

An Experimental Research on Uniform Corrosion of Inconel 600 and 690 Tubing Material

Inconel 600 및 690 튜브 재료의 일반 부식에 관한 실험적 연구

Yu-Sun Yeom, Jung Lae Hwang, In-Sub Jun, Soong-Pyung Kim* and Jang-Hee Yoon**

RadTek CO., LTD. 150 Dukjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

* Chosun University, 375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju

** Busan Branch, Korea Basic Science Institute, Busan 609-735

ysyeom@stmail.chosun.ac.kr

염유선, 황정래, 전인섭, 김승평*, 윤장희**

라드텍(주), 대전광역시 유성구 덕진동 150

*조선대학교, 광주광역시 동구 서석동 375번지

**한국기초과학지원연구원 부산센터, 부산시 금정구 장전동 산30번지

(Received September 14, 2005 / Approved March 8, 2006)

Abstract

By executing corrosion experiment on Inconel 600, 690 used to material of S/G tube in domestic NPP, this paper show estimation of amount of product such as Co-58, Co-60, Cr-51, Mn-54, Fe-59 which are main exposure cause to the workers in NPP. Therefore, Making the 12 samples consisted of Inconel 600, 690, whole corrosion experiment was carried out for 60 days(each pH by 20 days). The conditions of those tests were similar or more harsh than actual conditions of domestic NPP. The Glow Discharge Spectrometer(GDS) was used for quantitative analysis of results. The results of using GDS, the Inconel 600 corrodes more than Inconel 690 at pH 7 and pH 9. However, it is observed that Inconel 690 corrodes more than Inconel 600 at pH 4. Those results is estimated that test sections had the effect of transient. The long terms of experiment is required to minimize and solve the problem.

Key Words : Inconel 600/690, Corrosion Experiment, Corrosion Speed

요 약

본 논문은 국내 PWR 발전소에서 S/G tube 재료로 사용되고 있는 Inconel 600 및 690에 대한

부식 실험을 수행함으로써 작업자들의 주요 피폭원인 ^{58}Co , ^{60}Co , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe 의 생성량을 예측하고자 하였다. 이를 위해 Inconel 600 및 690 재질로 총 12개의 시편을 제작하여 실제 발전소의 운전조건과 유사하거나 가혹한 조건에서 전면 부식실험을 pH별로 20일씩 총 60일간 수행하였고, 실험 결과를 정량적으로 분석하기 위해 GDS(Glow Discharge Spectrometer) 장비를 사용하였다. GDS 장비를 이용하여 정량적으로 분석한 결과 pH 7 및 9에서는 Inconel 600이 Inconel 690에 비해 부식이 잘 되는 것으로 나타난 반면, pH 4에서는 Inconel 690이 부식이 더 잘 되는 것으로 평가되었다. 이러한 경향을 보이는 것은 과도상태의 영향이 과도하게 반영된 것에 기인한 것으로 비교적 정확한 결론을 도출하기 위해서는 장시간의 부식 실험을 수행함으로써 과도상태에 의한 영향을 최소화해야 할 것으로 판단된다.

중심단어 : Inconel 600/690, 부식 실험, 부식 속도

I. 서론

현재 상업운전 중인 국내 PWR 발전소에서 작업종사자의 주요 피폭 선원은 일차냉각재계통을 구성하고 있는 금속 재질들과 고온·고압의 냉각재가 접촉하게 됨으로써 발생하는 부식생성물이다.

부식 방지 및 감소를 위해 일차냉각재계통의 구조물들은 내식성이 큰 재질이 사용되고 있고, 또한 엄격한 수질관리를 수행하고 있기 때문에 큰 문제점은 없지만 발전소 가동 년수의 증가에 따라 냉각재계통 내에 축적된 부식생성물(CRUD : Chalk River Unidentified Deposit)이 작업자 피폭의 70% 이상을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다[1].

작업자 피폭 측면에서 가장 크게 기여하는 핵종은 ^{58}Co , ^{60}Co 으로 ^{58}Co 의 반감기는 74일로 매우 짧기 때문에 운전 초기에 곧 평형상태에 도달하는 반면, ^{60}Co 로부터 생성되는 ^{60}Co 은 생성량은 작지만 반감기는 5.27년이고, 고에너지의 감마선 방출 핵종이기 때문에 발전소 가동 년수가 증가함에 따라 중요성이 커지고 있다. 이러한 이유로 ^{58}Co 유출량의 대부분을 차지하고 있는 Inconel 600 및 690 증기발생기 전열관 사양은 모두 ^{58}Co 의 함유량을 0.1% 이하로 제한하고 있다[1].

일차냉각재계통 중 냉각재와 접촉 면적이 가장 큰 S/G tube는 총 냉각재 접촉 면적의 약 75% 정도 차지하고 있으며, 작업자 주요 피폭원인 핵종을 방출하

기 때문에 실제 발전소의 운전 조건과 동일하거나 유사한 조건에서 S/G tube 재질에 대한 일반부식에 대한 실험을 수행하여 부식 경향 및 속도를 파악함으로써 작업자에 대한 피폭선량을 예측할 필요가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 Inconel 600 및 690 재질로 실험 시편을 제작하여 일반부식 실험을 수행하였고, 실험 결과로 나타난 산화막 두께 및 부식생성물의 양을 파악하기 위해 프랑스의 Jovin Yvon에서 제작한 GDS(Global Discharge Spectrometer) 모델 JY 10000 RF 장비를 이용하여 정량적인 분석을 수행하였으며, 정량적 분석 결과에 근거하여 pH 및 Inconel 재질별로 부식 속도 및 경향을 평가하였다.

II. 연구 내용

방사성 부식생성물은 안정한 원소인 부식생성물이 냉각재와 함께 이동하다가 노심의 열전달 표면, 즉 핵연료 봉에 침적된 후 증성자나 양자와 반응하여 생성되거나 노심 재질의 금속 물질이 방사화되어 생성된다.

생성된 CRUD는 물질의 평형법칙에 따라 냉각재 전 영역으로 확산되며, 이러한 방사성 부식 생성물의 생성을 피할 순 없지만 보충수 순도유지, 절제된 수질관리 및 방사화 되기 전에 부식 물질을 정화하는 방법으로 핵연료 표면에 침적되는 부식물량을 줄임

으로서 결국 방사성 부식 생성물의 생성율을 낮출 수 있다.

원자력발전소 운전 중 일차냉각재계통을 구성하고 있는 금속 재질들과 고온·고압의 냉각재가 접촉하게 됨으로써 여러 가지 형태의 부식이 발생하게 되며, 일차적으로 금속 표면을 어느 정도 산화시켜 산화 보호피막이 형성된다.

이 산화 보호피막으로 더 이상의 부식 발생을 억제해 주지만 형성된 산화 보호 피막이 침식되거나 불완전하게 형성된 산화 보호피막의 일부가 용존 이온상(Soluble Ions) 또는 불용성 물질(Insoluble Matter)로 원자로 냉각재 내로 유입될 수 있다.

이때 원자로 내로 유입된 부식생성물 중 입자 크기가 수 마이크로 정도로 원자로 냉각재에 현탁되어 있는 산화물 상태의 부식생성물이 원자력발전소를 운영하는데 있어서 문제가 되고 있다.

원자로 구조재의 금속재질들이 처음 냉각재와 접촉하게 되면 매우 빠르게 부식이 진행되지만 부식이 진행됨에 따라 금속표면에 산화막이 형성됨으로써 냉각재와 금속재질의 직접적인 접촉이 방해를 받아 부식율이 점차 낮아지며, 결국 부식생성물의 유출과 부식이 평형상태에 도달하게 된다.

금속재질이 부식되는 동안 일부의 부식생성물들은 침식이나 용출에 의하여 냉각재 내로 유출되는데 이렇게 유출된 부식생성물들이 노심에서 방사화되어 발전소 방사선준위 증가에 중요한 원인이 되고 있다. 원자력발전소는 운전초기의 짧은 기간을 제외하면 안정한 산화막의 존재하에서 운전되기 때문에 산화막이 형성된 후 평형 상태에서의 부식과 유출이 발전소 방사선 준위에 중요한 인자가 된다.

PWR 발전소에서 방사성 피폭의 주요 원천이 되는 CRUD의 원소 구성과 선량 기여도와 부식생성물로부터 증성자 조사에 의하여 생성되는 주요 방사성 핵종들의 핵반응식을 각각 [그림 1]과 [표 1]에 각각 나타내었다[1].

[그림 1]에서 보여 주듯이 ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{51}Cr 순으로 CRUD에 많이 포함되어 있으며 피폭측면에서는 ^{58}Co , ^{60}Co 이 대부분을 차지하고 있다.

피폭 측면에서 기여도가 큰 핵종들의 반응식을 나

타낸 [표 1]을 분석해 보면, ^{58}Co 의 반감기는 74일로 매우 짧기 때문에 운전 초기에 곧 평형상태에 도달하는 반면, ^{59}Co 로부터 생성되는 ^{60}Co 의 경우 생성량은 작지만 반감기는 5.27년으로 상당히 길고, 고에너지의 감마선을 방출하기 때문에 발전소 가동 년수가 증가함에 따라 중요성이 커진다. 또한 ^{59}Co 는 인코넬과 스테인레스강의 구성 성분인 Ni의 불순물로써 함유되어 있거나 스텔라이트의 기본 성분으로 존재하며 부식이나 마모에 의해 냉각재로 유출된다.

본 연구에서는 전면 부식 실험을 통해 Inconel 600 및 690 재질의 거의 대부분을 차지하고 있는 Fe, Cr, Ni핵종을 집중적으로 분석함으로써 부식 전·후의 거동을 파악함과 동시에 부식되는 양과 속도를 파악하고자 하였다. 이를 위해 정량적 분석 장비인 GDS를 이용하였고, 부식 시작점을 보다 합리적으로 정의함으로써 분석에 따른 오차를 최소화하였으며, 정량적 분석 결과에 근거하여 부식 경향을 파악함과 동시에 부식 속도를 계산하였다.

Table 1. Radioactive characteristics of major radionuclide

Radionuclide	Nuclear Reaction	Half life	γ energy (Kev)	Quality
Fe^{59}	$\text{Fe}58(n,r)\text{Fe}59$	45일	2,099/1,292	SS
Co^{58}	$\text{Ni}58(n,p)\text{Co}58$	74일	810	SS, Inc.
Cr^{51}	$\text{Cr}50(n,r)\text{Cr}51$	28일	320	SS, Inc.
Co^{60}	$\text{Co}59(n,r)\text{Co}60$	5.3년	1,173/1,332	Inc., St.
Mn^{54}	$\text{Fe}54(n,p)\text{Mn}54$	313일	835	SS

* SS : Stainless Steel, Inc : Inconel, St : Stellite

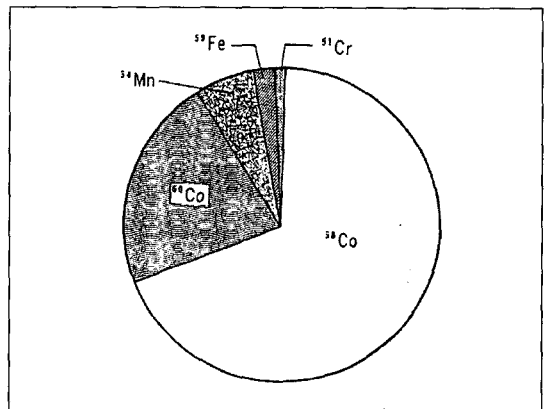


Fig. 1. Main chemical compositions of CRUD in PWR plants

부식 속도를 계산하기 위해서는 산화막을 제거한 후 무게를 측정해야 하는데, 기존의 연구결과(1-10)에 의하면 Inconel 600 및 690 재질 표면에 형성된 산화막을 제거하는 방법론은 아직 개발되지 않은 상태이다.

GDS 장비는 산화막을 제거하지 않더라도 부식 전·후로 주요 핵종에 대한 정량적인 분석을 수행함으로써 거동을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 각 핵종에 대한 부식 속도를 계산할 수 있기 때문에 산화막을 제거하는 방법론에 비해 보다 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

III. 실험 방법 및 절차

가. 실험 장치 및 조건

본 연구에서 Inconel 600 및 690 시편에 대한 부식 실험을 위해 구성한 장비는 Chemical make up tank(200L), 소형탱크(50L), 고압펌프, 3set의 3.8L Autoclave와 관련 계측기 및 밸브들이다. Closed loop로 구성된 실험장치의 layout을 [그림 2]에 나타냈었고, 시편의 holder 및 시편장착 모습을 [그림 3]에 도시하였다.

그림으로 제시한 Autoclave와 시편 holder는 316 stainless steel 재질로 되어 있으며, PWR 1차 계통수와 deoxygenated demineralized pure water에서 Alloy 600 혹은 Alloy 690과 Stainless steel 316과 부식전위의 차이는 없다. 따라서 갈바닉 부식 효과도 없는 장치로 되어 있다.

원자력발전소에 핵연료가 장전되면 12~18개월 단위로 발전소는 상업운전을 하게 되고, 한 주기는 기동운전, 출력운전, 정지운전과 예방정비기간의 4 단계로 나눌 수 있는데 각 단계별로 수처리 조건이 다르다.

따라서 본 연구에서는 발전소의 수처리 조건, 즉 pH 값을 발전소와 동등하거나 가혹한 조건으로 하여 Inconel 600 및 690에 대한 전면부식 실험을 수행하였다.

pH 변화에 따라 부식되는 양과 부식 경향 및 속도를 파악하기 위해 NaHSO_4 , 중류수, NaOH를 첨가함으로써 수질의 pH 값을 4, 7, 9로 고정하여 각 pH 별

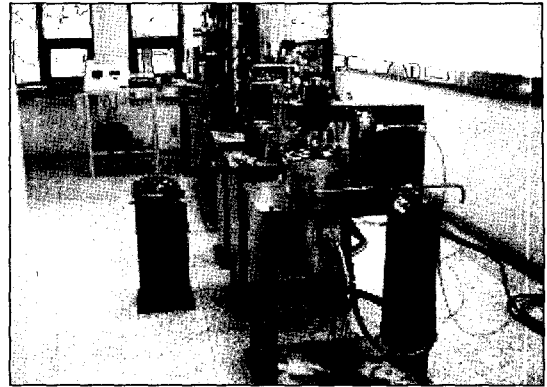


Fig. 2. Equipment for corrosion experimentation

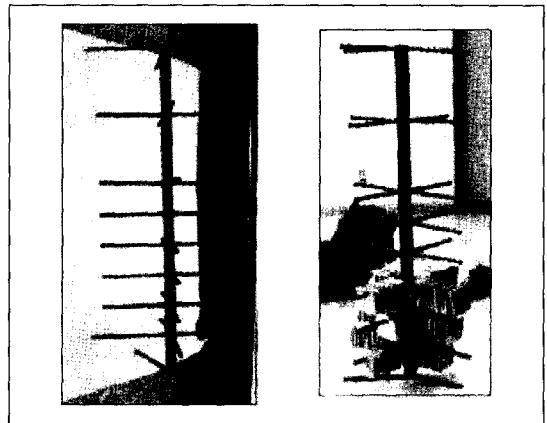


Fig. 3. Test specimens holder and installation form

로 20일간 실험을 수행하였고, 실험을 위해 사용된 온도는 315℃이다.

나. 실험 절차 및 방법

Inconel 600 및 690 재질에 대한 부식 실험을 수행하였고, 실험 결과로 나타난 부식 속도 및 경향을 분석하기 위해 정량화를 수행하였으며 이에 대한 절차 및 방법은 다음과 같다.

1) 시편 제작

- ① Inconel 600 및 690 tube를 일정한 크기로 절단한 후 압연처리 수행.
- ② 압연 처리된 tube는 Inconel 600 및 690 시편 각각에 대해 1070℃와 1100℃로 열처리 수행
- ③ 열처리된 tube는 실험조건에 맞게 20×20×2mm 크기로 각각 6개씩 총 12개 시편을 제작

Table 2. Factor of test specimen

* Inconel.

Test Specimen	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
IC* 600	20 ± 0.05	20 ± 0.05	2
IC* 690	20 ± 0.05	20 ± 0.05	2

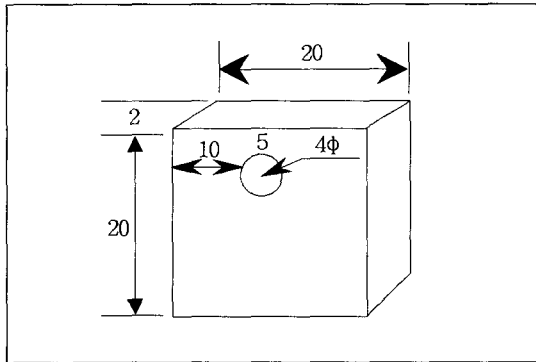


Fig. 4. Configuration of test specimen

제작한 시편의 형상과 제원을 [그림 4]와 [표 2]에 도시하였고, 실험 결과로 나타난 부식생성물의 양을 파악하기 위해서는 시편의 체적을 먼저 계산하여야

$$\text{시편 체적} = \text{가로} \times \text{세로} \times \text{두께} (\pi r^2 \times \text{두께})$$

하는데 체적 계산식에 사용된 식은 다음과 같다.

[표 2]에 제시된 시편 제원을 분석해 보면 두께에서는 기계적 공차가 존재하지 않았지만 시편의 가로 및 세로 길이에서 최대 ±0.05mm 정도의 기계적 공차가 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 시편을 20mm × 20mm 규격으로 균일하게 절단하는 과정에서 발생한 기계적 공차에 기인한 것이다.

2) 시편 무게 측정

- ① Inconel 600 및 690으로 제작된 총 12개 시편에 대해 #600, #800, #1000, #1200 grid의 sand paper를 순차적으로 사용하여 surface roughness를 일정하게 유지하기 위해 polishing 작업 수행.
- ② 각 시편에 번호를 매긴 후 아세톤 및 증류수를 사용하여 탈지 및 세척 수행.
- ③ 시편을 완전히 말린 후 10⁻⁴ gram까지 측정할 수 있는 전자저울을 사용하여 무게를 측정하였고, 그 결과를 [표 3]에 나타냄.

Table 3. A measured value of test specimen weight

IC 600	Weight(g)	pH	IC 690	Weight(g)	pH	note
V1	3.3986	9	T1	3.3211	9	Weight is average
V2	3.3485	9	T2	3.2675	9	
V3	3.4124	7	T3	3.2711	7	
V4	3.3653	7	T4	3.3313	7	
V5	3.3019	4	T5	3.2878	4	
V6	3.3815	4	T6	3.3486	4	

- ④ 시편의 무게를 측정 할 때 불확실성을 최소화하기 위해 2명이 3회씩 측정한 후, 그 결과를 평균하였음.

3) 표면 촬영

시편의 표면 상태는 실험 결과에 영향을 미칠 수 있기 때문에 시편의 표면을 균일하게 유지하기 위해 polishing 작업을 수행하였고, polish 작업이 완료된 시편에 대해서는 SEM (Scanning Electron Microscope)장비를 사용하여 표면 촬영을 하였다. 본 실험에서는 Inconel 600 및 690으로 제작된 시편들 중에 각 재질을 대표할 수 있는 시편 한 개를 선정하여 표면 촬영을 하였고, 그 결과를 [그림 5]와 [그림 6]에 도시하였다.

[그림 5]와 [그림 6]은 1500배로 시편 표면을 촬영한 것으로서 표면 거칠기는 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다.



Fig. 5. Result of SEM photographing(Inconel 600)

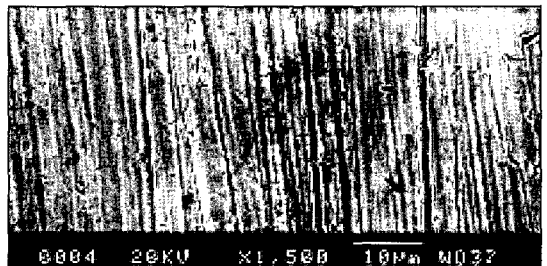


Fig. 6. Result of SEM photographing(Inconel 690)



Fig. 7. T1 Test specimen(Inconel 690)

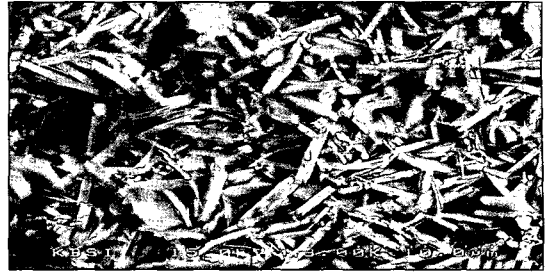


Fig. 8. T3 Test specimen(Inconel 690)



Fig. 9. T5 Test specimen(Inconel 690)

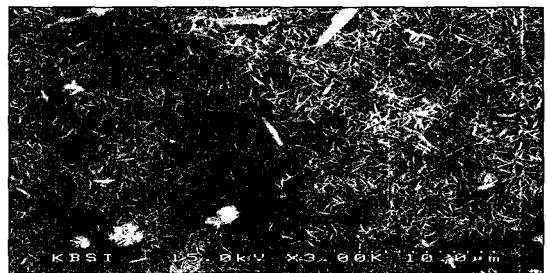


Fig. 10. V1 Test specimen(Inconel 600)



Fig. 11. V3 Test specimen(Inconel 600)

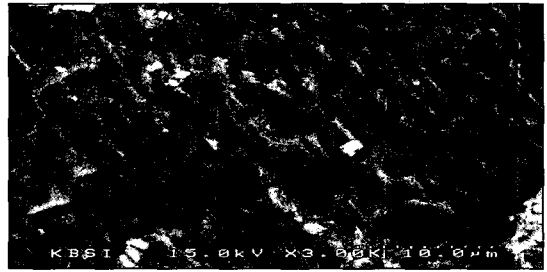


Fig. 12. V5 Test Specimen(Inconel 600)

4) 부식실험 수행

Inconel 600 및 690 재질로 제작한 시편에 대한 일반부식 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 온도는 실제 원자력발전소의 정상운전 조건과 유사하게 315°C로 설정하였으며, 실험에 관련된 유일한 조절인자는 pH 값이다.

5) 부식생성물의 표면 촬영

부식 실험을 수행하고 난 후, 부식생성물의 표면 상태를 파악하기 위해 SEM장비를 이용하여 시편 표면을 촬영하였고, 그 결과를 [그림 7]~[그림 12]에 나타내었다.

[그림 7]과 [그림 10]은 pH 9에서 실험한 결과로 Inconel 690 재질인 T1 시편의 표면 상태는 마치 모래 입자가 붙어있는 듯한 형상이고, Inconel 600 재질인 V1 시편의 표면은 실모양의 작은 입자형태로 존재하고 있다.

[그림 8]과 [그림 11]은 pH 7에서의 실험 결과인 V3 및 T3 시편의 표면 상태는 모두 작은 stick 모양의 형태이고, pH 4에서의 실험 결과인 [그림 9]와 [그림 12] 경우는 부식생물들이 덩어리 형태로 시편 표면에 뭉쳐져 있는 것을 볼 수 있다.

6) 부식생성물에 대한 정량 분석 수행

각 pH별로 20일씩 총 60일간 수행한 일반부식에 대한 실험결과를 분석하기 위해 GDS 장비를 이용하여 정량적인 분석을 수행하였으며, GDS 장비를 이용할 경우 시편의 내부뿐만 아니라 부식에 의해 시편 표면에 형성된 산화막에 대한 정량적 분석이 가능하다.

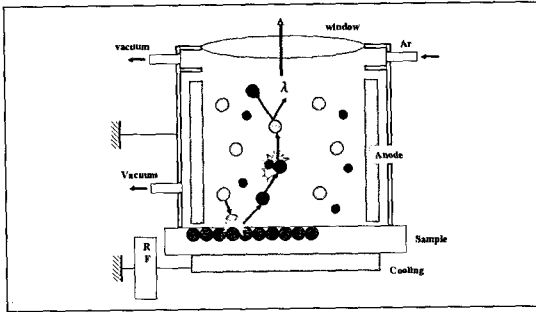
• GDS 장비의 원리

GDS는 Glow Discharge Lamp를 이용하여 시편 중의 원소를 증착하고, 다시 발광하게 한 후 Spectrometer에서 분광토록 하여 정량적으로 분석할 수 있는 장비로 구성은 Glow discharge lamp, 분광

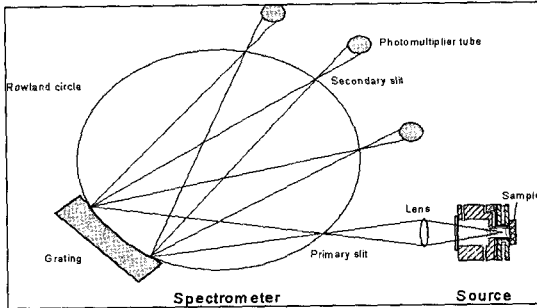
기, RF Generator(라디오 파장 발생장치), Electronic(전자장치), 컴퓨터로 되어 있다. RF Generator만을 사용하여 발생장치의 교체 없이 전도체 및 비전도체의 분석이 가능하고, 각종 금속의 성분 분석 및 비전도체의 성분 분석에 많이 사용되고 있다. 또한, Polychromator의 채널을 이용하여 깊이별 측정 가능하여 코팅물질을 층별로 분석 할 수 있다.

• GDS 주요 사양

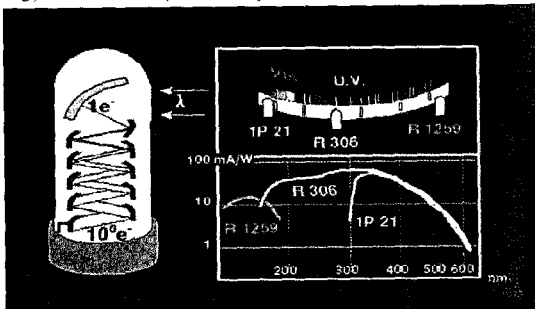
1) Sample introduction system



2) Layout of a GD instrument : high resolution polychromator



3) Photo detector(Photomultiplier Tubes)



- The measurement dynamic range: 10^{15}
- Sensitivity is high, as the dark current is low.
- Very fast response times, typically 1-2 ns for a 10%-90% change in signal.
- The main inconvenience of photomultiplier is their cost.

• GDS 장비의 분석 절차 및 방법

- 1) 분석대상 시편의 적절한 증착 조건 및 깊이별 해석 등을 결정하기 위한 예비실험 실시
- 2) 표준시편(Standard Reference Materials)을 이용하여 분석대상 시편의 함량 산출
- 3) 분석조건 : 증착 압력은 400 Pa, RF 출력은 30 W, 모델은 750 및 위상은 450
- 4) 분석 후 깊이별 측정 장치(depth profiler meter)를 이용하여 깊이 측정 및 적용

• GDS 장비의 불확실도

- 1) 원소에 대한 불확실도 : 대부분의 원소에 대하여 high resolution polychromator를 적용하기 때문에 spectral interference가 감소하며, 표준시편을 이용하여 비교 분석함으로써 각 원소에 대한 정밀도 및 정확도가 높은 결과를 산출 하였다.
- 2) Detection limit : 각 원소마다 다소의 차이는 있으나, 약 수 ppm ~ 수십 ppm
- 3) 장비의 재현성(분석결과의 재현성) : RSD %는 원소의 함량에 따라 차이는 있으나, 약 0.5 ~ 1.5 %

7) 부식 속도 계산

현재까지 Inconel 600 및 690 재질에 대한 산화막 제거 방법론을 개발되지 않지 않기 때문에 본 연구에서는 피폭 측면에서 기여도가 큰 Fe, Cr, Ni 원소에 대한 정량적인 분석을 수행함으로써 산화막 두께와 부식 속도 및 경향을 평가하였다.

IV. 결과 분석 및 검증

가. 시편 조성비 평가를 통한 결과 검증

본 연구에서 부식 실험을 위해 사용한 재질은 Inconel 600 및 690으로 이들 재질을 구성하고 있는 핵종들에 대한 정량화 결과가 없기 때문에 [표 4]와 [표 5]에 제시되어 있는 Inconel 600 및 690의 핵종 구성비를 이용하여 분석 결과를 검증하였다[1,9].

[표 4]에 제시된 각 원소의 함량은 부식이 시작되기 전 단계까지의 Fe, Cr, Ni 및 기타 원소들이 차지하는 상대적인 양을 나타낸 것이다.

Inconel 600 재질로 제작된 총 6개의 시편 중 V1, V3, V5 시편에 대해 GDS 장비를 이용하여 정량적으

Table 4. Performance results of GDS equipment for test verification of Inconel 600 and Inconel 690

Element	Composition(%) of Inconel 600			
	Original data	V1	V3	V5
Fe	6-10	8.2-8.8	8.8-9.2	8.5
Ni	72-80	73-77	70-71	74-75
Cr	14-17	13.5-17	18.5-18.8	17
Zr	-	-	-	-
Sn	-	-	-	-
Mn	1.0*	0.11*	0.14*	0.12*
C	1.15*	0.04*	0.02*	0.04*
Si	0.5*	0.18*	0.18*	0.2*
P	-	-	-	-
Cu	0.75*	0.06*	0.05*	0.06*
Co	-	-	-	-
W	-	-	-	-

* : Max. value, ** : Min. value

로 분석한 결과를 나타낸 [표 4]를 보면 V3 시편의 원소를 제외한 나머지 시편들의 Fe, Ni, Mn, C, Si, Cu 원소 함량은 기존 자료[1,9]에서 제시한 제한치 내에 포함되는 것을 볼 수 있고, V3 시편의 함량은 기존 자료에서 제시한 제한치에 비해 약 10% 정도 높게 나타났다.

[표 5]는 Inconel 690으로 제작된 총 6개의 시편 중에 시편 T1, T3, T5에 대한 정량적 분석 결과를 도식한 것으로 Inconel 600 재질과 달리 모든 시편에서의 원소 함량은 기존 자료에서 제시한 제한치[1,9] 범위 내에 포함되는 것을 볼 수 있는데, 이러한 비교·분석 결과로부터 GDS 장비를 이용하여 부식생성물에 대한 정량적 분석을 수행 할 경우 신뢰성 있는 결과를 도출 할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 부식실험 결과 분석

본 연구에서는 Inconel 600 재질로 제작된 시편 V1~V6과 Inconel 690으로 제작된 시편 T1~T6을 대상으로 pH 값에 따른 부식생성물의 양과 부식 경향을 파악하였다.

실험 결과로 나타난 산화막의 두께 측정과 산화막 내에 존재하는 핵종 분석은 GDS 장비를 이용함으로써 피폭선량 측면에서 기여도가 큰 핵종인, 원소의 부식 속도 및 경향을 파악할 수 있었다.

Table 5. Performance results of GDS equipment for test verification of Inconel 690

Element	Composition(%) of Inconel 690			
	Original data	T1	T3	T5
Fe	7-11	8.8-9.5	9.2-9.7	9-9.5
Ni	58**	60-64	57.5-59	59-60
Cr	27-31	24-30	30.5-31.5	29-30
Zr	-	-	-	-
Sn	-	-	-	-
Mn	0.5*	0.13*	0.14*	0.12*
C	0.05*	0.04*	0.02*	0.04*
Si	0.5*	0.18*	0.2*	0.18*
P	-	-	-	-
Cu	0.5*	0.06*	0.05*	0.05*
Co	-	-	-	-
W	-	-	-	-

* : Max. value, ** : Min. value

1) Inconel 690

① pH 9의 실험 결과

pH 9에서의 부식실험 결과로 나타난 T1 시편에 대한 정량적 분석 결과를 [그림 13]에 도시하였고, [그림 13]의 결과를 좀 더 세밀하게 분석하기 위해 산소에 대한 철분율의 관계로 [그림 14]에 나타내었다.

[그림 13]과 [그림 14]에서 산화막 두께의 기준점은 부식에 의해 생성된 산화막 표면이며, 시편의 부식 여부를 판단하기 위해 산소 분율을 사용하였다.

산소 분율 곡선과 분율 곡선이 만나는 지점을 부식의 시작점이라 정의하여 부식에 의해 생성된 산화막의 두께를 도출하였는데 이러한 정의는 GDS 장비에서도 일반적으로 사용하는 정의이다.

[그림 13]과 [그림 14]를 통해 볼 수 있듯이 두께가 3~8 μ m인 시편 내부에서 산소의 분율은 거의 0%에 가깝고, 부식이 시작되기 전 단계인 약 1.8~3 μ m 구간에서의 산소 분율은 약 8% 정도까지 서서히 증가하였다가 부식이 시작된 후인 1~1.8 μ m에서는 약 65%까지 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. [그림 13]과 [그림 14]에서 T1 시편의 부식시작점은 1.78 μ m이다.

부식 시작점은 부식생성물의 양과 부식 속도를 계산하는데 있어서 많은 영향을 미칠 수 있기 때문에 정확하게 정의할 필요가 있다. [그림 14]를 통해 볼

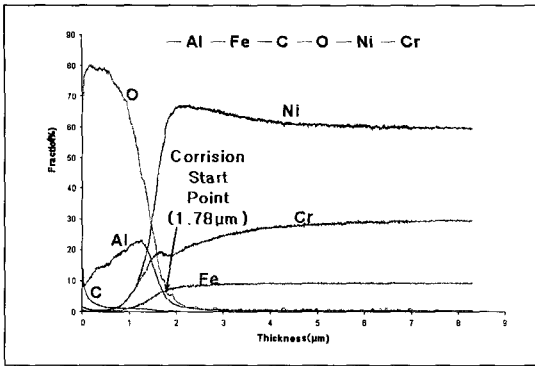


Fig. 13. Quantitative analysis result of T1 test specimen

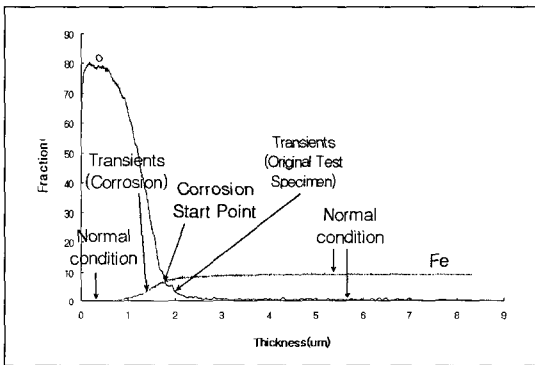


Fig. 14. element tendency of T1 test specimen

수 있듯이 원시편 측면에서 과도상태가 시작되는 지점(산소 분율이 증가하기 시작하는 지점)을 부식 시작점이라 정의하여 산화막 두께를 도출할 수 있지만 이럴 경우 많은 오차를 수반할 것으로 판단되며 이에 대한 근거는 다음과 같다.

- 본 연구는 정상 가동 중인 원자력발전소의 증기발생기 튜브에서 부식에 의해 생성된 부식 속도를 파악하는 것으로 정상상태의 값이 중요함
- [그림 14]에 의하면 정상상태는 0~1μm 구간으로 과도상태인 1~3μm 구간에 비해 짧고, 원소의 분률 또한 과도하게 높게 나타나고 있으며, 이로 인해 부식 속도를 평가하는데 많은 오차를 수반할 것으로 판단됨
- 이러한 분석에 근거하여 본 연구에서는 철 원소의 분률 곡선과 산소 원소의 분률 곡선이 만나는 지점을 부식시작점이라 정의함으로써 과도상태의 영향을 감소시킬 수 있을 것으로 판단됨

부식생성물의 표면 근처인 0~1μm 구간에서 산소 함유량은 약 80% 정도에서 포화되었다가 부식생성물 표면에서 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있고, 철의 경우 부식이 시작된 후에 산소 함유량과 반대의 경향을 보이면서 선형적으로 감소하였다가 포화상태에서는 거의 0에 가까워지는 것을 볼 수 있다.

[그림 13]을 분석해 보면 Fe, Cr, Ni 순으로 부식이 시작되는 것을 볼 수 있고, 부식이 시작됨과 동시에 이들 원소들이 거의 선형적으로 감소하였다가 포화상태에 도달하면서 이들 핵종의 분률은 거의 0에 가까워지는 것을 볼 수 있으며, T1 시편의 부식 두께는 1.78μm로 상당히 작기 때문에 포화 상태의 두께 역시 작게 나타나고 있다.

부식이 시작되면서 Al원소가 급격하게 증가하였다가 감소하는 경향을 보이면서 부식생성물 내부에 존재하는 것을 볼 수 있는데, Al원소는 피폭 측면에서 기여를 하는 핵종이 아니기 때문에 본 연구에서는 이 핵종에 대한 분석은 수행하지 않았다.

T2 시편을 정량적으로 분석한 결과 Ni, Cr, Fe 원소의 거동 경향은 [그림 13]과 거의 유사하였고, 유일한 차이는 산화막 두께로 T1 시편의 산화막 두께는 1.78μm인 반면, T2 시편의 산화막 두께는 1.16μm로 T1 시편에 비해 약 35% 정도 낮게 나타났다. 이러한 차이를 보이는 것은 시편의 surface roughness에 기인한 것이라 판단된다.

본 연구에서 사용한 시편의 두께는 2mm로 상당히 얇아 표면 조도를 일정하게 하기가 어려웠고, 이로 인해 산화막 두께에 차이가 존재하는 것으로 판단되며, 부식 속도를 계산하기 위해 사용된 산화막 두께 값은 T1 시편과 T2 시편의 평균값인 1.47μm이다.

② pH 7의 실험 결과

[그림 15]는 pH 값이 7인 조건에서 수행한 부식실험 결과를 정량화한 것으로 T3 시편에 대한 정량화 결과를 도시한 것이다.

그림을 보면 T1 시편에 비해 포화 상태의 길이가 길고, 부식에 의해 형성된 산화막 두께 또한 9.76μm로 T1 시편에 약 5배 정도 크게 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있다.

[그림 13]과 [그림 15]를 비교 분석해 보면 [그림 13]에서 Fe, Cr, Ni 원소의 분율은 부식이 시작됨과 동시에 급격하게 0에 근접하는 반면, [그림 15]에서의 경향은 다소 다르게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

즉, Fe원소의 경우 [그림 13]과 [그림 15]에서 거의 유사한 경향을 보이고 있지만 Cr, Ni 원소의 경우에는 경향이 다르게 나타나고 있다.

[그림 15]에 도시된원소는 부식이 시작된 후에 거의 선형적으로 감소하였다가 아주 서서히 0에 근접하고 있는 반면, Ni원소는 부식이 시작된 이후에 7~9 μm 구간에서 거의 선형적으로 감소하였다가 1~7 μm 구간에서 포화 상태로 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

GDS 장비를 이용하여 T4 시편을 정량적으로 분석한 결과 Ni, Cr, Fe 원소에 대한 경향은 [그림 15]에서의 경향과 거의 유사하였고, 산화막 두께 또한 큰 차이가 없었다.

[그림 15]에서 산화막 두께는 9.76 μm 이었고, T4-1과 T4-2시편의 산화막 두께는 각각 9.23 μm 와 9.48 μm 로 최대 0.53 μm 정도의 차이를 보이고 있으며, 본 연구에서 부식 속도를 계산하기 위해 사용한 산화막 두께 값은 이들 세 값을 평균한 값으로 9.49 μm 을 사용하였다.

③ pH 4의 실험 결과

[그림 16]은 pH 4에서 실험한 결과를 GDS 장비를 이용하여 정량화한 것이다. T5 시편의 정량화 결과를 도시한 [그림 16]을 통해 볼 수 있듯이 2.57 μm 에서 부식이 시작되고 있고, 부식이 시작된 이후에 Ni과 Fe은 감소를 하지만 Cr은 거의 변화가 없거나 오히려 증가하는 경향을 보이고 있다.

[그림 16]을 [그림 13] 및 [그림 15]와 비교 분석해 보면 [그림 16]에서 Fe 원소는 부식이 시작된 후 oscillation을 하면서 감소하고 있는 반면, [그림 13]과 [그림 15]에서는 oscillation 없이 0에 근접하는 경향을 보이고 있다.

Ni원소의 경우 [그림 13]에서는 부식이 시작된 이후에 거의 선형적으로 감소하였다가 0에 근접하지만 [그림 15]와 [그림 16]에서는 0에 가깝게 감소하는 것이 아니라 일정한 양을 계속 유지하는 경향을 보이고 있다.

[그림 16]의 0~1.5 μm 구간에서 Ni원소는 아주 미

세하게 감소하는 경향을 보이는 반면, [그림 15]의 1~6 μm 구간에서 Ni원소 함유량은 약 7% 정도로 일정한 값을 유지하고 있다.

T6 시편에 대한 정량적인 분석 결과 Ni, Cr, Fe 원소의 경향은 [그림 16]과 거의 유사함을 알 수 있고, 산화막 두께에서 약간의 차이가 있었다.

T5, T6-1, T6-2 시편의 산화막 두께는 각각 2.57 μm , 2.89 μm , 3.31 μm 로 최대 0.7 μm 정도의 차이를 보이고 있고, T6-2 시편을 기준으로 했을 때 상대적인 오차는 최대 22% 정도의 차이를 보였으며, 부식 속도를 계산하기 위해 산화막 두께의 평균값으로 2.92 μm 를 사용하였다.

2) Inconel 600

① pH 9의 실험 결과

pH 9에서의 실험 결과 V1 시편에 대한 정량화 결과를 [그림 17]에 도시하였고, [그림 14]에서 분석했던 방법론에 따라 부식시작점을 정의하여 산화막 두께를 도출하였다.

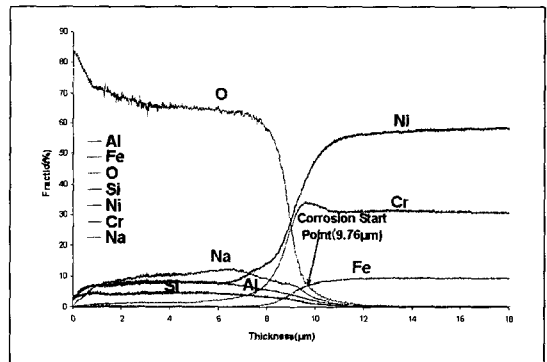


Fig. 15. Quantitative analysis result of T3 test specimen

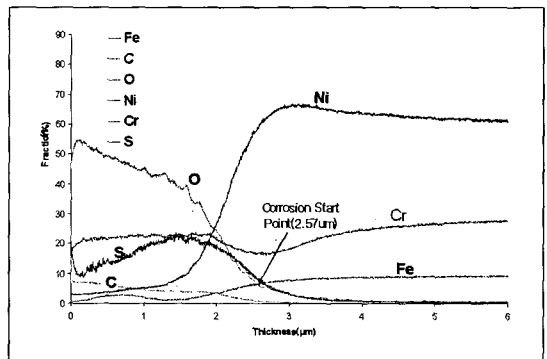


Fig. 16. Quantitative analysis result of T5 test specimen

[그림 17]에서 보여 주듯이 두께가 약 2.5~6.5 μm 인 시편에서 산소의 분률은 거의 0에 가깝고, 부식이 시작되기 전 단계인 1.7~2.4 μm 구간에서의 산소 분률은 약 7% 정도까지 서서히 증가하였다가 부식이 시작된 후인 약 0~1.7 μm 에서는 약 60%~70%까지 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

Inconel 690 재질에 대한 분석 방법과 동일한 조건을 주기 위해 산소 분률 곡선과 분률 곡선이 만나는 지점을 부식이 시작되는 지점이라 정의하여 산화막 두께를 도출하였고, [그림 17]에서 V1 시편이 부식되는 시작점은 1.71 μm 이다. [그림 17]을 분석해 보면 부식생성물의 표면 근처인 0~1 μm 구간에서 산소는 60~70% 정도의 범위에서 포화되었다가 부식생성물 표면까지 급격하게 감소하고 있고, Cr의 경우 부식이 시작된 후에 산소와 반대의 경향을 보이면서 선형적으로 감소하였다가 포화 상태에서는 거의 0에 근접하는 것을 볼 수 있는 반면, Fe원소는 Cr원소에 비해 아주 서서히 0에 근접하고 있거나 거의 감소하지 않는 경향을 보이고 있다. Ni원소의 경우도 Cr, Fe 원소와 마찬가지로 부식이 시작된 이후에 감소하고 있지만 Fe 및 Cr원소에 비해 분률은 약 15% 정도로 상당히 크고, 감소하는 경향 또한 아주 서서히 진행되고 있음을 볼 수 있다.

V2 시편의 양면을 분석한 결과 경향 자체는 [그림 17]과 거의 유사하였다. V2-1 및 V2-2 시편의 산화막 두께는 각각 1.31 μm 과 1.25 μm 로 산화막 두께의 최대 차이는 0.45 μm 로 나타났으며, 이러한 경향은 Inconel 600 재질에서 분석한 바와 같이 시편의 surface roughness에 기인한 것이라 판단되며, Inconel 600 재질로 제작하여 pH 9 조건에서 수행한 실험 결과, 부식 속도를 계산하기 위해 도출한 산화막 두께는 1.42 μm 이다.

② pH 7에서 수행한 실험

[그림 18]은 Inconel 600 재질로 제작된 시편 V3에 대해 pH 값이 7인 조건에서 수행한 부식실험 결과를 정량화한 것으로 V1 시편에 비해 포화 상태의 길이가 길고, 부식에 의해 형성된 산화막 두께 또한 상당히 크게 나타나고 있다.

V3, V4-1, V4-2 시편의 산화막 두께는 각각 12.1

μm , 11.7 μm , 12.6 μm 로 최대 오차는 약 1 μm 이고, 평균 값은 12.13 μm 로 pH 9에서 수행한 결과인 1.42 μm 에 약 8.5배 정도 크게 나타나고 있다.

[그림 18]을 [그림 17]과 비교 분석해 보면 경향이 약간 다르게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, [그림 18]에서 Fe 원소와 Cr원소의 경향이 [그림 17]에 도시한 Fe 및 Cr원소의 경향과 정반대로 0에 근접하고 있다는 것이다. [그림 18]에 제시되어 있는 Ni원소의 경우 [그림 17]과 달리 부식이 시작된 이후에 peak 값이 존재하였다가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 산소 분률에 기인한 결과라 판단된다. 즉, [그림 18]을 자세히 보면 부식이 시작된 이후 정상상태에 이르는 과정에 한 단계의 plateau가 존재하는데 이때 Ni원소 분률 또한 peak 값을 가지고 있고, peak 값의 크기는 Ni원소와 정반대의 경향을 보이고 있다.

③ pH 4에서 수행한 실험

[그림 19]는 pH 4에서 수행한 실험 결과인 V5 시편을 정량적으로 분석한 것이다. 정량화 결과 V5,

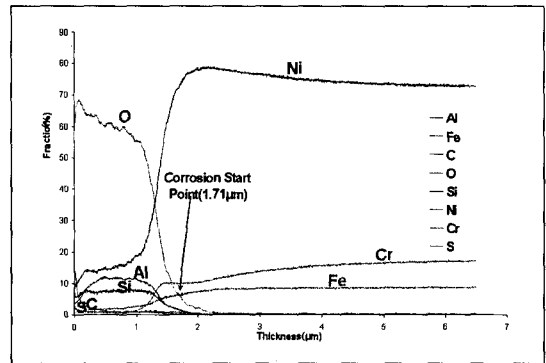


Fig. 17. Quantitative analysis result of V1 test specimen

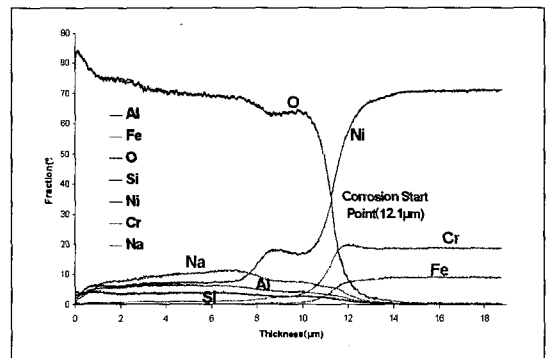


Fig. 18. Quantitative analysis result of V3 test specimen

V6-1, V6-2 시편의 산화막 두께는 각각 1.05 μ m, 1.08 μ m, 1.33 μ m 이고, 평균 두께는 1.15 μ m이며, 최대 오차는 0.25 μ m 정도이다.

V6-1 시편에서 Ni, Cr, Fe원소의 경향은 [그림 19]와 거의 유사하지만 V6-2 시편에서는 다소 차이가 있었다. 특히 Cr원소의 경우 V5 및 V6-1 시편과 달리 부식이 시작된 이후에도 거의 선형적으로 감소하였는데 이러한 차이를 보이는 것은 정량적인 분석 수행 시 문제가 있었던 것으로 판단된다.

즉, 부식이 시작되기 전 단계까지는 시편 내부에서의 산소 분율은 거의 0%에 근접하거나 0이어야 하지만, V6-2 시편을 분석한 결과에 의하면 부식이 시작되기 전인 2~3.5 μ m에서 산소 분율은 약 2% 정도로 시편 내에 존재하였다.

이는 물리적 타당성이 없는 결과로 정량분석 수행 시 전기적 노이즈에 의한 영향이 반영된 결과라 판단된다.

다. 부식 생성량 및 속도 평가

원자로용기 하부 구조재인 저합금강(SA 508)에 대한 기존의 부식실증실험 결과에 의하면[7] SA 508에 대한 부식속도를 측정하기 위해서는 실험 전 시편의 표면적 및 무게를 측정하고, 실험을 통해 시편 표면에 형성된 산화막을 제거 한 후 시편 무게를 측정함으로써 부식속도를 계산하였다.

부식 생성물 양 및 속도를 평가하기 위해서는 실험 수행 후의 시편 무게를 파악해야 하는데 기존의 방법론에 따라 산화막 자체를 제거한 후 무게를 측정하는 방법이 있지만 Inconel 600 및 690에 대한 산화

막 제거 방법론이 개발되지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 GDS 장비를 이용하여 정량적으로 분석함으로써 산화막 두께와 각 원소별 함유량을 도출하여 부식속도를 평가하였다. 기존의 연구 [7]와 동일한 방법으로 산화막 자체를 제거하여 부식속도를 계산할 경우 산화막 내에 존재하는 핵종들의 종류 및 양을 파악할 수 없지만 정량적 방법으로 분석을 수행할 경우 산화막 내에 존재하는 핵종들의 종류 및 양을 파악할 수 있다. 또한 pH 값 및 재질에 따른 부식 경향을 파악할 수 있기 때문에 기존의 방법론에 비해 좀 더 정확한 분석 및 결론을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

$$CV = \frac{vV}{t} \dots\dots\dots \text{식(4.1)}$$

위의 식에서 CV는 부식속도(g/yr), v와 t는 각각 산화막의 체적(cm³)과 실험 기간(yr)이다.는 원소의 밀도(g/cm³)로 Fe, Cr, Ni원소 각각의 밀도는 7.86, 7.20, 8.91이다.

부식 실험에 사용된 수용액 조건과 실험온도 및 시간, 정량화를 통해 도출한 산화막 평균 두께와 계산된 산화막 체적을 [표 6]에 나타내었고, 산화막 내에 존재하는 각 원소별 함유량과 부식속도 계산 결과를 [표 7]에 나타내었다.

부식속도 계산을 위해 [표 6]에 제시된 산화막 두께는 평균값을 적용한 것으로 짝수 시편의 경우 시편의 한쪽 면을, 홀수 시편의 경우 시편의 양쪽 면을 각각 정량적으로 분석하였고, 분석 결과로 나타난 산화막 두께를 평균하였다.

[표 7]에서 원소별 함유량은 각 시편에 대한 정량화 결과로 나타난 값이고, 원소별 부식 속도는 위의 식과 [표 6]에 제시된 산화막 두께 및 체적과 [표 7]의 원소별 함유량을 이용하여 계산된 값이다.

[표 7]에서 부식에 의해 생성된 원소별 함유량 값은 수용액 조건 및 pH 값에 따라 최대 6배 정도로 큰 차이를 보이는 반면, 원소별 부식 속도는 최대 1.76 배로 상대적으로 낮게 나타나고 있는데 이러한 경향을 보이는 것은 식(4.1)에서 볼 수 있듯이 부식속도를 계산할 때 산화막 체적과 원소별 함유량을 고려한 밀

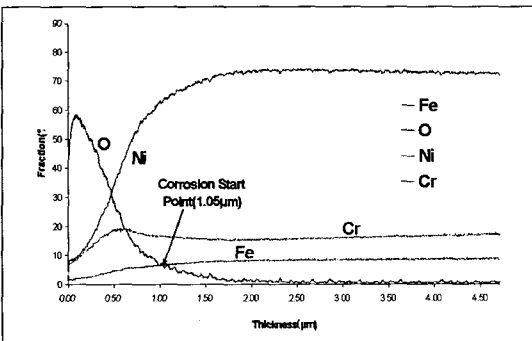


Fig. 19. Quantitative analysis result of V5 test specimen

도를 적용하였기 때문이다.

[표 6]을 통해 볼 수 있듯이 본 연구에서 계산한 부식속도는 원소의 거동 및 함유량에 크게 의존함을 볼 수 있다. 부식속도 계산 결과 pH 4 조건에서 Inconel 690의 총 부식 속도는 4.23×10^{-3} , Inconel 600의 총 부식 속도는 6.57×10^{-3} 으로 Inconel 690 재질이 Inconel 600에 비해 약 50% 정도 부식이 잘 되는 것으로 나타났는데, 이는 기존의 연구와 다른 경향을 보이는 것으로 기존의 연구결과[11]에 의하면 pH 값이 작을수록 Ni는 부식이 잘 되는 것으로 평가되었지만 본 연구에서 제시한 Ni의 부식속도는 다른 경향을 보이고 있다.

즉, pH 7 및 9에서 Inconel 600의 경향은 기존의 결과와 동일한 경향을 보이고 있지만 pH 4에서의 경향은 기존의 결과와 정반대의 경향을 보이고 있는데, 이러한 경향을 보이는 것은 과도상태에 의한 영향이 과도하게 반영됨과 동시에 V6-2 시편에 대한 정량적 분석 수행시 문제가 있었던 것으로 판단된다.

Inconel 690과 600의 근본적인 차이는 재질을 구성하고 있는 각 원소의 함유량 차이로 판단되기 때문에 Inconel 690의 경우도 Inconel 600과 마찬가지로 과도상태의 영향이 과도하게 반영됨으로써 pH 7 조건에서 부식이 가장 잘 되는 것으로 평가되었다 판단됨으로 비교적 정확한 결론을 도출하기 위해서는 추가적으로 장시간의 부식 실험을 수행함으로써 과도상태에 의한 영향을 최소화하고, 실험 시편의 수를 늘려 부식 실험과 정량적 분석을 수행함으로써 불확실성을 감소시키고 동시에 정확한 원인을 규명해야 할 것으로 판단된다.

V. 결론

Inconel 600 및 690 재질로 제작된 시편에 대해 pH 변화에 따른 부식 실험을 수행하였고, 실험 결과를 GDS 장비를 사용하여 방사선 강해 측면에서 중요한 원소인 Fe, Cr, Ni 원소에 대한 정량적인 분석을 수

Table 6. Thickness and volume of oxide film(Experiment period : 20 day)

Quality of the material	pH	Condition of solution	Experiment Temp.	Test specimen kind	Thickness of Oxide Film(μm)	Volume (cm^3)
IC 600	4	NaOH + D.W.*	315 $^{\circ}\text{C}$	V5/V6	1.15	4.58×10^{-4}
	7	D.W.*		V3/V4	12.13	4.82×10^{-3}
	9	NaHSO ₄ + D.W.*		V1/V2	1.42	5.65×10^{-4}
IC 690	4	NaOH + D.W.*		T5/T6	2.92	1.16×10^{-3}
	7	D.W.*		T3/T4	9.49	3.77×10^{-3}
	9	NaHSO ₄ + D.W.*		T1/T2	1.47	5.83×10^{-4}

* D.W : distilled water

Table 7. Each element content and corrosion velocity in oxide film

Quality of the material	pH	Test specimen kind	Content of each element (% , average)				Quality of the material	pH	Test specimen kind	Corrosion speed of each element(g/yr)			
			Fe	Cr	Ni	total				Fe	Cr	Ni	total
IC 600	4	V5/V6	3.8	10.2	45.2	59.2	IC 600	4	V5/V6	2.5×10^{-4}	6.1×10^{-4}	3.4×10^{-3}	4.2×10^{-3}
	7	V3/V4	0.6	2.1	14.2	17.0		7	V3/V4	4.4×10^{-4}	1.4×10^{-3}	1.1×10^{-2}	1.3×10^{-2}
	9	V1/V2	3.2	3.7	26.1	32.9		9	V1/V2	2.6×10^{-4}	2.7×10^{-4}	2.4×10^{-3}	3.9×10^{-3}
IC 690	4	T5/T6	2.3	17.3	18.8	38.4	IC 690	4	T5/T6	3.8×10^{-4}	2.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}	6.6×10^{-3}
	7	T3/T4	0.8	3.9	14.9	19.5		7	T3/T4	4.1×10^{-4}	1.9×10^{-3}	9.1×10^{-3}	1.1×10^{-2}
	9	T1/T2	1.5	5.9	10.5	17.9		9	T1/T2	1.3×10^{-4}	4.5×10^{-4}	1.0×10^{-3}	1.6×10^{-3}

행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- pH 값에 따른 부식 경향을 정량적으로 분석한 결과 pH 값 및 사용한 재질에 따라 산화막 두께는 다르게 나타남.

- ㉠ Inconel 600 재질의 산화막 두께는 pH 4, 7, 9에서 각각 1.42 μ m, 12.1 μ m, 1.15 μ m로 나타났고, Inconel 690 재질의 경우 pH 4, 7, 9에서 산화막 두께는 각각 1.92 μ m, 9.49, 1.47 μ m로 나타남.
- ㉡ Inconel 600 및 690 재질에 상관없이 pH 7 조건에서 산화막 두께가 가장 크게 나타남.

- 각 시편에 대한 부식 속도를 계산한 결과 부식 속도의 범위는 1.14 $\times 10^{-2}$ ~6.57 $\times 10^{-3}$ g/yr로 상당히 높게 나타났고, pH 4에서 Inconel 690 재질이 Inconel 600 재질에 비해 약 50% 정도 부식이 잘 되는 것으로 나타남.

- ㉠ 이는 기존의 연구 결과와 다른 경향을 보이는 것은 과도상태에 따른 영향이 과도하게 반영됨과 동시에 V6-2 시편에 대한 정량적 분석 수행시 문제가 있었던 것으로 판단됨.
- ㉡ 따라서, 비교적 정확한 결론을 도출하기 위해서는 추가적으로 장시간의 부식 실험을 수행함으로써 과도상태에 의한 영향을 최소화하고, 실험 시편의 수를 늘려 부식 실험과 정량적 분석을 수행함으로써 불확실성을 감소시킴과 동시에 정확한 원인을 규명해야 할 것으로 판단됨
- ㉢ pH 7 및 9에서는 Inconel 600 재질이 Inconel 690 재질에 비해 부식이 잘 되는 것으로 나타남.

감사의 글

이 논문은 2004년도 조선대학교 연구보조비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] KAERI/AR321/90, 'Optimum Water Chemistry Control of PWR Primary System for the Reduction

of Plant Personnel Exposures', 1990. 11, 한국원자력연구소.

[2] KAERI/CM-511/2001, '염기성 분위기에서 부식억제가 증기발생기 재료의 재부동태 속도에 미치는 영향', 최종보고서, 한국원자력연구소.

[3] KAERI/TR-1979/2001, 'SMART 모사 Loop에서 노심 재료(Zr, Ti, SUS)의 부식 특성', 한국원자력연구소.

[4] KAERI/CM-189/97, '원전 증기발생기 전열관 용력 부식균열 억제기술 기반 연구', 최종보고서, 한국원자력연구소.

[5] KAERI/RR-2214/2001, '원전냉각계통 부식방지 기술개발', 최종보고서, 한국원자력연구소.

[6] KAERI/AR-341/91, '핵연료 피복관 부식기구 규명', 한국원자력연구소.

[7] '영광 5호기 손상원자로용기 부식실증시험', 최종보고서, 한국원자력연구소, 2004.3.

[8] 김상현외, '원자력 발전소 배관재를 이용한 고온 수화학 조건에서의 입자성 부식생성물 발생에 관한 연구', 한국원자력학회, 2004 춘계학술발표회 논문집.

[9] Special Metals Corporation Products- Inconel alloy 690, 2003 October, www.specialmetals.com

[10] 송민철외, '차세대원전 일차계통 방사화 부식생성물 평가 연구', 한국원자력학회, '98춘계학술발표회 논문집.

[11] Lee Inn Chong, Suk Tae Won, "The Corrosion Behavior of Nickel and Inconel 600 in Sodium Hydroxide and Hydrochloric Acid Solution at 280 °C", 한국부식학회지 Vol. 9, No.1, March, 1980.

[12] Nicolas H. Bings, Annemie Bogaerts, and Jose A. C. Broekaert, "Analytical Chemistry", Vol. 76, No. 12, 2004(pp 3313-3336)