

부식 환경에서 SUS304 스테인레스 강의 마모 거동

이광진^{†*} · 윤상돈^{**} · 구영필 · 김형자

부경대학교 기계공학부, *창원기능대학 컴퓨터응용기계과, **대한상공회의소 부산인력개발원

Wear Behavior of SUS304 Stainless Steels in Corrosive Environment

Kwang-Jin Lee^{†*}, Sang-Don Yoon^{**}, Young-Pil Koo and Hyung-Ja Kim

School of Mechanical Engineering, Pukyong National University

**Dept. of Computer based Machinery, ChangWon Polytechnic College*

***Busan Human Resource Development Institute, KCCI*

Abstract – Wear behavior of self-mated stainless steels in NaCl solution has been investigated. The experiment was done in the corrosive liquid of which NaCl concentration of 0~3% and temperature of 15~90°C. Two kinds of wear type were observed: one is 'severe wear' type which shows gradually increasing wear volume with increasing sliding distances, the other is 'mild wear' type which shows change of wear rate from high value to low at transition distance. The specific wear rate in severe wear type was not sensitive to the liquid temperature and concentration of NaCl but stable at value of $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ approximately.

Key words – stainless steel, corrosive wear, mild wear, severe wear, transition.

1. 서 론

스테인레스 강은 외관이 미려하고 내식성이 우수하므로 화학 공업, 발전소, 해양 설비 등 특수 환경 분야에 주로 사용되고 있다. 특히, 해양 자원의 활용이 증대함에 따라 해양 구조물이나 해수를 취급하는 기계 장비에 스테인레스 강의 사용이 확대되고 있다. 해양이라는 특수 환경에서 가장 큰 문제는 부식이므로 부식 환경에서 스테인레스 강의 마찰·마모 거동을 조사할 필요가 있다.

부식 환경에서 스테인레스 강의 마모와 부식에 관하여 많은 연구가 실험적으로 이루어져 왔다. 이들 연구는 재질 개선 또는 환경의 영향에 관한 연구로 크게 구분된다. 재질에 관한 연구로서 여러 종류의 스테인레스 강 중에서 오스테나이트계가 미소 전단 저항이 크게 나타났으며[1], 침식-부식 환경에서 Nb이 첨가된 스테인레스 강의 내식성이 향상되었다는 연구결과가

발표되었고[2], 부식성 용액에서 Cu와 Mo이 첨가된 Cr-Mn-N 계열의 주물 스테인레스 강의 마모저항이 SUS304보다 우수하다고 알려졌다[3]. 부식 환경의 영향에 관한 연구로서 NaCl 수용액의 농도가 0.1%일 때 SUS316강의 마모율이 최대라고 발표되었고[4], 전기 화학적 변화가 마모 과정 중에 미치는 복합 효과에 관한 연구에서 음극 방식이 마모 감소에 효과적이었으며[5], 염소 이온이 존재하면 마모율의 증가가 관찰되었다[6]. 또한, 산성 슬러리 환경에서 사용되는 스테인레스 강에 대하여 슬러리 침식과 부식에 의한 시너지 효과가 확인되었다[7].

그러나 이와 같이 많은 연구에도 불구하고, 기존의 부식 환경에서의 실험은 해양 설비가 사용되는 해수 환경에서 발생할 수 있는 다양한 조건을 다루는데 부족함이 있다. 부식 마모의 주요 인자는 부식용액의 농도 및 온도, 작용 하중, 미끄럼 속도 등이며 특히, 부식용액의 농도와 온도는 다양하게 변동될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 내식성 재료인 SUS304 스테인레스 강에 대하여 부식용액의 농도와 온도의 변화에 따

[†]주저자 · 책임저자 : kwangjlee@cpc.ac.kr

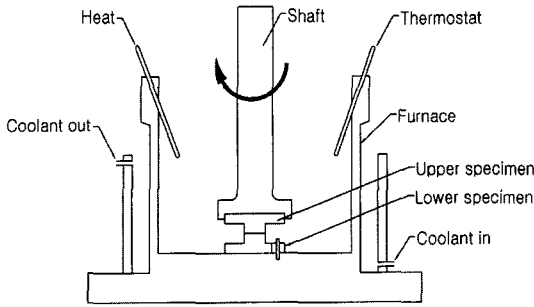


Fig. 1. Schematic of wear test rig.

른 마모 거동을 면밀하게 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2-1. 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 회전형 마모실험장치의 개요도 이다. 부식성 분위기를 조성하기 위하여 부식용액을 저장하고 부식용액의 온도를 조절할 수 있는 노(furnace)를 준비하였다. 부식용액의 온도는 노 내에 장치된 히터와 온도조절기를 이용하여 10~100°C의 범위에서 임의로 설정된다. 실험 조건에 따라 부식용액이 낮은 온도를 유지하기 위하여 노 주위에 냉각수를 공급할 수 있도록 하였다. 하부 시편은 노의 바닥에 고정되고, 상부 시편은 회전축의 하부에 설치되어 축과 같이 회전하면서 수직하중을 전달받는 구조로 하여, 부식용액 중에서 마모시험이 이루어지도록 하였다.

2-2. 시험편

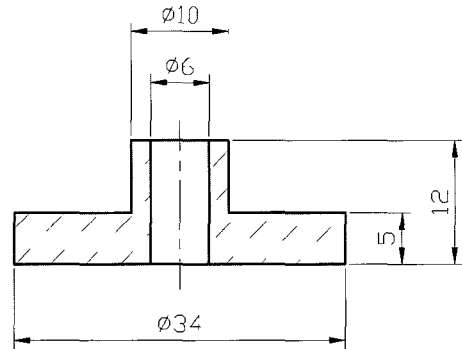
상부 및 하부 시험편의 재질은 해수 환경에서 내식성 재료로 이용되는 SUS304로 하였다. Table 1에 재료의 물성치를 나타내었다. 시험편의 형상과 치수를 나타낸 Fig. 2에서 내경 6 mm, 외경 10 mm의 환상 영역이 서로 접촉하여 마모되는 부분이다.

2-3. 마모 실험

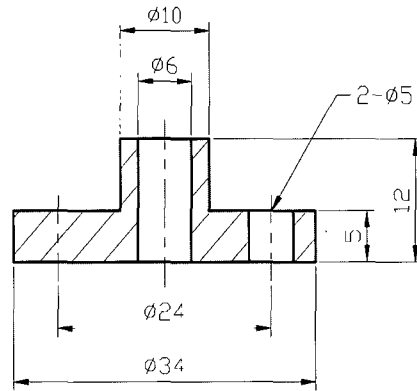
시험편의 마찰면을 시험 개시 전에 표면거칠기 R_{max} 0.5 μm 이하로 폴리싱한 후, 증류수로 세정하고 아세톤 속에서 5분간 초음파 세정한 다음, 시험편을 부식 환경하의 노 속에서 상부 시험편은 결합용 척에 장착하고, 하부 시험편은 노의 바닥면에 장착한 후 마모실험장치의 스피ndl에 수직하중과 회전력을 가한다. 각 실험조건에서 일정 미끄럼거리 동안 시험편을 회전시킨

Table 1. Material specification of specimens

| Mechanical Properties | Chemical | Composition [wt%] |
|------------------------|----------|-------------------|
| Tensile strength [MPa] | 510 | C 0.08 |
| | | Si 1.00 |
| Yield strength [MPa] | 202 | Mn 2.00 |
| | | P 0.04 |
| Elongation [%] | 35 | S 0.03 |
| Reduction of area [%] | 60 | Ni 9.5 |
| | | Cr 19.0 |
| Hardness [HB] | 187 | Fe Bal. |



(a) Upper specimen



(b) Lower specimen

Fig. 2. Configuration of specimens.

후, 상부 및 하부 시험편을 장치에서 분리하여 정밀 전자 저울로써 실험 전과 실험 후의 중량 변화를 측정하여 마모체적을 산출하였다. 중량 측정 전에 매회 증류수로 세정하고 아세톤에서 5분간 초음파 세정하였다.

마모시험은 수직하중 41.8 N, 미끄럼속도를 0.201 m/s로 일정하게 하고, 부식용액 농도를 0%(증류수),

Table 2. Test conditions

| No | Normal load [N] | Sliding speed [m/s] | Concentration of NaCl [wt%] | Water temperature [°C] |
|----|-----------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1 | | | 0.0 (distilled water) | 15, 20, 35, 50, 60, 75, 90 |
| 2 | | | 0.001 | 20, 50, 60, 75 |
| 3 | 41.8 | 0.201 | 0.1 | 20, 50, 60, 75, 90 |
| 4 | | | 1.0 | 20, 60 |
| 5 | | | 3.0 | 20, 50, 80 |

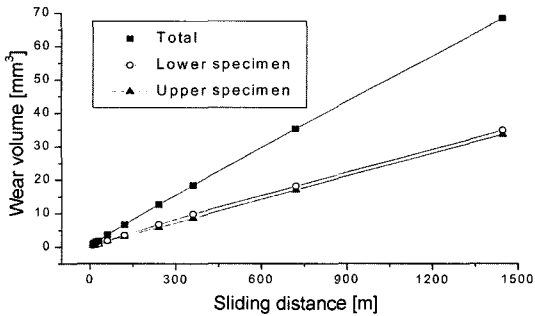


Fig. 3. Wear volume as a function of sliding distance (severe wear type).

0.001%, 0.1%, 1%, 3% NaCl의 5단계로 하였으며, 액온은 15~90°C까지 변화를 주었고, 최대 미끄럼거리는 1447 m로 하였다. Table 2는 실험조건의 조합을 나타낸 것이다.

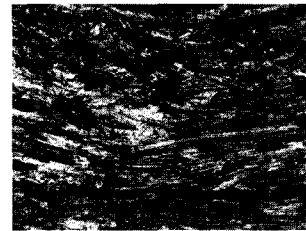
3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 미끄럼거리에 따른 마모 형태

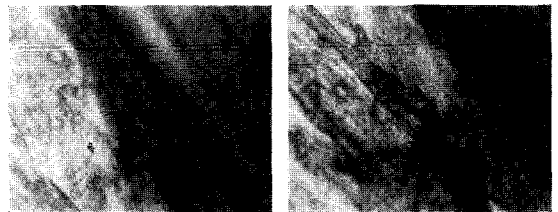
본 실험에 있어서의 마모 형태는 마모량이 직선적으로 증가하는 ‘중마모(severe wear)’ 상태가 미끄럼거리 최후까지 계속 이어지는 형태와 중마모 상태가 이어지던 도중에 어떤 미끄럼거리에서 마모량이 대단히 적은 ‘경마모(mild wear)’ 상태로 천이 하는 형태로 되는 두 종류의 마모곡선이 얻어진다.

3-1-1. 중마모(severe wear)

Fig. 3은 액온 75°C, 농도 0.1% NaCl 수용액 중에서 마모 실험하였을 때의 마모진행곡선을 나타낸 것이다. 미끄럼거리 1447 m까지 중마모에서 경마모 상태로의 천이를 나타내지 않고, 거의 선형적으로 중마모 상태가 이어진다. 마모 중 마찰음이 크고 회전축 방향의 진동이 크다. Fig. 4는 이 조건으로 미끄럼거리 1447 m까지 실험한 시험편의 마찰면을 전자현미경으로 확대한 형상이다. Fig. 4(a)에 나타낸 마모 트랙의 마



Sliding direction
(a) Wear track(×50)



(b) Adhesive particle(×1000) (c) Reaction products(×1000)
Fig. 4. Worn surface @ NaCl=0.1%, temp.=75°C, sliding distance=1447 m.

찰면은 응착 마모의 양상을 나타내고 있어 거칠다. 상부 및 하부 시험편에서 측정된 표면거칠기 평균치는 R_{max} 6.6 μ m이다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 마찰표면을 확대한 것으로서 Fig. 4(b)에는 이착물, 그리고 Fig. 4(c)에는 부식생성물의 입자가 표면의 오목부에서 관찰되고 있다.

3-1-2. 경마모(mild wear)

Fig. 5는 액온 20°C, 농도 0.001% NaCl 수용액 중에서 마모 실험하였을 때의 마모진행곡선을 나타낸 것이다. 마모진행곡선은 미끄럼거리 약 60 m까지는 마모가 급격하게 일어남을 보이며, 그 후 서서히 마모율이 감소하여 미끄럼거리 약 360 m 이하는 마모율이 대단히 낮은 경마모 상태를 나타내고 있다. 중마모 상태에서 경마모 상태로 변환될 때까지의 미끄럼거리를 천이 거리라 하며, 천이 거리 이후부터는 마모량이 매우 적

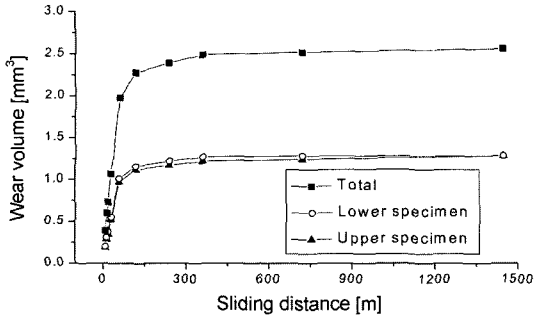
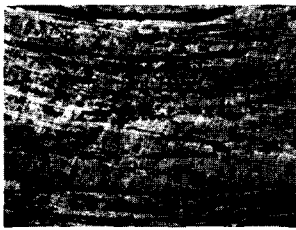
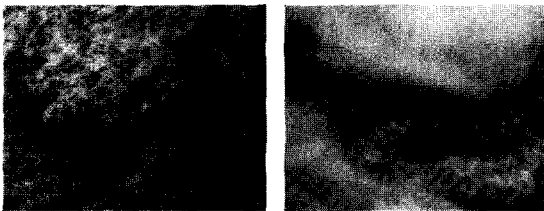


Fig. 5. Wear volume as a function of sliding distance (mild wear type).



(a) Wear track($\times 50$)



(b) Adhesive particle($\times 1000$) (c) Reaction products($\times 1000$)

Fig. 6. Worn surface @ NaCl=0.001%, temp.=20°C, sliding distance=1447 m.

다. 경마모 상태에 도달하면 회전축 방향의 진동은 일정하며 마찰음도 작다. Fig. 6(a)는 미끄럼거리 1447 m까지 실험한 시험편의 마찰면을 전자현미경으로 확대한 형상으로서 표면에는 황갈색, 적갈색, 흑색 등의 생성물이 미끄럼방향을 향해 피상으로 분포하고 있다. Fig. 6(b)는 이착물, 그리고 Fig. 6(c)는 부식생성물의 입자를 확대한 형상으로 이착물과 부식생성물의 입자가 표면의 오목부에서 관찰되고 있다. 표면거칠기는 상부, 하부 시험편의 평균값이 R_{max} 5.3 μm 로 측정되었다. 경마모역에서 미끄럼거리를 길게 마모 실험할 경우 표면거칠기 값이 낮게 나타나는데 이것은 부식생성물의 윤활작용으로 오목부가 없어지고 폴리싱된 마찰

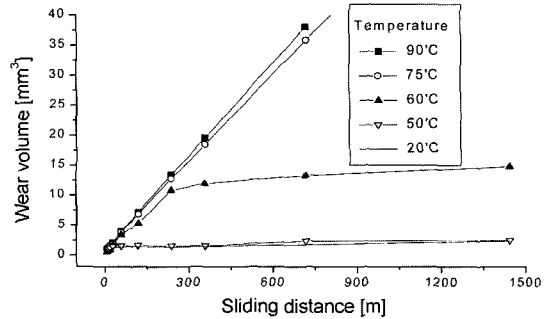


Fig. 7. Wear volume as a function of sliding distance @ NaCl=0.1%.

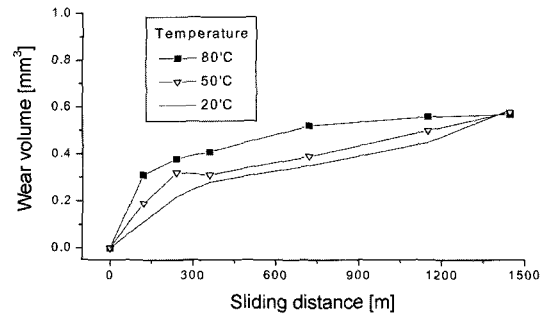


Fig. 8. Wear volume as a function of sliding distance @ NaCl=3%.

면의 비율이 높아지기 때문이다.

Fig. 3과 Fig. 5에서는 상부, 하부 시험편의 마모량을 구분하여 나타내었지만 두 시험편의 마모량의 차가 매우 적으므로 이하에서는 전체 마모량을 나타내기로 한다.

3-2. 농도 및 온도 변화에 따른 마모 거동

Fig. 7은 0.1% NaCl 수용액 중에서 실험한 마모진 행곡선을 나타낸 것이다. 액온이 20°C와 50°C에 있어서 미끄럼거리가 비교적 짧은 30 m부근 이내에서 경마모 상태로 천이하기 시작하여 미끄럼거리 100 m부근에서 경마모 상태를 보이고 있다. 액온 60°C에 있어서도 240~360 m부근에서 천이가 시작된다.

Fig. 8은 3%의 NaCl 수용액 중에서 실험한 마모진 행곡선을 나타낸 것이다. 이 경우에는 초기 마모량이 적어 마모량을 측정할 미끄럼거리 간격을 크게 하였기 때문에 중마모 상태에서 경마모 상태로의 천이가 일어나는 미끄럼거리에 대한 확인은 어려웠으나, 액온 80°C에 있어서는 미끄럼거리 100 m부근에서 경마모 상태로의 천이가 일어남을 확인할 수 있었다. 수용액의

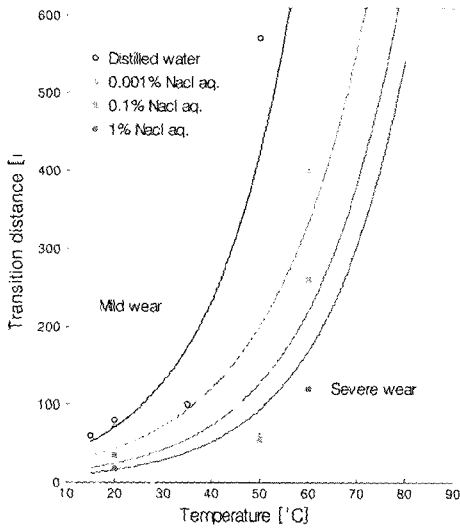


Fig. 9. Transition distance as a function of temperature.

농도가 증가함에 따라 경마모 상태로의 천이가 일어나는 미끄럼거리가 짧아지며, 천이점의 경계도 수용액 농도의 증가에 따라 불분명해 짐을 나타내고 있다. 경마모 상태에서의 마모량의 증가는 매우 적은 것을 알 수 있었다.

실험 결과로부터 NaCl 수용액 농도와 액온에 따라 마모 형태가 중마모 상태에서부터 경마모 상태로 천이하는 미끄럼거리가 존재함을 알 수 있다. Fig. 9는 NaCl 수용액 농도와 온도 변화에 따른 천이 거리의 변화를 나타낸 것이다. 농도가 일정할 때 온도가 상승하면 천이 거리는 증가하고, 온도가 일정한 조건에서 농도가 농후해지면 천이 거리는 감소한다.

3-3. 부식생성물의 영향

계면에 생기는 부식생성물이 유회작용을 하게되어 마모거동에 직접적인 영향을 미치고 있는 것이라고 생각할 수 있다. 즉 계면에 생성물이 개재하여 있으면 생성물의 유회작용에 의해 마모 형태는 경마모 상태로 천이하므로 부식생성물의 생성율과 천이 거리의 관계가 성립한다고 생각된다. Fig. 10은 각각 액온 20°C와 60°C에서 농도에 대한 천이 거리를 나타낸 것이다. NaCl 수용액 농도가 높을수록 천이 거리는 짧아진다. 이것은 스테인레스 강의 양호한 내식성은 표면에 형성된 부동태 피막의 방호작용에 의해서 유지되나, 미끄럼 운동에 의하여 부동태 피막이 일부 손상되면 특히, 염소 이온이 존재 하면 그 방호 작용이 저하되어 부식

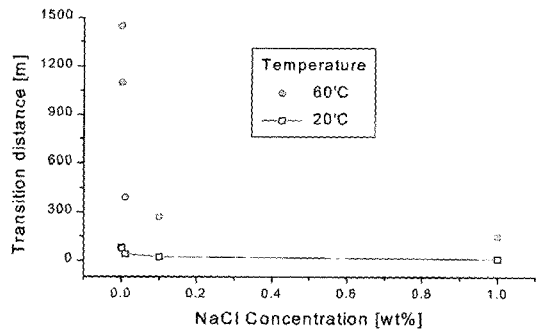


Fig. 10. Transition distance as a function of NaCl concentration.

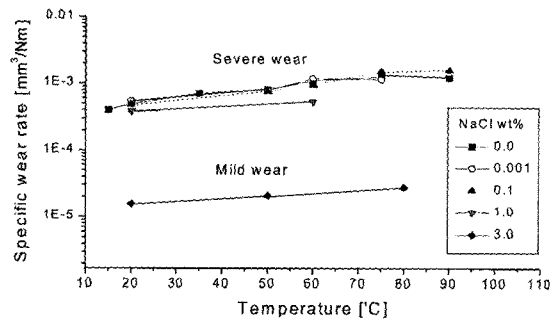


Fig. 11. Specific wear rate as a function of temperature.

생성율이 높아지기 때문이라고 사료된다[6]. 즉, 농도가 높아지면 부식생성물의 양이 많아지므로 계면의 유회 성능이 향상되어 경마모가 시작되는 미끄럼 거리가 감소한다.

액온이 높아지면 천이 거리는 길어지는데 이것은 액온이 높아질수록 증류수에 대한 산소의 용해도가 감소하여, 그 결과 부식 생성물이 낮아지기 때문이라고 생각되어진다. 부식 생성물의 양을 측정하지는 못하였지만 농도가 높아짐에 따라 용액의 색깔이 점차 진하게 변색되었으므로 부식생성물 양의 증가를 확인할 수 있었다.

3-4. 부식 환경에서의 비마모율

Fig. 11은 각 NaCl 수용액 농도에 있어서 온도에 대한 중마모역 및 경마모역에서의 비마모율을 나타낸 것이다. 여기서 비마모율은 단위거리, 단위하중에 대한 마모량이다. 중마모역에 있어서 비마모율은 NaCl 수용액 농도와 액온에 민감하지 않고 약 $1.0 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 으로 거의 일정한 값을 갖는다. 경마모역에 있어서 실제의 마모량이 대단히 적기 때문에 비마모율도 상대적으로 작은 값을 보이고 있다.

4. 결 론

내식성 재료인 SUS304 스테인레스 강을 사용하여 주요 부식 환경 인자인 부식용액 농도와 온도를 다양하게 변화시켜 마모 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마모 형태는 NaCl 수용액 농도와 액온의 영향에 의하여 천이 거리에서 '중마모(sever wear)' 상태에서 '경마모(mild wear)' 상태로 천이 하는 경우와 일정한 미끄럼거리에서 천이하지 않고 중마모 상태가 계속 이어지는 경우가 있다.

(2) 증류수 및 0.001~1% NaCl 수용액 중에 있어서 천이 거리는 수용액 온도가 30~60°C 부근에서 급격히 증대하며 동일 온도에서 농도가 높을수록 천이 거리는 감소한다.

(3) 중마모 상태에 있어서 비마모율은 NaCl 수용액 농도 및 온도에 민감하지 않고 약 $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 로 거의 일정한 값을 갖는다.

참고 문헌

1. Allen, C. and Ball, A., "The abrasive-corrosive wear of stainless steels," *Wear*, Vol. 74, pp. 287-305, 1981.
2. Gupta, M. K., Chakrabarti, A. K. and Basak, A., "Erosive and erosive-corrosive wear behaviour of cast nitrogenated stainless steels," *Wear*, Vol. 199, pp. 33-35, 1996.
3. Bi, H. Y., Jiang, X. X. and Li, S. Z., "The corrosive wear behavior of Cr-Mn-N series casting stainless steel," *Wear*, Vol. 225-229, pp. 1043-1049, 1999.
4. Yahagi, Yoshiaki and Mizutani, Yoshiyuki, "Corrosive wear of carbon and austenitic stainless steels in NaCl solution," *Wear*, Vol. 110, pp. 401-408, 1986.
5. Abd-El-Kadar, H. and El-Raghy, S. M., "Wear-corrosion mechanism of stainless steel in chloride media," *Wear*, Vol. 26, pp. 647-653, 1986.
6. Hong, Moon-Hee and Pyun, Su-II, "Corrosive wear behaviour of 304-L stainless steel in 1 N H₂SO₄ solution Part 1. Effect of applied potential," *Wear*, Vol. 147, pp. 59-67, 1991.
7. Fan Aiming, Long Jinming and Tao Ziyun, "An investigation of the corrosive wear of stainless steels in aqueous slurries," *Wear*, Vol. 193, pp. 73-77, 1996.