

## 해양환경 중에서 Glass Flake 라이닝 강재의 부식과 캐비테이션 침식 방지에 관한 연구

임우조\* · 김성훈\*\*

### Study on the Corrosion and Cavitation Erosion Control of Glass Flake Lining for Mild Steel in Marine Environment

Uh Joh Lim\*, Seong Hoon Kim\*\*

Key words : Total weight loss (무게감소량), Current density(전류밀도), Open circuit potential(개로전위), Tafel polarization(타펠분극), Cavitation erosion(캐비테이션 침식)

#### ABSTRACT

Port facilities and marine structures used in marine environment were encountered to corrosion damages because of the influence of  $Cl^-$ . Generally, to protect these accidents, mainly applied anti-corrosion paint and epoxy coating. But it was still remained erosion-corrosion damage such as impingement erosion, cavitation erosion, deposit attack. There was needs to develop the new coating materials to protective those corrosion damages.

This paper, polyester glass flake, vinylester glass flake lining and epoxy coating for SS400 were investigated electrochemical tests and cavitation erosion test for corrosion behaviour under sea water.

The main results obtained are as follows ;

- 1) Surface of epoxy coating appear erosion pin hole but surface of polyester glass flake and vinylester glass flake lining do not appear erosion pin hole after impingement-cavitation erosion test in sea water.
- 2) Weight loss of polyester glass flake and vinylester glass flake lining do not occur after impingement-cavitation erosion test in sea water.
- 3) Corrosion current density of polyester glass flake lining less drained than epoxy coating and substrate under corrosion potential.
- 4) Corrosion current density of vinylester glass flake lining with three coating less drained than that of polyester glass flake lining with two coating.

#### 1. 서 론

최근 공업의 발전과 더불어 기계장치와 설비, 자동차, 항공기 및 선박 등은 고속, 고출력, 경량화 추세이다. 이와 같은 추세에 따라 유체를 사용하고 있는 기

계요소에서 유속 및 기계부재의 회전속도 등이 빠르게 되면 유체충격과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인하여 침식이 발생하면서 기계의 성능 저하와 손상을 일으킨다. 이와 같은 침식손상은 액체의 제트 또는 액적이 고체표면에 충돌하여 발생하는 충격 침식(impingement erosion)과 캐비테이션 발생시의 기포 붕괴에 따른 액적의 충격압으로 일어나는 캐비테이션 침식(cavitation erosion) 등으로 대별 할 수 있다.<sup>(1),(2)</sup>

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 기계공학과 대학원

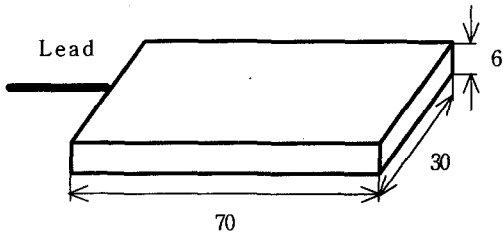


Fig. 1 Dimension of test specimen (unit:mm)

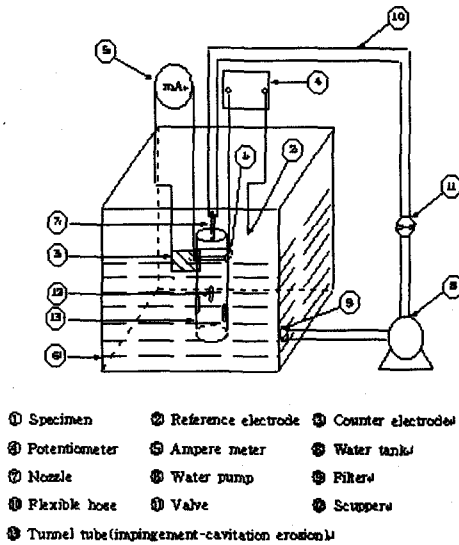


Fig. 2 Schematic diagram of cavitation erosion test apparatus

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used material (SS400)

Chemical composition (wt %)	C	Si	Mn	P	Ni	Cr
	0.18	0.34	0.9	0.024	0.04	0.02
Mechanical properties	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )		Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )		Elongation (%)	
	47.5		32.5		30	

또한 기계부재의 사용 환경이 다양해지고 오염되면서 침식은 부식성 환경조건에서 많이 발생하고 있다. 특히, 강전해질의 해양환경 중에서 기계적인 충격 침식과 더불어 전기화학적 부식이 중첩하여 일어나는

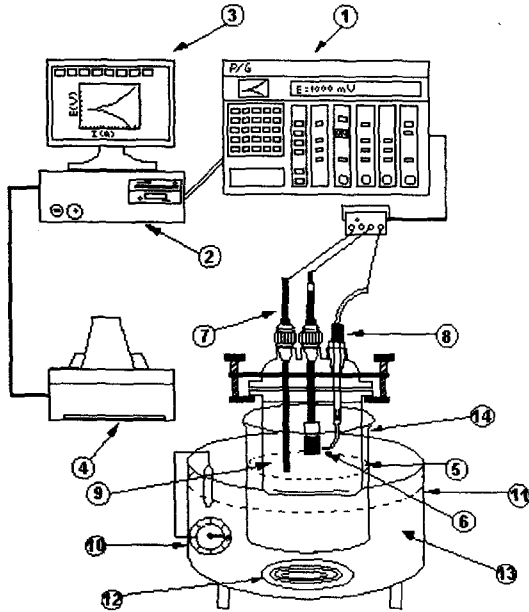
경우에는 침식과 부식이 상호간에 가속하는 상승효과 때문에 기계장치의 수명에 치명적인 영향을 미친다.<sup>(3)~(6)</sup> 특히, 해양환경 중에서 사용되는 펌프의 임펠러, 항만시설과 해양구조물, 공업용수배관, 발전설비, 열교환기, 선박의 프로펠러 등의 기계장치나 각종 설비는 해염인자에 의해 부식이 발생되고 있다.<sup>(7)</sup> 또한 우리나라의 공업지역은 대부분 해안부근에 건설됨으로서 공업단지의 공해물질과 해안의 해염인자인 Cl<sup>-</sup>의 영향으로 부식이 가속화되어지며 상승적인 부식손상을 받는다.<sup>(8)</sup>

이러한 강전해질인 해양환경 중에서 침식-부식 손상을 방지하기 위하여 가격이 저렴한 연강재에 내식성이 우수한 도막이나 Lining에 의한 피복방식법이 많이 이용되고 있다. 해양환경 중에서 철강재 부식방지용으로 에폭시도료를 피복방식 하였다. 그러나 해양·항만 시설들은 발전소의 취수도와 같은 정적 설비뿐만 아니라 각종 순환수 펌프, 복수기 등의 동적 설비와 용수 배관도 있으므로, 이들 설비들은 해수의 와류현상에 의한 빠른 유속으로 인한 충격 침식 손상이나 캐비테이션 침식 손상, 어패류의 부착과 각종 침전물에 의한 Deposit Attack 등의 손상이 있으므로, 에폭시 도료만으로는 이러한 침식과 부식 손상을 막을 수는 없다. 이러한 상태에서 모든 해양구조물, 항만과 해양설비 등은 내구성, 시공성, 경제성이 우수한 방식대책이 요구되고 있으므로 신소재 복합 라이닝 재의 개발이 절실히 요구되고 있다<sup>(9)</sup>. 따라서 본 연구에서는 해양환경 중에서 신소재 복합 라이닝재인 Glass Flake 라이닝에 의한 연강재의 침식과 부식 방지에 관한 연구를 하기 위하여, Polyester Glass Flake 라이닝 강재 및 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재와 에폭시 도막에 대해 천연해수 중에서 Cavitation erosion 시험장치에 의해 캐비테이션 침식-부식 실험 그리고 Potentiometer / Galvanostat 시험장치로 분극시험을 실시하여, 라이닝 강재와 에폭시 피복강재의 부식거동, 분극거동, 캐비테이션 침식-부식거동을 고찰함으로써 해양환경 중에서 기계장치나 각종 해양설비의 부식손상에 대한 설계, 제작 및 보수 유지의 기초자료로 활용하는데 기여하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험재료는 두께 6.0 mm인 연강



- ① Potentiostat/Galvanostat    ② Personal computer
- ③ Monitor                      ④ Printer
- ⑤ Corrosion cell                ⑥ Specimen
- ⑦ Counter electrode            ⑧ Reference electrode
- ⑨ Electrolyte                  ⑩ Temperature controller
- ⑪ Heater body                  ⑫ Heating coil
- ⑬ Oil bath                        ⑭ Heating beaker

Fig. 3 Schematic diagram of potentiodynamic polarization equipment

재인 SS400이며 이 시험재료의 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1과 같은 화학적 성분 및 기계적 특성을 가진 일반구조용 압연강재인 SS400 시험재료로부터 절취하여 제작·가공하였으며, 이 시험편의 전표면을 사포 #400~1200번까지 연마한 후, 아세톤으로 탈지하여 건조시킨 충격-캐비테이션 침식 부식 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다. 주 라이닝재료인 Polyester Glass Flake와 Vinyester Glass Flake로 라이닝하고, 에폭시 피복하였으며, 라이닝과 피복의 두께는 0.5 mm 하였다. 또한 전기화학적 부식 시험을 위하여 직경 2mm의 피복 동선을 삽입하여 고정하였다.

## 2.2 충격-캐비테이션 침식 부식 시험

Fig. 2는 캐비테이션 침식 시험장치의 개략도이고,

이 시험장치는 액제트(liquid jet)의 충격침식에 관한 규정 ASTM G73-98에 의한 "Liquid Cavitation Erosion Testing" 및 JIS A 1452, H 8503을 참조하였다<sup>(10)</sup>.

부식용액의 공급 및 순환은 마그네틱 펌프에 의해 노즐선단으로부터 매분 10 l의 부식용액을 13 m/s의 유속으로 분사하고, 분사된 부식용액은 노즐선단으로부터 40 mm의 거리에 고정된 시험편에 분사하고, 용액의 충격에 의한 시험편 전면에 충격침식현상이 일어나지 않도록 플라스틱으로 절연하였으며, tunnel tube를 설치함으로써 시험편의 배면에는 캐비테이션(cavitation)이 발생하여 캐비테이션 침식이 일어나도록 하였다.

## 2.3 전기화학적 분극시험

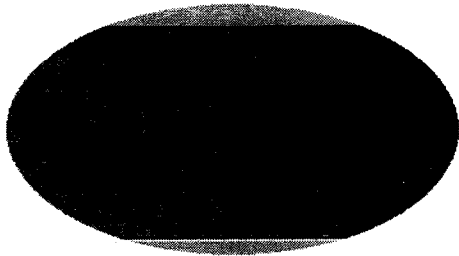
본 실험에 사용된 전기화학적 분극시험은 다른 부식평가법보다 실험시간이 짧게 되고, 비파괴적으로 실시할 수 있기 때문에 부식평가법으로 많이 이용되고 있는 Potentiostat/Galvanostat 시험장치를 이용하여, 분극시험을 실시하였다. 여기서 기준전극은 포화카로멜전극 (saturated calomel electrode, SCE), 보조전극(counter electrode)으로는 백금을 사용하였다.

전기화학적 분극시험은 Fig. 1의 시험편에서 모재, 라이닝 강재 및 피복강재의 표면을 유효노출면적 30 cm<sup>2</sup> 만을 남기고 절연테이프로 절연하여, Fig. 3의 분극시험장치의 회로도와 같이 배선하였다. 분극시험은 시험편을 부식환경조에 침지한 후, 부식전위에서 10분간 안정시키고 난 후 실시하였다. 분극시험은 부식환경조내의 천연해수 중에서 Fig. 3의 분극시험장치에서 시험편, 기준전극 및 보조전극의 부식반응을 EG & G사의 Model 273A Potentiostat/Galvanostat → personal computer(M 352/252 corrosion software 장착) → Monitor 등을 거쳐서 Printer에서 분극곡선, 부식반응선도 및 부식 Data가 기록되도록 하였다.

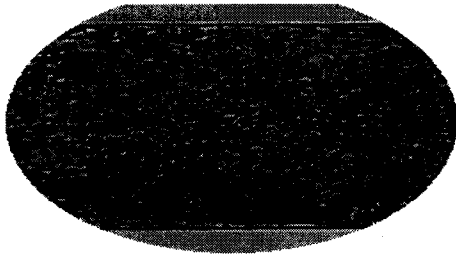
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 충격-캐비테이션 침식-부식 양상

Fig. 4는 천연해수 중에서 120시간동안 충격-캐비테이션 침식-부식 실험을 실시하기 전의 모재의 표면과 캐비테이션 침식 부식 시험을 실시한 후의 모재인

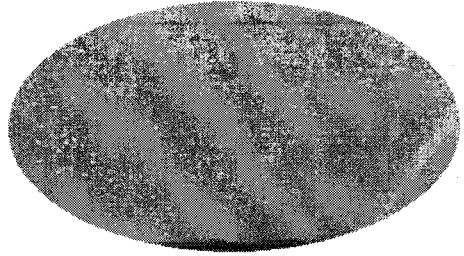


(a) Before cavitation erosion test in sea water

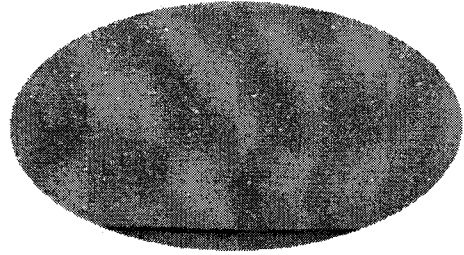


(b) After cavitation erosion test in sea water

Fig. 4 Macro-graph of SS400

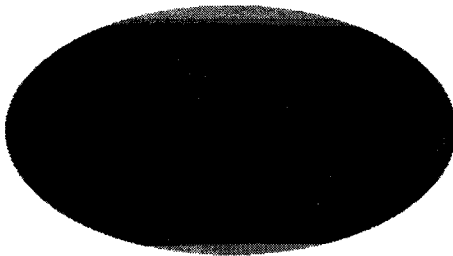


(a) Before cavitation erosion test in sea water

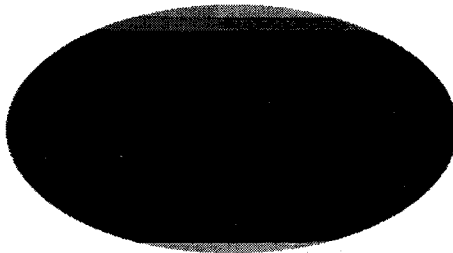


(b) After cavitation erosion test in sea water

Fig. 6 Macro-graph of polyester glass flake lining

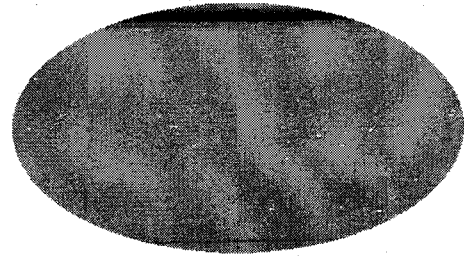


(a) Before cavitation erosion test in sea water

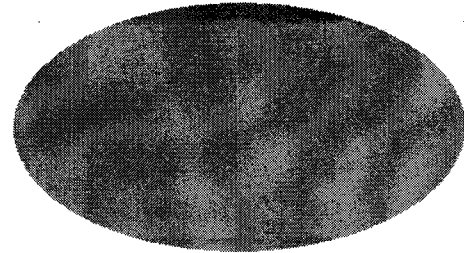


(b) After cavitation erosion test in sea water

Fig. 5 Macro-graph of epoxy coating



(a) Before cavitation erosion test in sea water



(b) After cavitation erosion test in sea water

Fig. 7 Macro-graph of vinyl ester glass flake lining

SS400의 표면양상을 나타낸 것으로, Fig. 4의 (b)는 캐비테이션 침식 손상부로 전표면에 걸쳐 캐비테이션 침식 양상이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 에폭시 피복강재의 천연해수 중에서 120 시간 동안 캐비테이션 침식-부식실험을 실시하기 전의 표면과 캐비테이션 침식-부식실험을 실시한 후의 표면의 손상부를 나타낸 것이다.

Fig. 5의 (a)는 캐비테이션 침식 실험 전의 표면양상이고, (b)는 캐비테이션 실험후의 표면양상으로 캐비테이션 침식 양상이 나타나고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 본 실험의 주재료인 Polyester Glass Flake 및 Vinylester Glass Flake lining 시험편의 실험전의 표면양상과 실험후의 표면양상을 각각 나타낸 것이다. 실험전이나 실험후에도 표면에 아무런 변화가 없음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 120겹에서 150겹 정도의 유리 입자층이 캐비테이션 침식에 도우수한 방식 성능을 가지는 것으로 사료된다.

### 3.2 충격-캐비테이션 침식 부식 거동

Fig. 8은 천연해수 중에서 120시간 동안 캐비테이션 침식 부식 실험을 실시한 모재(SS400), 에폭시 피복강재 및 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 무게감소량을 나타낸 것이다.

Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 무게감소량은 모재나 에폭시 피복강재의 무게감소량 보다 작게 나타나고 있고, 시험초기에 가장 많은 무게감소량을 보이고 있다. 시험초기에 무게감소량이 많이 나타나는 이유는 시험초기에는 기포붕괴가 시험편 표면에 직접 충격을 가해 표면피막을 파괴하고, 시간이 경과함에 따라 침식된 부분에 기존의 용액이 고여서 기포붕괴압의 영향을 감소시키는 것으로 사료된다. 에폭시 도막에서는 96시간 이후부터 무게감소량이 Fig. 8에 나타난 바와 같이 다시 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 캐비테이션 침식 손상으로 에폭시 도막에 미세한 pin hole이 생겨 모재인 SS400이 부식되기 시작한 것으로 추찰된다. 반면에 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 무게감소량은 약 0.01g 정도로 아주 미세하게 나타났다.

Fig. 9는 본 실험의 주 라이닝 재료인 Polyester Glass Flake 및 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재의 천연해수 중에서 120 시간동안 캐비테이션 실험후의 무게감소량을 나타낸 것이다.

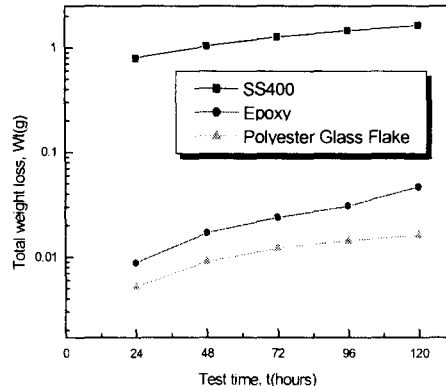


Fig. 8 Total weight loss of SS400, epoxy coating and polyester glass flake lining by cavitation erosion test in sea water

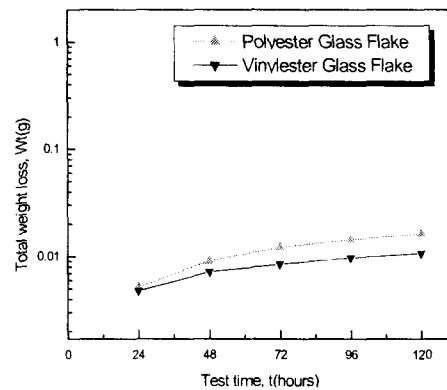


Fig. 9 Total weight loss of polyester glass flake and vinylester glass flake coating by cavitation erosion test in sea water

3회 코팅을 실시한 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재는 2회 코팅을 실시한 Polyester Glass Flake 라이닝 강재 보다 무게감소량이 더 적게 나타나고 있다. Fig. 8과 마찬가지로 이 시험편 역시 초기에 가장 많은 무게감소량이 나타났고, 시간의 경과 따라 안정되고 있다.

### 3.3 피복 및 라이닝 강재의 Tafel 분극거동

Fig. 10은 천연해수 중에서 120 시간 동안 캐비테이션 침식 부식 실험을 실시한 후, 모재(SS400)와 Epoxy 피복강재 및 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 Tafel 분극곡선을 정리하여 나타내었다.

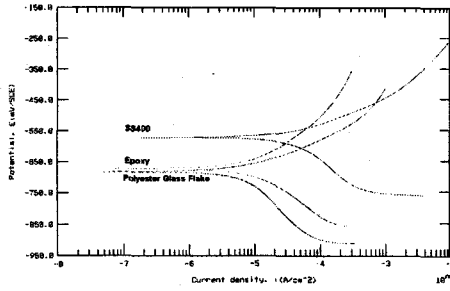


Fig. 10 Tafel polarization curves of SS400, epoxy coating and polyester glass flake lining after cavitation erosion test in sea water

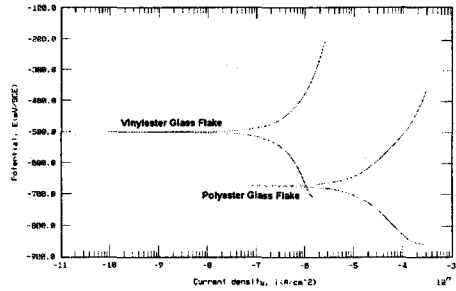


Fig. 12 Tafel polarization curves of polyester glass flake lining and vinylester glass flake lining after cavitation erosion test in sea water

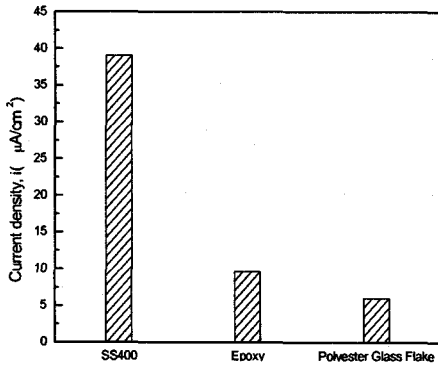


Fig. 11 Current density of SS400(substrate), epoxy coating and polyester glass flake lining after cavitation erosion test in sea water

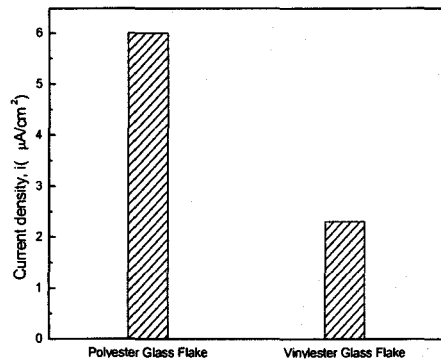


Fig. 13 Current density of polyester glass flake lining and vinylester glass flake coating after cavitation erosion test in sea water

Polyester Glass Flake 라이닝 강재 및 에폭시 피복 강재의 개로전위는 모재의 개로전위보다 더 비전위화 되는 경향을 나타내고 있다. 또 모재인 SS400의 전류 밀도가 에폭시 도막이나 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 전류밀도보다 많이 배류되고 있고, 특히 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 전류밀도가 가장 낮게 배류 되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 120~150 겹의 유리 입자층이 캐비테이션 침식-부식손상에도 내침식 성 효과가 뛰어나며, 양극전위가 상승하면서도 부식전류를 차단하는 효과가 우수한 것으로 추찰된다.

개로전위하에서 모재(SS400), 에폭시 피복강재 및 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 부식전류밀도에 대해 정량적인 고찰을 하고자, 천연해수 중에서 모재,

에폭시 도막 및 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 부식전류밀도를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10에서 고찰한 바와 같이 모재부의 전류밀도가 가장 많이 배류 되고, Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 전류밀도가 가장 적게 배류되고 있다.

### 3.4 라이닝 강재의 Tafel 분석거동

Fig. 12에 천연해수 중에서 Polyester Glass Flake 및 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재의 충격-캐비테이션 침식-부식 실험을 실시한 후 Tafel 분석곡선을 나타내었다.

Vinylester Glass Flake 라이닝 강재의 부식전위는 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 부식전위보다 더 귀전위화되는 경향을 나타내고 있으며, 양극전위의 영

역으로 전위가 상승할수록 Polyester Glass Flake 라이닝 강재의 부식전류밀도는 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재에서 전류밀도보다 많이 배류되고 있음을 알 수 있다. Fig. 13에 개로전위하에서 Polyester Glass Flake 및 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재의 부식 전류밀도를 비교하여 나타내었다.

Fig. 12에서 고찰한 바와 같이 Polyester Glass Flake 도막의 전류밀도가 Vinylester Glass Flake 도막의 전류밀도 더 많이 배류되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 3회 코팅을 실시한 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재가 2회 코팅을 실시한 Polyester Glass Flake 라이닝 강재보다 미세한 pin-hole의 수가 적기 때문에 방식 성능이 더 우수한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 해양환경 중에서 Polyester Glass Flake 및 Vinylester Glass Flake 라이닝강재와 에폭시 도막 강재의 부식과 캐비테이션 침식에 대해서 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충격-캐비테이션 침식에 의해 모재와 에폭시 피복 강재는 거시적 침식 양상이 나타났지만, Polyester Glass Flake 및 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재에서는 거시적 침식 양상이 나타나지 아니한다.
- 2) 충격-캐비테이션 침식에 의한 모재와 에폭시 피복 강재에 비해 Polyester Glass Flake 및 Vinylester Glass Flake 라이닝 강재의 무게감소량은 크게 억제된다.
- 3) 개로전위하에서 Polyester Glass Flake 라이닝 강재이 부식 전류밀도가 모재, 에폭시 피복강재의 전류 밀도 보다 억제된다.
- 4) 3회 코팅을 실시한 Vinylester Glass Flake 라이닝

강재가 2회 코팅을 실시한 Polyester Glass Flake 라이닝 강재보다 부식전류가 적게 배류된다.

#### 참고 문헌

- (1) 本島 茂, 防蝕工學, p. 196, 日本日刊工業新聞社 (1987)
- (2) 임우조, 이진열(1995) : 해상용 원심펌프 임펠러의 침식억제법으로 음극방식 및 재료개발에 관한 기초연구(1), 한국박용기관학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 56~66
- (3) 황재호, 임우조(1996) : 진동 캐비테이션 침식-부식 손상에 미치는 유속의 영향, 한국부식학회지, Vol. 25, No. 3, pp. 317~326
- (4) Kenneth R. Tretheway and John Chamberlain, Corrosion, Longman Scientific & Technical, p. 153 (1998)
- (5) 松材倉信, 岡 良則, 腐蝕 に及ぼすエロシヨソの 影響, 日本防蝕技術, 31卷, p. 67 (1982)
- (6) Denny A. Jones, Principle and Prevention of corrosion, Macmillan publishing company, p. 342 (1991)
- (7) Herbt H. Uligh and r. Winston Revie, "Corrosion and Corrosion Control", John Willey & Sons, p. 217 (1985)
- (8) 大谷南海男 (1993) : 金屬表面工學 日本日刊工業新聞社, pp. 249~250
- (9) 山本隆, 小田光之, 森田超夫, 石原幕孝, 肥後清彰 (1986) : 海洋構造物に適用さらに重防蝕塗膜の壽命豫測法, 日本防蝕技術, Vol. 35, No. 1, pp. 3~5
- (10) Karl Erik Thelning(1975) : Steel and its heat treatment : Butterworths, pp. 378~379