

900MPa급 TWIP강의 마찰교반용접(FSW)

이광진^{*,†} · 김상혁^{**} · 권의표^{*} · 손규송^{**}

^{*}한국생산기술연구원

^{**}전북대학교 금속공학과

Friction Stir Welding of 900MPa Grade TWIP Steel

Kwang-Jin Lee^{*,†}, Sang-Hyuk Kim^{**}, Eui-Pyo Kwon^{*} and Kyu-Song Son^{**}

^{*}Korea Institute of Industrial Technology, Jeonju 561-202, Korea

^{**}School of Materials Science of Engineering, Chon-buk National University, Jeonju 561-756, Korea

[†]Corresponding author : kjlee@kitech.re.kr

(Received April 26, 2014 ; Revised April 30, Accepted April 30, 2014)

Abstract

Friction stir welding (FSW) was successfully performed about 900MPa grade Twinning Induced Plasticity (TWIP) steel. A PCBN tool with convex-type shoulder was applied. Optimal process conditions were deduced. Microstructure and mechanical properties such as hardness, tensile strength and impact absorbed energy were observed and evaluated, respectively. An optical microscope (OM) and a field emission scanning electron microscope (FE-SEM) was selected for observing the grain structure.

Key Words : TWIP steel, FSW, Tensile strength, Hardness, Impact

1. 서 론

자동차 산업에서는 충돌안전성 및 환경규제 강화에 대응하고자 차체의 경량화를 위한 기술개발에 몰두하고 있으며, 경량화 소재로서 알루미늄합금, 마그네슘합금과 같은 저비중 경량소재와 더불어, 강도특성이 월등히 우수할 뿐 아니라 상대적으로 경제적으로 유리한 고강도강(HSS: High Strength Steel)의 개발과 적용이 적극적으로 검토되어 왔다¹⁻³⁾. 최근에는 590MPa급 및 780MPa급의 복합조직(DP: Dual Phase)강과 변태유기소성(TRIP: Transformation Induced Plasticity)강이 일부 Pillar류 및 Member류 부품에 적용되어 차체경량화에 기여하고 있으나, 한 층 더 강화된 1GPa급 초고강도강(UHSS: Ultra High Strength Steel)에 대한 요구가 확대되고 있다⁴⁻⁵⁾. 한편, 1GPa급 초고강도강은 기존의 고강도강 대비 연성, 성형성 및 용접성이 현저히 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 최근에는 이러한 문제점들을 개선하여 강도·연성지수(MPa·%)

가 획기적으로 향상된 쌍정유기소성(TWIP: Twinning Induced Plasticity)강이 주목을 받고 있다⁶⁾. 그러나, Mn 등의 합금원소를 다량 포함하는 고합금계인 TWIP강 또한 용접성의 확보가 차체 부품으로의 적용 확대를 위해 우선적으로 해결되어야 하는 과제로 남아있다.

본 연구에서는, 저자의 연구그룹이 개발한 900MPa급 TWIP강에 대하여, 알루미늄합금, 마그네슘합금과 같은 난용접성 경량금속과 스테인레스 스틸, 타이타늄합금 등의 고용점 금속재료에의 적용 가능성이 폭넓게 검토되고 있는 마찰교반용접(FSW: Friction Stir Welding)을 실시하였으며⁷⁻⁹⁾, 용접부와 모재에 대한 다양한 기계적 특성에 대한 시험을 통하여 초고강도 TWIP강의 마찰교반용접성을 평가하였다.

2. 실험방법 및 절차

본 연구에서는 저자의 연구그룹이 개발한 900MPa급 TWIP강 판재를 사용하였으며, 그 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 판재 제조를 위한 세부 공정조

Table 1 Chemical composition of base metal

Mn	C	Al	Nb	Fe
15.9	0.61	2.02	0.05	bal.

Table 2 Manufacturing process of base metal sheet

Process	Condition
Casting	Ingot 50t x 150w x 180L
Homogenization	13733K, 3hr
Hot Rolling	1223K, 4.6t
Cold Rolling	RT, 2.0t
Annealing	1173K, 10min.

Table 3 Mechanical properties of base metal

Tensile specimen	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
JIS Z 2201	563	872	84

건을 Table 2에 나타내었으며, 모재에 대한 인장시험 결과를 Table 3에 나타내었다.

모재에 대한 광학현미경 관찰 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 전형적인 TWIP강의 어닐링쌍정이 관찰되었으며, 결정립의 크기는 약 40 μ m 정도로 확인되었고, 결합은 발견되지 않았다.

마찰교반용접은 PCBN으로 제작한 Convex-type의 툴을 사용하였으며, 시편 및 접합공정에 대한 자세한 내용은 Table 4에 정리하였다.

접합부 단면에 대한 미세조직 관찰을 위하여 정연마 및 Nital etchant를 이용하여 부식한 후, 광학현미경(Nikon, Epiphot200)을 이용하여 관찰을 실시하였다.

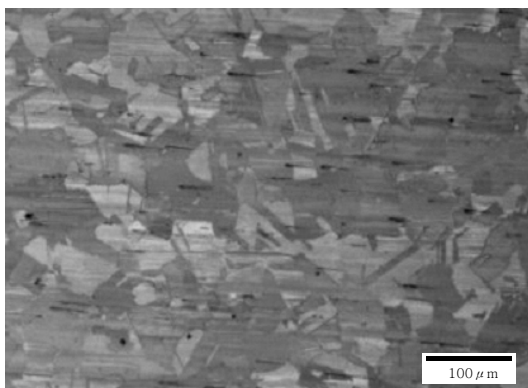


Fig. 1 Optical microstructure of base metal

Table 4 Friction stir welding condition

Specimen size		2t × 70w × 140L
Tool	Probe dia.	4.5mm
	Probe length	1.6mm
FSW condition	Travel speed	50~300mm/min
	rotational speed	50~1100rpm
	Tilting	0°
	Dwell time	10, 15sec.

인장시험 후의 파단면의 관찰에는 주사전자현미경(FE-SEM, Carl Zeiss, SUPRA40VP)을 사용하였다. 경도는 접합부 단면에 대하여 표면으로부터 1mm 떨어진 영역에서 측정하였고, 비커스 경도측정기(Mitsutoyo, AAV-502)를 이용하였으며, 200gf의 하중을 적용하였다. 인장시험은 인스트론 타입의 인장시험기(United, SFM-600KN)를 사용하였으며, 상온에서 크로스헤드 속도 1mm/mim의 조건에서 실시하였다. 충격시험은 V-notch type의 KS B 0809 규격의 시험편을 사용하였고, 샤르피 충격시험기(Zwick/Roell, RKP450)를 적용하였으며, 해머의 각도는 150°로 고정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부 외관

툴 삽입 후의 유지시간(Dwell time)을 10sec로 설정한 경우, 접합의 초기부터 Tunnel 결합이 생성되었으며, 툴의 회전속도 및 이송속도를 조절하여 고입열 공정조건에서 시공한 시편의 경우는 결합의 폭이 다소 감소하는 경향을 보였으나, 결합은 여전히 존재하였다. 한편, 툴 삽입 후의 유지시간을 15sec로 설정한 경우는 Tunnel 결합이 현저히 감소하였고, 350rpm, 50mm/mim의 조건에서 외관상 결합이 없는 시편을 제작할 수 있었다. 위의 실험 조건에서 툴의 외관 관찰 결과 특별한 마모 현상은 관찰되지 않았다. Fig. 2에 유지시간 15sec에서 제작된 시편의 외관사진을 나타내었다. 위의 결과로부터, 본 모재와 같은 초고강도강의 경우는 알루미늄 합금 등의 경량금속의 경우와 달리, 알루미늄합금 및 구조용 연강 대비 3~5배 정도 긴 15sec 정도의 유지시간이 요구되는 것과 이 유지시간 조건이 건전한 용접부 확보를 위한 매우 중요한 공정조건임을 확인하였다. 이러한 결과는 모재(TWIP steel)의 초기 온도가 유지시

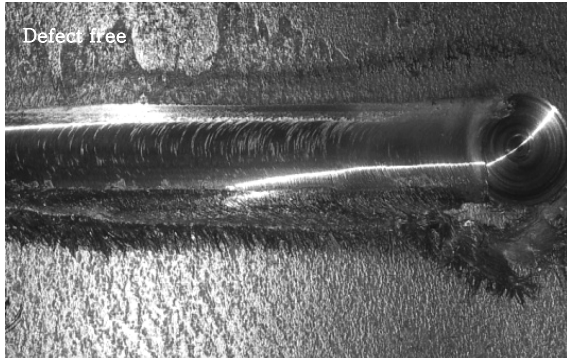


Fig. 2 Appearance of FSWed specimen

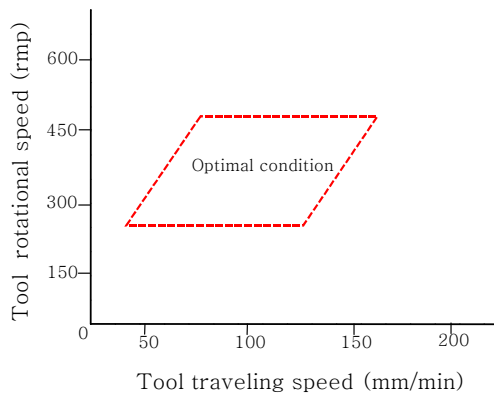


Fig. 3 FSW process window

간에 따라 결정되어지기 때문이다. 유지시간이 짧은 경우에는 모재(TWIP steel)의 연화가 충분히 일어나지 못하여 툴의 진행과 교반력에 의한 유동이 활발하지 못하여 초기에 결함이 생성되는 반면 유지시간이 길어지면 생성되는 입열량이 증가함으로써 모재(TWIP steel)가 충분히 연화가 일어나게 되고 툴이 진행을 실시하여도 연화된 모재가 툴의 진행과 교반력에 의하여 충분한 유동이 일어나는 결과를 보이기 때문이다.

Fig. 3은 툴의 삽입 후 15sec 유지하고 마찰교반접합을 실시하였을 때 결함없는 접합부를 얻을 수 있는 공정 범위이다. 툴의 회전속도: 350RPM, 툴의 진행속도: 50, 100mm/min의 조건에서는 결함이 없는 건전한 마찰교반접합부를 생성하는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 툴 삽입 후 적절한 시간을 유지하더라도 툴의 회전속도와 진행속도가 마찰교반접합의 접합성에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Fig. 2의 용접 시편에서 채취한 시험편의 용접부 단면에 대한 결정립조직 관찰결과를 Fig. 4에 나타내었다. 전 용접영역에서 공공과 같은 미접합 결함 또는 부분용융과 같은 용융결함은 발견되지 않았다. 마찰교반영역(SZ: stir zone)에서는 모재 대비 매우 미세화된

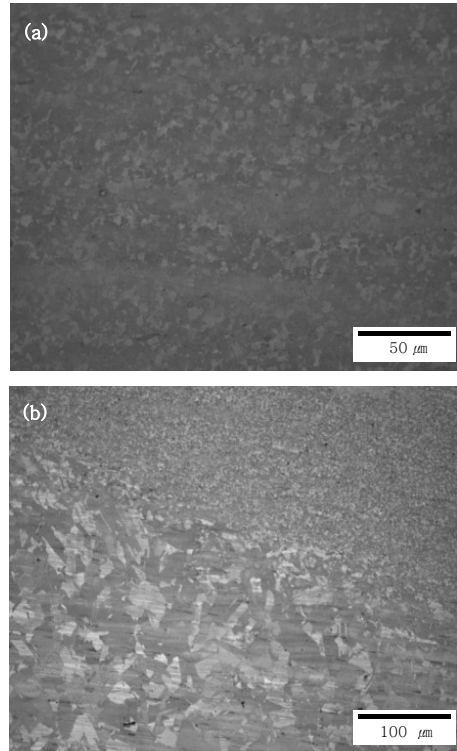


Fig. 4 Microstructure of FSWed area. (a) SZ, (b) TMAZ

5μm 정도의 결정립조직이 관찰되었으며, 열기계적영역(TMAZ: thermo-mechanical affected zone)에서는 모재와 유사한 크기의 결정립조직이 관찰되었으며, 일반적으로 용융용접부에서 관찰되어지는 조대화된 결정립조직은 관찰되지 않았다.

3.2 기계적 특성

마찰교반접합부 단면에 대한 경도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 전체적인 경도의 분포는 SZ의 중심부를 기점으로 좌우 대칭형 분포를 나타내었으며, SZ의 경도는 모재(250Hv)보다 높은 값(300Hv)을 나타내었고, 중심부(400Hv)에서 가장 높은 값을 나타내었다. 일반적으로 용융용접부의 주변에 형성되어 기계적 특성 저하의 원인이 되는 열영향영역(HAZ: heat affected zone)이 관찰되지 않았다. SZ의 경도가 전반적으로 모재보다 높은 값을 나타낸 것은 마찰교반용접 공정 중에 도입된 Strain과 마찰열에 의한 동적재결정에 기인하는 결정립의 초미세립화의 영향인 것으로 판단되었다. 또한, SZ 내에서의 경도분포의 차이는 모재에 첨가된 원소들에 의한 화합물의 형성에 기인한 것으로 사료되었으나, 보다 정밀한 분석과 관찰이 요구되었다.

모재와 마찰교반용접 시편의 인장시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 마찰교반용접부의 기계적 특성을 정확

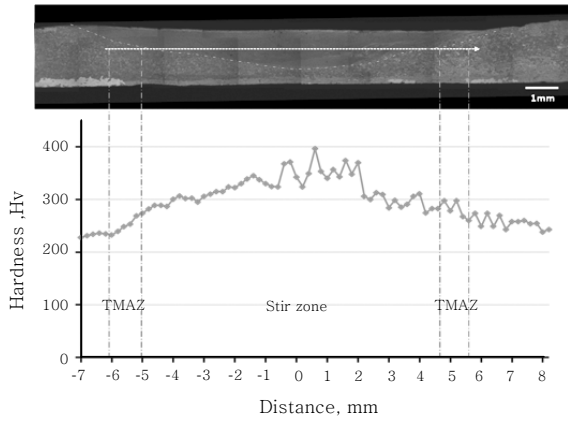


Fig. 5 Hardness profile of FSWed area

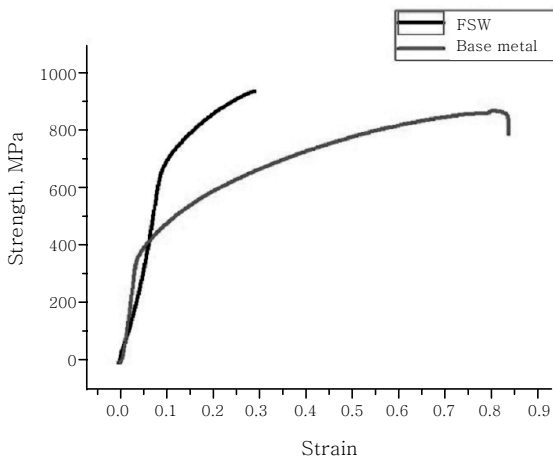


Fig. 6 Stress-Strain curve of base metal and FSW specimen

하게 평가하기 위하여 각각의 시험편은 SZ 내에서 용접방향을 따라 채취하였다. 인장시험 결과, 마찰교반용접 시험편의 인장강도와 항복강도는 각각 907MPa, 620MPa로 모재보다 높은 값을 나타내었다. 모재의 연신율이 80% 수준의 매우 높은 값을 나타낸 것은 냉간압연 후 실시한 어닐링의 영향인 것으로 판단되었다. 인장시험에 의한 파단면에 대한 주사전자현미경 관찰결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전반적으로 매우 미세한 dimple이 관찰된 반면, 일부에서는 상대적으로 조대한 dimple도 관찰되었다. 이는 인장시험에 의한 시험편의 파단이 매우 미세한 결정립으로 구성된 SZ와 결정립미세화가 일어나지 않은 TMAZ의 경계영역에서 일어났음을 시사하는 결과로 판단되었다.

샤르피 충격시험의 결과와 충격시험 후의 시험편의 사진을 각각 Table 5와 Fig. 8에 나타내었다. 마찰교반용접 시험편의 충격흡수에너지는 모재와 동등한 수준으로 확인되었고, 이는 SZ에서의 결정립미세화에 의한

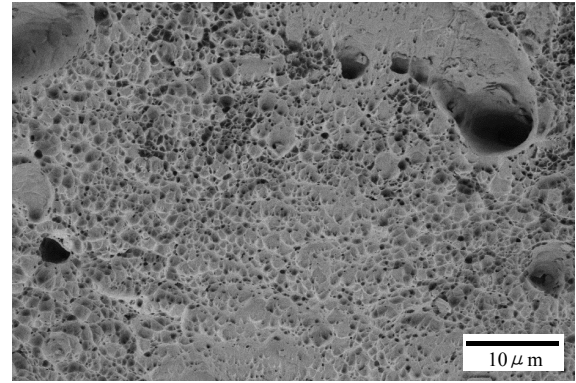


Fig. 7 SEM image of tensile fracture surface

Table 5 Charpy impact test result of base metal and FSW specimen

	base metal	FSW specimen
Absorbed energy [J/mm ²]	1.20	1.14

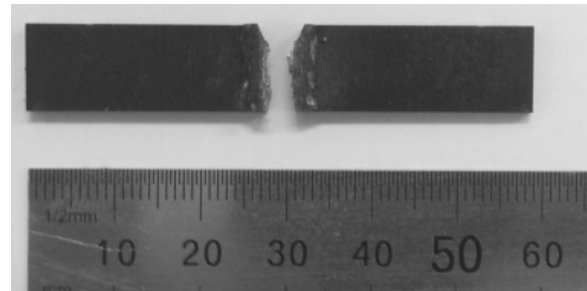


Fig. 8 Appearance of failed impact test specimen

상승효과와 경도증가에 의한 저하효과가 복합적으로 작용한 결과인 것으로 판단되었다.

이상의 결과들로부터 초고강도 TWIP강은 마찰교반용접에 의해 모재와 동등한 수준의 기계적 성질을 갖는 용접부를 확보할 수 있는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는, 저자의 연구그룹이 개발한 900MPa급 TWIP강에 대하여 마찰교반용접(FSW: Friction Stir Welding)을 실시한 후, 용접부에 대한 기계적 특성의 평가를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 900MPa급 초고강도강에 대한 마찰교반용접에 성공하였으며, 최적 용접공정(틀의 회전속도 350rpm, 이송속도 50~100mm/min, 유지시간 15sec)을 도출하였다.

2) 최적 조건에서 제작된 마찰교반용접부의 인장강도, 충격강도 및 경도 등의 기계적 특성은 모재 대비 동등한 수준을 확보할 수 있다.

3) 마찰교반용접부에서의 기계적 특성의 향상은 마찰교반용접 공정 중의 결정립미세화에 기인하며, 열영향부를 형성하지 않는 점도 기계적 특성의 향상에 기여하는 것을 확인 하였다.

후 기

본 특집호 논문의 일부는 한국생산기술연구원 산업계 연계형사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Reference

1. Hashimoto shunichim : 5th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials. **539-543** (2006), 4411-4416

2. Kazuhiro Abotani, Kazuhiro Hirohata, Tetsuya Kiyasu : Kawasaki steel Technical Report **No. 48** (2003), 17-22
 3. W. Bleck : Journal Of Metals, **48** (1996), 26-30
 4. J. Adamczyk, A. Grajcar : Journal of Materials Processing Technology, **162-163** (2005), 267-274
 5. B.C. De cooman : Current Opinion in Solid State and Materials Science. **8** (2004), 285-303
 6. O. Bouaziz, S. Allain, C. P. Scott, P. Cugy and D. Barbier : Current Opinion in Solid State and Materials Science, **15** (2011) 141-168
 7. Rajiv S. Mishra and Murrar W. Mahoney : Friction Stir Welding & Processing. Materials Park, OH. ASM International, 2007
 8. Kwang-jin Lee and Sang-hyuk Kim : Effects of Tool Plung Position on Mechanical Properties of Friction-stir-welded Region in A6061-T6/AZ31 Dissimilar Metals, Journal of KWJS, **30** (2012), 22-26 (in Korean)
 9. Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, Yutaka Sato, Yuri Hobanski and Ravi Verma : Friction Stir Welding & Processing, Hoboken, New Jersey. Jhon Wiley & Sons (2013)



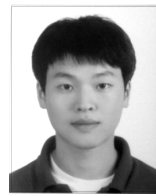
- 이광진
- 1973년생
- 대한용접접합학회
- FSW & FSP, 이종금속 접합 및 분석
- e-mail : kjlee@kitech.re.kr



- 권의표
- 1981년생
- 대한용접접합학회
- 초고강도강 제조 및 미세조직 분석
- e-mail : ackep@kitech.re.kr



- 김상혁
- 1981년생
- 대한용접접합학회
- 마찰교반접합, 용접야금
- e-mail : qldus@kitech.re.kr



- 손규송
- 1988년생
- 대한용접접합학회
- 초고강도강 특성 및 미세조직 분석
- e-mail : sonks87@kitech.re.kr