

원자로 냉각재 펌프용 스테인리스강에 대한 화학적 제염 공정 개발(II)

김성종^{a*}, 김정일^a, 김기준^b

^a목포해양대학교, ^b한국해양대학교

Development of Chemical Decontamination Process of Stainless Steel for Reactor Coolant Pump (II)

Kim Seong-Jong^{a*}, Kim Jeong-Il^a, Kim Ki-Joon^b

^aDivision of Marine System Engineering, Mokpo Maritime University

^bDivision of Marine System Engineering, Korea Maritime University

(Received December 13, 2007 ; accepted December 21, 2007)

Abstract

In this study, applicable possibility in chemical decontamination for reactor coolant pump (RCP) was investigated for the various stainless steels. The stainless steel (STS) 304 showed the best electrochemical properties for corrosion current density and the lowest weight loss ratio in chemical decontamination process model 3-3 than other materials. The weightloss quantity in chemical decontamination process model 3-3 presents the lowest value compare to the other chemical decontamination process model 1, 2, 3-1 and 3-2. In the case of SEM observation, the pitting corrosion was generated in both STS 415 and STS 431 with the increasing numbers of cycle. The intergranular corrosion in STS 431 was sporadically observed. The sizes of their pitting corrosion were also increased with increasing cycle numbers.

Keywords: Reactor coolant pump, Chemical decontamination, Corrosion current density, Stainless steel

1. 서 언

최근 우리 나라는 원자력발전소의 가동년수 증가로 인하여 원자로 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump, 이하 RCP) 내장품의 방사선 오염 증가가 예상되고 있으므로 분해점검 및 교체작업시 고방사선에 기인한 정비상의 어려움이 심각한 문제로 제기되고 있어 방사선 피폭저감을 위한 대책이 절실한 실정이다¹⁾. 따라서 적절한 방사선 피폭저감을 위해 화학제염공정이 필요하게 되었으며, 그와 관련한 원자력발전소의 여러 설비중 냉각재펌프에 대한 화학제염공정 기술이 중요한 문제로 대두되었다. RCP 내장품 재료로는 오스테나이트계 스테인레스강이 주로 사용되고 있는데, 화학제염 공정 적용시 화학약품으로 인해 입계부식(Intergranular Corrosion)이나 공식(Pitting) 등의 부식손상이 지적되어 왔으며,

이로 인해 화학제염 실시에 따른 내장품의 건전성 확보와 화학제염 효과의 최적화를 이루기 위한 노력이 진행되어 왔다. RCP의 화학제염에 관한 연구는 1990년대에 들어서면서부터 국제적으로 관심의 대상이 되어온 분야이며, 그 동안 미국, 일본, 프랑스, 대만 등에서는 상당한 연구성과를 거두어 각 나라마다 독자적으로 개발한 제염기술을 사용하고 있다²⁾. 그러나 이에 대한 지금까지의 기술정보는 세계적 경쟁속에서 각국마다 기술의 공개를 극비로 제한하고 있어 상세한 정보를 입수하기란 거의 불가능한 형편이다. 따라서, 우리 나라의 원자력발전소에서도 이에 대한 자체공정 및 설비개발이 절실히 필요한 상황이다. 전 연구에서는 이를 해결하기 위하여 모델 1과 모델 2를 개발하여 적용하였다. 그 결과 모델 1에서는 STS 304, STS 415, STS 431, 공구강, 인코넬 600 및 탄소강을 적용한 결과, 인코넬 600의 경우는 2 사이클부터 피팅과 입계부식의 형상이 현저히 관찰되었으며, 탄소강과 공구

*Corresponding author. E-mail : ksj@mmu.ac.kr

강은 1 사이클 종료만으로 지나친 부식 발생으로 인하여 실제 적용이 불가능함이 판명되었다. 또한 스테인리스강의 경우는 STS 304의 경우만 대체적으로 건전한 특성을 나타낸 반면 다른 스테인리스강은 피팅과 입계부식이 관찰되었다³⁾. 또한 모델 2에서는 가장 가혹한 조건으로 제시한 결과, 모델 1에 비하여 시편의 부식 정도와 무게 감량이 현저히 증가하는 경향을 나타냈다⁴⁾. 그리고 모델 3-1과 3-2를 개발하여 연구한 결과, 공정 및 사이클이 반복됨에 따라 STS 304는 가장 안정된 경향을 나타낸 반면, STS 415와 STS 431은 전기화학적으로 불안정한 특성을 나타내어 STS 304에 비해 높은 부식 특성으로 인한 많은 무게 감량을 나타냈다^{5,6)}.

따라서 본 연구에서는 화학제염 공정의 신 모델 3-3을 개발하여 실제 RCP 재료로 사용되는 STS 304, STS 415 및 STS 431 등을 선정하여 실제 현장의 화학제염 공정절차를 실험실에서 재현하여 각 공정단계별 부식특성을 조사하고, 분극시험을 통한 내식성, 무게감량 특성 등을 비교/연구하였으며, 주사전자현미경을 이용하여 피팅과 입계부식으로 인한 손상정도를 평가하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 RCP에 사용되는 재료 중 STS 304(A), STS 415(B) 그리고 STS 431(C)에 대한 화학적 조성을 표 1에 나타냈다. 모델 1과 모델 2 그리고 모델 3-2를 참조하여 개발된 신 공정 모델 3-3은 표 2에 나타냈다.

연구모델 3-3은 연구모델 3-1과 연구모델 3-2와 같은 시간을 적용하였다. 본 연구에서도 각 사이클 별 공정변화에 무관하게 시편이 부식 유무에 무관하게 5사이클까지 실시하였다. 산화공정과 분해공정에서는 다른 모델 조건에 비하여 비교적 작은 농도를 사용하였으며, 환원공정 중 Oxalic Acid의 농도는 연구모델 3-1과 3-2의 중간정도의 농도를 선택하였다. 또한, Citric Acid는 연구모델 3-1과 3-2보다 적은 농도를 사용하였으며, LiOH는 연구모델 3-1과 3-2에 비하여 다소 많은 농도를 적용하였다. 또한 수행온도는 연구모델 3-1과 3-2과 같이 88°C에서 실시하였다. 연구모델 3-3은 1 사이클은 7시간, 2-3 사이클은 각각 5시간과 4시간, 그리고 4-5 사이클은 3시간씩 실시하여 총 소요시간은 22시간이었으며, 수행온도는 88°C에서 실시하였다. 본 연구에 사용된 각 공정마다 적용되는 전체 공정과정은 처음 산화공정용 공정수를 조성하여 공정을 수행하며, 다음 분해공정을 통해 공정수를 분해시킨다. 분해된 공정수에 환원공정용 화학약품을 투입하여 환원공정을 수행한다. 환원공정이 완료되면 피제염체는 순수로 세척하고, 공정수는 정화설비를 사용하여 정화시킨 다음, 다시 그 공정수에 산화공정용 약품을 투입하여 산화공정을 수행하는 방법이다. 여기서 산화, 분해, 환원공정이 완료되면 1 사이클이라 한다.

분극시험에 사용된 시험편은 노출면적 1 cm²로 하여 에머리페이퍼 600번까지 연마하고, 시험 직전 초음파 세척기를 이용해 아세톤과 증류수로 세척하여 사용하였다. 분극시험 조건은 300초 동안 안정

Table 1. Chemical composition of materials

	Cr	C	Mn	Si	P	S	Ni
STS 304	18.29	0.08	1.11	0.52	0.36	0.02	8.03
STS 415	12.540	0.038	0.670	0.810	0.019	0.009	3.870
STS 431	15.17	0.2	1.00	1.00	0.040	0.030	1.25-2.50

Table 2. Process model 3-3 on chemical decomposition of materials for RCP

Process	Chemical name	Concentration (g/l)			Applied time (Hr)				
		1 Cycle	2 Cycle	3-5 Cycle	1 Cycle	2 Cycle	3 Cycle	4 Cycle	5 Cycle
Oxidation process	HNO ₃	0.20	0.20	0.20	3	2	2	1	1
	KMnO ₄	0.40	0.40	0.40					
Dissolution process	HNO ₃	0.35	0.25	0.25	2	2	1	1	1
	Oxalic acid	0.70	0.70	0.70					
Reduction process	Oxalic acid	0.60	0.50	0.40	2	1	1	1	1
	Citric acid	0.85	0.80	0.75					
	LiOH	0.50	0.50	0.50					
Applied temperature	88°C								

시킨 후 전위주사속도 2 mV/sec로 하여 개로전위를 기준으로 -0.25 V에서 +0.25 V까지 실시하였으며, 기준전극은 은/염화은 전극(Ag/AgCl)을 대극은 백금선을 사용하였다. 무게감량 측정용 시험편은 공정모델 3-3(최적의 화학제염 공정 모델을 개발하기 위해 수많은 공정 모델을 개발하여 시도되었다. 추후 개발된 공정모델 등과 구별하기 위하여 붙인 명칭이며, 본 연구에 언급된 모델은 모두 공정모델 3-3임) 용액조건에서 시작부터 해당 사이클 종료 시까지 실시하였고, 용액 중 침지를 위해 상부 증상에 약 2 mm의 구멍을 뚫어 리드선을 연결하였다. 적용면적은 실제 RCP의 총 표면적과 화학제염에 소요되는 공정수의 총량을 단위면적/공정용액의 비로 계산하여 실험하였다. 또한 시험용액에 침지하기 전, 초음파 세척기를 이용해 표면에 오염된 불순물을 제거한 후, 전자저울로 시험편의 무게를 10^{-4} g까지 측정하였으며 시험 후에도 같은 방법으로 측정하여 무게감량을 산출하였다. 주사전자현미경 관찰용 시험편은 분극시험용 시험편과 유사하나 연마시 에머리페이퍼 2000번까지 실시하여 동일한 세척과정을 거친 후, 표면 관찰을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 1은 모델 3-3의 조건에서 STS 304 시편에 대한 각 사이클별 분극 경향을 나타내고 있다. 1 사이클 시작 전 0 사이클의 경우는 1.175 V(vs. Ag/AgCl) 정도의 부식전위로 상당히 높은 값을 나타냈으며, 5×10^{-7} A/cm² 정도로 낮은 부식전류밀도를 나타냈다. 양분극 곡선에서는 전위변화에 따라 부동태 현상과 같은 완만한 전류밀도의 상승이 관찰되었으며, 음분극 곡선에서도 전위가 비방향으로 이행함에 따라 완만하게 상승하는 용존산소 환원반응($O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$)에 의한 농도분극의 현상이 관찰되었으므로 다른 조건에 비하여 양호한 전기화학적 거동을 나타냈다고 할 수 있다. 1 사이클 종료 후에는 부식전위가 약간 저하하였으며, 부식전류밀도는 정확히 구분하기 어려우나 2×10^{-6} A/cm² 정도의 값을 나타냈다. 한편 2 사이클 종료 후에는 1.15 V 정도의 부식전위를 나타냈으며, 부식전류밀도는 급격히 상승하여 대략 2×10^{-5} A/cm² 정도의 값을 나타냈으므로 2 사이클 과정에서 많은 무게 감량이 발생할 것으로 유추가 가능하다. 또한 0 사이클에서 1, 2 사이클로 이행 할수록 부식전위가 완만하게 저하한 반면, 부식전류밀도는 현저히 상승하였음을 알 수 있다. 다음 3, 4, 그리고 5 사이클에서는 사이클이 증가하면서 완만한 부식전위

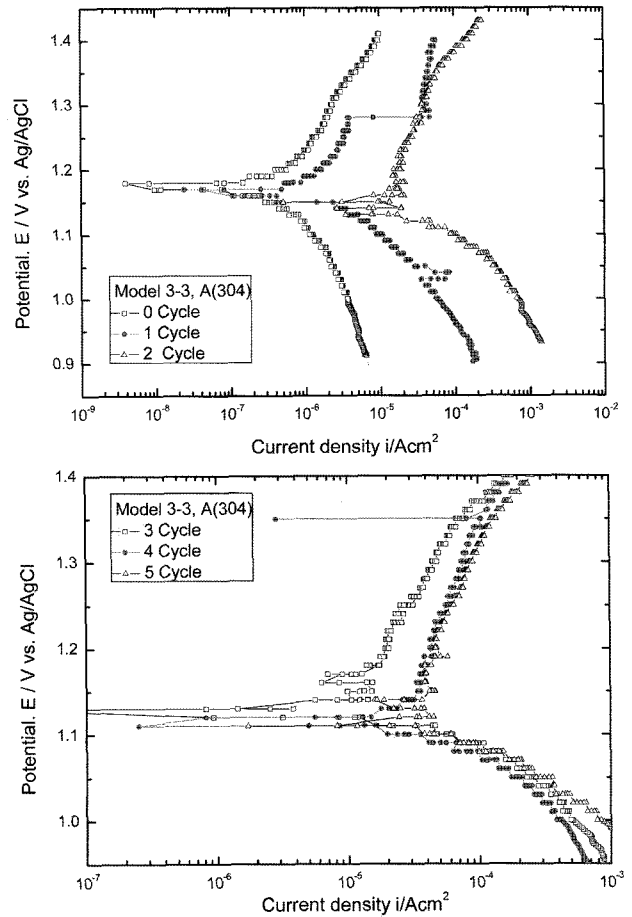


Fig. 1. Variation of polarization curves with increasing of number of cycles for STS 304 in process model 3-3 solution.

의 저하와 부식전류밀도가 증가가 관찰되었으나 유사한 분극 거동을 나타냈다. 대체적으로 전류밀도는 양분극의 경우가 음분극의 경우에 비하여 낮은 값을 나타냈다. 한편 STS 304 시편에 대한 각 사이클 변화에 따른 무게감량 시험편을 관찰한 결과, 전 사이클에 걸쳐서 아주 깨끗한 표면을 나타냈으므로 육안 관찰로는 거의 구분이 가지 않을 정도의 변화를 보여 주었으므로 무게감량을 상호 비교하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

표 3은 각 사이클 변화에 따른 무게 감량 시험편의 감소량과 감소율을 보여 주고 있다. 무게감량 측정 결과 1 사이클 종료 후 0.00000097 g/cm²로 낮은 무게 감량을 보인 연구모델 3-1⁵⁾에 비하여 1/3 정도로 아주 낮은 무게 감량을 보였다. 2 사이클 종료 후에는 1 사이클에 비해 3배 정도의 많은 무게 감량을 보였는데 이는 분극 실험을 통해서 관찰한 바와 같이 2 사이클 종료 후에 부식전류밀도가 상당히 많이 증가한 경향을 보였으므로 동일한 경향을 나타냈다고 할 수 있다. 이 후 사이클 증가에 따라 대체적으로 큰 비율로 무게감량이 상승하였으

Table 3. Weightloss ratio for STS 304 specimen with cycles in model 3-3 solution

	After 1 Cycle	After 2 Cycle	After 3 Cycle	After 4 Cycle	After 5 Cycle
Before	74.6074	74.9636	74.8376	73.7112	74.9198
After	74.6073	74.9633	74.8369	73.7102	74.9184
Weightloss	0.0001	0.0003	0.0007	0.0010	0.0014
Exposed area	103.0398	102.4662	102.60965	102.0442	103.1044
Weightloss ratio	0.00000097	0.000002927	0.000006821	0.000009799	0.000013578

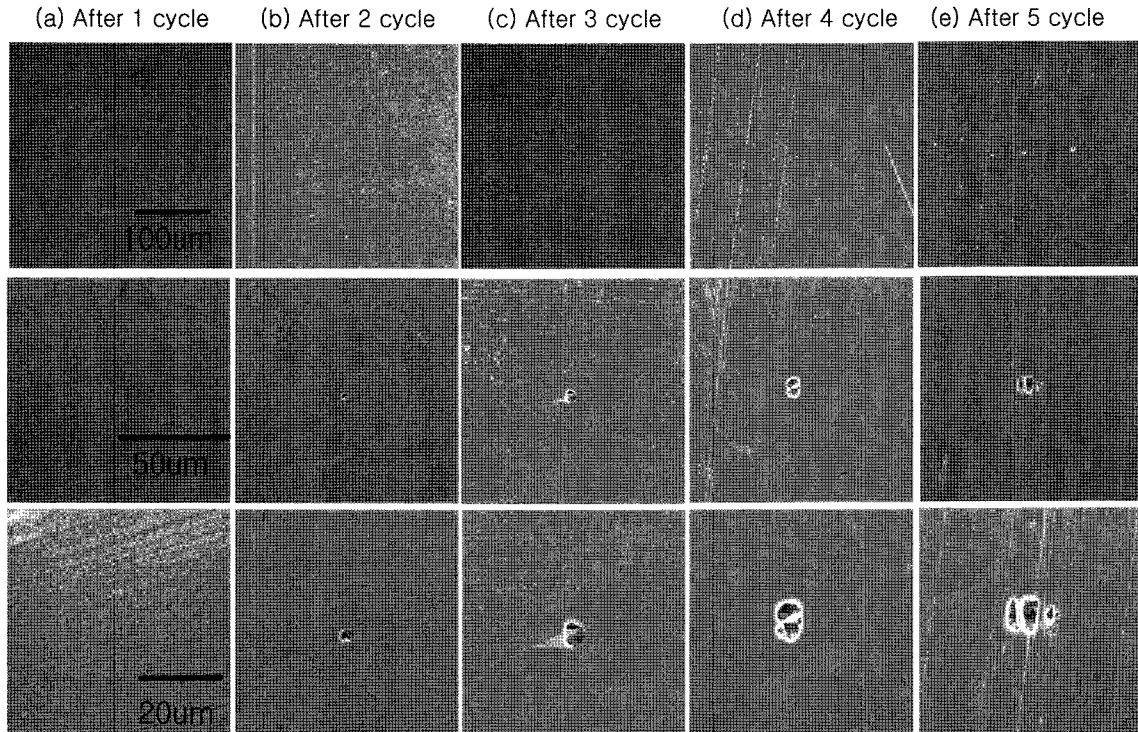


Fig. 2. Surface morphology with cycle variation of STS 304 in model 3-3 process solution.

나 다른 시편에 비하여 전체적으로 아주 작은 소모량이라 할 수 있다. 최종 5 사이클 종료 후에 $0.000013578 \text{ g/cm}^2$ 정도의 무게 감량을 나타냈는데 이는 연구모델 3-1의 1/5에 불과하다고 할 수 있다.

그림 2는 STS 304 시편에 대하여 각 사이클 종료 후 표면형상을 보여 주고 있다. 1 사이클 종료 후 모든 배율에서 피팅이나 부식의 영향이 없는 아주 깨끗한 표면이 관찰되었다. 반면, 2 사이클의 경우는 아주 작은 공식이 관찰되었으며, 3 사이클의 경우는 2 사이클에 비하여 약간 공식이 크게 나타났으나 큰 차이는 관찰되지 않았다. 4 사이클과 5 사이클의 경우 부분적으로 피팅이 서로 결합한 양상도 관찰되었으나, 마이크로 스크레치에 미세한 용해반응이 관찰되었으며, 5 사이클의 경우가 4 사이클에 비하여 용해반응이나 피팅 성장의 그 경향이 짙게 나타났다. 본 실험에 사용된 전 시험편 중 가장 양호한 특성을 보여 주었다. 또한 화학성분도 크롬 양은 18.29%로 가장 많으며, 게다가 탄소량은 0.08%로 가장 작기 때문에 우수한 내식 특성을 보

인 것으로 판단된다. 일반적으로 크롬과 니켈의 양은 많을수록, 탄소량은 적을수록 내식성이 우수하다. 또한 크롬이나 니켈 첨가에 의해 피팅에 대한 저항성이 향상되며, 전위도 귀 방향으로 이행하는 것으로 알려져 있다⁷⁾. 또한 피팅 저항성을 향상시키는 이외의 합금 원소는 몰리브덴⁷⁻¹¹⁾과 질소¹²⁾, 바나듐^{12,13)}, 실리콘^{9,14)}, 텅스텐^{15,16)} 등이 있다.

그림 3은 모델 3-3의 STS 415 시편에 대한 분극곡선을 보여 주고 있다. 각 사이클 변화에 따른 분극곡선의 전체적인 경향은 양분극 곡선에서는 전류밀도의 완만한 상승이 관찰된 반면, 음분극 곡선에서는 전위가 비방향으로 이행함에 따라 급격히 증가하는 활성용해반응의 거동을 보였다. 0 사이클에서는 부식전위 주위에서 전위변화에 따른 전류밀도의 헌팅 현상이 관찰되었는데 이는 침지 초기부터 활성적인 거동을 보였음을 의미하며, 부식전류밀도는 대략 $1.5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 으로 추후 사이클에 비하여 낮은 값이나 다른 시편에 비하여 높은 값이라 할 수 있다. 1 사이클과 2 사이클의 경우는 유사한

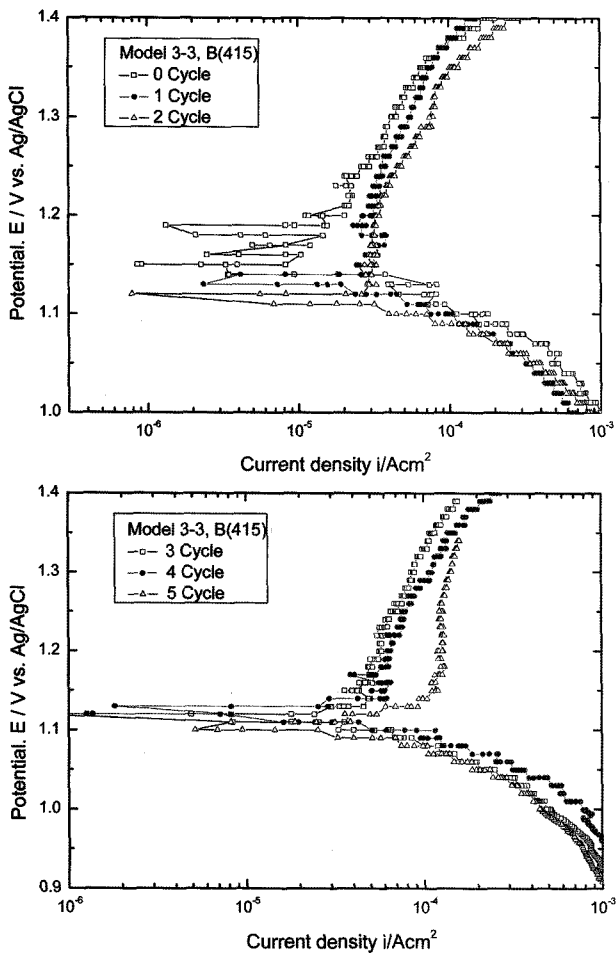


Fig. 3. Variation of polarization curves with increasing of number of cycles for STS 415 in process model 3-3 solution.

거동을 보이거나 0 사이클에 비하여 약간 낮은 부식 전위를 나타냈으며, 부식전류밀도는 크게 증가하였

음을 알 수 있다. 3-5 사이클의 경우는 거의 유사한 부식전위와 부식전류밀도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 전체적인 경향은 거의 유사하며, 양분극 곡선에서의 전류밀도가 음분극 곡선에서의 전류밀도보다 낮게 나타났다.

다음 그림 4는 STS 415 시편의 경우 각 사이클 변화에 따른 무게감량 시편의 사진을 보여 주고 있다. 지금까지 시행된 다른 모델의 STS 415에 비하여 현저히 양호한 표면 형상을 보여 주었다. 명확히 구분하기는 어려우나 아주 미세한 용해반응이 발생한 것으로 사료되며, 보다 구체적인 사항은 무게감량과 현미경 사진을 통해서 설명하기로 한다.

표 4는 STS 415 무게감량 시편의 각 사이클 변화에 따른 무게 감소량과 감소율을 보여 주고 있다. 1 사이클 종료 후에는 0.000010549 g/cm² 정도의 무게감량으로 STS 304에 비하여 11배 정도의 무게감량을 나타냈으며, 2 사이클 종료 후에는 1 사이클에 비하여 2배 정도 무게감량이 증가하였다. 5 사이클 종료 후 0.0000063542 g/cm² 정도의 무게감량을 나타냈는데 이는 동일 모델의 STS 304에 비하여 4.7배 정도에 해당되는 무게감량이라 할 수 있다.

그림 5는 STS 415 시편에 대하여 각 사이클 종료 후 표면 형상을 보여 주고 있다. 1 사이클 종료 후에는 아주 작은 피팅이 관찰되었으며, 자세히 보면 마이크로 스크래치에서 용해반응과 같은 현상이 관찰되었다. STS 415 시편에 대한 각 2-5 사이클 종료 후의 표면 형상을 보여 주고 있다. 사이클이 증가할수록 1 사이클 종료 후에 비하여 피팅의 수효가 증가했을 뿐만 아니라 스크래치 주위에서의

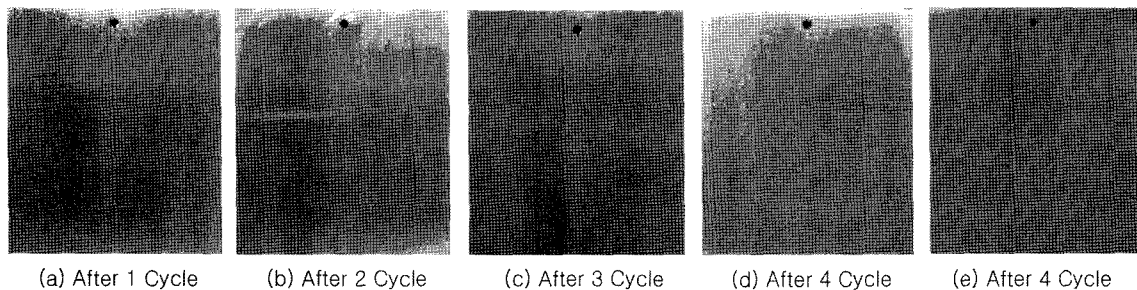


Fig. 4. Photos of weightloss specimens for STS 415 with cycle in model 3-3 solution.

Table 4. Weightloss ratio for STS 415 specimen with cycles in model 3-3 solution

	After 1 Cycle	After 2 Cycle	After 3 Cycle	After 4 Cycle	After 5 Cycle
Before	165.6741	163.5519	163.0719	167.3542	161.4847
After	165.6733	163.5504	163.0701	167.3521	161.4800
Weightloss	0.0008	0.0015	0.0018	0.0021	0.0047
Exposed area	75.8302	74.221	74.1068	74.391	73.966
Weightloss ratio	0.000010549	0.000020209	0.000024289	0.000028229	0.000063542

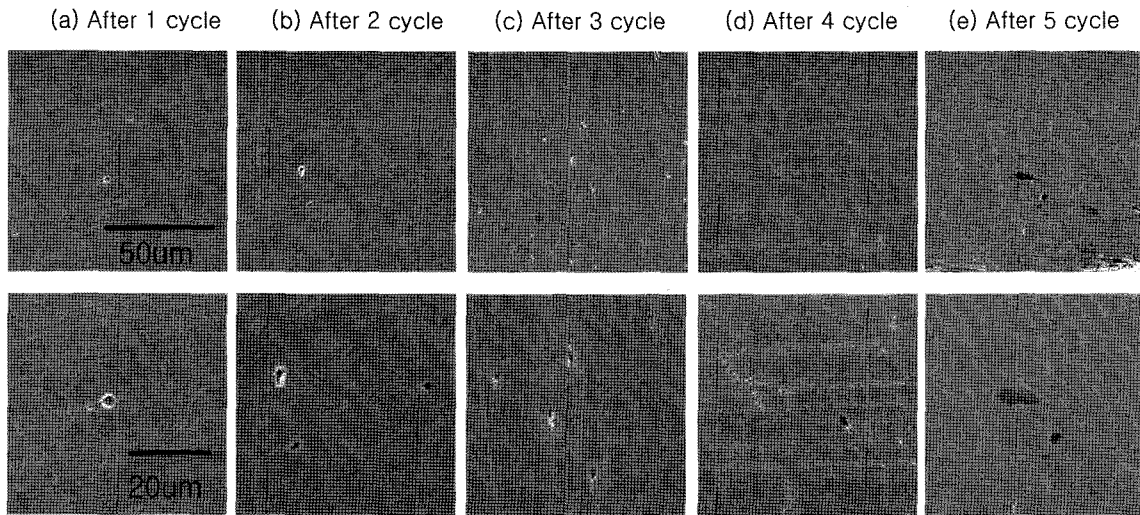


Fig. 5. Surface morphology with cycle variation of STS 415 in model 3-3 process solution.

용해반응이 더욱 진전되었음을 확인할 수 있었다. 또한 스크래치에서 발생한 용해반응이 발생한 부위에 피팅이 보다 많이 생성되었다. 그 후 사이클 증가에 따라 그 경향이 보다 진전되었으며, 피팅의 합체에 의한 피팅의 성장도 관찰되었으며, 그 결과 다소 거친 표면의 양상을 보여 주었다.

그림 6은 모델 3-3의 STS 431 시편에 대한 분극 곡선이다. 0 사이클에서 부식 전위는 대략 1.13 V 정도를 나타냈으며, 0-2 사이클까지의 양분극 곡선에서는 전위상승에 따른 완만한 전류밀도의 상승이 관찰되었으며, 음분극 곡선에서는 용존산소 환원반응에 의한 농도분극의 현상은 관찰되지 않은 활성화 반응이 관찰되었다. 그 결과 양분극에서의 전류밀도는 음분극 곡선에서의 전류밀도에 비하여 낮은 전류밀도를 나타냈다. 한편 3-5 사이클에서는 거의 유사한 부식전위를 나타냈으며, 전 사이클과 유사하게 양분극 곡선에서는 부동태적인 경향이 더 짙게 나타나 전류밀도가 낮게 나타났다. 그러나 양분극 곡선에서 부동태적인 경향을 보인다 할지라도 전체적으로 부식전류밀도가 높다는 것을 인지해야 할 것으로 사료된다. 5 사이클의 경우 부식전류밀도가 다른 사이클에 비하여 높게 나타났으므로 이때 활성적인 전기화학적 반응으로 인하여 무게 감량이 많은 것으로 사료된다. 전체적으로 부식전류밀도는 STS 415에 비하여 낮게 나타났으나 STS 304에 비하여 높게 나타났다. 본 연구모델에서는 3 가지 스테인리스강 모두 분극 거동은 양분극 곡선에서의 전류밀도가 음분극 곡선에서의 전류밀도보다 낮게 나타난 경향을 보여 주었다. STS 431 시편의 각 사이클 변화에 따른 무게 감량 시편을 관찰한 결과, 육안관찰로는 거의 유사하여 부식 경향을 관찰할 수 없었으며, 미소한 차이는 구분하기 어

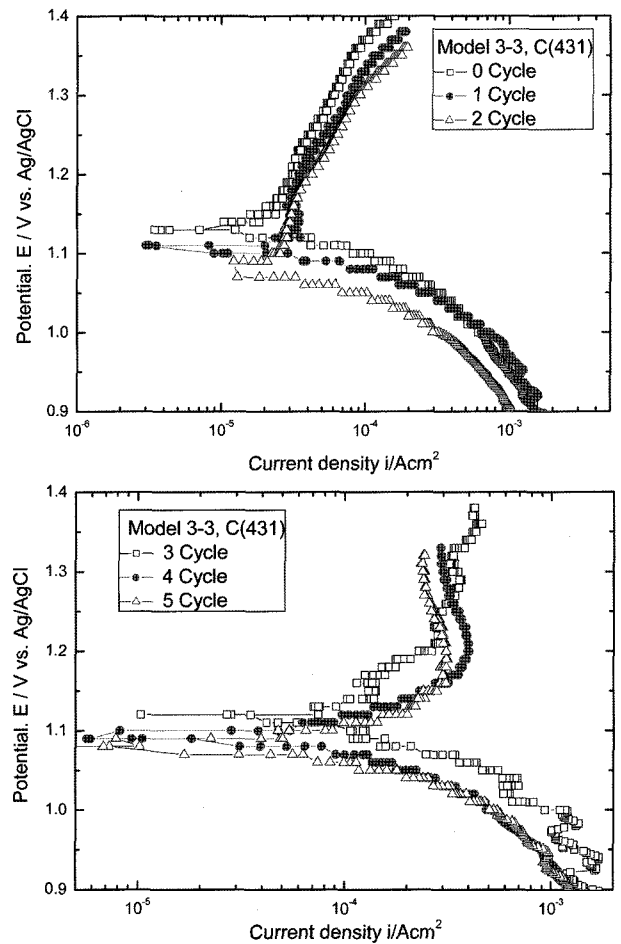


Fig. 6. Variation of polarization curves with increasing of number of cycles for STS 431 in process model 3-3 solution.

려웠으므로 각 사이클 변화에 따른 무게 감량과 주사전자현미경 분석을 실시하여 비교하기로 한다.

표 5는 STS 431 무게감량 시편에 대한 각 사이클 변화에 따른 무게 감소량과 감소율을 보여주고

Table 5. Weightloss ratio for STS 431 specimen with cycles in model 3-3 solution

	After 1Cycle	After 2 Cycle	After 3 Cycle	After 4 Cycle	After 5 Cycle
Before	173.5365	175.4180	173.8139	173.9108	173.9683
After	173.5363	175.4173	173.8127	173.9093	173.9664
Weightloss	0.0002	0.0007	0.0012	0.0015	0.0019
Exposed area	103.6	103.7388	103.3312	105.0838	102.6326
Weightloss ratio	0.00000193	0.000006747	0.000011613	0.000014274	0.000018512

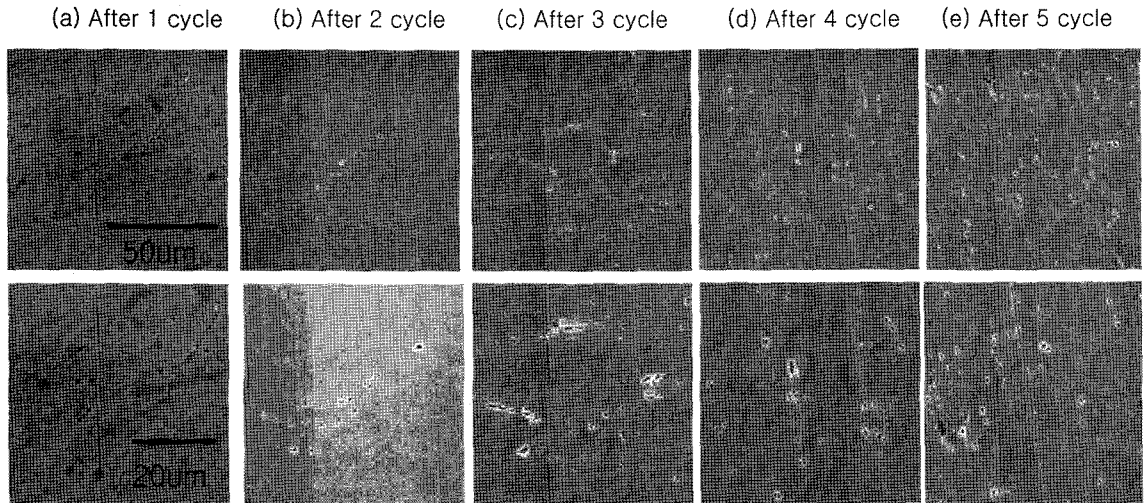


Fig. 7. Surface morphology with cycle variation of STS 431 in model 3-3 proces.

있다. 1 사이클 종료 후 0.00000193 g/cm²으로 동일 조건에서의 STS 304에 비하여 2배 정도의 무게 감량을 나타냈으며, STS 415에 비하여 0.18배 정도를 나타냈다. 2 사이클에서는 0.000006747 g/cm²로 1 사이클에 비하여 3.5배 정도의 무게 감소량이 증가하였다. 이후 무게 감량은 꾸준히 상승하여 5 사이클 종료 후에는 0.000018512 g/cm²의 무게 감량을 나타냈는데 이는 STS 304의 1.4배 정도이며, STS 415의 0.3배 정도에 해당되는 무게 감량이다.

그림 7은 STS 431 시편에 대하여 각 사이클 종료 후 표면 형상을 보여 주고 있다. 1 사이클 종료 후에는 산발적으로 아주 작은 피팅이 분포하고 있음을 알 수 있다. 2 사이클과 3 사이클이 진행하면서 공식의 분포가 보다 많아졌으며, 명확히 구분하기는 어려우나 입계를 따라서 공식이 형성된 듯하였다. 1-3 사이클에서 발생한 공식이 4-5 사이클에서 넓게 분포된 것은 물론 주로 입계에서 공식과 공식이 결합하여 성장해 가는 양상을 보여 주었다. 이는 전기화학적으로 입계의 경우가 입내에 비하여 열악하기 때문에 발생하는 현상이라 할 수 있다. 이런 현상은 열처리시 크롬을 많이 함유한 스테인리스강과 같은 금속이 입계에 크롬 결핍층이 형성됨으로 인하여 생성되기도 한다¹⁷⁾. 여기서 탄소는 카바이드 석출 등에 의한 영향으로 예민화시키는 가장 중요한 성분이며, 휴이시험(Huey Test)을 통해서

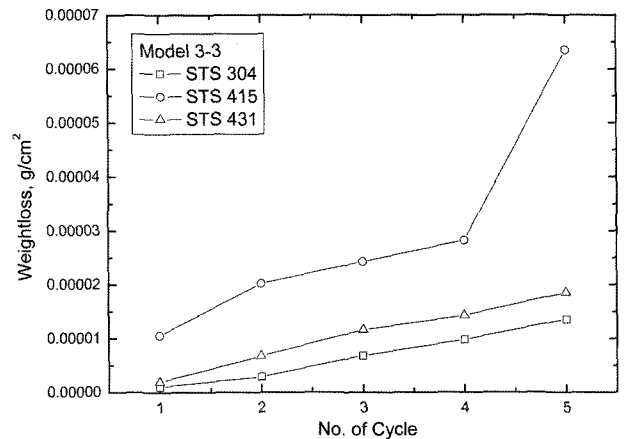


Fig. 8. Comparison of weightloss for various stainless steel in model 3-3 process.

알 수 있다¹⁸⁾. 특히 탄소함량이 0.03% 이상이면, 부식속도는 현저히 증가한 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에 사용된 시편 모두 0.03% 이상이나 본 공정에서는 서로 다른 양상을 나타냈다. 일반적으로 입계부식은 스테인리스강이나 알루미늄에서 발생하는 대표적인 부식양상인데 인코넬 600에서도 화학 제염 공정 시 현저한 입계부식이 관찰되었다³⁾.

그림 8은 여러 시편 종류에 따른 각 사이클 변화별 무게 감소율을 상호 비교한 그래프이다. 1 사이클 종료 후 STS 304와 STS 431은 거의 비슷한 무게 감량을 보였으나 STS 415의 경우는 훨씬 높은

무게 감량을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 STS 304와 STS 431은 사이클 경과에 따라 일정 간격으로 완만하게 무게 감량이 증가하는 양상을 나타낸 반면 STS 415의 경우는 4 사이클 종료 시까지 완만한 무게 감량의 증가를 보인 후 5 사이클 종료 후 현저하게 증가하는 양상을 나타냈다. 현미경 관찰결과 STS 304의 경우는 부식손상이 적게 나타났음이 확인되었으나 STS 415와 STS 431은 큰 차이가 없는 형상을 보였으나 STS 415의 경우 5 사이클에서 현저히 손상이 증가하였음을 알 수 있다. 그러나 1-4 사이클 종료 시까지는 큰 차이는 없으나 무게 감량이 크게 나타난 이유는 공식이나 입계부식의 분포 차이에 기인한 것으로 사료된다.

4. 결 론

분극 실험, 무게감량 시험 그리고 주사전자 현미경 관찰 결과 공정 및 사이클이 반복됨에 따라 STS 304는 가장 안정된 경향을 나타낸 반면, STS 415와 STS 431은 전기화학적으로 불안정한 특성을 나타내어 STS 304에 비해 높은 부식 특성으로 인한 많은 무게 감량을 나타냈다. 사이클 증가에 따른 세 시험편에 대한 부식 경향 관찰에서 STS 304는 대체적으로 완만한 상승을 보인 반면, STS 415는 피팅이 산발적으로 발생한 후, 그 피팅이 점진적으로 커지면서 5 사이클 종료 후에는 아주 거친 표면을 나타냈다. 한편 STS 431의 경우는 초기에 입계 주위에서 산발적으로 피팅이 생성된 후 생성된 피팅의 밀도가 증가하고, 성장해 가면서 입계 부식의 경향을 나타냈다. 공정모델 3-3에서 STS 304가 가장 내식성이 우수하였으며, STS 415가 가장 열악한 특성을 나타냈다. 그 이유는 STS 304 시편의 경우가 STS 415나 STS 431에 비하여 내식특성을 향상시키는 크롬이나 니켈의 양이 많기 때문이며, 또한 내식성을 저하시키는 탄소량이 적기 때문으로 사료된다.

참고문헌

1. 한국전력공사 원자력 본부, 원자로 냉각재 펌프 TVCS 교체 (1995).
2. 한전기공(주) 원자력정비기술센터, 원자로 냉각재 펌프 내장품 화학제염 공정 및 설비개발 (1997).
3. 김성중, 김정일, 김기준, 한국마린엔지니어링학회, 31(1) (2007) 84-94.
4. 김성중, 장석기, 김기준, 해양환경안전학회, 12(4), (2006) 253-259.
5. 김성중, 김정일, 김기준, 한국표면공학회, 40(5) (2007)
6. 김성중, 김정일, 김기준, 해양환경안전학회 투고 중
7. J. Horvath, H. H. Uhlig, Journal of the Electrochemical Society, 115 (1968) 791.
8. J. E. Truman, "Corrosion, Metal/Environment Reactions", L. L. Shreir, ed., Vol. I, Newness-Butterworths, Boston, (1976) 3:31.
9. N. D. Tomashov *et al.*, Corrosion, 20 (1964) 166.
10. J. J. Eckenrod, C. W. Kovach, "in Properties of Austenitic Stainless Steels and Their Weld Metals", ASTM STP 679, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1979) 17.
11. R. J. Brigham, Materials Performance, 13 (1974) 29.
12. J. E. Truman, M. J. Coleman, K. R. Pirt, British Corrosion Journal, 12 (1977) 236.
13. Stress Corrosion Cracking Resistance Stainless Steel SCR-3, Report CE-06-703, Sumitomo Metal Industries Ltd., Amagasaki, Japan (1975).
14. B. E. Wilde, Corrosion, 42 (1986) 147.
15. N. Bui *et al.*, Corrosion, 39 (1983) 491.
16. H. Okamoto *et al.*, Sumitomo Search, Sumitomo Metal Industries Ltd., Amagasaki, Japan, No. 54, (October, 1993) 21.
17. T. Thorvaldsson, A. Salwen, Scripta Metallurgica, 18 (1984) 739.
18. J. J. Heger, J. L. Hamilton, Corrosion, 11 (1955) 22.