

고온 급수에 의한 파워 플랜트 배관 침식-부식 거동[§]

방성호* · 이진원* · 김태원**†

* 한양대학교 자동차공학과, ** 한양대학교 기계공학부

Erosion-Corrosion Behavior of Power Plant Pipe Caused by Hot Feed Water

Sung-Ho Bang*, Jin-Won Lee* and Tae-Won Kim**†

* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,

** School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received June 22, 2012 ; Revised February 16, 2013 ; Accepted February 23, 2013)

Key Words: Erosion-Corrosion(침식-부식), Mass Diffusion(질량 확산), Finite Element Analysis(유한요소해석), Pipe(파이프)

초록: 본 연구에서는 급수 순환 시스템 중 동작 유체의 이송을 위해 사용하는 배관을 대상으로 관로 크기 및 고온 급수 환경에 따른 침식-부식 거동과 그 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위해 일반적인 관로 소재인 철과 핵심 부식 인자인 산소의 화학반응식을 기반으로 Hayduk 과 Minhas 가 제안한 모델을 이용하여 침식-부식 해석을 실시하였다. 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 사용하여 해석을 수행하였으며 배관의 직경 및 급수 온도를 변화시킴에 따른 침식-부식률을 평가할 수 있었다. 결과를 통해 급수 온도가 침식-부식률에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 됨을 알 수 있었으며, 특히 290℃ 급수에 노출된 스테인리스 316 강은 연간 2.59 μm의 두께 손실이 발생할 것으로 예상되었다.

Abstract: In this study, we tried to define the erosion-corrosion behavior together with the resulting effects on a pipe that is a part of a feed water circulation system according to the pipe size and hot feed water environment. An erosion-corrosion analysis was performed through the Hayduk and Minhas model based on the chemical reaction between iron and oxygen, an essential corrosive factor. The erosion-corrosion rate against the pipe diameter and feed water temperature was then evaluated by means of finite element analysis using ABAQUS. As shown in the results, the feed water temperature was the main factor influencing the erosion-corrosion rate; in particular, it was expected that the thickness of 316 stainless steel would decrease by 2.59 μm every year in a hot water environment at 290℃.

- 기호설명 -

b	: 배관 벽을 제외한 배관 내부 영역(bulk)	k_i	: i 의 질량 전달 계수 (m/s)
$C_{i,j}$: i 에서의 j 의 농도 (mol/m ³)	L	: 배관의 특성 길이 (m)
CR	: 침식-부식률 (μm/year)	M_i	: i 의 단위 부피당 몰 수 (kg/mol)
D_i	: 배관의 내부 직경 (mm)	P	: 표면장력 계수 (kg ^{0.25} ·m ³ /mol·s ^{0.5})
$D_{i,j}$: i 의 j 로의 확산 계수 (m ² /s)	Sh	: 셔우드(Sherwood) 수
J_i	: i 의 단위 면적/시간 당 흐름 (mol/m ² ·s)	T	: 작동 급수 온도 (K)
		V	: 단위 몰 당 산소 분자의 부피 (cm ³ /mol)
		w	: 배관 벽 영역(wall)
		η	: 분자 부피 보정계수
		μ	: 작동 급수의 점성 (cP)
		ρ_i	: i 의 밀도 (kg/m ³)

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문
 춘계학술대회(2012. 6. 26-27, 대전컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, twkim@hanyang.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

과워 플랜트가 설계된 바에 따라 그 기능을 유지, 동작하기 위해서는 특히, 시스템에 사용되는 제반 유체가 특정 유니트에 정확히 이송되어야 한다. 사용 유체는 유니트의 종류에 따라 일반 급수로부터 암모니아, 수소 등 특정 화학물에 이르기까지 다양하다. 일반적으로 발전용 설비에서는 일반 급수가 소요열량을 전달하기 위해 유니트 내부의 배관을 통해 이송하게 되며 이때 상온이 아닌 고온의 상태로 유지된다. 이에 고온 상태의 급수가 배관 내부를 유동함에 의해 급수에 용해된 산소와 배관의 주 성분인 철(iron)과의 화학 반응이 촉진되며 따라서 상온일 경우 보다 침식-부식이 더욱 가속화된다.⁽¹⁾ 결과적으로 배관 내부의 침식-부식으로 인해 외부로 질량 손실이 유발되며 이와 같은 현상이 지속될 경우 배관 파손(failure)이 발생하게 된다. 상술한 바와 같은 파손과정으로 인해 과워 플랜트 전체 효율 저하는 물론 작동 급수의 조건에 따라 배관이 이탈하여 근접한 유니트에 충격을 주는 2 차 파손이 발생될 수 있고 따라서 과워 플랜트 분야에서 급수 온도의 영향에 따른 침식-부식 특성은 중요하게 고려해야 할 설계 대상이다.

배관에서 발생하는 침식-부식 거동에 대한 연구와 관련하여 국내에서 수행된 연구는 실험적 방법이 일반적이며 특히, 특정 화학 물질이 용해된 급수에 의한 침식-부식 특성 평가가 주요 사례를 이루고 있다. 중소기업체를 중심으로 제반 인프라 및 여건의 부족으로 인해 과워 플랜트 관련 유니트 설계 시 침식-부식 거동에 대한 연구가 심도 있게 수행되지 않고 있으며, 일반적으로 HEI(Heat Exchange Institute) 등의 기관에서 발행한 설계 권고안에 따라 과워 플랜트 유니트를 제작하고 있다. 하지만, 최근 설계 대상 시스템의 신뢰성이 강조되고 발전용 플랜트 수요가 급증하면서 침식-부식에 대한 실험적 접근법만 아니라 이론적 해석을 통한 연구가 개시되고 있다. 이와 반면에 국외에서는 실험적 방법은 물론 해석적 연구가 병행되고 있다.⁽²⁾ 한편 국내에서 채택되고 있는 실험방법은 Fig. 1 과 같이 KS 규격 D0292(배관용 파이프의 부식-침식 시험방법)⁽³⁾를 바탕으로 실험장치 및 배관의 형상(Fig. 1 상의 A 및 B)에 따른 시편 장착법이 제안되어 있지만, 1 회 50 일 이상 시험 실시와 3 회 반복 시험을 권장함에 따라 많은 시간과

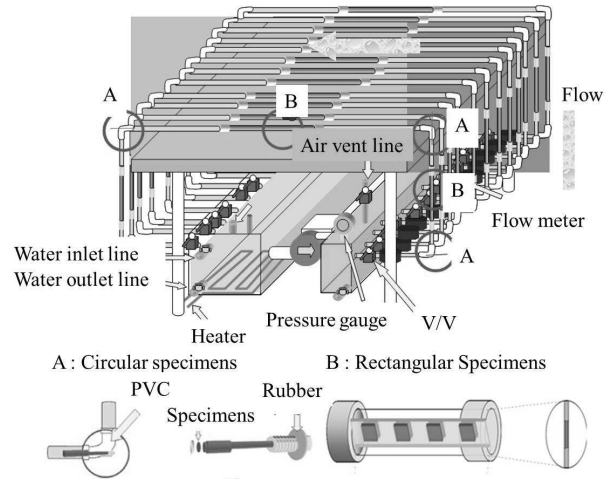


Fig. 1 Erosion-Corrosion test equipment recommended by Korean Industrial Standard (KS) [3]

비용이 소요되는 한계를 지니고 있다.

이상과 같은 문제를 해결하고자, 본 연구에서는 해석적 방법에 기반하여 관로 직경과 작동 급수 온도에 따라 배관 내부에 발생하는 침식-부식 거동을 고찰하였다. 해석에 적용된 관로 소재는 스테인리스 316 강으로써 고강도 및 내부식성이 요구되는 과워 플랜트 배관에 주로 사용되는 재료이다.⁽⁴⁾ 따라서 실제 과워 플랜트 운용에 사용되는 온도에 근거하여 스테인리스 316 강의 침식-부식률을 ABAQUS 를 사용하여 해석하였다. 해석은 Hayduk 과 Minhas 가 제안한 분자 질량 확산 모델⁽⁵⁾을 기반으로 수행되었으며, 이는 급수 온도에 따라 침식-부식 요인인 산소 분자의 확산 거동을 모사한 것으로서 실배관의 침식-부식률을 계산할 수 있게 된다. 뿐만 아니라 본 해석 모델을 통한 결과의 정확성을 검증하기 위해 참고자료를 바탕으로 동일한 환경에서 실시된 침식-부식 실험 결과와 비교하였다. 이상과 같은 결과와 침식-부식 평가를 통해 배관 형상 및 급수 온도의 영향을 고찰할 수 있었다.

2. 침식-부식 모델

2.1 침식-부식

배관 내부의 존재하는 유체의 유동은 부식 반응물의 질량 전달을 가속화시키며,⁽⁶⁾ 유체의 전달력을 야기시키고⁽⁷⁾ 따라서 부식 보호 피막을 제거하는데 영향을 미치게 된다.⁽⁸⁾ 이와 같이 작동

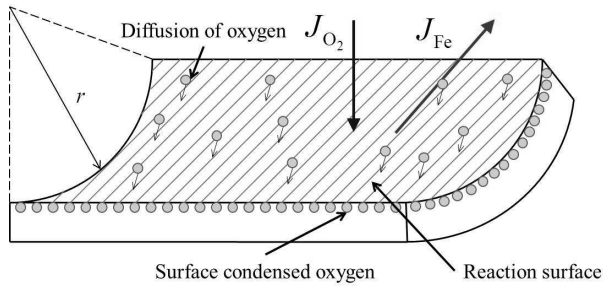
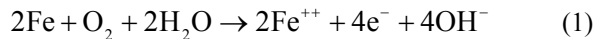


Fig. 2 Diffusion process of oxygen and Fe in pipe

급수의 유동이 발생함에 따라 배관 표면에서 산소 분자의 화학 반응에 의해 부식되는 현상이 침식-부식이다. 실제 침식-부식은 배관의 표면 상태와 산소의 질량 전달 비에 의해 좌우된다. 금속 배관에서 발생하는 침식-부식은 Postlethwaite⁽⁸⁾가 제안한 방법에 따라 산소의 질량 전달을 통해 이론적으로 계산할 수 있으며, 따라서 스테인리스 316 강 배관의 고온 급수에 의한 침식-부식률을 이와 같은 이론을 통해 해석적 방법으로 계산하였다.

2.2 침식-부식 이론 모델

배관 내부에 발생하는 침식-부식 현상을 규명하기 위해서는 일반적으로 화학 반응식을 기반으로 한다. Fig. 2 와 같이 급수에 용해되어 있는 산소가 배관 표면으로 확산되고 배관 표면에 존재하는 철과 반응하여 부식이 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 산소와 철의 화학 반응은 다음과 같은 화학식 (1)로 표현할 수 있다. 이를 통해 철과 산소는 2:1 의 몰 비로 반응을 하게 되며, 그에 따른 산소와 철의 단위면적/시간 당 흐름은 식 (2) 및 식 (3)과 같이 배관 내부의 산소의 농도 차이로 표현할 수 있다.⁽⁹⁾



$$J_{\text{O}_2} = k_{\text{O}_2} (C_{b,\text{O}_2} - C_{w,\text{O}_2}) \quad (2)$$

$$J_{\text{Fe}} = 2k_{\text{O}_2} C_{b,\text{O}_2} \quad (3)$$

여기서 C_{w,O_2} 는 배관 벽 영역에서의 산소의 농도, C_{b,O_2} 는 배관 벽을 제외한 배관 내부 영역에서의 산소의 농도이며, k_{O_2} 는 산소의 질량 전달 계수, J_{O_2} 는 산소의 단위 면적/시간 당 흐름, J_{Fe} 는 철의 단위 면적/시간 당 흐름을 의미한다. 식 (1)로부터 철이 산소와의 화학 반응을 통해

Table 1 Accuracy analysis among various models for molecular diffusivities in liquid [5]

Model	Average Error (%)	Major Physical Terms
Hayduk-Laudie	10.3	μ, V
Hayduk-Minhas	9.4	μ, V, T
Wilke-Chang	10.4	
Mixed(Wilke-Chang and Tyn-Calus)	12.8	μ, V, T, P
Tyn-Calus	13.3	

이온화되면서 배관의 질량 감소 즉, 침식-부식이 발생되며 이를 정량적으로 계산하기 위해 단위면적/시간 당 철의 흐름을 파악하여야 한다. 질량 전달 계수는 작동 급수 조건에 결정되는 값이므로 특히 작동 급수 온도에 따른 산소의 확산 계수와 질량 전달 계수를 관련시키기 위해 식 (4)와 같이 셔우드 수(Sh)⁽¹⁰⁾를 도입하였다.

$$Sh = (k_{\text{O}_2} L) / D_{b,\text{O}_2} \quad (4)$$

여기서 D_{b,O_2} 는 배관 중심부에서 배관 내부 표면 방향으로의 산소 분자의 확산 계수이며, L 은 특성 길이를 의미한다. 셔우드 수는 질량 전달 계수와 확산 계수의 비로 정의 되며 여기서 특성 길이는 침식-부식 해석 대상인 배관의 내부 직경(D_i)이다. 산소분자의 확산현상 모델에 관한 선행연구는 Table 1 과 같으며 이때 각 모델에서 채택한 주요 변수로서 μ 는 급수의 점성계수, V 는 단위 몰 당 분자의 부피, T 는 급수의 온도, 그리고 P 는 표면장력 계수를 의미한다. 본 연구에서는 이들 중 실제 분자확산 현상과의 평균 오차가 가장 적은 Hayduk 과 Minhas 가 제안한 분자 질량 확산 현상 모델⁽⁵⁾을 적용하였다. 이 모델을 통해 알 수 있듯이 급수 온도와 점성의 곱은 산소의 확산 계수와 선형적인 관계를 나타내며 수학적으로 모델링 한 결과는 식 (5) 및 식 (6)과 같이 표현된다.

$$D_{b,\text{O}_2} = (1.25V^{-0.19} - 0.365)10^{-12} \times T^{1.52} \mu^\eta \quad (5)$$

$$\eta = \frac{9.58}{V} - 1.12 \quad (6)$$

이상과 같은 확산 모델에 사용된 핵심 변수들을 기반으로 하여 실질적인 배관의 성능 분석에 필요한 침식-부식률(CR)을 제안하였으며 식 (7)과 같이 최종적으로 나타낼 수 있다.

$$CR = J_{Fe} \frac{M_{Fe}}{\rho_{Fe}} = \frac{2ShD_{b,O_2} C_{b,O_2} M_{Fe}}{D_i \rho_{Fe}} \quad (7)$$

여기서 M_{Fe} 는 철의 단위 몰 당 질량이며, ρ_{Fe} 는 철의 단위 부피 당 질량, J_{Fe} 와 M_{Fe} 의 곱은 단위 면적/시간 당 질량 흐름률을 의미한다.

3. 침식-부식 해석

3.1 재료 물성

스테인리스 316 강의 기계-재료적 물성값은 Matweb⁽¹¹⁾의 데이터베이스를 참고하였으며 Table 2 와 같다. 작동 급수 온도에 따라 해당 급수의 점성 값은 기존 실험 결과⁽¹²⁾를 보간법을 통해 얻은 식 (8)을 적용하여 구할 수 있다. 작동 급수 조건에 따른 급수의 물성치는 Table 3 과 같다.

$$\mu = 2.4 \times 10^{-5} \left[10^{\frac{247.8}{(T-140)}} \right] \quad (8)$$

3.2 모델링 및 해석 조건

상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS v. 6.10-ef⁽¹³⁾를 사용하여 침식-부식 해석을 수행하였으며 해석에 사용된 배관의 형상은 Fig. 3 과 같다. 본 연구에서 사용한 재료는 스테인리스 316 강 배관으로 그 두께는 KS 배관 규격에 따라 고압 환경에서 사용되는 SCH80 호칭두께를 사용하였다. 이에 의해 배관의 내부 직경은 호칭경 B2, B3 및 B4 에 각각 해당되는 49.5 mm, 73.9 mm 및 97.1 mm 을 사용하였다. 작동 급수 온도는 대기압 및 일반적인 고압 파워 플랜트 유닛 운영 환경인 15 atm⁽¹⁴⁾을 사용함에 따라 각각 100℃와 200℃로 설정하였다. 아울러 침식-부식 해석 검증을 위해 이용한 참고자료의 조건, 즉 가속실험 환경인 70 atm 에서의 물의 끓는점인 290℃도 함께 채택하였다. 이와 같은 배관의 내부 직경과 급수 온도조건에 따라 총 9 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 해석을 위한 경계 조건으로는 배관의 외부 면에서는 질량 확산이 발생하지 않고 배관

Table 2 Mechanical properties of stainless steel 316 [11]

Yield Strength, σ_Y (MPa)	Elastic Modulus, E (GPa)	Density, ρ (kg/m ³)
290	193	8000

Table 3 Material properties of feed water

T_{FW} (°C)	Viscosity (cP)	Diffusivity Factor (mm ² /hr)
100	2.778×10^{-6}	3.501×10^{-5}
200	1.332×10^{-6}	8.693×10^{-5}
290	9.248×10^{-7}	1.487×10^{-4}

Temperature of pipe is equal to that of feed water

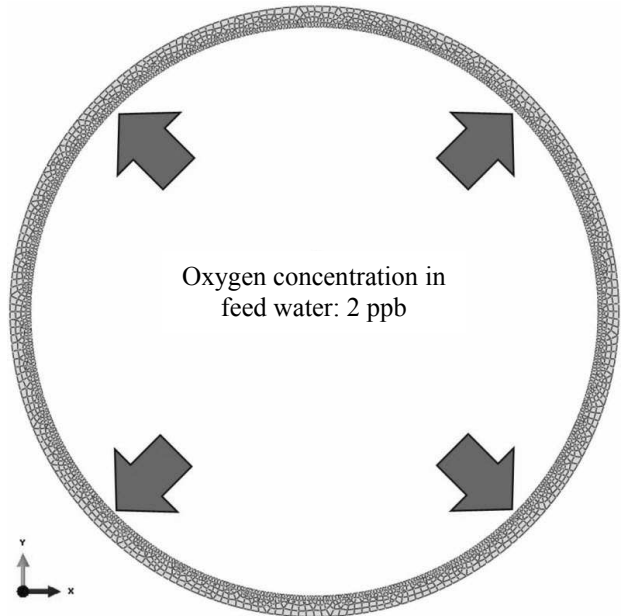


Fig. 3 Finite element model used in analysis

내부 면에서만 급수 온도에 따른 일정한 질량 확산 속도를 갖는다고 가정하였다. 또한, 침식-부식이 작동 급수의 유동 방향으로는 일정하게 발생한다는 가정 하에 2차원 요소를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

질량 전달 이론을 바탕으로 도출한 침식-부식

모델과 배관 형상 모델링을 기반으로 총 9 가지의 경우에 대해 각각 주어진 환경에서의 침식-부식률을 계산하였다.

4.1 해석 결과

주어진 고온 급수 환경에서 스테인리스 316 강 배관의 해석적 방법을 통해 구한 질량 흐름율을 식 (7)에 적용하여 침식-부식률을 구하였다. 그 결과 배관의 내부 직경과 작동 급수 온도에 따라 발생하는 침식-부식으로 인한 질량 손실은 Table 4 와 같이 계산되었다. Fig. 4 는 확산에 따른 배관 표면에서의 산소 농도로서 침식-부식이 배관의 내부 표면으로부터 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 5 는 급수 온도의 상승에 따른 침식-부식률 관계를 나타낸다. 같은 배관 직경 하에서 급수 온도가 상승함에 따라 침식-부식률이 증가하는 경향을 보였으며, 특히 온도가 상승함에 따라 산소의 확산이 더욱 가속화되어⁽⁶⁾ 100℃에서 200℃로 증가하였을 때 침식-부식률의 상승률보다 200℃에서 290℃로 증가하였을 때 침식-부식률의 상승률이 더 커짐을 알 수 있다. Fig. 6 은 배관의 직경에 따른 침식-부식률의 관계를 나타낸다. 급수 온도가 상승할수록 침식-부식률의 분산이 증가하였으며, 같은 급수 온도 조건하에 직경의 조건에 따라 침식-부식률 값이 증가하다 감소하는 경향을 보인다. 이는 질량 전달 계수와 산소 확산 계수 값의 차로 인해 발생됨을 식 (7)을 통해 확인할 수 있다. 식 (7)에서 정의된 침식-부식률을 배관의 내부 직경에 대해 미분하면 다음과 같다.

Table 4 Analytically determined erosion-corrosion rate by using the numerical data (ABAQUS)

Analysis Case	D_i (mm)	T_{FW} (°C)	Erosion-Corrosion Rate ($\mu\text{m}/\text{year}$)
1	49.5	100	0.329
2		200	0.989
3		290	1.776
4	73.9	100	0.618
5		200	1.521
6	290	2.595	
7	97.1	100	0.337
8		200	1.122
9		290	2.030

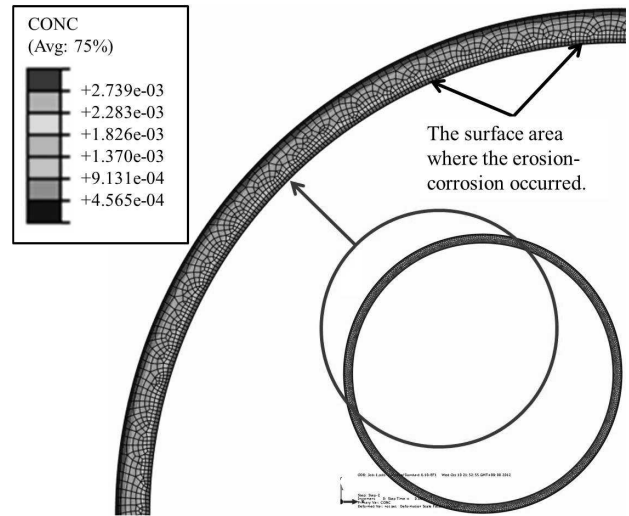


Fig. 4 Erosion-Corrosion analysis results obtained from ABAQUS(a quarter of pipe)

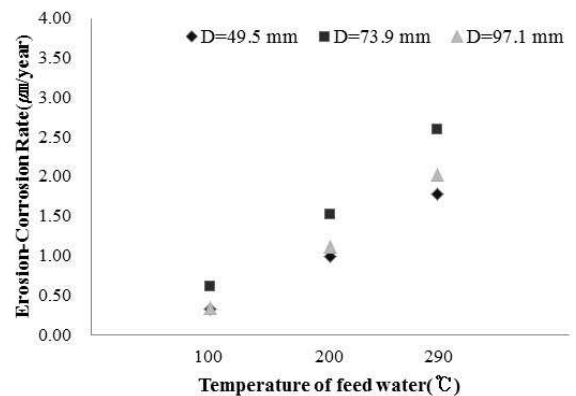


Fig. 5 The relationship between erosion-corrosion rate and temperature of feed water

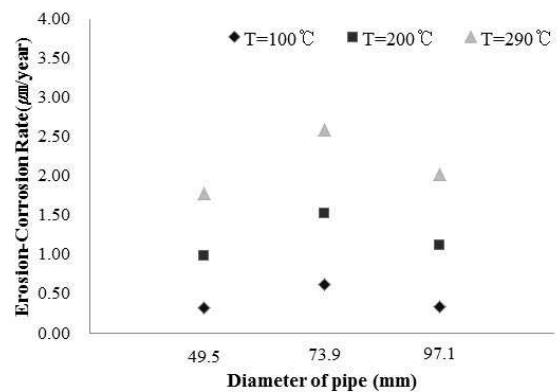


Fig. 6 The relationship between erosion-corrosion rate and diameter of pipe

Table 5 Analysis of variance for erosion-corrosion rate

Design Parameter	Degree of Freedom	F _{CR}	F(0.9)	F(0.95)	F(0.99)
D_i	2.00	13.811	9.00	27.44	99.00
T_{FW}	2.00	123.738	9.00	27.44	99.00

$$\begin{aligned} \frac{\partial CR}{\partial D_i} &= \frac{1}{D_i} \left\{ \frac{\partial Sh}{\partial D_i} D_{b,O_2} C_{b,O_2} \right\} - \frac{1}{D_i^2} \left\{ Sh D_{b,O_2} C_{b,O_2} \right\} \\ &= \frac{1}{D_i^2} \left\{ \frac{D_i k_{O_2}}{D_{b,O_2}} D_{b,O_2} C_{b,O_2} - Sh D_{b,O_2} C_{b,O_2} \right\} \\ &= \frac{C_{b,O_2}}{D_i^2} (D_i k_{O_2} - Sh \cdot D_{b,O_2}) \end{aligned}$$

여기서 $D_i k_{O_2}$ 는 두 절점 간의 질량 전달 계수이고 $Sh \cdot D_{b,O_2}$ 는 평면상에서 산소의 확산 계수이며 편미분 값이 0 이 되는 배관의 내부 직경 값은 $D_i' = (Sh \cdot D_{b,O_2}) / k_{O_2}$ 이다. 따라서 배관의 내부 직경이 D_i' 보다 큰 경우, 내부 표면적 증가에 따라 배관 표면으로의 산소 확산이 용이해져 침식-부식률이 감소하는 경향을 보였다. 반면, 배관의 내부 직경이 D_i' 보다 작은 경우 산소 확산보다 상대적으로 질량 전달이 용이해져 침식-부식률이 상승하는 경향을 보였다. 이를 통해 배관의 직경이 침식-부식률에 적지 않은 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

침식-부식률 해석 결과를 토대로 이원 분산분석법⁽¹⁵⁾을 사용하여 요소의 주효과를 분석하였다. Table 5 는 이를 바탕으로 계산된 침식-부식률에 대한 평가 결과(F_{CR}) 를 나타낸다. 여기서 자유도는 상대인자의 수준의 수를 의미하며, 또한 F(0.9), F(0.95) 및 F(0.99)는 각각 90%, 95%, 99%의 주효과를 평가하기 위한 기준으로 사용된다. 결과를 통해 배관의 직경은 $F(0.9) < F_{CR} < F(0.95)$ 이며, 급수 온도는 $F(0.99) < F_{CR}$ 의 값을 획득하였다. 즉 배관의 직경보다는 급수 온도가 침식-부식률에 더욱 지대한 영향을 미치는 인자로 확인되었다.

4.2 모델 검증

침식-부식률 계산결과를 검증하기 위해 Mitsutaka 가 수행한 가속수명시험⁽¹⁶⁾ 결과값과 비교하였다. 이 실험은 일정 응력 가속시험으로서 스테인리스 316 강과 동일한 내부식성과 경도 값⁽¹⁷⁾을 갖는 스테인리스 316L 강 배관에 대해 실제 파워 플랜트의

운용 환경을 조성한 후 고온 작동 급수에 의한 침식-부식 효과를 연구한 것이다. 스테인리스 316 강과 스테인리스 316L 강은 내마모·부식성에 영향을 미치는 망간(Mn), 크롬(Cr) 및 몰리브덴(Mo)의 함량이 모두 동일하며 스테인리스 316 강이 스테인리스 316L 강보다 0.05wt%의 탄소 함량이 많음에도 불구하고 로크웰 B 및 브리넬 경도 값이 모두 동일하다. 따라서 두 재료는 유사한 기계적 물성치 및 내마모·부식성을 갖는다고 볼 수 있다.

해당 배관의 내부 직경은 73.7 mm 이고 작동 급수 온도는 290℃이며 이는 Table 4 에 보는 바와 같이 6 번의 경우와 동일한 온도 및 내부 직경 조건이다. 해석을 통해 계산된 침식-부식률은 2.595 $\mu\text{m}/\text{year}$ 으로서 실험 결과 2.7 $\mu\text{m}/\text{year}$ 값과 거의 유사함을 알 수 있었다. Mitsutaka 가 채택한 가속모형은 고온에서의 특성값을 잘 표현할 수 있는 아레니우스 모형으로서, 채택된 가속계수는 온도 역수 값의 차이로 정의된다. 따라서 참고자료의 온도 조건과 본 연구에서 사용한 해석 온도 조건 (사례 6 번)을 동일하게 설정하여 가속계수를 0 으로 두었으며 이를 바탕으로 침식-부식 해석 모델을 검증할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 고온급수에 따른 관로 내부의 침식-부식 현상을 정량적으로 규명하기 위해 질량전달 모델에 기반한 철과 산소의 화학반응식 및 Hayduk 과 Minhas 의 확산계수를 바탕으로 침식-부식률 모델을 제안하였다. 이를 바탕으로 파워플랜트에서 일반적으로 사용중인 스테인리스 316 강에 대하여 침식-부식 거동을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 작동 급수 온도와 배관 직경에 따른 침식-부식 경향을 파악할 수 있었으며 해석 결과를 바탕으로 선형보간법을 통해 급수 온도가 100℃ 상승함에 따라 산소의 확산이 가속화되어 $0.904 \pm 0.172 \mu\text{m}/\text{year}$ 만큼 침식-부식률이 증가하였다. 따라서 파워 플랜트의 침식-부식 거동은 급수 온도에 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

(2) 급수 온도가 상승함에 따라 배관의 호칭경이 B2→B3→B4 로 증가할수록 침식-부식률의 분산이 $0.006 \pm 0.29 \mu\text{m}/\text{year}$ 정도 증가하다 감소하였다. 따라서 동일한 급수 온도 조건이더라도 직경 크기에 따라 침식-부식률에 다소간의 영향을 미침을 알 수 있다.

(3) 침식-부식률 대한 결과를 바탕으로 영향 인

자를 평가하였으며, 특히 두 요인 중 급수 온도가 침식-부식률에 더욱 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.

(4) 침식-부식 해석을 통해 얻은 결과를 바탕으로 실제 배관 설계 시 작동 급수 온도에 따라 침식-부식률 관계를 정량적으로 평가할 수 있었다. 이와 같이 계산된 침식-부식률을 바탕으로 배관 설계의 신뢰성을 확보할 수 있는 기본적인 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 지식경제 기술혁신사업(과제명 : 고효율 스프레이-스크러버 일체형 탈기 개발)으로 지원받아 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chawla, V., 2011, *High Temperature Corrosion and Erosion-Nanostructured and Conventional Coatings*, LAP Lambert Academic Publishing, Herstellung, pp. 32~38.
- (2) Stack, M.M., Song-Roehrl, Q., Stokk, F.H. and Wood, G.C., 1995, "Computer Simulation of Erosion-Corrosion Interactions at Elevated Temperatures," *Wear*, Vol. 181, No. 2, pp. 516~523.
- (3) Korean Industrial Standard, 2009, *KS D 0292-Test Method of Erosion-Corrosion on Pipe*, Korean Agency for Technology and Standards, Seoul, pp. 1~8.
- (4) Takahashi, Y., Shibamoto, H. and Inoue, K., 2008, "Study on Creep-Fatigue Life Prediction Methods for Low-Carbon Nitrogen-Controlled 316 Stainless Steel (316FR)," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, No. 2, pp. 322~335.
- (5) Hayduk, W. and Minhas, B.S., 1982, "Correlations for Prediction of Molecular Diffusivities in Liquids," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 60, No. 2, pp. 295~299.
- (6) Silverman, D.C., 1988, "Rotating Cylinder Electrode - Geometry Relationships for Prediction of Velocity-Sensitive Corrosion," *Corrosion Science*, Vol. 44, No. 1, pp. 42~49.
- (7) Silverman, D.C., 1984, "Rotating Cylinder Electrode for Velocity Sensitivity Training," *Corrosion Science*, Vol. 40, No. 5, pp. 220~226.
- (8) Nestic, S. and Postlethwaite, J., 1991, "Hydrodynamics of Disturbed Flow and Erosion-Corrosion. Part i - Single-Phase Flow Study," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 69, No. 3, pp. 704~710.
- (9) Davis, C. and Frawley, P., 2009, "Modelling of Erosion-Corrosion in Practical Geometries," *Corrosion Science*, Vol. 61, No. 4, pp. 769~775.
- (10) Cengel, Y.A., 2006, *Heat and Mass Transfer : A Practical Approach Third Edition*, McGraw-Hill, New York, pp. 773~827.
- (11) Online Material Information Resource (<http://www.matweb.com>)
- (12) Stack, M.M., Abdelrahman, S.M. and Jana, B.D., 2010, "Some Perspectives on Modeling the Effect of Temperature on the Erosion-Corrosion of Fe in Aqueous Condition," *Tribology International*, Vol. 43, No. 12, pp. 2279~2297.
- (13) Commercial Finite Element Analysis Program, ABAQUS Manual (version: 6.10-EF).
- (14) Spirax Sarco(on deaerator air venting capacity-pressurised deaerators) (<http://www.spiraxsarco.com/>)
- (15) Jang, K., 2006, *Theory of Optimization Design of Experiments*, Jayu-academy, Paju, pp. 7~127.
- (16) Mitsutaka, H.K., 2006, "Erosion Corrosion in Stainless Steel Pipe under Water Vapour Two-Phase Flow Conditions," *Corrosion Science*, Vol. 48, No. 3, pp. 617~624.
- (17) Davis, J.R., 2007, *ASM Specialty Handbook - Stainless Steels*, ASM International, Materials Park, OH, pp. 32~38.