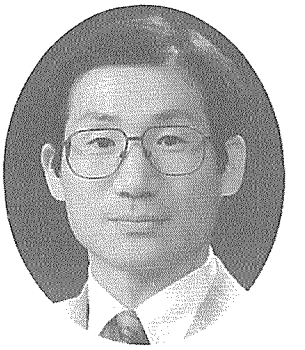
논단 II

퍼지 알고리즘을 이용한 ARC 용접기의 출력제어



국립천안공업대학 용접기술과
공학박사 박 상 흡

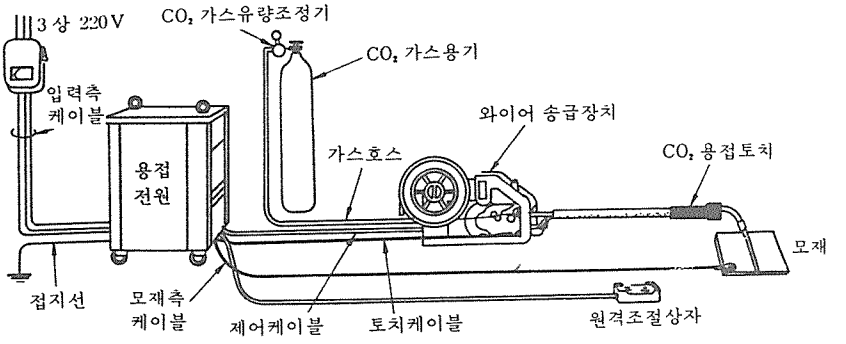
1. 개 요

용접은 각종 소형 부품의 접합뿐만 아니라 전자기기, 자동차, 건축, 조선등 모든 산업분야에서 필요한 가공기술이다. 그러나 최근 일손의 부족에 의한 노동환경의 변화로 용접기에 대한 소비자의 요구가 다양화되고 있다.

일손부족을 용접 자동화 및 용접 로봇화, 숙련인력의 부족을 고성능화된 용접기로 보상하도록 요구하고 있다. 이러한 사용자의 요구에 부응하기 위하여 용접기에 인버터 제어방식이 도입되기 시작하였으며, 현재에 있어서는 숙련된 기능인의 기능을 이용한 퍼지제어 알고리즘이 적용되기 시작하였다.

1.1 인버터 CO_2/MAG

CO_2/MAG 용접법은 다른 아크 용접법에 비하여 생산성 및 경제적인 면에서 우수하므로 산업계에서 널리 사용되고 있다.

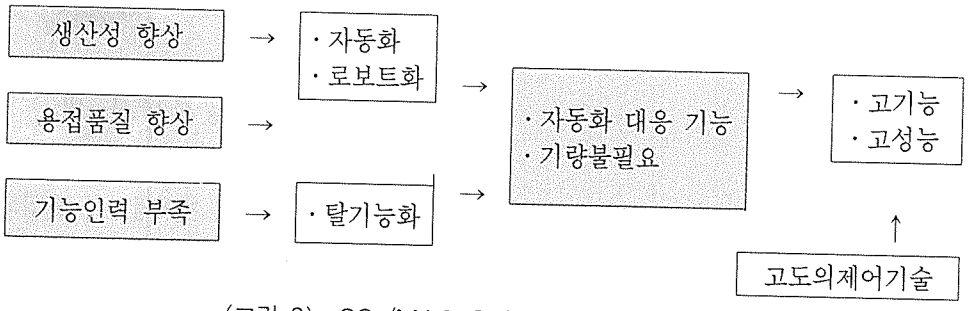


(그림 1) CO_2/MAG 용접기

1.2 용접법의 원리

용접와이어가 와이어 송급장치에 의하여 용접토치의 헤드부로 송급되고 용접토치의 헤드에 있는 컨닥터팁에 의하여 전원과 연결되며 모재와의사이에서 아크가 발생하여 이 아크열에 의하여 용접모재 및 용접와이어를 용융시켜 금속을 접합시키는 방식이다.

1.3 CO_2/MAG 용접기의 기술개발 동향

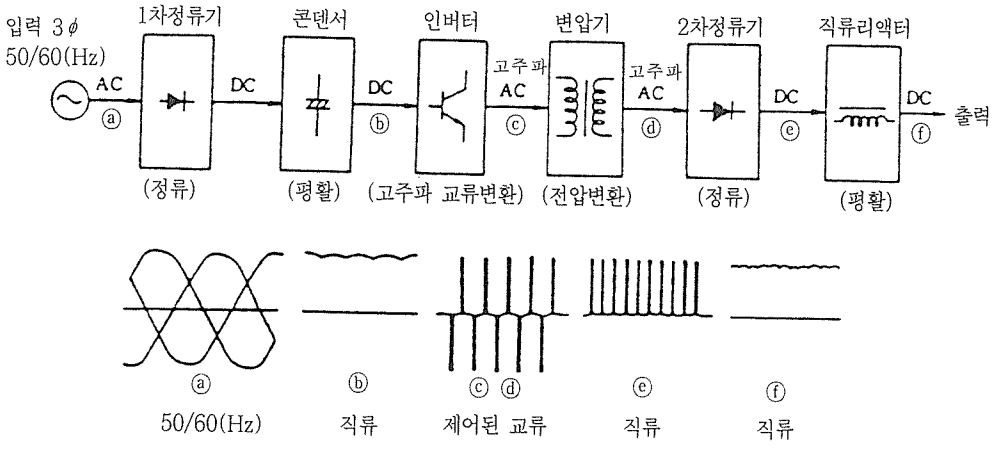


(그림 2) CO_2/MAG 용접기의 기술 동향 추이

근래에 와서는 용접분야에 조사하는 인원은 감소함과 동시에 여성의 비율이 증가하는 경향이므로 용접기에 요구되는 기술의 전개 방향은 자동화 및 로봇화에 적합한 기능을 요구하게 된다. 또한 여성인력의 증가는 용접기능인력의 부족을 뜻하므로 용접기는 이러한 기능인력의 기능을 포함하도록 요구되고 있다.

2. 인버터 제어 방식의 용접기

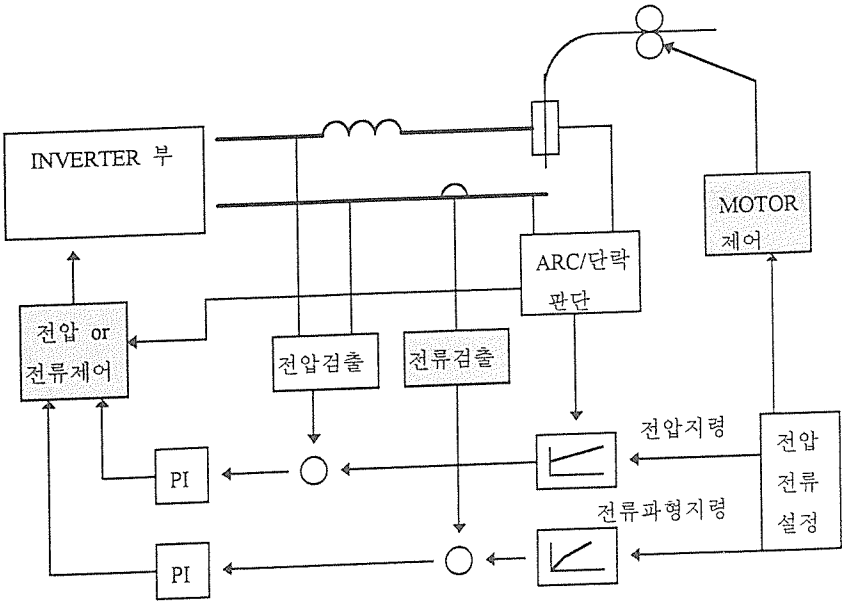
인버터 제어 방식 용접기의 구성은 그림 3과 같이 상용 주파수의 교류를 직류로 변환하고 고속 스위칭



(그림 3) 인버터 방식의 회로 구성과 출력파형

소자를 사용한 인버터에 의하여 10-50kHz의 고주파수로 변환된다. 고주파 출력은 다시 용접변압기에 의하여 용접에 적합한 전압으로 강압되어 정류되고 이를 직류리액터를 통하여 직류전류를 평활시켜 아크부하에 적절한 직류를 공급하는 방식이다.

2.1 인버터 제어기 구성



(그림 4) 인버터 제어기 구성도

2.2 인버터 적용효과

2.2.1 저스패터 용접의 실현

CO_2/MAG 용접은 용접 현상론적으로 보면 어느정도의 스패터 발생은 피할 수 없다. 이러한 스패터 발생이 용접물에 부착되어 용접후 공정증가로 시간 손실을 초래한다.

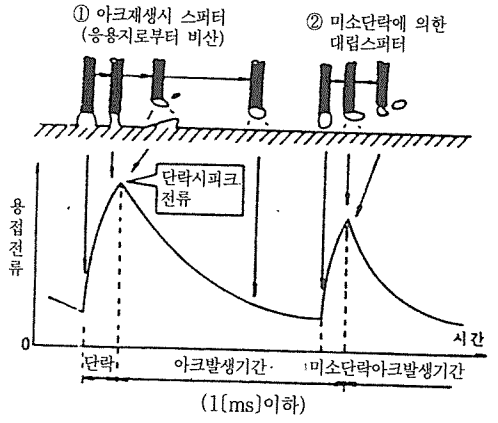
그림5는 싸이리스터제어방식 CO_2/MAG 용접기의 용접전류 파형과 스패터 발생 상황을 나타낸 것이다.

인버터 방식의 CO_2/MAG 용접기는 스위칭 소자를 사용하여 전압 및 전류를 용접에 적합한 형태로 직접 제어함으로서 스패터의 발생을 감소 시킬수 있다.

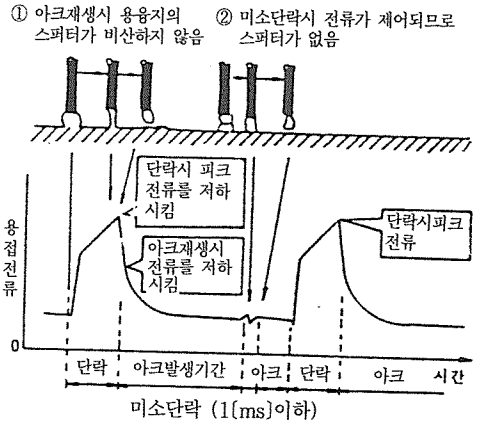
단락기간 또는 아크 발생중에 용접전류를 직접 제어 회로에 의해 용접에 적절하도록 제어하고 아크 재생시 용융지로부터 스패터가 비산되지 않도록 단락시의 최대 전류를 저감하고 미소 단락시(1ms이내) 발생하는 대립의 스패터를 방지하기 위해 순시단락 전류를 시간적으로 제어한다.

2.2.2 용접전원의 소형 경량화

용접기에는 용접변압기가 사용되고 있는데, 이 변압기를 구성하고 있는 철심의 단면적 S는 다음



(그림 5) 싸이리스터 제어 방식

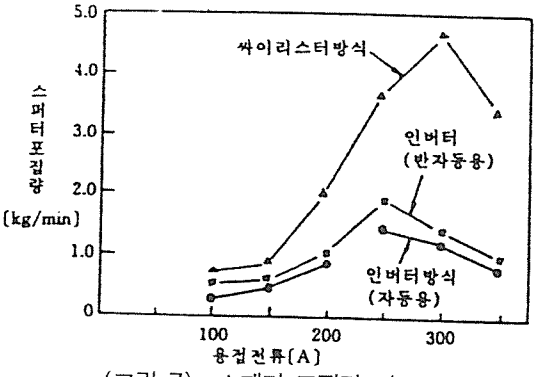


(그림 6) 인버터 제어 방식

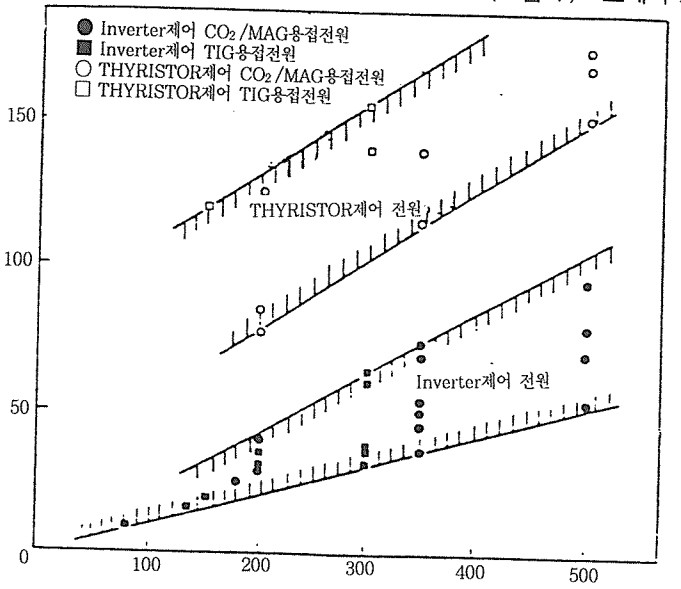
식과 같이 주어진다.

$$S = E1/(4.44fNBm)$$

E1 : 변압기 입력 전압
f : 입력 주파수
N : 권수
Bm : 자속밀도



(그림 7) 스패터 포집량 비교

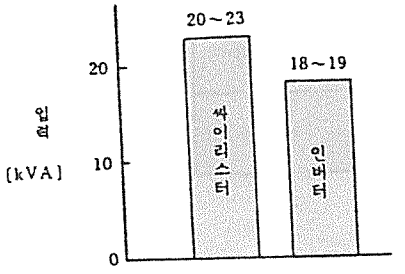


(그림 8) 각종 용접 전원의 중량 비교

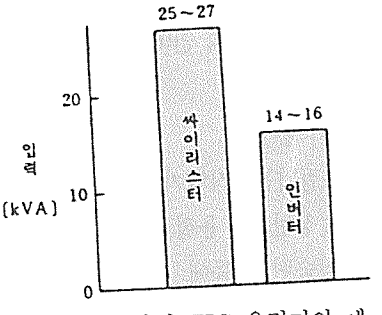
2.2.3 전원 설비 용량의 감소

기존의 싸이리스터 제어 방식은 출력 전압의 조정 수단으로서 싸이리스터의 점호위상각을 제어함으로 전류 전압에 위상차가 발생하여 역율이 0.4~0.8 정도이므로 유효전력(KW)에 대한 입력 (KVA)이 커지게 된다.

이에 비하여 인버터 제어방식은 교류를 일단 직류로 변환한후 수위칭에 의하여 PWM제어를 함으로 입력 역율은 0.9이상을 유지함으로 입력(KVA)용량이 적어진다.



(a) 350〔A〕 CO_2 · MAG 용접기의 예



(b) 300〔A〕 TIG 용접기의 예

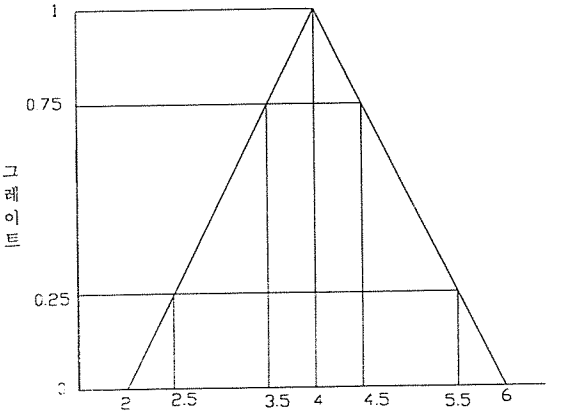
(그림 9) 입력(KVA) 비교

3. 인버터 퍼지제어 용접기

3.1 퍼지제어 이론

퍼지이론은 1965년에 제창되어 1974년에 처음으로 제어에 응용되었다. 1980년대에 처음으로 실용화가 되어 1990년대에 들어서서 가전제품에 채택되고 나서 커다란 화제가 되어 여러 분야의 제품에 응용되고 있다.

우리들이 평소에 사용하는 말가운데는 "시속 50km"라던가 "수온50도"와 같은 수치표현 보다는 "조금 빠르다", "미지근하다"와 같이 윤곽이 명료하지 않은 말이 많은 편이다. 이와같이 윤곽이 명료하지 않은 정성적인 말을 정량적으로 즉 수량적으로 표현하여 처리하고자 하는 것이 퍼지이론의 기본 사고방식이다.



(그림 10) 적정 아크 길이의 멤버쉽 함수

적 정 아 크 길 이	
아크길이(mm)	그레이드
2	0
2.5	0.25
3.5	0.75
4	1
4.5	0.75
5.5	0.25
6	0

〔진 리 치 표〕

예를들면 피복아크용접을 초심자에 지도하는 경우 중요한 요소의 하나인 아크 길이는 피복아크용접봉의 심선의 직경과 거의 같게 유지하여 운봉하도록 일반적으로 지시하고 있다. 용접봉의 심선의 직경이 4mm인 경우 적정한 아크 길이는 4mm가 된다.

그러나 그렇다고 해서 3.5mm나 4.5mm 전후의 아크 길이가 전혀 적정하지 않다고 잘라 말할 수 없다.

다만 어쩐지 이상적인 적정 아크 길이의 정도가 적어진 감이 든다.

그러나 아크 길이가 2mm이하나 6mm이상이 되면 그것은 확실하게 "아크 길이가 짧다" 혹은 "길다"라고 말할 수 있다.

이와같이 딱 떨어짐없이 서서히 적정 아크 길이가 된다던가 서서히 적정 아크 길이로 되지 않는 감을 그래프로 표현하면 그림 10과 같다. 아크길이가 4mm인 곳이 산의 정상모양으로 되어 있는데 이산의 모양을 멤버쉽 함수라고 한다. 또한 정상의 높이를 1로 했을때에 지표로부터 직선까지의 높이는 "그래이드"라고 부르며 우리들이 느끼는 감의 정도로서 정의되어 있다.

3.2 퍼지제어의 특징

3.2.1 논리적 제어

if-then형태를 사용하여 제어 알고리즘을 자유롭게 표현이 가능하다.

3.2.2 병렬(분산)제어

일반적 제어정책들이 일련의 제어규칙들에 의하여 분산되어 있음을 의미하며 이것은 서로 다른 논리적 구조를 갖는 제어가 공존하는 것이 가능하다.

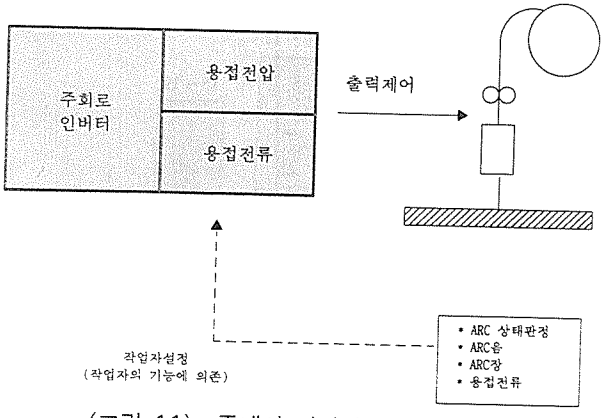
3.2.3 언어적 제어

제어 규칙을 일상 언어를 통하여 구현하는 것이 가능하다.

3.3 종래의 인버터제어 와 퍼지제어 용접기와의 비교

3.3.1 종래의 인버터제어 용접기

종래의 인버터 제어 용접기는 작업자가 용접을 하면서 작업자 스스로 아크 상태를 판정하여 이에 적절한 용접 전압 및 전류를 가변시켜 용접을 시행한다.



(그림 11) 종래의 인버터제어 용접기

3.3.2 퍼지제어 용접기

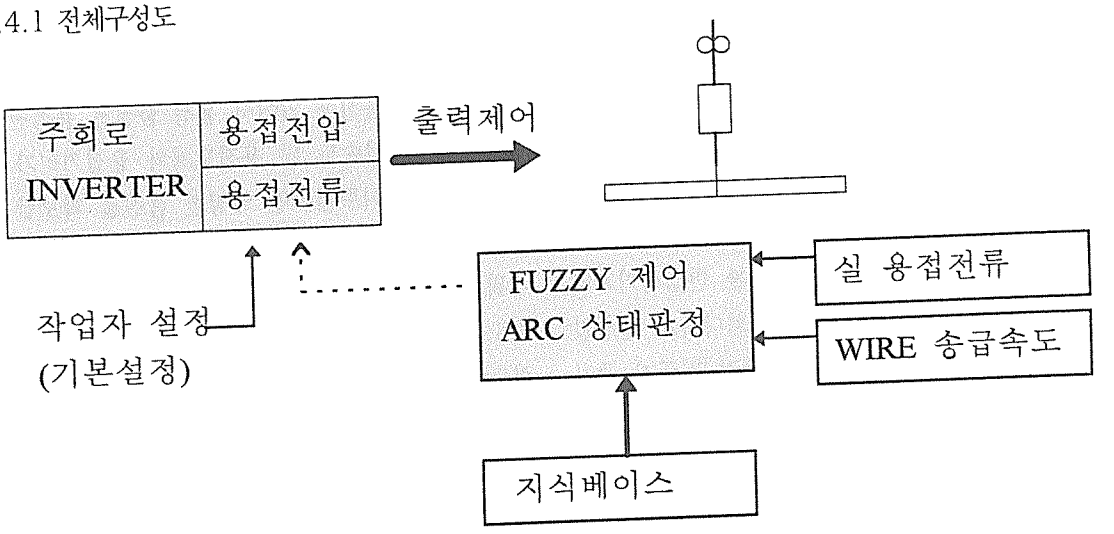
퍼지제어 용접기는 작업자가 기준용접전압 및 용접 전류를 설정한 후 용접을 할 때 모재의 형상 및 작업자의 비숙련도 등에 의하여 발생되는 아크 상태를 숙련자의 경험에 바탕을 둔 퍼지제어기를 이용하여 일정한 아크출력이 되도록 용접전압 및 전류를 제어하는 방식이다.(그림12참조)

3.4 퍼지제어 인버터 용접기

퍼지제어 인버터 용접기는 용접 기능인의 기능을

정량화시켜 이를 바탕으로 제어를 함으로써 용접 품질을 확보할 수 있다.
작업자의 기능에 크게 의존하지 않고 일정한 용접

3.4.1 전체구성도



(그림 12) 퍼지제어 용접기 전체 구성도

3.4.2 ARC 용접기에 퍼지제어 적용

퍼지제어 인버터 용접기는 작업자가 기준 용접 전압 및 전류를 설정한 후 용접을 할 때 모재의 형상 및 작업자의 비숙련도 등에 의하여 발생되는 ARC 출력이 되도록 용접전압 및 전류를 제어하는 방식이다.

3.4.3 퍼지제어의 효과

- 작업자의 숙련도와 관련없이 일정한 용접품질을 확보할 수 있다.
- 모재의 형상에 의하여 토치와 모재간의 거리를 일정하게 확보할 수 없는 경우에도 균일한 용접 품질의 확보가 가능하다.
- 용접자동화가 용이하다.

4. 퍼지 제어기 설계

4.1 퍼지추론요소

용접 작업자가 용접을 하는 형태를 관찰하여 이를 기반으로 작업자의 행태가 용접에 영향을 미치는 가를 분석 이를 퍼지제어의 제어대상으로 선정한다.

4.1.1 전극과 모재간의 거리

용접을 할 때 용접 모재와 용접 전극간의 거리는 작업자의 숙련도 및 용접 모재의 형상에 따라 항상 변동하며, 이때 나타나는 현상을 관측하면 다음과 같다.

◈ 용접모재와 전극간의 거리가 증가하면 다음과 같은 현상이 발생한다.

- 용접전류가 감소한다.
- 용입이 감소한다.
- 아크길이가 길고 커진다.
- 아크가 불안정해진다.

4.1.2 용접전류

숙련된 작업자가 용접 전류를 용접상황에 따라 변경시키는 상황을 보면 용접비드를 변경시키거나 용입을 변경시킬 때 및 스패터가 과다하게 발생할 때 용접전류를 변경하는데 이때 용접 전류가 증가할 때 나타나는 현상은 다음과 같다.

- 비드폭이 넓어진다.
- 비드높이가 높아진다.
- 용입이 깊게 확보된다.
- 스패터 발생이 적어진다.

4.1.3 용접 전압 - 증가시

용접 전압은 비드폭을 변경할 때 용입을 변경할 때 및 스패터 발생에 따라 작업자가 용접을 하면서 적절히 변경시킨다.

◈ 용접전압이 증가하면 나타나는 현상은 다음과 같다.

- 비드폭이 넓어진다.
- 비드높이가 낮아진다.
- 용입이 낮아진다.
- 스패터 입자가 커진다.

4.1.4 용접속도

용접속도는 작업자의 숙련도에 따라 크게 변동되며 자동용접에 있어서는 생산성에 중대한 영향을 미치는 요소로 용접속도가 증가될 때 나타나는 현상은 다음과 같다.

- 비드폭이 좁아진다.
- 비드높이가 낮아진다.
- 용입이 낮아진다.
- 언더컷이 발생하기가 쉽다.

위와 같이 용접에 있어서 용접 품질은 용접전압, 용접전류, 용접속도 및 용접모재와 용접거리가 적절히 조화를 이루어야만 일정한 품질을 확보할 수 있다.

위와같은 용접에 필요한 4가지 요소중에서 용접속도 및 용접모재와 전극과의 거리는 작업자의 숙련도에 따라 크게 변화하므로 일정 용접전류 및 용접전압 상황에서도 용접의 품질은 작업자에 따라 커다란 차이가 발생한다.

퍼지추론은 작업자의 숙련도에 따라 변동되는 용접속도 및 용접모재와 전극간의 거리변동에 따른 용접품질의 불균일을 숙련된 작업자가 조정하는 용접전압 및 용접전류를 정량화하여 이를 제어의 요소로 삼는다.

4.2 퍼지제어

4.2.1 선행조건에 사용되는 입력정보 선정

4.1의 퍼지 추론에 의하며 용접전류 및 용접전압이 제어의 선행조건으로 추론되었기 때문에 제어기의 입력요소로서 실용접 전류를 선정하며 퍼지제어기의 출력으로서는 용접전압, 용접전류 및 송급속도의 기준치를 선정한다.

(a) 관측치 입력 — 용접전류지령, 용접전류, 송급속도, 용접전압 지령

(b) 선정된 입력 정보 — 용접전류오차, 용접전류오차 변화분

4.2.2 입력의 퍼지 분할

선정된 입력 정보를 숙련된 경험자의 경험을 바탕으로 퍼지분할을 한다.

(a) 용접전류오차

N : 용접전류가 큰 영역

Z : 용접전류가 적절한 영역

P : 용접전류가 적은 영역

(b) 용접전류오차 변화분

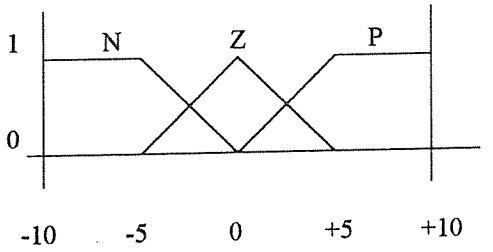
N : 용접전류 Err가 감소하는 영역

Z : 용접전류 Err가 변동없는 영역

P : 용접전류 Err가 증가하는 영역

(c) 입력 퍼지집합

퍼지분할된 입력에 해당하는 멤버쉽 함수를 정의하고, Z영역이 1일 때 느끼는 감이 제일 좋게 입력을 정량화 한다.



(그림 13) 퍼지입력 멉버쉽 함수

(용접전류 오차 및 용접전류 오차 변화값)

4.2.3 퍼지추론(의사결정)부

인간의 언어로서 퍼지법칙을 설정

• 법칙 1 : if(용접전류가 적다 and 용접전류의 오차가 증가하고 있다) then(용접wire 송급속도를 유지시킨다 and 용접전압을 유지시킨다)

• 법칙 9 : if(용접전류가 크다 and 용접전류의 오차가 감소하고 있다) then(용접wire 송급속도를 유지시킨다 and 용접전압을 유지시킨다)

〈표 1〉 용접 wire 송급속도 및 용접전압 결정 규칙

오차 \ 오차변화	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

N : 모터 송급속도 감소, 용접전압 감소 영역

Z : 모터 송급속도 유지, 용접 전압유지 영역

P : 모터 송급속도 증가, 용접전압 증가 영역

4.2.4 퍼지 연산

a. Mamdani's

* Min operation

fuzzy 추론된 결과에 해당하는 값은 적은값을 취한다.

ifUa(x)〈Ub(x) then out(x) = Ub(x)

4.2.5 비퍼지화부(무게 중심법 사용)

퍼지추론, 퍼지법칙 및 퍼지연산에 의하여 계산된 퍼지출력값을 실제 제어기에 적합한 값으로 변화시켜 주는 영역

(a) 입력 - 속도 변화분 및 용접전압 변화분 소속도

속도 변화분 및 용접전압 변화분이 소속도를 가지고 존재하는 영역

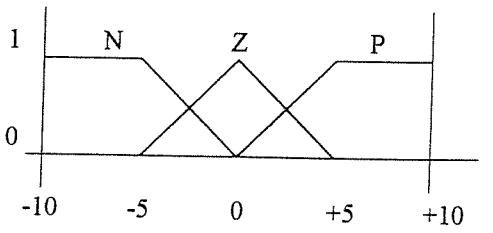
(b) 출력 - 실제 송급모터 속도변화분 및 용접전압 변화분

$$Uo = \frac{U(Uj)*Uj}{U(Uj)}$$

합성된 출력 퍼지 집합의 무게중심을 구하여 그 해당하는 값을 제어 입력으로 사용

(c) 출력퍼지집합

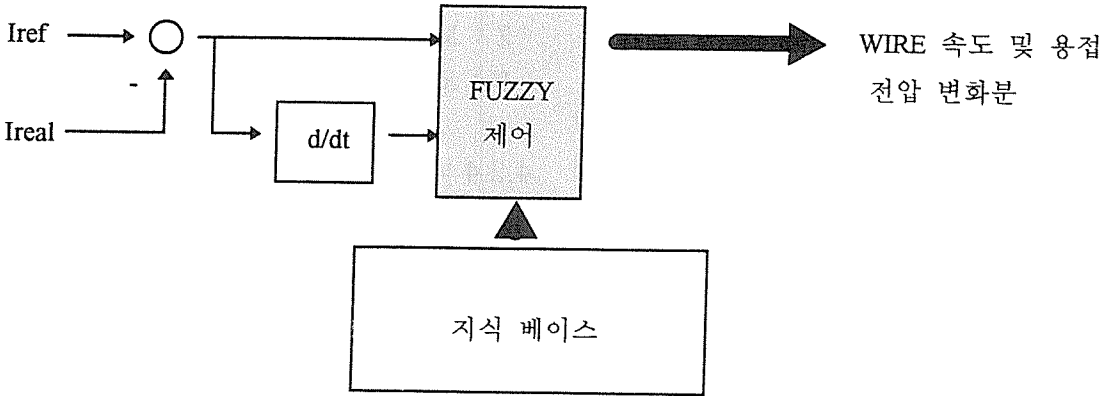
wire 송급 속도 변화분 및 용접전압 변화분이 소속되어 있는 영역 및 소속도



(그림 14) 퍼지출력 멤버쉽함수

(wire 송급 속도변화분, 용접전압 변화분)

4.3 제어기 구성도



(그림 15) 퍼지제어기 구성도

5. 퍼지적용 결과

5.1 퍼지 시험결과

시험조건 Sampling = 10 mSEC

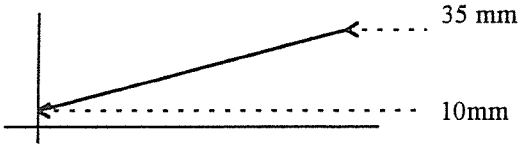
퍼지상수 = 4A→1

Limit = 8000 : 최대속도의 35%

최대전압의 10%

용접속도 = 400 mm/분

모재와 토치사이의 이격거리



경사면 용접에 있어서 퍼지를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 용접을 할 때 실제 흐르는 용접 전류 및 용접 wire 송급속도 파형

5.2 퍼지 적용 효과

5.2.1 아크 추종성 향상

손떨림에 의하여 아크가 변화되는 것을 보상하여 아크 안정성이 향상된다.

5.2.2 비드외관 개선

전극과 모재간의 거리가 변동되어도 일정한 용접 전류가 흐르므로 비드의 폭 및 높이가 용접 모재의 형상이 변화하여도 일정하게 유지되므로 용접자동화에 쉽게 사용될 수 있다.

5.2.3 용접품질의 균일화

전극과 모재사이에 거리 변동을 자동적으로 보상함으로 용접 숙련도에 따라 용접품질의 격차를 해소할 수 있어 용접 기능인력 부족을 대처 할 수 있다.

6. 결 론

이 글에서는 인버터를 이용한 용접기의 출력 제어 기술과 그 효과 및 최근에 개발한 퍼지제어 인버터 용접기에 대하여 기술하였다.

인버터로 제어되고 있는 용접기는 앞서 살펴본 바와 같이 우수한 용접품질, 소형경량화, 성력화의 장점을 가지고 있어 산업전반의 용접분야에 폭넓게 적용되고 있다. 그러나 숙련된 용접 작업자의 감소 및 용접 자동화에 따라 향후 용접기에 요구되는 최대 과제는 숙련된 용접 작업자의 감소 및 용접 자동화에 따라 향후 용접기에 요구되는 최대 과제는 숙련된 작업자의 경험이나 기능에 의존해 온 용접품질을 용접기의 자체 기능에 의하여 보상되도록 하는 것이다.

이러한 인간의 기능을 제어에 적용하기 위하여 인간의 미세한 감상을 제어에 이용하는 퍼지제어 알고리즘을 ARC 용접기에 적용함으로서 비숙련자 또는 자동화에 적합한 탈 기능화한 용접기가 가능함이 실험결과에 의하여 입증되었다.

향후 인버터 제어 용접기는 고속연산이 가능한 DSP를 사용하여 보다 많은 정보를 동시에 처리함으로서 숙련된 작업자 기능 이상의 제품이 가능할 것이다.