creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

工學碩士 學位論文

소모성 전극 아크 용접에서 용입의 산포와 각변형을 고려한 최적 필릿 용접 공정의 개발

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

*2007*年 *2*月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

尹 承 鍾

工學碩士 學位論文

소모성 전극 아크 용접에서 용입의 산포와 각변형을 고려한 최적 필릿 용접 공정의 개발

指導敎授 趙 相 明

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2007年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

尹 承 鍾

尹承鍾의 工學碩士 學位論文으로 認准함

*2007*年 *2*月

주　심 工學博士　金　雨　烈 (印)

위　원 工學博士　徐　源　贊 (印)

위　원 工學博士　趙　相　明 (印)

목 차

Abstract ---------- 1

제 *1* 장 서 론 ---------- 2

1.1 연구배경 및 필요성 ---------- 2

1.2 연구목적 및 개요 ---------- 3

제 *2* 장 이론적 배경 ---------- 4

2.1 소모성 전극 아크 용접의 정의 ---------- 4

*2.1.1 GMAW*의 원리 및 분류 ---------- 5

*2.1.2 FCAW*의 원리 ---------- 6

2.1.3 플럭스 코어드 및 솔리드 와이어의 와이어 송급속도 비교 ---------- 7

2.1.4 플럭스 코어드 및 솔리드 와이어의 단면 형상에 따른 와이어 저항발열 비교 8

2.2 각변형*(Angular distortion)*의 정의 ---------- 10

2.3 용융효율*(Melting efficiency)*의 정의 ---------- 11

*2.4 CTWD*와 와이어 스틱아웃 길이의 정의 ---------- 13

2.5 평균용입의 정의 ---------- 14

제 *3* 장 플럭스 코어드 및 솔리드 와이어의 용착효율 비교 실험 ---------- 16

3.1 서언 ---------- 16

3.2 실험 재료 및 실험 방법 ---------- 17

3.2.1 실험 재료 ---------- 17

3.2.2 실험 방법 ---------- 18

3.3 실험 결과 및 고찰 ---------- 19

3.4 결언 ---------- 21

제 4 장 필릿 용접부에서 용입과 각변형에 미치는 공정 파라메타의 영향 22
4.1 서언 ---------- 22
4.2 실험 재료 및 실험 방법 ---------- 23
4.2.1 실험 재료 ---------- 23
4.2.2 실험 방법 ---------- 24
4.3 실험 결과 및 고찰 ---------- 26
4.3.1 플럭스 코어드 및 솔리드 와이어에 대한 파형 및 단면 마크로 ---------- 26
4.3.2 각변형과 평균용입 D_P에 미치는 CTWD의 영향 ---------- 27
4.3.3 각변형과 평균용입 D_P에 미치는 용접속도의 영향 ---------- 30
4.3.4 각변형과 평균용입 D_P에 미치는 아크길이의 영향 ---------- 33
4.4 결언 ---------- 36

제 5 장 반응 표면 분석법을 이용한 최적 필릿 용접 공정 개발 ---------- 37
5.1 서언 ---------- 37
5.2 실험 재료 및 실험 방법 ---------- 38
5.2.1 실험 재료 ---------- 38
5.2.2 실험 방법 ---------- 39
5.3 실험 결과 및 고찰 ---------- 40
5.3.1 평균용입 D_P와 각변형에 미치는 공정 파라메타의 영향 ---------- 40
5.3.2 미니탭을 이용한 최적 공정조건 구현 ---------- 44
5.3.3 최적 필릿 용접 공정조건에서의 평균용입 D_P와 각변형 ---------- 45
5.4 결언 ---------- 47

제 6 장 결론 ---------- 48
참고문헌 ---------- 49
감사의 글 ---------- 50

Development of The Optimum Fillet Welding Process Considering Distribution of Penetration and Angular Distortion in Consumable Electrode Arc Welding

Seung-jong, Yun

Major of Materials Processing Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The several problems from the deformation generated in welding structure, such as requirements for the supplementary reformation work and the incidental expenses, occurred in the field. Therefore, many researches have been doing to solve this deformation.

This research aims at the development of the optimum fillet welding process in the view of the distribution of penetration and angular distortion with regard to fillet that are designed to have constant leg length by using flux cored wire and solid wire.

For the aims, there's a test that gave varieties to CTWD, the welding speed, and the arc length, and analyzed current, voltage, and apparent heat input and section area of weld metal as well.

The optimum process condition using flux cored wire is achieved when CTWD and Set voltage are 31mm and 31.7V at advancing angle 10 degree.

Key Words : Distribution of penetration, Average penetration, Angular distortion, CTWD, Arc length, Welding speed, Progressive angle

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

아크 용접 공정에서는 빠른 입열과 냉각 때문에 그 모재는 모든 방향에서 불규칙한 팽창과 수축을 받게 되고, 이것은 모재의 다른 방향에서의 변형을 이끌게 된다. 이러한 용접 구조물에서 발생하는 변형으로 인해 현장에서는 교정 작업의 추가공수가 요구되고 그로 인한 비용 또한 상당한 실정에 있으며, 이러한 변형을 해결하기 위하여 많은 연구자들이 연구를 진행하고 있다[1-3].

V. VEL MURUGAN의 경우 구조용 강판 GMAW의 각변형에 미치는 공정인자의 영향에 대해서 연구를 하였고, 패스 수, 와이어 송급속도, 패스 사이의 시간의 변화에 대한 각변형의 영향을 밝혔지만, 용입에 미치는 영향을 검토하지 않았다[4].

박정웅의 경우 용접 각변형에 미치는 구속도의 영향에 대해 연구하였는데, 각변형의 영향에 대해 필릿 용접부와 맞대기 용접부를 비교함으로써 각변형을 예상하였다. 하지만, 현장에서 바로 적용할 수 있는 공정의 개발에 대한 연구가 진행되지는 못했다[5].

언급된 바와 같이 현재까지는 용접변형 방지에 관한 연구가 지속적으로 진행되었지만, 각변형을 최소화 하면서 동시에 양호한 용입을 가질 수 있도록 하는 연구는 미흡한 실정이다.

1.2 연구목적 및 개요

본 연구의 목적은 플럭스 코어드 와이어와 솔리드 와이어를 사용하여 동일한 각장 5.9mm를 가지도록 공정 설계된 필릿 용접부에 대해여, 공정 파라메타들에 따른 각변형과 용입부족의 경향을 살펴보고, 또한 플럭스 코어드 와이어를 사용하여 동일한 각장 8mm를 가지도록 공정 설계하여 용입의 산포와 각변형을 고려한 최적 필릿 용접 공정을 개발하는 것을 그 목적으로 하였다. 그리고 최적 필릿 용접 공정 조건을 이용하여 반복 재현실험을 하였다. 이를 위해 CTWD, 용접속도, 아크길이에 대한 변화실험 및 진행각에 대한 변화시험을 하였고, 그에 따른 전류, 전압, 겉보기 입열량 및 용접금속단면적을 분석하였다. 그리고 용접금속단면적의 분석을 통한 평균용입 D_P의 정의 및 평균용입 D_P와 각변형과의 관계를 고려하여 최적공정 조건을 구하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 소모성 전극 아크 용접의 정의

소모성 전극 아크 용접은 각종 아크 용접 시에 아크 중에서 용융 및 소모되는 전극을 사용하여 용접하는 방법으로 일반적으로 가스 메탈 아크 용접(Gas Metal Arc Welding), 플럭스 코어드 아크 용접(Flux Cored Arc Welding), 피복 아크 용접(Shielded Matal Arc Welding), 서브머지드 아크 용접(Submerged Arc Welding) 등을 말한다.

이러한 소모성 전극 아크 용접은 비소모성 전극을 사용하는 가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten Arc Welding)이 아크길이가 변하여 아크전압이 심하게 변해도 용접전류가 변하지 않고 일정하게 흐르는 외부특성 곡선을 가지는 전원인 정전류 특성 전원을 사용하는 것과 반대로 아크전압이 조금만 변해도 용접전류가 크게 변하는 외부특성곡선을 가진 용접전원인 정전압 특성 전원을 사용한다[6].

*2.1.1 GMAW*의 원리 및 분류

실드가스를 사용하면서 소모전극 와이어인 솔리드 와이어를 연속적으로 송급하고, 그 선단에서 아크가 발생하도록 하여 용적이 용융지로 이행되도록 하는 용접법을 말한다. 이 용접법에서는 Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 연속적으로 송급되는 와이어가 아크의 높은 열에 의해 용융되어 아크 기둥을 거쳐 용융지로 이행하게 되며, 용융부위는 가스노즐을 통하여 공급되는 실드가스에 의해 주위의 대기로부터 보호된다. 이 용접법은 사용되는 실드가스의 종류에 따라 크게 세 종류로 분류된다. 즉 아르곤과 같은 불활성가스를 사용하는 것을 MIG 용접이라고 하고, 순수한 탄산가스만을 사용하는 것을 CO_2 용접이라고 한다. 그리고 탄산가스와 아르곤 가스가 혼합된 가스를 사용하는 것을 MAG 용접이라고 한다.

본 연구에서는 80% 아르곤과 20% 탄산가스를 사용하는 MAG 용접 및 CO_2 용접법을 사용하였다.

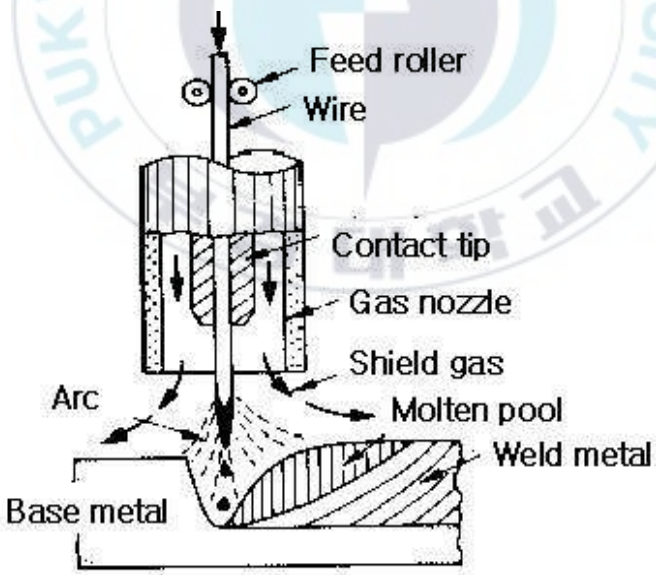


Fig. 2.1 Schematic of GMAW

*2.1.2 FCAW*의 원리

FCAW의 원리는 GMAW와 유사하나, 이름 자체가 의미하는 바와 같이 와이어 중심부에 플럭스가 채워져 있는 플럭스 코어드 와이어를 사용한다. 따라서 FCAW는 플럭스 코어드 와이어를 일정한 속도로 공급하면서 전류를 통하여 와이어와 모재 사이에 아크가 발생되도록 하고, 발생된 아크열로 용융지와 용접비드가 형성되도록 하는 용접법이다.

Fig. 2.2는 FCAW의 모식도이다.

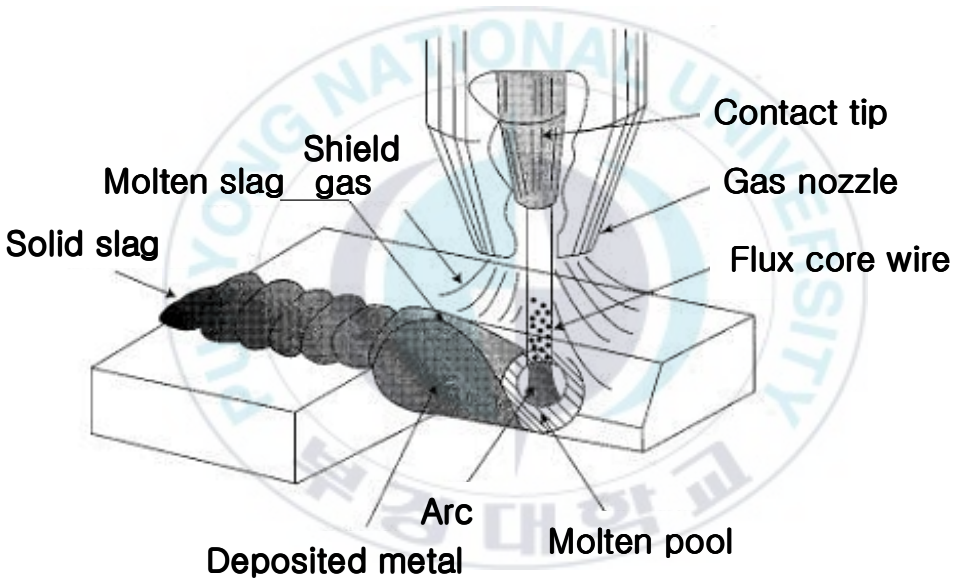


Fig. 2.2 Schematic of FCAW

2.1.3 플럭스 코어드 및 솔리드 와이어의 와이어 송급속도 비교

Fig. 2.3은 플럭스 코어드 와이어와 솔리드 와이어의 전류에 따른 와이어 송급속도를 나타낸 것이다. 같은 전류 250A에서 플럭스 코어드 와이어가 솔리드 와이어보다 와이어 송급속도가 더 빠른 것을 알 수 있다. 이는 플럭스 코어드 와이어를 사용하여 용접을 할 때 같은 전류에서 플럭스 코어드 와이어가 솔리드 와이어 보다 더 많은 용착량을 가진다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 이러한 관계에 있는 두 와이어의 송급속도를 고려하여 동일한 각장을 가지도록 공정설계를 하였다.

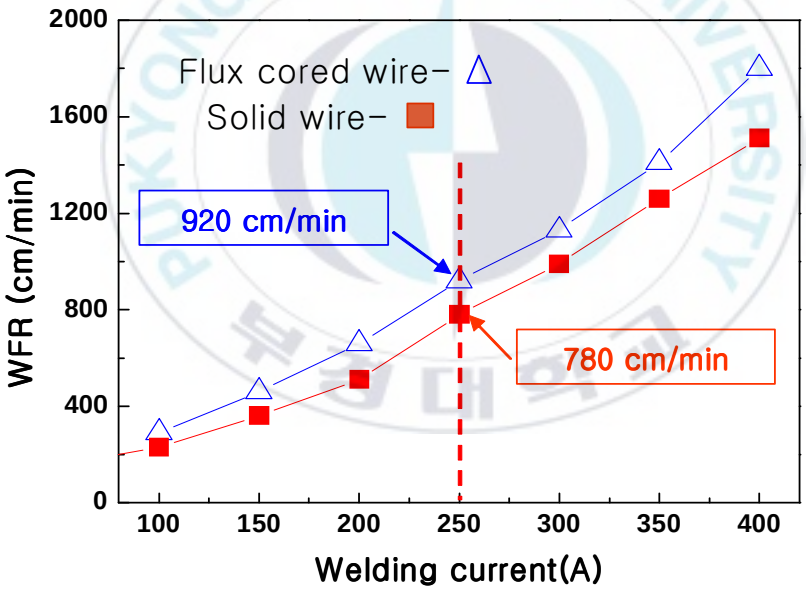


Fig. 2.3 Wire feed rate with welding current

2.1.4 플럭스 코어드 및 솔리드 와이어의 단면 형상에 따른 와이어 저항발열 비교

Fig. 2.4는 플럭스 코어드 와이어의 단면적을 나타낸 것이다. 8점에 대해 와이어 끝단에서 플럭스까지의 길이를 3회씩 측정 하였다. Fig. 2.5에 나타난 것과 같이 각각 3회씩 측정된 값의 평균값을 다시 8점에 대해 평균값을 구하였다. 식 (2.1), (2.2)는 플럭스 코어드 와이어의 단면적을 구하기 위한 식이다.

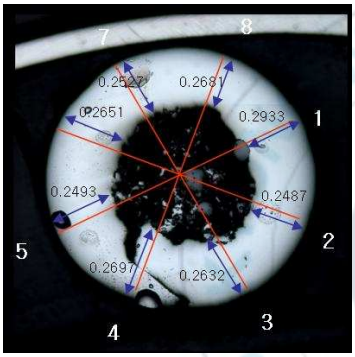


Fig. 2.4 Measure of Sheath thickness

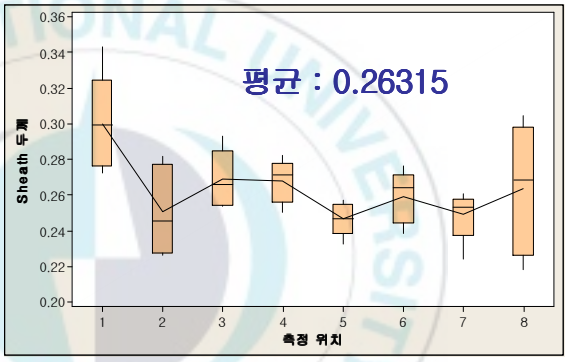


Fig. 2.5 Average of Sheath thickness

$$A_{fcw} = \frac{\pi d^2_{fcw}}{4} \qquad \text{----------(2.1)}$$

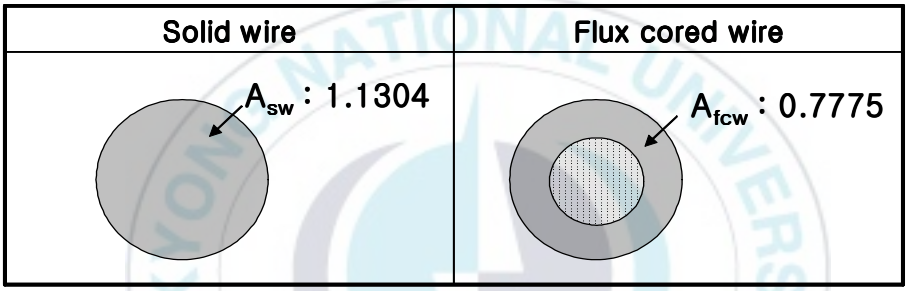
$$d_{fcw} = \sqrt{\frac{4A_{fcw}}{\pi}} \qquad \text{----------(2.2)}$$

여기서, A_{fcw} : 플럭스 코어드 와이어의 단면적, mm^2

d_{fcw} : 플럭스 코어드 와이어의 직경, mm

Table 2.1은 플럭스 코어드 와이어와 솔리드 와이어의 단면적 모식도를 나타낸 것이다. 보이는 바와 같이 플럭스 코어드 와이어가 솔리드 와이어보다 단면적이 더 작은 것을 확인할 수 있고, 이와 같은 사실은 Fig. 2.6에 나타난 것과 같이 지름(d)이 작은 플럭스 코어드 와이어가 솔리드 와이어 보다 와이어 저항 발열에 의한 와이어 용융이 많다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로 플럭스 코어드 와이어가 솔리드 와이어보다 모재에 투입되는 열량이 더 적게 된다는 것을 짐작할 수 있다.

Table 2.1 Comparison of area with wire type



Wire melting rate(By eq. of Halmoy)

$$M(kg/h) = 6.5\times10^{-3}\times I + 2.88\times10^{-6}\times\frac{L_S I^2}{d^2}$$

where
M : Melting rate,kg/h
I : Set current,A
L_S : Wire stickout,mm, L : Arc length(mm)
d : Wire diameter,mm

아크열에 의한 와이어 melting

와이어 저항 발열에 의한 와이어 melting

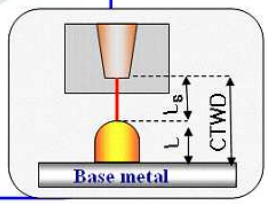


Fig. 2.6 Equation for wire melting rate

2.2 각변형(*Angular distortion*)의 정의

필릿 용접부에서 발생하는 각변형으로 인해 현장에서는 많은 교정작업이 필요한 실정이다. 이러한 각변형은 용접부의 입열과 냉각에 의한 팽창과 수축이 그 원인이 된다.

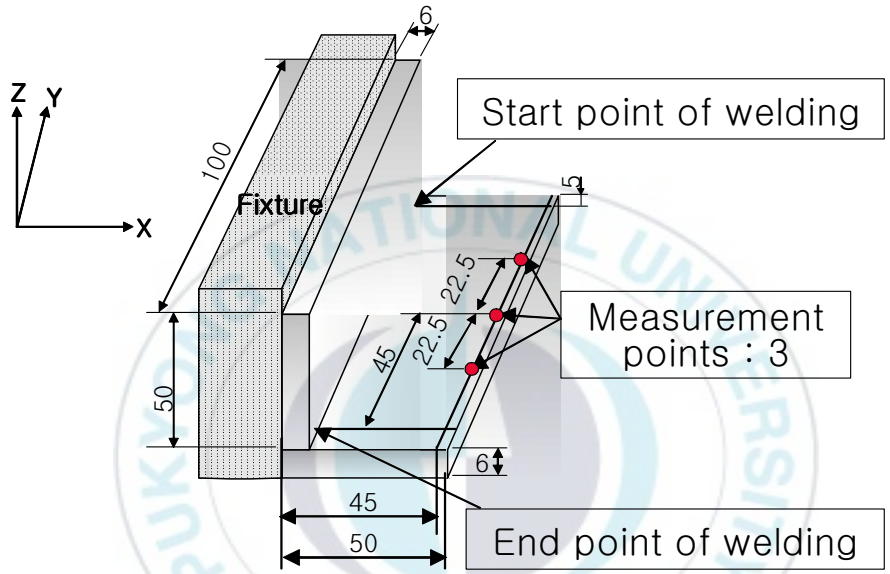


Fig. 2.7 Schematic of measurement point and specimen dimension

Fig. 2.7은 용접 시작부, 종료부, 각변형량 측정부를 나타낸 것이며, 본 연구에서의 각변형량 측정은 수직판을 고정한 상태에서 용접 전, 후 수평판의 Y축 방향 3점에서 Z축 방향의 변위를 측정하였다. 그리고, 측정된 3점에 식 (2.3)과 같이 사인바 공식을 이용하였고, 3점에 대한 평균값을 각변형이라고 정의 하였으며, 이때의 용접부 길이는 90mm로 하였다.

$$\theta = \tan^{-1}\frac{H}{45} \qquad \text{----------(2.3)}$$

2.3 용융효율(*Melting efficiency*)의 정의

Fig. 2.8은 용접공정에서의 에너지 분포 모식도를 나타낸 것이다. 에너지 분포는 크게 아크효율과 용융효율로 나뉘며 본 연구에서는 식 (2.4)에 나타나 있는 용융효율을 공정 파라메타들의 변화에 따라 검토하였다.

또한 용융효율 계산하기 위해 아래의 두 식 (2.5), (2.6)을 사용하였으며, 이때, Q_m은 상수이므로 제외시키고, 겉보기 입열량과 용접금속단면적을 이용하여 용융효율을 ME의 형태로 나타내었다[8].

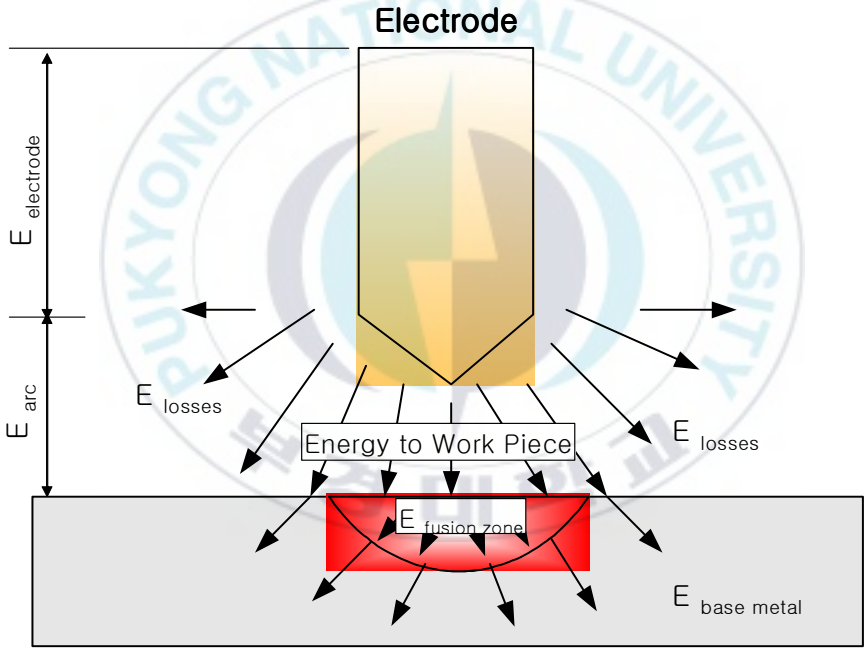


Fig. 2.8 Schematic of energy distribution in the welding process

$$\text{용 융 효 율},\ \eta_m = \frac{E_{fz}}{E_{fz} + E_{bm}} \qquad \text{---------- (2.4)}$$

$$Z_m = \frac{Q_m (AW)\upsilon}{VI} \qquad \text{---------- (2.5)}$$

$$ME = \frac{Z_m}{Q_m} = \frac{AW}{(VI/\upsilon)}, \quad mm^3/J \qquad \text{----------(2.6)}$$

여기서, η_m : 용융효율

E_{fz} : 모재로 투입되어 모재를 용융시키는데 사용된 에너지, J

E_{bm} : 모재로 투입되었으나 모재를 용융시키지 못하고 빠져나간 에너지, J

Q_m : 모재를 녹이는데 필요한 에너지, J/mm^3

AW : 용융금속단면적, mm^2

VI/υ : Machine output, J/mm

2.4 CTWD와 와이어 스틱아웃 길이의 정의

Fig. 2.9에서와 같이 CTWD (Contact tip To Workpiece Distance)는 컨택팁 선단에서 모재 표면까지의 거리이며, 스틱아웃은 컨택팁 선단에서 와이어가 돌출해 있는 길이로 정의된다. MAG 용접 시 CTWD는 스틱아웃과 아크길이의 합으로 표현될 수 있다.

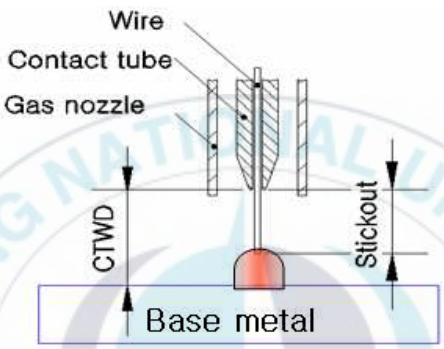


Fig. 2.9 Schematic drawing of CTWD and stickout in MAG welding

Fig. 2.10에 나타난 식은 와이어 용융속도에 대해 Halmoy가 주장한 식으로 크게 아크열에 의한 와이어 용융항과 와이어 저항 발열에 의한 와이어 용융항의 합으로 나타낸다. 와이어 용융속도는 아크열에 의한 설정 전류, 와이어 저항 발열에 의한 설정전류의 제곱 및 와이어 스틱아웃에 비례하며 와이어의 단면적에 반비례한다.[9)]

Wire melting rate(By eq. of Halmoy)

$$M(kg/h) = 6.5\times10^{-3}\times I + 2.88\times10^{-6}\times\frac{L_S I^2}{d^2}$$

아크열에 의한 와이어 melting

와이어 저항 발열에 의한 와이어 melting

where
M : Melting rate,kg/h
I : Set current,A
L_S : Wire stickout,mm, L : Arc length(mm)
d : Wire diameter,mm

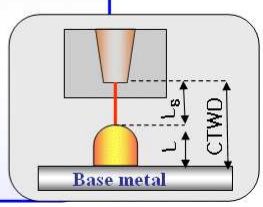


Fig. 2.10 Equation for wire melting rate

2.5 평균용입의 정의

- $B = 2L_L \times D_P$ ----------(2.7)
- $D_P = B / 2L_L$ ----------(2.8)

식(2.7)은 모재에 대한 용입면적 B를 계산에 의해 구하는 식이며, 식(2.7)을 사용하여 식(2.8)를 유도하였다. 식(2.8)에서 나타낸 바와 같이 평균용입 D_P는 B에 대한 각장 L_L (Leg length)의 비로 정의하였다.

Fig. 2.11은 실제 B값을 구하기 위한 방법을 나타낸 것으로 용접부 단면적을 캐드디지타이저로 구하였다.

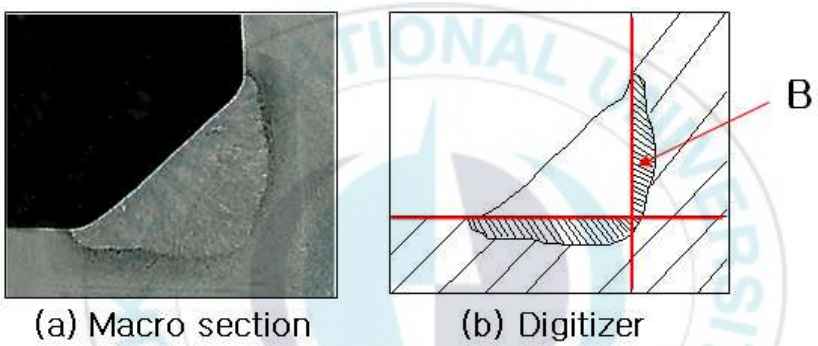


Fig. 2.11 Comparison of penetration by real macro section and digitizer

본 연구에서는 Fig. 12에 나타난 것과 같이 평균용입 D_P가 0.6mm일 때를 양호하다고 정의하였고, 평균용입 D_P가 0.6mm보다 크게 되면 각변형이 증가되는 것이고, 평균용입 D_P가 0.6mm보다 작게 되면 용입부족이 우려 되는 것으로 판단하였다.

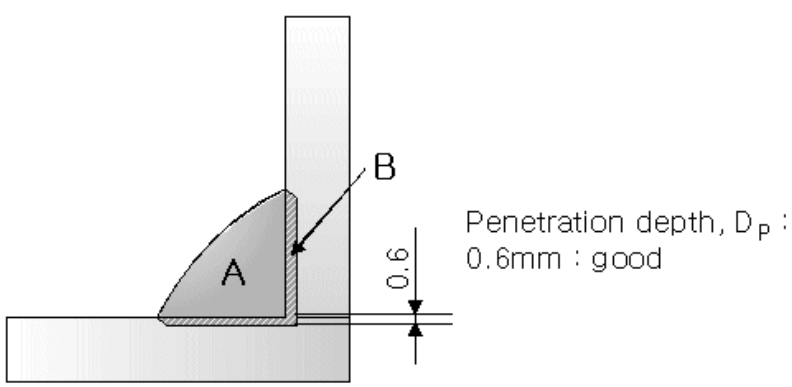


Fig. 2.12 Definition of penetration depth for good penetration

여기서, A = Section area of deposited metal

B = Penetration area of base metal

D_P = Penetration depth, Average penetration

L_L = Leg length

Fig. 2.13, 2.14는 평균용입 D_P가 클 때와 작을 때의 모식도를 각각 나타낸 것이다.

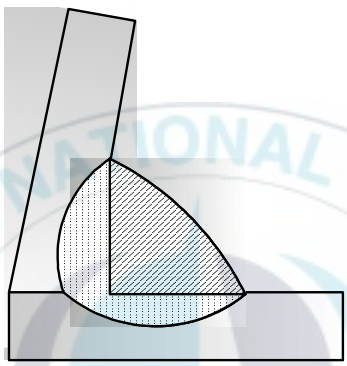


Fig. 2.13 Schematic of deep D_P (increasing in angular distortion)

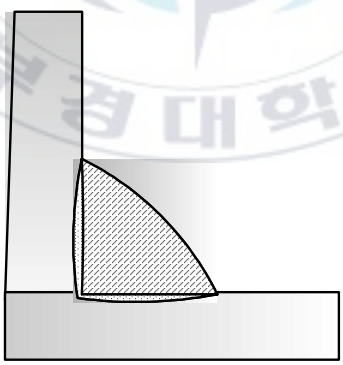


Fig. 2.14 Schematic of shallow D_P (concerned about lack of penetration)

제 3 장 플럭스 코어드 및 솔리드 와이어의 용착효율 비교 실험

3.1 서언

본 장에서는 필릿 용접부에 대한 실험을 하기 전에 동일한 각장을 얻기 위해 플럭스 코어드 와이어와 솔리드 와이어를 사용하여 용착효율의 값을 구하는 실험을 진행하였다. 각 와이어의 용착효율을 구하게 되면 식 (3.1)과 (3.2)에 의해 모든 실험에서 동일한 각장을 가지도록 공정설계가 가능해진다.

용착 효율 (Deposition efficiency)은 와이어의 소모중량에 대하여 형성된 용착금속의 중량비율로 %로 나타난다.

△ Welding speed (mm/sec)

= Deposition rate (mm3/sec)/Deposition cross section area (mm2) ----- (3.1)

△ Deposition rate (mm3/sec)

= Wire section area (mm2) × WFR (mm/sec) × Deposition efficiency - (3.2)

3.2 실험 재료 및 방법

3.2.1 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 폭 50mm × 길이 100mm × 두께 6mm의 연강판을 사용하였고, 시편 형상은 Fig. 3.1에 나타내었다. 재료는 그라인드 작업으로 재료 양면의 흑피를 제거하여 사용하였다.

사용된 와이어의 종류는 플럭스 코어드 와이어 AWS-E71T-1과 솔리드 와이어 AWS-ER70S-6이며, 직경은 1.2mm를 사용하였다.

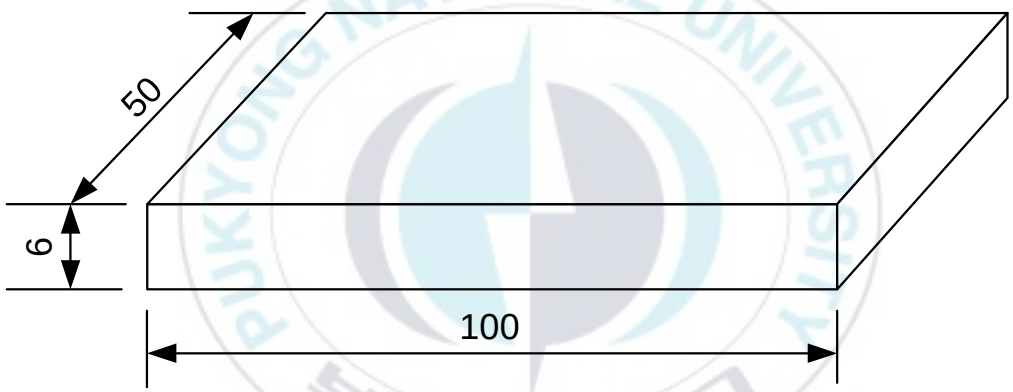


Fig. 3.1 Configuration of base metal

3.2.2 실험 방법

실험에 대한 용접조건은 Table 3.1에 나타난 것과 같이 전류 200A, 비드온 플레이트, CTWD 30mm이며, 비드의 평활도를 동일하게 하기 위해 플럭스 코어드 와이어와 솔리드 와이어의 단락시간 비를 각각 0.01%, 1%로 맞추었다.

측정은 용접 전 각 시험편의 무게를 Fig. 3.2에 나타나 있는 전자저울로 측정하고, 용접 후 스패터를 제거하고 다시 시험편의 무게를 측정하였다.

Table 3.1 Welding condition

Power source	Fronius TPS4000	
Welding current	200A	
Welding position	Bead on plate	
CTWD	30mm	
Shield gas	80%Ar + 20%CO2 (20L/min)	
Welding wire	Flux cored	solid
Shot circuit ratio	0.01%	1%

Fig. 3.2 Photo of electronic scale

3.3 실험 결과 및 고찰

Table 3.2는 실험 전, 후의 시험편의 무게와 사용한 와이어의 무게를 나타내었고, Fig. 3.3과 Fig. 3.4는 두 와이어 사용 시의 파형을 나타낸 것이다.

Table 3.2 Measured value of experiment before and after

	용접 전 시편무게	용접 후 시편무게	사용한 wire 무게
Flux cored wire	216.46g	225.23g	10.40g
Solid wire	215.23g	223.66g	9.00g

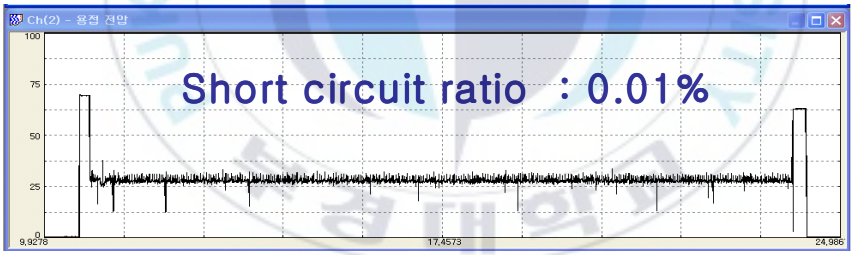


Fig. 3.3 Waveform by flux cored wire

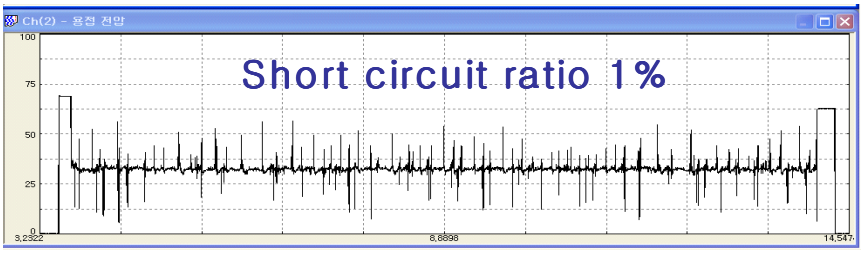


Fig. 3.4 Waveform by solid wire

아래에서 계산된 것과 같이 두 와이어의 용착효율 실험 결과, 플럭스 코어드 와이어가 84.32%, 솔리드 와이어가 93.66%의 용착효율을 가진다는 것을 알 수 있었다.

Table 3.3 에서는 구해진 용착효율을 사용하여 동일한 각장을 가지도록 공정설계한 두 와이어의 와이어 송급속도를 나타내었다.

<플럭스 코어드 와이어 용착 효율 계산>

1) 사용한 와이어의 무게, X

X = 1000mm / 7.09 g * 1464mm X = 10.40 g

2) 용착된 용접금속의 무게 = 용접 후 시편 무게 - 용접 전 시편 무게

= 225.23 g - 216.46 g = 8.77 g

3) 용착효율 = (용착된 용접금속의 무게 / 사용한 와이어의 무게) x 100

= (8.77g / 10.40g) x 100 = ***84.32%***

<솔리드 와이어 용착 효율 계산>

1) 사용한 와이어의 무게, X

X = 1000mm /8.50 g * 1059mm X = 9.00 g

2) 용착된 용접금속의 무게 = 용접 후 시편 무게 - 용접 전 시편 무게

= 223.66 g - 215.23 g = 8.43 g

3) 용착효율 = (용착된 용접금속의 무게 / 사용한 와이어의 무게) x 100

= (8.43g / 9.00g) x 100 = ***93.66%***

Table 3.3 WFR from melting efficiency in the constant leg length

Wire	wire 단면적 (mm2)	WFR (mm/sec)	용착효율	용착속도 (mm3/sec)	용접속도 (mm/sec)	설정전류 (A)	L_L (mm)
~~Flux~~ core ~~Solid~~	1.1304	153.33 ~~138.04~~	0.84 ~~0.94~~	146.15	8.33	250 ~~260~~	5.9

3.4 결언

동일한 각장을 위한 용착효율 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 단락시간 비를 플럭스 코어드 와이어 0.01%, 솔리드 와이어 1%로 하였을 때 용착효율은 각각 84.32%, 93.66%의 값을 얻을 수 있었다.

2) 플럭스 코어드 와이어와 솔리드 와이어를 사용하여 각각에 대해 일정한 각장(5.9mm)으로 용접하기 위해서는 용접속도가 8.33mm/sec일 때 플럭스 코어드 와이어는 와이어 송급속도를 153.33mm/sec, 솔리드 와이어는 138.04mm/sec로 설정해야 된다는 것을 알 수 있었다.

제 4 장 필릿 용접부에서 용입과 각변형에 미치는 공정 파라메타의 영향

4.1 서언

본 장에서는 플럭스 코어드 와이어 및 솔리드 와이어를 사용하여 필릿 용접부에 대하여 CTWD를 10mm ~ 50mm까지 10mm씩 증가시키는 실험과 용접속도를 20cm/min ~ 80cm/min까지 15cm/min씩 증가시키는 실험과 아크길이를 변화시키기 위해 설정전압을 2V씩 변화시키는 실험을 하였다. 이를 통해 공정 파라메타들의 변화에 따른 각변형량을 구하였고, 전류, 전압, 겉보기 입열량, 용접금속의 단면적을 통해 용융효율을 구하였으며, 평균용입 D_P를 구하였다.

Fig. 4.1은 CTWD를 10mm, 50mm변화 시의 모식도를 나타낸 것이다.

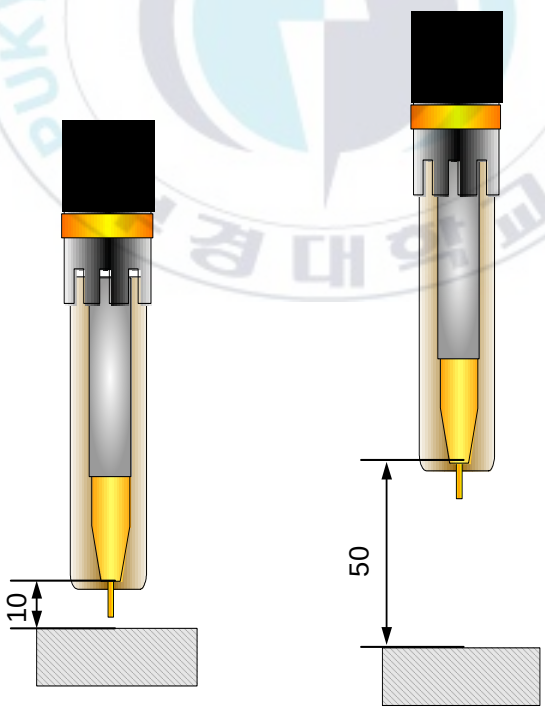


Fig. 4.1 Schematic of variation for CTWD (10mm,~ 50mm)

4.2 실험 재료 및 실험 방법

4.2.1 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 폭 50mm×길이 100mm× 두께 6mm의 연강판을 사용하였고, 시편 형상은 Fig. 4.2에 나타내었다. 그라인드 작업으로 재료 양면의 흑피를 제거하여 사용하였다.

사용된 와이어의 종류는 플럭스 코어드 와이어 AWS-E71T-1와 솔리드 와이어 AWS-ER70S-6이며 , 직경은 1.2mm을 사용하였다.

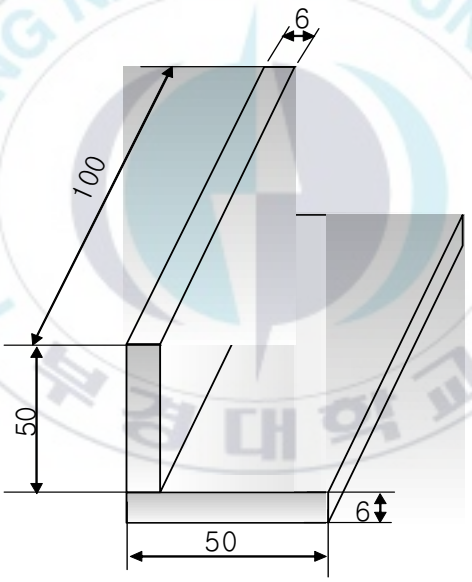


Fig. 4.2 Configuration of base metal

4.2.2 실험 방법

Table 4.1은 실험에 대한 용접 조건을 나타낸 것이다. 각장을 5.9mm로 고정시켰고, CTWD, 용접속도, 설정전압을 각각 변화시키면서 실험을 진행 하였다.

Table 4.1 Welding condition

Fixed	Power source		Fronius TPS4000				
	Leg length (Deposited metal area)		5.9mm(17.5mm^2)				
	Shield gas flow rate		Ar 80% +CO_2 20%, 25L/min				
	Material		Flux cored wire			Solid wire	
Exp. A	WFR (mm/sec)		153			138	
	Set current (A)		250			260	
	Welding speed (cm/min)		50				
	CTWD (mm)		10, 20, 30, 40, 50				
Exp. B	WFR (mm/sec)	Flux cored wire	61	107	153	199	245
		Solid wire	55	97	138	179	221
	Set current (A)	Flux cored wire	124	196	250	313	360
		Solid wire	136	217	260	316	362
	Welding speed (cm/min)		20	35	50	65	80
Exp. C	WFR (mm/sec)		153			138	
	Set current (A)		250			260	
	Welding speed cm/min)		50				
	Set voltage (V)		24.5, 25.8, 27.2, 28.4, 29.5			26.9, 28.1, 29.4, 30.6, 32.1	

Fig. 4.3에 나타난 것과 같이 시험편을 45° 회전시켜서 아래보기 필릿 용접으로 실험을 진행하였으며, Fig. 4.4에 나타난 것과 같이 아크모니터링 시스템(WAM 3000N)으로 계측하였다.

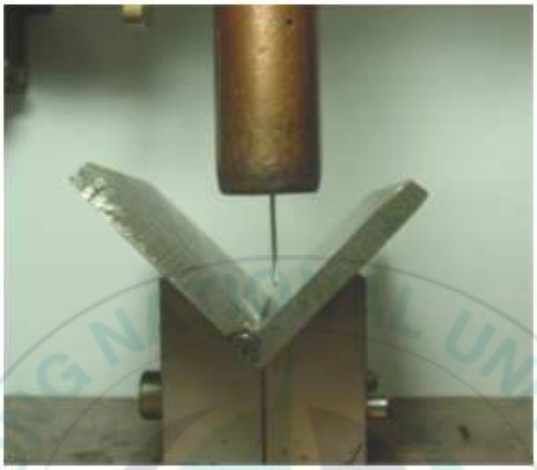


Fig. 4.3 Experimental set up

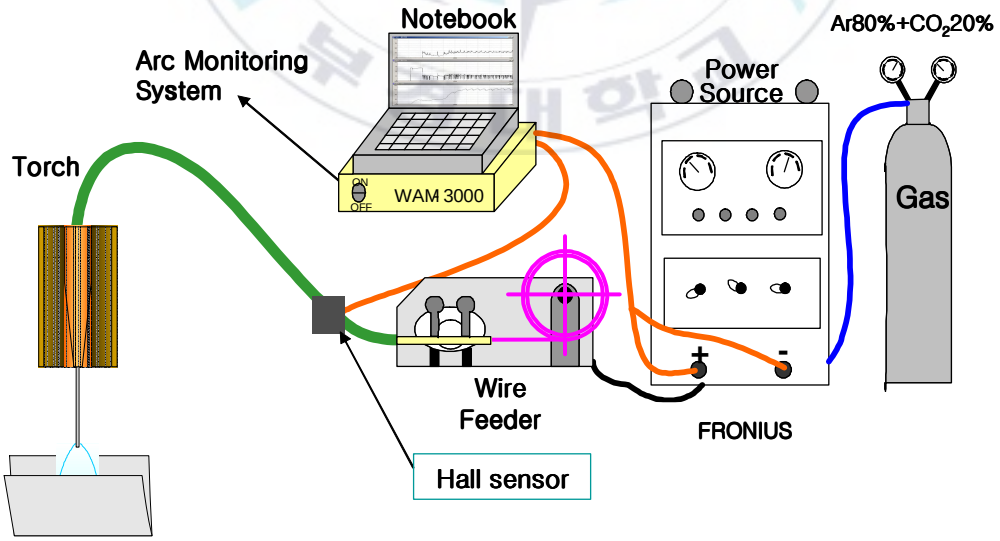


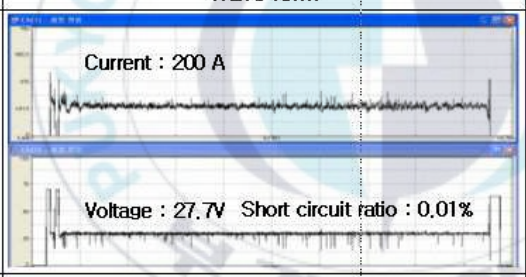
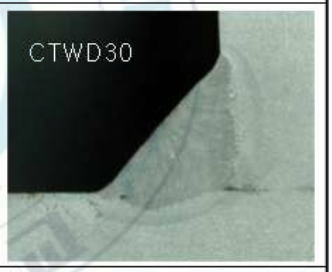
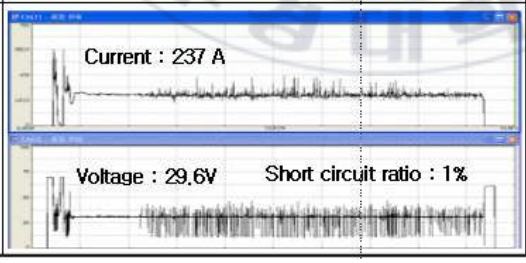
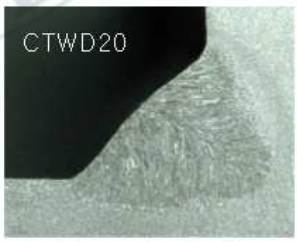
Fig. 4.4 Equipment for experiment

4.3 실험 결과 및 고찰

4.3.1 플럭스 코어드 및 솔리드 와이어에 대한 파형 및 단면 마크로

Table 4.2는 CTWD 변화 실험 후, 플럭스 코어드 와이어와 솔리드 와이어의 파형과 용접금속 단면적을 나타낸 것이다. 단락시간 비가 각각 0.01%, 1%로 나온 것을 확인 할 수 있었으며, 플럭스 코어드 와이어의 경우는 용입부족이 나타난 것을 볼 수 있었다. 또한, 솔리드 와이어의 경우는 완전 용입이 되었고, 용접금속의 단면적이 플럭스 코어드 와이어보다 큰 것을 볼 수 있었다.

Table 4.2 Waveforms and section areas of WM

	Wave form	Section area of weld metal
Flux cored wire		
Solid wire		

4.3.2 각변형과 평균용입 D_P에 미치는 CTWD의 영향

Fig. 4.5는 CTWD 변화실험 결과로써, 두 와이어에 대한 각변형과 용융효율에 미치는 CTWD의 영향에 대하여 나타내었다. 플럭스 코어드 와이어의 경우에는 CTWD가 증가함에 따라 각변형이 감소하고 용융효율이 증가하는 경향이 나타났고, 솔리드 와이어의 경우에도 플럭스 코어드 와이어와 마찬가지로 CTWD 증가에 따라 각변형이 감소하고 용융효율이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 CTWD의 증가에 따라 입열량의 감소와 용융효율의 증가로 인해 각변형이 감소하였을 것이라고 판단된다. 또한 솔리드 와이어가 플럭스 코어드 와이어보다 용융효율과 각변형이 높게 나타났다.

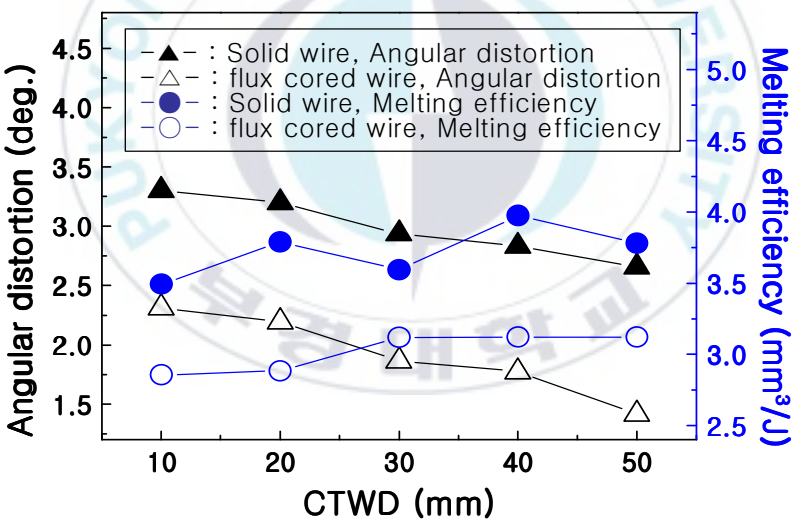


Fig. 4.5 The effects of CTWD on angular distortion and melting efficiency with wire type

Fig. 4.6은 CTWD 증가실험에서 두 와이어에 대한 평균용입 D_P에 미치는 CTWD의 영향을 나타낸 것이다. 두 와이어 모두 CTWD가 증가 할 때 평균용입 D_P가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 앞서 언급한 할모이 수식에 나타난 와이어 저항발열항의 증가에 따른 결과라고 판단된다.

Fig. 4.7은 CTWD 증가에 따른 입열량의 결과를 나타낸 것이다. CTWD의 증가에 따라 입열량이 감소하였다.

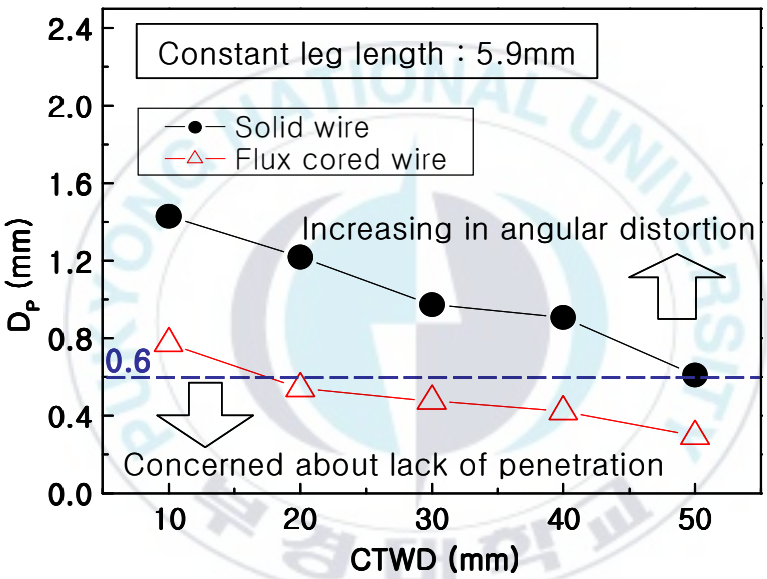


Fig. 4.6 The effects of CTWD on D_P with wire type

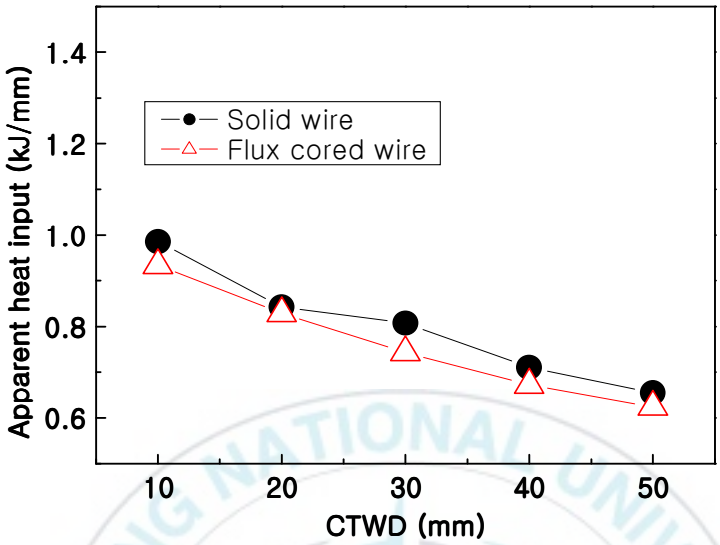


Fig. 4.7 The effects of CTWD on apparent heat input with wire type

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

4.3.3 각변형과 평균용입 D_P에 미치는 용접속도의 영향

Fig. 4.8은 용접속도 변화실험 결과로써, 두 와이어에 대한 각변형과 용융효율에 미치는 용접속도의 영향에 대하여 나타내었다. 플럭스 코어드 와이어의 경우에는 용접속도가 증가함에 따라 각변형이 감소하고 용융효율이 크게 증가하는 경향이 나타났고, 솔리드 와이어의 경우에도 플럭스 코어드 와이어와 마찬가지 경향이 나타났다. 이는 용접속도의 증가에 따라 입열량의 감소와 용융효율의 증가로 인해 각변형이 감소하였을 것이라고 판단된다. 또한 솔리드 와이어가 플럭스 코어드 와이어보다 용융효율과 각변형이 높게 나타났다.

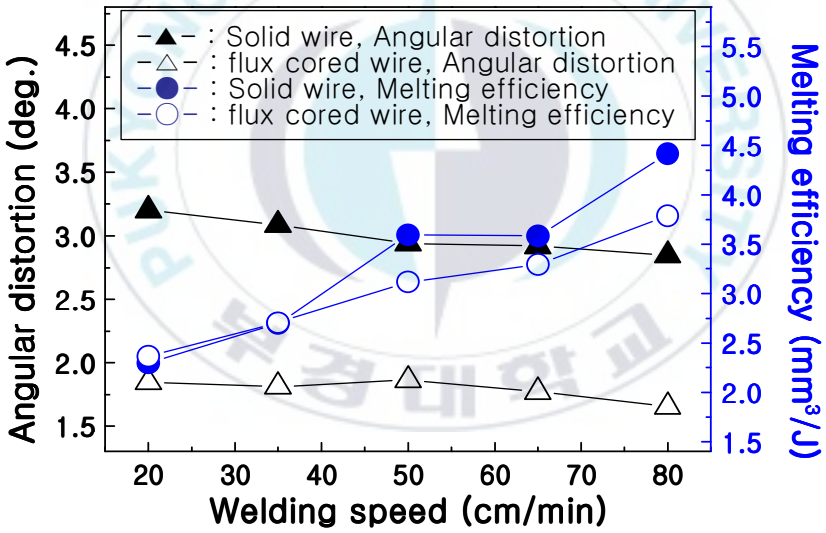


Fig. 4.8 The effects of welding speed on angular distortion and melting efficiency with wire type

Fig. 4.9는 용접속도 증가실험에서 두 와이어에 대한 평균용입 D_P에 미치는 용접속도의 영향을 나타낸 것이다. 두 와이어 모두 용접속도가 증가할 때 평균용입 D_P가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 앞서 동일한 각장을 만들기 위해 용접속도 증가할 때, 전류도 같이 증가시켰기 때문이라고 판단된다.

Fig. 4.10은 용접속도 증가에 따른 입열량의 결과를 나타낸 것이다. 용접속도의 증가에 따라 입열량이 감소하였다.

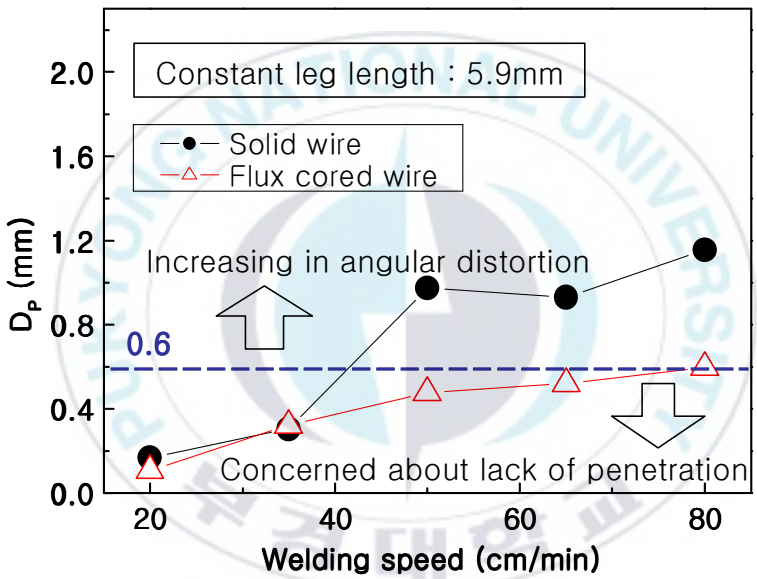


Fig. 4.9 The effects of welding speed on D_P with wire type

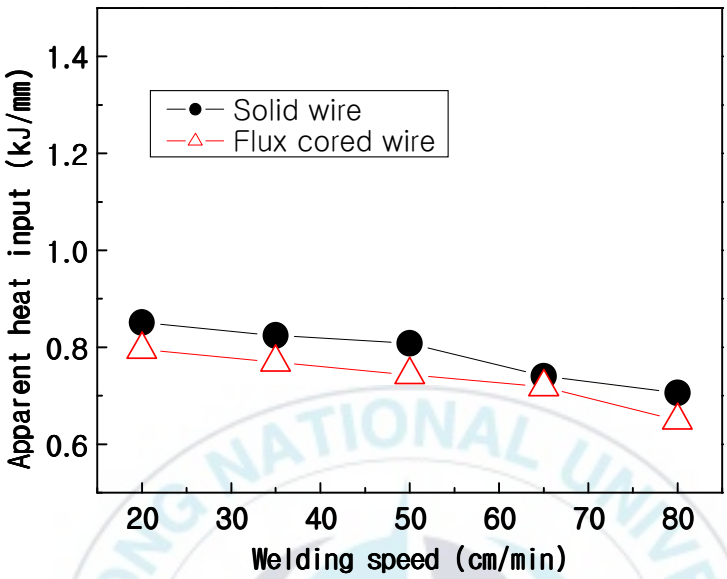


Fig. 4.10 The effects of welding speed on apparent heat input with wire type

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

4.3.4 각변형과 평균용입 D_P에 미치는 아크길이의 영향

Fig. 4.11은 아크길이 변화실험 결과로써, 두 와이어에 대한 각변형과 용융효율에 미치는 아크길이의 영향에 대하여 나타내었다. 플럭스 코어드 와이어의 경우에는 아크길이가 증가함에 따라 각변형이 증가하고 용융효율이 감소하는 경향이 나타났고, 솔리드 와이어의 경우에도 플럭스 코어드 와이어와 마찬가지 경향이 나타났다. 이는 아크길이의 증가에 따라 입열량의 증가와 용융효율의 감소로 인해 각변형이 증가하였을 것이라고 판단된다. 또한 솔리드 와이어가 플럭스 코어드 와이어보다 용융효율과 각변형이 높게 나타났다.

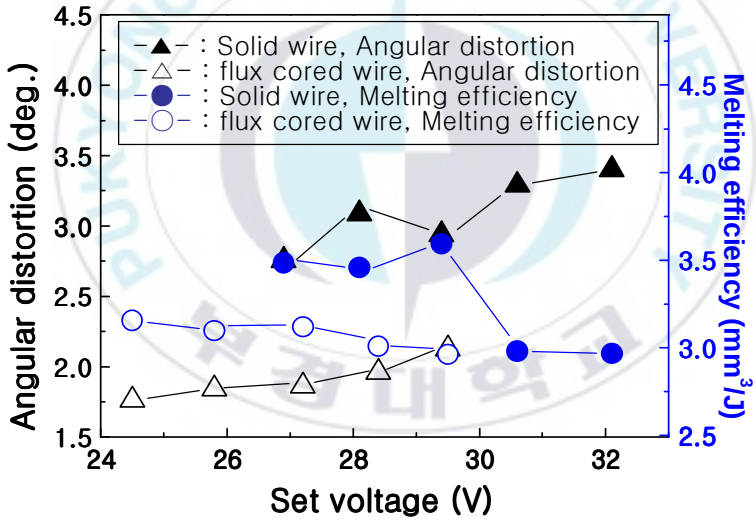


Fig. 4.11 The effects of arc length on angular distortion and melting efficiency with wire type

Fig. 4.12는 아크길이 증가실험에서 두 와이어에 대한 평균용입 D_P에 미치는 아크길이의 영향을 나타낸 것이다. 두 와이어 모두 아크길이가 증가 할 때 평균용입 D_P가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 아크길이 증가에 따라 입열량이 증가되었기 때문이라고 판단된다.

Fig. 4.13은 아크길이 증가에 따른 입열량의 결과를 나타낸 것이다. 아크길이의 증가에 따라 입열량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

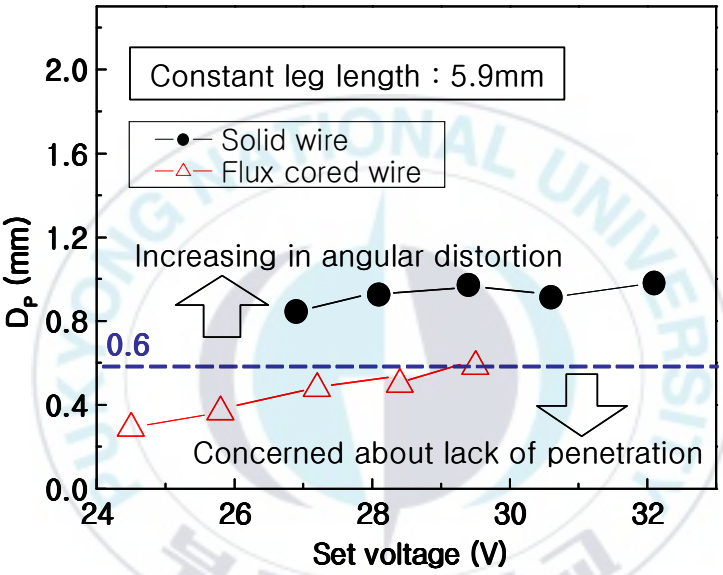


Fig. 4.12 The effects of arc length on D_P with wire type

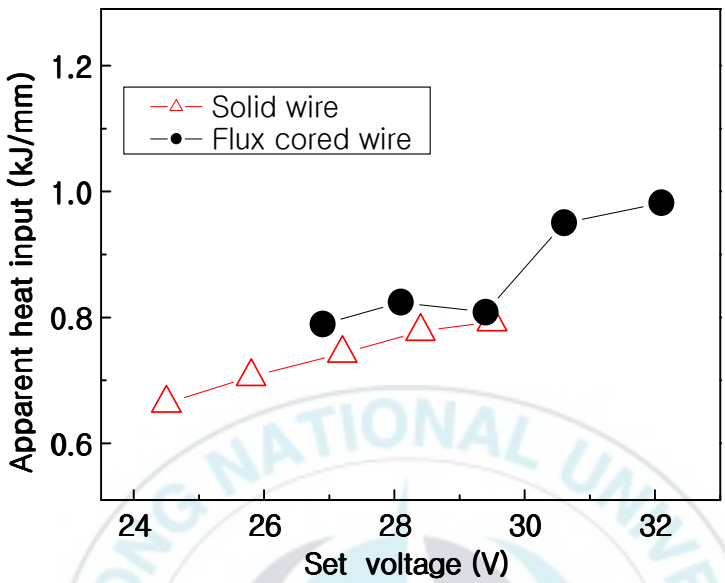


Fig. 4.13 The effects of arc length on apparent heat input with wire type

4.4 결언

1) CTWD의 증가에 따라 각변형이 감소하였고, 용융효율은 증가하였으며, 평균용입 D_P는 감소하는 경향이 나타났다.

2) 각장을 일정하게 유지하기 위해 용접 전류를 높이면서 속도를 증가시키면 각변형이 감소하였고, 용융효율은 증가하였으며, 평균용입 D_P도 증가하는 경향이 나타났다.

3) 아크길이가 증가하면 각변형이 증가하였고, 용융효율은 감소하였고, 평균용입 D_P는 증가하는 경향이 나타났다.

제 5 장 반응 표면 분석법을 이용한 최적 필릿 용접 공정 개발

5.1 서언

본 장에서는 반응 표면 분석법을 이용하여 최적 필릿 용접 조건을 구하기 위하여, 용접부의 각장을 8mm로 일정하게 되도록 공정설계 하였고, 플럭스 코어드 와이어를 사용하여, 전류350A, 용접속도 42cm/min으로 실험을 진행하였다. 또한 변수로서는 진행각, CTWD, 설정전압을 변화시켰다. 본 실험은 반응표면 분석법 중 중심합성 계획법(3인자 3수준) 사용하여 실험을 하였다.

5.2 실험 재료 및 실험 방법

5.2.1 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 폭 50mm×길이 100mm× 두께 6mm의 연강판을 사용하였고, 시편 형상은 Fig. 5.1에 나타내었다. 사용된 와이어의 종류는 플럭스 코어드 와이어 AWS-E71T-1이며, 직경은 1.2mm을 사용하였다.

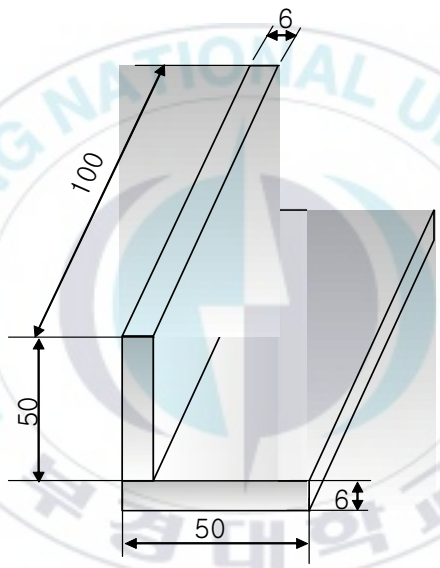


Fig. 5.1 Configuration of base metal

5.2.2 실험 방법

Table 5.1은 본 장에서의 실험 조건을 나타낸 것이다. 동일한 각장을 유지하기위해 공정설계된 필릿 용접부에 대해 설정전류 350A, 용접속도 42cm/min으로 하여 실험을 하였으며, 플럭스 코어드 와이어를 사용하였다. 용접자세는 아래보기 자세를 사용하였으며, 계측은 모니터링 시스템(WAM3000)으로 하였다. 또한 Table 5.2는 반응표면분석법을 위한 실험설계를 나타낸 것이고, 3인자 3수준에 맞추어 X_1을 진행각, X_2를 CTWD, 설정전압을 X_3로 하였다.

Table 5.1 Welding condition

Fixed	Power source	Fronius TPS4000
	Leg length	8mm
	Shield gas flow rate	CO_2 100%, 20L/min
	Material	Flux cored wire
	Set current (A)	350
	Welding speed (cm/min)	42
Variable	Progressive angle (^{0})	-10, 0, 10
	CTWD (mm)	20, 30, 40
	Set voltage (V)	28.3, 30.3, 32.3

Table 5.2 Factors and levels for experimental design

Factor	Factor name	Level		
		-1	0	1
X1	Progressive angle (^{0})	-10	0	10
X2	CTWD (mm)	20	30	40
X3	Set voltage (V)	28.3	30.3	32.3

5.3 실험 결과 및 고찰

5.3.1 평균용입 D_P와 각변형에 미치는 공정 파라메타의 영향

Table 5.3은 입력변수인 진행각, CTWD, 아크길이에 따른 출력변수인 평균용입 D_P와 각변형의 결과를 나타낸 것이다.

Table 5.3 Experimental result

No.	Natural variables			Response	
	Progressive angle (^{0})	CTWD (mm)	Set voltage (V)	Penetration depth : D_P (mm)	Angular distortion (^{0})
1	-10	20	28.3	1.422363	2.89
2	10	20	28.3	0.95785	2.65
3	-10	40	28.3	0.258881	2.31
4	10	40	28.3	0.087988	2.25
5	-10	20	32.3	1.504031	2.96
6	10	20	32.3	1.48125	2.69
7	-10	40	32.3	0.420219	2.33
8	10	40	32.3	0.339475	2.27
9	-10	30	30.3	0.802794	2.36
10	10	30	30.3	0.430669	2.34
11	0	20	30.3	1.261075	2.71
12	0	40	30.3	0.2416	2.18
13	0	30	28.3	0.4699	2.33
14	0	30	32.3	0.720925	2.47
15	0	30	30.3	0.609556	2.40

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{\kappa} \beta_i \chi_i + \sum_{i \leq j}^{\kappa} \beta_{ij} \chi_i \chi_j + \varepsilon \quad \text{----------(5.1)}$$

$$Y_1 = 2.8052 - 0.1207X_1 - 0.1155X_2 - 0.0423X_3 + 0.0017X_2^2 + 0.0023X_3^2 + 0.0033X_1X_3 - 0.0012X_2X_3 \quad \text{---- (5.2)}$$

$$Y_2 = 15.6162 - 0.0718\,X_2 - 0.7919X_3 + 0.0010\,X_2^2 + 0.0135\,X_3^2 - 0.0004X_2X_3 \quad \text{-----(5.3)}$$

식 (5.1)은 반응표면분석법을 위한 2차 회귀반응식이며, 식 (5.2)와 식 (5.3)은 앞선 Table 4의 결과와 식 (5.1)을 통해서 나타난 회귀식에 대해 Y 값에 영향을 1% 미만으로 미치는 것을 제외시켜 단순화 시킨 회귀식이다.

여기서, Y_1 : 용입

Y_2 : 각변형

X_1 : 진행각

X_2 : CTWD

X_3 : 설정전압

Fig. 5.2 ~ 5.4는 식 (5.2)를 사용하여 진행각, CTWD, 아크길이에 대한 평균용입 D_P를 나타낸 것이다. 진행각이 후진각 10도로 갈수록 평균용입 D_P가 커지고, CTWD가 작아질수록 평균용입 D_P가 커지며, 아크길이가 커질수록 평균용입 D_P가 커졌다. 또한 CTWD가 진행각과 아크길이보다 평균용입 D_P에 큰 영향을 미쳤다.

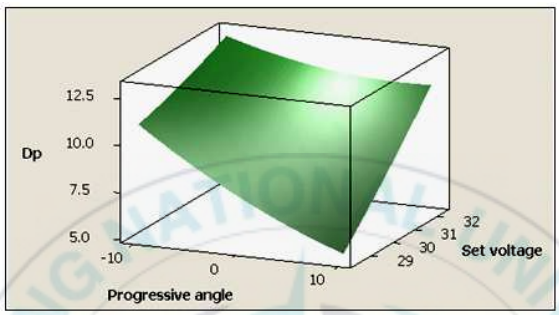


Fig. 5.2 Average penetration to progressive angle and arc length

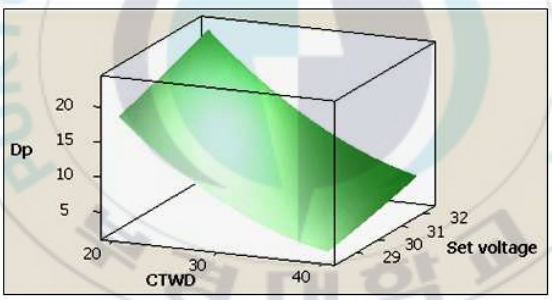


Fig. 5.3 Average penetration to CTWD and arc length

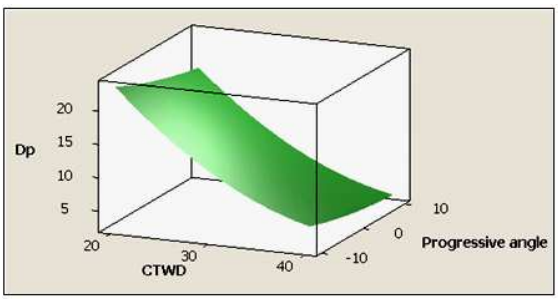


Fig. 5.4 Average penetration to CTWD and progressive angle

Fig. 5.5 ~ 5.7은 식 (5.3)을 사용하여 진행각, CTWD, 아크길이에 대한 각변형을 나타낸 것이다. 진행각이 전진각 10도로 갈수록 각변형이 감소하였고, CTWD가 커질수록 각변형이 감소하였으며, 아크길이가 작아질수록 각변형이 감소하였다. 또한 평균용입 D_P와 마찬가지로 CTWD가 진행각과 아크길이보다 각변형에 큰 영향을 미쳤다.

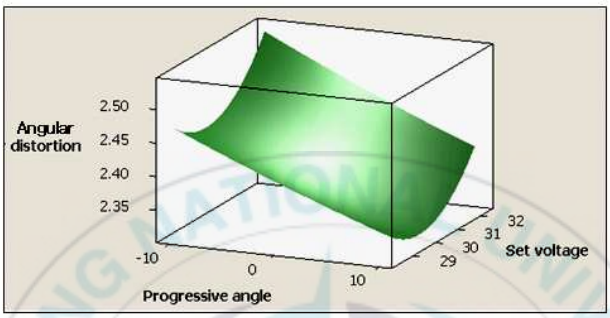


Fig. 5.5 Angular distortion to progressive angle and arc length

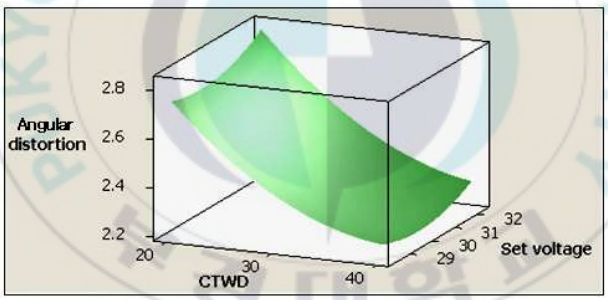


Fig. 5.6 Angular distortion to CTWD and arc length

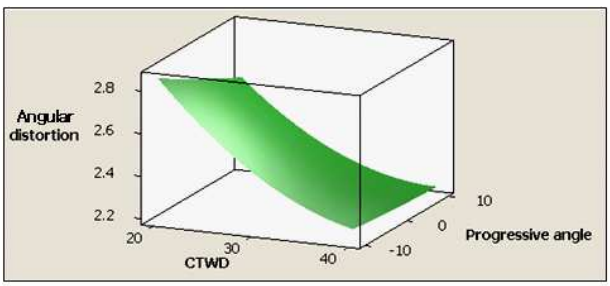


Fig. 5.7 Angular distortion to CTWD and progressive angle

5.3.2 미니탭을 이용한 최적 공정조건의 구현

Fig. 5.8은 앞선 반응에 대한 결과를 통해 최적 공정조건을 나타낸 것이다. 평균용입 D_P의 타겟을 0.6mm, 각변형의 타겟을 0으로 하였을 경우, 둘 모두를 동시에 만족하는 조건, 즉 평균용입 D_P가 양호한 값을 가지면서, 각변형이 최소가 되는 조건으로는 진행각이 전진각 10도, CTWD가 31mm, 전압이 31.7V이다. 이에 대한 결과로 용입 Y_1 = 0.6098, 각변형 Y_2 = 2.3413이 나왔다.

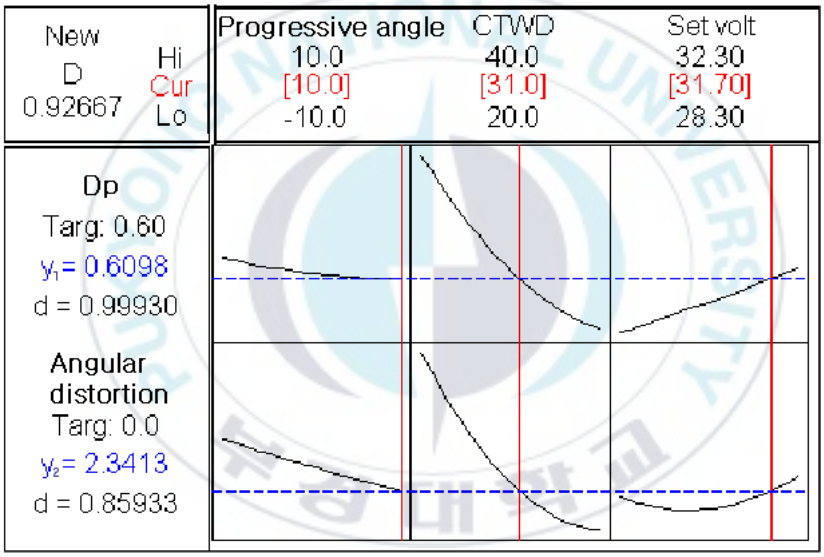


Fig. 5.8 Optimized welding condition by minitab (flux cored wire, 350A, 42cm/min)

5.3.3 최적 필릿 용접 공정조건에서의 평균용입 D_P와 각변형

Table 5.4와 Fig. 5.9는 앞선 최적 공정조건으로 5회 반복 실험한 결과를 나타낸 것이다. 평균용입 D_P의 표준편차가 0.06이 나왔고, 각변형의 변동계수가 1%가 나왔다. 또한 평균용입 D_P의 공정능력 분석결과, 공정능력지수가 1.77이 나옴으로써, 5시그마 수준을 만족하였지만, 좀 더 높은 수준이 되기 위해서는 평균용입 D_P의 표준편차를 줄여야 하고, 이를 위해 자동용접으로 진행될수록 유리할 것이라고 판단된다. 이 때 각변형의 변동계수 역시 줄어들 것이라고 판단된다.

Table 5.4 Experimental result

No.	D_P (mm)	Angular distortion (deg.)
A	0.72	2.35
B	0.63	2.36
C	0.68	2.31
D	0.66	2.34
E	0.78	2.37
Average	0.69	2.35
Standard deviation	0.06	0.03
Coefficient Of Variation	8%	1%

- 평균용입 D_P의 공정능력 분석 -

$$C_P = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = 1.77$$

여기서, C_P : 공정능력지수

σ : 평균용입 D_P의 표준편차

USL : 0.9mm (각변형 大)

LSL : 0.3mm (용입부족 우려)

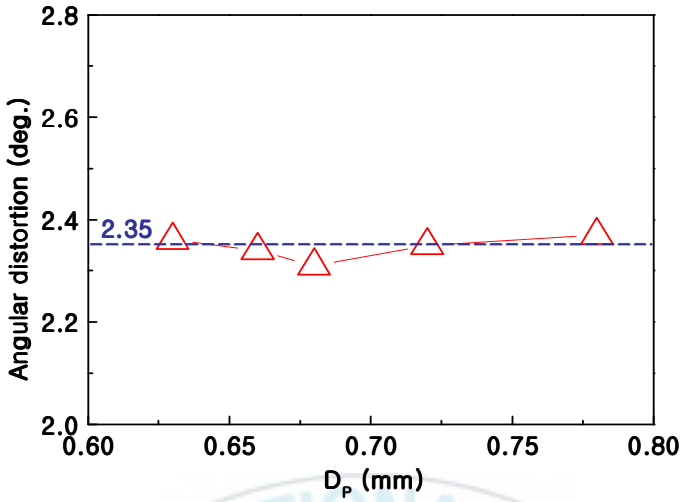


Fig. 5.9 The effects of D_P on angular distortion

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

5.4 결언

일정한 각장을 가지도록 공정설계한 필릿용접부에서 반응표면 분석법을 이용한 최적 공정조건의 개발을 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 반응 표면 분석법을 이용한 최적 공정 조건의 개발에 대한 실험 결과에서 플럭스 코어드 와이어를 사용하여 용접속도 42cm/min, 설정 전류 350A, 각장 8mm의 조건으로 용접할 때, 진행각은 전진각 10도, CTWD는 31mm, 설정전압은 31.7V의 값을 가질 때, 양호한 용입과 각변형 최소의 조건을 만족시켰다.

2) 개발된 최적 필릿 용접 공정 조건으로 반복 실험한 결과 평균용입 D_P의 표준편차가 0.06으로 낮은 값이 나왔고, 이때의 각변형의 변동계수가 1%로 낮게 나옴으로써 개발된 최적 용접 공정조건이 양호하다는 것을 알 수 있었다.

제 6 장 결 론

일정한 각장을 가지도록 공정 설계한 필릿 용접부에 대한 소모성 전극 아크 용접에서 용입의 산포와 각변형을 고려한 최적 필릿 용접 공정을 개발하면서 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) CTWD의 증가에 따라 각변형이 감소하였고, 평균용입 D_P도 감소하는 경향이 나타났다. 이는 CTWD의 증가에 따라 용융효율의 증가, 입열량의 감소 및 와이어 저항 발열항의 증가에 기인한 것이라고 판단된다.

2) 각장을 일정하게 유지하기 위해 용접 전류를 높여 용접속도를 증가시키면, 용접속도의 증가에 따라 각변형이 감소하였고, 평균용입은 증가하는 경향이 나타났다. 이는 용접속도의 증가에 따라 용융효율의 증가와 입열량의 감소로 각변형이 감소하였을 것이라고 판단되며, 전류가 증가했기 때문에 평균용입이 증가하였을 것이라고 판단된다.

3) 아크길이가 증가하면 각변형이 증가하였고, 평균 용입도 증가하는 경향이 나타났다. 이는 아크길이의 증가에 따른 입열량의 증가 때문이라고 판단된다.

4) 반응 표면 분석법을 이용한 최적 공정 조건의 개발에 대한 실험 결과에서 필릿 용접부에 대해 각변형을 최소화 하는 동시에 양호한 용입의 조건을 만족시키는 기법을 개발하였다.

5) 개발된 최적 필릿 용접 공정 조건으로 반복 실험한 결과 평균용입 D_P의 공정능력지수가 1.77로 5시그마를 만족하였고, 이때의 각변형의 변동계수가 1%로 낮게 나옴으로써 개발된 최적 용접 공정 조건이 양호하다는 것을 알 수 있었으며, 평균용입 D_P의 표준편차를 줄이면 각변형의 변동계수를 줄이는 것이 가능할 것이고, 이때 자동용접이 유리할 것이라고 판단된다.

참고 문헌

1. K.H. Tseng, C.P. Chou : The study of nitrogen in argon gas on the angular distortion of austenitic stainless steel weldments, Journal of Materials Processing Technology, 142 (2003) 139-144

2. M. Abid, M. Siddique : Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint, International Journal of Pressure Vessels and Piping 82 (2005) 860-871

3. Tso-Liang Teng, Chin-Ping Fung, Peng-Hsiang Chang, Wei-Chun Yang : Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds, International Journal of Pressure Vessels and Piping 78 (2001) 523-538

4. V. Vel Murugan and V. Gunzaral : Effects of process parameters on angular distortion of gas metal arc welded structural steel plates, Welding journal november 2005 pp.165~171, 2005. 11

5. J.-U. Park, H.-W. Lee, H.-S. Bang : Effect of mechanical constraints on angular distortion of welding joints, science and technology of Welding and Joining, 2002 Vol. 7 No. 4

6. 대한용접학회 : 용접 • 접합 편람, (1998), pp.531-564

7. M. Suban, J. Tusek : Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used, Journal of Materials Processing Technology, 119, (2001), 185-192

8. J. N. Dupont : Thermal efficiency of arc welding processes, Welding journal 1995. 12

9. 김인태 : 플라즈마-탄뎀 용접에 의한 중후판 맞대기 용접 공정의 개발, 부경대학교 대학원 석사학위 청구논문(2006)

감사의 글

2004년 10월, 나의 삶에 새로운 길이 생기기 시작한 시기입니다. 취업을 부탁드리기 위해 조상명 교수님을 찾게 되었고, 그곳에서 교수님과의 인터뷰를 통해 Welding IT Lab.에 들어온 그 순간을 평생 잊지 못할 것입니다. 그리고 2년 남짓 한 지금까지 너무나도 많은 배움들을 얻게 되었습니다. 물론 이제부터 다시 시작이라는 생각이 들기는 하지만, 당시와 비교했을 때 나의 모습에 대해서 스스로 대견함을 느끼게 됩니다.

가장 먼저 고개 숙여 감사드리고 싶은 분은 역시 지도교수이신 조상명 교수님이십니다. 당시 너무나도 서투르고, 많이 부족한 저를 지금 이 자리에 까지 있게 해주신 고마운 분이십니다. 감사합니다.

학부, 대학원 과정동안 많은 지도를 해주신 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 이병우 교수님, 방국수 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님들께 감사의 말씀을 올립니다. 또한 논문 완성을 위해 많은 조언을 해주신 김우열 교수님과 서원찬 교수님께 다시 한번 감사드립니다.

처음 연구실에 들어온 저에게 많은 도움을 주셨던 김덕원, 조성우, 박덕조, 유광선, 김인태, 조진안, 김영주, 김대만 선배님들께 고마움을 전하고 싶습니다. 또한 항상 후배들에게 모범이 되셨던 황동수, 고명훈, 고미혜 박사과정 선배님들께도 많은 고마움을 전하고 싶고, 훌륭하게 박사과정을 마치신 오동수 선배님께도 감사의 말을 전합니다. 2년 동안 같이 수업을 수강한 동기 함효식, 김진욱군에게 특별한 고마움을 전하고 싶습니다. 마지막으로 항상 열심히 노력하시는 추용수, 고찬식, 이정현, 문영덕, 추환수, 김성덕, 박인기, 배광무, 황규민, 윤영현, 김효원 후배님들께 감사의 말씀을 드립니다.

끝으로 항상 묵묵히 지원해 주신 부모님과 가족들에게 감사드립니다.