

## 슬러리 펌프용 고크롬 주철의 교반 가속 부식법

이준섭<sup>1,2,†</sup> · 이준형<sup>2</sup> · 이예진<sup>2</sup> · 오준석<sup>1,3</sup> · 김정구<sup>4</sup> · 이재현<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>국립창원대학교 신소재공학부, 51140 경남 창원시 창원대학교로 20  
<sup>2</sup>국립창원대학교 소재융합시스템공학과, 51140 경남 창원시 창원대학교로 20  
<sup>3</sup>(주)아이-캐스팅테크, 50875 경남 김해시 진례면 고모로 582번길 21  
<sup>4</sup>성균관대학교 신소재공학부, 16419 경기도 수원시 서북로 2066  
(2022년 10월 13일 접수, 2022년 10월 20일 수정, 2022년 10월 21일 채택)

## Stir-Accelerated Corrosion Test of High Chromium Cast Iron for Application in Slurry Pumps

Jun-Seob Lee<sup>1,2,†</sup>, Jun-Hyeong Lee<sup>2</sup>, Ye-Jin Lee<sup>2</sup>, Jun-Seok Oh<sup>1,3</sup>,  
Jung-Gu Kim<sup>4</sup>, and Je-hyun Lee<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Materials Science and Engineering, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro, Changwon, 51140, South Korea  
<sup>2</sup>Materials Convergence and System Engineering, Changwon National University, 20 Changwondaehak-ro, Changwon, 51140, South Korea  
<sup>3</sup>i-Casting Tech Ltd., Gomo-ro, Gimhae, 50875, South Korea  
<sup>4</sup>Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, 2066 Seobuk-ro, Suwon, 16419, South Korea  
(Received October 13, 2022; Revised October 20, 2022; Accepted October 21, 2022)

Stir-accelerated corrosion test of a high chromium cast iron was attempted in 0.1 mol dm<sup>-3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0.05 mol dm<sup>-3</sup> HCl + 10 wt% SiC solution for 48 h at room temperature or at 45 °C. The high chromium cast iron was composed of 2.8 wt% C and 27 wt% Cr and balanced with Fe. The high chromium cast iron was positioned into a 500 mL beaker with stirring of the solution at 1050 rpm using a magnetic hot plate. The corrosion rate was increased by agitating the solution. In addition, the corroded depth of the high chromium cast iron surface was increased by agitating the solution. The surface morphology of the high chromium cast iron after the stir-accelerated corrosion test revealed that a dendritic austenite phase partially remained in the corroded region after agitating the solution, indicating that solution movement during agitating could accelerate the corrosion rate of the high chromium cast iron.

**Keywords:** High chromium cast iron, Corrosion, Acidic solution

### 1. 서론

탄소 (C) 2.0 wt% ~ 3.0 wt%, 크롬(Cr) 14.0 wt% ~ 28.0 wt%이 주요 합금 원소 중 하나인 고크롬 주철은 내마모성 등의 기계적 성질이 스테인리스강보다 우수하고 부식 저항성은 주철과 비교하여 우수하기 때문에 내마모성과 부식 저항성이 필요한 금형, 화력발전소 탈황설비 슬러리 펌프 등에 널리 사용된다 [1-3]. 그 중 탈황설비 슬러리 펌프는 주로 27 wt% Cr 이상을 포함한 고크롬 주철로 제조한다 [3]. 고크롬 주철의 미세조직은

주로 탄화물과 기지 오스테나이트 상으로 이루어져 있어 탄화물 상은 내마모성, 오스테나이트 상은 인성에 영향을 준다 [4].

본 연구의 저자들은 27 wt% Cr의 고크롬 주철에 C 함량이 증가함에 따라 전면 부식 저항성이 감소하는 것을 탈황설비 환경 모사 용액에서 확인하였다 [5]. 고크롬 주철에 C 함량이 증가함에 따라 오스테나이트 상의 분율은 감소하고 탄화물 상의 분율이 증가하여 두 상간의 갈바닉 부식 속도가 증가한다고 주장하였다. 다만, 이전 연구에서는 고크롬 주철이 회전하는 용액 안에서 존재하는 고체 입자와의 충돌에 의한 부식 및 손상에 대한 정보는 없었다. 실제 슬러리 펌프가 구동되는 환경은 산 염화물 그리고 슬러리인 고체 입자를 포함하는

<sup>†</sup>Corresponding author: junseoble@changwon.ac.kr

이준섭: 교수, 이준형: 석사과정, 오준석: 박사후연구원, 과장, 김정구: 교수, 이재현: 교수

환경이다. 이는 부식과 함께 기계적인 마모 등이 일어날 수 있는 환경이다. 부식과 마모가 동시에 일어나는 시험법에 대한 보고가 있었지만 [6], 복잡한 기계 장치와 전기화학 장치를 동시에 사용해야 하는 등 일반적인 산업 현장에서 손쉽게 적용하기에는 다소 어려움이 있을 것으로 생각한다. 더 간단한 시험법으로 부식과 마모가 일어날 수 있는 환경을 모사한다면 마모와 부식 저항성을 가지는 금속의 내식성 및 수명 예측을 위한 정보를 얻는데 도움이 될 것이다. 본 연구는 탈황 설비 모사 강산-염화물 환경에서 간단하게 적용할 수 있는 가열 교반기를 활용한 부식 및 마모 시험법 개발 시도에 대하여 보고하고자 한다.

## 2. 실험

실험에 사용한 고크롬 주철은 C 2.8, Cr 27 wt% 그리고 Fe 기반 합금이다.  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ 로 절단한 시편을 #100 SiC 사포로 연마한 뒤,  $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4 + 0.05 \text{ mol dm}^{-3} \text{ HCl} + 10 \text{ wt\% SiC}$  용액에 침적시켰다. 가열 교반기 (MS300HS, 미성과학기기)를 활용한 마모 부식 가속 시험에 장치를 Fig. 1에 나타냈다. 가열 교반기 위에 부식 모사 용액 300 mL을 담은 비커를 올리고 상온 또는  $45^\circ\text{C}$ 의 온도에서 길이 4 cm 교반자를 1050 rpm으로 회전시켰다. 이 회전 속도는 직경 600 ~ 1000 mm 슬러리 펌프 일 경우 각각  $33.0, 55.0 \text{ m s}^{-1}$  이고 탈황 설비 흡수탑의 슬러리 펌프 운행 조건을 모사한 것이다 [7]. 이때, 고크롬 주철 시편은 유리막대로 고

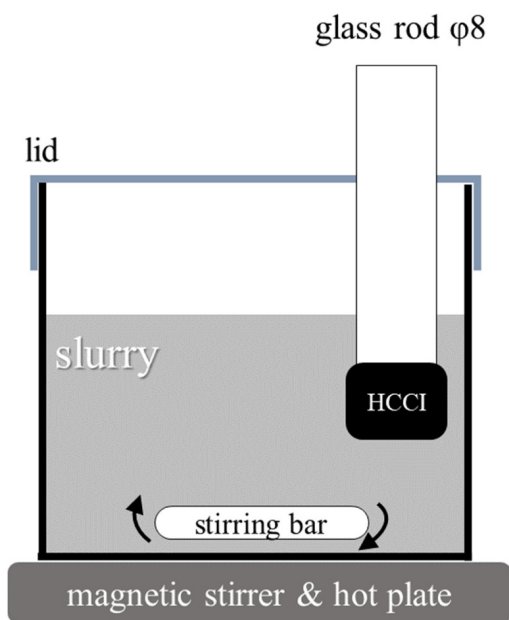


Fig. 1. Schematic image of the experimental set-up

정하고 비커의 중앙부에서 비커 벽 쪽으로 약 1 cm 정도 떨어진 곳에 두었다. 이는 회전에 의한 물과 공기가 섞인 소용돌이 중앙부에 시편이 위치하지 않도록 하기 위함이다. 48시간 실험 후 물, 에탄올, 아세톤으로 5분간 초음파 세척하여 표면에 존재하는 부식 생성물을 제거하였다. 시편의 무게 변화를  $0.1 \text{ mg}$  단위의 전자저울로 측정하였다. 시편의 부식 양상을 확인하기 위해서 48시간 실험 후 시편을 마운팅 한 뒤 단면을 잘라 경면연마 한 뒤 광학 현미경 100배 배율에서 관찰하였다. 단면에서 부식된 영역의 깊이는 5번 이상 측정하여 평균값과 표준 편차 값을 얻었다.

## 3. 연구결과 및 고찰

Fig. 2는 고크롬 주철을  $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4 + 0.05 \text{ mol dm}^{-3} \text{ HCl} + 10 \text{ wt\% SiC}$  용액을 상온과  $45^\circ\text{C}$ 에서 48시간 동안 교반 유무에 따라 얻은 부식 속도이다. 부식 속도는 다음식에 따라 얻었다:

$$\text{corrosion rate, mm y}^{-1} = \frac{87.6W}{D \cdot A \cdot T} \quad (1)$$

여기서 W는 부식 시험 후 무게 감량 mg, D는 밀도  $\text{g cm}^{-3}$ , A는 표면적  $\text{cm}^2$ , T는 침지 시간, h이다. 침지 온도가 상온에서  $45^\circ\text{C}$ 로 온도가 증가함에 따라 교반 유무와 상관없이 부식 속도는 약 30% 이상 증가하였다. 침지 용액을 교반 함에 따라 온도에 상관없이 40% 이상 부식 속도가 증가하였다. 온도에 따라 부식 속도가 증가하는 것은 합금 표면의 반응 속도 증가에 따른 부식량이 증가하는 것이고 [8] 교반에 따른 부식 속도 증가는 부식 용액의 흐름이 합금 표면에서의 양극 또는

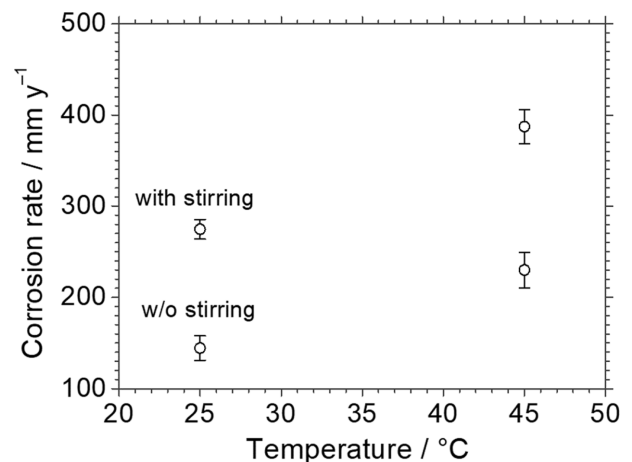
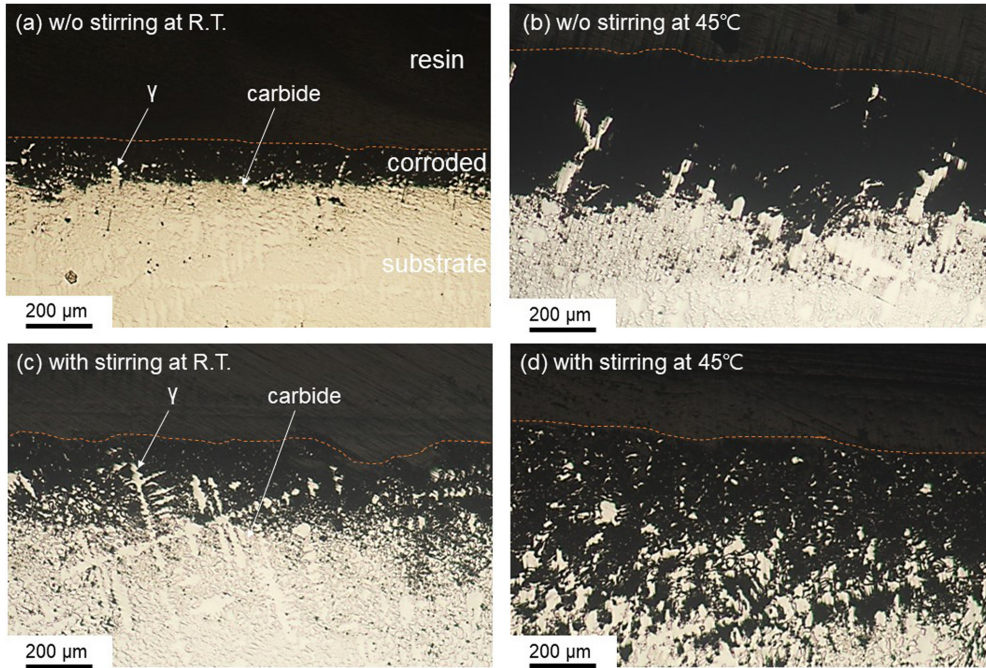


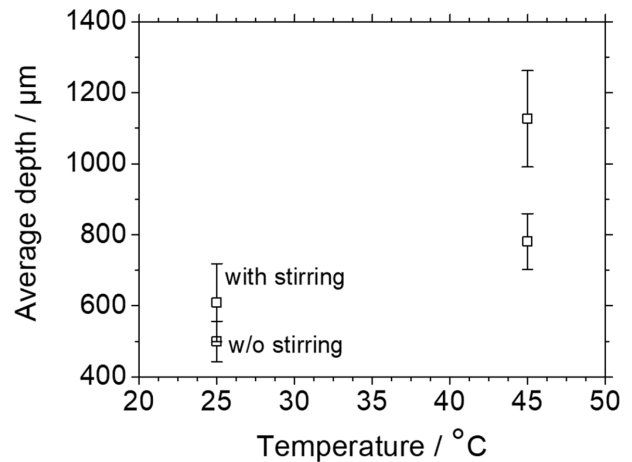
Fig. 2. Corrosion rate of the high chromium cast iron after immersion test with or without stirring in  $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4 + 0.05 \text{ mol dm}^{-3} \text{ HCl} + 10 \text{ wt\% SiC}$  solution



**Fig. 3. Cross-sectional images of the high chromium cast iron after immersion test with or without stirring in  $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{H}_2\text{SO}_4 + 0.05 \text{ mol dm}^{-3} \text{HCl} + 10 \text{ wt\% SiC}$  solution**

음극 반응을 가속해 부식 속도 증가에 영향을 미쳤을 것이다. 용액의 흐름은 전하 이동 속도의 증가에 따른 금속의 용해 반응인 양극 반응 속도와 물질 이동 속도의 증가에 따른 산화제나 환원종의 반응 속도 증가에 기여할 것이다 [9].

Fig. 3은 침지 시험 후 고크롬 주철의 단면의 광학현미경 사진이다. 표면에서부터 합금의 깊이 방향으로 에폭시 레진, 부식된 표면, 기지 합금 영역으로 구분된다. 부식 영역과 기지에서 보이는 수지 형태는 오스테나이트 조직이고 오스테나이트 수지 상이 탄화물 상으로 둘러싸여 있는 미세구조가 관찰되었다. 이 탄화물은 저자들의 이전 연구 결과에서 보고한 것처럼  $M(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_6$ 이다 [5]. 부식된 깊이를 광학현미경으로 측정한 값은 Fig. 4에 나타내었다. 침지 시험 용액의 온도가 증가하면 부식된 영역의 깊이는 교반하지 않은 경우는 평균 56%, 교반한 경우는 85% 증가하였다. Fig. 3의 교반 후 부식된 영역에서는 오스테나이트 수지 상이 부분적으로 그 가지 형태를 유지하면서 남아있었다. 반면, 교반하지 않은 합금의 표면에서는 교반한 합금의 표면에 비해 수지 상이 적게 남아있었다. 부식 용액이 이동하면서 포함된 고체 입자 등과 부딪쳐 합금 표면이 물리적으로 손상된다면, 탄화물 또는 오스테나이트 상들이 탈락 또는 파손되는 현상이 발생할 수 있다. 물리적 손상에 의한 합금 표면은 수지상이나 탄화물 상 등이 물리적 손상이 없는 경우와 비교하여 덜 남아있게 될 것이다. 반



**Fig. 4. Corroded-depth values of the high chromium cast iron after immersion test with or without stirring in  $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{H}_2\text{SO}_4 + 0.05 \text{ mol dm}^{-3} \text{HCl} + 10 \text{ wt\% SiC}$  solution**

면, 교반 후 합금 표면에 남은 수지 상이 교반하지 않은 시편에 비해 더 많이 존재하므로 교반에 의해 부딪치면서 발생하는 물리적 손상 정도가 크지 않을 수 있다. 이를 표면의 조도 등의 변화 등으로는 검토하기 어려웠지만, 오스테나이트 상의 경우 탄화물 상 보다 경도 값이 낮다고 알려져 있고 탄화물 상은 오스테나이트 상보다 취성이 강하여 [5] 손상 후 물리적으로 탈락될 수 있다고 판단하였다.

본 연구에서는 슬러리 펌프 부식 모사 용액의 교반에

의한 부식 가속화 방법을 시도하였고 합금의 마모 부식을 평가할 수 있는 가능성을 시도하였다. 본 실험 방법은 합금 표면에서 반응 속도가 빨라지는 부식 용액 유속 증가 효과를 검토할 수 있다. 더불어, 고체입자에 의한 마모를 일으키는 시험 방법으로 발전할 수 있는 기초 자료로 활용할 수 있다고 생각한다. 저자들은 향후 교반 방식에 대한 개량 및 합금의 마모 부식을 모사할 수 있는 교반 조건 등을 개선하여 마모 부식 현상을 모사하는 시험법에 대하여 연구할 예정이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는  $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4 + 0.05 \text{ mol dm}^{-3} \text{ HCl} + 10 \text{ wt\% SiC}$  용액에서 부식과 더불어 마모도 일어날 수 있는 교반 시험법을 고크롬 주철에 적용해 보았다. 침지 시험 후 부식 속도는 교반에 의해 30% 이상 증가하였고 부식된 영역의 깊이는 50% 이상 증가하였다. 교반 후 부식된 합금 표면은 교반하지 않은 합금 표면과 비교하여 수지 형태의 오스테나이트 상이 부분적으로 더 남아있었고 이는 부식 용액의 교반에 의한 마모의 역할에 비해 용액의 유속에 따른 부식 가속화 효과이다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

#### References

1. Y. Zheng, W. Liu, Z. Yao, and W. Ke, Damage mechanisms and metallic materials development in multiphase flow, *Corrosion Science and Technology*, **1**, 41 (2002). [https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf\\_viewer.htm?code=C00010100041](https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=C00010100041)
2. C. K. Kim, S. Lee, and J. Y. Lee, Wear Resistance and Fracture Toughness of Heat-treated Duo-cast Materials Composed of High-Chromium White Cast Iron and Low-Chromium Steel, *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, **42**, 877 (2004). [http://kjmm.or.kr/past/view\\_kiss.asp?a\\_key=2382457](http://kjmm.or.kr/past/view_kiss.asp?a_key=2382457)
3. R. Lee, and Y. S. Kim, Effect of Heat treatment on Hardness and Corrosion Resistance of Super Cast Iron, *Korean Journal of Metals and Material*, **52**, 511 (2013). Doi: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2014.52.7.511>
4. I. Chakrabarty and A. Basak, Structural study of Cr-Mn-Cu white cast irons, *Journal of Materials Science Letters*, **6**, 1399 (1987). <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01689301.pdf>
5. J. S. Lee, J. H. Lee, J. S. Oh, and J. H. Lee, General Corrosion Behavior of High Chromium Cast Iron in an Acid Solution, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 367 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.6.367>
6. Y. J. Jeong, J. S. Park, H. R. Bang, S. G. Lee, J. K. Choi and S. J. Kim, Effect of Cr Addition to High Mn Steel on Flow-Accelerated Corrosion Behaviors in Neutral Aqueous Environments, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 41 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.6.373>
7. A. Hall, WARMAN® Centrifugal Slurry Pumps, Weir Minerals North America (2014). <https://www.global.weir/assets/files/product%20brochures/20140811%20Warman%20Horizontal%20Slurry%20Pump%20Global.pdf>
8. H. K. Hwang, and S. J. Kim, Effect of Temperature on Electrochemical Characteristics of Stainless Steel in Green Death Solution Using Cyclic Potentiodynamic Polarization Test, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 5 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.5.266>
9. K. M. Kim, Y. M. Cheong, E. H. Lee, S.-B. Oh, and D. J. Kim, Effects of Alloys and Flow Velocity on Welded Pipeline wall Thinning in Simulated Secondary Environment for Nuclear Power Plants, *Corrosion Science and Technology*, **15**, 245 (2016). Doi: <http://dx.doi.org/10.14773/cst.2016.15.5.245>