2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력 발전소 배관재 부식생성물 모사와 분석에 관한 연구

Study on the Simulation and Analysis on Corrosion Products of Piping Materials in NPP

김상현, 김인섭
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요약

발전소 내 방사화 부식생성물의 대부분을 차지하고 있는 니켈 페라이트계 부식생성물을 모사 발생시키기 위한 고온 고압용 장치를 제작하여 연구를 수행하였다. 니켈 합금과 철 합금은 270℃에서 부식반응이 일어나며 상대적으로 높은 온도를 가진 포집용 고압용기에 부식생성물이 포집 되도록 고안하였다. 생성된 부식생성물의 특성을 규명하기 위하여 용액 분석과 주사전자현미경 관찰, EDX 조성 분석을 수행하였다. 연구 결과로 제작된 장치 내에서 부식생성물이 지속적으로 발생되는 것을 관찰하였으며, 생성된 부식생성물의 Fe: Ni: Cr의 비는 7.48: 1.21: 1.32로서 Ni/Fe의 비가 0.16이었으며 $Ni_{0.3}Cr_{0.4}Fe_{2.3}O_4$의 구조를 가지는 mixed ferrite인 것으로 측정되었다.

Abstract

High temperature - high pressure apparatus was developed for simulating nickel ferrite corrosion products. Nickel base alloy(Inconel 690) and iron base alloy(SA106 Gr.C) in the corrosion product generator were corroded at 270℃. Ni ions and Fe ions dissolved by corrosion reaction were transported to the corrosion product accumulator through high pressure balance stainless steel tube.

To evaluate the property of simulated corrosion products, test solution analysis, scanning electron microscope observation, EDX analysis, and X-ray diffraction analysis were performed. SEM observation of corrosion product showed the typical micro-structure of oxide layer and proved that the corrosion product layer continuously grew in high temperature solution. According to EDX analysis, the chemical composition of simulated corrosion product was Fe: Ni: Cr = 7.48: 1.21: 1.32 and micro-structure of corrosion products was mixed ferrite spinel structure ($Ni_{0.3}Cr_{0.4}Fe_{2.3}O_4$).

1. 서론

가압경수로에서 발생되는 방사화 부식생성물은 주로 발전소의 1차측인 증기발생기에서 생성된 부식생성물이 핵연료 표면에 침착 되어 노심 내의 중성자에 의해 피폭되어 방사화 된 후 다시 노심 밖으로 유출되어 구조재 표면에 부식피막 형태로 쌓이게 되어 그 부위의 방사선량을 높이게 된다. 방사화 부식생성물은 발전소 내 작업 종사자들의 피폭량의 큰 비중을 차지하고 있으므로 이러한 방사화 부식생성물의 발생을 억제하거나 줄이는 방안을 연구하는 것이 최근 원자력 발전소 수화학 연구의 중요 현안이 되고 있는 실정이다. 방사화 부식생성물은 증기발생기 세관에 사용되는 니켈 기지 합금이나 스테인리스 강이 부식되면서 발생하는 부식생성물이 대부분으로서 조성은 주로 비화학양론적인 니켈 페라이트($Ni_xFe_{3-x}O_4$)가 주를 이룬다[1]. 비화학양론적인 니켈 페라이트의 조성은 니켈과 철의 원자 비에 따라 결정되며 Ni/Fe 비가 1인 경우에는 x=1로서 $NiFe_2O_4$가 되며 Ni/Fe 비가 0.5 미만인 경우에는 x<1이 되지만 Ni/Fe 비가 0.5 초과인 경우에는 니켈 페라이트가 아닌 NiO 같은 다른 니켈 화합물질이 된다[2]. 본 연구에서는 취급이 난해한 방사화 부식생성물을 대신하여 발전소 운전조건과 유사한 환경하에서 발생되는 부식생성물을 모사하여 부식생성물의 발생거동과 특성을 규명하기 위한 기초 연구를 다루고 있다.

2. 실험 절차

1. 고온 고압용 부식생성물 발생 장치

가압경수로의 1차측 수화학조건은 첨가되는 붕산과 수산화 리튬에 의해 약산성으로 유지되며, 1차측의 가동 온도 범위는 230 ~ 330℃이다. 이러한 조건에서의 니켈과 철의 용해도는 그림 1에서 보이는 것처럼 온도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 알려져 있다[3]. 원자력발전소 1차측 내에서의 방사화 부식생성물 발생 과정을 살펴보면, 상대적으로 온도가 낮은 증기발생기 계통이나 배관재의 cladding 부위에서 니켈 이온과 철 이온이 부식반응에 의하여 냉각수 내로 용해되고 이러한 이온들은 핵연료 표면에서 온도가 증가함에 따른 용해도 감소로 인하여 산화물의 형태를 가지고 석출되게 된다. 본 연구에서는 발전소에서 발생되는 방사화 부식생성물과 유사한 조성과 발생 기구를 가지는 부식생성물을 발생시켜 그 특성을 분석하는데 그 목적이 있으므로, 발전소 분위기와 비슷한 온도 구배를 가질 수 있도록 부식생성물 발생장치를 설계 및 제작하였다. 니켈 합금과 탄소강은 증기발생기의 운전온도 범위인 270℃내외의 온도를 유지하는 부식생성물 발생장치에서 부식 반응이 일어나며, 부식 반응의 결과로 발생되는 니켈 이온과 철 이온은 고압경계로 이루어진 세관을 통하여 상대적으로 고온으로 유지되는 부식생성물 포집 장치로 이동하게 된다. 부식생성물 발생장치와 포집장치는 고온 고압경계로 이루어진 폐 회로를 구성하게 되어 지속적으로 부식물 생성과 포집이 이루어지도록 고안되었다. 이러한 설계요건을 기준으로 제작된 부식생성물 발생계통의 설계도를 그림 2에 나타냈다.

사용되는 시험편의 재질이 니켈 합금이므로 상온 대기 중에서 형성된 기존의 산화막에 의하여 고온 수화학 조건하에서도 자연적으로는 거의 부식이 발생하지 않을 것으로

판단된다. 따라서 외부로부터 인위적으로 시험편이 anodic polarization이 되도록 전위를 인가하는 방법이 제시되었다. 이를 위해서는 시험편과 외부의 전압장치를 전기적으로 연결시켜주는 장치가 필요하며, 이 장치는 시험편과 압력용기간의 갈바닉 부식을 방지하는 기능도 가져야 한다. 니켈 기지 합금과 고온 고압 장비의 구조재로 사용되는 304 stainless steel이 수화학 환경하에서 전기적으로 연결되어 있을 경우에는 갈바닉 반응에 의하여 니켈 기지 합금은 cathodic protection이 되어 방식 되고 304 stainless steel은 anodic activation되어 부식률이 증가하는 현상이 발생할 수 있기 때문이다. 그림 3에 시편 holder의 설계도와 시편 holder를 지지하는 지지판의 설계도를 실었다.
발생된 부식생성물이 지속적으로 포집장치에서 석출될 수 있도록 부식생성물 발생장치와 포집장치는 실험 용액의 누수와 큰 온도변화 없이 고압경계를 유지하면서 연결되도록 제작되었다. 두 압력용기 간에 압력 차가 없으므로 유체의 흐름을 발생시킬 수 있는 구동력을 제공하기 위하여 마그네틱 펌프를 제작하여 loop에 설치하였다. 상온에서의 펌프유량을 측정한 결과 대략 10cc/분으로 관찰되었다. 마그네틱 펌프의 설치 목적이 부식생성물 발생장치와 포집장치 간의 유동 확보에 있으며, 실험 용액이 포집장치에 머무르는 시간이 길어질수록 부식생성물의 발생율이 증가할 것이므로 본 연구의 목적인 부식생성물 발생량을 증가를 위해서는 이 정도의 유량은 적절한 것으로 판단된다. 포집률을 증대시키기 위하여 유량을 최소화할 예정이므로 loop을 통과하는 동안 용액의 온도강하가 예상되었다. 이러한 온도강하를 최소화하기 위하여 loop의 모든 pipe에는 heating tape을 장착하여 일정온도 이상으로 유지할 수 있도록 제작하였다.

2. 실험 절차

부식생성물 발생 실험은 다음과 같은 조건을 가지고 수행되었다. 2.5 liter의 증류수를 고온 고압 부식생성물 발생 장치에 채우고 제작된 고온용 시편 홀더에 니켈 기지 합금인 Inconel 690 시편과 철 기지 합금인 SA 106 Gr.C 강을 직사각형 형태로 가공하여 부식생성물 발생기 내부에 시편 홀더 지지대에 부착시켜 삽입하였으며, 실험에 사용된 니켈 기지 합금인 Inconel 690 강과 철 기지 합금인 SA 106 Gr.C 강의 조성표는 표 1에 실은 것과 같다. 실험에 사용된 수용액은 실험실에 구비되어있는 증류수 생성기를 이용하여 자체 생산한 증류수를 이용하였으며, 용액 내의 용존 산소를 제거하기 위하여 부식생성물 발생 장치의 온도를 올리기 전에 마그네틱 펌프를 이용하여 loop내의 용액을 순환시키며 질소 장입을 수행하였다. 반응기 두 개의 온도차에 따른 니켈과 철 이온의 용해도 차를 이용하여 입자성 부식생성물을 발생시키기 위하여, 부식생성물 발생기의 온도는 270℃, 부식생성물 포집기의 온도는 300℃로 설정하여 실험을 수행하였다. 두 반응기 사이의 유체 이동은 loop에 설치된 magnetic pump를 이용하여 확보하였으며, 유량은 약 10cc/분이었다. 니켈 기지 합금의 부식량을 증대시키기 위하여 potentiostat을 이용하여 정전류를 시편에 가해주면서 실험을 수행하였는데, 실험을 수행하는 시간이 지남에 따라 일정한 전류값을 유지하는데 전위가 상승하는 현상을 나타냈다. 실험에 사용된 potentiostat의 운전 허용 범위에 따라 전위값이 최대값을 넘지 않도록 인가 전류값을 변화시켜 주었으며, 초기의 인가 전류값은 1.5mA 이었으나 최종 인가 전류값은 0.758mA 이었다. 부식생성물 발생

실험은 97일간 수행되었으며 실험이 끝난 후 용액은 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer(ICPMS)를 사용하여 성분 분석을 수행하였다. 발생된 입자성 부식생성물을 포집하기 위하여 부식생성물 포집기용 고온 고압 용기에 삽입한 금박에 석출된 부식생성물과 포집기 내벽에 침착 된 부식생성물은 실험이 끝난 후에 주사전자 현미경과 EDX, X-ray 회절법을 이용하여 미세구조 관찰과 성분 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

1. 수용액 분석

부식반응 결과로 생성되는 이온들의 종류와 용액 속에 존재하는 이온량을 분석하기 위하여 실험이 끝난 후의 용액 속에 들어있는 원소들의 함량을 ICPMS를 이용하여 조사하였으며, 표 2에 실험에 사용된 증류수와 각각의 실험별 시료에 대한 조성 분석결과를 나타내었다. 각 원소에 대한 실험 결과치는 증류수에 포함되어 있는 양을 제외한 값으로서 실험의 결과로 발생한 양만을 나타내고 있다. 시료에 대한 측정 결과를 보면, 실험용액에서 검출되는 모든 원소들이 증류수에 포함되어 있긴 하나 실험 후 용액에 포함되어 있는 값에 비해 매우 작은 것으로 미루어보아 실험 결과에 포함되어있는 원소들의 대부분은 시편이나 부식생성물 발생 장치로부터 나온 것을 알 수 있다. 시편의 재질인 SA106 Gr.C 강과 Inconel 690 강에 함량이 높은 Fe, Ni, Cr의 검출량은 상당히 높은 편이었으며, 함량이 낮은 원소들의 검출량은 매우 낮은 경향을 나타내었다. 용액 내에 존재하는 성분들의 함량을 살펴보면 크롬의 함량이 매우 높고 니켈/철의 비도 0.57인 등 발생된 부식생성물의 조성과는 상당히 다른 값을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 ICPMS를 통한 분석으로 검출된 원소들의 함량은 원소들의 성분 중에서도 이온 상태로 용액 속에 존재하는 성분들의 양이므로 용액 분석 결과로는 금속의 부식 정도를 직접적으로 판단할 수는 없다. 부식반응의 결과로 금속으로부터 용액 속으로 방출되는 이온들 중 상당량은 부식생성물을 생성시키는데 소비되기 때문이다.

2. SEM 관찰

고온 고압 부식생성물 발생 장치로부터 생성된 부식생성물 중 부식생성물 포집기에 삽입한 금박에 침착 된 부식생성물을 채취하여 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 생성된 부식생성물 층은 사진에서도 알 수 있듯이 전형적인 산화물의 미세조직인 침상 형태를 가지고 있는 것으로 관찰되었으며 시간에 따라 점진적으로 성장하여 형성된 것으로 판단된다. 이를 통해 본 연구를 위하여 제작된 고온 고압 부식생성물 발생 장치에서 실험이 진행되는 동안 시간에 따라 연속적으로 부식생성물이 발생되는 것을 알 수 있다.

부식생성물 포집용 압력용기의 내벽에도 실험 기간 중에 발생된 부식생성물이 층을 이루며 침착 되어 있었다. 이러한 부식생성물 층을 채취하여 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 사진을 그림 5에 실었다. 금박에서 채취한 부식생성물과는 다르게 좀더 균일한 형태를 가지고 부식생성물이 성장해있는 것을 알 수 있으나 이는 취급과 시료 제작 과정에서의

차이가 큰 것으로 판단된다. 금박 표면에서 채취한 부식생성물은 금박의 표면이 균일하지도 않을 뿐만 아니라 층의 두께도 상대적으로 얇아서 부스러지기 쉬운 관계로 취급에 어려움이 있었던 관계로 SEM 관찰 시료를 만드는데 작은 부식생성물 조각들을 이용한 반면에 포집기 내벽에서 채취한 부식생성물은 취급이 상대적으로 용이하여 큰 조각의 부식생성물을 시료로 사용하여 손상되지 않은 부분을 선택적으로 관찰할 수 있었기 때문이다. 그러나 부식생성물을 확대하여 관찰한 결과, 금박에서 채취한 시료와 포집기에서 채취한 시료 사이의 차이점은 발견할 수 없었다.

포집용 압력용기 내벽에 침착 된 부식생성물 층을 채취하여 육안으로 관찰한 결과, 수용액이 있는 측의 부식생성물 층과 내벽과 닿아 있는 쪽의 부식생성물 층과는 차이점을 발견할 수 있었다. 수용액과 닿아있는 쪽의 부식생성물은 검은 빛을 띠고 있었으며 부식생성물이 결을 이루며 쌓여있는 것으로 관찰 되었으나, 용기 내벽과 닿아있던 부분은 흰색의 매끈한 층을 이루고 있는 것으로 관찰되었다. 용기 내벽과 닿아있던 부식생성물 층을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 사진을 그림 6에 나타내었다. 포집기 내벽에 침착 된 부식생성물 층에서 용액과 닿아있던 표면을 관찰한 사진인 그림 5와 그림 6을 비교해 보면, 포집기 내벽 측에 닿아있던 부분은 훨씬 더 매끈한 표면을 가지고 있으며 산화물이 더 조밀한 구조를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 양측 표면 모두 산화물의 전형적인 미세구조인 침상 형태를 보이고 있으나, 서로 다른 성분을 가지는 산화물 층인 것으로 판단되어 성분 분석을 수행하였으며 그 결과는 다음의 부식생성물의 성분 분석에 기재하였다.

3. EDX 조성 분석

생성된 부식생성물의 성분을 분석하기 위하여 주사전자현미경 관찰과 동시에 EDX를 이용하여 성분분석을 수행하였다. 그림 7은 포집기 내부에 설치한 금박 표면에 침착 된 부식생성물의 성분분석 결과이다. 작은 조각으로 나누어진 부식생성물 시료를 SEM 관찰용 시편 홀더에 carbon tape을 이용하여 부착시킨 후에 SEM과 EDX를 이용하여 분석을 수행하였기 때문에 조성분석 결과에 탄소 성분이 측정된 것으로 판단된다. 실제 발전소에서 발견되는 방사화 부식생성물의 대표적인 조성은 Fe: Ni: Cr의 비가 78: 20: 2로서 $Ni_{0.6}Fe_{2.4}O_4$로 표시할 수 있으며, Ni/Fe 비가 0.5 일 때 $NiFe_3O_4$의 형태로 존재하고 Ni/Fe 비가 0.5 미만인 경우에는 $Ni_xFe_{3-x}O_4$ ($x<1$), Ni/Fe 비가 0.5 초과인 경우에는 NiO 등의 다른 니켈 화합물로 존재한다고 알려져 있다[2]. 본 연구에서 생성된 부식생성물을 관찰한 결과 Fe: N: Cr의 비는 7.48: 1.21: 1.32로서 Ni/Fe의 비가 0.16이었으며 $Ni_{0.3}Cr_{0.4}Fe_{2.3}O_4$의 구조를 가지는 mixed ferrite인 것으로 측정되었다. 실제 발전소의 경우보다 Cr의 함량이 높게 나온 것은 발전소의 경우에는 증기발생기 전열관의 니켈 기지 합금의 표면적이 매우 크므로 니켈의 부식량이 높은 반면에, 본 연구에서 사용된 장비는 니켈 기지 합금의 부식면적은 상대적으로 작고 크롬이 합금원소로 들어있는 304 stainless steel을 장비의 구조재로 사용하였기 때문에 니켈 원소 대비 크롬 함량이 높아진 것으로 판단된다.

실험이 끝난 후에 부식생성물 포집기 내벽을 관찰한 결과, 금박에 침착 된 부식생성물 층보다 두꺼운 부식생성물 층이 내벽에 침착 되어있는 것을 발견하고 부식생성물 층을

채취하여 분석을 수행하였다. 포집기 내벽에서 채취한 부식생성물의 표면 중에서 수용액과 닿는 쪽의 표면을 EDX를 이용하여 분석한 결과를 그림 8에 실었다. 포집기 내벽 측에서 채취한 시료는 금박에서 채취한 시료에 비해 상대적으로 두껍고 단단하여 취급이 용이한 편이어서 큰 부식생성물 조각을 분석에 사용할 수 있었다. 따라서 금박에서 채취한 시료의 결과와는 다르게 탄소 성분은 검출되지 않았으며, 다른 성분은 Si를 제외하고 거의 유사한 값을 나타냈다. 부식생성물에 포함되어있는 Fe: Ni: Cr의 비는 7.38: 0.64: 1.65였으며 이를 통하여 부식생성물의 조성을 계산한 결과 $Ni_{0.2}Cr_{0.5}Fe_{2.3}O_4$의 구조를 가지는 mixed ferrite인 것으로 판단되었다. 금박에 침착 되었던 부식생성물에 비하여 크롬의 함량이 상대적으로 높은 이유는 포집기의 내벽을 구성하고 있는 304 stainless steel이 고온에서 부식반응을 일으켜 크롬 이온이 용해되고 이러한 크롬 이온이 부식생성물을 이루는데 기여해서 발생된 것으로 보인다.

부식생성물 포집기 내벽에서 부식생성물 층을 채취하여 관찰한 결과, 부식생성물의 표면 중에서 용액과 닿아있던 부분과 포집기 내벽과 닿아 있던 부분의 색과 구조가 서로 다른 것을 관찰하였다. 그림 9에 나타낸 분석결과는 포집기 내벽에서 채취한 부식생성물 층의 내벽과 닿아있던 표면을 EDX를 이용하여 조성 분석한 결과이다. 흰색의 매끄러운 표면을 가지고 있는 부식생성물의 표면은 대부분이 SiO_2인 것으로 분석되었다. 금박에서 추출한 부식생성물이나 내벽에서 추출한 부식생성물의 용액 측 표면을 분석한 결과에서도 Si 성분은 비교적 높은 함량을 보였으나 mixed ferrite의 성분이 관측된 반면에, 포집기 내벽에서 추출한 부식생성물의 내벽 측 표면은 Fe나 Ni, Cr 성분이 전혀 검출되지 않았다. 이러한 현상은 실험에 사용된 증류수나 기타 부품에 함유되어있던 Si 원소가 산화되면서 실험이 시작되고 나서 짧은 기간 내에 이미 포집기의 내벽에 침착 되었고, 이러한 SiO_2 층 위로 부식생성물이 침적된 것으로 판단되나 명확한 원인과 현상은 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다. 비교 분석의 용이함을 위하여 EDX를 이용한 채취 부위별 각 부식생성물의 조성 분석 결과를 표 3에 실었다.

4. 결론

제작된 고온 고압용 부식생성물 발생 장치에서 니켈 합금과 탄소강은 증기발생기의 운전온도 범위인 270℃내외의 온도를 유지하는 부식생성물 발생장치에서 부식 반응이 일어나며, 부식 반응의 결과로 발생되는 니켈 이온과 철 이온은 고압경계로 이루어진 세관을 통하여 상대적으로 고온으로 유지되는 부식생성물 포집 장치로 이동하게 된다. 부식생성물 발생장치와 포집장치는 고온 고압경계로 이루어진 폐 회로를 구성하게 되어 지속적으로 부식물 생성과 포집이 이루어지도록 고안되었다. 시편과 구조재의 갈바닉 반응을 방지하고 시편에 anodic current를 가해주기 위하여 Rulon LR 재질의 시편 홀더를 제작하여 부식생성물 발생용 고압 용기 내에 삽입하였다.

부식반응 결과로 생성되는 이온들의 종류와 용액 속에 존재하는 이온량을 분석하기 위하여 실험이 끝난 후의 용액 속에 들어있는 원소들의 함량을 조사하였다. 용액 내에 존재하는 성분들의 함량을 살펴보면 크롬의 함량이 매우 높고 니켈/철의 비도 0.57인 등

부식생성물의 조성과는 상당히 다른 값을 가지는 것을 알 수 있다. 부식 반응의 결과로 금속으로부터 용액 속으로 방출되는 이온들 중 상당량은 부식생성물을 생성시키는데 소비되기 때문에 용액 조성 분석을 통해서는 금속의 부식률을 직접적으로 판단할 수는 없다. 주사전자현미경을 이용한 관찰에서 생성된 부식생성물 층은 전형적인 산화물의 미세조직인 침상 형태를 지닌 부식생성물이 시간에 따라 점진적으로 성장하여 형성된 것으로 판단되었다. 본 연구에서 생성된 부식생성물을 관찰한 결과 Fe: Ni: Cr의 비는 7.48: 1.21: 1.32로서 Ni/Fe의 비가 0.16이었으며 $Ni_{0.3}Cr_{0.4}Fe_{2.3}O_4$의 구조를 가지는 mixed ferrite인 것으로 측정되었다. 실제 발전소의 경우보다 Cr의 함량이 높게 나온 것은 발전소의 경우에는 증기발생기 전열관의 니켈 기지 합금의 표면적이 매우 크므로 니켈의 부식량이 높은 반면에, 본 연구에서 사용된 장비는 니켈 기지 합금의 부식면적은 상대적으로 작고 크롬이 합금원소로 들어있는 304 stainless steel을 장비의 구조재로 사용하였기 때문에 니켈 원소 대비 크롬 함량이 높아진 것으로 판단된다.

EDX 를 이용한 부식생성물의 조성 분석 결과를 부가적으로 확인하기 위하여 X-ray 회절법을 이용하여 부식생성물의 성분 분석을 수행하였다. 그림 10에 나타난 것처럼 X-ray 회절법을 이용하여 분석한 결과도 EDX 를 이용한 분석결과와 거의 동일한 결과를 나타내었으나, 오히려 많은 noise 를 내포하고 있어서 정확한 성분분석은 EDX 를 이용한 편이 우수한 것으로 판단된다.

참고문헌

[1]. KEPRI, 원전 1차계통 방사선량 감소기술 개발, KRC-90N-J04, 1993

[2]. A.K. Strasser, J. Santucci, "Corrosion Product Buildup on LWR Fuel Rods", EPRI NP-3789, 1985

[3]. Y.L. SANDLER and R.H.KUNIG, Nucl. Sci. Eng., 77, 211 (1981)

후기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 "원자로 일차계통 오염 최소화 방안 연구-입자성 부식생성물 제거를 위한 마그네틱 필터 개발연구"의 일환으로 수행되었음.

표 1. 니켈 합금 Inconel 690과 철 합금 SA106 Gr.C의 조성표

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ti	Al	Cu	Co	Ni	Fe
SA106 Gr.C	0.19	1.22	0.009	0.007	0.27	0.05	-	0.029	0.013	0.003	0.11	Bal.
Inconel 690	0.02	0.26	0.004	0.001	0.33	29.5	0.32	-	-	0.012	Bal.	10.4

표 2. 실험에 사용된 증류수와 실험 후 용액의 조성 분석

Element	Mass	Distilled Water	Test Solution
Cr	53	0.1080 ppb	105.10 ppb
Mn	55	0.0807 ppb	5.68 ppb
Fe	57	0.3026 ppb	70.84 ppb
Ni	60	0.0844 ppb	40.80 ppb
Cu	63	0.0374 ppb	16.02 ppb
Zn	66	0.0478 ppb	56.82 ppb

표 3. 생성된 부식생성물의 EDX 조성 분석 결과

Elements	#1(Wt%)	#1(At%)	#2(Wt%)	#2(At%)	#3(Wt%)	#3(At%)
C	16.50	29.10				
O	33.98	44.97	42.30	61.99	47.86	62.71
Al	3.08	2.41	6.41	5.57	3.98	3.09
Si	12.73	9.60	24.53	20.48	40.31	30.09
Ca	7.37	3.89	3.91	2.29	7.85	4.10
Cr	3.25	1.32	3.66	1.65		
Fe	19.73	7.48	17.59	7.38		
Ni	3.36	1.21	1.60	0.64		

#1. 금박에서 추출한 부식생성물
#2. 부식생성물 포집기 내벽에 침착 된 부식생성물의 용액 측 표면
#3. 부식생성물 포집기 내벽에 침착 된 부식생성물의 내벽 측 표면

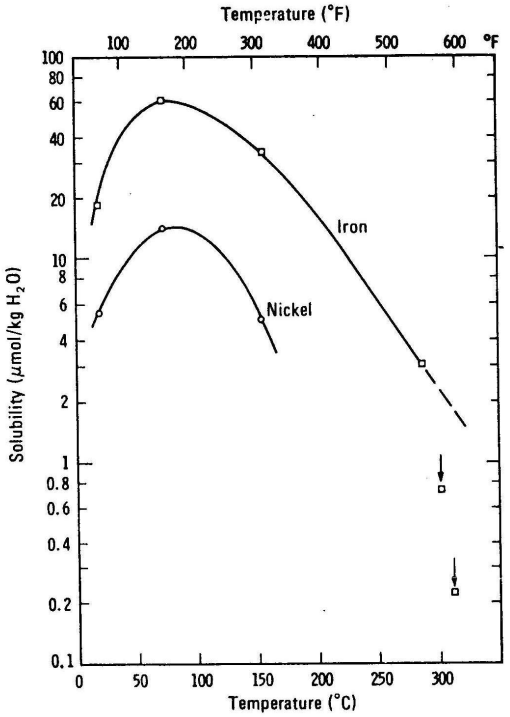


그림 1. 0.2M 붕산이 첨가된 수용액에서 온도 변화에 따른 철과 니켈의 용해도 변화 [1]

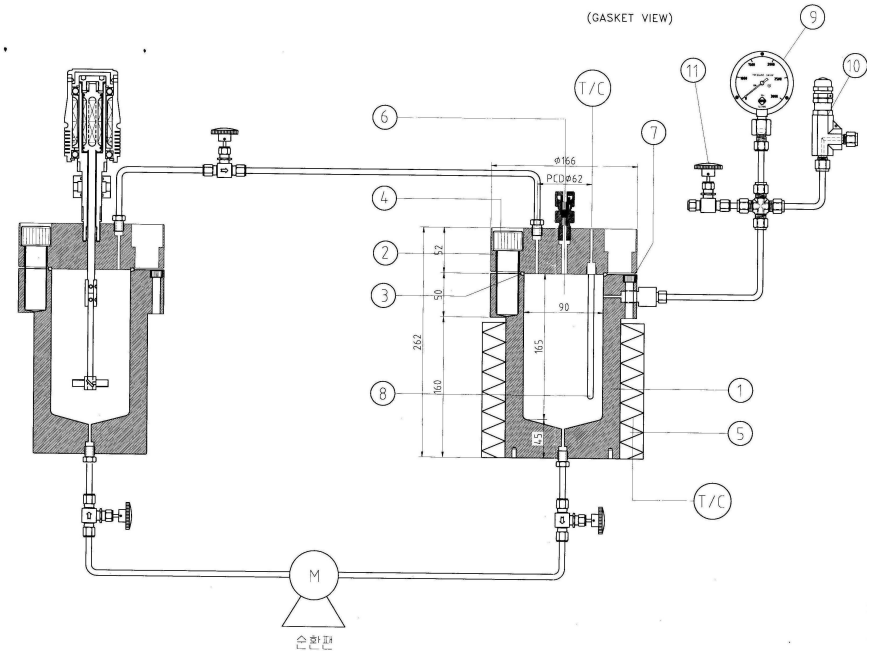


그림 2. 고온 고압용 부식생성물 발생계통

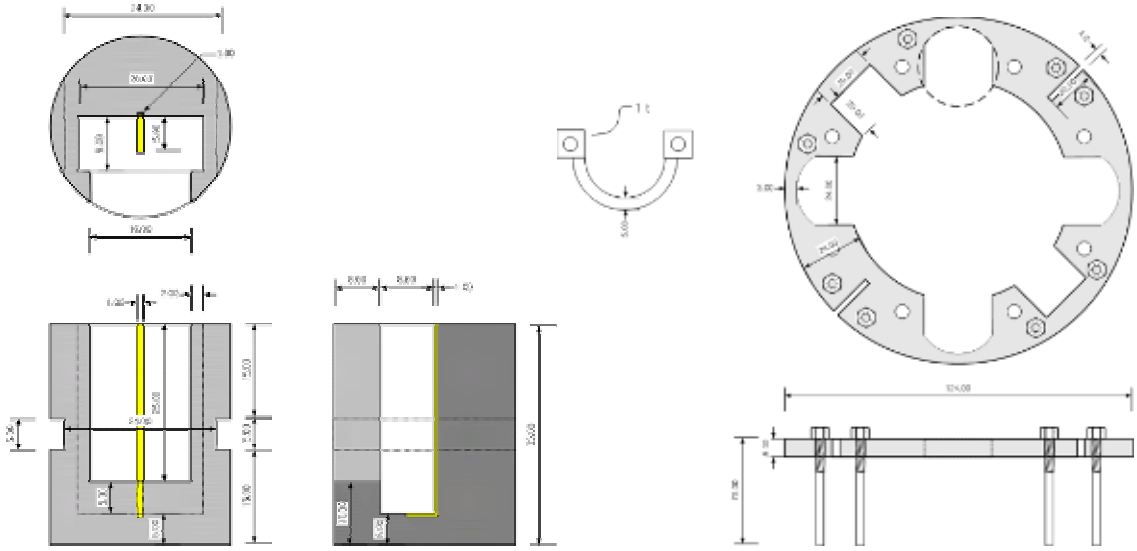
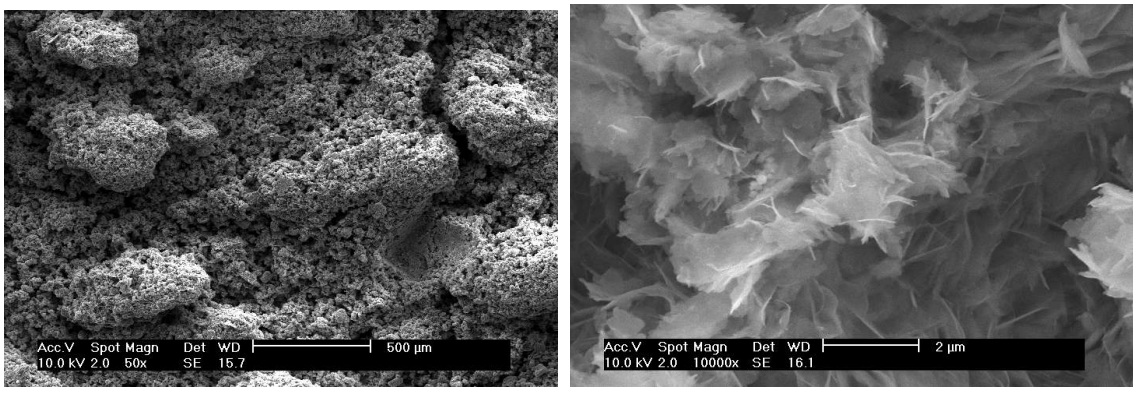
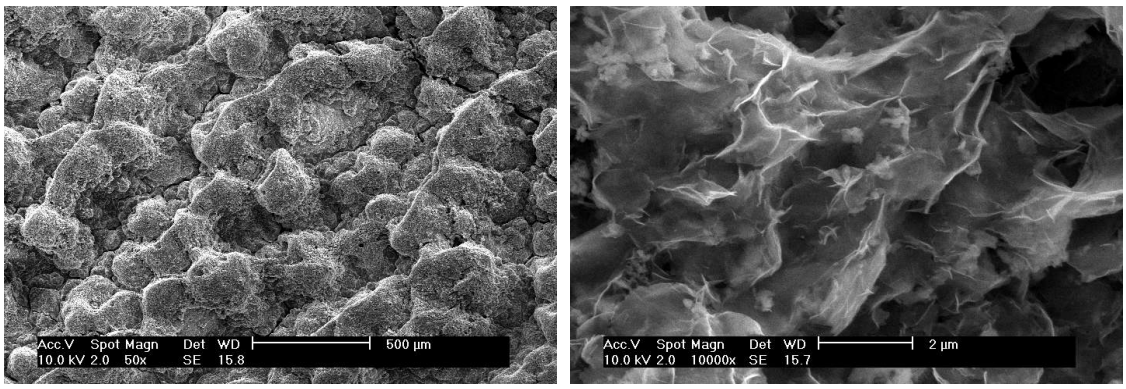


그림 3. 고온 고압용 시편 홀더와 시편 홀더 지지대



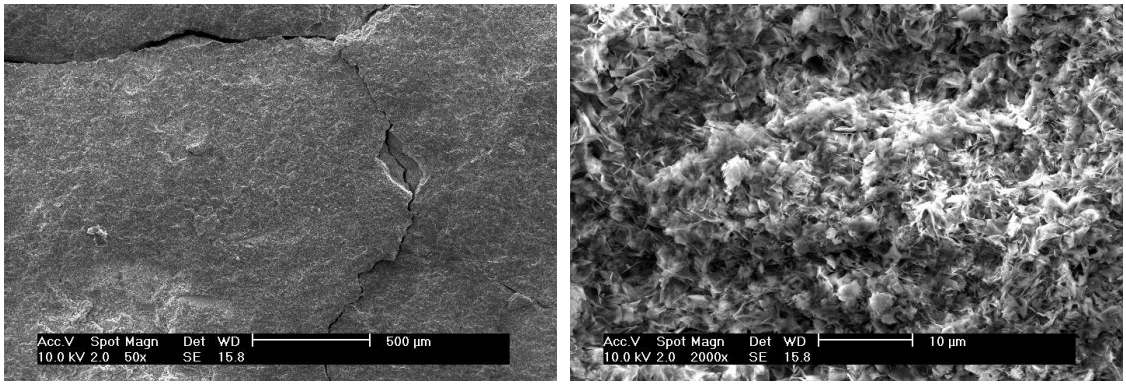
(a) (b)

그림 4. 금박에서 추출한 부식생성물 (a)×50, (b)×10,000



(a) (b)

그림 5. 포집용 압력용기 내벽에서 추출한 부식생성물 (a) ×50, (b) ×10,000



(a) (b)

그림 6. 포집용기 내벽에 닿아있던 부식생성물 (a) ×50, (b) ×2,000

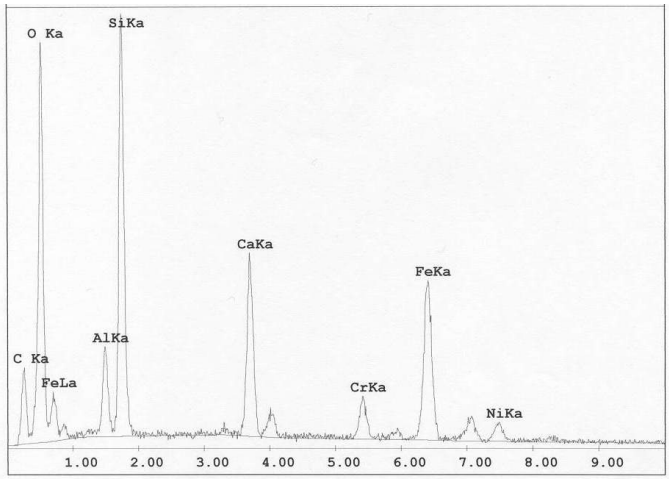


그림 7. 금박 표면에 침착 된 부식생성물의 EDX 분석 결과

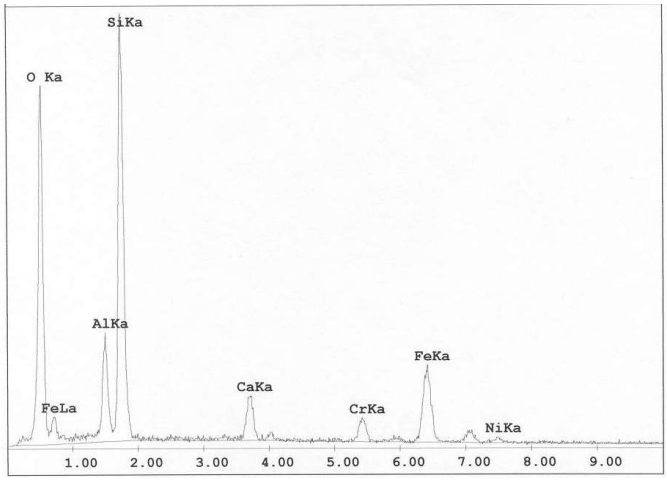


그림 8. 포집용기 내벽에서 추출한 부식생성물 층의 용액측 표면 조성 분석 결과

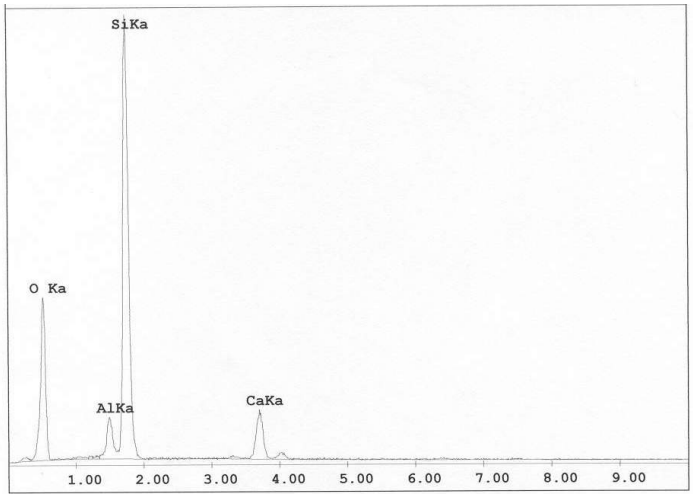


그림 9. 포집용기 내벽에서 추출한 부식생성물 층의 내벽 측 표면 조성 분석 결과

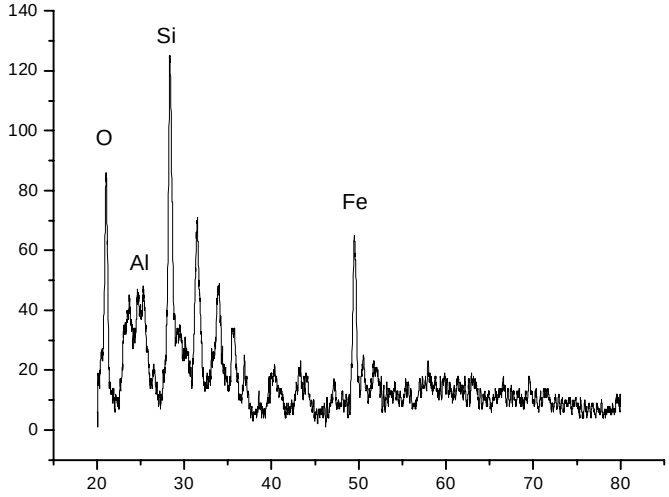


그림 10. 금박 표면에 침착 된 부식생성물의 X-ray 회절법을 이용한 분석 결과