

## GMA 위보기 및 수직자세 초층용접 최적조건 선정에 관한 실험적 연구

김 지 선\* · 김 인 주\*<sup>†</sup> · 김 일 수\*\*

\*한국생산기술연구원 그린몰드기술센터

\*\*목포대학교 기계공학과

### A Experiment Study on Selection the Optimal Condition for GMA Root-pass Welding in Overhead and Vertical Position

Ji-Sun Kim\*, In-Ju Kim\*<sup>†</sup> and Ill-So Kim\*\*

\*Green mold Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Gwang-ju 500-460, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Mokpo Univ, Mokpo 534-729, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : k9inju@kitech.re.kr

(Received September 5, 2012 ; Revised October 16, 2012 ; Accepted December 7, 2012)

#### Abstract

Due to increase in demand of stable and long pipelines in natural gas industry, wide range of researches are being performed on automation welding to improved welding quality with respect to weld process parameters in real time measurement. In particular, the coupling between the pipe manufacturing process and location of the weld seam, the measured size of the gap that exists in the weld position and the weld angle depending on whether the movement of molten weld. This is due to absence of controlling welding penetration position, depending on the required size of the angle of the setting. In addition, the optimum welding conditions must be considered while selecting, the correlation between these variables and the systematic correlation has not yet been identified. Therefore, in most welded pipe root-pass weld solely depends on the experience of workers in relation to secure a stable weld quality.

In this study, automation welding system is implemented to select a suitable root-pass STT (Surface Tension Transfer) welding method using the optimal welding conditions. To successfully accomplish this objective, there were various welding conditions used for welding experiment to confirm that the assessment required for construction through the pipe and automatic welding process is proposed to optimize this plan.

Key Words : Root-pass welding, STT(Surface tension transfer), Open-gap, Vertical welding, Overhead welding

#### 1. 서 론

제조 산업 현장의 핵심기술인 용접기술은 열악한 작업환경과 유해하고 육체적인 부담이 크기 때문에 근로자들이 꺼려하는 대표적인 3D작업 중에 하나이다. 최근 숙련된 용접인력의 감소, 용접사의 고령화 및 인건비 증가 등의 이유로 용접자동화가 국가 경쟁력의 주요 현안으로 대두되고 있는 실정이다<sup>1)</sup>. 특히 조선해양산업은 설계, 생산 및 관리기술 외에 첨단IT기술의 적용이

필수적인 산업으로, 선박의 건조공정이 매우 다양하고 대형 구조물의 제작상 자동화에도 한계가 있기 때문에 적정규모의 기능인력 확보가 필수적인 산업이다. 선박의 내부는 수많은 배관들로 구성되어 있는 관계로, 배관용접공정은 선박 및 해양구조물 제작에 있어 핵심적인 기술로서 전체 생산 공정 중 50%이상을 차지하고 있다<sup>2)</sup>.

특히 자동화 비율이 가장 낮고, 기술적인 난이도가 높은 분야 중 하나이다. 국내 대부분의 배관의 원주용접은 수동 상진 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)

공정으로 구성되어 있고, 원주 자동용접 공정을 적용하기 위해 다양한 연구가 수행 중에 있다<sup>3-4)</sup>. GTAW 공정은 용접사의 능력에 따라 용접부의 품질이 좌우되며, 재현성과 반복성이 매우 낮아 자동화 시스템을 개발하는데 많은 문제점을 가지고 있다. 또한, 오픈갭(Open-gap) 형태의 배관의 정렬상태에 따라 용융풀을 이끌어 나가지 못하여 용락(Burn through)이 발생하고 단락으로 인해 지속적인 용접진행이 어렵다. 이런 문제점을 해결하기 위해 다소 투박하지만 MAGW (Metal active gas welding)을 사용하여 배관의 초층 용접에 적용하고 있다.

배관의 초층 용접의 품질은 이면비드의 형상에 의해 대변 될 수 있으며, 용접자동화를 위해서는 용접조건과 이면비드와의 관계를 도출하는 것이 중요하다. 용접공정은 다중 입출력 공정이며, 용접 비드형상 변수들은 서로 상호 연계되어 있다. 이런 용접부의 조건과 용접부 형상에 대한 다양한 연구가 진행되어지고 있으며, 용접공정의 입력변수와 출력변수 사이의 상관관계를 분석하고 이것을 이용하여 최적의 공정변수를 결정하는 다양한 방법들이 제안되고 있다<sup>5)</sup>. Shinoda 및 Doherty<sup>6)</sup> 와 Kim 및 Rhee<sup>7)</sup>는 외관 용접비드에 대한 품질을 향상시키기 위하여 아크용접의 매개변수 및 용접비드 기하학 사이의 상관관계를 반응표면 방법론을 사용하여 최적의 퍼지논리(fuzzy logic) 제어기의 설계하였다.

본 연구에서는 일반적으로 아래보기 자세에 비해 조건 선정이 어려운 수직(Vertical), 위보기(Overhead) 자세에서의 용접 공정변수(토치 진행각, 용접속도)가 이면비드 형성에 미치는 영향을 실험을 통해 관찰하고, 최적조건 선정을 위해 수학적 모델을 개발하고자 하였다. 개발된 모델의 유의성을 검토하였다.

## 2. 용접 실험

### 2.1 실험 방법

오픈갭 형태의 배관에서 가장 자동화가 어려운 위보기 및 수직자세의 용접공정 최적화를 위하여 실험을 실시

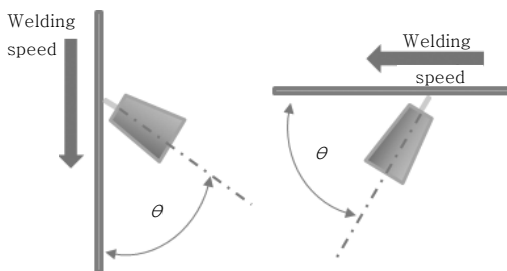


Fig. 1 Concept of welding experiment

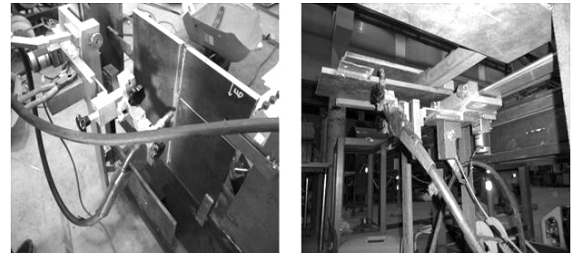


Fig. 2 Equipment of welding system

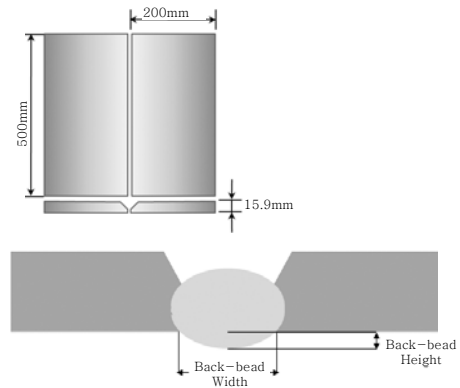


Fig. 3 Configuration of welding specimen

하였다. 실험은 Fig. 1과 같이 위하여 속도, 용접진행각에 대한 용접성 평가 시험을 위해 Fig. 2와 같은 자세별 평판 실험을 준비하였다. 용접속도를 제어할 수 있는 직선 캐리지와 가이드 레일, STT(Surface Tension Transfer)용접기, 시험편 고정용 지그 등을 사용하여 전체 실험 시스템을 구성하였다. 캐리지 주행은 별도의 컨트롤러를 통해 제어하였으며, 토치의 각도는 캐리지 기구부의 수동조절을 통하여 제어하였다.

보호가스는 CO<sub>2</sub> 100%를 사용하였으며, 토치부에 공급되는 보호가스 유량은 약 15~18(l/min) 상태를 유지하였다. 시험편은 Fig. 3과 같이 맞대기(Butt) 형태의 시험편으로 제작하였으며 규격은 각각 500×200×15.9mm이다. 맞대기 용접용 시험편의 개선각은 70°, 루트 갭(Root-gap) 2.5mm, 루트 면(Root-face)은 1~1.5mm를 선정하였다. STT 용접기는 오픈갭 형태의 V-개선 모재를 용접하기 위해 개발된 용접기로서 아크의 파형제어 및 독립된 와이어 송급을 통해 입열량을 조절하여 안정된 초층 용접을 수행한다. 일반적인 GMAW는 용락을 방지하고자 모재의 안쪽에 백킹재를 사용하여 용접을 수행하지만, 본 실험은 오픈갭 형태로 백킹재를 사용하지 않은 상태에서 실험을 수행하였다. 본 실험은 동일한 전류(Peak current : 397(A), Base current 80(A)), 와이어 송급 속도(310CPM)에 따라 용접자세, 토치의 진행각과 용접속도의 차이에 의해 발생하는 이면비드의 형상차이를 분석하고자 Table 1과 같은 변수 수준을 선정하여 실험계획을 수행하였다.

**Table 1** Process parameter and level for vertical/overhead position

Process parameter	Symbol	Unit	Level		
			-1	0	1
Torch angle	Ta	Degree	50	60	70
Welding speed	Ws	Cm/min	10	15	20

2.2 실험 결과

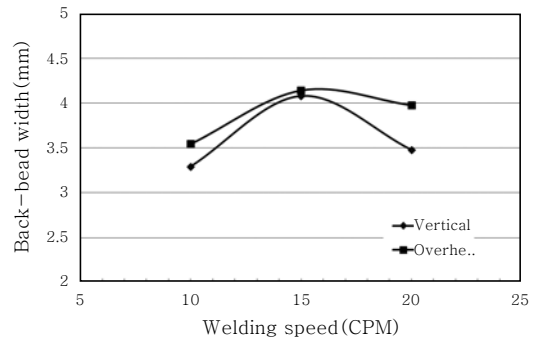
실험은 총 18회에 걸쳐 이루어 졌으며, 이면비드의 형상을 측정하기 위해 시험편의 단면을 절단하여 폴리싱(Polishing)을 수행한 이후 광학 현미경을 이용하여 이면비드의 형상을 관찰하였다. Table 2를 통해 확인할 수 있듯이 18번의 실험에서 거의 대부분의 불룩한 이면비드를 형성하였다.

Fig. 4~5를 통해 알 수 있듯이, 이면비드 폭의 경우 위보기 자세가 수직자세에 비해 전반적으로 넓게 형성되는 것을 알 수 있었다. 용접속도가 증가함에 따라 이면비드 폭은 지속적으로 증가하다 15cpm 이상부터 감소하였다. 진행각도의 변화에 따른 이면비드 폭의 변화는 50°에서 60°까지는 지속적으로 감소하며, 60°에

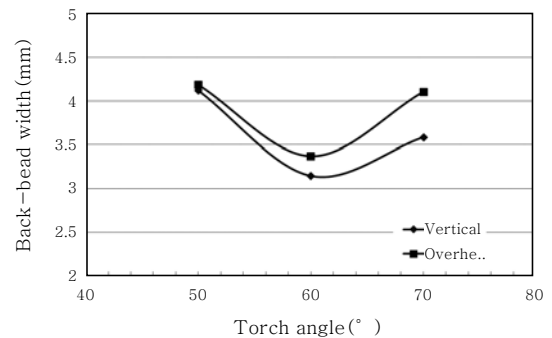
**Table 2** Results of experiment

No./ Position.	Process parameter		Back-Bead Geometry		
	Ws	Ta	Wb	Hb	
1	Vertical position	10	70	3.6	0.6
2		15	70	3.32	0.11
3		20	70	3.84	0.36
4		10	60	2.56	0.4
5		15	60	4.16	0.36
6		20	60	2.72	0.44
7		10	50	3.72	0.52
8		15	50	4.76	0.48
9		20	50	3.88	0.32
1	Overhead position	10	70	3.56	0.12
2		15	70	4.28	0.72
3		20	70	4.48	0.76
4		10	60	3.08	0.24
5		15	60	3.02	0.44
6		20	60	4.01	0.6
7		10	50	4	0.44
8		15	50	5.12	0.32
9		20	50	3.44	0.16

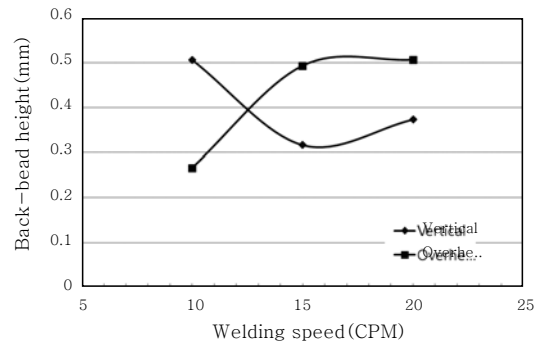
\* W<sub>b</sub> : Back-bead width, H<sub>b</sub> : Back-bead height



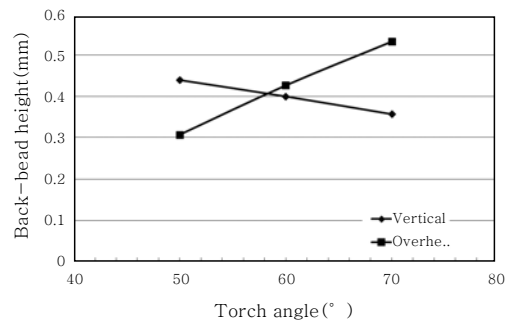
**Fig. 4** Comparison of back-bead width with Welding speed



**Fig. 5** Comparison of back-bead width with Torch angle



**Fig. 6** Comparison of back-bead height with Welding speed



**Fig. 7** Comparison of back-bead height with Welding angle

서 70°까지는 다시 증가함을 알 수 있다. 이면비드의 높이의 경우는 용접자세에 따라 이면비드의 형태가 반대 형상을 띄는 것을 확인하였다.

### 3. 최적 조건 선정

#### 3.1 수학적 모델 개발

용접공정은 매우 복잡한 비선형적 관계로 이루어져 있다. 이와 같은 용접공정의 이면비드 형상을 정확히 예측한다는 것은 매우 어렵다<sup>8)</sup>. 그러나 수학적 모델링을 통해 근사한 이면비드 예측이 가능하다. 주어진 토치각과 용접속도로부터 최적의 용접조건 선정을 위한 모델을 개발하기 위하여 실험결과를 이용하였다. 토치각, 용접속도에 의하여 최적의 용접조건 선정을 위한 수학적 모델 개발은 주어진 최적의 용접조건을 얻기 위한 공정변수들을 각각 콤비네이션 함으로 달성할 수 있다. 2가지의 용접변수를 가지고 응답변수(y)는 이면비드 폭 및 비드높이의 크기를 나타내는 변화함수로서 다음과 같이 식(1)에 나타낸다. 용접실험결과를 바탕으로 회귀분석을 이용하여 입력변수와 출력변수에 대한 수학적 모델을 개발하였다. 개발된 수학적 모델은 식(2)에 나타내었으며 개발된 수학적 모델의 계수는 Table 3에 나타낸 것과 같다.

$$y = f(T_a, W_s) \tag{1}$$

$T_a$  : Torch angle,  $W_s$  : welding speed

$$Y_{o/v} = a_0 + a_1 T_a + a_2 W_s + a_3 T_a^2 + a_4 W_s^2 + a_5 T_a W_s \tag{2}$$

수직 및 위보기 자세는 아래보기 자세 실험에 의해 선정된 최적조건을 기본용접조건으로 고정하고 용접진행각( $T_a$ ) 및 용접속도( $W_s$ )를 입력변수로 선정하여 수

**Table 3** Estimated regression coefficients of empirical model

Coeff.	Vertical position		Overhead position	
	Width	Height	Width	Height
a <sub>0</sub>	-16.8467	-9.2177	36.7511	-1.6888
a <sub>1</sub>	-0.1640	0.2373	-0.8565	0.0873
a <sub>2</sub>	1.1966	0.1433	-0.3216	0.0009
a <sub>3</sub>	0.0036	-0.0011	0.0053	-0.0001
a <sub>4</sub>	-0.0104	-0.0017	0.0009	0.0005
a <sub>5</sub>	-0.0057	-0.0019	0.0040	-0.0011

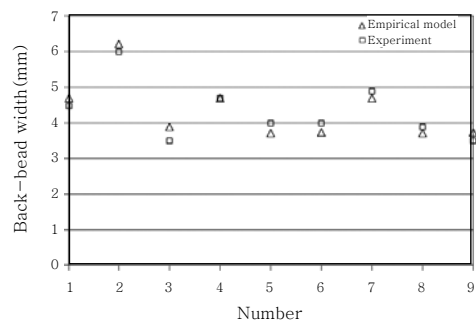
**Table 4** Variance test for developed empirical models

Developed models		SSE	R-Square
Vertical position	Wb	0.548	0.901
	Hb	0.046	0.864
Overhead position	Wb	3.620	0.882
	Hb	0.020	0.931

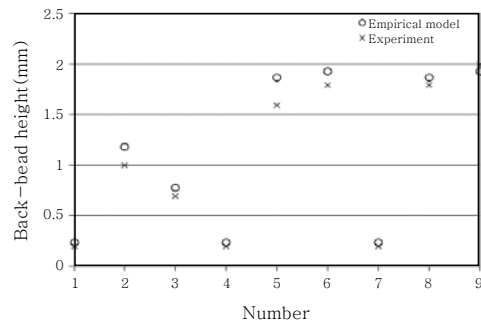
학적 모델을 개발하였다. 개발된 수학적 모델의 유의성을 판단하기 위해 분산분석(ANOVA)의 결정계수(R<sup>2</sup>)와 잔차의 제곱합(SSE)을 이용하였다<sup>7)</sup>. Table 4는 개발된 모델의 결정계수(R<sup>2</sup>)과 잔차의 제곱합(SSE)을 나타낸 표이다.

모델의 정확성을 평가하는 방법으로 개발된 수학적 모델을 통해 예측 했을 경우의 값을 백분율 오차법(percentage error method)을 이용하여 Figs. 8~9와 같이 예측값과 실험값의 차이를 비교·분석하였다.

수직자세의 예측 모델의 경우 이면비드 폭은 매우 정확히 예측하는 것을 알 수 있었으나, 높이의 경우 몇몇 경우에 따라 예측성능이 저하됨을 확인할 수 있었다. 위보기 자세의 경우에도 이면비드 폭에 비해 높이의 예측성능이 다소 좋지 않음을 확인하였으나, 대체적으로 예측성능이 우수함을 확인하였다. 이와 같이 높이에 대한 비교 결과는 용접 공정변수(용접진행각, 용접속도)이외의 다른 요인이 이면비드 높이에 영향을 미친다는 것을 나타내며, 이면비드 높이에 대한 심도 있는

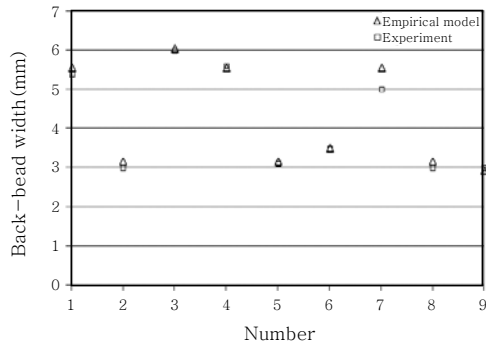


(a) Back-bead width

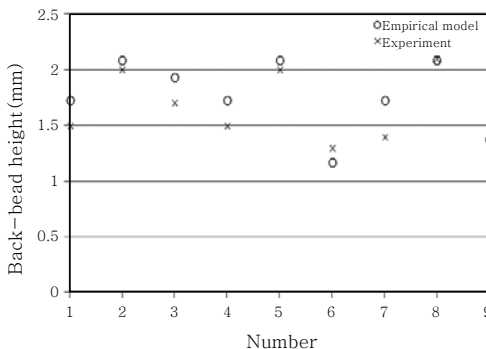


(b) Back-bead height

**Fig. 8** Accuracy analysis for vertical position



(a) Back-bead width



(b) Back-bead height

Fig. 9 Accuracy analysis for overhead position

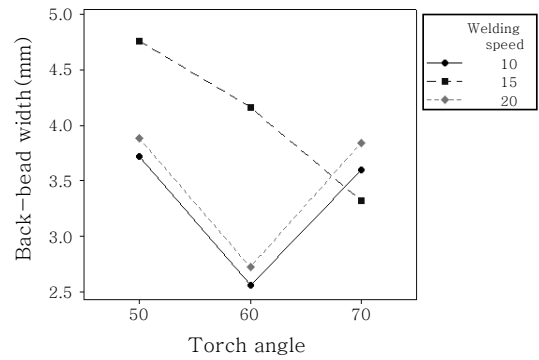
고찰이 필요할 것으로 판단된다. 이와 같은 각각의 변수가 출력변수(이면비드 폭, 높이)에 대한 영향에 대해 살펴보기 위해 주효과 분석 및 교호작용에 대한 평가가 수행되어야 한다.

### 3.2 상호 작용 분석

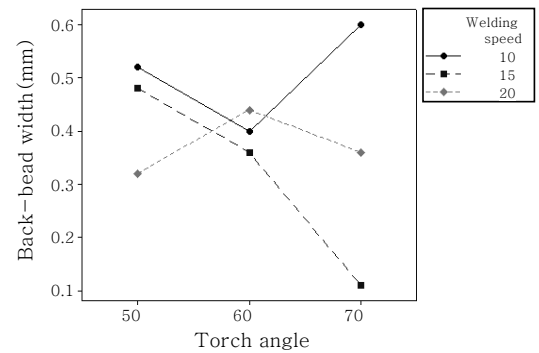
용접진행각과 용접속도가 이면비드 형성에 미치는 영향을 확인하기 위해 인자들의 상호효과를 살펴보았다. Figs. 10~11는 상용 통계프로그램인 미니탭을 이용한 상호작용 플롯을 나타낸다.

상호작용분석 결과, 수직자세의 경우 용접속도가 15cpm 일 때 용접진행각의 변화에 따라 이면비드 폭에 미치는 영향이 매우 큼을 확인하였다. 용접속도가 10cpm, 20cpm의 경우 용접진행각과의 상호작용 효과는 매우 미비하며, 뚜렷한 경향을 나타내지 않음을 확인하였다. 이면비드 높이의 경우도 폭과 마찬가지로 15cpm에서 용접진행각과의 상호작용 효과가 매우 크며, 그 이외 상호작용 효과는 나타나지 않았다.

위보기 자세의 경우 용접속도가 15cpm, 20cpm의 경우 이면비드 폭과 높이에서 상호작용 효과가 가장 뚜렷하며, 10cpm의 경우 상호작용 효과는 있으나 이면비드의 폭과 높이를 제어하기는 어려운 형태의 작용력을 나타내고 있다. 이는 이면비드의 폭과 높이를 효과

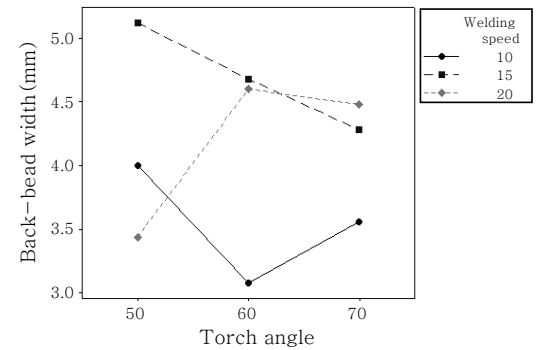


(a) Back-bead width

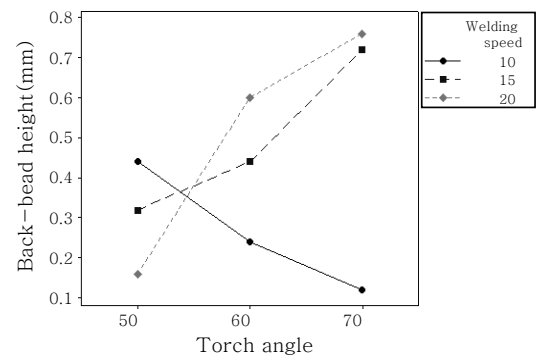


(b) Back-bead height

Fig. 10 Interaction effects for vertical position



(a) Back-bead width



(b) Back-bead height

Fig. 11 Interaction effects for overhead position

적으로 제어하기 위해서는 용접속도가 15cpm으로 고정하여 용접진행각을 수정하는 것이 가장효과적임을 나타낸다.

### 3.3 반응 분석을 통한 최적조건 선정

반응표면 분석법중 만족도 함수는 반응 최적화에서 솔루션이 모든 반응에 대한 목표를 전체적으로 만족하는 정도를 측정하는 측도이다. Fig. 12는 만족도 함수의 가중치에 따른 목표 값에 대한 중요치를 나타내고 있다<sup>9)</sup>. 본 연구에서는 가중치 0.1을 부여하여 최대 및 최소한계치 내의 이상적인 조건을 찾고자 하였다.

만족도에는 개별 만족도와 합성 만족도가 있으며, 특히 합성된 만족도의 범위는 0에서 1까지 이며, 1은 이상적인 경우를 나타내고 0은 하나 이상의 반응이 허용한계를 벗어난다는 것을 뜻한다<sup>9)</sup>. Table 5에 나타낸 것과 같이 목표값 ( $T_i$ )와 목표값에 대한 최소한계 값 ( $L_i$ ), 최대한계 값 ( $H_i$ )을 가질 때 식(3)과 같은 만족도 함수를 이용할 수 있다.

$\hat{y}_i$  는 회귀 모델에 의해 예측된 값이며 이러한 예측된 값에 따라 4가지 형태로 만족도가 계산되어 진다.

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < L_i \\ \left[ \frac{(\hat{y}_i - L_i)}{(T_i - L_i)} \right]^{r_i} & L_i \leq \hat{y}_i \leq T_i \\ \left[ \frac{(H_i - \hat{y}_i)}{(H_i - T_i)} \right]^{r_i} & T_i \leq \hat{y}_i \leq H_i \\ 0 & \hat{y}_i > H_i \end{cases} \quad (3)$$

각각의 출력변수에 대한 개별 만족도 함수는 수식

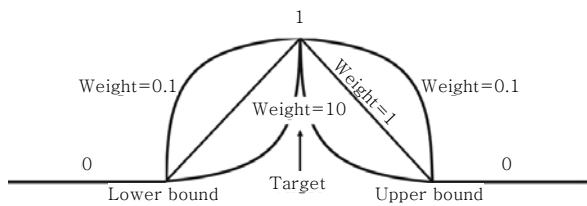


Fig. 12 Concept of satisfaction function

Table 5 The target value of the optimal back-bead determine

	Lower bound (Li)	Target (Ti)	Upper bound (Hi)	Weight (ri)
$W_b$	3	4	5	0.1
$H_b$	0.5	1.0	1.5	0.1

(4)과 같이 표현할 수 있으며, 비드 폭과 높이에 대한 복합 조합도 함수는 수식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$D_{w/h} = \left( \prod_{i=1}^n (d_i) \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

$$D = (d_w * d_h)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

만족도 함수를 통해 본 연구에서 목표로한 최적 용접조건을 도출할 수 있었다. Fig. 13과 14에 나타낸 것과 같이 최적 용접조건 선정을 위하여 미니탐의 최적조건 선정 툴을 이용하여 이면비드 폭과 높이에 대한 용접조건을 확인하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다.

수직자세의 경우 이면비드의 폭에 대한 목표 값(4mm)과 높이에 대한 목표값(0.5mm)과 거의 유사한 결과를

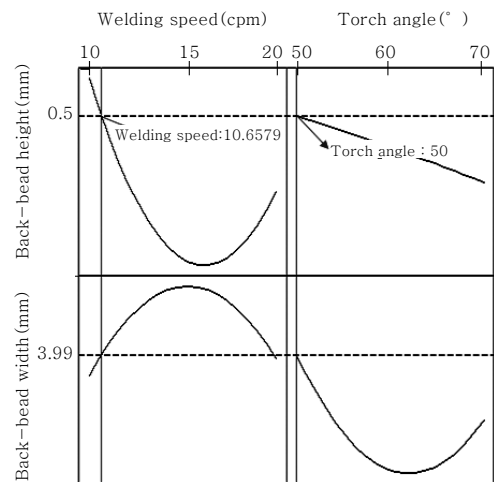


Fig. 13 Response optimization of vertical position

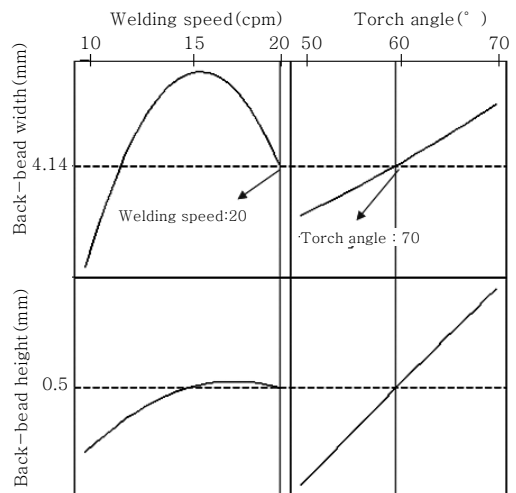


Fig. 14 Response optimization of overhead position

**Table 6** The optimal value of process parameters predicted

Welding position	Optimal conditions		
	Torch angle	Welding speed	desirability
Vertical	50	10.65	0.97849
Overhead	59.67	20	0.9922

얻을 수 있었으나, 위보기 자세의 경우 목표치와 최적 조건을 통해 응답된 이면비드의 형상의 차이가 폭은 +0.14mm 높음을 확인하였다. 선정된 최적 조건은 만족도 함수를 통해 적절성을 평가 할 수 있었으며, 수직 자세 용접의 경우 이면비드 폭 및 높이에 대한 적절성은 각각 0.95745, 1.000으로 평균 0.97849로 나타나 매우 적절하다고 평가 되었다. 또한, 위보기용접일 경우 이면비드 폭과 높이에 대하여 각각 0.98447, 1.000로 평균 0.9922의 적절성이 나타났다.

#### 4. 결 론

배관의 초층 용접자동화의 최적화 방안제시를 위하여 다양한 시험기법을 이용하여 용접실험을 계획 및 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 배관의 전 자세 초층의 용접공정에 적합한 STT (Surface Tension Transfer) 용접기를 사용하여 오픈 갭(open-gap) 형태의 초층용접 조건선정을 위한 실험을 수행하였으며, 이면비드 예측성능이 우수한 수학적 모델을 개발하였다.

2) 수직, 위보기 자세에서의 용접 진행각, 용접속도가 이면비드 형성에 미치는 영향 확인하기 위해 상호작용 효과에 대해 연구하였으며, 이를 이용하여 이면비드를 제어하는 효과적인 방법을 제안하였다.

3) 반응표면 분석법의 만족도 함수를 이용하여 수직, 위보기 자세에서의 최적 용접조건(용접진행각, 용접속도)을 선정하였다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

#### 참 고 문 헌

1. S. B. Jones, : Process Tolerance in Submerged Arc Welding, Weld. Inst. Research Report **1**, 1976
2. W. S. Kim, Y. P. Kim, C. M. Kim and J. H. Baek. : Comparison for grth auto welding procedure of field construction of gas pipeline, Journal of KWS, 21-3 (2003), 105~108, (in Korean),
3. W. S. Chang, M. Y. Lee, and B. Y. Yoon, : High current keyhole GTAW for stainless Steels and ti alloys. Journal of KWS, **22-6** (2004), 6~9, (in Korean)
4. R. S. Ha, B. H. Jung, and H. S. Park : Structure and defects in welds of high strengths al alloys by using GTAW. Journal of KWS, **21-5** (2003), 540~546, (in Korean)
5. R. S. Chandel, : Mathematical Modeling of Gas Metal Arc Weld Features", Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes, 1988, 109~120, (in Korean)
6. T. Shinoda and J. Doherty : The Relationships Between Arc Welding Parameters and Weld Bead Geometry. The Welding Institute Report **74**, 1978 (in Germany)
7. D.C. Kim and S. H. Rhee, : Design of an Optimal Fuzzy Logic Controller Using Response Surface Methodology. IEEE Trans on Fuzzy systems, **9-3** (2001), 404-412
8. H. S. Park, T. H. Kim, and S. H. Rhee, : Optimization of Welding Parameters for Resistance Spot Welding of TRIP Steel Using Response Surface Methodology, Journal of KWS, **21-2** (2003), 76-81 (in Korean)
9. J. Y. Lee, J. W. Kim, and C. H. Kim, : A study on the selection of fillet weld conditions by considering the tack welds, Journal of KWS, **24-5** (2006), 377~384, (in Korean)