

탄뎀 GMA 용접공정의 표면비드높이 예측을 위한 STACO모델 개발에 관한 연구

이종표* · 김일수*·† · 박민호* · 박철균* · 강봉용** · 심지연**

*목포대학교 기계공학과

**한국생산기술연구원 용복합부품·농기계실용화센터

A Study on Development of STACO Model to Predict Bead Height in Tandem GMA Welding Process

Jongpyo Lee*, IllSoo Kim*·†, Minho Park*, Cheolkyun Park*, Bongyong Kang** and Jiyeon Shim**

*Department of Mechanical Engineering, Mokpo University, Mokpo 534-729, Korea

**Korea Institute of Industrial Technology, Jeonju 561-202, Korea

†Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received August 11, 2014 ; Revised November 25, 2014 ; Accepted December 26, 2014)

Abstract

One of the main challenges of the automatic arc welding process which has been widely used in various constructions such as steel structures, bridges, autos, motorcycles, construction machinery, ships, offshore structures, pressure vessels, and pipelines is to create specific welding knowledge and techniques with high quality and productivity of the production-based industry. Commercially available automated arc welding systems use simple control techniques that focus on linear system models with a small subset of the larger set of welding parameters, thereby limiting the number of applications that can be automated. However, the correlations of welding parameters and bead geometry as welding quality have mostly been linked by a trial and error method to adjust the welding parameters. In addition, the systematic correlation between these parameters have not been identified yet.

To solve such problems, a new or modified models to determine the welding parameters for tandem GMA (Gas Metal Arc) welding process is required. In this study, A new predictive model called STACO model, has been proposed. Based on the experimental results, STACO model was developed with the help of a standard statistical package program, MINITAB software and MATLAB software. Cross-comparative analysis has been applied to verify the reliability of the developed model.

Key Words : STACO model, Tandem GMA welding, Neural networks

1. 서 론

용접·접합산업은 국가 기간산업인 조선, 자동차, 중공업, 건설, 전기/전자, 반도체 등의 산업에 필요한 기기 및 재료를 공급하기 때문에 이들 기간산업의 국가경쟁력을 좌우하는 생산기반산업이며, 첨단기술과의 융·복합을 통해 명품 제조업의 탄생을 견인한 국가기간산업의 핵심기반 기술이다. 하지만, 용접공정은 아크열과

아크광, 연기, 소음 등의 열악한 작업환경으로 인해 작업자가 기피하고 있는 3D 업종의 하나로 인식되고 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 용접공정의 개선과 생산량 향상을 위한 용접자동화 시스템 개발이 시급한 실정이다.

용접효율 및 생산량을 가장 손쉽게 올릴 수 있는 방법으로는 용접속도를 향상시키거나 용접공법을 변경하는 것이다. 그중 탄뎀 용접은 용착속도를 높이기 위해 전극수를 2개 이상 이용하여 하나의 용융지를 형성하는

방법으로 고효율 용접 혹은 고생산성 용접이라고 하며¹⁾, 자동용접 캐리지를 적용하여 두 개의 독립적 제어가 가능한 용접기술을 적용하고 용접공정변수의 유지성과 초기 전극사이의 거리를 개별적으로 제어함으로써 용접 생산성 향상과 동시에 용접품질 향상에 도움이 된다²⁾. 현재 용접작업시 발생하는 용접결함인 용입깊이 및 용착면적을 결정하는 인자의 영향을 분석하고 정립하는 연구가 진행되고 있다³⁻⁴⁾. An은 탄뎀 EGW를 이용한 대입열 용접부 성능을 향상 시키려는 연구가 수행되었으며⁵⁾, 고속으로 수평 필릿 용접이 가능하도록 Filler Wire를 선, 후행 전극 사이에 삽입시켜 고용착 및 용융시 안정화를 도모한 새로운 TOP (Twin-Tandem One Pool) 시공법과 전용 메탈게 플렉스 코어드 와이어의 개발에 관한 연구도 보고되고 있다⁶⁻⁸⁾. 하지만, 이러한 인자들을 1-토치 용접조건 설정과는 달리 탄뎀 용접의 경우 품질에 영향을 미치는 인자가 더 많이 존재하며 현장조건에 맞추어 용접사의 경험적인 측면에서 작업조건을 설정함으로써 용접 불량률을 더욱 효과적으로 감소시킬 수 있는 기술과 자동 연속용접을 위한 알고리즘이 필수적으로 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 탄뎀 GMA 용접공정시 획득한 데이터를 MATLAB프로그램을 활용하여 신경회로망을 기반으로 하는 예측모델을 개발하고, 개발된 예측모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 실제 용접실험에서 얻은 비드형상과 상호 비교·분석하며, PAM분석을 통해 정확도를 평가하고자 한다.

2. 용접 실험

2.1 실험장치 구성 및 방법

탄뎀 GMA 용접공정의 비드형상을 예측하기 위하여 2대의 600A급 GMA용접기와 2전극 토치 구동부, 와이어 송급장치, 직선형 용접캐리지 및 가이드 레일로 시스템을 구성하여 용접실험을 실시하였다. 용접결함을 줄이기 위하여 선행토치는 솔리드 와이어(A5.18 ER70S-6)를 사용하였으며, 후행토치는 많은 용착량을 확보하기 위하여 플렉스 코어드 와이어(E71T-1C)를 사용하였다. 보호가스 역시 2개의 분배를 이용하여 개별적으로 용접기를 통해 공급되도록 구성하였으며, CTWD (Contact Tip to Work Distance)는 18mm로 고정하였다. 용접 토치각도는 수직 토치각도로 고정하였으며, 용접성에 영향을 미치는 토치간 거리는 예비실험을 통하여 도출된 적정 값인 50mm로 고정하였다. 또한, 보다 체계적인 결과분석을 위하여 용접전류와 아크전압은 모니터링 시스템(WTS-100A, WeldteQ System)을 이용하

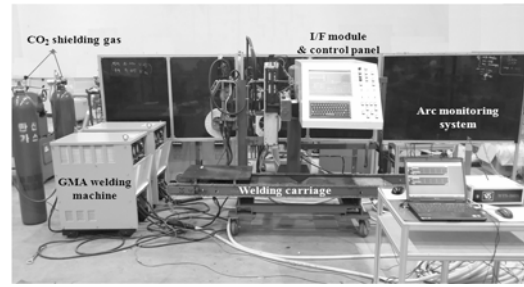


Fig. 1 Experimental setup for tandem GMA welding process

여 실시간으로 수집되도록 하였다. Fig. 1은 용접실험을 위한 전체시스템 구성을 나타낸다.

본 실험에서는 입력변수는 용접전류, 아크전압, 용접속도이며, 이에 따른 출력변수로는 표면 비드형상(표면비드 폭, 표면비드 높이)으로 선정하였다. 실험계획법은 입력변수 변화에 따른 출력변수 반응의 비선형적인 변화에도 민감하게 대응할 수 있고 실험횟수의 최적화를 고려하기 위하여 중심합성계획법을 적용하였다. 입력변수 3개로 설정한 결과 정방점 8개, 축점 6개, 중심점 6개로 구성된 총 20회의 실험조건이 생성된다. 적정 수준의 범위는 예비실험을 통하여 정하였으며, 입력변수의 실험변수 및 수준은 Table 1 과 같이 설정하였고, 20개의 실험조건을 사용하여 순차적으로 3회 반복실험을 실시하였다.

2.2 실험 결과

용접실험결과 전반적으로 아크가 안정적이고 양호한 비드를 형성함으로써 외관상 결함을 나타내지 않았으며, 용접조건에 따라 용융부의 형상에 미치는 영향을 판별하기 위해 광학 현미경 시스템을 이용하여 단면형상(macro)을 촬영하여 특성을 분석하였다. 측정된 결과인 표면비드 높이와 단면 비드형상을 Table 2에 나타내었다. AWS (American Welding Society) D1.1⁹⁾에서 제시하는 일반 철구조물 용접부의 최대 허용 비드높이인 1/8인치 즉, 3.175mm 이하인 경우 양호한 비드높이를 형성하였다고 판단한다. 탄뎀 용접실험을 통해 획득한 표면비드 높이의 최대는 2.22mm로, 용접부의 최대 허용 비드높이인 3.175mm보다 작으며

Table 1 Welding parameters and their levels

Parameter \ Level	-α	-1	0	1	α
Welding current(A)	250	270	300	330	350
Arc voltage(V)	27	28	30	32	33
Welding speed(cm/min)	25	27	30	33	35

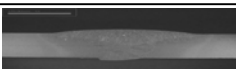
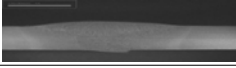
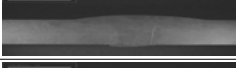
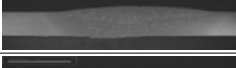
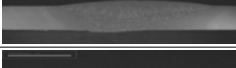
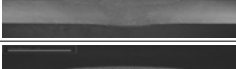
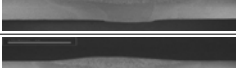
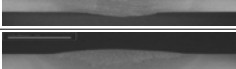


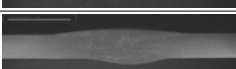
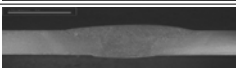
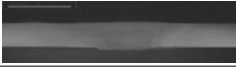
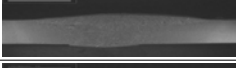
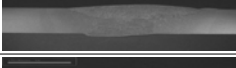
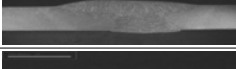
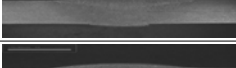
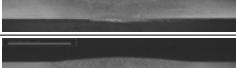


로 안정적인 비드형상이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

3. 예측모델 개발

3.1 STACO 모델의 구조 선택

표면비드 높이에 대한 STACO(Stability of Coalitions) 모델의 최종 구조를 선택하기 위하여 6가지의 신경회로

Table 2 Experimental Results data of the GMA welding

No.	Top-bead height (mm)				Bead geometry
	1st	2nd	3rd	Avg.	
1	1.85	1.79	1.92	1.85	
2	1.89	2.01	1.97	1.96	
3	1.64	1.68	1.71	1.68	
4	2.24	2.53	2.49	2.42	
5	1.87	1.92	1.88	1.89	
6	1.34	1.47	1.41	1.41	
7	1.84	1.71	1.88	1.81	
8	1.86	1.85	1.79	1.83	
9	1.62	1.55	1.72	1.63	
10	1.95	1.99	1.84	1.93	
11	2.21	1.95	1.89	2.02	
12	1.61	1.60	1.63	1.61	
13	2.02	1.99	1.95	1.99	
14	1.88	1.87	1.92	1.89	
15	2.12	2.05	2.01	2.06	
16	2.01	1.82	1.71	1.85	
17	1.88	1.81	2.15	1.95	
18	2.22	1.80	2.08	2.03	
19	1.84	1.86	2.22	1.97	
20	1.72	1.58	1.78	1.69	

망을 구성하여 평가하였다. STACO모델이란 인공신경망 예측 모델의 일부분으로, 역전파 알고리즘을 기반으로 하고 있다. 이 모델은 넓은 범위의 입력변수에 따라 여러 가지의 신경망 함수를 복합적으로 이용하여, 복잡하고 비선형적인 출력변수의 예측이 가능한 모델이다. 학습을 위한 6가지의 신경회로망구조 설정은 Table 3에 나타내었으며, 네트워크 개발과 트레이닝은 MATLAB을 이용하였다. 학습에 사용된 데이터는 20개의 용접조건별로 각 3회씩 반복하여 획득한 총 60회의 탄뎀 GMA용접 실험결과를 이용하였으며, 학습된 신경회로망을 시험하기 위하여 60회의 실험결과 평균값을 이용하였다.

입력변수는 용접전류, 아크전압, 용접속도 총 3개를 이용하였으며, 출력변수는 표면비드 높이를 이용하였다. 학습을 수행하여 표면비드 높이를 예측한 결과 전달함수 "tansig+purelin"은 전달함수 "logsig+logsig" 보다 MSE값은 감소하며, 결정계수의 값은 증가함으로써 보다 정확한 표면비드 높이를 예측함을 확인하였다. 학습함수는 "trainlm"함수가 "trainbr"함수 보다 정확한 표면비드 높이를 예측하였다. 6가지의 신경회로망 중 5번째 신경회로망의 구조가 시험의 MSE와 학습의 MSE의 오차가 최소였으며, 상관계수 R이 1에 가까운 0.90965로 가장 정확한 표면비드 높이를 예측하였다. Fig. 2는 탄뎀 GMA 용접의 측정된 표면비드 폭과 신경회로망 LMBP알고리즘을 이용하여 학습을 수행한 표면비드 폭의 실측값과 예측값을 비교하여 나타내었다.

은닉층 사이즈 선택은 신경망 설계에서 가장 중요하게 고려해야 할 요소이다. 6개의 신경회로망 구성 중 가장 정확한 표면비드 폭을 예측한 5번째 신경회로망 구조를 이용하여 숨겨진 은닉층의 뉴런수를 확인하였으며, 은닉층의 뉴런수는 3~10으로 설정하여 오차가 최소화되도록 학습하였다. Fig. 3은 은닉층의 뉴런수에 따른 표면비드 폭의 실측값과 예측값의 비교·분석한 결과를 보여주고 있으며, 학습을 수행한 결과 은닉층의 뉴런수가 8개일 경우 상관계수 R이 1에 가장 가까운 0.98982로 은닉층의 3개일 경우 보다 정확한 표면비드 높이를 예측함을 확인하였다.

시험의 MSE와 학습의 MSE의 최소 오차 또한 은닉층의 뉴런수가 8개일 경우에 시험의 MSE 0.0068과 학습의 MSE 0.0019로 은닉층의 뉴런수가 3개일 경우 보다 정확한 표면비드 높이를 예측하였으며, Fig. 4는 5번째 신경회로망을 이용하여 얻은 시험과 학습에 대한 MSE 오차를 나타내었다.

신경회로망 구조를 설정하여 학습한 결과 Fig. 5와 같은 표면비드 높이의 STACO모델을 개발하였다. 표면

Table 3 Characteristics of the six selected neural-network configurations

	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4	Conf. 5	Conf. 6
Input Variables	3	3	3	3	3	3
Output Variables	1	1	1	1	1	1
Neurons on Hidden Layer	3	3	3	3	3	3
Training Function	trainbr	trainbr	trainlm	trainlm	trainbr	trainlm
Transfer Function	logsig+	tansig+	logsig+	tansig+	tansig+	tansig+
Function	logsig	purelin	logsig	purelin	purelin	purelin
Max._epoch	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Error goal	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10
Mu Parameter	0.005	0.005	0.005	0.005	0.01	0.001

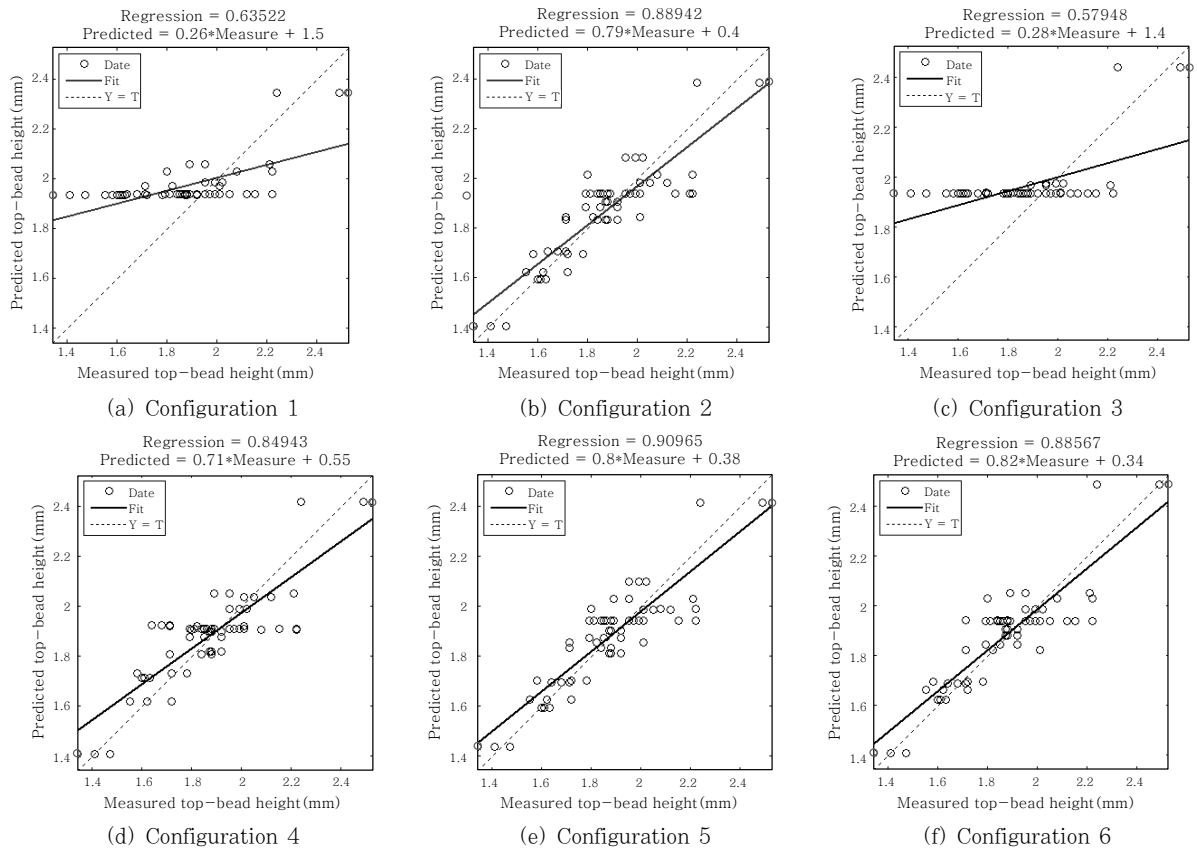


Fig. 2 R²-value for the six selected neural-network configurations

비드 높이의 STACO모델 구조의 전달함수 “tansig+ purelin”, 학습함수는 “trainlm”, 학습 기능은 “Learnqdm”, 은닉층의 뉴런수는 8개이다.

3.2 최적의 예측모델 성능평가

개발된 STACO모델의 예측성능을 비교·분석하기 위하여 Poliak¹⁰⁾이 정의한 PAM(Predictive Ability

of Model)을 이용하여 정확도를 평가하였다. PAM은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$PAM = \frac{N_{PAM}}{N_{total}} \times 100 \tag{1}$$

여기서, N_{PAM} 은 $\left| \frac{B_M - B_P}{B_M} \right| \leq 0.1$ 범위의 예측

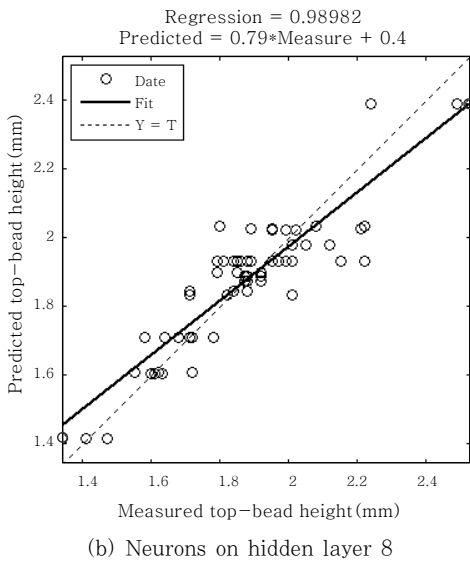
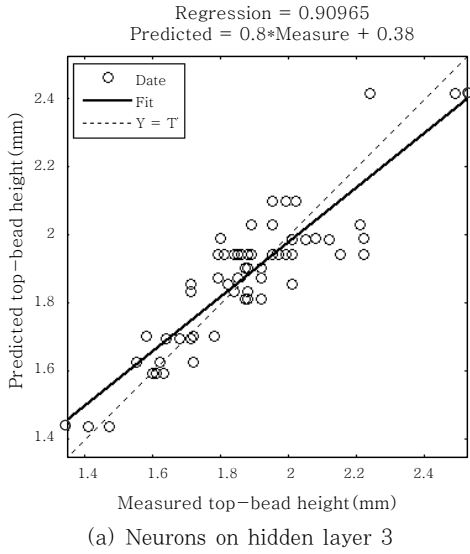


Fig. 3 R²-value for the selected artificial neural-network configuration 5 with a number of between 3 and 10 neurons in the hidden layer

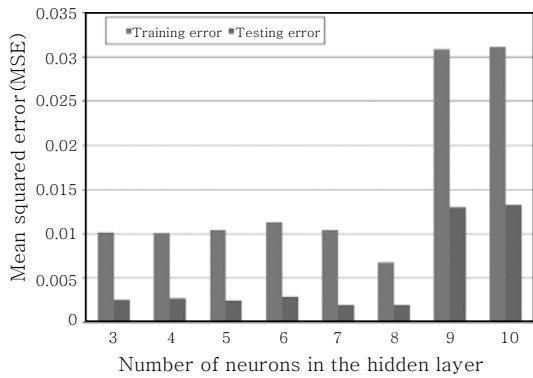


Fig. 4 Training and test subset MSE value for the selected artificial neural-network configuration 5 with a number of between 3 and 10 neurons in the hidden layer

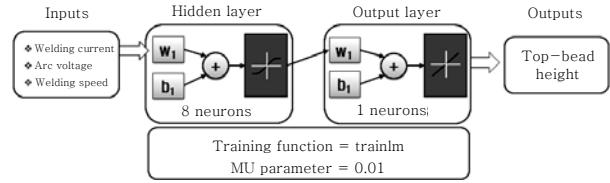


Fig. 5 STACO model structure of top-bead height

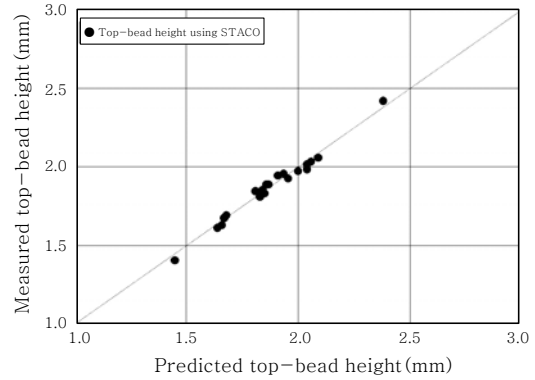


Fig. 6 Comparison between measured and predicted top-bead height from the developed STACO model

치의 수를 나타내며, N_{total} 은 전체 예측치 수를 나타낸다. 그리고 B_M 은 실측치 표면비드 높이이며, B_P 는 계산된 표면비드 형상을 의미한다. PAM은 오차범위 10% 이내에 예측을 정확한 예측으로 간주하여 모델의 정확도를 나타낸다. 탄뎀 용접실험을 통해 획득한 표면비드 높이의 최대는 2.22mm이며 오차 범위 10%이내의 최대 표면비드 높이는 2.44mm이다. 그러므로 용접부의 최대 허용 비드높이인 3.175mm보다 작으므로 PAM의 오차범위 10% 이내의 예측을 정확한 예측으로 간주하여 모델의 정확도를 평가하여도 안정적인 표면비드 형상을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

예측능력 확인을 위해 각 실험조건별 측정된 표면비드 높이와 예측된 표면비드 높이를 비교하여 Fig. 6에 나타내었으며, 100%의 PAM의 예측능력을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

탄뎀 GMA 용접공정의 비드형상 예측모델 개발을 위하여 용접실험을 실시하였으며, 이를 통하여 획득한 데이터를 활용하여 비드형상 예측모델 개발을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 탄뎀 GMA 용접 자동화 시스템을 구성하여 용접 실험을 수행한 결과 균일한 표면비드의 형상으로 외관상 결함이 없으며, 표면비드 높이의 최대는 2.22mm로

용접부의 최대 허용 비드높이인 3.175mm보다 작으므로 안정적인 비드형상이 이루어짐을 확인하였다.

2) 용접실험에서 측정된 실험결과를 기초로 신경회로망 LMBP알고리즘을 이용하여 전달함수 “tansig+purelin”, 학습함수“trainlm”, 학습기능“Learnngdm”, 은닉층의 뉴런수 8의 구조가최적화된 STACO모델임을 확인할 수 있었다.

3) PAM을 이용하여 최적화된 STACO모델의 신뢰성을 검증한 결과 100%의 예측성을 나타냄을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (No. 2013H1B8A2032082).

Reference

- Hui Jin Yi, Sung Soo Kang, Gum Bin Yu, Won Hak Bae and Hyun Soo Moon : Comparison of Mechanical Properties and Microstructural Charateristies of Tandem GMAW Weld Metal in 490MPa Grade Steel, Journal of KWJS, **27-2** (2009), 76-81 (in Korean)

- H., J. (2009). Comparison of Mechanical Properties and Microstructural Charateristies of Tandem GMAW Weld Metal in 490MPa Grade Steel. Journal of KWJS, **27(2)**, 76-81
- Seung gab Hong and 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)
- H.C. Wikle, 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
- Y.H An, H.J Park.. The Effect of Twin-tandem EGW on the Performance of Welded Joint with Large Heat Input, KWJS (2012), 41-41
- F. Koshiishi: Welding Technology, 56-1(2008), 66
- H. Yukinori: Arc welding, Japan Welding Society, **77-5** (2008), 70
- S. Keiichi: Welding material, Japan Welding Society, **77-5** (2008), 65
- AWS D1. 1, The latest edition issued prior to December **31**, 1994
- Poliak. “Parallel ANOVA Processing”, MIT Press, Cambridge, MA, 318-362, 1986



- 이종표
- 1987년생
- 목포대학교 대학원 기계공학과
- 자동차 및 알고리즘
- e-mail : jplee@mokpo.ac.kr



- 박철균
- 1989년생
- 목포대학교 대학원 기계공학과
- 자동차 및 모니터링시스템
- e-mail : ckpark@mokpo.ac.kr



- 김일수
- 1958년생
- 목포대학교 기계공학과
- 자동차 및 용접공정 최적화
- e-mail : ilsookim@mokpo.ac.kr



- 강봉용
- 1960년생
- 한국생산기술연구원 용복합부품 농기계 실용화센터
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail : kanbo@kitech.te.kr



- 박민호
- 1988년생
- 목포대학교 대학원 기계공학과
- 자동차 및 레이저용접
- e-mail : parkminho21@mokpo.ac.kr



- 심지연
- 1980년생
- 한국생산기술연구원 용복합부품 농기계 실용화센터
- 전자기 펄스 용접 공정
- e-mail : shimjy@kitech.re.kr