

고온재료의 마찰교반접합을 위한 툴의 개발

이광진 · 김상혁 · 박현국 · 오익현

Development of the Tool for Friction Stir Welding of High Temperature Materials

Kwang-jin Lee, Sang-hyuk Kim, Hyun-guk Park and Ik-hyun Oh

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding)은 영국의 TWI(The Welding Institute)가 개발한 새로운 개념의 접합 방법으로, Probe와 Shoulder로 구성되는 Tool을 고속으로 회전시키면서 용접하고자 하는 재료에 삽입하여 재료의 표면과 내부에서 발생하는 마찰열을 이용하여 재료를 연화함과 동시에 고온 소성 유동을 일으켜 툴의 좌우에 배치된 재료의 일부를 상호간에 맞은편 영역에 교반 혼입시켜 접합을 실현하는 고상 접합 방법이다¹⁻⁴⁾. 이 접합 방법은 기존의 용융 용접 방법들과 비교하여 발열이 최소한으로 억제되어, 접합 후 열에 의한 변형이 현저히 감소하고, 접합 후의 결함도 거의 발생하지 않으며, 강력한 소성 변형에 의해 접합부 조직이 모재보다 미세화 하는 등의 이점이 많아 개발된 지 십 수 년 밖에 지나지 않았음에도 불구하고, 이미 알루미늄 합금을 적용한 자동차, 철도 차량, 선박 및 항공 우주 분야 등의 구조용 부품에 적용되고 있으며, 최근에는 구조용 연강, 고강력강, 타이타늄 및 초합금 등의 고온재료에 까지 그 적용을 확대하기 위한 연구가 진행되고 있다⁵⁻¹²⁾. 그러나, 실용화 실적은 극히 제한적인 것이 현실이다. 그 원인은 고온재료를 마찰교반접합하기 위해 사용되는 툴은 강도, 경도, 인성, 내마모성 및 비반응성 등의 고성능이 요구되는 반면, 이러한 성질을 동시에 만족할 만한 소재가 없기 때문이다. 고온재료 전용 툴 소재의 개발은 향후 마찰교반접합기술의 저변화 및 실용화의 확대를 위해서 반드시 해결되어야 할 과제임이 분명하다. 다행하게도 자동차, 철도차량 및 항공 분야 등에서 이미 마찰교반접합 기술의 적용이 비교적 활성화된 미국과 일본을 중심으로 고온재료 전용 마찰교반접합 툴에 대한 연구와 개발이 진행되고 있다. 이에 본 논문에서는 국내외의 고온재료에 대한 마찰교반접합 연구 현황 및 고온재료용 마찰교반접합 툴의 개

발 동향에 대해 간략하게 보고하고자 한다.

2. 고온재료 마찰교반접합 연구 현황

올 해 3월, 미국의 샌디에고에서 개최된 'TMS2011'의 'FSW & FSP Symposium'에서 발표된 연구 논문의 내용을 아래의 그림 1에 정리하였다. 총 3.5일의 일정으로 80편의 연구 결과가 발표 되었다. 분야별로 나누어 보면, Al, Mg 등 경량금속에 관한 발표가 25편, 타이타늄, 철강재료 등 고온재료에 관한 발표가 21편, 마찰교반프로세스에 관한 발표가 10편, 마찰교반접합 현상 및 모델링에 관한 발표가 12편, 마찰교반접합 논문이 10편 발표 되었다¹³⁾.

사용된 고온재료는 자동차용 초고강도강(AHSS: Advanced High Strength Steel), Ti-based Alloys, Co-based Alloys, Oxide Dispersion Strengthened Steel Alloys, Cast Iron 등으로 매우 다양하였으며, 주로 원자력 발전과 극지 자원 개발을 위한 장비 및 부품에의 적용을 목적으로 하고 있었다. 발표 내용은 각 고온재료에 대한 마찰교반접합 공정조건의 영향과 접합부 기계적 성질에 관한 것이 주류를 이루었고, 투과전자현미경(TEM; Transmission Electron Microscope), 전계방사주사전자현미경(FE-SEM; Field Emission

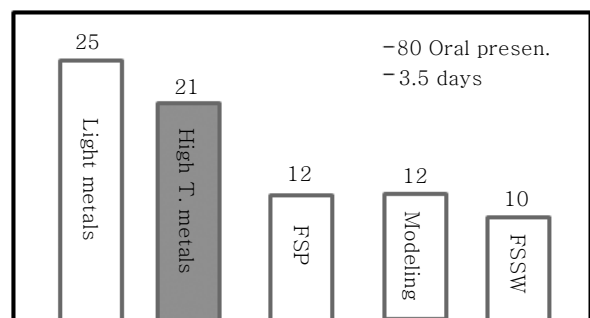


그림 1 FSW & FSP Sympo. 발표현황(TMS2011)

Scanning Electron Microscope) 및 EBSD(Electron Backscatter Diffraction) 방법 등을 이용한 접합부 미세조직의 형성 거동 및 기계적 성질에 미치는 영향에 관한 심도 있고 흥미로운 연구 결과들도 발표되었다. 그리고, 연구 및 발표 기관이 소수의 대학과 연구기관으로 제한되는 국내의 상황과 달리, 대학과 연구기관뿐 아니라 다양한 산업분야의 기업 연구소들이 다수의 연구 결과를 발표하였다. 향후, 고온재료에 대한 마찰교반접합의 적용이 더욱 확대될 것이 확실함을 실감하였으며, 강도, 경도, 인성, 내마모성 및 비반응성 등의 성능을 골고루 갖춘 고성능 고온재료 전용 마찰교반접합 툴의 개발은 현 시점에서 절대절명의 과제라 할 수 있겠다.

3. 고온재료용 마찰교반접합 툴의 개발

3.1 미국의 개발 동향

Megastir Technologies사에 의해 소결한 PCBN Composite 소재를 사용한 몇 종류의 고온재료 전용 툴이 개발되었으며, 고온재료의 마찰교반접합에 가장 널리 사용되고 있다. 상기 FSW & FSP Symposium 에서 발표된 고온재료의 마찰교반접합에 대한 연구 발표는 대부분 Megastir Technologies사의 PCBN계 툴의 일종인 MS80와 Q60을 사용하였다. PCBN Composite의 미세조직을 그림 2에 나타내었다. Dark Contrast 부분이 PCBN이며, Bright Contrast 부분이 첨가된 W/Re에 해당한다. 약 10마이크로미터 정도의 미세한 PCBN 분말이 균일하게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. Q60은 W/Re의 첨가에 의해 MS80 대비 인성이 향상된 모델이다. 그러나, 상대적으로 마찰계수가 높아 마찰교반접합 공정 중의 Peak Temperature가 높아지는 면이 있다.

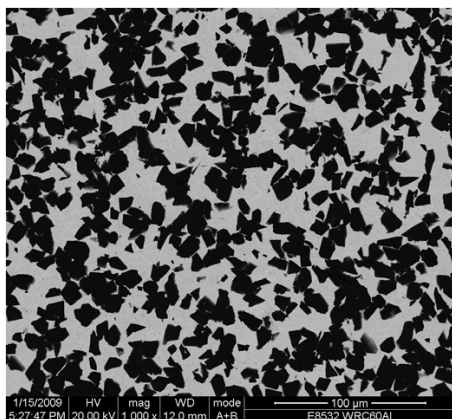
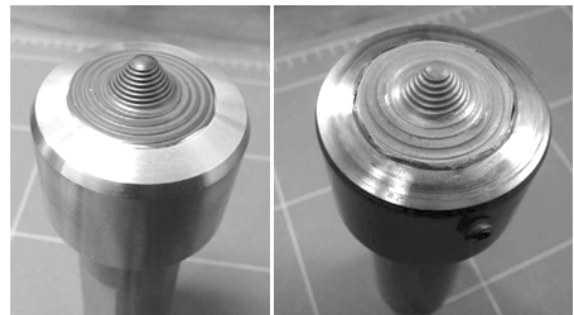


그림 2 Q60의 미세조직¹⁴⁾

이에 대한 대책으로써, 툴의 회전속도를 300RPM 이하의 비교적 낮은 수준으로 유지할 것을 권하고 있으며, 더불어 툴의 수명을 연장하기 위해서는 접합 공정 중에 Cooling System을 사용하여 툴의 온도를 740°C 이하로 유지할 요구하고 있다. 그렇지 않을 경우, 툴의 수명이 급격히 단축될 가능성을 배제할 수 없다고 한다. 마찰교반접합 전과 후의 툴(Q60)의 형상을 그림 3에 나타내었다. 그림 3 (a)로부터 Probe 와 Should 부분은 PCBN Composite, Shank 부분은 다른 소재로 구성되어 있음을 알 수 있다. Mild Steel에 대하여 35.6m 마찰교반접합을 실시한 후의 툴의 형상을 그림 3 (b)에 나타내었다. 저배율 사진인 관계로 마모의 정도를 정확하게 판단하기는 쉽지 않으나, 사용 전의 형상을 거의 그대로 유지하고 있는 것으로 판단되며, 파손 또한 관찰되지는 않았다.

PNNL(Pacific Northwest National Laboratory)은 초고강도강의 마찰교반점접합에 적용할 목적으로 Si₃N₄와 Tib₂ Composite 소재를 사용한 툴을 개발하여 소개하였으며, 이 툴은 PCBN 툴 대비 가격이 25% 이상 저렴하지만, 접합체의 접합강도는 거의 동등한 수준으로 유지된다고 보고하였다. 그러나, 툴의 수명에 관하여는 언급하지 않았다. 그림 4에 Si₃N₄와 Tib₂ 툴의 외형을 나타내었다.



(a) 사용 전 (b) 사용 후

그림 3 마찰교반접합 전후의 Q60 외관 형상¹⁴⁾

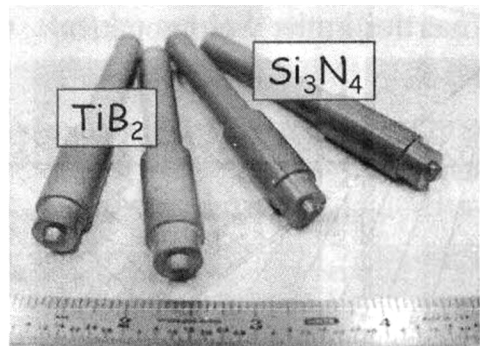


그림 4 Si₃N₄ 및 Tib₂ 툴¹⁵⁾

3.2 일본의 개발 동향

미국이 분말소결에 의한 복합재료를 가공하여 툴을 개발하고 있는 반면, 일본의 경우는 분말소결 공정이 가지는 생산성의 한계를 극복하기 위하여 신 합금설계 및 주조공정에 의한 Ingot를 가공하는 방법으로 툴의 개발을 진행하고 있다. Furuya Metal은 툴 소재로서의 모재를 선택하기 위하여 다양한 후보군 원소들에 대하여 고온 환경에서의 산화시험을 실시하였으며, 반응성이 가장 낮은 Ir을 툴 모재로 선정하였다. 그림 5에 그 결과를 나타내었다.

그림 6은 Ir에 각각의 고용점 금속원소를 1at% 첨가한 합금의 경도의 열처리온도 의존성을 나타낸 것이다. Re를 첨가한 경우가 다른 금속원소를 첨가한 경우보다 연화개시온도 즉, 재결정온도가 높아서 내열성을 필요로 하는 고온재료 전용 마찰교반접합 툴의 소재로서 효과적임을 보고하였다. 개발한 Ir-Re 툴을 사용하여 SUS304 스테인레스 스틸에 대하여 마찰교반접합을 실시하였고, 약 1m 접합 후 툴의 중량을 측정된 결과

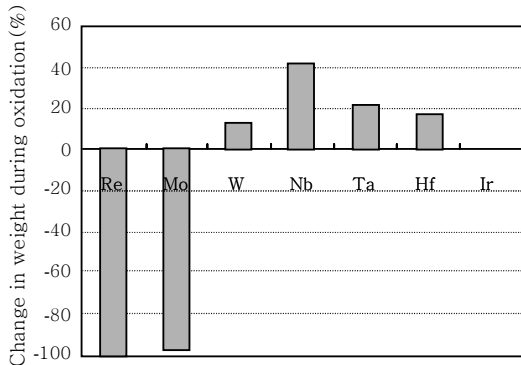


그림 5 TG-DTA 산화시험에 의한 각 원소의 중량 변화 (1200℃, 180min)¹⁶⁾

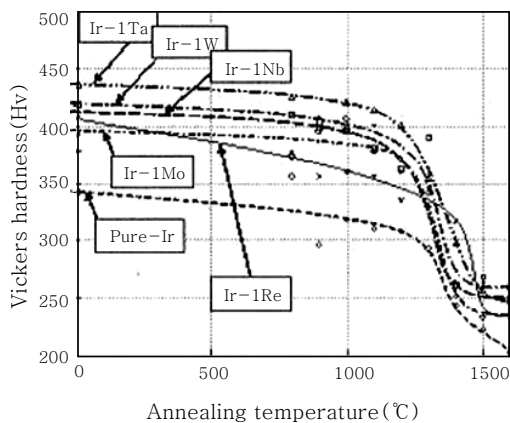


그림 6 Ir 합금의 소둔온도에 따른 경도 거동¹⁶⁾

1%에 가까운 중량 감소가 확인 되었다.

Tohoku Univ.와 Hitachi사가 공동연구를 통하여 1000℃ 이상의 고온영역에서 L1₂ 구조를 갖는 금속간 화합물(Co₃(Al,W))의 분산에 의해 강화되는 Co-base 합금을 사용한 툴의 개발을 보고 하였으며, 이 툴을 Mild Steel에 적용하여 약 50m까지 성공적으로 마찰교반접합을 수행하였고 툴의 파손은 발견되지 않았다고 보고하였다¹⁶⁾.

4. 국내의 개발 동향

미국과 일본 등 선진국에서의 고온재료 전용 마찰교반접합 툴에 대한 적극적인 개발 동향과는 달리 국내에서의 개발 사례는 극히 제한적이다. 최근, 저자의 연구 그룹이 WC-base 툴의 개발을 진행하고 있으며, 개발한 툴을 Mild Steel에 적용하여 50m까지 마찰교반접합을 성공적으로 수행하였고, 툴의 마모 및 파손은 발견되지 않았다. 접합거리에 따라 인장시험편을 채취하여 인장시험을 실시한 결과, 접합거리에 관계없이 모든 시험편은 모재부에서 파단이 발생하였고, 접합부 강도는 모재와 동등한 수준을 나타내었다. 인장시험 후의 시험편의 사진을 그림 7에 나타내었다. 마찰교반접합 수행에 의한 툴의 중량 감소는 거의 확인되지 않았다. SUS304 스테인레스 스틸에 대하여도 마찰교반접합에 성공하였으며, 향후 1GPa급 초고강도강, Ti Alloy 및 Super Alloy에 적용하여 그 성능을 테스트할 예정이다.

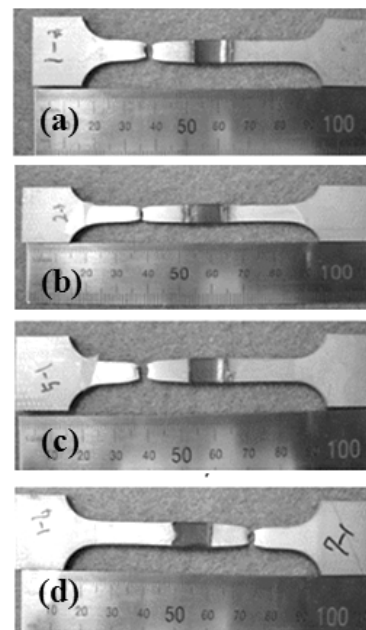


그림 7 국내 개발 툴 적용 연강 마찰교반접합부에 대한 인장 시험 결과, 접합거리: (a) 5m, (b) 10m, (c) 15m, (d) 50m

5. 맺 음 말

향후 수송기기 분야를 비롯한 전 산업분야에서 그 시장의 확대가 예상되는 고온재료에 대한 마찰교반접합 및 고온재료용 마찰교반접합 틀의 개발 동향에 대해 살펴보았다. 미국은 분말소결 복합재료를 사용한 틀의 개발에 집중하고 있는 반면, 일본은 분말소결 공정의 생산성의 한계를 극복하기 위하여 분산강화상을 이용한 합금주조 재료를 사용한 틀의 개발에 주력하고 있다. 현재 미국과 일본이 개발한 틀의 수명은 연강 기준으로 약 50m 수준으로 판단된다. 최근 국내에서도 고온재료 마찰교반접합용 초내열/초내마모성 틀의 국산화 개발이 진행 중이며, 기존의 틀 대비 제조 단가가 10% 이하의 수준으로 월등히 저렴하면서도 틀의 수명과 접합부 성능이 동등한 수준으로 확인되었다. 마찰교반접합 공정의 적용이 경량금속에만 국한되는 것이 아니라, 국내의 기술력에 의해 초고강도강, Ti Alloy 및 Super Alloy 등의 고온재료로 확대 적용될 가능성이 확인되었다고 할 수 있겠다.

후 기

본 연구의 일부는 한국생산기술연구원 '산업계 연계형 기술지원 사업 - 플랫폼형 R&D 기술지원 사업(과제번호: JA-11-0001)'의 지원으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. Moataz M. Attallah and Hana야 G. Salem : Friction stir welding parameters, Mater Sci. Eng. A, **391** (2005), 51~59
2. P. Bala Srinivasan, W. Dietzel, R. Zettler, J. F. dos Santos and V. Sivan : Stress corrosion cracking susceptibility of friction stir welded AA7075-AA6056 dissimilar joint, Mater Sci. Eng. A, **392**(2005), 292-300
3. M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss and P. J. Withers : Microstructure, mechanical properties and residual stress as a function of welding speed in aluminum AA5083 friction stir welds, Acta Mater., **51**(2003), 4791-4801

4. Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto : Microstructure in the friction stir weld of an aluminum alloy, Metal. and mater. Trans. A, **32**(2001), 941-948
5. R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan : Development of grain structure during friction stir welding, Scripta Mater., **51**(2004), 243-248
6. K. V. Java and S. L. Semiatin : Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloy, Scripta Mater., **43**(2000), 743-749
7. Y.S. Sato, Y. Kurihara, S.H.C. Park, H. Kokawa and N. Tsuji : Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding, Scripta Mater., **50**(2004), 57-60
8. S. Lathabai, M. J. Painter, G.M.D. Cantin and V.K. Tyagi : Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy, Scripta Mater., **55**(2006), 899-902
9. K. Nakata, Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura and T. Komazaki : Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing, Mater Sci. Eng. A, **437**(2006), 274-280
10. Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Fukuhara : Microstructural evolution of ultrahigh carbon steel during friction stir welding, scripta Mater., **57**(2007), 557-560
11. K. Lee and K. Bang : Interfacial Microstructure of Dissimilar Friction Stir Welds between Al and Ti Alloy Sheets, Journal of KWJS, **28-5** (2010), 15~19 (in korean)
12. K. Bang, K. Lee, H. Bang and H. Bang : Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welds between 6061-T6 Aluminum and Ti-6%Al-4%V Alloys, Mater. Trans., **52**(2011), 974-978
13. TMS 2011 140th Annual Meeting Proceedings
14. Scott Packer : Q60 Gtade FSW Parameters Recommendations, Technical Bulletin 090626, 1-2
15. S. Hong : Next step and targets of FSW, Proc. of FSW Symposium of KWJS, **2** (2009) 1-14
16. T. Miyazawa, Y. Iwamoto, T. Maruko and H. Fujii : Development of Ir based tool for friction stir welding of high temperature materials, Proc. of JWS, **86** (2010), 42-43 (in japanese)



- 이광진
- 1973년생
- 한국생산기술연구원
- 마찰교반접합, 용접야금
- e-mail : kjlee@kitech.re.kr



- 박현국
- 1980년생
- 한국생산기술연구원
- 분말소결, 마찰교반접합 틀 소재
- e-mail : kjlee@kitech.re.kr



- 김상혁
- 1981년생
- 한국생산기술연구원
- 마찰교반접합, 용접야금
- e-mail : kjlee@kitech.re.kr



- 오익현
- 1966년생
- 한국생산기술연구원
- 분말소결, 마찰교반접합 틀 소재
- e-mail : ihoh@kitech.re.kr