

< 기술논문 >

Al 7075-T651의 마찰교반 용접에 대한 회전속도와 이송속도의 영향

장석기* · 한민수* · 전정일**

(2007년 1월 24일 접수, 2007년 2월 24일 심사완료)

Effects of Tool Rotation and Transition Speed during Friction Stir Welding of Al 7075-T651 Alloy

Seok-Ki Jang, Min-Su Han and Jeong-Il Jeon

Key Words: Friction Stir Welding(FSW ; 마찰교반용접), Heat Affect Zone(HAZ ; 열영향부), Thermo-Mechanically Affected Zone(TMAZ ; 열-기계적 영향부), Nugget(너깃), Base Metal(BM ; 모재).

Abstract

The 7075-T651 Al alloy was welded by friction stir welding. Microstructure, macro behaviors and fracture type in the nugget, thermo-mechanically affected zone(TMAZ) and heat affected zone(HAZ) of the welded part were compared to base metal. The microstructures of nugget zone were compared with tool rotation speeds and various tool transition speed. When the rotation speeds were decreased and transition speeds were increased, the hardness of nugget zone were decreased. Also, the optimal microstructure was observed at the low rotation speed of 800rpm and the high transition speed of 124mm/min. The transgranular dimple and quasi-cleavage at fractured part of nugget zone were investigated.

1. 서 론

최근 에너지 절약 및 고속화 측면에서 수송기기의 경량화가 추진되면서 선박, 철도차량, 항공기, 자동차, 탱커선 등에 알루미늄합금의 사용이 점점 확대되고 있다.

Al합금은 경량으로 비강도가 우수하여 수송기기 등의 구조재로서 이용이 기대되며 이들 기기에 Al합금을 적용하는 경우 Al합금의 용접은 매우

중요하다. Al합금을 용융 용접하여 구조물을 만드는 경우 용접변형, 기공 및 응고균열 등의 용접결함이 발생하기 쉬워 변형방지를 위한 지그 준비, 불활성 가스에 의한 용접부 차폐(Shielding), 용접 전 산화막 처리는 물론 숙련된 용접기술자 등을 필요로 한다. 이와 같은 Al합금 용융용접상의 문제점을 획기적으로 해결할 수 있는 마찰교반용접(Friction Stir Welding)이 최근 개발되어 수송기기 분야의 Al합금 용접방법으로 주목을 받고 있다.^(1,2) 특히, 고강도 알루미늄 합금은 중량이 가볍고, 인장강도와 항복강도가 높으며 가공성, 성형성이 좋아 선박, 항공기, 자동차등 수송기기의 재료로 각광을 받고 있으며, 이 중 Al-Zn-Mg계(7000계) 알루미늄 합금은 용접 구조물용 경량 소재로 활용범위가 넓다.⁽³⁾ 본 연구에서는 두께 6.35mm인 알루미늄 7075-T651에 대해 마찰교반

† 책임저자, 회원, 목포해양대학교 기관시스템공학부

E-mail : jangsk@mmu.ac.kr

TEL : (061)240-7093 FAX : (061)240-7282

* 목포해양대학교 기관시스템공학부 대학원

** 신양금속주식회사 생산관리팀

Table 1 Chemical composition (wt%) of Al 7075-T651 aluminum alloy

Element	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti	Al
wt(%)	1.7	0.4	2.4	5.4	0.1	0.2	0.04	Bal.

Table 2 Mechanical properties of Al 7075 -T651 aluminum alloy

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
529.2(L)	591.92	16.3	158
493.92(T)	607.6	14.4	156

※ (L) : Longitudinal / (T) : Transverse

용접법에 의한 맞대기 이음을 실시하여 양호한 접합을 확보하였다. 최적의 FSW를 위한 중요한 변수는 공구의 회전속도와 이송속도 등이었다. 최적접합조건을 규명하기 위해 용접회전속도와 용접이송속도를 변경하여 용접조건에 따른 횡단면상의 거시 및 미세적 거동을 관찰하였다. 관찰된 미세조직의 특성은 알루미늄 합금 7075-T651 기계적 특성⁽⁴⁾과의 상관관계를 고찰하였다.

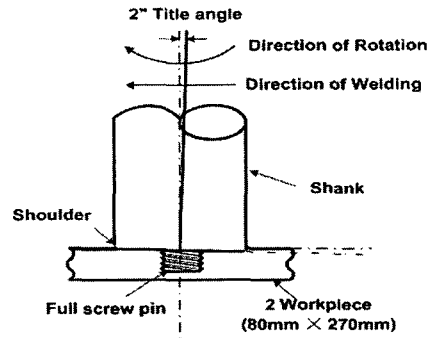
2. 실험재료 및 실험방법

2.1 시험 재료 및 용접방법

이 실험에 사용된 알루미늄 합금 Al7075-T651의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

마찰교반용접에는 Fig. 1과 같이 80mm(W) X 270mm(L)로 절단한 두 개의 판재를 평평한 후판(Back plate)에 길이방향으로 맞대어 고정하고, 밀링에 장착된 공구의 전진각(Tilt angle)은 2°를, 용접방향은 롤링방향(L)으로, 용접공구의 회전방향은 편에 가공되어진 나선선의 방향과는 반대인 반시계방향을 유지하고 공구의 회전속도를 800, 1250 및 1600rpm의 3가지 조건에서 맞대기 이음을 실시하였다.

또한 용접속도 15, 61 및 124mm/min의 3가지

**Fig. 1** A typical, tilt angle and direction of rotation and welding for FSW

조건에서 공구의 치수와 형상을 고려한 24가지의 용접조건을 적용하여 반나사형과 전나사형(Full screw type)공구⁽⁴⁾로 마찰교반용접 맞대기이음을 실시하였다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 마찰교반용접용 공구핀인 반나사형(Half screw type pin)과 전나사형(Full screw type pin)의 형상을 보여주고 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 용접부 횡단면 경도시험

시험에 사용된 마이크로 경도 시험기는 SHIMADZU사의 HMV-2시험기로서 배율은 X40으로, 136°의 다이아몬드 피라미드 압자를 사용하여 하중과 하중시간을 0.98N 및 10sec로 측정하였다.

2.2.2 용접부 횡단면 표면 에칭

마찰교반용접된 시편 접합부에서의 기공이나 용접균열과 같은 결함, 그리고 접합부단면의 용접거동을 관찰하기 위하여 외관검사 및 횡단면을 에칭하여 관찰하였다.

에칭 조건은 수산화나트륨 5.8g과 증류수 100ml로 실온에서 55sec동안 에칭한 후 증류수로 세척시켜 건조⁽⁵⁾하여 광학현미경(X100)을 사용하여 관찰하였다. 횡단면 관찰을 위해 #600으로 조연마, #2000으로 정밀연마 시행한 후 산화알루미늄을 사용하여 연마포로 연마하였다.

2.2.3 SEM에 의한 용접부 횡단면 미세조직 관찰

마찰교반용접된 시편 접합부의 미세조직의 형상이 용접부의 기계적 특성에 미치는 영향을 관

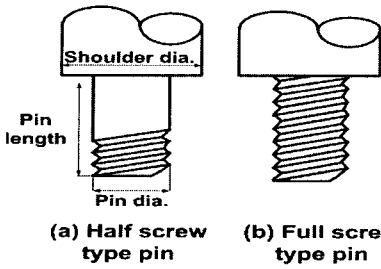


Fig. 2 Schematic diagram of tool for friction stir welding

찰하기 위하여 광학현미경(X1000)과 주사전자현미경(SEM ; Scanning electron microscope)을 사용하여 용접부 횡단면의 너깃부, 열-기계적 영향부, 열영향부(HAZ) 및 모재 부위를 관찰하였다. 또한, 모재의 압연방향과 압연방향의 직각방향으로 인장시편을 가공하여 인장시험 실시한 후 파단면과 마찰교반용접된 횡단면 너깃부 및 열영향부의 파단면을 관찰하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 공구형상, 회전수와 이송속도에 따른 용접부의 특성평가

3.1.1 전나사형, 공구회전수 800rpm, 이송속도 124mm/min 조건에서 용접부의 특성평가

접합부 단면에서의 영역별로 측정된 경도 값을 Fig. 3에 나타냈다. 모재의 경도 값 156HV를 100%로 볼 때 너깃부가 146HV로 모재의 경도 값의 93%를, 열-기계적 영향부 및 열영향부는 120HV로 76%를 나타냈다. 최대 인장 응력은 모재의 588MPa의 79%인 470MPa를 나타냈다⁽⁴⁾.

이미 알려진 바와 같이 본 실험에서도 Fig. 4와 같이 FSW접합부의 대표적인 단면 즉 높은 열과 큰 변형으로 인한 회복과 재결정이 일어나는 너깃부(동적재결정부), 소성변형과 열에 의해 기존의 결정조직이 변화되어 부분 재결정이 생성되는 열-기계적 영향부 그리고 변형보다는 열에 의한 영향을 받는 열영향부를 나타냈다⁽⁵⁾. 용접중앙에는 너깃이 넓은 범위에 걸쳐 타원형으로 잘 발달되어져있음을 뚜렷이 볼 수 있으며, 열-기계적 영향부와 열영향부도 명확히 관찰되었다. 또한 Fig. 4의 각 영역에 대한 미세조직을 Fig. 5에 나

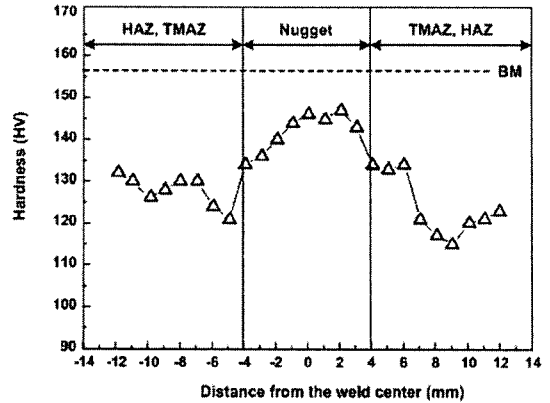


Fig. 3 Comparison of micro vickers hardness of cross-section welded at the condition of 800rpm and 124mm/min

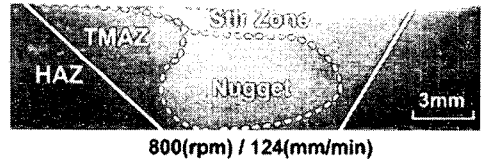


Fig. 4 Macro-structure of cross-section welded by full screw type tool at the condition of 800rpm and 124mm/min speed

타 냈다. 모재부에서는 조직의 특별한 형상을 볼 수 없었으나, 너깃부에서는 원형 형상의 결정립을 나타냈으며, 결정립 내부에 재결정이 충분히 진행되어 대부분의 결정립이 완전한 결정립 상을 이루며 조직이 미세화된 것을 볼 수 있다⁽⁶⁾. 반면, 열-기계적 영향부나 열영향부에서는 사선형의 형상이 나타났으며, 열영향부에서 조직의 조대화 및 더욱더 많은 사선형의 형상을 나타냈다.

각 영역에 대해 예칭을 실시하지 않는 경우의 SEM 사진을 Fig. 6에 보여주고 있다. 사진에서 보이는 것과 같이 열영향부에서 조대해진 기공(Porosity)을 가장 많이 관찰할 수 있었으며, 열-기계적 영향부 및 너깃부 순으로 기공이 약간 관찰되었다. 한편, 모재부위에서는 기공이 극소수로 관찰되었다. 각 부에 형성된 기공의 영향 때문에 경도시험결과 열영향부에서 가장 낮은 경도 값을, 열-기계적 영향부가 다음으로 낮은 경도 값을 보인 것으로 추정된다. 또한 인장시험 결과 파단도 기공이 가장 많고 조대해진 열영향부에서 일어났다.

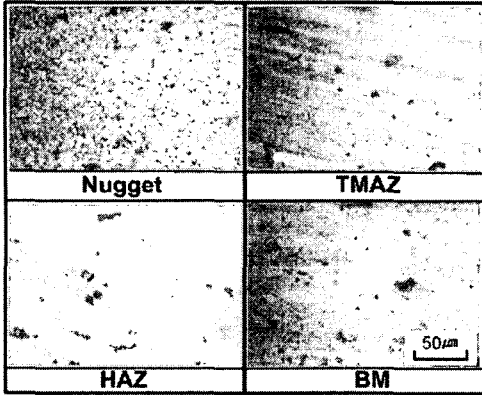


Fig. 5 The optical microstructures of the friction stir welded part at the condition of 800rpm and 124mm/min

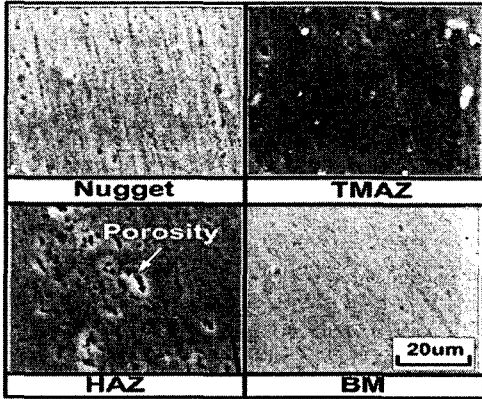


Fig. 6 SEM images of friction stir welded part at 800rpm, 124mm/min

3.1.2 반나사형 공구로 용접 이송속도 124 mm/min일정일 때, 공구회전속도에 따른 용접부의 특성 평가

Fig. 7은 용접이송속도124mm/min의 일정에서 회전속도 변화에 따른 용접부의 너깃영역의 경도 값을 상호 비교한 것이다. 800rpm일 때의 너깃경도 값은 145HV로 가장 높게 나타났으며, 1250 rpm에서는 136HV 그리고 1600rpm에서는 130HV로 가장 낮은 경도 값을 나타냈다. 즉 회전수가 클수록 미소 기공의 증가로 인해 경도가 낮아지는 경도변화가 있었다. 인장응력 역시 800rpm일 때 가장 높은 값인 460MPa를 나타냈다.

Fig. 8에 핀 직경이 4φmm인 반나사형 공구를 사용한 경우, 용접부 횡단면에 대한 거시적 조직을 관찰하였다. 회전속도가 커질수록 너깃의 치

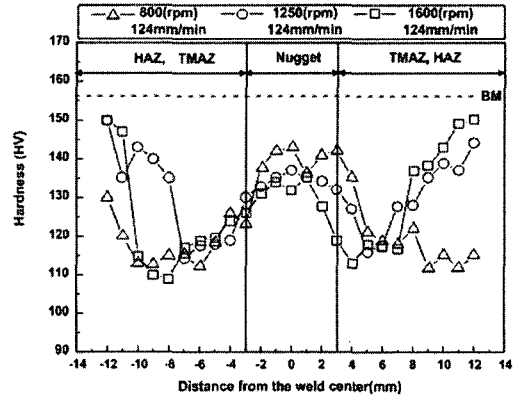


Fig. 7 Comparison of micro vickers hardness of cross-section welded at the conditions of 800, 1250 and 1600rpm with 124mm/min

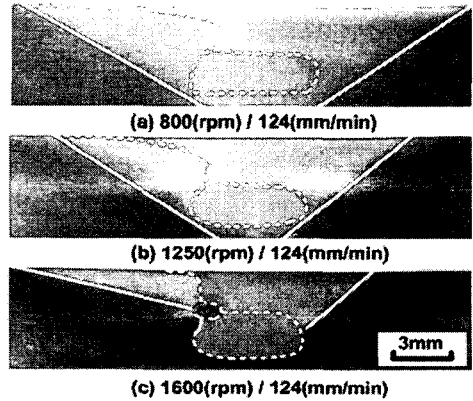


Fig. 8 Macrostructure of cross-section welded by half screw type tool at the conditions of 800, 1250 and 1600rpm with 124mm/min speed

수가 다소 작아졌으며 회전속도가 800rpm일 때는 열-기계적영향부 안쪽에 너깃이 크고 안정적으로 위치해 있으나 1250rpm, 1600rpm으로 증가할수록 열-기계적영향부의 한쪽이 비대칭적으로 작아지고, 너깃부가 열-기계적영향부 바깥쪽인 열영향부에 너깃의 절반정도가 나온 불안정한 양태를 보였으며, 동시에 너깃부 왼쪽 상단, 즉 너깃, 열-기계적 영향부 및 열영향부가 공존하는 곳에서 기공이 형성된 것을 관찰하였다.

Fig. 9는 Fig. 8의 용접부 횡단면상의 너깃에 대해 124mm/min 일정에서 용접회전속도에 따른 표면 조직을 나타내고 있다. 용접회전속도가 800rpm에서 1250rpm으로 증가 시 너깃부의 결정립의 크

기가 약간 작아졌으며, 1600rpm으로 용접회전속도가 800rpm의 두 배로 빨라지면서 결정립의 크기도 약 1/2배 정도 작아짐을 보였다. 그러나 용접회전속도가 800rpm인 경우 너깃내의 결정립은 전체적으로 완전한 결정립 형상을 나타내고 있으나, 1600rpm에서는 결정립의 형상이 불완전하며, 불완전한 부분에서 기공과 같은 결함이 관찰되었다.

3.1.3 용접 회전속도가 800rpm일 때, 이송속도에 따른 용접부의 특성 평가

Fig. 10은 용접이송속도에 따른 너깃부의 경도 값을 상호 비교한 것으로 이송속도가 124mm/min일 때의 경도 값은 약 135HV으로 가장 높은 값을 보였으며, 61mm/min에서는 128HV 그리고 15mm/min에서는 115HV로 매우 낮은 값을 보였다. 인장강도 역시 124mm/min일 때 가장 높은 값인 458 MPa를 나타냈다. 너깃의 경도 값이 크면 인장강도 값이 크게 나타났다. 핀의 직경에 관계없이 800rpm, 124mm/min조건에서 경도 값과 인장강도가 가장 크게 나타났다.

Fig. 11은 핀 직경이 6φmm인 반나사형 공구를 사용한 경우, 용접회전속도 800rpm에서 용접이송속도를 각각 15mm/min, 61mm/min 그리고 124mm/min으로 변화시킨 후 용접부 횡단면을 관찰한 것이다. Fig. 8과 비교하면 핀 직경이 커짐에 따라 너깃이 조대해졌다. 용접이송속도가 빨라질수록 너깃의 크기는 약간 감소하였으며 횡단

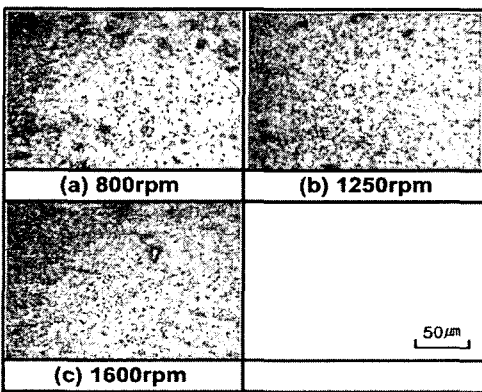


Fig. 9 Macrostructure of nugget within cross-section welded by half screw type tool at the conditions of 800, 1250 and 1600rpm with 124mm/min speed

면상의 너깃의 위치가 용접부 저부에서 위쪽으로 약간씩 상승하면서 너깃형상이 점차 완전폐곡선을 이루었으나 모양은 약간 불안정하였다. 또한 열-기계적 영향부가 대체적으로 대칭된 안정적인 형상을 나타냈으며, 용접부에서의 결함은 관찰되지 않았다.

Fig. 12는 Fig. 11의 용접부 횡단면 상의 너깃에 대해 800rpm에서 용접이송속도에 따른 너깃부 결정립을 나타내고 있다.

용접이송속도가 15mm/min일 때의 너깃 내의 결정립은 완전한 형상을 갖추지 못하였으며 충분한 재결정이 진행되지 않아 결정립내부에 미세한 변형조직들이 관찰되었다. 또한, 이송속도가 61mm/min일 때 너깃 내의 결정립의 변형조직들이 점차적으로 사라지며, 이송속도가 124mm/min에서는 너깃 전반부에 걸쳐 완전한 형상의 결정립을 나타냈다.

3.2 모재 및 용접부 파단 조직

3.2.1 모재의 파단면의 미세조직

이송속도에 따라 너깃영역의 모양과 크기가 다르게 나타났으며 이에 대한 메카니즘을 분석하기 위하여 파면 관찰을 실시하였다.

Fig. 13은 마찰교반용접되지 않은 모재의 종방향(롤링방향) 및 횡방향으로 제작된 시험편의 인장 후 모재의 파단면을 나타낸 사진이다.

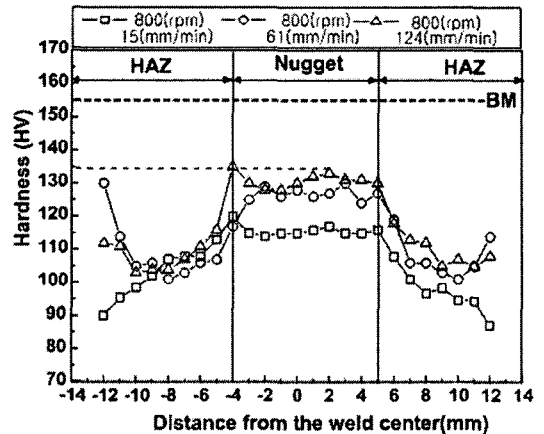


Fig. 10 Comparison of micro vickers hardness of cross-section welded at the conditions of 15, 61 and 124mm/min with 800rpm

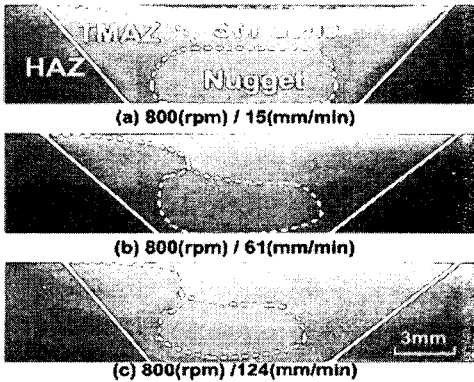


Fig. 11 Macrostructure of cross-section welded by half screw type tool at the conditions of 15, 61 and 124mm/min with 800rpm

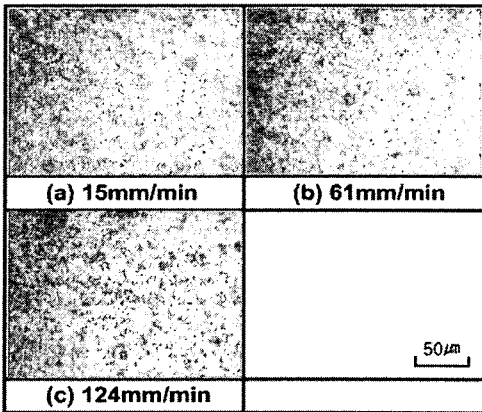


Fig. 12 Macrostructure of nugget within cross-section welded by half screw type tool at the conditions of 15, 61 and 124mm/min with 800rpm

종방향 모재의 연신율은 16.3%로서 결정립의 길이 방향으로 외력이 작용하여 파면에 딩플(dimple)형상의 연성 파단이 발생하였다. 반면에, 횡방향으로 가공된 모재 시험편에 대한 연신율은 14.4%로 종방향 연신율에 비해 감소하였으며 파단면이 종방향에 비하여 약간 벽개형(cleavage) 파단 거동을 나타냈다.

3.2.2 이송속도에 따른 파단면 분석

Fig. 14는 마찰교반용접된 너깃을 포함한 동적 재결정부 파단면의 미세조직과 파단면의 각 영역의 조직을 나타낸 것이다. 흰색점선은 파단 전

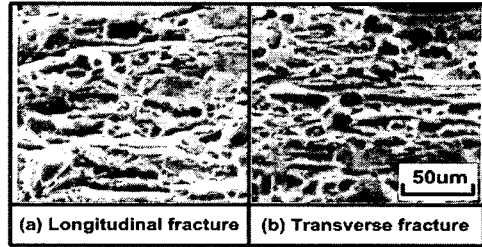


Fig. 13 SEM images of the fracture surfaces of base metal

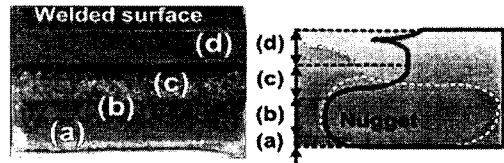


Fig. 14 Fractography analysis of friction stir welded zone

의 너깃부이며, 검정색 실선은 파단 후 관찰된 파단면 각 영역의 위치 및 형상을 나타낸 것이다.

(a)는 전형적인 연성파괴에서 일어나는 딩플형⁽⁷⁾ 파단양태의 미세조직을 보이며, 쉬어립(Shear lip)이 너깃계면 (b)보다 많이 나타남을 볼 수 있다. 따라서 (a)의 미세조직이 (b)보다 쉽게 전단분리된다고 할 수 있다. TMAZ와 교반영역(Stir Zone) (c)와 (d)는 연성파괴에서 볼 수 있는 딩플형 조직과 취성 파괴에서 볼 수 있는 벽개형 파괴가 공존하는 준벽개(quasicleavage)파면형상⁽⁸⁾을 보이고 있다. 하지만 (c)의 조직은 딩플형의 조직이 상대적으로 더 많이 분포된 연성 파괴를 나타내

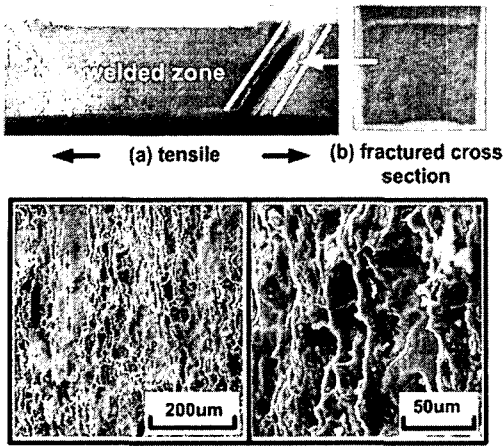


Fig. 15 Fractography analysis of heat affect zone.

며, (d)는 벽개형의 조직이 더 많이 분포된 취성 파괴를 나타내었다. 경도가 낮은 HAZ영역 (a)에서 균열이 진전되어 경도가 큰 너깃영역은 파단되지 않고 너깃계면을 따라 파단된 것을 확인하였다.

Fig. 15는 만나사형 공구로 회전속도 800rpm와 이송속도가 15mm/min 일 때 마찰교반용접된 인장시험편을 가공하여 공구의 이송방향과 수직인 방향으로 인장하중을 가하여 인장시험 한 결과 경도가 가장 낮은 용접부의 열영향부에서 파괴가 나타난 형상을 사진으로 나타내었다.

파단면에서는 인장응력에 의한 최대전단응력 방향인 45° 기울기를 갖는 전단 파단 상태를 보였다. 전반적인 덩플형 미세조직의 분리능 격자면을 따라서 슬립이 점진적으로 진행되면서 분리 파괴된 형상을 보였다.⁽⁹⁾

4. 결 론

마찰교반용접법으로 맞대기 용접된 6.35mm Al 7075-T651 합금 판재의 공구형상, 편의 직경, 공구이송속도와 회전수의 영향에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 만나사형 공구의 경우 너깃부에서 대부분의 결정립이 완전한 미세 결정립 상을 이루고 있었으며 모재인 경우에 비해 93%의 경도 값과 인장응력 470MPa을 나타냈다. 또한, SEM 촬영결과는 열영향부(HAZ)에서 다수의 기공(Porosity)과 모재의 75 ~ 80%로 낮은 경도 값을 나타냈다.

(2) 만나사형 공구 사용의 경우 회전속도가 작은 800rpm일 때 너깃부의 경도 값은 145HV로 큰 값을 나타냈으며, 회전속도가 증가할수록 너깃부에서의 경도 값은 낮게 나타났다. 그리고 회전속도가 800rpm보다 커질수록 결정립의 크기는 작아지고 불안정한 결정립 및 결함이 발생하였다.

이송속도 124mm/min일 때 너깃부의 결정립계가 명확히 구분되는 완전한 결정립 형상을 보였다.

(3) 또한, 124mm/min조건에서 너깃을 중심으로 덩플형조직과 준벽개형 조직을 보였으며 파단은 경도가 낮고 기공이 많이 존재하는 HAZ영역에서 연성균열의 개시 및 균열이 진전하면서 경도가 큰 너깃영역은 파단되지 않고 너깃계면을 따라 준벽개형으로 파단 하였다. 한편 15mm/min조건에서는 HAZ를 따라 슬립이 진행되면서 덩플형 조직의 전단파괴양상을 보였다.

참고문헌

- (1) Yun-Mo Yeon, Won-Bae Lee and Seung-Boo Jung, 2001, "Microstructures and Characteristics of Friction-Stir-Welded Joints in Aluminium Alloys," *Journal of KWS*, Vol. 19, No. 6.
- (2) Seok-Ki Jang and Jeong-Il Kim, 2006, "Experimental Behaviors of Weld Zone Property of the Butt and the Lap Jointed Specimen Friction-Stir-Welded with 2mm 1050 Aluminum Alloy Sheet," *Journal of KSME*, Vol. 30, No. 2, pp. 187~193.
- (3) Park, S.T., Jung, J.P. and Suhr, C.J., 1994, "Weldabilities of 7000 Aluminium Alloys(I)," *Journal of KWS*, Vol.12, No. 1.
- (4) Seok-Ki Jang and Jeong-il Jeon, 2006, "Weldability of Al 7075 Alloy According To Different Tools and Welding Conditions by F.S.W," *Journal of KSME*, Vol. 30, No. 1. pp. 30~41.
- (5) Lim, S.G., Kim, S.S., KIM, C.G. and Kim, S.J., 2003, "Microstructural Evolution and Tensile Behavior of Stir Friction Welded Al Alloys," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 41, No. 11, pp. 743~749.
- (6) Yutaka, S.S. and Hiroyuki, K, 1999,

- "Microstructural Evolution of 6063 Aluminum During Friction Stir Welding," *Metal Mater Trans A*, Vol. 30A, pp. 2429~2437.
- (7) J.G. Kim, H.W. Park, 2003, "Cleavage and Fracture for Solid Materials Metallography," *Published by Gold*, pp. 226~227.
- (8) J.G. Kim, K.Y. Kim, H.W. Park, 1999 "The Structures of Metallograph," *Published by Gold*, pp. 640~642.
- (9) S.G. Lim, S.S. Kim, C.G. KIM and S.J. Kim, 2005, "Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al Alloys with Different Hardening Mechanism," *Metals and Materials international*, Vol. 11, No. 2, pp. 113~120.