

철도차량 설계를 위한 A16005 알루미늄 판재의 마찰교반용접(FSW)과 MIG 용접부의 피로 특성 비교 연구

최원두*, 고준빈+, 구기영**
(논문접수일 2010. 3. 5, 심사완료일 2010. 9. 15)

Comparative Study on the Fatigue Properties of FSW and MIG Joints of Al6005 Sheets to Design Railway Vehicles

Won Doo Choi*, Jun Bin Ko+, Gi Yong Gu**

Abstract

Friction stir welding results in low distortion and high joint strength compared with other welding procedures, and is able to join all aluminium alloys that are not considered as virtually weldable with classical liquid state techniques. The comparative study on high cycle fatigue properties between Al6005-T6 friction stir welds and MIG weld joints have been performed and fracture mechanisms for the fatigue specimens were investigated. Although mechanical properties are lower than the corresponding base material, FSW joints of Al6005-T6 become higher at tensile and fatigue strength in comparison with the traditional fusion weld(MIG). The fracture surfaces of FSW and MIG fatigue specimens clearly show different aspects of the fracture morphology. MIG weldments were characterized by voids and cleavage(brittle fracture) but FSW specimens showed the presence of ductile fracture surface.

Key Words : Friction stir welding(마찰교반용접), Aluminum(알루미늄), Fatigue test(피로시험), MIG(불활성가스 금속 아크 용접)

1. 서론

최근 에너지 절감과 환경보호에 대하여 전 세계적으로 높은 관심과 요구에 따라 자동차, 선박, 항공기, 철도차량 등과

같은 수송기기의 경량화를 위한 기술 개발이 매우 활발하게 진행되고 있고, 이를 위하여 기존에 사용되던 금속 소재를 알루미늄, 마그네슘 등과 같은 경량합금 소재로 빠르게 대체되고 있다.

* 한밭대학교 공동실험실습관 (wondoo@hanbat.ac.kr)

주소: 305-719 대전광역시 유성구 덕명동 산16-1

+ 한밭대학교 기계설계공학과

++ 한국폴리텍 대학 IV 홍성대학 산업설비자동화

특히 알루미늄 합금은 중량에 비하여 강도가 매우 높은 장점으로 인하여 차체의 구조물로 유용하게 사용되고, 저 용점 소재이기 때문에 개조나 폐차시의 재활용이 우수하다.⁽¹⁻²⁾ 현재 알루미늄의 차체는 주로 압출에 의해 제작된 판넬(panel)과 이들을 용융용접으로 접합하여 만들어지고 있다. 하지만 알루미늄 합금의 용접은 용융용접이 갖는 에너지 효율, 환경오염 등의 문제와 특히 접합부의 건전성 면에서 문제점을 안고 있다.

이러한 문제를 개선하기 위한 접합방법인 마찰교반용접(Friction Stir Welding ; FSW)은 영국의 용접기술연구소(TWI)에서 1991년에 특허로 출원된 고상접합기술로서, 최근 유럽과 미국, 일본을 중심으로 항공과 조선을 포함한 수송기계 산업분야에서 기술 적용이 급격히 증가하고 있다.⁽³⁻⁵⁾ 일본에서는 1990년대 후반부터 마찰교반용접에 대한 연구가 본격적으로 진행되었고, 이와 함께 철도 차량 제작과 관련된 마찰교반용접의 특허 출원도 급격한 증가를 보이고 있다.⁽⁶⁾

현재 국내에서 제작되고 있는 철도차량 또는 경전철의 객차 차체의 대부분은 Al 6005-T6 합금재를 이중외판(double skin) 형태로 압출하여 사용하고 있다. 이러한 압출재에 대한 품질 검사는 압출재의 모재와 압출이음매, MIG 용접부로 나누어 인장시험, 경도시험, 피로시험 등의 물성값과 거시(macro)와 미세(micro) 조직시험 등으로 균열, 조대 비금속 개재물, 기공, 결정립 과대성장 등을 확인한다. 특히 MIG 용접에 의한 이음부의 물성은 다른 부위에 비하여 매우 취약하고, 용접시 치수의 변화와 제품의 변형은 제작 공정의 효율을 떨어뜨리는 중요한 요인으로 지적되고 있다.⁽⁷⁾ 이러한 용융용접의 비효율성을 개선하기 위하여 추후 철도차량의 객차에 적용하게 될 Al 6005-T6의 마찰교반용접부의 건전성에 대한 평가가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 철도차량의 차체에 사용되는 Al6005-T6 합금의 압출재와 MIG 용접부, 마찰교반용접부의 기초적인 물성을 비교하고, 접합부의 조직관찰을 통하여 강도와 연관성을 분석하였다. 또한 철도차량 객차의 설계에 필요한 고주기 피로시험을 통하여 피로한도 및 파손 분석을 비교하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 두께 3mm로 압출된 Al 6005-T6 합금재로서, 마찰교반용접을 수행하기 위하여 압출방향으

로 길이 150mm, 너비 80mm로 절단하여 사용하였다. 또한 MIG 용접시편은 철도차량의 차체를 제작하기 위한 패널(panel)에서 채취하였다. 재료의 화학적 성분과 기계적 특성은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험방법

2.2.1 용접조건

마찰교반용접에서 접합부의 물성에 영향을 주는 접합인자는 공구의 형상, 이송 속도, 회전 속도, 공구의 기울기 등이 있다. 본 연구에서 사용된 공구의 형상은 압출재의 두께 3mm를 고려하여 2.8mm 길이와 4.5~5.5mm 지름인 나사형 핀과 지름이 17mm인 숄더(shoulder)로 이루어 졌다. 용접조건은 공구의 전진각(lead angle)은 2.5°, 이송 속도를 600mm/min으로 고정하고, 공구의 회전 속도를 1600, 1800, 2380rpm으로 변화를 주어 적용하였다. 마찰교반용접을 위하여 전용지그를 제작하여 이를 범용 밀링머신에 장착하였다. 전용 지그는 마찰교반용접시 핀의 삽입과 회전에 의한 판재의 움직임을 방지할 수 있도록 Fig. 1과 같이 수평 및 수직 방향으로 고정할 수 있도록 설계되었다.

불활성가스 아크 용접(MIG)은 용접 전류 180~190A, 전압 23.5~24.0V, 와이어 이송속도 10~12m/min, 용접속도 300~400mm/min의 조건으로 용접하였다.

Table 1 chemical composition of materials(Wt. %)

Fe	Si	Mn	Cu	Cr	Ti	Zn	Mg
0.26	0.65	0.46	0.07	0.06	0.02	0.05	0.55

Table 2 Mechanical properties of materials

Tensile stress (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
273	203	11	98

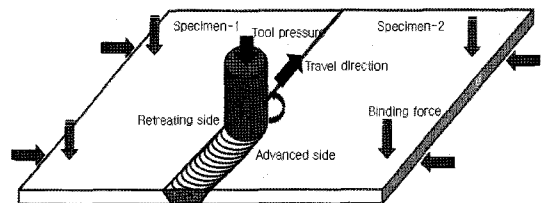


Fig. 1 Schematic of friction stir welding process

2.2.2 분석방법

모재 및 마찰교반용접과 MIG 용접으로 제작된 시편의 물성을 측정하기 위하여 인장시험, 경도시험, 피로시험을 진행하였다. 용접부의 인장 및 피로 시험편은 Fig. 2와 같이 용접 방향에 수직으로 채취하였고, MIG 용접부는 비드를 제거하여 모재의 두께와 일치하도록 하였다. 피로시험의 경우 표면 거칠기의 영향을 최소화하기 위하여 기계가공 후 사포와 6 μ m 알루미나를 이용하여 연마하였다. 인장시험은 KS B 0802에 따라 2mm/min의 변위제어를 통하여 수행하였고, 만능재료시험기는 INSTRON 사의 4484 모델을 이용하였다. 용접부와 열영향부 및 모재의 경도 변화를 관찰하기 위하여 경도측정 조건은 압입하중과 측정간격을 각각 500g, 1mm으로 하였고, 단면의 중앙에서 직선으로 측정하였다. 사용된 경도시험기는 Matsusawa사 MMT-7 모델이다. 피로시험은 MTS사의 810 모델의 유압식 피로시험기를 이용하여 주파수 20Hz, 최대응력에 대한 최소응력 비로 정의되는 응력비(stress ratio) R=0.1인 정현파로 하중을 제어하였다. 이때 반복횟수가 1 \times 10⁷ 회 이상이면 무한 수명으로 간주하였다.

알루미늄 압출재 및 용접부의 거시 및 미세조직 관찰을 위해 연마된 시편을 Keller 용액을 이용하여 에칭한 후 광학현미경(Olympus사)을 이용하여 관찰하였다. 피로시험 후의 파면을 JEOL사 JSM-6300 모델의 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 분석하였다.

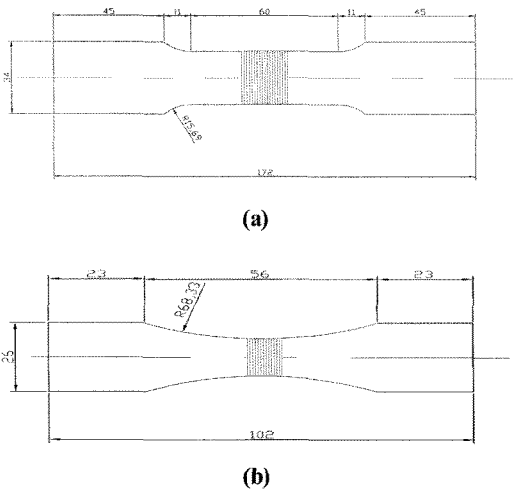


Fig. 2 Schematic of tensile (a) and fatigue (b) test specimens.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조직분석

Fig. 3(a)는 철도차량용 Al6005-T6 압출재 패널의 조직 사진이다. 압출 공정시 온도에 의해 표면의 결정립(grain)의 크기가 조대화되어 있고, 미세한 석출물들이 고루 분포되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3의 (b), (c)는 MIG 용접부와 마찰교반용접부의 조직을 관찰한 결과이다. 용착부는 급냉에 의해 치밀한 조직을 보이고 있고, 열영향부(heat affected zone, HAZ)와 용착부의 결정립 형태가 극명하게 차이나는 것을 관찰할 수 있다. 모재와 비교해서 결정립 성장을 보이고 있고, 석출물이 기지(matrix)에 용해되어 상당부분 사라졌음을 알 수 있다. 이와 같이 용접 입열에 의해 조대화된 결정립으로 인하여 인장시험 시 열영향부에서 대부분 파단이 일어난다.

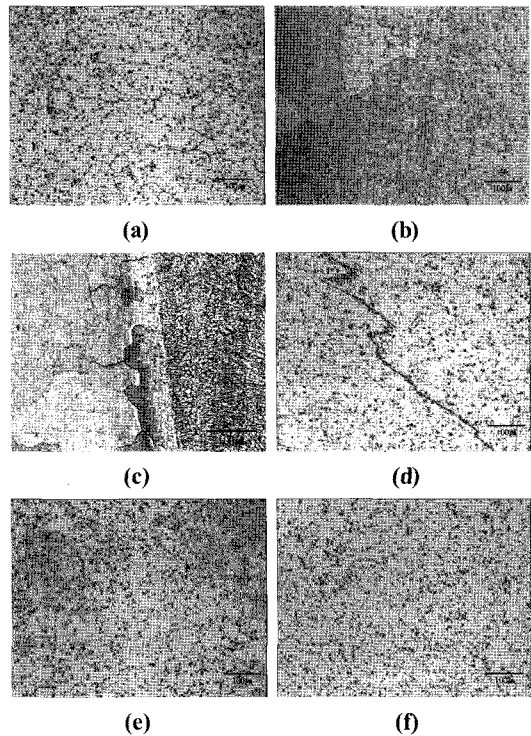


Fig. 3 Microstructures of tested specimens. (a) base metal, (b) HAZ and (c) boundary between HAZ and weldment of MIG weld, (d) stir zone, (e) thermo-mechanical affected zone(TMAZ) and (f) HAZ of FSW

Fig. 3의 (d), (e), (f)는 마찰교반용접부의 용접방향에 수직인 단면의 미세조직을 보여주고 있다. Fig. 3(d)는 용접부 중앙의 교반부로서 높은 열과 변형으로 회복과 재결정이 일어나는 동적재결정(dynamically recrystallized zone, DXZ) 현상이 일어나 조직이 비교적 균일하게 분포하고 있다. 공구의 핀에 의한 재료의 소성 유동으로 인하여 석출물의 불규칙적인 군집(cluster)이 형성되어 있음을 관찰할 수 있었다. Fig. 3의 (e)와 (f)는 각각 열영향부와 변형과 열에 의해 기존의 결정조직이 변화되는 열가공영향부(thermo-mechanical affected zone, TMAZ)로서 석출물이 불규칙하게 분포되어 있고, 심한 소성변형에 의한 흔적이 남아있다.

석출물의 조대화와 군집되어 있는 양상은 열처리형 알루미늄 합금에서 주로 발생을 하며, 이 부위에서 파단이 일어나고, 연신량을 감소시키는 요인이 된다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 이는 본 연구에서 인장 및 피로 시험의 파단 위치와 최소 경도값을 보이는 부위와도 잘 일치하고 있다.

3.2 인장 및 경도 시험

압출재의 길이방향으로 용접속도 600mm/min에서 공구의 회전속도를 1600, 1800, 2380rpm으로 변화를 주어 마찰교반용접을 진행한 후 용접부의 수직방향으로 채취한 시험편의 인장시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 시험결과에서 알 수 있듯이 마찰교반용접부의 강도와 연성은 1600~2380 rpm의 회전속도에서 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 또한 모재의 강도와 비교하면 인장강도는 약 85% 이상, 내력(0.2% offset)은 약 75%이다. 반면 MIG 용접부와 모재의 강도 비율은 인장강도가 약 79%, 내력이 약 64% 정도이고, 특히 마찰교반용접부의 연신율은 보통 7% 내외로 측정되었고, MIG 용접부의 5% 내외의 결과에 비해 높게 나타났다. 박영빈은 본 실험에 사용된 재료와 유사한 강도, 즉 압출방향에 수직인 횡방향 시험편의 인장강도가 263MPa인 Al6005 시험편을 공구 회전 속도 1200rpm, 이송 속도 30mm/min 조건에서 용접 후 211MPa의 인장강도를 얻은 바 있다.⁽⁷⁾ 본 실험의 용접조건은 이와 비교할 때 공구회전수 및 이송속도가 매우 빠르지만 인장강도는 더 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 공구의 회전속도를 빠르게 하여 마찰열을 높이는 대신 이송속도를 빠르게 하여 입열량을 조절했기 때문이다. 시효경화형 알루미늄 합금의 마찰교반용접에서 용접부의 강도는 비열처리 합금보다 공구의 회전속도와 이송속도에 더 많은 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.⁽⁸⁾ 이와 같이 용접부의 건전성을 유지하면서 생산성을 높일 수 있는 최적의 용접조건을 찾는 것 또한 마찰교반용접에서 중요한 사안이라 생

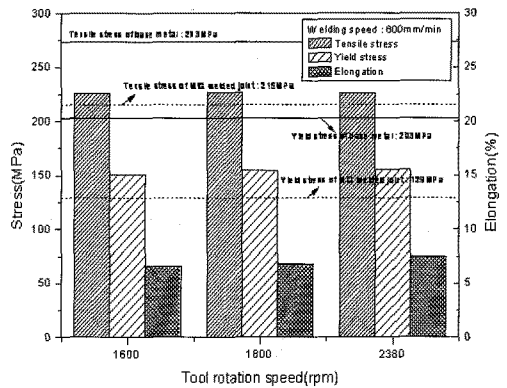


Fig. 4 The changes in mechanical properties of Al6005-T6 FSW joint for tool rotation speed

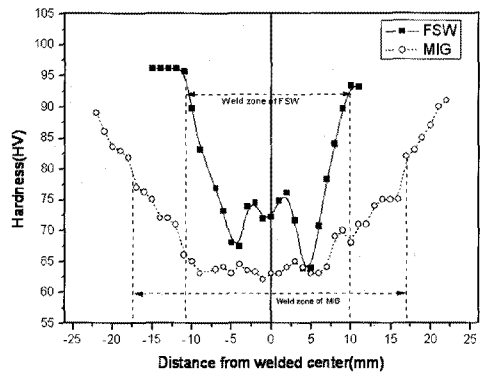


Fig. 5 Comparison of vickers hardness for FSW and MIG welded zone.

각된다.

Fig. 5는 마찰교반용접부와 MIG 용접부의 마이크로경도 시험 결과이다. 마찰교반용접부에서는 SZ(stir zone)의 경도값이 HAZ부 보다 높고, 특히 낮은 경도가 나타나는 면적이 매우 좁다. MIG 용접부는 용착부에서 가장 낮은 경도값을 보이고, 용접부의 평균 경도값이 마찰교반용접부에 비해 낮게 나타남을 알 수 있다.

3.3 피로시험 및 파면분석

Fig. 6은 모재, 마찰교반용접부, MIG 용접부의 고주기 피로시험에서 얻은 응력-수명 곡선이다. 각 시험편은 응력과 수명의 로그-로그 스케일에서 선형적으로 잘 표현되고 있다. 1×10^7 수명에서의 강도가 피로 한계라 정의할 때 모재, 마찰

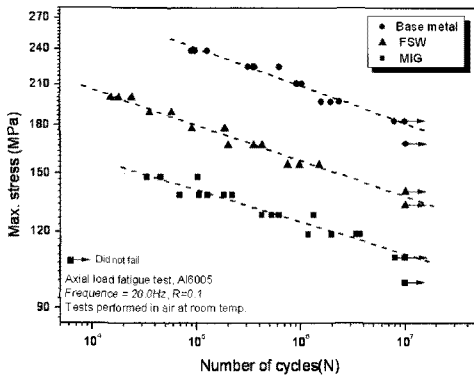


Fig. 6 S-N curves of base metal, FSW weld and MIG weld for Al6005

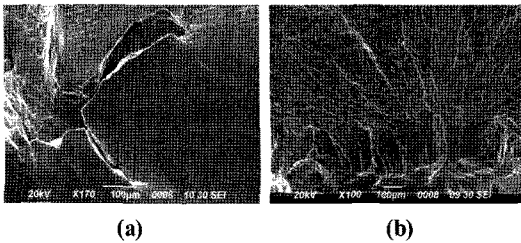


Fig. 7 Fractograph of base metal fatigue specimens : (a) outer surface crack initiation, (b) crack propagation

교반용접부, MIG 용접부의 피로 한계는 각각 180MPa, 145MPa, 110MPa 이다. 마찰교반용접부는 모재의 피로 한계의 80%에 육박하며, MIG 용접부의 60%에 비해 내피로 특성이 뛰어난을 알 수 있다. 또한 MIG 용접의 피로시험 결과는 다른 시편에 비해 수명의 산포가 크게 나타났다.

Fig. 7~Fig. 9는 피로 시험 후의 파면 및 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 일반적으로 열처리형 알루미늄의 전형적인 파괴는 석출물의 균열생성, 석출물과 기지(matrix)의 계면 분리에 의한 기공의 생성, 기공의 합체 및 성장으로 진행된다.⁽¹¹⁻¹⁴⁾ 모재의 피로 파괴는 Fig. 7(a), (b)와 같이 국소적인 소성변형으로 인해 균열이 발생하여 내부로 성장하는 것으로 추정된다. 2차 균열전파는 고루 분포되어 있는 2차상의 석출물을 중심으로 전형적인 연성파면의 덩플(dimple)이 관찰된다.

MIG 용접부는 벽계파괴에 의해 생성된 파면이 주를 이루고, Fig. 8(a), (b), (c)와 같이 벽계면을 따라 피로 줄무늬

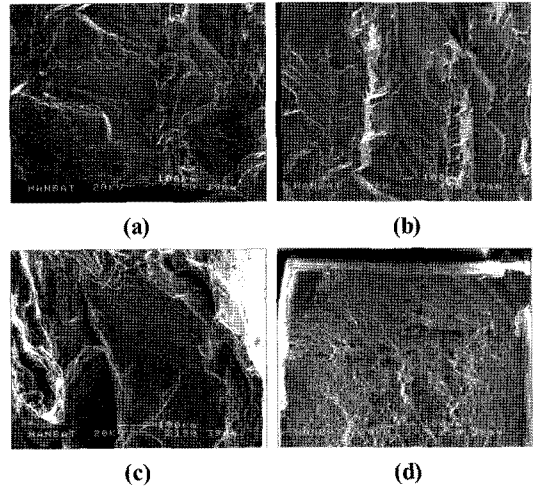


Fig. 8 Fractograph of MIG welded fatigue specimens : (a) crack initiation, (b) river pattern of brittle fracture (c) striation, (d) voids in ductile fracture

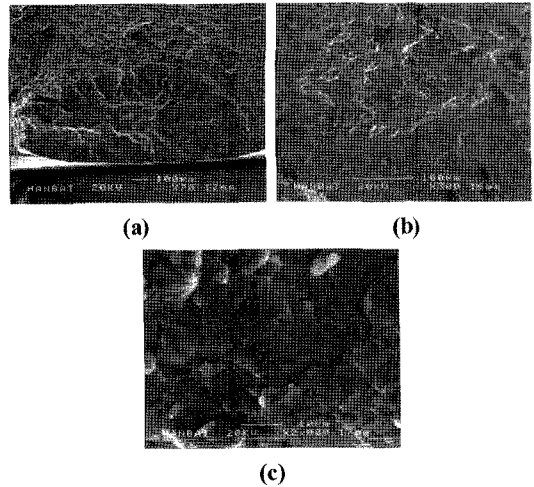


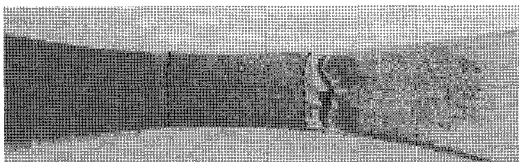
Fig. 9 Fractograph of FS welded fatigue specimens : (a) crack initiation, (b) crack propagation, (c) striation of ductile fracture

(striation)를 형성하며 균열이 전파하는 것을 관찰할 수 있다. 각 벽계면으로 성장한 균열이 연결되며 형성된 리버 패턴(river pattern)의 전형적인 취성파면을 형성하고 있다. Fig. 8(d)는 균열 전파 후 최종 파단면을 보여준다. 연성파면 내에는 MIG 용접에 의해 생성된 미세 기공이 다수 관찰되었다.

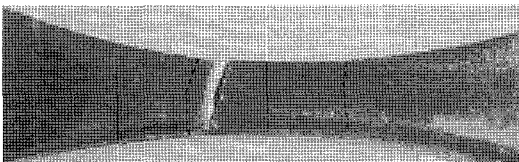
마찰교반용접부에서는 Fig. 9(a), (b)와 같이 취성 파면이 일부 관찰되었으나, MIG 용접부와 같이 넓은 면적에 걸쳐 나타나지 않으며, 초기 균열은 벽계파면과 연성파면이 혼재되어 전파된 후 2차 균열 전파는 Fig. 9(c)와 같이 입내(intergranular) 균열 전파의 양상을 보이고 있다.

Fig. 10은 용접 시편의 피로 시험 후 파괴 위치를 나타낸 사진이다. MIG 용접부는 Fig. 9(a)와 같이 정상적인 수명을 보일 때 주로 HAZ 위치에서 파단되고, Fig. 9(b)와 같이 용착부의 결합에 의한 강성의 저하로 짧은 수명을 보이는 경우로 구분된다. MIG 용접부의 피로 균열이 HAZ 부에서 주로 발생하는 것은 용접입열에 의해 입계의 조대화로 용착부나 모재에 비해 강성이 낮아져 소성 변형이 집중되기 때문이다. 반면 마찰교반용접은 Fig. 9(c)와 같이 HAZ 또는 TMAZ에서 파괴가 일어난다. 마찰교반용접에서 주로 발생할 수 있는 핀의 침투 부족(lack of penetration)에 의한 결함은 파괴의 중요한 원인으로 작용한다고 알려져 있다.⁽¹⁵⁾

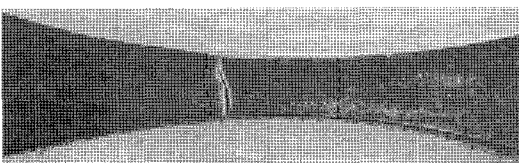
본 논문의 피로 시험에 사용된 마찰교반용접 시편의 파괴 양상은 루트(root)부의 결합에서 시작되는 것이 아니라 HAZ 또는 TMAZ의 낮은 강성에 의한 응력집중으로 나타났기 때문에 용접조건 및 공구의 형상이 적합한 것으로 생각된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Fracture appearance of welded fatigue specimens.
(a), (b) MIG welded, (c) FS welded

4. 결론

본 연구에서는 철도차량용 패널에 사용되는 알루미늄 합금재(Al6005-T6)에 대하여 MIG 용접부와 마찰교반용접부의 기초적인 기계적 성질을 평가하고, 고주기 피로 시험을 통하여 피로 한도 및 파괴양상을 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) Al6005 합금재의 마찰교반용접부는 용접속도가 600mm/min일 때, 공구의 회전속도 1600~2380rpm에서 뚜렷한 강도의 변화 없이 양호한 접합상태를 보였다.
- (2) 마찰교반용접부의 인장강도, 내력(0.2% offset)은 각각 모재의 85%와 75%의 수준으로 MIG 용접부에 비해 약 5%와 10% 높게 나타났다.
- (3) 마찰교반용접부의 경도는 MIG 용접부에 비해 평균적으로 높게 측정되었고, TMAZ에서 가장 낮은 경도값을 보인다. 또한 용접에 의한 경도의 강하 구간은 마찰교반용접법이 MIG 용접법 보다 약 1/2 수준으로 좁게 측정되었다.
- (4) 마찰교반용접부의 고주기 피로한계는 145MPa으로서 모재의 약 80%에 해당하며, MIG 용접부의 약 60%에 비해 높게 나타났다.
- (5) MIG 용접의 피로 균열은 벽계면을 따라 성장하는 취성 파괴가 주를 이루고, 마찰교반용접부는 취성 파면과 연성파면이 혼재되어 나타났다.

참고 문헌

- (1) Chang, W. S., Choi, K. Y., Kang, M. J., and Gak, Y., 2000, "UP and Coming Friction Stir Welding," *Journal of KWS*, Vol. 18, No. 6, pp. 704~712.
- (2) Bang, H. S., 1992, "A study on the mechanical behavior of welded part in thick plate," *Journal of KWS*, Vol. 10, No. 4, pp. 250~258
- (3) Lohwasser, D., 2000, "Application of friction stir welding for aircraft industry," *Proceeding of the Second International Symposium on FSW*, Gothenburg, Sweden.
- (4) Esparza, J. A., Davis, W. C., Trillo, E. A., and Murr, L. E., 2000, "Friction Stir Welding of Magnesium alloy AZ31B," *J. Mater. Sci. Lett.* Vol. 21, pp. 917~920.

- (5) Ki, Y., Trillo, E. A., and Murr, L. E., 2000, "Friction Stir Welding of Aluminum alloy 2024," *J. Mater. Sci. Lett.* Vol. 19, pp. 1047~1051.
- (6) Thomas, W. M., 1999, "Friction Stir Welding-Tool Design and Development," *Proceeding of the First International Symposium on FSW*, Thousand Oaks, USA,
- (7) Park, Y. B., Koo, J. S., and Goo, B. C., 2009, "A Study on the Friction Stir Welding Properties of A6005 Extruded Aluminum Panels," *Journal of railway*, Vol. 12, No. 4, pp. 512~517.
- (8) Lim, S. G., Kim, S. S., Lee, C. G., and Kim, S. J., 2005, "Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al Alloys with Different Hardening Mechanisms," *Metals and materials international*, Vol. 11, No. 2, pp. 113~120.
- (9) Park, H. S., Choi, W. D., and Ko, J. B., 2009, "A Study on the Effect that Pin Shape on Mechanical Strength in Dissimilar Friction Stir Welding A6061-T6 and A5052-H32," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 270~278.
- (10) Lim, S. G., Kim, S. S., Lee, C. G., and Kim, S. J., 2004, "Tensile Behavior of Friction Stir Welded Al 6061-T651," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 42, No. 1, pp. 29~36.
- (11) Srivatsan, T. S. and Prakash, A., 1995, "The quasi-static fracture behavior of an aluminium alloy metal-matrix composite," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 54, No. 3, pp. 307~315.
- (12) Srivatsan, T. S. and Meslet, A. H., 2002, "The fatigue and final fracture behavior of SiC particle reinforced 7034 aluminum matrix composites," *Compos. Part B, Eng.*, Vol. 33, No. 5, pp. 391~404.
- (13) Srivatsan, T. S., Meslet, A. H., Petraroli, M., Hotton, B. and Lam, P. C., 2002, "Influence of silicon carbide particulate reinforcement on quasi static and cyclec fatigue fracture behavior of 6061 aluminium alloy composites," *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 325, No. 1-2, pp. 202~214.
- (14) Wang, Z. G., Li, S., and Sun, L., 1995, "Fatigue and fracture behaviors of discontinuously reinforced aluminium matrix composites," *Key. Eng. Mater.*, Vols. 104-107, pp. 729~748.
- (15) Ceschini, L., Boromei, I., Minak, G., Morri, A., and Tarterini, F., 2007, "Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.%Al₂O₃p composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 605~615.