

원전 2차계통 배관재의 수용액 pH에 따른 130℃ 단상 침식-부식 특성 (I)

A Study on Single Phase Erosion-Corrosion Characteristics of NPP Secondary System Piping Materials depending on Aqueous pH at 130℃ (I)

성기웅, 김광락, 김우철

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

문정호, 정홍호

충남대학교
대전광역시 유성구 공동 220

요 약

원전 2차계통 배관재로 사용중인 탄소강(A106 Grade B) 및 대체후보 재질인 저-합금강(1Cr-½ Mo 및 2¼Cr-1Mo)의 침식-부식 특성을 고찰하기 위하여, 제작한 침식-부식 시험루프 내에서 유속을 4 m/sec(또는 9 m/sec)로 고정하고 130℃ 탈-산소 수용액 pH_{25℃}를 8.0~9.5 이내로 조절하면서 500 시간 후 시편들의 무게손실을 측정하였다. Cr과 Mo 합금원소를 함유한 저-합금강 시편들의 무게손실은 탄소강 시편 무게손실의 절반에 불과하였으며, 각 시편은 유속 9 m/sec에서 4 m/sec에서보다 25% 정도 증가하였다. 각 시편의 무게손실은 수용액 pH_{25℃}가 8.0에서 9.5로 증가될수록 감소하였다. 이는 130℃ 수용액의 동일 pH 범위 내에서 열역학적으로 계산한 pH에 따른 magnetite 용해도 특성과 거의 유사하였다.

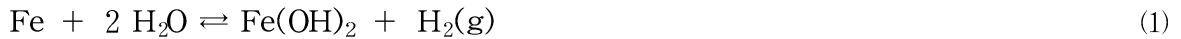
Abstract

In order to investigate the erosion-corrosion characteristics of carbon steel(A106 Grade B) used at present as, and low-alloy steels(1Cr-½Mo and 2¼Cr-1Mo) of its alternatives for the secondary system piping material at nuclear power plants, the weight losses of the specimens were measured after 500 hours in an oxygen-free aqueous solution at 130℃ under the flow velocity of 4 m/sec, or partly under 9 m/sec, within the solution pH_{25℃} range from 8.0 to 9.5, in an erosion-corrosion test loop. The weight losses of the low alloy steels containing Cr and Mo were shown less than half of those of carbon steel, of which the weight loss under the flow velocity of 9 m/sec appeared about 25% higher than that under 4 m/sec. According to the solution pH_{25℃} increase from 8.0 to 9.5, each specimen weight loss began to decrease, while it increased at pH_{25℃} 9.5. This tendency was shown nearly compatible with the magnetite solubility behavior with pH thermodynamically calculated.

1. 서 론

1986년 12월 미국 Surry 2호기의 2차계통 배관 파손에 따른 대형사고가 침식-부식에 기인한 것으로 밝혀진 이후, 다른 원전의 2차계통 배관재로 널리 사용되고 있는 탄소강이나 저-합금강 재질에서도 유사한 손상사례가 나타나고 있으며, 1995년까지 PWR에서 약 270종, BWR에서 약 115종에 달하였다 (Fig. 1 참조) [1]. 원전에서의 침식-부식이 대부분 습증기 계통에서 일어나지만, 3분의 1 정도는 2차계통 배관의 단상(single-phase) 영역에서 일어나고 있다 [2].

일반적으로, 철은 탈-산소 수용액 내에서 용해되어 식 (1)과 같이 철(II) 수산화물인 $Fe(OH)_2$ 를 형성한다 :



100°C 이상에서는 철(II) 수산화물은 분해되어 식 (2)와 같이 Fe_3O_4 로 전환된다 :



200°C 이상에서는, H_2O 가 산화물 내의 미세한 기공을 통과하는 내부확산 및 금속이온(Fe^{2+})이 액상으로 향하는 외부확산 등의 물질이동 과정을 통해, Fe_3O_4 가 금속-산화물 경계에서 직접 형성될 수 있어서 이중의 산화물 층이 생성된다. 바로 이 산화물 막의 안정도가 침식-부식 과정을 제어하며, 막 용해속도는 온도, pH 및 수소 분압 등의 함수로 나타난다. 이와 더불어, 용해성 부식 생성물은 와류의 충돌에 의해 제거될 수 있으며 이에 따라 부식이 가속된다. 즉, magnetite가 용해될수록 철이 용해성 막으로 이동되기 때문에, 금속표면의 손실은 가속된다. 유체 기하학은 배관의 기하학적 구조에 따라 변형되며, L자-관이나 T자-관과 같은 연결부위에서는 와류가 증가되면서 질량이동계수가 직관보다 1~5 배정도로 크게 증가되고, 대부분의 침식-부식이 이러한 불연속적 유체영역 근처에서 일어난다 [2].

대개의 침식-부식 손상이 일어나는 온도범위는 단상(single phase) 유체 내에서 80~230°C이며 2상(two-phase) 유체 내에서 140~260°C이고, 침식-부식 속도는 대체적으로 이 온도범위의 중간 영역에서 최대로 나타난다 (Fig. 2 참조). 그러나, 최대 침식-부식 속도를 보이는 온도범위의 값들은 큰 차이를 나타낸다. 침식-부식의 온도 의존성에 대한 한 모델에서는, 고온에서 침식-부식이

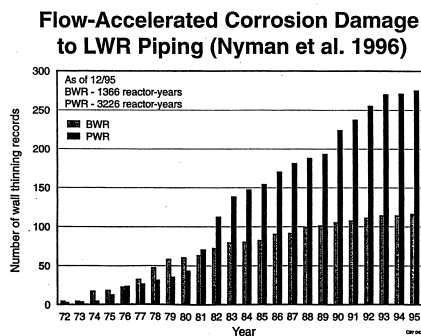


Fig. 1 World-wide experience in flow-accelerated corrosion damage to LWR secondary-side piping [1]

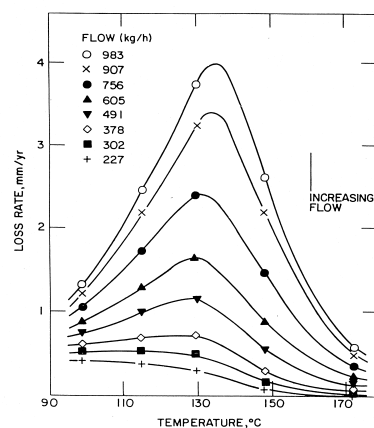


Fig. 2 Temperature dependence of post-orifice erosion-corrosion rates for mild steel in de-oxygenated water (pH = 9.05) (by Bignold et al.) [2]

감소되는 이유가 온도의 증가에 따른 마그네타이트 용해도의 감소에 기인하며, 저온에서는 산화물의 평형용해도가 증가함에도 불구하고 반응속도가 제한되기 때문이라고 제시되고 있다. 다른 모델에서는, 저온에서의 침식-부식 감소가 용해반응 속도의 감소에 기인하지만, 고온에서의 급격한 감소는 산화물의 기공상태가 변화되어 금속표면으로의 접근을 방해하는 데에 기인한다고 제시되었다 [2].

침식-부식 속도는 수화학 계통의 계통수 pH에 따라 크게 변화되며, 2차계통 급수의 pH_{25°C} 8.5~9.5 범위 내에서 크게 감소된다 (Fig. 3 참조). 수용액 pH는 pH 조절제의 종류나 수중 불순물에 의해 영향을 받는다. 특히, 2상(two-phase) 유체 내에서의 결정적인 침식-부식 변수는 액상 상태의 pH이다. 즉, pH 제어를 위한 화학종이 증가와 액상간에 얼마나 분배되는가에 따라 액상의 pH가 크게 영향을 받는다. 대부분의 미국 PWR에서는 ETA를, 프랑스 PWR에서는 morpholine을 사용하고 있으며 이들은 증기상으로 분배되는 경향이 기존의 ammonia보다 작다. 국내 PWR에서는 ETA의 사용을 모든 호기에 확대적용하고 있다. 한편, pH를 권고범위 내의 상한 쪽으로 상승시키는 것은 침식-부식을 단기간 완화시킬 수가 있지만, 반면 2차계통 재질 내 구리합금 성분의 부식속도를 증가시킬 수도 있다. 유기불순물이나 이온교환수지 입자의 열분해 생성물인 유기산은 고온수 내에서 매우 안정하며 특히 산성 불순물들과 함께 수용액 pH를 저하시킬 수 있다 [2].

암모니아가 용해된 물(pH_{25°C} ~9) 속에서는 미량(2~10 ppb)의 산소가 존재하여도 침식-부식 속도가 크게 감소된다 (Fig. 4 참조). 이는, 용존산소 존재 하에서 magnetite(Fe₃O₄)와 hematite(Fe₂O₃)가 산화물 막에 공존하며, 헤마타이트의 용해도가 마그네타이트보다 훨씬 작아서 산화물 막이 침식-부식 저항성을 증가시키기 때문이다. 따라서 중간 농도의 용존산소는 탄소강 급수 배관의 침식-부식을 저감시키는 데에 매우 유리하다고 할 수도 있다. 그러나, 용존산소와 산화물과의 반응생성물이 증기발생기 재질에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 비록 BWR에 대한 EPRI/BWR OG 수화학 지침에서는 급수 내 용존산소 함량을, 수소 수화학(hydrogen water chemistry) 조건 하에서라도, ≥20 ppb로 유지할 것을 권고하고 있지만, 최근 PWR 2차계통에서는 공기유입과 용존산소 함량을 가능한 한 낮게 유지하려고 하고 있다 [2].

일반적으로 합금은 침식-부식에 대해 민감하지 않다. 오스테니틱(austenitic) 스테인리스강은 침

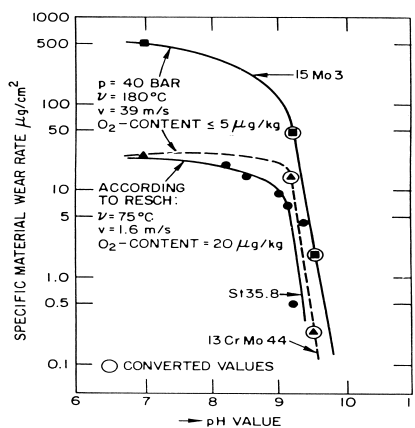


Fig. 3 Effect of pH value on material wear due to erosion-corrosion for various steels in neutral water (by Heitmann and Kastner) [2]

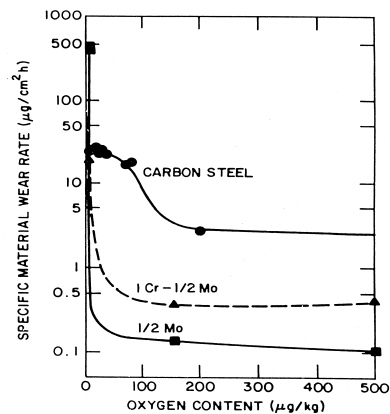


Fig. 4 Effect of oxygen content on material wear rate due to erosion-corrosion for various steels in neutral water for steel denominations (by H. Heitmann and P. Schub) [2]

식-부식 저항성이 크며, 2½Cr-1Mo 강도 좋은 저항성을 보여준다(Fig. 3 및 Fig. 4 참조). Cr은 특히 침식-부식 저항성 증대에 있어 가장 중요한 합금원소인데, 왜냐하면, 크롬 산화물의 열역학적 안정도가 매우 높기 때문이다. Mo이나 Cu와 같은 합금원소들도 이러한 영향을 주지만, 아직 그 근거가 분명하지 않다. 상용 탄소강(예 : A106 Gr B, A234 Gr WPB)의 재질조성 사양에는 Cr이 포함되지 않기 때문에, 각 원전에서 사용된 탄소강에 어느 정도의 크롬이 함유되었는가는 미지수이다. 경험상으로 보면, 상용 탄소강에 0.005~0.07 wt% 범위의 크롬이 불순물로 존재할 수도 있다. 높은 pH와 및 습증기 조건에서 수행된 시험 데이터에 의하면, 이 정도의 함량은 상대적으로 거의 영향을 주지 않지만, 단상 유체에서의 시험 데이터는 낮은 함량의 크롬도 강한 역할을 한다고 제시되고 있다. 그러나, 대부분 시험결과들이 상대적으로 높은 크롬 함량을 지닌 탄소강 재질에 대해 수행되어 왔으며, 그 결과들로부터 외삽한 상용 탄소강 내 미량 크롬의 침식-부식 저항성 데이터는 다소 의심스러운 일면이 있다 [2].

이와 같이, 탄소강의 침식-부식 특성은 다양한 변수들에 의존하기 때문에, 미량 크롬 합금원소나 수증 불순물 또는 소량 용존산소 등의 침식-부식에 미치는 영향이 더 체계적으로 연구되어야 할 것이다.

본 연구에서는, 원전 2차계통 배관재질인 탄소강과 이를 대체할 수 있는 후보재질들의 침식-부식 거동특성을 고찰하기 위해, 침식-부식 시험루프를 설계·제작하고, 예비단계로 침식-부식 가속 조건 하에서 상용 탄소강 및 두 종류의 저-합금강을 대상으로 단상 침식-부식 특성에 대한 실험을 수행하여, 침식-부식 변수들이 미치는 영향을 검토하고, 대체재질들의 침식-부식 저항성을 확인하였다.

2. 실험

가. 침식-부식 시험루프

2차계통 배관재질의 단상(single-phase) 침식-부식 거동을 고찰하기 위한 침식-부식 시험루프

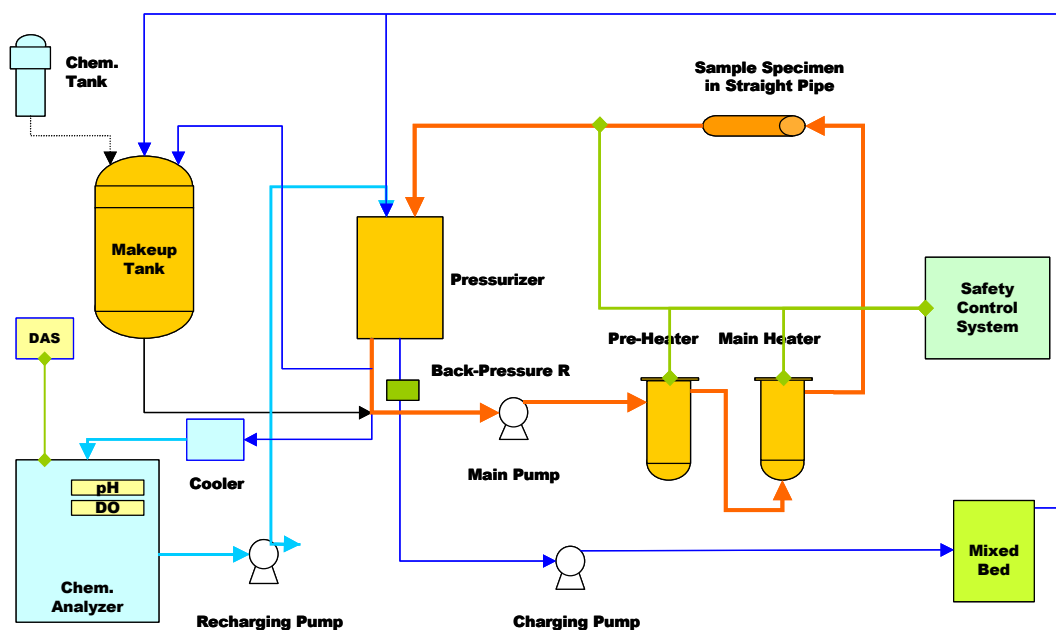


Fig. 5 Schematic diagram of an erosion-corrosion test loop

Table 1 Chemical compositions of the test specimens

Mat.	Specification (ASTM)	Chemical composition (wt%)								
		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Fe
1	A106 Gr. B (Commercial)	0.3 (0.15)	0.29~1.06 (0.64)	0.048 (0.003)	0.058 (0.014)	0.1 (0.19)	(0.06)	(0.03)	(0.01)	balance
	A336 P11 (1Cr-½Mo)	0.15 (0.10)	0.3~0.6 (0.36)	0.03 (0.009)	0.03 (0.009)	0.5~1.0 (0.56)		1.0~1.5 (1.06)	0.44~0.65 (0.48)	balance
3	A335 P22 (2¼Cr-1Mo)	0.15 (0.09)	0.3~0.6 (0.49)	0.03 (0.012)	0.03 (0.008)	0.5 (0.21)		1.9~2.6 (2.03)	0.87~1.13 (0.97)	balance

* Pipe : ID ½", SCH. 80 (~3.3 mm in wall thickness)

** Values in parentheses are the actual composition of product

는 Fig. 5와 같으며, 약 200°C까지의 승온이 가능하며, pH-meter(Omega사 제)와 DO-Analyzer (TOA Electronics사 제)를 장착하여 실시간 측정이 가능하도록 설계·제작되었다.

나. 재질 및 시편

실험에 사용된 재질은 Table 1과 같은 화학성분을 함유한 탄소강(A106 Grade B) 및 A336 P11 (1Cr-½Mo)과 A335 P22(2¼Cr-1Mo) 저-합금강을 Fig. 6과 같은 형태의 소형시편으로 가공하여 사용하였다.

다. 침식-부식 반응 가속조건

원전 2차계통 수화학 조건 하에서 탄소강 침식-부식 파손은 온도에 따라 크게 변화하며 고온부에서보다 저온부에서 파손이 크게 일어난다. 침식-부식 가속조건으로, Fig. 2에 근거하여 반응온도를 130°C 및 Fig. 4에 근거하여 탈-산소 수용액 환경으로 설정되었다. 고리모양의 시편을 Fig. 6과 각 시편부위에 오리피스 후단에 일정한 간격을 두고 장착하고, 두 종류의 오리피스에 의해 유속을 4 m/s (및 9 m/s)로 고정하여 500 시간동안 반응시킨 후 시편무게 손실량을 측정하였다.

3. 결과 및 토의

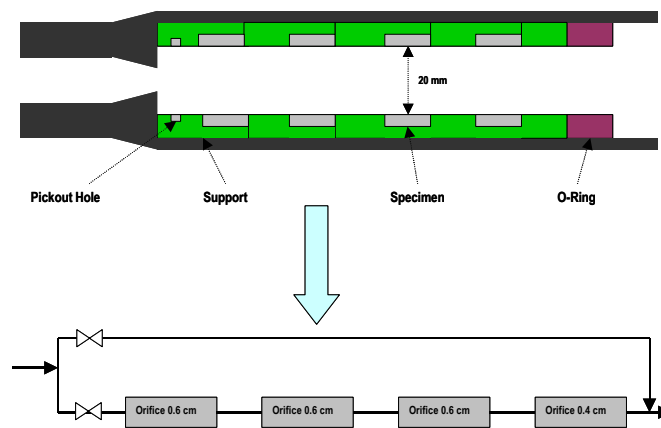


Fig. 6 Layout of the erosion-corrosion test specimen

가. 유속에 따른 시편무게 손실

130°C 및 pH 8의 탈-산소 수용액이 순환하는 침식-부식 시험루프 내에서, Fig. 6과 같이 장착된 직경 0.6 mm 및 0.4 mm의 오리피스에 의해 4 m/s 및 9 m/s의 유속 하에서, 탄소강 시편이 500 시간동안 반응한 후 시편무게 손실을 측정하였다. 오리피스 거리가 20.4 mm인 영역에서의 시편무게 손실은 Fig. 7과 같이 나타났다. 유속 9 m/s에서의 탄소강 시편의 무게손실은 4 m/s인 경우에 비해 약 25 % 정도 더 증가되었으며, 탄소강의 침식-부식에 의한 무게손실의 유속 의존성을 확인하였다.

나. 오리피스로부터의 거리에 따른 시편무게 손실

오리피스로부터의 거리에 따른 유속의 변화가 침식-부식에 미치는 영향을 고찰하기 위해, 4개의 시편이 Fig. 8과 같이 오리피스로부터 각각 6.8 mm, 13.6 mm, 20.4 mm 및 27.2 mm의 거리에 배열되고, 130°C, pH 8, 탈-산소, 4 m/s 및 9 m/s의 환경에서 500 시간동안 반응된 후의 시편무게 손실이 측정되었다. 오리피스로부터의 거리에 따른 시편무게 손실은 Fig. 9와 같이 나타났다. 유속 9 m/s에서의 탄소강 무게손실은, 전반적으로 유속 4 m/s에서보다 훨씬 크며, 오리피스로부터의 거리가 증가함에 따라 증가되었다. 오리피스가 장착되어 유속이 조절되는 경우에는, 오리피스로부터 가장 가까운 영역에서 역류를 수반하는 복잡한 유속장(flow velocity field)이 생성된다. 이 후단 영역에서는 시편표면에 미치는 유속의 영향이 역류가 형성되는 정도만큼 상쇄되어 침식효과가 감소될 것이다. 현저한 시편무게 손실을 보이는 오리피스로부터의 거리는 유속 9 m/s의 경우 대략 20 mm 정도, 4 m/s의 경우 대략 27 mm 이상으로 나타났다. 이 현상은 원전 2차계통 탄소강 배관재에 대한 침식-부식 손상 해석에 고려되어야 하는 인자이다.

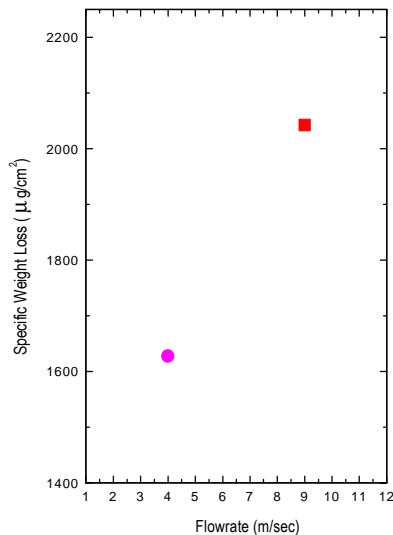


Fig. 7 Weight losses of carbon steel dependent on flow rates of 4 and 9 m/s after 500 hours at 20.4 mm from orifice, pH 8 and 130°C

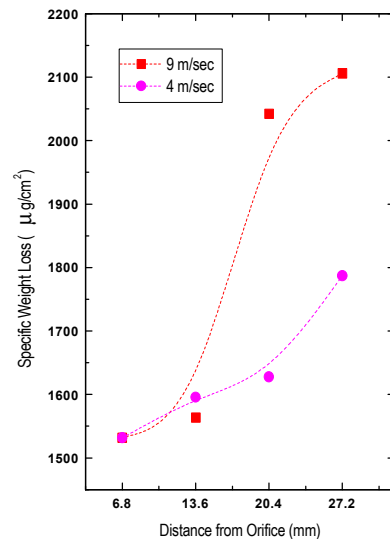


Fig. 8 Weight loss of carbon steel dependent on distance from orifice after 500 hours under 4 and 9 m/s at pH 8 and 130°C

다. 재질 성분에 따른 시편무게 손실

탄소강 및 저-합금강 (1Cr-½Mo과 2¼Cr-1Mo)의 재질 성분에 따른 침식-부식 특성을 확인하기 위하여, 130°C, pH 8, 탈-산소 수용액 내에서 유속 4 m/s의 조건으로 500 시간동안 반응시킨 후 시편무게 손실을 측정된 결과, Fig. 9와 같이 나타났다. 시편무게 손실은 탄소강의 경우 두 저-합금강에 비해 거의 배 이상 컸으며, 2¼Cr-1Mo보다 크롬이나 몰리브덴이 절반 정도 덜 함유된 1Cr-½Mo 시편무게의 손실이 약간 더 컸다. 이 결과는, 탄소강에 VI B 전이원소인 크롬과 몰리브덴이 첨가된, 저-합금강의 우수한 침식-부식 저항성을 확인시켜주고 있다. 한편, Table 1에서와 같이, 상용 탄소강의 재질사양에는 크롬이나 몰리브덴의 함량이 제시되어 있지 않으며, 전술한 바와 같이 크롬이 0.005~0.07 wt% 정도 불순물로 함유되어 있을 수도 있다 [2]. 그러나, 이 정도의 함량은 1Cr-½Mo이나 2¼Cr-1Mo의 크롬 함량에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에, 합금원소의 효과가 상대적으로 미세하다고 할 수 있다.

라. 수용액 pH에 따른 시편무게 손실

단상 유체 영역에서의 탄소강 및 저-합금강 침식-부식에 대한 수용액 pH의 영향을 확인하기 위하여, 130°C, 탈-산소 수용액에서 유속 4 m/s의 조건으로 500 시간동안 반응시킨 후 무게손실을 측정하였으며, 오리피스로부터의 거리가 20.4 mm인 부위에서의 시편무게 손실을 도시하면 Fig. 10과 같다. 각 시편의 무게손실은 수용액 pH가 높을수록 크게 감소하였다. 수용액 pH 8.0~9.0 범위에서는 무게 손실량이 양의 값을 보인 반면, pH 9.5에서는 음의 값을 나타냈다. 이는, 탄소강 표면의 철 성분이 상대적으로 높은 수용액 pH 조건에서 OH⁻ 이온에 의해 식 (1) 및 식 (2)에 의해 Fe₃O₄를 생성한 데에 기인되었을 것으로 추정된다.

마. 재질과 유속 및 수용액 pH에 따른 침식-부식 해석

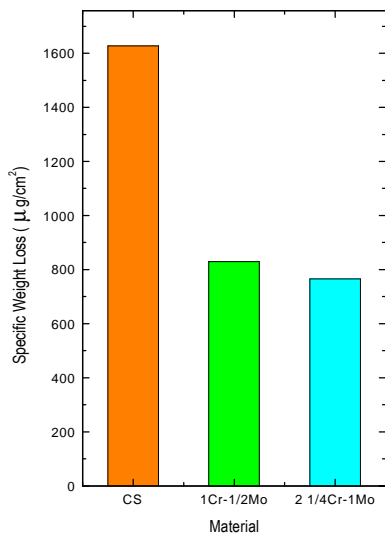


Fig. 9 Weight losses dependent on materials after 500 hours under 4 m/s at 20.4 mm from orifice, pH 8 and 130°C

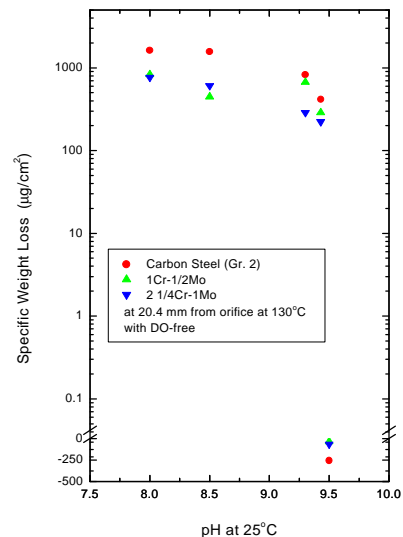


Fig. 10 Weight losses dependent on aqueous pH after 500 hours under 4 m/s at 20.4 mm from orifice at 130°C

Table 2 The constant values of $y = a + b x$ for a linear curve fitting, and the relative values of a and b compared with those obtained from carbon steel with 4 m/s

Materials	a at $\text{pH}_{25^\circ\text{C}} 7$ ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{mol} \cdot \ell$)	$a/a_{\text{CS-4m/s}}$	$b/b_{\text{CS-4m/s}}$
CS with 9m/s	2077	-6.0E+7	1.18	1.09
CS with 4m/s	1760	-5.5E+7	1.00	1.00
1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo with 4m/s	864	-2.4E+7	0.49	0.44
$\frac{1}{4}$ Cr-1Mo with 4m/s	744	-2.3E+7	0.42	0.41

각 시편무게 손실의 수용액 내 OH^- 이온농도에 따른 모사 선형 의존성을 구하였다. Fig. 11과 같이, 실험 pH 범위 내에서 수용액 내 OH^- 이온농도가 클수록 각 시편무게 손실은 대략 선형적으로 감소하였으며, 모사 선형 1차 식의 절편 a [at $\text{pH}_{25^\circ\text{C}} 7$, ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)]와 기울기 b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{mol} \cdot \ell$)는 Table 2와 같이 계산되었다. $b/b_{\text{CS-4m/s}}$ 값은, 유속 4 m/s에서의 탄소강 무게손실을 기준으로 한 각 시편무게 손실의 상대적 값들로서, 수용액 OH^- 이온농도(또는 pH) 변화에 따른 시편들의 침식-부식에 대한 상대적 민감도를 나타낸다고 할 수 있다. Fig. 11에서, 130°C 에서의 탈-산소 수용액 $\text{pH}_{25^\circ\text{C}} 8.0 \sim 9.5$ 범위 및 상이한 4 m/s과 9 m/s의 유속 하에서, 탄소강의 OH^- 이온농도에 따른 상대적 침식-부식 민감도가 유속의 크기에 따라 다소 증가하였다. 한편, 1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo과 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo의 경우와 같이 크롬과 몰리브덴 합금원소가 탄소강에 함유되면, 침식-부식 저항성이 크게 향상되는 동시에, OH^- 이온농도 변화에 따른 상대적 민감도가 탄소강의 경우에 비하여 절반이상 감소하며 합금원소 함량이 증가함에 따라 약간 더 감소함을 알 수 있다. 원전 2차계통 배관재는 침식-부식 특성이 수용액 내 OH^- 이온농도(즉, pH)의 변화 또는 유속의 변화에 민감하지 않을수록 좋기 때문에, $b/b_{\text{CS-4m/s}}$ 값에 의해 침식-부식 특성을 비교·평가할 수 있을 것이다.

한편, 130°C 수용액의 동일한 pH 구간에서 보호피막인 magnetite의 주요 용해성 이온 화학종이

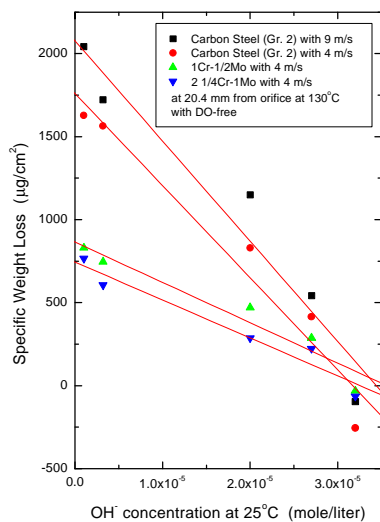


Fig. 11 Pseudo linear dependence of the weight losses of the specimens on aqueous hydroxyl ion concentration

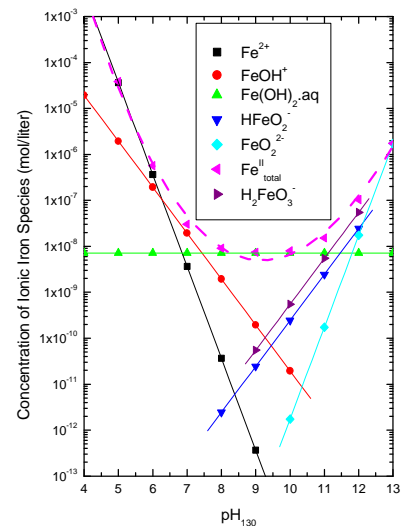
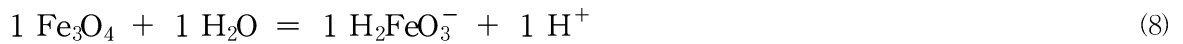
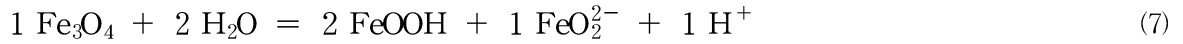
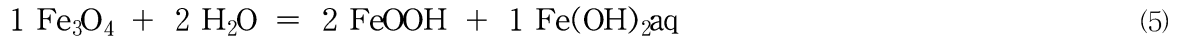
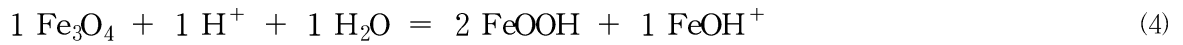
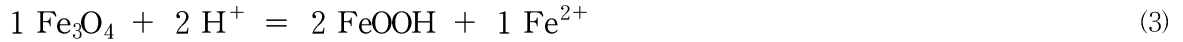


Fig. 12 Contribution of individual ionic species to the total Fe_3O_4 solubility in water, calculated at 130°C

Fe^{2+} , FeOH^+ , $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{aq}$, HFeO_2^- , FeO_2^{2-} 및 H_2FeO_3^- 라고 가정하고, 다음의 식들에 의해 각 이온종에 대한 용해도 및 전체 용해도를 열역학적으로 계산하였다 :



계산결과는 Fig. 12와 같이 나타났으며, magnetite의 용해반응은 수용액 pH 8.0~9.5 구간에서는 주로 반응 (3) 및 반응 (4)에 의해, pH가 9.5를 넘으면서부터 주로 반응 (6)과 반응 (7) 및 반응 (8)에 의해 지배되고, 반응 (5)는 pH에 무관하게 나타났다. 실험의 pH 범위인 $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ 8.0~9.5에서의 pH에 따른 magnetite 용해도 감소추세 및 pH 9.5 근처에서의 최소 용해도 값은 Fig. 10의 실험결과와 거의 동일한 경향을 보이고 있다. 이러한 magnetite 용해도 계산결과는 탄소강 및 저-합금강의 침식-부식 특성을 해석하는 데에 유용하다고 할 것이다.

4. 결 론

원전 2차계통 배관재질들의 침식-부식 특성실험을 위해 설계·제작된 침식-부식 시험루프를 사용하여, 단상 침식-부식 가속조건 (130°C, 탈-산소) 하에서 기존재질인 탄소강 및 대체후보 재질인 저-합금강(1Cr-½Mo과 2¼Cr-1Mo) 시편들의 침식-부식에 의한 무게 손실을 측정하였다 :

- 유속 4 m/s(일부 9 m/s)로 500 시간동안 반응된 후 탄소강 시편의 무게손실은 유속의 크기에 의존하였으며, 오리피스로부터의 시편거리가 20 mm 이상인 경우에 크게 증가하였다.
- 합금원소 크롬과 몰리브덴의 함량이 클수록 시편무게 손실은 더 감소하였다.
- 탄소강 및 저-합금강들의 시편무게 손실은 수용액 pH가 증가할수록 감소하였으며, 수용액 내 OH^- 이온농도 크기에 거의 선형적으로 비례하였다.
- 수용액 내 OH^- 이온농도에 따른 시편무게 변화가 보여주는 모사 1차선형 식의 기울기를 계산하여 각 시편의 침식-부식에 대한 상대적 민감도를 추정하고, magnetite의 열역학적 용해도를 계산하여 실험결과와 거의 유사한 경향을 확인하였다.

제작된 침식-부식 시험루프를 사용하여 수용액 pH 10~11 범위에서의 침식-부식 특성실험이 수행되고 있으며, 이들은 PWR 및 PHWR 배관재의 침식-부식 특성 해석에 활용될 것이다.

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Vik Shah, "Flow-Accelerated Corrosion of PWR Carbon Steel Components", Life Extension and Aging Management of Nuclear Power Plant Components in Korea, Korea Institute of Nuclear Safety, Taejon, Korea, July (1999)
2. G. Cragolino, C. Czajkowski and W. J. Shack, "Review of erosion-corrosion in single-phase flows", NUREG/CR-5156 TI88 015791 (1988)