

# 선박 곡블록의 경사 필렛 이음부의 적정 용접조건 (I)

박주용\*

\*한국해양대학교 해양시스템공학부

## Optimal Welding Condition for the Inclined and Skewed Fillet Joints in the Curved Block of a Ship (I)

JU-YONG PARK\*

\*Division of Ocean System Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Optimal Welding Condition 적정 용접 조건, Inclined Fillet Joint 경사 필렛 이음부, Critical Deposited Area, 한계용착면적, Regression 회귀분석, ANN(Artificial Neural Network) 인공신경망

**ABSTRACT:** The curved blocks which compose the bow and stern of a ship contain many skewed joints that are inclined horizontally and vertically. Most of these joints have a large fitness error and are continuously changing their form and are not easily accessible. The welding position and parameter values should be appropriately set in correspondence to the shape and the inclination of the joints.

The welding parameters such as current, voltage, travel speed, and melting rate, are related to each other and their values must be in a specific limited range for the sound welding. These correlations and the ranges are dependent up on the kind and size of wire, shielding gas, joint shape and fitness. To determine these relationships, extensive welding experiments were performed. The experimental data were processed using several information processing technologies. The regression method was used to determine the relationship between current voltage, and deposition rate.

When a joint is inclined, the weld bead should be confined to a the limited size, in order to avoid undercut as well as overlap due to flowing down of molten metal by gravity. The dependency of the limited weld size which is defined as the critical deposited area on various factors such as the horizontally and vertically inclined angle of the joint, skewed angle of the joint, up or down welding direction and weaving was investigated through a number of welding experiments. On the basis of this result, an ANN system was developed to estimate the critical deposited area. The ANN system consists of a 4 layer structure and uses an error back propagation learning algorithm. The estimated values of the ANN were validated using experimental values.

### 1. 서 론

선박의 건조공정에서 중 가장 많은 인력과 시간이 투입되는 공정인 조립과 탑재공정의 대부분은 용접공정을 통해 이루어진다. 선박의 선수미 부분을 차지하고 있는 곡블록의 경우는 부재의 형상이 복잡한 3차원 곡면을 이루고 있고 거기에 부착되어 있는 필렛 이음부도 곡면의 형태에 따라 복잡한 양상을 띠게 된다. 곡블록의 용접은 곡면의 상태에 따라 용접자세가 연속적으로 변화하는 경우가 많고 이에 따라 여러 용접변수들의 값이 연속적으로 조정되면서 진행되어야 하므로 매우 어려운 용접작업에 해당된다. 현재는 전적으로 숙련된 용접 작업자의 경험에 의존해서 용접변수의 조정이 이루어지고 있으며 이 과정은 정량적으로 표현될 수가 없기 때문에 정확한 값의 설정이 요구되는 자동화된 용접에는 그대로 적용될 수 없다.

상기와 같이 연속적으로 변화하는 이음부의 상태에 대응한 최적의 용접조건을 구하기 위해서는 많은 용접 실험과 용접 결과의 분석이 요구된다. 용접에 영향을 미치는 인자가 대단히

과의 분석이 요구된다. 용접에 영향을 미치는 인자가 대단히 많기 때문에 이들을 모두 변화시켜가며 적절한 조건을 찾으려 면 방대한 양의 용접 실험과 분석이 필요하게 되어 엄청난 경비와 시간이 소요된다. 따라서 용접 인자들에 대한 체계적 조사 및 기존 용접 데이터의 통계적 분석, 인공지능, 퍼지로지, 인공 신경망 등과 같은 복잡하거나 경험적이고 불명료한 정보로부터 유용한 데이터를 추출할 수 있는 정보 처리 기술을 활용하면 실험횟수도 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 정밀한 최적 용접 조건을 구할 수 있다(Park and Whang, 2001; Park and Kang, 2000)

본 논문에서는 많은 용접실험을 통해 주요 용접변수들간의 상관관계를 조사하고 경사진 이음부의 최적 용접조건 설정에 가장 중요한 기준인 한계용착면적(2.4절 참조)과 여기에 영향을 미치는 주요 인자들과의 상관관계를 연구하였다. 또한 실험 결과를 토대로 임의의 이음부에 대해 적절한 한계용착면적을 제시할 수 있는 인공신경망시스템의 개발에 대해 소개하였다.

### 2. 주요 용접변수의 상관관계

용접비드 형상에 영향을 미치는 주요 용접변수는 용접전류,

제1저자 박주용 연락처 : 부산광역시 영도구 동삼동 1

051-410-4307 jypark@hhu.ac.kr

용접전압, 용접속도, 이음부 형상 및 기울기, 와이어 돌출길이 등 여러 가지가 있다. 이들 변수는 서로 연관성이 깊고 상관관계도 매우 복잡하며 복합적으로 비드형상에 영향을 미친다. 본 연구의 용접실험에서는 조선소에서 널리 적용되는 100% CO<sub>2</sub> 보호가스, 1.4mmφ 플럭스코어드와이어를 사용하였다.

2.1 용접전류-용접전압

용접전류와 용접전압은 아크 안정성 및 와이어 용융에 관련되며 비드 형상에 직접적인 영향을 미치는 기본 용접변수들이다. 일반적으로 용접전류에 따른 용접전압의 가용범위인 전압의 최소치 및 최대치는 용접전류에 대한 1차식으로 간략하게 나타내거나(Masumoto et al., 1979) 3차식으로 표기하고 있다(박주용, 1995). 그러나 본 연구에서 용접 실험을 수행하여 분석해 본 결과 Fig. 1과 같이 전류의 변화에 따른 전압의 변화가 소전류 역과 대전류 역과는 달리 중전류 역에서 비교적 크게 나타나는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이는 아크길이가 짧은 단락이행모드에서 아크길이가 긴 입상 또는 구상이행 모드로 변환하는 과정에서 나타나는 현상으로 생각된다.

용접 전류와 용접 전압의 이러한 상관관계는 식 (1)과 같은 시그모이드(Sigmoid) 함수의 경향과 일치한다. 식 (1)의 계수는 회귀 분석을 통해 결정하였다. 본 연구에서 밝혀진 또 한 가지 현상은 수직하향 용접에서 용융금속의 처짐 현상을 피할 수 있도록 용착량을 줄인 경우 심한 오목비드의 현상이 나타나기 때문에 이 경우는 가급적 전압을 낮게 설정하여야 비드의 과오목 현상을 줄일 수 있다는 점이다. 이 때 고전류, 고속용접이 될수록 이 현상은 더욱 심해졌는데 이는 고전류의 경우 아크압력에 의해 가장자리로 밀려난 용융부 중앙부분에 위치하던 용융금속이 높은 용접속도로 인한 고냉각속도에 의해 미처 채워지기 전에 응고되기 때문인 것으로 추정된다. 이 추정은 전류와 속도를 낮춘 경우 비드의 오목 현상이 점차 줄어드는 것이 관찰되는 것을 볼 때 합리적인 추정으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 이 현상이 두드러지는 이음부의 수직 경사각도 30°를 경계로 하여 이보다 경사각이 클 경우와 작은 경우에 대한 최소 및 최대의 시그모이드 곡선에 대한 계수를 회귀 분석을 통해 구하였다.

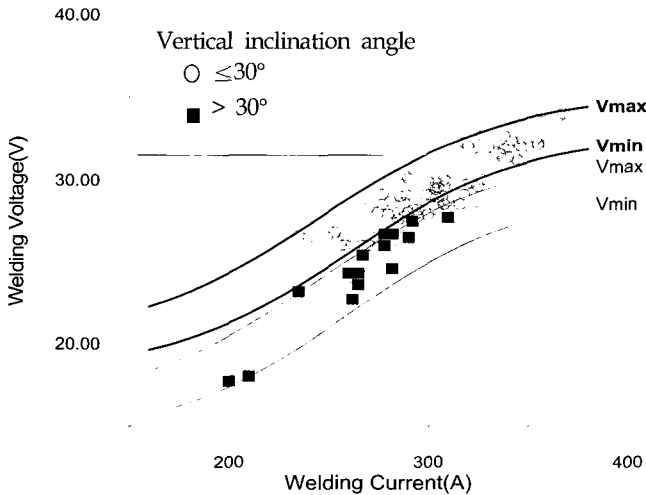


Fig. 1 Relationship of welding current and voltage

$$f(x) = \frac{d}{a + e^{(bx+c)}} \tag{1}$$

2.2 용접전류와 용착속도

용착속도(deposition rate)는 와이어가 용융되어 스패터로 인한 손실을 뺀 양이 이음부에 쌓이는 속도로써 적절한 용접조건 하에서는 용착속도는 용융속도에 비례한다. 와이어 용융속도는 아크열과 전기저항열에 의해 용융되며 식 (2)로 표현될 수 있으며(Lesnewich, 1958) 이는 용착속도에 대해서도 그대로 적용될 수 있다. 식 (2)의 양변을 전류로 나누면 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며 이 때 계수는 실험 데이터에 근거한 회귀 분석을 통해 구할 수 있다. Fig. 2는 용접전류와 용착속도의 실험데이터와 회귀분석을 통해 구한 함수를 그래프로 나타낸 것이다.

$$V_D = b_1 \cdot I + b_2 \cdot I^2 \cdot l_w \tag{2}$$

$$\frac{V_D}{I} = b_1 + b_2 \cdot I \cdot l_w \tag{3}$$

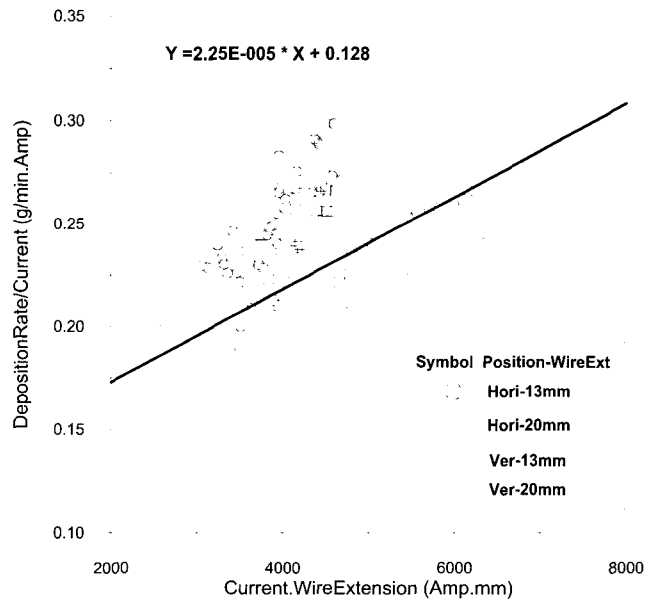


Fig. 2 Relationship of welding current, wire extension and deposition rate

2.3 각장, 용착 단면적 및 용접속도

곡블록 필렛 용접부에서는 Fig. 3과 같이 수직부재와 수평부재가 이루는 각(이하 필렛각)과 양 이음면의 갭, 목표로 하는 각장이 주어지면 용착 단면적을 구할 수 있다. 필렛각이 90도가 아닌 경우 갭은 이음면의 양단에서 달라지게 되는데 여기n에서는 이면의 갭의 크기를 기준으로 하였다. 갭부분의 용착면

적(이하 갭면적)은 Fig. 3의 A3부분으로 표시되며 완전용입의 경우 갭면적은 모재의 필렛각과 수직판의 두께에 의해 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 용착면적은 각장으로 이루어진 삼각형 면적(이하 각장면적)인 A1과 덧살면적 A2, 그리고 갭면적 A3의 합으로 이루어진다. 이들은 각각 식 (4), (5), (6) 및 (7)로 표시된다.

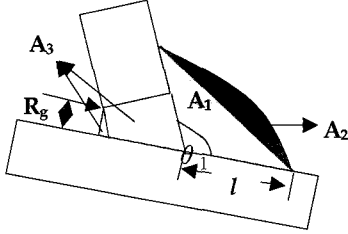


Fig. 3 Deposited area of fillet joint

$$A_1 = l^2 \cdot \sin \frac{\theta_1}{2} \cdot \cos \frac{\theta_1}{2} \quad (4)$$

$$A_2 = C_r \cdot A_1 \quad (5)$$

$$A_3 = \frac{t \cdot R_g}{\sin \theta_1} + \frac{R_g^2}{2 \cdot \tan \theta_1} + \frac{t^2}{2 \cdot \tan \theta_1} \quad (6)$$

$$A_{dep} = A_1 + A_2 + A_3 \quad (7)$$

식 (7)에 의해 표현된 용착 단면적은 단위 시간당 용착량과 용접 속도로 나타내고 단위를 일치시키면 식 (8)로 표현된다. 식 (8)을 단위 시간당의 용착량으로 나타내면 이는 전류와 와이어 돌출길이의 함수인 식 (2)과 같으므로 식 (9)으로 나타난다. 식 (9)을 용접 속도를 구하는 식으로 고쳐쓰면 식 (10)과 같이 된다. 따라서 전류값과 와이어 돌출길이가 주어지고 요구 각장 및 갭이 주어지면 식 (10)에 의해 적정 용접속도를 구할 수 있다.

$$A_{dep} = \frac{V_D \cdot 100}{V_S \cdot \rho} \quad (mm^2) \quad (8)$$

$$V_D = \frac{A_{dep} \cdot V_S \cdot \rho}{100} = b_1 \cdot I + b_2 \cdot I^2 \cdot l_w \quad (g/min) \quad (9)$$

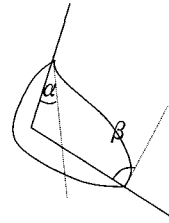
$$V_S = \frac{(b_1 \cdot I + b_2 \cdot I^2 \cdot l_w) \cdot 100}{A_{dep} \cdot \rho} \quad (cm/min) \quad (10)$$

단,  $\rho = 7.85 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ , 철의 밀도

2.4 중력 및 모재 경사각의 영향과 한계용착면적의 정의

모재가 기울어진 경우 용착금속을 지지할 수 없기 때문에 용착금속이 흘러내려 정상적인 비드 형성이 어렵게 된다. 이때 과도하게 흘러내림 현상이 동반될 경우의 비드형상은 Fig. 4와 같이 비드가 수직판에 닿는 점에서의 접선과 수직판과 이루는 각이 0°보다 작게되는 언더컷(Undercut)이 생기거나 비드가 수평판과 닿는 점에서의 접선과 수평판의 각이 90° 이상인 되는 오버랩(Overlap)이 생기게 된다. 이 경우 용착금속이 흘러

내리기 전에 응고가 되도록 용착금속의 양을 일정 크기 이하로 하면 이러한 결함을 피할 수 있다. 이 양은 필렛각, 모재의 경사각, 상하의 용접방향 및 위빙여부에 따라 달라지는데 본 연구에서는 단위길이의 용접선에 대한 이 용착량을 한계용착면적으로 정의하고 실험을 통해 여러 가지 경우에 대한 한계용착면적의 크기를 구하였다.



Sound bead without undercut and overlap if  $\alpha > 0^\circ$  and  $\beta < 90^\circ$

Fig. 4 Critical deposited area of the inclined joint

3 용접실험을 통한 한계용착면적의 조사

3.1 실험조건 및 범위

비드 형상에 영향을 미치는 용접변수는 용접에 관련된 모든 인자라 할 수 있겠으나 경사-필렛용접에서는 용접 전류, 용접 전압, 용접 속도와 함께 이음부 형상과 관련된 갭, 필렛각, 모재경사각, 용접시공법과 관련된 상향 및 하향의 용접방향, 위빙 등이 중요한 변수가 된다. 그 중에서도 한계용착면적은 용착량을 결정하는 용접전류, 전압 및 속도와 중력에 의한 용융물의 흘러내림에 영향을 주는 이음부의 수평 및 수직경사각, 필렛각, 상향 및 하향의 용접방향, 위빙이 중요한 변수가 된다.

본 연구에 사용된 시편은 일반연강재질의 필렛 이음부 시편으로 Fig. 5와 같으며 곡블록에서 나타나는 이음부 상태를 조사하여 전술한 주요 변수를 다음과 같은 범위 내로 정하여 실험을 수행하였다.

- 수평경사각: 0 - 60°
- 수직경사각: 0 - 90°
- 필렛각: 80 - 100°
- 위빙: 상향의 경우에만 적용

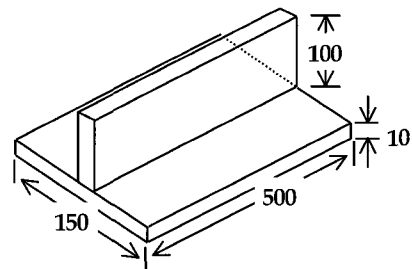


Fig. 5 Dimension of specimen

3.2 한계용착면적 분석

선체의 곡블록에서 볼 수 있는 다양하게 경사진 필렛 이음부에 대해 2.4절에서 정의한 한계용착면적을 구하기 위해 200여회의 용접실험을 수행하였다.

Fig. 6에서와 같이 시편의 수평 경사각이  $\theta_h$ , 수직 경사각이  $\theta_v$ 일 때  $\theta_h$  및  $\theta_v$ 가 클수록 용융 금속의 흘러내리는 경향을 클 것이므로 2.4절에서 정의한 한계용착면적이 작아질 것이다. 이를 정량적으로 파악하기 위하여 수평경사각 0 - 60°, 수직경사각 15 - 90° 범위에서 Table 1과 같은 경우에 대해 200여회의 용접실험을 수행하였다. Table 2는 200여회의 용접실험에 적용된 용접조건에 대한 데이터의 일부를 보여주고 있다.

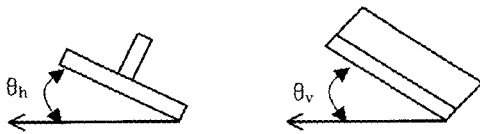


Fig. 6 Horizontally and vertically inclined angle

Table 1 Horizontally and vertically inclined angle of specimens for welding experiments

$\theta_h$	0	0	0	0	0	0	15	30	30	30	30	45	60	60	60	60
$\theta_v$	0	15	30	45	60	90	0	0	30	45	60	0	0	30	45	60

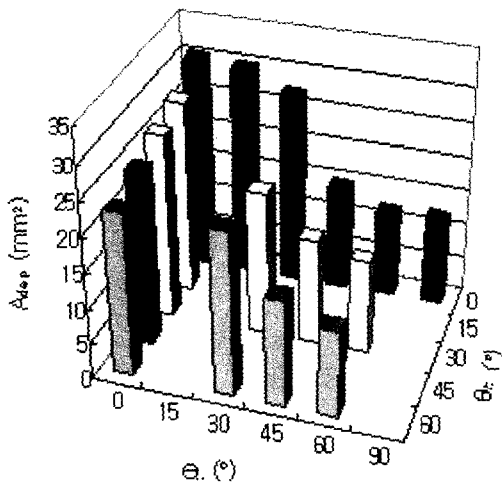


Fig. 7 Critical deposited area according to vertical and horizontal inclination angle

Fig. 7은 Table 2에서 나타난 데이터로 용접실험을 수행한 것 중 필렛각이 90°인 경우에 대하여 다양한 경사각에 대한 한계용착면적의 크기를 그래프로 나타낸 결과이다. Fig. 7에서 수직경사각이 있는 경우 용접방향은 수직경사각 30°까지는 상향 및 하향의 영향이 별로 없으므로 상하의 구분을 두지 않았으나 수직경사각 45°부터는 하향용접을 대상으로 하였다. 수직경사각이 45° 이상이 되는 경우의 상향용접은 일반 수직상향과 같이 위빙을 하면 각장 11mm 이상도 한 패스로 용접이 가능

한 만큼 한계용착면적의 크기에 거의 제한이 없다고 볼 수 있다. Fig. 7에서 수직경사각과 수평경사각이 30°이내인 범위에서는 한계용착면적이 감소 추세를 보이고 있지만 그리 뚜렷하지는 않다. 그러나 수직경사각이 45° 이상되면 수직하향 용접의 경향을 보이며 한계용착면적이 급격히 줄어든다. 여기에서 관찰할 수 있는 한가지 흥미있는 현상은 수직경사각 30도까지는 수평경사각이 커짐에 따라 한계용착면적도 줄어들지만 수직경사각이 45° 이상되면 수평경사각이 커짐에 따라 한계용착면적이 소폭이지만 오히려 증가된다는 사실이다. 이는 수직 및 수평경사각이 있는 경우 중력의 방향이 용접방향에 대해 경사지게 작용함으로 인해 용융속이 수직기울기 및 수평기울기의 방향의 합인 방향으로 흐르게 되어 용접방향에 대한 수직성분의 형상으로 평가하는 언더컷 또는 오버랩의 정도가 약간 줄어드는 효과에 기인한 것으로 추정된다.

Table 2 Welding conditions for various welding experiments

Fillet Angle	$\theta_v$	$\theta_h$	Gap	Weaving	Up/Down	Cur.	Speed	Vol.	$A_{dep}$
90	0	0	0	0	-	270	30	27	33.9
90	0	0	0	0	-	325	40	30.7	30.9
90	0	0	0	3	-	302	30	29.8	35.8
90	0	15	0	0	-	300	42	28.5	28.3
90	0	15	0	0	-	245	30	25.6	21.9
90	0	30	0.5	3	-	262	32	26.9	24.7
90	0	30	1	3	-	270	34	27.2	21.4
90	0	45	1	0	-	257	32	25.9	23.3
90	0	45	1	0	-	237	34	23.8	16.6
90	0	60	0	0	-	220	30	22.2	21.1
90	0	60	0	0	-	256	30	26	27.3
90	15	0	0	0	d	280	30	27.9	28.6
90	15	0	0	0	u	288	30	28.6	28.2
90	30	0	0	3	u	303	31	30.2	31.11
90	30	0	0	0	d	285	30	24.5	17.3
90	45	0	0	0	d	245	36.1	29.9	20.6
90	45	0	0	3	u	280	20	26.3	39.17
90	60	0	0	3	u	278	27	26.7	55.95
90	60	0	0	0	d	290	100	24.7	17.42
90	90	0	0	3	u	288	16	25.7	54.38
90	90	0	0	0	d	253	45	27.1	17.32
90	30	30	0	3	u	270	32	28.3	26.4
90	30	30	0	0	d	296	48	27.3	20.5
90	30	45	0	0	d	292	64	27.5	15.1
90	30	45	0	0	d	290	80	27.5	11.9
90	30	60	0	0	d	283	70	25.7	13.3
90	60	30	0	0	d	300	43.4	26.4	23.2
90	60	30	0	3	u	270	29	28.3	30
90	60	45	0	0	d	282	61	26.7	15.1
90	60	45	0	0	d	302	80	29.2	12.7
90	60	60	0	0	d	308	70	26.2	14.9

3.3 한계용착면적 예측 시스템

선체의 곡블록에서는 임의의 각도로 기울어진 이음부가 많이 나타나고 필렛각도 90°가 아닌 경우가 흔히 나타나므로 이

에 대한 정확한 용접조건을 설정하기 위해서는 임의의 이음부 상태에 대한 한계용착면적을 구할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 전절에서 실험을 통해 조사한 한계용착면적 데이터를 토대로 인공신경망의 학습기능을 적용하여 임의의 이음부 형상 및 경사각에 대해 한계용착면적을 구하는 시스템을 개발하였다. 신경망의 구조는 Fig. 8과 같이 수직 및 수평경사각, 상하의 용접방향, 위빙적용여부, 필렛각등의 5개의 입력변수값으로 구성되는 입력층, 2개의 7개의 뉴런으로 구성된 은닉층, 초기 전류치 및 한계용착면적으로 구성되는 출력층 등 4개의 층으로 되어 있으며 학습규칙은 가장 널리 사용되는 오류역전파 학습규칙을 사용하였다. Table 3은 실제의 한계용착면적과 학습된 인공신경망으로 추정된 값을 비교한 결과로서 실제값과 추정값의 오차 범위가 11% 이내였다. 11%의 오차는 용착단면적으로 약 1.5mm에 해당되는 양으로 용접현장에서는 그리 문제가 되지 않는 수준이어서 Fig. 8의 신경망 구조가 한계용착면적의 추정에 적절함을 보여주고 있다.

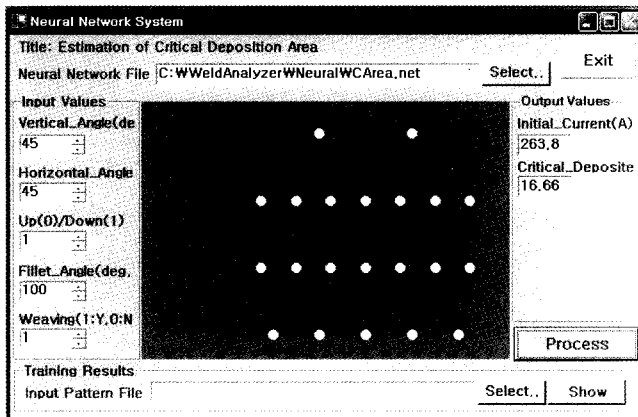


Fig. 8 Neural network system for estimating the critical deposited area

Table 3 Comparison between estimated values by ANN and actual values by welding experiments

No.	Fillet Angle	$\theta_v$	$\theta_h$	Weaving	Up/Down	Critical Deposited Area		Error (%)
						Actual	Estimated	
1	90	0	30	y	-	26.5	26.5	100
2	90	0	60	n	-	23.2	23.0	99.1
3	90	30	0	n	d	27.3	27.0	98.9
4	90	30	30	n	d	20.5	20.9	102.0
5	90	30	60	n	d	23.2	22.0	94.8
6	90	45	0	n	d	14.9	15.0	100.7
7	90	45	30	n	d	15.1	16.0	106.0
8	90	45	60	n	d	15.3	17.0	111.1
9	90	60	0	n	d	12.3	13.7	111.4
10	90	60	30	n	d	13.3	14.3	107.5
11	90	60	60	n	d	12.1	13.4	110.7

#### 4. 결 론

경사진 필렛 용접부에 대한 적정 용접조건 설정을 위한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 용접전압의 용접전류에 대한 상관관계는 직선관계보다는 저전류역 및 고전류역보다 중전류역에서 전압의 변화폭이 크게 나타나는 시그모이드 함수가 더 적절함이 실험을 통해 입증되었으며 수직경사각이 30° 이상인 용접의 경우 30° 미만 경우보다 전압이 낮게 설정되어야 한다.
- (2) 용착속도는 용접전류와 와이어 돌출길이의 함수로 표현되며 용착단면적이 주어질 경우 적정 용착속도를 구할 수 있다.
- (3) 이음부가 수평 및 수직으로 경사진 경우 용접비드의 건전성은 언더컷과 오버랩 결함을 피할 수 있는 용착량의 크기인 한계용착면적에 의해 좌우되며 한계용착면적은 수직 및 수평경사각, 필렛각, 상향 또는 하향의 용접방향, 위빙여부에 영향을 받는다.
- (4) 한계용착면적은 수직 및 경사각이 커짐에 따라 감소하며 경사각이 30° 이상이 되면 수직경사각의 영향이 절대적이며 또한 수직경사각이 30° - 60° 사이에서는 수평경사각이 커짐에 따라 한계용착면적이 소폭 증가하였다.
- (5) 4-layer 구조와 오류역전파 학습규칙을 사용한 인공신경망시스템을 개발하여 실험치를 대상으로 학습한 후 임의의 이음부 형상 및 기울기에 대해 추정치와 실험치를 비교해 본 결과 오차범위가 11% 이내로 나타나 한계용착면적의 추정에 인공신경망의 적용이 가능함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부와 삼성중공업(주)의 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

박주용 (1995) "퍼지 전문가 시스템을 활용한 적정 용접조건 설정과 최적화", 대한조선학회 논문집 제32권, 제4호, pp 136-141.

Lesnewich, A. (1958). "Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas Shielded Metal Arc Welding", Welding Journal Vol 37, No 9, pp 343-418

Masumoto, I, Shinoda, T. and Takano, J. (1979). "Program for CO2 Horizontal Fillet Welding Parameters", Japan Welding Society Vol 48, No 11, pp 23-27.

Park, J.Y. Hwang, S.H (2001). "Determination of Optimal Welding Parameter for and Automatic Welding in the Shipbuilding", International Journal of Korean Welding Society, Vol 1, No 1, pp 17-22.

Park, J.Y. and Kang, B.Y. (2000). "Research on the Object-Oriented Welding Information System for Shipbuilding", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 3, No 2, pp 30-36.

2004년 9월 2일 원고 접수  
2004년 11월 16일 최종 수정본 채택