연 구 논 문

마찰교반용접한 AZ31B-H24 마그네슘 합금의 용접특성에 미치는 용접조건의 영향

이원배* · 방극생* · 연윤모** · 정승부*

*성균관대학교 신소재공학과
**수원과학대학 자동화용접과

The Effects of Welding Conditions on the Joint Properties of the Friction Stir Welded AZ31B-H24 Mg Alloys

Won-Bae Lee*, Keuk-Saing Bang*, Yun-Mo Yoen** and Seung-Boo Jung*

*Dept. of Advanced Materials Engineering, SungKyunKwan Univ. Suwon City, 440-746, Korea
**Dept. of Automatic-Welding Engineering, Suwon Science Colleg. Whasung City, 445-742, Korea

Abstract

Weldability of Friction Stir Welded(FSW) AZ31B-H24 Mg alloy sheet with 4mm thick was evaluated by changing welding speed. The sound welding conditions mainly depended on the sufficient welding heat input during the process. The insufficient heat input resulted in the void like defect in the weld zone. Higher welding speed caused a larger inner void or lack of bonding. The defects were distributed at the stir zone or the transition region between stir zone and thermo-mechanical affected zone (TMAZ). The size of defects slighlty increased with increasing welding speed. These defects had a great effect on the joint strength of weld zone. The weld zone was composed of stir zone, TMAZ and heat affected zone. The stir zone was cosisted of fine recrystallized structure with 5-8㎛ in the mean grain size. The hardness of weld zone was near the 60HV, which was slightly lower than that of base metal. The maximum joint strength was about 219MPa that was 75% of that of base metal and the yield strength was also lower than that of base metal partly due to the existance of defects.

(Received April 11, 2002)

Key Words : Friction stir welding. Weld defect. AZ31B-H24 Mg alloy, Heat input

1. 서 론

마찰교반용접법(Friction Stir Welding,이하 FSW)은 1991년 영국 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 신개념의 고상용접법으로 기존의 용융용접법으로는 용접부내에 결함이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 없었던 알루미늄 합금에 적용하여 우수한 용접부 특성을 얻을 수 있었다[1-3]. FSW 공정은 특수하게 설계된 용접툴(tool)을 소정의 회전수로 회전시키면서 용접하고자 하는 재료의 용접라인에 삽입하여 용접에 필요한 마찰열과 소성변형을 유도한다. 그 후 용접라인을 따라 툴을 이동시킴으로서 용접이 이루어지는 매우 간단한 공정이다[4]. FSW 공정에서는 용가재, 보호가스(shielding gas) 및 고비용이 드는 용접 전 후 과정이 생략되기 때문에 생산비 절감의 효과를 가져올 수 있다[5,6]. 이러한 장점을 이용하여 국외의 경우 이미 거대한 알루미늄 구조물, 예를 들면 로켓의 외부 연료 탱크[7], 철도 차량[8], 고속여객선[9], 알루미늄 교량[10] 등에 FSW가 적용되고 있다. 그 동안 FSW에 대한 연구는 주로 알루미늄 합금에 적용되어 왔으나, 최근 경량 구조용 재료로 주목받고 있는 마그네슘 합금에 대한 FSW 연구는[11,12]는 매우 적은 실정이다.

마그네슘 합금은 저밀도, 고비강도, 우수한 주조성 및 재활용성 등 많은 우수한 기계적인 특성을 가지고 있어 미래 알루미늄을 대체할 수 있는 경량 재료이지만 마그

네슘 합금의 용접에는 많은 문제점이 있기 때문에 구조 용재료로서 적용시키기에는 여전히 많은 문제를 가지고 있다[13,14]. 최근 마그네슘 합금은 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding, TIG) 및 GMAW(Gas Metal Arc Welding, MIG)등 아크를 이용한 용접법으로 접합을 하고 있다. 그러나 우수한 용접속도를 얻을 수 있지만 높은 용접 잔류응력, 용융 및 재응고 과정에 동반한 용접부의 조직 변화 등의 문제점을 야기할 수 있다[15]. 그 외에 레이저용접(Laser welding) 혹은 전자빔용접(Electron beam welding)을 이용하여 용접을 할 수도 있지만 고비용 및 용접부내의 취약한 조직 및 기공의 존재 등이 문제되고 있다[15]. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 고상용접법인 FSW를 이용하면 해결이 가능하다.

FSW를 이용하여 알루미늄 합금을 용접하는 경우 툴의 형상, 재료, 전진각(tool angle) 및 용접변수 등이 어느 정도 밝혀지면서 알루미늄 합금의 응용기술을 한층 향상시키고 있다. 그러나 마그네슘 합금의 용접의 경우 적정한 용접조건 및 용접변수에 대한 정보가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 보고된 용접조건 및 용접변수[16-17]를 고려하여 마그네슘 합금의 FSW특성에 미치는 용접인자의 영향을 조사하였다. 또한 용접계면에서 관찰되는 결함의 분포 및 크기가 FSW용접부의 용접강도에 미치는 영향도 검토하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 쓰인 마그네슘 합금은 시중에서 구입할 수 있는 AZ31B-H24으로서 길이 170mm, 폭 70mm, 두께 4mm 인 판재를 이용하였다. 본 실험에 쓰인 재료의 화학적 조성 및 기계적인 특성을 Table 1 및 Table 2에 각각 나타냈다. 본 실험에 사용된 마찰교반용접기는 상업적으로 널리 쓰이는 밀링 머신에 특수하게 제작한 지그(Jig) 및 툴을 회전축에 삽입하였고, 탄소강으로 제작한 backing plate를 시편 고정에 사용하였다. 용접변수 즉 전진각(tool angle, 용접 하고자하는 시편과 툴이 이루는 각도), 툴 회전수, 용접속도는 이미 보고된 연구자들의 마찰교반용접 조건을 고려하여 선정하였고 자세한 조건은 Table 3에 나타냈다.

Table 1 Chemical composition of AZ31B-H24 Mg alloy

Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Ca	Mg
2.5-3.5	0.2	0.7-1.3	0.05	0.05	0.005	0.005	0.04	Bal.

Table 2 Mechanical properties of AZ31B-H24 Mg alloy

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
293MPa	222.7MPa	13%

용접부 근방의 미세조직을 관찰하기 위해 광학현미경을 이용하였으며 조직 관찰을 위해 SiC paper2000번까지 연마를 한 후 0.3㎛ 알루미나 파우더를 이용하여 미세연마를 하였다.

조직관찰을 위해 사용된 부식액은 초산(acetic acid) 5mml, 피크릭 산(picric acid) 5g, 증류수 100ml, 에탄올 70ml를 이용하였다. 용접부내의 결함의 크기를 관찰하기 위해 image analyzer를 이용하였다. 파단면 관찰은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy)을 이용하였으며 파단면 원소 분석을 위해 EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)를 이용하였다. 용접변수에 따른 기계적인 특성 평가를 위해 인장시험 및 경도시험을 행하였다. 인장시험은 Instron 만능 시험기를 이용하여 상온에서 1.67×10^{-3} mm/sec의 속도로 시험하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 용접중심부에 수직방향으로 하중 100g, 시간 10sec를 주어 행하였다.

Table 3 Friction stir welding parameters

Tool material	STS11
Tool angle	3°
Rotation speed	1600 rpm
Welding speed	87i-507 mm/min

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접조건에 따른 용접부의 조직

툴 회전속도를 1600rpm으로 일정하게 유지시키고 용접속도를 변화시켜 용접한 후의 용접부 표면(top surface) 및 이면(rear surface) 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 표면 및 이면 모두 용접속도의 변화에 관계없이 매우 평활한 양상을 나타내고 있으며 표면 결함은 관찰되지 않았다.

Fig. 2는 일정한 툴 회전속도 1600rpm에서 용접속도를 증가시킨 경우, 용접부의 단면 거시조직을 나타내었다. 용접 툴 과 시편의 마찰 교반작용에 의해 반 타원형 형상의 용접부가 형성됨을 알 수 있다. 이는 위부분(upper surface)이 용접도중 원형의 툴과의 접촉에 의해 극심한 마찰열 및 소성변형을 받아 아래 부분

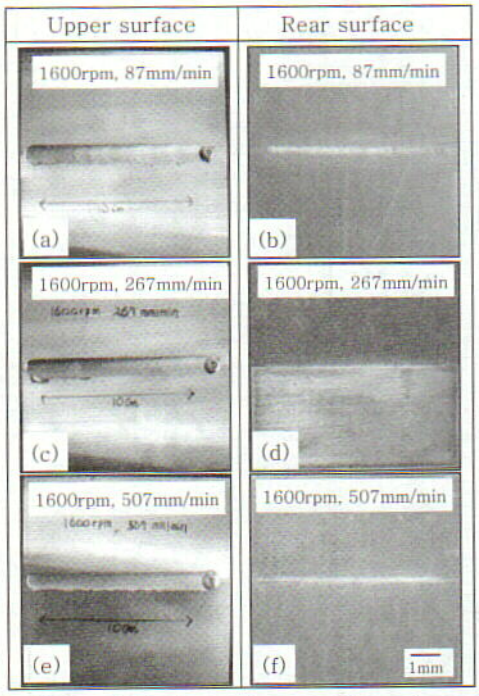

Fig. 1 Photos of the top and rear surface of as welded specimens. (a)and (b) 87mm/min, (c) and (d) 267mm/min, (e) and (f) 507mm/min

(lower surface)에 비해 넓기 때문이다. Sato 등에 의하면 마찰교반용접부의 형상은 용접하고자하는 재료의 열전도도 및 용접조건(전진각)에 따라서 타원형, 반원추형등으로 형성된다고 한다[18]. 열 및 기계적인 영향부의 경우 툴의 회전과 관련해 일정한 방향성을 가지며 거시적으로 극심하게 변형된 조직을 나타내고 있음을 알 수 있다.

용접조건의 변화에 따른 용접부 면적의 변화를 관찰한 결과, 용접속도가 증가할수록 용접부의 면적이 약간 좁아지는 경향을 나타내고 있으며 이와 같은 결과는 용접속도가 증가할수록 용접부의 온도가 감소하기 때문이다. 또한 용접부 표면에서 없었던 결함들이 관찰되고 있다. 결함의 대부분은 교반부 혹은 교반부와 열 및 기계적인 영향부의 경계부에 존재하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결함의 원인은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 그 주요 원인의 하나는 용접도중 용접 툴과 용접하고자 하는 마그네슘 합금사이에 불충분한 입열에 의해 용접부의 온도가 충분히 상승하지 않기 때문이라 생각된다. 마찰교반용접에 있어서 용접부의 온도는 재료의 소성변형을 일으킬 수 있는 온도까지 충분히 가열될 필요가 있다. 용접부에 있어서 용접길이당 입열은 마찰발열량(Q)/접합속도(V)로서 간단히 표시할 수 있으며 Q는 툴 회전속도에 비례하고 용접속도에 반비례한다[11]. 툴 회전속도가 일정하고 용접속도가 증가하는 경우 Fig. 2에 나타냈 듯이 입열량의 감소로 인해 재료

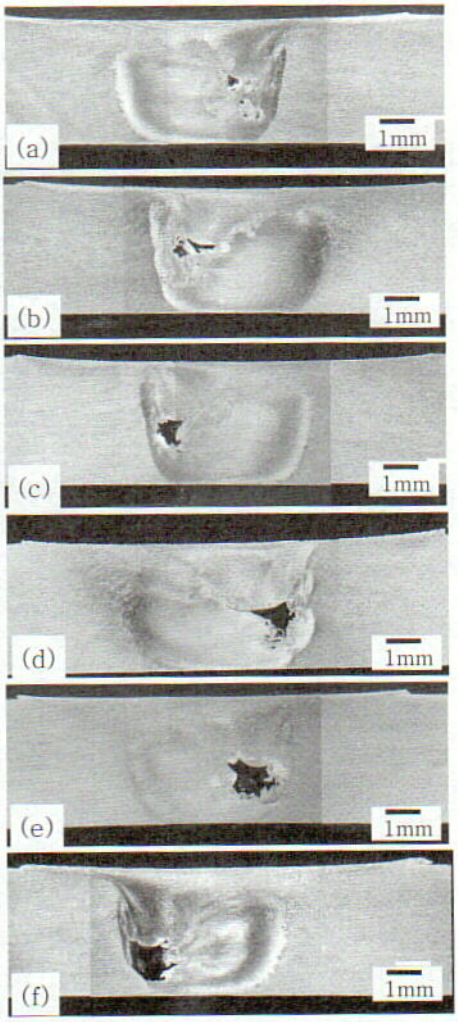

Fig. 2 Macrostructures of weld zone at various welding speeds. (a) 87mm/min, (b) 127mm/min, (c) 187mm/min, (d) 267mm/min, (e) 342mm/min, (f) 507mm/min

의 충분한 소성유동이 발생되지 않아 교반부 내부의 결함 분율이 증가한다.

일반적으로 교반부와 열 및 기계적인 영향부 경계는 툴의 회전방향과 용접방향이 일치하는 쪽(advancing side, flowing side)과 일치하지 않은 쪽(retreating side, shearing side)로 나눌 수 있다. Retreating side의 경우, 툴의 회전방향과 접합재료사이에 advancing side에 비해 더 큰 전단력의 작용으로 인해 결함의 발생 확률이 높고 결함 또한 이 곳에 집중된다[11]. 이러한 전단력의 작용이 용접부 결함발생의 다른 원인이 된다고 사료된다. 따라서 마찰교반용접부내 결함이 발생하지 않게 하기 위해서는 충분한 입열이 용접부에 가해져야 하며 입열량은 용접툴 형상을 설계하는데 있어서 매우 중요한 인자라 생각된다.

Fig. 3은 툴 회전수 1600rpm, 용접속도 267mm/min

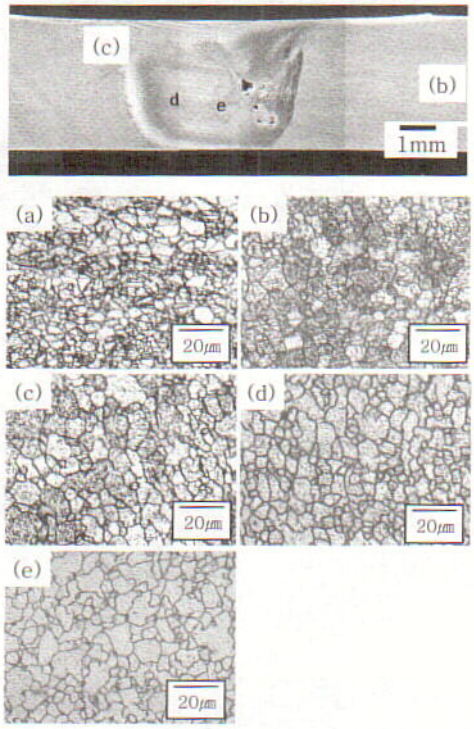

Fig. 3 The optical microstructures of friction stir welded joint at 1600rpm, 267mm/min. (a) Base Metal, (b) HAZ, (c) TMAZ, (d) and (e) SZ

인 경우, 용접부근방 및 모재의 미세조직을 나타냈다. 알루미늄 합금의 FSW의 경우[19]와 마찬가지로 마그네슘 합금의 FSW부도 교반부(Stir Zone, SZ), 열 및 기계적인 영향부(Thermo-Mechanical Affected Zone, TMAZ)와 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)로 분류된다. AZ31B-H24의 모재의 결정립은 열간압연 및 어닐링 처리로 인해 미세하며 부분적인 재결정에 의한 등축(equaxied)정 및 압연 방향에 따른 조직이 관찰된다. 또한 결정립내부에는 쌍정(twin)조직이 있음을 확인 할 수 있다. 교반부의 경우, 거시적으로 매우 불균일한 조직을 나타낸 부분을 확대 해 본 결과, 충분한 재결정이 진행되지 않아 결정립내부에 미세한 변형조직들이 형성된 부분(d)과 재결정이 완전히 이루어져 결정립 내부에 변형조직이 사라진 부분(e)으로 나뉨을 알 수 있다. 열 및 기계적인 영향부는 툴의 회전과 관련해 일정한 방향성을 가지며 모재에 비해 연신된 조직을 나타내고 있다. 열영향부의 경우, 모재와 거의 유사한 조직을 나타내며 용접열에 의해 모재에 비해 결정립이 약간 조대화되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 용접속도의 변화에 따른 교반부의 미세조직을 나타냈다. 교반부의 결정립크기는 모재의 경우(약 9.55㎛)에 비해 약간 미세해짐을 알 수 있으며 쌍정등

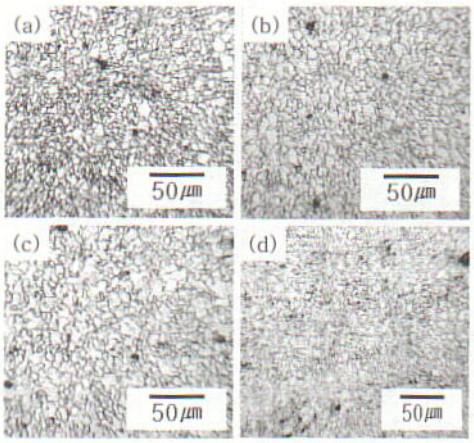

Fig. 4 The optical microstructures of stir zone: (a) 87mm/min, (b) 127mm/min, (c) 187mm/min, (d) 507mm/min

변형된 조직들이 사라지고 거의 등축정들이 생성된다. 이는 툴과 용접하고자 하는 재료의 접촉에 의한 마찰열(frictional heat)과 소성변형(plastic deformation)이 동반하여 발생한 동적재결정(Dynamic recrystallisation)이 일어났기 때문이라고 생각된다[20].

Fig. 5는 용접속도의 변화에 따른 교반부의 결정입도의 변화를 나타냈다. 용접속도가 증가함에 따라 결정입도가 8.5-5㎛로 감소함을 알 수 있으며 용접속도 507mm/min의 경우, 모재에 비해 약 1/2배정도 작아짐을 알 수 있다. 이와 같은 교반부의 결정립의 미세화는 앞서 언급했던 용접속도의 증가에 따른 입열량의 감소의 결과라 생각된다.

3.2 용접부의 경도 분포

Fig. 6에 툴 회전속도 1600rpm, 용접속도 87mm/min의 경우, FSW접합부 근방의 경도값 분포를 나타냈다. 용접중심부 근방은 모재에 비해 연화된 영역으로 약

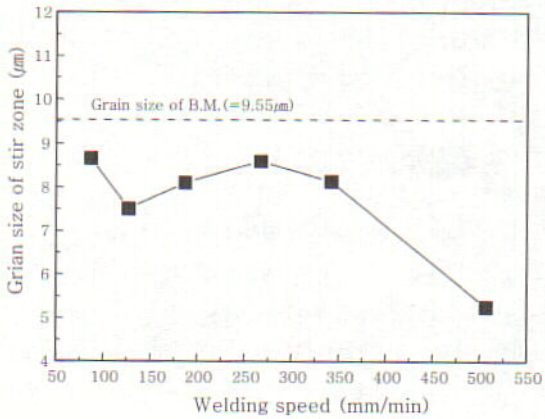

Fig. 5 The grain size distribution of stir zone at various welding speeds.

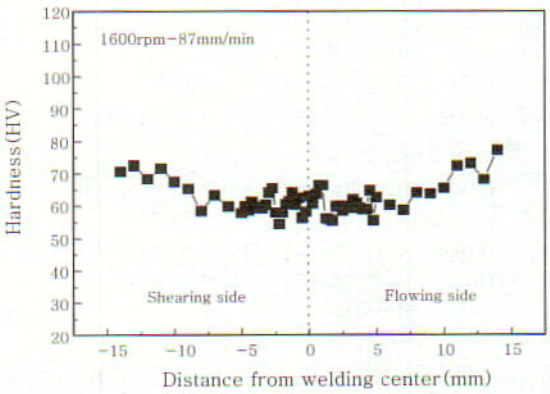

Fig. 6 The hardness distribution of near weld zone at 1600rpm, 87mm/min

60HV 정도의 경도값을 나타내며 모재의 경도값에 비해 약 85%정도이다. 이는 마찰열 및 소성변형에 의해 재결정이 일어나 모재에 존재하는 가공 조직들이 사라졌기 때문이라 사료된다. 교반부 내부의 경도값이 분포가 불균일한 것은 마크로 조직사진에서와 같이 완전 재결정이 일어난 부분과 부분적으로 재결정이 진행된 부분으로 이루어 졌기 때문이라 생각된다.

3.3 용접부 강도에 미치는 용접속도 및 용접부 내부 결함의 영향

Fig. 7은 툴 회전속도 1600rpm에서의 용접속도의 변화에 따른 용접강도 및 용접부 내부 결함의 비율(결함의 면적/교반부의 면적)의 관계를 나타냈다. 용접속도가 증가할수록 전체적으로 인장강도 값이 감소함을 알 수 있으며 입열량이 가장 높다고 예상되는 용접속도 87mm/min의 경우, 인장강도 값이 219MPa로 가장 높게 나타나고 있다. 그러나 용접부내의 결함으로 인해 모재 인장강도(293MPa)의 약 75% 정도였다. 용접속도 187mm/min 이상에서는 200MPa 이하의 매우 낮은 인장강도를 나타내고 있다. 용접부의 결함비율도 용접속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며 용접속도 87mm/min의 경우, 약 1% 미만이지만 342mm/min의 경우, 5%이상임을 알 수 있다. 따라서 입열량의 부족으로 인한 결함의 존재가 접합강도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 항복강도의 경우, 모든 용접조건에서 결함의 존재로 인해 모재에 비해 매우 낮았다.

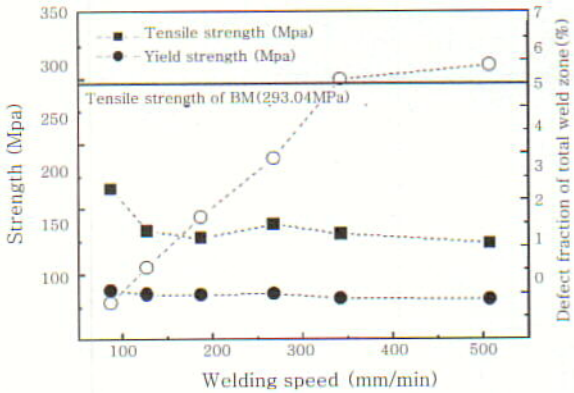

Fig. 7 The effects of welding speed on the joint strength and defect fraction of total weld zone (O)

Fig. 8은 SEM을 이용하여 용접부의 파면을 관찰한 사진으로, 파면은 크게 접합이 약하게 이뤄진 부분 또는 전혀 이뤄지지 않은 부분(weak bonded region or un-bonded region, (b))과 완전히 이뤄진 부분(bonded region, (c))으로 구성된다. 접합이 완전히 이뤄진 부분의 경우, 연성파괴의 전형적인 양상인 딤플(dimple) 파단의 형상을 관찰 할 수 있으며, EDX 분석결과 산화물은 검출되지 않았다. 그러나 약하게 결합된 부분의 경우 취성파괴의 경향을 보이고 있으며 용접도중의 산소의 흡착으로 인하여 산화물이 생성되어 용접부강도에 나쁜 영향을 미친다고 생각된다.

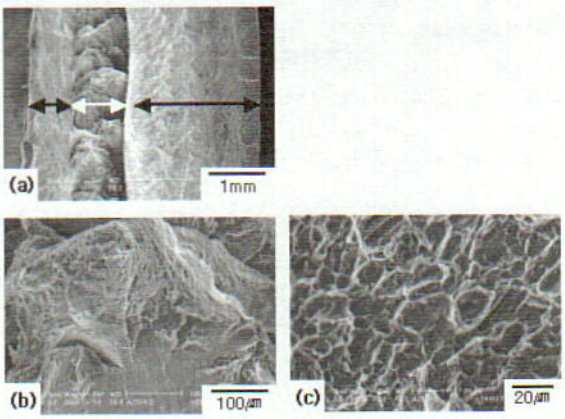

Fig. 8 SEM images of the fracture surfaces at 1600 rpm, 267mm/min. (a) low magnification of the fracture surface, (b) weak bonded region (c) bonded region

4. 결 론

마찰교반용접법을 이용하여 일정한 툴 회전속도 1600rpm에서 용접속도를 87-507mm/min로 변화시켜 용접한 후, AZ31B-H24 마그네슘 합금의 FSW부의 용접강도에 미치는 용접인자 및 용접부 결함을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) FSW부의 표면 및 이면에서는 모든 용접조건에서 결함이 발생하지 않았으나 교반부 내부에서는 입열량 부족에 기인되는 결함이 존재하였다. 결함의 크기는 용접속도가 증가함에 따라 증가하였다.

2) 교반부는 툴 과 재료간의 직접적인 접촉에 의한 동적재결정이 부분적으로 발생하여 모재의 결정립에 비해 미세해짐을 알 수 있었으며 교반부의 결정립크기는 용접속도가 증가함에 따라 작아졌다.

3) 교반부의 경도값은 모재에 비해 약간 감소하였으며, 교반부 내부는 균일하지 않은 미세조직으로 인해 경도값이 불균일하였다.

4) 마찰교반용접부의 용접강도는 용접속도가 증가함에 따라 감소하였는데 이는 용접속도의 증가에 따른 교반부내의 결함 분율의 증가와 밀접한 관련이 있었다. 반면, 용접속도가 느린 87mm/min 경우, 비교적 높은 값을 나타냈으며 이는 모재강도의 약 75%이었다.

참 고 문 헌

1. C.J.Dawes: Welding and Metal Fabrication, 63 (1995), 13-16.2. W.M.Thomas and E.D.Nicholas: Mater. Des., **18** (4-6) (1997), 267-273
3. M.B.Ellis and M.Strangwood: Mater. Sci. Technol., **12** (1996), 970-977
4. C.J.Dawes and W.M.Thomas: TWI Bulletin, **6** (1995),138
5. C.J.Dawes and W.M.Thomas: Weld. J., **75** (1996), 41-45
6. E.D.Nicholas: Proc. IACC-6, The Japan Institute of light metal, Toyohashi, Japan, **1** (1998), 139-151.
7. M.R.Johnsen: Weld. J., **78** (1999), 35-39
8. H. Okamura, K. Aota, and M.Ezumi: J. Jpn. Inst. Light Met., **50** (2000), 166-171
9. S.Kallee, D.Richardson and I.Henderson: Schweissen Schneiden (Welding cutting), **36** (1997), 69-75
10. O.Kluken and M.Ranes: Svetsaren, **3**(1995), 13-15.
11. K.Nakata, S.Inoki, Y.Nafano, T.Hashimoto, S.Jorgan and M.Ushio: J. of Jpn. Inst. of Light Met., **51**(10) (2001), 528-533
12. W.B.Lee, Y.M.Yeon, Shae.K.Kim, Y.J.Kim and S.B.Jung: Proc. of Magnesium Technology 2002, TMS, Seattle, USA,(2002), 309-312
13. B.L.Mordike and T.Ebert: Mater. Sci. and Engineering, **A302** (2001), 37-45
14. A Munitz, C.Cotler, A.Stern and G.Kohn: Mater. Sci. and Engineering, **A302** (2001), 68-73
15. S.A.Lockyer and M.J.Russell: Third International Symposium on Friction Stir Welding, September, (2001), Kobe, Japan
16. T.Kitahara, K.Katoh and H.Tokisue: 溶接學會全國大會講演概要, 第68集 (2001-4), 132-133 (in Japanese)
17. K.Nakata, M.Ushio, S. Inoki, M.Yakushiji, S.Jyogan and T.Hashimoto: 溶接學會全國大會講演概要, 第68集 (2001-4), 134-135 (in Japanese)
18. Y.S.Sato, H.Kokawa, M..Enomoto and S.Jorgan: Metall.Mater.Trans.A, **30A** (1999), 2429-2437
19. Yun-Mo Yeon, Won-Bae Lee and Seung-Boo Jung: J. of KWS, **19-6** (2001),584-590
20. K.V.Jata and S.L.Semiatin: Script mater., **43** (2000), 743-749