

마찰교반접합기술의 철강재 적용 현황

이 원 배

The Status of Friction Stir Welding Applications to Ferrous Materials

Won-Bae Lee

1. 서 론

마찰교반접합법 (Friction Stir Welding, 이하 FSW)은 개발된 이래 주로 Al 합금의 접합에 적용되어 연비향상을 위해 부품 경량화를 추구하고 있는 수송기기 분야에 성공적으로 상업화가 이루어지고 있다. 또한 반도체 sputtering 장비의 backing plate 및 방사선 폐기물 보관용 소재 (copper canister)로 사용되는 Cu 합금의 접합에 적용되었다. 철강재와 같이 상대적으로 강도가 높은 재료의 경우는 접합부 물성은 확보할 수 있으나 고가의 접합 툴이 사용되며 접합 중 툴 마모 등의 문제로 인해 상용화가 더딘 실정이다. 현재 산업계 전반에서 접합 및 용접이 이루어지는 부품의 약 80%이상이 철강재이므로 FSW기술 적용 확대를 위해서는 철강재에 적합한 접합 툴 및 공정 개발이 매우 시급하며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 철강재료용 FSW 기술의 현황 (접합 툴 및 각 철강재의 FSW특성) 및 향후 전망 등에 대해 기존의 논문들을 인용하여 보고하고자 한다.

2. 본 론

2.1 접합 툴¹⁻⁷⁾

철강용 FSW 툴 재료는 고온강도, 내 마모성, 인성이 우수하고 철강재와 반응이 적어야 하는 요구 특성이 있으며 이러한 특성을 만족시킬 수 있는 재료는 내화재료, 초 연마 및 세라믹재료가 있다.

내화재료 (Refractory material)로는 순 W¹⁾ 및 W-Re합금, Mo 합금 등이 있다. 순 W의 경우, 툴 재료로서 고온강도는 좋지만 상온인성이 좋지 않아 접합 전에 툴 예열을 실시해야 하며, 접합도중 툴이 급격히 마모된다. Mo 합금(Zr, Ti 첨가) 툴의 경우²⁾, 철강재를 성공적으로 접합할 수 있지만 툴의 마모 및 파괴가

자주 발생하였으며 특히 산소가 존재하는 환경에 노출될 경우 700°C에서 급격하게 독성 MoO₃ 산화물을 생성시키기 때문에 툴 재료로서 적용이 제한된다. W-Re 합금 툴의 경우, W에 Re를 첨가해서 연성취성변태온도를 상온 이하로 낮추어 툴 및 접합체를 예열 없이 접합이 가능하게 하였으며, 다양한 제조공정 제어를 통해 소결체 밀도를 향상시켜 마모량을 줄일 수 있지만 접합체와 화학적 반응을 일으키는 문제점이 보고된다. 그 외, 주기율표상에서 Pt 주위의 고온강도가 우수한 고용점 재료, Os (Osmium)과 Ir(Iridium)등이 각각 비밀리에 연구되고 있다고 알려지고 있다³⁾.

초 연마재 (Super Abrasive Material)는 Poly Crystalline Diamond (PCD)와 Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN)가 있다. PCBN은 탁월한 고온강도 및 내 연마성을 나타내고 화학적으로 불활성이지만, 제조할 수 있는 크기에 제약이 있으며 열전도도가 매우 높고 상대적으로 낮은 인성이 문제가 되고 있다. 세라믹 재료로는 Alumina, Zirconia와 WC가 철강재료용 툴로서 연구되고 있지만, 스피들(spindle)의 동심도(concentricity)가 매우 높은 접합장비를 이용하지 않는 경우 툴 삽입 혹은 이동 시 파괴가 일어난다고 보고하고 있다.

고온강도 및 내마모성이 우수한 다양한 재료들이 FSW용 접합 툴 재료로서 연구되고 있으며, 이중 PCBN과 W-Re툴이 집중적으로 진행 중이다.

PCBN^{4,5)}은 지구상 존재하는 재료 중 다이아몬드 다음으로 경한 재료이며, 다이아몬드 결정구조를 가지며 B과 C가 치환 형으로 격자자리에 존재한다. PCBN은 고온, 초 고압(HT-UHP, 1700K, 6000MPa)하에서 생성된 CBN 분말을 다결정 blank를 제작하기 위해 고온, 초 고압 하에서 소결하여 제작한다. PCBN의 특징은 경하고 내마모성이 우수하여 1500K까지 내구성

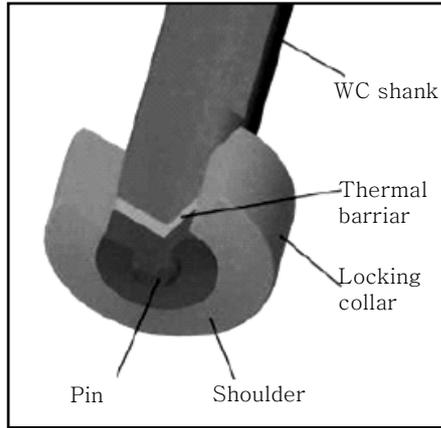


Fig. 1 PCBN tool 구조

을 유지할 수 있다. FSW용 PCBN 접합 툴은 Fig. 1에 나타나듯이 WC shank와 PCBN shoulder와 probe 그리고 이들을 연결하고 툴을 고정시킬 수 있는 Ni-base 합금 locking collar로 구성되고 있다. 툴 내 구성을 유지하기 위해서는 스펀들의 동심도가 $10\mu\text{m}$ 이하로 유지되고, 접합하는 동안 툴을 지지하기 위해 WC로 제작한 견고한 수냉 장치가 장착된 툴 홀더를 이용해야 한다. 표준 shoulder직경은 25mm이고, probe의 길이는 실험용으로는 12mm까지 개발되었지만 범용으로 사용되고 있는 probe의 길이는 6.4 mm이다. PCBN 툴 설계 시, shoulder직경대비 probe크기를 크게 하여 더욱 튼튼하게 만들며, 재료의 유동성을 향상시킬 수 있도록 설계해야 한다. Probe/shoulder계면은 곡률반경을 키워서 probe root에서 굽힘 응력이 집중되어 응력이 상승하는 것을 최소화 하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 W에 3% Re이 첨가된 재료는 조명산업, 5-10% 첨가된 재료는 x-ray target용 재료, 25% 첨가된 재료는 열전도선으로 이용된다⁶⁾. 25%의 Re 첨가는 텅스텐에 어느 정도의 연성을 유지하며 첨가할 수 있는 최대 양이며 가장 높은 강도를 나타낸다. 1998년 W-25Re 합금 접합 툴을 이용하여 최초로 철강재료를 FSW를 시도 하였으며 당시에는 소둔과 부분 스웨징을 통해 제작하였으나 분말 압축 및 소결 과정에서 잔류 기공들이 존재하였다. W-Re 합금은 분말공정, 냉간정수압 (CIP)와 소결공정을 통해 88-93%의 실제 밀도를 가진 재료를 제작하며, 전통적인 swaging 공정 혹은 열간정수압 (HIP)과 고온 압출공정을 통해 밀도를 약 99%이상 향상시킬 수 있다. 소결체는 swaging을 통해 미세해 지지만, 재료의 가공효과가 주로 표면에 집중되어 중심부에 비해 밀도가 더 높다. HIP처리한

경우, 고온 압출공정과 유사하게 재료 가공 균일성을 향상시켜 주며 99%이상의 밀도 향상을 꾀할 수 있다. W-Re 툴을 이용하여 접합 한 경우, 툴이 마모되고 W과 Re 흔적이 접합부에 잔류하여 접합강도에 악영향을 미칠 수 있다. 실제로 shoulder는 probe에 비해 더욱 빠르게 마모가 되며, 특히 오목한 형태의 shoulder경우, 상당한 양의 교반된 재료가 구석을 침투하여 shoulder의 압착효과를 감소 시키는 반면 probe의 길이는 증가하게 된다⁷⁾.

2.2 철강재 FSW접합부 특성

2.2.1 페라이트계 강

페라이트계 강에 대한 FSW 보고는 지금까지 연강⁸⁾, 각종 탄소강⁹⁻¹⁴⁾, DH36강¹⁵⁾, C-Mn강^{16,17)}, 라인 파이프용강^{18,19)}, 12%Cr강^{20,21)}, HSLA-65강²²⁻²⁶⁾, DP강²⁷⁻³⁰⁾, B첨가강³¹⁾ 등에 대한 FSW 적용 예가 보고되었다. 페라이트계 강의 FSW부 표면은 평활 하고 금속학적인 광택을 얻을 수 있고 적절한 접합조건이 설정된다면 접합부의 결함은 생성되지 않는다.

Fig. 2는 탄소함량이 다른 탄소강 FSW부의 경도 분포를 나타낸다. 모든 탄소강 교반부는 모재에 비해 높은 경도를 나타내고 있다. 그러나 경도 향상 기구는 각 탄소강에 따라 다르다. 탄소량이 0.12%이하의 경우, FSW에 의해 미세한 페라이트-펄라이트 조직이 얻어지기 때문에 교반부의 경도가 상승한다. 탄소량이 0.2% 이상인 경우, FSW시 가열·급냉에 의해 교반부에 마르텐사이트 등의 경화조직이 생성되기 때문에 경도가 현저하게 상승된다¹⁰⁻¹⁴⁾. 그러나 접합조건을 조절하여 냉각속도 및 최고도달온도를 제어하면 FSW후 경화조직의 형성을 억제할 수 있다¹⁰⁻¹¹⁾. Fig. 3에서는 판 두께 1.6mm의 각종 탄소강에 대해 WC합금 툴을 이용하여 FSW한 경우에 접합속도와 최고 도달 온도 및 냉각속도의 관계를 나타낸다¹¹⁾. 접합속도가 증가하면 최고도달온도는 감소하는 경향이지만 냉각속도는 증가한다. 냉각속도를 마르텐사이트 생성 임계냉각속도보다 천천히 제어한 결과 미세한 페라이트-펄라이트 조직을 얻었으며, 최고 도달온도를 A1점 이하로 제어한 결과 모재 조직의 재결정에 의해 현저히 미세한 조직이 형성된다고 보고 하였다. A1점 이하로 제어한 FSW를 0.7% 고탄소강 및 0.85%C 과공석강에 적용한 결과 미세한 페라이트와 세멘타이트 조직을 얻어 강도와 함께 연성도 현저히 향상되었다^{10,12)}.

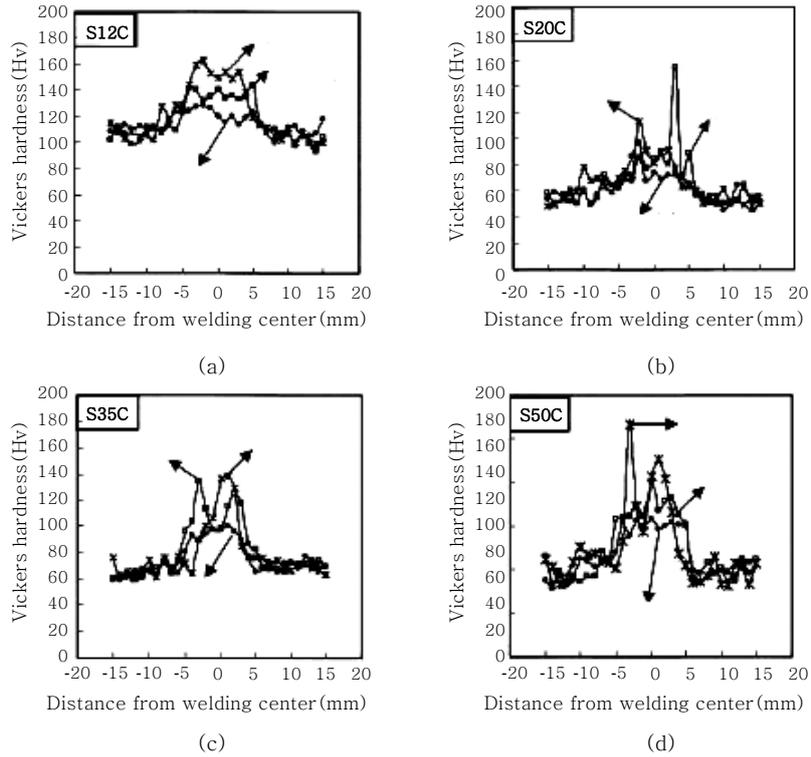


Fig. 2 탄소함량에 따른 탄소강 FSW부 경도분포에 미치는 접합속도의 영향

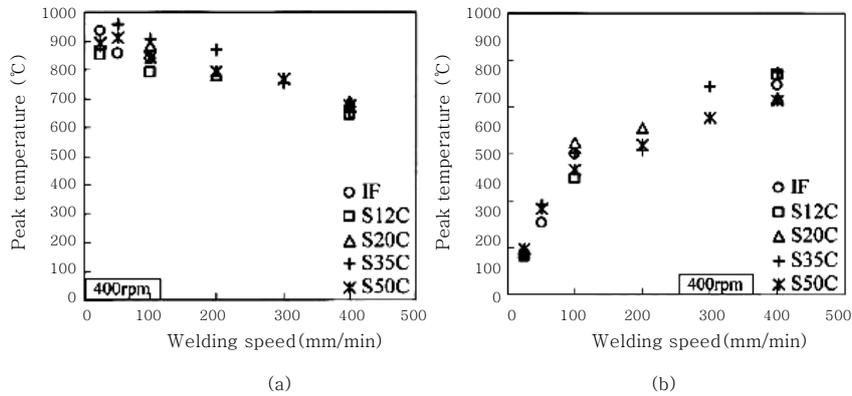


Fig. 3 탄소강 FSW시 최고도달온도 및 냉각속도에 미치는 탄소량 및 접합속도의 영향

열영향부(HAZ)의 경도는, 초기 모재조직 및 FSW중 조직 변화에 의존하며 모재 보다 약간 저하하는 경우와 경화하는 경우가 있다. HAZ에 있어서의 연화는 결정립의 조대화, 경화 조직의 소둔 효과에 기인하는 경우가 많다. 페라이트 강 FSW부 대해서 인장 시험을 실시하면, 교반 부내에 결함이 없는 한 파단은 연화부에서 생긴다. 따라서, HAZ가 연화하는 강종에서는 HAZ 파단, 그 이외에서는 모재 파단이 되는 것이 일반적이다. FSW부의 인장 강도는 최대 연화부의 강도가 전체를 대표하기 때문에, HAZ 파단의 경우에는 이음부 효율 70%이상, 모재 파단의 경우에는 이음부 효율이 거의

100%가 되고 일반적으로 GMAW부 보다 높다.

S355 C-Mn강 FSW부에 있어서의 교반부 및 HAZ의 인성을 샤르피 충격 시험에 의해서 조사한 결과¹⁷⁾을 Fig. 4에 나타낸다. 교반부, HAZ의 흡수 에너지는, 저온에서는 모재와 동등하지만, 실온에서는 모재 보다 낮다. 교반부에 있어 인성이 저하하는 현상은 HSLA-65 강의 경우도 보고되고 있다²²⁾.

Fig. 5는 라인파이프용 X-80강 모재와 교반부 (판 두께 19 mm를 이면으로부터 2pass FSW)의 CTOD 파괴 인성치에 미치는 시험 온도의 영향을 나타낸다¹⁹⁾. CTOD=0.1~0.2 mm가 파이프라인 용접부에 요구되

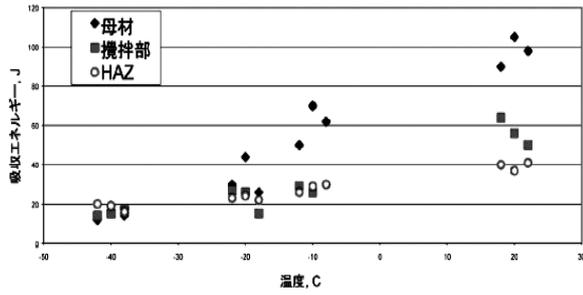


Fig. 4 S335 C-Mn강 교반부, 열영향부의 샤르피 충격 시험 결과

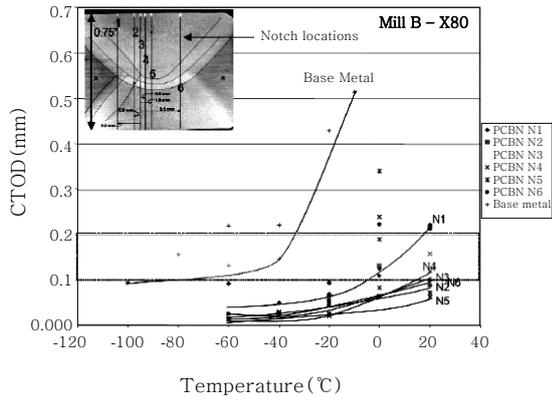


Fig. 5 라인 파이프용 X80 강 FSW부 CTOD 파괴 인성치에 미치는 시험온도의 영향

는 허용치이지만, FSW 교반부에서는 모두 그 값을 밑돌고 있고 모재 보다 낮다.

Fig. 6에 DH36강 FSW부의 단면 사진과 각 영역의 광학 현미경 사진을 나타낸다¹⁵⁾. DH36강 모재는 페라이트+펄라이트 조직을 보이지만 (Fig. 6(d)), 접합 중심부에 근접함에 따라, 미세결정립 영역(Fig. 6(c)), Lath상 조직 영역(Fig. 6(b))으로 변화한다. 또, 교반부의 Advancing side(이후, AS영역이라고 생각한다)에 소용돌이 영역(Swirl zone)이 존재하고 있다. 이 영역은 마르텐사이트와 베이나이트 조직으로부터 형성

되는 밴드 구조를 가지고 있어 교반부 중앙보다 경도가 높아지는 경향이 있다. 다른 FSW부 교반부의 AS영역에 있어도, 비슷한 밴드 조직이 관찰되고 있다.

2.2 스테인리스 강의 FSW

2.2.1 페라이트계 및 2상 스테인리스 강 FSW

430 페라이트계 스테인리스 강 FSW부의 단면 마이크로 사진과 경도 분포³²⁾을 Fig. 7에 나타낸다. 모재에 비해 교반부의 경도는 현저하게 높다. Fig. 8에 교반부의 조직을 보면 교반부는 미세하고 등축인 페라이트·마르텐사이트 2상조직을 나타내고 있다. 430강의 FSW시 교반부 최고 가열 온도가 약 1140°C인 것으로부터, 오스테나이트가 생성 후, 냉각 과정에서 마르텐사이트 변태 한 것이라고 생각할 수 있다. 430강 FSW이음부 인장 시험결과 모재 파단으로, 모재와 동등의 강도를 나타낸다³²⁾.

2상 스테인리스 강의 용융 용접에서는, 용접 금속부에서 페라이트 량이 증가하여 인성이 저하하는 문제가 있지만 FSW부에서는 페라이트 량이 모재와 동일한 정

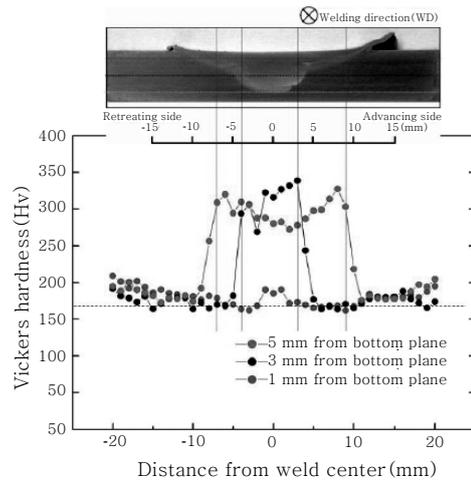


Fig. 7 SUS 430 스테인리스 강 FSW부 단면 마이크로 사진 및 경도 분포

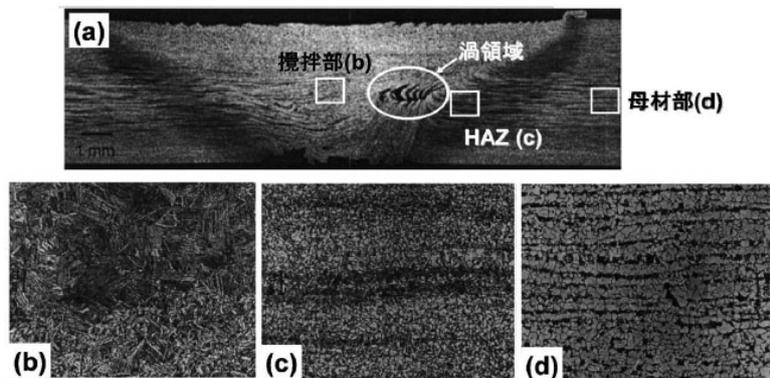


Fig. 6 DH36탄소강 FSW부 단면사진(a) 및 교반부 (b), HAZ (c), 모재부 (d) 광학사진

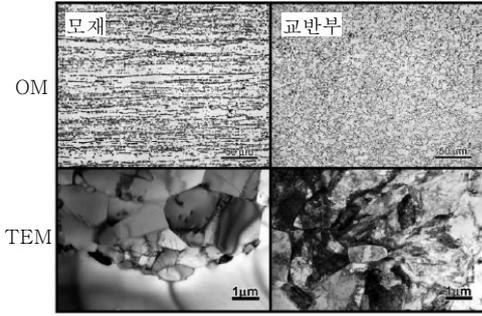


Fig. 8 430 모재 및 교반부 광학 및 TEM 사진

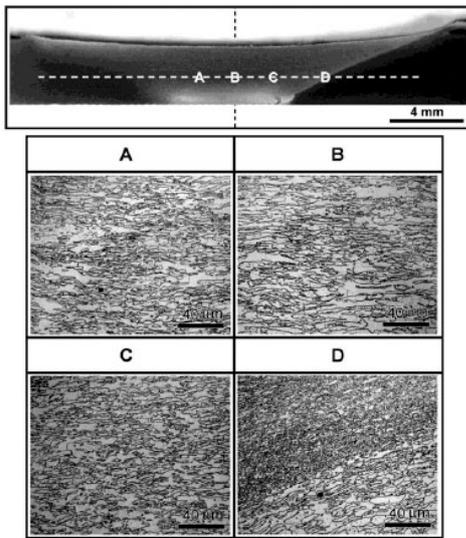


Fig. 9 SAF2507 스테인리스강 FSW부 단면 조직

도로 유지된다. Fig. 9에 SAF2507 2상 스테인리스강 FSW부의 조직²⁷⁾을 나타낸다. 교반부에는 등축의 페라이트와 오스테나이트의 2상 조직이 생성되고 FSW부 전체적으로 모재와 동일한 정도의 균일한 페라이트량 분포가 유지된다. 이 FSW부 인장 시험 결과²⁷⁾, 파단은 교반부와 TMAZ의 경계 부근에서 생기지만 모재와 동일한 정도의 인장 강도를 나타낸다.

2.2.2 오스테나이트계 스테인리스 강 FSW

오스테나이트계 스테인리스 강에 대해서는 304강³³⁻³⁵⁾ 및 304L강^{17,35)}에 관한 연구 보고가 있다. Fig. 10(a)에 304 스테인리스 강 FSW부의 단면 사진, Fig. 10(b)에 교반부, TMAZ, 모재부의 광학 및 TEM 사진을 나타낸다³³⁾. 모재에는 전위밀도가 낮은 조대한 결정립이 관찰되지만, 교반부에서는 전위밀도가 약간 높은 등축 결정립 조직이 TMAZ에서는 아결정립 조직이 관찰되었다.

Fig. 10(a)의 단면 사진을 상세하게 관찰하면, 흰색 사각으로 표기한 교반부의 AS영역(Fig. 11(a))에 밴

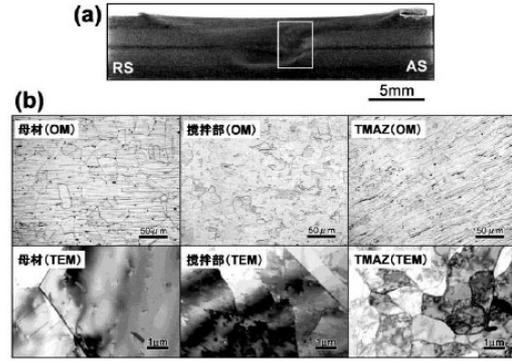


Fig. 10 304 스테인리스 강 FSW부 단면사진 (a) 및 모재, 교반부, TMAZ 광학 및 TEM 사진

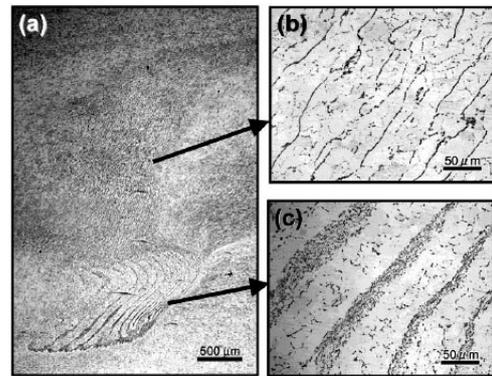


Fig. 11 304 스테인리스 강 교반부의 AS 영역 (a), 밴드상 조직 (b), 라멜라상 조직 (c) 광학사진

드상으로(Fig. 11(b)) 라멜라 조직(Fig. 11(c))이 관찰된다¹⁷⁾. 이러한 영역을 TEM 관찰한 결과, 시그마상¹⁷⁾과 Cr 탄화물²⁴⁾의 존재가 확인되었다.

시그마상은, FSW 중의 페라이트 생성과 동적 재결정에 의해서 형성되고¹⁷⁾, Cr탄화물은 PCBN 툴의 마모 잔존물(BN)이 기지와 반응에 의해서 형성된 것으로²⁴⁾ 보고하고 있다. 시그마상 및 Cr탄화물 모두, 주위의 Cr를 다량으로 소비하여 교반부 AS영역의 내식성을 감소시킨다.

304강에 대해서 PCBN 툴을 이용해 FSW 했을 경우, 교반부의 AS측에 시그마상, Cr탄화물 생성을 볼 수 있었지만, W합금 툴을 이용했을 경우에는, Cr결핍을 가져오는 반응은 일어나지 않고, 교반부의 AS측에, W를 많이 포함한 페라이트상이 잔존한다⁴³⁾. 한편, WC 기합금 툴을 이용했을 경우에는, 다량의 거대한 Cr₂₃C₆ 탄화물이 교반 부내에 생성해, Cr결핍을 가져와 교반부 AS측의 내식성은 현저하게 저하한다⁴⁴⁾.

304강 교반부의 경도는 모재에 비해 높고, 경도가 최고 높은 영역은 밴드 조직을 나타내는 영역과 일치한다⁴⁵⁾. 교반부에 있어서의 경도 상승은 결정립 미세화,

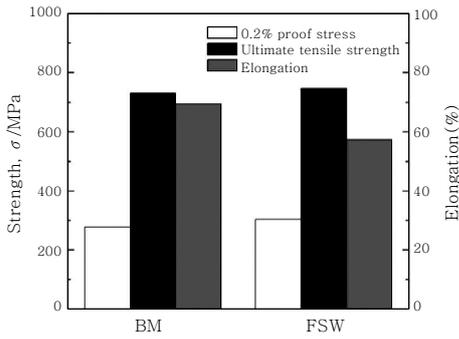


Fig. 12 304 스테인리스 강 FSW부의 인장특성

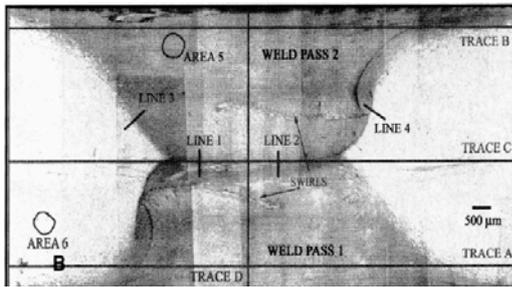


Fig. 13 W-Re tool을 이용하여 2-pass FSW 한 AL-6XN 슈퍼 스테인리스 강 FSW부의 단면 사진

전위밀도의 증가에 의한다고 생각할 수 있다. 교반부의 AS영역에 있어 미세한 시그마상이나 Cr탄화물 등도 분산하고 있기 때문에, 이것들이 경도 상승에 기여할 가능성도 있다. FSW이음부 인장 특성⁴⁵를 Fig. 12에 나타낸다. 모재부에서 파단이 발생하여 0.2%내력 및 최대 인장 강도는 모재와 거의 동등의 값을 나타냈다. 그러나, 교반부에 있어 경화되기 때문에 연신율은 모재에 비해 약간 감소했다. W-Re툴로 제작한 304L강 FSW 교반부는 모재 이상의 인장 강도를 가지고 있어 파단 연신율 50%이상으로 지극히 높은 것을 보이고 있다.

2.2.3 슈퍼 오스테나이트계 스테인리스강 FSW

Posada³⁶⁾은, AL-6 XN FSW 교반부는 항복 강도, 최대 인장 강도가 뛰어나지만, 연신이 저하한다고 보고하였다. Fig. 13에 AL-6 XN의 FSW부 단면 사진을 나타낸다. W-Re합금 툴을 이용해 이면으로부터의 2 패스로 FSW했던 것으로 결함이 없는 이음부가 형성되었다. 교반부는 모재보다 미세한 등축결정립이 생성되었지만, 교반부 하부에 소용돌이 영역(Swirl)에서는 W합금 툴의 마모편이 다수 존재하였다. 교반부에 미세결정조직이 형성되기 때문에 경도가 상승하였다.

Sato³⁷⁾은 NSSC270의 FSW부 조직과 제특성에 대해 조사했다. 툴 회전 속도 400 rpm와 800 rpm로, 접합 속도 0.5 mm/s에서 결함이 없는 이음부를 얻을

수 있었다. 교반 부내에 부식에 민감한 조직이 형성되어 주로 σ 상이나 χ 상등의 금속간 화합물이 고속접합 시 미세하게 석출하는 것으로 나타나고 있다. 금속간 화합물의 양은 회전 속도가 높을 경우 밀도가 높아져 내식성과 인성의 저하된다. 아크 용접에와 같이 조대한 금속간 화합물이 용융부에서 형성하는 것을 방지하기 위해서는, 저 회전속도의 FSW를 이용하는 것으로, 비교적 양호한 이음부를 제작 가능하다고 시사하였다.

3. 결론 및 향후 전망

일반적으로 철강재의 경우 고강도 고급 강재를 제외하고는 용융용접을 통해서 쉽게 용접이 가능하며 용접 속도 및 강도에 전혀 문제가 없다고 알려 졌다. 따라서 현실점에서 FSW를 적용할 수 있는 분야는 용융용접으로 용접이 곤란한 고강도 고급강재들로 제한된다. 그러나, FSW를 일반강재의 접합에 적용할 경우, 용융용접시 발생할 수 있는 뒤틀림 등에 대한 후 보수 비용 및 오염물질 배출에 따른 환경부담금에 대한 문제를 고려하지 않아도 되는 이점이 있다. 스테인리스 강의 경우 탄소강에 비해 낮은 열전도도와 높은 열팽창 때문에 뒤틀림이 훨씬 더 발생하기 때문에 용접 후 뒤틀림을 제거하기 위한 비용이 상당히 높다. 또한 스테인리스 강 용접 시 용접 흡을 통해서 발생하는 Cr⁺⁶이 환경 및 인체에 유해하기 때문에 미국의 경우 법률적으로 그 양을 제한하고 있는 실정이다. FSW를 철강재에 적용할 경우, 접합속도 측면 및 툴 교체에 따른 비용을 고려하면 현재 경제성을 떨어지지만, 우수한 접합부 특성으로 인한 후 공정의 생략 및 환경문제에 대한 부담감소등의 이점을 살리고 경제적으로 타당한 내구성을 가진 접합 툴이 개발된 되면 상업화가 급속하게 이루어지리라 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

1. W M Thomas, P Woolin and K I Johnson: Friction Stir Welding of a ferritic Stainless Steel-A feasibility study, TWI Members Report 664 (1998)
2. W M Thomas : Friction Stir Welding of ferrous materials-A Feasibility Study' 1st international Friction Stir Welding Symposium. Thousand Oaks CA, USA. June 1999
3. P L Treadgill : A Review of Friction Stir Welding Part 2 Selection of Tool Materials, TWI Members Report 761 (2003)
4. C D Sorenson, TW Nelson and S M Packer: Tool materials testing for friction stir welding of High temperature alloys 3rd international friction stir welding symposium Kobe Japan September 2001

5. Tool and Equipment Requirements for FSW ferrous and Non-ferrous alloys, Megastir technologies, October (2002)
6. J Downs, T Leonhardt and R Johnson : The evolution of tungsten 25% rhenium tooling for friction stir welding, Materials Science and Technology Conference, New Orleans, September (2004)
7. R Johnson : Friction Stir Welding of Steels-status report, TWI Members Report 838 (2005)
8. T.J. Lienert, W.L. Stellwag, Jr., B.B. Grimmer and R.W. Warke: Weld. J., **82** (2003), 1s.
9. H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata and K. Nogi: Mater. Sci. Eng. A, **429** (2006), 50-57
10. L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji and K. Nogi: Scripta Mater., **56** (2007), 637-640
11. L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji, K. Nakata, K. Nogi, R. Ikeda and M. Mtsushita: ISIJ Intern., **72** (2007), 299-306
12. Y.D. Chung, H. Fujii, R. Ueji, K. Nogi: Science and Technology of Welding and Joining, **14** (2009), 233
13. Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Furuhashi: Scripta Mater., **57** (2007), 557-560
14. Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Furuhashi: ISIJ Intern., **48** (2008), 71-76
15. A.P. Reynolds, W. Tang, M. Posada and J. DeLoach: Sci. Technol. Weld. Join., **8** (2003), 455
16. P. Konkol: Proc. 4th Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Park City, Utah, USA, (2003), CD-ROM
17. R. Johnson, J. dos Santos and M. Magnasco: Proc. 4th Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Park City, Utah, USA, (2003), CD-ROM
18. A. Ozekcin, H.W. Jin, J.Y. Koo, N.V. Bangaru and R. Ayer: Intern. J. Offshore Polar Eng., **14** (2004), 284
19. R. Ayer, D.P. Fairchild, S.J. Ford, N.E. Nisseley, H.W. Jin and A. Ozekcin: Proc. 7th Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Awaji-Island, Japan, (2008), CD-ROM
20. W.M. Thomas, P.L. Threadgill and E.D. Nicholas: Sci. Technol. Weld. Join., **4** (1999), 365
21. W.M. Thomas, C.S. Wiesner, D.J. Marks, D.G. Staines: Science and Technology of Welding and Joining, **14** (2009), 247
22. P.J. Konkol, J.A. Mathers, R. Johnson and J.R. Pickens: Proc. 3rd Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Kobe, Japan, (2001), CD-ROM
23. W. Gan, Z.T. Li, S. Khurana: Science and Technology of Welding and Joining, **12** (2007), 610
24. P.J. Konkol, M.F. Mruczek: Welding Journal, **86** (2007), 187s
25. T.W. Nelson, L. Wei, M. Abassi: Friction Stir Welding and Processing V, TMS, (2009), 910
26. M.F. Sinfield, J.C. Lippold, B.T. Alexandrov: Proc. 7th Int. Sympo. Friction Stir Welding, TWI, Awaji-Island, Japan, (2008), CD-ROM
27. Y.S. Sato, T.W. Nelson, C.J. Sterling, R.J. Steel and C.-O. Pettersson: Mater. Sci. Eng. A, **379** (2005), 376
28. M.P. Miles, J. Pew, T.W. Nelson and M. Li: Sci. Technol. Weld. Join., **11** (2006), 384-388
29. W. Yuan, J.M. Rodelas, R.S. Mishra: Friction Stir Welding and Processing V, TMS, (2009), 113
30. M.P. Miles, T.W. Nelson, R. Steel, E. Olsen, M. Gallagher: Science and Technology of Welding and Joining, **14** (2009), 228
31. Y. Hovanski, M.L. Santella and G.J. Grant: Scripta Mater., **57** (2007), 873-876
32. S.H.C. Park, T. Kumagai, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki, Proc. ISOPE2005, ISOPE, Seoul, Korea, **4** (2005), 6-12
33. S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Scripta Mater., **49** (2003), 1175
34. S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Scripta Mater., **51** (2004), 101
35. S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Sci. Technol. Wed. Join., **10** (2005), 550
36. M. Posada, J. DeLoach, A.P. Reynolds and J.P. Halpin: Proc. 6th Intern. Conf. on Trends in Welding Research, ASM International, Materials Park, USA, (2003), 307-311
37. Y.S. Sato, N. Harayama, H. Kokawa, H. Inoue, Y. Tadokoro, S. Tsuge: Science and Technology of Welding and Joining, **14** (2009), 202



- 이원배 (李元培)
- 1973년생
- POSCO 기술연구원
- 마찰교반접합, STS 400계 조관용접
- e-mail : wonbaelee@posco.com