

철강 재료의 마찰 교반 점 용접

이창용 · 최돈현 · 연운모 · 서원찬 · 정승부

Friction Stir Spot Welding of Steel Alloy

Chang-Yong Lee, Don-Hyun Choi, Yun-Mo Yeon, Won-Chan Seo and Seung-Boo Jung

1. 서 론

금속재료의 조직적 연결에 사용되는 용접은 공정 시 발생하는 내부 조직 변화에 따라 두 가지로 구분될 수 있다. 용융 용접(Fusion Welding)과 고상 접합(solid state bonding)이다. 아크 용접(arc welding), 전기 저항 용접(electric resistance welding), 레이저 용접(laser welding) 등 대부분의 용접은 각각 다른 외부의 에너지 원(源)에 의해 재료를 용융시켜 접합시키는 용융 용접의 분야이다. 한편 접합면이 충분히 청정하고, 소성유동이 발생하기 쉬운 경우 접합면을 용융하지 않아도 압력을 가하는 것만으로 금속원자의 접근이 가능하게 된다. 이러한 경우 실행되는 접합법이 고상접합으로 앞서 언급했던 접합에 필요한 에너지를 주로 기계적 방식으로 얻는 접합이고, 압접(pressure welding), 마찰 용접(friction welding), 확산 접합(diffusion welding) 등이 이에 속한다.

고상접합의 가장 큰 특징은 접합부에서 재료의 용융이 발생하지 않는다는 점이다. 이 기본적인 특징으로 인해 용융 용접에 비해 많은 장점을 지니고, 가장 큰 장점은 주조 후 응고조직이 가지는 결함(cast defect)으로부터 자유롭기 때문에 기계적 특성이 매우 우수하다는 것이다^{1, 2)}.

비교적 최근 개발된 고상 접합법으로 마찰 교반 접합(Friction Stir Welding: FSW)과 마찰 교반 점 용접(Friction Stir Spot Welding: FSSW)이 있다. 마찰 교반 접합은 직선적으로 긴 판재의 맞대기 및 겹치기 접합에 매우 용이하며, 마찰 교반 점 용접은 형상의 제약을 상대적으로 덜 받는 겹치기 점용접에 매우 유리하다^{3, 6)}.

현재까지 보고된 마찰 교반 점 용접에 관한 연구결과는 주로 알루미늄 합금을 대상으로 하였다. 일부 마그네슘 합금과 철계 합금에 관한 내용이 보고되어 있지만 그 수가 상대적으로 매우 적다고 할 수 있다. 그 이유

는 자동차 경량화를 위해 알루미늄 합금의 차체 적용이 대두되는 상황에서 마찰 교반 점 용접이 현재 자동차 차체 조립 시 사용되는 전기 저항 점 용접을 대체할 접합법으로 가장 주목받기 때문이다. 하지만 알루미늄 합금의 미약한 강도로 인해 알루미늄 합금은 부분적인 사용으로 제한되게 되었고, 이것은 동시에 마찰 교반 점 용접의 철계 합금 적용에 대한 필요성이 되는 것이다.

마찰 교반 점 용접법을 이용하여 steel과 같은 강한 재료를 접합하기 위해서는 내구성이 갖추어진 툴⁷⁻⁹⁾, 툴과 피접합재의 마찰시 발생하는 열을 냉각시키는 방법 등 해결되어야 할 몇 가지 과제가 있지만 경제적 측면이나 접합부의 우수한 특성 등을 고려할 때 그 적용 및 발전 가능성이 매우 높다고 예측할 수 있다.

본 논문에서는 현재까지 보고된 연구 결과를 토대로 하여 다양한 철계 합금의 마찰 교반 점 용접 적용 가능성을 평가하였다.

2. 마찰 교반 점 용접의 원리 및 변수

마찰 교반 점 용접 기술은 회전하는 접합 툴이 겹치기 이음부의 상판 및 하판에 삽입되면서 상·하판 사이에 소성 유동 현상이 발생하고 동시에 계면이 활성화되어 접합이 이루어지는 방법이다 (Fig. 1 참조). 마찰 교반 점 용접은 2001년 마찰 교반 접합의 원리를 응용하여 최초로 개발되었다. 기존의 마찰 교반 접합과 마찬가지로 접합부에서 재료의 용융이 발생하지 않는 기본적인 특징으로 인해 많은 장점을 보유하고 있다¹⁰⁻¹³⁾.

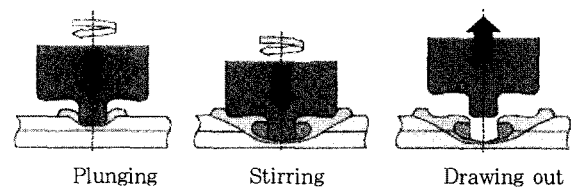


Fig. 1 Visual schematic of the three-step friction stir spot welding process

마찰 교반 점 용접의 원리는 두 재료 즉 상·하부 재료의 표면원자가 내부에서 각기 서로 끌어당기는 힘 및 거리보다 접합하고자 하는 두 재료의 표면원자가 더욱 가깝도록 외부에서 인위적으로 접근시키는 것이라고 할 수 있다. 이와 같은 반응에는 막대한 양의 에너지가 필요하고, 이러한 에너지를 통과 피접합재 즉, 상부재료와의 마찰열에서 얻게 되는 것이다. 따라서 틀의 회전 속도, 틀 삽입 후 유지시간, 틀의 직경, 압입 하중, 재료의 마찰계수 등에 의해 접합 시 발생하는 에너지를 계산할 수 있고, 이러한 에너지의 크기에 따라서 접합 강도도 예측이 가능하다. 하지만 이와 같은 이론을 구체적으로 현실화시키기에는 더욱 많은 연구가 필요할 것이다¹⁴⁾. 상기한 바와 같이 마찰 교반 점 용접에는 많은 변수가 존재하고 이를 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 먼저 접합하고자 하는 재료이다. 재료의 종류, 강도, 두께 등에 따라 적용되어야 하는 공정변수 및 틀 재료의 선택이 달라지고, 각각의 조건에서 접합 시 발생하는 에너지의 양이 달라지므로 가장 기본적인 변수라고 해도 과언이 아니다. 두 번째는 틀 변수이다. 틀의 재료, 틀의 형상, 냉각을 위한 cooler 장착 유무 등이 그 예이고, 각각의 조건에 따라 접합부의 신뢰성에서 큰 차이를 나타내므로 반드시 고려되어야 할 변수이다. 특히, 틀의 형상에 따라서는 접합 원리가 달라질 수도 있으므로, 즉 끝이 뾰족하고 긴 형태의 핀을 사용하느냐 아니면 편평한 형태의 핀을 사용하느냐에 따라 기계적 교반에 의한 소성변형에 의해, 혹은 마찰열에 의한 원자 확산에 의해 접합이 이루어 질 수도 있으므로 틀 변수 역시 매우 중요하다고 할 수 있다. 마지막으로 세 번째는 공정변수이다. 틀 삽입 깊이, 틀 회전 속도, 삽입 후 유지 시간, 틀 삽입 및 제거 속도, 틀 삽입각 등에 따라 접합의 가능, 불가능이 결정되므로 자세한 조정이 반드시 필요한 변수이다. 이외에도 동종재료의 접합 혹은 이종재료의 접합에 따라서 상·하부 재료의 위치가 바뀌게 되고¹⁵⁻¹⁶⁾, 특별한 경우 지지대 사용 유·무가 결정될 수도 있다. 이러한 모든 변수들을 종합적으로 고려할 때 최적의 마찰 교반 점 용접이 실행될 수 있고, 응용분야를 더욱 넓힐 수 있는 신뢰성 있는 데이터베이스 구축이 가능할 것이다.

3. 철계 합금의 마찰 교반 점 용접 결과

3.1 표면 형상

아래 Fig. 2는 텅스텐 카바이드(WC) 합금으로 제작된 틀을 사용하여 탄소 함량 0.03w%의 저탄소강판과 동일한 소재에 대해 아연이 도금된 도금강판을 마찰 교

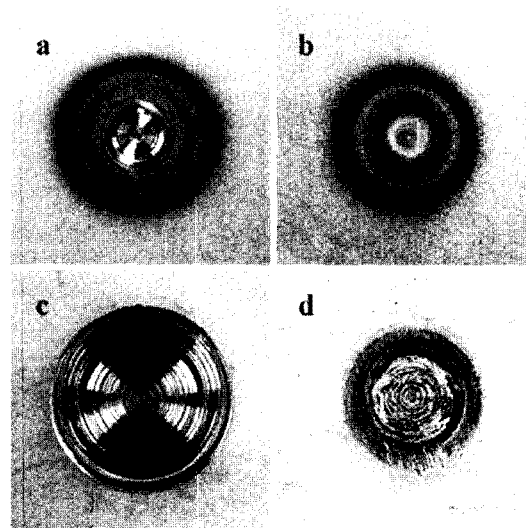


Fig. 2 Top and bottom surface after friction stir spot welding of low carbon steel (a, b) and galvanized low carbon steel (c, d)

반 점 용접한 후 외관을 보여주는 그림이다. Fig. 2-a, b에서 보이는 바와 같이 접합에 의해 위, 아래 표면에 산화층이 뚜렷하게 형성되는 것이 저탄소강의 마찰 교반 점 용접부에서 관찰되는 특징이라 할 수 있다. 이것은 일반적으로 재료에 가해지는 입열량이 증가하는 조건 즉, 틀 유지 시간이 길수록, 틀 삽입 깊이가 증가할수록, 틀 회전 속도가 증가할수록 더욱 뚜렷하고, 커지는 경향을 나타낸다. 하지만 아연도금 강판의 경우 표면에 산화층이 관찰되지 않았다. 이것으로 보아 재료 표면에 도금된 아연에 의해 표면 산화가 방지되는 것으로 판단된다.

3.2 접합부 미세조직

접합부의 미세조직은 틀의 형태에 따라 그 영역이 크게 변한다. 핀이 편평한 원기둥 형태일 때와 나사산이 존재하는 볼트(bolt)형 일 때 각각 접합부 내에서 조직의 구분이 달라지고, 이것은 접합 원리의 차이에서 기인하는 것으로 알려져 있다. 아래의 Fig. 3은 편평한 원형 핀을 사용하여 접합한 경우이고, 접합부 각 영역의 결정립 크기 및 형태를 보여준다¹⁷⁾. Fig. 3-b는 접합에 영향을 받지 않은 모재(base metal)로서 장방형의 페라이트 조직이 관찰되었다. Fig. 3-c는 접합부에서 약 10mm 이내의 주변부에서 관찰된 열영향부 조직을 나타내었다. 모재에 비해 세로축의 길이가 다소 증가한 형태의 결정립이 관찰되었고, 결정립계가 더욱 뚜렷해진 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 3-d는 틀 회전 시 직접적으로 기계적 영향을 받은 영역과 열영향부의

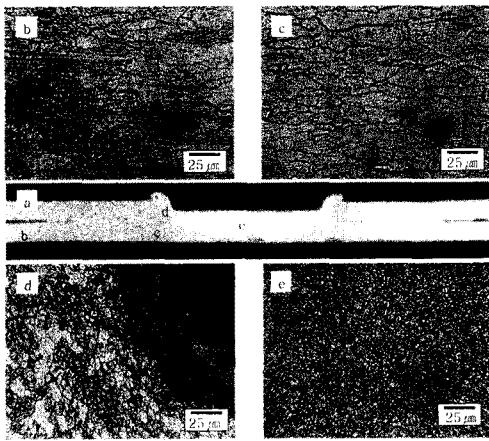


Fig. 3 Microstructures of friction stir spot welded low carbon steel a) transverse cross section, b) base metal, c) heat affected zone, d) transition zone, e) thermally and mechanically affected zone

경계로서 틀의 회전에 의해 연신된 결정립이 관찰되었고 결정립의 크기도 매우 불규칙한 것을 알 수 있다. Fig. 3-e는 접합 시 회전하는 틀의 편과 접촉하는 부분으로서 결정립이 모재에 비해 매우 미세한 것을 관찰할 수 있었고, 그 크기는 1 μ m 이하인 것으로 예측되었다. 이것으로 보아 알루미늄과 유사하게 철계 합금의 마찰 교반 점 용접시에도 교반 영역에서 동적 재결정이 발생하는 것으로 판단된다. 저탄소강의 경우 전반적으로 접합부내에서 상변태의 흔적은 발견되지 않았다. 하지만 단면을 정밀하게 관찰한 결과, 틀과 맞닿는 상판의 극 표면에서 약간의 이상 조직이 관찰되었고 이것은 탄소함량 변화 및 접합 변수에 따라 저탄소강에서도 상변태가 발생할 수 있음을 보여주는 징후로 판단된다.

Fig. 4는 탄소 함량이 0.16wt% 인 마르텐사이트계 고장력강의 마찰 교반 점 용접 후 접합부의 미세조직이

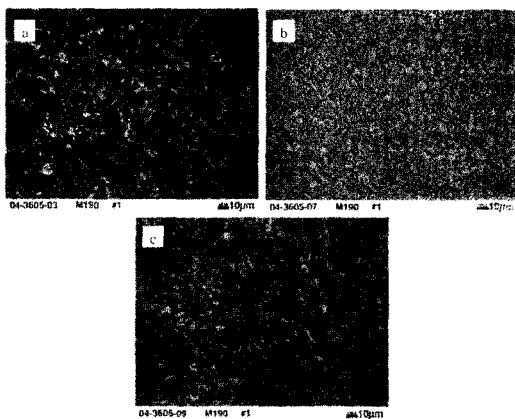


Fig. 4 Microstructures of friction stir spot welded AHSS(M190) a) Base metal, b) transition BM to intercritical region, c) TMAZ

다¹⁸⁾. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모재와 접합부는 동일한 마르텐사이트 조직을 나타내고 있지만, Fig. 4-b)의 열영향부에서는 페라이트와 마르텐사이트가 혼재하였다. 이것은 접합 시 열적 거동에 의한 결과로서, 접합부에서는 A₃ 온도 이상까지 온도가 상승하여 오스테나이트화 되었다가 접합 후 냉각 과정에서 다시 완전하게 마르텐사이트가 형성되었지만, 열영향부에서는 페라이트와 오스테나이트가 공존하는 A₁ 과 A₃ 사이의 온도까지만 상승하여 냉각 과정에서 페라이트와 마르텐사이트가 혼재하는 상태로 형성된 결과이다.

이와 같이 접합부의 미세조직은 피접합재의 탄소함량과 접합 변수에 의해 결정되는 최고 접합 온도에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있다.

3.3 접합부 경도 분포

Fig. 5는 모재 강도 약 1300 MPa 과 600MPa 급의 M190 강판과 DP600 강판의 마찰 교반 점 용접부에 대한 비커스 경도 분포를 보여준다¹⁸⁾. M190의 경우 모재는 약 450Hv 경도값을 가지지만 접합부 주변에서 크게 감소하는 결과를 보여준다. 이 영역은 엄밀하게 솔더 하부의 열영향부라고 할 수 있고, 이것은 마

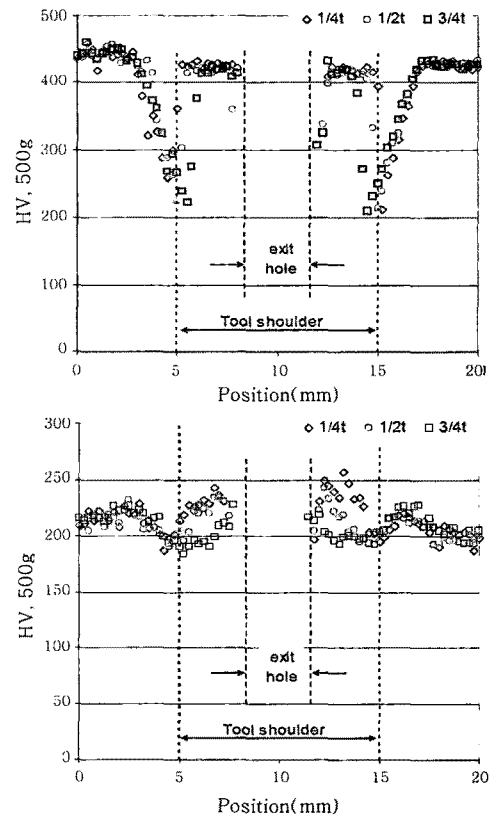


Fig. 5 Micro-hardness distribution across the weld in top sheet. Top: M190; bottom: DP600

르텐사이트 조직에서 페라이트와 마르텐사이트 혼재 조직으로 변화된 미세조직과 깊은 관련이 있다. 접합부 중심에 가까워질수록 경도는 회복되어 결국 모재 값까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 접합부 미세조직이 완전히 마르텐사이트화 된 것이 그 원인이라 할 수 있다. 한편 DP600의 경우 모재 경도는 약 250Hv 정도이지만 접합부 및 주변에서 감소하는 영역이 존재하지 않는다. 이것은 열영향부의 조직변화가 크지 않았기 때문이고, 미약하나마 상승한 접합부의 경도는 모재의 혼합상(페라이트 기지에 마르텐사이트 혹은 베이나이트 강화상이 분산)중 강화상의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

알루미늄 합금의 경우 가공 경화형 합금 혹은 석출 경화형 합금에 경우에 따라서 접합부의 경도는 달라질 수 있다. 그 원인은 조금 다르지만 철계합금의 경우에서도 상기한 바와 같이 모재의 조건과 접합 변수의 영향에 의해 접합부의 경도 분포도 크게 달라지는 것을 알 수 있다.

3.4 접합부 기계적 특성 평가

저 탄소강의 마찰 교반 접 접합 시 접합강도를 톨 삽입 깊이에 따라서 보여주는 결과를 Fig. 4에 나타내었다¹⁷⁾. 접지기 접합의 특성상 파단시의 최고 하중값으로 결과를 표시하였다. 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 삽입 깊이 0.24mm 조건에서 가장 높은 값이 측정되었다. 삽입 깊이가 얇을 경우 상판과 하판간의 원자 확산이 충분히 일어나기 어렵고, 일정 깊이 이상의 톨 삽입에서는 오히려 상판 두께의 감소가 발생하므로 인장전단 하중에 해로운 영향을 미치는 것으로 판단된다.

마찰 교반 접 용접 시 핀의 직경과 핀 삽입 깊이를 증가시킬 경우 실제 접합 면적은 비례하여 변하게 된다. 아연 도금된 DP600 강을 이용하여 마찰 교반 접

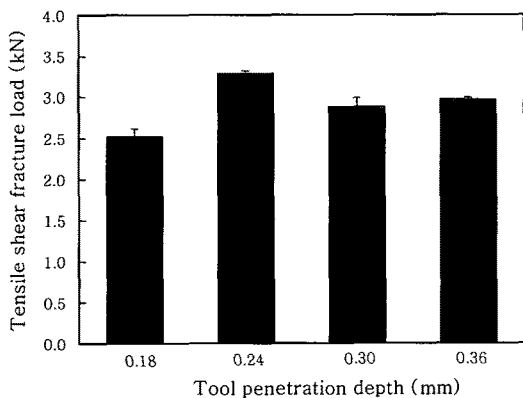


Fig. 6 Tensile shear fracture load of low carbon steel with tool penetration depth

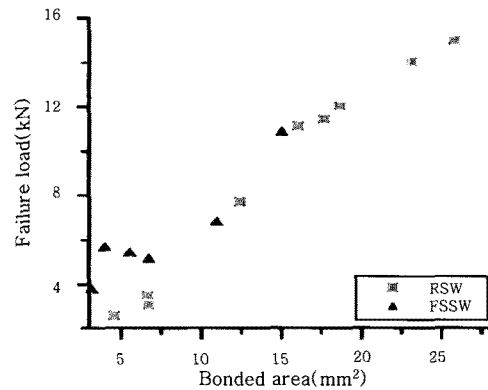


Fig. 7 Tensile shear fracture load of galvanized AHSS with bonded area

용접을 실시하고 실제 접합 면적에 따른 인장 전단 시험 결과를 Fig. 7에 나타냈다¹⁹⁾. 그림에서 보이는 바와 같이 제한된 실험 조건 내에서 실제 접합 면적이 증가할수록 접합 강도는 증가하는 경향을 나타냈고, 이것은 동일한 접합 면적일 경우 전기 저항 점 용접과 거의 동등한 강도를 보여주었다. 이 한편의 연구 결과로는 단정하기 어려우나 마찰 교반 접 용접과 전기 저항 점 용접은 도금 강판의 접합 강도 측면에서는 우열을 가리기 힘든 것으로 보고되었다.

파단의 원인 및 경로는 Fig. 8에 보이는 바와 같이 접합 후 단면에서 관찰되는 상판과 하판의 경계면에 의한 것으로 확인되었다¹⁹⁾. 이것은 선형 마찰 교반 접합부에서 관찰되는 키싱 본드(kissing-bond)와 유사한 현상으로 상판과 하판의 교반이 완벽하게 이루어진 지점까지 이어진 선결합의 일종이다. Fig. 9에 보이는 바와 같이 접합부 내에서도 이 영역은 주변 영역과 다른 상변태 결과가 관찰되고 경도 분포 또한 다르게 측정된

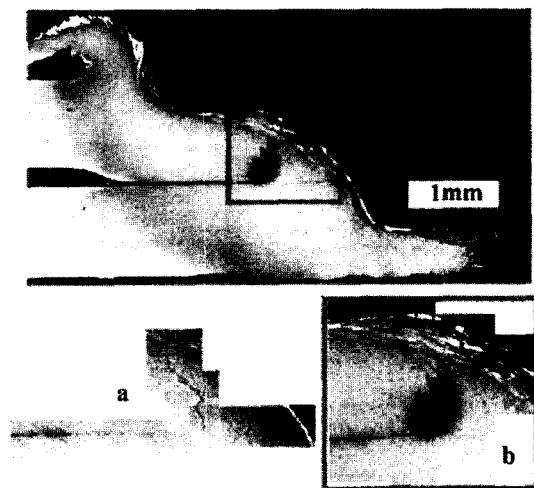


Fig. 8 Partial tensile of FSSW cross-section: a) as welded, b) partial fracture

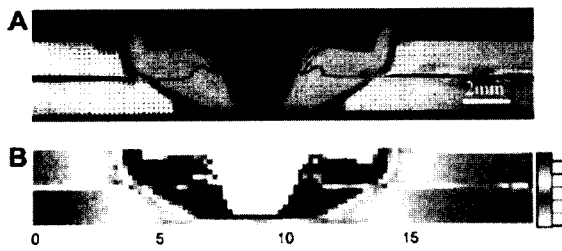


Fig. 9 Transverse photo micrograph of a friction stir spot weld in hot-stamped boron steel; (B) A microhardness map of the same friction stir spot weld.

다는 결과가 보고된 바 있다²⁰⁾. 따라서 틀의 형상과 접합 조건의 다양한 조정에 의해 실질 접합 영역을 틀 중심에서 모재 방향으로 확장하는 것이 접합의 효율 증대 및 접합강도의 증가를 위해서 반드시 필요하다고 할 수 있다.

접합부의 기계적 특성 평가는 인장 전단 시험 외에 피로 시험, 십자 인장 시험(Cross-tension test)으로 이루어지기도 한다. 아래의 Fig. 10은 십자 인장 시험을 위한 시편과 그 결과이다¹⁸⁾. 이것은 마찰 교반 점접합의 접합 축방향의 강도를 측정하는 값으로서 동일한 조건에서 인장전단시험과 비교할 경우 약 50%의 하중값을 보여준다.

4. 결 론

철계 합금의 마찰 교반 점 용접 결과에 대해 상기와 같이 조사·정리한 결과, 저탄소강, 도금강, 스테인레스 스틸, DP강 및 마르텐사이트 계 AHSS 등에 이르기 까지 거의 모든 철계 합금에 대해 접합 변수와 미세조직의 관계, 미세조직과 경도 등 기계적 특성과의 관계 등이 규명됨에 따라 마찰 교반 점 용접이 매우 실용적인 수준까지 연구된 것을 확인할 수 있었다. 다만 생산 현장 적용 단계에서 보다 필요한 자료로 예상되는 틀의

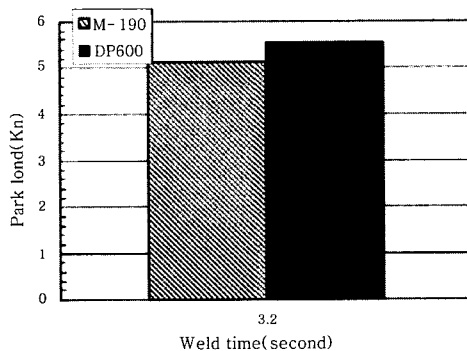


Fig. 10 Specimen and peak loads from cross-tension test of FSSWed AHSS

내구성에 대한 실질적인 연구 자료와 부식 및 피로 저항 특성 등 다양한 접합부의 신뢰성 평가에 관한 연구 결과가 부족한 상황으로 파악되었다. 현재 철계 합금이 실생활에서 차지하는 비중을 고려할 때 마찰 교반 점 용접의 적용 확대를 위하여 보다 다양하면서도 세밀한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각되고, 특히 기술 국산화를 위한 국내 연구진들의 노력이 더욱 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회편: 용접·접합편람, 대한용접학회(1998) 256 (in Korean)
2. 溶接學會編: 溶接·接合便覽, 日本溶接學會(1990) 1016 (in Japanese)
3. R.Sakano, K.Murakami, K.Yamashita, T.Hyoe, M.Fujimoto, M.Inuzuka, H.Nagao, H.Kashiki: Development of Spot FSW Robot System for Automotive Body Members, Friction Stir Welding, Third International Symposium, Kobe(2001,9), Japan
4. S.Koga: Development of Friction Spot Joining, Journal of Light Metal Welding & Construction, **42-1**(2004) 523
5. R.Sakano, R. Kato: Development of SFW, Welding Technology, **52-2**(2004) 99 (in Japanese)
6. R.S.Mishra and Z.Y.Ma: Friction stir welding and processing, Materials science and engineering R, **vol. 50**(2005) 1
7. R.Uegi, H.Fujii, L.Cui, A.Nishioka and K.Nogi: Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process, Materials science engineering A, **vol. 423**(2006) 324
8. M.M.Attallah and H.G.Salem: Friction stir welding parameters: a tool for controlling abnormal grain growth during subsequent heat treatment, Materials science engineering A, **vol.391**(2005) 51
9. H.Fujii, L.Cui, M.Maeda and K.Nogi: Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminium alloy, Materials science engineering A, **vol.419**(2006) 25
10. T.Y.Pan, A.Joaquin, D.E.Wilkosz, L.Rearherford, J.M.Nicholson: Spot Friction Welding for Sheet Aluminium Joining, Proceedings of 5th International Friction Stir Welding Symposium, Metz(2004,9), France
11. S.Lathabai, M.J.Painter, G.M.D.Cantin and V.K.Tyagi: Friction spot joining of extruded Al-Mg-Si alloy, Scripta Materialia, **vol. 55**(2006) 899
12. K.Aota and K.Ikeuti: Spot friction stir welding of low carbon steel, Proceedings of the 2005 Autumn Annual Meeting of JWS, **77**(2005), 252 (in Japanese)
13. J.F.Hinrichs, C.B.Smith, B.F.Orsini, R.J.DeGeorge, B.J.Smale, P.C.Ruehl: Friction Stir Welding for the 21st Century Automotive Industry, Proceedings of

5th International Friction Stir Welding Symposium, Metz(2004,9), France

14. Y.S.Kim, Y.G.Kwon, R.W.Chang: solid state joining of steel and iron, journal of the Korean welding society, **vol.10**(1992) 1

15. C.Y.Lee, J.H.Lee, W.B.Lee, Y.M.Yeon, H.S.Park, W.S.Chang and S.B.Jung: Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and AA5J32. Proceedings of the 2006 Autumn Annual Meeting of KWS, **47**(2006) 115 (in Korean)

16. C.Y.Lee, J.H.Lee, D.H.Choi, W.B.Lee, Y.M.Yeon, W.S.Chang and S.B.Jung: A study on the dissimilar friction spot welding property of pure Ti and low carbon steel. Proceedings of the 2006 Spring Annual Meeting of KWS, **46**(2006) 283 (in Korean)

17. C.Y.Lee, J.H.Lee, D.H.Choi, W.B.Lee, Y.M.Yeon, H.S.Park and S.B.Jung: A study on the friction spot welding property of low carbon steel. Proceedings of the 2006 Spring Annual Meeting of KWS, **46**(2006) 143 (in Korean)

18. Z. Feng, M. L. Santella, S. A. David, R.J. Steel, S. M. Packer, T Pan, M. Kuo and R. S. Bhatnagar: Friction Stir Spot Welding of Advanced High-Strength Steels - A Feasibility Study, Proceedings of 6th International Friction Stir Welding Symposium (2005)

19. M. I. Khan, M. L. Kunt, P. Su, A. Gerlich, T. North and Y. Zhou: Resistance and friction stir spot welding of DP600- a comparative study, Science and Technology of Welding and Joining, **Vol. 12**(2007) 175

20. Y. Hovanski, M.L. Santella and G.J. Grant: Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel, Scripta Materialia **57**(2007) 873



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



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



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



- 서원찬(徐源贊)
- 1963년생
- 부경대학교 신소재공학부
- 마찰교반접합, 용접자동화
- e-mail : seowc@pknu.ac.kr



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