

Al 7075의 마찰교반 용접부 미세조직에 관한 연구

장석기⁺, 이돈출⁺⁺, 김성종⁺⁺⁺, 전정일⁺⁺⁺⁺

(원고접수일 : 년 월 일, 심사완료일 : 년 월 일)

Microstructures in friction-stir welded Al 7075-T651 alloy

Seok-Ki Jang⁺, Don-Chool Lee⁺⁺, Seong-Jong Kim⁺⁺⁺, Jeong-il Jeon⁺⁺⁺⁺

Abstract : The grain structure, dislocation density and second phase particles in various regions including the stir zone(SZ), thermo-mechanically affected zone(TMAZ), and heat affected zone(HAZ) of a friction stir weld 6.35mm thick aluminum 7075-T651 alloy were investigated and compared with the base metal. The microstructures of nugget zone were compared according to tool rotation speeds and tool transition speeds. The hardness profiles of nugget zone were increased, while decreasing rotation speed and increasing welding speed. The optimal microstructure was gained at the low rotation speed 800rpm and th high welding speed 124mm/min. The nugget microstructures of fracture surface, transgranular dimple and quasicleavage type were showed different fracture type with the HAZ, shear fracture type.

Key words : Friction stir welding(FSW;마찰교반 용접), Heat affect zone(HAZ;열영향부), Thermo-mechanically affected zone(TMAZ;열-기계적 영향부), Nugget(너겟) Base metal(BM; 모재).

1. 서 론

최근 에너지절약 및 고속화 측면에서 수송기기의 경량화가 추진되면서 선박, 철도차량, 항공기, 자동차, 탱커 등에 알루미늄(Al)합금의 사용이 확대되고 있다.

Al 합금은 경량으로 비강도가 우수하여 수송기기등의 구조재로서 이용이 기대된다. 그러나, 이들 기기에 Al 합금을 적용하는 경우 Al 합금의 용접은 매우 중요하다. 즉, Al 합금을 용융용접하여 구조물을 만드는 경우 용접변형, 기공 및 응고균열 등의 용접결함이 발

생하기 쉬워 변형방지를 위한 지그 준비, 불활성 가스에 의한 용접부 실딩(Sealed), 용접전 산화막처리, 숙련된 용접기술자 등이 요구되어 왔다. 이와 같은 Al 합금 용융용접상의 문제점을 획기적으로 해결할 수 있는 Friction Stir Welding이 최근 개발되어 수송 기기 분야의 Al 합금 용접에서 주목을 받고 있다^[1]. 특히, 고강도 알루미늄 합금은 중량이 가벼우면서 인장강도와 항복강도가 높고 가공성, 성형성이 좋아 선박, 항공기, 자동차등 수송재료로 각광을 받고 있으며, 이 중 Al-Zn-Mg계(7000계) 알루미늄 합금은 용접 구조물용 경량소재로 활용범위가 높다^[2]. 이 논문에서는 두께 6.35mm인 알루미늄 7075-T651의 최적 공구^[3]에 의해 마찰교반용접 되어진 용접부의 용접회전속도의 차이 및 용접이송속도의 차이에 의한 횡단면상의 거시 및 미시적 거동을 관찰하였다. 관찰된 미

+ 책임저자(목포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : jangsk@mmu.ac.kr, T : 061)240-7093

++목포해양대학교 기관시스템공학부

+++목포해양대학교 기관시스템공학부

++++목포해양대학교 대학원

세조직의 특성은 알루미늄 7075-T651 용접부의 기계적 특성^[3]과의 상관관계를 고찰하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 시험 재료 및 용접방법

이 실험에 사용된 재료는 두께가 6.35mm인 알루미늄 A17075-T651 열처리 되어진 판재를 사용하였으며, 재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition (wt%) of A17075-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 A17075 - T651 aluminum alloy

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HMV)
54.0(L)	60.4	16.3	158
50.4(T)	62.0	14.4	156

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

마찰교반용접용 공구는 공구강(SK)을 선반으로 가공하여 공구어깨의 치수를 15φmm와 20φmm로, 공구핀의 직경은 4φmm와 6φmm로 하고 공구핀의 길이는 시편의 두께보다 약간 작은 6mm로 제작하였다. 교반마찰용접에는 80mm(W) X 270mm(L)로 절단한 두 개의 판재를 평평한 후판(Back plate)에 길이방향으로 맞대어 크램프(Cramp)로 고정하고, 밀링에 장착된 공구 2°의 전진각(Tilt angle)을 주어 용접방향은 롤링방향(L)으로 용접공구의 회전방향은 핀에 가공되어진 나사선의 방향과는 반대방향인 반시계방향을 유지하

면서 공구의 회전속도는 800~1600rpm범위에서, 용접속도는 15~124mm/min범위에서 공구의 치수와 형상을 고려한 24가지의 용접조건을 시행하여 최적공구인 공구어깨직경 20φmm, 공구핀 직경 6φmm 및 공구핀 길이 6mm인 전나사형(Full screw type)공구^[3]를 선정하여 마찰교반용접 하였다.

Fig. 1은 이 실험에 사용된 마찰교반용접용 공구핀인 반나사형(Half screw type pin)과 전나사형(Full screw type pin)이다.

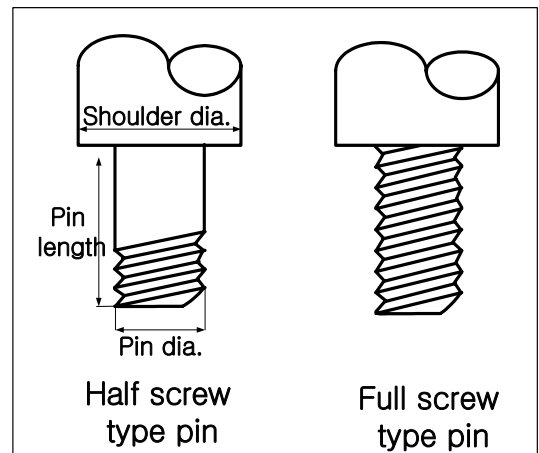


Fig. 1 The Tool types of friction stir welding

2.2 시험방법

1) 용접부 횡단면 표면에칭

마찰교반용접된 시편 접합부에서의 기공이나 용접균열과 같은 결함, 그리고 단면의 용접거동을 관찰하기 위하여 외관검사 및 부식 횡단면 표면에칭을 실시하였다. 횡단면 표면관찰을 위해 절단된 시편을 우선 #600으로 조연마, #2000으로 정밀연마 한 후 산화알루미늄을 사용하여 연마포로 연마하였다. 에칭에는 수산화나트륨 5.8g과 증류수 100ml로 실온에서 55sec동안 에칭한 후 증류수로 세척시켜 건조^[4]하여 광학현미경(X100)을 사용하여 관찰하였다.

2) SEM에 의한 용접부 횡단면 미세조직 시험

마찰교반용접된 시편 접합부의 미세조직의 상태가 용접부의 기계적 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 광학현미경(X1000)과 주사전자현미경(SEM;

Scanning electron microscope)을 사용하여 용접부 횡단면의 너겟부, 열-기계적 영향부, HAZ 및 모재를 각각 현미경 배율 X50, X200, X1000 및 X2000로 촬영하였다. 또한, 모재를 롤링방향 및 횡방향으로의 과단면과 마찰용접된 판재의 너겟부 및 HAZ부의 과단면을 촬영하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 용접조건에 따른 용접부의 조직

3.1.1 공구회전수 800rpm, 이송속도 124mm/min일때의 용접부 거동과 미세 조직

Fig. 2는 최적공구인 공구어깨직경 20φmm, 공구핀 직경 6φmm 및 공구핀 길이 6mm인 전나사형(Full screw type)공구로 최적용접조건인 용접회전속도 800rpm, 용접이송속도 124mm/min으로 마찰교반용접된 용접부 횡단면의 거시적 조직을 보여주고 있다.

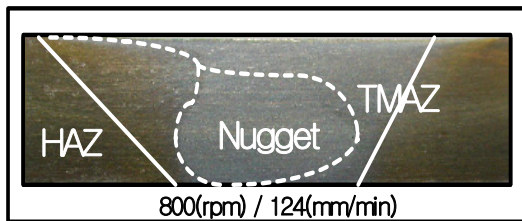


Fig. 2 Welded transverse cross-section macrostructures according to the rotation speed 800rpm and the transition speed 124mm/min with full screw type tool.

접합부의 거시조직은 높은 열과 변형량으로 인해 회복과 재결정이 일어나는 너겟부(동적재결정부), 변형과 열에 의해 기존의 결정조직이 변화되는 열-기계적 영향부 및 변형보다는 열에 의한 영향을 받는 HAZ부를 나타냈다^[4].

용접중앙에는 너겟이 타원형으로 잘 발달되어져있음을 뚜렷이 볼 수 있으며, 열-기계적 영향부와 HAZ부

도 명확히 구분됨을 보였다.

Fig. 3의 각부 경도값은 모재의 경도값 156Hv를 100%로 볼때 너겟부가 145Hv로 모재의 경도값의 93%를 나타냈으며, 열-기계적영향부 및 HAZ는 120Hv로 76%를 나타냈다. 또한, 최적공구로 용접된 인장시험편의 인장응력 462MPa는 모재의 인장응력 588MPa의 79%를 나타냈으며, 항복점은 모재의 59%를 나타냈다. 또한 연신율은 모재의 연신율 14%의 절반인 7.3%로 낮은 연신율을 보였다.

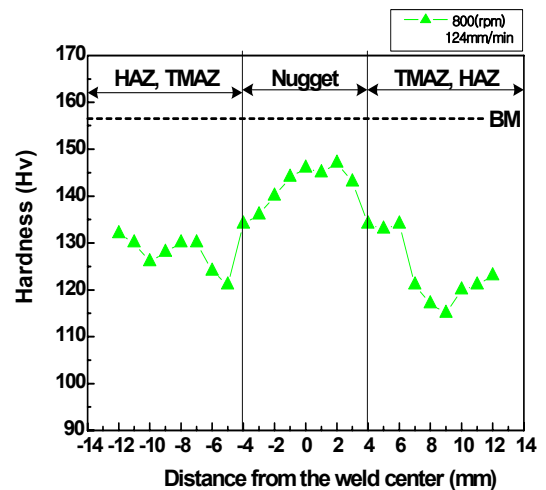


Fig. 3 Comparison of micro vickers hardness profile on the cross-section of the welded zone according to rotation speed 800rpm and transition speed 124mm/min

Fig. 4는 최적공구를 사용하여 용접회전속도 800rpm과 용접이송속도 124mm/min으로 용접된 용접부 근방 즉, 일반적인 알루미늄 합금의 FSW^[5]의 경우에 나타나는 너겟부, 열-기계적 영향부 및 HAZ부의 광학현미경에 의한 미세조직을 나타냈다. 모재부에서는 조직의 특별한 형상을 볼 수 없었으나, 너겟부에서는 원형 형상의 결정립을 나타냈으며, 결정립내부에 재결정이 충분히 진행되어 대부분의 결정립이 완전한 결정립 상을 이루고 있음을 볼 수 있다. 반면, 열-기계적 영향부나 HAZ에서는 사선형의 형상이 나타났으

며, HAZ부에서 더욱더 많은 사선형의 형상을 나타냈다.

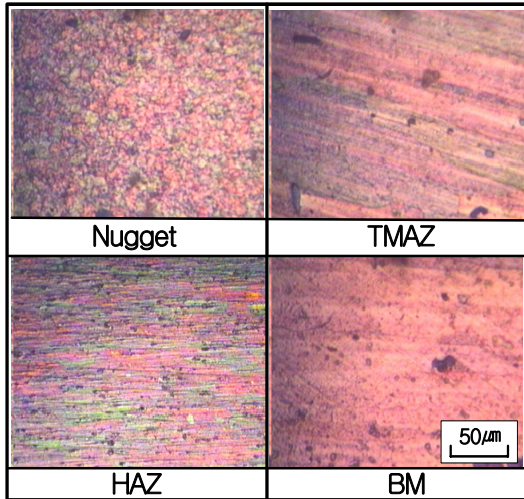


Fig. 4 The optical microstructures(X1000) of the Nugget, TMAZ, HAZ and BM for FSW joint.

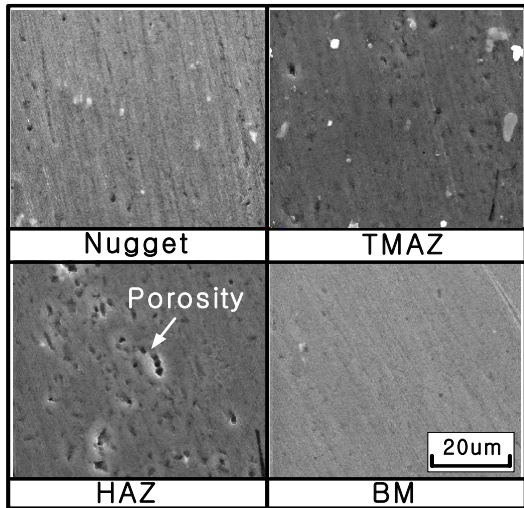


Fig. 5 SEM images of friction stir welded joint at 800rpm, 124mm/min.

Fig. 5는 마찰교반용접된 각부를 표면부 에칭 하지 않고 SEM으로 촬영한 것이다. 사진에서 보이는 것같이 HAZ에서 가장 많고 조대한 기공(Porosity)를 보

였으며, 다음으로 열-기계적 영향부가 너겟에서 보다 많은 기공(Porosity)을 보였다. 또한, 모재에서는 기공이 거의 보이지 않았다. 경도시험결과 열영향부(HAZ)에서 가장 낮은 경도값을 보였으며, 열-기계적 영향부가 다음으로 낮은 경도값을 보였다. 또한 인장 시험 후의 파단도 기공이 가장 많고 조대한 열영향부에서 일어났다.

3.1.2 용접이송속도 124mm/min일때 공구회전 속도에 따른 용접부 거동과 미세조직

Fig. 6은 핀직경이 4φmm인 반나사형 공구를 사용하여 용접이송속도 124mm/min 일정 일때 회전속도를 각각 800rpm, 1250rpm 및 1600rpm으로 변화 시켜 용접부 횡단면을 관찰하였다.

회전속도가 커질수록 너겟의 치수가 다소 작아졌으며 회전속도가 800rpm일때는 열-기계적영향부가 너겟을 충분히 포함하고 있어 안정적인 형상을 보이거나 1250rpm에서 열-기계적 영향부가 다소 작아졌다. 1600rpm에서는 열-기계적영향부가 너겟의 절반정도만을 포함하는 불안정한 거시적 형상을 보였으며, 너겟부 상단에서 균열이 발생하였다.

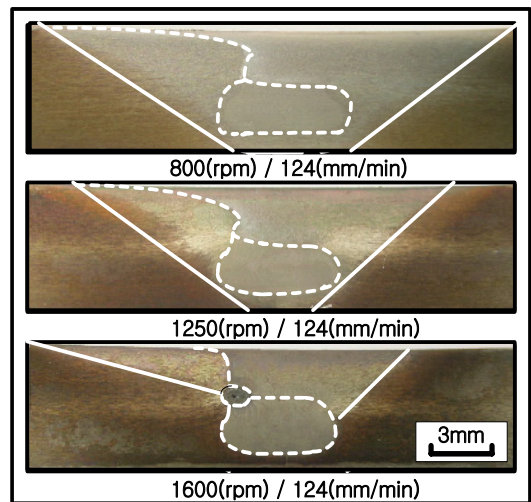


Fig. 6 Welded transverse cross-section macrostructures according to the welding speeds(800rpm, 1250rpm and 1600rpm) and the transition speed 15mm/min with half screw type tool.

Fig. 7에서 각 조건별 너겟부의 경도값을 비교하면 800rpm일때의 경도값은 145Hv으로 가장높은 경도값을 보였으며, 1250rpm에서는 136Hv 그리고 1600rpm에서는 130Hv로 가장낮은 경도값을 보였으며, 인장응력 역시 800rpm일때 가장 높은 값인 460MPa를 나타냈다.

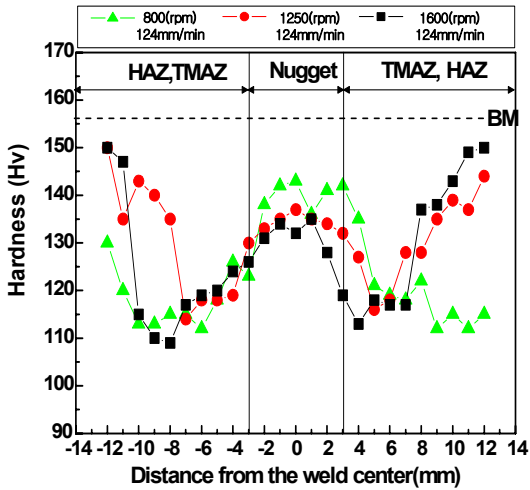


Fig. 7 Comparison of micro vickers hardness profiles on the cross-section of the welded zone according to rotation speeds 800rpm, 1250rpm and 1600rpm and transition speed 124mm/min.

Fig. 8은 Fig.6의 용접부 횡단면상의 너겟을 SEM을 이용 용접회전속도에 따른 각각의 조건별 너겟의 결정립을 나타낸것이다.

용접회전속도가 800rpm에서 1250rpm으로 증가시 너겟부의 결정립의 크기가 약간 작아졌으며, 1600rpm으로 용접회전속도가 800rpm의 두배로 빨라지면서 결정립의 크기도 약 1/2배 정도 작아짐을 보였다. 그러나 용접회전속도가 800rpm에서 너겟내의 결정립은 완전한 결정립 형상을 대부분의 영역에서 나타내고 있으나, 1600rpm에서는 결정립의 형상이 불완전한 경향을 보였으며, 결정립이 불완전한 부분에서 결함이 발생하였다.

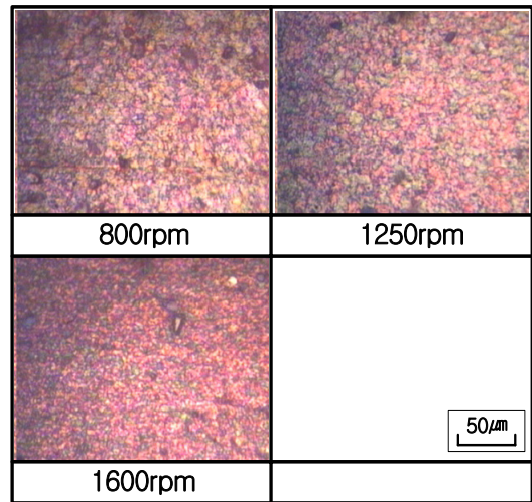


Fig. 8 The optical microstructures of the friction stir welded joint according to the welding speeds(800rpm, 1250rpm and 1600rpm) and the transition speed 15mm/min with half screw type tool.

3.1.3 용접회전속도가 800rpm일정 일때 이송 속도에 따른 용접부 거동과 미세조직

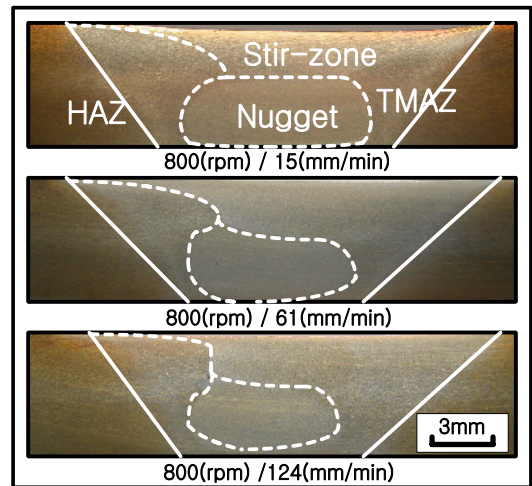


Fig. 9 Welded transverse cross-section macrostructures according to the welding speed 800rpm and the transition speeds 15mm/min with half screw type tool.

Fig. 9는 편직경이 6φmm인 만나사형 공구를 사용하여 용접회전속도를 800rpm 고정일때 용접이송속도를 각각 15mm/min, 61mm/min 그리고 124mm/min으로 변화시킨 후 용접부 횡단면을 관찰하였다.

용접이송속도가 빨라질수록 너겟의 직경은 약간씩 감소하였으며, 횡단면상의 너겟이 용접부 후면부에서 표면부 쪽으로 약간씩 상승하였다. 용접부 횡단면 상의 너겟의 위치는 열-기계적 영향부가 잘 대칭된 대체적으로 안정적으로 나타났으며, 용접부에서의 결함은 발생하지 않았다.

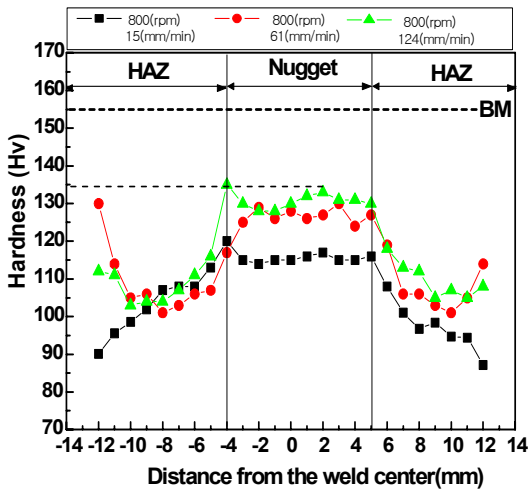


Fig. 10 Comparison of micro vickers hardness profiles on the cross-section of the welded zone according to rotation speeds 800rpm, 1250rpm and 1600rpm and transition speed 124mm/min

Fig. 10은 각 조건별 너겟부의 경도값을 비교한것으로 이송속도가 124mm/min일때의 경도값은 135Hv로 가장높은 경도값을 보였으며, 61mm/min에서는 128Hv 그리고 15mm/min에서는 115Hv로 매우 낮은 경도값을 보였다. 인장응력 역시 124mm/min일때 가장높은 값인 462MPa를 나타냈다.

Fig. 11은 Fig. 9의 용접부 횡단면 상의 너겟을 SEM을 이용하여 각각의 용접이송속도에 따른 너겟부 결정립을 나타내고있다.

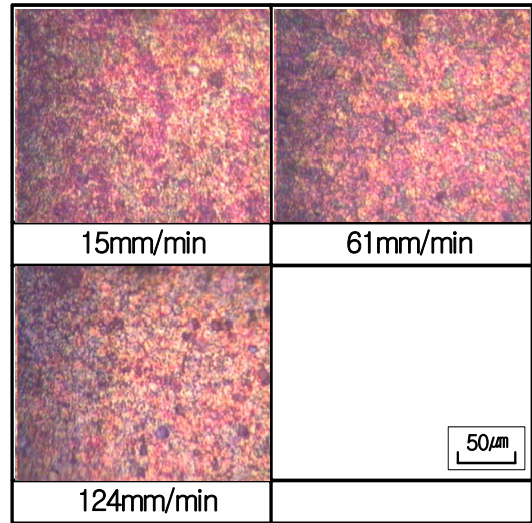


Fig. 11 The optical microstructures of the friction stir welded joint according to the welding speed 800rpm and the transition speeds (15mm/min, 61mm/min and 124mm/min) with half screw type tool.

용접이송속도가 15mm/min일때의 너겟 내의 결정립은 완전한 형상을 갖추지 못하였으며 충분한 재결정이 진행되지 않아 결정립내부에 미세한 변형조직들이 형성되었다. 또한, 이송속도가 61mm/min일때 너겟 내의 결정립의 변형조직들이 점차적으로 사라지며, 이송속도가 124mm/min에서는 너겟 전반부에 걸쳐 완전한 형상의 결정립을 보였다.

3.2 모재 및 용접부의 파단 조직

3.2.1 모재의 파단면의 미세 조직

Fig. 12는 마찰교반용접되지 않은 종방향(롤링방향) 및 횡방향으로 제작된 모재의 파단면을 SEM에 의해 X1000배로 촬영된 미세조직 사진이다.

종방향 모재의 연신율은 16.3%로서 결정립의 길이 방향으로의 힘이 작용하므로 연성이 증대되기 때문에 연성적인 파단이 일어난 반면, 횡방향 모재의 연신율은 14.4%로 종방향에 비해 연신율 저하와 종방향에 비해 약간 취성적으로 파단이 일어났다.

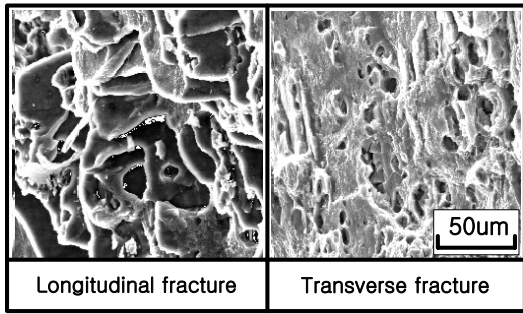


Fig. 12 SEM images of the fracture surfaces of base metal.

3.2.2 너겟부 파단면의 미세조직

Fig. 13은 마찰교반용접된 너겟을 포함한 동적 재결정부 파단면의 미세조직을 파단부의 형상에 따라 나타낸 것이다.

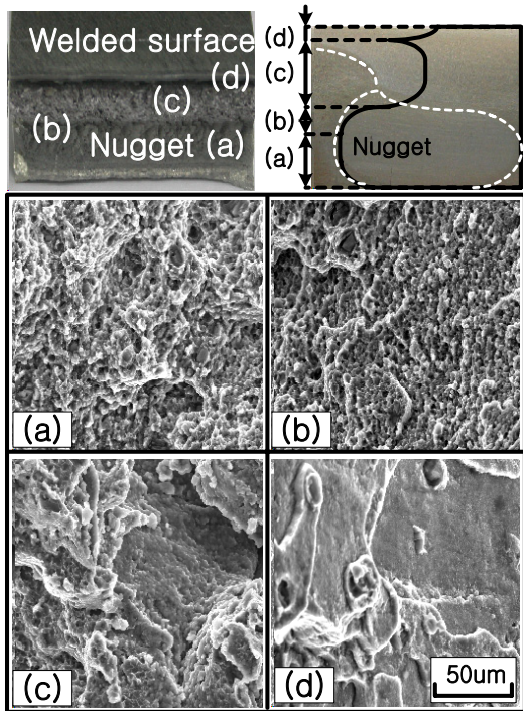


Fig. 13 SEM images of the fracture surfaces of the stir zone.

(a)는 전형적인 연성파괴에서 일어나는 입내딩플(Transgranular dimple)형^[6]의 파단면 미세조

직을 보이며, 쉬어립(Shear lip)이 (b)보다 많이 나타남을 볼 수 있다. 따라서 (a)의 미세조직이 (b)보다 연성이 더 강하다고 할 수 있다. (c)와 (d)는 연성파괴에서 볼 수 있는 딩플형 조직과 취성 파괴에서 볼 수 있는 벽개형 파괴가 공존하는 준벽개(Quasicleavage)파면형상^[7]을 보이고 있으며, (c)의 조직은 딩플형의 조직이 많이 분포된 연성형 파괴를 나타내며, (d)는 벽개형의 조직이 많이 분포된 취성형 파괴를 나타내고 있다.

3.2.3 HAZ에서의 파단

Fig. 14는 마찰교반용접된 용접부의 HAZ부 파단면의 미세조직을 X200와 X1000배로 나타낸 것이다.

파단면에서는 전단응력에 의한 전단파괴경향으로 격자면을 따라서 슬립이 점진적으로 진행되면서 분리된 형상을 보인다^[8].

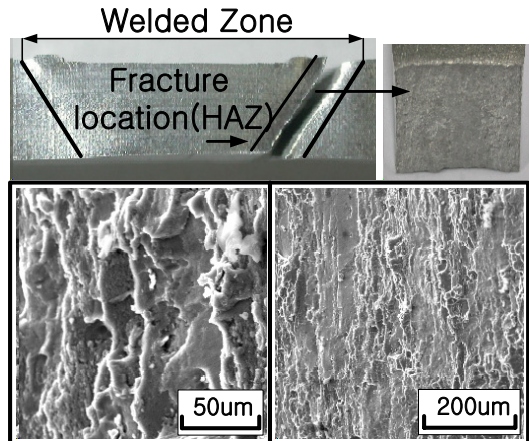


Fig. 14 SEM images of the fracture surfaces of the HAZ.

4. 결론

마찰교반용접법으로 맞대기 용접된 6.35mm_t Al

7075-T651 합금 관재의 용접조건에 따른 거시적 거동과 미시적 조직상태 관찰 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 마찰교반용접된 시편의 횡단면 조직관찰결과 너겟부에서 대부분의 결정립이 완전한 미세 결정립 상을 이루고 있었으며 모재에 93%인 높은 경도값을 나타냈다. 또한, HAZ에서 SEM촬영결과 다수의 기공(Porosity)이 보였으며 경도값도 75~80%로 낮은 값을 보였다.

2) 용접회전속도에 따른 너겟부의 미세조직관찰 결과 회전속도가 1600rpm으로 커질수록 결정립의 크기는 작아졌으나, 회전수가 작을 때인 800rpm 보다 불안정한 결정립의 형상을 보였으며 결함이 발생하였다. 또한, 너겟부의 경도값은 회전속도가 작은 800rpm일때 145Hv로 가장높은 값을 나타냈으며, 회전속도가 빨라질수록 너겟부에서의 경도값이 낮게 나타났다.

3) 용접이송속도에 따른 너겟부의 미세조직관찰 결과 이송속도가 빠른 124mm/min일때의 너겟부의 결정립이 결정립계가 명확히 구분되는 완전한 결정립 형상을 보였다. 또한, 너겟부의 경도값은 이송속도가 빠른 124mm/min 일때 135Hv로 가장높은 값을 나타냈으며, 이송속도가 15mm/min 일때는 124mm/min 일때 보다 20Hv정도 낮은 경도값을 보였다.

4) 파단부 미세조직 관찰결과 너겟부의 파단면의 미세조직은 딥플형 조직과 준벽개형 조직을 나타냈으며, HAZ부는 전단파괴형상을 보였다.

"Weldabilities of 7000 Aluminium Alloys (I)", Journal of KWS, Vol.12, NO.1.

- [3] Seok-Ki Jang, Jeong-il Jeon, "Weldability of Al 7075 Alloy according to different tools and welding conditions by F.S.W".
- [4] S.G.Lim, S.S.Kim, C.G.KIM and S.J.Kim, 2003, "Microstructural Evolution and Tensile Behavior of Stir Friction Welded Al Alloys", J.Kor.Inst. Met. & Mater. Vol.41, No.11. pp.743~749.
- [5] Yutaka S. Sato, Takayasu Kaneko, Mitsunori Urata and Hiroyuki Kokawa, 2002, "Effect of Microstructure on Mechanical Properties in Friction Stir Welded Cast A356 Aluminum Alloy", IWS-Korea.
- [6] 김정근, 박해웅, 2003, "금속재료의 균열과 파괴", 도서출판 골드, PP.226~227.
- [7] 김정근, 김기영, 박해웅, "금속현미경 조직학", 1999, 도서출판 골드, PP.640~642.
- [8] 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", Vol.11, No.2, pp.113~120.

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] S.T.Park, J.P.Jung and C.J.Suhr, 1994,