

# FCA 필릿 파이프 용접에서 다중 비선형 회귀 모형과 구간적 3차 에르미트 보간법을 통한 비드 형상 예측

조대원\* · 나석주\*<sup>†</sup> · 이목영\*\*

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*포항산업과학연구원 융합공정연구그룹

## Expectation of Bead Shape using Non-linear Multiple Regression and Piecewise Cubic Hermite Interpolation in FCA Fillet Pipe Welding

Dae-Won Cho\*, Suck-Joo Na\*<sup>†</sup> and Mok-Young Lee\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, 335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

\*\*Welding Research Center, RIST, Pohang 790-600, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received March 13, 2009 ; Revised May 27, 2009 ; Accepted August 3, 2009)

### Abstract

Pipe welding is used in various ranges such as civil engineering and ship building engineering. Until now, many technicians work for pipe welding manually under harmful, dangerous and difficult conditions. So it is necessary to install automation process. For automation pipe welding, relation between welding parameters & bead shape should be considered. Using this relation, bead shape could be expected from welding parameters. FCAW was used in this study. Instead of pipe workpiece, fillet joint plate is used, which were inclined 0,45,90,135,180 degree. By analyzing between welding parameters (current, welding speed, voltage) and bead shape parameters with non-linear multiple regression, bead shape parameters could be expected. Piecewise Cubic Hermite Interpolation was used to expect smooth curved bead shape with bead shape parameters. From these processes, bead shape could be expected from welding parameters.

Key Words : Bead shape, Welding parameter, Non linear regression, Taguchi-method, Piecewise cubic Hermite interpolation

### 1. 서 론

FCAW (Flux Cored Arc Welding)공정은 내부에 플럭스 코어드 와이어가 충전된 GMAW (Gas Tungsten Arc Welding)라고 할 수 있다. 즉, 소모성 전극인 플럭스 코어드 와이어와 모재 사이에 흐르는 전류에 의해 생기는 아크를 이용해 금속을 용융시켜 접합하는 공정이다. 일반 솔리드 와이어보다 비싸다는 단점이 있지만, 플럭스의 영향으로 보다 안정된 아크를 공급할 수 있고 슬래그에 의해 비드를 덮어주기 때문에 보다 건전한 비드를 형성할 수 있다. 또한 고가의 Ar을 사용하지 않고,

저가의 CO<sub>2</sub> 가스만 사용하여도 충분한 용접부 보호 효과를 얻을 수 있다. 특히 파이프 용접은 지하 공간 혹은 옥외에서 이루어지는데, 이러한 사용조건은 습도, 바람, 온도 등의 변화가 심하여 용접작업을 어렵게 한다. 뿐만 아니라, 파이프 용접은 파이프 원주의 위치에 따라 위보기, 아래보기, 수직자세 등 전자세 용접이 이루어지므로 중력에 의한 용융풀의 유동에 의하여 용접비드의 편차가 크게 발생한다.

파이프 원주용접에서는 파이프의 용도, 환경, 요구조건 등에 따라 이음부의 형태와 용접 방법이 다양하다. 가스관, 쓰레기 수거관 등 비교적 직경이 작은 (500mm 이하) 경우에는 그루브 가공을 하고, 필러와이어를 사용

한 GTA (Gas Tungsten Arc) 용접을 한다. 상수도 도수관 등 관경이 큰(500mm 이상) 경우에는 보다 많은 용착량을 필요하기 때문에 파이프를 삽입하고 내/외면에 대한 GMA 혹은 FCA 용접을 실시한다. 본 연구에서는 대구경 파이프 겹치기 이음부 (overlap joint)의 FCA 용접에서 용접자세에 따른 용접비드 형상에 관하여 검토하였다.

용접을 통해서 얻은 비드는 용접에 사용되는 조건(전류, 전압, 용접속도)에 따라 그 형태가 변화된다. 사용되는 용접 조건에 따라 비드 형상에 미치는 요인을 분석하는 방법은 기존 연구에서 활발히 이루어져 있다. 용접 변수와 비드 형상이 선형적으로 변하는 경우는 선형 모델을 설정하여 예측하게 된다. 그러나 선형적으로 근사하면 복잡한 작용들로 인해 비교적 많은 오차가 발생하게 되므로 극히 제한적인 경우에만 적용할 수 있다. 따라서 용접 현상은 대부분 비선형적인 관계로 가정하고 용접 현상을 예측하게 되는 것이다. 용접 비드 형상을 예측하는 경우, 비드의 형상을 각각 세분화하여, 비드의 너비, 용입 깊이, 목두께, 각장길이 등 각각의 비드 형상 변수를 예측하고 또한 GTAW, GMAW, FCAW 등의 용접 공정에 따라 많은 연구가 진행되어 왔다. K.M.Tay는 다꾸찌방법을 이용하여 실험을 계획하고 신경 회로망을 통하여 GMAW에서의 용접 변수를 입력하고 비드 형상 변수를 추출할 수 있도록 하였다<sup>1)</sup>. D.S.Nagresh는 전류, 전압 뿐만 아니라 용접속도, 와이어 송급 속도 등을 입력 변수로 추가하여 신경 회로망을 이용하여 용접비드의 형태를 보다 더 정확하게 예측할 수 있었다<sup>2)</sup>. I.S.Kim은 로봇의 아크 용접에서 V-groove 시편에서의 비드 높이를 신경 회로망, 선형회귀, 비선형 회귀 등을 통하여 예측하고, 그 중에서 가장 오차가 적은 방법을 찾아냈다<sup>3)</sup>. Hakan Ates등은 용접 가스의 구성 비율을 입력으로 하여 용접 시편의 기계적인 속성들을 신경 회로망을 통하여 예측하기도 하였다<sup>4)</sup>. 또한 H.S.Moon은 비드 형상 변수를 입력으로 하고 신경 회로망, 다중 비선형 회귀 분석을 통하여 용접 결합이 존재하지 않는 용접 변수를 얻을 수 있도록 하였다<sup>5,6)</sup>. 비드 형상에 따른 용접 변수를 예측하기 위해서는 보다 많은 양의 데이터가 필요하게 된다. 즉, 요인 설계 (factorial design)의 실험 계획은 많은 실험 횟수를 필요로 하기 때문에 본 연구에서는 다꾸찌 방법을 통하여 실험 횟수를 줄였다. 또한 주어진 자세에서 전류, 전압, 용접속도를 다중 비선형 회귀 모형을 이용하여 위치에 따른 비드 형상 변수를 예측하도록 하였다. 그 외의 용접 변수 혹은 비드 형상의 최적화와 관련된 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되었다<sup>7-10)</sup>.

그러나 아직까지는 보간법을 이용하여 비드 형상을 비드 형상 변수를 통하여 매끄러운 곡선으로 표현한 경우는 없었다. 주어진 좌표로 하여금 매끄러운 곡선을 형성하도록 하는 과정을 스플라인(spline)이라 하는데<sup>11)</sup>, Bickely는 구간적 3차 스플라인 그래프를 구현하는 방안을 마련하였다<sup>12)</sup>. 본 연구에서는 비드 형상 변수를 입력으로 하였을 경우, 구간적 3차 에르미트 보간법 (Piecewise Cubic Hermite Interpolation)을 통하여 얻은 비드 곡선이 실제 비드 모양과 얼마나 일치하는지 살펴본다. 또한 주어진 각도에서 용접 변수를 입력으로 하였을 때, 다중 비선형 회귀 모형을 통하여 얻은 비드 형상 변수를 구간적 3차 에르미트 보간법에 적용하여 용접 변수로부터 비드의 표면형태를 부드러운 곡선으로 예측할 수 있도록 알고리즘을 구현하였다.

## 2. 용접 실험 및 회귀 분석

### 2.1 실험 계획

본 연구에서는 용접할 대상으로 파이프를 선정하였다. 파이프에 직접 용접을 하여 최적조건을 선정하는 것은 고가의 장비가 소요되고, 다량의 비용 및 인력을 필요로 하는 반면, 조건선정이 어려우므로 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 평판을 특정한 각도로 기울여서 실험하였다. 즉, 용접의 공정을 준 정상상태(quasi steady state)라고 가정할 것으로 비드의 형상은 일정한 형상을 유지한다고 볼 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 250mm의 직경의 파이프를 2도 회전하면서 용접했다고 가정했을 때  $\delta$ 값은 0.0381mm로 평판의 높이의 차이를 비교하면 그 편차는 매우 미비하다는 것을 알 수 있다.

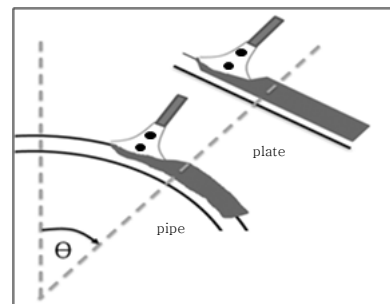


Fig. 1 Concept of pipe welding in plate

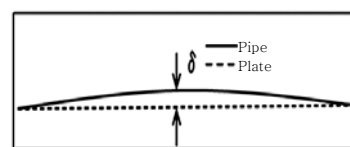


Fig. 2 Comparison pipe with plate

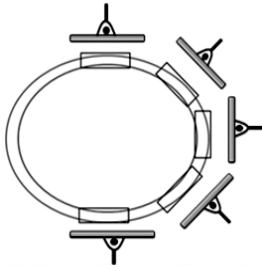


Fig. 3 Schematic of pipe weld experiment with different welding positions

파이프 모사 용접실험은 Fig. 3처럼 5개의 다른 위치에서 용접을 실시하였는데, 기울기 0도인 아래보기 자세로부터 45, 90, 135, 180도의 조건으로 용접을 실시하였다. 일반적인 그루브 파이프 용접에서는 상향용접만이 이루어지므로 대칭성을 고려하면 전술의 5가지 위치에서 실험하였다. 각각의 위치에서 전류, 전압, 용접 속도를 공정변수로 하고, 비드 형상 변수를 출력 변수로 선정하였다. 실험 계획은 Table 1과 같이 5개의 각도에 대해 다꾸찌 방법에서  $L_9(3 \times 3)$  직교 배열법을 사용하여 9번의 실험을 하여 총 45회 실험을 하였다. 출력 변수는 Fig. 4에서 보듯이 각장길이 (L1,L2) 목두께(T), 볼록한

Table 1 Orthogonal array  $L_9(3 \times 3)$  of experiments for a given position

No	cur (Ampere)	w.s (mm/min)	vol (Volt)
1	200	180	20
2	200	240	24
3	200	300	28
4	230	180	24
5	230	240	28
6	230	300	20
7	260	180	28
8	260	240	20
9	260	300	24

\* cur : current(A), w.s : welding speed(mm/min)  
vol : volt(V)

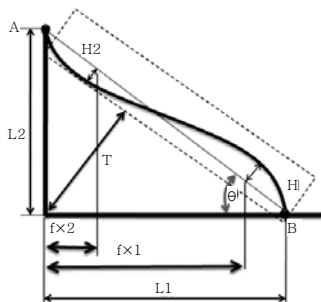


Fig. 4 Bead surface profile with specific parameters

부분의 덧살길이(H1), 오목하게 들어간 깊이(H2), H1과 H2의 x방향으로의 위치(fx1,fx2)로 구성하였다. 또한 모든 실험에서 YFW-C50RD 와이어, CO<sub>2</sub> 100%의 보호가스, 20mm의 CTWD, 10mm 두께의 SS400 강을 사용하였다.

2.2 실험 결과

대체적으로 입열량이 증가하게 되는 경우, 각장길이, 목두께 등 비드 형상 변수들이 증가하게 된다. 즉, 전류와 전압이 증가하고, 용접속도가 감소할수록 입열량이 증가하게 되어 비드 형상 변수들이 증가하게 되고, 반대의 경우는 비드 형상 변수들이 감소하게 된다. 그러나 자세에 따라서 변하는 요인이 굉장히 복잡하고 다양하기 때문에 선형적인 요소로 판단할 수 없다. 따라서 비선형적이고 불규칙한 결과를 나타내는 그래프를 수학적인 모델로 표현하기 위해서 본 연구에서는 다중 비선형 회귀 모형을 이용해 용접의 입력변수에 따른 비드 형상을 예측하였다.

2.2.1 다중 비선형 회귀 모형

용접의 공정은 매우 복잡한 비선형적인 관계로 이루어져있다. 그러나 수학적인 모델링을 통해 어느 정도 근사한 값으로 용접 형상을 예측할 수 있다. 물론 실험을 통해 얻은 데이터를 통하여 모델링을 할 수 있지만 용접 비드 형상과 용접 변수를 예측할 수 있는 식을 만들 수 있었다.

$$Y = f(\text{current, weldingspeed, voltage}) \quad (1)$$

식 (1)에서 Y는 비드의 형상(L1, L2, H1, H2, f1L1, f2L1)에 관련된 항이고, 입력 변수는 용접 변수(전류, 용접 속도, 전압)에 해당한다. 실험을 통해 얻은 fx1, fx2 값 대신 f1L1, f2L1를 사용한 이유는 fx1, fx2값이 절대적인 값을 취하기 때문에 fx1값이 큰 경우, 비드 너비가 작은 형상에는 적용하기 어렵다. 때문에 상대적인 비율을 표현하는 값을 사용하였고, 이 실험에서는 f1L1, f1L1 값을 사용하였다.

$$f1L1 = \frac{fx1}{L1} \quad (2)$$

$$f2L1 = \frac{fx2}{L1} \quad (3)$$

다중 비선형 회귀 모형을 통하여 입력과 출력간의 관계를 다음과 같은 식으로 모델링 하였다.

$$Y = cur^{b_0} \times w.s^{b_1} \times vol^{b_2} \tag{4}$$

b0, b1, b2 : coefficient

식 (4)를 가우스 뉴턴법으로 잔차 제곱의 합을 최소화시키는 방향으로 반복을 통해 우리가 구하고자 하는 계수 값(b0, b1, b2)을 구할 수 있다. 식(4)에 표현된 계수를 결정하기 위해서 상용 통계 프로그램인 SAS가 사용되었고 각도별, 용접 변수별로 다음과 같이 총 35개의 수식을 얻을 수 있었다. Table 3 에서 각각의 위치별로 비드 형상 변수에 관련된 계수들을 표현하였다. 그리고 예측된 결과가 실제와 얼마나 잘 일치하는가에 대한 고찰이 필요하다. 즉 검증을 위한 실험을 추가적으로 실시하여 다중 비선형 회귀 모형의 타당성 여부를 살펴봐야 한다.

### 2.2.2 다중 비선형 회귀 모형의 수학적 모델링에 대한 분산 분석

Table 2에 나와있는 계수를 이용하여 새롭게 구성된 식들이 타당한지에 대한 여부를 검증해야 한다. 모델에 사용하기 위한 적합성 여부를 검증하기 위해 분산 분석(ANOVA : Analysis of Variance)를 통해 F-ratio 값을 계산하였다. 그 결과는 Table 3를 통해 알 수 있다. 기존 연구를 바탕으로 F-ratio가 F 분포의 95% 신뢰도보다 큰 경우 실험을 통해 얻은 모델은 적합하다고 생각할 수 있다<sup>3)</sup>. Table 3를 통해 확인할 수 있듯이, 분산 분석을 통해 얻은 F-ratio 값이  $F_{(3,6,0.05)} = 4.76$ 이므로 다중

Table 2 Estimated regression coefficients of mathematical model for bead geometry parameters

		$Y = cur^{b_0} \times w.s^{b_1} \times vol^{b_2}$						
		L1	L2	T	H1	H2	f1L1	f2L1
0	b0	1.1936	0.8583	0.8855	4.8638	-0.6061	-0.1678	-1.9924
	b1	-1.3573	-0.6761	-0.8994	-4.6397	0.5543	0.1916	1.5474
	b2	0.9804	0.3227	0.5745	-0.5527	-0.2711	-0.1343	0.2095
45	b0	1.2365	0.2466	0.5706	1.1369	2.2036	-0.111	-0.0145
	b1	-0.5969	-0.1173	-0.2913	-1.8613	-0.683	0.0182	0.2511
	b2	-0.4486	0.3592	0.0201	1.2418	-3.0363	0.028	-1.0882
90	b0	0.7887	0.8061	0.7491	0.7713	2.5127	0.2617	3.9586
	b1	-0.668	-0.3373	-0.5185	-0.3807	-1.6981	-0.2959	-2.2009
	b2	0.4197	-0.1992	0.1095	-0.6262	-2.274	-0.1336	-4.1685
135	b0	0.7818	0.7937	0.7086	0.0513	1.4198	0.1407	0.8147
	b1	-0.6485	-0.3645	-0.4566	-0.1664	-1.882	-0.1784	-1.2496
	b2	0.4006	-0.1969	0.0343	0.3504	0.1596	-0.0859	-0.1576
180	b0	0.6572	0.606	0.5709	3.2087	-1.1879	-0.239	0.1005
	b1	-0.6447	-0.2504	-0.3927	-1.3419	-4.9366	0.7045	-5.1446
	b2	0.65	-0.0475	0.1915	-3.4507	9.5475	-1.0751	7.7663

Table 3 ANOVA of mathematical model

Bead geometry	F-ratio for different position				
	0	45	90	135	180
L1	214.8	1687.26	130.9	179.22	238.38
L2	238.13	222.1	373.73	337.78	376.35
T	334.37	573.13	305.01	408.03	1183.07
H1	68.58	21.9	28.55	12.73	43.48
H2	5.19	9.05	4.97	5.9	89.21
f1L1	5.1	174.37	54.64	218.71	28.53
f2L1	11.34	22.18	5.19	5.21	5.1

비선형 회귀 모형의 사용이 적합하다고 볼 수 있다.

### 2.2.3 테스트를 통한 수학적 모델의 검증

다중 비선형 회귀 모형 이외의 추가적인 실험을 통하여 모델을 검증하고자 하였다. 검증에 사용된 실험은 임의의 각도에서 추가 실험을 하였고, 실험 데이터는 Table 4, 비선형 회귀 모형을 통해 얻은 결과는 Table 5에 나타내었다. H1, H2, f1L1, f2L1 값들의 오차 백분율은 비교적 크지만, 상대적으로 매우 작은 값이므로 절대적인 오차는 크지 않다. 따라서 비교적 정확한 데이터를 얻었다 볼 수 있다.

## 3. 보간법을 이용한 비드 형상 구현 및 예측

용접 비드 형상을 근사하기 위해서 용접 단면으로부터 다음과 같이 L1, L2, H1, H2, f1L1, f2L1 등의 길이를 알때 구간적 3차 에르미트 보간법이 실제 비드 형상과 얼마나 유사한지 알아보았다.

Table 4 Result from experiments

No	Input value				Output value						
	cur	w.s	vol	angle	L1	L2	T	H	H2	f1L1	f2L1
1	230	240	24	0	9.49	7.51	5.32	0.6	0.37	0.63	0.17
2	230	180	20	135	8	6.38	5.01	1.95	0.03	0.45	0.05
3	200	240	28	180	8.32	6.04	4.86	0.1	0.28	0.26	0.16

Table 5 Result of predicted value using regression model

No	Input value				Output value						
	cur	w.s	Vol	angle	L1	L2	T	H1	H2	f1L1	f2L1
1	230	240	24	0	8.74	7.3	5.54	0.48	0.33	0.74	0.18
2	230	180	20	135	8.04	6.26	4.88	1.59	0.21	0.52	0.06
3	200	240	28	180	8.29	5.37	4.53	0.16	0.22	0.31	0.11

### 3.1 구간적 3차 에르미트 보간법

보간법은 주어진 점들로부터 해당 곡선 혹은 직선을 구하는 방법이라고 할 수 있다. 직선인 경우에는 두 점의 x좌표와 y좌표를 각각 알면, 기울기와 주어진 점들로부터 직선 방정식을 쉽게 구할 수 있다. 곡선인 경우에는 주어진 좌표를 바탕으로 3차 이내의 방정식들로 곡선을 근사할 수 있다<sup>12)</sup>. 이때 3차 방정식을 P(x)라고 하고, (x,y)로 이루어진 2차원 좌표계에서  $h_x$ 를 k번째 interval 이라고 하고 y값 차분을  $h_y$ 로 나눈 값을  $\delta_x$ 라고 한다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_x = x_{k+1} - x_k \tag{5}$$

$$\delta_k = \frac{y_{k+1} - y_k}{h_k} \tag{6}$$

또한  $x_k$ 에서 P(x)의 기울기는  $d_x = P'(x)$ 로 표현할 수 있다. 구간적 선형 보간법에서  $d_k = \delta_{k-1}$  or  $\delta_k$  형태로 표현이 가능하나, 2차 방정식 이상에서는 적용될 수 없다.  $x_k \leq x \leq x_{k+1}$  범위에서  $s = x - x_k$ ,  $h = h_k$ 라고 한다면, 3차 방정식 P(x)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(x) = \frac{3hs^2 - 2s^3}{h^3}y_{k+1} + \frac{h^3 - 3hs^3 + s^3}{h^3}y_k + \frac{s^3(s-h)}{h^2}d_{k+1} + \frac{s(s-h)^3}{h^2}d_k \tag{7}$$

위와 같이 표현된s와 x로 표현된 3차 다항식은 4개의 보간 조건을 필요로 하며, 그 조건은 다음과 같이 특정 지점에서의 2개의 함수 값과 2개의 미분 값이다.

$$P(x_k) = y_k, \quad P(x_{k+1}) = y_{k+1} \\ P'(x_k) = d_k, \quad P'(x_{k+1}) = d_{k+1} \tag{8}$$

보간법 중에서 미분 값의 조건을 만족시키는 조건을 에르미트 보간법이라고 하며, 비드 형상을 이와 같은 보간법을 통해 매끄러운 곡선으로 근사하기 위해서는 Fig. 4에서 표현한 것처럼, 비드가 오목한 지점과, 볼록한 지점에서의 함수 값과 그 지점에서의 미분 값을 알면 구할 수 있다.

### 3.2 모형 보존형 보간법

본 연구에서 구간적 3차 에르미트 보간법을 비드 형상 예측에 응용하기 위해서는 모형 보존형 보간법을 사

용해야 하며, 이는 기울기  $d_k$ 를 결정하는데 있어서  $\delta_x$ 와  $\delta_{k-1}$ 의 부호가 서로 다르거나 둘 중에 하나가 0이면,  $x_k$  지점에서의 함수 값은 부분적 최고값 혹은 부분적 최소값으로 설정한다. 수식을 통해 표현하면 다음과 같다.

$$d_k = P'(x_k) = 0 \tag{9}$$

즉, 주어진 조건이 최대 혹은 최소값이라는 가정을 사용할 경우 위 방법을 사용할 수 있으므로, 비드 형상을 구하는데 적용하였다. Fig. 4로부터 알 수 있듯이 비드 형상이 오목한 지점과 볼록한 지점을 동시에 갖는다고 가정하고, L1, L2, H1, H2, f1L1, f1L2의 값을 알면 다중 비선형 회귀 모형에 적용하기 위해서는 다음과 같이 입력 변수를 이용한 다른 변수가 필요하게 된다.

$$f1L1 \times beadwidth = wx1 \tag{10}$$

$$f2L1 \times beadwidth = wx2 \tag{11}$$

$$\tan^{-1}\left(\frac{L2}{L1}\right) = \theta \tag{12}$$

위에서 구한 4가지 변수와 기존에 입력한 H1, H2를 합하여 총 6가지 기하학적인 변수를 알면, 구간적 3차 에르미트 보간법을 적용하여 매끄러운 곡선 형태로 비드 형상을 근사할 수 있게 된다. Fig. 5는 Fig. 4의 빗금 친 4각형 영역을 식 (10), (11) 을 통해 구한 변수들로 표현한 그림이다. H1은 wx1에서의 부분적 최대값, H2는 wx2에서의 부분적 최소값을 의미하며 따라서 wx1, wx2 각각의 지점에서 근사된 곡선의 y값은 최대가 되고 이 지점에서의 미분값은 0이 된다. 또한 Fig 5는 식 (12)에서 구한 각도만큼 반시계 방향으로 회전시키면 비드의 형상을 표현할 수 있다.

Fig. 6부터 Fig. 8까지는 실험을 통해 얻은 단면과 구간적 3차 에르미트 보간법의 과정을 통해 얻은 그래프와 비교한 그림이다. 몇몇 사진들의 비교 분석 결과 실제 데이터와의 차이가 0.2mm 오차범위 안에서 일치하였다.

### 4. 다중 비선형 회귀 모형을 적용한 구간적 3차 에르미트 보간법

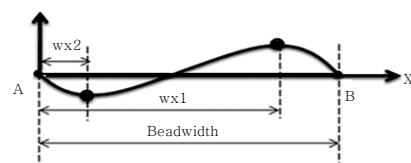


Fig. 5 Rotated bead profile from Fig. 4

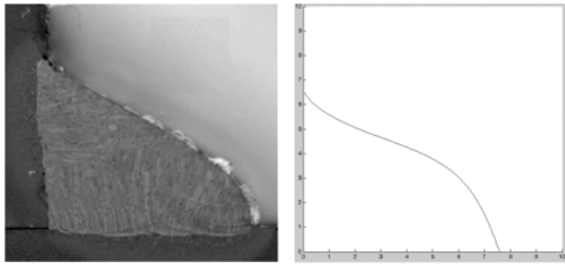


Fig. 6 Comparison experiment with piecewise cubic hermite interpolation which use experiment data (260A 240mm/min, 20V in 0degree)

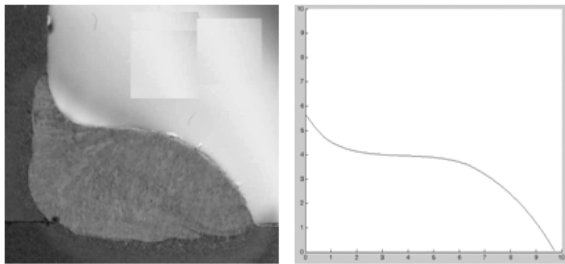


Fig. 7 Comparison experiment with piecewise cubic hermite interpolation which use experiment data (260A 240mm/min, 20V in 45degree)

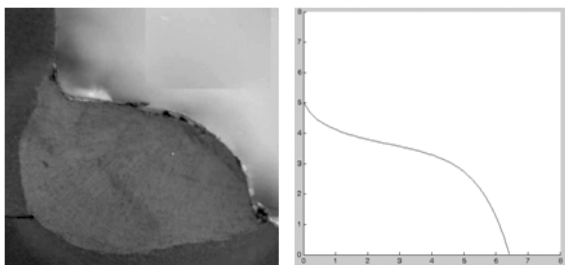


Fig. 8 Comparison experiment with piecewise cubic hermite interpolation which use experiment data (230A 300mm/min, 20V in 135degree)

2장에서 얻은 결과를 바탕으로 다중 비선형 회귀 모형 결과를 이용하여 구간적 3차 에르미트 보간법을 하도록 하였다. 즉, 주어진 각도 (0,45,90,135,180)에서 전류, 전압, 용접 속도를 부여하였을 때, 비드의 형상을 예측할 수 있도록 알고리즘을 구현하였다.

Fig. 9는 용접 변수로부터 비드 형상을 예측하는 순서도를 간단히 표현한 것으로 몇몇의 실험을 통해 비드 형상을 예측 가능하다. Table 4와 Table 5의 수치를 이용해 Fig. 10 부터 Fig. 12까지 다중 비선형 회귀 모형과 구간적 3차 에르미트 보간법을 이용하여 얻은 그림을 실제 비드와 비교한 것으로 용접 변수를 입력하였을 때 비드의 형상이 예측 가능하도록 하였다. 위 경우 최대 오차는 각장 길이에서 0.75mm로 10%이하의 오차범

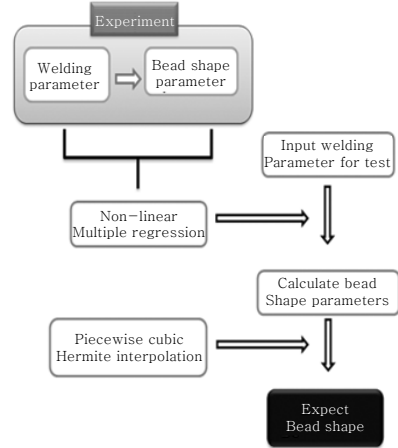


Fig. 9 Flow chart from experiment to expectation of bead shape using non-linear multiple regression & piecewise cubic hermite interpolation

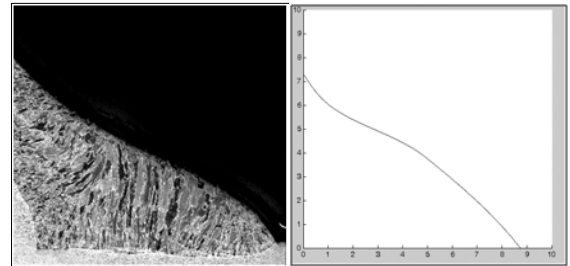


Fig. 10 Comparison of experimental picture with piecewise cubic hermite interpolation which use non linear multiple regression (230A 240mm/min 24V in 0 degree)

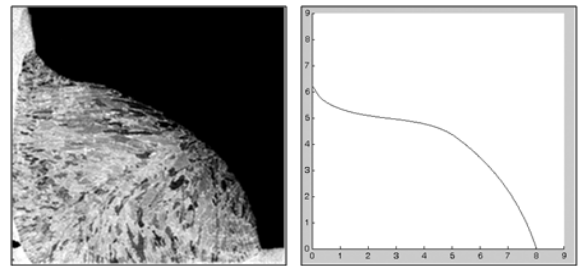


Fig. 11 Comparison of experimental picture with piecewise cubic hermite interpolation which use non linear multiple regression (230A 180mm/min 20V in 135 degree)

위를 나타내는 것을 알 수 있다.

이러한 알고리즘은 해석적인 접근이 아닌 경험적으로 얻은 데이터를 근거로 비드의 형상을 표현하도록 하였다. 그렇기 때문에 비드의 형상이 물리적으로 어떠한 이유에 근거하여 형성된다는 것을 밝힐 수는 없고, 3차 곡선으로 비드 형상을 예측하였기 때문에 보다 복잡한 비

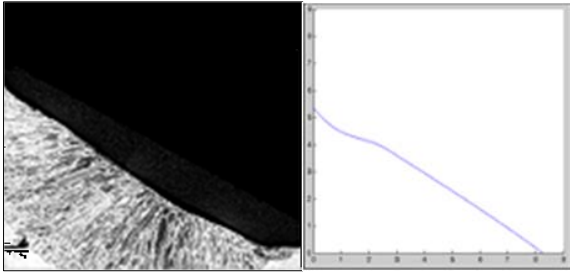


Fig. 12 Comparison of experimental picture with Piecewise Cubic Hermite Interpolation which use non linear multiple regression (200A 240mm/min 28V in 180 degree

드의 형상을 근사하기 위해서는 보다 고차항의 보간법을 활용해야 할 것이다. 그러나 주어진 각도에 대해서 용접 변수를 입력하면 수초 이내로 비드의 형상을 예측할 수 있고, 회귀 모델의 정확성이 보장될 때 비드의 형상을 정확한 예측을 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 파이프 용접을 하기 위해 실제의 파이프 대신 평판을 5개의 각도로 기울여 각각의 위치에서 다른 결과를 얻을 수 있었다.
- 2) 다중 비선형 회귀 모형의 활용을 통해 입력 변수와 실험에서 얻은 출력 변수를 비선형 관계로 수학적 모델링 하였다. 또한 분산 분석을 통하여 모델의 적합성 여부를 확인하였다.
- 3) 구간적 3차 에르미트 보간법을 활용하여 비드 형상 변수로부터 비드의 형상을 복원할 수 있도록 알고리즘을 구현하였다.
- 4) 다중 비선형 회귀 모형을 구간적 3차 에르미트 보간법에 적용시켜, 주어진 각도에서 용접 변수로 하여금 2차원의 용접 비드 형상을 신속하게 예측 가능하도록 하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점 기술개발 사업으로 수행되었으며 RIST의 주관으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. K. M. Tay and C. Butler "Modeling and optimizing of a MIG welding process-a case study using experimental designs and neural networks." *Quality and Reliability Engineering International* 132 (1997), 61 - 70
2. D. S. Nageshet al "Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks" *Journal of Materials Processing Technology* 123 (2002), 303 - 312
3. I.S Kim, J.S. Son, S.H. Lee and Prasad K.D.V. Yarlagadda, "Optimal design of neural networks for control in robotic arc welding" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 20 (2004), 57 - 63
4. Hakan Ates, "Prediction of gas metal arc welding parameters based on artificial neural networks" *Journal of Materials Processing Technology* 123 (2002), 303 - 312
5. H. S. Moon, S. Y. Lee and S. J. Na, "A Study on Selection of Gas Metal Arc Welding Parameters of Fillet Joints Using Neural Network" *Journal of the Korean Welding Society*, 11-4, (1993), 151-163 (in Korean)
6. H. S. Moon, "A study on selection of Adequate Welding Parameters by Considering Weld Bead Shape and Weld Defect and Development of Seam Tracker in Horizontal Fillet Welding". Ph.D. Thesis, Kaist, 1997, 49-82
7. Y. S. Tarn and W. H. Yang, "Optimization of the Weld Bead Geometry in Gas Tungsten Arc Welding by the Taguchi Method" *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14 (1998), 549-554
8. G.E. Ridings, R.C. Thomson and G. Thewlis, "Prediction of multiwire submerged arc weld bead shape using neural network modelling" *Science and Technology of Welding & Joining*, 7-5 (2002), 265-279
9. K.M.Tay and C. Butler, "Modelling and optimizing of mig welding process - A case study using experimental designs and neural networks" *Quality and Reliability Engineering International* 13-2 (1997), 61-70
10. I.S. Kim, J.S. Son, C.E. Park, I.J. Kim and H.H. Kim, "An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process" *Journal of Materials Processing Technology* 159 (2005), 113 - 118
11. E.Kreyszig "Advanced engineering mathematics, 8th edition", 862-864
12. WG Bickley, "Piecewise cubic interpolation and two point boundary problems" *The Computer Journal*, 1968
13. P.K,Palan and N.Murugan, "Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW" *Journal of Materials Processing Technology* 190 (2007), 291-299