

## 해양환경 중에서 Ni-Cr 용사피복재의 침식-부식 거동에 관한 연구

임우조\* · 이상열\*\* · 윤병두\*\*\*

### Study on the Behavior of the Erosion-Corrosion for Ni-Cr Alloy Sprayed Coating in the Marine Environment

U. J. Lim · S. Y. Lee · B. D. Yun

**Key words** : Erosion(침식), Corrosion(부식), Marine Environment (해양환경), Sprayed Coating(용사피복), Polarization Curve(분극곡선), Passivity(부동태)

#### Abstract

Thermal sprayed Ni-Cr alloy coating on the carbon steel was carried out erosion-corrosion test and electrochemical corrosion test in the marine environment. The erosion-corrosion behavior and electrochemical corrosion characteristics of substrate(SS400) and thermal sprayed Ni-Cr coating was investigated. The erosion-corrosion control efficiency of Ni-Cr coating to substrate was also estimated quantitatively.

#### 시 론

최근 공업의 발전과 더불어 장치·설비, 자동차, 항공기 및 선박 등은 고성능 및 경량화 추세이다. 이와 같은 추세에 따라 유체를 사용하고 있는 기계 요소에서 유속 및 회전속도 등이 빠르게 되면 유체 충격과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인하여 침식이 발생하면서 기계의 성능 저하와 손상을 일으킨다. 이와 같은 침식 손상은 액체의 제트 또

는 액적이 고체표면에 충돌하여 발생하는 충격침식과 캐비테이션 발생시의 기포 붕괴에 따른 액적의 충격압으로 일어나는 캐비테이션침식 등으로 대별할 수 있다.

강전해질의 해양환경 중에서 기계적인 침식과 더불어 전기화학적 부식이 중첩하여 일어나는 경우에는 침식과 부식이 상호간에 가속하는 상승효과 때문에 기계장치의 수명에 치명적인 영향을 미친다<sup>1,2,3</sup>.

\* 부경대학교 교수(원고접수일 : 99년 7월)

\*\* 포항1대학 교수

\*\*\* 부경대학교 대학원

이러한 강전해질인 해양환경 중에서 침식-부식 손상을 방지하기 위하여, 가격이 저렴한 탄소강에 내식 및 내마모성이 우수한 다른 금속이나 합금으로 피복하는 방식법이 많이 이용되고 있다. 이러한 피복방식법 중에서 용사피복법은 가스 또는 전기에 의해 용융한 금속이나 합금을 목적물에 용사 피복하는 방법으로 피복을 비교적 간단히 실시할 수 있는 특징이 있다.

따라서 해양환경 중에서 Ni-Cr용사피복재의 침식-부식거동에 관한 연구를 하기 위하여, 본 연구에서는 Ni-Cr합금분말을 탄소강재에 용사피복한 후에 해양환경 중에서 침식-부식시험과 전기화학적 부식시험을 실시하였다. 이러한 실험결과를 토대로 하여, 기계적 침식거동 및 전기화학적 부식거동에 대해 규명하고, 모재에 대한 Ni-Cr용사피복재의 침식과 부식의 억제효율을 정량적으로 평가함으로써 해양환경 중에서 침식-부식의 방지에 대한 기초자료로 활용하는데 기여하고자 한다.

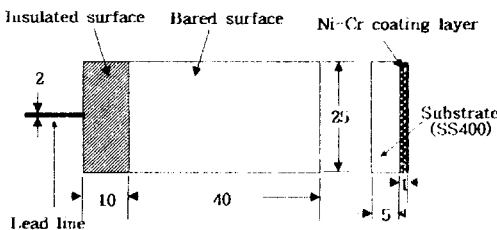
### 실험방법

#### 1. 시험재료

본 실험에서 분말용사를 하기 위해 사용한 모재

**Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of SS400 carbon steel used**

Chemical composition (wt %)	C	Si	Mn	P	S
	0.11	0.29	0.59	0.01	0.01
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)		Yield strength (MPa)	Elongation (%)	
	416		253	32	



**Fig. 1 Dimension of test specimen (unit : mm)**

는 시판의 일반구조용 탄소강재인 SS400으로서 그 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1과 같다. Table 1과 같은 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 SS400의 모재에 Table 2와 같은 화학적 성분을 가진 Ni-Cr계 분말재를 용사하여, 제작·가공한 시험편은 Fig. 1과 같다.

이 시험편의 유효노출면적 10cm<sup>2</sup>를 제외한 나머지 부분은 에폭시 수지로 절연하였으며, 직경 2mm의 비닐피복동선을 삽입하여 고정하였다. 본 실험에서의 용사조건은 Table 3에 나타내었다.

#### 2. 침식-부식 시험

모재(SS400) 및 Ni-Cr용사피복재의 침식-부식특성시험은 Fig. 2와 같은 침식-부식시험장치를 이용하였다. 내경 25mm의 배관에 노출직경이 3mm인 테프론재의 평행노즐(parallel nozzle)을 설치하고, 각 부식용액의 순환용으로 내식성 마그네틱 펌프를 부착하였다. 여기서 시험편과 시험장치의 각 부재들 사이에 이종금속접촉에 의한 전지작용부식(galvanic corrosion)을 방지하기 위하여, 순환회로 배관을 비롯한 시험장치의 부재들을 플라스틱, 테프론 및 아크릴 등의 절연성 재료를 사용하였으며, 실험중 시험편에서 부식된 부식생성물에 의한 전기화학적 영향을 제거하기 위하여 순환회로 배관에 절연성 필터를 설치하였다.

또 부식용액의 공급 및 순환은 마그네틱 펌프에 의해 노즐선단으로부터 매분 10l의 부식용액을 13m/s의 유속으로 분사하고, 분사된 부식용액은 노즐선단으로부터 100mm의 거리에 고정된 시험편에 충돌하도록 하여 용액의 충격에 의한 침식-

**Table 2 Chemical compositions of Ni-Cr powder(wt%)**

Chemical composition (wt %)	Ni	Cr	Si	Fe	B	C
	Balance	18.0	4.2	3.6	3.1	0.6

**Table 3 Spraying conditions**

Parameters	Conditions
Oxy. gas pressure	0.098 MPa
Ace. gas pressure	0.078 MPa
Spraying distance	50mm
Preheating temperature	400~500°C

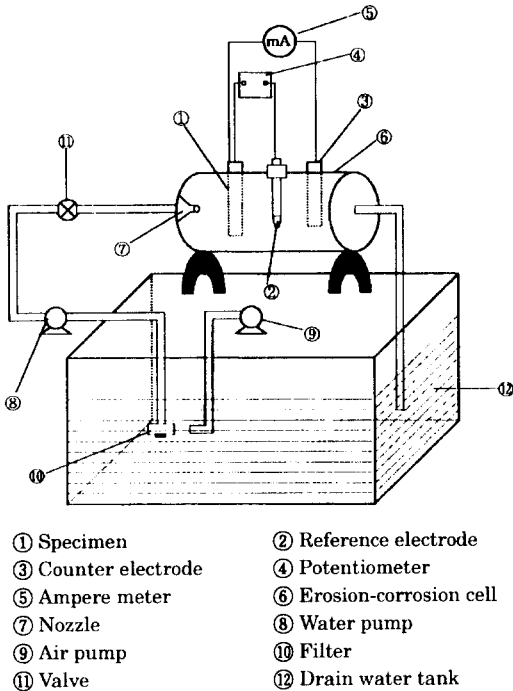


Fig. 2 Schematic diagram of erosion-corrosion test apparatus

부식현상이 발생하도록 하였다.

또한 부식용액은 증류수에 해수를 혼입하여 비저항을  $25\Omega \cdot \text{cm}$ (해수),  $5000\Omega \cdot \text{cm}$ (담수)로 일정하게 유지하여 실험하고, 수온은 실내온도로 유지하였다.

모재에 대한 Ni-Cr 용사피복재의 침식-부식 억제효율은 침식-부식시험 전후의 체적 변화비의 백분율로 표시하였다<sup>5)</sup>.

침식-부식억제효율(%)=

$$\left(1 - \frac{\text{Ni-Cr 피복재의 체적감소량}}{\text{모재의 체적감소량}}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서, 체적감소량은 모재 및 Ni-Cr용사피복재의 무게감소량을 각각의 밀도로 나누어서 구하였다.

### 3. 전기화학적 부식시험

모재(SS400) 및 Ni-Cr용사피복재의 전기화학적 부식특성시험은 EG & G사의 model 273A potentiostat/galvanostat, IBM PC, M352/252

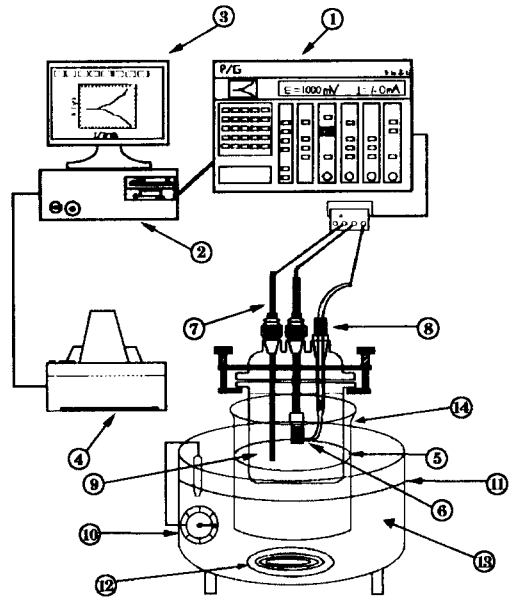


Fig. 3 Schematic diagram of polarization test apparatus

Table 4 Experimental conditions of the polarization test

Instrument	EG & G model 273A
Electrolyte	$25\Omega \cdot \text{cm}$ and $5000\Omega \cdot \text{cm}$ solution
Material	SS400 and Ni-Cr coating layer
Specimen preparation	1200 grid emery paper
Surface area	$10\text{mm}^2$
Temperature	Room temp.

corrosion software를 사용하여 시험하였고, 기준전극으로는 포화카로멜전극을, 보조전극으로는 고밀도 탄소봉을 사용하였다. 이 전기화학적 분극시험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. Table 4는 전기화학적 분극시험조건을 나타낸다.

그리고 각 부식용액 중에서 모재에 대한 Ni-Cr용사피복재의 부식억제율은 부식전위하에서 배류되는 부식전류밀도를 측정하여, 부식전류밀도 변화비를 백분율로 표시하였다<sup>5)</sup>.

부식억제효율(%)=

$$\left(1 - \frac{\text{Ni-Cr 피복재의 부식전류밀도}}{\text{모재의 부식전류밀도}}\right) \times 100 \quad (2)$$

### 결과 및 고찰

#### 1. 침식-부식거동

Fig. 4는 5000Ω·cm인 용액 중에서 침식-부식에 의한 모재인 탄소강재 및 Ni-Cr 용사피복재의

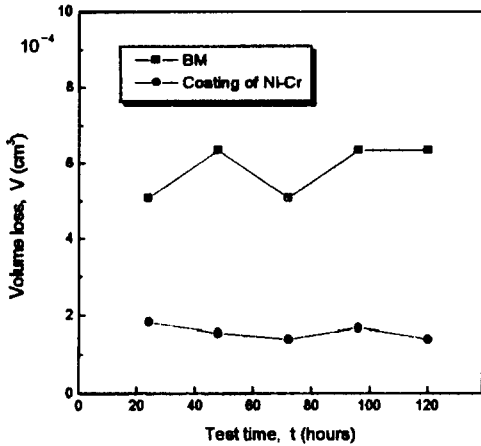


Fig. 4 Volume loss of substrate(SS400) and Ni-Cr thermal spray coating by erosion-corrosion in 5000 Ω·cm solution

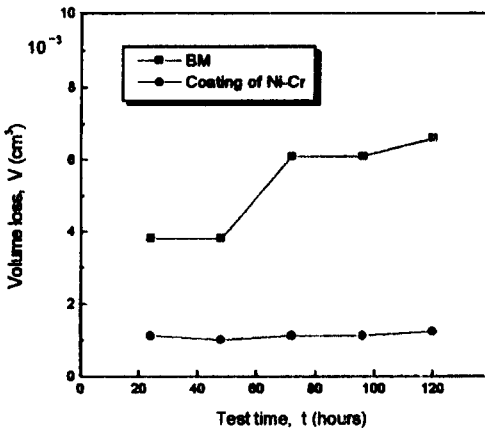


Fig. 5 Volume loss of substrate(SS400) and Ni-Cr thermal spray coating by erosion-corrosion in 25 Ω·cm solution

체적감소량을 시험시간의 경과에 따라 나타낸 것이다.

비저항이 높은 5000Ω·cm인 용액 중에서 침식-부식에 의한 모재인 탄소강재의 체적감소량은 Ni-Cr 용사피복재보다 더 높게 나타나고, 시간경과에 따른 Ni-Cr 용사피복재의 침식-부식 거동은 모재보다 안정되는 경향이다.

Fig. 5는 비저항이 25Ω·cm인 용액 중에서 침식-부식에 의한 모재 및 Ni-Cr 용사피복재의 체적감소량을 시험시간의 경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다.

강전해질인 25Ω·cm 용액 중에서 침식-부식에 의한 모재의 체적감소량은 Ni-Cr용사피복재의 체적감소량보다 높게 나타나고, 모재의 침식-부식손상거동은 시간이 경과하면서 거의 선형적으로 증가하는 거동을 보이는 반면에 Ni-Cr용사피복재의 침식-부식손상거동은 시간이 경과하면서 안정화되는 양상을 나타내고 있다.

#### 2. 전기화학적 부식거동

Fig. 6은 5000Ω·cm인 용액 중에서 모재 및 Ni-Cr 용사피복재의 분극곡선을 나타낸 것이다.

5000Ω·cm인 용액 중에서 Ni-Cr 용사피복재의 부식전위는 모재의 부식전위보다 더 貴電位化되고, 양극전위의 전영역에서 Ni-Cr용사피복재의 전류밀도는 모재의 전류밀도보다 더 적게 배류되고 있다. 또 양극전위가 높아짐에 따라 모재의 전류밀도는 급격히 증가하지만, Ni-Cr 용사피복재의 전류밀도가 거의 일정하게 배류되는 부동태

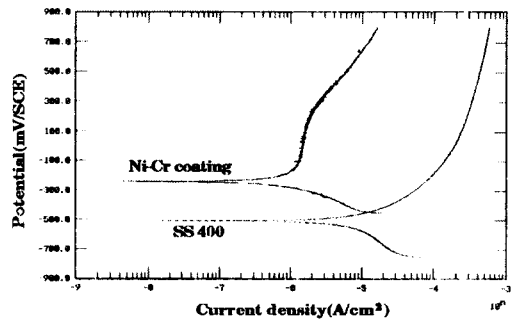


Fig. 6 Polarization curves of substrate(SS400) and Ni-Cr thermal spray coating in 5000Ω·cm solution

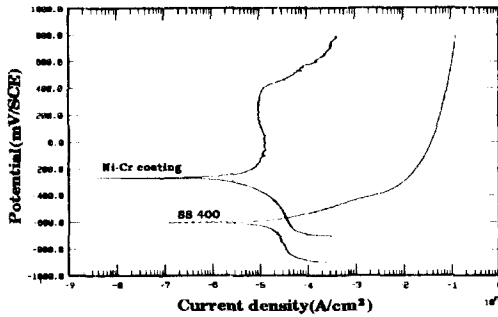


Fig. 7 Polarization curves of substrate(SS400) and Ni-Cr thermal spray coating in 25Ω·cm solution

(passivity)영역이 나타나고 이 영역은 양극전위 -220~+250mV/SCE 범위에서 나타나고 있다.

Fig. 7은 25Ω·cm인 용액 중에서 모재 및 Ni-Cr 용사피복재의 분극곡선을 나타낸 것이다.

부식전위와 전류밀도의 거동은 Fig. 6의 5000Ω·cm 용액 중에서도와 같이 Ni-Cr 용사피복재가 모재보다 더 貴電位化되고, 전류밀도는 더 적게 배류되고 있다. 또한 Ni-Cr 용사피복재의 부동태영역은 양극전위 -180~+430mV/SCE범위로 Fig. 6의 5000Ω·cm 용액 중에서 보다 부동태의 전위범위가 더 크게 되는 경향이지만, 부동태유지전류밀도(passive current density)는 5000Ω·cm용액 중에서 보다 25Ω·cm용액 중에서 더 높게 배류되고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7을 비교하면 5000Ω·cm인 용액 중에서보다 강전해질인 25Ω·cm인 용액 중에서 모재에 비해 Ni-Cr용사피복재의 전류밀도는 양극전위의 전영역에서 더 적게 배류되고 있는 경향을 보이고 있다.

### 3.3 Ni-Cr 용사피복재의 침식-부식의 제효율

비저항 25Ω·cm 및 5000Ω·cm인 용액 중에서 모재에 대한 Ni-Cr 용사피복재의 침식-부식억제효율을 Fig. 4 및 Fig. 5의 실험값을 식(1)에 의해 계산하여 Fig. 8에 나타내었다.

비저항 25Ω·cm 인 용액 중에서 모재에 대한 Ni-Cr 용사피복재의 침식-부식억제효율은 약

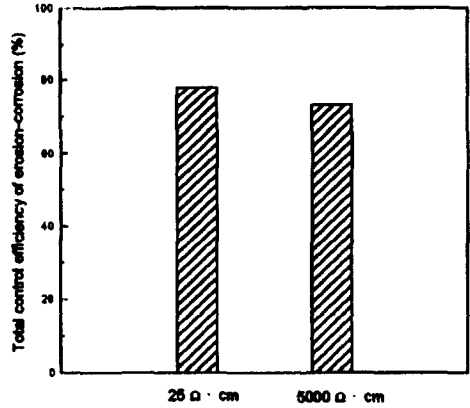


Fig. 8 Total control efficiency of erosion-corrosion for Ni-Cr thermal spray coating to substrate(SS400) in 25 Ω·cm and 5000 Ω·cm solution

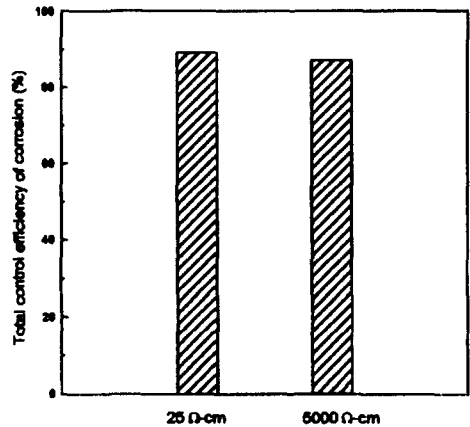


Fig. 9 Total control efficiency of corrosion for Ni-Cr thermal spray coating to substrate (SS400) in 25Ω·cm and 5000Ω·cm solution

78%로 비저항 5000Ω·cm의 73%보다 높게 나타나고 있다.

### 4. Ni-Cr 용사피복재의 부식억제효율

Fig. 9는 비저항 25Ω·cm 및 5000Ω·cm인 용액 중에서 모재에 대한 Ni-Cr 용사피복재의 부식억제효율을 Fig. 6 및 Fig. 7의 실험값을 식(2)에 의해 계산하여 나타내었다.

5000Ω·cm 중에서 모재에 대한 Ni-Cr 용사피복재의 부식억제효율은 약 87%이고, 비저항이

25Ω·cm 중에서도 모재에 대한 Ni-Cr 용사피복재의 부식억제효율은 약 89%이다. 25Ω·cm 용액 중에서 Ni-Cr 용사피복재의 침식-부식억제효율 및 부식억제효율은 5000Ω·cm 용액 중에서도 약간 우수하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 5. 분극지배거동

Fig. 10은 비저항 25Ω·cm 및 5000Ω·cm 용액 중에서 모재 및 Ni-Cr 용사피복재의 부식전위와 부식전위하에 배류되는 전류밀도를 정리하여 나타낸 것이다. 여기서 부식전위와 전류밀도값은 Fig. 6과 Fig. 7의 실험값을 나타낸 것이다.

25Ω·cm 및 5000Ω·cm 중에서 모재 및 Ni-Cr 용사피복재의 부식전위가 낮아지면서 부식전류밀도는 증가하는 경향을 나타내고, 이러한 경향은 중성용액 중에서 부식반응을 주로 일으키는 음극지배(cathodic control)형으로 사료된다<sup>7)</sup>.

## 결론

연강재에 Ni-Cr용사피복한 후에 해양환경 중에서 침식-부식시험과 전기화학적 분극시험을 실시하여, 모재와 Ni-Cr용사피복재의 침식-부식거동과 전기화학적 부식특성에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 침식-부식에 의한 Ni-Cr용사피복재의 체

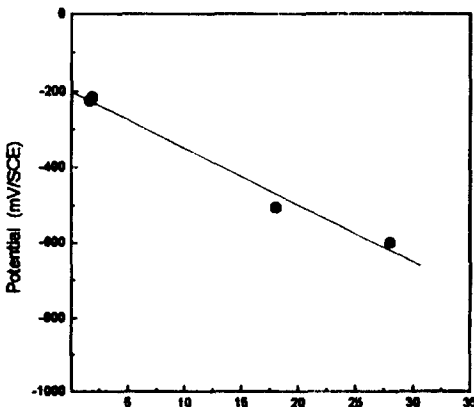


Fig. 10 Corrosion potential of substrate (SS400) and Ni-Cr thermal spray coating vs. current density in 25Ω·cm and 5000Ω·cm solution

적감소량은 모재보다 더 억제되고, 25 Ω·cm용액 중에서 모재의 체적감소량은 시간경과에 따라 거의 선형적으로 증가되지만 Ni-Cr용사피복재의 체적감소량은 거의 일정하다.

- 2) Ni-Cr용사피복재의 부식전위는 모재보다 더 貴電位化되고, Ni-Cr용사피복재의 전류밀도는 모재보다 더 적게 배류되고 있다.
- 3) 25Ω·cm용액 중에서 Ni-Cr용사피복재의 부동태영역은 5000Ω·cm용액 중에서 보다 더 크지만, 부동태유지전류밀도는 더 높게 배류된다.
- 4) 5000Ω·cm인 용액 중에서도 강전해질인 25Ω·cm 수용액 중에서 모재에 대한 Ni-Cr 용사피복재의 침식-부식억제효율 및 부식억제효율이 높게 나타난다.

## 참고문헌

1. Kenneth R. Tretheway and John Chamberlain, "Corrosion", Longman Scientific & Technical, p. 153, 1988.
2. Denny A Jones. "Principles and prevention of corrosion", Macmillan publishing company, p. 342, 1991.
3. 松村昌信, "日本材料と環境", 40, p. 814, 1991.
4. 伊藤伍郎, "機械工學全書 6(腐蝕と防蝕), 日本ロカ社, p. 393, 1982.
5. 이상열, 임우조, 윤병두, "Cu-Ni 용사피복재의 층격침식-부식특성에 관한 연구", 한국부식학회지, 27, 5, pp.536~545, 1998.
6. 前掲書(5), pp. 536~545
7. Herbert H. Uhlig, "Corrosion and corrosion control", John willey company, pp. 50~53, n 1985.

## 저 자 소 개



**임우조 (林祐助)**

1943년 7월 29일생. 당학회 부회장, 한국  
부식학회 부회장, 1975년~현재 부경대학  
교 기계·자동차공학부 교수



**이상열 (李相烈)**

1961년 12월생. 1989년 경일대학교 기계  
공학과 졸업, 1992년 부경대학교 대학원  
졸업(석사), 1997년 부경대학교 박사수료.  
현재 포항1대학 자동차과 전임강사.



**윤병두 (尹炳斗)**

1973년 12월 3일생. 1997년 부경대학교  
기계공학과 졸업, 1999년 부경대학교 대학  
원 졸업(석사), 현재 부경대학교 박사과정