



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2006年度 2月
博士學位論文

Inconel 600 및 *690*의 原子爐 冷却材에
의한 腐蝕에 관한 研究

朝鮮大學校 大 學 院

機械工學科

韓 英 玉

Inconel 600 및 *690*의 原子爐 冷却材에
의한 腐蝕에 관한 研究

*A Study on the Corrosion of Inconel 600 and 690
in a Reactor Coolant*

2006年 2月 日

朝鮮大學校大學院

機械工學科

韓 英 玉

Inconel 600 및 *690*의 原子爐 冷却材에
의한 腐蝕에 관한 研究

指 導 教 授 金 崧 平

2005年 12月 日

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

機 械 工 學 科

韓 英 玉

韓英玉의 博士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校	教授	印
委員	朝鮮大學校	教授	印
委員	朝鮮大學校	教授	印
委員	朝鮮大學校	教授	印
委員	朝鮮大學校	教授	印

2005年 12月 日

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론적 고찰	5
제1절 부식생성물의 생성원	5
1. 냉각재 내 핵종 농도 계산을 위한 이론적 배경	7
가. 냉각재 내 핵종 농도 예측	7
나. 대상 모델 선정	9
2. 핵분열 생성물	10
3. 방사화 부식생성물	14
제2절 부식 mechanism 및 주요 방사성 핵종	15
제3절 pH 및 온도에 따른 부식생성물 거동 분석	19
1. 부식에 영향을 미치는 인자	19
2. pH와 부식생성물의 침적	20
3. pH 조절	21
가. 초기 pH 제어	21
나. 상향 pH	21
다. 상향 pH 적용시 문제점	25
제 3 장 실험 방법 및 절차	26
제1절 실험 장치	26
제2절 실험 절차 및 방법	29

1. 시편 제작	29
2. 시편 무게 측정	32
3. 표면 촬영	32
4. 실험 수행	36
5. 부식생성물의 표면 촬영	36
6. 부식생성물에 대한 정량분석 수행	40
가. GDS 장비의 원리	40
나. GDS 장비 분석 절차 및 방법	44
다. GDS 장비의 오차(불확실도)	44
7. 부식속도 계산	44
제 4 장 실험결과 분석	46
제1절 실험결과 검증	46
제2절 Inconel 690 종합 분석	50
1. pH 9에서 수행한 실험	50
2. pH 7에서 수행한 실험	56
3. pH 4에서 수행한 실험	61
제3절 Inconel 600 종합 분석	65
1. pH 9에서 수행한 실험	65
2. pH 7에서 수행한 실험	70
3. pH 4에서 수행한 실험	74
제4절 Inconel 600 및 690 실험 결론	78
1. Inconel 690 시편	78
2. Inconel 600 시편	79
제5절 부식 생성량 및 속도 평가	81

제 5 장 결 론 85

참고 문헌

저작물 이용 허락서

표 목 차

Table 1. Radioactive Characteristics of Main Radionuclide	6
Table 2. Main Radionuclide	19
Table 3. Factor Test Specimen	30
Table 4. A Measured Value of Test Specimens Weight	32
Table 5. Performance Results of GDS Equipment for Test Verification of inconel 600	48
Table 6. Performance Results of GDS Equipment for Test Verification of inconel 690	49
Table 7. Experimental Results	80
Table 8. Thickness and Volume of Oxide Film	82
Table 9. Each Element Content and Corrosion Velocity in Oxide Film	83

그림 목차

Figure 1. Main Chemical Compositions of CRUD in PWR Plants	18
Figure 2. Solubility of Each Element in pH 7.0	23
Figure 3. Solubility of Each Element in pH 7.4	24
Figure 4. Equipment for Corrosion Experimentation	27
Figure 5. Configuration of Test Specimen(unit : mm)	30
Figure 6. Test Specimens Holder(a) and Installation Form(b)	31
Figure 7. Result of SEM Photographing(Inconel 600)	34
Figure 8. Result of SEM Photographing(Inconel 690)	35
Figure 9. T1 Test Specimen(Inconel 690)	37
Figure 10. T3 Test Specimen(Inconel 690)	37
Figure 11. T5 Test Specimen(Inconel 690)	38
Figure 12. V1 Test Specimen(Inconel 600)	38
Figure 13. V3 Test Specimen(Inconel 600)	39
Figure 14. V5 Test Specimen(Inconel 600)	39
Figure 15. Sample Introduction System	41
Figure 16. Layout of a GD Instrument	42
Figure 17. Photo Detector	43
Figure 18. Quantitative Analysis Result of T1 Test Specimen	53
Figure 19. F_e Element Tendency of T1 Test Specimen	54
Figure 20. Quantitative Analysis Results of T2 Test Specimen	55
Figure 21. Quantitative Analysis Results of T3 Test Specimen	58
Figure 22. Quantitative Analysis Results of T4-1 Test Specimen	59
Figure 23. Quantitative Analysis Results of T4-2 Test Specimen	60

Figure 24. Quantitative Analysis Results of T5 Test Specimen	62
Figure 25. Quantitative Analysis Results of T6-1 Test Specimen	63
Figure 26. Quantitative Analysis Results of T6-2 Test Specimen	64
Figure 27. Quantitative Analysis Results of V1 Test Specimen	67
Figure 28. Quantitative Analysis Results of V2-1 Test Specimen	68
Figure 29. Quantitative Analysis Results of V2-2 Test Specimen	69
Figure 30. Quantitative Analysis Results of V3 Test Specimen	71
Figure 31. Quantitative Analysis Results of V4-1 Test Specimen	72
Figure 32. Quantitative Analysis Results of V4-2 Test Specimen	73
Figure 33. Quantitative Analysis Results of V5 Test Specimen	75
Figure 34. Quantitative Analysis Results of V6-1 Test Specimen	76
Figure 35. Quantitative Analysis Results of V6-2 Test Specimen	77

ABSTRACT

An Study on the Corrosion of Inconel 600 and 690 in a Reactor Coolant

Young-Ok Han

Advisor : Prof. Soong-Pyung Kim, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Radioactive Corrosion Products formed by corrosion in the primary coolant system of domestic pressurized water reactors occupy more than 70 percents of radiation exposure to plant maintenance personnel and draw much attention to the study on this field in order to reduce radiation exposure by the radioactive corrosion product.

As nuclear species contributing to exposure among materials existing into radioactive corrosion product are Co^{58} , Co^{60} , Cr^{51} , Mn^{54} , Fe^{59} , it is necessary to estimate comparatively exactly the relative production amount of these nuclear species accumulated according to the operation of nuclear power plants.

Because coolant contact area of Steam Generator tube in primary coolant system occupies about 75 percents, it is judged that the amount of radioactive Corrosion Products formed by the

corrosion of Steam Generator Tube(S/G tube) is also considerably much.

Therefore, it is judged that corrosion experiments are performed according to pH on more severe water quality and chemical treatment condition than those of actual PWR plants, and dose on plant maintenance personnel is predicted by evaluating corrosion velocity as well as corrosion trend based on experimental result.

For this, in this paper, an experiment on uniform corrosion with the object of estimating the generation quantity of Co^{58} , Co^{60} , Cr^{51} , Mn^{54} , Fe^{59} into Inconel 600 and 690 material which are used of S/G tube was carried out. For this, twelve test sections were made of Inconel 600 and 690, and corrosion experiments were performed for 20 days according to pH on more severe water quality and chemical treatment condition than those of actual PWR plants, also Glow Discharge Spectrometer was used to analyze experimental result quantitatively.

According to quantitative analysis result, Inconel 600 corrodes more than Inconel 690 does on the condition of pH 7 and pH 9, but on the other hand it is evaluated that Inconel 690 corrodes more than Inconel 600 does at pH 4. It is judged that this trend is because the effect of transient state was reflected excessively. Therefore, it is judged that by performing corrosion experiment during a long period to evaluate result comparatively exactly the effect of transient state must be minimized.

제1장 서론

원자력발전소는 전기에너지를 얻기 위해 우라늄의 핵분열 에너지를 이용하며, 연속적인 핵분열을 위해서는 적절한 중성자속이 필요하다. 그러나 중성자는 재료 구성 물질과도 반응하여 안정한 원자핵을 에너지 상태가 높은 여기상태로 변환시킨 다음, 다시 안정한 원자핵으로 천이할 때 방출하는 방사선으로 인해 발전소 냉각재 계통의 방사선장 증가요인으로 작용하고 있다.

원자력발전소에서 일차계통의 냉각재와 접촉하는 기계적 장치들의 구성물질은 주로 철, 니켈, 코발트, 크롬, 지르코늄 등으로 구성되어 있으며 원자로 운전시 고온·고압 및 방사선장의 가혹한 환경에 노출되게 되어 물 또는 용전산소와 화학적으로 반응하여 산화물인 부식생성물을 만들게 된다. 뿐만 아니라, 핵연료로부터 발생하는 방사화물의 일부는 일차측의 냉각수로 흘러들어 가게 되어 일차계통 내를 흘러다니다가 계통의 재료 표면에 침착되게 된다.

특히 부식생성물들 중 방사화된 핵종들은 대부분 반감기가 길고 방출하는 방사선 에너지가 높아서 원전 계획예방정비 기간중 작업자 피폭을 유발하는 주요 방사선량률 기여인자이다. 이는 원전 체적제어계통 처리 과정에서 제거되지 않고 잔류하는 방사성 부식생성물은 계통 방사선량 준위의 원인이며, 방사선장은 원자력발전소의 점검 및 보수 작업 때 방사선장 구역에서 작업에 참여하는 작업자의 방사선 피폭과 직결되므로 작업 수행전에 운전중 계통 내면에 침적된 방사선 부식생성물을 제거하기 위하여 엄격한 수질관리를 수행하는 수화학 처리를 실시하고 있으며, 부식 방지 및 감소를 위해 일차냉각계통의 구조물들은 내식성이 큰 재질이 사용되고 있기 때문에 큰 문제점은 없지만 발

전소 가동 년수의 증가에 따라 냉각계통 내에 축적된 부식생성물이
작업자 피폭(현재 최신 권고안인 ICRP-60 작업자 선량 목표치 1man-
Sv-yr)의 70% 이상을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다¹⁾.

작업자 피폭 측면에서 가장 크게 기여하는 핵종은 Co^{58} , Co^{60} 으로
 Co^{58} 의 반감기는 74일로 매우 짧기 때문에 운전 초기에 곧 평형상태
에 도달하는 반면, Co^{59} 로부터 생성되는 Co^{60} 은 생성량은 작지만 반
감기는 5.27년이고, 고에너지의 감마선 방출 핵종이기 때문에 발전소
가동 년수가 증가함에 따라 중요성이 커지고 있다.

또한 발전소의 방사선방호설계 목적은 원자력발전소의 운전으로 인
한 작업자 집단선량 및 일반대중선량을 사회적, 경제적 측면을 고려하
여 합리적으로 가능한 낮게(ALARA : As Low As Reasonable
Achievable) 유지하는 것이다. 특히 원자력발전소의 작업자선량을
ALARA로 유지하기 위해서는 설계단계에서부터 ALARA 개념을 적용
하는 것이 중요하며, ALARA 설계의 적절성은 작업자선량의 평가를
통하여 입증한다. 현재 원자력발전소의 방사선방호 설계기준이 되고
있는 ICRP-60에 따르면 원자력발전소 작업자의 연간 피폭선량을 내부
피폭선량과 외부피폭선량의 합으로 규제하고 있다.

기존의 작업자 피폭선량 평가방법은 운전중인 유사노형원전의 주요
작업별 작업자 피폭자료를 통계처리한 후 해당원전의 설계개선에 의
한 선량저감효과를 공학적 판단으로 평가하여 작업자 선량을 예측하
고 있다. 이러한 기존의 평가방법은 공학적 판단에 의해 이루어지고
있어 보다 상세한 정량적인 평가가 요구되고 있으며, 방사선방호 규정
에 따라 내부피폭을 고려한 작업자 선량 평가의 필요성이 대두된 것
이다.

따라서 계통의 방사선량을 낮추기 위한 가장 효과적인 방법은 운

전중에 부식생성물이 핵연료 표면과 같은 노심내에서 침적 되지 않도록 제어하는 것이 가장 효과적이다. 이러한 노력의 일환으로 가압경수로 원전의 운전중 부식생성물의 노심내 침적을 줄이기 위해 B/Li 조절에 의한 pH 운전영역 확립, 고형물의 농도를 낮추어 노심에서의 침적 확률을 줄이기 위한 미세 여과재의 채택, 방사성 부식생성물 Co^{60} 핵종의 생성을 원천적으로 제어하기 위한 재질 개량 및 재질내 Co 함량기준 마련 등의 연구가 수행되어 왔다.

이러한 이유로 Co^{59} 유출량의 대부분을 차지하고 있는 Inconel 600 및 690 증기발생기 튜브(Steam Generator Tube ; S/G Tube) 사양은 모두 Co^{59} 의 함유량을 0.1% 이하로 제한하고 있다²⁾.

그리고 일차냉각계통 중 냉각재와 접촉 면적이 가장 큰 S/G tube는 총 냉각재 접촉 면적의 약 75% 정도 차지하고 있다.

작업자 주요 피폭원인 핵종을 방출하기 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 판단되었다.

현재 작업자 선량 평가방법은 국내 신형원전의 경우 해석적 방법에 의한 작업자선량 평가 도입, 크게 방사선원평가, 방사선량율평가, 작업자선량 평가, 설계개선방안 도출로 구분하고 있다.

따라서 원자력발전소 작업종사자 피폭의 상당량을 차지하는 방사성 부식생성물 생성에 대해 본 연구에서는 Co^{60} 의 주요 생성원인 Inconel 600 및 690 재질로 실험 시편을 제작하여 일반부식 실험을 수행하였고, 실험 결과로 나타난 산화막 두께 및 부식생성물의 양을 파악하기 위해 GDS(Glow Discharge Spectrometer) 장비를 이용하여 정량적인 분석을 수행하였으며, 정량적 분석 결과에 근거하여 pH 및 Inconel 재질별로

부식 속도 및 경향을 평가하여 방사성 부식생성물과의 메카니즘을 규명하는데 노력하고자 하였다.

제2장 이론적 고찰

제1절 부식 생성물의 생성원

대부분의 PWR RCS(Reactor Coolant System)는 원자로 용기, 원자로 용기 내장품, 원자로 냉각재 펌프, 증기 발생기, 가압기 및 관련 배관들로 구성되어 있으며, 이들 계통들은 거의 대부분 고온 및 고압의 냉각재에 노출되어 있기 때문에 Inconel 600 및 690 S/G tube, SS(Stainless Steel)-304 배관, Zircaloy-4 핵연료 피복관 등과 같은 내식성이 강한 금속을 주요 재질로 사용하고 있다. 이러한 재질들은 뛰어난 운전 특성과 강한 부식 저항력을 갖추고 있어 널리 사용되고 있고, 이외에도 제어봉 구동장치, 밸브 등에 내마모성 합금으로 알려진 Stellite 등도 사용되고 있다.

가압경수로에서 원자로 냉각재 계통에 사용되는 기기나 배관의 금속 재질들로부터 중성자에 조사되어 부식생성물이 생성되고 있으며, 생성된 부식생성물은 배관이나 증기발생기 내부표면에 재침전되어 오염시키거나 연계계통으로 이송, 확산된다.

금속 재질의 구성 원소별 성분 및 일차 냉각재와의 접촉 면적 비율을 Table 1.에 나타내었다^{2,3)}.

원자력 발전소에서 냉각재 계통의 금속 재질과 고온의 냉각재가 접촉하여 금속 재질의 표면에서 전면부식이 발생되면 일차적으로 금속 표면을 어느 정도 산화시켜 산화 보호피막 즉, 금속히 생성된 침전을 미립(微粒), 완만하게 생성된 침전을 조립(粗粒)이라 하며 이에 따라 보다 치밀하게 피복된 피막이 형성되고, 이 산화 보호피막으로 더 이상의 부식 발생을 억제해 준다. 그러나 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 부식 생성물중 입자 크기가 수 μ 정도로 원자로 냉각재에 현탁되어 있는 산화물 상태의 부식 생성물(CRUD ; Chalk River Unidentified Deposits)이 원자로력발전소를 운영하는데 가장 큰 문제이다.

Table 1. Radioactive Characteristics of Main Radionuclide

Material	Inconel 600	Inconel 690	SS-304	Zircaloy	Stellite
Surface(%)	75	75	20	5	-
Fe	6-10	7-11	65-70	0.18-0.24	3
Ni	72-80	58 min	8-11	0.07 max.	3
Cr	14-17	27-31	18-21	0.07-0.13	30.8
Zr				Balance	
Sn				1.2-1.7	
Mn	1.0 max.	0.5 max	1.5 max.		1.2
C	1.15 max.	0.05 max	0.08 max.		
Si	0.5 max.	0.5 max	2.0 max.		
P			0.04 max.		
Cu	0.75 max.	0.5 max	1.5 max.		
Co					47.8
W					10

방사성 부식생성물은 안정한 원소인 부식생성물이 냉각재와 함께 이동하다가 노심의 열전달 표면, 즉 핵연료봉에 침적된 후 중성자나 양자와 핵반응하여 생성되거나 노심 재질의 금속 물질이 방사화되어 생성된다. 생성된 CRUD는 물질의 평형법칙에 따라 냉각재 전 영역으로 확산된다.

기기나 배관표면에 형성된 부식층은 Inner Layer와 Outer Layer로 구성되며, Inner Layer의 성분은 $Cr - Ni - Fe$ 이 조합된 Spinel로

서 화학적으로 매우 안정하나, Outer Layer은 Ni -Ferrite 성분으로 화학적으로 불안정하다. 이러한 방사성 부식생성물의 생성을 피할 순 없지만 보충수 순도유지, 절제된 수질관리 및 방사화되기 전에 부식 물질을 정화하는 방법으로 핵연료 표면에 침적되는 부식물량을 줄임으로서 결국 방사성 부식생성물의 생성율을 낮출 수 있다. 따라서 일차냉각계통의 수화학처리는 정상운전중에는 재질의 부식억제에, 정지중에는 형성된 외부피막의 제거에 초점을 맞추어 수행되어지고 있다.

1. 냉각재 내 핵종 농도 계산을 위한 이론적 배경

가. 냉각재 내 핵종 농도 예측

방사선원항 평가 시 중요한 인자인 원자로 냉각재 내 방사선원항은 그 목적에 따라 다음과 같이 두 가지로 구분한다.

- (1) 설계기준 방사선원항 또는 보수적 방사선원항(design basis source term or conservative source term) - 계통의 설계와 차폐요구사항에 대한 설계기준으로 사용되는 방사선원항
- (2) 운전기준 선원항(operational source term or realistic source term) - 1차측과 2차측 냉각재 내 방사성 핵종의 예상평균 농도를 평가하는데 사용되는 방사선원항

설계기준 방사선원항을 예측하기 위해 사용되는 모델을 설계기준 모델이라 하며, 운전기준 방사선원항을 예측하는 모델 중 가장 널리 쓰이는 대표적인 것으로는 ANSI/ANS-18.1-1984이 있다⁴⁾.

이 모델은 1차측 및 2차측 원자로 냉각재내의 예상 평균농도를 예측하는 모델로서, 여러 원전에서 실측한 자료를 근거로 만들어진 것이다.

국내 원전의 최종 안전성 분석 보고서(FSAR)에서는 이러한 설계

기준 방사선원항 예측을 위하여 핵연료 영역에서의 방사능과 이를 바탕으로 한 냉각재 내핵종 농도를 구하고 있다. 또한, 운전 기준 선원항 평가를 위하여, ANSI/ANS-18.1-1984 모델을 바탕으로 한 PWR-GALE 을 사용하고 있다.

이러한 설계기준선원항과 운전 기준선원항의 평가 시 주요한 차이점은 다음과 같다.

- 설계기준 선원항은 이론적 모델을 사용하는데 반하여, 운전기준 선원항은 실측치를 바탕으로 한 운전 경험을 반영한다.
- 설계기준 선원항은 1%의 핵연료 결함율을 가정하여 계산하지만, 운전 기준선원항은 핵연료 결함율에 대한 반영이 이루어지지 않는다.
- 설계기준 선원항은 핵분열 생성핵종, 방사화 부식 생성물, 삼중수소, N^{16} , C^{14} 등의 핵종에 따라 다른 선원항 평가 방법을 제공하고 있지만, 운전기준 선원항은 대상핵종의 발생원에 관계없이 실측값을 바탕으로 발전소 운전 사양에 따른 보정계수를 제공하고 있다.

위와 같이 국내 기준 원전에 대한 선원항 평가 시 고려되는 사항은 운전 기준 선원항 평가 시와 설계기준 선원항 평가 시에 대하여 차이를 보인다.

따라서 냉각재 내 핵종 농도 도출 방법론을 보완하고, 일반화 및 단순화된 수식을 통하여, 차세대 원전에 적용 가능한 냉각재 내 핵종 농도 도출을 위한 이론적 배경 및 평가 코드를 제시하고 있다.

대상 원전은 U-튜브 증기발생기와 지르칼로이 피복관을 사용하는

가압경수로이며, 기존의 선원항 평가도구인 PWR-GALE에서 고려되는 핵종들에 중점을 두고 있다.

계산 과정은 핵연료 영역에서의 핵종 발생량 예측, 핵연료 손상률 및 냉각재 정화 계통을 고려한 냉각재 내에서의 핵종 농도 예측으로 구분되고, 핵연료 영역에서의 핵종 발생량은 핵분열 생성핵종, 핵연료 이물질 및 핵분열 생성 핵종의 방사화 핵종, 핵분열 생성핵종의 방사화에 의한 액티나이드 핵종으로 구분하여 발생량을 예측하였다. 이러한 핵연료 영역에서의 발생량을 바탕으로, ANSI/ANS-18.1-1984의 보정 계수 도출 방법을 보완하여 냉각재 내 핵종 농도를 예측하였다.

나. 대상 모델 선정

차세대 원전의 냉각재 내 핵종 농도 도출을 위한 대상 원전을 선정하기 위하여, 원자로 냉각재 핵종농도에 영향을 주는 주요한 인자들을 살펴보면 다음과 같다⁴⁾.

- (1) 핵연료 피복관의 결함이나 피복관상에 존재하는 tramp 우라늄으로부터 원자로 냉각재로 누출되는 핵분열 생성핵종
- (2) 원자로내부 구조재의 부식생성물이 원자로 내에서 중성자 조사에 의해 생성되는 방사화 부식생성핵종
- (3) 원자로 냉각재 정화계통으로 유입되어 제거되는 핵종
- (4) 원자로 냉각계통의 누설로 제거되는 핵종

위의 (1)번과 (2)번항은 방사성 물질의 발생원이며, (3)번과 (4)번항은 냉각재내 핵종의 제거원이 된다. 따라서 (1)번과 (2)번의 발생원은 대상 원전의 핵연료 형태, 장전 주기, 원자로의 열출력 등의 발전소 사양과, 핵연료 결함율, 수화학 조건에 따른 방사화 부식생성물 평가 등의 운전 조건 및 실험데이터가 주요한 인자로 작용한다. (3)번과 (4)

번항의 제거원은 1차측에 대하여, 화학 및 체적 제어계통, 2차측의 증기발생기 취출계통 및 복수정화계통 등의 냉각제 정화를 담당하게 된다.

각 영역에서의 발생원과 제거원은 가압경수로형에 대한 일반적인 형태로서, 기존의 국내 가압경수로형뿐만 아니라 차세대 원전에도 적용 가능한 일반화된 형태이다. 특히, 핵연료 영역에서의 발생원 중 주요한 인자는 핵연료 종류 및 연소 주기이다. 핵연료의 연소에 따른 방사성 물질의 생성은 ORIGEN 2 코드를 통하여, 연소도에 따른, 그리고 핵연료 형태에 따른 발생량 예측이 가능하다.

냉각재 내 핵종의 제거원인 냉각재 정화계통으로 작용하는 화학 및 체적제어 계통과 증기발생기 취출계통은 처리계통의 구성 및 제거 효율을 통하여 일반화된 형태로 적용이 가능하다.

2. 핵분열 생성물

핵반응물질은 피복재 내에서 생성되는 actinide류를 제외하고 원자로 내에 설치된 여러 구조물들이 중성자에서 조사되고 방사화되어 부식생성물의 형태로 생성된다. 중성자 흡수반응을 통하여 생성된 핵반응물질의 냉각재내 변화율은 다음과 같다⁴⁾.

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{act} \Phi - \lambda_i N_i - \sigma_{ai} \Phi N_i \quad (\text{식 2.1})$$

여기서,

$N_i = i$ 반응핵종의 수밀도 ($\#/cm^3$)

$\Sigma_{act} =$ 모핵종의 핵반응 거시 단면적 (cm^{-1})

$\Phi =$ 중성자속 ($\#/cm^2 \text{sec}$)

$\lambda_i =$ 방사성핵종 i 의 붕괴상수 (sec^{-1})

$\sigma_{ai} =$ 방사성핵종 i 의 흡수단면적 (cm^2)

식 2.1의 해는 다음과 같다.

$$N_i(t) = \frac{\Sigma_{act} \Phi [1 - \exp(1 - (\lambda_i + \sigma_{ai} \Phi)t)]}{\lambda_i + \sigma_{ai} \Phi} \quad (\text{식 2.2})$$

대부분의 핵반응물질은 $\sigma_{ai} \Phi \ll \lambda_i$ 이므로, 이 경우 핵반응물질의 방사능도는 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$A_i(t) = \lambda_i N_i(t) = \Sigma_{act} \Phi (1 - \exp(-\lambda_i t)) \quad (Bq/cm^3) \quad (\text{식 2.3})$$

핵분열에 의하여 노심내에서 생성된 핵분열생성물의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dN_i}{dt} = \gamma_i \Sigma_f \Phi - \lambda_i N_i - \sigma_{ai} \Phi N_i \quad (\text{식 2.4})$$

여기서,

$\gamma_i =$ 핵분열생성물 i 의 핵분열 생성비 ($\#/fission$)

$\Sigma_f =$ 핵분열 거시 단면적 (cm^{-1})

핵분열 생성물 중 중성자 흡수율이 매우 큰 원소(Xe^{135}), 반감기가 매우 긴 원소(Kr^{85} , Sr^{90} , Cs^{136})를 제외한 경우 핵종 i 의 냉각재 내 농도는 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$N_i = \frac{\gamma_i \Sigma_f \Phi}{\lambda_i} \quad (\text{식 2.5})$$

또한, 노심내의 포화 상태의 총방사능 강도는 노심 전체의 체적 V 로 식 2.5를 적분하면 다음과 같다.

$$A_i = \int_V \lambda_i N_i dV = \gamma_i \int_V \Sigma_f \Phi dV \quad (\text{식 2.6})$$

따라서, 원자로 출력 P 는 총 핵분열수에 비례하므로 $P = \int_V \Sigma_f \Phi dV$ 과 같이 표현할 수 있으므로, 포화상태의 핵분열생성물의 방사능 강도는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$A_i = (9 \times 10^5) \times P \times \gamma_i \quad (\text{식 2.7})$$

여기서,

$$9 \times 10^5 = \frac{1}{(3.7 \times 10^7 \text{ Bq/Ci}) \times (3 \times 10^{-17} \text{ MW/fissions/sec})}$$

A_i = 핵분열생성물 i 의 노심내 포화강도 (Ci)

P = 원자로 열출력

따라서, 핵연료 영역에서의 핵분열 생성물과 핵반응 생성물은 핵

분열생성율의 함수가 된다.

위의 식과 연계하여 원자로 냉각재 내의 방사성 물질은 핵분열 생성물과 핵반응물질로 구분된다. 원자로 냉각재 내 핵분열 생성물의 생성률은 아래와 같다⁴⁾.

$$PF_i = v_i \times n_i \times A_i \quad (\text{식 2.8})$$

여기서,

$$PF_i = \text{핵분열 생성물 } i \text{의 생성률} \quad (\text{Ci/sec})$$

$$v_i = \text{핵종 } i \text{의 누출율 상수} \quad (\text{sec}^{-1})$$

$$n_i = \text{예상 핵연료 결함율}$$

$$A_i = \text{핵분열 생성물 } i \text{의 노심내 방사능 강도} \quad (\text{Ci})$$

냉각재 내에서 방사성 핵종 i 의 농도 변화율은 생성률과 함께 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{PF_i}{WP} - (R_i + \lambda_i + \sum_{a \neq i} \Phi) \times C_i(t) - \frac{L_i}{WP} C_i(t) \quad (\text{식 2.9})$$

여기서,

$$C_i = \text{핵종 } i \text{의 방사능 강도} \quad (\mu\text{Ci/cc})$$

$$R_i = \text{원자로 냉각재 정화율} \quad (\text{vol/cc})$$

$$L_i = \text{원자로 냉각재 보충율} \quad (\text{cc/sec})$$

$$WP = \text{냉각재량} \quad (\text{cc})$$

식 2.9에서 일반적으로, 원자로 냉각재 유출량은 매우 작으므로 무시한다. 또한, 중성자 흡수율이 매우 큰 Xe^{135} 를 제외한 경우, 포화상

태에서 핵반응물질 및 핵분열생성물은 NRC, NUREG-0017, "Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from PWRs", Rev.1, April 1985⁵⁾를 바탕으로 되어 있고 원자로 냉각재 평형농도는 아래와 같다.

$$C_i = \frac{PF_i}{(R_i + \lambda_i) \times WP} = \frac{v_i \times n_i \times A_i}{(R_i + \lambda_i) \times WP} \quad (\text{식 2.10})$$

따라서 핵분열 생성물의 냉각재 내 핵종농도는 핵연료 영역에서의 핵종 발생량, 핵연료 결함율, 핵종 이탈계수, 반감기, 1차측 냉각재량, 냉각재 정화계통의 제거 계수에 대한 함수로 주어진다^{4,5)}.

3. 방사화 부식생성물

핵분열생성물은 대부분 피복재의 결함에 의해서 냉각재로 누출된다. 그러나 핵반응물질은 시간에 따라 변화가 매우 심하고 열수력학적 운전모드에 따라서 발생량이 결정되므로 그 양을 예측하기가 매우 어렵다. 이러한 이유로 인하여, 냉각재내 부식생성물의 농도는 실측치를 이용하거나, 수화학 조건을 고려한 코드 결과를 이용하고 있다.

이러한 방사화 부식 생성물 평가 코드로는 국외의 경우 부식생성물 거동분석 프로그램 즉, CRUDIM(MIT), ACE(Mitsubishi), PACTOLE (Framatome), CORA-II (EPRI) 등이 사용되고 있으며, 현재 국내는 COTRAN(KAIST) 있으나 지속적인 수정 보완하여 개발 중에 있다⁴⁾.

일반적으로, 이러한 코드들은 가압경수로의 1차 계통을 다수의 노드로 나누어, 각각의 평균온도, 유량, 배관 규격, 표면물질의 구성, 중성자속, 그리고 다른 물리-화학적 변수들로 각 지역을 나타낸다. 또한, 출력, 화학 변화 및 냉각재 정화 효과 등의 발전소 운전 이력을 고려

하고 있다. 주요 변수는 계통을 구성하는 물질의 용해도이며, 부식 생성물의 생성, 침식, 입자의 침전과 용해, 그리고 입자의 이동과 같은 현상들도 고려되었으며 고려되는 핵종들은 Fe , Ni , Cr , Mn 및 Co 이고 이들의 방사화 핵종은 Fe^{59} , Co^{58} , Cr^{51} , Mn^{54} 및 Co^{60} 이다.

제2절 부식 *Mechanism* 및 주요 방사성 핵종

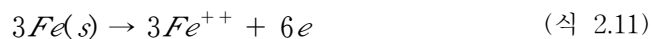
원자로 구조재의 금속재질들이 처음 냉각재와 접촉하게 되면 매우 빠르게 부식이 진행되지만 부식이 진행됨에 따라 금속표면에 산화막이 형성됨으로써 냉각재와 금속재질의 직접적인 접촉이 방해를 받아 부식율이 점차 낮아지며, 결국 부식생성물의 유출과 부식이 평형상태에 도달하게 된다.

강철의 경우 취화리튬 용액중의 물과 반응하여 표면에 Fe_3O_4 (마그네타이트)란 부착성 피막을 형성한다. 즉, 이 피막이 반응 관련 물질과 서로 접근하는 것을 막는 장애물으로써 작용한다.

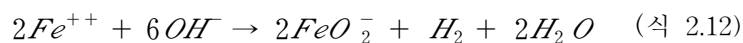
만약, 이 피막이 부착력이 강한 부식 매질(媒質)에 대하여 불용성(不溶性)이면 속도는 극히 저하된다.

마그네타이트가 생성되는 과정은 다음과 같다.

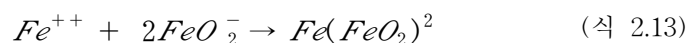
a) 양극 산화반응에 의해 “제1철 이온”이 생성된다.



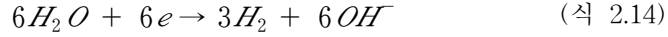
b) 용액산화에 의해 “제1철”의 일부가 “제2철 이온”으로 된다.



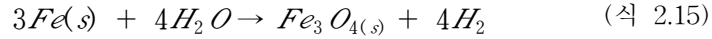
c) “제1철”과 “제2철”이온의 침전 반응에 의해 마그네타이트가 생성된다.



d) 음극 환원에 의해 수소를 생성한다.



이런 것들을 정리하면 다음 식으로 되며, 철 1 mol이 없어져 수소 1.33 mol이 생성된다.



마그네타이트의 성상은 (c)의 침전 반응 과정에서 결정된다.

일반적으로 급속히 생성된 침전은 미립(微粒)이고, 완만하게 생성된 침전은 조립(粗粒)이므로 보다 치밀하게 피복된 피막이 된다.

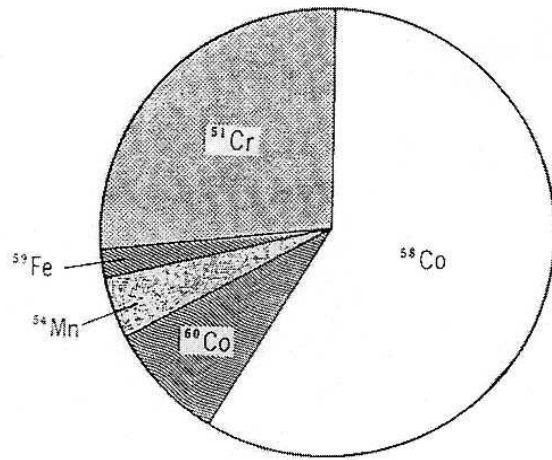
따라서 금속재질이 부식되는 동안 일부의 부식생성물들은 침식이나 용출에 의하여 냉각재 내로 유출되는데 이렇게 유출된 부식생성물들이 노심에서 방사화되어 발전소 방사선준위 증가에 중요한 원인이 된다. 원자력발전소는 운전초기의 짧은 기간을 제외하면 안정한 산화막의 존재하에서 운전되기 때문에 산화막이 형성된 후 평형 상태에서의 부식과 유출이 발전소 방사선 준위에 중요한 인자가 된다.

PWR 발전소에서 방사성 피폭의 주요 요인이 되는 CRUD의 원소 조성과 선량 기여도를 Fig 1.에, 부식생성물로부터 중성자 조사에 의하여 생성되는 주요 방사성 핵종들과 핵반응식을 Table 2.에 각각 나타내었다²⁾.

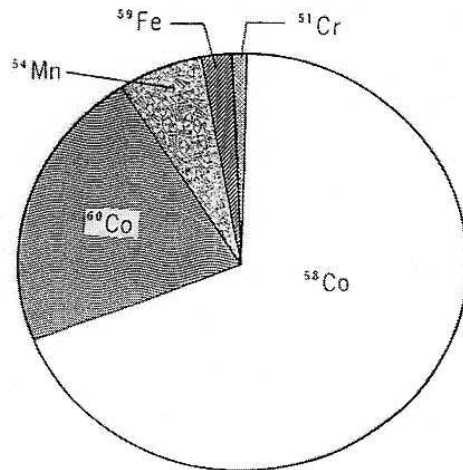
Fig 1.에서 보여 주듯이 Co^{58} , Co^{60} , Mn^{54} , Fe^{59} , Cr^{51} 순으로 CRUD에 많이 포함되어 있지만 피폭 측면에서는 Co^{58} , Co^{60} 이 대부분을 차지함을 볼 수 있다. 또한 Table 2.에서 보여 주듯이 Co^{58} 은 증기발생기 세관제질인 inconel 600이나 690에 포함된 Ni 이 부식후 중성자에 의해 방사화되어 생성되고, 반감기는 74일로 매우 짧기 때문에 운전 초기에 곧 평형상태에 도달하는 반면, Co^{59} 로부터 중성자를 흡수하여

생성되는 Co^{60} 은 생성량은 작지만 반감기는 5.3년으로 매우 길고, 고에너지의 γ 선 방출 핵종이기 때문에 발전소 가동 년수가 증가함에 따라 방사선준위에 미치는 영향이 크기 때문에 중요성이 커진다.

그리고 Co^{59} 는 주로 밸브 등에 Hard-facing 재질로 사용되는 Stellite에서 방출되며, Inconel과 Stainless Steel의 구성 성분인 Ni 의 불순물로써 함유되어 있거나 Stellite의 기본 성분으로 존재하며 부식이나 마모에 의해 냉각재로 유출된다. Co^{59} 유출량의 대부분이 증기발생기 전열관으로부터 생성되므로 Inconel 600 증기발생기 전열관 사양은 모두 Co^{59} 의 함유량을 0.1% 이하로 제한하고 있다. 일반적으로 SS-304 Co 함량은 0.08w/o 이고, Inconel 600의 경우 불순물로 함유되는 Co 는 0.03w/o이다.



Main Chemical Compositions of CRUD in PWR Plants



Main Chemical Compositions of Dose rate contribution

Fig 1. Main Chemical Compositions of CRUD in PWR Plants

Table 2. Main Radionuclide

Radio-nuclide	Nuclear Reaction	Half Life	Mean γ energy (Mev)	quality of the material.	Natural Abundance Ratio of Parent Nuclide
Fe^{59}	Fe58(n, γ)Fe59	45d	0.028	SS	0.31
Fe^{55}	Fe54(n, γ)Fe55	2.6d	-	SS	5.8
Co^{58}	Ni58(n,p)Co58	74d	0.6536	SS, Inc.	67.76
Cr^{51}	Cr50(n, γ)Cr51	28d	0.169	SS, Inc.	4.31
Co^{60}	Co59(n, γ)Co60	5.3yr	1.205	Inc., St.	100
Mn^{54}	Fe54(n,p)Mn54	313d	0.747	SS	5.84
Na^{24}	Na23(n, γ)Na24	15hr	1540	impurities in Coolant	100
Zr^{95}	Zr94(n, γ)Zr95	65d	0.767	Zir.	17.4
Sb^{122}	Sb121(n, γ)Sb122	2.7d	0.343	Seal, Bearing	57.3
Sb^{124}	Sb121(n, γ)Sb124	60.2d	0.805	Seal, Bearing	42.7
W^{87}	W187(n, γ)W187	24hr	0.310	Steel Carbides	28.6

note) SS : Stainless Steel, Inc : Inconel, St : Stellite, Zir : Zircaloy

제3절 pH 및 온도에 따른 부식생성물 거동 분석

1. 부식에 영향을 미치는 인자

금속재료의 부식에 영향을 주는 주요 인자로는 냉각재의 수소이온 농도(pH), 온도, 용존 산소로서 이러한 인자들 중 pH는 중요한 인자로서 pH 변화에 따라 부식생성물의 거동(침전, 용해)에 가장 많은 영향을 주는 것으로 알려지고 있다.

국내 발전소에서는 냉각재속에 용해되어 있는 용존 산소를 제거하기 위해 하이드라이진과 수소를 사용하고 있고, 수산화리튬을 사용하여 pH를 조절하고 있다. 하이드라이진의 경우 제한치는 0~50ppm이고, 원자로 냉각재온도가 150°F이하, 냉각기간동안 400°F 이하에서 적용하고 있으며 수산화리튬의 경우 제한치는 0~2.5ppm이다⁶⁾.

2. pH와 부식생성물의 침적

냉각재 내에 존재하는 이온들의 용해도에 대한 온도계수는 낮은 pH 영역에서는 부(-)의 온도계수를, 높은 pH 영역에서는 정(+)의 온도계수를 가지게 된다. 즉, 낮은 pH 영역에서는 온도가 높아질수록 용해도가 감소하고, 높은 pH 영역에서는 온도가 올라갈수록 용해도가 증가한다는 것을 의미한다.

발전소가 pH가 낮아 부의 용해도계수를 가지게 되면 1차 계통의 저온부에서 산화물의 용해도가 크게 나타날 것이다.

즉, 증기발생기 Cold leg 같은 저온부에서 부식생성물이 포화된다. 저온부에서 포화된 부식생성물이 노심에서 가열되고 부의 용해도계수로 인해 고온부(Hot Spot) 표면에 침적하게 된다. 냉각재가 증기발생기를 거쳐 튜브를 통해 2차 계통으로 열을 발산한 후, 다시 냉각되고 부의 용해도계수 운전이 계속됨으로써 모든 1차 계통 저온표면으로부터 더욱 많은 부식생성물을 용해시킨다. 이런 방법으로 부의 용해도계수는 부식생성물을 노심 내부로 이동시키게 되는데, 이는 노심 속에서 부식생성물이 중성자 흡수를 통해 방사화되기 때문에 바람직하지 못하다.

발전소가 pH가 높아 정의 용해도계수를 가지게 되면 위와는 반대로 부식생성물은 냉각재에 용해되어 노심 외부로 이동하고 증기발생

기 온도가 떨어짐에 따라 과포화된 부식생성물은 저온 지역에서 석출되거나 증기발생기에 침적된다.

3. pH 조절

가. 초기 pH 제어

Sweeton-Bass 실험은 285°C에서의 마그네타이트(Fe_3O_4) 용해도 계수를 근거로 만들어져 대부분 가압경수로 발전소에서 적용하고 있다. 운전초기부터 말까지 pH 6.9로 유지하거나 운전주기 초에 pH 6.9로 일정하게 유지하다 노심 후반에 리튬농도를 0.7ppm으로 일정하게 유지하는 이른바 조정화학체계(Coordinated Chemistry)에 따랐고, 노심말기에 산성으로의 진행을 방지하고자 하한을 0.7ppm으로 유지하였다.

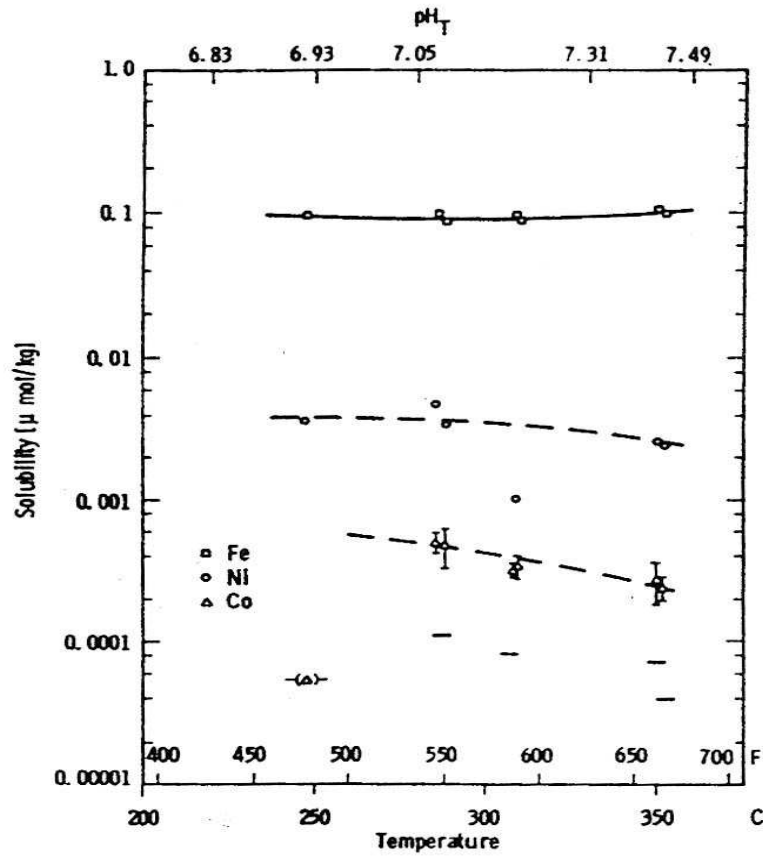
나. 상향 pH

80년대 이후에 대부분 발전소가 조정화학체계를 사용하고 있었으나 몇몇 발전소에서 노심표면에서의 방사성 부식생성물의 용해와 주기말 증기발생기 수실과 같은 냉각부에 부식생성물의 침적이 늘어나 수실 선량율이 상승되는 것을 경험하게 되었다.

따라서 그들은 pH 6.9 곡선으로선 노심 밖으로 부식생성물을 이동시키기엔 pH가 부족하다고 판단하였고, 대신 용해도계수를 정으로 유지시켜 노심 밖으로 부식생성물을 이동하게끔 하기 위해선 상향 pH가 필요하다고 판단해 리튬농도를 계속해서 처음의 2.2ppm으로 일정하게 유지시킨 결과 방사성핵종들이 재용해 되는 것을 확인하였다.

각 원소의 용해도를 나타낸 Fig 2.에서 pH 7.0에서도 Fe, Ni, Co 등의 용해도가 정이 아닌 것을 볼 수 있는데, 이 결과로부터 pH 6.9보다는 Fig 3.의 pH 7.4가 필요함을 확인할 수 있다.

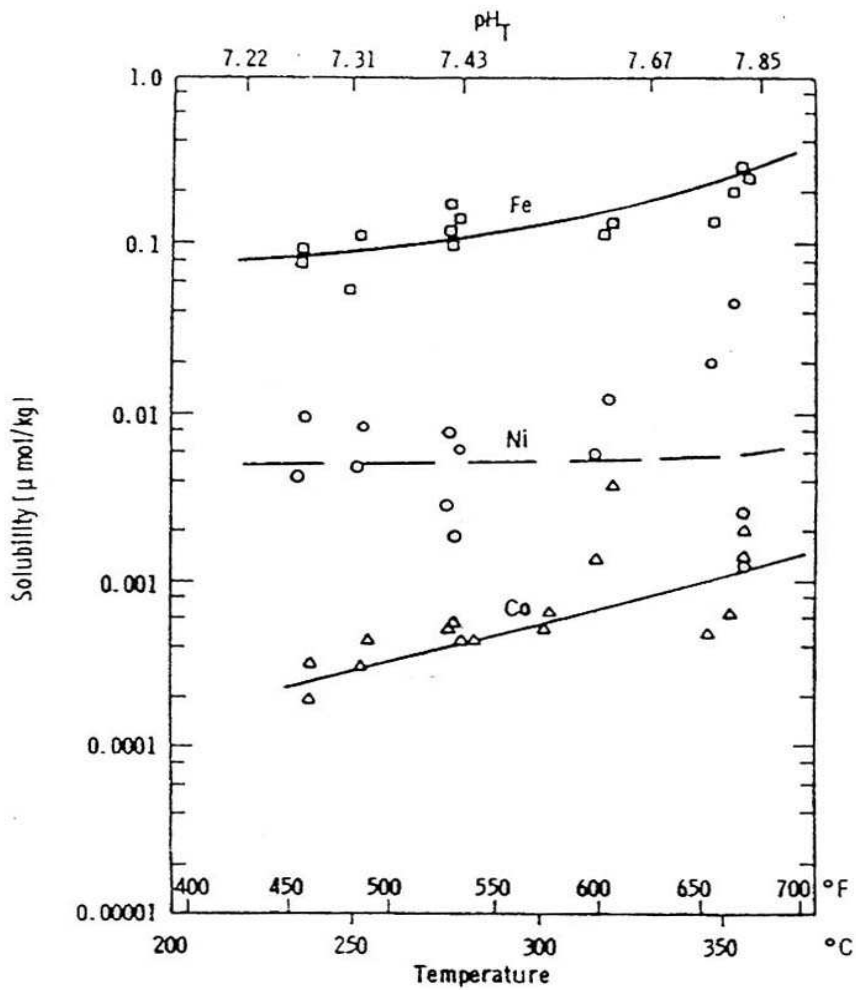
pH 7.4 정도에서는 운전초기에 리튬농도가 5ppm 이상 필요하나 핵연료 피복관의 부식문제로 상한을 3.5ppm으로 정하고 있다. 그러나 모든 발전소의 운전온도와 운전조건이 다르기 때문에 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 발전소별 특정 pH를 적용할 수 있도록 여러 pH에서 리튬-보론띠를 권고하고 있다.



Solubility of Iron, Nickel, Cobalt

Compound	Chemistry	[H ₂]	pH _{25°C}
Ni _{0.50} Co _{0.05} Fe _{2.45} O ₄ (C)	B(OH) ₃ LiOH	4.0 x 10 ⁻⁴ M	25 cm ³ /kg
			7.0

Fig 2. Solubility of Each Element in pH 7.0



Solubility of Iron, Nickel, Cobalt

Compound	Chemistry	[H ₂]	pH _{25°C}
Ni _{0.50} Co _{0.05} Fe _{2.45} O ₄	B(OH) ₃ LiOH	25 cm ³ /kg	7.4
	0.06 M 1.0 x 10 ⁻³ M		

Fig 3. Solubility of Each Element in pH 7.4

다. 상향 pH 적용시 문제점

상향 pH 화학체계는 계통의 고방사선 준위문제를 해결하기 위한 방안으로 처음 고안되었지만 계통 및 피복재의 건전성에 문제점이 발견되었다. 외국의 여러 발전소에서 상향 pH로 운전한 결과 방사선량을 낮추는데 있어선 성과를 거두었지만 1차계통 응력부식균열(PWSCC ; Primary Water Stress Corrosion Cracking)은 스웨덴 Ringhals(W/H사 800MWe PWR) 및 미국 Millstone(W/H사 PWR) 발전소에서 발생했으며 이러한 원인으로 응력부식균열 시점을 앞당긴다는 사실이 발견되어 본래의 조정화학체계(Modified Chemistry)의 복귀를 검토하고 있다.

그러나 장주기 운전 발전소의 경우 붕소농도가 높기 때문에 리튬 농도를 2.2ppm 이상 유지할 필요가 있어 pH 6.9를 유지하는 수준의 리튬이 필요하다. 현재 장주기 운전 발전소에선 주기초 pH 6.9(리튬 농도의 상한을 3.5ppm)를 유지하면서 운전하다가 리튬농도가 2.2ppm에 이르면 pH 7.2 정도를 유지하면서 발전소 특정온도에 따라 노심말기엔 EPRI 지침서의 여러 조건중 적합한 것을 택하고 있는 추세이다. 즉 pH 7.4에서 pH 7.2로 다소 낮춘 상태이다.

제3장 실험 방법 및 절차

제1절 실험 장치

Fig 4.에 제시된 실험 장치를 사용하여 Inconel 600 및 690 시편에 대한 부식 실험을 수행하였고, 실험 장치는 chemical make up tank(200 ℓ), 소형탱크(50 ℓ), 고압펌프, 3set의 3.8 ℓ autoclave, back pressure regulator, 용존산소, 전도도, pH, 온도, 압력, 유량 계측기와 다수의 밸브로 구성되어 있으며, 압력 및 온도와 수소 경보계가 부착되어 있기 때문에 경보 발생시 실험 장치는 자동으로 정지된다.

부식 시험장치의 입체도와 Closed loop로 구성된 실험장치의 layout을 Fig 4.에 도시하였다.

이들 장치는 Stainless Steel 316 재질로 되어 있으며, PWR 1차 계통수와 Deoxygenated Dimineralized Pure Water에서 Allow 600 혹은 690과 Stainless Steel 316과 Corrosion potential 차이가 없다. 따라서 Corrosion effect도 없는 장치이다⁶⁾.

원자력발전소에 핵연료가 장전되면 12~18개월 단위(한 주기)로 발전소는 상업운전을 하게 되고, 한 주기는 기동운전, 출력운전(100%), 정지운전과 예방정비기간의 4 단계로 나눌 수 있으며, 각 단계별로 수처리 조건이 다르다. 따라서 본 연구에서는 발전소의 수처리 조건 (B ; 800ppm, Li ; 2.2ppm, O_2 ; < 5ppb, H_2 ; 30cc/kg), 즉 pH 값을 발전소와 동등하거나 가혹한 조건으로 하여 Inconel 600 및 690에 대한 부식 실험을 수행하였다.

pH 변화에 따라 부식되는 양을 파악하기 위해 $NaHSO_4$, 증류수, $NaOH$ 를 첨가함으로써 수질의 pH 값을 4, 7, 9로 고정하여 각 pH 별로 20일간 실험을 수행하였고, 실험 온도는 315°C이다.

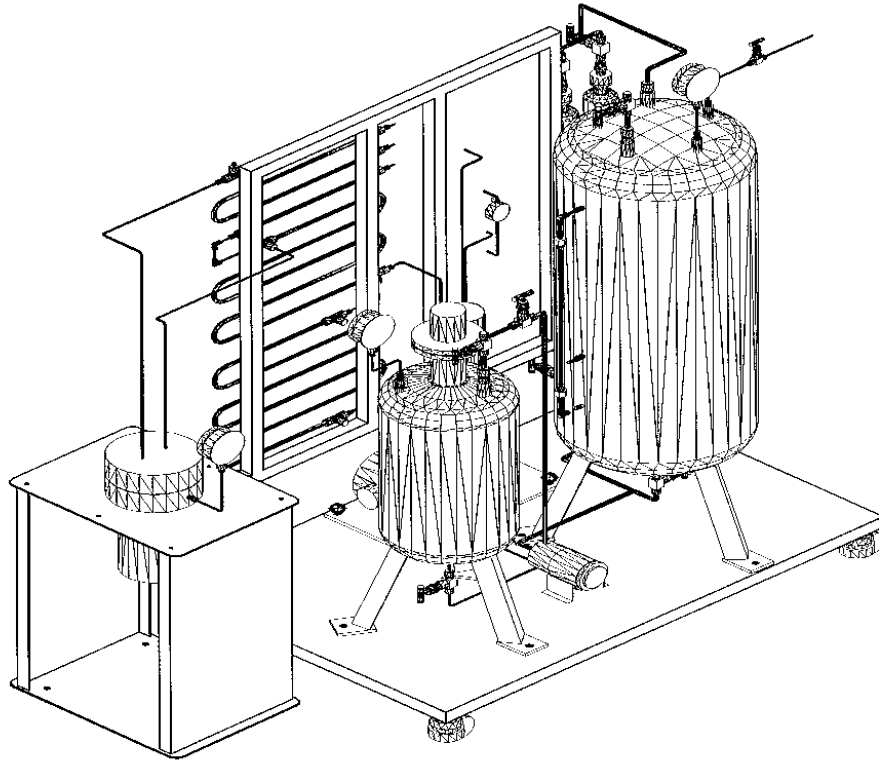


Fig 4. Equipment for Corrosion Experimentation(1/2)



Fig 4. Equipment for Corrosion Experimentation(2/2)

제2절 실험 절차 및 방법

Inconel 600 및 690 재질에 대한 부식 실험을 수행하였고, 부식 실험 결과로 나타난 부식생성물의 양과 부식속도를 평가하기 위해 정량적인 방법론을 도입하여 분석하였으며, 이에 대한 절차 및 방법은 다음과 같다.

1. 시편 제작

- 가. Inconel 600 및 690 tube를 일정한 크기로 절단
- 나. 절단한 tube에 대해 압연처리 수행
- 다. 압연 처리된 tube는 Inconel 600 및 690 시편 각각에 대해 1070℃와 1100℃로 열처리 수행
- 라. 열처리된 tube를 20×20×2mm 크기로 실험 시편을 제작

제작한 시편의 형상과 제원을 Fig 5.과 Table 3.에 도시하였고, 실험 결과로 나타난 부식생성물의 양을 파악하기 위해서는 시편의 체적을 먼저 계산하여야 하며, 체적 계산식은 다음과 같다.

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

Table 3.에 제시된 시편 제원을 분석해 보면 두께에서는 기계적 공차가 존재하지 않았지만 test section의 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 공차이다.

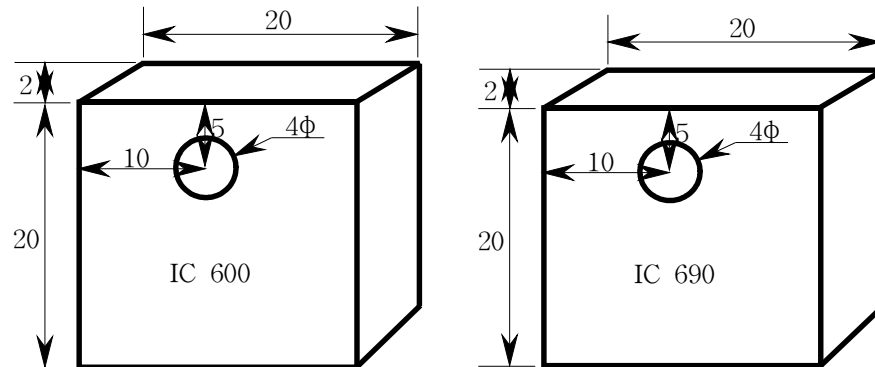


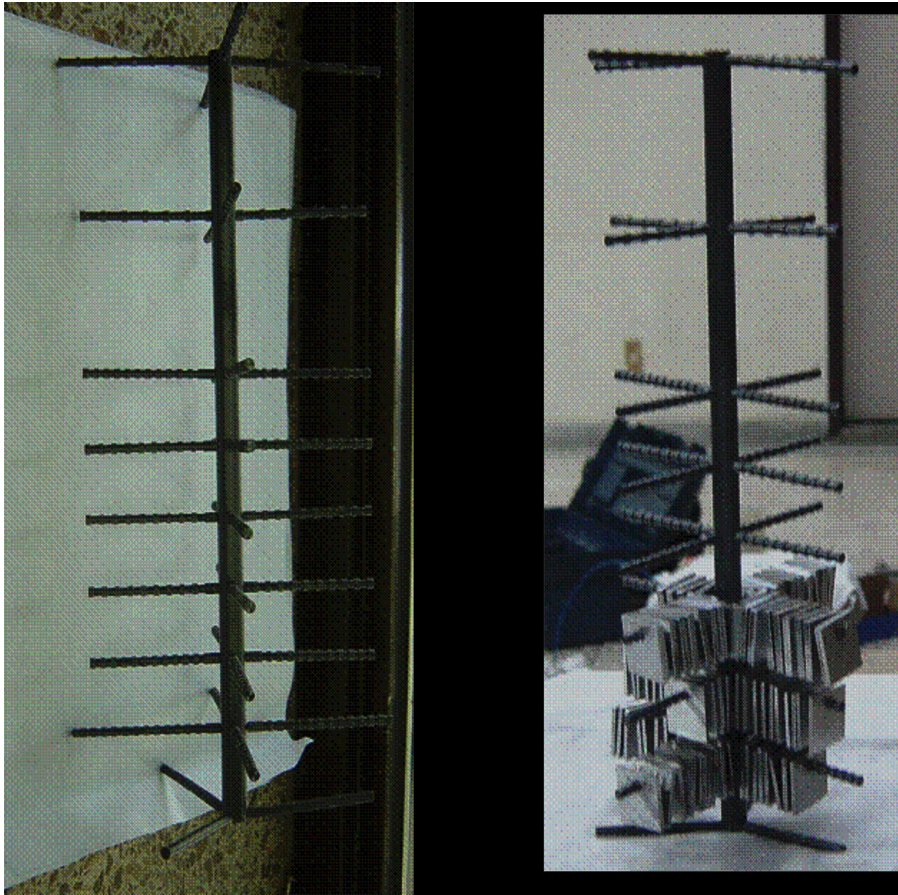
Fig 5. Configuration of Test Specimen(unit : mm)

Table 3. Factor Test Specimen

Test Specimen	Length(mm)	Width(mm)	Thickness (mm)	Test Specimen Volume(mm ³)
Inconel 600	20±0.05	20±0.05	2	775
Inconel 690	20±0.05	20±0.05	2	775

시편과 시편, 시편과 지지대 그리고 시편과 autoclave의 절연이 본 실험을 수행하는 필수요소이다.

이를 위해 Zr rod를 구입하여 Zr을 고온에서 산화시킨 후 Zr 산화막의 안전성과 절연성을 300℃의 실험용액에서 평가하였다. 그 결과를 바탕으로 Zr rod를 이용하여 시편 지지대를 제작하였다. 시편의 holder 및 시편장착 모습을 Fig 6.에 도시하였다.



(a)

(b)

Fig 6. Test Specimens Holder(a) and Installation Form(b)

2. 시편 무게 측정

- 가. 20mm×20mm×2mm 크기로 제작된 총 12개 시편에 대해 #600, #800, #1000, #1200 grid의 sand paper를 순차적으로 사용하여 surface roughness를 일정하게 하기위해 polishing 작업 수행하였다.
- 나. 총 12개 시편에 번호를 매긴 후 아세톤 및 증류수를 사용하여 탈지 및 세척 작업을 수행하였다.
- 다. 시편을 완전히 말린 후 10^{-4} g까지 측정할 수 있는 전자저울을 사용하여 무게를 측정하였고, 그 결과를 Table 4.에 나타내었다.
- 라. 비교적 무게를 정확하게 측정하기 위해 각 시편을 두 사람이 번갈아 가면서 3번씩 측정하여 평균하였다.

Table 4. A Measured Value of Test Specimens Weight

Inconel 600	Weight (g)	pH	Inconel 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	

3. 표면 촬영

시편의 표면 상태는 실험 결과에 영향을 미칠 수 있기 때문에

#600, #800, #1000, #1200 grid의 sand paper로 polishing 작업을 수행하여 표면 거칠기를 일정하게 유지한 후, SEM(Scanning Electron Microscope) 장비를 사용하여 표면 촬영을 하였고, 그 결과를 Fig 7. 과 8.에 도시하였다.

1500배로 시편 표면을 촬영한 Fig 7.과 Fig 8.을 보면 표면 거칠기는 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

본 실험에서는 모든 시편의 표면을 다 촬영할 수 없어서 Inconel 600 및 690으로 제작된 시편들 중에 각 재질을 대표할 수 있는 시편 하나만을 선정하여 표면 촬영을 하였다.

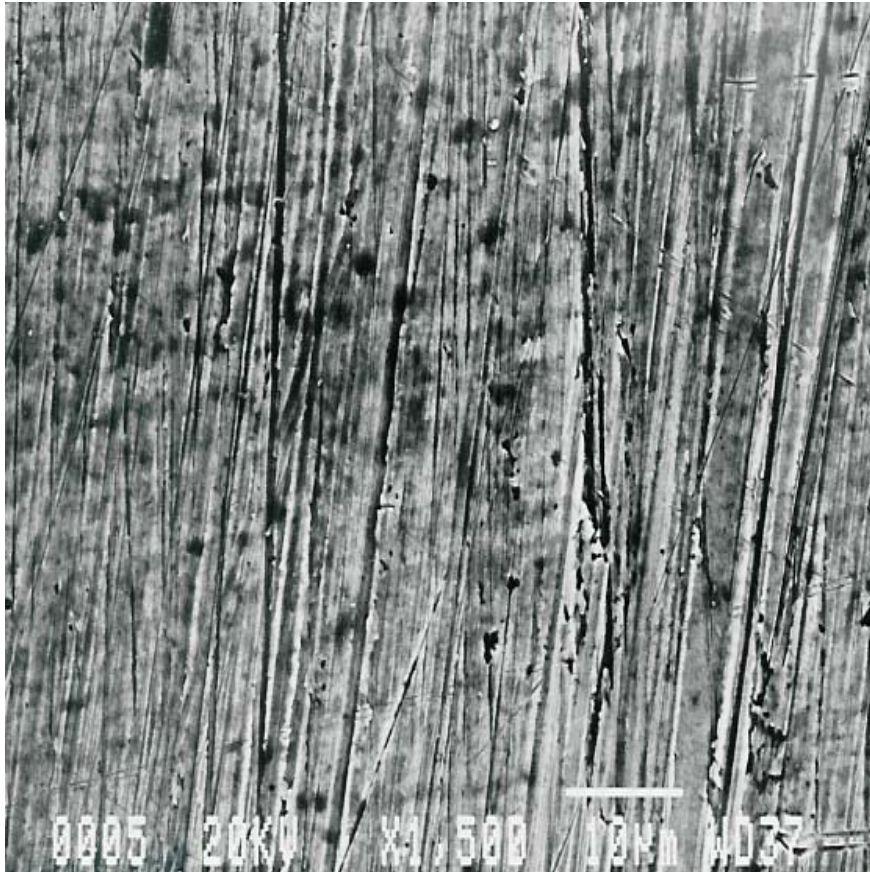


Fig 7. Result of SEM Photograph(Inconel 600)

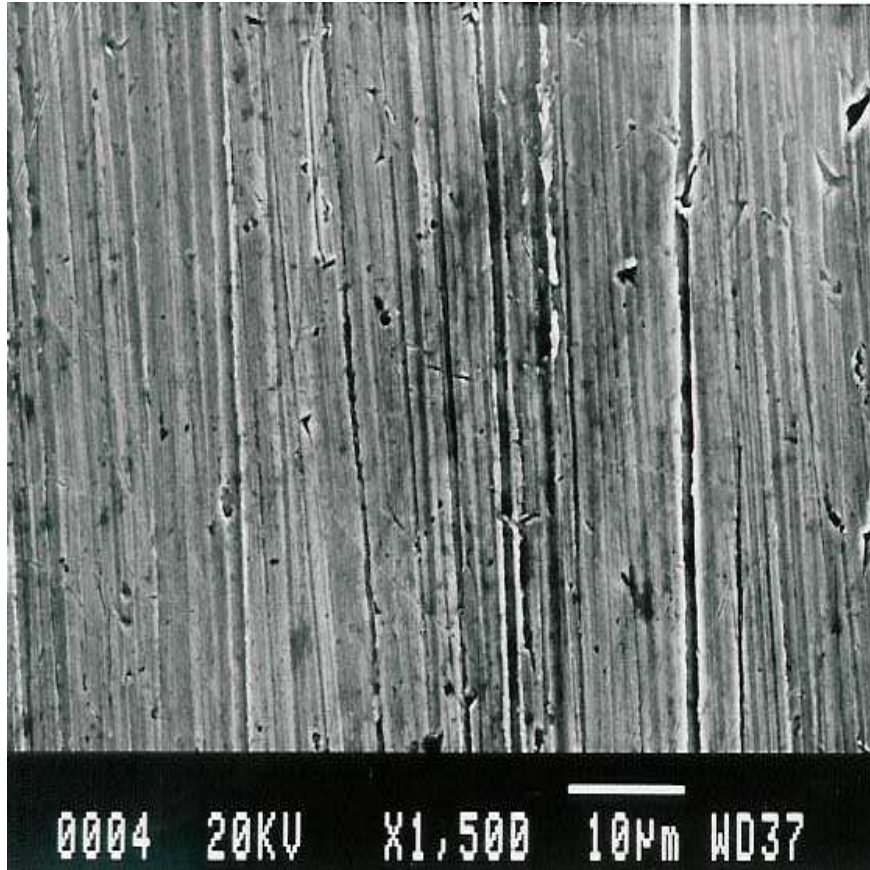


Fig 8. Result of SEM Photograph(Inconel 690)

4. 실험 수행

본 논문에서는 Fig 4.에 제시된 실험 장치 및 장비를 이용하여 일반부식에 대한 실험을 수행하였고, 실험 온도는 실제 원자력발전소의 정상운전 조건에 맞게 315℃로 설정하였으며, 실험에 관련된 유일한 control variable은 pH 값이다.

5. 부식생성물의 표면 촬영

위 제1절에서 제시한 실험 장비를 이용하여 부식 실험을 수행하고 난 후, 부식생성물의 표면 상태를 파악하기 위해 SEM 장비를 이용하여 시편 표면을 촬영하였고, 그 결과를 Fig 9.~Fig 14.에 나타내었다.

Fig 9.와 Fig 12.는 pH 9에서 실험한 결과로 Inconel 690 재질인 T1 시편의 표면 상태, 즉 부식생성물의 형태는, 마치 모래 입자가 붙어있는 듯한 형상이고, Inconel 600 재질인 V1 시편의 표면은 실모양의 작은 입자 형태로 존재하고 있다.

Fig 10.과 Fig 13.은 pH 7 조건에서 실험한 결과 시편의 표면 상태를 나타낸 것으로 V3 및 T3 시편의 표면 상태는 모두 작은 stick 모양의 형태를 띄고 있고, pH 4에서의 실험 결과인 Fig 11.과 Fig 14.의 경우에는 부식성물들이 덩어리 형태로 뭉쳐져 있는 것을 볼 수 있다.

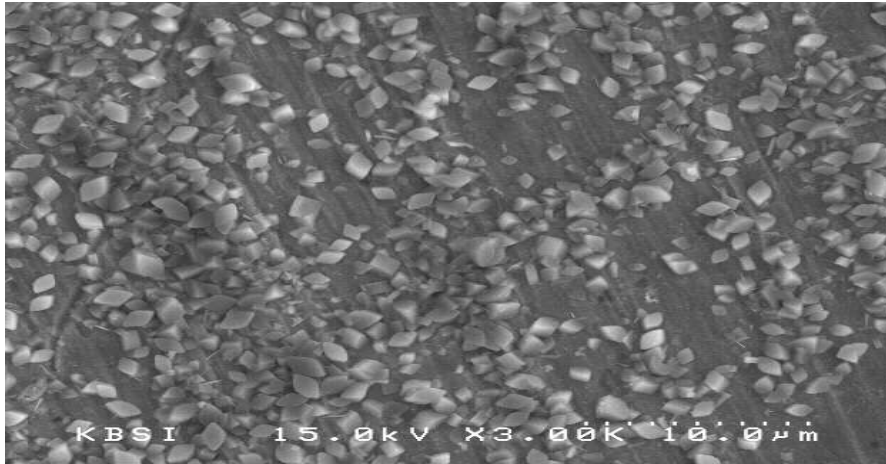


Fig 9. T1 Test Specimen(Inconel 690)

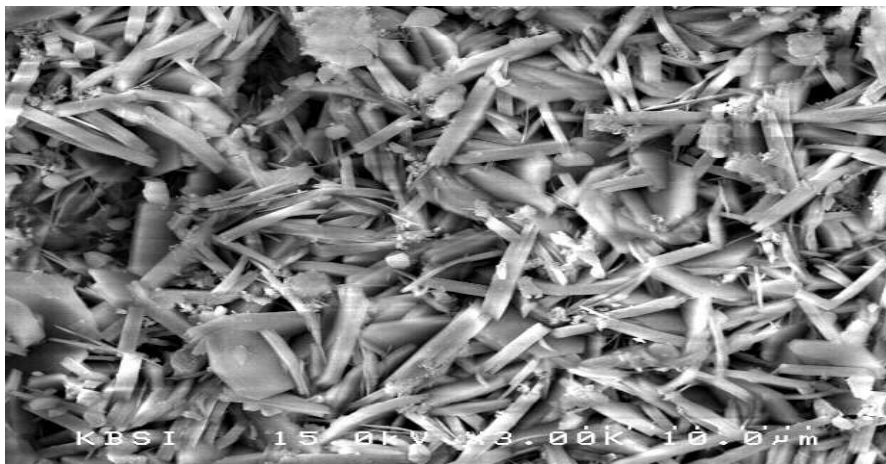


Fig 10. T3 Test Specimen(Inconel 690)

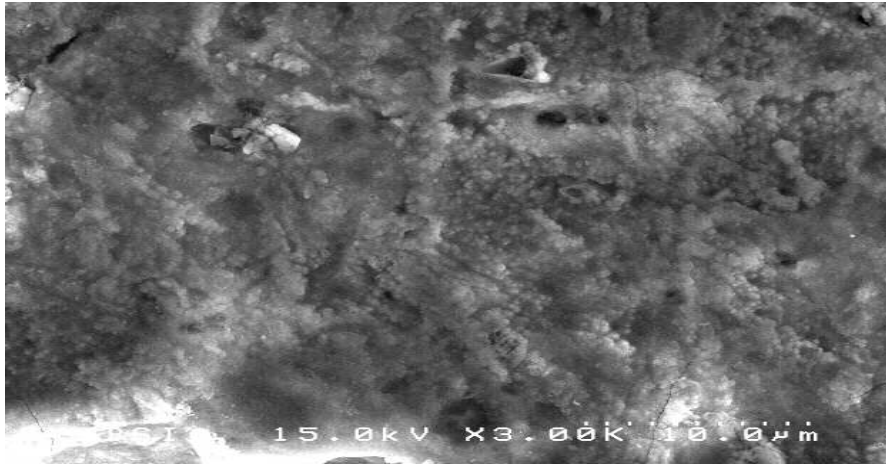


Fig 11. T5 Test Specimen(Inconel 690)



Fig 12. V1 Test Specimen(Inconel 600)

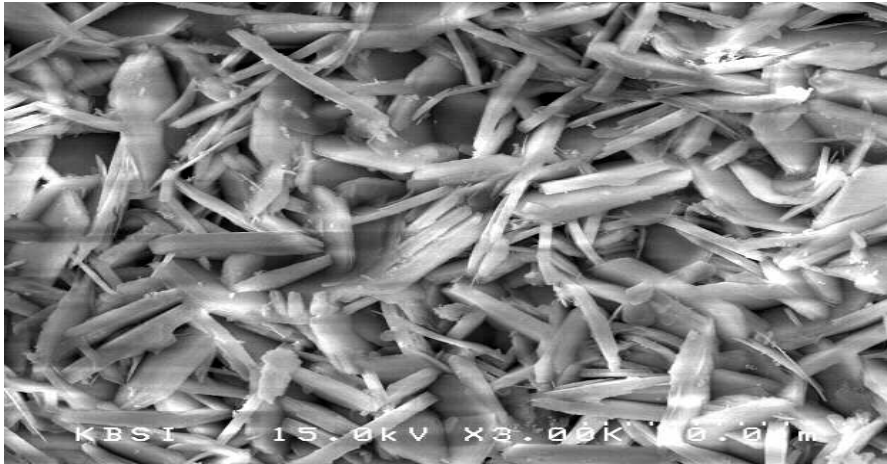


Fig 13. V3 Test Specimen(Inconel 600)

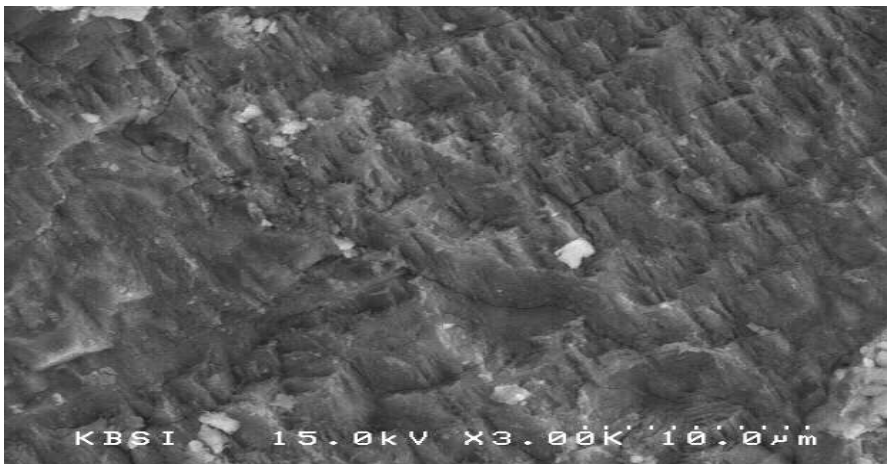


Fig 14. V5 Test Specimen(Inconel 600)

6. 부식생성물에 대한 정량분석 수행

Inconel 600 및 690 재질을 이용하여 시편을 제작하여 pH 별로 20 일씩 총 60일간 일반 부식에 대한 실험을 수행하였고, 부식 실험 결과로 나타난 부식생성물의 양과 부식 속도, 부식 경향을 파악 및 분석하기 위해 GDS 장비를 이용하였으며, 정성적인 분석은 수행하지 않았다. 기존의 분석 방법과 달리 GDS 장비를 이용할 경우 test section 뿐만 아니라 부식에 의해 test section 표면에 형성된 부식생성물들에 대한 정량화도 가능하기 때문에 기존의 결과에 비해 비교적 정확한 결론을 도출할 수 있을 것으로 판단되고, 정량 분석에 사용된 GDS 장비의 원리 및 방법은 다음과 같다.

가. GDS 장비의 기본 원리 및 사항

GDS는 Glow Discharge Lamp를 이용하여 시편 중의 원소를 Sputtering하고, 다시 발광하게 한 후 Spectrometer에서 분광토록 하여 정량적으로 분석할 수 있는 장비로 구성은 Glow discharge lamp, Spectrometer, RF Generator, Electronic, Computer로 되어 있다. RF Generator만을 사용하여 Generator의 교체 없이 전도체 및 비전도체의 분석이 가능하고, 각종 금속의 성분 분석 및 비전도체의 성분 분석에 많이 사용되고 있다. 또한, Polychromator의 channel을 이용하여 Depth Profile이 가능하여 Coating물질을 층별로 분석 할 수 있으며, 기본적인 사항을 Fig 15. ~ Fig 17. 까지 나타내었다.

vacuum

Fig 15. Sample Introduction System(Principle of Glow Discharge)

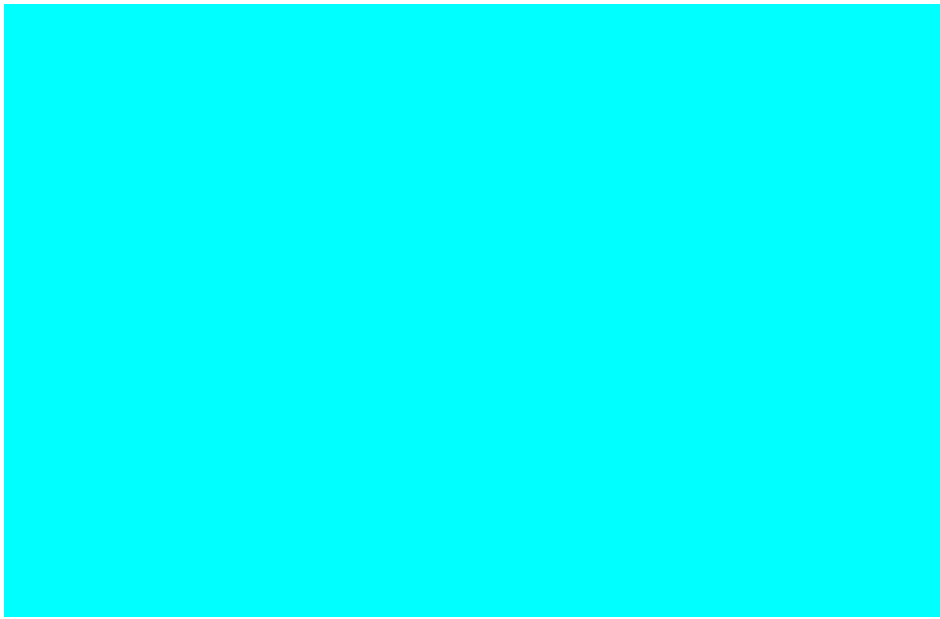
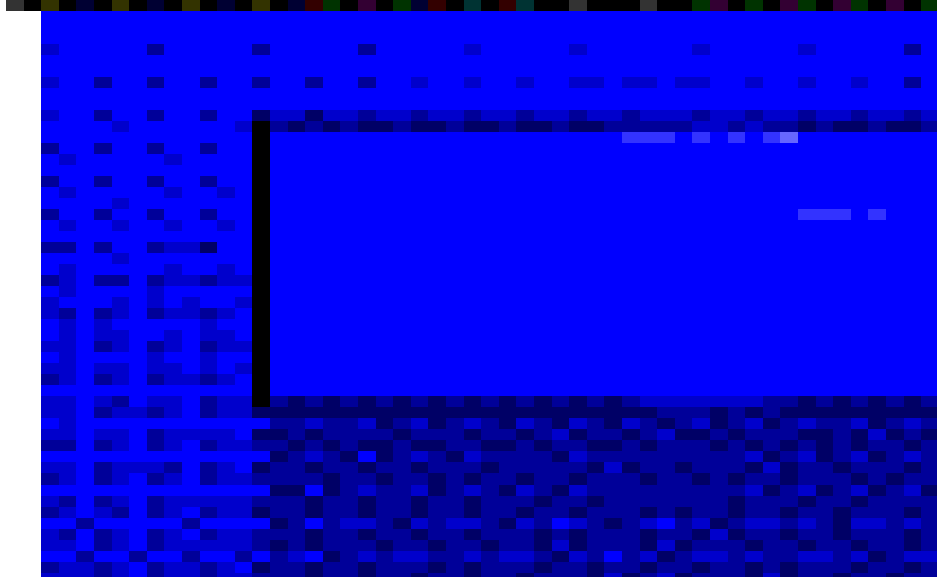


Fig 16. Layout of a GD Instrument : high resolution polychromator



- * 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.

Fig 17. Photo Detector(Photomultiplier Tubes)

나. GDS 장비의 분석 절차 및 방법

- (1) 분석대상 시편의 적절한 sputtering 조건 및 depth resolution 등을 결정하기 위한 예비실험 실시
- (2) 표준시편(Standard Reference Materials)을 이용하여 분석대상 시편의 함량 산출
- (3) 분석조건 : sputtering pressure는 400 Pa, RF power는 30 W, Module은 750 및 Phase는 450
- (4) 분석 후 depth profiler meter를 이용하여 깊이 측정 및 적용

다. GDS 장비의 오차(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
- (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. 부식속도 계산

부식 속도를 평가하는 방법으로는 두 가지 방법이 있을 수 있다.

첫 번째 방법은 부식 실험 수행 전·후에 시편을 무게를 측정함으로써 시간 변화에 따른 시편의 무게 감량을 평가하는 것으로 이 방법을 적용할 경우 산화막을 제거해야 한다는 단점이 있다. 또한 부식에 의해 생성된 산화막 전체를 제거하는 방법이기 때문에 산화막 내부에

존재하는 각 핵종의 정보를 얻을 수 없다는 단점이 있다.

두 번째 방법은 각 pH 별로 일반부식 실험을 수행한 후, 부식에 의해 시편 표면에 형성된 산화막을 제거하지 않고 산화막 및 시편 내부에 존재하는 원소들을 분석함으로써 이들 원소들의 상대적인 양을 파악하는 방법이다.

두 번째 방법을 적용하여 분석을 수행할 경우 산화막 및 시편 표면 내부에 존재하는 각 원소들의 거동 뿐만아니라 부식 경향을 파악할 수 있기 때문에 첫 번째 방법에 비해 좀 더 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 현재까지 Inconel 600 및 690 재질에 대한 산화막 제거 방법론이 개발되지 않았을 뿐만 아니라 실험 결과에 대한 좀 더 정확한 결과를 도출하기 위해 두 번째 방법인 정량적인 분석을 수행하였고, 정량적 분석을 위해 GDS 장비를 사용하였다.

본 논문에서는 부식 실험 및 정량적 분석 결과에 근거하여 피폭 측면에서 기여도가 큰 *Fe*, *Cr*, *Ni* 원소에 대한 거동 및 부식 특성과 부식 속도를 평가하였다.

제4장 실험결과 분석

본 연구에서는 Inconel 600 재질로 제작된 시편 V1~V6과 Inconel 690으로 제작된 시편 T1~T6을 대상으로 pH 값에 따른 부식생성물의 양과 부식 속도 및 경향을 파악하였다. 제작된 시편 규격은 20mm×20mm×2mm이고, 규격으로 총 12개의 test section을 제작하여 pH 값에 따라 20일간 부식 실험을 수행하였고, 부식 실험 결과는 GDS장비를 이용하여 피폭선량 측면에서 기여도가 큰 핵종인 Fe , Cr , Ni 원소에 대한 정량적 분석을 수행하였다.

제1절 실험결과 검증

본 연구에서 부식 실험을 위해 사용한 재질은 Inconel 600 및 690으로 이들 재질을 구성하고 있는 핵종들에 대한 정량화 결과가 없기 때문에 Table 5.에 제시되어 있는 Inconel 600 및 690의 핵종 구성비를 이용하여 분석 결과를 검증하였다^{1,3)}.

Table 5.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, V5는 단면을 분석하였고 V2, V4, V6 시편에 대해서는 양면을 분석하는데 사용하였다.

이들 시편에 대해 GDS 장비를 이용하여 정량적으로 분석한 결과를 나타낸 Table 5.를 보면, V3, V4, V6 시편의 Cr 원소를 제외한 나머지 시편들의 원소 함량은 기존 자료^{1,3)}에서 제시한 제한치 내에 포함되는 것을 볼 수 있다. V3, V4, V6 시편의 Cr 함유량은 기존 자료

에서 제시한 제한치에 비해 약 10% 정도 높게 나타났다.

Inconel 690으로 제작된 총 6개 시편 T1, T2, T3, T5 시편의 경우는 단면을 분석에 사용하였으며, T4, T6에 대해서는 양면을 분석하는데 사용하였다.

Table 6.은 정량적 분석 결과를 도시한 것으로 Inconel 600 재질과 마찬가지로 Cr 원소를 제외한 모든 시편에서의 원소 함유량은 기존 자료에서 제시한 제한치^{1,3)} 범위 내에 포함되었고, Cr 원소의 함유량의 경우 모든 시편에서 기존 자료에 비해 약 10% 정도 오차가 있는 것을 확인할 수 있다.

이러한 비교·분석 결과로부터 GDS 장비를 이용하여 부식생성물에 대한 정량적 분석을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

Table 5. Performance Results of GDS Equipment for Test
Verification of Inconel 600

Element	Composition(%)						
	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Fe	6-10	8.2-8.8	8-9	8.8-9.2	8-8.5	8.5	7-8
Ni	72-80	73-77	71-73	70-71	76-77	74-75	71-73
Cr	14-17	13.5-17	16.5-17	18.5-18.8	13-13.5	17	13-13.5
Zr	-	-	-	-	-	-	-
Sn	-	-	-	-	-	-	-
Mn	1.0*	0.11*	0.12*	0.14*	0.14*	0.12*	0.14*
C	1.15*	0.04*	0.02*	0.02*	0.02*	0.04*	0.02*
Si	0.5*	0.18*	0.16*	0.18*	0.18*	0.2*	0.18*
P	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0.75*	0.06*	0.05*	0.05*	0.05*	0.06*	0.05*
Co	-	-	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	0.2*	0.25*	0.25*	0.25*	0.2*	0.25*
H	-	0.06*	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*
Ti	-	0.35*	0.4*	0.4*	0.4*	0.4*	0.4*
Na	-	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*

* : Maximum value.

주) V0 ; before experiments

V1~V5 ; after experiments

Table 6. Performance Results of GDS Equipment for Test
Verification of Inconel 690

Element	Composition(%)						
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Fe	7-11	8.8-9.5	7.5-8.5	9.2-9.7	8-9	9-9.5	8-8.5
Ni	58**	60-64	67-69	57.5-59	64-66	59-60	65-68
Cr	27-31	24-30	23-24	30.5-31.5	24-26	29-30	24-25
Zr	-	-	-	-	-	-	-
Sn	-	-	-	-	-	-	-
Mn	0.5*	0.13*	0.12*	0.14*	0.12*	0.12*	0.12*
C	0.05*	0.04*	0.04*	0.02*	0.04*	0.04*	0.04*
Si	0.5*	0.18*	0.18*	0.2*	0.18*	0.18*	0.18*
P	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0.5*	0.06*	0.05*	0.05*	0.05*	0.05*	0.05*
Co	-	-	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	0.5*	0.4*	0.5*	0.4*	0.4*	0.4*
H	-	0.05*	0.05*	0.05*	0.05*	0.05*	0.05*
Ti	-	0.35*	0.4*	0.4*	0.4*	0.4*	0.4*
Na	-	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*

* : Maximum value. ** :Minimum value.

주) T0 ; before experiments

T1~T5 ; after experiments

제2절 Inconel 690 분석

1. pH 9에서 수행한 실험

pH 9에서의 실험 결과인 T1 시편에 대한 정량화 결과를 Fig 18.에 도시하였고, 이 결과를 좀 더 세밀하게 분석하기 위해 시편에서 산소 분률과 철 분률의 관계를 Fig 19.에 나타내었다.

Fig 18.과 Fig 19.에서 두께의 기준점은 부식에 의해 생성된 산화막의 표면이며, 부식 여부를 판단하기 위해 산소 분률을 사용하였다.

Fig 18.과 Fig 19.을 통해 볼 수 있듯이 두께가 3~8 μm 인 시편 내부에서 산소의 분률은 거의 0%에 가깝고, 부식이 시작되기 전 단계인 약 1.8~3 μm 구간에서의 산소 분률은 약 8% 정도까지 서서히 증가하였다가 부식이 시작된 후인 1~1.8 μm 에서는 약 70~80%까지 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 산소 분률 곡선과 Fe 분률 곡선이 만나는 지점을 부식이 시작되는 지점이라 정의하여 부식생성물의 두께를 도출하였고, Fig 18.과 Fig 19.에서 T1 시편이 부식되는 시작점은 1.78 μm 였다.

부식이 시작되는 지점을 선정하는 것은 부식생성물의 양과 부식 속도를 계산하는데 있어서 많은 영향을 미칠 수 있기 때문에 부식 시작점을 정확하게 정의할 필요가 있다. Fig 18.을 통해 볼 수 있듯이 원시편 측면에서 과도상태가 시작되는 지점(산소 분률이 증가하기 시작하는 지점)을 부식 시작점이라 정의하여 산화막 두께를 도출할 수 있지만 이럴 경우 많은 오차를 수반할 것으로 판단되며 이에 대한 근거는 다음과 같다.

- 가. 본 연구의 목적은 정상 가동 중인 원자력발전소의 증기발생기 튜브에서 부식에 의해 생성된 방사성 부식생성물의 양과

부식 속도를 파악하는 것으로 정상상태의 값이 중요함

나. Fig 19.에 의하면 정상상태는 $0\sim 1\mu\text{m}$ 구간으로 과도상태인 $1\sim 3\mu\text{m}$ 구간에 비해 짧고, 부식에 의해 형성된 Fe 원소의 분률 또한 과도하게 높게 나타나고 있으며, 이로 인해 부식 생성물의 양 및 부식 속도를 파악하는데 많은 오차를 수반할 것으로 판단됨

다. 이러한 분석에 근거하여 본 과제에서는 철 원소의 분률 곡선과 산소 원소의 분률 곡선이 만나는 지점을 부식시작점이라 정의함으로써 과도상태의 영향을 감소시킬 수 있을 것으로 판단함

부식생성물의 표면 근처인 $0\sim 1\mu\text{m}$ 구간에서 산소 함유량은 약 80% 정도에서 saturation되었다가 부식생성물 표면에서 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있고, 철의 경우 부식이 시작된 후에 산소 함유량과 반대의 경향을 보이면서 선형적으로 감소하였다가 saturation 상태에서는 거의 0에 가까워지는 것을 볼 수 있다.

Fig 18.를 분석해 보면 Fe, Cr, Ni 순으로 부식이 시작되는 것을 볼 수 있고, 부식이 시작됨과 동시에 이들 원소들이 거의 선형적으로 감소하였다가 saturation 상태에 도달하면서 이들 핵종의 분률은 거의 0에 가까워지는 것을 볼 수 있으며, T1 시편의 부식 두께는 $1.78\mu\text{m}$ 로 상당히 작기 때문에 saturation 상태의 두께는 짧게 나타나고 있다.

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

Fig 20.은 T2 시편에 대한 정량화 결과를 도시한 것으로 Ni ,

Cr, Fe 원소의 거동 경향은 Fig 18.과 거의 유사하고, 차이가 있는 것은 산화막의 두께로 T1 시편의 산화막 두께는 $1.78\mu\text{m}$ 인 반면, T2 시편의 산화막 두께는 Fig 20.에 보이는 것처럼 $1.16\mu\text{m}$ 로 T1 시편에 비해 약 35% 정도 낮게 나타나고 있다.

이러한 차이를 보이는 것은 test section의 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 $1.47\mu\text{m}$ 이다.

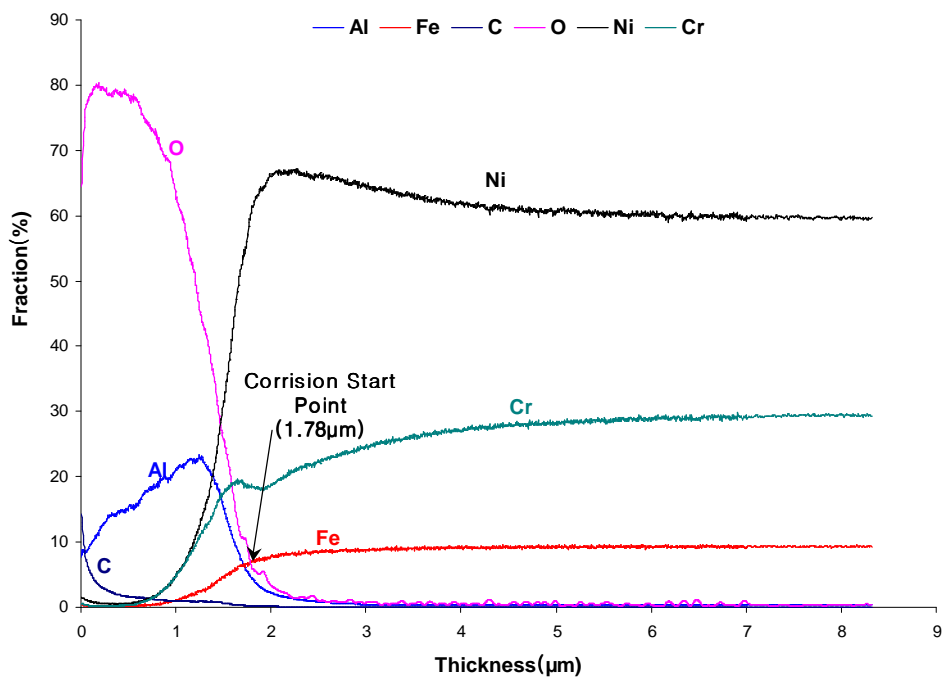


Fig 18. Quantitative Analysis Result of T1 Test Specimen

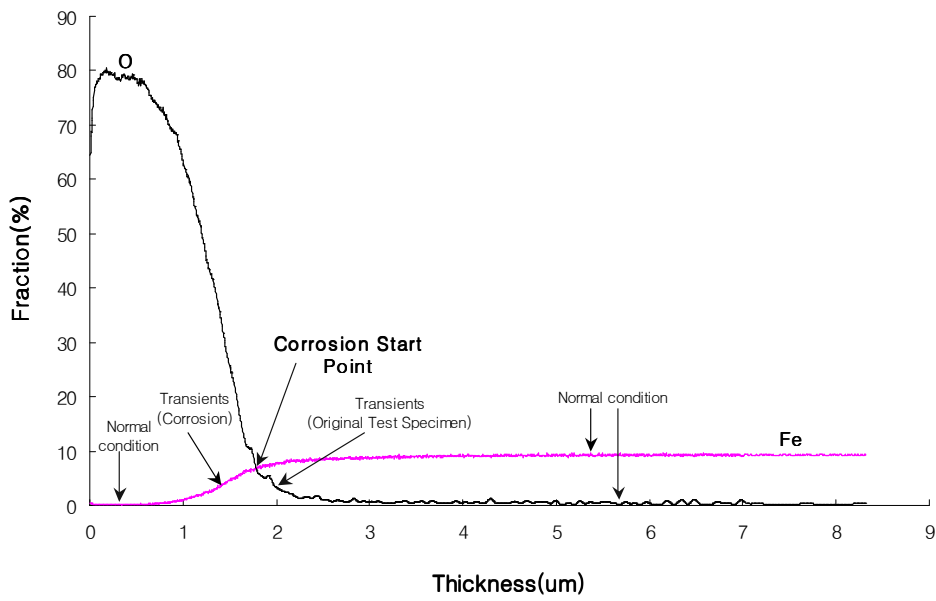


Fig 19. *Fe* Element Tendency of T1 Test Specimen

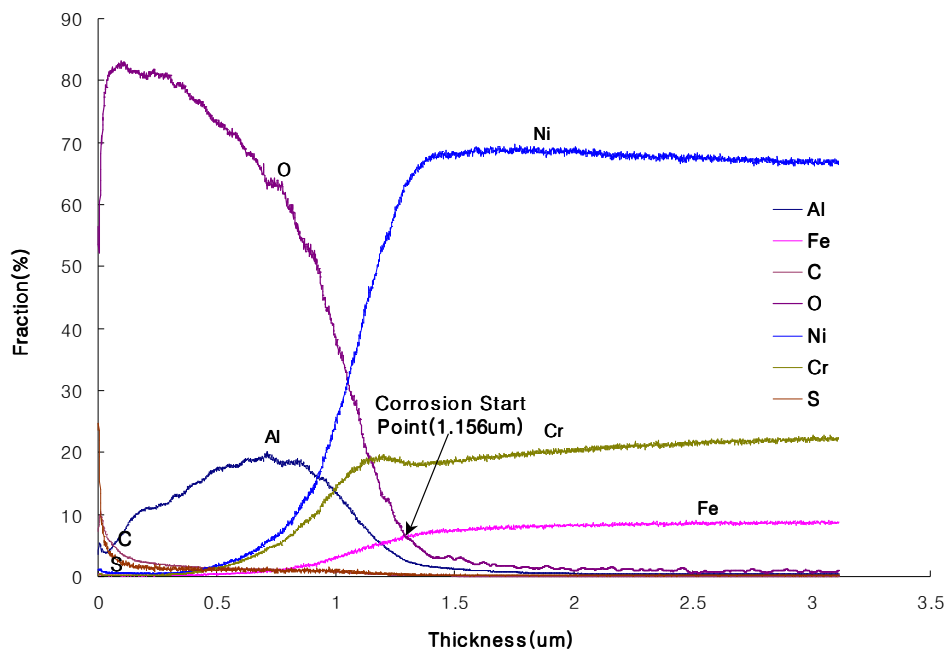


Fig 20. Quantitative Analysis Results of T2 Test Specimen

2. pH 7에서 수행한 실험

Fig 21.~Fig 23.은 pH 값이 7인 조건에서 수행한 부식실험 결과를 정량화한 것이다. T3 시편에 대한 정량화 결과를 도시한 Fig 21.을 보면 T1 시편에 비해 saturation 상태의 길이가 길고, 부식에 의해 형성된 산화막 두께 또한 $9.76\mu\text{m}$ 로 T1 시편에 약 5배 정도 크게 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있다.

Fig 18.와 Fig 21.을 비교 분석해 보면 Fig 18.에서 Fe, Cr, Ni 원소의 분률은 부식이 시작됨과 동시에 급격하게 0에 근접하는 반면, Fig 21.에서의 경향은 다소 다르게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

즉, Fe 원소의 경우 Fig 18.와 Fig 21.에서 거의 유사한 경향을 보이고 있지만 Cr, Ni 원소의 경우에는 경향이 다르게 나타나고 있다.

Fig 21.에 도시된 Cr 원소는 부식이 시작된 후에 거의 선형적으로 감소하였다가 아주 서서히 0에 근접하고 있는 반면, Ni 원소는 부식이 시작된 이후에 $7\sim 9\mu\text{m}$ 구간에서 거의 선형적으로 감소하였다가 $1\sim 7\mu\text{m}$ 구간에서 saturation 상태로 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

부식에 의해 생성된 Al, Na, Si 원소는 피폭에 기여하지 않기 때문에 이들 핵종에 대한 분석은 제외하였다.

Fig 22.와 Fig 23.은 각각 T4 시편에 대해 양면분석을 수행하여 정량화 결과를 도시한 것으로 Ni, Cr, Fe 원소에 대한 경향만을 나타내었고, Fig 21.과 비교 분석해 보면 산소 분률에 따라 약간의 차이는 있지만 이들 원소의 경향 자체는 거의 유사하며, 산화막 두께 또한 큰 차이가 없음을 확인 할 수 있다.

Fig 22.의 $4\sim 9\mu\text{m}$ 구간을 보면 산소 분률이 완만하게 증가하고 있고, 이에 따라 Ni 원소도 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있는 반면, Fig 23.의 $6\sim 9\mu\text{m}$ 구간에서는 산소 분률이 급격하게 증가하였다가

한 단계의 plateau가 존재한 후 다시 증가하고 있고, 이에 따라 N_i 분
률 곡선은 peak가 생성된 후 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig 21.에서 산화막 두께는 $9.76\mu\text{m}$ 이었고, Fig 22.와 Fig 23.에서
의 산화막 두께는 각각 $9.23\mu\text{m}$ 와 $9.48\mu\text{m}$ 로 최대 $0.53\mu\text{m}$ 정도의 차이를
보이고 있으며, 본 연구에서 부식 속도를 계산하기 위해 사용한 산화
막 두께 값은 이들 세 값을 평균한 값으로 $9.49\mu\text{m}$ 을 사용하였다.

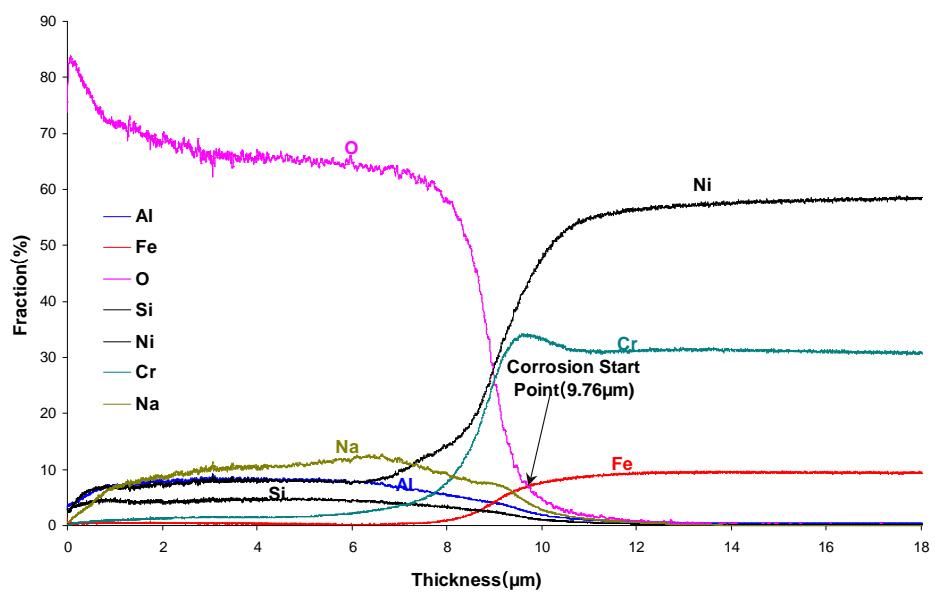


Fig 21. Quantitative Analysis Results of T3 Test Specimen

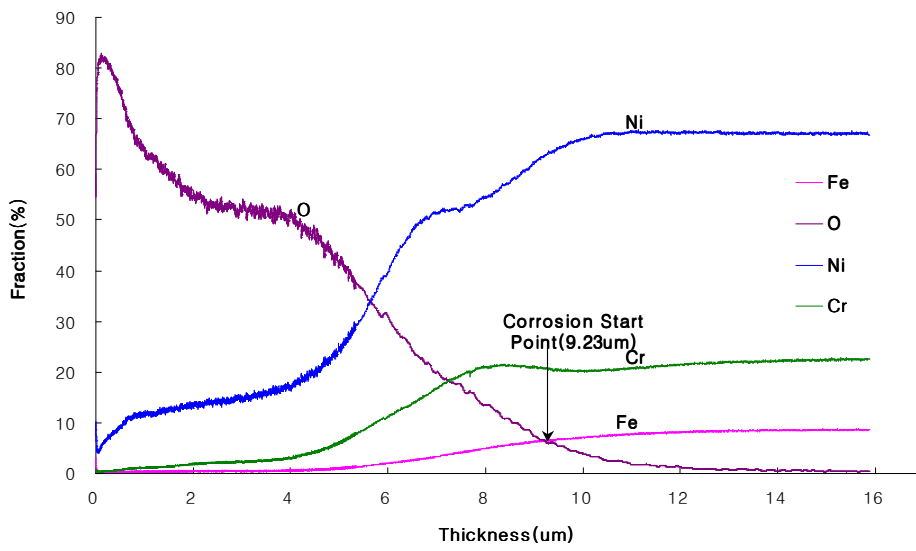


Fig 22. Quantitative Analysis Results of T4-1 Test Specimen

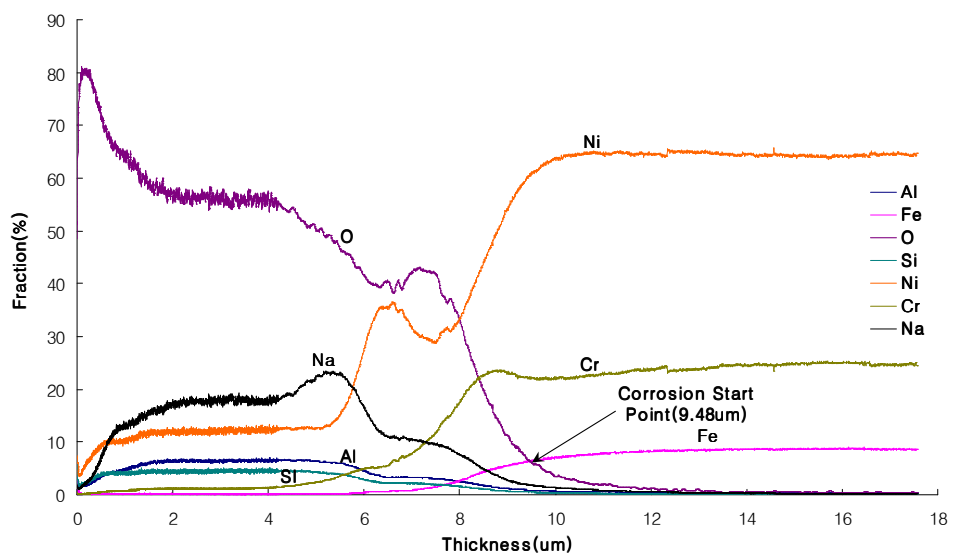


Fig 23. Quantitative Analysis Results of T4-2 Test Specimen

3. pH 4에서 수행한 실험

Fig 24.~Fig 26.는 pH 4에서 실험한 결과를 정량화한 것이다. T5 시편의 정량화 결과를 도시한 Fig 24.을 통해 볼 수 있듯이 2.57 μm 에서 부식이 시작되고 있고, 부식이 시작된 이후에 Ni 과 Fe 은 감소를 하지만 Cr 은 거의 변화가 없거나 오히려 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig 24.를 Fig 18. 및 Fig 21.과 비교 분석해보면 Fig 24.에서 Fe 원소는 부식이 시작된 후 oscillation을 하면서 감소하고 있는 반면, Fig 18.과 Fig 21.에서는 oscillation 없이 0에 근접하는 경향을 보이고 있다.

Ni 원소의 경우 Fig 18.에서는 부식이 시작된 이후에 거의 선형적으로 감소하였다가 0에 근접하지만 Fig 21.과 Fig 24.에서는 0에 가깝게 감소하는 것이 아니라 일정한 양을 계속 유지하는 경향을 보이고 있다.

Fig 24.의 0~1.5 μm 구간에서 Ni 원소는 아주 미세하게 감소하는 경향을 보이는 반면, Fig 21.의 1~6 μm 구간에서 Ni 원소 함유량은 약 7% 정도로 일정한 값을 유지하고 있다.

Fig 25.와 Fig 26.은 T4 시편처럼 동일한 조건에서 양면 분석을 수행한 실험으로 Ni , Cr , Fe 원소의 경향을 Fig 24.와 거의 유사함을 알 수 있고, 산화막 두께에서 약간의 차이가 있는 것을 볼 수 있다.

Fig 24.~Fig 26.에서 산화막 두께는 각각 2.57 μm , 2.89 μm , 3.31 μm 로 최대 0.7 μm 정도의 차이를 보이고 있고, Fig 26.을 기준으로 했을 때 상대적인 오차는 최대 22% 정도의 차이를 보였으며, 부식 속도를 계산하기 위해 산화막 두께의 평균값으로 2.92 μm 를 사용하였다.

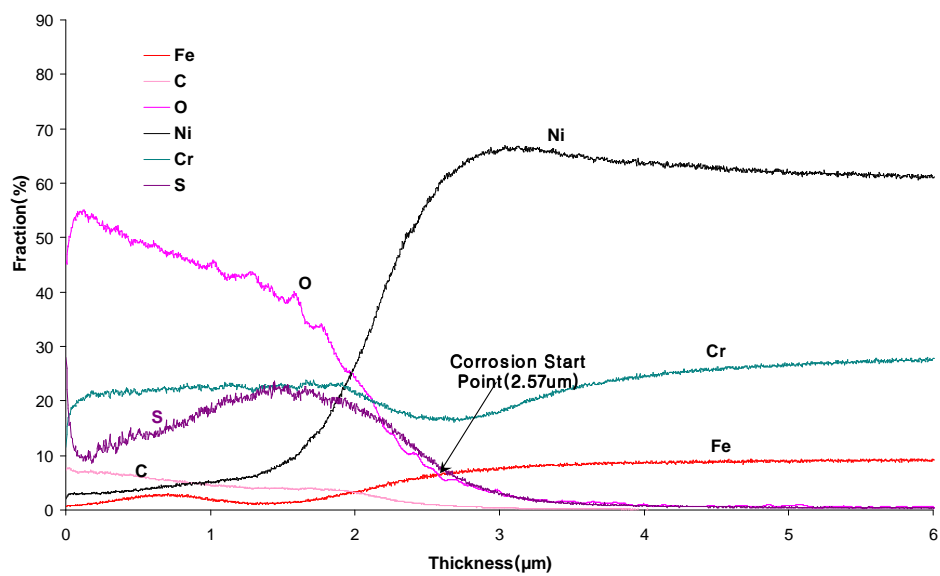


Fig 24. Quantitative Analysis Results of T5 Test Specimen

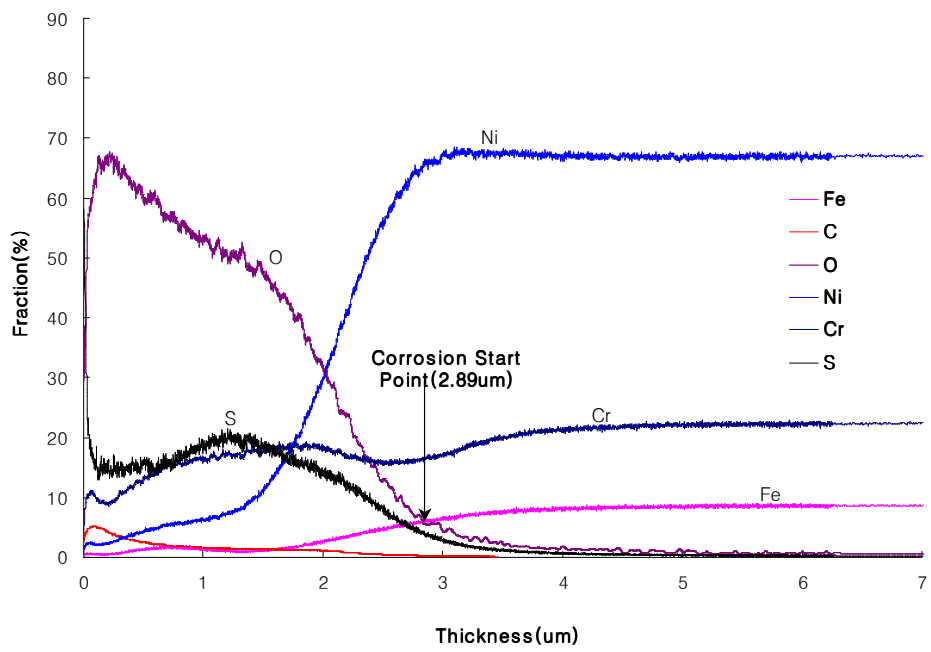


Fig 25. Quantitative Analysis Results of T6-1 Test Specimen

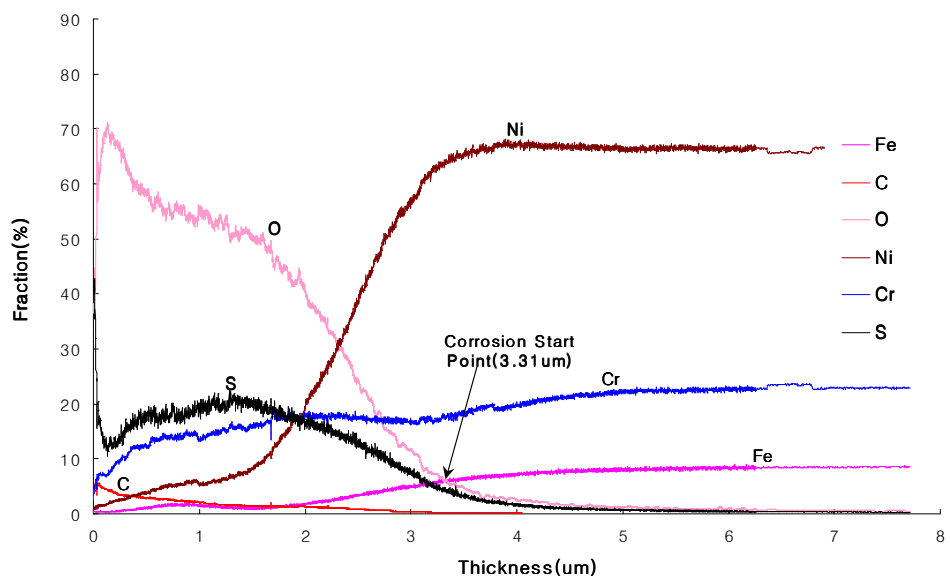


Fig 26. Quantitative Analysis Results of T6-2 Test Specimen

제3절 Inconel 600 분석

1. pH 9에서 수행한 실험

pH 9에서의 실험 결과인 V1 시편에 대한 정량화 결과를 Fig 27. 에 도시하였고, Fig 18.에서 분석했던 방법론에 따라 부식시작점을 정의하여 산화막 두께를 도출하였다.

Fig 27.에서 보여 주듯이 두께가 약 $2.5\sim 6.5\mu\text{m}$ 인 시편에서 산소의 분률은 거의 0에 가깝고, 부식이 시작되기 전 단계인 $1.7\sim 2.4\mu\text{m}$ 구간에서의 산소 분률은 약 7% 정도까지 서서히 증가하였다가 부식이 시작된 후인 약 $0\sim 1.7\mu\text{m}$ 에서는 약 60% ~ 70%까지 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

Inconel 690 재질에 대한 분석 방법과 동일한 조건을 주기 위해 산소분률 곡선과 Fe 분률 곡선이 만나는 지점을 부식이 시작되는 지점이라 정의하여 산화막 두께를 도출하였고, Fig 27.에서 V1 시편이 부식되는 시작점은 $1.71\mu\text{m}$ 이다.

Fig 27.을 분석해 보면 부식생성물의 표면 근처인 $0\sim 1\mu\text{m}$ 구간에서 산소는 60~70% 정도의 범위에서 saturation되었다가 부식생성물 표면에서 급격하게 감소하고 있고, Cr 의 경우 부식이 시작된 후에 산소와 반대의 경향을 보이면서 선형적으로 감소하였다가 saturation 상태에서는 거의 0에 근접하는 것을 볼 수 있는 반면, Fe 원소는 Cr 원소에 비해 아주 서서히 0에 근접하고 있거나 거의 감소하지 않는 경향을 보이고 있다.

Ni 원소의 경우도 Fe , Cr 원소와 마찬가지로 부식이 시작된 이후에 감소하고 있지만 Fe 및 Cr 원소에 비해 분률은 약 15% 정도로 상당히 크고, 감소하는 경향 또한 아주 서서히 진행되고 있음을 볼 수 있다.

Fig 28.과 Fig 29.는 V2 시편의 양면을 분석한 결과로 경향 자체는 Fig 27.와 거의 유사함을 볼 수 있다. Fig 28.와 Fig 29.에서 V2-1 및 V2-2 시편의 산화막 두께는 각각 $1.31\mu\text{m}$ 과 $1.25\mu\text{m}$ 로 산화막 두께의 최대 차이는 $0.45\mu\text{m}$ 로 나타났으며, 이러한 경향을 보이는 것은 앞에서 분석한 바와 같이 시편의 surface roughness에 기인한 것이라 판단된다.

Inconel 600 재질로 제작하여 pH 9 조건에서 수행한 실험 결과 부식 속도를 계산하기 위해 도출한 산화막 두께는 $1.42\mu\text{m}$ 이다.

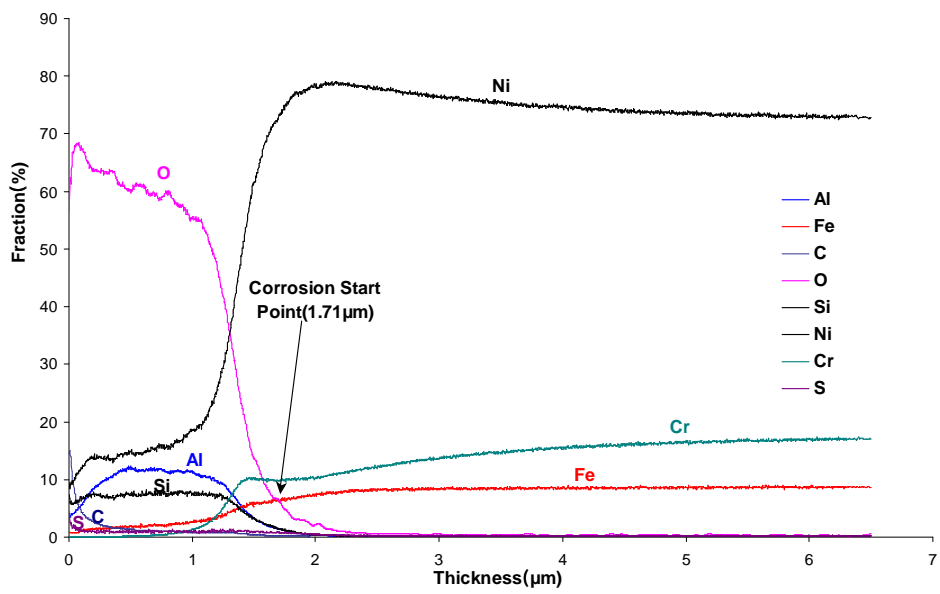


Fig 27. Quantitative Analysis Results of V1 Test Specimen

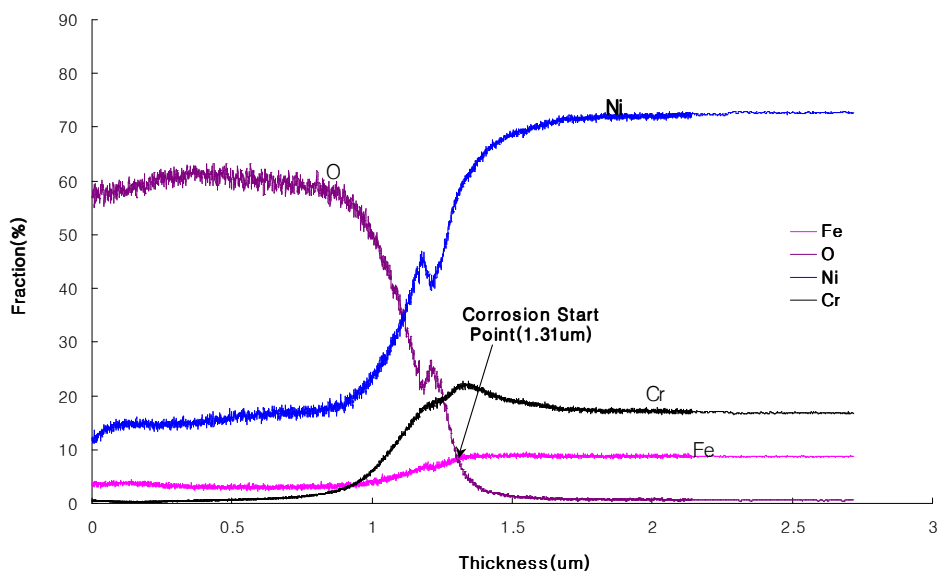


Fig 28. Quantitative Analysis Results of V2-1 Test Specimen

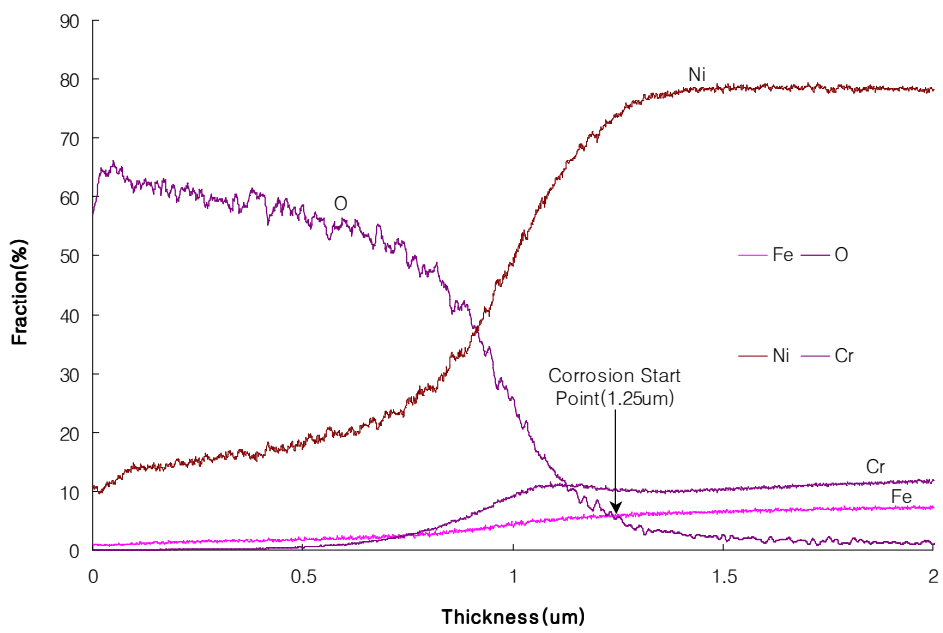


Fig 29. Quantitative Analysis Results of V2-2 Test Specimen

2. pH 7에서 수행한 실험

Fig 30.~Fig 32.는 Inconel 600 재질로 제작된 시편 V3, V4에 대해 pH 값이 7인 조건에서 수행한 부식실험 결과를 정량화한 것으로 V1 시편에 비해 saturation 상태의 길이가 길고, 부식에 의해 형성된 산화막 두께 또한 상당히 크게 나타나고 있다.

V4의 경우 양면을 분석하여 그림으로 나타내었으며, 이들 그림에 제시된 V3, V4-1, V4-2 시편의 산화막 두께는 각각 $12.1\mu\text{m}$, $11.7\mu\text{m}$, $12.6\mu\text{m}$ 로 최대 오차는 약 $1\mu\text{m}$ 이고, 평균값은 $12.13\mu\text{m}$ 로 pH 9에서 수행한 결과인 $1.42\mu\text{m}$ 에 약 8.5배 정도 크게 나타나고 있다.

Fig 30.~Fig 32.를 Fig 24.~Fig 26.과 비교 분석해 보면 경향이 약간 다르게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig 30.~Fig 32.에서 *Fe* 원소와 *Cr* 원소의 경향이 Fig 27.~Fig 29.에 도시한 *Fe* 및 *Cr* 원소의 경향과 정반대로 0에 근접하고 있다는 것이다.

Fig 30.~Fig 32.에 제시되어 있는 *Ni* 원소의 경우 Fig 27.~Fig 29.과 달리 부식이 시작된 이후에 peak 값이 존재하였다가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 산소 분률에 기인한 결과라 판단된다.

즉, Fig 30.~Fig 32.를 자세히 보면 부식이 시작된 이후 정상상태에 이르는 과정에 한 단계의 plateau가 존재하는데 이때 *Ni* 원소 분률 또한 peak 값을 가지고 있고, peak 값의 크기는 *Ni* 원소와 정반대의 경향을 보이고 있다.

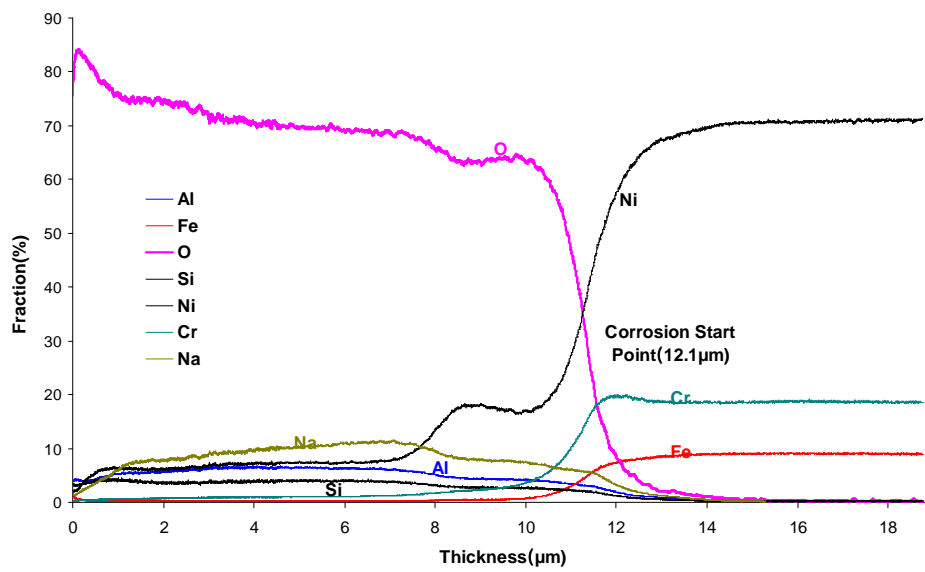


Fig 30. Quantitative Analysis Results of V3 Test Specimen

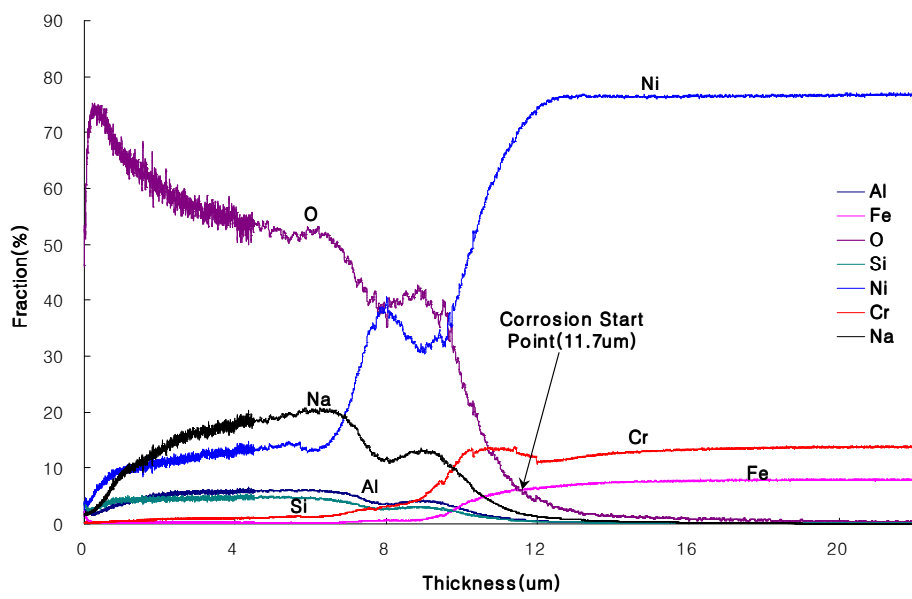


Fig 31. Quantitative Analysis Results of V4-1 Test Specimen

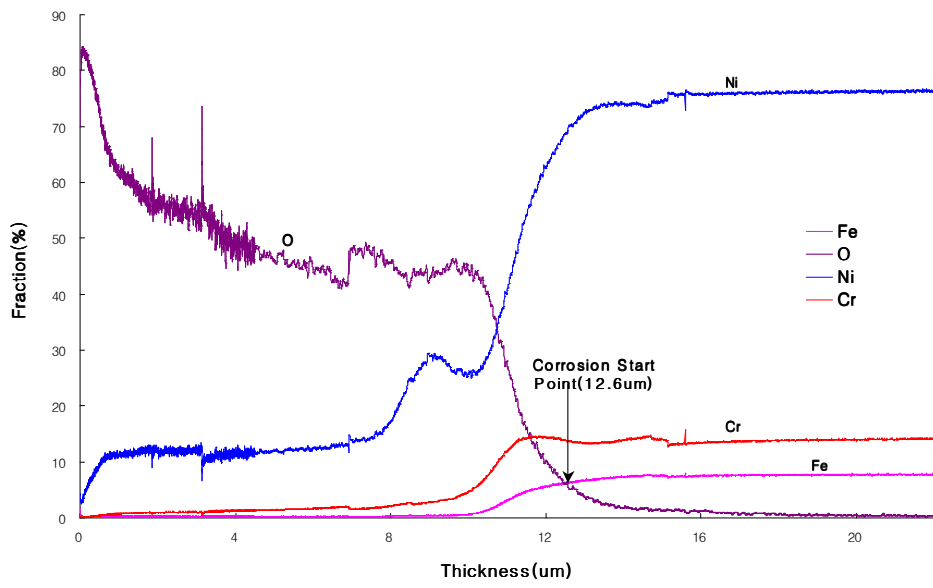


Fig 32. Quantitative Analysis Results of V4-2 Test Specimen

3. pH 4에서 수행한 실험

Fig 33.~Fig 35.는 pH 4에서 수행한 실험 결과인 V5, V6 시편을 정량적으로 분석한 것이다.

그리고 V4의 경우와 같이 V6은 양면을 분석하였으며, 그림에서 보여 주듯이 V5, V6-1, V6-2 시편의 산화막 두께는 각각 $1.05\mu\text{m}$, $1.08\mu\text{m}$, $1.33\mu\text{m}$ 이고, 평균 두께는 $1.15\mu\text{m}$ 이며, 최대 오차는 $0.25\mu\text{m}$ 정도이다.

Fig 33.과 Fig 34.을 비교 분석해 보면 *Fe*, *Cr*, *Ni* 원소의 경향은 거의 유사한 경향을 보이고 있는 것을 볼 수 있지만 Fig 32.의 경우 다소 차이가 있다. 특히 *Cr* 원소의 경우 Fig 33. 및 Fig 34.과 달리 부식이 시작된 이후에도 거의 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 정량적 분석 수행시 문제가 있었던 것으로 판단된다.

Fig 35.를 자세히 보면 부식이 시작되기 전인 $2\sim 3.5\mu\text{m}$ 에서 산소 분율은 거의 0%가 아닌 약 2% 정도의 일정한 분율이 시편 내에 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 다른 시편의 결과와 다소 차이가 있는 것으로 분석상의 문제라 판단된다.

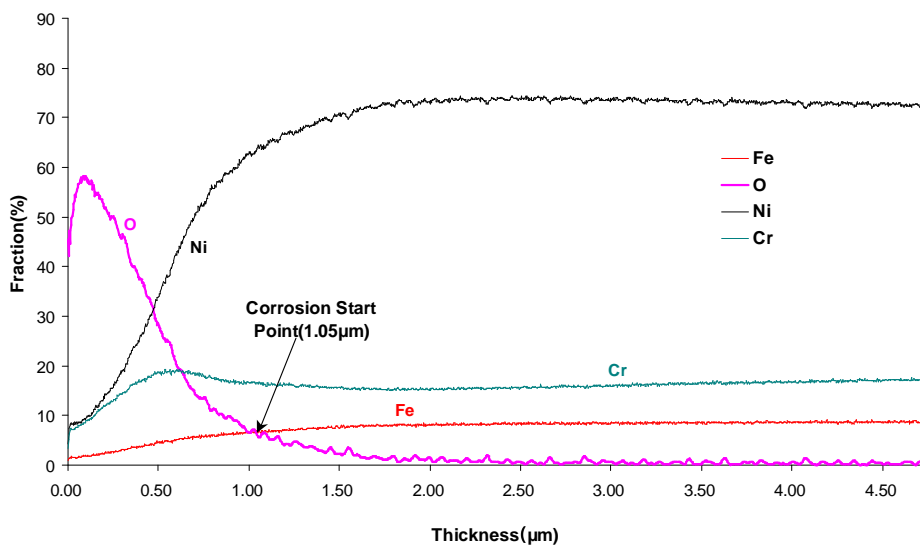


Fig 33. Quantitative Analysis Results of V5 Test Specimen

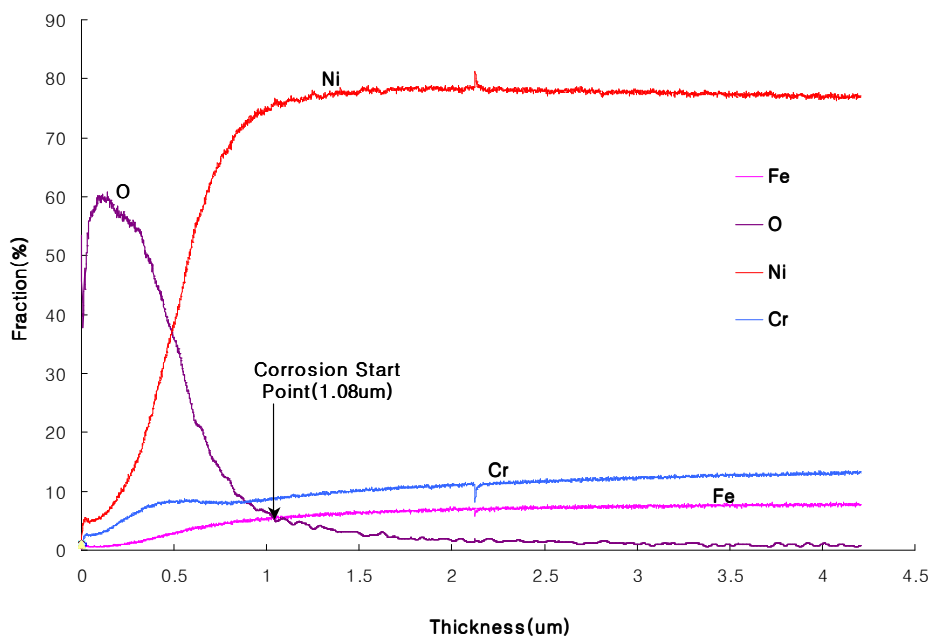


Fig 34. Quantitative Analysis Results of V6-1 Test Specimen

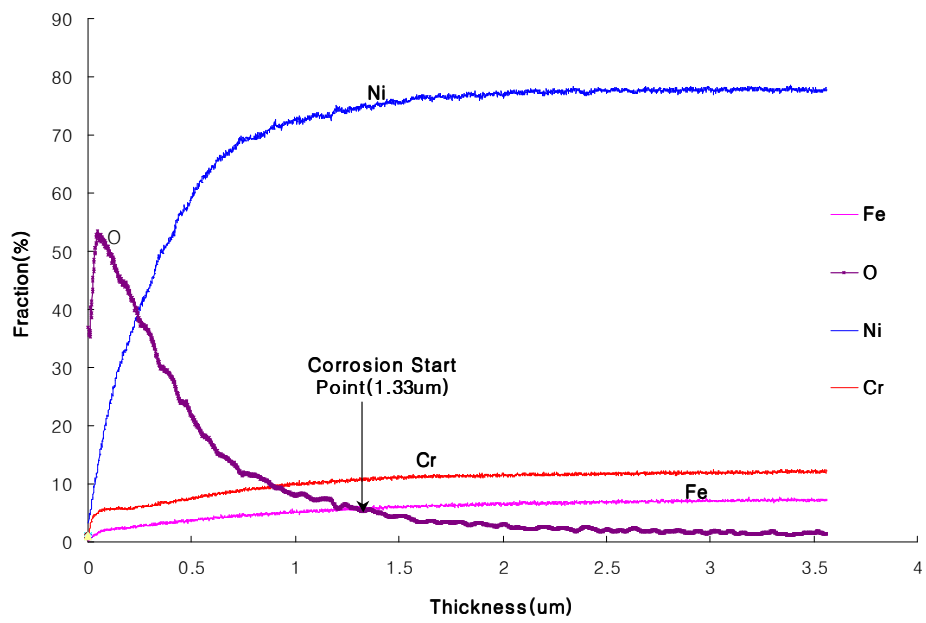


Fig 35. Quantitative Analysis Results of V6-2 Test Specimen

제4절 Inconel 600 및 690 실험 결론

1. Inconel 690 시편

Inconel 690 재질로 제작한 시편 T1~T6에 대해 pH 값에 따른 부식 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

가. pH 값에 따른 Ni , Fe , Cr 원소에 대한 경향을 분석한 결과

- (1) Ni 원소는 pH 9 조건에서 부식이 시작된 후 급격하게 감소하였다가 saturation된 후에는 0에 근접한 반면, pH 7 조건에서는 saturation 상태에서도 10% 내외의 일정한 값을 보여주었고, pH 4 조건에서는 saturation 상태에서 완만하게 감소하는 경향을 보임
- (2) Fe 원소는 pH 7 및 9에서 부식이 시작된 후 급격하게 감소하였다가 saturation된 후에는 0에 근접한 반면, pH 4 조건에서는 부식이 시작된 후 oscillation 하면서 감소하는 경향을 보임
- (3) Cr 원소는 pH 7 및 9에서 부식이 시작된 후 0에 근접하였지만 pH 4에서는 부식이 시작된 후에 감소하는 경향을 보이지 않거나 오히려 증가하는 경향을 보임

나. 표면 조도에 따른 산화막 두께는 최대 차이는 $0.7\mu\text{m}$ 로 나타났다, pH 4, 7, 9에서 부식 실험을 수행한 결과 산화막 두께는 각각 $2.92\mu\text{m}$, $9.49\mu\text{m}$, $1.47\mu\text{m}$ 로 pH 7 조건에서 가장 부식이 잘 되었으며, pH 값에 따라 산화막 두께는 많은 차이를 보임

다. 따라서 부식되는 양과 경향을 좀 더 정확하게 파악하기 위해서는 pH 값을 세분화하여 실험을 수행할 필요가 있음

라. 정량화 분석 결과 과도상태에 의한 영향이 많이 반영됨으로써 부식생성물의 양을 파악하는데 많은 오차를 수반하고 있기 때문에 과도상태에 의한 영향을 최소화함과 동시에 부식되는 양을 비교적 정확하게 파악하기 위해서는 장시간의 실험이 필요

2. Inconel 600 시편

Inconel 600 재질로 제작한 시편 V1~V6에 대해 pH 값에 따른 부식 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

가. pH 값에 따른 Ni , Fe , Cr 원소에 대한 경향을 분석한 결과

- (1) Ni 은 pH 7 및 9에서 부식이 시작된 후 급격하게 감소하였다가 saturation 상태에서는 아주 서서히 감소하거나 약 12% 정도의 일정한 분률로 존재하였고, Fe 와 Cr 원소는 pH 7 및 9에서 서로 정반대의 경향을 보임
- (2) pH 4에서 수행한 실험의 경우 산화막 두께가 너무 얇아 부식생성물 내부에서 Ni , Cr , Fe 원소의 경향을 파악하기가 어려움

나. Inconel 600 재질로 제작된 시편에 있어서 산화막 두께의 최대 차이는 $1.0\mu\text{m}$ 로 나타났고, pH 4, 7, 9에서 부식 실험을 수행한 결과 산화막 두께는 각각 $1.42\mu\text{m}$, $12.13\mu\text{m}$, $1.15\mu\text{m}$ 로 pH 7 조건에서 가장 부식이 잘 되었으며, pH 값에 따라 산화막 두께는 많은 차이를 보이고 있기 때문에 부식되는 양과 경향을 좀 더 정확하게 파악하기 위해서는 pH 값을 세분화하여 실험을 수행할 필요가 있음

다. Inconel 600과 690 재질을 비교 분석한 결과 Inconel 690의 pH 4, 7, 9에서 산화막 두께는 각각 2.92 μm , 9.49 μm , 1.47 μm 로 pH 7 조건에서 산화막 두께는 Inconel 600 재질에 비해 얇지만 pH 4 및 9에서의 두께는 Inconel 600에 비해 크게 나타남

(1) 실험을 통해 도출된 산화막 두께만을 근거로 부식되는 양 및 부식 속도를 파악하기 보다는 산화막 두께와 각 원소에 대한 함유량을 고려하여 결정해야 할 것으로 판단됨

라. 정량화 분석 결과 과도상태에 의한 영향이 많이 반영됨으로써 부식생성물의 양을 파악하는데 많은 오차를 수반하고 있기 때문에 과도상태에 의한 영향을 최소화함과 동시에 부식되는 양을 비교적 정확하게 파악하기 위해서는 장시간의 실험이 필요하다고 판단됨.

위의 Inconel 600 및 690 실험 결과로 도출된 산화막 두께를 정리하여 Table 7.에 나타내었다.

Table 7. Experimental Results

	pH 4		pH 7		pH 9	
	Inconel 600	Inconel 690	Inconel 600	Inconel 690	Inconel 600	Inconel 690
Thickness of Oxide Film (μm)	1.42	2.92	12.13	9.49	1.15	1.47

제5절 부식 생성량 및 속도 평가

원자로용기 하부 구조재인 저합금강(SA 508 ; Low alloy steel)에 대한 기존의 부식실증시험 결과에 의하면⁶⁾ 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.

부식생성물 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 산화막 제거 방법론이 개발되지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 GDS 장비를 이용하여 정량적으로 분석함으로써 산화막 두께와 각 원소별 함유량을 도출하여 부식속도를 평가하였다. 기존의 연구⁶⁾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.

$$CV = \frac{\rho v}{t} \quad (\text{식 4.1})$$

위의 식에서 CV (Corrosion Velocity)는 산화막 내에 존재하는 Fe , Cr , Ni 의 부식속도(g/yr)이고, v 와 t 는 각각 산화막의 체적

(cm^3)과 실험 기간(yr)을 나타내며, ρ 는 Fe, Cr, Ni 원소의 밀도 (g/cm^3)로 이들 원소의 밀도는 각각 7.86, 7.20, 8.91이다. Table 8.에 수용액 조건, 실험 온도 및 시간과 정량화를 통해 도출한 산화막의 평균 두께와 계산된 산화막 체적을 나타내었다.

Table 8. Thickness and Volume of Oxide Film

Quality of the Material	pH	Condition of Solution	Experimentation Temp.($^{\circ}C$)	Period	Test Specimen Kind	Thickness of Oxide Film(μm)	Volume (cm^3)
Inconel 600	4	$NaOH$ +distilled water	315	20 day	V5/V6	1.15	4.58E-4
	7	distilled water		20 day	V3/V4	12.13	4.82E-3
	9	$NaHSO_4$ +distilled water		20 day	V1/V2	1.42	5.65E-4
Inconel 690	4	$NaOH$ +distilled water		20 day	T5/T6	2.92	1.16E-3
	7	distilled water		20 day	T3/T4	9.49	3.77E-3
	9	$NaHSO_4$ +distilled water		20 day	T1/T2	1.47	5.83E-4

또한 산화막 내에 존재하는 각 원소별 함유량과 부식속도 계산 결과를 Table 9.에 나타내었다.

Table 9. Each Element Content and Corrosion Velocity in Oxide Film

Quality of the Material	pH	Test Specimen Kind	Content of each Element (% , Average)				Corrosion Velocity of each Element (g/yr)			
			<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	total	<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	total
Inconel 600	4	V5/V6	3.82	10.2	45.17	59.19	2.51E-4	6.13E-4	3.36E-3	4.23E-3
	7	V3/V4	0.64	2.13	14.24	17.01	4.42E-4	1.35E-3	1.12E-2	1.29E-2
	9	V1/V2	3.18	3.65	26.07	32.91	2.58E-4	2.71E-4	2.39E-3	2.92E-3
Inconel 690	4	T5/T6	2.27	17.34	18.82	38.44	3.78E-4	2.64E-3	3.55E-3	6.57E-3
	7	T3/T4	0.75	3.85	14.91	19.50	4.05E-4	1.90E-3	9.13E-3	1.14E-2
	9	T1/T2	1.51	5.86	10.52	17.88	1.26E-4	4.49E-4	9.97E-4	1.57E-3

Table 9.에서 원소별 함유량은 각 시편에 대한 정량화 결과로 나타난 값이고, 원소별 부식 속도는 위의 식과 Table 8.에 제시된 산화막 두께 및 체적과 Table 9.의 원소별 함유량을 이용하여 계산된 값이다.

Table 9.을 분석해 보면 부식에 의해 생성된 *Fe*, *Cr*, *Ni* 원소의 함유량 값은 수용액 조건 및 pH 값에 따라 최대 6배 정도로 큰 차이를 보이는 반면, 원소별 부식 속도는 최대 1.76배로 상대적으로 낮게 나타나고 있는데 이러한 경향을 보이는 것은 식(4.1)에서 볼 수 있듯이 부식속도를 계산할 때 산화막 체적과 원소별 함유량을 고려한 밀도를 적용하였기 때문이다.

부식속도 계산 결과 pH 4 조건에서 Inconel 690의 총 부식 속도는 4.23E-3, Inconel 600의 총 부식 속도는 6.57E-3으로 Inconel 690 재질이 Inconel 600에 비해 약 50% 정도 부식이 잘 되는 것으로 나타났는데, 이는 기존 연구결과^{7~12)}에 pH값이 작을수록 *Ni*는 부식이 잘 되

는 것으로 평가되었지만 본 연구에서 다른 경향을 보이고 있다. 이러한 결과를 보이는 것은 정량적 분석에서 언급하였듯이 과도상태의 영향이 과도하게 반영됨으로써 불확실성이 많이 개입되었기 때문이라 판단된다.

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 수행 시 문제가 있었던 것으로 판단된다.

나머지 pH 조건에서는 Inconel 600 재질이 Inconel 690 재질에 비해 약 13~83% 정도 부식이 더 잘 되는 것으로 평가되었다.

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 본 연구는 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 판단된다.

제5장 결 론

본 논문에서는 국내 원자력발전소에서 S/G tube로 많이 사용되고 있는 Inconel 600 및 690 재질에 대한 부식 경향을 파악하고, 부식 속도를 평가하기 위해 고온·고압 부식생성물 발생장치를 이용하여 실제 발전소의 운전 조건과 동일하거나 가혹한 수처리 조건에서 부식 실험을 수행하였다.

이를 위해 Inconel 600 및 690 재질로 20×20×2mm 크기의 시편을 총 12개 제작하여 pH별로 20일씩 총 60일간 부식 실험을 수행하였고, 부식 실험에 의해 시편 표면에 형성된 부식생성물 및 산화막 내부에 존재하는 원소들을 정량적으로 분석하기 위해 GDS 장비를 사용하였다. 또한, GDS 장비에서 일반적으로 사용하고 있는 방법론에 따라 부식 시작점을 정의하였고, 정의한 부식 시작점에 근거하여 방사선 장해 위해도가 큰 *Fe*, *Cr*, *Ni* 원소에 대한 부식 경향 및 거동 특성을 분석하였으며, 그 결과에 근거하여 부식 속도를 평가하였다.

pH 값에 따른 부식 경향 및 거동 특성을 정량적으로 분석한 결과 pH 값 및 사용한 재질에 따라 이들 원소들의 경향은 많은 차이를 보였고, 산화막 두께 또한 큰 차이를 보였으며, pH 값에 따른 차이를 분석한 결과 Inconel 600 및 690 재질에 상관없이 pH 7조건에서 부식이 가장 잘 되는 것으로 평가되었다.

부식 실험 및 정량적 분석 결과에 근거하여 부식 속도를 계산한 결과 속도의 범위는 1.14E-2~6.57E-3g/yr로 상당히 높게 나타났고, 특히 pH 4에서는 Inconel 690 재질이 Inconel 600 재질에 비해 약 50% 정도 부식이 잘 되는 것으로 나타났는데 이는 기존의 연구 결과와 다른 경향을 보이는 것은 과도상태에 따른 영향이 과도하게 반영

됨과 동시에 양면을 분석에 사용된 V6 시편에서 V6-2 시편의 경우 정량적 분석 수행시 문제가 있었던 것으로 판단된다. 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 판단된다.

위의 결과중 pH 4이외의 조건인 pH 7 및 9에서는 Inconel 600 재질이 Inconel 690 재질에 비해 부식이 잘 되는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 부식실험 결과를 정량적 분석 장비를 사용하여 방사선 피폭 측면에서 위험도가 큰 Fe , Cr , Ni 원소들의 상대적인 양을 평가하였기 때문에 이들 원소로부터 생성되는 Co^{58} , Cr^{51} , Co^{60} , Mn^{54} , Fe^{59} 핵종의 상대적인 양은 평가할 수 없었다. 따라서 이들 핵종들의 양을 파악하기 위해서는 부식실험 결과에 대한 정성적 및 화학적 분석을 수행해야 하지만 현재까지 이에 대한 기술이 개발되지 않았기 때문에 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) KAERI/CM-511/2001, '염기성 분위기에서 부식억제제가 증기발생기 재료의 재부동태 속도에 미치는 영향', 최종보고서, 한국원자력연구소.
- 2) KAERI/AR321/90, 'Optimum Water Chemistry Control of PWR Primary System for the Reduction of Plant Personnel Exposures', 한국원자력연구소.
- 3) Special Metals Corporation Products-Inconel alloy 690, 2003 October, www.specialmetals.com
- 4) KINS/HR-241, '차세대 원자로 선원향 평가를 위한 방법론 개발 (IV)', 최종보고서, KINS, 1999.
- 5) NRC, NUREG-0017, "Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from PWRs", Rev.1, April 1985
- 6) '영광 5호기 손상원자로용기 부식실증시험', 최종보고서, 한국원자력연구소, 2004.3.
- 7) KAERI/TR-1979/2001, 'SMART 모사 Loop에서 노심재료(Zr, Ti, SUS)의 부식 특성', 한국원자력연구소.
- 8) KAERI/CM-189/97, '원전 증기발생기 전열관 응력부식균열 억제기술 기반 연구', 최종보고서, 한국원자력연구소.
- 9) KAERI/RR-2214/2001, '원전 냉각계통 부식방지 기술개발', 최종보고서, KAERI.
- 10) KAERI/AR-341/91, '핵연료 피복관 부식기구 규명', KAERI.

- 11) 김상현외, '원자력 발전소 배관재를 이용한 고온 수화학 조건에서의 입자성 부식생성물 발생에 관한 연구', 한국원자력학회, 2004 춘계학술발표회 논문집.
- 12) Ihn Chong Lee, Tae Won Suk, 'The Corrosion Behavior of Nickel and Inconel 600 in Sodium Hydroxide and Hydrochloric Acid Solution at 280°C', Korea Atomic Energy Research Institute, 한국부식학회지 Vol. 9, No.1, March, 1980.
- 13) S.R. Yoon, 'An Electrochemical Study on the Hot Corrosion of Nickel in Molten Sodium Sulfate, 한양대학교, 한국부식학회지 제 12권 제3호, 1983.
- 14) 이종권외, '304 스텐레스강의 응력부식균열에 미치는 pH의 영향', 한국기계연구소, 한국부식학회 Vol.17, No.3, 1988.
- 15) 송명호외, '90°C 염화물 수용액중의 Inconel 600 관재료의 Pitting 부식', 한국에너지연구소, 한국부식학회지 Vol.15, No.4, 1986.
- 16) 송민철외, '차세대원전 일차계통 방사화 부식생성물 평가 연구', 한국과학기술원, '98년춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
- 17) 김주희외, '증기발생기 전열관 재료의 고온 재부동태 거동', 원자력연구소, 2004.
- 18) '원자로 정지 및 기동시 화학처리 절차', 한국수력원자력(주) 영광 1,2호기 운영절차서, 2002.
- 19) 홍진기외, '온도가 인코넬 690 증기발생기 세관의 마모에 미치는 영향', KAIST, 원자로재료 및 EAC 워크샵, 2002.
- 20) '원자로 정지시 일차측 화학처리 공정개발', 최종보고서, 전력연구원, 1997.