

## 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

### 스테인레스강 용접의 스팬터에 관한 연구

이 성 근\* · 서 성 필\*

#### Study on the Spatter in Stainless Steel Welding

by

S. G. Lee\* · S. P. Suh\*

#### 1. 서 론

Chemical tanker의 Cargo tank는 화학제품에 대한 내식성, 내산성 등이 요구되는 재료로서 스테인레스강이나, 스테인레스 클래드강이 주로 사용되고 있다. 이러한 스테인레스강을 사용한다 하더라도 사용시 극부적인 결함 및 부식의 문제점이 발생되고 있다. 특히 스테인레스 클래드강을 사용했을 경우 부식 및 기타 요인에 의해 결함이 발생했을 때, 클래드재(알루미늄)의 두께가 약 2.5mm 정도에 불과하므로 보수작업이 어려우며, 보수작업에 의한 산화피막의 파괴는 부식을 촉진시킨다. 이들 결함 및 부식 발생의 어려움인 중 특히 용접 시공상의 문제점이 가장 크게 영향을 미친다. 또한 용접 시공상의 문제점 중 스팬터를 제거하기 위해서는 많은 공수가 소모될 뿐 아니라 품질면에서도 나쁜 영향을 주고 있다.

본 고에서는 스팬터 생성기구의 검토와 스팬터가 모재에 미치는 영향을 다루고자 한다. 또한 용접조건 및 용접재료의 변화에 의한 스팬터 생성량 변화, 입도에 따른 비행거리 등을 검토하는데 목적을 두었다.

#### 2. 스팬터 생성기구 및 형상

##### 2.1. 스팬터 생성기구

스팬터는 아아크 용접 중 용접봉 끝 또는 용융지에서 小粒의 용적이 비산하여 발생한 것으로 발생 형태별로 분류하여 보면 그림 1과 같이 4종류가 있다.





Type	형 태	원 인
I		discharge of the gas
II		explosion of the gas
III		power of the arc
IV		regeneration of the arc

그림 1. 스팬터 발생 형태와 주요 원인

Type I은 기포의 방출에 의한 스팬터의 발생인데 가스가 용융금속 중에 생성되면 그 기포가 용융금속 표면으로 방출되어 소멸한다. 이때 기포의 소멸과 더불어 스팬터가 발생하는 것이라 생각된다. 기포를 만드는 가스의 성분으로는 용융금속 중의 C와 O가 반응해서 생기는 CO와 대기 중에서 흡수된 질소 가스 등이 있다.

Type II는 가스의 폭발에 의한 스팬터인데 아아크 용접시 아아크 부근의 온도는 3000~6000°C 정도의 고온이므로 용접봉의 선단, 이행 중의 용적 및 용융지 표

\* 대우조선 해양연구 개발실, 정회원

면에서는 금속의 증기와 플렉스 등을 구성하는 물질의 증기가 격렬하게 발생하여 그 부위에서 상당한 증기압이 형성된다. 이때 가스가 높은 증기압과 어울어져 폭발을 하게되며, 용적이 비산되어 스팬터가 발생하게 된다.

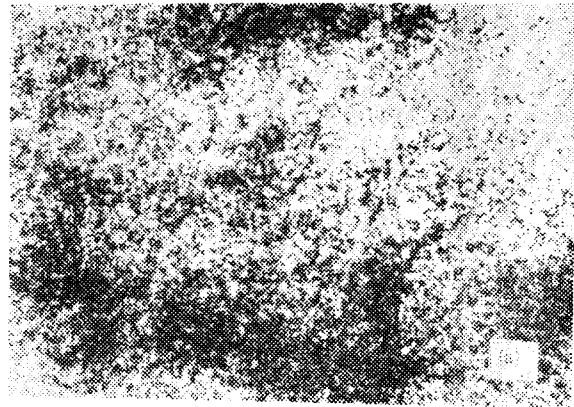
Type III은 아아크 힘에 의한 스팬터의 생성으로 아아크가 지속해서 존재할 때에 단시간에 전류 및 전압 상승이 일어나면서 심한 반발력을 받게 된다. 이 현상이 일어나면 용접봉 끝에 매달려져 있던 용적이 격하게 위로 울러지고 아아크 반발력에 의해 옆으로 날아가게 되는데 이때 상당히 큰 입도의 스팬터가 발생하게 된다.

Type IV은 가장 기본적인 것으로 아아크 재생에 의하여 스팬터가 생성된다. 아아크열 및 용접재료의 전기발열에 의해 용접재료가 용융될 때 용접재료 끝에 용적이 생성되면 용적의 중량과 아아크 반발력이 어울려서 잠시 용접재료 끝에 머물러 있게 된다. 그후 용적의 무게가 아아크 반발력 보다 크면 용적이 크레이터와 접촉된다. 용적이 크레이터 쪽으로 이전됨에 따라 가교가 형성되고 그곳에 전류가 집중하면 전기발열에 의해 가교가 증발하고 가교가 끊어질 때 아아크가 재생된다. 이때 주위의 가스가 급격히 팽창해서 용접금속의 일부를 스팬터로 날려보낸다.

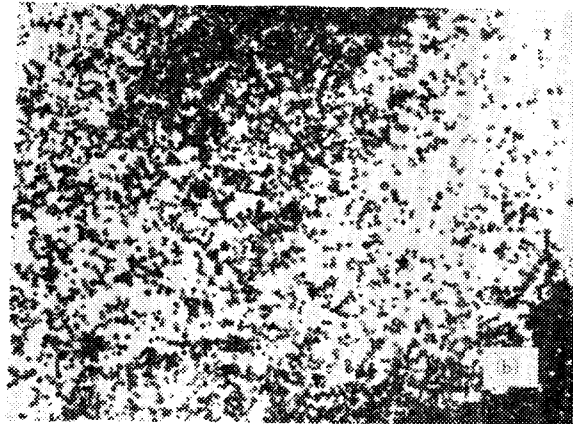
이런 과정들을 통해 발생된 스팬터는 구상에 가까운 형상을 갖는다. 이들 중 큰 입도의 스팬터는 거의 모체 표면에 부착되고 매우 미세한 스팬터는 비행도중 공중에서 산화되어 모체에 큰 영향을 주지 않으나 공기 중에서 날아다니므로 인체에 피해를 준다.

## 2.2. 스팬터의 형상

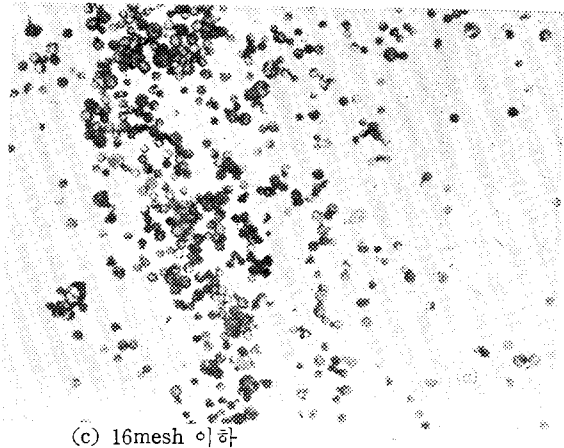
본 실험에서 얻은 스팬터의 형상 및 입도 분포는 사진 1과 같다. 입도 및 스팬터의 형상을 다음의 3종류로 분류하였다. 제 1은 30mesh 이상 크기의 스팬터로 사진 1(a)에서 보는 바와 같이 완전한 구형의 미세립 형상이다. 제 2는 16~30mesh간의 스팬터로 사진 1(b)에서 보는 바와 같다. 이것 또한 완전한 구형을 가지고 제 1, 제 2의 스팬터는 용적이 공중에 비산할 때 구상화되며, 즉시 냉각되어 낙하하므로 모체에 큰 영향을 주지 않는다. 제 3은 16mesh 이하의 스팬터로 사진 1(c)에서 보는 바와 같이 주로 반구형이다. 이것은 스팬터의 입경이 크고 공중에서 지체하는 시간이 짧아 완전 냉각되지 않은 상태에서 모체에 낙하되며 그후 응고되기 때 문인 것으로 생각된다. 이 16mesh 이하 크기의 스팬터는 모체의 잠식 깊이가 깊어 용이하게 제거되지 않는다. 따라서 작업성을 향상시키기 위해서는 16mesh 이하의 스팬터 생성을 억제하는 작업조건을 설정해야 한다.



(a) 30mesh 이상



(b) 16~30mesh



(c) 16mesh 이하

사진 1. 스팬터 형상(배율 1:1)

## 3. 실험방법

스팬터량을 측정하는 방법에는 표 1과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있으며 각각의 경우 표 1에서와 같은 제한이 있다.

표 1. 스팬터량 측정방법 및 제한조건

방 법	필수조건 실측입도재현 가능분리성	필수조건		
		△	○	×
사 진 법	카메라 사용	△	△	×
	고속도 사진	△	○	×
중 량 법	용융용접 재료량과 용착량의 차	○	×	○
	노즐에 부착한 량 (CO <sub>2</sub> 경우)	○	×	○
	비산한 스팬터를 포집 (본 실험에서 사용)	○	○	○
인 간의 판	인간의 판능	×	×	△

○ : 양호  
△ : 보통  
× : 불량

즉 스팬터의 측정방법으로 다음의 3항목을 필수조건으로 갖추어야 한다.

- 스팬터량을 정량치로 하여도 파악이 가능할 것.
- 입도별로 분리하는 것이 가능할 것.
- 측정치의 재현성이 좋을 것.

본 실험에서는 중량법 중 비산한 스팬터를 포집하는 방법을 사용하였다.

### 3.1. 스팬터 생성과 비행거리

#### 3.1.1. 시편 및 실험장치

시편의 형상은 그림 2와 같고 실험장치는 그림 3과

표 2. 용접봉 및 모재의 화학조성과 기계적 성질

Properties	화 학 조 성						기 계 적 성 질			
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	0.2% Y.S (N/mm <sup>2</sup> )	T.S (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	
용접봉	E30MoL	0.038	0.33	2.40	13.58	22.29	2.37	483	601	34.6
	E317L	0.031	0.41	1.60	12.84	19.01	3.48	418	566	48.3
모 재	316L	Max 0.03	Max 1.00	Max 2.00	10.00— 14.00	16.00— 18.00	2.00— 3.00	247	547	40

표 3. 용접조건 (전류변화)

과 스	용 접 조 건				
	전 류 (A)	전 압 (V)	용 접 속 도 (cm/min)	적 (mm) 경	자 세
1	DC/AC 100	20-21	15-20	φ 3.2	아래 보기 맞대기 용접
2	DCRP 110-150*	21-23	15-20	φ 4.0	"
	AC 130-150*	21-23	15-20	φ 4.0	"

\* 10Amp 증가마다 스팬터 생성량 측정

같이 SUS 316 L 시편 양옆에 거리별로 구분되어 있는 스팬터 포집기를 배치시켰다.

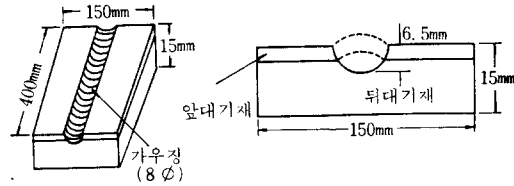


그림 2. 시편의 형상 및 크기

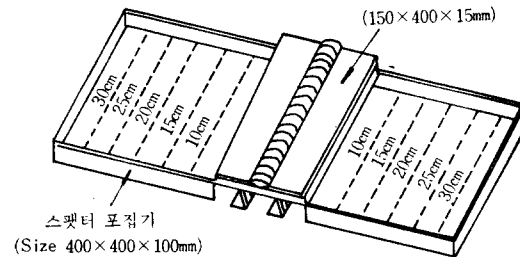


그림 3. 시편 및 스팬터 포집기 배치

시편은 스테인레스 클래드강 (AISI 316L+Steel)을 사용하였고 용접재료로는 1층 용접에는 φ3.2mm WEL 309 Mo(E 309 Mo-16), 2층 용접에는 φ4.0mm WEL 317 L을 사용하였다. 사용 재료의 화학적 성질과 기계적 성질을 표 2에 나타내었다. 실험조건은 표 3에서 보는 바와 같다.

3.1.2. 실험

- 1) 시편 및 스패터 포집기 위에 안티-스패터제를 도포한다.
- 2) 시편의 SUS면 중심부를  $\phi 8\text{ mm}$  gauze봉으로 가우징을 실시하여 현장조건과 동일하도록 한다.
- 3) 표 3과 같은 용접조건으로 용접을 행한다.
- 4) 스패터 포집기 위에 각각 다른 용접조건하에서 비산 낙하한 스패터를 거리별로 모아 무게를 측정한다.
- 5) 거리별로 모은 스패터를 다시 크기별로 구분하여 무게를 측정한다.

3.2. 용접재료 및 극성 변화에 따른 스패터 생성 변화 실험

전체적인 실험 방법은 3.1절의 내용과 거의 일치한다. 다만 개선을 주지 않고 패스를 시행한 점과 거리별 수집이 아닌 총량 수집을 한점과 50mesh 이하의 다소 큰 입도의 스패터만을 측정할 점이 다르다. 용접조건은 표 4와 같으며 용접재료는 표 5에 표시된 것이 사용되었다.

위와 같은 재료에 대해 각각 DCRP, DCSP 용접을 시행하여 수집한 스패터를 크기별로 (16mesh 이하, 16~30mesh, 30~50mesh) 구분한 뒤 무게를 측정하여 각 용접재료 성분에 따른 변화 및 극성에 따른 차이점 등을 조사하였다.

3.3. 스패터가 모재에 미치는 영향 실험

본 실험에서는 스패터가 발생하여 모재에 고착되었을 경우 모재에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시편에 안티-스패터제를 도포하지 않고 스패터가 모재에 부착되도록 하였다.

3.3.1. 시편 및 용접조건

시편은 AISI 316L로써 두께 15mm, 가로 세로 각각 100mm인 스테인레스강을 사용하였고, 용접봉은 AWS E 316 L-16에 준하는 A사의 832 SKR AC/DC를 사용하였다. 용접조건은 표 6과 같으며 AC용접기로 적정 전류보다 높게 2 패스 하향 용접을 행하였다.

표 4. 용접조건

극 성	용 접 전 류	진 압	속 도	용 접 봉 size	패 스
DCRP, DCSP	150-160A	21-23V	15-20cm/min	$\phi 4.0\text{mm}$	2패스 하향 용접

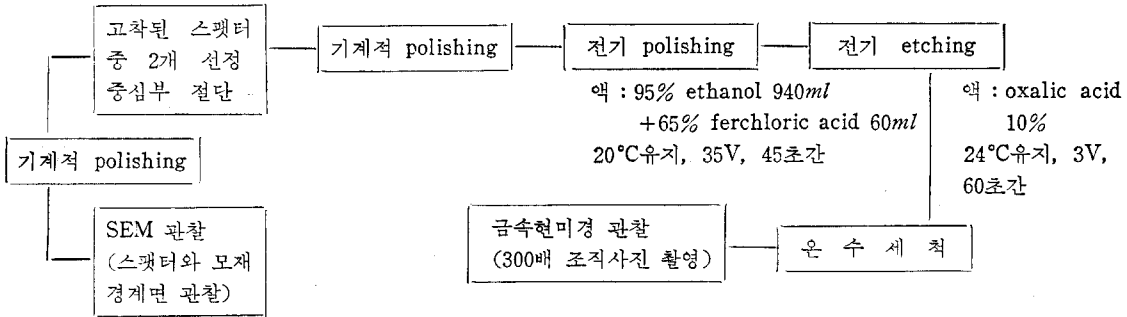
표 5. Chemical Composition of the Welding Electrodes.

사 명	상 품 명	규 격	화 학 조 성								비 고
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	기 타	
W 사	WEL 317L	E317L	0.031	1.6	1.41			19.01	12.84	Mo 3.48	
	WEL 309 Mo	E309Mo-16	0.06	2.06	0.42			23.40	12.99	Mo2.27	
S 사	INOX BWL	E316L-16	0.03	1.4	0.6	0.019	0.008	18.5	12.4	Mo2.3	
	FERINOX	E309Mo-16	0.07	1.4	0.5	0.018	0.008	23.8	13.3	Mo2.3	
C 사	NC-317L	E317L-16	0.03	1.64	0.42	0.02	0.01	19.04	13.04	Mo3.52	
	NC-308	E308-16	0.06	1.27	0.43	0.024	0.009	19.52	10.26		
A 사	832SNR-PW	E317L-16	0.02	1.2	0.9			19.04	14.0	Mo3.5	
	832SKR-AC	E316L-16	0.02	1.3	0.9			22.5	13.5	Mo2.7	
	P5-AC/DC	E309Mo-16	0.02	1.5	0.9			22.5	13.5	Mo2.7	

표 6. 적정 용접조건 및 본 실험 용접조건

용접봉 직경 (mm)	메이커 추천 용접조건		시 험 조 건		
	전 류 (A)		전 류 (A)	전 압 (V)	용 접 속 도 (cm/min)
	아 래 보 기	수 직			
4.0φ	110-140	110-130	180	25-30	15-20

3.3.2. 실험절차



4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 용접조건에 따른 스패터 생성변화 및 입도와 비행거리 관계

4.1.1. 전류변화에 따른 스패터 생성량

용접전류 변화에 따른 스패터의 생성량 변화를 그림

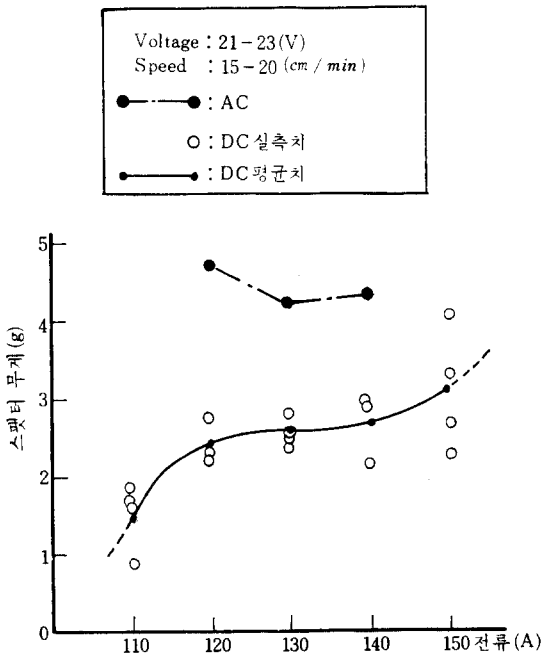
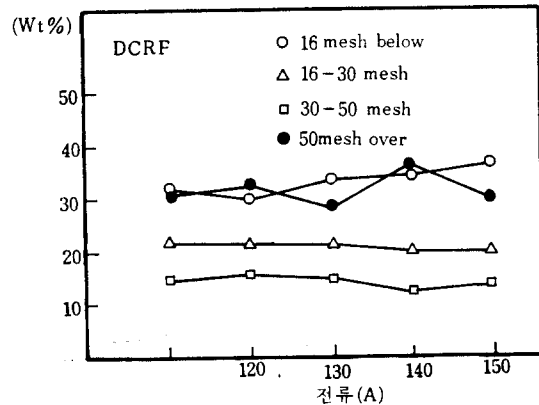


그림 4. 전류변화에 따른 스패터 생성량

4에 나타냈다. 각각의 경우 3~4회의 실험을 실시하여 산술적 평균을 취하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 DC 용접의 경우 전류가 상승함에 따라 스패터 생성량도 점차 증가하고, 변화량의 기울기는 적정전류 범위(120A~140A) 내에서는 다소 완만하고 이 범위 밖에서의 기울기는 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이외의 그림 4에서 1점쇄선으로 표시된 것은 DC의 경우와 전류, 전압, 속도 등을 같게하여 AC 용접한 것인데 DC 용접에 비해 스패터 발생량이 거의 2배에 도달하고 있다.

4.1.2. 용접조건과 스패터 입도의 관계

전류변화에 따른 스패터 입도 변화는 그림 5에서 보는 바와 같이 전류가 높아짐에 따라 16mesh 이하의 큰 입도의 스패터 비율이 증가하고, 16mesh~50mesh 사이의 중간 크기의 스패터는 일정한 비율을 보이며, 50



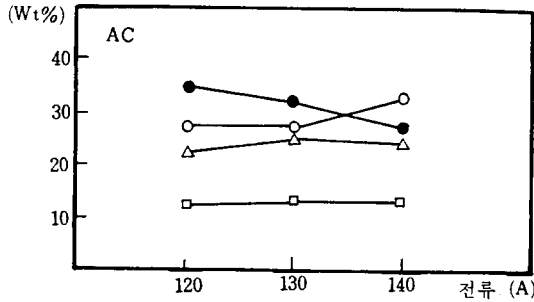


그림 5. 전류변화에 따른 스패터 입도변화

mesh 이상의 세립 스패터의 비율은 상대적으로 줄어드는 경향을 보이고 있다.

4.1.3. 입도와 비행거리의 관계

비행거리별로 (5cm간격) 스패터를 모아 측정해 본 결과 그림 6과 같은 입도와 비행거리간의 관계를 얻을 수 있었다. 이는 용접조건에 따라 다소 다른 양상을 보이는데 본 고에서는 대표적인 예로 전류 110A, 130A, 150A인 경우를 나타냈다.

이 결과를 검토해 보면 모재에 큰 영향을 주는 16mesh 이하의 큰 스패터는 대부분 용접 비이드에서 5cm 이내에 낙하하며 5cm이상에서의 감소율은 매우 급격하다. 한편 중간 크기의 스패터(16~50mesh) 및 50mesh 이상의 분진형 스패터는 입도가 큰 스패터에 비해 거리에 따른 감소율이 다소 완만하다.

전류가 높아짐에 따라 스패터 분포 기울기는 더욱 급격해지며, 이의 의미는 전류 증가에 의해 스패터 생성이 많아지며 이들이 주로 용접선 근처에 낙하함을 말해

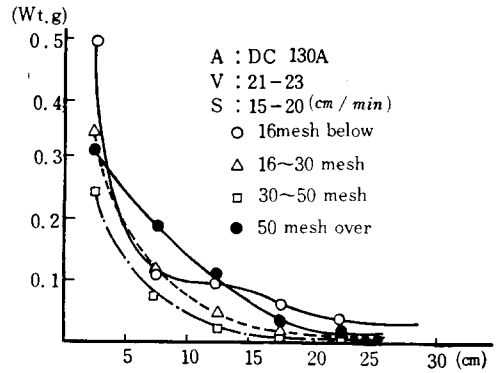
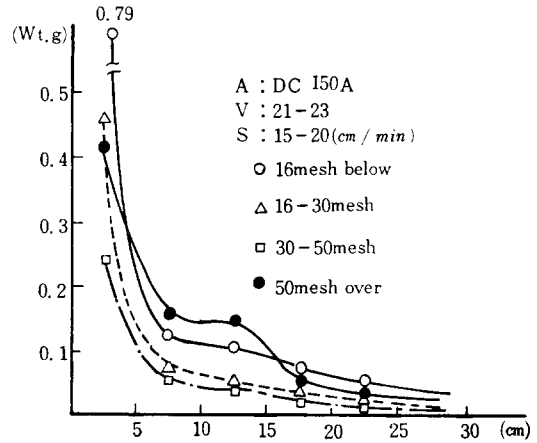


그림 6. 전류변화에 따른 스패터 입도와 비행거리 관계 (110A, 130A, 150A)

준다. 특히 16mesh 이하의 조립 스패터가 많이 발생하게 되며, 용접선 근처에 대부분 낙하하므로 인해 중립 세립 스패터 분포에 비해 더욱 급격한 변화를 보이게 되는 것이다.

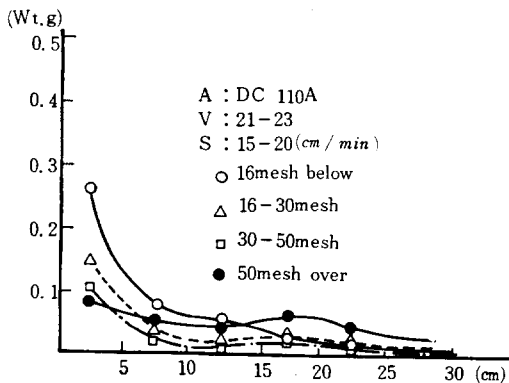
4.2. 용접재료 및 극성변화에 따른 스패터의 생성 변화

그림 7은 실험 3.2에 대한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 2회 실험 실시한 결과의 평균치이다.

40cm 용접장에 2패스 용접한 결과 평균 4개의 용접봉이 소모되었으며, 이때 발생한 스패터 중 50mesh 이하의 것들만 분류 측정된 값이다.

그림 7에 나타난 것과 같이 정극성 용접의 스패터 발생이 역극성 용접의 것에 비해 평균적으로 약 2.5배 정도 많다. 이러한 것은 역극성에 적합하도록 용접재료 성분이 구성되었음에 기인할 가능성이 있다.

832 SNR-PW의 경우를 제외한 AWS E317L-16 용



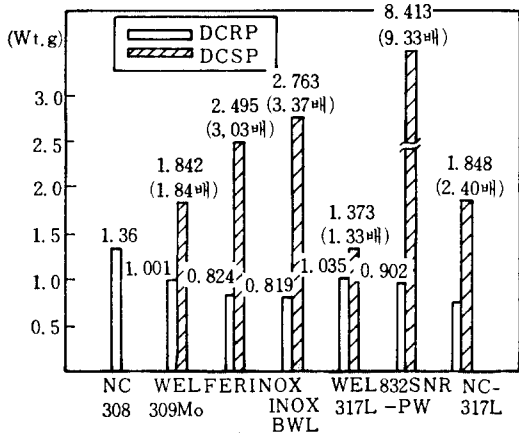


그림 7. 용접재료 및 극성변화에 따른 스패터 발생량  
 접재료는 DCRP, DCSP 양자의 경우 모두 스패터 발생에 있어, 어느 정도 안정성을 보이고 있다. AWS E 308-16의 경우 DCRP 용접시 많은 스패터 발생량을

보이는데 이러한 제반 사항을 검토하는데는 다음과 같은 요인들의 영향을 충분히 고려해야 한다.

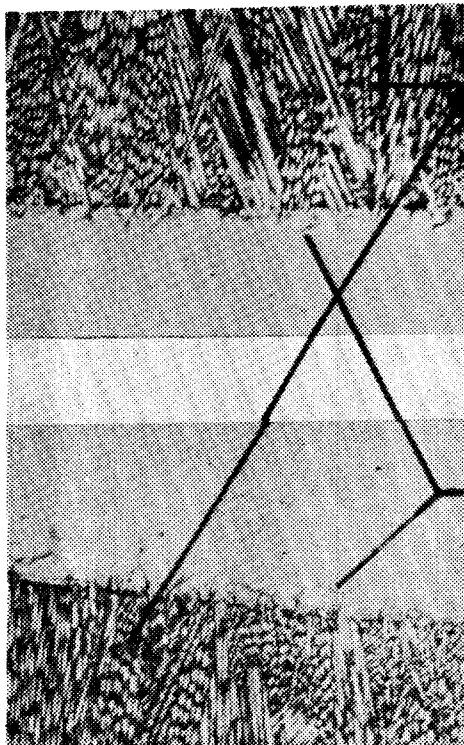
1) C의 영향 : 탄소함량이 증가하면 스패터량은 증가하며, C량이 0.1% 이상이 되면 스패터량의 증가가 현저하고, 또한 C량을 올리면 세립의 스패터는 증가하나 조립의 스패터는 역으로 감소하는 경향이 있다.

2) Mn 및 Si의 영향 : C량이 일정할 경우 Mn, Si량이 높게 되면 스패터량이 감소하고, 역으로 작게 되면 스패터량이 증가한다. 양자 중 Si이 스패터를 감소시키는 효과가 크다.

3) 이외에 용접재료 성분 중 Ti, Al, 희토류금속(REM), Se 등이 스패터 발생에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 확인되고 있다.

4) 보호가스 중의 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>도 스패터 발생을 증가시킨다.

위와 같은 요인들을 고려하면 AWS E 308-16 용접재료의 경우 타 재료에 비해 다소 높은 탄소함량 및 낮은 Si, Mn함량의 영향이 어느 정도 스패터 생성량에 영향



스패터가 급격히 냉각하여 생긴 inter-dendrite ditches로서, ferrite가 발생한 부위가 깊이 파여져 서로 연결된 구조이며, 냉각속도 차이에 따라 방향성을 가지고 있다. 또한 곳곳에 슬래그의 석출이 관찰되고 있다.

스패터의 냉각 수축으로 인하여 스패터 가까이 있는 모재의 입계에 micro-crack가 발생하고 있다.

사진 2. 스패터 부착부위 조직 관찰 (×300)

을 미쳤다고 추정할 수 있다. WEL 용접재료의 경우는 DCRP 용접시 타 재료에 비해 다소 높은 스패터 발생을 보이는 반면 DCSP의 경우는 매우 우수한 것으로 판명되었다.

결론적으로 각 용접재료는 고유의 특성에 의해 (재료 성분, 피복재 특성 등)스패터 발생량이 정해지며, 본 실험에서 쓰인 각종 규격의 스테인레스강 용접봉의 경우 DCRP 용접이 스패터 발생 감소에 효율적임을 알 수 있다.

4.3. 스패터가 모재에 미치는 영향

4.3.1. 금속현미경에 의한 조직 관찰

사진 2는 실험 3.3에 의해 채취한 스패터와 모재와의 경계 부위 시편을 금속현미경으로 확대 촬영한 것이다. 이 사진에서 스패터의 조직과 스패터가 모재에 어떠한 영향을 미치는가 하는 점을 조사할 수 있었다.

4.3.2. SEM에 의한 조직 관찰

사진 3은 그림 8에 보이는 바와 같이 큰 스패터 A와 작은 스패터 B가 부착된 시편을 채취하여 그 중 큰 스패터 A의 중앙 부위, 즉 스패터와 모재와의 경계 부위를 300배로 촬영한 것이다. 그 결과 “가”부위에 미세균열이 발생되었으며 “나”부위에서는 슬래그 혼입을 관찰할 수 있었다. 이 “가”부위의 미세균열을 확대 촬영한 것이 사진 4이며 또한 그림 8에서 보인 작은 스패터 B의 중앙 부위를 3000배로 확대 촬영한 것이 사진 5이다.

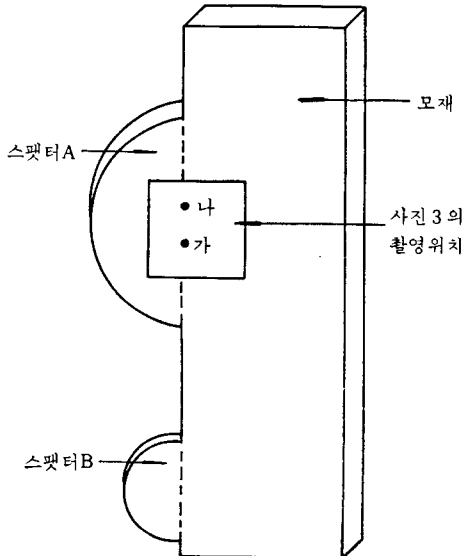


그림 8. 시험편 형상

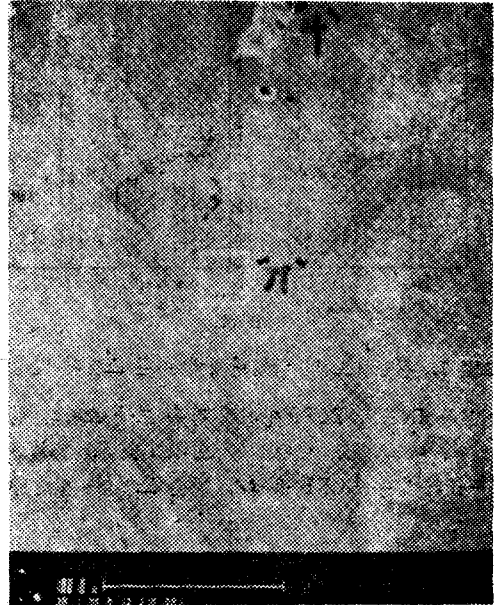


사진 3. 그림 8의 스패터 A 중심부의 조직 관찰 (×300)

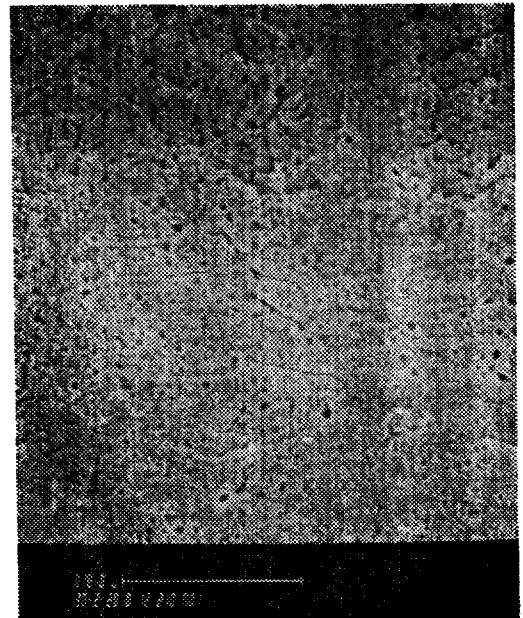


사진 4. 사진 3의 “가”부위 조직 관찰 (×3000)





사진 5. 그림 8의 스패터 B 중심부 조직 관찰 (×3000)

사진 4에서 보는 바와 같이 많은 미세균열이 존재하고 있고, 이의 평균 길이는  $4\mu\text{m}$  정도이며, 경계선을 중심으로 양쪽으로 뻗어 있음을 볼 수 있다. 이러한 미세균열은 부착된 스패터 크기가 작아질수록 점차 줄어들며 사진 5에서와 같이 어느 일정한 크기 이하가 되면 균열이 발생치 않음을 알 수 있다. 이는 크기가 작은 스패터는 대부분 비행 중 산화 냉각되며 또한 부착되었을 경우라도 열영향 및 수축응력 등이 큰 스패터에 비해 아주 경미하기 때문이다.

이외에 스패터와 모재의 경계부에서는 슬래그 석출 및 스패터 끝단 부위와 모재사이의 불완전 용입에 의한 오우버랩, 모재와의 충돌시의 언더컷트 발생 등의 현상을 많이 볼 수 있으며, 이러한 현상들로 인해 스패터로 인한 틈부식, 흠부식 등의 발생 위험도가 높아진다. 또한 스패터와 모재와의 조직적 이질성 때문에 국부적인 전기 cell을 형성하여 부식을 촉진시키는 요인이 된다. 이외에도 경계 부위에 존재하는 미세균열이 반복하중에 의해 성장할 우려가 있다.

## 5. 결 론

### 5.1. 용접조건에 따른 스패터 생성변화 및 입도와 비행거리의 관계

1) 용접전류, 전압, 속도의 증가에 따라 스패터 입도  
大韓熔接學會誌 第2卷 第2號 1984年 12月

가 커지며, 총 생산량도 증가한다.

2) AC 용접시는 DC 용접에 비해 약 2배의 스패터 발생량을 보인다.

3) 대다수의 스패터 (약 60% 이상)는 용접 비이드에서  $5\text{cm}$  이내에 낙하하며, 거리에 따른 스패터량의 변화는 입도가 큰것은 급격히 변하고 중간이나 작은 입도의것은 완만하게 줄어드는 추세를 보인다. 전류가 높아지면 이들 스패터 분포 기울기는 더욱 급격해 진다.

### 5.2. 용접재료 및 극성변화에 따른 스패터의 생성변화

1) SUS 용접재료 중 당사에서 보유하고 있는 7종류의 용접봉에 대한 실험 결과로서, DCSP 용접의 경우 DCRP 용접에 비해 평균적으로 약 2.5배 정도의 스패터 발생량을 보이고 있다.

2) 스패터 발생량에 영향을 미치는 재료의 요소는 피복제의 특성, 재료의 성분 및 아아크시의 보호가스 성분 등이며, 특히 C, Mn, Si, 및 가스 중의  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ 의 영향이 크다.

### 5.3. 스패터가 모재에 미치는 영향

1) 스패터가 모재에 고착시 이들은 경계부에 슬래그 석출, 불완전 용입에 의한 오우버랩, 언더컷트 등을 유발시키며, 또한 부착면의 하부에는 미세균열이 형성된다. 이로 인하여 틈부식, 흠부식 등의 각종 부식 가능성을 증대시킨다.

2) 일정 크기 이하의 스패터는 모재에 영향을 미치지 않으며 작은 입도의 스패터는 비행 중 산화된다.

## 참 고 문 헌

1. Herbert H. Uhling, *Corrosion and Corrosion Control*, Wiley, 2nd. ed. pp.60~182.
2. AWS, *Welding Hand Book* Vol.1, pp.59~66.
3. Magci A Novel Shielded Arc Welding Process, *Metal Construction*, 10, (1982).
4. 山田忠昭,  $\text{CO}_2$  Arc 용접에 있어서 Spatter 발생, 용접기술, 2월, (1982).
5. 木村幹男,  $\text{CO}_2$  Arc 용접에 있어서 Spatter에 관하여 일본 용접기술, 2월, (1984).
6. Toshio Arai, *Spattering in  $\text{CO}_2$  Arc Welding*, 일본 용접학회 논문집, Vol.1, No.2, (1983).
7. 일본용접학회편, 용접편람, pp.213~223, 환선.
8. 최대순, 피복강의 용접에 관한 연구, pp.12~35. 대우 조선 선박해양 연구소