

## Neuro-Fuzzy 기법을 이용한 GMA 용접의 비드 형상에 대한 기하학적 추론 알고리즘 개발

김면희<sup>†</sup> · 배준영<sup>\*</sup> · 이상룡<sup>\*\*</sup>

(2002년 8월 20일 접수, 2002년 12월 10일 심사완료)

### A Development of the Inference Algorithm for Bead Geometry in the GMA Welding Using Neuro-Fuzzy Algorithm

Myun-Hee Kim, Joon-Young Bae and Sang-Ryong Lee

**Key Words:** GMAW(보호가스아크용접), Inference Algorithm(추론알고리즘), Fuzzy-Logic(퍼지로직), Neural Network(신경회로망)

#### Abstract

One of the significant subject in the automatic arc welding is to establish control system of the welding parameters for controlling bead geometry as a criterion to evaluate the quality of arc welding. This paper proposes an inference algorithm for bead geometry in GMA Welding using Neuro-Fuzzy algorithm. The characteristic welding parameters are measured by the circuit composed of hall sensor, voltage divider tachometer, etc. and then the bead geometry of each weld pool is calculated and detected by an image processing with CCD camera and a measuring with microscope. The relationships between the characteristic welding parameters and the bead geometry have been arranged empirically. From the result of experiments, membership functions and fuzzy rules are tuned and determined by the learning of neural network, and then the relationship between actual bead geometry and inferred bead geometry are concluded by fuzzy logic controller. In the applied inference system of bead geometry using Neuro-Fuzzy algorithm, the inference error percent is within -5%~+4% in case of bead width, -10%~+10% in bead height, -5%~+6% in bead area, -10%~+10% in penetration. Use of the Neuro-Fuzzy algorithm allows the GMA Welding system to evaluate the quality in bead geometry in real time as the welding parameters change.

#### 1. 서론

가스 메탈 아크 용접(Gas Metal Arc Welding, GMA Welding)은 소모성 전극 와이어를 용융지에 송급하면서, 전류를 이용하여 모재와 전극 사이에 아크를 발생시켜 수행하는 용접법으로 조선, 철강 산업 등 중공업에서 차지하는 비중이 대단히 커

서, 산업전반에 영향을 많이 미치는 용접법이라 할 수 있다. 그러나 용접공정에서 발생하는 고온과 강한 빛, 유해가스 등으로 인하여 3D 직종이라는 인식이 강하며, 고능률을 중요시하던 과거의 작업과는 달리, 품질을 통한 경쟁력확보가 중요해지는 추세로 인하여, 전문가의 양성이 어려워져 오늘날 자동용접의 개발에 대한 필요성이 높아지고 있으며, 이를 위하여 용접품질평가를 위한 연구,<sup>(1)</sup> 아크의 안정성 유지를 위한 연구<sup>(2)</sup>등이 수행되고 있다. 이를 위한 용접공정의 자동화와 무인화가 진행되고 있으나, 대부분 오프라인(off-line)으로 작업을 수행하고 있어 생산성의 향상과 용접 품질 향상 면에서 그 기능을 충분히 발휘하지 못하고 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 용접공

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

E-mail : ipconfig@chollian.net

TEL : (053)952-2229 FAX : (053)950-6550

<sup>\*</sup> 경북대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 경북대학교 기계공학부 교수

정 해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 접근 방법으로는 용접 현상을 해석하기 위한 용접공정변수의 선정과 이러한 공정변수를 이용하여 용접현상을 해석하는 알고리즘의 개발이 있다. 기존에 비드형상과 용접공정 변수와의 상관관계를 규명하고 비드 형상의 예측 및 제어를 위한 연구의 최근의 동향은 다음과 같다. 용접비드형상을 수학적 모델에 의한 예측 및 용접공정변수와 용접비드폭의 상관관계를 규명한 연구<sup>(3)</sup> 위빙(weaving)을 수반한 경우에 있어서의 인공신경회로망을 이용한 비드형상에 관한 연구,<sup>(4)</sup> 신경회로망을 이용하여 용접공정변수로서 선정된 용접물 표면상 5점의 온도로부터 용융지크기를 예측제어하는 연구<sup>(5)</sup> 그리고 용접아크 및 용융지의 유동을 고려한 용접부의 수치해석에 관한 연구가 많이 수행되어 왔으며, 용접비드의 형상에 대한 연구로서는 신경회로망과 용입깊이의 상관관계에 대한 연구,<sup>(6)</sup> 신경회로망을 이용한 최적의 비드폭 예측에 대한 연구,<sup>(7)</sup> 신경회로망을 이용한 최적의 비드 높이에 대한 연구<sup>(8)</sup> 등이 있다. 그러나 GMA 용접은 단순한 수학적 모델링이나 경험식만으로는 파악하기에 어려운 열·물리적 현상을 수반한다는 점과 선행된 비드형상에 대한 연구가 대부분 평판(bead-on-plate)에 국한되어 있다는 한계가 있었다. 따라서 본 논문에서는 뉴로퍼지기법을 이용하여 겹침이음(lap-joint)에 대한 용접비드형상(폭, 높이, 용입)을 추론하고자 한다.

본 연구에서는 산업현장에서 많이 사용하고 있는 3mm 저탄소강인 SS41의 재질에 대하여 용접전류, 용접전압, 토치이송속도, CTWD(contact-tip to workpiece distance), 와이어피드량을 주요 용접공정변수로 선정하고 겹침이음(lap-joint) 형태로 실험을 수행하였으며, 이렇게 확보된 데이터를 이용하여 특정용접변수들과 비드형상과의 관계를 규명하였다. 그리고 용접공정변수들 중에서 용접전류, 용접전압, 와이어피드량 그리고 각 조건에 따른 비드형상의 결과를 토대로 하여 신경회로망과 퍼지이론<sup>(4-9)</sup>을 융합한 방법을 이용하여 기하학적인 비드형상을 추론함으로써 용접공정의 품질평가시스템 개발의 가능성을 검토하여 보았다.

## 2. 실험

### 2.1 용접실험장치

본 연구의 수행을 위하여 구성된 실험장치는 Fig. 1에 도시한 바와 같으며, 용접기는 350A 용량의 정전압 인버터 타입이며, 보호가스는 아르곤 70%, 이산화탄소 30%를 사용하였고, 가스체적유량(gas flow rate)은 15 l/min으로 하였다. 용접봉은 1.2mm 인 YGW-15를 사용하였으며, 159 cm/min의 용접속도로 두께 3mm인 두 개의 일반구조용 저탄소강 SS41을 겹침이음(lap-joint)이음의 형태로 GMA 용접 실험을 수행하였다.

실험장치는 용접기 시스템과 3축 직교 좌표 로봇, 가스혼합기로 구성되며 용접시편은 지그(jig)상의 두 바이스(vise)에 의해 고정된다. GMA 용접기는 정전압 인버터(inverter) 타입으로 최대 350A를 출력할 수 있고 토치는 로봇에 부착되어 있으며, 교시작업에 의해서 토치이송속도와 CTWD가 조절되어진다. 용접전류는 홀(hall)센서를 이용하여 측정하였고, 전압은 용접기의 출력전압을 측정하였다. 와이어의 송급속도는 와이어 롤러의 회전축에 타코미터를 설치하여 측정하였다.

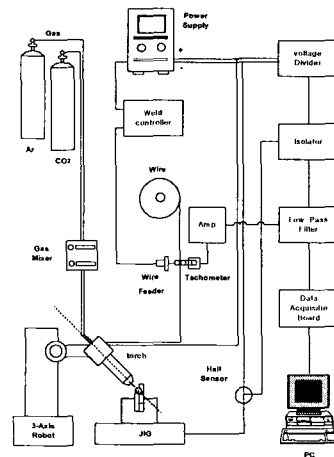


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

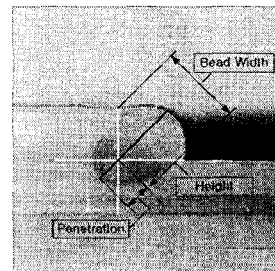


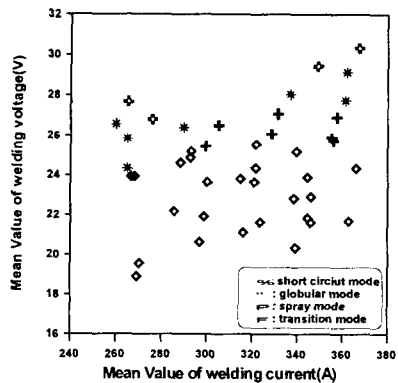
Fig. 2 Bead geometry of lap-joint welding

**Table 1** Process parameters and limits for experiment - 1

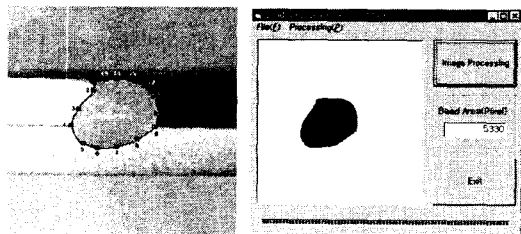
Weld. Cond.	Weld. Volt. (V)									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Weld. 250	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Cur. 270	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
(A) 290	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Other Cond.	•CTWD : 15/18/20 mm •Travel Speed : 127/159/190.8 (cm/min) •Shielding Gas : Ar : CO <sub>2</sub> = 7:3									

**Table 2** Process parameters and limits for experiment - 2

Weld. Cond.	Weld. Cur. (A)							
	230	240	250	260	270	280	290	300
Weld. 24	○	○	○	○	○	○	○	○
Volt. 25	○	○	○	○	○	○	○	○
(V) 26	○	○	○	○	○	○	○	○
Other Cond.	•CTWD : 18 mm •Travel Speed : 127 (cm/min) •Shielding Gas : Ar : CO <sub>2</sub> = 7:3							



**Fig. 3** Metal transfer according to mean value of welding current and voltage



**Fig. 4** A typical example to calculate bead area

이렇게 용접전류, 용접전압, 와이어송급속도를 계측하여, 저역통과필터를 거쳐서 노이즈를 감소시킨 후 12bit 분해능을 가지고 있는 데이터 획득

장치(MetraByte DAS 1600)를 통하여 1 kHz 의 샘플링 주기로 PC에 저장하였다.

2.2 용접실험조건

본 연구에서는 일정한 용접전류 조건하에서 용접전압을 1V씩 증가시켜가면서 금속이행모드가 단락모드에서 스프레이모드가 나올 때까지 실험을 수행하였다. 스프레이모드가 나타나면 용접전류를 20A씩 증가시켜 넓은 범위에서 비드의 기하학적 형상이 고려될 수 있도록 실험조건을 선정하였다. 이렇게 함으로써 비드의 기하학적 형상이 한정된 특정 형상에 편중됨이 없이 골고루 분포되고 학습데이터의 수가 많을수록 입력변수의 멤버쉽함수는 신뢰성을 가지게 된다. 용접조건은 Table.1 과 같이 용접전압에 따른 비드의 기하학적인 형상의 관계를 구하기 위해 용접전류는 250A에서 20A씩 290A까지 증가시켰고 각 용접전류마다 20V에서 30V까지 용접전압을 1V씩 증가시켜 실험을 행하였다. 그리고 토치 이송속도는 159 cm/min을 기본으로 하였고 추가적으로 127 cm/min 과 190.8 cm/min 으로 실험을 하였다. 그리고 CTWD에 대한 관계를 얻기 위해서 15mm, 18 mm, 20mm로 일정한 조건하에서 실험을 첨가하였다. 용접전류에 대한 비드의 형상을 보다 넓은 범위에서 얻기 위해서 Table.2 와 같이 용접전압을 24V, 25V, 26V에 각각 고정한 후, 용접전류를 230A에서 10A씩 증가시켜 300A까지 실험을 하였다.

2.3 용접실험결과

Fig. 3 는 용접전류와 용접전압과의 상관관계를 각각의 모드에 따라 표현한 것이다. 모드는 실험시에 스패터의 유무와 소리 등으로 판단하였다. 전류를 증가시키면 용입이 깊어지고, 전압을 증가시키면 비드폭이 넓어졌으며, CTWD와 토치이송속도를 증가시키면 비드높이 및 용입이 줄어들 관찰할 수 있었다.

2.4 비드형상측정

앞의 과정을 거쳐서 용접된 시편을 절단, 연마한 후 연마한 단면에서 비드 형상을 선명하게 나타내기 위해서 Nital액(질산 10%, 알코올 90%)으로 비드부분을 에칭(etching)한 후, 비드의 형상정보를 취득하였다. 단순 형상정보를 측정하기 위

하여 0.001mm의 정밀도(resolution)를 Mitutoyo社의 공구 현미경(TF-501F)을 이용하였다. 비드의 면적은 공구현미경으로 측정하기에는 어려움이 있어서 화상처리를 이용하였다. 이를 위하여 Sony社의 CCD(DXC-107A)카메라로 비드 이미지를 획득하였다. 이때 영상획득에 있어서 중요한 요소인 조명의 영향을 줄이기 위하여 NIKON社의 조명장치(Fiber Optic Light source)를 사용하여 균일한 조명을 가하였으며, Matrox社의 이미지 획득 보드(Meteor)를 사용하여 PC에 저장하였다.

이렇게 얻어진 이미지는 연마 방향, 애칭(etching)시간에 따른 부식의 정도 차이 그리고 조명조건에 따라 이미지의 색상이 일정하지 않으므로 Fig. 4와 같이 그래픽 툴을 사용하여 비드의 단면적을 계산할 수 있도록 비드 이미지에 노트(node)를 추가하여 비드의 경계선을 규정한 후, 비드의 단면적을 계산하도록 하였다.

3. 추론부

Table 3 Fuzzy rule to infer bead width

Rule No.	Membership Funtion			Parameter of bead width Y'			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> '	C <sub>2</sub> '	C <sub>3</sub> '	C <sub>4</sub> '
1	S	S	S	0.911	-21.917	1.356	-1.242
2	S	S	L	-0.421	8.386	-0.479	17.928
3	S	M	S	4.470	-39.781	-0.686	2.148
4	S	M	L	-2.258	6.633	2.551	7.113
5	S	L	S	-2.564	46.099	-3.972	1.062
6	S	L	L	2.415	-33.621	1.905	-3.628
7	M	S	S	-0.294	-8.878	2.189	8.674
8	M	S	L	0.012	1.295	0.029	-53.776
9	M	M	S	-0.971	0.012	2.183	-8.633
10	M	M	L	0.144	-0.840	-0.110	-14.069
11	M	L	S	1.509	-9.793	-1.176	-5.691
12	M	L	L	-0.338	1.402	0.292	20.687
13	L	S	S	-4.653	58.257	1.576	-5.121
14	L	S	L	0.521	-5.463	-0.411	28.560
15	L	M	S	-4.091	63.139	-0.405	2.688
16	L	M	L	0.258	-5.832	0.362	-19.428
17	L	L	S	-14.251	35.556	22.693	-0.253
18	L	L	L	1.372	-3.468	-2.187	1.359

Table 4 Fuzzy rule to infer bead height

Rule No.	Membership Funtion			Parameter of bead thickness Y'			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> '	C <sub>2</sub> '	C <sub>3</sub> '	C <sub>4</sub> '
1	S	S	S	-0.085	0.504	0.073	6.042
2	S	S	L	2.059	-13.062	-1.609	-18.209
3	S	M	S	-0.992	2.958	2.109	-73.797
4	S	M	L	-0.460	-65.664	9.770	-12.867
5	S	L	S	1.910	-2.930	-3.385	13.264
6	S	L	L	-0.767	-15.887	7.157	-0.436
7	M	S	S	0.372	2.564	-0.460	-105.609
8	M	S	L	-0.119	2.463	-0.321	38.083
9	M	M	S	-0.468	4.877	-0.273	68.912
10	M	M	L	0.842	7.389	-1.990	-89.344
11	M	L	S	-0.495	-8.064	2.204	4.973
12	M	L	L	-0.877	11.905	-0.669	-0.528
13	L	S	S	-1.727	-15.587	5.129	3.251
14	L	S	L	0.197	3.832	-0.628	-40.337
15	L	M	S	3.657	-11.124	-5.484	-1.944
16	L	M	L	-1.191	7.002	1.280	6.804
17	L	L	S	-0.043	-27.019	4.788	-0.661
18	L	L	L	0.211	5.017	-1.364	3.565

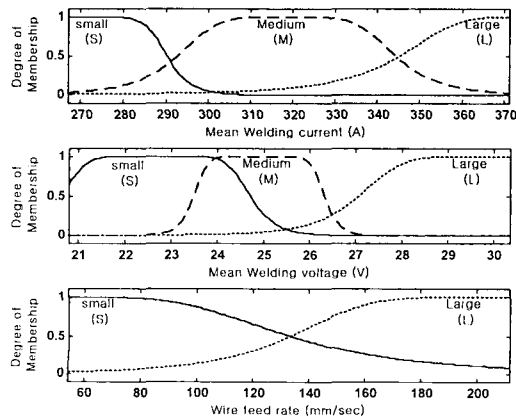


Fig. 5 Membership function to infer bead width

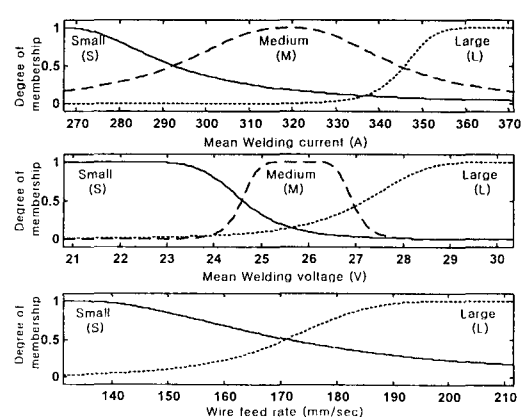


Fig. 6 Membership function to infer bead height

본 연구에서는 비드형상을 추론하기 위한 추론 엔진의 구현을 위하여, 신경회로망과 퍼지이론을 접목시켜 구성된 뉴로-퍼지를 이용하였으며, 입력 변수는 용접변수들, 출력변수는 비드의 기하학적 형상정보로 구성하였고, 퍼지입력 함수의 형태를 일반적인 bell 형상의 함수로 설정하고 추론 오차율의 목표설정치를 ± 10% 이내가 되도록 퍼지규칙의 수를 설정하였다. 따라서 퍼지규칙의 수를 변화시켜 추론한 결과, 각 퍼지입력 변수의 멤버쉽 함수의 개수로서 용접전류와 용접전압은 각각 3개, 와이어 피드량은 2개로 설정하였다.

Table 5 Fuzzy rule to infer bead area

Rule No.	Membership Functon			Parameter of bead area Y'			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> '	C <sub>2</sub> '	C <sub>3</sub> '	C <sub>4</sub> '
1	S	S	S	-4.319	25.454	4.720	-87.597
2	S	S	L	62.664	-390.461	-56.496	-12.933
3	S	M	S	0.751	-7.592	0.636	-71.609
4	S	M	L	-25.949	-138.295	64.143	-23.102
5	S	L	S	1.884	-47.322	4.289	190.488
6	S	L	L	48.432	-378.503	-22.139	-4.681
7	M	S	S	0.057	-1.681	-3.838	589.089
8	M	S	L	0.750	13.318	-2.989	12.479
9	M	M	S	-0.809	-6.539	2.476	60.348
10	M	M	L	-0.703	5.592	1.115	-113.257
11	M	L	S	4.397	-31.889	-2.925	-38.199
12	M	L	L	3.848	-22.113	-4.394	77.194
13	L	S	S	-11.392	70.209	15.870	-13.517
14	L	S	L	-0.717	-19.833	3.239	-41.271
15	L	M	S	1.730	11.741	-5.823	-31.348
16	L	M	L	1.023	-0.753	-1.875	102.646
17	L	L	S	-92.736	576.741	86.092	-9.266
18	L	L	L	16.176	-103.698	-14.480	-1.533

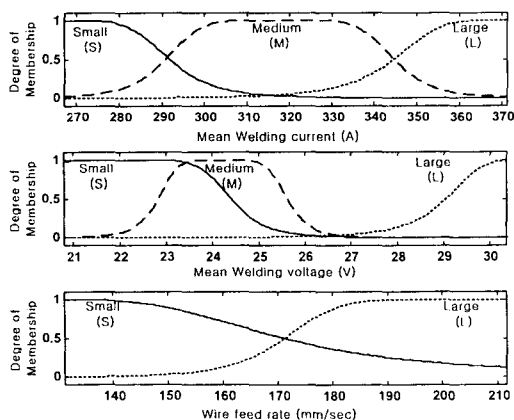


Fig. 7 Membership function to infer bead area

따라서 본 연구에서 사용된 TSK(Tagaki-Sugeno-Kang)<sup>10)</sup> 추론방식의 최소 퍼지 규칙 수는 3×3×2=18개 이다.

Table 3~6 은 비드 폭을 추론하기 위해 학습으로 구해진 퍼지규칙을 나타내고 있다. 여기서, 정리된 퍼지규칙에서 S는 Small, M은 Medium, 그리고 L은 Large를 나타내었고 비드 폭을 나타내기 위한 변수들 C<sub>1</sub><sup>i</sup>, C<sub>2</sub><sup>i</sup>, C<sub>3</sub><sup>i</sup> 는 용접전류의 실효값, 용접전압의 실효값, 그리고 와이어 피드량에 대한 정수배를 나타내고 C<sub>4</sub><sup>i</sup>는 상수이다.

Table 6 Fuzzy rule to infer penetration

Rule No.	Membership Functon			Parameter of Penetration Y'			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	C <sub>1</sub> '	C <sub>2</sub> '	C <sub>3</sub> '	C <sub>4</sub> '
1	S	S	S	-0.310	3.895	0.168	-10.471
2	S	S	L	1.260	-24.660	0.637	-0.001
3	S	M	S	-0.406	2.888	0.474	-24.326
4	S	M	L	2.312	-33.286	0.630	-0.907
5	S	L	S	2.169	-28.170	1.761	9.210
6	S	L	L	-11.834	-82.146	33.574	-0.491
7	M	S	S	-0.166	0.482	0.698	-64.773
8	M	S	L	-0.101	0.241	0.573	-78.183
9	M	M	S	0.139	-0.599	-0.161	0.245
10	M	M	L	-0.364	3.571	0.419	-48.093
11	M	L	S	-1.089	1.681	1.792	7.311
12	M	L	L	3.167	-13.285	-3.958	11.286
13	L	S	S	1.529	-14.765	-0.828	-5.552
14	L	S	L	-0.246	-1.033	0.542	-4.717
15	L	M	S	1.311	-6.005	-1.336	-22.918
16	L	M	L	0.184	-0.759	-0.356	22.342
17	L	L	S	-20.029	141.536	15.869	-6.331
18	L	L	L	1.425	-13.238	-0.815	31.185

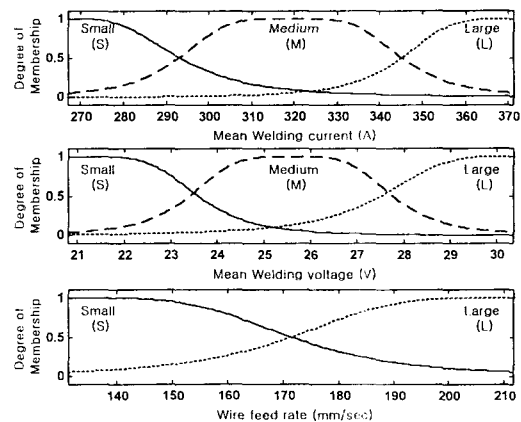


Fig. 8 Membership function to infer penetration

예를 들어, Table 3의 규칙 1의 의미는 다음과 같다.

"If ( $X_1$  is S) and ( $X_2$  is S) and ( $X_3$  is S)  
Then

$$Y^1 = 0.911X_1 - 21.927X_2 + 1.357X_3 - 1.242$$

여기서,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  는 각각 용접전류의 실효값, 용접전압의 실효값, 그리고 와이어 피드량을 의미하고  $Y^1$ 는 비드폭을 의미하고 있다.

Figs. 5~8은 각각 비드폭, 높이, 단면적 그리고 용입을 추론하기 위해 신경회로망의 학습으로 구해진 퍼지입력 멤버쉽 함수를 나타내고 있다.

다음의 Figs. 9~12 은 학습에 의해 선정된 입력멤버쉽함수, 퍼지규칙, 그리고 후건부의 선형함수식의 계수로 구성된 퍼지제어기로부터 추론된 결과이다.

오차율은 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Inference error percent} = \frac{\text{inferred value} - \text{real value}}{\text{real value}} \times 100$$

위의 과정에서와 같이 구현된 뉴로-퍼지 시스템으로부터 비드의 기하학적인 형상을 추론한 결과, 겹침이음(lap-joint)의 경우는 비드의 폭은 -5%~+4%이내, 비드높이는 -10%~+10%이내, 비드의 단면적은 -5%~+6%이내, 그리고 용입깊이는 -10%~+10%이내의 추론오차율을 나타내었다.

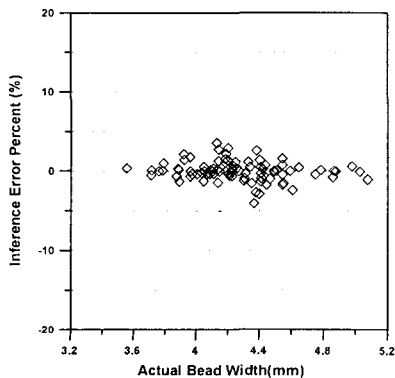


Fig. 9 Inference error percent regarding bead width

비드폭, 단면적의 경우에는 추론오차가 전체영역에 있어서 비교적 고른 분포를 나타내었고 최대추론오차율도 대부분  $\pm 6\%$ 이내로서 양호한 편이었으나 용입과 비드높이는  $\pm 10\%$ 의 큰 오차율을 보였다.

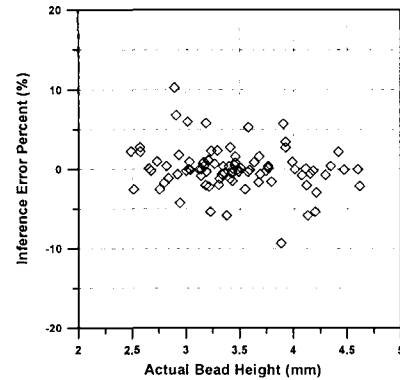


Fig. 10 Inference error percent regarding bead height

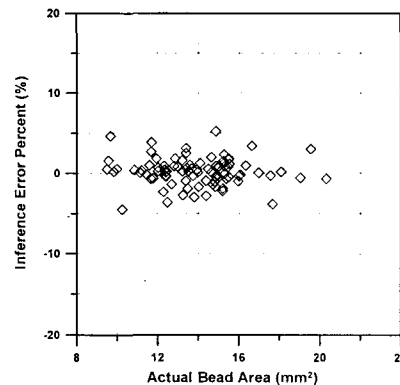


Fig. 11 Inference error percent regarding bead area

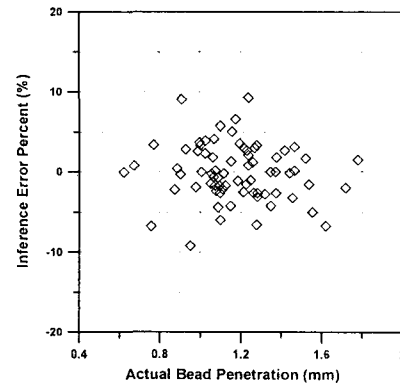


Fig. 12 Inference error percent regarding bead penetration

#### 4. 결론

본 연구에서는 GMA용접서 특정 파라미터를 뉴로-퍼지 알고리즘을 이용하여 학습시킨 후 퍼지 추론 시스템으로부터 비드폭, 비드높이, 단면적, 용입깊이와 같은 기하학적 형상에 대한 결과를 추론하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) GMA용접에서 용접과정중 획득 가능한 입력 파라미터 즉, 용접전류, 용접전압, 와이어 파드량으로부터 비드의 기하학적인 형상에 대한 퍼지 추론 시스템이 구성될 수 있었다.

(2) 구성된 뉴로-퍼지 시스템으로부터 비드의 기하학적인 형상을 추론한 결과, 입력변수들에 대한 비드폭은 -5%~+4%이내, 비드높이는 -10%~+10% 이내, 비드의 단면적은 -5%~+6%이내, 그리고 용입깊이는 -10%~+10%이내의 추론 오차율을 나타내었다.

(3) 추론 오차율의 결과로부터 실제 GMA용접 공정에 있어 뉴로-퍼지를 이용함으로써 용접품질 평가의 알고리즘의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, J.S., Lee, J.I. and Lee, S.R., 1998, "Quality Assurance Algorithm Using Fuzzy Reasoning for Resistance Spot Weldings," *Transactions of the KSME A*, Vol. 22, No. 3, pp. 644~653.
- (2) Kang, M.J., Rhee, S.H. and Woo, J.J., 2000, "Development of Estimation Model for Arc Stability Considering Arc Extinction with Multiple Regression Analysis in CO<sub>2</sub> Arc Welding," *Transaction of the KSME A*, Vol. 24, No. 8, pp. 1885~1898.
- (3) Kim, I.S., Kwon, W.H. and Park, C.E., 1996, "The Effect of Welding Process Parameters on Weld Bead Width in GMAW Processes," *Journal*

*of the Korean Welding Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 33~42.

- (4) Na, S.J., Shin, J.S. and Kim, J.W., 1992, "A study on seam Tracking and Arc Data Monitoring for sheet Metal Weldign," *Int. Conf. on Computerization of Welding information IV*, November 3-6, Orlando, Florida, pp. 240~250.
- (5) Lim, T.G., Cho, H.S. and Boo, K.S., "Control of Weld Pool Size in GMA Welding Process Using Neural Network," *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 59~72.
- (6) Kim, I.S. and Chon, K.S., 1999, "A Study on Prediction of Optimized Penetration Using the Neural Network and Empirical models," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 5, pp. 70~75.
- (7) Kim, I.S., Park, C.E., Jeong, Y.J., Kim, I.J., Son, J.S. and Lee, J.P., 1998, "A Study on Development of System for Prediction of the Optimal Bead Width on Robotic GMA Welding," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 7, No. 6, pp. 57~63.
- (8) Kim, I.J., Park, C.E., Kim, I.S., Son, J.S., An, Y.H., Kim, D.K. and Oh, Y.S., 1999, "Development of Algorithm for Prediction of Bead Height on GMA Welding," *Journal of KWS*, Vol. 17, No. 5, pp. 304~310.
- (9) Tsoukalas, L.H., 1997, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering," *John Willy & Sons, Inc.*
- (10) Takagi T., and Sugeno M., 1985, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Trans. on SMC*, 15-1, pp. 116~132.
- (11) Shing J. and Jang R., 1993, "Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", *IEEE Transactions on Sys., Man., and Cyber.*, Vol. 23, No. 3, May/June.