

특집 : 마찰 교반 접합

Friction Stir Welding을 이용한 마그네슘 합금의 접합

이원배 · 연운모 · 서창제 · 정승부

Bonding of Magnesium Alloys by Friction Stir Welding

Won-Bae Lee, Yun-Mo Yeon, Chang-Chae Shur and Seung-Boo Jung

1. 서 론

최근, 영국의 TWI에서 Friction Stir Welding (FSW, 마찰교반접합)이라는 신개념의 고상접합법이 개발된 이래, FSW는 철도차량, 선박 및 우주항공기 등 수송기기분야의 Al합금의 접합에 활발히 적용되고 있다^{1,7)}. FSW의 기본적인 공정은 재료에 따라 특별한 형상으로 제작된 비소모성 tool을 접합하고자 하는 두 재료의 접합면에 삽입한 후 tool의 회전력에 의해 피접합재의 소성유동 및 마찰열을 발생시키면서 회전하는 tool이 접합라인을 따라 이동하여 접합이 이루어진다. FSW접합성은 종래의 용융용접방법의 경우에 비해 우수하여 향후에는 경량화가 요구되는 분야에서 Al합금 이외에 Mg합금이 사용되는 산업분야로도 적용이 확대되어질 것으로 기대되고 있다.

마그네슘(Mg)합금은 실용적인 금속재료 중에서 가장 경량으로 비강도 및 비강성이 높고 주조성이 우수하여 가전제품, 자동차부품 및 의료복지기구 등의 분야에서 주로 사용되고 있으며 수지계 재료에 비해 리사이클도 용이하고 환경문제도 적으므로 근래 많은 관심을 받고 있다. 그러나 Mg합금은 매우 활성이므로 종래의 용융용접방법으로 용접하는 경우, 전처리, 분위기 제어 등이 필요하며 용접변형 및 용접결함이 생기는 문제점등이 있어 용접시 주의를 요한다고 알려져 있어⁸⁻¹⁰⁾ FSW에 의한 접합이 시도되고 있다. FSW에 관한 보고는 주로 알루미늄 합금에 관한 것으로 Mg합금에 대한 보고¹¹⁻¹⁵⁾는 매우 적지만 본 보고에서는 이제까지 보고된 Al-Zn계 Mg합금의 접합부 조직, 기계적 성질 및 접합인자를 중심으로 검토하였다.

2. 접합부 조직

Fig. 1¹²⁾은 AZ91D Mg합금의 용접속도변화에 따른 FSW부의 표면 및 X선 투과사진을 나타낸다. 용접

속도가 느린 경우(50mm/min)에는, 용접결합이 없는 건전한 접합부를 나타내지만 용접속도가 증가함에 따라 접합부표면이 거친 상태로 되고 접합부에 터널상의 결함이 발생한다. 이러한 경향은 AZ31 Mg합금¹³⁾ 접합부에서도 나타난다. 대표적인 Mg합금 FSW부 단면 조직사진 Fig. 2¹¹⁾에서 알수 있듯이 Mg합금 모두에서 Al합금의 FSW부와 거의 유사한 형태의 접합부가 형성되어 있음을 알 수 있다. 즉, 접합부 중앙으로부터 (a)마찰교반부(Stir Zone), (b)열-기계적인 영향부(Thermo-Mechanical Affected Zone), (c)열영향부(Heat Affected Zone)가 형성되며 그 주위에 (d)모재(Base Metal)가 존재하게 된다. Fig. 3¹²⁾은 반응용 가압법(Thixomolding)으로 제조된 AZ91D Mg합금 FSW부의 대표적인 단면조직사진을 나타냈다. 편이 통과한 SZ영역(b)에서는 조직이 편이 회전 에 의해 교반혼적(Al합금의 경우, onion ring 또는

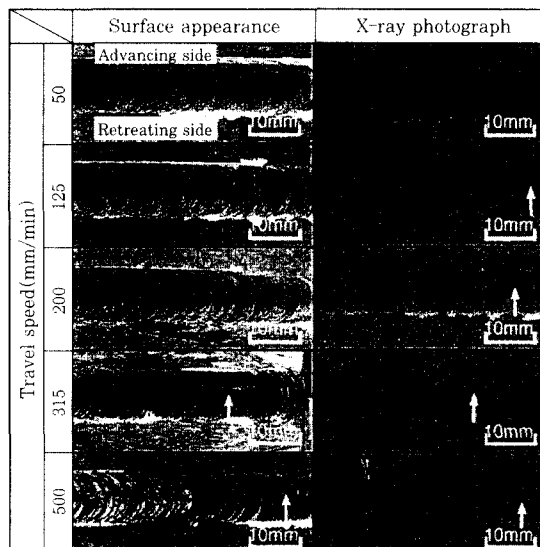


Fig. 1 General appearances and X-ray photographs of AZ91D FS Welds at constant tool rotating speed, 1240rpm

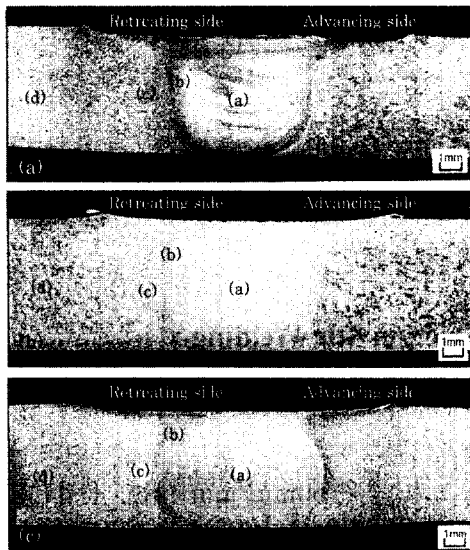


Fig. 2 Macrostructure of FSW (a)AZ31 (1500rpm-1000mm/min) (b)AZ61 (1500rpm-200mm/min) (c)AZ91D (1000rpm-50mm/min)

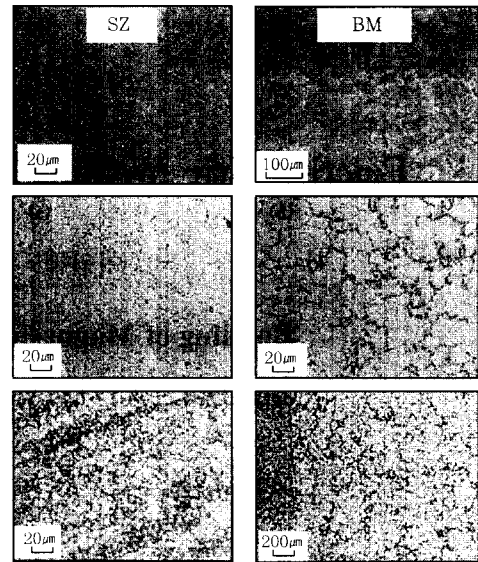


Fig. 4 Micro structure of FS Welds and Base Metal (a)(b) AZ31 (c)(d) AZ61 (e)(f) AZ91D

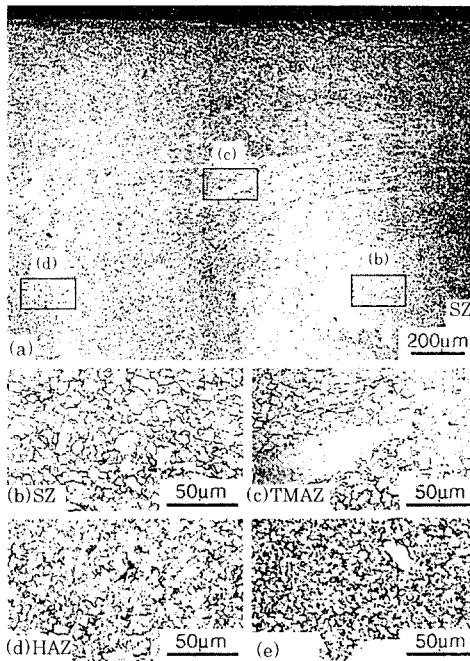


Fig. 3 Microstructure of cross section of FSW joint at tool rotating speed 1750 rpm and travel speed 50mm/min

flow line이라 칭함)이 존재하며 10µm이하의 미세한 결정입경이 형성된다. TMAZ부(c)에서는 shoulder 및 pin의 기계적인 교반작용에 의해 소성변형이 일어나 모재의 조직에 비해 연신된 결정조직이 형성되며 그 주위에 HAZ(d) 및 모재(e)가 존재하게 된다.

SZ부의 조직을 모재와 비교하여 Fig. 4¹¹⁾에 나타내었다. 모든 Mg합금에서 SZ부는 모재에 비해서 미세

		Travel speed(mm/min)		
		50	125	200
Tool rotating speed (rpm)	1750		—	—
	1240			
	880		—	—

Fig. 5 Effects of tool rotating speed and welding speed on microstructure of SZ in AZ91D

화됨을 알 수 있다. Al합금의 FSW부와 유사하게 각 Mg합금 FSW부의 SZ부는 모재에 비해 매우 미세한 등축 결정립이 형성되는 것은 마찰교반작용 중 발생하는 마찰열과 소성변형에 의해 비교적 짧은 시간내에 동적 재결정이 생기기 때문이다. AZ91D의 경우, 모재에서 dendrite가 발달된 전형적인 응고조직을 보이고 있으며 sub-grain boundary 내에 조대한 β상(Mg₁₇Al₁₂)이 존재하게 된다. SZ부내의 결정립 크기는 용접속도 및 회전수에 따라 변화되는 것을 Fig. 5¹²⁾을 통하여 알 수 있다. 즉, 마찰열이 큰(용접속도가 느리고 tool의 회전수가 빠른)경우, 재결정립의

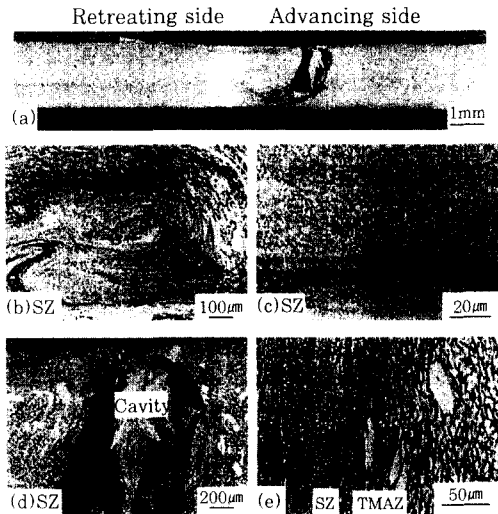


Fig. 6 Macro and microstructure of cross-section of Thixomolded AZ91D FSW joint at tool rotating speed 1240rpm and travel speed 500mm/min

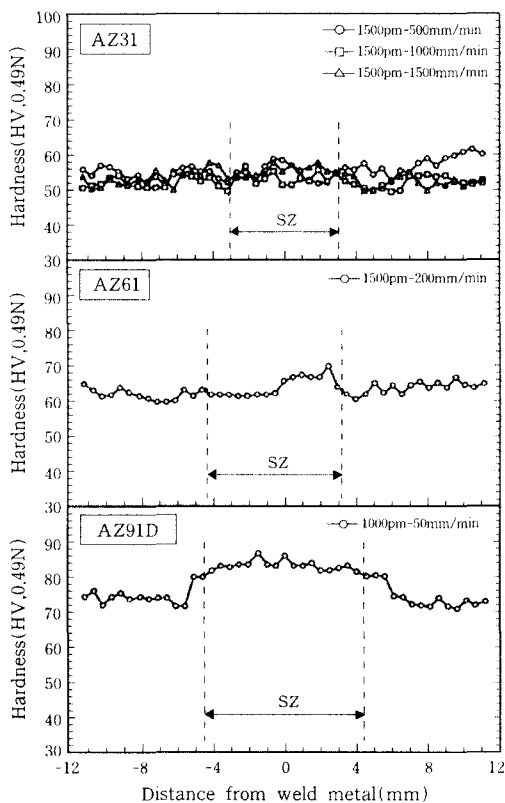


Fig. 7 Hardness profile of Mg alloys at each tool rotating speed and welding speed

성장이 촉진 되어 조대해지는 경향을 보이며 동일한 회전수에서도 용접속도는 빠를 경우 미세화된다.

Fig. 6¹²⁾에 AZ91D합금의 FSW부의 결합형태를 나타내었다. 결합은 주로 기공의 형태로써 용접방향과 tool의 회전방향이 일치하는 advancing side에서 발

생하는데 이는 마찰열에 의한 온도상승이 낮아 소성유동이 충분히 생기지 않기 때문이다.

3. 접합부의 경도변화

Mg합금의 FSW부의 경도분포를 Fig. 7^{11,15)}에 나타내었다. AZ31합금의 경우, 모재 및 FSW부의 경도변화는 거의 없으며 AZ61합금의 경우, AZ31합금의 경우와 같이 접합부 전체의 경도변화는 거의 없지만 SZ의 경도는 일부에서 모재에 비해 약간 상승한다. 주조재인 AZ91D합금의 경우는 다른 합금에 비해 경도값의 변화가 현저하며 SZ부의 폭이 넓게 형성되는 것은 이는 회전수와 용접속도가 느려 접합부 조망에 마찰열이 증가하기 때문이다. 또한, 모재 및 HAZ에 비해 약 20 HV증가한다. 이는 모재 및 HAZ는 조대한 응고조직이지만 SZ의 경우 pin의 교반작용에 의해 미세한 재결정조직 및 β 상의 미세분산 때문이다. 이상에서와 같이 Mg합금의 FSW부에서는 용융용접시 문제가 되는 용접부의 연화현상은 관찰되지 않았다.

4. 접합인자의 영향

Fig. 8^{11,12)}과 같이 외관검사 및 X선 투과 시험을 통해 Mg합금 FSW부의 표면상태 및 결합유무를 조사하여 건전한 접합부를 얻을 수 있는 적정 FSW조건범위를 알 수 있다. Mg합금의 FSW부 결합은 Al합금과 마찬가지로 회전수가 비교적 낮고 용접속도가 빠른 경우, 주로 발생한다. 일반적으로 FSW부의 온도는 재료가 충분히 소성유동 일어날 수 있는 온도까지 상승시켜 접합할 수 있을 만큼 마찰열이 발생하여야 하며 이때 접합에 필요한 마찰열은 tool의 회전 속도와 비례한다¹⁴⁾. 따라서 회전수가 빠르고 용접속도가 느린 경우, 충분한 마찰열이 발생하므로 건전한 접합부를 얻을 수 있게 된다. Mg합금의 접합계면에서의 결합은 주로 용접도중 발생하는 마찰열에 의한 소성유동의 정도 및 tool과 피접합재의 전단작용에 기인한다고 할 수 있다.

AZ31합금(Thickness, 5t)의 경우, 건전한 접합부를 얻을 수 있는 용접범위가 가장 넓고 FSW성이 우수하며 용접속도는 레이저 용접과 비슷한 1500mm/min의 고속용접도 가능하다. AZ61합금(Thickness, 5t)의 경우도 용접속도는 200mm/min 정도이내에서 양호한 FSW성을 나타내는데 이 용접속도는 GTAW의 경우와 거의 비슷하다. Al이 가장 많이 첨가된 AZ91D합금(Thickness, 5t)의 경우, 적정 용접범위가 매우 좁아 용접속도는 최고 50mm/min 정도이다.

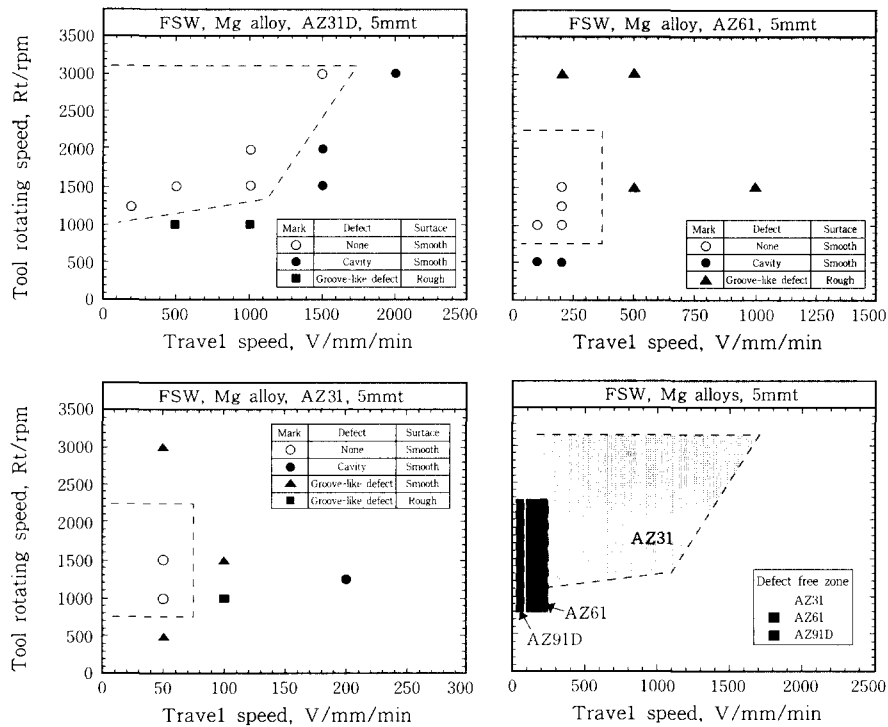


Fig. 8 FS Weldabilites of AZ31, AZ61 and AZ91D Mg alloys

GTAW용접하는 경우, 다수의 기공이 발생하며 용접이 곤란하다고 알려져 있으나 FSW기술을 이용한 경우, 결함이 없는 접합부를 얻을 수 있다. 또한 반응용가압법으로 제조된 AZ91D(Thickness, 2t)의 경우¹²⁾도 AZ91D 합금과 유사한 범위에서 적정 용접범위를 얻을 수 있다. AZ계 Mg합금의 경우, Al 첨가량이 증가하면 강도가 증가하지만 반대로 연신율은 감소한다. 또한, Al이 약 6%이상 첨가되면 β상(Mg₁₇Al₁₂)이 형성되어 재료의 소성변형성을 감소시킨다. 주조재의 경우, 결정입계에 다량의 금속간화합물이 정출되어 연성이 감소한다. 따라서 이러한 AZ91D합금의 경우,

건전한 접합부를 나타내는 FSW범위는 모재의 기본적인 특성에 의해 결정된다.

5. 접합부의 인장강도, 충격강도 및 이종 재료와의 접합

Mg합금 FSW부의 기계적 특성을 GTAW의 경우와 비교한 결과를 Fig.9에 나타내었다¹¹⁾. FSW를 행한 AZ31합금 및 AZ61합금의 경우, 인장강도는 모재의

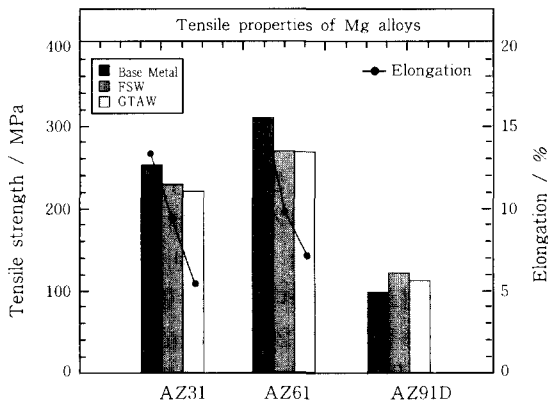


Fig. 9 Tensile strength and elongation of FSWelded AZ31, AZ61, AZ91D Mg alloys relative to GTAW

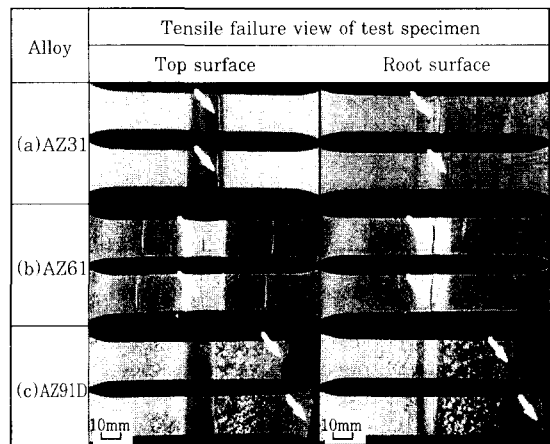


Fig. 10 Fracture location after tensile test of FSWelded AZ31, AZ61, AZ91D Mg alloys (a) 1500rpm-1000mm/min (b) 1500rpm-200mm/min, (c) 1000rpm-50mm/min

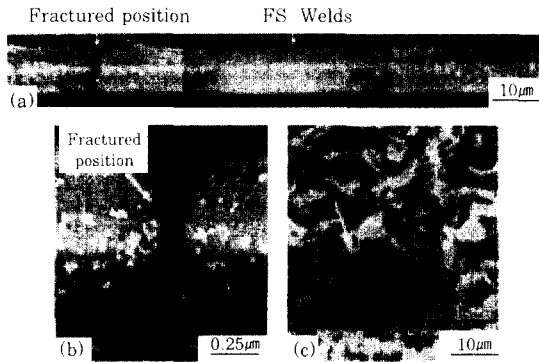


Fig. 11 Macrostructure of cross section of FS Welds after transverse tensile test and fracture surface at base metal

약90%정도로 GTAW의 경우와 거의 유사한 값을 나타내지만 연신률은 GTAW의 경우에 비해 우수하다. 인장시험후의 파단위치는 Fig. 10에 나타내듯이 AZ31 합금의 경우, HAZ 및 SZ 영역 근방이며 AZ61합금의 경우는 SZ영역에서 파단됨을 보여준다. AZ91D합금의 경우는 모재에서 파단될 정도로 접합성이 우수하다. Fig. 11¹²⁾에 반응용가압법으로 제조된 AZ91D합금의 FSW부의 인장시험후의 단면 및 파면을 나타내었다. 파단면(a,b)에 알수 있듯이 모재파단임을 알 수 있으며 모재파면에서는 블로홀(Blow hole)과 같은 구조결함이 존재하기도 한다.

AZ31, AZ61 및 AZ91D합금 FSW부의 충격 흡수 에너지를 GTAW의 경우와 비교한 것을 Fig. 12¹¹⁾에 나타내었다. FSW로 접합했을 경우, SZ부의 충격 흡수 에너지는 어떠한 Mg합금의 경우에도 GTAW 용접

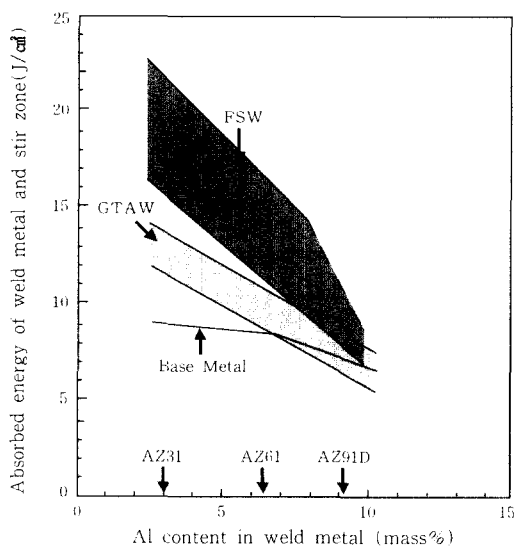


Fig. 12 Comparison of absorbed energy of FS Welded AZ31, AZ61, AZ91D Mg alloys and GTAW joints

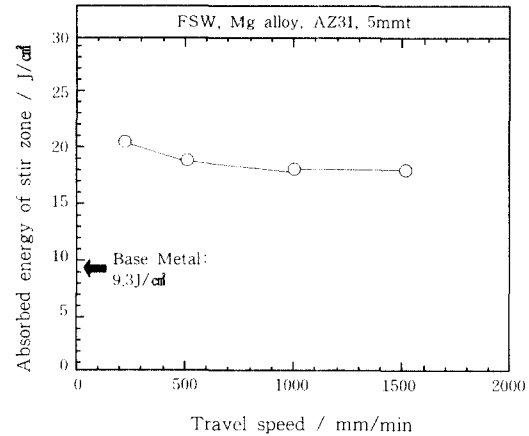


Fig. 13 Relation between welding speed and absorbed energy of Stir Zone (AZ31 Mg alloys)

금속 및 모재의 경우에 비해 높다. 또한 FSW, GTAW등 용접방법에 관계없이 Al함유량이 증가할수록 충격 흡수에너지가 감소하는 경향을 나타낸다. 일반적으로 Mg합금의 경우, Al은 주로 고용강화와 β상의 정출물(Mg₁₇Al₁₂)의 분산강화에 의해 강도를 증가시키지만 Al량이 증가함에 따라 역으로 충격치는 감소한다. 또한 압출재에서 가공경화에 의한 충격치는 용체화 및 재결정에 의해서도 감소한다. AZ31합금 및 AZ61합금의 경우, 모재가 GTAW 및 FSW의 접합 경우보다 낮은 것은 이와 같은 이유 때문이다. 또한 GTAW 및 FSW의 차이는 GTAW의 경우 용접부에 응고조직이 나타내며 FSW의 경우는 미세한 재결정조직이기 때문이다. 또한 SZ부의 충격흡수에너지와 용접속도와의 관계를 AZ31합금에 대해 조사한 결과를 Fig. 13에 나타냈다. AZ31합금 SZ의 충격흡수에너지

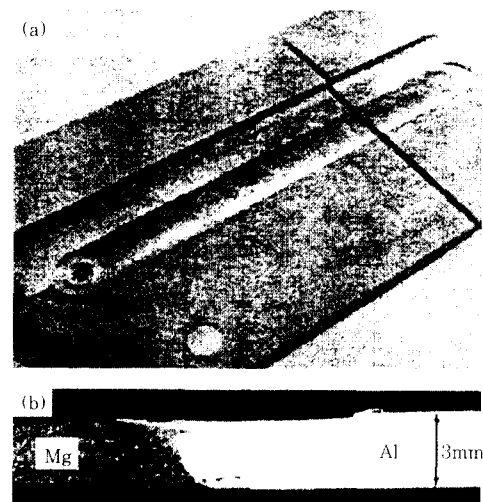


Fig. 14 FS Welded general view and cross-section of Mg alloy (AZ91) to Al alloy (2219Al)

지는 전반적으로 모재의 충격흡수에너지(9.3J/cm²)에 비해 높은 경향을 나타내며 특히 용접속도가 비교적 느린 200mm/min에서는 20.7J/cm²로 모재의 약 2배의 값을 보인다. 용접속도가 증가하면 충격흡수에너지가 약간 감소하는 경향을 나타내지만 용접속도의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

Mg합금과 이종재료의 접합은 매우 광범위하게 이용될 수 있으며 특히 Al합금과의 접합은 실용가능성이 매우 높다. Fig. 14¹⁶⁾는 AZ91합금과 2219Al합금 FSW부의 표면(a) 및 단면(b)상태를 나타낸다. 이러한 이종재료의 FSW부 계면에서는 기존의 접합방법에 의해 금속간 화합물의 결함이 될수 있는 가능성이 적고 따라서 접합특성이 우수하다.

6. 맺는 말

이상에서 기술했듯이 Mg합금의 용접에 있어서 FSW기술을 적용한 경우가 종래의 용융용접법에 비해 용접부 결함이 없는 우수한 특성을 나타낸다. 또한, 주조재 AZ91D합금의 FSW접합범위는 좁으나 압출재인 AZ31 및 AZ61합금의 경우는 그 접합범위가 매우 넓으며 Al합금과의 접합에서도 우수한 접합성을 나타낸다. 따라서, 이제까지 주로 Al합금에 적용되어오던 FSW기술이 향후에는 경량화가 요구되는 산업분야에서 Mg합금의 접합에 적용될 수 있으리라 기대된다.

참고 문헌

1. C. J. Dawes: Welding and Metal Fabrication, 63

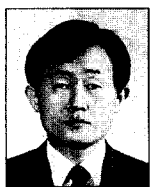
(1995), pp13-16.
 2. C.J.Dawes, W.M. Thomas : Welding Journal, 75-3(1996), pp41-45
 3. C. J. Dawes, W. M. Thomas : TWI Bulletin, 6 (1995), pp124-127.
 4. C. G. Rhode, M.W.Mahoney, W.H.Bingel, R.A. Spurling and C.C.Bampton : Scripta Materialia, 36 (1997), pp69-75.
 5. G. Liu, L.E.Murr, C-S.Niou, J.C.McClure and F.R.Vega: Scripta Materialia 37 (1997),pp 355-361.
 6. Y. S. Sato, H.Kokawa, M.Enomoto and S.Jogan : Metallurgical and Materials Transaction A, 30A (1999), pp2429-2437.
 7. O. V. Flore, C.Kennedy, L.E.Murr, D.Brown, S.Pappu, B.M.Nowak and J.C.McClure: Scripta Materialia, 38 (1998), pp703-708.
 8. 大韓溶接學會 : 溶接·接合便覽(1998)
 9. B. L. Mordike and T. Ebert : Materials Science and Engineering A302 (2001), pp37-45.
 10 A. Munitz: Materials Science and Engineering, A302 (2001), pp68-73.
 11 Young Gon Kim : 大阪大學 碩士學位 卒業論文
 12 K. Nakata, S.Inoki, Y.Nagano, T. Hashimoto, S.Johgan and M.Ushio : 輕金屬 10(2001) pp 528-533
 13 Won-Bae Lee, Yun-Mo Yeon, Shae K. Kim, Young-Jig Kim and Seüng-Boo Jung: Proceeding of 2002 Magnesium Technology(TMS in press)
 14 T. Kitahara, K. Katoh and H. Tokisue : 溶接學會全國大會講演概要 68 (2001-4) pp132-134
 15 K. Nakata, S.Inoki, M.Yakushiji, S.Johgan and T. Hashimoto : 溶接學會全國大會講演 演概要 68 (2001-4)pp134-135
 16 L.K.France, R.Freeman : Procceding of international IMA conference (2001) pp34-37



- 이원배 (李阮培)
- 1973년생
- 성균관대학교 신소재공학과
- 마찰교반접합, 마찰용접
- e-mail : saba38@mail.skku.ac.kr



- 정승부 (鄭承富)
- 1959년생
- 성균관대학교 금속재료공학부
- 마이크로 접합, 마찰용접, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.ac.kr



- 연운모 (延倫模)
- 1953년생
- 수원과학대학 자동용접과
- 마찰교반접합· 마찰용접
- e-mail : ymyeon@ssc.ac.kr



- 서창제 (徐昌濟)
- 1950년생
- 성균관대학교 금속재료공학부
- Al 표면 개질, Packaging, 마찰교반접합
- e-mail : tromance@hanmail.net