

# 서브머지드 아크 클래딩에 의한 표면 피복층의 마모특성

김권흡\*, 권오양\*\*

## Wear Characteristics of Submerged-Arc Cladding

Quan-Qia Jin\* and Oh-Yang Kwon\*\*

### ABSTRACT

This paper is to investigate the wear behavior of submerged-arc claddings by the wear test with a ball-on-disk type wear testing machine in air. The specimens were clad with Stoody105 alloy wire on a medium carbon steel (SM45C) substrate by submerged-arc cladding process under different welding parameters. The wear behavior of the cladding through ball-on-disk test has been studied under the wear load from 5 to 16 N and the sliding speed from 8 to 35 cm/s. The weight loss of the specimen was measured. Scanning electron micrographs of the worn surface show a layer of oxide film formed on the worn surface. Oxidation wear mechanism controls the wear process. The spalling of the oxide is caused by the repeated rubbing fatigue mechanism.

**Key Words:** Submerged-arc cladding(서브머지드 아크 클래딩), Wear(마모), Dilution(희석율), Stoody alloy(스투디 합금)

### 1. 서론

클래딩은 모재가 가지지 못한 특성을 얻기 위해 모재 표면에 다른 재료를 부착하는 것으로, 기계구조용 소재의 내마모성, 내식성 등 표면특성의 향상을 위해 널리 사용되고 있다. 지난 수 십년간 클래딩 방법은 항공산업, 자동차산업 뿐만 아니라 제조업을 포함하여 모든 분야의 다양한 응용측면에서 마모와 부식 문제를 해결하는데 사용되어 왔다. 최근에 화학 증착법, 물리 증착법, 세라믹코팅 등과 같은 경질코팅 기술이 이용되어 왔으나 코팅층의 취성 및 밀착강도의 저하로 열악한 환경에서의 고성능의 내마모성, 내식성 및 내열성 부품 개발을 위해서는 아직도 해결해야 할 문제점이 많다.

아크용접에 의한 클래딩 방법은 용융이 가능한 대부분 재료에 적용할 수 있고, 모재의 크기와 형상에 비교적 제한이 적으며, 형성속도가 빠르고, 후막화가 가능하다. 특히 서브머지드 아크 클래딩은 와이어의 공급 속도를 자동으로 조절할 수 있고, 플럭스가 아크 열을 막아주기 때문에 열손실이 적으며 대 전류를 사용할 수 있는 등 장점이 많다. 따라서 희석율이 큰 단점에도 불구하고 점착율이 높고 자동화가 가능하며 부품에 대면적 코팅층의 형성이 가능한 장점을 살려 실제로 중공업 제품을 비롯한 석유화학, 압력용기 등 폭 넓은 분야에서 마모와 부식문제를 해결하는데 많이 사용되어 왔다. 또한 보수용접 측면에서 부품의 원가를 줄이고 사용수명을 연장시키기 위해 철강산업

\*\*\* 2002년 7월 2일 접수  
\* 인하대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 인하대학교 기계공학부

에서의 압연용 롤, 터빈 축(shaft)<sup>(1-3)</sup> 등에 사용되어 왔다. 한편 마모진행시의 클래딩층 마모기구를 파악하는 것은 사용 분위기에 적합한 클래딩 선택 및 내마모성 향상 방안을 마련하는데 매우 중요한 역할을 하므로 이 또한 많은 연구를 필요로 하는 분야이다. 지난 수 십년간 서브머지드 아크 클래딩층의 표면특성에 관한 연구가 많이 이루어졌으나 실험조건 및 실험환경이 다르므로 실험수치가 많이 분산되어 있으며, 많은 연구는 주로 더욱 높은 접착율과 양호한 클래딩층을 얻기 위한 연구와 일정한 공정변수에서 여러 가지 클래딩 재료에 의해 형성된 클래딩층의 화학적 조성분석, 비드 특성, 회석율 등에<sup>(4-7)</sup> 대한 연구가 이루어졌으며, 특정한 환경에서 클래딩 공정변수에 따른 마모기구에 대한 연구는 아주 적다. 또한 클래딩층의 마모는 동일한 클래딩이라도 사용환경에 따라 서로 다른 형태로 나타내며, 실제 접촉면에서는 한가지 이상의 마모기구가 동시에 작용하므로 연구자들 사이에도 의견들이 매우 다양하다. 특히 서브머지드 아크 클래딩 공정에서 회석율이 큰 단점으로 인하여 모재가 클래딩층의 특성에 큰 영향을 미치므로 주로 클래딩층의 회석율과 비드 특성에 대한 연구가 많이 이루어졌으며, 특정한 환경에서 클래딩 변수에 의한 마모기구에 대한 정보는 아주 미흡한 실정에서 클래딩 변수가 클래딩층의 기계적 특성, 마모거동 및 회석율에 미치는 영향에 대하여 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 공정변수에 따른 서브머지드 아크 클래딩층의 마모특성을 규명하기 위하여 구조용 재료로 많이 사용되는 SM45C 중탄소강을 모재로, Stody105 서브머지드 아크 용접용 와이어를 사용하여 여러 공정변수에서 클래딩층을 형성하여 mild condition 에서 클래딩 공정변수가 클래딩층의 기계적 특성, 마모거동, 비드 특성 및 회석율에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 또한 마모면을 SEM 을 이용하여 면밀히 관찰함으로써 가능한 마모기구를 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편 제작

본 실험에서는 DSM-800 형 서브머지드 아크 용접기를 이용하여 SM45C 중 탄소강을 모재로 하고 Stody105 서브머지드 아크 용접 와이어( $\phi 3.2$ )

를 이용하여 용접 비드를 중첩시키면서 클래딩층을 얻었다. 클래딩층과 모재 계면접촉 및 클래딩층의 품질 향상을 위하여 모재 표면의 이 물질을 폴리싱 방법으로 제거하였다. Table 1 은 모재와 클래딩 재료의 조성을 나타낸다.

클래딩층의 품질에 가장 크게 영향을 미치는 공정변수로는 클래딩 전류, 아크전압, 이송속도 등이 있다. 본 연구에서는 클래딩 전류와 이송속도를 주요 공정변수로 선정하여 여러 변수에서 클래딩층을 얻었다.

Table 1 Chemical composition of substrate and cladding wire (wt%)

Element	C	Si	Mn	P	S	
SM45C	0.43	0.24	0.77	<0.025	<0.024	
Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Wire	0.2	1.3	2.0	2.8	0.4	0.15

Table 2 Processing variables of submerged-arc cladding

Wire feed rate (m/min)	2.1
Voltage (V)	38
Current (A)	300, 360, 420, 500
Travel speed (mm/s)	3.5, 5.0, 5.88, 7.14, 9.54

Table 2 는 클래딩 변수를 나타낸다. 마모시험은 소정의 크기( $\phi 30 \times 10$ )로 가공한 뒤 시험 및 상대재의 접촉면을 실험 전에 균일화하기 위하여 클래딩 표면을 평면연삭기에 의해 표면가공하고 연마하여 표면조도가  $0.2 \mu\text{m(Ra)}$ 가 되도록 한 후 아세톤으로 초음파 세척기에 15분 세척하여 사용하였다.

### 2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 여러 공정변수에 의해 형성된 클래딩층의 내마모성을 알아보기 위하여 ball-on-disk 형 마모시험기를 사용하였고 마모조건은 상온에서 무윤활 상태로 마모실험을 수행하였다. Fig. 1 은 마모시험기의 구성도를 보여준다.

마모실험 시 상대시험편으로는 ball-on-disk 형의 상대재인 HRc 62 의 경도를 갖는 베어링용 강구를 사용하여 두 단계로 나누어 실험을 수행하였다. 첫 단계에서는 일정한 공정변수에서 형성된 클래딩층에 대하여 마모하중을 5, 8, 12, 16 N 으로, 마모속도를 8, 15, 25, 35 cm/s 로, 마모거리를 500, 1000,

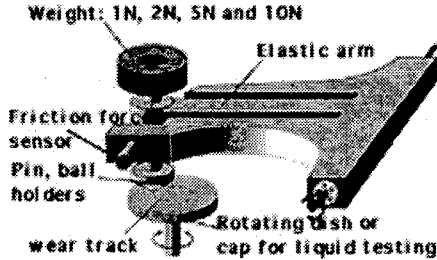


Fig. 1 A schematic diagram of wear tester

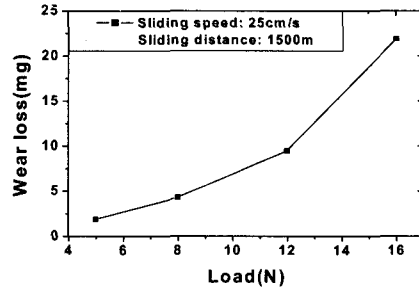
1500, 2000 m로 하여 마모실험을 수행하여 마모변수가 마모특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하고, 두 번째 단계에서는 마모거리 1500 m에서 하중을 12 N으로, 미끄럼속도를 15 cm/s로 하여 일정한 마모변수에서 여러 가지 클래딩 공정변수에 의해 형성된 클래딩층에 대하여 마모실험을 수행하여 클래딩 변수가 마모특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 마모시험 후 0.1 mg 정밀천칭으로 마모량을 구하고, 마모면을 주사전자 현미경으로 관찰하였다. 클래딩층의 기계적 특성으로는 경도를 측정하였다. 클래딩층의 비드 특성 및 회석율을 관찰하기 위하여 여러 변수에서 형성된 클래딩층의 비드 폭을 측정하고, 단면을 연마한 후 etching하여 회석율을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

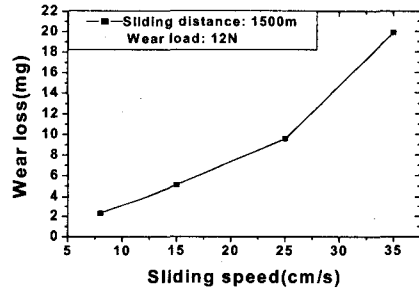
#### 3.1 마모변수에 의한 클래딩층의 마모특성

Fig. 2는 마모변수와 클래딩층의 마모관계를 나타낸다. 그림에서 일반적인 경향과 마찬가지로 마모하중, 마모속도, 마모거리의 증가함에 따라 마모량이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 2(c)는 마모 거리에 따른 마모량의 측정결과를 나타낸다. 그림에서 첫 500 m에서 마모량이 급속히 증가하며 그 이후로는 마모거리가 증가하면서 마모량이 다소 작아지며 마모되는 정도가 어느 정도 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 즉 초기마모 및 정상마모 구분이 명확한 것으로, 이것은 마찰초기에 상대 마찰면 사이에 친화력이 없는 상태에서 초기마모가 진행되면서 발생된 마모분말에 의한 것이며 또한 상대면의 미소돌기가 절삭작용을 하는 것 때문에 마모량이 크고 마모가 진행되면서 마모분말이 자기 유회작용을 하며 또한 마찰면 사이의 온도가 점점 상승하게 되면서 산화막이 형성되기 때

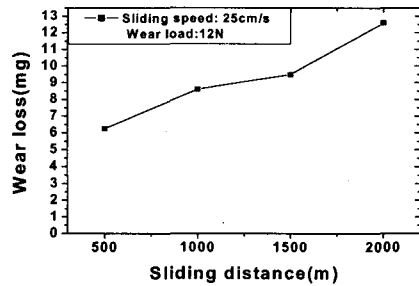
문이라 사료된다. 산화막은 취약하고 탈락이 쉬우며 마모가 크지만 mild condition에서 일정하게 응착을 막을 정도로 보호 역할을 할 수도 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Relationship between weight loss and wear parameters

#### 3.2 클래딩 공정변수에 따른 마모특성

Fig. 3은 클래딩 공정변수와 클래딩층의 마모량 사이의 관계를 보여준다. Fig. 3(a)는 클래딩 전류와 마모량의 상관관계를 나타낸다. 클래딩 전류가 증가함에 따라 클래딩층의 회석율이 커지며 경도는 낮아졌지만 마모량은 오히려 줄어드는 경향을 나타내고 있다.

마모면의 관찰에 의해 마모는 주로 산화에 의

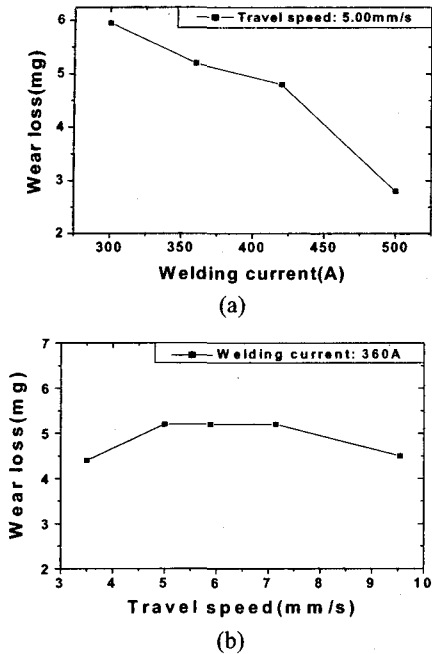


Fig. 3 Relationship between weight loss and cladding parameters

하여 진행되었음을 알았으며 표면피로에 의한 박리와 응착마모도 발생하였다. 이것은 전류가 증가함에 따라 경도는 낮아지지만 희석율이 증가하며 모재로 인하여 클래딩층의 탄소함량이 증가한다. 탄소함량이 증가하면 산화마모가 용이하지만 표면에 형성한 산화피막은 취약하고 탈락이 쉬우며 마모가 크지만 mild condition 에서 일정하게 응착을 막을 정도로 보호 역할을 할 수도 있기 때문이라 사료된다. 이것은 위에서 설명한 초기마모 시 마모가 크고 정상마모가 진행되면서 산화막이 형성되어 마모량이 다소 적어지는 것과 일치한다. 또한 마찰열에 의해 생긴 산화막은 취성이 높으므로 계속되는 하중에 의해 수직방향의 균열 발생을 유도하여 응착, 탈락현상이 발생된다. 응착부가 탈락되고 전이되는 것으로 인해 생기는 응착마모 시 마모량은 하중에 비례하고 경도에 반비례한다는 것은 일찍이 Holm<sup>(8,9)</sup>에 의해서 보고된 바 있다. Fig. 3(b)는 클래딩 속도와 마모량의 관계를 나타낸다. 클래딩 속도 변화에 따라 저속도와 고속도 시에 마모량이 다소 변화가 나타났으나 전류변화에 비해 변화가 적으며 전체적으로 비슷한 범위의 수치를 나타내고 있다. 즉 클래딩 속도에 비해 클래

딩 전류가 마모량에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 이것으로 클래딩 전류가 클래딩 속도에 비해 클래딩층의 품질특성에 미치는 영향이 보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 클래딩층의 기계적 특성

여러 공정변수에서 형성한 클래딩층의 기계적 특성을 비교하기 위하여 경도측정을 하였다. 클래딩 표면의 5 점을 택하여 경도를 측정하고 평균치를 구하였다.

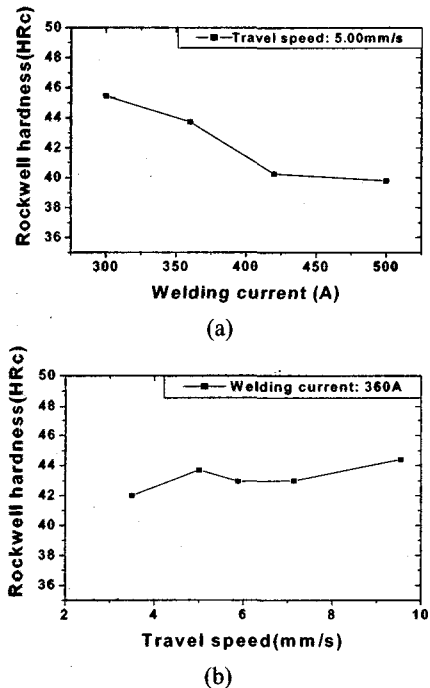


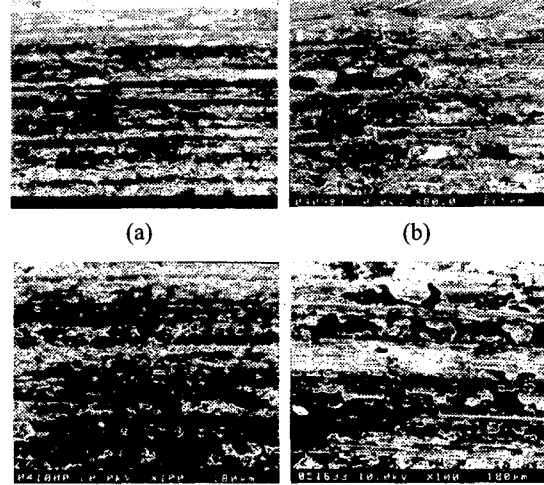
Fig. 4 Relationship between surface hardness and cladding parameters

Fig. 4 는 클래딩 표면의 경도와 클래딩 전류 및 클래딩 속도의 관계를 나타낸다. 모재인 SM45C 강의 일부가 클래딩 와이어와 함께 용융되기 때문에 클래딩층의 조성은 모재로 인한 희석의 영향을 받는다. Fig. 4(a)에서 표면의 경도는 클래딩 전류가 증가함에 따라 감소하는 양상을 나타낸다. 이것은 클래딩 전류가 증가함에 따라 비드 폭이 증가되고 클래딩층의 두께가 감소되며, 클래딩재의 용융속도가 보다 효과적으로 모재에 희석되므로 클래딩재의 합금원소가 모재에 용융되어 모재

의 특성이 클래딩층에 큰 영향을 미치기 때문이라 사료된다. Fig. 4(b)에서 클래딩 속도가 5 mm/s 이하에서 속도가 증가함에 따라 경도는 증가하는 양상을 보이고 속도가 5~7 mm/s 에서 속도가 증가함에 따라 경도는 다소 감소하는 경향을 보이며 속도가 계속 증가하면서 경도는 증가하는 복잡한 거동을 나타낸다. 이것은 클래딩 속도가 클래딩 진류에 비해 용융에 미치는 영향이 비교적 적으며, 모재에 대한 용입이 저속도에서 클래딩 속도가 어떠한 값에서 최대가 되고 이 값보다 증가 또는 감소하면 회색율은 감소하기 때문인데 이 구간에서 모재가 클래딩층에 미치는 영향이 다소 복잡한 양상을 나타낸다.

**3.4 마모기구 관찰**

여러 가지 마모조건 및 클래딩 조건에서 수행한 마모면의 SEM 관찰 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 하중 5 N에서 마모면이 흰 산화물로 씌어져 있는 것을 볼 수 있다. 마모하중 및 마모거리가 증가함에 따라 클래딩층이 떨어져 나가 겹겹이 응착된 모습을 나타내며, 클래딩 속도 9.54 와 5 mm/s 에서는 거의 일정한 모습을 나타낸다. Fig. 5(c)는 마모거리 500 m 에서의 초기마모 형상을 나타낸다. 초기마모는 친화력이 없는 상태에서 마모가 진행되면서 상대재와의 응착과 탈락으로 마모입자들이 생성되고 이 입자들에 의한 마모로 굵은 줄무늬와 함께 흠이나 굽힌 흔적을 찾아볼 수 있으며 국부적으로 산화마모와 겹겹이 응착된 모습을 볼 수 있다. SEM 조직에서 겹겹이 응착된 부분들은 클래딩 표면에서 상대적으로 돌기 된 부분이며 마모 도중 더 많은 하중을 받은 부분이라 할 수 있다. 이들은 마찰열로 인해 산화가 다른 부분에 비해 더 많이 진행되었으며 반복하중에 의해 탈락된 것으로 사료된다. 또한 응착된 부분들은 수직방향의 균열을 포함하였으며 이것은 클래딩층 내의 균열, 기공이나 개재된 산화물 등에서 시작된 클래딩층 사이의 균열이 상대재인 볼의 연속적인 반복 하중에 의한 표면피로에 의해 박리된 것으로 사료된다. Fig. 6 은 EDS 성분분석을 위하여 Fig. 5(a)와 동등한 시편의 마모면을 고배율(200 배)로 관찰한 것으로, A 로 표시한 흰 산화막층과 B 로 표시한 회색층에 대한 EDS 분석 결과를 Table 3 에 나타내었다.



(a) Wear parameters: 5N, 25cm/s, 1500m  
Cladding parameters: 5mm/s, 360A  
(b) Wear parameters: 12N, 25cm/s, 1500m  
Cladding parameters: 5mm/s, 360A  
(c) Wear parameters: 12N, 25cm/s, 500m  
Cladding parameters: 5mm/s, 360A  
(d) Wear parameters: 12N, 25cm/s, 1500m  
Cladding parameters: 9.54mm/s, 360A

Fig. 5 SEM micrographs of worn surface

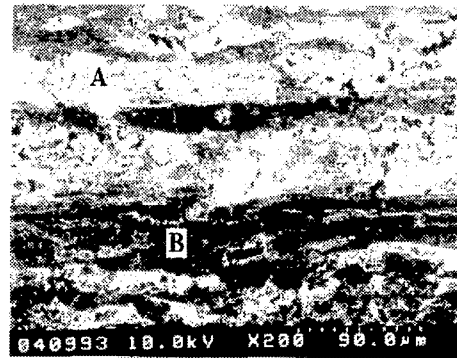


Fig. 6 SEM micrograph of worn surface

Table 3 Chemical compositions measured at worn Surface

Location		O	Si	Cr	Mn	Fe
A	wt(%)	8.13	1.09	2.05	1.49	Bal.
	at (%)	25.24	1.75	1.79	1.22	Bal.
B	wt(%)	-	1.13	2.47	2.03	Bal.
	at (%)	-	2.21	2.62	2.03	Bal.

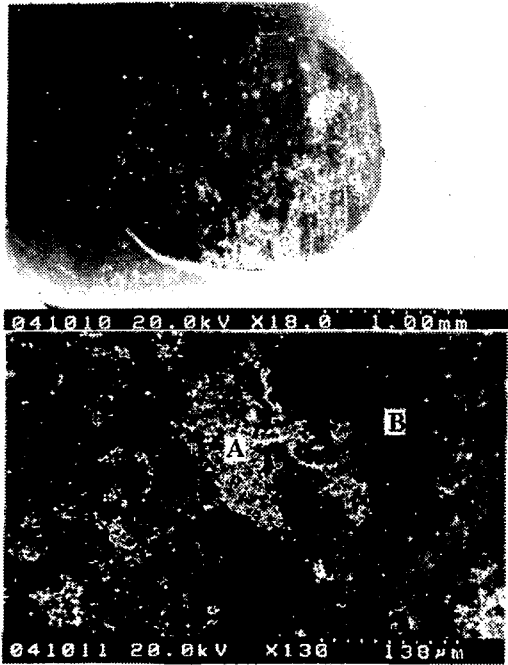


Fig. 7 SEM micrographs of worn surface of the ball

Table 4 Chemical compositions measured at worn surface of the ball

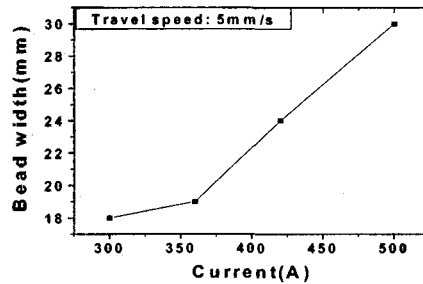
Location		O	Si	Cr	Mn	Fe
A	wt (%)	4.73	-	1.72	-	Bal.
	at (%)	14.74	-	1.66	-	Bal.
B	wt (%)	-	-	1.88	-	Bal.
	at (%)	-	-	2.02	-	Bal.

한편 상대재 볼의 경우 마모량은 시편에 비해 매우 적으며 정량적으로 측정된 결과는 시편의 1/3 정도이다. Fig. 7 은 상대적인 볼의 마모면의 SEM 관찰 결과를 보여준다. 시편의 경우에 비하여 흰 산화층이 적고 희박하게 국부적으로 분포되어 있으며 표면에 굵은 흔적이나 흠을 찾아 볼 수 없으며 응착, 탈락된 현상도 시편에 비해 적다. Table 4 는 볼의 마모면에서 흰 산화막층(A)과 검은 회색층(B)에 대한 EDS 분석 결과를 나타낸다.

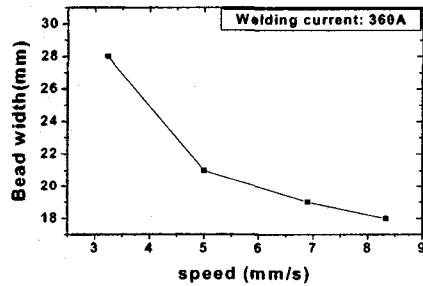
### 3.5 클래딩층의 비드 및 회석율에 대한 고찰

클래딩 부위의 비드 형상은 적절한 비드의 외관, 접합 부위에서 요구되는 강도 등과 같은 기계

적 성질을 만족하는지를 나타내는 품질 평가의 주요 기준이다. 비드 형상은 일반적으로 용접된 부재의 단면에서 폭, 높이, 용입으로 구분되며, 용접전류, 아크전압, 이송속도, 토치의 각도, 와이어의 직경 등에 의해 영향을 받으며 이 중에서 가장 영향을 많이 미치는 주 변수로는 용접전류, 아크전압, 이송속도 등을 들 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 Relationship between bead width and cladding parameters

본 연구에서 비드 형상 및 회석률과 클래딩 공정변수와의 상관관계를 규명하기 위하여 공정 변수에 따른 클래딩층의 비드 폭과 회석율을 측정하였다.

Fig. 8 은 단일 클래딩층의 비드 폭과 클래딩 전류 및 클래딩 속도와의 상관관계를 나타낸다. Fig. 9 는 클래딩층의 회석율과 클래딩 전류 및 클래딩 속도와의 상관관계를 나타낸다.

일반적으로 클래딩 전류가 비드 외관 및 용입에 미치는 영향이 이송속도의 영향에 비해 비교적 크다. 그럼에서 전류가 증가함에 따라 비드 높이가 낮아지며 비드폭이 증가한다. 이송속도와 비드의 크기는 반비례 한다. 이론적으로도 용접전류가

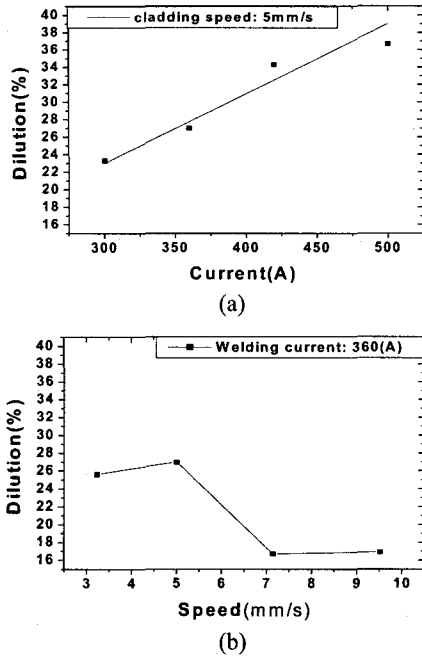


Fig. 9 Relationship between dilution and cladding parameters

용입에 가장 큰 영향을 미친다. Fig. 9(a)에서 클래딩 전류와 회석율의 관계를 보면 클래딩 전류가 증가함에 따라 회석율이 증가한다. 이는 기존의 결과와 잘 일치한다. 반면에 Fig. 9(b)는 이송속도와 회석율의 관계를 나타낸다. 이송속도의 경우 회석율의 변화는 이송속도가 5 mm/s 이하에서 속도증가에 따라 회석율이 다소 증가하며 5~7.14 mm/s 구간에서 클래딩 속도가 증가함에 따라 회석율이 감소하고 이송속도가 7.14 mm/s 이상으로 증가하면서 다소 증가하는 변화가 나타났으나 변화는 아주 적다. 이론적으로 이 범위에서 클래딩 속도가 증가함에 따라 회석율은 작아진다. 이것은 이송속도가 느리면 용접봉으로 부터 너무 많은 용융금속이 용착되고 용융금속이 아크 전방으로 흘러 들어가 모재에 일종의 완충 작용을 하기 때문에 용입이 잘 되지 않으며 반대로 이송속도가 빠르면 용접입열이 모재를 녹이는데 충분한 시간을 갖지 못하게 되어 용입이 잘 되지 않기 때문이다.

#### 4. 결론

서브머지드 아크 클래딩 방법으로 SM45C 탄소

강에 Stoddy 105 클래딩층을 형성하고 ball-on-disk 형 마모시험기를 이용하여 무윤활 건조마찰상태로 mild condition 에서의 마모특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 일정한 공정변수에서 형성한 클래딩층에서는 마모하중, 마모속도, 마모거리 증가에 따라 마모량이 증가하며, 초기마모와 정상마모의 구분이 명확하다.

2) 여러 가지 공정변수에서 형성한 클래딩층에서는 클래딩 속도 변화에 대해서는 마모량은 거의 일정하고, 클래딩 전류의 변화에 대해서는 300~500 A 범위에서 전류가 증가함에 따라 마모량이 감소하였다. 따라서 클래딩 전류가 클래딩 속도보다 클래딩 품질 특성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3) 마모면에 대한 SEM 관찰 결과 주로 산화에 의한 마모가 발생되었으며 상대재 볼의 반복하중에 의한 피로 박리와 응착마모도 발생되었다. 이로서 mild condition 에서의 마모는 주로 산화마모에 의한 것임을 알 수 있다.

4) 클래딩층의 표면경도는 클래딩 전류가 증가함에 따라 낮아지고, 클래딩 속도가 5 mm/s 이하에서 속도가 증가함에 따라 경도는 증가하다가 5 mm/s 이상에서 다시 감소하고 속도가 7.14 mm/s 를 초과하면서 경도는 다시 증가하는 복잡한 양상을 나타낸다.

5) 클래딩층의 비드 특성 및 회석율에 대한 관찰 결과 클래딩 전류가 증가함에 따라 비드 폭이 증가하고 회석율도 거의 선형적으로 증가한다. 반면에 클래딩 속도의 증가에 따라 비드 높이는 증가하고 비드 폭은 반대로 줄어들지만, 회석율은 대체로 감소하다가 속도가 7.14 mm/s 를 초과하면 회석율의 변화가 거의 없다.

#### 후 기

이 논문은 2000 년도 한국학술진흥재단의 연구비지원에 의하여 연구되었음(KRF99-005-E00006).

#### 참고문헌

1. V. D. Mallya, H. S. Srinivas, "Bead Characteristics in Submerged Arc Strip Cladding," *Welding J.*, Vol. 68, No. 12, pp. 30-36, 1989.

2. D. J. Kotecki, "Dilution Control in Single-Wire Stainless Steel Submerged Arc Cladding," *Welding J.*, Vol. 75, No. 2, pp. 35-s-45-s, 1996.
3. R. S. Chandel, H. P. Seow, F. L. Cheong, "Effect of Increasing Deposition Rate on the Bead Geometry of Submerged Arc Welds," *J. Mat. Processing Technology*, Vol. 72, pp. 124-128, 1997.
4. N. Murugan and R. S. Parmar, "Effect of Welding Conditions on Microstructure and Properties of Type 316L Stainless Steel Submerged Arc Cladding," *Welding J.*, Vol. 76, No. 5, pp. 210-s-220-s, 1997.
5. Y. S. Kim, Y. H. Kim, "Sliding Wear Behavior of Fe<sub>3</sub>Al-based Alloys," *Mat. Science and Engineering*, A258, pp. 319-324, 1998.
6. 서성문, 이보영, 이상율, "기계적 합금화한 Ni-base 자용성 합금 분말의 용사 및 코팅층의 마모특성에 관한 연구," *대한금속학회지*, Vol. 34, No. 7, pp. 870-876, 1996.
7. 정재현, 성환진, 안상호, "연주를용 스테인레스 내열강으로 육성용접된 피복재의 열피로 특성," *대한금속학회지*, Vol. 36, No. 1, pp. 33-36, 1998.
8. R. Holm, "Electric Contacts," *Almqvist and Wiksells*, Stockholm, Sweden, 1946.
9. E. Rabinowicz, "Friction and Wear of Materials," *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, U.S.A., pp. 143-188, 1995.