

STACO 모델을 이용한 탄뎀 GMA 용접공정의 표면비드 폭 예측

이종표^a, 박민호^a, 김도형^a, 진병주^a, 손준식^b, 강봉용^c, 심지연^c, 김일수^{a*}Prediction of the Top-bead width of Tandem GMA Welding Processes
Using the STACO ModelJong Pyo Lee^a, Min Ho Park^a, Do Hyeong Kim^a, Byeong Ju Jin^a, Joon Sik Son^b,
Bong Yong Kang^c, Ji Yeon Shim^c, Ill Soo Kim^{a*}^a Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University,
1666, Yeongsan-ro, Chonggye-myon, Muan-gun, Jeonnam-do, 58579, Korea^b Research Institute of Medium & Small Shipbuilding,
55, Deabuljugeo 3-ro, Samho-eup, Yeongam-gun, Jeonnam-do, 58457, Korea^c Korea Institute of Industrial Technology,
222, Palbok-ro, Deokjin-go, Jeonju, Jeonbuk-do, 54853, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 September 2015
Revised 17 November 2015
Accepted 30 November 2015

Keywords:

Top-bead width
Tandem GMA welding
STACO model
Welding quality

ABSTRACT

Tandem arc welding is a guarantor for high efficiency and cost saving since the quantity of wire which is deposited in the welding is approximated 30% greater than in conventional welding. The welding process is now being successfully applied in many industries. However, in the case of tandem arc welding, good quality and high productivity should depend on the welding parameters. Therefore, an intelligent algorithms for the automatic tandem arc welding process has been necessarily required. In this study, a predictive model based on the neural network by using the data acquired during tandem gas metal arc (GMA) welding process has been developed. To verify the reliability of the developed predictive model, a mutual comparison with the surface of the top-bead width obtained from actual experiments has been analyzed.

1. 서론

용접·접합기술은 15대 전략기술 중 생산기반, 생산시스템, 자동차·조선, 반도체, 디스플레이, 금속재료 등 6개 분야와 발전, 건축토목, 기계, 철도, 항공우주, 전자통신, 방위산업 분야 등의 국내 성장동력 산업과 주력기간 산업에서 제품의 품질 및 내구성, 생산성, 부가가치 등을 결정하는 핵심기술이다. 그러나 92% 이상이 20인 미만의 소기업으로 중소기업 중심산업에 해당하여 영세성을 면

치 못하고 있어 독자 기술력 확보가 매우 시급하다¹⁾. 용접기술은 용접전문기술자만이 임의의 용접상황에 대해 적절한 용접시공법을 구현하고 있어 전문 인력을 확보하지 못한 대다수의 용접관련 업체에서는 부정확하고 비효율적인 용접시공법을 적용함으로써 용접불량 용접결함으로 인한 기술적인 어려움과 불량증가 원가상승 등의 경제적인 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 용접공정의 개선과 생산성 향상을 위한 자동화 용접시스템의 개발이 시급한 실정이다.

* Corresponding author. Tel.: +82-61-454-3455

Fax: +82-61-452-6376

E-mail address: ilsookim@mokpo.ac.kr (Ill Soo Kim).

용접 고효율 및 생산성을 가장 손쉽게 향상할 수 있는 방법으로는 용접속도를 향상시키거나 용접방법을 변경하는 것이다. 다양한 방법 중 탠덤(tandem) 용접 방법은 와이어 전극수를 2개 이상 사용하여 용착속도를 높여 하나의 용융지를 형성하는 방법으로 고효율을 용접 혹은 고생산성 용접이라고 한다. 또한 독립적 제어가 가능한 두 개의 자동용접기술을 이용하고 용접공정변수의 유지성과 2개의 전극사이의 거리를 독립적으로 제어함으로써 용접 생산성 및 품질 향상에 도움이 된다.

현재 용접 수행 중 발생하는 용착면적 및 용입깊이를 결정짓는 인자의 영향 분석 및 정립하는 다양한 연구가 수행되고 있으며^[2], 탠덤 용접이나 다전극 용접과 같이 용접공법을 변경하여 생산성을 향상시키려는 연구가 수행되었다^[3,4]. Park^[5]은 탠덤 서브머니즈 용접 공법의 용접조건에 따른 용입깊이 및 용착면적 예측에 관한 연구를 수행하였으며, Park^[6]은 탠덤 필릿용접 불량개선을 위한 선행 토치의 전류 결정에 관한 연구를 수행하였다. 하지만, 탠덤 용접은 품질에 관계되는 요소가 더 많이 존재하며, 현장조건에 맞춰 풍부한 경험을 갖춘 소수의 고급용접 전문기술자만이 임의의 용접사항에 대해 적절한 용접시공법을 구현하고 있어 효과적으로 용접공정의 불량을 감소시킬 수 있는 용접기술과 자동용접을 위한 알고리즘이 필수적으로 요구되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 탠덤 용접공정 시 획득한 데이터를 이용하여 신경회로망을 기반으로 하는 예측모델을 개발하며, 개발되어진 예측모델의 신뢰성 검증을 위하여 실제 용접실험에서 획득한 표면비드 폭과 상호 비교 분석하고자 한다.

2. 용접 실험

2.1 실험 방법

탠덤 용접공정의 품질평가 및 비드형상 예측모델을 개발하기 위하여 2대의 600A급 용접기와 2전극 토치 및 직선형 용접피더 캐리지로 시스템을 구성하여 용접실험을 진행하였다. 선행토치는 솔리드 와이어(SM-70 와이어, $\varnothing 1.2$)를 사용하여 용접결함을 줄이고자 하였으며, 후행토치는 플렉스 코어드 와이어(K-71T 와이어, $\varnothing 1.2$)를 사용하여 많은 용착량을 확보하고자 하였다. CTWD (contact tip to work distance)는 18 mm로 고정하였으며, 토치각도는 수직으로 고정하였다. 또한, 아크 스프링 현상을 최소화하기 위하여 토치 중심간 거리는 선행연구 및 예비실험결과를 참고하여 적정 수준인 50 mm로 고정하였으며, 보다 체계적인 결과분석을 위하여 아크전압과 용접전류 모니터링 시스템(WTS-100A)을 사용하여 실시간으로 데이터를 수집할 수 있도록 하였다. Fig. 1은 용접실험을 위한 전체시스템 구성을 나타내며, Fig. 2는 용접실험에 적용한 선행 및 후행토치의 세팅을 나타낸다.

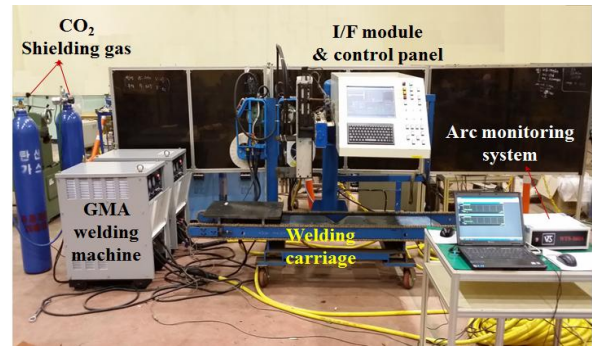


Fig. 1 Tandem GMA welding experiment setup

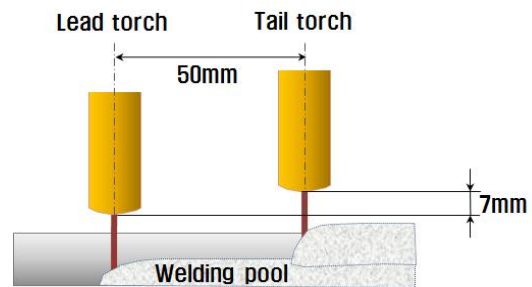


Fig. 2 Dimensions of torch distance

Table 1 Welding conditions for experiments

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

본 용접실험에의 공정변수는 용접성에 가장 큰 영향을 미치는 용접전류, 아크전압, 용접속도로 선정하였으며, 이에 따른 출력변수로는 표면비드 폭으로 선정하였다. 실험계획법은 실험횟수의 최적화를 고려하기 위하여 비선형적인 변화에 민감하게 대응할 수 있는 중심합성계획법을 활용하였다. 20개의 용접 실험조건을 이용하여 순차적으로 3회 반복실험을 실시하였으며, 입력변수의 실험 변수 및 수준은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험 결과

용접 실험 중 실제 용접전류 및 아크전압값을 용접기의 출력단에서 홀센서 타입의 전류센서와 전압센서를 이용하여 초당 2.5 kHz의 샘플링 간격으로 측정된 데이터가 PC로 저장되도록 하였다.

실험결과 전반적으로 양호한 비드를 형성함으로써, 외관상 결함은 나타나지 않음을 확인할 수 있었으며, 용접조건에 맞춰 용융부 형상에 미치는 특성을 분석하기 위해서 단면형상(macro)을 촬영하였다. 실험이 완료된 용접시험편의 가로축 중간부분을 레이저절단기(laser cutting machine)를 이용하여 60×30 mm의 크기로 절

Table 2 Welding levels and results of experiment

No.	Level			Results of experiment
	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	
1	0	0	α	16.73
2	0	0	0	18.34
3	0	$-\alpha$	0	17.01
4	α	0	0	19.02
5	0	α	0	17.44
6	$-\alpha$	0	0	16.33
7	0	0	$-\alpha$	19.34
8	0	0	0	18.68
9	-1	1	1	16.72
10	0	0	0	18.47
11	1	1	-1	21.35
12	-1	-1	1	18.22
13	1	-1	-1	19.25
14	-1	-1	-1	16.72
15	0	0	0	18.69
16	1	-1	1	17.67
17	0	0	0	18.34
18	1	1	1	18.85
19	0	0	0	18.51
20	-1	1	-1	15.68

단하였으며, 비드 크기 측정을 위하여 광학 현미경을 이용하여 단면형상(macro)을 촬영하였다. 측정된 결과인 표면비드 폭은 Table 2에 나타내었다.

표면비드 폭의 경우 특별히 정해진 규정 없이 해당 용접구조물의 용접작업절차서(WPS: welding procedure specification) 및 용접절차 승인시험 기록(PQR: procedure qualification record) 등에서 제시하는 기준을 따르는 것이 일반적이며 용접방법, 모재의 두께, 개선부의 넓이 등에 따라 최대 허용 표면비드 폭의 크기가 달라진다. 따라서 본 연구에서는 구조용 철골공사의 현장 용접시공 규정(A505010)에서 제안하는 일반 맞대기 용접구조물의 허용 표면비드 폭인 15~25 mm를 충족하였을 경우 양호한 표면비드 폭을 형성하였다고 판단하였다. 표면비드 폭 측정 결과 15.31~21.35 mm로 일반 맞대기 용접구조물의 허용 표면비드 폭인 15~25 mm를 만족하는 안정적인 비드를 형성함을 확인할 수 있었다.

3. STACO 모델 개발

3.1 표면비드 폭 모델의 구조 선정

표면비드 폭에 대한 STACO(stability of coalitions)모델의 최

Table 3 Characteristics of neural-network configurations

	Training Function	Transfer Function
configuration 1	Bayesian regularization	logsig+logsig
configuration 2	Bayesian regularization	tansig+purelin
configuration 3	Levenberg-Marquardt backpropagation	logsig+logsig
configuration 4	Levenberg-Marquardt backpropagation	tansig+purelin
configuration 5	Bayesian regularization	tansig+purelin
configuration 6	Levenberg-Marquardt backpropagation	tansig+purelin

종 구조 선택을 위하여 신경회로망 6가지를 구성하여 평가하였다. STACO모델이란 인공신경망 예측 모델의 일부분으로, 넓은 범위의 입력변수에 따라서 다양한 신경망 함수를 복합적으로 이용하여 비선형적이고 복잡한 출력변수의 예측이 가능한 모델이다.

학습을 위한 신경회로망 여섯 가지의 구조 설정은 Table 3에 나타내었으며, 트레이닝과 네트워크 개발은 MATLAB을 사용하였다. 용접실험을 통해 획득한 총 60회의 용접실험결과를 이용하여 학습에 사용하였으며, 60회의 실험결과 평균값을 이용하여 학습된 신경회로망을 시험하였다. 입력변수는 아크전압, 용접전류, 용접속도를 사용하였으며, 출력변수는 표면비드 폭 1개를 사용하였다. 또한 은닉층의 수는 최적화 문제에서는 은닉층의 수가 3개만으로도 충분하므로 은닉층 수는 3개로 고정하였으며, epoch수가 1000일 때, 목표오차가 1e-10까지 훈련을 수행하였다.

탄뎀 GMA 용접실험을 통해 획득한 표면비드 폭과 신경회로망 LMBP알고리즘을 사용하여 학습을 수행한 표면비드 폭의 예측값과 실측값을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 학습을 수행하여 표면비드 폭을 예측한 결과 “tansig+purelin”의 전달함수는 “logsig+ logsig”의 전달함수 보다 평균제곱오차(mean square error) 값이 감소하였으며, 결정계수의 값은 증가함으로써 보다 정확한 표면비드 폭을 예측함을 확인할 수 있었다. 또한, “Bayesian regularization”의 학습함수보다 “Levenberg-Marquardt backpropagation”의 학습함수가 정확한 표면비드 폭을 예측하였다.

6개의 신경회로망 중 4번째 신경회로망 구조가 시험 및 학습 MSE의 오차가 최소였으며, 상관계수 R은 0.93519로 가장 정확한 표면비드 폭을 예측하였다.

3.2 최적의 예측 모델 선정

신경회로망 설계에서 가장 고려해야 할 요소는 은닉층의 사이즈 선택이다. 따라서 가장 정확한 표면비드 폭을 예측한 4번째 신경망 구조를 사용하여 숨겨진 은닉층의 뉴런수를 확인하고자 하였으며,

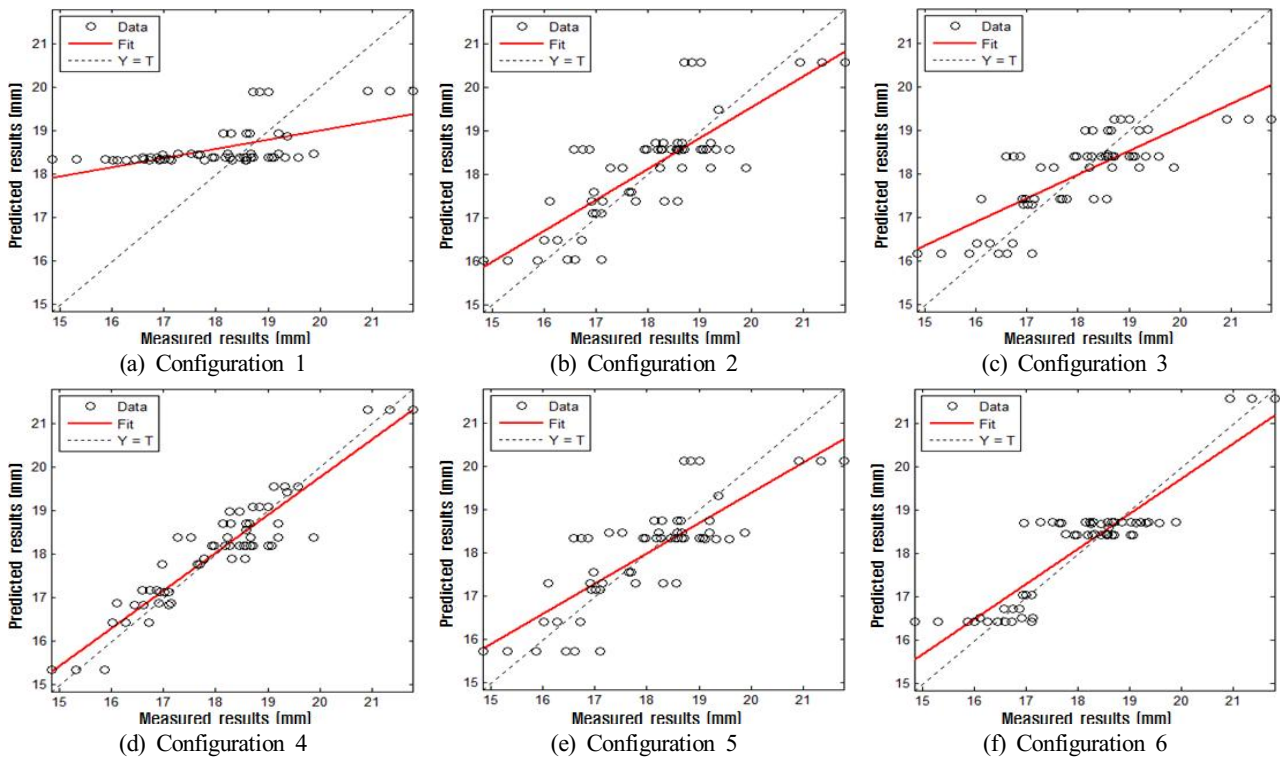


Fig. 3 R^2 -value for neural-network configurations for top-bead width

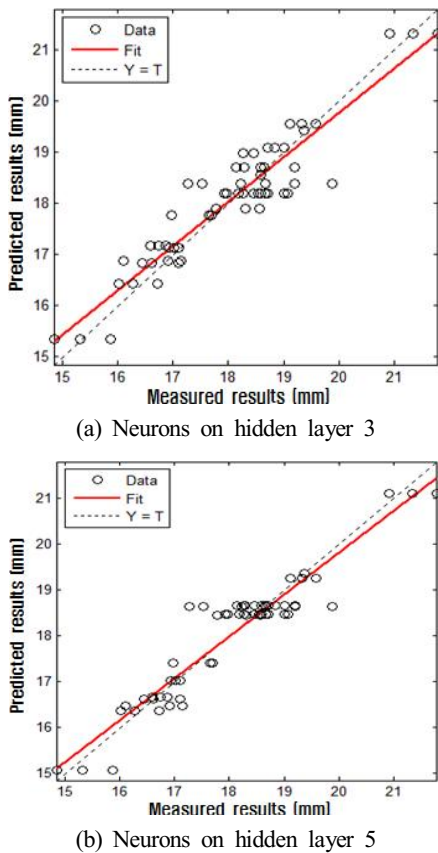


Fig. 4 R^2 -value for the fourth neural-network configuration with 3 to 10 neurons in the hidden layer for top-bead width

Table 4 R^2 -value for the fourth neural-network configuration between 3 and 10 neurons in the hidden layer

Hidden Layer	Epochs	Training Time (sec)	Training Error (MSE)	Testing Error (MSE)
3	203	00:00:02	0.3271	0.2049
4	1000	00:00:07	0.3865	0.2926
5	179	00:00:02	0.1963	0.2041
6	144	00:00:01	0.2974	0.2146
7	172	00:00:01	0.3109	0.1532
8	465	00:00:04	0.2021	0.1257
9	226	00:00:02	1.5248	1.5536
10	340	00:00:02	0.2039	0.4479

3~10까지의 은닉층 뉴런수를 설정하여 오차가 최소화되도록 학습하였다. 은닉층 뉴런수 변화에 따른 표면비드 폭의 실측 및 예측값의 비교·분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 은닉층의 뉴런수가 5개일 경우 상관계수R이 0.98157로 가장 정확한 표면비드 폭을 예측하였음을 확인할 수 있었다.

Table 4에 은닉층의 뉴런수를 찾기 위한 네트워크 구조를 재구성하여 학습한 신경회로망 결과를 나타내었으며, 은닉층의 뉴런수가 3개일 경우보다 5개일 경우 시험의 MSE 0.1963과 학습의 MSE 0.3865로 오차가 최소로 정확한 표면비드 폭을 예측함을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 4번째 신경회로망을 이용하여 획득한 시

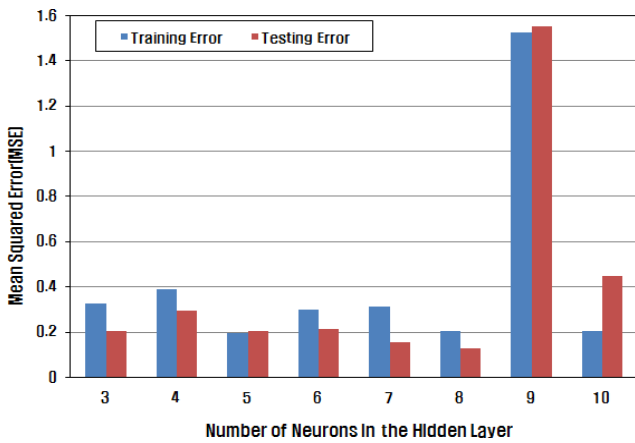


Fig. 5 Training and testing subset MSE value for the fourth neural-network configuration for top-bead width

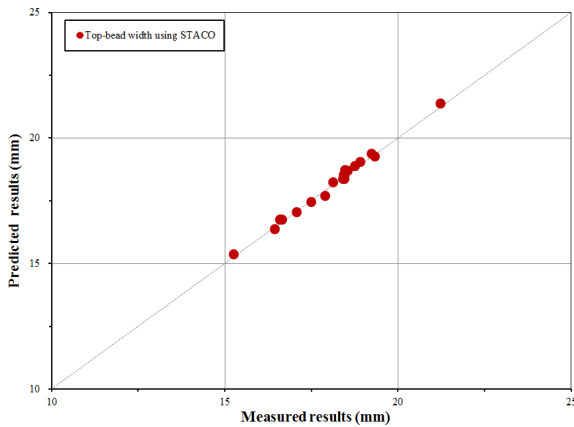


Fig. 6 STACO model comparison of the measured and predicted results

협과 학습 MSE 오차에 대해 나타내고 있다.

3.3 최적의 예측 모델 성능평가

Poliak^[7]가 정의한 PAM (predictive ability of model)을 사용하여 개발된 STACO모델의 정확도를 분석 및 평가하였다. PAM은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$PAM = \frac{N_{PAM}}{N_{total}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, N_{PAM} 은 $|(B_M - B_P)/B_M| \leq 0.1$ 범위의 예측치의 수를 나타낸다. N_{total} 은 전체 예측치 수를 나타내며, B_M 은 실측치 표면비드 폭, B_P 는 계산된 표면비드 폭을 의미한다. PAM은 모델의 정확도를 나타내며, 10% 이내의 오차범위를 정확한 예측으로 간주한다. 탄뎀 용접실험을 통해 획득한 표면비드 폭은 15.31~21.35 mm로 오차 범위 10% 이내이므로 안정적인 표면비드 폭을 예측함을 판단할 수 있다. 예측능력 확인을 위해서 각각의 실험조건에 따라 측정된 표면비드 폭과 예측된 표면비드 폭을 비교 분석

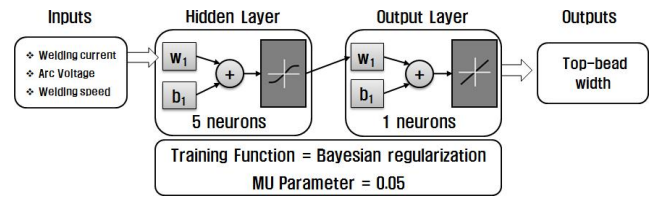


Fig. 7 STACO model flow chart for top-bead width

하여 Fig. 6에 나타내었으며, PAM의 예측능력은 100%임을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 신경회로망 구조를 통해 설정하여 학습한 결과로서 표면비드 폭의 STACO모델을 개발하였다. 표면비드 폭의 STACO 모델 구조는 “tansig+purelin”의 전달함수와 “Bayesian regularization”의 학습함수, “LearnGDM”의 학습 기능, 은닉층의 뉴런 수는 5개로 구성되어 있다.

4. 결론

탄뎀 용접공정의 표면비드 폭에 대한 예측모델을 개발하기 위해서 탄뎀 용접자동화 시스템을 구성하여 용접실험을 수행한 결과 표면비드 폭 15.31~21.35 mm로 일반 맞대기 용접구조물의 허용 표면비드 폭인 15~25 mm를 만족하는 양호한 비드를 형성함을 확인하였다.

탄뎀 GMA 용접실험을 통해 획득한 실험결과를 기초로 신경회로망 LMBP알고리즘을 이용하여 STACO모델을 개발하였다. STACO모델의 최적화된 구조를 개발하기 위하여 6가지의 신경회로망을 구성하여 평가하였으며, 오차를 최소화하기 위하여 6가지의 신경망 구조 중 가장 정확한 표면비드 폭을 예측한 신경회로망 구조를 사용하여 숨겨진 은닉층의 뉴런수를 확인하였다. 그 결과 “Tansig+Purelin”의 전달함수, “Bayesian regularization”의 학습함수, “LearnGDM”의 학습기능, 은닉층의 뉴런수 5개의 구조를 가진 최적화된 STACO모델을 개발하였다. 또한, 예측성능을 확인하기 위해서 각각의 실험조건별 측정된 표면비드 폭과 예측된 표면비드 폭을 비교한 결과 PAM 100%의 예측성능을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과는 선박의 건조 공정에서 전체 용접부의 70%정도를 차지하는 도포강판의 필렛(filllet) 용접시스템에 적용하여 용접부 고속화 및 고효율화를 구현할 수 있을 것으로 예상된다.

후기

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

References

- [1] The Small and Medium Business Administration, 2014, Report on Road-map of Small and Medium Industry on Manufacture Based Integration Technology, 564-564.
- [2] Wikle, H. C., Kottilingam, S., Zee, R. H., Chin, B.A., 2001, Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process, *Journal of Materials Processing Technology*, 113 228-233.
- [3] Mulligan, S. J., Melton, G. B., 2002, An assessment of the Tandem MIG-MAG welding process, TWI report. 745.
- [4] Moon, H. S., Beattie, R. J., 2001, Adaptive multitorch multipass SAW, *Journal of KWS*, 1 1-7.
- [5] Park, S. J., Nam, S. K., Kweon, C. G., 2012, Prediction of Weld Penetration and Deposited Metal Area in Accordance with Weld Parameters in Tandem Submerged Arc Welding Process, *KWJS*. 39:6 71-26.
- [6] Park, T. K., Yang, J. S., Cho, S. M., 2004, Parallel ANOVA Processing, *KWJS*. 45 141-143.
- [7] Poliak, 1986, *Wide-Angle-Reflective Cube-corner Retroreflective Sheeting*, MIT Press Cambridge Mass. 318-362.