

# 해수중에서 STS304강의 프레팅 마멸특성 Fretting Wear Characteristics of STS304 Steel in Seawater

김은구, 김태형, 김석삼\*  
경북대학교 기계공학과 대학원  
경북대학교 기계공학부

## Abstract

The fretting wear characteristics of STS304 steel in seawater were investigated experimentally. A fretting wear tester was designed to be suitable for this fretting test. This study was focused on the effects due to the combination of normal load, slip amplitude and number of cycles and corrosive environment as the main factors of fretting. The results of this study showed that the wear volume increased abruptly at slip amplitude between  $70\mu m \sim 100\mu m$  by fracture of oxide layers but above that slip amplitude the wear volume increased steadily.

*Keyword* : Fretting, Stainless Steel, Stick, Corrosion, Wear volume

## 1. 서론

우리 나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 특수한 환경으로 인하여 해양자원, 해양에너지, 해양공간의 활용이 중요시되고 있으며 과학기술의 발달과 함께 해양의 이용이 늘어가는 추세이다.

해양이라는 특수한 환경 하에서의 가장 큰 문제는 부식문제이며 이러한 환경 하에서 설계된 구조물과 장비들은 해수의 파동과 흐름으로 말미암아 발생하는 미세진동에 의한 프레팅 손상이 발생한다.[1]

이러한 부식손상과 프레팅 손상에 대한 정확한 정보를 가지고 있지 못하면 사용수명 및 안전성을 보장하기 위해 높은 안전율을 고려해야 하므로 이는 경제적 손실과 직결될 뿐만 아니라 장비들의 크나

큰 성능저하 및 치명적인 파손을 초래할 수도 있다.

일반적으로 프레팅이란 수백  $\mu m$  이내의 미소한 거리를 상대 운동하는 재료들의 접촉계면에서 발생하는 표면손상을 말한다.[2] 이러한 프레팅은 매우 작은 접촉면적 및 미끄럼거리에서 여러 가지 마멸기구들의 복합적인 작용으로 발생하기 때문에 해석하기가 매우 어렵다.

그러므로, 프레팅 연구는 진폭, 하중, 온도, 환경, 주파수 등 프레팅 마멸에 영향을 주는 인자 중 주된 관련인자들만을 선별하여 여러 가지 재질에 대해서 연구가 수행되고 있다.

Iwabuchi 등은 탄소강의 프레팅 실험에

서 진동수, 진폭이 클수록 마멸량이 증가하며, 상대습도가 45%인 경우가 75%인 경우보다 마멸량이 많음을 보고 하였으며,[3] Cho 등은 경수 중에서 핵연료봉(Zircaloy-4 tube)을 이용한 프레팅 실험을 통하여 진폭이 200 $\mu$ m 이상에서는 미끄럼 특성이 나타나고 있음을 보였다.[4]

해수에서의 가장 큰 문제인 부식(Corrosion)은 금속의 산화작용으로 정의되는 용어로서 철 구조물에 있어서 부식 문제는 극히 자연스러운 문제이다. 이런 부식문제들은 금속이 동적인 상태 하에서 발생하므로 더욱더 복잡한 문제를 보이고 있다.

특히, 부식환경에 사용되는 내식성 재료는 표면의 부동태막 형성에 의해서 보호되나 프레팅 운동 등의 기계적 작용에 의한 부동태 피막의 파괴로 재료의 내식성을 저하할 수 있다. 또한 이러한 내식성 재료는 해수 중에서 생물의 부착이나 극간부식 등에 의해 공식이 발생하는 것으로 알려져 있다.[5]

일본의 Iwabuchi 등은 해수와 대기중의 스테인레스강의 트라이볼로지 특성실험을 통하여 해수 중에서는 대기 중 마찰계수의 1/2, 비마멸량의 1/100이며 낮은 속도의 미끄럼 운동에서는 부식적 영향으로 마모가 증가함을 보였다.[6]

Pearson 등은 해수 중에서(진폭 40 $\mu$ m) 프레팅 마멸이 대기 중에서 크다고 보고했으나, Sato 등은 진폭 30 $\mu$ m 이하에서는 순수 물 또는 해수 중의 프레팅 마멸이 대기 중에서보다 크지만 그 이상의 진폭에서는 반대로 대기 중에서 마멸이 크다고 보고했다.[1,7]

위에서 언급한 것과 같이 프레팅과 부식 손상에 대한 많은 연구자들의 노력에

도 불구하고 수명 예측 및 파손 방지를 위한 일반적인 방법은 여전히 제시되지 못한 상태에 있으며 국내에서는 부식환경 하에서의 프레팅 현상에 대한 연구가 거의 없는 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 현재 화학, 발전, 처리산업의 현장에서 부식방지를 위한 구조용 재료로 널리 사용되고 있는 STS304 강을 이용하여 프레팅에 가장 주된 인자로 작용하는 하중, 미끄럼 거리 및 왕복수의 영향에 대해 프레팅 마멸실험을 부식환경인 해수 중에서 수행하여 각 인자들의 변화에 따른 프레팅 손상 기구와 부식 특성을 실험에 의해 구하고자 한다.

## 2. 실험

### 2-1 실험장치

실험에 사용된 마찰·마멸 실험기는 본 연구실에서 직접 설계·제작한 프레팅 마멸 실험기를 이용하였다. 상온·상압하에서 실린더 형태의 시험편을 수직으로 교차하도록 접촉시켜 프레팅 마멸 실험을 수행하는 기구로서 Fig. 1에 그 개략도를 나타내었다.

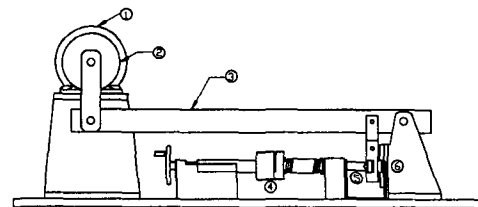


Fig. 1 Schematic diagram of fretting wear tester

- |                  |                   |
|------------------|-------------------|
| ① Motor          | ② Eccentric plate |
| ③ Vibrating beam | ④ Load cell       |
| ⑤ Water box      | ⑥ Specimens       |

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of STS304 cylinder

Chemical composition(%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
~0.08	~1.00	~2.00	~0.04	~0.03	8.0 ~11.0	18.0~ 20.0	-
Mechanical properties							
항복점(Y.P) kgf/mm <sup>2</sup>	인장강도(T.S) kgf/mm <sup>2</sup>	연신율(EL) %	단면수축율 %		경도(HB)		
206 min	520 min	35 min	60 min		187		

### 2.2 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 현재 화학, 처리, 발전산업의 현장에서 부식방지를 위한 구조용 재료로 널리 사용되고 있는 직경이 10mm인 STS304(스테인레스304)강을 아무런 가공없이 실험에 필요한 길이로 절단하여 사용하였다. STS304강의 결합형태는 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

이동시험편과 고정시험편 모두 STS304강을 사용하였으며 화학적 성분과 기계적 성질은 KS D 3576-80에 규정된 사양을 Table 1에 나타내었다.

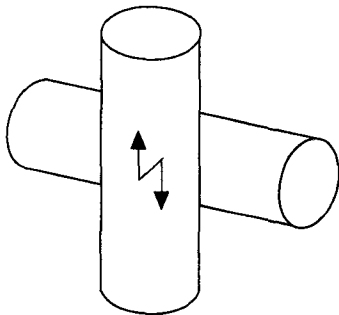


Fig. 2 Crossed cylinder arrangement of two specimens

### 2.3 실험조건

실험시험편을 초음파 세척기로 5분간 세척한 후 건조시켜서 실험을 실시하였다. 실험 후에 다시 10분간 아세톤 초음파 세

척을 시킨 후 마멸면의 단면곡선을 측정하였다.

해수 중에서 미끄럼 거리, 하중 및 왕복수 등의 인자들이 프레팅 마멸에 미치는 영향을 조사하기 위하여 미끄럼거리는 70  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ 의 5단계, 하중은 20N, 40N, 60N, 80N, 100N의 5단계로 구분하여 왕복수  $1 \times 10^5$ 사이클,  $3 \times 10^5$ 사이클,  $5 \times 10^5$ 사이클에 대해서 각각 조합하여 실험을 실시하였다.

천연적으로 채취된 해수는 지역, 환경오염 등으로 부식성의 정량성을 얻기 힘들기 때문에 본 실험에서는 ASTM D1141-52에 규정된 인공해수를 제조하여 사용하였다. 실험용액은 1회 100ml/를 21~30°C 인 실내에서 교반하지 않은 채로 사용하며 1회사용 후 교환을 하였다. 인공해수의 성분은 Table 2에서 나타난 바와 같다.

Table 2 Chemical composition of artificial seawater

	(g/20l)		(pH8.2)
NaCl	490.68 g	NaHCO <sub>3</sub>	4.02 g
MgCl <sub>2</sub>	222.23 g	KBr	2.01 g
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	81.88 g	SrCl <sub>2</sub>	0.85 g
CaCl <sub>2</sub>	30.70 g	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.54 g
KCl	13.89 g	NaF	0.06 g

모든 실험은 각각의 조건에서 2회씩 실시한 후 그 평균치를 데이터로 사용하였다.

### 3. 실험결과와 고찰

#### 3.1 왕복수 증가에 대한 마멸량의 변화

Fig. 3은 왕복수의 변화에 STS304강의 마멸량의 변화를 각각의 미끄럼 거리에 대해 나타낸 것이다.

그림에서 보면 왕복수의 증가에 대한 마멸량의 변화는 증가율에 차이는 있었으나 하중에 관계없이 마멸량이 모두 증가함을 보여 주고 있다. 이러한 현상은 왕복수의 증가에 따른 전체 미끄럼거리의 증가로 인해 마멸량이 커지는 것으로 생각된다.

실험 초기에 시편들의 접촉형태가 점접촉의 형태로부터 시작되지만, 마멸이 진행됨에 따라 접촉면적은 점점 증가하게 된다. 접촉면적은 계속 증가하지만, 두 시편에 가해지는 하중의 크기는 항상 일정하기 때문에 마멸을 유발시키는 접촉압력은 감소하게 되므로 실험 초기에서부터  $1 \times 10^5$ 사이클까지의 마멸량의 변화가 다른 단계에서보다도 크게 나타남을 알 수 있다.

진폭  $70\mu\text{m}$ 일 때는 왕복수의 증가에 따른 마멸량의 변화가 가장 적음을 볼 수 있다. 이것은 전체 미끄럼 거리는 증가하지만, 마멸량은 거의 증가하지 않는다는 것을 의미한다.

#### 3.2 미끄럼 진폭 증가에 대한 마멸량의 변화

Fig. 4는 미끄럼 진폭의 증가에 대한 마멸량의 변화를 각각의 하중에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 나타나 있듯이 수직

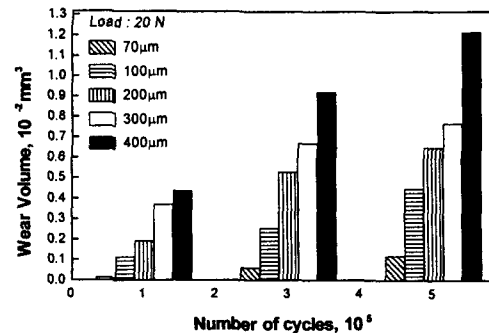


Fig. 3 Wear volume as a function of number of cycles at 20N

하중의 크기에 따라 다소 차이는 있지만 미끄럼 진폭이 증가할수록 마멸량이 증가함을 알 수 있다.

특히  $70\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 의 진폭에서 마멸량이 크게 증가하며 그 이상의 진폭에서는 점차적으로 증가함을 볼 수 있다.

일반적으로 프레팅 현상에서는 고착과 미끄럼이 공존하는 고착-미끄럼단계에서 마멸면 전체에서 슬립이 발생하는 미끄럼 단계로 진행되면서 마멸량이 급격히 증가하는 천이시점이 나타난다고 알려져 있다.[8]

따라서 이러한 미끄럼 거리 증가에 대한 마멸량의 변화에 대한 정확한 현상을 규명하기 위해 SEM을 이용한 미시적 표면관찰을 하였다.

Fig. 5는 미끄럼거리  $70\mu\text{m}$ , 하중 100N,  $1 \times 10^5$ 사이클동안 실험을 수행한 후의 마멸면 사진이다. 사진에서 보면 접촉부의 가장자리에서만 약간의 미끄럼 마멸흔적이 관찰되며 가장 많이 마멸이 발생하여야 할 중앙부에는 판상 모양의 마멸입자들이 생성되는걸 알 수 있다. 따라서  $70\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 의 진폭에서 마멸량이 크게 증가하는 이유는 중앙부의 판상 모양의 마멸입자들의 이탈에 의한 것으로 생각된다.

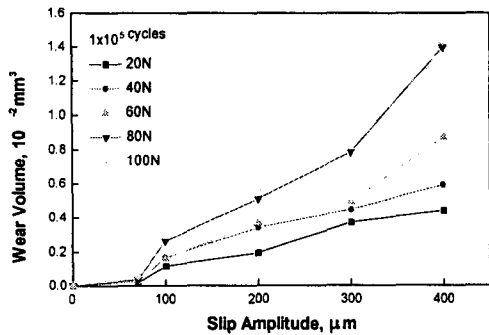


Fig. 4 Wear volume as a function of slip amplitude at  $1 \times 10^5$  cycles

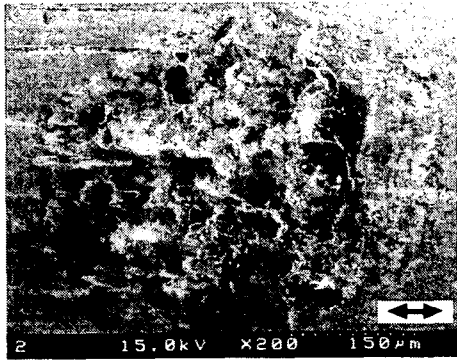


Fig. 5 SEM photograph of a worn surface ( $70 \mu\text{m}$ ,  $100\text{N}$ ,  $1 \times 10^5$  cycles)

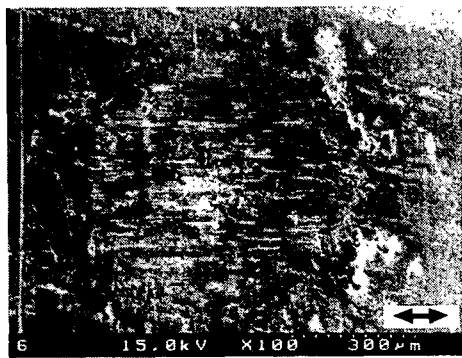


Fig. 6 SEM photograph of a worn surface ( $100 \mu\text{m}$ ,  $40\text{N}$ ,  $3 \times 10^5$  cycles)

Fig. 6은 미끄럼거리  $100 \mu\text{m}$ , 하중  $40\text{N}$ ,  $3 \times 10^5$  사이클 동안 실험을 수행한 후 마멸

면을 SEM으로 관찰한 것으로 접촉부 전체에 미끄럼 운동이 일어났음을 알 수 있다.

이러한 사실로 미루어 보아 진폭  $70 \mu\text{m}$ ,  $1 \times 10^5$  사이클 실험 조건에서 접촉부에 미끄럼 운동이 거의 발생하지 않고 단지 반복적 변형만을 가하여 판상의 마멸입자를 생성시키는 고착 영역이 있음을 알 수 있다. 이러한 마멸입자들은 왕복수와 진폭의 증가에 따라 탈락하므로  $100 \mu\text{m}$  이상의 진폭에서는 고착-미끄럼 영역의 존재없이 전체적인 미끄럼 영역을 형성하는 것을 볼 수 있다. 이는 해수라는 부식적 환경 하에서 재료의 표면에 취성이 큰 산화피막이 형성되며 접촉부 중앙부에서의 반복적 변형이 고착영역을 파괴하여 판상의 마멸입자를 생성하기 때문이라고 생각된다.

#### 3.4 진폭, 하중 증가에 대한 비마멸율의 변화

비마멸율은 마멸량을 하중과 미끄럼거리로 나눈 값으로써 구해지며, 마멸특성을 이해하기 위해 종종 사용된다. Fig. 7은 하중에 대한 비마멸율의 변화를 각각의 미끄럼 거리에 대해 나타낸 것이다.

대부분의 경우에 하중이 증가함에 따라 비마멸율이 감소하고 있음을 알 수 있다.

특히  $70 \mu\text{m}$ 의 진폭에서 하중에 따른 비마멸율이 거의 일정하여 시편사이에 상대운동의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 8은 미끄럼진폭에 대한 비마멸율의 변화를 각각의 하중에 대해 나타낸 것이다.

진폭  $70 \mu\text{m}$ 와  $100 \mu\text{m}$  사이에서 비마멸율이 급격히 증가하며 진폭  $100 \mu\text{m}$  이후에서는 비마멸율이 대부분 일정하게 유지됨을

알 수 있다.

이는 앞에서 언급한 미끄럼거리에 대한 마멸량 변화에서와 같이 진폭 70 $\mu\text{m}$ 에서 100 $\mu\text{m}$ 사이에서 마멸면에 형성된 산화막의 파괴에 의해 급속한 비마멸율의 증가를 가져왔으며 100 $\mu\text{m}$  이후에서는 마멸작용을 하는 산화마멸입자들이 진폭의 증가와 해수의 마멸입자 제거효과와 유체윤활효과에 의해 비마멸율이 안정됨을 알 수 있다.

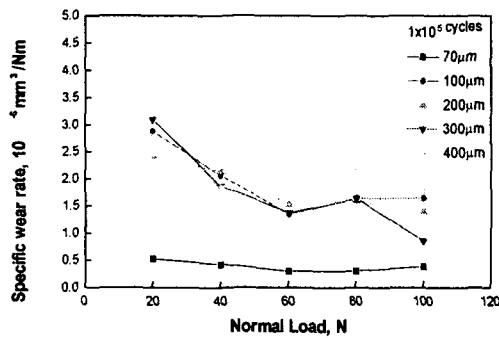


Fig. 7 Specific wear rate as a function of normal load at  $1 \times 10^5$  cycles

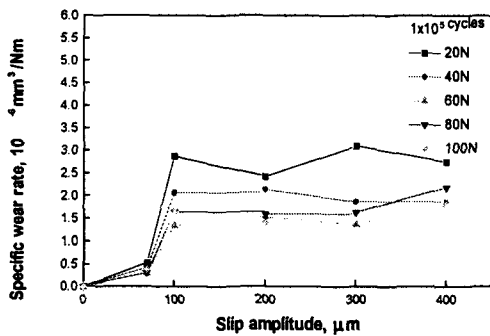


Fig. 8 Specific wear rate as a function of slip amplitude at  $1 \times 10^5$  cycle

### 3.5 마멸면의 미시적 관찰

마멸면의 미시적 형상을 조사하기 위해 SEM을 사용했다. Fig. 9는 미끄럼거리 200 $\mu\text{m}$ , 하중 80N,  $5 \times 10^5$ 사이클동안 실험을 한 후 마멸면을 관찰한 것이다.

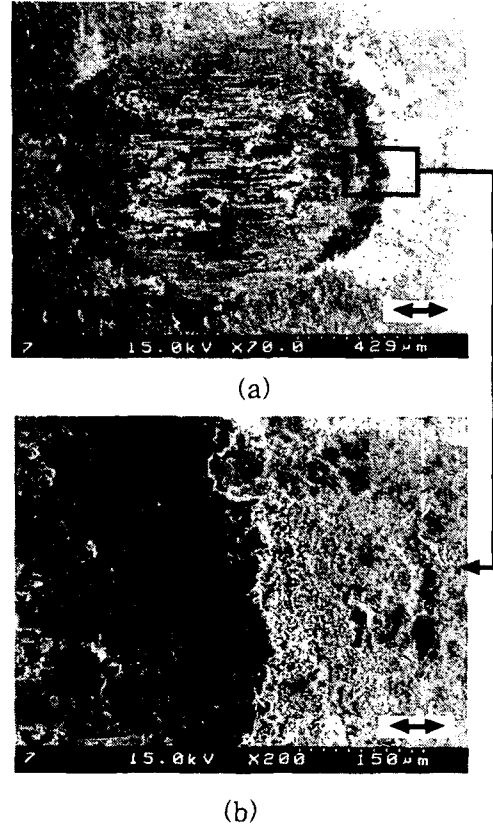


Fig. 9 SEM photograph of a worn surface(100 $\mu\text{m}$ , 40N,  $5 \times 10^5$ cycles)

그림 (a)에서 알 수 있듯이 접촉면의 주위에 운동방향으로 부식손상이 관찰되며 마멸면의 중앙에 마멸입자들이 존재함을 알 수 있다. 그림(b)는 그림(a)의 가장자리 부분을 확대한 사진이다.

그림(b)에서 마멸면 주위에 운동방향으로의 부식현상은 마멸입자들의 축적과 시편의 접촉형상에 의한 틈부식(Crevice corrosion)으로 인한 부식손상이며, 이와 같은 부식현상은 틈 내부에서 액의 정체에 의한 염화물(Chloride) 농도의 증가와 산가수분해(Acid hydrolysis)로 인해 발생한다. 이러한 부식현상은 하중과 진폭 변화에 관계없이 왕복수가  $3 \times 10^5$ 사이클 이

상에서 관찰되며  $5 \times 10^3$  사이클에서 가장 심한 부식형상을 보였다.

본 실험에서는 해수에 의한 재료의 산화성의 조사를 위해 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)로 실험 전, 실험 후 마멸면과 비마멸면을 분석하였다.

Fig. 10에서 보면 실험 후의 높은 산소 함량으로 보아 재료의 표면에 형성된 부동태 산화층의 주성분이 산화철과 산화크롬임을 예측할 수 있다.

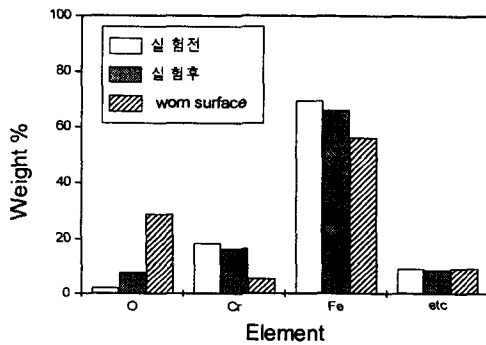


Fig. 10 Weight % of elements on surface ( $100\mu\text{m}$ ,  $40\text{N}$ ,  $3 \times 10^5$ )

#### 4. 결론

본 연구에서는 현재 화학, 발전, 처리산업의 현장에서 부식방지를 위한 구조용 재료로 널리 사용되고 있는 STS304강을 사용하여 인공해수라는 특수한 환경 하에서의 프레팅 마멸실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 구하였다.

- (1) 왕복수와 진폭이 증가함에 따른 전체 미끄럼 거리의 증가로 인하여 마멸량이 증가한다.
- (2) 비마멸율은 진폭  $70\mu\text{m}$ 에서  $100\mu\text{m}$  사이에서 마멸면에 형성된 산화막의 파괴에 의해 급속히 증가를 하며 전체 미끄럼영역인  $100\mu\text{m}$  이후에서는 마멸작용을 하는 산화마멸입자들이 진폭의

증가와 해수의 마멸입자 제거효과와 유체유회효과에 의해 비마멸율이 안정됨을 알 수 있다.

- (3) 마멸입자의 축적과 접촉형상에 의해 마멸면 주위의 운동방향으로 틈부식이 발생하며 왕복수가 증가할수록 심한 부식손상을 보이고 있다.

#### 참고문헌

- (1) B.P.Pearson, P.A.Brook and R.B. Waterhouse, "Fretting in Aqueous media, particularly of Roping steels in Seawater", *Wear*, 106, pp.225-260, 1985.
- (2) Waterhouse, R. B., "Wear of Materials-1981", ASME, 17, 1981.
- (3) Iwabuchi, A., "The Effect of Slip Amplitude and Load in Fretting Wear", *J SME*, Vol. 44, No. 378, pp.692-699, 1978.
- (4) 조광희, "경수중에서 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸특성", *한국윤활학회지*, 제14권 제4호, pp.131-147, 1998.
- (5) Denny A. Jones, "Principles and Prevention of Corrosion", Department of chemical and metallurgical engineering university of nevada, 1996.
- (6) Iwabuchi, A., "Tribological Properties of SUS304 Steel in Seawater", *JSME Int'l. Jour. Ser. I*, 35, pp.117-122, 1992.
- (7) Sato, J., Shima, T., Sagawara, T., Tahara, A., "Effects of Lubricants on Fretting wear of Steel", *Wear*, Vol 125, pp.83-95, 1988.
- (8) Vingsbo, Olof, "On Fretting Maps", *Wear*, Vol. 126, pp.131-147, 1988.