

## 해수환경에서의 차축소재(RSA1) 부식특성 평가

최두호\*, 서승일<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국철도기술연구원

### Evaluation of Corrosion Behavior of Railway Axle Material (RSA1) in Seawater

Dooho Choi<sup>\*</sup>, Sung-il Seo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Railroad Research Institute.

**요약** 본 연구에서는 철도차량의 차축소재로 사용되는 RSA1 소재에 대한 해수 부식특성 평가를 하였다. 미국재료시험협회에서 규정한 ASTM-D1141에 해당하는 인공해수를 사용하여 3전극 셀 구조를 이용한 동전위 분극법과 임피던스 분광법을 바탕으로 산출된 부식전류밀도와 부식속도는 각각  $18.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 와  $0.217\text{ mm}/\text{yr}$ 이다. 이 결과에 따르면 철도차량의 일반적인 내구연한인 25년을 가정할 때 한 면에서의 차축부식량은 5mm 정도로 예상된다. 패러데이법칙을 바탕으로 한 정전류 부식 가속화 시험을 통해 1,3,4년의 부식량을 인위적으로 형성하였고, 단면적 감소분을 고려하여 인장시험을 시행하였다. 탄성구간에서는 부식에 의한 기계적 특성변화가 관찰되지 않았지만 소재의 연성 값은 부식이 진행 될수록 감소되는 경향을 보였다. 본 연구 결과는 향후 해수환경에서 사용될 철도차량 설계 시 고려할 기초 부식데이터로 활용될 것으로 기대된다.

**Abstract** In this study, we evaluated corrosion behavior of a common rolling stock axle material, RSA1, in seawater. 3-electrode electrochemical cell experiment was conducted using artificial sea water, fabricated according to ASTM-D1141 set by American Society for Testing and Materials, where the corrosion current density and corrosion rate were determined to be  $18.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$  and  $0.217\text{ mm}/\text{yr}$ , respectively, by employing potentiodynamic test method and impedance spectroscopy method. Considering the fact that life time of railway car is ~25 years, the expected corrosion layer depth is 5mm. Constant-current corrosion test was conducted to accelerate the corrosion process, to reach corrosion periods of 1,3 and 4 years based on Faraday's law, followed by tension tests where the reduced specimen gauge cross-section was re-measured for stress calculation. While no apparent corrosion-related changes in mechanical properties were observed in the elastic regime, the reduction in ductility of the material was found to be increased as the corrosion period increased. The results of this study are expected to be basic corrosion data for the design of rolling stock axles, which will be operated in the sea water environment.

**Keywords** : Corrosion, Electrochemistry, Mechanical properties, Rollingstock axle and Tension test

### 1. 서론

최근 육로에 국한되어 활용되던 철도시스템은 레일운하, 열차페리, 해중철도 등 해상 또는 해저로 그 적용범위를 넓히게 되고, 이로 인해 기존의 대기 부식 뿐만 아니라 해수에서의 부식현상 또한 그 중요성이 더 커지게

되었다. [1] 철도차량의 구조재료는 철도차량의 수명연한인 25년 이상 운행됨에 따라 지속적인 부식이 발생하게 되고, 이로 인해 최초 설계된 차량부품의 치수 감소를 발생시킬 뿐만 아니라 지속적으로 가해지는 응력에 의해 부식열화현상을 일으켜 철도차량의 소재 안정성을 악화 시킴에 따라 차량 설계 시 부식에 의한 기계적 특성변화

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Dooho Choi(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-10-2851-8592 email: dhchoi@krrri.re.kr

Received June 1, 2015

Revised August 4, 2015

Accepted August 6, 2015

Published August 31, 2015

의 고려가 필요하다. 특히, 레일운하시스템은 10만톤급에 달하는 선박을 철도차량을 이용해 육상으로 운송하는 물류이송시스템으로써 고중량 선박을 지지하는 다축화차가 선박을 싣고 내리기 위하여 해수 내에 진입하여야 하므로 해수에서의 철도차량 소재의 부식의 연구가 반드시 선행되어야 한다. 그러나 아직까지 해수환경에서 철도차량 소재의 부식 현상에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 화차의 차축에 일반적으로 사용되는 RSA1소재의 해수 내 부식특성 결과를 보고한다. 동전위 분극법과 임피던스 분광법을 활용하여 인공해수 내 RSA1소재의 부식속도를 산출하였고, 정전류 부식가속화 실험을 통해 1년~4년의 기간에 해당하는 부식층을 인위적으로 형성하였다. 각 부식 조건 별 인장시편을 제작하여 부식기간에 따른 기계적 특성을 분석하여 철도차량 차축의 해수환경 내 소재건전성을 평가하였다.

## 2. 본론

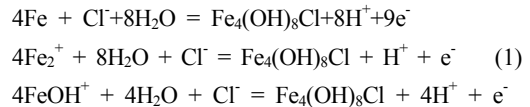
### 2.1 해수 부식시험

#### 2.1.1 해수 부식 메커니즘

해수에서의 가장 큰 부분을 차지하고 있는 이온은 염화나트륨(NaCl)에서 기인하는 염소이온(35,000 ppm)으로 이는 해수 내 철강의 부식에 가장 큰 영향을 미치는 성분으로 알려져 있다. 철의 부식속도는 용액의 NaCl 농도에 따라 달라지는 것으로 알려져 있는데, 0%에서 3%까지는 NaCl 농도 증가가 증가할 수록 전도도의 증가에 의한 산환, 환원반응의 활성화로 인해 부식속도가 증가하지만 3%보다 더 높으면 용액 내에 용해될 수 있는 용존산소량이 감소하기 때문에 부식속도가 감소하는 경향을 보인다. 해수에서의 NaCl 농도는 약 3.5%정도이기 때문에 해수에서 염소이온에 의한 부식속도의 증가는 최대치에 가깝다고 볼 수 있다. [2]

염소이온은 단순히 전도도 증가에 의한 부식속도 증가뿐만 아니라, 공격성이온 및 촉매제로서 부식 반응을 가속화시킨다고 알려져 있다. 대표적인 가속화 메커니즘은 전기장 형성, 촉매반응, 피막침투 등이 있다. 전기장에 의한 효과는 전기음성도가 큰 염소이온이 금속표면에서 강한 전기장을 발생시키고 이 전기장에 의해서 철 이온이 더 쉽게 용출된다고 보고되었으며, 촉매반응의 활

성화는 염소이온이 중간 촉매제로서 환원반응을 가속시켜서 전체 부식반응이 증가된다고 보고되었다. 또한, 염소이온은 공격성이온으로서 흡착이나 다른 물질의 사이에 머물기를 선호하는 특성 때문에 녹이나 철의 피막에 쉽게 침투하여 피막의 보호성 등을 저해하여 부식속도를 증가시킬 수 있다. [3-4] 특히, 염소이온은 아래와 같은 화학반응을 통하여 “푸른 녹(green rust)”이라 불리는 부식 생성물인  $Fe_4(OH)_8Cl$ 을 형성시키고 이는 염소이온이 다량 포함된 해수에서 흔히 발생한다. [5-7]



염소이온과의 화학반응이 포함된 포베 다이그램(Pourbaix diagram)에 따르면 염소이온의 양이 많아질수록 푸른 녹의 영역이 커지게 되어 철의 표면에 생성되는 푸른 녹의 양도 증가하게 되며 이로 인한 화학반응을 통해 생성된 수소로 인해 재료 내 pH를 감소시킨다. [4] 또한, 이 부식생성물은 결정구조 내에 염소이온이 침입형 원자로 들어가 있어 그 상태가 상당히 불안정하여 피막으로서의 작용을 거의 하지 못한다. 따라서 이러한 푸른 녹은 pH의 감소와 불안정한 피막형성으로 부식의 진행을 활성화 시킨다.

#### 2.1.2 시편, 인공해수 및 전기화학실험 개요

해수 부식 실험에 사용된 시편은 화차의 차축에 일반적으로 사용되는 강재(RSA1)이며 Table 1에 화학 조성비를 나타내었다. 인장시편은 국제규격인 NACE Standard TM0177-96을 따라 제작하였으며 게이지섹션(gauge section)의 지름은 6.35mm이다.

Table 1. Chemical composition (wt %) of impurities for RSA1, a typical axle material in railway rolling stocks.

Chemical component	C	Si	Mn	P	S	Cu
%	5.20	4.19	1.16	0.66	0.20	0.10

해수의 조성은 지역별, 기후별 많은 차이가 존재하기 때문에 표준화된 시험용액을 사용한 부식실험이 필요하다. 본 시험에서는 미국재료시험협회(American

Society for Testing and Materials, ASTM)에서 규정한 ASTM-D1141에 해당하는 인공해수를 사용하였으며, 용액의 화학조성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Chemical composition for artificial sea water (g./L) according to ASTM-D1141.

NaCl	MgCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl	NaHCO <sub>3</sub>	KBr	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	SrCl <sub>2</sub>	NaF
24.5	5.20	4.19	1.16	0.66	0.20	0.10	0.03	0.03	0.003

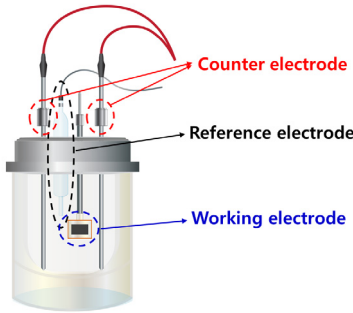


Fig. 1. Schematic of a three-electrode cell experiment.

전기화학실험은 Fig. 1에 나와 있는 3전극 셀을 구성하여 실험을 진행하였다. [8] 3전극 셀은 시험할 시편인 작업전극 (Working electrode, WE)과 탄소봉 2개로 구성된 보조전극(Counter electrode, CE), 그리고 상대적인 전위 값을 얻기 위한 기준전극(Reference electrode, RE)으로 구성 되어있다. 기준전극은 포화감홍전극(Saturated calomel electrode, SCE)을 사용하였으며 작업전극의 준비는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 표면상태를 균일하게 하기 위해서 silicon carbide(SiC) 페이퍼 600번까지 폴리싱을 실시한 후 구리와 에폭시 블록에 전도성 접착제인 실버 페이스트를 사용하여 시편과 블록을 접착시켰다. 이렇게 구성된 작업전극을 이용해 3전극 셀을 구성한 후 전기화학장비(Princeton Applied Research PARSTAT 2263)에 연결하여 해수환경에서의 부식특성 평가를 하였다. 부식속도 측정을 위해서 동전위 분극법과 임피던스분광법을 이용하였으며 부식가속화를 위해 정전류 가속화 실험을 수행하였다. 정전류 가속화 후에 부식된 시편의 세척은 에탄올 및 아세톤 용액에서 초음파 세척기를 통한 표면 부식생성물 제거 후 버니어캘리퍼스(Vernier calipers)를 이용하여 4 point의 직경감소율을 측정하였다.

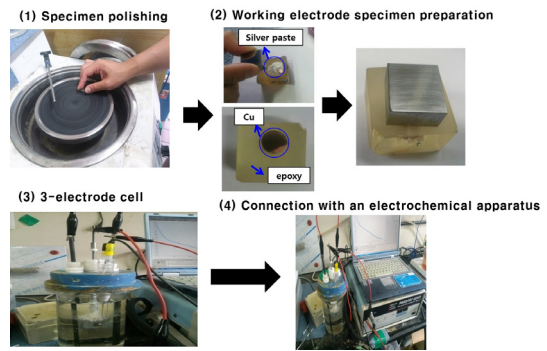


Fig. 2. Sample preparation procedure and connection setup for a three-electrode-cell electrochemical experiment

### 2.1.3 부식 속도 측정

부식속도 측정을 위해 동전위 분극법과 임피던스 분광법 2가지 방법에 대한 실험을 수행하였으며, 데이터의 신뢰성을 위해 각 분석방법당 3개의 시편에 대해 반복 실험을 하였다. 동전위분극법은 Fig. 3의 분극곡선에서 전위의 기울기가 일정한 타펠영역(Tafel region)의 기울기를 이용하여 부식전류를 구하게 되고 이를 측정된 시편의 면적으로 나눠서 부식전류밀도를 구하게 되고, 아래 식을 통해 부식속도를 산출하였다. [9] Fig.3에 나타내듯이 3회 반복실험에서 우수한 재현성을 보였다.

$$Corrosion\ rate(mm/yr) = \frac{3.16 \times 10^8 \times i_{corr} \times M}{z \times F \times \rho} \quad (2)$$

여기서  $i_{corr}$ 는 부식전류밀도(Ampere/cm<sup>2</sup>), M은 원자량(g/mole), z는 전자교환수 (number of electron transferred per metal atom), F는 페러데이 상수 (96,500 C/sec), ρ는 시편의 밀도 (density, g/cm<sup>3</sup>)를 나타낸다.

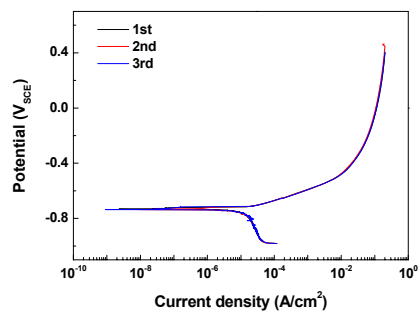


Fig. 3. Electrochemical potentiodynamic tests

Table3에 동전위분극법에서 추출한 전기화학적 파라미터 및 부식속도를 정리하였다.

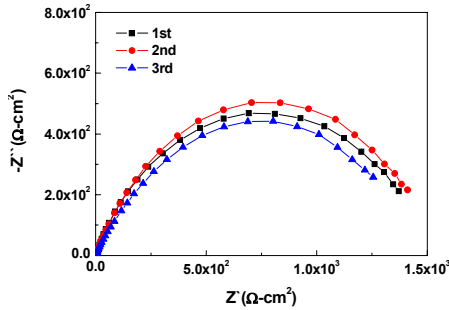
**Table 3.** Electrochemical parameters from the potentiodynamic graph are given.  $\beta_a$  and  $\beta_c$  correspond to Tafel slopes(mV/decade) for the oxidation and reduction curves, respectively.

No.	$\beta_a$ (mV/dec.)	$\beta_c$ (mV/dec.)	$E_{corr}$ (mV <sub>SCE</sub> )	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	C. R. (mm/yr)
1st	92.4	577	-747	17.57	0.203
2nd	94.4	570	-749	17.63	0.204
3rd	93.2	559	-747	17.82	0.206

임피던스 분광법은 동전위분극법에서 얻은 타펠 기울기와 Nyquist plot을 통해 측정된 분극저항값을 바탕으로 아래의 식을 이용하여 부식전류밀도를 산출한다.[9]

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.3 \times R_p \times (\beta_a + \beta_c)} \quad (3)$$

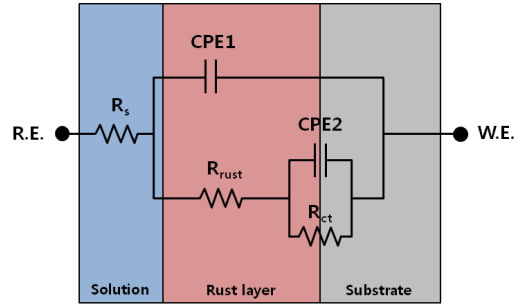
여기서  $R_p$ 는 분극저항이다.



**Fig. 4.** Nyquist plot for 3 repetitive tests. The x-axis and y-axis correspond to real-part impedance and imaginary-part impedance, respectively.

Fig. 4은 임피던스 분광법을 이용한 Nyquist plot이며 반원의 개형이 크게 차이가 나지 않는 것으로 보아 실험의 재현성이 잘 나타난 것으로 판단된다. 이 방법 역시 3회 반복실험에서 우수한 재현성을 보여주고 있다. Fig. 5는 임피던스 분광법으로부터 전기화학적 파라미터를 추출하기 위해 구성한 등가회로이며, 중요한 전기화학적 파라미터들을 Table 4에 정리하였다. 이러한 과정을 통해 구한 분극저항 값 ( $R_p$ )을 Equation (3)에 대입하여 부식전류밀도를 산출하였고 이 값을 다시 Equation (2)에

대입하여 부식속도를 산출하였다.



**Fig. 5.** Equivalent circuit for the analysis of the impedance spectroscopy method. R.E. and W.E. stand for reference electrode and working electrode, respectively.  $R_s$ ,  $R_{rust}$ ,  $R_{ct}$ , CPE represent solution resistance, rust resistance, charge-transfer resistance and constant phase element, respectively.

**Table 4.** Electrochemical parameters from the impedance Spectroscopy method.

No.	$R_s$ ( $\Omega cm^2$ )	$R_{rust}$ ( $\Omega cm^2$ )	$R_{ct}$ ( $\Omega cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega cm^2$ )	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	C.R. (mm/yr)
1st	2.9	3.3	1523	1526	19.9	0.231
2nd	2.6	1.6	1565	1566	19.0	0.220
3rd	2.8	5.5	1522	1527	20.5	0.237

결론적으로, 동전위분극법 및 임피던스분광법 실험 결과에 따르면, RSA1 차축소재의 해수환경 내 평균 부식전류밀도와 부식속도는 각각  $18.27 \pm 1.25 \mu A/cm^2$ 와  $0.217 \pm 0.014 mm/yr$ 으로 산출되었다.

### 2.1.4 정전류 부식 가속화 시험

부식 가속화 시험은 부식전류와 시간의 곱은 총 전하량이라는 패러데이 법칙에 기반을 두고 있다. [10]

$$Q = I_{corr} \cdot t \quad (4)$$

여기서 Q는 전하량 (C),  $I_{corr}$ 는 부식전류(A), t는 전류가 흐른 시간(s)을 의미한다.

산출된 부식 전류를 바탕으로 1,3,4년 부식에 필요한 전하량을 계산 후, 부식전류를 인위적으로 증가시켜 부식시간을 줄이는 방법으로 부식가속화 시험을 수행하였다. 결과의 신뢰성을 위해 동일 부식가속시험을 2-3회 진행하였으며, 부식형성물을 제거한 후 인장시험의 gauge section의 4 point에 대해 부식으로 감소된 평균직

경 및 연간부식층의 두께를 Table 5에 대해 정리하였다.

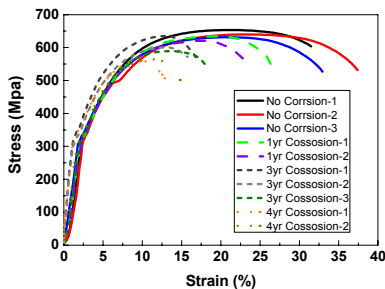
**Table 5.** Diameter measurement after accelerated corrosion tests.

Corrosion Period (yr)	Reduction in Diameter (mm)	Diameter Reduced per Year (mm)
1	0.48	0.48
3	1.29	0.43
4	1.91	0.47

동전위분극법 및 임피던스분광법에 의해 산출된 부식 속도는 0.217 mm/yr이며 시편은 전면이 노출이 되기 때문에 양쪽면에서의 부식을 고려할 때 1년 가속화 후에는 0.434 mm의 직경이 감소가 예상된다. 이는 Table 5에 정리된 실제 측정된 부식량과 유사하므로 선정된 부식 기간 동안 부식은 균일한 속도로 진행이 되는 것으로 결론 내릴 수 있다.

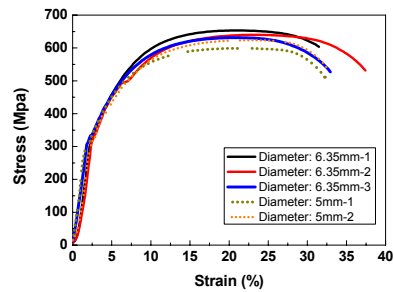
### 2.2 기계적 특성 평가

Fig. 6은 차축 시편의 부식 전 그리고 1, 3, 4년 부식 가속화된 시편에 대해 직경감소율을 반영한 응력-변형률 곡선을 보여준다. 인장시험은 1.524 mm/min의 속도로 파단시까지 진행하였으며, 재현성을 위해 각 조건당 2~3회의 반복실험을 실시하였다. 인장시험 후 버니어캘리퍼스(Vernier Calipers)를 이용하여 연신율 및 단면적 감소율을 측정하였다. Table 6에 모든 부식조건별 인장 시편에 대한 항복강도, 인장강도, 연신율, 단면적 감소율에 대해 정리하였다. Table 6에 따르면 탄성구간 내에서는 부식기간에 따른 기계적 물성 변화가 크지 않으나 연신율은 부식기간에 비례하여 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 부식이 진행될수록 재료의 연성(ductility)이 감소하는 것을 의미한다.



**Fig. 6.** Stress-strain curves for railway axle specimens. The area of the gauge section was re-measured after removing the corroded layers.

연성의 감소가 부식에 의한 화학적 영향인지 또는 부식에 의한 두께 감소 효과인지를 설명하기 위하여 인장 시편의 지름을 3년 부식된 시편과 유사한 5mm로 제작하고 부식을 시키지 않은 상태에서 인장시험 시험을 실시하였다. Fig. 7에는 이 인장 시편에 대한 시험 결과를 Fig. 6의 부식 전 시편 (지름: 6.35mm) 결과와 함께 나타내었다. 지름이 다른 두 종류의 시편의 인장시험 결과 유사한 응력-변형률 거동을 보이고 연신율값의 차이가 유사하므로 부식시편의 연성감소는 단면적 감소에 의한 효과가 아닌 부식에 의한 효과라고 결론 내릴 수 있다.



**Fig. 7.** Stress-strain curves for uncorroded specimens having different diameters of gauge section.

**Table 6.** Summary of yield strength (Y.S.), ultimate tensile strength (UTS), elongation (E.L.) and reduction in area (R.A.) as a function of corrosion periods.

Corrosion period (year)	Diameter (mm)	Y.S. (MPa)	U.T.S. (MPa)	E.L.(%)	R.A.(%)
0	6.35	303.9	639.1	31.8	52.9
	5	295.1	612.9	30.7	50.2
1	6.35	309.9	625.6	25.9	41.0
3		303.8	609.5	21.4	36.0
4		299.45	561.0	15.5	31.4

### 3. 결론

본 연구에서는 철도차량의 차축소재로 흔히 사용되는 RSA1 소재에 대해 해수환경에서의 부식특성 평가를 하였으며, 주요한 결론은 다음과 같다.

- (1) 동전위 분극법과 임피던스 분광법을 이용하여 측정된 RSA1의 부식전류밀도는  $18.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이고, 이 값과 패러데이법칙을 이용하여 산출한 부식속도는 0.217 mm/yr이다. 철도차량의 일반적인 내구연한을 25년이라고 가정할 때 한 면에서의 부식량은 5mm로 예측할 수 있다.

- (2) 부식 전 후 시편에 대한 인장시험 결과, 탄성구간에 서의 기계적 특성은 큰 차이가 없으나, 재료의 연성은 부식기간이 길어질수록 감소되는 경향을 보였다.
- (3) 부식량이 증가할수록 연성이 감소하는 현상이 부식에 의한 화학적인 효과인지 또는 부식에 의해 인장시편의 단면적이 줄어들어 발생하는 물리적 효과인지를 파악하기 위하여 인장시편의 지름을 6.35mm와 3년 부식된 시편의 지름과 유사한 5mm로 제작하고 두 시편 모두 부식을 시키지 않은 상태에서 인장시험을 실시하였다. 그 결과 두 인장 시편간에 기계적 특성의 변화는 관찰되지 않았으며, 따라서 부식기간의 증가에 따른 연신률의 감소는 부식에 의해 발생하는 현상이라고 결론내릴 수 있다.
- (4) 향후 해수환경에서 사용되는 철도차량 대차 설계시 본 연구결과를 활용하여 진행할 필요가 있다. 실제 철도차량 운행 시 발생하는 반복하중을 모사하여 반복하중인가 실험 및 이로 인해 발생하는 응력부식현상과 피로현상에 관한 연구를 향후 추가로 수행할 계획이다.

## References

- [1] S. Seo, M. Sagong, J. Kim, Future Railway System Technologies, Korea Society of Civil Engineers, Vol. 61, No. 9, pp. 14-19, 2013
- [2] S.H. Drissi, Ph. Refait, M. Abdelmoula, J.-M.R. Gënin, The preparation and thermodynamic properties of Fe (II)-Fe(III) hydroxide-carbonate (green rust 2); pourbaix diagram of iron in carbonate-containing aqueous media, Corros. Sci. 37, pp. 2025-4041, 1995
- [3] R.T. Foley, Role of the chloride ion in iron corrosion, Corrosion, Vol. 26, No. 2 pp. 58-70, 1970
- [4] Ph. Refait, M. Abdelmoula, J.-M.R. Gënin, Mechanisms of formation and structure of green rust on in aqueous corrosion of iron in the presence of chloride ions, Corros. Sci. Vol. 40, No. 9, pp. 1547-1560, 1998. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00066-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00066-3)
- [5] Ph. Refait, J.-M.R. Gënin, The oxidation of ferrous hydroxide in chloride-containing aqueous media and Pourbaix diagram of green rust one, Corros. Sci. Vol. 34, No. 5, pp. 797-819, 1993
- [6] J.-M.R. Gënin, A.A. Olowe, Ph. Refait, L. Simon, On the stoichiometry and Pourbaix diagram of Fe(II)-Fe(III)

hydroxy-sulphate or sulphate-containing green rust 2: An electrochemical and mössbauer spectroscopy study, Corros. Sci. Vol. 38, No. 10, pp. 1751-1762, 1996

- [7] S.H. Drissi, Ph. Refait, M. Abdelmoula, J.-M.R. Gënin, The preparation and thermodynamic properties of Fe (II)-Fe(III) hydroxide-carbonate (green rust 2); pourbaix diagram of iron in carbonate-containing aqueous media, Corros. Sci. Vol. 37, No. 12, pp. 2025-2041, 1995
- [8] M.J. Kim, S.I. Jang, S.H. Woo, J.G. Kim, and Y.H. Kim, Corrosion Resistance of Ferritic Stainless Steel in Exhaust Condensed Water Containing Aluminum Cations, Corrosion, Vol. 71, No. 3, pp. 285-291, 2015
- [9] Denny A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, pp.75-77, PrenticeHall, 1996
- [10] Pierre R. Roberge, Corrosion Engineering Principles and Practice, pp. 39-40, 2008

### 최 두 호(Dooho Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 부산대학교 재료공학과 (재료공학학사)
- 2005년 8월 : 광주과학기술원 신소재공학과 (재료공학석사)
- 2011년 12월 : Carnegie Mellon University 재료공학과 (재료공학박사)
- 2012년 11월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

고속열차, 차세대 물류 시스템 연구, 신소재 연구개발, 에너지 저장장치, 재료 분석 연구

### 서 승 일(Sung-il Seo)

[정회원]



- 1984년 2월 : 서울대학교 조선공학과(공학사)
- 1986년 2월 : 서울대학교 조선공학과(공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과(공학박사)
- 1986년 2월 ~ 2002년 3월 : 한진중공업 수석연구원
- 2002년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

신교통시스템 개발, 차세대 물류 시스템 연구, 철도-해양 융합기술 개발