

대전류 및 용가재 직경에 따른 Al5083 아크 용접부 마그네슘 기화 및 기계적 성질

권혜미* · 박철호** · 홍인표*** · 강남현**,[†]

*부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터

**부산대학교 재료공학부

***현대중공업 생산기술연구소

Effects of High Current and Welding Wire Diameter on the Magnesium Vaporization and Mechanical Properties of Al5083 Arc Welds

Heimi Kwon*, Chul-ho Park**, In-Pyo Hong*** and Namhyun Kang**,[†]

*National Core Research Center (NCRC), Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**Department of Materials Science of Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

***Industrial Technology Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Ulsan 682-792, Korea

[†]Corresponding author : nhkang@pusan.ac.kr

(Received December 1, 2013 ; Revised December 6, 2013 ; Accepted December 12, 2013)

Abstract

The demand of LNG tank and the constituting material, i.e., the Al5083 thick plate, increased due to the rapid growth LNG market. To weld the Al5083 thick plate, the gas metal arc welding (GMAW) of high current is necessary to increase manufacturing productivity incurred by the multi pass welding. However, the arc welding vaporizes the volatile element such as magnesium (Mg). This phenomenon changes the Mg composition of the weld metal and the mechanical properties. The study investigated the weldability of Al5083 alloys after conducting high current GMAW. The Al5083 alloy was welded by using different size of welding wires and high current (800-950A). As the arc current increased from 800A to 950A, the mechanical strength decreased and the secondary dendrite arm spacing (SDAS) increased. Even though the arc current increased SDAS, the mechanical strength decreased due to the Mg loss in the weldment. The large diameter of welding wire decreased the dilution of the weld, therefore increasing the Mg content and the strength of the weld. For the reason, the content of Mg in welds was a major parameter to determine the mechanical property for the high current GMAW. For the arc current between 800A and 950A, the yield strength of the weldments showed a relationship with the weight percent of Mg content (X_{Mg}): $Y.S = 27.9(X_{Mg}) - 11$.

Key Words : Al5083, Weldability, Microstructure, Mg vaporization, Mechanical property

1. 서 론

LNG는 높은 연료 효율과 낮은 탄소 배출로 인해 친환경 연료로 각광을 받고 있어 LNG 저장고의 수요도 증가하는 추세이다. LNG 저장고 소재는 극저온 특성을 만족하면서 경량화 효과를 가질 수 있는 Al5083재

가 사용되고 있다¹⁻³⁾.

Al5000계 합금은 마그네슘(Mg)의 고용강화 효과를 이용한 비열처리 합금으로, 그 중 Al5083 합금은 4-5wt% 마그네슘을 함유하고 있어 다른 Al 합금에 비해 높은 강도와 내식성 및 용접성을 가진다⁴⁾.

Al5083 합금의 용접에서는 요구 용착량을 만족하기 위해 가공 후 다층 용접을 실시하고, 이 때 기공과 용

접부 균열 같은 용접결함이 일어나기 쉽다. 이를 방지하기 위해 필요한 공정을 추가할 경우 생산성을 저하시키므로⁵⁾, 대전류 용접 기술을 통하여 용접 횟수를 줄이는 방법으로 다층 용접시에 생기는 문제점을 보완할 수 있다.

그러나 Al 합금에 대전류 용접이 될 경우 비점이 낮은 마그네슘의 기화가 발생할 수 있다⁶⁾. Al5000계열 합금은 마그네슘의 고용량과 기계적 성질이 비례하기 때문에, 마그네슘의 기화가 발생할 경우 용접부의 기계적 성질이 저하되게 된다⁶⁻⁸⁾. 이는 용접시 마그네슘을 다량 포함한 용가재를 사용하여 마그네슘 기화로 인한 기계적 성질 저하를 방지 할 수 있으며, 용가재도 용접 중에 마그네슘 기화가 발생하므로 모재보다 더 높은 마그네슘 함량을 가진 용가재의 사용이 필요하다⁹⁾. 마그네슘 기화로 인한 기계적 성질 저하에 관한 연구는 레이저 용접, Gas Tungsten Arc Welding(GTAW) 그리고 중전류 Gas Metal Arc Welding(GMAW)에서 다수 보고되었다⁶⁻¹⁴⁾. 그러나 800A 이상의 대전류 GMAW에서의 마그네슘 기화 및 기계적 성질에 대한 연구는 보고되어 있지 않다.

본 연구는 70t 두께의 후판 Al5083 합금에서 대전류 GMAW로 Bead on Plate(BOP) 용접을 수행하였다. 용접시 용접전류와 용가재 직경에 따른 용접부의 미세조직, 마그네슘 기화, 경도 그리고 인장강도와 같은 기계적 성질을 평가하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 모재는 Al5083-O 이고 용가재는 Al5083-O비해 마그네슘 함량이 높지만 그 외의 조성은 유사한 Al5183을 사용하였다. 모재와 용가재의 화학조성은 Table 1과 같다. Al 후판 용접성을 테스트하기 위해 사용된 모재의 두께와 폭은 각각 70mm와 300mm이며, 용가재는 4.0mm와 5.6mm 직경을 가진 것을 사용하였다.

용접방법은 GMAW Bead on Plate(BOP)를 실시하였다. 용접 보호가스는 Ar50%+He50% 혼합가스를 사용하였고, 20cm/min 용접속도로 800~950A의 대전류를 사용하였다. 용가재 직경에 따른 영향을 보기 위해 4.0mm와 5.6mm 직경의 용가재를 사용하였다.

자세한 용접 조건은 Table 2에 표시하였다.

용접형상은 비드 표면, 비드 폭, 비드 높이, 용입 깊이를 측정하였다. 용접비드 단면형상을 통해 용가재의 희석률(dilution ratio)을 계산하였다. 희석률 계산식은 다음과 같다.

$$P(\%) = \frac{B}{A+B} \times 100$$

P : 희석률 A : 용착금속 면적 B : 용입 면적

미세조직 관찰은 연마 후 개선된 Poulton 용액(12mL HCl + 16mL HNO₃ + 1mL HF + 1mL H₂O + Chromic acid solution(3g Chromic acid + 10mL H₂O))으로 에칭하고, 광학현미경 관찰 및 이미지 프로그램을 이용하여 용접전류에 따른 용접부와 열영향부(HAZ) 미세조직 변화와 용접부 중앙에서의 secondary dendrite arm spacing(SDAS)를 측정하였다.

용접 조건 변화에 따른 기계적 성질은 경도 및 인장 시험을 측정하였다. 경도는 마이크로비커스 경도시험기를 이용하여 0.5mm 간격으로 하중 200gf, 유지시간 10초로 측정하였다. 인장시험은 ASTM A370 규격으로 가공한 시편을 2.5mm/min cross-head 이동속도로 시행하였다.

용접전류와 용가재 직경에 따른 마그네슘 기화 정도는 Electron Probe Micro Analysis (EPMA)로 분석하였다. EPMA분석은 시편을 1μm까지 연마 시킨 후, 용접부의 마그네슘 함량 변화를 알기 위해 0.5mm 간격으로 포인트 분석 후 평균값으로 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부 단면 마크로 및 미세조직

Table 3은 용접전류와 용가재 직경에 따른 용접부 단면 형상을 나타낸 것이다. 용접전류가 증가함에 따라 용입 깊이가 증가하였다. 동일 전류에서는 용가재 직경이 4.0mm에서 5.6mm로 증가하면 용입 깊이가 5~10% 증가하였고, 비드 폭의 경우 19~23% 증가하였다. 즉, 동일 전류 조건에서 용가재 직경이 5.6mm로 증가하면 용입 면적도 같이 증가하였다. 그러나 5.6mm

Table 1 Chemical composition of base metal and filler metal

	Mg	Mn	Cr	Cu	Fe	Ti	Zn	Al
Al5083-O	4.52	0.41	0.12	0.06	0.21	0.14	0.13	Bal.
Al5183	4.94	0.75	0.05	0.06	0.21	0.11	0.15	Bal.

Table 2 Welding parameters used in the study

Current (A)	Voltage (V)	Shielding gas	Welding speed (cm/min)	Diameter of wire(mm)
800	36	50 Ar + 50 He	20	4.0
900	43			
950	46			
850	36			5.6
900	38			
950	39			

Table 3 Cross section analysis of the weld

Current (A)	Wire diameter (mm)	Bead width(mm)	Penetration (mm)	Dilution (%)
800	4.0	46.7	27.2	65.6
900		48.5	30.7	74.7
950		45.6	32.7	74.5
850	5.6	65.1	24.9	64.0
900		60.9	33.1	59.6
950		56.4	34.4	68.8

용가재를 사용한 용착금속의 면적이 4.0mm 용가재의 용착금속 면적보다 더욱 크게 증가하였기 때문에, 5.6mm 용가재를 사용한 용접부의 희석률이 4.0mm 용가재의 희석률보다 더 작다. 특히 5.6mm 용가재 900A 전류 조건에서 가장 낮은 희석률이 측정되었다. 900A와 950A 전류조건에서의 모재 내 용가재의 용입 면적은 비슷하였지만, 5.6mm 용가재 900A 전류조건에서의 경우 표면부분에 상당량의 용가재가 쌓이면서 가장 낮은 희석률 나온 것으로 판단된다. 950A의 경우 용접시 발생한 스패터로 인해 900A 조건에 비해 적은 양의 용가재가 표면에 쌓여 900A 조건에 비해 높은 값의 희석률이 계산되었다. 이와 같이 직경이 큰 조건이 동일 전류에서 용착되는 양이 더 많았으므로 직경이 큰 5.6mm 용가재 조건의 용접부 성분과 성질은 모재보다 용가재에 의한 영향이 더 클 것으로 예상된다.

용접부 미세조직은 수지상 형태를 나타내었으며, Fig. 1은 용접전류에 따른 수지상 조직의 SDAS를 나타냈다. 동일한 용접 속도에서 전류 값이 커지면 냉각속도는 감소하고 SDAS가 증가함을 알 수 있다¹⁰⁾. 그러나 용가재 직경에 따른 SDAS 변화 경향은 거의 없는 것으로 판단된다. 그 이유는 용가재 직경이 증가하거나 감소하더라도 동일한 전류와 용접속도를 유지하면서 용접을 수행하였고 전압의 변화도 크지 않았기 때문에, 용접부의 냉각속도와 이에 따른 SDAS도 거의 동일한 것으로 분석된다.

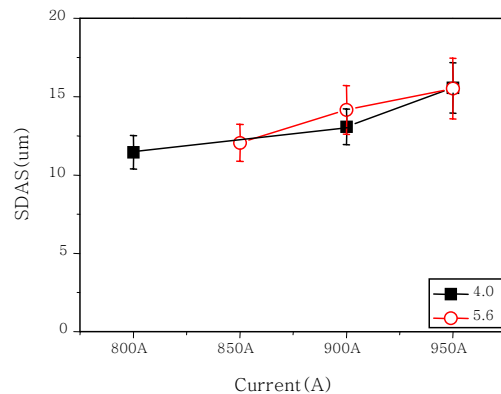


Fig. 1 Effect of arc current and wire diameter on SDAS in fusion zone

3.2 용접부 마그네슘 조성변화

용접전류와 용가재 직경에 따른 용접부내 마그네슘 농도 변화를 알기 위해, 4.0mm와 5.6 mm 용가재로 구분하여 용접전류에 따른 마그네슘 함량을 측정하여 Table 4에 정리하였다.

모재의 평균 마그네슘 함량은 5.4wt% 이었으며, 용접 후 용접부의 마그네슘 함량은 모든 용접조건에서 5.4wt% 이하로 측정되었다. 이는 용접 중 아크 열원에 의해 모재와 용가재 모두 마그네슘의 기화가 발생하여, 용접부의 마그네슘 함량이 모재보다 감소한 것으로 판단된다. 용접전류가 800A에서 950A로 증가할수록, 4.0mm 용가재의 용접부 마그네슘 함량은 4.74wt%에

Table 4 Effect of welding condition on Mg concentration in the weld

	Mg (wt.%)		Base metal
	4.0mm filler	5.6mm filler	
800A	4.74	-	5.4
850A	-	5.12	
950A	4.53	5.07	

서 4.53wt%로 감소하였다. 또한 5.00mm 용가재의 용접부 마그네슘 함량은 용접전류가 850A에서 950A로 증가할수록, 5.12wt%에서 5.07wt%로 감소하였다. 동일한 950A용접전류 조건에서 용가재 4.0mm인 경우의 마그네슘 함량은 4.53wt%, 5.0mm 인 경우는 5.07wt%로 측정되었다. 따라서 동일한 용접전류와 용접속도 조건에서는 용가재 직경이 클수록 용접부의 마그네슘 함량이 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 3.1장의 결과와 같이 용가재의 직경이 큰 용접부의 희석률이 감소하였고 마그네슘 함량이 더 많은 용가재의 영향을 많이 받았을 것이라는 예상과 일치한다.

3.3 용접부 경도 및 인장성질 변화

용접전류와 용가재 직경에 따른 마그네슘 기화와 미세조직 변화가 기계적 성질 변화에 미치는 영향을 고찰하기 위해 마이크로비커스 경도 실험을 수행하였다. Fig. 2는 용접전류에 따른 용접부의 경도를 용가재 직경에 따라 측정한 것이다. Fig. 2a는 4.0mm 용가재를 사용한 용접부의 경도로서, 용접전류가 증가함에 따라 용접부의 경도가 감소한다. Fig. 2b는 5.6 mm 용가재의 용접부 경도로서, 용접전류가 증가함에 따라 거의 동일한 경도를 가진다. 4.0mm 용가재 용접부의 경도는 Hv65~75 정도이며, 5.6mm 용가재 용접부 경도는 Hv70~80으로 측정되어, 용가재 직경이 큰 용접 조건의 경도가 모든 조건에서 높은 경도값을 보였다. 이는 5.6mm 용가재 용접조건이 4.0mm 용가재 용접 조건 보다 용접부에서의 평균 마그네슘 농도가 높아서 (Table 4), 알루미늄 모재에 고용된 마그네슘 용질원자의 고용강화 효과가 증가하여 경도값이 높은 것으로 판단된다. 또한 용가재의 직경에 상관없이 마그네슘의 기화가 발생하여 용접부에서의 마그네슘 농도가 모재에서 보다 낮았기 때문에, 용접부의 경도는 모재보다 낮게 측정되었다. 또한 용접전류가 증가하면서 열영향부는 결정립 크기가 증가하여 4.0mm용가재의 경우 열영향부를 나타내는 용접부 중심으로부터 25-30mm 구간

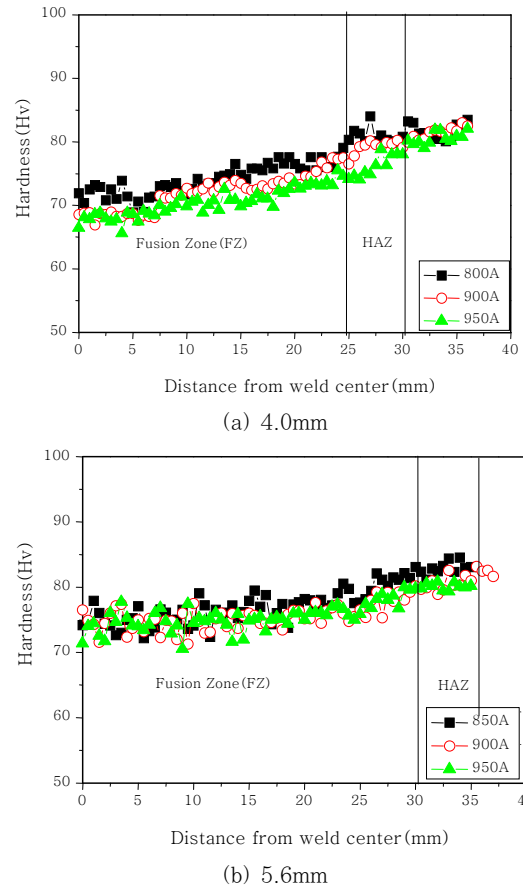


Fig. 2 Micro Vickers hardness distribution with respect to the welding wire diameter

과 5.6mm 용가재의 35-40mm 구간의 경도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 4.0mm 용가재 조건의 경우 30mm 이후부터는 용접에 영향을 받지 않는 모재 부분으로 용접조건에 관계없이 경도값이 일치하는 하는 것을 알 수 있다.

마그네슘 기화에 따른 기계적 성질 중 인장 강도 성질에 대한 분석을 수행하였다. Table 5는 Al5083-O 모재의 인장 및 항복강도를 각각 100%로 정하고, 용가재의 직경과 용접전류에 따른 용접부의 강도특성을 모재강도와 비교하여 나타내었다.

용접부의 인장강도와 항복강도는 용접 전류가 800A

Table 5 Mechanical property at various welding conditions

	4.0mm wire		5.6mm wire	
	Y.S(%)	T.S(%)	Y.S(%)	T.S(%)
800A	83.9	91	-	-
850A	-	-	92.9	94
900A	87.5	90.3	91.5	93.3
950A	85.4	87.2	89.4	91.6

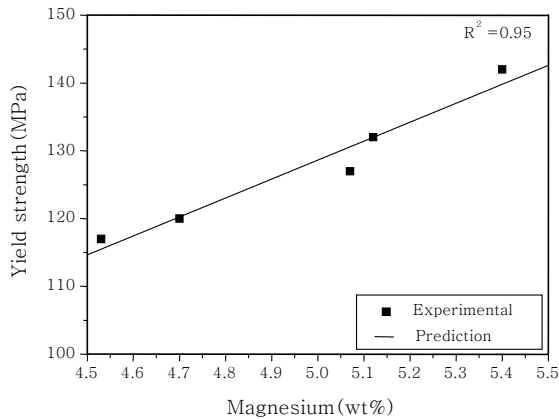


Fig. 3 Linear regression analysis on yield strength and magnesium composition

(4.0mm 용가재) 또는 850A(5.6mm 용가재)에서 950A로 증가할수록 3~4% 감소하는 경향을 나타냈다. 동일 전류 조건에서는 용가재 직경이 4.0mm인 경우 모재 대비 항복강도는 83-87% 인장강도는 87~91%로 측정되었고, 용가재 직경이 5.6mm인 경우 항복강도는 89-92% 인장강도는 91~94% 수준이었다. 즉, 큰 직경의 용가재를 사용한 용접부의 인장 특성이 더 우수하였다. 또한, 4.0mm 용가재 용접 조건 중에서 가장 낮은 용접 전류인 800A 용접부의 항복 및 인장강도는 83.9%와 91%로써, 5.6mm 용가재 용접 조건 중 가장 높은 용접 전류인 950A 용접부의 항복 및 인장강도인 89.4%와 91.6% 보다 낮았다.

Fig. 1의 SDAS 크기와 Table 4의 EPMA 분석을 종합하여, 용가재 직경 변화에 따른 용접부의 마그네슘 농도를 인장성질과 비교하였다. 동일한 용접 전류 조건일 경우 SDAS 크기는 차이가 없지만, 5.6mm 용가재의 용접조건이 0.5wt% 정도 많은 마그네슘 농도를 가지고 항복/인장강도는 3-4% 높게 분석된다. 또한 Fig. 1의 SDAS 값을 보면, 800A(4.0mm 용가재)의 SDAS크기는 11.5 μ m로 950A(5.6mm 용가재)의 15.5 μ m보다 미세하였다. 그러나 Table 4에서 마그네슘 농도는 950A(5.6mm 용가재)의 용접부가 5.07wt%로써, 800A(4.0mm 용가재)의 용접부 마그네슘 농도인 4.74wt% 보다 약 0.3wt% 높았다. 즉, 용접 전류가 증가할수록 SDAS가 증가하고 마그네슘 농도가 감소하여, 같은 직경의 용가재 조건에서는 인장강도가 감소했다. 동일한 용접 전류에서 용가재 직경이 다른 경우에도 거의 일정한 SDAS를 가지지만, 마그네슘 농도가 높은 큰 직경의 용가재를 사용한 용접부의 인장성질이 더 우수한 것을 알 수 있다.

위 실험 결과를 통해 Al5083 합금의 용접부 인장 특성을 결정하는 주요 인자는 미세조직의 결정립 크기

(SDAS)보다 마그네슘 농도인 것으로 판단 할 수 있다. Fig. 3은 측정된 용접부의 마그네슘 농도와 항복강도의 선형적 관계를 알아보기 위해 회귀 분석을 한 결과이다. 회귀분석 식의 결정계수(R-squared) 값은 0.95로써, 측정값과 예측값의 직선적 비례 관계가 잘 일치하였다. 또한 이 결과는 기존 연구에서 마그네슘 비율과 항복강도가 선형적으로 비례한다는 결과와 일치한다^{7,8,15}.

$$Y.S = 27.9(X_{Mg}) - 11$$

(X_{Mg} : weight percent of Mg content)

4. 결 론

본 연구는 대전류 GMAW 및 용가재 직경 변화가 Al5083-O 용접부에서의 SDAS 크기, 마그네슘 기화의 정도 그리고 기계적 성질의 변화를 분석하였고, 자세한 결론은 다음과 같다.

1) 70mm 두께의 Al 5083-O 모재 위에 BOP GMAW 용접에서, 전류가 800A에서 950A로 증가하면 용입깊이보다는 비드폭이 크게 증가하였다. 동일한 전류에서는 용가재 직경이 큰 5.6mm의 경우 4.0mm 조건보다 용착량이 더 증가하여, 5.6mm 용가재를 사용한 GMAW의 희석율이 4.0mm 용가재의 경우보다 작았다.

2) 용접 전류가 800A에서 950A로 증가할수록 용접부의 SDAS 크기가 증가하였고, 그 증가 정도는 용가재 직경 변화와 관계없이 전류값과 같이 증가하였다.

3) 용접 전류가 증가할수록 마그네슘 기화가 더욱 활발하게 일어났다. 또한, 4.0mm 용가재의 용접부보다 5.6mm 용접부의 마그네슘 농도는 모든 전류 조건에서 높게 나타났다. 이 결과는 5.6mm 용가재의 용착량이 더 많아 용가재의 마그네슘 함량을 용접부에 용입시켰고 그로인해 희석율이 낮았기 때문으로 판단된다.

4) 용접 전류가 증가할수록 경도값은 감소하였고 상대적으로 용접부에서의 마그네슘 농도가 적은 4.0mm 용가재의 경도가 5.6mm 용가재에서보다 낮게 나타났다. 모든 조건의 용접부의 경도는 모재의 경도보다 낮게 측정되었으며, 이는 아크 에너지에 의한 결정립(SDAS) 크기 증가와 마그네슘 기화로 인한 결과로 생각된다.

5) 용접 전류가 증가할수록 용접부의 항복강도와 인장강도는 감소하였다. 동일한 용접 전류 조건에서는 결정립의 크기가 거의 동일하지만 큰 직경의 용가재를 사용한 경우 항복 및 인장강도가 더 높게 측정되었다. 이 결과는 용가재 직경 변화에 따른 마그네슘 농도의 차이 때문이라 판단된다. 결국 전류조건이 다르더라도 많은

마그네슘 농도를 가진 용접부에서의 항복강도와 인장 강도가 크게 나타났다.

6) 결론적으로 대전류 GMAW Al5083-O 용접부의 기계적 특성을 변화시키는 주요 변수는 마그네슘의 농도이며, 용접부 내에서의 마그네슘 농도와 항복강도는 $Y.S = 27.9(X_{Mg}) - 11$ (X_{Mg} : weight percent of Mg content)와 같은 선형적인 비례관계를 가진다.

Reference

1. Y.B. Choi, M.J. Kang, D.C. Kim and I.S. Hwang : High Current Arc Welding Technology of Aluminum Alloy, Journal of KWJS, **31-1** (2013), 21-25 (in Korean)
2. T.C. Lee, H.W. Lee, D.W. Joo, J.H. Lee and J.H. Sung : Effect of aging treatment on the microstructure and low temperature tensile properties in 5083 aluminum alloy weldments, Journal of the Korean society for heat treatment, **13** (2000), 1-9
3. S.H. Hong : Present status and prospect of LNG storage tank, Journal of KWS, **13-3** (1995), 1-7 (in Korean)
4. J.L. Searles, P.I. Gouma and R.G. Buchheit : Stress Corrosion Cracking of Sensitized AA5083, Metallurgical and Materials Transaction A, **32A** (2001), 2859-2867
5. J.H. Kim, D.H. Park : Porosity in Thick Aluminum Alloy Welds, Journal of KWS, **12-1** (1994), 7-11
6. A. Blake and J. Mazumder : Control of Magnesium Loss During Laser Welding of Al-5083 Using a Plasma Suppression Technique, Transactions of the ASME, **107** (1985), 276-280
7. H. Zhao and T. Debroy : Weld Metal Composition Change during Conduction Mode Laser Welding of Aluminum Alloy 5182, Metallurgical and Materials Transactions B, **32B** (2001), 163-172
8. T. Mukai, K. Higashi, S. Tanimura : Influence of the magnesium concentration on the relationship between fracture mechanism and strain rate in high purity Al-Mg alloys, Materials Science and Engineering, **176** (1994), 181-189
9. J.B. Wang, H. Nishimura, S. Katayama and M. Mizutani : Evaporation phenomena of magnesium during pulsed-MIG arc welding of aluminum alloy, Transactions of JWRI, **39** (2010), 19-21
10. K. Sindo, Welding metallurgy, 2nd edition, Wiley-Interscience, 2002, 204-209
11. A. Block-Bolten and T. W. Eager : Metal vaporization from weld pools, Metallurgical Transactions B, **15B** (1984), 461-469
12. D. Yang, X. Li, D. He, H. Hui and L. Zhang : Study on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn-Er alloy joints welded by TIG and laser beam, Materials and Design, **40** (2012), 117-123
13. U. Dilthey, A. Goumeniouk, V. Lopota, G. Turichin and E. Valdaitseva : Development of a theory for alloying element losses during laser beam welding, Journal of Physics D : Applied Physics, **34** (2001), 81-86
14. M. Pastor, H. Zhao, R. P. Martukanitz and T. Debroy : Porosity, Underfill and Magnesium loss during continuous wave Nd:YAG laser welding of thin plates of aluminum alloys 5182 and 5754, Welding Journal, **78** (1999), 207-216
15. E. Romhanji and M. Popovic : Problems and prospect of Al-Mg alloys application in marine constructions, Metalurgija-journal of metallurgy, **12**(2006), 297-307