

## 퍼지 전문가 시스템을 활용한 용접 품질 예측 시스템에 관한 연구

박 주 용\* · 강 병 윤\*\* · 박 현 철\*  
(97년 2월 4일 접수)

### Research on the Weld Quality Estimation System Using Fuzzy Expert System

Ju-Yong Park\* · Byung-Yun Kang\*\* · Hyun-Chul Park\*

**Key Words** : Weld Quality Estimation(용접 품질 예측), Weld Bead Shape(용접 비드 형상), Welding Parameters(용접 변수), Fuzzy Rule(퍼지룰), Approximate Reasoning(근접추론), Fuzzy Expert System(퍼지 전문가시스템)

#### Abstract

Weld bead shape is an important measure for evaluation of weld quality. Many welding parameters have influence on the weld bead shape. The quantitative relationship between welding parameters and bead shape, however, is not determined yet because of their high complexity and many unknown factors. Fuzzy expert system is an advanced expert system which uses fuzzy rules and approximate reasoning. It is a very useful tool for welding technology because it can process rationally the uncertain and inexact information such as the welding information.

In this paper, the empirical and the qualitative relationship between welding parameters and bead shape are analyzed and represented by fuzzy rules. They are converted to the quantitative relationship by use of approximate reasoning of fuzzy expert system. Weld bead shape is estimated from the welding parameters using fuzzy expert system. The result of comparison between measured values of weld bead by welding experiments and the estimates values by fuzzy expert system shows a good consistency.

#### 1. 서 론

용접 기술은 다양한 기술 분야가 어우러진 복합 기술로써 용접 과정에는 아크, 고온 유동, 용융, 응고 등의 불안정한 물리 및 야금 현상이 동

반되며 용접에 관여하는 인자도 매우 많아 정량적인 해석이 매우 어려운 분야이다. 용접은 구조물의 제작시 필수적으로 적용되는 생산 기반 기술이며 용접의 품질은 구조물의 외관 및 강도에 직결되는 만큼 고품질의 용접은 용접의 생산성

\* 한국해양대학교 조선해양공학부

\*\* 부산대학교 조선해양공학과

향상과 함께 가장 핵심적인 목표가 되고 있다. 용접 품질은 용접 결함의 여부와 용접 비드의 형상으로 평가되며 용접 결함이 수반되는 대부분의 경우 비드의 형상이 비정상적이 되므로 일차적으로 비드의 형상으로 용접의 품질을 평가하게 된다. 보다 정밀한 품질의 평가를 위해서는 추가적으로 X-Ray 검사, 초음파 검사 등으로 대표되는 비파괴 검사와 적절한 시편에 구조물에 적용한 용접 조건으로 용접한 후 직접 인장 및 충격 시험과 같은 파괴 검사를 시행하여 최종 품질을 결정짓게 된다. 그러나 비파괴 검사와 파괴 검사는 특별히 하중이 집중되는 부위나 피로하중이 심각한 문제가 되는 경우에 시행하며 일반적으로는 비드의 외관 형상으로 용접 품질을 평가한다.

퍼지 전문가 시스템은 경험적 지식을 처리할 수 있는 기존의 전문가 시스템에 퍼지론적 접근을 도입한 시스템으로 다양한 분야에 널리 적용되고 있고 최근 용접 분야에서도 적용 범위를 넓혀가고 있다<sup>12)</sup>. 본 연구에서는 비드 형상을 용접 품질의 평가 기준으로 삼고 퍼지 전문가 시스템의 지식 표현 기법인 퍼지룰(Fuzzy rule)을 활용하여 정량적인 해석이 불가능한 용접 변수와 용접 비드 형상과의 관계를 기술하고 퍼지 전문가 시스템의 근접 추론(Approximate reasoning)을 활용하여 비드 형상을 예측함으로써 용접 품질을 추정하는 시스템을 개발하였다.

## 2. 용접 변수와 비드 형상과의 상관 관계 고찰

비드 형상에 영향을 미치는 용접 변수는 용접에 관련된 모든 인자라 할 수 있겠으나 그 중 영향을 미치는 정도가 크고 작업자에 의해 조절이 가능한 인자를 들어보면 용접 전류, 용접 전압, 용접 속도, 토치의 위치 및 각도, 위빙, 이음부의 형상, 용접 자세 등이 이에 해당한다. 본 연구에서는 조선 분야에서 널리 적용되는 CO<sub>2</sub> 용접법을 적용하고 필렛 수평 이음부에 대해 직경 1.4 mm 플렉스 코어드 와이어를 사용한 경우를 대상으로 하였다.

용접 전류는 아크의 에너지 상태와 와이어의

저항열을 좌우하는 주인자로 비드 형상에 결정적인 영향을 미치는 인자 중의 하나이다. 용접 전류가 높아지면 비드는 전반적으로 커지게 되어 비드 폭, 덧살, 용입이 모두 커진다.

용접 전압은 용접 전류가 일정한 경우 일종의 저항 성분인 아크 길이에 의해 결정된다. 아크 길이가 증가하면 저항이 크게 되어 용접 전압도 높아진다. 용접 전압이 높아지면 모재 표면에 닿는 아크의 면적이 크게 되어 비드 폭이 커지며 상대적으로 덧살 높이는 줄어든다. 또한 모재 표면의 단위 면적당 가해지는 에너지는 감소되므로 용입은 줄어든다. 반면에 용접 전압이 줄어들면 아크 면적이 줄어들어 비드 폭이 좁게 되고 덧살 높이는 증가되며 용입도 증가된다. 하지만 용접 전압이 너무 낮게 되면 높아진 덧살로 인해 아크 열이 모재의 밑부분으로 전달되기 어려워 용입은 다시 줄어든다.

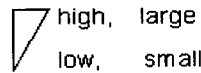
용접 속도는 모재에 미치는 입열량을 결정짓는 주요 인자로 역시 비드 형상에 결정적인 영향을 미치는 인자이다. 속도가 높은 경우 용접선 방향으로 단위 길이당 가해지는 입열량이 줄어들게 되어 비드 폭, 덧살, 용입이 모두 줄게 된다. 용접 속도가 줄어들면 단위 길이당 입력이 증가하므로 비드 폭, 덧살, 용입이 모두 커진다. 하지만 지나치게 용접 속도가 낮으면 아크가 이미 넓게 형성된 용융지 위에 계속 작용하게 되어 용융 금속이 과열되고 유동성이 증가되어 옆으로 흘러 넘치게 된다. 이로 인해 비드 토우부에 오버랩이 형성되기 쉽고 모재의 루트부에 열이 전달되기 어려워 용입도 오히려 줄어든다.

위빙은 수직 방향 용접이나 후판 용접의 경우, 특히 아크 센서가 쓰이는 자동 용접의 경우는 필수적으로 적용되는 운봉 기법으로 다층 용접시 패스 수를 줄일 수 있고 비드를 적절히 퍼지게 하여 평평한 비드 형상을 얻을 수 있게 한다. 위빙이 커짐에 따라 입열은 비드 폭 방향으로 분산되어 비드 폭은 증가되며 용융 단면은 역삼각형에서 사각형에 가까운 형태로 되어 용입은 줄어들게 된다. 수평 필렛의 경우 위빙 폭이 너무 크면 용입 부족의 결함이 생기게 된다. 위빙폭이 줄어들면 위빙이 없는 경우에 가까운 형태로 되지

만 수평 필렛의 경우 각장이 큰 경우는 용융 금속의 흘러내림으로 인해 밑으로 처진 비드가 형성된다.

갭은 용접 현상에 관련된 변수는 아니지만 비드의 형상에 큰 영향을 미치는 인자이다. 갭이 클수록 아크열이 모재 밑부분에 도달하기 용이하고 용융 금속이 중력에 의해 밑으로 흘러 내려 용입이 급격히 증가하고 덧살과 비드 폭은 줄어든다.<sup>3)</sup>

용접 변수와 용접 비드의 상관 관계는 전술한 바와 같이 정성적으로 기술이 가능하며 이는 Fig. 1과 같이 요약될 수 있다<sup>4)</sup>. 그러나 이들에 대한 정량적인 상관 관계는 Masumoto<sup>5)</sup>, Kuhne<sup>6)</sup> 등이 많은 실험 데이터의 회귀분석을 통해서 용접 변수와 용접 비드 형상과의 상관 관계를 실험적으로 제한한 바 있고 Sudnik<sup>7)</sup>이 아크의 에너지 상태와 용융 금속의 유동을 고려한 이론적 분석을 통해 이들의 상관 관계를 표현한 바 있으나 제한된 범위내에서만 적용 가능할 뿐만 아니라 실제 값과의 오차가 심하여 실용적으로 활용되지 못하고 있다.



Welding parameters	Penetration	Bead width	Reinforcement
Welding current	▲	▲	▲
Welding voltage	▶	▲	▲
Welding speed	▶	▲	▲
Gap	▲	▲	▲
Weaving	▲	▲	▲

Fig. 1 Influences of welding parameters on weld bead shape

### 3. 퍼지 전문가 시스템의 설계

#### 3.1 퍼지룰과 근접 추론

2절에서 기술한 각 용접 변수들의 값은 경험적으로 '크다' 또는 '매우 높다'와 같이 일상적으로 쓰는 언어적인 표현으로 애매하게 서술되어 있다. 이와 같이 표현된 변수들은 언어적 변수(Linguistic variable)라 하며 이들은 퍼지 집합의 도입에 의해 비교적 합리적으로 정량화된 형태로 나타낼 수 있다<sup>8)</sup>. 퍼지 집합은 집합의 원소를 소속도와 함께 나타냄으로써 각 원소가 같은 집합에 속해 있어도 달리 평가되도록 한다. 즉 Fig. 2에서 280-380Amp의 전류값은 'high current'의 집합에 속해 있지만 동시에 280-330Amp의 값은 'middle current'의 집합에, 또 330-380Amp의 값은 'very high'의 집합에도 속하며 속하는 정도가 값에 따라 제각기 다르다. 따라서 280-380Amp사이의 값들은 모두 서로 다르게 평가되며 이는 곧 용접 전류가 그 값에 따라 다른 인자에 미치는 영향의 정도가 다름을 의미하는 것으로 실제의 현상과 유사한 매우 합리적인 논리라 할 수 있다. Fig. 3은 비드 형상에 영향을 미치는 각 변수들과 비드 형상을 나타내는 변수들의 크기를 퍼지 집합으로 표현한 그림이다.

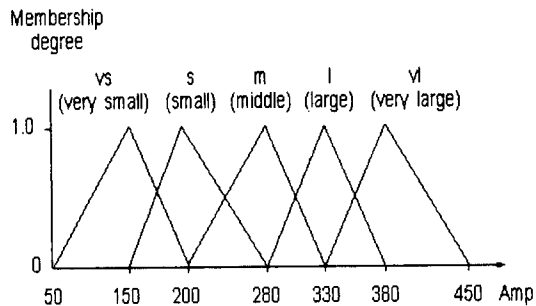


Fig. 2 Evaluation of welding current by fuzzy sets

Fig. 1에서 정성적으로 표현되어 있는 용접 변수와 비드 형상의 상관 관계는 언어적 변수를 사용하여 퍼지룰의 형태로 표현할 수 있다. 물론 인

공지능 분야에서 경험적 지식을 표현하는 대표적인 도구로서 지식을 논리적으로 정리한 후 IF-조건절과 THEN-결론부로 표현한다. 퍼지룰은 IF-조건절과 THEN-결론부에 언어적 변수와 퍼지 집합을 사용한 룰을 뜻한다. Table 1은 Fig. 1의 내용의 일부를 퍼지룰을 사용하여 표현한 예이다. 퍼지룰로 표현된 정성적인 지식은 퍼지룰의 근접 추론에 의해 합리적으로 정량화된 유용한 정보로 변환될 수 있다.

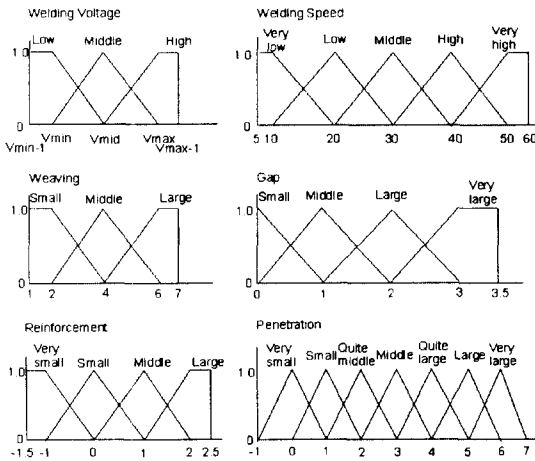


Fig. 3 Evaluation of welding parameters by fuzzy sets

Table 1 Representation of relationship between welding parameters by fuzzy rules

Rule No	IF	THEN
10	Current=middle AND Voltage=middle AND Speed= middle AND Gap=small AND Weaving=small	Penetration=quite small AND Bead width=middle AND Reinforcement= middle
11	Current=middle AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=middle AND Weaving=small	Penetration=middle AND Bead width=small AND Reinforcement= small
12	Current=middle AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=large AND Weaving=small	Penetration=large AND Bead width =very small AND Reinforcement= very small
13	Current=high AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=small AND Weaving=small	Penetration=middle AND Bead width=middle AND Reinforcement= middle
14	Current=high AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=small AND Weaving=small	Penetration=quite high AND Bead width=middle AND Reinforcement= small
15	Current=high AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=large AND Weaving=small	Penetration=large AND Bead width=small AND Reinforcement= very small

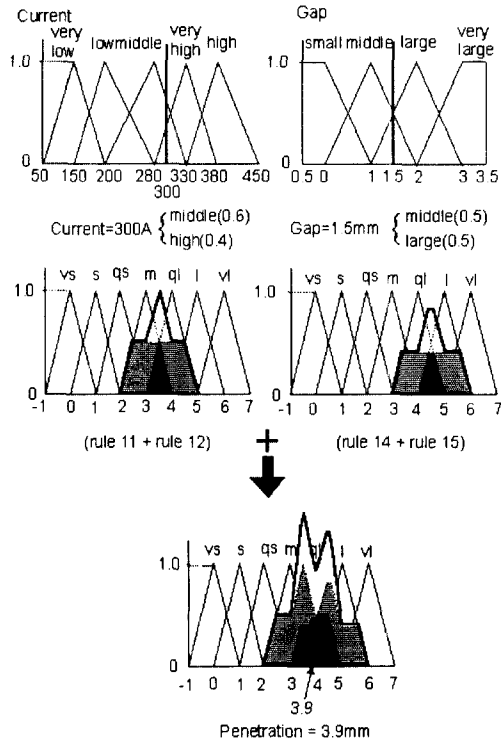


Fig. 4 Approximate reasoning of fuzzy system

Fig. 4는 용접 전류와 갭의 변화만을 고려하여 용입을 추정하는 경우에 대해서 Table 1에 나타난 퍼지룰을 적용하여 수행한 근접 추론에 의해 용입을 구하는 과정을 보여주고 있다. 300A의 용접 전류는 middle과 high의 두 퍼지집합에 속해 있으며 소속정도(Membership degree)는 각각 0.6, 0.4이다. 1.5 mm의 갭은 middle과 large의 퍼지집합에 각각 0.5의 소속정도로 속해 있다. Table 1의 퍼지룰 중 룰 11, 12, 14, 15번이 이 경우에 해당되는 룰이고 IF가정부의 두 변수인 Current와 Gap은 AND로 연결되어 있으므로 룰 11과 12는 Current 0.6과 Gap 0.5의 소속정도 중 두 변수의 소속정도의 공통범위인 0.5의 소속정도로 적용된다고 볼 수 있다. 한편 룰 14와 15는 0.4와 0.5의 소속정도 중 공통범위 0.4의 소속정도를 적용할 수 있다. 이 룰들의 소속정도는 결국 THEN결론부의 Penetration 퍼지집합의 소속정도로 표현되므로 Fig. 4의 중간부분의 그림에서 사

다리꼴로 표시된 부분이 이에 해당한다. 이 물들은 어느 한 가지만 적용되는 것이 아니라 모두 적용되므로 각 물에서 나오는 결론을 합하면 Fig. 4의 마지막 그림에 나타난 도형과 같은 결과가 얻어진다. 이 도형이 바로 근접추론의 결과이며 통상 이 도형을 대표하는 도심(Center of area)의 값으로 표현되어 결국 300 Amp 용접전류, 1.5 mm의 Gap일 때 용입은 3.9 mm라는 합리적인 결론이 얻어진다. 실제로 본 연구에서는 용입, 비드폭 및 덧살 높이를 추정하기 위해 용접 전류, 용접 전압, 용접 속도, 위빙폭, 갭의 5가지 변수를 고려하였으며 적용된 퍼지룰의 수는 600여개였다.

### 3.2 비드 형상 예측 퍼지 전문가 시스템의 구성

본 연구를 통해 개발된 비드 형상 예측 퍼지 전문가 시스템은 Fig. 5와 같이 데이터베이스, 퍼지룰베이스, 근접추론기구, 그래픽 사용자 인터페이스의 4부분으로 이루어져 있다. 데이터베이스는 용접 재료에 의해 결정되는 용접 변수의 상관 관계와 사용범위, Fig. 2와 Fig. 3의 용접 변수의 크기 평가를 위해 사용된 퍼지 집합 정보 등을 수록하고 있고 퍼지룰베이스는 Table 1에 그 일부가 표현된 퍼지룰을 저장하고 있다. 근접추론기구는 데이터베이스와 퍼지룰베이스로부터 결론을 도출하는 부분이며 그래픽 사용자 인터페이스는 사용자의 활용이 용이하도록 대화창, 편리한 입출력 기능 등을 구현하는 부분이다.

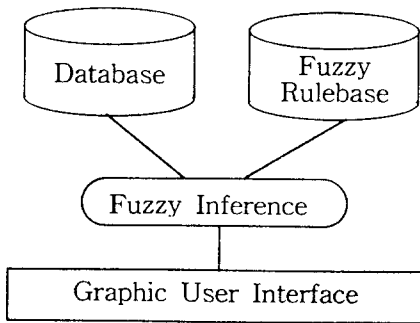


Fig. 5 Structure of fuzzy expert system for estimation of bead shape

## 4. 용접 실험을 통한 시스템의 검증 및 검토

본 연구를 통해 개발된 퍼지 전문가시스템의 유용성을 검증하기 위해 용접 실험을 수행하여 마크로 단면 사진을 찍은 뒤 비드 폭, 덧살 높이, 용입을 측정하고 측정된 값을 퍼지 전문가시스템에 의해 추정된 값과 비교하였다. 본 연구의 용접 실험에서 사용된 시편은 일반 연강재이며 형상은 Fig. 6과 같다. 용접법은 CO<sub>2</sub> 100%의 보호가스를 사용하는 플럭스코어드 와이어 용접법을 적용하였고 직경 1.4 mm의 와이어를 사용하였다. Fig. 7(a)에서 Fig. 7(h)까지의 그림은 용접 실험에 사용된 용접 조건과 마크로 단면 형상, 용입, 비드 폭, 덧살 높이의 값과 퍼지 전문가시스템에 의해 추정된 값을 비교하여 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 비교적 받아들일 수 있는 오차범위 내에서 추정치가 실험치와 일치함을 알 수 있었다. 추정치와 측정치의 차이가 약간 큰 경우도 있으나 이는 용접 현상 자체가 불안정한 불리 현상이어서 같은 조건에서 실험한 경우에도 측정값이 상당한 차이가 있으므로 불가피한 것으로 사료된다.

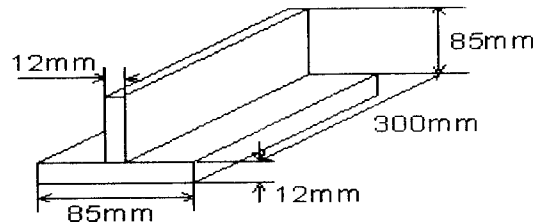
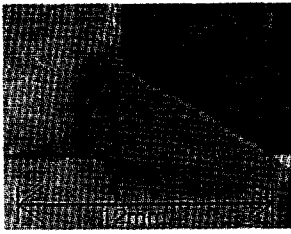


Fig. 6 Specimen for welding experiments

본 연구를 통해서 개발된 용접 품질 예측용 퍼지 전문가시스템은 용접 변수와 비드 형상 사이의 정량적인 상관 관계가 알려져 있지 않음에도 용접 변수가 주어질 때 신뢰성 높은 비드 형상 정보를 제공하는 유용한 도구임이 실험 결과와의 비교를 통해서 입증되었다. 본 퍼지 전문가시스템



Current=170Amp  
Voltage=21.5Volt  
Speed=35cm/min  
Weaving=3mm  
Gap=0mm

	Measured Value(mm)	Estimated Value(mm)
Penetration	1.0	0.8
Bead Width	9.1	8.8
Reinforcement	0.4	0.5

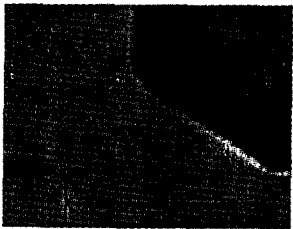
(a) Experiment 1



Current=325Amp  
Voltage=32Volt  
Speed=45cm/min  
Weaving=4mm  
Gap=0mm

	Measured Value(mm)	Estimated Value(mm)
Penetration	3.5	4.0
Bead Width	12.9	13.1
Reinforcement	0.8	1.2

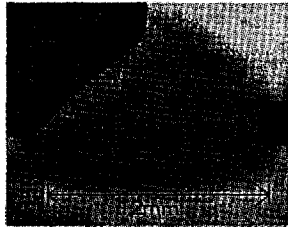
(b) Experiment 2



Current=235Amp  
Voltage=24.5Volt  
Speed=40cm/min  
Weaving=3mm  
Gap=1.2mm

	Measured Value(mm)	Estimated Value(mm)
Penetration	2.9	2.6
Bead Width	9.4	9.6
Reinforcement	0.5	0.6

(c) Experiment 3



Current=330Amp  
Voltage=31.5Volt  
Speed=48cm/min  
Weaving=4mm  
Gap=1.2mm

	Measured Value(mm)	Estimated Value(mm)
Penetration	6.6	6.0
Bead Width	10.1	10.8
Reinforcement	0.3	0.5

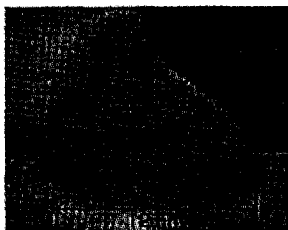
(d) Experiment 4



Current=235Amp  
Voltage=25Volt  
Speed=40cm/min  
Weaving=3mm  
Gap=2.0mm

	Measured Value(mm)	Estimated Value(mm)
Penetration	2.8	3.1
Bead Width	9.1	9.0
Reinforcement	0.4	0.3

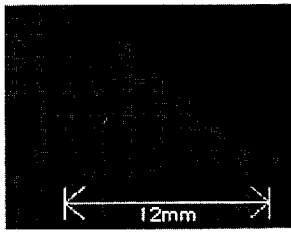
(e) Experiment 5



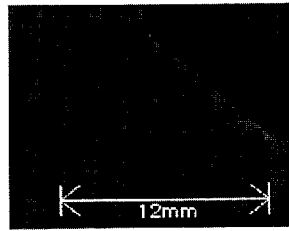
Current=235Amp  
Voltage=24.5Volt  
Speed=40cm/min  
Weaving=3mm  
Gap=1.2mm

	Measured Value(mm)	Estimated Value(mm)
Penetration	6.0	6.6
Bead Width	11.0	10.3
Reinforcement	0.8	0.4

(f) Experiment 6



Current=238Amp  
Voltage=30Volt  
Speed=35Cm/min  
Weaving=4mm  
Gap=3.0mm



Current=345Amp  
Voltage=32Volt  
Speed=40Cm/min  
Weaving=4mm  
Gap=3.0mm

	Measured Value(mm)	Estimated Value(mm)
Penetration	5.9	5.3
Bead Width	11.2	10.8
Reinforcement	0.4	0.3

(g) Experiment 7

	Measured Value(mm)	Estimated Value(mm)
Penetration	6.7	7.2
Bead Width	11.3	11.0
Reinforcement	0	0.1

(f) Experiment 8

Fig. 7 Comparison of experimental data and estimated value of fuzzy expert system

의 핵심은 퍼지룰의 작성시 요구되는 각 용접 변수의 크기에 대해 퍼지 집합으로 표시할 때와 용접 변수 사이의 상관 관계를 IF조건절과 THEN결론절로 나타낼 때 실제의 경험적 지식을 얼마나 정확하게 표현하고 있는가 하는 것에 있으며 이의 정확성이 퍼지 전문가시스템이 도출하는 결과의 신뢰성을 좌우한다. 따라서 경험이 풍부하고 관련 분야의 지식이 풍부한 전문가의 지식을 토대로 하여 퍼지룰이 작성되어야 하며 이 퍼지룰들은 해당 분야의 전문가에 의해 합리적으로 작성되었는지에 대한 검증이 뒤따라야 한다. 본 연구를 통해 구축된 퍼지 전문가시스템은 1.4 mm 플렉스 코어드 와이어를 사용하는 CO<sub>2</sub> 필렛용접을 대상으로 하였으며 적용 자세는 수평필렛 자세였다. 만약 다른 자세로 용접하거나 맞대기 이음부, 또는 다른 직경의 와이어를 사용할 경우에 대해서는 각 용접 변수의 크기에 대한 퍼지 집합에 의한 평가와 퍼지룰이 달라지므로 이들을 본 시스템에 추가시키면 이 경우에 대해서도 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 용접 품질은 용접 결함, 비드 형상 및 스패터의 발생량에 의해 결정되지만 일반적으로 정상적인 비드 형상에서 용접 결함이나 스패터가 다량 발생하는 경우는 드물기 때문에 본 시스템에서는 비드 형상을 용접 품질의 평가 기준으로 삼았다. 비드 형상은 용입, 비드폭, 덧살 높이에 의해 표현되지만 비드의 단면 형상이 주어지면 비드 형상에 의

한 보다 정밀한 품질 평가가 가능할 것이므로 추후로 비드 단면 형상을 제시할 수 있는 퍼지 전문가 시스템의 연구를 계속할 예정이다.

## 5. 결론

본 연구를 통해서 비드 형상을 예측할 수 있는 퍼지 전문가 시스템을 개발하였으며 개발 과정을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 경험적으로 표현되는 용접 변수 및 비드 형상의 크기는 퍼지 집합에 의해 합리적으로 표현할 수 있다.
- 정성적으로 기술되는 용접 변수와 용접 품질의 상관 관계는 퍼지룰에 의해 적절히 기술할 수 있다.
- 퍼지 전문가 시스템의 근접 추론 기능에 의해 용접 변수가 주어질 때 비드 형상을 예측할 수 있었으며 용접 실험을 통해서 그 신뢰성을 확인할 수 있었다.

## 6. 참고문헌

- 1) J. Burmeister, "Fuzzy-Logic - nicht nur ein Modetrend", Schweißen und Schneiden Vol. 43, No. 9, pp.533-538, 1991

- 2) S. Murakami, F. Takemoto, "Weld-line tracking control of arc welding robot using fuzzy logic controller", *Fuzzy Sets and Systems* 32, pp.221-237, 1989
- 3) AWS, *Welding Handbook*, 8th Edition, Vol. 2, pp.43-71
- 4) J. Y. Park, "Fuzzy-Logic-basiertes Beratungssystem zur Prozessoptimierung und Fehlerdiagnose beim MAG-Schweißen", PhD Thesis of RWTH Aachen, 1993
- 5) I. Masumoto, T. Shinoda, T. Natsume, "Determination of Welding Parameters by Computer", *Proc. of 2nd International Symposium of the Japan Welding Society*, Osaka, 25-27. Aug., 1975
- 6) A. Kuhne, "Ein Beitrag zur Steuerung und Regelung des automatisierten Schutzgas-schweissprozesses und zur Anpassung der Schweissparameter an die jeweilige Fugengeometrie", PhD Thesis of RWTH Aachen, 1985
- 7) W. A. Sudnik, "Untersuchung von Schmelzschweisstechnologien anhand physikalisch mathematischer Modelle", *Schweißen und Schneiden* Vol. 43, No. 10, pp. 588-590, 1991
- 8) A. Kandal, *Fuzzy Expert System*, CRC Press, 1992