특집 : 마찰교반접합기술의 최근 연구 동향

마찰교반용접(FSW) 및 마찰교반처리(FSP)의 최신 연구개발 동향

이 광 진*,†

*한국생산기술연구원 친환경부품소재센터

Recent Research & Development Trend on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing

Kwang-Jin Lee*,†

*Environmental Materials & Components Center, Korea Institute of Industrial Technology

†Corresponding author : kjlee@kitech.re.kr

Abstract

The latest research & development trend on friction stir welding and friction stir processing technologies presented in the international symposium, 'Friction Stir Welding & Processing Ⅶ'. Papers and presentations about high temperature materials such as advanced high strength steel, stainless steel and titanum alloy shoot up this year. Papers on modeling of metal flow and control of process parameters also increased. The FSP technologies for manufacturing of carbon materials reinforced metal matrix composites were reported, too.

Key Words : Friction stir welding, Friction stir processing, Modeling, High temperature materials, Light metals

1. 서 론

마찰교반용접(FSW)은 고속으로 회전하는 비소모성 툴(Tool)을 피접합재에 삽입하여 툴과 피접합재와의 마찰에 의해 발생한 열과 마찰열에 의해 연화된 피접합재의 소성유동을 이용하는 용접공정으로[1], 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에 의해서 개발된 이래 불과 이십 여 년 밖에 되지 않은 새로운 용접 방법임에도 불구하고, 공정 중에 용융 및 응고 과정을 수반하지 않는 고상(Solid state) 용접공정이어서 용접부의 기계적 특성이 우수할 뿐 아니라[2-4], 기존의 용융용접 방법으로는 건전한 용접부를 얻기 어려웠던 난용접성 금속소재에 대한 용접성능을 인정받아 알루미늄합금, 마그네슘합금과 같은 경량금속의 용접공정으로 각광을 받고 있으며[5-7], 탄소강, 고강도강, 스테인레스 스틸 및 타이타늄합금 등 고융점 금속재료에의 적용 가능성이 폭넓게 검토되고 있다[8-10]. 최근에는 마찰교반용접의 원리를 응용한 마찰교반처리(FSP) 공법을 이용하여 모재의 개질(改質) 및 탄소소재 등의 분산을 통한 금속기복합재료(Metal Matrix Composites)의 제조 등 실로 다양한 각도에서 활용 가능성이 적극적으로 검토되고 있다[11].

마찰교반용접기술 관련 전문 국제 심포지움(Symposium)인 'International Symposium on Friction Stir Welding & Processing'이 영국, 미국 및 일본의 주도로 개최되고 있으며, 올 해는 TMS2013 (The Minerals, Metals and Materials 2013)에 포함된 하나의 심포지움(Friction Stir Welding & Processing Ⅶ)으로 개최되었다. 저자는 이종 경량금속의 마찰교반접합 및 초고강도강의 마찰교반접합에 대한 연구결과를 발표하기 위하여 심포지움에 참석하였으며, 3일 동안 6개의 세션(Session)에서 다양한 분야에 걸쳐 최신의 연구결과들이 발표되었다. 국내에서 마찰교반용접을 연구하고 있는 연구자들을 비롯하여 본 기술에 관심이 있는 분들을 위하여 'Friction Stir Welding & Processing Ⅶ'에서 발표된 연구 및 기술개발의 주요 내용을 정리하여 보고하고자 한다.

2. 통계로 본 연구개발 동향

'Friction Stir Welding & Processing Ⅶ'에서는 3일 간에 걸쳐 6개 세션에서 'Key note' 2편, 'Invited'

Journal of KWJS Vol.31 No.2(2013) pp26-29
http://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.2.26

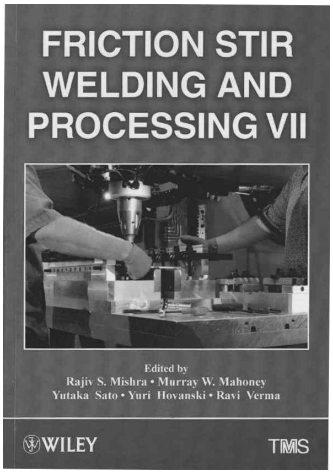

Fig. 1 Friction stir welding & processing Ⅶ

19편을 포함하여 총 69편의 논문이 구두(Oral)로 발표되었으며, 출판을 희망한 저자의 논문을 모아 심포지움명인 'Friction Stir Welding & Processing Ⅶ' (Fig. 1, ISBN 978-1-118-60578-3)으로 출판하였다. 여느 학회 및 심포지움과 달리 'Invited' 발표가 총 발표 건수 대비 약 30% 수준으로 월등히 많았던 것이 인상 깊었으며, 이는 세계 각국의 전문가들이 참석했음을 시사하는 것으로 판단되었다. 세션별로 'Modeling & Controls' 세션에서 12편, 'High Temperature Materials Ⅰ & Ⅱ'에서 각각 12편, 10편, 'Light Materials Ⅰ & Ⅱ'에서 각각 13편, 9편 그리고 'Friction Stir Processing'에서 13편의 논문이 발표되었으며, 본 내용을 정리하여 Fig. 2에 나타내었다.

알루미늄합금과 마그네슘합금의 경량금속이 주류를 이루었던 과거와 달리 구조용 연강, 고강도강, 초내열합금 및 타이타늄합금 등의 고융점 금속재료에 대한 연구발표가 가장 많았으며, 공정조건에 따른 접합부의 기계적 특성 및 미세조직에 대한 보고가 주류를 이루었다. 툴(Tool)은 PCBN(Poly Crystallized Cubic Boron

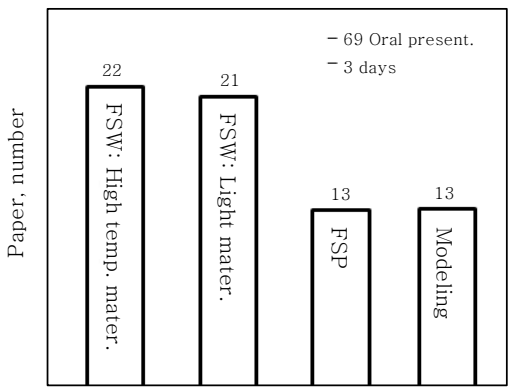

Fig. 2 Analysis of statistical data in each session

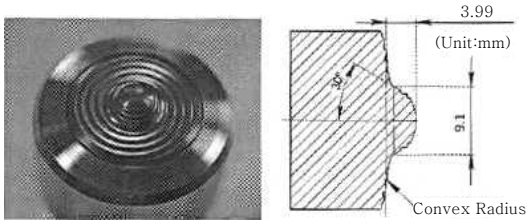

Fig. 3 Appearance & dimensions of the Q60 tool[12)]

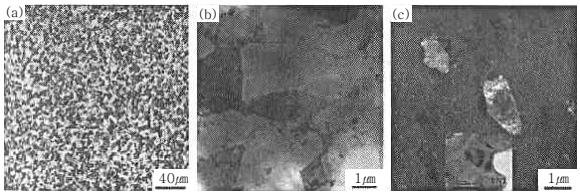

Fig. 4 Grain structures of 4-pass FSP sample: (a) AA2009 (OM), (b) 1.5 vol. % CNT+ AA2009 (TEM, bright field image), (c) 4.5 vol. % CNT+AA2009 (TEM, dark field image)[12)]

Nitride)를 비롯하여 Carbide계열, W-base alloy 등으로 제작된 툴이 사용되었으며, 스테인레스 스틸, 초내열합금 등에 적용할 경우는 수 미터(Meter) 정도의 비교적 짧은 거리의 시공에도 마모가 발생하는 것으로 보고되어 국내의 개발수준과 큰 차이가 없는 것으로 판단되었다. 고융점 금속재료의 마찰교반접합을 위해서는 고온 영역에서의 내마모성 및 인성이 획기적으로 향상된 툴 소재의 개발이 시급하며, 핵심기술(Key Technology)임이 다시 한 번 확인되었다.

Friction Stir Processing에 관한 논문들도 다수 발표되었다. 주조재 표면 조직의 균질화 및 나노 사이즈의 초미세 결정립 조직을 얻기 위한 개질(改質)을 비롯하여 CNTs 및 Graphene 등의 첨단 탄소소재를 판재의 표면에 코팅 또는 판재 내부에 분산시켜 금속기 나노탄소복합재(MMNCC: Metal Matrix Nano Carbon Composites)의 제조 및 기계적 특성 향상을 목적으로 하는 연구논문(Fig. 4)들이 발표되었다. 특히, 알루미늄합금 기지에 B_4C, Y_2O_3 분말을 분산시켜 내마모 및 피로특성을 개선하기 위한 연구결과가 발표되었고, B_4C 분말의 분산양이 증가함에 따라 내마모 특성이 향상하였으나, 8% 이상의 경우에는 큰 차이가 없으며, Y_2O_3 분말은 피로특성의 향상에 기여하는 것으로 보고되었다.

또한, 마찰교반용접 공정 중의 접합부의 형성 및 금속유동(Metal flow)에 대한 모델링(Modeling)과 제어(Control)에 관해서는 수학적 모델과 실시간 관찰 방법 등을 통한 흥미진진한 연구결과들이 발표되었다. 마찰교반접합 및 마찰교반처리 공정 중의 온도제어, 툴

하중 및 금속유동(Metal flow) 등에 대한 수학적 해석에 대해서는 BYU(Brigham Young University)의 Prof. Carl Sorensen group을 중심으로 연구가 진행되고 있으며, Osaka University의 Prof. Hidetoshi Fujii groupe은 X-ray Radiography를 적용하여 마찰교반공정 중의 Tracer(small tungsten ball)의 유동을 실시간으로 관찰하는 방법으로 마찰교반공정 중의 금속유동의 3차원 가시화(3-Demensional Visualization of Metal Flow)에 성공하였으며, 이와 관련한 유용한 관찰결과를 보고하였다. 본 내용에 관해서는 '3. 마찰교반공정 중의 금속유동'에 보다 자세하게 기술하고자 한다.

3. 마찰교반공정 중의 금속유동

3.1 실험장비

마찰교반용접 중의 X-ray radiography를 위한 장치의 모식도를 Fig. 5에 나타내었다. 판재의 상하부에 X-ray gun을 장착하였으며, Tracer (tungsten ball, 300μm dia.)의 유동을 보다 선명하게 관찰하기 위하여 판재와 툴은 밀도가 상대적으로 낮은 AA1050, AA2017 (2.7g/cm^3) 및 Si_3Ni_4 (3.4g/cm^3) 툴이 사용되었다. Fig. 6는 X-ray 투과 이미지를 나타낸다. Tool shoulder 아랫부분에서 Tracer를 선명하게 관찰할 수 있다.

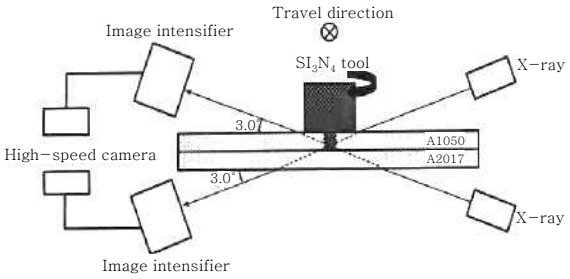

Fig. 5 Schematic illustration of the experimental setup for the X-ray radiography during the FSW[13]

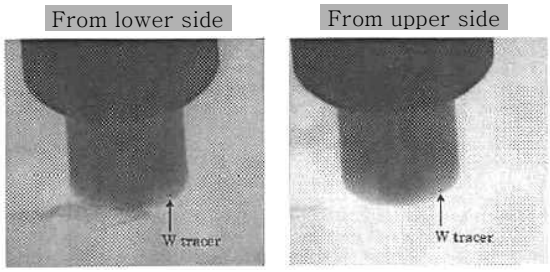

Fig. 6 X-ray transmission images obtained by the x-ray transmission real-time imaging system[12]

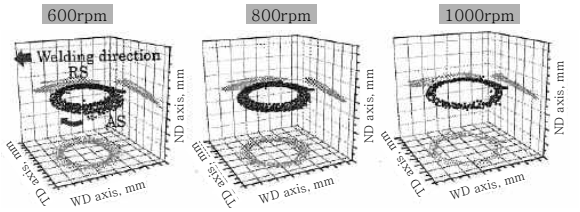

Fig. 7 A three-dimensional graph and various two-dimensional graphs obtained using the coordinates of the tungsten tracer[12]

툴의 이송속도와 Tilting angle을 각각 400 mm/min과 3°로 고정한 후, Tracer의 유동에 미치는 입열양의 영향을 확인하기 위하여 툴의 회전속도를 200~1000 RPM까지 변화를 주어 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 저자는 Tracer가 툴의 회전속도에 관계없이 Probe 주위를 수차례 회전하는 것을 관찰하였으며, 이는 Tracer의 최종 위치에 근거를 둔 금속유동에 대한 종래의 추측이 상당한 오류를 포함하고 있을 가능성에 대해 주장하였다[12]. 그리고, 금속유동 영역은 툴의 회전속도 및 이송방향에 관계없이 Probe 주변의 약 2 mm 정도이며, Advancing side (AS)와 Retreating side (RS)의 차이도 거의 없는 것으로 보고하였다.

또한, 툴의 회전속도 및 이송속도가 각각 1000 RPM, 400 mm/min의 조건일 경우, Probe 주변의 각 영역: AS, RS, FS (forward side) and BS (backward side)에서의 Tracer의 속도를 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다[13]. 흥미롭게도, Tracer의 속도는 Tracer가 Probe의 바깥쪽으로 이동함에 따라 급격히 증가할 뿐 아니라, 영역에 따라 서로 상이한 것으로 밝혀졌다. 다시 말하면, AS보다 RS 쪽에서, FS보다 BS 쪽에서 Tracer의 유동속도가 더 빠른 것으로 확인되었다고 주장하였다. Prof. Fujii의 본 실험은 비록 single tracer

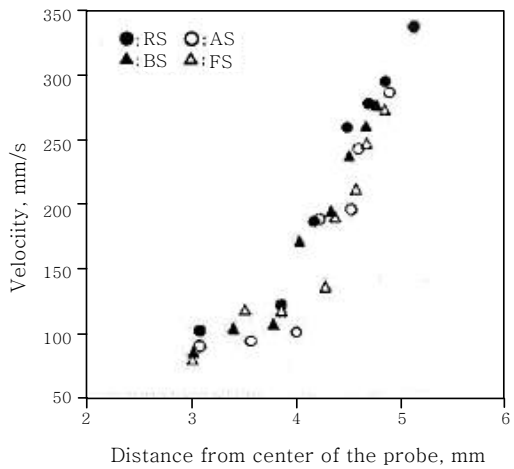

Fig. 8 Velocity of the tungsten tracer[13]

를 적용한 매우 단순한 시스템이기는 하나, 마찰교반공정 중의 금속유동에 대한 그동안의 많은 궁금증을 해소할 수 있는 유용한 결과들을 도출한 것으로 판단되었다.

4. 요 약

마찰교반용접(FSW) 및 마찰교반처리(FSP) 기술 관련 국제 심포지움인 'Friction Stir Welding & Processing Ⅶ'에서 발표된 연구논문의 내용을 토대로 아래와 같이 최신 연구개발 동향을 정리하였다.

- 알루미늄합금과 마그네슘합금의 경량금속에 대한 마찰교반용접이 주류를 이루었던 과거와 달리 최근에는 구조용 연강, 고강도강, 초내열합금 및 타이타늄 합금 등의 고융점 금속재료에 대한 마찰교반용접 공정기술 및 툴의 개발이 수행되고 있다.
- 주조재 표면 조직의 균질화 및 나노 사이즈의 초미세 결정립 조직을 얻기 위한 개질(改質)을 비롯하여 CNTs 및 Graphene 등의 첨단 탄소소재를 판재의 표면에 코팅 또는 판재 내부에 분산시켜 금속기 나노 탄소복합재(MMNCC: Metal Matrix Nano Carbon Composites)의 제조 및 기계적 특성 향상을 목적으로 하는 FSP 관련 연구가 다각적으로 수행되고 있다.
- 마찰교반용접 공정 중의 접합부의 형성 및 금속유동(Metal flow)에 대한 모델링(Modeling) 관련 연구가 다수 진행되고 있으며, 수학적 해석 및 실시간 모니터링을 통한 연구가 의욕적으로 진행되고 있다.

후 기

본 특집호 논문은 한국생산기술연구원 산업계연계형 사업의 지원으로 수행된 과제의 연구결과 발표를 위하여 참석한 TMS2013에서 개최된 심포지움 'Friction Stir Welding & Processing Ⅶ'의 내용을 정리한 것입니다.

참 고 문 헌

1. Rajiv S. Mishra and Murrar W. Mahoney : Friction Stir Welding & Processing. Materials Park, OH. ASM International, 2007
2. M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss and P. J. Withers : Acta Materialia, 51 (2003) 4791-4801
3. H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda and K. Nogi : J. Materials Processing Technology, 142 (2003) 692-696
4. Yutaka S. Sato, Mitsunori Urata, Hiroyuki Kokawa and Keisuke Ikeda : Materials Science & Engineering A, 354 (2003) 298-305
5. Ki-sang Bang, Kwang-jin Lee, Han-sur Bang and Hee-sun Bang: Materials Transactions, 52 (2011) 974-978
6. Kwang-jin Lee and Sang-hyuk Kim: Journal of KWJS, 30 (2012) 300-303
7. Kwang-jin Lee : Journal of KWJS, 27 (2009) 640-645
8. A. K. Lakshminarayanan and V. Balasubramanian : Materials Science & Engineering A, 539 (2012) 143-153
9. Yasuyuki Miyano, Hidetoshi Fujii, Yufeng Sun, Yasuyuki Katada, Shuji Kuroda and Osamu Kamiya : Materials Science & Engineering A, 528 (2011) 2917-2921
10. B. W. Ahn, D. H. Choi, D. J. Kim and S. B. Jung : Materials Science & Engineering A, 532 (2012) 476-479
11. Lucie B Johannes, Leonard L Yowell, and Edward Sosa, Sivaram Arepalli and Rajiv S Mishra : Nanotechnology, 17 (2006) 3081-3084
12. Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, Yutaka Sato, Yuri Hobanski and Ravi Verma : Friction Stir Welding & Processing, Hoboken, New Jersey. Jhon Wiley & Sons (2013)
13. Y. Morisada, H. Fujii, Y. Kawahito, K. Nakata and M. Tanaka : Scripta Materialia, 65 (2011) 1085-1088

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