



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

Submerged arc welding 플럭스 조성 및  
용접조건에 따른 용접금속의 용입특성 연구

A Study on Penetration Characteristic at variation  
of flux composition and welding parameters in  
submerged arc welding

울산대학교 대학원

중공업융합기술공학과

권 대 현

# Submerged arc welding 플럭스 조성 및 용접조건에 따른 용접금속의 용입특성 연구

지도교수 이정구

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2021년 02월

울산대학교 대학원  
중공업융합기술공학과  
권대현

권대현의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 신 상 용 (인)



심사위원 윤 성 욱 (인)



심사위원 이 정 구 (인)



울 산 대 학 교    대 학 원

2021 년 2 월

# 국문 요약

조선산업에서 두 판재를 붙이는 작업은 가장 기본적인 작업으로 용접을 이용한다. 여러 규격에서는 용접 시 요구하는 물성을 만족하기 위해 일정 수준의 용입을 제시하고 있으며 판재의 두께가 두꺼워질수록 요구하는 용입은 깊어진다. 따라서 판재의 두께의 증가에 따라 I, Single Y, Double Y 등 여러 가지 형태의 개선을 제작하여 요구하는 용입을 만족시킨다. 이때 I개선은 Y개선에 비해 비교적 간단한 형상으로 인해 절단 비용이 적다. 따라서 I개선에 적용되는 판재의 두께 범위를 늘리면 판재 절단에 드는 비용을 절감할 수 있을 것이라 예상된다.

용입을 증가시키기 위한 방법으로 용접조건 변경 또는 플럭스 조성 변경이 있다. 용접조건 즉 용접전류를 증가시키거나 용접속도를 감소시키면 입열량의 증가로 인해 용입이 깊어지지만 산화물의 조대화로 인하여 충격 인성이 감소한다고 알려져 있다. 또한 플럭스의 조성을 변경시 용융풀내 산소함량의 증가로 인한 마랑고니 효과로 용융풀의 대류방향이 용융풀의 중심부 쪽으로 바뀌어 용입은 깊어지지만 산화물의 조대화로 인해 마찬가지로 충격 인성이 감소한다고 알려져 있어 두가지 방법만으로는 한계가 있는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 용입에 미치는 용접조건 및 플럭스 조성의 영향을 알아보기 위하여 bead on plate 를 진행하고 다음의 방법으로 용입의 변화를 분석하였다. 실험결과 용접전류가 증가하거나 용접속도가 감소함에 따라 용입은 증가하는 경향을 보였다. 플럭스 성분 중  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  가 증가함에 따라 용융풀 내 산소 함량이 증가하였으며

용입이 증가함을 보였다. Mn 의 경우 유일하게  $\Delta$  값이 음수로 나타났으며 음의 방향으로 증가함에 따라  $\Delta O$  의 값이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 플럭스 내  $SiO_2$  함량이 증가함에 따라 용융된 슬래그 내 Mn 의 활동도가 감소하였으며  $\Delta Mn$  은 음의 방향으로 증가하였다. 플럭스 조성 중  $TiO_2$  의 함량이 많은 경우 용접속도가 증가함에 따라 용해되는 양이 감소하였다. 따라서 플럭스 조성 중  $TiO_2$  의 함량이 적은 경우와 용입의 차이가 크게 달라지지 않았다.

# 목차

<b>1 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구배경.....	1
1.2 연구목적.....	2
<b>2 이론적 배경</b> .....	<b>3</b>
2.1 SAW (Submerged Arc Welding).....	3
2.1.1 SAW 원리 및 특징 .....	3
2.1.2 플럭스.....	5
2.1.3 판재 두께에 따른 개선 형상 .....	7
2.2 용접 조건에 따른 용입 변화.....	8
2.3 플럭스 조성에 따른 용입 변화.....	11
2.3.1 플럭스 조성에 따른 원소이동 변화.....	11
2.3.2 마랑고니 효과.....	14
2.4 $dy/dT$ .....	16
<b>3 실험 방법</b> .....	<b>18</b>
3.1 Bead on Plate .....	18
3.2 용입 측정.....	20
3.3 산화물 분석 .....	20

<b>4</b>	<b>실험결과</b>	<b>21</b>
4.1	$\Delta$ 값 측정	21
4.2	용접부 마크로 조직 관찰	23
4.3	dy/dT	26
4.4	산화물 관찰	27
4.5	용접부 평균조성 측정	27
<b>5</b>	<b>고찰</b>	<b>31</b>
5.1	플럭스 조성에 따른 용입 변화	31
5.1.1	$\Delta$ Mn 값에 따른 용융풀 내 산소함량 변화	31
5.1.2	$\Delta$ Si, $\Delta$ Al 값에 따른 용융풀 내 산소함량 변화	35
5.1.3	용융풀내 산소함량 변화에 따른 표면장력 구배 변화	38
5.2	용접변수에 따른 용입 변화	41
5.2.1	용접변수에 따른 $\Delta$ Ti 변화	41
5.2.2	용접변수에 따른 산화물 변화	43
<b>6</b>	<b>결론</b>	<b>46</b>



## List of figures

Figure 2-1 schematic diagram of SAW .....	4
Figure 2-2 Relationship between plate thickness and groove shape.....	7
Figure 2-3 Relationship between penetration depth and Heat Input.....	9
Figure 2-4 Effect of heat input on inclusion diameter $d_v$ and number of particles per unit volume $N_v$ .....	10
Figure 2-5 Effect of heat input and travel speed on Charpy V notch toughness.....	10
Figure 2-6 schematic diagram of SAW .....	12
Figure 2-7 Schematic of marangoni convection mode in weld pool (a) without SAE, (b) with SAE .....	15
Figure 2-8 Variation of temperature coefficient of surface tension of Fe-O systems as a function of composition and temperature .....	17
Figure 4-1 Macrostructure of weld metal .....	24
Figure 4-2 Influence of welding current and flux composition on the welding penetration ..	25
Figure 4-3 Relationship between surface tension gradient ( $d\gamma/dT$ ) and temperature .....	26
Figure 4-4 SEM images of oxide .....	28
Figure 4-5 Relationship between welding current and oxide particle size .....	29
Figure 5-1 Relationship between $\Delta Mn$ and $\Delta O$ .....	33

Figure 5-2 Relationship between $\Delta Si$ and $\Delta O$ .....	36
Figure 5-3 Relationship between $\Delta Al$ and $\Delta O$ .....	37
Figure 5-4 Schematic of Marangoni effect, depending on the surface tension and temperature of the melt pool. ....	39
Figure 5-5 Schematic illustration of Marangoni effect.....	40
Figure 5-6 Relationship between $\Delta Ti$ and welding current.....	42
Figure 5-7 Relationship between Ti contents in weld metal and welding current .....	44
Figure 5-8 Relationship between Oxide particle size and welding current.....	44
Figure 5-9 Effect of $TiO_2$ composition and welding speed on penetration .....	45

# List of Tables

Table 2-1 Types of flux for carbon steel and low alloy steel .....	6
Table 2-2 Nominal Chemical Compositions of Fluxes (Weight Percent) .....	13
Table 2-3 Chemical Compositions of WMs (Weight Percent) .....	13
Table 3-1 Chemical composition of plate .....	18
Table 3-2 Chemical composition of wire .....	18
Table 3-3 Welding condition .....	19
Table 3-4 Chemical composition of flux .....	19
Table 3-5 Chemical composition of weld metal .....	19
Table 4-1 Delta( $\Delta$ ) quantities of weld metal .....	22
Table 4-2 Average chemical composition of weld metal (wt. %) .....	30
Table 5-1 Compositions of MnO-SiO <sub>2</sub> slags in equilibrium with Mn - Si metls.....	34

# 1 서론

## 1.1 연구배경

조선산업에서 두 판재를 붙이는 작업은 가장 기본적인 작업으로 용접을 이용한다. 여러 규격에서는 용접 시 요구하는 물성을 만족하기 위해 일정 수준의 용입을 제시하고 있으며 판재의 두께가 두꺼워질수록 요구하는 용입은 깊어진다. 따라서 판재의 두께의 증가에 따라 I, Single Y, Double Y 등 여러 가지 형태의 개선을 제작하여 요구하는 용입을 만족시킨다. 이때 I개선은 Y개선에 비해 비교적 간단한 형상으로 인해 절단 비용이 적다. 따라서 I 개선에 적용되는 판재의 두께 범위를 늘리면 판재 절단에 드는 비용을 절감할 수 있을 것이라 예상된다.

용입을 증가시키기 위한 방법으로 용접조건 변경 또는 플럭스 조성 변경이 있다. 용접조건 즉 용접전류를 증가시키거나 용접속도를 감소시키면 입열량의 증가로 인해 용입이 깊어지지만 산화물의 조대화로 인하여 충격 인성이 감소한다고 알려져 있다. 또한 플럭스의 조성을 변경 시 용융풀내 산소함량의 증가로 인한 마랑고니 효과로 용융풀의 대류방향이 용융풀의 중심부 쪽으로 바뀌어 용입은 깊어지지만 산화물의 조대화로 인해 마찬가지로 충격 인성이 감소한다고 알려져 있어 두가지 방법만으로는 한계가 있는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 용입에 미치는 용접조건 및 플럭스 조성의 영향을 알아보기 위하여 bead on plate 를 진행하고 용입의 변화를 분석하였다.

## 1.2 연구목적

본 연구는 용입을 증가시키기 위해서 플럭스 조성과 용접변수를 동시에 조절하였을 때 용입에 미치는 영향에 대해서 조사하기 위해 용접전류를 600,800,1000A 로 용접속도를 50cm/min, 60cm/min 으로 설정하였으며, 3 가지 플럭스 조성을 설정하였다. 이후 용입 분석을 실시하기 위하여 다음과 같은 분석 방향을 설정하였다.

1. 용융풀 내 산소함량을 정량화하기 위해 용접부 ICP 분석 및 플럭스로 XRF 분석을 실시한다.
2. 플럭스 조성에 따른 용융풀내 산소함량의 변화를 보기 위하여  $\Delta$ 를 계산하였으며 표면장력 구배를 계산하였다.
3. 용접변수에 따른 용입 변화를 보기 위하여 산화물의 크기 및 조성을 구한다.

## 2 이론적 배경

### 2.1 SAW (Submerged Arc Welding)

#### 2.1.1 SAW 원리 및 특징

잠호용접 (SAW, submerged arc welding)은 Fig 2-1 에서 보는 바와 같이 전극 와이어가 분말 형태의 플럭스에 묻힌 상태에서 와이어와 모재 사이에 아크가 발생하는 용접법이다[1]. 발생한 아크열은 와이어, 플럭스, 모재를 용융시키며 용융된 플럭스는 슬래그를 형성시키고 용융금속은 용접비드를 형성한다. 분말형태의 플럭스를 사용하므로 아크가 노출되지 않아 열효율이 95% 이상으로 높으며 스파터나 용접 가스 발생이 적어 작업환경이 우수하다[1, 2]. 또한 플럭스가 아크를 보호하고 있어 아크의 안정성을 높여주기 때문에 SAW 에 적용되는 용접전류가 200~3000A 사이로 고전류 용접 기법 이며 이와 같은 특징으로 인해 SAW 는 용착 속도가 빠르고 용입이 깊어 주로 후판을 용접하는데 사용된다[1, 2]. 하지만 SAW 는 플럭스가 묻힌 상태에서 용접을 실시하기 때문에 용접 상태를 육안으로 확인할 수 없으며 자세가 아래 보기 자세로 제한되어 있다는 단점이 존재한다[1].

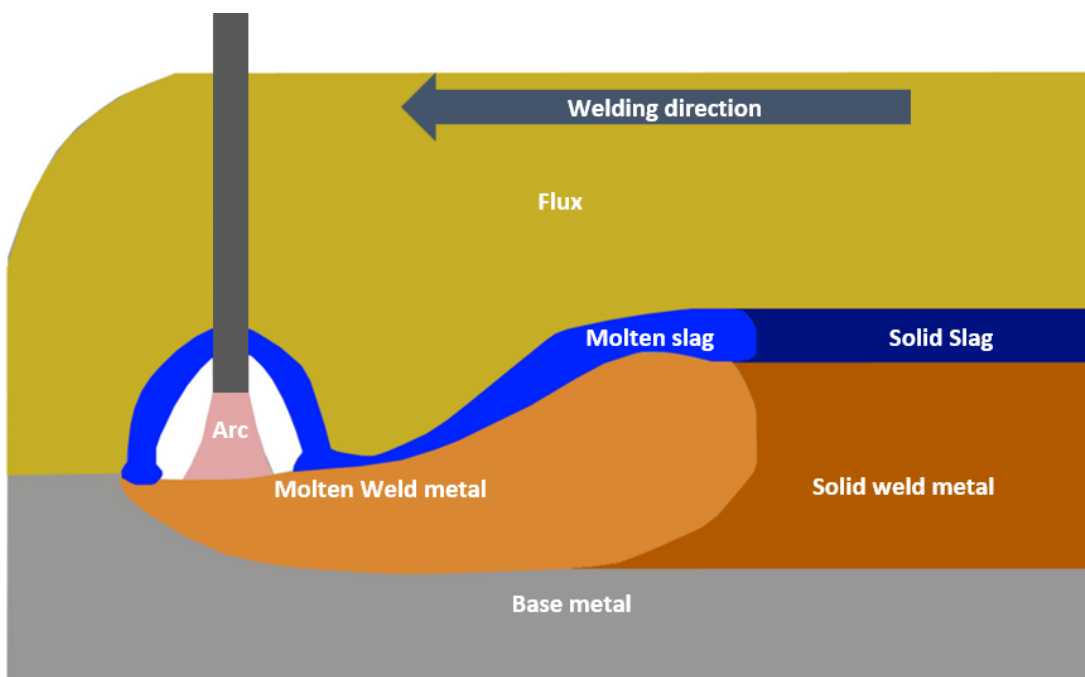


Figure 2-1 schematic diagram of SAW

### 2.1.2 플럭스

플럭스는 광물성 물질에 소량의 합금원소와 탈산제 등이 첨가된 것으로 용접 시 다음과 같은 역할을 한다.

- A. 아크의 안전성 향상
- B. 용융지 및 용적 보호
- C. 미려한 비드표면 형성
- D. 용착금속의 급냉 방지
- E. 보호가스 발생
- F. 용접금속의 성분 제어

플럭스는 제조 방법에 따라 용융형 플럭스와(fused flux) 소결형 플럭스(agglomerated 또는 bonded flux)로 구분된다. 용융형 플럭스는 원료를 혼합하여 용융시킨 후 응고시켜 분쇄한 것으로 화학조성이 균일하고 값이 저렴하지만 고온에서 용융되는 제조 과정으로 인해 탈산제나 합금원소의 첨가에 제한을 받는다는 단점이 있다. 소결형 플럭스는 물유리(silicate)로 각 원료성분을 접착시킨 후 원료 성분이 분해되지 않는 온도 범위인 400~1000°C에서 소결하고 분쇄하여 제조한다. 소결형 플럭스는 용착금속의 성분조절이 용이한 장점이 있지만 흡습성이 높아 보관 및 사용 시 주의가 필요하다. KS D 7012에서는 용융형 플럭스와 소결형 플럭스의 화학 성분 차이를 Table 2-1 과 같이 구분하고 있다.



Table 2-1 Types of flux for carbon steel and low alloy steel

	Chemical composition (wt.%)			
	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> +MnO+TiO <sub>2</sub>	CaO+MgO	Fe
Fused Flux	50<	-	-	Bal.
	55>	-	-	Bal.
	55>	60<	12-45	Bal.
	-	50>	22<	Bal.
	-	50<	-	Bal.
Agglomerated Flux	-	-	50>	10>
	-	-	40-80	10>
	-	-	50>	15-60
	-	-	40-80	15-60

### 2.1.3 판재 두께에 따른 개선 형상

ISO 5187 규격에 따르면 용접 후 결함을 측정하는 데 있어 일정 이상의 용입을 요구하고 있다. 따라서 Fig 2-2 과 같이 판재의 두께에 따라 적절한 그루브를 설계하여 용접을 실시한다. 양면 1run SAW 의 경우 판재의 두께에 따라 요구되는 용입을 만족시키기 위하여 I 개선, V 개선 등으로 제작하고 있으며 V 개선은 I 개선에 비해 형태가 복잡하므로 개선을 제작하는 비용이 증가하게 된다.

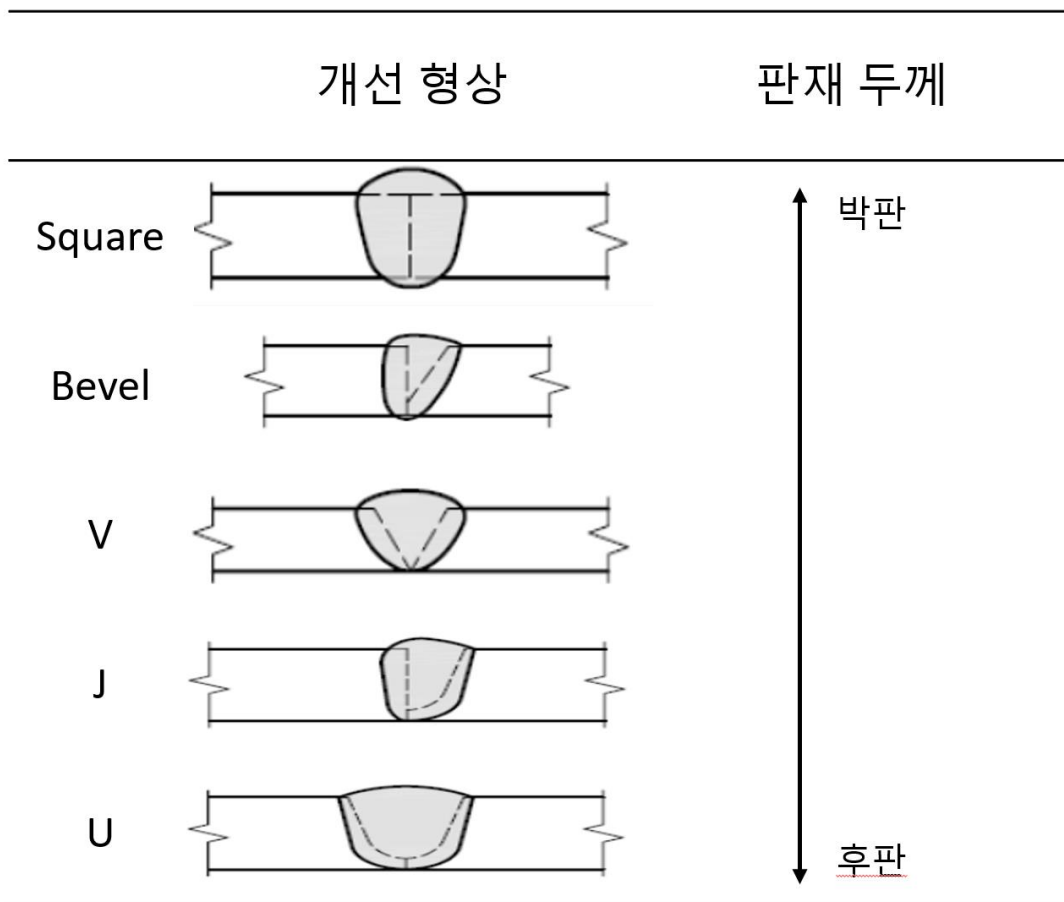


Figure 2-2 Relationship between plate thickness and groove shape

## 2.2 용접 조건에 따른 용입 변화

용접 전류, 전압, 속도 등 입열량에 영향을 미치는 용접 변수에 대한 용입의 변화는 여러 가지 선행 논문이 존재한다. S. Shen 에 따르면 용접전류가 증가하고 용접속도가 감소하는 등의 방법으로 입열량이 증가하게 되면 용착량이 증가함에 따라 용입이 증가하는 경향을 보였다[3]. R.S Chandel 또한 용접전류가 증가함에 따라 용입이 증가하는 경향을 보였다[4]. 이외에 여러 연구에서 입열량의 증가에 따른 용입의 증가를 관찰하였다[5-7]. 이처럼 용접변수 즉 용접전류 및 용접속도에 따라 입열량은 증가하는 반면 물성의 감소도 확인할 수 있었다. Beomjoo Kim 에 따르면 입열량이 증가하면 개재물의 크기가 증가하고 이에 따라 침상형 페라이트(AF, acicular ferrite)의 핵생성이 감소하였고 샤르피 충격에너지의 감소로 이어졌다[8]. Viano 또한 입열량이 증가함에 따라 개재물의 크기가 증가하였고 이에 따라 AF 의 감소로 이어졌으며 샤르피 충격에너지가 감소했다고 보고하였다[9]. 이 외에 용접전류가 증가함에 따라 언더컷, 오버랩 등의 결함이 생성되었으며, 열영향부 (HAZ, heat affected zone) 영역의 확대로 인해 물성이 감소함을 확인하였다.

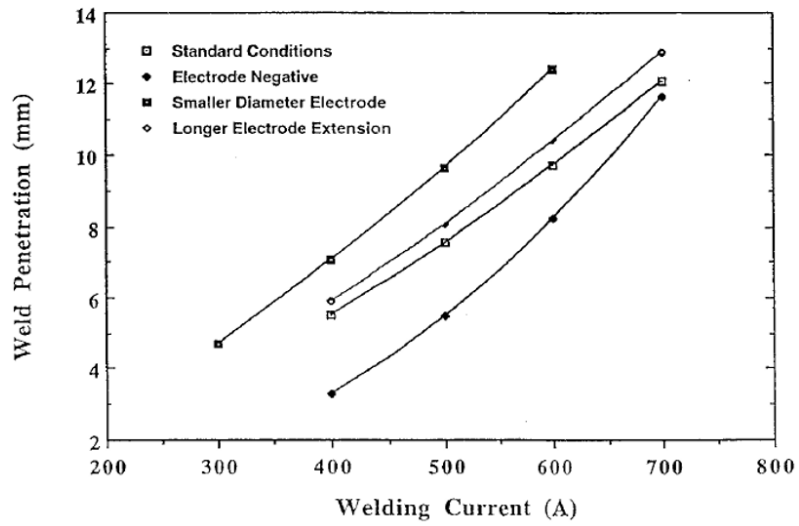
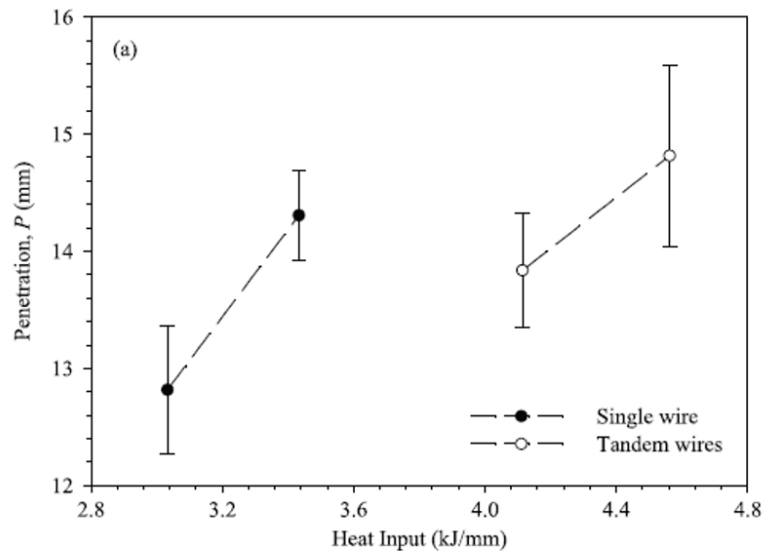


Figure 2-3 Relationship between penetration depth and Heat Input

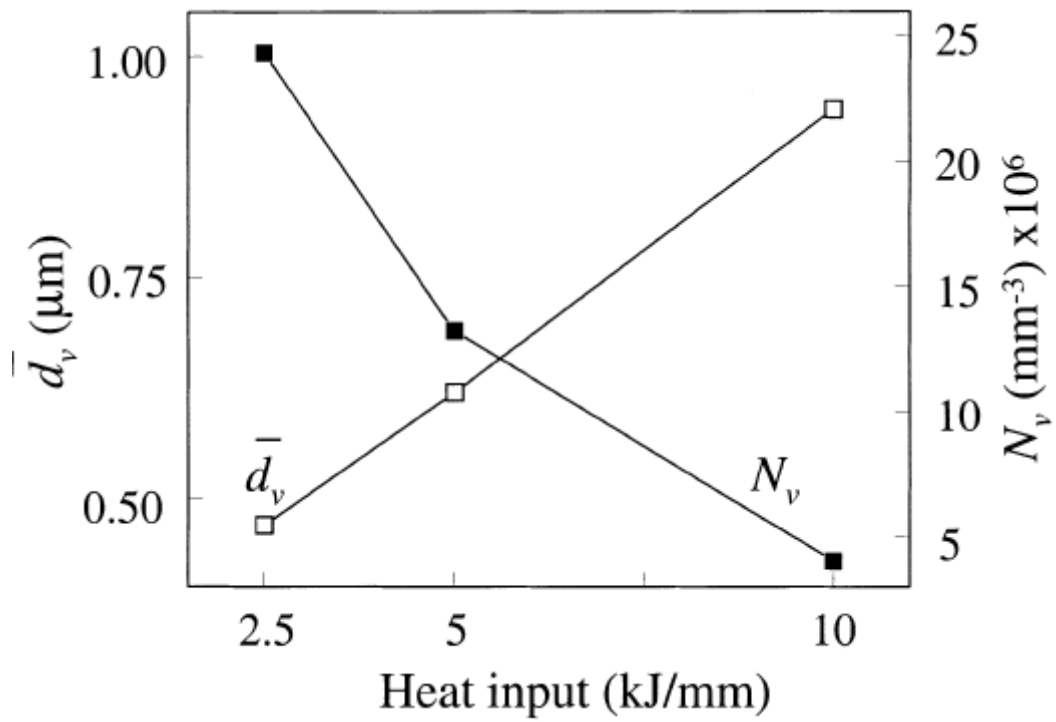


Figure 2-4 Effect of heat input on inclusion diameter  $\bar{d}_v$  and number of particles per unit volume  $N_v$

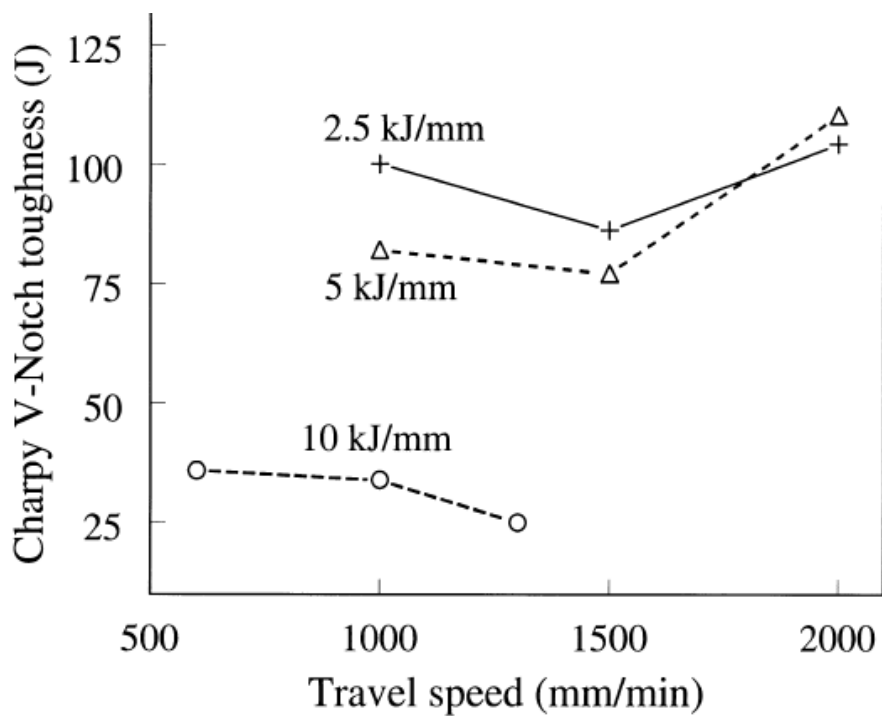


Figure 2-5 Effect of heat input and travel speed on Charpy V notch toughness

## 2.3 플럭스 조성에 따른 용입 변화

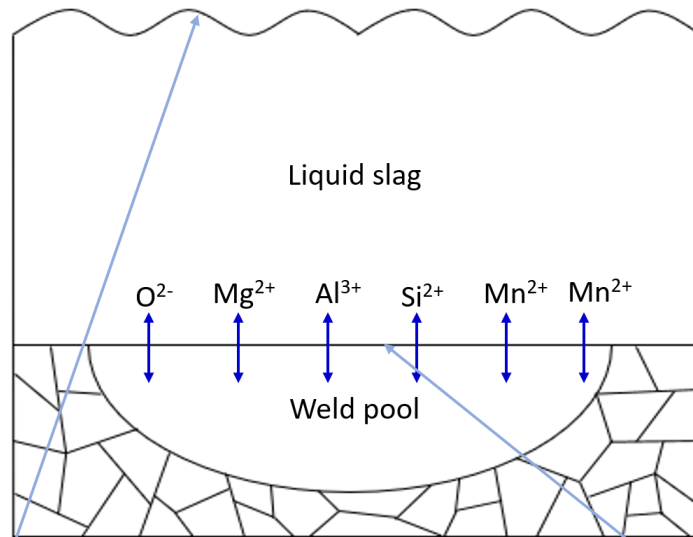
### 2.3.1 플럭스 조성에 따른 원소이동 변화

Figure 2-6 은 SAW 용접 중 아크의 열로 인해 슬래그와 용접금속 사이에서 일어나는 반응을 나타낸다. 용접 중 아크에 의해서 플럭스가 용융되고 용융된 용접금속과 접촉하게 된다. 서로 다른 조성을 가진 두 액체가 만나면서 원소의 이동이 일어나게 되는데 원소가 용융된 플럭스 및 용융된 용접금속에서 이동한 정도를  $\Delta$ 로 정의하며  $\Delta$ 값이 양수이면 슬래그에서 용접부로 원소가 이동하며 음수이면 반대로 이동했다는 것을 의미한다[10-12].

$\Delta$  = analyzed composition - expected composition

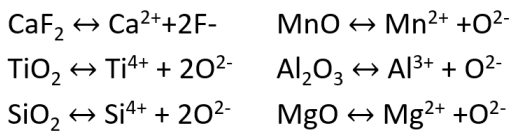
$$\text{Expected composition} = \frac{\text{dilution}}{100} \times \text{base metal composition} + \frac{100 - \text{dilution}}{100} \times \text{wire composition}$$

이와 같이  $\Delta$ 값에 따라 슬래그와 용접금속 사이에서 원소의 이동방향이 다르게 나타나는 이유는 용융플과 용융된 슬래그 사이에서 각 원소별 활동도 차이에 의해서 나타나는 것으로 알려져 있다. 여러 선행연구에서 용접 후 플럭스 조성에 따른  $\Delta$ 를 계산한 결과는 각각 상이한 결과를 보였다.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ 의 함량을 달리하여 용접을 실시한 결과  $\Delta$ 의 부호는 항상 같은 것을 확인하였다[13]. 이를 Table 2-2 와 Table 2-3 으로 정리하였다[13]. 반면 P.KANJILAL 에 의하면  $\Delta$ 을 통해 경험식으로서 용융플내 산소함량을 플럭스의 종류에 따라서 달라질 수 있음을 나타내었다[14]. 이를 통해 여러 개의 산화물로 구성된 플럭스를 이용하여 용접할 경우 산화물 한 개가 용접금속의 산소함량에 미치는 영향은 산화물의 구성에 따라 달라졌다[14].



플럭스의 용해

아크의 열원에 의해 플럭스 용해



이온의 이동

용융풀과 용융된 슬래그의 원소별 활동도 차이에 의해 이동방향 결정

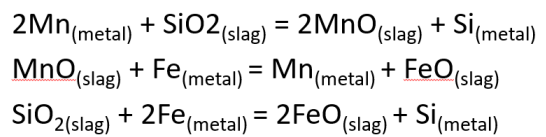


Figure 2-6 schematic diagram of SAW

**Table 2-2 Nominal Chemical Compositions of Fluxes (Weight Percent)**

Weld metals	Fluxes	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
WM-1	F-1	95	5
WM-2	F-2	90	10
WM-3	F-3	85	15
WM-4	F-4	80	20
WM-5	F-5	70	30
WM-6	F-6	60	40

**Table 2-3 Chemical Compositions of WMs (Weight Percent)**

Weld metals	Fluxes	Weld metal compositions								
		(Si) <sub>A</sub>	(Si) <sub>N</sub>	ΔSi	(Mn) <sub>A</sub>	(Mn) <sub>N</sub>	ΔMn	(O) <sub>A</sub>	(O) <sub>N</sub>	ΔO
WM-1	F-1	0.235	0.089	0.146	1.350	1.602	- 0.252	0.009	0.003	0.006
WM-2	F-2	0.252	0.091	0.161	1.350	1.612	- 0.262	0.011	0.003	0.008
WM-3	F-3	0.277	0.096	0.181	1.340	1.594	- 0.254	0.010	0.003	0.007
WM-4	F-4	0.292	0.101	0.191	1.300	1.585	- 0.285	0.011	0.003	0.008
WM-5	F-5	0.298	0.100	0.198	1.270	1.589	- 0.319	0.012	0.003	0.009
WM-6	F-6	0.305	0.093	0.212	1.280	1.598	- 0.318	0.018	0.003	0.015



### 2.3.2 마랑고니 효과

마랑고니 효과는 액체 표면에 온도 혹은 농도의 불균일로 인해 표면장력의 평형이 무너져서 발생하는 현상으로[15] 표면장력을 감소시키는 표면활성원소(SAE, surface active element)에 의해서 발생한다[16-20]. Fig 2-7 을 보면 용융풀 내에 표면활성 원소가 없는 (a) 상태일 때를 보면 용융풀의 표면에서 중심부는 가장자리에 비해 아크의 영향을 많이 받기 때문에 상대적으로 고온인 상태이다. 이로 인해 용융풀 표면에서 중심부는 가장자리에 비해 원자간 인력이 약해지며 결과 표면장력은 용융풀 표면에서 가운데 위치한 부분이 가장자리에 비해 상대적으로 낮은 상태가 된다. 결과 표면장력이 약한 용융풀 표면의 중심에서 가장자리로 이동하게 된다[21-23]. 즉 표면장력 구배( $dy/dT$ )가 음수인 상태가 된다. 반면 (b)를 보면 용융풀 내에 존재하고 있는 SAE 는 상대적으로 표면장력이 높은 곳에 Segregation 되어 표면장력을 감소시키기 때문에[15, 24] (a)와는 다르게 용융풀 표면에서 중심부가 가장자리에 비해 상대적으로 높은 표면장력을 가지게 된다. 따라서 용융풀 내에서 유동은 용융풀 표면의 중심부에서 가장자리로 이동하며 (a)에 비해 상대적으로 깊은 용입을 가지게 되며 표면장력의 구배는 양수가 된다. 따라서 플럭스 함량을 조절하여 용융풀내 산소함량을 증가시키면 용입은 깊어질 수 있다. 하지만 플럭스 내 산소 함량이 많아지면 개재물의 수가 증가하여 샤프피 충격 에너지를 감소시킨다고 보고되었다[25-27].

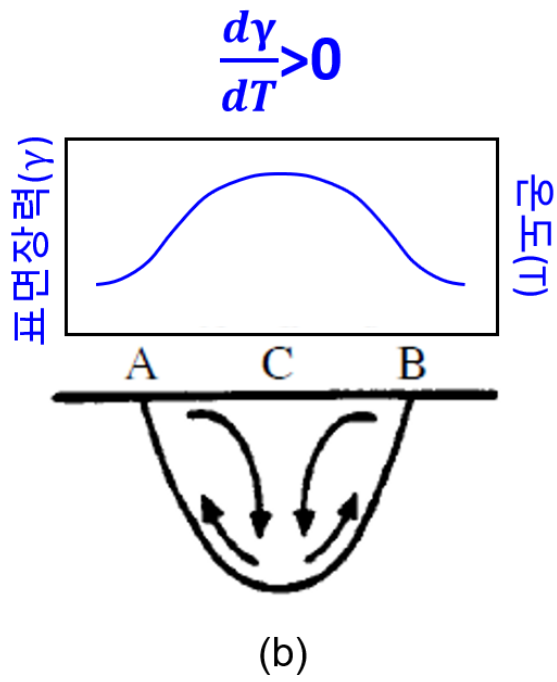
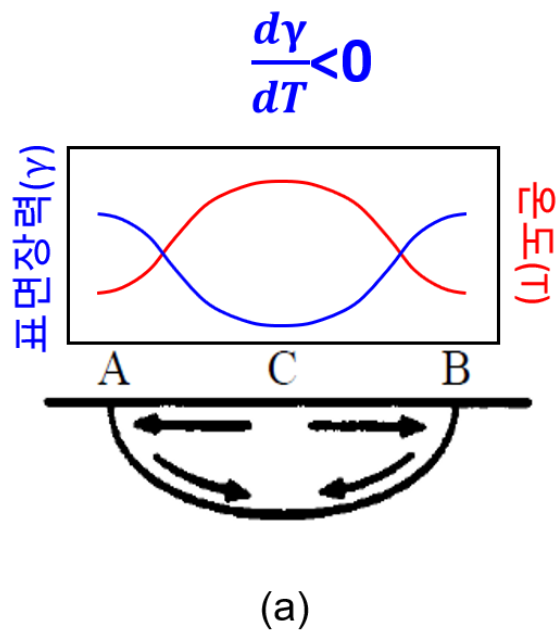


Figure 2-7 Schematic of marangoni convection mode in weld pool (a) without SAE, (b) with SAE

## 2.4 $dy/dT$

SAE, 즉 산소로 인한 용융풀 내 표면장력 구배 ( $dy/dT$ ) 변화를 계산하기 위하여 다양한 식이 제시되었다. Belton 은 SAE 의 존재 시 액체 금속의 surface tension 을 설명하는 식을 개발하였다[28, 29].

$$\gamma^{\circ} - \gamma = RT\gamma_s \ln(1 + Ka_i)$$

여기서  $\gamma^{\circ}$ 는 순수한 금속의 용점에서의 표면장력,  $K$  는 용질이 표면에 잘 붙는 정도를 나타낸 흡착계수,  $a_i$ 는 화학종  $i$ 의 활동도,  $A$  는 상수를 나타낸다.

이를 이용하여  $\gamma$ 를 유도하고

$$\gamma = \gamma^{\circ} - RT\gamma_s \ln(1 + Ka_i)$$

온도에 대해 미분하여 온도에 따른 표면장력 계수를 계산하였다.

$$\frac{d\gamma}{dT} = A - RT\gamma_s \ln(1 + Ka_i) - \frac{Ka_i}{1 + Ka_i} \frac{T_s}{T}$$

위의 식을 이용하여 Fe-O 계에서 온도에 따른 표면장력 구배를 계산하였으며 Fig 2-8 에 나타냈다.

## Fe-O

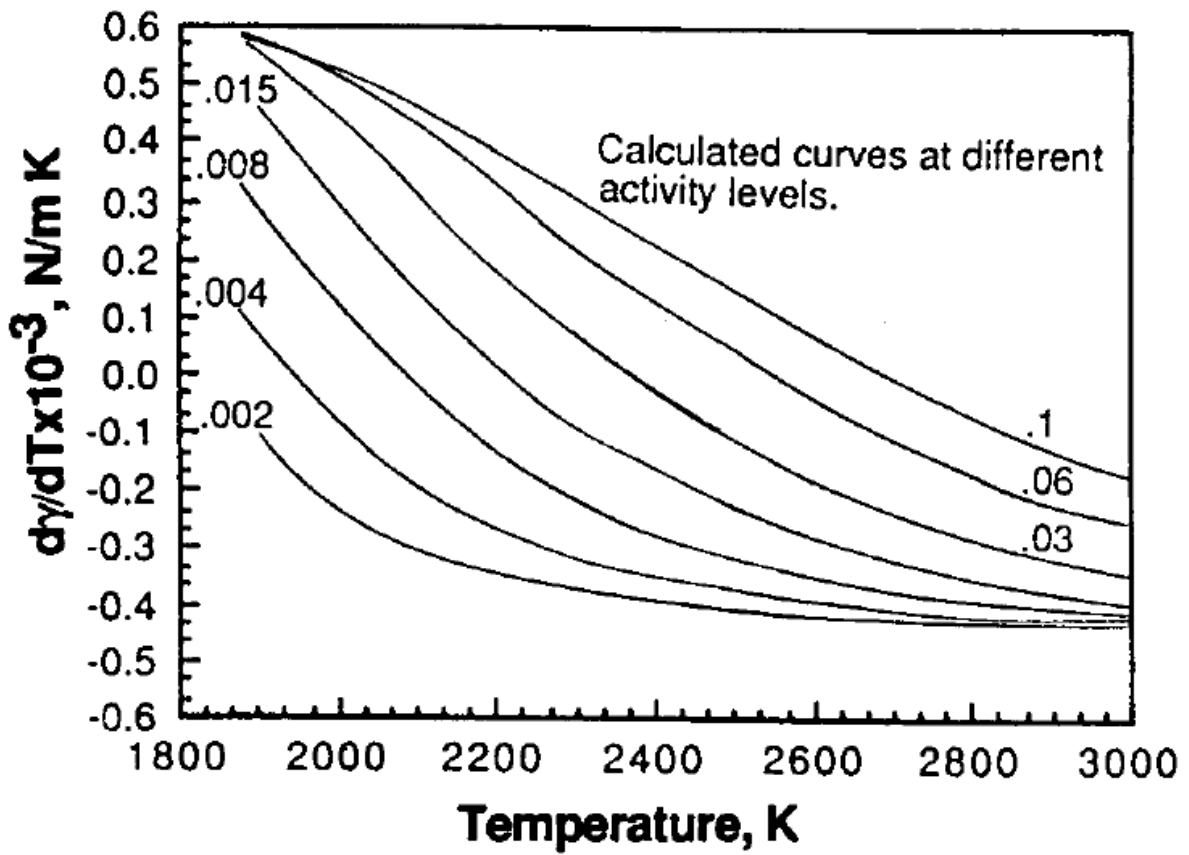


Figure 2-8 Variation of temperature coefficient of surface tension of Fe-O systems as a function of composition and temperature

### 3 실험 방법

#### 3.1 Bead on Plate

Bead on Plate 를 실시하기 위해 22mm 두께의 판재, 4.8Φ 의 전극을 준비하였으며 판재 및 전극의 화학 조성을 Table 3-1, Table 3-2 에 각각 정리하였다. 용접조건은 용접전류를 600A, 800A, 1000A 로 용접속도를 50cm/min, 60cm/min 으로 설정하여 SAW 용접을 진행하였으며 이에 따른 입열량을 Table 3-3 에 표기하였다. Table 3-4 에 표기된 A, B, C 플럭스를 이용하여 Bead on plate 를 진행하였으며 이후 용접부의 산소함량에 따라 A21, B18, C16 으로 표기하였다. 플럭스의 성분을 측정하기 위해 용접부를 절단하였으며 x 선 형광분석기(XRF, X-ray fluorescence spectrometer)을 이용하였다.

**Table 3-1 Chemical composition of plate**

Chemical composition (wt.%)														
C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Ti	Cr	Ni	Mo	V	P	S	Fe
0.15	1.6	0.34	0.046	0.042	0.013	0.012	0.012	0.011	0.011	0.002	0.0001	0.005	0.004	Bal.

**Table 3-2 Chemical composition of wire**

Chemical composition (wt.%)				
C	Si	Mn	P	S
0.12	0.03	1.93	0.016	0.009

**Table 3-3 Welding condition**

Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)
600	36	50	25.9
		60	21.6
800	36	50	34.5
		60	28.8
1000	36	50	43.2
		60	36.0

**Table 3-4 Chemical composition of flux**

	Chemical composition (wt.%)						
	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Etc.
A21	8.48	40.2	14.3	12.4	4.12	3.42	20.55
B18	21.1	19.3	23.3	15.0	1.37	4.86	17.27
C16	24.5	16.4	20.2	18.5	4.01	0.02	19.28

**Table 3-5 Chemical composition of weld metal**

	Chemical composition (wt.%)												
	C	Mn	Si	Ca	Mg	Al	Cu	Ti	Cr	Mo	V	O	Fe
A21	0.13	1.4	0.38	0.00073	0.00023	0.012	0.026	0.018	0.011	0.0016	0.018	0.021	Bal.
B18	0.09	1.4	0.34	0.00062	0.00035	0.014	0.024	0.008	0.012	0.0017	0.017	0.018	Bal.
C16	0.12	2	0.16	0.00089	0.00024	0.014	0.015	0.016	0.014	0.0013	0.001	0.016	Bal.

## 3.2 용입 측정

Bead on plate 를 실시 후 시편을 절단하였으며 용접부를 조연마, 미세연마 순으로 연마한 후 3% Nital 용액을 이용하여 에칭한 이후에 ISO 5817 에 따라 비드폭, 여성고, 용입을 측정하였다.

## 3.3 산화물 분석

용접한 시편의 용접부를 조연마, 미세연마 순으로 연마한 후 에칭을 하지 않고 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscopy)로 관찰하여 산화물의 크기를 측정하였으며 산화물의 성분을 분석하기 위하여 x-선 분광분석 (EDS, energy dispersive x-ray spectroscopy)를 이용하여 진행하였다.

## 4 실험결과

### 4.1 $\Delta$ 값 측정

플럭스 종류(A21, B18, C16), 용접전류(600A, 800A, 1000A), 용접속도(50 cm/min, 60cm/min)를 달리하여 용접한 후  $\Delta$ 값을 계산하였으며 이를 Table 4-1 에 정리하였다. 결과 다른 값과는 다르게  $\Delta$ Mn 값은 음수를 나타냈다. 또한 A21, B18, C16 순으로  $\Delta$ O 값이 증가하였다. 이는 용접부의 산소 함량이 높아짐에 따라 용접부에서 용융풀로 산소가 이동하는 양이 증가했다는 것을 의미한다. 또한 Ca 와 Mg 의 경우 용접조건 및 플럭스 조건에 따라 이동하는 원소의 량의 차이가 없는 것으로 나타났다.

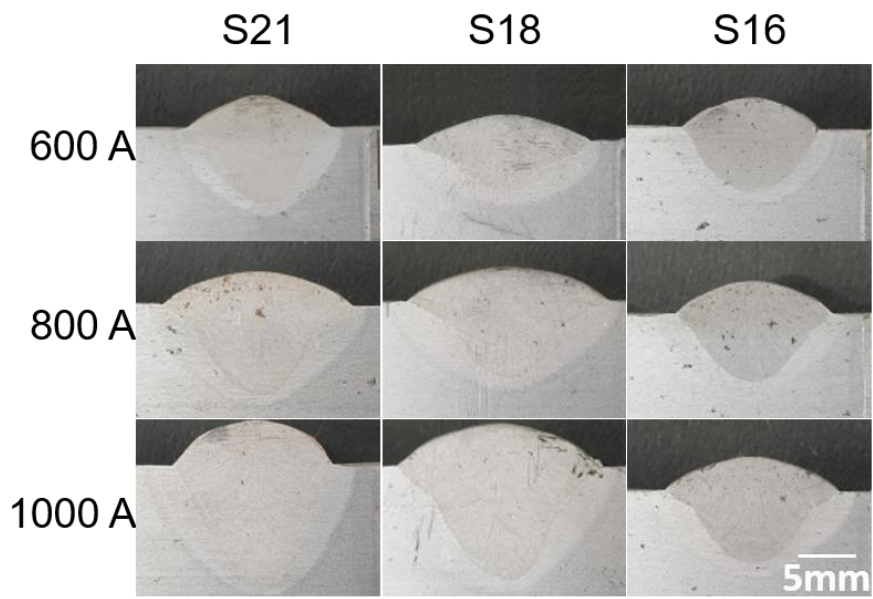


			(wt. %)						
	Welding speed (cm/min)	Welding current (A)	$\Delta$ Mn	$\Delta$ Si	$\Delta$ Ca	$\Delta$ Mg	$\Delta$ Al	$\Delta$ Ti	$\Delta$ O
A21	50	600	-0.3112	0.1596	0.0007	0.0002	0.0040	0.0098	0.0167
		800	-0.3049	0.1444	0.0007	0.0002	0.0033	0.0104	0.0164
		1000	-0.2748	0.1385	0.0007	0.0002	0.0031	0.0106	0.0160
	60	600	-0.3333	0.1652	0.0007	0.0002	0.0042	0.0081	0.0171
		800	-0.3310	0.1608	0.0007	0.0002	0.0038	0.0095	0.0168
		1000	-0.0265	0.1630	0.0007	0.0002	0.0041	0.0104	0.0164
B18	50	600	-0.3306	0.1627	0.0007	0.0002	0.0041	0.0083	0.0164
		800	-0.3148	0.1478	0.0007	0.0002	0.0035	0.0084	0.0162
		1000	-0.3115	0.1447	0.0007	0.0002	0.0033	0.0085	0.0159
	60	600	-0.3547	0.1853	0.0007	0.0002	0.0050	0.0083	0.0168
		800	-0.3247	0.1571	0.0007	0.0002	0.0039	0.0084	0.0160
		1000	-0.3197	0.1525	0.0007	0.0002	0.0037	0.0084	0.0159
C16	50	600	-0.3376	0.1478	0.0007	0.0002	0.0044	0.0101	0.0162
		800	-0.3148	0.1692	0.0007	0.0002	0.0035	0.0108	0.0160
		1000	-0.3131	0.1509	0.0007	0.0002	0.0003	0.0110	0.0158
	60	600	-0.3306	0.1627	0.0007	0.0002	0.0041	0.0088	0.0164
		800	-0.3148	0.1478	0.0007	0.0002	0.0035	0.0094	0.0159
		1000	-0.3115	0.1447	0.0007	0.0002	0.0033	0.0103	0.0155

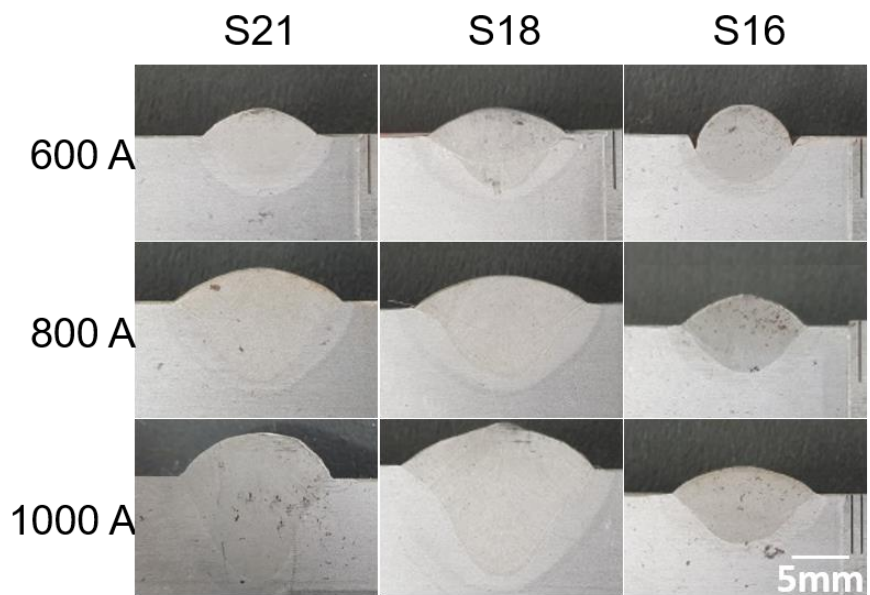
**Table 4-1 Delta( $\Delta$ ) quantities of weld metal**

## 4.2 용접부 마크로 조직 관찰

Figure 4-1 은 SAW 용접 이후 시편을 만들어서 마크로 조직을 관찰한 결과이다. 이를 이용하여 비드폭, 용입을 측정하여 이를 Figure 4-2 로 정리하였다. A, B, C 플렉스를 사용한 경우 용접속도를 50cm/min 으로하여 용접을 실시하였을 경우 동일 용접전류에서 A21 의 용입이 제일 깊었으며 C16 의 용입이 제일 낮았다. 이는 A21, B18, C16 순으로  $\Delta O$  값 증가에 따라 용융풀 내 산소함량 증가에 따른 마랑고니 효과로 용입이 깊어진 것으로 생각할 수 있다. 또한 용접속도를 50cm/min 으로 하여 용접하였을 경우 용접전류가 증가함에 따라 용입이 깊어짐을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 선행 논문에 조사한 내용처럼 용접전류가 증가할수록 입열량이 증가하여 용입이 커지는 현상과 동일한 경향을 보였다[3]. 하지만 용접속도를 60cm/min 으로 하여 용접을 하였을 경우 모든 용접전류 조건에서 B18 의 용입이 A21 또는 C16 에 비해 거의 감소하지 않는 현상이 나타났다.



(a) 50 cm/min



(b) 60 cm/min

Figure 4-1 Macrostructure of weld metal

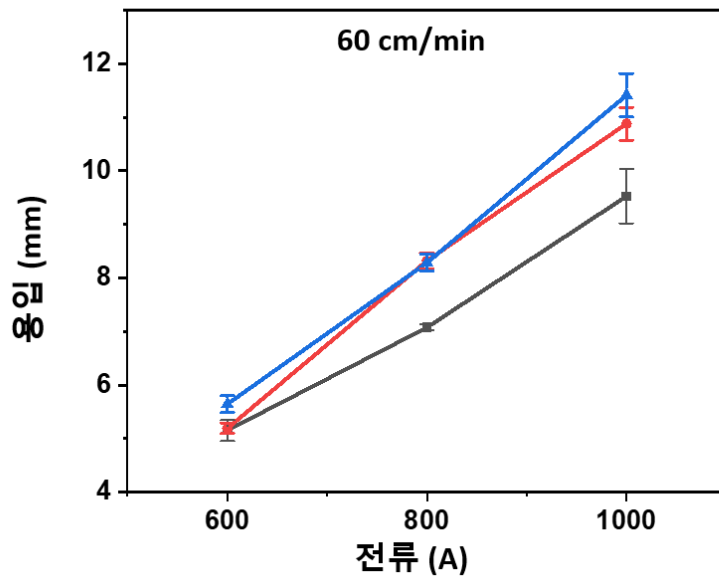
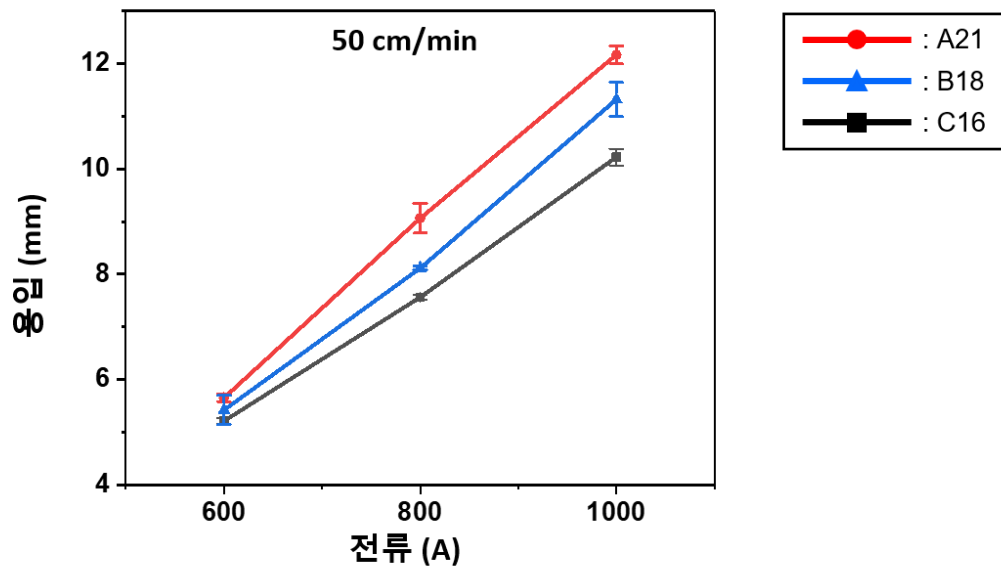


Figure 4-2 Influence of welding current and flux composition on the welding penetration

### 4.3 $dy/dT$

용접부의 산소함량에 따라서 용융풀내 표면장력 구배( $dy/dT$ )의 변화를 알아보기 위해 용접부 ICP 분석을 통하여 산소함량을 알아본 후 식을 이용하여 계산하였다. 결과 용융풀내 산소함량이 높을수록 표면장력 구배는 전체적으로 높았다. 하지만 표면장력의 구배가 용융풀 전체에 양 또는 음으로 표현되는 것이 아니라 용융풀에 표면장력 구배가 양과 음이 동시에 존재하였다.

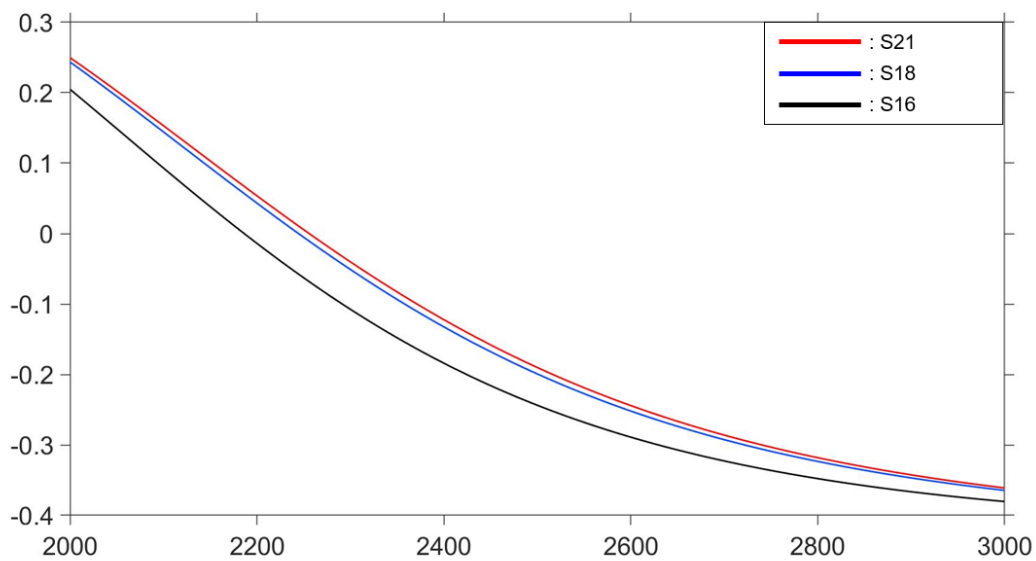


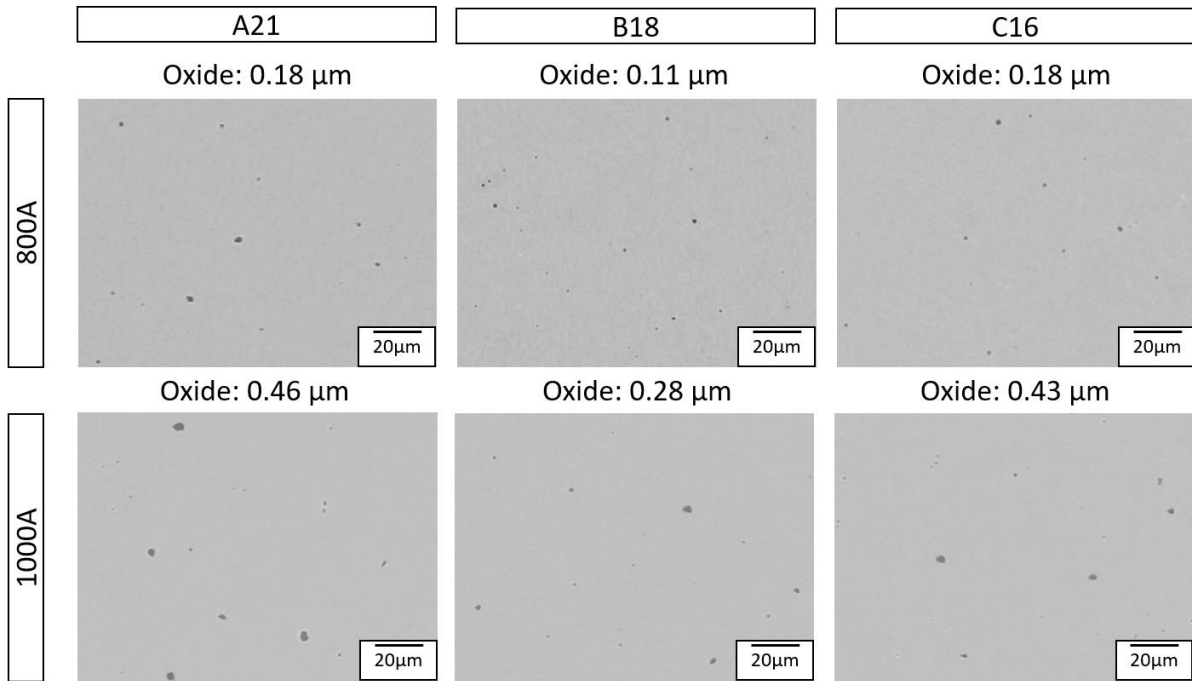
Figure 4-3 Relationship between surface tension gradient ( $dy/dT$ ) and temperature

## 4.4 산화물 관찰

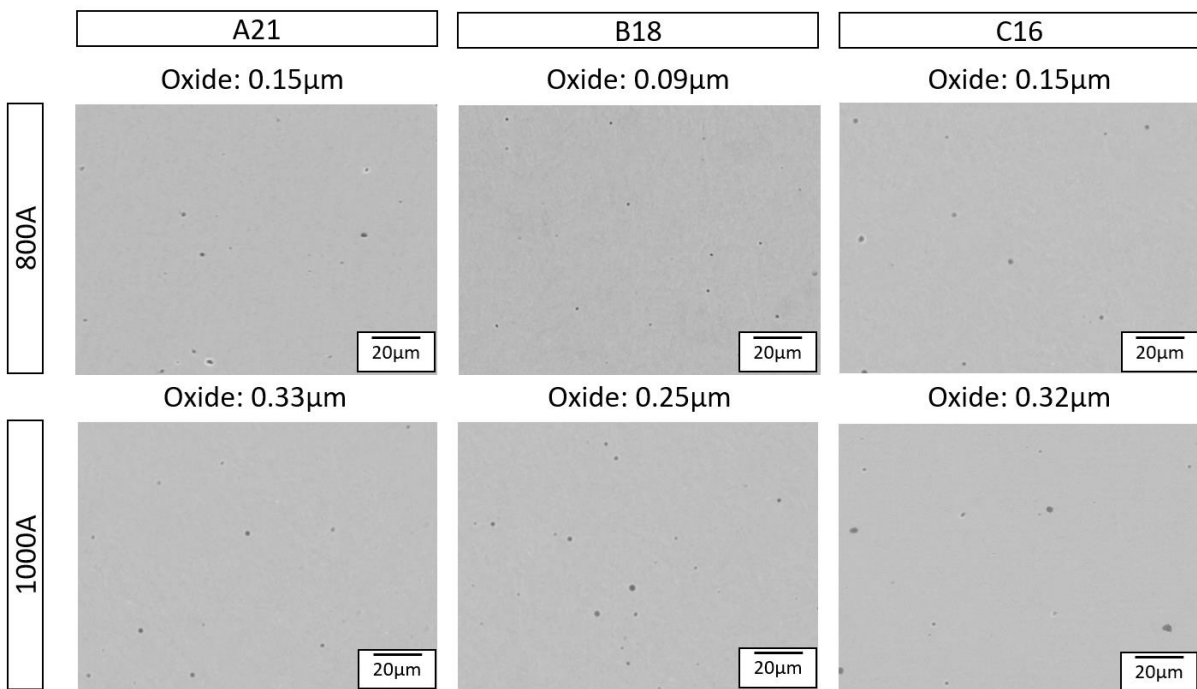
Figure 4-4 는 용접조건과 플럭스 조성에 따른 SEM 이미지를 나타냈으며 이를 이용하여 산화물의 크기를 측정하여 Figure 4-5 로 정리하였다. 결과 산화물의 크기는 A21, B18, C16 순으로 컸다. 또한 용접전류가 증가함에 따라 그 크기는 증가하는 경향을 보였다. 하지만 용접속도가 감소함에 따라 B18 의 산화물의 크기는 감소하지 않았다.

## 4.5 용접부 평균조성 측정

용접조건에 따라 산화물의 변화를 알아보기 위해 Table 4-2 와 같이 플럭스, 용접속도, 용접전류를 바꾸어 용접을 하였을 경우 용접부의 조성을 측정하였다. 결과 Ti 함량이 B18 의 경우 전체적으로 A21 과 C16 에 비해 작은 것을 확인하였으며 용접속도가 감소함에 따라 A21 과 C16 에 있는 Ti 의 함량이 감소함을 확인하였다.



(a) 50cm/min



(b) 60cm/min

Figure 4-4 SEM images of oxide

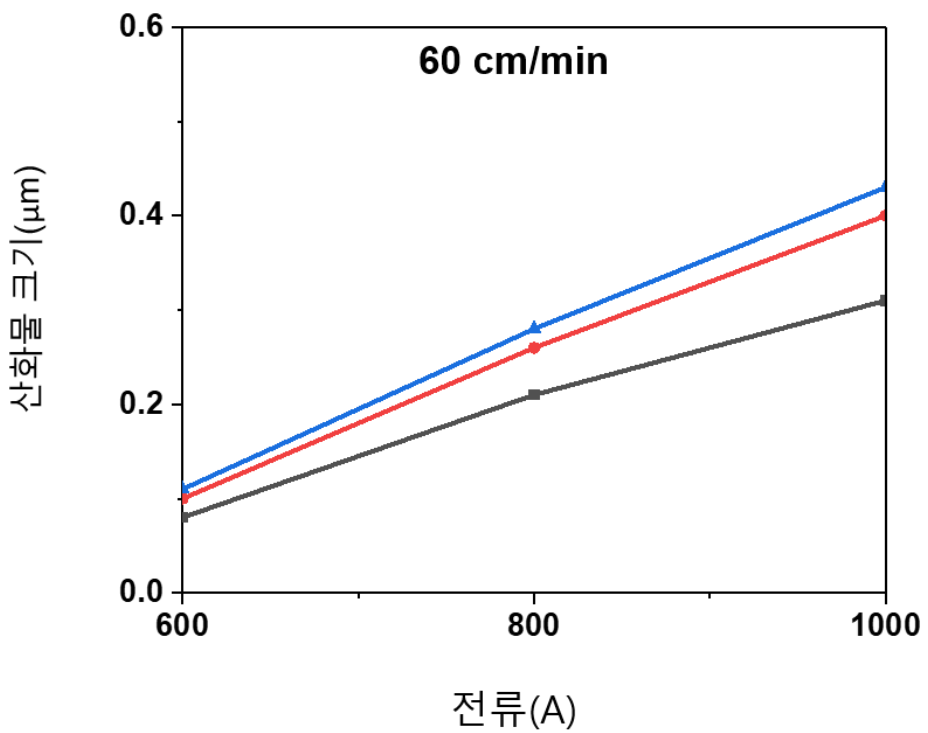
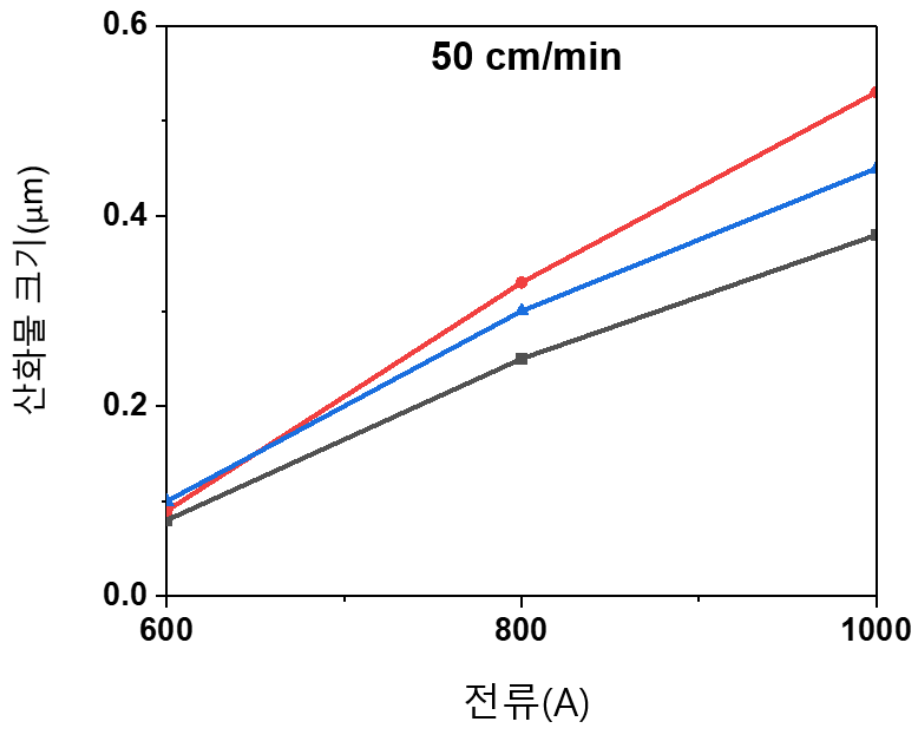


Figure 4-5 Relationship between welding current and oxide particle size



**Table 4-2 Average chemical composition of weld metal (wt. %)**

	Welding speed (cm/min)	Welding current (A)	O	Mg	Al	Si	Ti	Mn
A21	50	800	21.91	0.23	9.48	0.64	14.68	4.66
		1000	10.28		2.79	0.31	17.74	6.25
800		25.58	0.43	22.32	0.27	2.66	14.75	
1000		17.63	0.39	11.84	1.27	2.05	11.78	
C16	60	800	19.28		2.79	0.31	17.74	6.25
		1000	37.28	0.20	13.96	0.40	22.23	5.41
800		24.24		20.41	0.29	2.75	4.88	
1000		10.61		7.17	0.90	3.61	4.05	
B18	60	800	28.31	0.16	17.71	2.45	2.85	13.75
		1000	28.69	0.23	17.05	2.81	3.27	14.31
800		20.81	0.26	8.34	0.36	3.80	4.84	
1000		23.34		18.76		3.50	3.68	

## 5 고찰

### 5.1 플럭스 조성에 따른 용입 변화

#### 5.1.1 $\Delta Mn$ 값에 따른 용융풀 내 산소함량 변화

Table 4-1 에서 계산한  $\Delta$ 값 중에  $\Delta O$  와  $\Delta Mn$  의 상관관계를 조사하여 Figure 5-1 에 나타내었다. 그 결과 모든 용접조건이나 플럭스 종류에 상관없이 Mn 만 음수를 나타냈다. 따라서 3 가지 플럭스의 종류에 상관없이 플럭스를 첨가 시 MnO 를 제외한 각 산화물은 용융되어 용융풀로 이동한다는 의미가 된다. 또한 동일한 플럭스에서  $\Delta Mn$  의 값이 음으로 증가함에 따라 용융풀에서 슬래그로 이동하는 Mn 의 양이 증가하였으며 반대로 슬래그에서 용융풀로 이동하는 산소의 양은 증가했다는 것을 의미한다. 플럭스 중 MnO는 염기도를 증가시키는 산화물로 용융풀내 산소 함량을 증가시켜주는 산화물 중 하나이다. 따라서  $\Delta Mn$  의 값이 작을수록 Mn 이 용융된 용접부에서 슬래그로 이동하며 용융풀의 산소 함량을 증가시켜준다[24, 30]. 하지만 플럭스 B 의 경우 MnO 의 함량이 제일 높음에도 불구하고  $\Delta Mn$  의 값이 A21 보다 높음을 알 수 있다. 일반적으로 플럭스 중 MnO 가 적을수록  $\Delta Mn$  의 값은 음의 방향으로 증가하게 되며 이에 따라  $\Delta O$  의 값이 증가하게 되어 용접부내 산소 함량이 증가하게 된다. 이는 결국 마랑고니 효과에 의해 용입의 증가를 보이게 된다. 하지만 선행연구에 따르면 Mn-Si 이원계에서 Si 의 함량이 증가하게 되면 Mn 의 활동도를 감소시키게 되는 연구 결과를 확인할 수 있으며 Table 5-1 에 정리하였다[31]. 따라서 플럭스 중  $SiO_2$  함량이 가장 높은 B 의 경우 A 보다 MnO 의 함량이 높음에도 불구하고 용융된 슬래그에서 Mn 의 활동도가 감소하였기 때문에

슬래그에서 용융물로 이동하는 Mn의 함량이 비교적 적어지게 된다. 이로 인해 MnO의 함량이 B가 A에 비해 더 높음에도 불구하고  $\Delta O$ 의 크기는 B18보다 A16이 더 커질 수 있다.

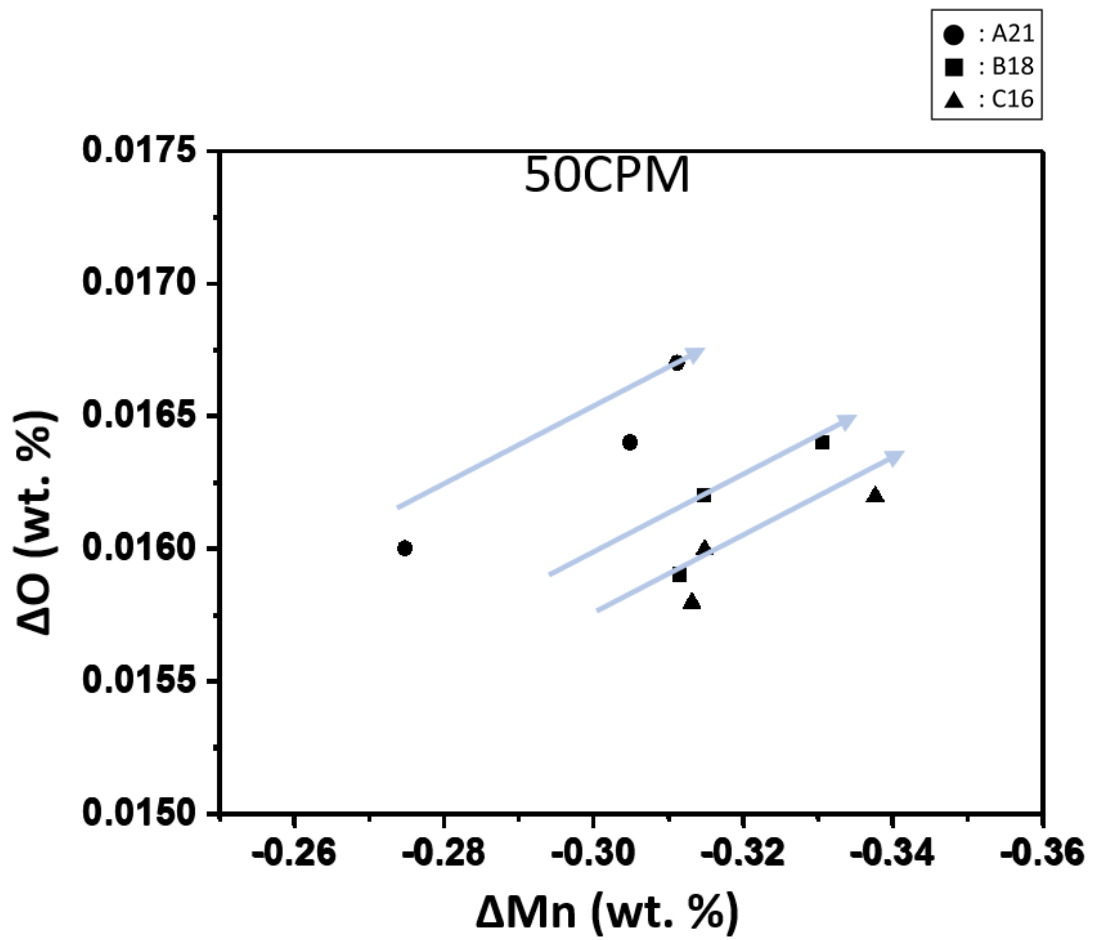


Figure 5-1 Relationship between  $\Delta Mn$  and  $\Delta O$

**Table 5-1 Compositions of MnO-SiO<sub>2</sub> slags in equilibrium with Mn - Si metls**

<b>MnO-SiO<sub>2</sub> slags</b>				
<b>a<sub>MnO</sub></b>	<b>a<sub>SiO<sub>2</sub></sub></b>	<b>(MnO) (mass %)</b>	<b>(SiO<sub>2</sub>) (mass %)</b>	<b>Phase</b>
1	0	100	0	Solid MnO
0.8950	0.0484	74.64	25.36	Liquid phase
0.4275	0.2201	66.58	33.42	
0.1491	0.9564	52.65	47.35	

### 5.1.2 $\Delta Si$ , $\Delta Al$ 값에 따른 용융플 내 산소함량 변화

Figure 5-2 에  $\Delta Si$  에 따른  $\Delta O$  의 변화에 대해 정리하였다. 결과 Mn 과 마찬가지로 동일 플럭스 조건에서  $\Delta Si$  가 높아질수록  $\Delta O$  값이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 앞서 언급한 것처럼 Si 의 활동도는 Mn 에 영향을 받기 때문에 플럭스 A 의 경우  $SiO_2$  의 함량이 C 에 비해 낮음에도 불구하고  $\Delta Si$  가 높아질 수 있다. 또한 Figure 5-3 에  $\Delta O$  와  $\Delta Al$  의 상관관계를 조사하여 정리하였다. Al 의 경우에도 동일 플럭스 조건에서  $\Delta Al$  이 높아짐에 따라  $\Delta O$  의 값이 증가하였다.

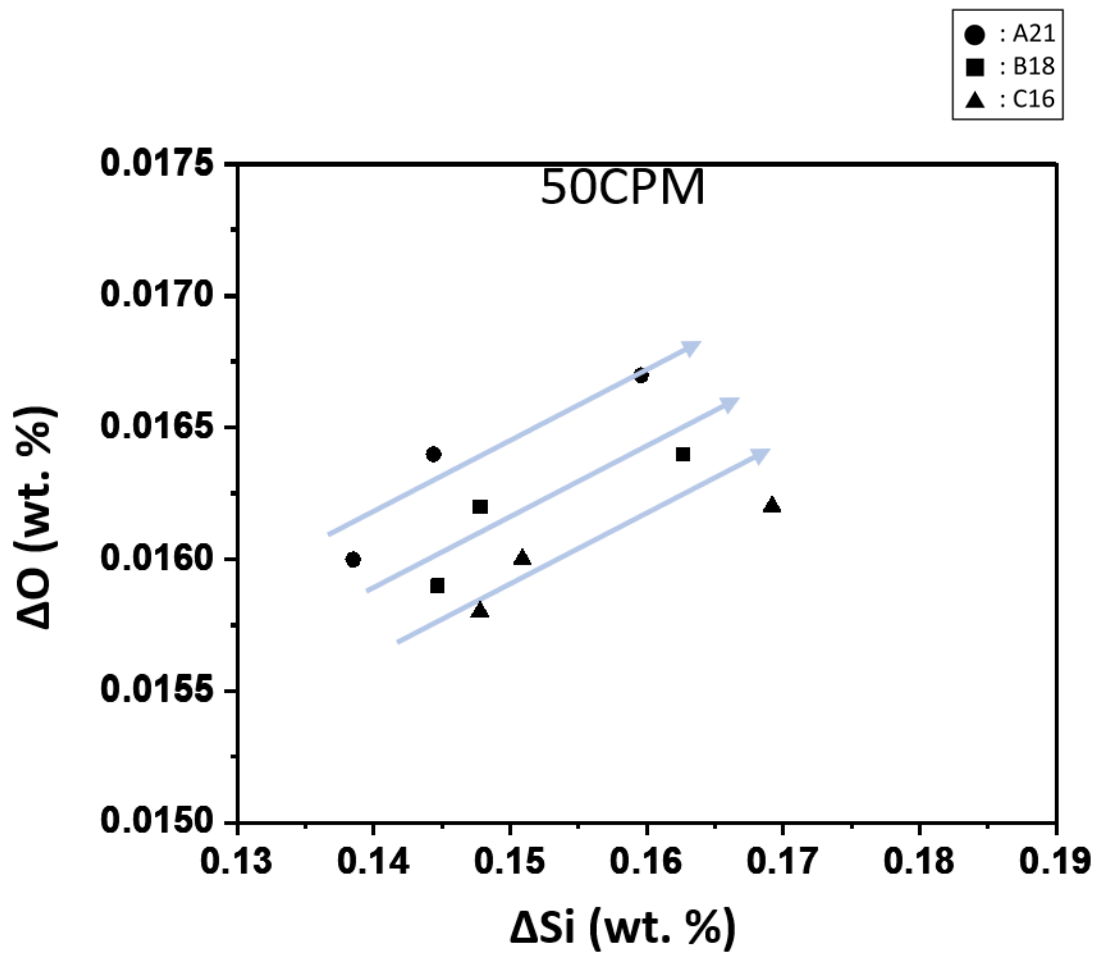


Figure 5-2 Relationship between  $\Delta Si$  and  $\Delta O$

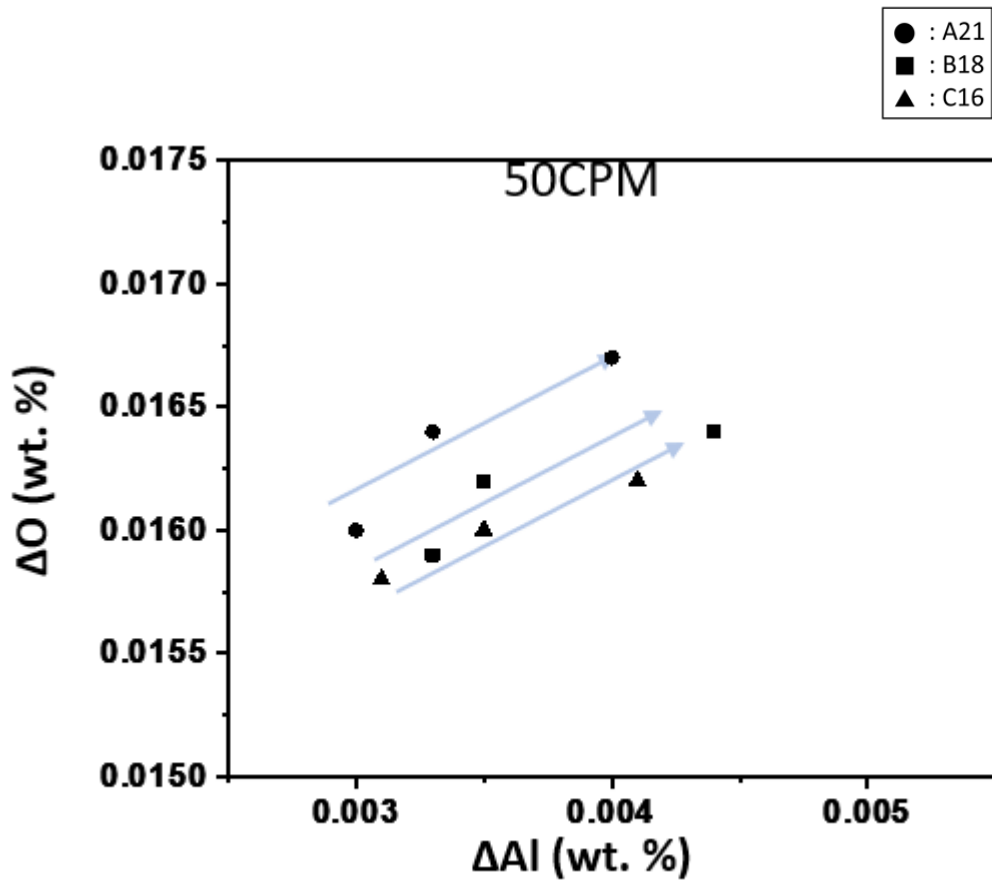


Figure 5-3 Relationship between  $\Delta Al$  and  $\Delta O$



### 5.1.3 용융풀내 산소함량 변화에 따른 표면장력 구배 변화

4.2 장에서 언급했듯이 A21, B18, C16 순서대로 용접부 내에 산소함량이 달랐으며 이에 따라 표면장력 구배가 전체적으로 A21 높아졌다. 하지만 표면장력 구배가 온도에 따라 양에서 음으로 변했는데 이는 Fig 5-4 처럼 온도가 증가함에 따라 표면장력이 증가하다가 감소하는 현상을 나타내며[32, 33] 온도의 증가에 따라 원자간 평형거리가 계속 증가하여 표면장력이 감소하는 것이 원인으로 나타났다[24].

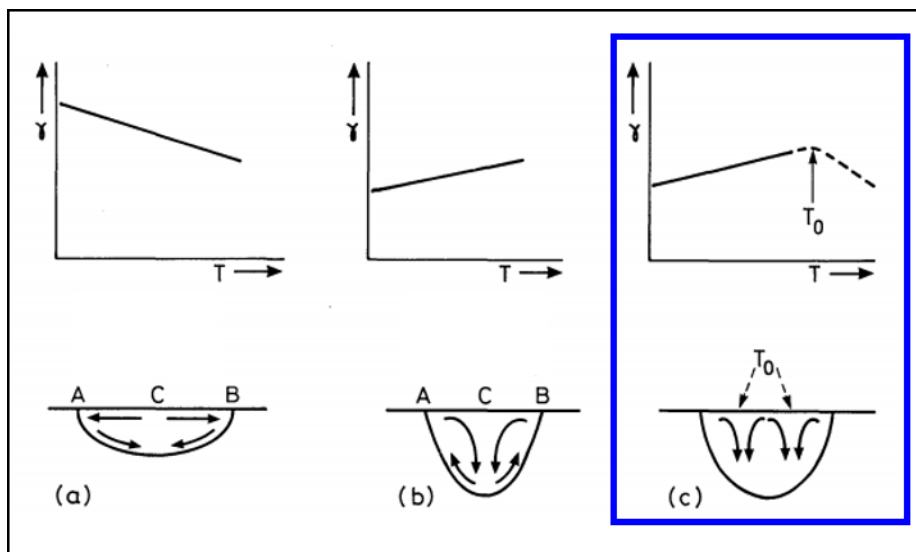


Figure 5-4 Schematic of Marangoni effect, depending on the surface tension and temperature of the melt pool.

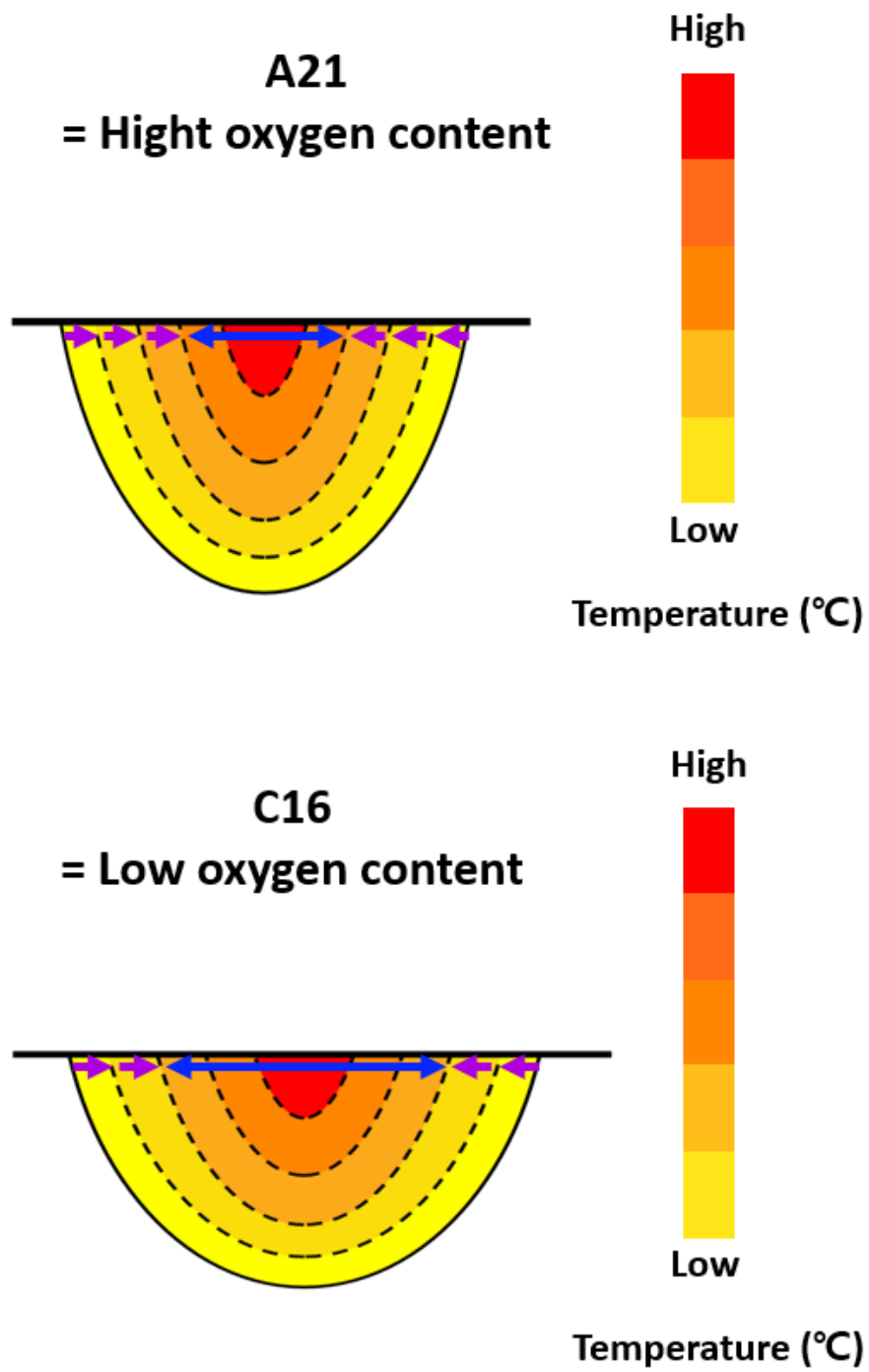
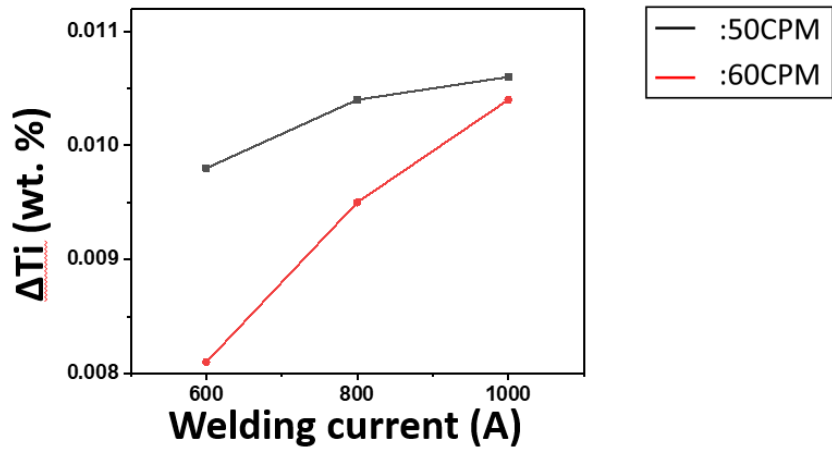


Figure 5-5 Schematic illustration of Marangoni effect

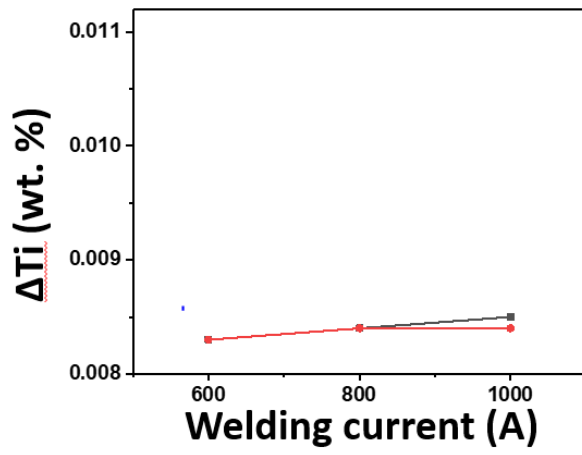
## 5.2 용접변수에 따른 용입 변화

### 5.2.1 용접변수에 따른 $\Delta Ti$ 변화

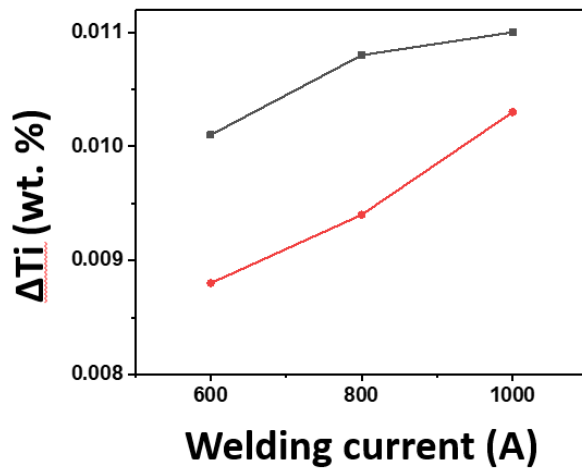
A21, B18, C16 에서  $\Delta Ti$  값에 따른 전류의 변화를 Figure 5-6 에 나타냈다. 용접속도를 50cm/min 으로 하여 용접을 실시하였을 경우 A21 와 C16 은 B18 에 비해  $TiO_2$  함량이 높기 때문에  $\Delta Ti$  의 값이 높았다. 이는 A21 과 C16 의 경우 B18 과 비교하였을 경우 슬래그에서 용융물로 이동하는 Ti 함량은 증가함을 의미한다. 반면 용접속도가 60cm/min 으로 증가하게 되면 B18 의 경우 A21 과 C16 에 비해  $\Delta Ti$  의 값이 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 차이를 보이는 이유는  $TiO_2$  가 입열량에 따라 녹는 양이 다르기 때문이다[34-36]. A21 과 C16 은 B18 에 비해 상대적으로 많은 양의  $TiO_2$  를 함유하고 있으며 이로 인해 입열량이 감소하면 B18 에 있는 적은 양의  $TiO_2$  는 대부분 용해되겠지만 A21 또는 C16 에 있는 많은 양의  $TiO_2$  는 입열량이 감소함에 따라 적어지게 된다. 이와 같은 이유로 A21 과 C16 은 입열량에 따라 플럭스 중  $TiO_2$  의 녹는 양이 달라지게 되며 이는 용융된 용접부와 접하게 되었을 경우 Ti 가 용융된 용접부로 이동하는 양에 영향을 미치게 될 것이다.



(a) A21



(b) B18



(c) C16

Figure 5-6 Relationship between  $\Delta Ti$  and welding current

## 5.2.2 용접변수에 따른 산화물 변화

용접 변수에 따라  $TiO_2$ 의 용해된 정도를 확인하고자 Figure 5-5와 같이 용접전류에 따른 용접부에서 Ti의 함량을 조사하였다. A21와 C16의 경우 용접속도가 50cm/min으로 용접을 하였을 경우 A21와 C16에서 Ti 함량이 높아졌으며 용접속도가 60cm/min으로 증가함에 따라 Ti 함량이 감소하였다. 반면 B18의 경우 용접속도가 증가함에도 불구하고 용접부 내 Ti 함량이 거의 변하지 않았다. 선행연구에 따르면 Ti 함량이 증가함에 따라 산화물의 크기 및 분율은 증가함을 알 수 있으며[37-39] 이를 확인하기 위해 용접전류에 따른 산화물의 크기를 Figure 5-6에 정리하였다. 결과 A21과 C16의 경우 용접속도가 50cm/min일 때 보다 60cm/min일 때 산화물의 크기가 현저하게 감소함을 확인하였다. 반면 B18의 경우 용접속도에 따라 산화물의 크기가 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

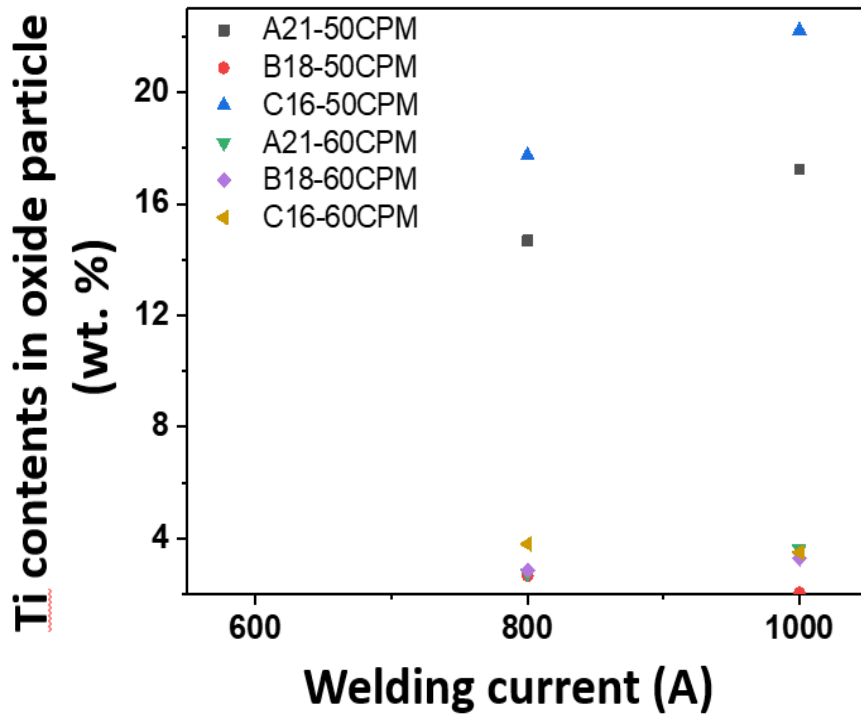


Figure 5-7 Relationship between Ti contents in weld metal and welding

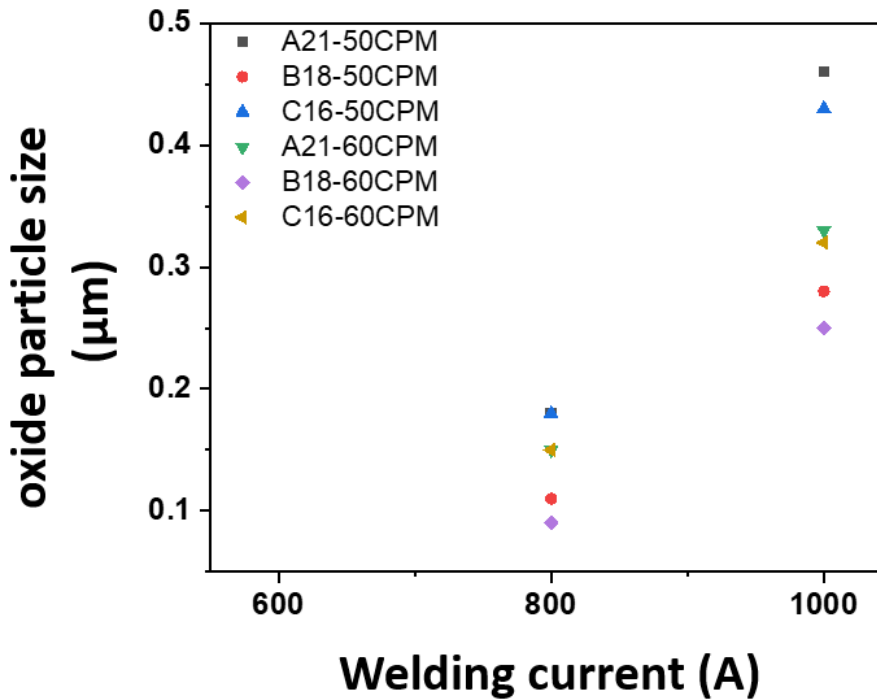
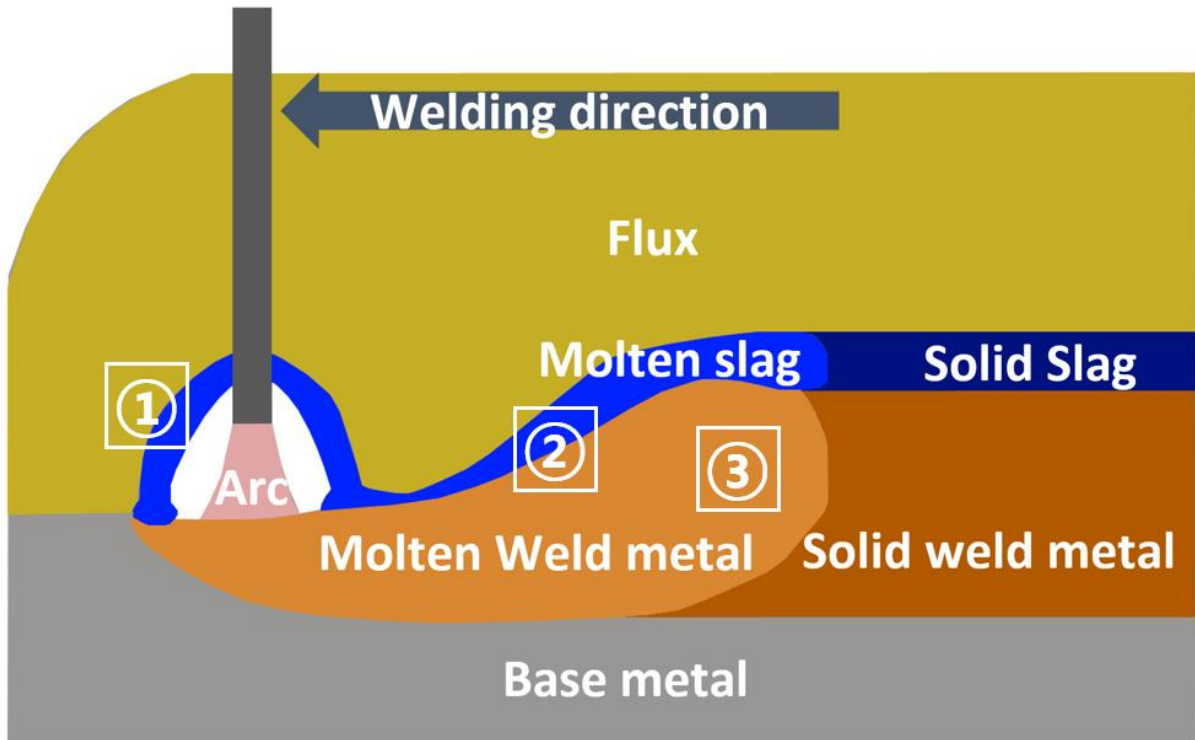


Figure 5-8 Relationship between Oxide particle size and welding current



**High welding speed, Low  $TiO_2$  contents**

①  $TiO_2$  녹는 양 일정 → 용융플로 이동하는 Ti 일정 → 용융플로 내 Ti 산화물 일정 → 용입 일정

**Low welding speed, Low  $TiO_2$  contents**

①  $TiO_2$  녹는 양 일정 → 용융플로 이동하는 Ti 일정 → 용융플로 내 Ti 산화물 일정 → 용입 일정

**Figure 5-9 Effect of  $TiO_2$  composition and welding speed on penetration**



## 6 결론

본 연구는 입열량에 영향을 미치는 용접조건 및 플럭스 조성에 따른 용입의 변화를 조사하였으며 결과는 다음과 같다.

1. Si, Al, Ti 는  $\Delta$ 값이 양수로 나타났으며 이로 인해 용융풀 내 산소함량이 증가하였으며 결과 마랑고니 효과로 인해 용입이 증가하였다.
2.  $\Delta$ Mn 은 음수로 나타났으며 음의 방향으로 증가함에 따라  $\Delta$ O 의 값이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 플럭스 내 SiO<sub>2</sub> 의 함량이 증가함에 따라 용융된 슬래그 내 Mn 의 활동도가 감소하였으며  $\Delta$ Mn 은 음의 방향으로 증가하였다.
3. 용접변수 즉 용접전류나 용접속도를 조절하여 용입을 증가시키면 용입은 증가하였지만 플럭스에 TiO<sub>2</sub> 가 있을 경우 입열량이 감소함에 따라 용융되지 못한 TiO<sub>2</sub> 가 생길 수 있으며 용융된 용접부로 이동하는 Ti 의 함량이 감소함에 따라 TiO<sub>2</sub> 가 적게 생길 수 있다.

## 참고문헌

1. Kou, S., *WELDING METALLURGY*. 2009: Wiley-Interscience.
2. Houldcroft, P.T., *Submerged arc welding*. 1990: Abington publishing.
3. S. Shen, I.N.A.O., S. Yannacopoulos, *Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints*. Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(1): p. 286-294.
4. R.S. Chandel , H.P.S., F.L. Cheong, *Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds*. Journal of Materials Processing Technol, 1997. **72**: p. 124-128.
5. B.G. Renwick, B.M.P., *Operating characteristics of submerged arc process*. weld.J., 1976. **55**: p. 69-79.
6. S.R. Gupta, N.A., *Influence of flux basicity on weld bead geometry and HAZ in submerged arc welding*. J. Mater. Process. Technol., 1993. **39**: p. 33-42.
7. Chandel, R.S., *Mathematical Modeling of Melting Rates for Submerged Arc Welding*. Weld. Res. Suppl., 1987.
8. Beomjoo Kim, S.U., Changhee Lee, Jongbong Lee, Youngho An, *Effects of Inclusions and Microstructures on Impact Energy of High Heat-Input Submerged-Arc-Weld Metals*. Journal of Engineering Materials and Technology, 2005. **127**(2): p. 204-213.
9. D.M. Viano, N.U.A.G.O.S., *Influence of heat input and travel speed on microstructure and mechanical properties of double tandem submerged arc high strength low alloy steel weldments*. Science and Technology of Welding and Joining, 2013. **5**(1): p. 26-34.
10. P. A. BURCK, J.E.I.A.D.L.O., *Effects of Welding Flux Additions on 4340 steel Weld Metal Composition*. Welding Journal, 1990: p. 115-124.
11. CB Dallam, S.L., DL Olson, *Flux composition dependence of microstructure and toughness of submerged arc HSLA weldments*. WELDING JOURNAL, 1985: p. 140-152.
12. N.D. Pandey, A.B., *Effect of submerged arc welding parameters and fluxes on element transfer behaviour and weld-metal chemistry* Journal of Materials Processing Technology, 1994. **40**: p. 195-211.

13. Jin Zhang, T.C., Cong Wang, *Element Transfer Behaviors of Fused CaF<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Fluxes Subject to High Heat Input Submerged Arc Welding*. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019. **51**(1): p. 16-21.
14. KANJILAL, T.K.P., S. K. MAJUMDAR, *Prediction of Element Transfer in Submerged Arc Welding*. WELDING JOURNAL, 2007. **86**: p. 135-146.
15. C. R. HEIPLE, J.R.R., *Mechanism for Minor Element Effect on GTA Fusion Zone Geometry*. WELDING RESEARCH, 1982: p. 97-102.
16. LIMMANEEVICHITR, S.K., *Visualization of Marangoni Convection in Simulated Weld Pools*. WELDING RESEARCH SUPPLEMENT, 2000: p. 126-135.
17. M.G. Velarde, R.K.Z., *The Effect of Interfacial Phenomena on Materials Processing*. 2002.
18. Richard French, H.M.-R., Will Yeadon, *A Feasibility Study Comparing Two Commercial TIG Welding Machines for Deep Penetration* MATEC Web of Conferences, 2019. **269**: p. 1-5.
19. Shanping Lu, H.F., Kiyoshi Nogi, *Sensitivity of Marangoni convection and weld shape variations to welding parameters in O<sub>2</sub>-Ar shielded GTA welding*. Scripta Materialia 2004. **51**: p. 271-277.
20. Keene, B.J., *Review of data for the surface tension of pure metals*. International Materials Reviews, 2013. **38**: p. 157-192.
21. Shanping Lu, H.F., Kiyoshi Nogi, *Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O<sub>2</sub> and Ar-CO<sub>2</sub> shielded GTA welding*. Materials Science and Engineering A 2004. **380**: p. 290-297.
22. Y.L. Xu , Z.B.D., Y.H. Wei, C.L. Yang, *Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007. **48**: p. 178-186.
23. C.X. Zhao, C.K., Y. Pan, I.M. Richardson, Z. Saldi, S. Kenjeres, C.R. Kleijn c, *The effect of oxygen on transitional Marangoni flow in laser spot welding*. Acta Materialia, 2010. **58**: p. 6345-6357.
24. Snow, H.M.M., *Investigation of the effect of a surface active flux on the microstructure and properties of gas tungsten arc welds made on a superaustenitic stainless steel*, in *Materials Science and Engineering*. 2002, Lehigh University.
25. E. S. SURIAN, J.L.T., T. BONISZEWSKI, *Effect of Oxygen Content on Charpy V-Notch Toughness in 3%Ni Steel SMA Weld Metal*. WELDING RESEARCH SUPPLEMENT, 1992: p. 263-268.

26. Ana Ma. Paniagua-Mercado, V.M.L.o.-H., Maribel L. Saucedo Muñoz, *Influence of the chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged-arc welds*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **169**(3): p. 346-351.
27. J. JANG, J.E.I., *Inclusion effects on submerged arc weld microstructure*. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 1987. **22**: p. 689-700.
28. R SAHOO, T.D., M.J. McNALLAN, *Surface Tension of Binary Metal Surface Active Solute Systems under Conditions Relevant to Welding Metallurgy*. METALLURGICAL TRANSACTIONS B, 1988. **19B**: p. 483-491.
29. BELTON, G.R., *Langmuir Adsorption, the Gibbs Isotherm, and Interfacial Kinetics Metal Systems Adsorption in Liquid*. METALLURGICAL TRANSACTIONS B, 1976. **78**.
30. Kook-soo Bang, C.P., Hong-chul Jung, *Effects of flux composition on the element transfer and mechanical properties of weld metal in submerged arc welding*. Metals and Materials International, 2009. **15**(3): p. 471-477.
31. Pei Wei Han, H.J.W., Shao-Jun Chu, *The Calculation for Saturated Solubility of Oxygen in Mn-Si Melts Equilibrated with MnO-SiO<sub>2</sub> Slags*. High Temperature Materials and Processes, 2017. **36**(1): p. 15-22.
32. K. C. Mills, B.J.K., R. F. Brooks, A. Shirali, *Marangoni effects in welding*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998. **356**(1739): p. 911-925.
33. K. C. Mills, B.J.K., *Factors affecting variable weld penetration*. International Materials Reviews, 1990. **Vol. 35**: p. 185.
34. Shanping Lu, H.F., Hiroyuki Sugiyama, Manabu Tanaka and Kiyoshi Nogi, *Weld Penetration and Marangoni Convection with Oxide Fluxes in GTA welding*. Materials Transactions, 2002. **43**: p. 2926-2931.
35. Z.D. Zhang, L.-M.L., Y. Shen, L. Wang, *Welding of magnesium alloys with activating flux*. Science and Technology of Welding and Joining, 2005. **10**: p. 737-743.
36. Sambherao, A.B., *Use of Activated Flux For Increasing Penetration In Austenitic Stainless Steel While Performing GTAW*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2013. **3**: p. 520-524.
37. Sang-Yoon Lee, Y.J.O., Kyung-Woo Y, *Effects of Titanium and Oxygen Content on Microstructure in Low Carbon Steels*. Materials Transactions, 2002. **43**: p. 518-522.
38. Ana Ma. Paniagua-Mercado, V.M.L.-H., Hector J. Dorantes-Rosales, Paulino Estrada Diaz, Elvia Diaz Valdez, *Effect of TiO<sub>2</sub>-containing fluxes on the mechanical properties and*

*microstructure in submerged-arc weld steels*. Materials Characterization, 2008. **60**: p. 36-39.

39. D.W. OH, D.L.O., R. H. FROST *The Influence of Boron and Titanium on Low-Carbon Steel Weld Metal*. WELDING RESEARCH SUPPLEMENT, 1990: p. 151-158.

## 영문요약

In the shipbuilding industry, welding is the most basic work to attach two plates. Several standards propose a certain level of penetration to satisfy the physical properties required for welding, and the thicker the plate, the deeper the required weld penetration. Therefore, as the thickness of the plate increases, various types of I, Single Y, Double Y welding groove are made to satisfy the required weld penetration. The cost of cutting is lower due to the relatively simple shape of I groove compared to Y groove. Therefore, it is expected that the cost of cutting the plate can be reduced by increasing the thickness range of the plate applied to I groove. There are two ways to increase penetration, changing welding conditions or changing flux composition. It is known that when welding conditions, that is, increasing the welding current or decreasing the welding speed, penetration becomes deep due to the increase in heat input, but the impact toughness decreases due to the coarsening of oxides. In addition, when the composition of the flux is changed, the convection direction of the molten pool changes toward the center of the molten pool due to the marangoni effect due to the increase of the oxygen content in the molten pool, and penetration becomes deeper.

Therefore, in this study, in order to investigate the effect of the welding conditions and flux composition used for penetration, the bead on the plate was processed and the weld penetration was analyzed by the following method. As a result of the experiment, penetration tends to increase as the welding current increase or welding speed decreases. As the  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  component increase, the increase in oxygen contents in the melting pool. The only thing for Mn is that the value of  $\Delta$  is negative and the value of  $\Delta\text{O}$  tends to increase as it increases in the negative direction. However, as the  $\text{SiO}_2$  content in the flux increased, the activity of Mn in the molten slag decreased, and  $\Delta\text{Mn}$  increased in the negative direction. In many cases of  $\text{TiO}_2$  in the flux composition, the dissolution amount decreased with increasing welding speed. Therefore, the difference between the flux composition and the low  $\text{TiO}_2$  content did not change significantly.