

탄뎀 서브머지드 용접 공법의 용접조건에 따른 용입깊이 및 용착면적 예측

박 세 진*[†] · 남 성 길* · 권 창 길*

*삼성중공업 산업기술연구소 용접연구

Prediction of Weld Penetration and Deposited Metal Area in Accordance with Weld Parameters in Tandem Submerged Arc Welding Process

Se-Jin Park*[†], Seong-Kil Nam* and Chang-gil Kweon*

*Dept. of Welding Research, Institute of Industrial Tech, Samsung Heavy Industry, Geoje-Si 656-710, Korea

[†]Corresponding author : trojin.park@samsung.com

(Received October 17, 2011 ; Revised November 14, 2011 ; Accepted December 21, 2011)

Abstract

Submerged arc welding method from both sides is generally applied to the welding of main panel manufacturing process during ship construction. The tandem SAW method is applied to improve the productivity. The various weld defects that occur during tandem SAW method are melt through, incomplete penetration, undercut and overlap etc. It could be thought that the reasons for these defects are mainly lack of prediction ability for penetration depth and deposited metal area.

In this research, total 5 kinds of welding factors for experiment like current of lead pole, voltage of lead pole, current of trail pole, voltage of trail pole and welding speed are adopted. Weld tests are carried out for the analysis of variation effects of these factors on penetration depth and deposited metal area.

Based on the test and analysis results, it is possible to obtain the prediction equation for the effect of these factors on the amount of deposited metal and penetration depth. As per the verification of the results by additional tests, it is confirmed that the prediction equation, include a error margin of $\pm 2\text{mm}$ for penetration depth and $\pm 10\text{mm}^2$ for deposited metal area.

Key Words : Tandem submerged arc welding, Weld penetration, Deposited metal area

1. 서 론

선박의 건조과정 중 주판 판계 용접 작업 시에는 양면 서브머지드 아크 용접(Submerged Arc Welding from both side) 공정이 일반적으로 적용되며, 생산성 향상을 위하여 2전극 탄뎀(Tandem) 공법이 주로 적용되고 있다.

2전극 탄뎀 방식의 경우 두 전극 모두 직류 전원을 사용하면 두 전극간 아크 간섭 발생으로 아크 불안 및 용접결함의 원인이 되므로 직류 전원-교류 전원 조합 또는 교류 전원-교류 전원 조합이 일반적으로 적용되

고 있다.

서브머지드 아크 용접은 용접하고자 하는 부위에 분말 형태의 플럭스를 일정 두께로 살포하고, 그 속에 전극 와이어를 연속적으로 송급하여 용접이 이루어지기 때문에 용접 아크가 외부로 노출되지 않는 특징을 가진다. 이 때문에 잠호 용접으로 불리기도 한다. 또한 대전류 용접이 가능하며 아크 효율이 95% 이상인 장점이 있고, 용접 흄(fume) 발생량이 작고 아크 광선이 외부로 노출되지 않으므로 작업 환경이 청결하다¹⁾.

하지만, 용접 도중 작업자가 용접 진행 상태를 육안으로 확인할 수 없기 때문에 용접 비드 형상의 양부(良否)를 즉시 판단할 수 없다. 또한 용입깊이에 대한 정

량적 수치가 확보되어 있지 않아 완전 용입 여부를 작업자의 경험에 의존해 판단하고 있는 실정이다.

일반적으로 사용되는 용착량 및 용착속도의 경우 단위 시간에 용착되는 용착금속의 양을 의미하므로 측정 및 예측식을 수립하는데 이용하기가 번거롭다. 따라서, 본 연구에서는 마크로 시험편의 단면적에서 측정 가능한 용착면적(Deposited metal area)에 대하여 분석 및 예측 작업을 진행하였다.

판계 용접 작업 시 발생하는 용접불량은 용입 깊이 예측 부족으로 발생하는 용각과 용입불량, 용착면적 예측 부족으로 발생하는 언더컷 및 오버랩 등이 있다. 이들 결함은 용접 전에 용접 조건에 따른 용착면적 및 용입깊이를 정확히 예측 가능한다면 예방 가능할 것으로 판단된다.

용접 불량 예방을 위한 첫 단계는 용입깊이, 용착면적을 결정하는 인자의 영향을 분석^{2,3)}하고, 관계식을 정립하는 것이다. 그 최종 단계로 용접공정 중 실시간으로 용입깊이, 비드형상 등의 관리 및 제어가 가능한 시스템 개발이 필요하다⁴⁾.

본 연구에서는 2전극 탄뎀 서브머지드 용접 공법에 직류 전원-교류 전원 조합을 적용하여 직류전류, 직류전압, 교류전류, 교류전압, 용접 속도와 용착면적 및 용입깊이의 상관 관계를 실험적으로 도출하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 인자 선정 및 수준확인

용접조건 중에서 용착면적 및 용입깊이에 영향을 줄 수 있으며 독립적으로 제어 가능한 5가지 인자를 선정하였고, 그 인자는 각각 직류전류, 직류전압, 교류전류, 교류전압, 용접속도이다.

전극간 거리, 와이어 돌출길이, 플럭스 살포 높이, 용접재료, 용접전원 특성, 모재 두께 등 그 외의 기타 인자들의 조건은 일정하게 하여 실험을 진행하였다. 용착면적 및 용입깊이 분석을 위해 선택된 5개의 인자에 대

하여 현업에서 사용 중인 용접조건 범위를 확인하여 인자 별로 최소 3 수준을 적용해 Table 1과 같이 정리하였다.

이 경우 실험계획법에 따라 완전요인실험(Full factorial experiment)⁵⁾을 수행한다면 실험을 반복하지 않는 경우에도 최소 300회 이상의 실험이 필요하다.

2.2 실험 계획 및 용접

완전요인실험에 따라 모든 경우의 수를 실험하는 것은 시간과 비용 증가 측면에서 효율적이지 못하기 때문에 본래의 실험 목적을 달성할 수 있는 범위에서 실험 횟수를 줄일 필요가 있다. 따라서, 본 연구에 앞서 사전에 보유 중인 실험 결과를 분석하여 각 인자들간의 교호 작용(2인자 이상의 인자간 조합효과)이 크지 않음을 확인하고, 3인자 이상의 교호작용은 없는 것으로 가정하였다.

용착면적과 용입깊이에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 판단되는 인자를 선별하여 Table 2와 같은 실험 계획을 수립하였다.

용접 시험편의 길이는 1000mm 이상으로 하였으며 각각의 시험편에 대해 일정한 간격으로 용접 시작부, 중앙부 및 끝단부의 동일 위치에서 3개의 마크로 시험편을 제작하여 그 평균값을 결과로 채택하였다.

3. 실험 결과

3.1 용입형상 계측

각각의 마크로 시험편에 대해 5% 나이탈 용액으로 에칭을 실시하고, 이미지 분석 장비를 이용해 마크로 단면 사진을 촬영하였다. 확보된 이미지 파일은 이미지 분석 프로그램(Image PRO)을 이용해 용입깊이(P), 용착면적(Ds)을 Fig. 1과 같이 계측하였다. 앞서 언급한 바와 같이 각각의 용접시험편에서 제작된 3개의 마크로 시험편의 평균값을 해당 용접결과의 기준으로 하였다.

Table 1 Control factors and their levels

Factors	Notation	Limits			
		-2	-1	0	+1
Current of lead pole(A)	DA	700	950	1200	1450
Voltage of lead pole(V)	DV		32	35	38
Current of trail pole(A)	AA		600	800	1000
Voltage of trail pole(V)	AV		36	40	44
Welding speed(cm/min)	S		70	100	130

Table 2 Design matrix

No.	Trial no.	Factors				
		DA	DV	AA	AV	S
1	1	-2	-1	-1	0	-1
2	2	-2	-1	-1	0	0
3	3	-2	-1	-1	0	1
4	5	-1	0	0	0	-1
5	6	-1	0	0	0	0
6	7	-1	0	0	0	1
7	9	0	0	0	0	-1
8	10	0	0	0	0	0
9	11	0	0	0	0	1
10	19	1	0	0	0	-1
11	20	1	0	0	0	0
12	21	1	0	0	0	1
13	13	0	0	-1	0	0
14	14	0	0	1	0	0
15	17	0	-1	0	0	0
16	18	0	1	0	0	0
17	15	0	0	0	-1	0
18	16	0	0	0	1	0

DA: Current of lead pole, DV: Voltage of lead pole, AA: Current of trail pole, AV: Voltage of trail pole, S: Welding speed

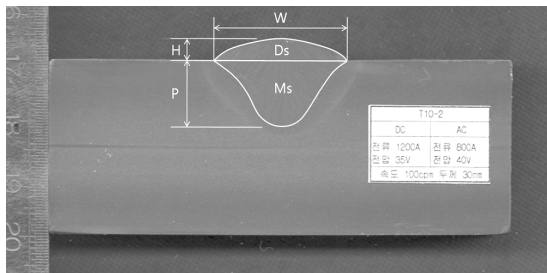


Fig. 1 Macro section of welded part and analysis with computer image program

3.2 용착면적 및 용입깊이 예측

측정된 용입형상에서 용착면적 및 용입깊이에 영향을 미치는 것으로 판단되는 5가지 인자와 Fig. 1에서 계측된 각각의 결과 값으로부터 $Y = F(DA, DV, AA, AV, S)$ 의 관계는 3인자 이상의 교호작용을 무시하면 다음과 같은 2차 관계식 식 (1)로 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 + b_1 DA + b_2 DV + b_3 AA + b_4 AV + b_5 S \\
 & + b_{11} DA^2 + b_{22} DV^2 + b_{33} AA^2 + b_{44} AV^2 \\
 & + b_{55} S^2 + b_{12} DA \cdot DV + b_{13} DA \cdot AA \\
 & + b_{14} DA \cdot AV + b_{15} DA \cdot S + b_{23} DV \cdot AA \\
 & + b_{24} DV \cdot AV + b_{25} DV \cdot S + b_{34} AA \cdot AV \\
 & + b_{35} AA \cdot S + b_{45} AV \cdot S
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

하지만 본 연구에서는 2차 관계식에 포함된 모든 인자의 영향, 특히 2인자 상호간의 교호 작용을 평가할 수 있는 실험이 수행되지 않았기 때문에 용착면적 및 용입깊이 예측식 도출을 위해 보유 중인 실험 결과의 분석 결과치 및 본 실험에서 확인된 인자의 영향을 반영하여 관련 인자수를 축소시켰다.

3.2.1 용입깊이 및 용착면적 예측식 도출

탄뎀 서브머지드 아크 용접 시에는 일반적으로 선행 전극의 전류 값이 후행전극의 전류값 대비 최소 15% 이상 높게 사용된다. 용입깊이는 적용 전류값과 밀접한 상관관계가 있음은 이미 알려진 사실이며, DA보다 낮은 값으로 설정된 AA가 용입깊이에 영향을 미치지 못한다는 것을 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 또한, 본 연구에서 실험된 전압 수준에서는 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 전압값의 변화 또한 용입깊이에 별다른 영향을 미치지 못함을 확인하였다.

선정된 용접인자의 수준에서는 선행 전극만으로 용접을 실시하는 경우 Fig. 5와 같이 비드폭이 작게 형성되어 언더컷이 쉽게 발생한다. 따라서 후행 전극이 용착면적과 용접 비드 형상에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

용착면적은 용접재료의 송급속도(Wire feed rate, WFS)와 관련성이 큰 것으로 알려져 있으며 송급 속도

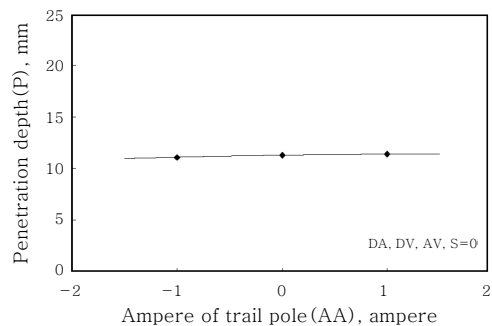


Fig. 2 Penetration depth variation based on ampere of trail pole

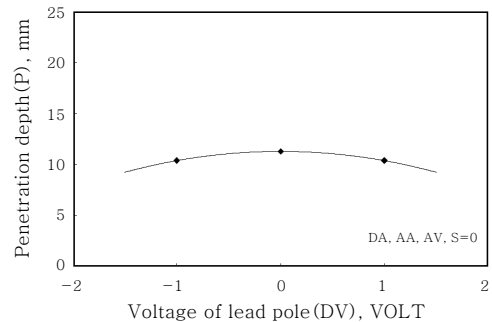


Fig. 3 Penetration depth variation based on voltage of lead pole

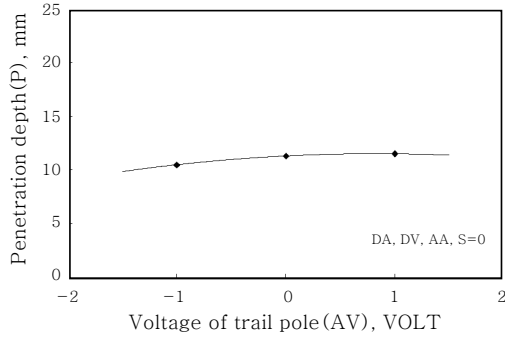


Fig. 4 Penetration depth variation based on voltage of trail pole

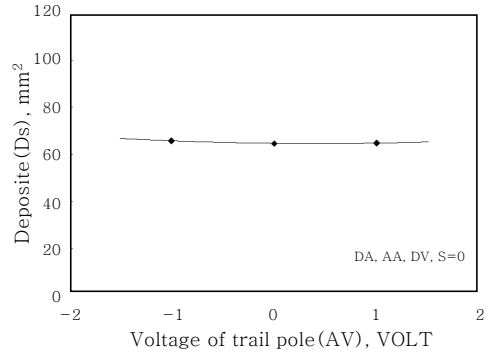


Fig. 7 Deposited metal area variation based on voltage of trail pole

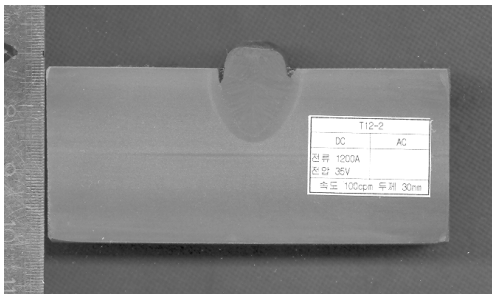


Fig. 5 Macro section of welded part without trail pole electrode

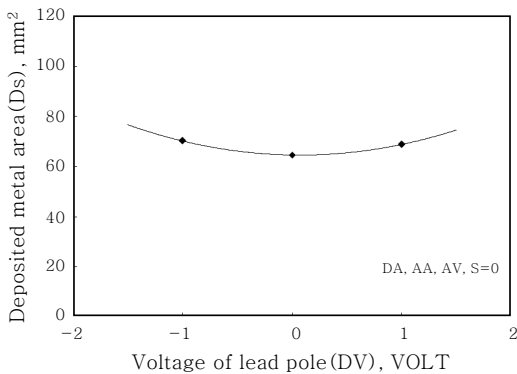


Fig. 6 Deposited metal area variation based on voltage of lead pole

$$P = 11.6 + 2.8DA - 2.45S - 0.05S^2 - 0.8DA \cdot S \quad (2)$$

$$Ds = 65.025 + 13.675DA + 8.85AA - 24.42S + 4.55DA^2 + 0.725AA^2 + 6.05S^2 - 6.35DA \cdot AA - 3.975DA \cdot S - 3.575AA \cdot S \quad (3)$$

4. 고찰

4.1 용입깊이 및 용착면적에 영향을 미치는 용접인자

용입깊이에 영향을 주는 주요인자로는 선행전극의 전류값과 용접속도로 판단되며 상관관계는 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

용착면적에 영향을 주는 주요인자로는 선행전극의 전류량, 후행전극의 전류량 및 용접속도이며 그 관계는 3차원 도시가 가능⁷⁾하며 Fig. 10과 같다.

4.2 예측식의 검증

기존 보유 중인 자료를 활용하여 용접 변수가 용입깊이 및 용착면적에 영향을 미치는 영향에 대한 예측

는 설정된 전류 값에 비례한다. 전압과 관련된 인자인 DV, AV는 용착면적에 거의 영향을 미치는 않는 것을 Fig. 6과 Fig. 7에서 확인하였다.

따라서 용입깊이 예측식 도출을 위해 후행전극의 전류, 선행 전극의 전압, 후행 전극의 전압 인자를 소거하고, 용착면적 예측식 도출을 위해서는 선행 전극의 전압, 후행 전극의 전압 인자를 소거한 후 각각의 회귀방정식을 계산하였다.

그 결과 용접조건 변화에 따른 용입깊이 및 용착면적의 변화는 다음과 같이 식 (2) 및 식 (3)으로 나타내어진다.

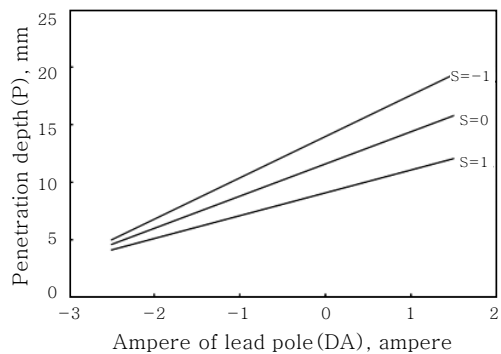


Fig. 8 Penetration depth variations based on ampere of lead pole

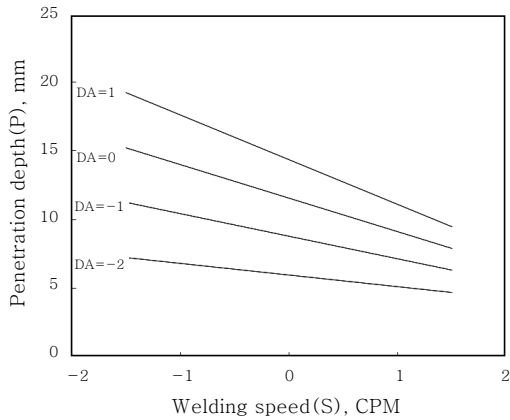


Fig. 9 Penetration depth variations based on welding speed

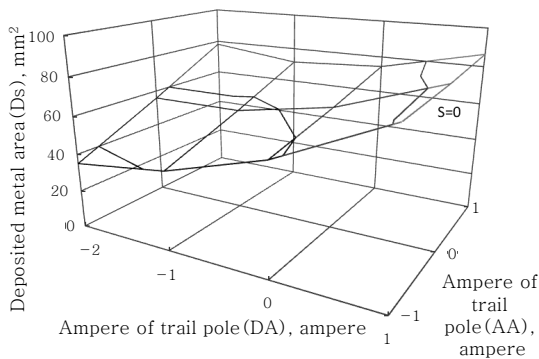


Fig. 10 Deposited metal area variations based on ampere of lead and trail pole

식, 식 (2) 및 식 (3)에 대한 검증을 실시하였다. 검증 방법으로 실측값대비 예측값의 정확도를 분석하였다⁸⁾.

용입 깊이 예측식, 식 (2)에 대한 검증결과는 Fig. 11과 같았고 오차 범위는 $\pm 2\text{mm}$ 임이 확인되었다. 예측식의 수립 및 검증에 사용된 용입깊이 범위는 5~18mm이며, 이것은 양면 서브머지드 아크 용접공법의 적용 시 필요한 대부분의 용입깊이를 포함하는 것이다. 양면 서브머지드 아크 용접공법에 따른 용입중첩 발생량은 일반적으로 4~8mm 수준이다. 따라서, 용접공정 자동화를 위해 추가적인 자료 수집 후 예측식의 정확도를 $\pm 1\text{mm}$ 오차범위까지 향상시켜야 할 것이다.

용착면적 예측식, 식 (3)에 대한 검증결과는 Fig. 12와 같으며 오차 범위는 $\pm 10\text{mm}^2$ 임이 확인되었다. 용착면적의 경우 표면 비드형상을 결정하는 주요한 인자로, 언더컷 및 오버랩 발생을 예측할 수 있다. 본 실험에서는 모두 양호한 비드형상을 획득하였으나, 향후 개선형상과 용착면적의 변화에 따른 실험을 통하여 개선형상에 따른 적정 용착면적 범위를 확인해야 할 것이다.

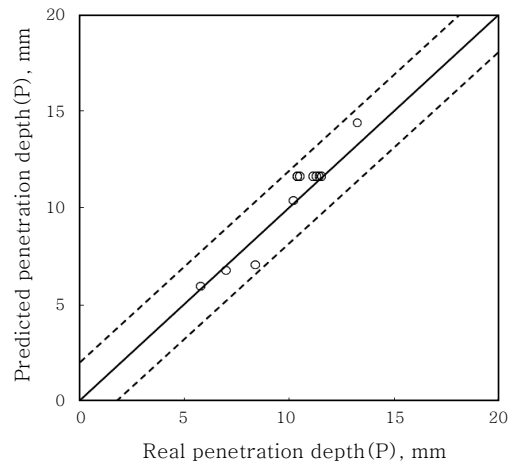


Fig. 11 Verification of the predicted penetration depth

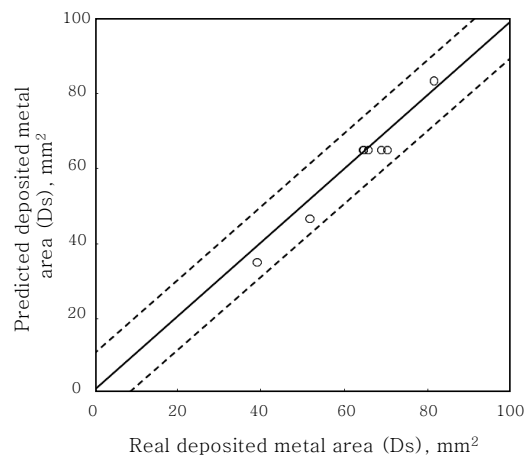


Fig. 12 Verification of the predicted deposited metal area

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

- 1) 탄뎀 서브머지드 용접 공법에서 용접조건에 따른 용입깊이, 용착면적에 대한 예측식을 도출하였다.
- 2) 시험된 인자 수준 범위 내에서 용입 깊이에 영향을 미치는 주요 인자는 선행 전극의 전류값과 용접속도이다. 선행 전극의 전류값과 선형적인 관계가 있음을 확인하였다.
- 3) 시험된 인자 수준 범위 내에서 용착면적에 영향을 미치는 주요 인자는 선행 전극의 전류, 후행 전극의 전류 및 용접속도이며 그 관계를 3차원 그래프로 확인하였다.
- 4) 도출된 예측식에 대하여 기존 보유 중인 자료를 활용하여 검증한 결과, 용입 깊이 예측식의 경우 2mm

이내의 오차 범위, 용착면적의 경우 10mm^2 이내의 오차 범위로 확인되었다.

5) 용접 전류값과 용접 속도 이외의 용접 변수의 경우에는 신뢰할만한 수준의 예측식을 도출하는 것이 어려울 것으로 판단된다. 예를 들면, 비드폭(W)을 예측하기 위해서는 L.J Yang⁹⁾의 연구와 같이 실험을 진행할 수 있으나, 용접 조건에 따른 뚜렷한 경향성을 확보하기 어려울 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 용접접합편람, III 공정 및 열가공, 2007 64-73 (in Korean)
2. H.R. Son, D.N. Shim : A Study on effective factor of penetration depth in TIG welding, Proceedings of KWS, 1997, 148-150 (in Korean)
3. Seung-gab Hong, Jong-Bong Lee : Effects of Welding Parameters on Penetration Depth in CO₂ Laser-GMA Hybrid Welding, Journal of KWS, **22-1** (2004), 38-42 (in Korean)
4. H.C. Wikle III, S. Kottilingam, R.H. Zee, B.A. Chin : Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process, Journal of Materials Processing Technology, **113** (2001), 228-233
5. Seonghyeon Park : Design of experiments, Minyoungsa, Desing of experiments by tables of orthogonal arrays, 2004, 377-432
6. N. Murugan, V. Gunaraj : Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes, Journal of Materials Processing Technology, **168** (2005), 478-487
7. Aniruddha Ghosh, Somnath Chattopadhyaya, R.K. Das, P.K.sarkar : Prediction of Submerged Arc Welding Yield Parameters through Graphical Technique, Procedia Engineering, **10** (2011), 2797-2802
8. Serdar Karaoglu, Abdullah Secgin : Sensitivity analysis of submerged arc welding process parameters, Journal of Materials Processing Technology, **202** (2008), 500-507
9. L.J.Yang, R.S.Chandel, M.J.Bibby : The effects of process variables on the bead width of submerged-arc weld deposits, Journal of Materials Processing Technology, **29** (1992), 133-144