[논문] 열처리공학회지, 제17권 제4호(2004)
J. of the Korean Society for Heat Treatment, *Vol. 17, No. 4, (2004) pp. 230~235*

응력제거 열처리한 Mg-AZ31B 합금 TIG 용접부의 기계적 특성과 미세조직 변화에 미치는 용접조건의 영향

김용길[1] · 정동석[2†] · 배차헌[3]
경남 지방중소기업청[1], *울산기능대학 재료학과[2†], 부경대학교 재료공학부[3]

The Influence of Welding Conditions on Mechanical Properties and Microstructural Change of TIG Welded Joint in Stress Relief Heat Treated Mg-AZ31B Alloy

Yong-Gir Kim[1], Dong-Seok Chung[2†] and Cha-Hurn Bae[3]
Gyeongnam Regional Office, Small and Medium Business Administration, Changwon, Gyeongnam, Korea[1]
Dept. of Materials, Ulsan Polytechnic College, Ulsan Korea[2†]
Dept. of Materials Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea[3]

Abstract Present work was carried out to investigate the influence of welded conditions, such as welding current, diameter of welding wire on the microstructural change and mechanical properties of TIG welded joint in AZ31B Mg alloy. It was found that good and sound welded joint was achieved in all welding conditions. The grain size decreased with increasing welding current and decreasing diameter of welding wire. Also, the second phases were homogeneously distributed in the grain and grain boundary as decreasing welding current and diameter of welding wire. The β discontinuos precipitates were observed in the welded joint, but this microstructure has not been reported by previous researchs in AZ31B Mg alloy. The hardness value is affected by the existence state of the second phase and the hardness of the welded joint region is lower than the other regions in welded AZ31B Mg alloy. The strength of the welded joint region was influenced by the grain size and has more than 90%, compared to that of ASTM standard specification.

(Received 7 May 2004; accepted 23 June 2004)

Key words: Stess relief heat treatment, TIG, Welding conditions, Welded joint, Mg-AZ31B alloy, Microstructural change, Mechanical properties

1. 서 론

실용 금속 중 가장 경량 소재인 마그네슘 합금은 Al 밀도의 36%, 강보다는 78%정도 낮은 밀도를 나타내고 비강도, 진동감쇠능, 가공성, 전자파 차폐성, 방열성 등의 우수한 특성으로 인해 전자 제품의 케이스, 쉴드재 및 레져, 자동차 산업 등에 각광받고 있으며 최근의 에너지 환경문제의 해결방안으로 기존의 강 및 Al 합금 등의 타 소재를 대체하는 등 그 적용 범위 또한 급격히 확대되고 있다[1,2].

현재 국내에서 주로 이루어지는 Mg소재 관련 제품생산기술은 주로 다이캐스팅 성형공정에 의존하고 있으나 다이캐스팅 법으로서는 제품의 크기와 형상에 한계가 있고 성형공정 특성상 불량 발생 및 후 가공처리에 막대한 비용이 소모되어 가격경쟁력 및 제품 개발에 한계가 있는 단점을 가지고 있다. 또한 외국처럼 대형 제품을 일체화로 한번에 생산할 수 있는 대형 장비가 부족하여 항공우주 및 자동차 산업으로의 적용확대에 큰 걸림돌이 되고 있다[3].

그러나 용접기술의 개발은 대부분의 산업에서 절실히 필요한 기술로서 이를 응용하여 제품의 크기 및 다양성과 기계적 특성을 향상시킬 수 있으며, 대형제품의 생산을 위해서도 중소형 위주의 다이캐스팅기를 보유하고 있는 국내 Mg 산업의 현황에 맞추어 볼 때 용접에 의한 접합 방법은 반드시 개발되어야 할 연구 분야이다.

선진국에서는 이미 Mg 용접기술 개발에 있어서 TIG[4,-6] 뿐만 아니라 Laser[4, 7, 8] 및 전자빔[9]

†E-mail : dongsjeong@kopo.ac.kr

을 이용한 동종 및 이종 합금간의 접합과 마찰교반용접(Friction Stir Welding)[10, 11] 및 GMAW[12] 등을 이용하여 이종재료간의 접합 기술도 개발이 완료되는 등 차세대 선진 기술로서 인식하여 범국가적인 지원으로 기술 수준 및 산업계에 응용 확대 폭 또한 상당한 상태이다.

그러나 국내에서의 Mg합금의 용접에 대한 연구는 첨단 용접접합방법에 대한 연구는 물론이고 TIG 및 MIG 용접방법에 대한 연구마저도 미비한 실정이며, 특히 이들 용접방법을 기초로 한 용접부의 미세조직 및 기계적 특성 등과 관련된 재료학적 측면에서의 연구도 부족한 실정이다. 또한 최근 압출판재로서 다양한 분야에서 사용되고 있는 Mg-AZ31B 합금의 용접에 대한 연구도 거의 진행되지 않은 분야이다.

따라서 본 연구에서는 위에서 언급한 바와 같이 Mg-AZ31B 합금의 용접 기술에 대한 기초적 자료를 확보하기 위하여 압출 판재인 Mg-AZ31B를 이용하여 TIG 용접 시 건전한 용접부 및 우수한 용접부 기계적 성질을 얻기 위한 용접 전류, 용접봉 직경 등 최적의 용접조건과 이들 용접 조건이 용접부의 기계적 특성과 미세조직변화에 미치는 영향을 조사 분석코져 한다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 용접 시험편인 Mg-AZ31B 합금과 사용한 용접봉(AMS4395)인 AZ92A의 조성을 Table 1에 나타내었다. Mg-AZ31B 합금 판재의 표면 오염을 제거하기 위하여 용접 작업 전에 아세톤으로서 표면을 세척한 후 방청된 Mg-AZ31B 판재 표면을 브러싱하였으며, 사용한 판재의 두께는 2.4 mm이었다. 합금 판재의 용접 시 예열온도는 130°C로 하였으며, 전극봉은 98%W-2%Th을 사용하였고, 전극봉의 지름은 2.4 mm로 하였다. 예비 TIG 용접 시험 시 용접봉의 직경이 1.5 mm인 경우 용접전류를 120A 및 130A로 하였을 때는 용접속도를 따라 갈 수 없었고 즉, 용접단락 현상이 발생하여 용접전류를 100A 및 110A로 낮추어 용접을 실시하였다.

또한 용접봉의 직경을 4.0 mm로 증가시켰을 경우에는 120A 및 130A에서 용접단락현상 없이 용접전류 및 용접속도를 증가시킬 수 있었으며, 본 연구에서 실시한 용접조건은 Table 2에 정리하여 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 Mg-AZ31B 합금의 TIG 용접 시 용접봉의 직경 및 용접 전류 변화에 따른 기계적 성질 및 미세 조직의 변화를 조사 분석하였다. 용접 후 응력제거 열처리 온도는 AZ31B-O재의 경우는 260°C이며, AZ31B-H24의 경우 150°C로 보고[12] 되어 있으나 본 연구에서는 사용한 Mg-AZ31B 합금 판재는 후자의 경우에 해당하기 때문에 150°C에서 60min간 응력제거 열처리를 하였다.

용접 후 응력제거 열처리한 용접부의 미세조직은 광학현미경(Leica, DMR) 및 주사전자현미경(Leica, Stereoscan 260)으로 관찰하였으며, 광학현미경 조직은 기계적 연마 및 정마 후 Acetic-picral의 부식액을 이용하여 3초동안 부식하여 관찰하였으며, 이후 SEM으로 미세조직을 관찰하였다. 용접부 미세조직의 조성 변화 및 제 2상의 조성은 SEM에 부착된 EDS(Leica, Stereoscan 260-EDS)를 이용하여 분석하였다. 용접부의 후열처리에 따른 기계적 특성을 평가하기 위하여 미소 경도 및 인장 시험을 하였다. 용접부의 미소 경도치는 마이크로 비커스 경도계(Wilson, Tukon 230)를 이용하여 측정하였고 하중은 200g이었으며, 하중시간은 15초로 하였다. 인장시험(Zwick, Z100)은 용접된 시험편에서 용접부가 중심이 되도록 방전 가공하여 표점거리 100 mm가 되도록 시험편을 제작하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. TIG 용접된 Mg-AZ31B합금의 미세조직 변화

용접 시 Mg-AZ31B합금의 성분 중 기지 중에서는

Table 1. Chemical compositon analysis of AZ31 Mg alloy and AZ92A welding wire

Materials \ Elements	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Mg
AZ31 alloy	3.00	0.9	0.25	0.025	-	-	Bal.
AZ92A welding wire	9.00	2.0	0.1	0.3	0.25	0.01	Bal.

Al과 Zn의 양은 변화하지 않기 때문에 기지 부위에서 생성되는 주된 상들은 큰 변화가 없을 것으로 판단된다. 그러나 용접부 및 그 주위에서는 Table 1에 나타낸 바와 같이 Al과 Zn의 농도가 높은 AZ92A 용접봉을 사용하였기 때문에 Al과 Zn의 조성이 상당량 변화될 것이고, 더욱이 용접부의 비평형 응고를 고려할 때 이 부위는 매우 복잡한 미세조직 변화를 나타낼 것으로 예측된다.

Fig. 1은 Mg-AZ31B 합금에 대한 TIG 용접부의 전형적인 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 관찰한 시험편은 Table 2의 C2 조건으로 용접한 것이며, 용접부, 열영향부, 모재 등의 영역을 명확하게 관찰할 수 있으며, 각 부위의 확대된 미세조직을 각 영역별로 동시에 나타내었다. 모재부에서는 10-30 μm정도 크기의 결정립 이 외에 다른 제 2상들의 존재 상태는 확인할 수 없었으며, 열영향부의 결정립 조직은 모재로부터 용접부쪽으로 갈수록 조대해 지고 있다. 또한 용접부의 조직은 열영향부나 모재와는 다른 조직 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 이 부위에 모재나 열영향부에서 관찰되지 않았던 제 2상들이(Fig. 2의 화살표) 형성되어 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 2는 Fig. 1의 용접부를 광학현미경으로 확대하여 관찰한 사진이다. 결정립과 제 2상들의 크기 및 분포 상태 등의 미세조직 상태가 용접조건에 따라 변화되고 있었으나 미세기공 등과 같은 용접결함들은 전혀 나타나지 않은 건전한 용접부를 관찰할 수 있다. 결정립의 크기는 C1조건(Fig. 2a)의 경우 100-150 μm정도로서 다른 용접조건의 시험편과 비교해 볼 때 2-3배 정도로 가장 조대한 것을 알 수 있으며, C2가 가장 미세하고 C3와 C4의 경우는 거의 유사한 크기를 나타내고 있다. 제 2상은 C1의 경우 5 μm크기로 결정입내와 입계에 분포하고 있으며, C2의 경우는 10 μm이며, 주로 결정입계에 분포하고 있다. C3와 C4의 경우 C1과 C2보다 제 2상의 크기가 미세하고 주로 입내에 분포하고 있으나 밀도가 C1보다 낮다.

Fig. 3은 각 조건(C1-C4)으로 TIG 용접한 미세조직을 SEM으로 관찰한 사진이다. 확대된 용접부의

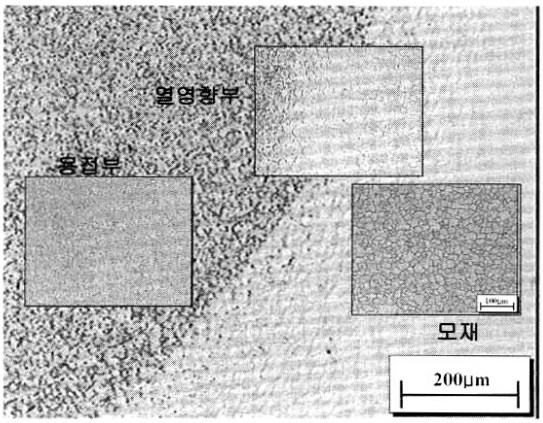

Fig. 1. Typical optical micrographs of C2 sample in TIG welded AZ31B Mg alloy.

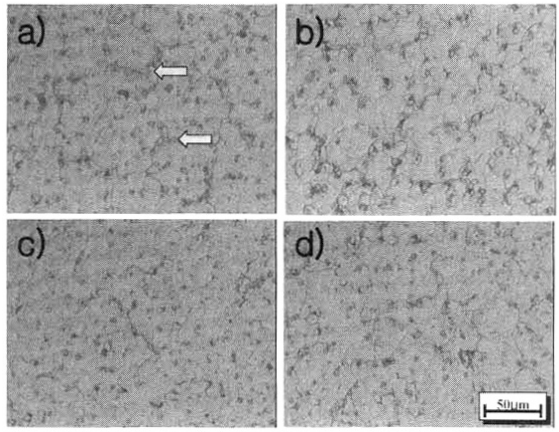

Fig. 2. Optical Micrographs of welding region acording to welding conditions in TIG welded AZ31B Mg alloy;
a) C1 condition, b) C2 condition, c) C3 condition and d) C4 condition.

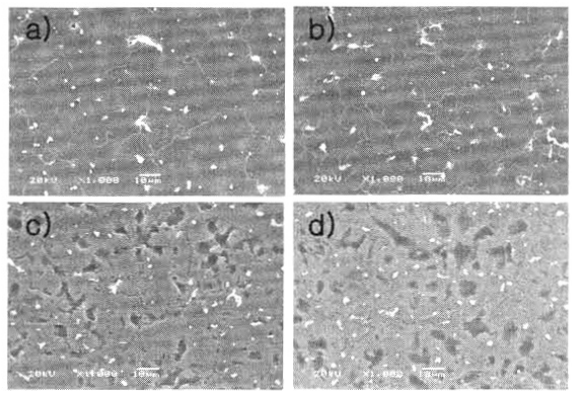

Fig. 3. SEM Micrographs of welding region acording to welding conditions in TIG welded AZ31B Mg alloy;
a) C1 condition, b) C2 condition, c) C3 condition and d) C4 condition.

Table 2. TIG welding conditions for present work

Welding Cond.	Pre-heated Temp. (°C)	Welding Current (A)	Electrod	Electrod Dia. (mm)	Welding wire	Welding wire Dia. (mm)	Ar gas Flowrate (L/min)	Backup gas Flowrate (L/min)
C1	130	100	W-98% Th-2%	2.4	AMS4395 (AZ92A)	1.5	12	5
C2	〃	110	〃	〃	〃	1.5	〃	〃
C3	〃	120	〃	〃	〃	4.0	〃	〃
C4	〃	130	〃	〃	〃	4.0	〃	〃

광학현미경 조직에서와 같이 고배율의 SEM 확대 조직에서도 미세기공 등의 용접결함들은 거의 관찰할 수 없었다. 관찰된 용접부 전체 부위에 대한 조성변화를 확인하기 위하여 SEM-EDS 조성분석을 실시하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 모든 용접조건에서 용접부의 Al과 Zn의 농도가 모재인 Mg-AZ31B의 농도보다 증가된 것을 확인할 수 있었다. 이것은 위에서 언급한 대로 Al과 Zn의 농도가 높은 AZ92A 용접봉을 사용하였기 때문이며, C4의 경우 Zn의 농도가 분석되지 않았는데 이는 용접전류의 증가로 인한 용접부 pool에서 Zn의 증발이 일어났기 때문인 것으로 사료된다.

용접부의 Al과 Zn의 조성은 거의 AZ91D의 조성과 유사하기 때문에 응고 시 AZ31B의 조직과는 다른 AZ91D에서 생성되는 조직이 나타날 가능성이 높다. 저배율의 SEM 조직 사진으로서는 이를 확인할 수 없어 이 중 직경이 큰 용접봉을 사용한 C3 조건의 시험편을 고배율로 관찰한 조직을 Fig. 4에 나타내었다. 예측된 바와 같이 다양한 형태의 비평형 응고 조직을 관찰할 수 있었다. 먼저 화살표 C로 표시한 영역은 AZ31B의 용접부에서는 지금까지 보고된 바가 없는 β-불연속 석출을 관찰할 수 있었다. 이러한 석출 형태는 주로 고농도 Al과 Zn가 포함된 Mg-AZ91AD, 혹은 Mg-AM60 합금 등에서 관찰되며, 용접부가 응고되면서 Al과 Zn가 입계로 편석이 되고 이로 인하여 입계부근은 공정조성의 농도에 가까워짐으로서 응고 시 최종 공정조직이 형성된다.

Al과 Zn의 입계 편석 거동은 화살표 A와 B로 표시한 부분의 농도를 분석한 결과를 비교해 보면 쉽게 이해할 수 있다. 즉, Fig. 4에 나타낸 SEM-EDS 스펙트럼에서 화살표 B로 나타낸 입내에서는 주로 Mg과 Al의 스펙트럼, 화살표 A로 표시한 입계 생성물에서는 Mg, Al 및 Zn의 스펙트럼을 관찰할 수 있었으며, 이것을 정량 분석한 결과를 Table 4에 나타내었다. 입내와 입계 생성물의 용질 농도를 비교해 보면 입계의 Al의 농도가 입내보다 5배 정도 높게 측정되었으며, Zn의 경우 입내에서는 거의 측정되지 않았지만 입계 생성물에서는 높은 농도 분포를 나타내었다. 따라서 입계에 다량의 용질원자들이 편석되었음을 확인할 수 있다. 또한 여기에 Mg-AZ92A 용접봉을 사용하였기 때문에 Al농도가 더욱 높아졌을 것으로 판단된다. 이렇게 생성된 불연속 석

Table 3. SEM-EDS Quantitative analysis of component element in welding region according to welding conditions in TIG welded AZ31B Mg alloy

	C1		C2		C3		C4	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
O	7.13	10.56	6.64	9.88	8,69	12.81	11.36	16.38
Mg	86.90	84.70	86.09	84.30	84.04	81.58	83.25	79.01
Al	5.00	4.39	6.13	5.41	4.88	4.27	5.40	4.61
Zn	0.98	0.35	1.14	0.41	1.39	0.50		
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 4. SEM-EDS Quantitative analysis of component element in Region A and B in Fig. 6

Element	Region A		Region B	
	weight %	atomic %	weight %	atomic %
O	7.26	11.87	4.62	6.88
Mg	58.87	63.27	91.39	89.59
Al	19.92	19.29	3.99	3.52
Zn	13.95	5.58	-	-
Total	100	100	100	100

출상들은 기계적 성질을 저하시키는 요인이다.

3.2. TIG 용접된 Mg-AZ31B합금의 기계적 특성 변화

Fig. 5는 각 종 용접조건으로 TIG 용접한 Mg-AZ31B 합금의 용접부 횡단면의 경도 분포를 측정한 결과이다. 용접부의 경도는 모재보다 감소된 것을 볼 수 있으며, 모든 용접조건에서는 거의 유사한 경도를 나타내고 있으나 C1의 경우가 상대적으로 높은 경도를 보였다.

Fig. 6은 TIG 용접한 Mg-AZ31B 합금의 용접조건에 따른 기계적 성질의 변화를 측정한 결과이다. 인장강도는 C2의 경우가 222MPa로서 가장 높은 강도를 얻었으며, C1은 203MPa, C3는 202MPa 및 C4는 215MPa의 강도치를 나타내었으며, 이 값은 ASTM의 Mg-AZ31B-H24의 인장특성 규격[12]

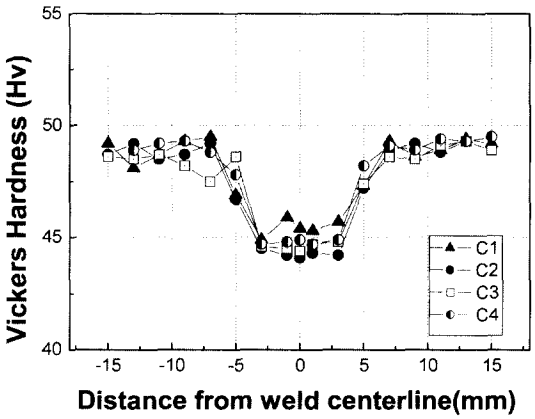

Fig. 5. Transverse hardness distribution across the TIG welded AZ31B Mg alloy.

의 80%이상의 특성을 나타내고 있다. 특히 C2의 경우는 ASTM 규격에 비하여 90%이상의 우수한 특성을 보였다. 그리고 연신율의 경우는 모든 용접조건에서 ASTM규격인 5-7%를 상회하는 특성을 나타내었다.

경도는 C1 시험편인 경우가 가장 높은 값을 보이지만 강도는 C2 시험편이 가장 우수한 결과를 나타내고 있고 C1의 경우는 C3와 함께 가장 낮은 강도를 보였다. 이러한 결과는 용접조건에 따른 용접부의 미세조직 변화와 밀접한 관계가 있다. 즉, 입내와 입계에 균일하게 분포하고 있는 C1은 제 2상의 크기가 가장 미세한 C3과 C4보다 크지만 가장 조대한

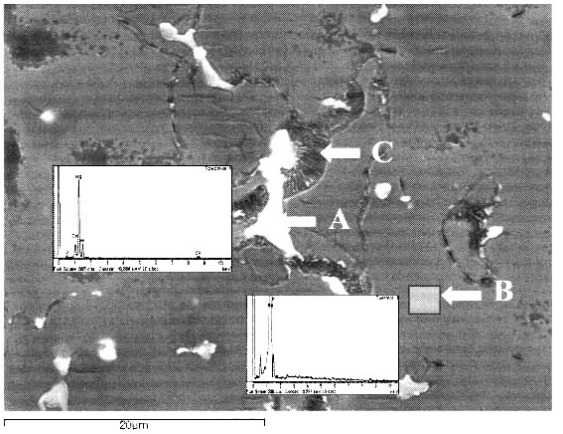

Fig. 4. SEM-EDS analysis of welding region of C3 sample in TIG welded AZ31B Mg alloy.

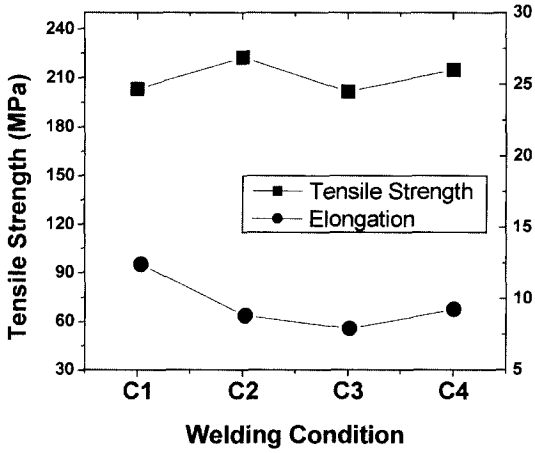

Fig. 6. Change of Mechanical properties according to welding conditions in TIG welded AZ31B Mg alloy.

C2보다는 작고, 가장 높은 경도를 보였지만 결정립의 크기가 다른 용접조건보다 조대하다는 것을 고려해 볼 때 경도는 Hall-Patch 식에 의해 지배되는 결정립 미세화에 의해 경화되기 보다는 제 2상의 밀도나 크기와 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 강도의 경우는 크기가 큰 제 2상이 불균일하게 존재하지만 결정립이 가장 미세한 C2 조건이 가장 우수한 것을 고려할 때 Mg-AZ31B 용접부의 강도는 Hall-Patch 식에 의해 지배된다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 C3 경우는 강도 및 연신율이 함께 낮아지는 경향이 있는데, 이는 Fig. 5에서 관찰된 바와 같이 결정입계에 생성된 β-불연속 석출과 상호관련이 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 압출 판재인 Mg-AZ31B를 이용하여 TIG 용접 시 건전한 용접부 및 우수한 용접부 기계적 성질을 얻기 위한 용접 전류, 용접봉 직경 등 최적의 용접조건과 이들 용접 조건이 용접부의 기계적 특성과 미세조직 변화에 미치는 영향을 조사 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 용접조건의 용접부에서는 미세기공 등과 같은 용접결함들은 전혀 나타나지 않은 건전한 용접부를 관찰할 수 있었다. 결정립의 크기는 C1시험편에서 100-150 μm정도로 가장 조대하였으며, C2가 가장 미세하고 C3와 C4의 경우는 거의 유사하였다. 제 2상은 C1의 경우 5 μm 크기로 결정입내와 입계에 분포하고 있으며, C2의 경우는 10 μm이며 주로 결정입계에 분포하고 있었다. C3와 C4의 경우 C1과 C2보다 제 2상의 크기가 미세하고 주로 입내에 분포하고 있으나 밀도가 C1보다 낮았다.

2. 모든 용접조건에서 용접부의 Al과 Zn의 농도가 모재인 Mg-AZ31B의 농도보다 증가된 것을 확인하였으며, 용접부에서 다양한 형태의 비평형 응고 조직을 관찰하였으며 β-불연속 석출을 관찰할 수 있었다.

3. 경도는 C1 시험편인 경우가 가장 높은 값을 보이지만 강도는 C2 시험편이 가장 우수한 결과를 나타내었다. 경도는 제 2상의 밀도와 크기, 강도는 결정립의 크기와 밀접한 관계가 있었다.

참고문헌

1. American Society for Metals, Metals Park, OH, (1990) 3933-3955.
2. S. Lee, S. H.Lee, D. H. Kim, Met Mater. Trans., **A29** (1998) 1221-1235.
3. C. Lehner, G. Reinhart, J. Laser Appl, **11** (1999) 206-212.
4. Z. Sun, D. Pan and J. Wei, Sci. & Tech. of Welding & Joining, **7** (2002) 343-351.
5. M. Marya and G. R. Edwards, Welding J., (2002) 291-298.
6. A. Munitz, C. Cotler, A Stern, G. Kohn, Mater. Sci. & Eng. **A302** (2001) 68-73.
7. 宮下 辛雄, 奥村 勇人, 武藤 陸治, 文部省 Project ID 02A39001d, (2002).
8. U. Draugelates, B. Bouaifi, S. Steinborm, R. Schmid-Fetzer, A. Pisch, 1st Int. Conf. On Magnesium Sci. & Tech., Jerusalem Israel, (1998) 309-314.
9. T. Asahina and H. Tokisue, Mater. Trans., **11** (2001) 2345-2353.
10. R. Johnson, Mater. Sci. Forum, **419-422** (2003) 365-370.
11. S. Fkumoto, T.Ono, S. Tanaka, H. Tsubakino, T. Tomita, M. Aritoshi and K. Okita, Mater. Sci. Forum, **419-422** (2003) 399-404.
12. Magnesium and Magneium Alloys, ASM Specialty Handbook, (1999).