

스테인리스 강의 마찰교반접합

연운모 · 이창용 · 최돈현 · 이종봉 · 정승부

Friction Stir Welding of Stainless Steels

Yun-Mo Yeon, Chang-Yong Lee, Don-Hyun Choi, Jong-Bong Lee and Seung-Boo Jung

1. 서 론

마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW)¹⁾기술은 고상접합으로서 종래의 용접법에 비해 접합시 변형이 작고 접합결합이 적으며 접합부의 기계적 특성이 양호하다는 등의 여러 가지 우수한 특징이 있어 경량화가 요구되는 철도차량, 자동차, 선박, 항공우주기기, 토목구조물, 반도체기기 등 여러 가지 분야에서 비교적 단기간에 실용화되어 왔다²⁻⁵⁾.

종래, 마찰교반접합기술 적용의 대부분은 알루미늄(Al)합금, 마그네슘(Mg)합금 및 구리(Cu)합금 등과 같이 용점이 비교적 낮은 재료에 한정되어 왔으나 최근에는 철강재료와 같이 비교적 용점이 높은 재료에 마찰교반접합이 적용되고 있다. 철강재료의 마찰교반접합에 관한 연구보고는 틀재질 및 접합장치의 문제로 알루미늄 합금과 같은 비철재료의 경우에 비하면 상대적으로 적다. 그러나 그 중에서도 스테인리스 강의 마찰교반접합⁶⁻¹¹⁾은 틀재질의 마모문제가 일부 있음에도 불구하고 금속조직적 특성에 대해 비교적 활발히 보고되었으며 최근에는 국내에서도 오스테나이트계 스테인리스 강에 관한 연구¹²⁻¹³⁾가 발표되기 시작하였다.

따라서 본 보고에서는 스테인리스 강의 마찰교반접합에 관한 이제까지의 보고를 조직, 틀의 마모 및 내식성을 중심으로 정리하여 소개하고자 한다.

2. 접합부 조직

오스테나이트계 스테인리스 강의 마찰교반접합부 각 부분의 미세조직은 알루미늄합금의 경우와 거의 비슷하지만 교반부 일부에서 밴드조직이 형성된다는 점이 다르다. 304 스테인리스 강(6t)을 PCBN틀을 사용하여 550rpm, 78mm/min의 접합조건에서 마찰교반접합한 후의 접합부 단면 마크로 조직을 Fig. 1⁷⁾에 나타낸다. 접합부에는 어떠한 내부결함도 관찰되지 않으나 교반부

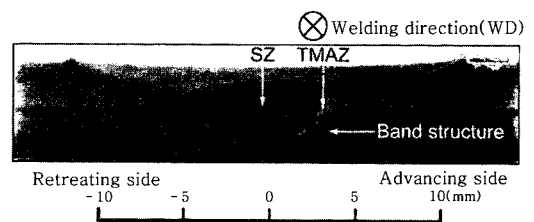


Fig. 1 Cross section perpendicular to the welding direction in 304 stainless steel friction stir weld

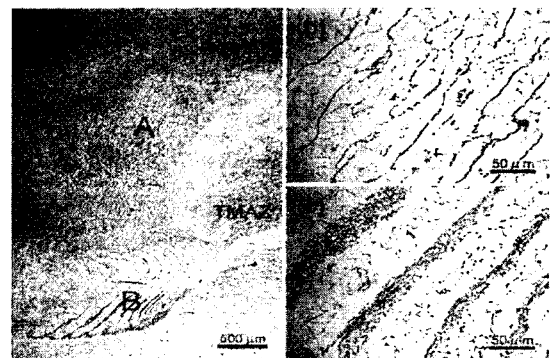


Fig. 2 Microstructure of the stir zone at the advancing side(304 stainless steel). (a) overview, (b) (c) detailed microstructure of A and B regions

(SZ)의 일부에서 띠 형태의 조직이 관찰된다.

교반부 일부의 이러한 조직을 좀 더 미세하게 보면 Fig. 2⁷⁾에 나타내듯이 교반부의 전진측(advancing side, AS)에서 형성되는 띠 형태의 밴드조직으로서 이러한 밴드조직은 316L 스테인리스 강 마찰교반접합부⁶⁾의 AS에서도 확인되고 있다. 304 스테인리스 강 마찰교반접합부의 밴드조직은 깊게 에칭된 선상조직(A) 및 층상조직(B)으로 분류된다. 밴드조직 중의 입계 및 입 내에는 미세한 석출물이 관찰되며 Fig. 3⁷⁾의 TEM조



Fig. 3 Higher magnified TEM images of the particles in the regions A and B, and selected area diffraction patterns(304 stainless steel)

직의 전자회절도형에 나타내듯이 석출물은 내부에 다수의 적층결합이 있는 시그마 상이다. 또한 304 스테인리스 강 모재의 판두께가 2mm로 얇아 마찰교반접합과정의 냉각속도가 빠른 경우¹⁰⁾에는 시그마상이 보이지 않고 δ페라이트가 관찰된다.

SZ의 밴드형태의 조직은 접지기 마찰교반접합부에서도 관찰된다. Fig. 4¹³⁾은 304 스테인리스 강(0.6t)을 800rpm, 87mm/min의 접합조건에서 WC툴로 접지기 마찰교반접합한 경우의 광학현미경 조직을 나타낸다. Fig. 4(c)에 나타내듯이 SZ는 모재(Fig. 4(b))에 비해 매우 미세화되며 등축의 재결정조직이다. SZ의 AS에서는 Fig. 4(d)에 나타내듯이 밴드형태의 조직이 형성되며 열가공 영향부(TMAZ)에서는 Fig. 4(e)에 나타내듯이 미세하면서 연신된 형태의 조직을 나타낸

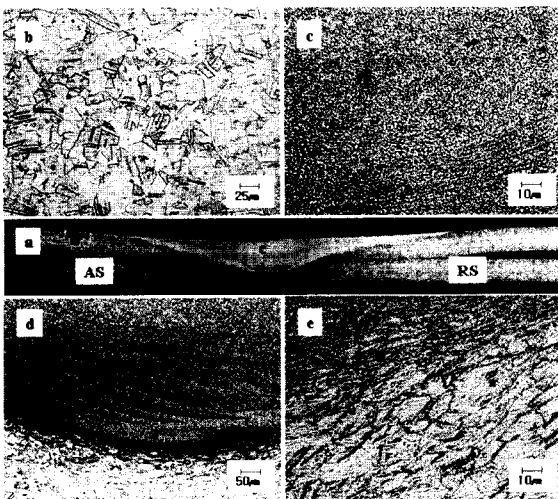


Fig. 4 Microstructures of cross section in 304 stainless steel friction stir lap weld. (a)overview (b)BM (c)SZ (d)band structure in SZ (e)TMAZ/HAZ

다. 이상에서와 같이 이러한 밴드조직은 304 스테인리스 강과 같은 오스테나이트계 스테인리스강의 마찰교반부에서 생기는 특이한 현상이라 할 수 있다.

3. 접합부의 경도분포, 결정입도 및 페라이트 량

304 스테인리스 강(2t)을 PCBN툴을 사용하여 1300rpm, 270mm/min의 접합조건에서 마찰교반접합한 접합부 단면의 경도분포를 Fig. 5¹⁰⁾에 나타낸다. 모재의 평균경도는 180Hv이나 접합부의 경도는 TMAZ에서 증가하며 SZ의 경도는 TMAZ의 경우에 비해 오히려 약간 감소한다. 304스테인리스 강 SZ의 경도가 모재에 비해 높고 최고경도를 나타내는 영역은 밴드조직을 나타내는 영역과 일치한다. 그러나 316L 스테인리스 강의 마찰교반접합부⁶⁾에서는 경도변화 및 열영향부(HAZ)의 연화가 거의 나타나지 않는다. 이들 304 스테인리스강 마찰교반접합부의 결정입도를 Fig. 6¹⁰⁾

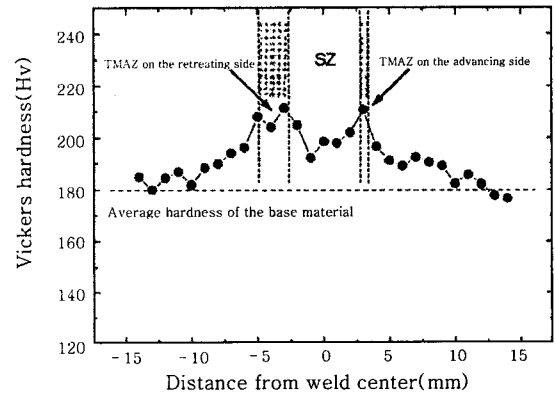


Fig. 5 Hardness profiles along transverse direction in 304 stainless steel FS weld

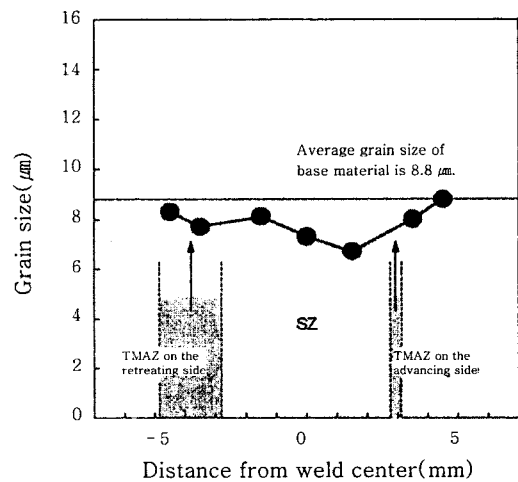


Fig. 6 Grain size distribution obtained from OIM maps via mean intercept method in 304 stainless steel FS weld

에 나타낸다. SZ 및 TMAZ의 결정입도는 평균적으로 모재의 경우에 비해 약간 작다. 이와 같은 결정립의 미세화뿐만 아니라 모재에 비해 높은 SZ 및 TMAZ의 전위밀도 및 SZ의 AS에서의 미세한 시그마상의 분산 등도 경도를 증가시키는데 기여한다¹⁰⁾.

이상의 오스테나이트계 스테인리스강의 경우에 비해 페라이트계 스테인리스강의 마찰교반접합부의 경도분포는 크게 다르다. 430 페라이트계 스테인리스 강(6t)을 550rpm, 80mm/min의 접합조건에서 마찰교반접합한 접합부 단면의 경도변화를 Fig. 7¹⁴⁾에 나타낸다. SZ 중심부에서 경도가 모재에 비해 증가되는데, 그 주된 이유는 SZ부에서의 마르텐사이트의 형성과 미세화된 2상 조직(페라이트+마르텐사이트)때문이다.

2상 스테인리스강(페라이트+오스테나이트)을 용융용접하는 경우, 용접금속중의 페라이트 량이 증대되는 문제점이 있지만 마찰교반접합하는 경우에는 이러한 문제가 생기지 않는다. Fig. 8¹⁵⁾에 2상 스테인리스 강(25Cr-7Ni-3.5Mo)접합부의 페라이트 량 분포를 나타내는데

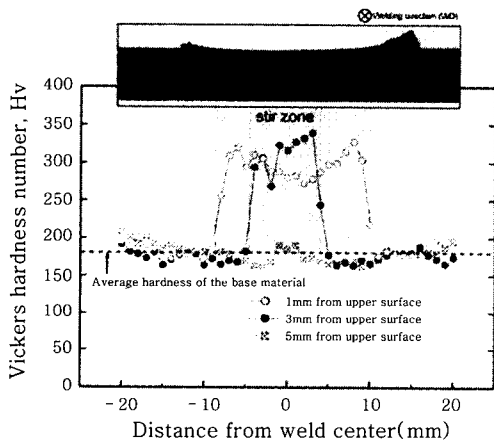


Fig. 7 Hardness distribution in 430 stainless steel FS weld

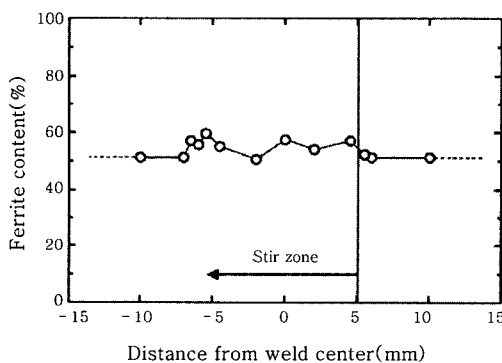


Fig. 8 Profile of ferrite content in duplex stainless steel FS weld

접합부 전체와 모재가 거의 비슷한 정도의 페라이트 량이 유지된다.

4. 최고온도 및 접합률의 마모

스테인리스 강은 알루미늄합금에 비해 강도가 높아 마찰교반접합시, 회전마찰에 의한 열이 많이 발생하여 접합률 및 교반부가 고온으로 가열되므로 접합률의 마모가 중요하다. 304 스테인리스 강을 550rpm의 틀회전속도로 마찰교반접합할 경우, 접합 중심부의 최고가열온도를 열전대를 사용하여 측정하면 Fig. 9⁶⁾에 나타내듯이 약 1200°C의 고온으로 되는데 이 부분은 교반부(SZ)에 해당되며 열가공 영향부(TMAZ)는 약 1000°C 까지 가열된다. 그러나 틀 회전속도가 높지 않은 경우⁸⁾에는 최고가열온도가 약 900°C 이하로 저하된다.

스테인리스 강을 마찰교반접합하면 교반부가 Fig. 9에서와 같이 고온으로 가열되므로 접합률 사용전후의 형상을 비교하면 접합률의 마모가 발생한다. Fig. 10¹⁶⁾은 여러 가지 종류의 스테인리스 강을 PCBN툴로 마찰교반접합한 후의 BM, 교반부의 retreating side (SZ-RS) 및 교반부의 advancing side(SZ-AS) 각각 영역에서의 질소량 분석결과를 나타낸다. 페라이트계 430 스테인리스강 및 2상 329J4L 스테인리스강에서는 BM 및 SZ-RS에 비해 SZ-AS에서 N함유량이 약간 증가하지만 교반부 전체의 질소량 변화는 거의 나타나지 않는다. 이에 비해 오스테나이트계 스테인리스강(304, 316L, 310)은 SZ-AS에서 BM 및 SZ-RS에 비해 질소량이 현저히 증가한다. 이는 PCBN툴의 마모가 오스테나이트계 스테인리스강에서 현저하다는 것을 보여준다. 이러한 오스테나이트계 스테인리스강의 마찰교반접합부의 SZ-AS에서는 Fig. 2⁷⁾에 나타낸 것과 같은 전형적인 밴드조직이 형성된다.

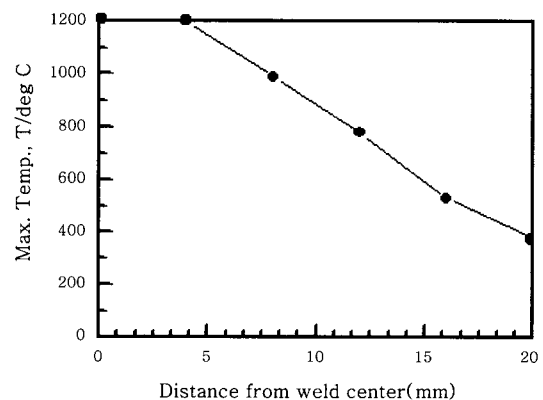


Fig. 9 Peak temperature as function of the distance from the weld centerline in 304 stainless steel FS weld(550rpm, 80mm/min)

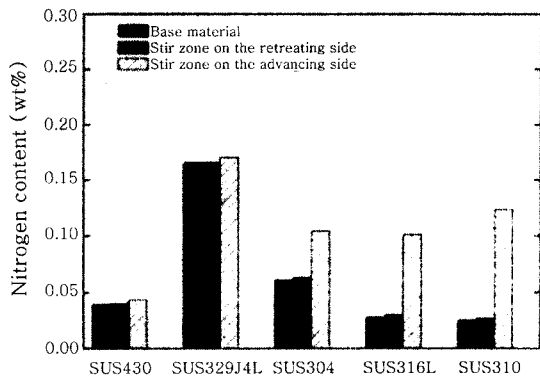


Fig. 10 Nitrogen contents of BM, SZ-RS and SZ-AS in friction stir welded stainless steels

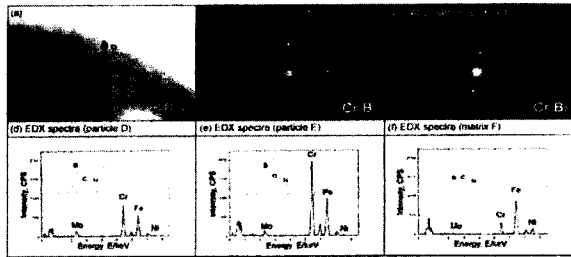


Fig. 11 (a)STEM images of stir zone on the advancing side in 316L stainless steel. (b~f)Selected area electron diffraction patterns and EDX spectra of particles and matrix

316L 스테인리스강 FSW접합부 SZ-AS의 밴드조직 내의 PCBN파편의 형태를 STEM/EDX로 분석한 결과를 Fig. 11¹⁶⁾에 나타낸다. 미세한 입자가 입계 및 입 내에 분포하는데 이들 입자는 기지에 비해 Cr함유량이 높고 Ni량은 낮으며 B피크는 관찰되지만 N피크는 관찰되지 않는다. 전자선 회절패턴 결과에 따르면 이들 입자는 Cr₂B 또는 CrB으로 PCBN 접합물은 마찰교반 접합중, 고온에서 마모되어 PCBN파편이 오스테나이트 기지와 반응하여 CrB계 화합물을 형성하나 PCBN파편으로 부터의 N은 오스테나이트 기지에 고용되어 화합물형성에는 영향을 미치지 않는다¹⁶⁾. 한편, WC를 사용하여 304 스테인리스 박판(0.6t)을 마찰교반접합하는 경우¹³⁾에는 접합물 중의 W입자가 극히 미량이지만 마모에 의해 기지내로 미세하게 혼입되기도 한다.

5. 접합부의 내식특성

마찰교반접합은 고상접합이므로 용융용접에 비해 접합온도가 낮아 열영향을 적게 받아 오스테나이트계 스테인리스 강 열영향부의 입계부식은 경미하지만 교반부

전진측(SZ-AS)의 내식성은 사용되는 틀재질에 따라 다르게 나타난다.

PCBN틀을 사용하여 마찰교반접합한 304 스테인리스 강 접합부의 입계부식시험(황산·황산제2철 부식시험)후의 BM, HAZ, SZ, SZ의 AS에서의 SEM사진을 Fig. 12⁹⁾에 나타낸다. 마찰교반접합재 HAZ에서의 입계부식은 Fig. 12(b)에 나타내듯이 같은 정도의 접합깊이의 용융용접(Fig. 13(e))에 비해 매우 억제되는데 이는 마찰교반접합부의 HAZ는 같은 정도의 접합깊이의 용융용접에 비해 예민화 온도영역에 유지된 시간이 1/5정도로 짧기 때문이다⁹⁾. 또한, SZ는 Fig. 12(c)에 나타내듯이 거의 부식되지 않는다. 그러나 SZ의 AS에서의 결정입계는 Fig. 12(d)에 나타내듯이 깊게 부식되며 내식성이 저하한다.

Fig. 12에서와 같은 접합조건에서 W-Re틀로 마찰교반접합한 후, EPR시험(재활성화 부식시험)에 의해 측정된 304 스테인리스 강 접합부 각 영역의 예민화도를 Fig. 13¹¹⁾에 나타낸다. PCBN 틀을 사용하여 접합한 경우, SZ의 AS에서는 예민화도가 매우 높고 Fig. 12(d)의 부식표면결과와도 잘 대응되나 W-Re 틀을 사용한 경우의 예민화도는 SZ-AS 뿐만 아니라 기타 영역에서의 경우에도 매우 낮으며 HAZ의 경우라도 용융용접 HAZ의 경우에 비해 약 1/3 정도로 낮다. 이러한 부식시험결과로 미루어 오스테나이트계 스테인리스

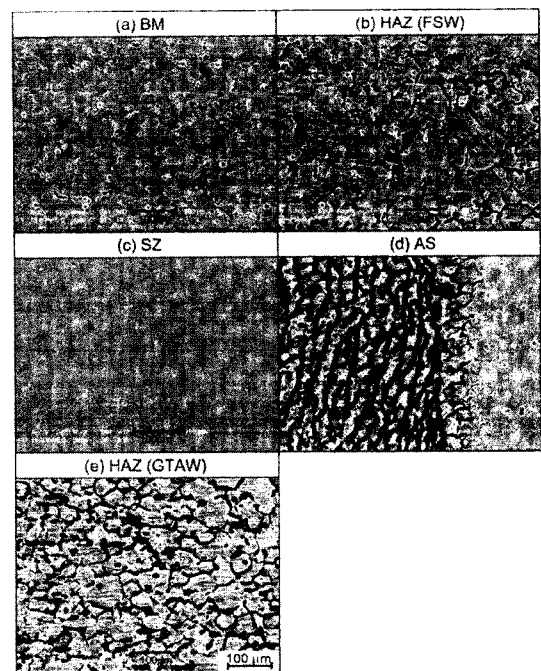


Fig. 12 SEM images of several regions after ferric sulfate-sulfuric acid test in 304 stainless steel FS weld

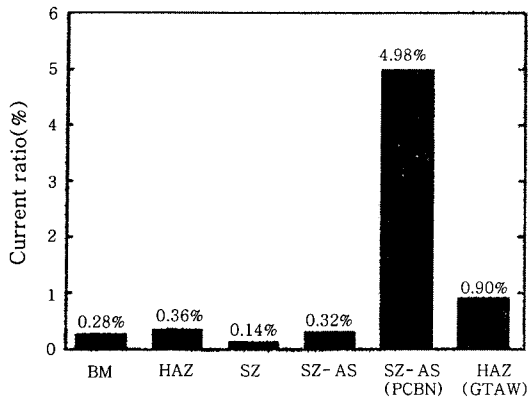


Fig. 13 Reactivation current ratios in the BM, the HAZ in 304 stainless steel FS weld, the SZ, the advancing side of the SZ and the HAZ in the GTA weld

의 경우에는 W-Re 톨을 사용하는 것이 PCBN 톨의 경우에 비해 마찰교반접합부의 내식성을 크게 향상시킬 수 있다.

PCBN 톨로 마찰교반접합한 304 스테인리스 강의 SZ-AS에서 입계부식이 심하고 예민화도가 높게 나타나는 것은 시그마상 및 CrB 주변에 Cr결핍층이 형성되는데 기인된다¹⁷⁾. Fig. 14⁹⁾의 TEM/EDX 분석결과에 의하면 HAZ 입계근방의 Cr결핍은 Fig. 14(d)에 나타내듯이 경미하지만 SZ의 AS에서의 Cr결핍은 Cr 석출물(Cr₂B, CrB 등)의 생성에 의해 Fig. 14(e)에 나타내듯이 현저해진다. 이러한 SZ의 AS에서의 현저한 Cr결핍(13% 이하)에 의해 SZ의 AS에서의 내식성이 저하되며 Fig. 13에 나타냈듯이 예민화도가 가장 높게 나타나게 된다.

6. 접합부의 기계적 성질

304 스테인리스 강 마찰교반접합재를 인장시험하면

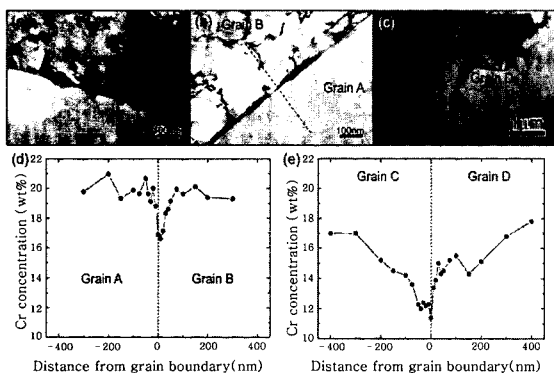


Fig. 14 TEM images and Cr content profiles near grain boundaries by EDS analysis in the HAZ and the advancing side of the stir zone

주로 모재에서 파단될 정도로 접합강도가 우수하다.

Fig. 15⁶⁾은 PCBN 톨을 사용하여 550rpm, 80mm/min의 접합조건에서 마찰교반접합한 시편의 인장시험후의 파단형태로서 BM의 경우와 같이 모재부에서 파단된다. 또한, 304 스테인리스 강을 WC 톨을 사용하여 800rpm, 87mm/min의 접합조건에서 겹치기 마찰교반접합한 경우¹³⁾에도 모재부 파단이 관찰된다. 그러나 304 스테인리스 강 마찰교반접합부의 연신률은 일반적으로 모재에 비해 약간 감소한다.

430 페라이트계 스테인리스강(6t)을 PCBN 톨을 사용하여 550rpm, 80mm/min의 접합조건에서 마찰교반접합한 접합재의 인장특성을 Fig. 16¹⁴⁾에 나타낸다. 마찰교반접합한 430 페라이트계 스테인리스 강(FSW-T)의 인장강도는 거의 모재와 비슷한 값을 나타내지만 연신률은 모재 연신률의 약 2/3정도를 나타낸다. 또한, 마찰교반영역만으로 이루어진 마찰접합재(FSW-L)의 경우는 모재의 경우에 비해 거의 2배의 강도를 나타내는 반면 연신률은 거의 절반으로 감소한다. 이는 SZ에 형성된 많은 양의 마르텐사이트에 기인된다¹⁴⁾. 2상 스테인리스강(4t)을 450rpm, 60mm/min의 조건에서 접합한 경우¹⁵⁾도 접합부의 항복강도 및 인장강도는 모재의 경우와 비슷하나 연신률은 감소하는 경향을 나타내며 인장시험후의 파단은 TMAZ(RS영역)와 SZ의 경계부에서 발생한다.

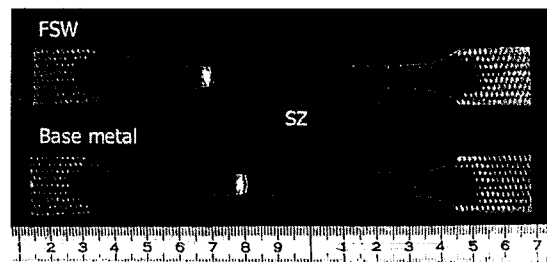


Fig. 15 Fractured transverse tensile specimen of the friction stir welded 304 austenitic stainless steel and the base metal

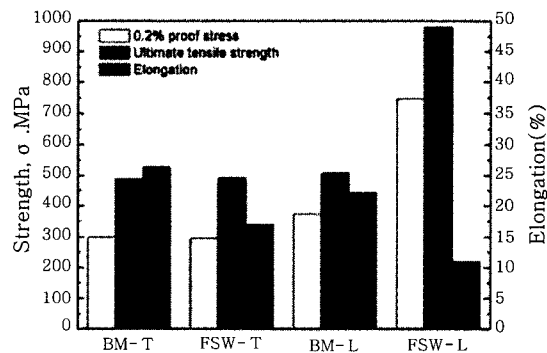


Fig. 16 Transverse and longitudinal tensile properties of friction stir welded 430 ferritic stainless steel

이상에서와 같이 마찰교반접합한 스테인리스 강의 접합강도는 강종에 관계없이 비교적 양호하나 마찰교반접합부의 조직 변화 및 경화현상으로 인해 접합재의 연신률은 일반적으로 감소한다.

7. 맺는 말

스테인리스강의 용접은 종래의 아크용접기술로도 가능함에도 불구하고 마찰교반접합특성이 요구되는 특수 분야라면 본 기술의 적용이 가능하리라 생각된다. 특히 마찰교반접합기술이 알루미늄 합금 철도차량에 이미 실용화되고 있듯이 스테인리스 철도차량제조에도 그 적용이 검토될 수 있으리라 기대된다. 또한, 스테인리스 강의 마찰교반접합이 그 동안 동종재 위주로 연구되어 왔다면 향후에는 스테인리스 강과 이종재료와의 접합이 요구되는 분야에 마찰교반접합기술의 적용이 기대된다고 하겠다.

참 고 문 헌

1. W.M.Thomas, E.D.Nicholas, J.C.Needhan, M.G.Murch, P.Temp Smith and C.J.Dawes: International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6(1991)
2. M.R.Johnsen: Welding Journal, 78-2(1999), 35-39
3. H.Okamura, K.Aota, M.Ezumi: Journal of Japan Institute of Light Metal, 50-4(2000), 166-172(in Japanese)
4. Y.S.Sato, H.Kokawa: Journal of the High Temperature Society, 32-3(2006), 165-171(in Japanese)
5. H. Fujii: Journal of Japan Institute of Light Metal, 57-11(2007), 499-505(in Japanese)
6. K.Okamoto, S.Hirano, M.Inagaki, S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, T.W.Nelson, C.D.Sorensen : Proc. 4th Int. Sympto. Friction Stir Welding, TWI, Park City, Utah, USA, (2003), CD-ROM

7. S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano and M.Inagaki: Scripta Mater., 49(2003), 1175-1180
8. A.P.Reynolds, W.Tang, T.Gnaupel-Herold and H.Prask: Scripta Mater., 48(2003), 1289-1294
9. S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano and M.Inagaki: Scripta Mater., 51(2004), 101-105
10. S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano, M.Inagaki: Science and Technology of Welding and Joining, 10-5(2005), 550-556
11. Y.S.Sato, M.Muraguchi, H.Kokawa: Friction Stir Welding and Processing IV, TMS(2007), 261-268
12. Heung-Ju Kim, Hyun-Jin Cho, Woong-Seong Chang: Proceedings of the 2006 Spring Annual Meeting of KWJS, 286-288(in Korean)
13. Chang-Yong Lee, Don-Hyun Choi, Seong-yun Pyo, Won-Bae Lee, Jong-Bong Lee, Yun-Mo Yeon, Seung-Boo Jung: Proceedings of the 2007 Autumn Annual Meeting of KWJS, 158-160(in Korean)
14. S.H.C.Park, T.Kumagai, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano, M.Inagaki: Proceedings of The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, June 19-24, (2005)
15. Y.S.Sato, T.W.Nelson, C.J.Sterling, R.J.Steel and C.O.Pettersson: Mater. Sci. Eng. A, 397(2005), 376-384
16. S.H.C.Park, Y.S.Sato, H.Kokawa, K.Okamoto, S.Hirano, M.Inagaki: Preprints of the National Meeting of Japan Welding Society, 77(2005), 174-175(in Japanese)
17. S.H.C.Park: Microstructures and properties of friction stir welded sinless steels (Ph.D. thesis), Tohoku University, 2005



- 연운모(延倫模)
- 1953년생
- 수원과학대학 신소재응용과
- 마찰교반접합, 마찰교반 점용접
- e-mail : ymyeon@ssc.ac.kr



- 이창용(李暢鎔)
- 1974년생
- 한국과학기술원 기계기술연구소
- 마찰교반접합, 마이크로접합
- e-mail : lcy011@skku.edu



- 최동현(崔敦鉉)
- 1982년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마찰교반접합, 마이크로접합
- e-mail : cdh0326@skku.edu



- 이종봉(李種鳳)
- 1953년생
- POSCO 기술연구소
- 철강용접
- e-mail : jongblee@posco.co.kr



- 정승부(鄭承富)
- 1959년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마이크로조이닝, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.ac.kr