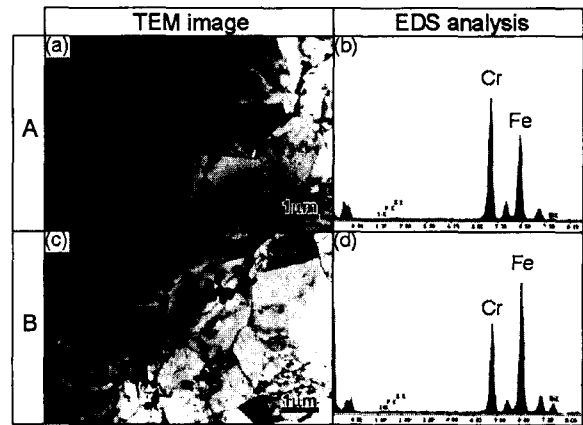


Fig. 4 TEM images in regions "A" and "B" and EDS analyses in the regions.

side에서 급격히 촉진되었다. 이것은 접합중 온도 상승에 의해, 델타 페라이트가 생성되어, 그 페라이트가 고변형 및 동적 재결정을 통해 단시간에 시그마상과 오스테나이트상으로 분해된 것으로 추찰된다.

3.3 접합부의 경도분포 및 인장특성

Fig. 6에 FSW부의 경도분포를 나타낸다. SZ의 경도는 모재에 비해 높고, 경도분포는 접합중심을 경계로 좌우 비대칭을 이루었다. 최고 경도는 밴드조직을 나타내는 지역과 일치했다. 이것은 그 부분에서의 결정립 미세화와 시그마상의 형성때문으로 생각되어진다.

Fig. 7은 FSW부의 인장특성을 모재와 비교하여 나타낸다. FSW 접합재의 인장시험후 파단은 모재에서 일어났다. 접합재의 연신율은 모재에 비해 약간 감소하긴 했지만, 항복응력 및 인장강도는 모재와 거의 동등했다.

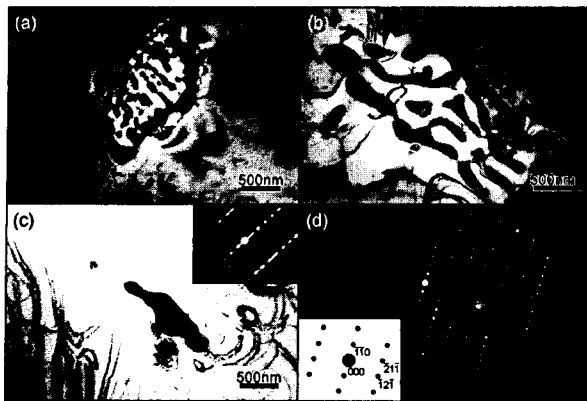


Fig. 5 TEM images of the particles in regions "A" and "B," and selected area diffraction patterns. The zone axis is accordant with $[113]_0$ in Fig. 4(d).

4. 결 론

304스테인레스강 FSW부에 대한 미세조직 형성에 대해 조사했다. 교반부 및 열/기계적 영향부는 전형적인 동적 재결정 및 회복 조직을 보였다. 교반부의 Advancing side에는 시그마상이 형성되었다. 급속도로 형성된 시그마상은 마찰열에 의한 델타 페라이트의 형성과 고변형에 관계한 것으로 생각된다.

참고문헌

1. C.J. Dawes and W.M. Thomas : Welding Journal, 75-3 (1996), 41-45
2. M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling and W.H. Bingel : Metall. Mater. Trans. A, 29A (1998), 1955-1964.
3. G. Liu, L.E. Murr, C-S. Niou, J.C. McClure and F.R. Vega : Scripta Mater., 37 (1997), 355-361.
4. Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto and S. Jogan : Metall. Mater. Trans. A, 30A (1999), 2429-2437.
5. Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto : Mater. Trans. A, 30A (1999), 3125-3130.
6. K.V. Jata and S.L. Semiatin : Scripta Mater., 43 (2000), 743-749.
7. Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda and M. Enomoto : Scripta Mater., 45 (2001), 109-114.
8. Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto : Metall. Mater. Trans. A, 32A (2001), 941-948.
9. Y.S. Sato and H. Kokawa : Metall. Mater. Trans. A, 32A (2001), 3023-3031.
10. Y.S. Sato, S.H.C. Park and H. Kokawa : Metall. Mater. Trans. A, 32A (2001), 3033-3042.
11. S.H.C. Park, Y.S. Sato and H.Kokawa : Proceedings of the 7th International Symposium of JWS, Kobe, Japan, vol. 1 (2001), 639-644.

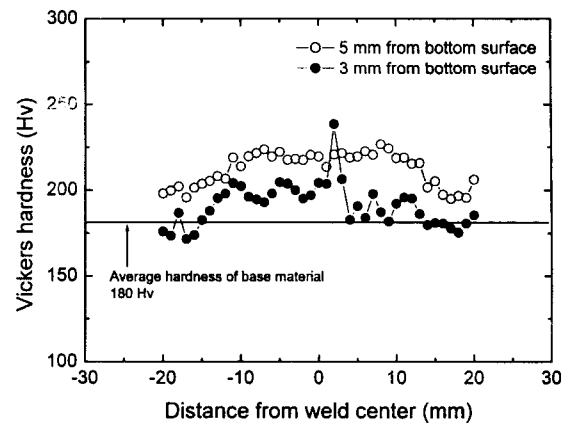


Fig. 6 Hardness distributions in friction stir welded 304 stainless steel.

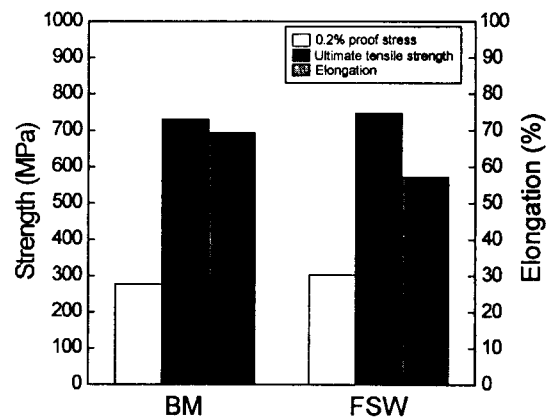


Fig. 7 Tensile properties of friction stir welded 304 stainless steel.

12. S.H.C. Park, Y.S. Sato and H.Kokawa : Proceedings of the 6th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, Georgia, (2002), 267-272.
13. S.H.C. Park, Y.S. Sato and H.Kokawa : Metall. Mater. Trans. A, 34A (2003), 987-994.
14. S.H.C. Park, Y.S. Sato and H.Kokawa : Scripta Mater., 49 (2003), 161-167.
15. M.R. Johnsen : Welding Journal, 78-2 (1999), 35-39.
16. J.G. Wylde : J. Japan Inst. Light Metals, 50 (2000), 189-197.
17. S.W. Kallee, J. Davenport and E.D. Nicholas : Welding Journal, 81-10 (2002), 47-50.
18. W.M. Thomas, P.L. Threadgill and E.D. Nicholas : Sci. Technol. Weld. Join., 4-6 (1999), 365-372.
19. C.D. Sorensen, T.W. Nelson and S.M. Packer : Proceedings of the 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, (2001), CD-ROM.
20. T.J. Lienert, W.L. Jr. Stellwag, B.B. Grimmer and R.W. Warke : Welding Journal, 82-1 (2003), S1-S9.
21. A.P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold and H. Prask : Scripta Mater., 48 (2003), 1289-1294.
22. K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki, S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, T.W. Nelson and C.D. Sorensen : Proceedings of the 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, (2003), CD-ROM.