

## 技術報告

大韓熔接學會誌  
第2卷第2號 1984年 12月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 2, No. 2, Dec., 1984

## SMAW의 슬래그 혼입에 대한 각종 要因의 影響

구정서\* · 백승호\* · 장재성\* · 김영환\*

## Factors Causing Slag Inclusion in SMAW

by

J. S. Koo\* · S. H. Baek\* · J. S. Jang\* · Y. H. Kim\*

## 1. 서 론

發電設備를 비롯한 産業設備, 각종 壓力容器 및 철 구조물 제작시 발생하는 여러가지의 용접불량 중에서 슬래그 혼입이 차지하는 비율이 전체 불량의 절반 이상을 차지하고 있다. 특히 여타의 용접법에 비해 SMAW에 의한 슬래그 혼입의 발생이 가장 많으므로 이에 대한 결함 발생의 경향을 조사하고 그 방지대책을 설정하기 위하여 이번 실험을 실시하게 되었다.

수동 용접봉의 피복재 중 가스 발생 원인은 아아크 분위기를 생성하고 기타 부분은 슬래그가 되어 용융금속을 둘러싸서 이것을 보호하면서 용융지로 이행한다.

슬래그는 용융지 내에서 비이드 표면으로 浮上하면서 脫酸반응이나 불순물을 제거하는 精鍊作用을 한다.

또한 적당한 합금 원소의 보충, 용융금속의 流動性 증가 등에 의하여 양호한 용착금속의 生成을 돕는다.

한편 슬래그는 高溫금속을 덮어 이것을 보호함과 동시에 急冷을 緩和하는 작용을 한다.<sup>1)</sup>

그러나 이러한 슬래그가 凝固하는 熔着금속 사이에 混入된다면 熔着금속의 기계적 성질을 저하시키는 중요한 요인이 된다. 슬래그 혼입에 대하여 간단하고 일반적인 방지대책은 많이 언급되어 있으나 슬래그 혼입의 방지대책에 대해 깊이 있는 연구가 거의 없다. 이번 실험에서는 광범위한 요인의 선제, 시수의 제안으로 인하여 새로운 슬래그 혼입 機構의 설정이나 특정한 요인의 영향에 대한 정확한 한계치의 설정보다는 각 요인에 대한 정성적인 영향을 분석하였다

## 2. 실험 방법

슬래그 혼입의 발생에 영향을 미치는 요소라고 생각되는 각종 요인을 채택하여 실험하였다. 용접—비파괴 검사(X-ray: ASME SEC. X에 준함)—시편절단(flame cutting)—polishing(1,000 grit paper)—etching(5% nital 液)—macrography(배율: 1.28)의 순서로 실험을 진행하였다.

본 실험에 사용된 장비와 자재 및 용접조건은 표 1과 같다.

아아크 발생시의 영향을 없애기 위하여 위빙 시편을 제외한 전 용접시 한층에 하나의 용접봉을 사용했고 슬래그 제거는 chipping 과 wire brushing 으로 거의 완전하게 제거하였다. 용접은 ASME 2, 3, 4 G 자격증을 가진 용접사가 수행하였다.

표 1. 용접장비와 자재 및 용접조건

구 분	종류 및 고정범위
용 접 기	DC용접기(H사)
속도 제어 장비	SH-20 자동절단기(S사)
모 재	ASTM A36
시 편 크 기	20'×90*×200 <sup>1</sup> mm : 2EA
root face	0mm
root gap	3mm
용 접 봉	AWS E 7018(C사) 4.0mm

\* 한국중공업 용접기술부, 정회원

용접 자세	아래보기(1G)
극성	DCRP(역극성)
전류	90amp( $\phi 3.2$ : root pass) 170amp( $\phi 4.0$ )
전압	22-28Volts
용접 속도	20cm/min.
운봉각도 (Travel Angle)	75-80°(그림 2)
작업각도 (Work Angle)	각 pass 위치에 따라 변화
Weaving 및 예열	없음
층간 온도	220°C 이하
End tap	180°×100mm
Back Gouging	grinding
실험 기간	'84. 7. 16-'84. 9. 28

2.1 용접전류 및 용접속도의 변화

일반적으로 용접의 가장 중요한 변수는 전류, 전압, 용접속도를 들 수 있으나, SMAW에서 전압을 조정하는 것이 곤란하다. 이러한 이유로 전류와 용접속도의 두 가지를 선택하여 표 2와 같이 2원법으로 16개의 시편을 용접하였다.

2.2 위빙 크기의 변화

일반적으로 대부분의 용접에서는 위빙을 하고 있으나 각종 용접 관련자료에서 위빙은 슬래그 혼입의 가능성을 높이며 심선 굵기의 3배 이내의 위빙을 추천하고 있다. 이에 대한 영향을 알기 위해서 그림 1과 같이 하나의 시편을 이용해서 비이드를 분할하지 않고 1패스로서 1층을 쌓아 그 결과를 살펴보았다. 위빙의 크기는 심선의 1~6.5배 이었다.

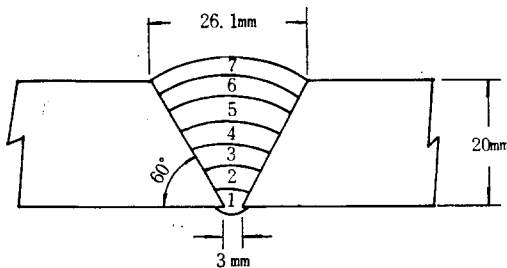


그림 1. 위빙 시편의 비이드 쌓기

2.3 용접봉 운봉각도의 변화

용접봉의 운봉각도가 슬래그 혼입에 상당한 영향을 미칠 것으로 기대되므로 30°에서 10°간격으로 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°로 실험하였으며 각도의 유지는 wire를 사용하여 그림 3과 같은 삼각형을 만들어 속도제어를 위한 자동절단기 위에 장치하고 빗변과 용접봉을 평행하게 유지하였다.

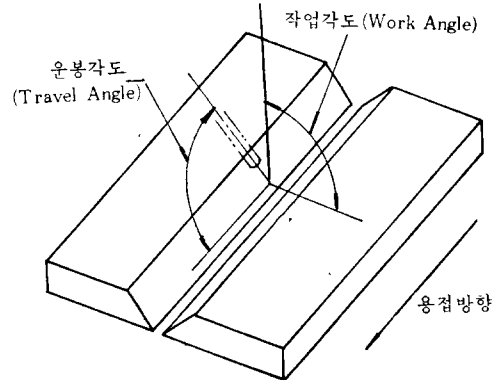


그림 2. 용접봉 · 운봉각도의 구분

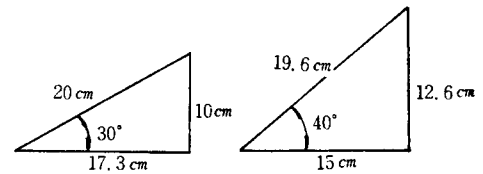


그림 3. 용접봉 · 운봉각도 유지에 사용한 삼각형 예

2.4 모재 경사도의 변화

모재에 경사가 주어지는 경우는 철구조물의 용접이나, 특히 용기의 상부에서 girth seam을 용접할 경우(그림 4 참조)에 상향과 하향의 경사가 주어질 수 있다.

AWS 및 ASME code에는 모재의 경사가 15°까지를 아래보기(1G) 자세로 규정하고 있다. 본 실험에서는 10°에서 5°간격으로 15°, 20°로 용접하였으며 시편의 크기는 200mm(W)×300mm(L)×20mm(t)로서 최초 150mm는 상향법으로 나머지 150mm는 우측으로 이동시켜 하향법으로 용접을 실시하였다.

용접은 그림 5와 같은 장치를 작업대 위에 설치하고 모재의 경사를 유지하였다.

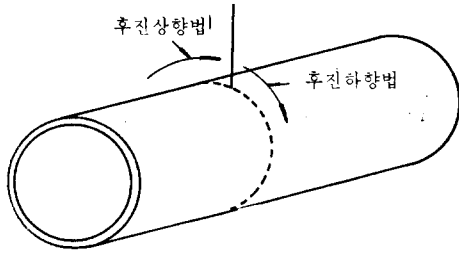


그림 4. 용기용접에서 모재에 경사가 주어지는 경우

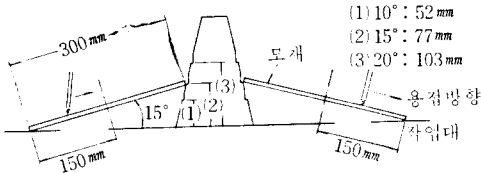


그림 5. 모재경사 유지장치

2.5 용접봉 크기의 변화

동일한 개선각 내에서 용접봉 크기에 의한 영향을 파악하기 위하여 4.0mm, 5.0mm 두가지 용접봉(2mm 이하의 세경봉은 생산성이 현저히 감소하므로 생략)으로 각 크기에 적절한 전류(4.0 : 170amp, 5.0 : 220amp)를 선택하여 실험하였다.

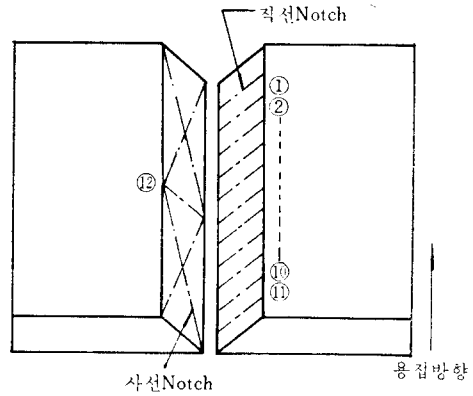
2.6 모재 개선각의 변화

기하학적인 원인의 하나로서 개선각의 크고 작음에 의한 영향을 파악하기 위하여 40°, 50°, 60°로 개선하여 용접을 실시하였다.

40° 개선은 직경 3.2mm로 2 패스 용접한 후 직경 4.0mm를 사용하였다. 이것은 개선에 적절한 용접봉을 선택하기 위해서였다.

2.7 개선면의 notch에 의한 영향

이러한 경우는 많이 발생하지 않으며 설사 발생하였을 경우에도 생산현장에서는 대부분 제거를 하고 용접을 실시한다. 그러나 절단, 가공 혹은 취급 부주의 등으로 인하여 발생한 개선면상의 notch나 기타의 흠이 슬래그 혼입에 직접적인 영향을 미칠 것으로 생각되므로 그림 6 과 같이 정상적인 개선면에 I 자 펀치를 이용하여 V형 notch를 만든 후 용접을 실시하였다. notch의 길이와 깊이는 그림 6에 표시하였으며 notch의 각도는 80°였다.



사선 notch 길이 : 115mm  
 사선 notch 깊이 : 0.5—0.7mm  
 수직 notch 길이 : 24mm  
 수직 notch 깊이 : 아래참조  
 ① 0.9    ② 0.8    ③ 0.5    ④ 0.3  
 ⑤ 0.7    ⑥ 0.6    ⑦ 0.7    ⑧ 0.5  
 ⑨ 0.4    ⑩ 0.5    ⑪ 0.4    ⑫ 0.6mm

그림 6. 개선면 notch 부여

3. 실험결과 및 분석

3.1 용접전류 및 속도의 영향

3.1.1 냉각속도의 영향

표 2의 전류와 용접속도의 조합표에서 합, 불합격의 경계선을 살펴보면 용접속도가 빠를수록, 전류가 낮을수록 슬래그 혼입의 위험도가 높게 나타난다. 이것은 入熱과 冷却速度라는 관점에서 분석할 때 합당한 근거가 있다고 보여진다. 다음의 6 패스 이상을 용접하는 “厚板用 冷却速度式”<sup>2,3)</sup>을 고려하면

$$R = \frac{2\pi K(T_c - T_0)^2}{H_{net}} : \dots\dots\dots(1)$$

여기서

$$H_{net} = F_1 \cdot \frac{E \cdot I}{V}$$

이므로

$$R = \frac{2\pi K(T_c - T_0)^2 \cdot V}{F_1 \cdot E \cdot I} : \dots\dots\dots(2)$$

로 된다.

- $K$  : 금속의 열전도도 ( $J/mm \cdot sec \cdot ^\circ C$ )
- $R$  : 용접 중심선상의 온도  $T_c$  (여기서는 용융지)를 지날 때의 냉각속도 ( $^\circ C/sec.$ )
- $T_0$  : 초기온도 ( $^\circ C$ )
- $E$  : 전압 (Volt)
- $F_1$  : 열전달율
- $V$  : 용접속도 ( $mm/sec.$ )
- $I$  : 전류 ( $amp.$ )
- $H_{net}$  : 실에너지 입력

용융지에서 용융금속과 뒤섞인 용융 슬래그가 비이드 표면으로 浮上하기에는 짧은 시간이긴 하지만 어느 정도의 시간이 요구된다. 다시 말해서 용융지의 응고속도가 문제가 되는데 (용융지에서의 冷却速度) 응고속도가 빠르면 빠를수록 용융 슬래그가 떠오르기 위한 충분한 시간을 가지지 못하기 때문에 슬래그 혼입의 가능성이 높다<sup>4)</sup>. 식 (2)에서 냉각속도  $R$  은 전류( $I$ )가 커질수록 감소하며 용접속도가 커질수록 증가하는데 이는 곧 入熱量에 반비례 한다는 것과 같다.

표 2. 전류와 용접속도의 조합 및 결과

속도 \ 전류	150 amp	170 amp	190 amp	210 amp
15cm/min.	○	○	○	○
20cm/min.	○	○	○	○
25cm/min.	×	○	○	○
30cm/min.	×	×	△	○

- : 합격 (슬래그 혼입 없음)
- ×
- △ : 합격권내의 슬래그 혼입

이러한 사실을 수치상으로 전류 150amp, 용접속도 15cm/min 를 기준(1,000)으로 잡고 전류와 용접속도와의 각 조합의 응고속도 비율(초기 온도는 동일하다고 믿음)을 표 3에 표시하였다. 이는 작업물 크기의 영향을 생각하지 않을 때 응고속도가 빠를수록, 입열

표 3. 전류와 용접속도 조합의 응고속도 비율과 패스수

속도	전류 구분	150 amp		170 amp		190 amp		210 amp	
		냉각속도 비	pass 수	냉각속도 비	pass 수	냉각속도 비	pass 수	냉각속도 비	pass 수
15 cm/min		1.000	14	0.082	14	0.789	14	0.714	14
20 cm/min		1.333	20	1.176	17	1.053	16	0.952	15
25 cm/min		1.666	24	1.470	23	1.315	21	1.190	20
30 cm/min		2.000	29	1.764	26	1.579	24	1.428	21

량이 적을수록 슬래그 혼입의 가능성이 커진다는 이들과, 표 2의 실험 결과와는 잘 일치하나 豫熱이 없는 용접에서 root 패스는 상층의 패스에 비하여 빨리 식으므로 용착금속 사이에 슬래그가 혼입될 위험이 크다.<sup>5)</sup>

결합이 발생한 4개의 시편을 냉각속도 순서에 따라 elongate type(길이와 너비의 비가 3:1 이상의 슬래그 혼입)과 round type 으로 구분하여 定量的으로 표시하면 그림 7과 같다.

참고로 elongate 슬래그 혼입은 root bead와 hot 패스간에 발견되며 round 슬래그 혼입은 어떤 패스에도 介在될 수 있다. 보통 cleaning 을 완전히 하지 않을 경우와 아아크 길이 특성에 기인한다.<sup>6)</sup>

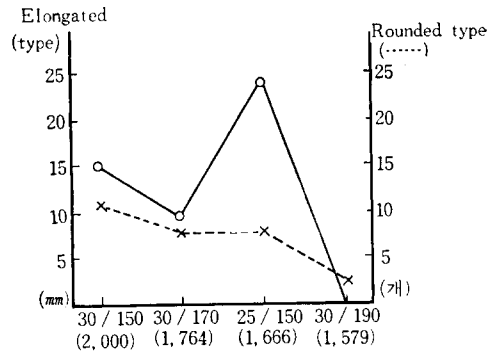


그림 7. 불량 시편 결합의 정량적 표시

이러한 경우 25cm/min/150 Amp 때의 elongate type의 경우가 예외적이거나 일반적인 경향은 냉각속도가 빠를수록 elongate 및 round type 모두가 증가함을 보여주고 있다. 이로서 결론지을 수 있는 사항은 전류가 높을수록, 용접속도가 느릴수록 혼입의 가능성은 줄어든다는 것이다. 덧붙여서 入熱量이 클수록 슬래그 박리가 양호해짐을 관찰할 수 있었다.

지금까지는 냉각속도의 측면에서 관찰하였으나 入熱

량의 관점에서 보면 그림 8에 표시한 바와 같은데, 경계선보다 入熱量이 적으면 슬래그 혼입이 발생할 위험이 크다는 것을 짐작할 수 있다.

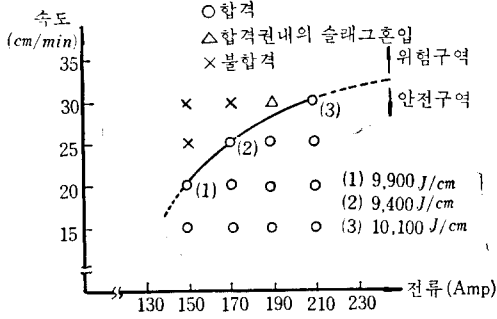


그림 8. 슬래그 혼입 방지를 위한 최소입열량 표시

3.1.2 속도의 영향

용접속도가 지나치게 빠르면 cleaning이 불완전한 부분의 잔류 슬래그가 再融(remelt)되는 시간을 찾지 못하기 때문에 아아크 force에 의한 충분한 洗滌(washing out) 작용이 이루어지지 않으며<sup>6)</sup>, wetting 작용이 감소하므로 언더컷이 생기기 쉽다<sup>6,7)</sup> 이로 인한 슬래그 혼입의 위험이 있다. 반대로 용접속도가 느려지면 용융금속의 熔着層계가 두꺼워지므로 용고속도가 느리게 되고 슬래그가 浮上할 수 있는 시간을 제공하기 때문에 슬래그 혼입 防止에 유리하다.<sup>4)</sup>

이번 실험에서 전류의 변화에 관계없이 슬래그 혼입이 생기지 않은 용접속도는 20cm/min 이하였다. 그러나 실제 현장용접 시 용접속도가 일정치 않기 때문에 슬

래그 혼입의 가능성이 있다.<sup>7,8)</sup>

3.1.3 전류의 영향

높은 전류를 사용하면 용입이 깊어진다. 그리고 용입이 깊어지면 前層의 잔류 슬래그나 용착금속 가운데 혼입된 슬래그를 再融(remelt)시켜 비이드 표면으로 떠올리는 힘이 강하므로 결합이 적게 발생한다.

이번 실험에서는 210amp 범위에서는 용접속도의 변화에 관계없이 결합이 전혀 발생하지 않았다. 슬래그 혼입의 용접 결합을 방지하고자 할 때 연강의 경우 재료 메이커가 추천하는 130~180amp(4.0mm 용접봉)보다 상향된 전류치로 용접하는 것이 좋다고 믿어진다.

3.1.4 流動性 및 패스 수

같은 용접봉을 사용하더라도 流動性과 패스 수는 달라진다. 流動性은 熔融池의 크기와 더불어 증가하기 때문에 슬래그 混入防止를 위해서 높은 入熱量으로 용접하는 것이 바람직하다. 또한 패스 수는 熔着量에 의하여 결정된다. 패스 수가 많으면 잔류 슬래그 또는 浮上力의 減小 등에 기인하여 슬래그 混入이 많아질 수 있다. 패스 수를 줄이는 것은 슬래그를 제거하는 시간을 줄여주기 때문에 生産性 면에서 유리하다.

3.1.5 入熱量에 의한 충격치의 변화

지금까지 슬래그 混入 측면에서 入熱量을 기술하였다. 入熱量의 크기는 충격치에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려졌다. 충격치 보증치는 ASME Sec. II Part C. SFA 5.1에서 규정하는 -29°C에서 최소 흡수에너지 2.7kg-m 이었다. 시험방법은 ASME SA-370에 준하였다. 210amp에서 용접속도를 달리하여 시험편을 채취하였으며 시험은 열영향부와 용착부로 나누어 하였다. 위 시험 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4. 210 Amp를 사용한 시험편의 충격치

시 편 구 분		흡수에너지(kg.m)				
		1	2	3	4	최대치와 최소치를 제외한 평균치
15 cm/min.	HAZ	13.2	7.5	3.1	3.1	5.3
	Weldment	11.2	10.8	4.3	15.2	11.0
20 cm/min.	HAZ	15.4	7.7	14.5	14.6	14.55
	Weldment	5.6	15.2	1.8	13.2	9.4
25 cm/min.	HAZ	9.3	12.0	10.5	15.5	11.25
	Weldment	11.2	1.8	10.4	8.3	9.35
30 cm/min.	HAZ	14.5	8.8	2.0	15.2	11.65
	Weldment	9.0	6.8	11.4	7.5	8.25

표 4에 의하면 시험치가 ASME에서 규정하는 E 70 18인 경우 최소 흡수에너지 2.7kg-m 이상이어서 10 Amp로 용접할 때의 入熱量의 制限조건을 만족시킨다. 따라서 슬래그 混入 측면에서 유도된 높은 전류의 용접조건이 현장 시공에 바람직한 것으로 생각된다.

### 3.2 위빙의 영향

그림 1에서와 같이 홈의 폭을 제한하여 위빙의 크기를 결정하였다. 그 크기는 각각 심선의 1배(2층), 2.1배(3층), 3.2배(4층), 4.3배(5층), 5.4배(6층), 6.5배(7층)였으며 root 층은 직경 3.2mm 용접봉으로 용접하였다. 그런데 위빙의 크기에 비하여 일반적인 예상과는 다르게 슬래그 혼입은 전혀 발견되지 않았다. 따라서 위빙의 폭을 직선의 3배 이내로 제한하는 것은 슬래그 혼입 측면에서 추천할 만한 사항이 아닌 것으로 믿어진다. 위빙용접이 일직선 비이드(stringer 비이드) 보다는 용접이 일반적으로 깊다. 따라서 前層의 비이드에 혼입된 슬래그가 다시 용융되어 나오게 될 수 있는 기회 때문에 위빙용접 시 슬래그 혼입이 없는 것으로 생각된다.

이외에도 위빙의 크기가 커질수록 용융지의 온도가 높아진다. 그 결과 流動性이 증가하고 그와 동시에 용융금속의 粘性이 감소하므로 슬래그가 떠오르는데 저항을 적게 받는다. 이때 용융금속 내부의 슬래그 입자가 더욱 잘 합쳐져서 부피가 커지며 그 결과 슬래그가 표면으로의 浮上이 빠르게 된다. 이 두가지 요인 역시 위빙용접 시의 슬래그 혼입을 방지하는 역할을 한다.

그러나 이러한 경우 용융 슬래그의 粘性이 떨어져 슬래그가 넓게 퍼진 결과 熔着금속을 적절하게 덮어주지 못한다. 그렇기 때문에 기타의 부적절한 용접이 될 위험이 있다.<sup>4)</sup>

슬래그 혼입을 설명한 여러가지 자료에서 보면 용접 시 슬래그의 先行은 슬래그 혼입의 불리한 원인이 될 수 있다.<sup>6,8,9,10)</sup>

본 위빙 실험 시에 용융지의 높은 온도는 저속용접에 의한 단위 용접장당 많은 용착량 그리고 前層의 슬래그를 제거하지 않음에 기인하는 다량의 슬래그 등에 기인하여 아아크에 先行하는 슬래그가 관찰되었다. 그러나 슬래그 혼입은 조사한 결과 슬래그 混入 결함은 발견되지 않았다. 오히려 위빙 용접 시 슬래그의 박리성이 우수한 것으로 드러났다.

### 3.3 용접봉 운봉각도의 영향

용접 관련의 많은 문헌이 70~80°의 운봉각도를 추천

하고 있는 반면에 60°<sup>8)</sup> 또는 80~85°<sup>10)</sup>를 추천하는 문헌도 있다. 본 실험의 결과 60°이하에서는 소량의 슬래그 혼입이 발견되었다. 70° 및 90° 시편의 경우는 슬래그 혼입은 없었으며 pore가 1개씩 발견되었다. 운봉각도에 대한 슬래그 혼입과 pore는 그림 9에 나타내었다.

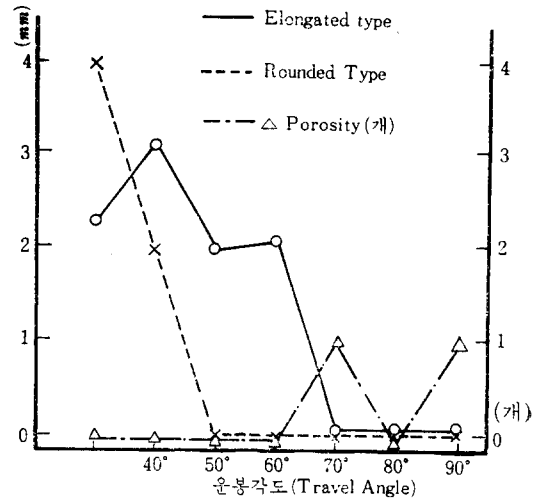


그림 9. 운봉각도 변화 시편의 정량적 결함 표시

그림 9에서 보듯이 운봉각도가 증가할수록 round, elongate type의 슬래그 혼입이 모두 감소하는 경향을 보여준다.

90° 시편에서의 pore는 아아크가 직각으로 모재에 부딪히므로 생성비이드 쪽으로 보호가스가 원활하게 공급되어지지 않는데 기인한 것으로 생각된다.

또한 운봉각도가 작아질수록 용융지의 모양은 길게 늘어나서 비이드가 거칠어지며 용융지의 노출이 심해지고 아아크의 안전성이 감소한다. 또한 스패터가 많아지며 용융슬래그가 불균일하게 용융지로 이행하기 때문에 슬래그 혼입의 가능성은 점차 커진다고 말할 수 있다. 따라서 80°의 운봉각도가 가장 바람직하다고 생각된다.

### 3.4 모재 傾斜도의 영향

그림 5에서 보는 바와 같이 모재 경사 유지장치를 이용하여 모재의 경사도가 용접성에 미치는 영향을 시험하였다. 20°까지의 상향 및 하향용접에서 슬래그 혼입은 발견되지 않았다. 그러나 pore가 약간씩 발견되었다.

상향용접에서는 슬래그 先行의 문제가 전혀 없었으나 하향용접에서는 상당량의 슬래그가 先行했다. 특히 비

이드 별로 보면 그림 10에서 보듯이 우측(각층에서 마지막으로 용접되는 비이드)의 경우보다는 좌측(각층에서 제일 먼저 용접되는 비이드)과 중간 비이드에서 용융 슬래그가 아아크를 迂迴하여 多量 先行했고, 윗층의 비이드로 올라갈수록 先行하는 경향은 감소했다.

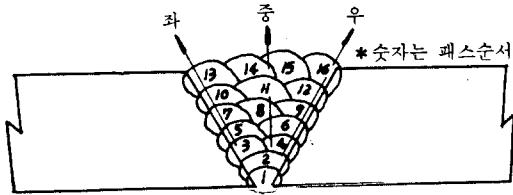


그림 10. 좌·우측 비이드의 구분

이렇게 슬래그가 先行함에도 불구하고 슬래그 혼입이 전혀 없었던 것은 3.2에서도 설명한 바와 같이 슬래그 先行이 슬래그 혼입의 결정적 요인이 되지 못함을 다시 한번 보여준다.

슬래그가 先行할 경우 용융지에서 간헐적인 과열현상을 발견할 수 있었는데 이것은 pore의 성장과파에 의한 것이라 생각된다.

상향용접에서는 용융물의 중량에 의해서, 또한 아아크 힘이 아래로 향하므로서 용융물이 밑으로 쳐지게 되고 적절한 비이드 형상을 유지하기 위해서는 용접속도가 자연히 느려질 수 밖에 없으며 경사가 커질수록 그 경향은 심해지고 패스 수는 감소하게 된다.

그러나 하향용접에서는 용융물의 중량은 아래로 향하고 아아크 힘은 위로 향하기 때문에 용접속도는 별다른 영향이 없다.

모재 경사도의 영향을 알기 위한 시편 3개에서 상향과 하향의 중간 지점에서 아아크를 끊고 다시 발생시킨 부위가 44개였다. 이 44개소에서 슬래그 혼입은 없었으나 기공이 많이 발생하였다.

### 3.5 용접봉 크기의 영향

용접봉의 직경이 커지면 작은 직경의 용접봉보다 전류밀도가 낮아지므로 세밀한 부분까지 아아크가 침투하지 못한다. 또한 개선각이 좁을 경우, 불록 비이드가 생겼을 경우, 기하학적인 원인에 의해서 비이드가 개선면간의 홈에 슬래그가 빠지기 쉽다. 슬래그 제거가 불완전한 경우에도 충분한 용입으로 잔류 슬래그를 녹여서 비이드 표면으로 떠올리는 힘이 약해질 우려가 있다. 그러나 이러한 우려와는 달리 슬래그 혼입은 거의 발견되지 않았다.

### 3.6 모재 개선각의 영향

개선각이 좁으면 운봉이 어려워지고 슬래그가 혼입될 위험이 커지며 굵은 용접봉을 사용할 수 없다는 단점이 있다. 보통 4mm 용접봉을 사용할 경우 40°까지의 개선은 슬래그 혼입의 위험은 적다고 판단되며 더 좁은 개선이라도 적절한 크기의 용접봉을 선택하고 운봉을 적절히 한다면 슬래그 혼입은 방지할 수 있다고 생각된다.

### 3.7 개선면상 눈치의 영향

일반적인 생각과는 달리 개선면상에 눈치가 발생한 경우에도 조심스러운 용접조작으로 능히 슬래그 혼입을 방지할 수 있다. 이와 관련하여 용접속도가 빠르거나 운봉조작이 잘못 되거나, 전류가 지나치게 높을 경우에 발생하는 언더컷도 다음 패스에서 적절한 운봉조작으로 결함 없는 용접을 행할 수 있다고 보며, 이렇게 하기 위해서는 눈치나 언더컷 부위에 아아크가 직접 닿게 하여 반드시 한번 녹여주어야 한다.

### 3.8 슬래그 혼입 위치

슬래그 혼입 위치는 아래와 같이 두가지 경우로 분류된다.

- (1) 비이드 내부의 슬래그 혼입.
- (2) 비이드와 비이드 사이, 비이드와 개선면간의 슬래그 혼입.

#### 3.8.1 비이드 내부의 슬래그 혼입

비이드 내부의 슬래그 혼입은 자주 발생하지는 않으나 사진 1, 7, 8에서와 같이 최상층에서 종종 발생하며 사진 1, 3, 5에서와 같이 그 아래층에서도 드물게 발견된다. 그 원인은 용고속도가 슬래그 부상속도보다 빠르기 때문이며 최상층의 비이드에서 더 많이 발생하는 것은 혼입되었던 슬래그가 그보다 더 상층의 비이드에 의해 再融되어서 다시 한번 비이드 표면으로 떠오를 수 있는 기회를 갖지 못하기 때문으로 생각된다.

이와같은 결함을 예방하기 위해서는 가능한 한 入熱을 크게하여 용고속도를 느리게 하거나, 전류를 높여 용입을 깊게 함으로서 稀釋되는 부위를 깊게 해주어야 한다.

#### 3.8.2 비이드와 비이드, 비이드와 개선면간의 슬래그 혼입

이러한 경우는 그림 10에서와 같이 좌, 중앙, 우측(각층에서 마지막으로 용입되는 비이드)으로 구분하여

좌측의 경우에는 슬래그 혼입이 거의 발생하지 않으며 대부분이 우측선상의 비이드와 개선면의 접촉선상에서 발생(사진 2, 3, 4, 5, 6 참조)되며 사진 5에서와 같이 중앙부에서도 간혹 발생한다.

그런데 이러한 결함의 경우도 사진 4에서와 같이 결함이 약간 위쪽으로 나타난 것을 제외하고는 대부분의 경우가 모재 두께의 중앙 이하에서 발생하고 있다.

이러한 원인을 검토하여 보면 각층에서 가장 먼저 용접되는 좌측면상의 비이드는 용접봉의 조작이 자유로울 뿐만 아니라 아아크의 중심을 정확하게 비이드와 개선면의 경계선에 유지할 수 있고 점차 우측으로 용접해 갈수록 운봉에 제한을 받기 때문에 결함이 많이 발생한다고 생각된다. 또한 용접이 진행됨에 따라 상층으로 갈수록 개선폭이 넓어지므로 용접봉의 조작이 쉬워져서 상층의 비이드에서는 많이 발생하지 않았다.

이와같은 결함은 전층의 슬래그를 완전히 제거하고 되도록이면 비이드와 비이드, 비이드와 개선면간의 홈에 아아크의 중심이 닿도록 하여 예방할 수 있으리라 생각된다.

또 한가지 방법으로는 그림 11과 같이 패스 순서를 정하는 것도 좋은 방지책으로 추천된다.

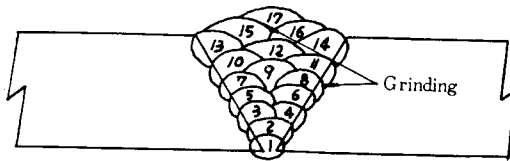


그림 11. 슬래그 혼입 예방을 위한 패스 순서

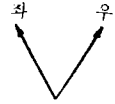
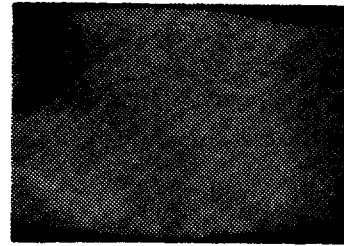


사진 3. 속도 30cm/min. 전류 150amp

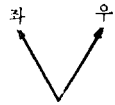
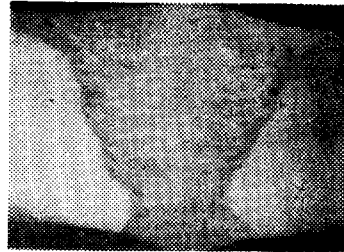


사진 4. 속도 30cm/min. 전류 150amp

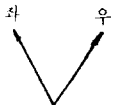
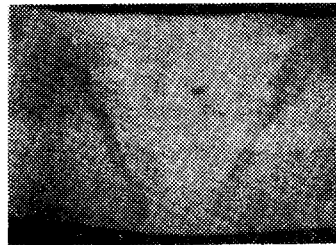


사진 5. 속도 30cm/min. 전류 170amp

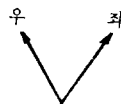
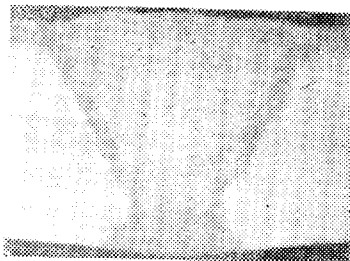


사진 1. 속도 25cm/min. 전류 150amp

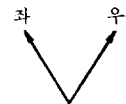
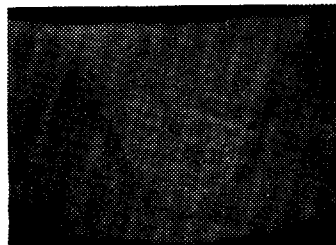


사진 6. 속도 30cm/min. 전류 170amp

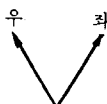
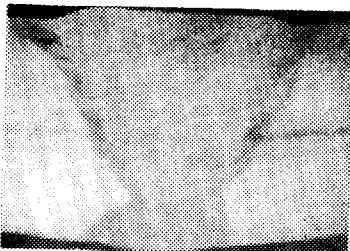


사진 2. 속도 25cm/min. 전류 150amp

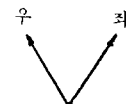
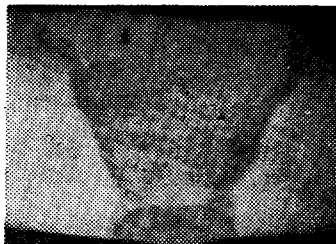


사진 7. 속도 30cm/min. 전류 170amp



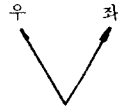
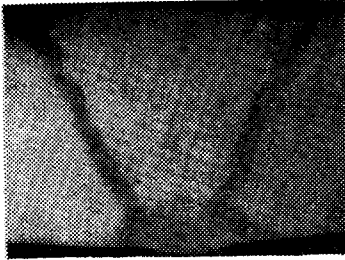


사진 8. 속도 30cm/min. 전류 190amp

#### 4. 결 론

이상과 같이 용접전류, 용접속도, 위빙의 크기, 용접봉의 운봉각도, 용접봉의 크기, 모재의 경사도, 개선각 및 개선면상의 낫치 등의 영향에 대해서 살펴보았다.

표 1에 나타난 표준상태로 용접했을 경우 각 요인별로 다음과 같이 결론 지어진다.

- 1) 슬래그 혼입을 방지하기 위해서는 가능한 한 용접 전류는 높게, 용접속도는 느리게 하는 것이 유리하며 입열량은 대략 10,000J/cm 이상이어야 슬래그 혼입을 예방할 수 있다.
- 2) 위빙의 크기는 슬래그 혼입의 중요한 요인이 되지 않는다. 슬래그 先行은 슬래그 혼입의 결정적 요인이 되지 않는다.
- 3) 용접봉 운봉각도는 75°~85°가 추천된다.
- 4) 모재의 傾斜度는 슬래그 혼입의 결정적 요인이 되지 않는다. 아아크 발생부위는 슬래그 혼입의 위험은 적고 기공의 위험이 크다.
- 5) 직경 5.0mm의 용접봉은 다층 용접 시 슬래그 혼입에 영향을 미치지 않는다.
- 6) 직경 4.0mm의 용접봉을 사용할 경우 40°까지의 개선은 조심스러운 운봉조작으로 슬래그 혼입을 예방할 수 있다.
- 7) 개선면상의 낫치와 용접 중에 생긴 언더컷도 조심스러운 운봉조작으로 예방할 수 있다.
- 8) 비이드 内部의 슬래그 혼입은 마지막 층에서 간혹 발생하며 入熱을 크게하면 슬래그 혼입이 방지된다. 비이드와 개선면간의 슬래그 혼입은 각층의 最終 패스에서 특히 많이 발생한다. 이의 예방을 위해서는 아아크 중심이 비이드와 개선면간의 홈에 직접 닿게하는 것이 좋다.

上述한 요인 이외에도 슬래그 혼입에 영향을 미치는 중요한 요인으로서는 아아크 길이를 비롯하여 용접전압, 용접자세, fit-up상태, 前層의 비이드 형상 및 前層의 슬래그 제거 등의 많은 요인이 관련된다.

슬래그 혼입을 줄이기 위한 대책으로는 품질향상을 위한 부단한 용접사의 교육, 용접사 개개인의 透徹한 職業意識의 재고, 생산현장의 사기양양을 위한 制度的인 管理방안의 수립 등을 들 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 鈴木春義 原著, 金教斗 譯編, 熔接 핸드북(1980), p. 45.
- 2) Welding Handbook, *Fundamentals of Welding*, 7th ed. American Welding Society, Vol. 1, (1976), pp. 84~85.
- 3) 朴鍾段, 熔接部内の 熱流動(熔接技術 8), (1983), pp. 8~14.
- 4) G. E. Linnert, *Welding Metallurgy*, American Welding Society, Vol. 2, (1967), pp. 213~216.
- 5) Corl Düren and Hermann Musch, *Peculiarities on Site Welding of Large Diameter Pipe Using Rod Electrode with Cellulose Covers*, Stahl and Eisen, Vol. 96, No. 9, pp. 450~454.
- 6) Task Force on Field Welding Subcommittee on Line Pipe Steels, *Weld Defects, Welding Research Council Progress Report*, Vol. 32, No. 1.
- 7) *Semiautomatic Submerged Arc Welding Guide*, Lincoln Electric Company, (Jan. 1981), p. 22.
- 8) Metal Handbook, *American Society for Metals*, 8th ed, Vol. VI, (1971), p. 19, p. 57.
- 9) *Pocket Welding Guide*, Hobart Welding Company, (1979), pp. 6~9, p. 22.
- 10) 鈴木, 田村 外, 現代熔接技術大系 1권, p. 110, 7권 p. 100, p. 156, p. 217, 36권 p. 277, 37권 p. 127, 38권 p. 118.
- 11) *SMAW Instruction Guide*, Hobart Welding Guide (Welder Training Program), SMAW, Hobart Welding Company.
- 12) J. E. Hinkel, *Pipeline Welding, Meeting Today's Quality Requirements*, July, (1981).