

Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting

Oxide Fouling on Venturi Flowmeter at Nuclear Power Plants : Root Causes and Its Mitigation Method

Dong Seok Lim^{a*}, Hyun Chul Lee^a, Won jun Choi^b, Chi Bum Bahn^b, Young Jin Kim^a

^a FNC Tech Co. Ltd, Heungdeok IT Valley, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-908, Korea

^b School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ., Busan,43241, Korea

2020. 12. 17.



www.fnctech.com



1. 연구개요

■ 연구개발 필요성

- ▶ 원전 2차측 주급수 벤추리 유량계 파울링 발생으로 인하여 유량 측정값의 불확실성 증가 → 설계기준보다 낮은 열출력 조건으로 유지하며 운전
- ▶ 원전 열출력 감소에 따른 발전출력 손실로 경제적 손실 발생
- ▶ 매주기 벤추리 유량계 세정 및 유지 보수를 위한 부대 비용 발생
- ▶ 벤추리 파울링 완화 기술 개발을 통한 설비 안전성 및 경제성 향상 도모

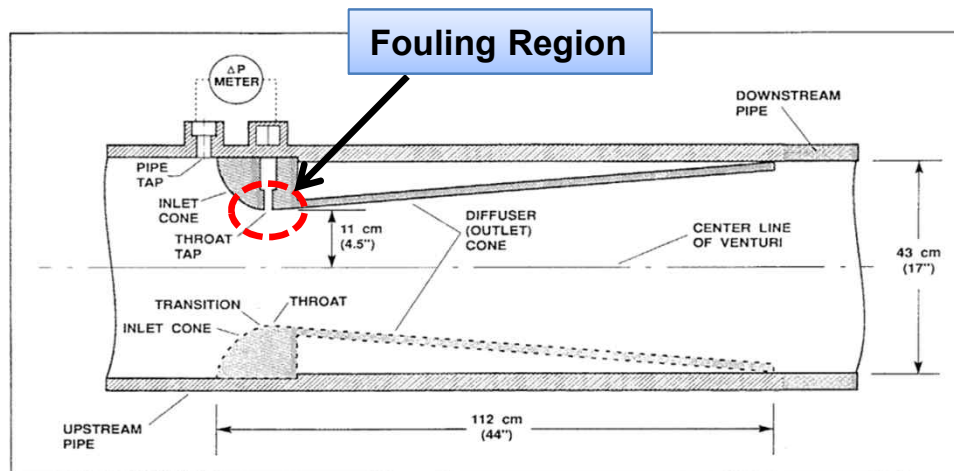
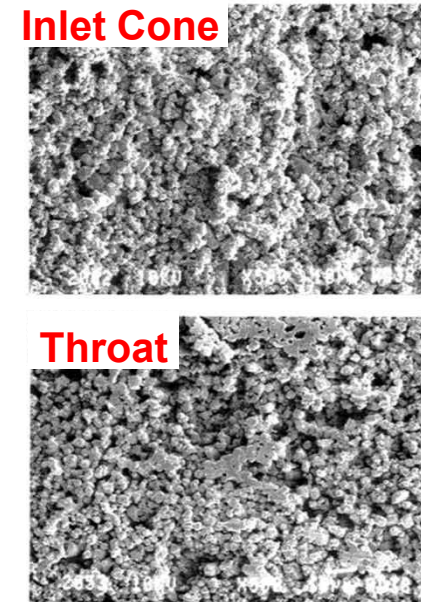


Figure 2-6. General Areas Sampled on the TMI-1 Feedwater Venturis

Survey and Characterization of Feedwater Venturi Fouling at Nuclear Power Plants (Volume 1: EPRI TR-100514, May 1992)



1. 연구개요

■ 국내 연구개발 현황

- ▶ 유동 관점에서 파울링 현상을 극복하려는 연구 수행
- ▶ 파울링 발생시 측정되는 유량을 보정하는 계산 방법론 연구
- ▶ 유동해석 및 Simulation 접근을 통한 파울링 영향 저감 유량계 설계 연구

■ 국외 연구개발 현황

- ▶ 파울링 발생시 예측되는 유량값의 수치해석적 안정화 방향 연구
- ▶ BWR Jet Pump Nozzle 파울링 방지 코팅 적용 연구

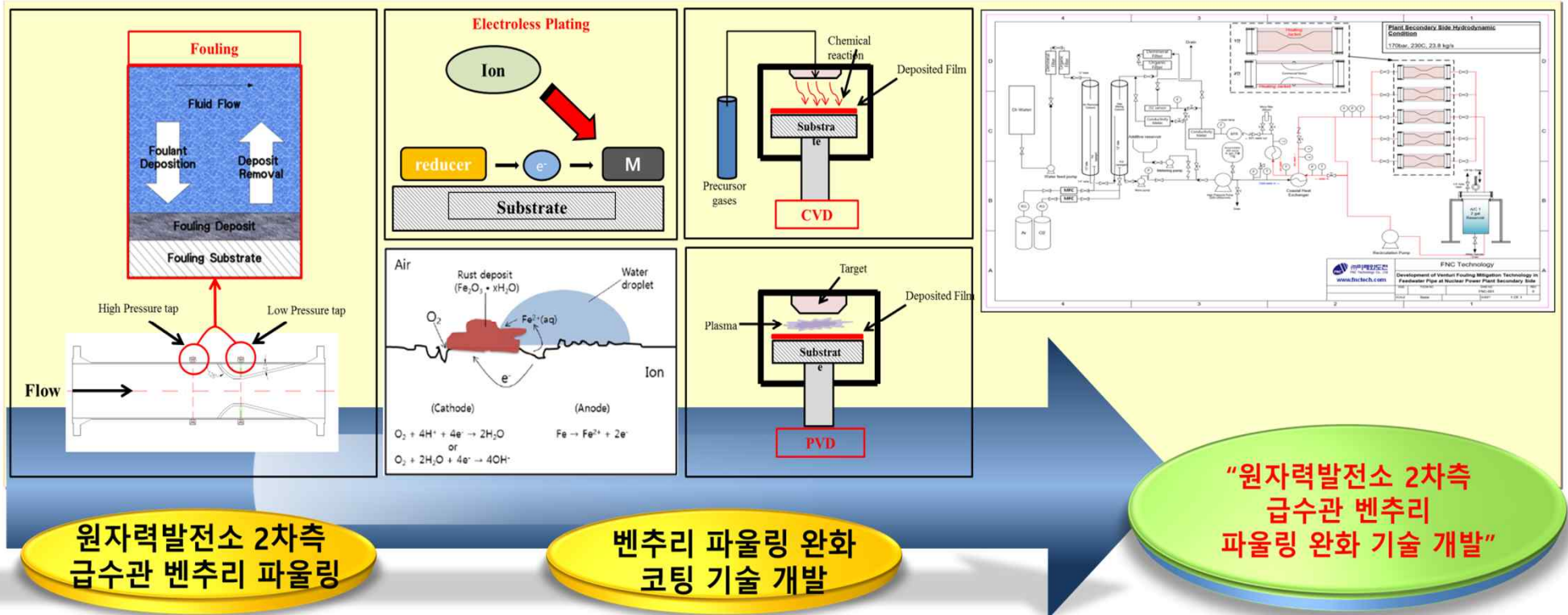
■ 문제점

- ▶ 국내 원전 벤추리 유량계 관련 기술 수입의존도 높음
- ▶ 기존 연구는 원전 계통구조 설계변경 및 운전방법 변경이 수반되는 방법론이며 파울링 현상 근본적인 해결 불가능

1. 연구개요

■ 연구개발 기술

- ▶ 벤추리 파울링 완화를 위한 금속표면 코팅 재료 선정 및 코팅 기술 개발
- ▶ 벤추리 파울링 완화를 위한 최적화된 코팅 기술 적용 성능시험 및 시제품 개발



원자력발전소 2차측
급수관 벤추리 파울링

벤추리 파울링 완화
코팅 기술 개발

"원자력발전소 2차측
급수관 벤추리
파울링 완화 기술 개발"

2. 연구내용 및 결과

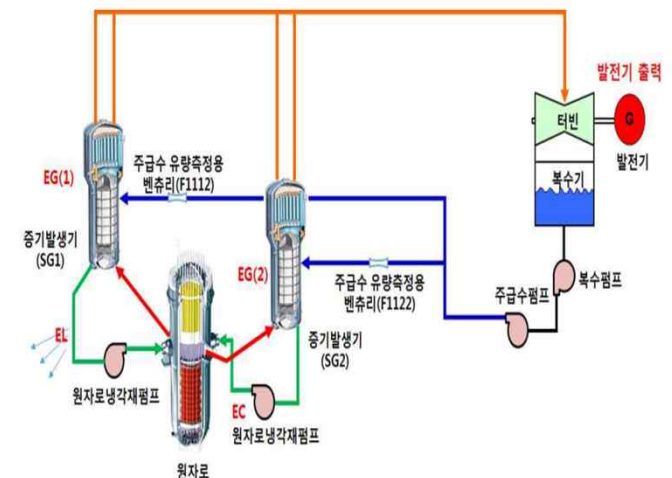
■ 연구개발 기술

- ▶ 원자력발전소 2차측 급수관 벤추리 파울링 및 발전소 출력 측정원리/방법론 조사

[발전소 출력 산출식]

$$\text{발전소 출력} = \text{EG}(1) + \text{EG}(2) + \text{EL} - \text{EC}$$

- $\text{EG}(i)$ = i 번째 증기발생기로 전달된 출력
 - = 출구증기 엔탈피 X 출구 유량 + 취출수 엔탈피 X 취출수 유량 - 급수엔탈피 X **급수 유량**
- EL = 측정된 RCS 전체 에너지 손실항의 합
- EC = 측정된 RCS 전체 에너지 입력항의 합 (RCP 등)
 - 관련 자료 한수원으로부터 확보 (20' 6.1)
 - 2차측 급수관 벤추리 유량계 설계 사양 (재료, 유량, 온도, 수질, 공급사)
 - 2차측 급수관 벤추리 유량계 세척 절차서



2. 연구내용 및 결과

■ 연구개발 기술

- ▶ 원자력발전소 2차측 급수관 벤추리 파울링 및 발전소 출력 측정원리/방법론 조사

[벤추리 유량계 급수유량 산출식]

$$W = CE\epsilon d^2 \sqrt{(\rho \Delta p)}$$

W : 급수유량

E : $1/\sqrt{1-\beta^4}$ (접근속도계수)

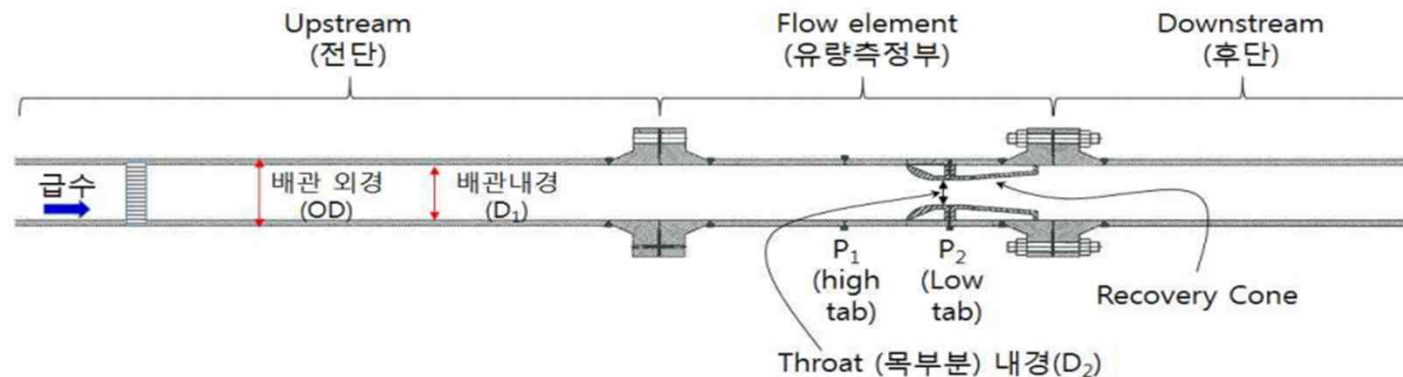
β : 벤추리 튜브직경(d)/주급수유료배관직경(D)

C : discharge 계수

ϵ : 확장계수(비압축성 유체에 대해서는 1)

Δp : 차압

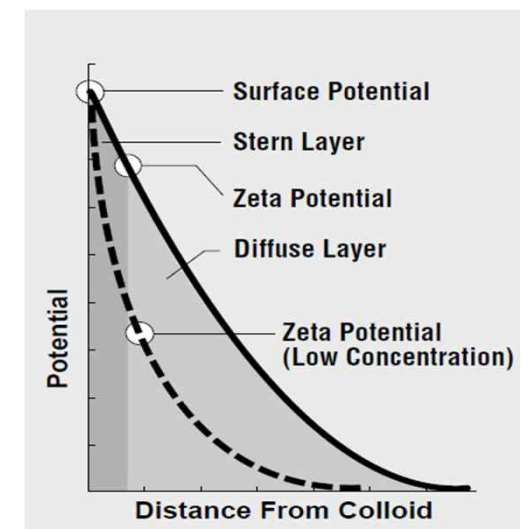
ρ : 주급수 압력에서의 밀도



2. 연구내용 및 결과

■ 연구개발 기술

- ▶ 원자력발전소 다양한 코팅재료(Pd, Ni, Ti, TiN, CrN)의 Zeta Potential 특성 확인 및 측정
 - Zeta 전위는 콜로이드 분산의 안정성을 나타냄.
 - 그 크기는 분산액 에서 유사하게 하전된 인접한 입자 사이의 정전기 반발 정도
 - 충분히 작은 분자와 입자의 경우 높은 Zeta 전위일수록 안정성을 유지함.
 - 즉, 용액 또는 분산액이 응집력이 약하며, 전위가 작으면 인력이 반발력을 초과하여 분산이 깨져 응집.
 - 따라서, 높은 Zeta 전위 (음전위 또는 양전위)를 가진 콜로이드는 전기적으로 안정화되고, Zeta 전위가 낮은 콜로이드는 응고되거나 응집.
 - 작동 pH 값에서 산화물 부식 생성물의 전하와 동일한 표면 전하의 신호는 정전기적 반발을 통해 생성물이 표면에 부착/응집되는 현상을 방지함.

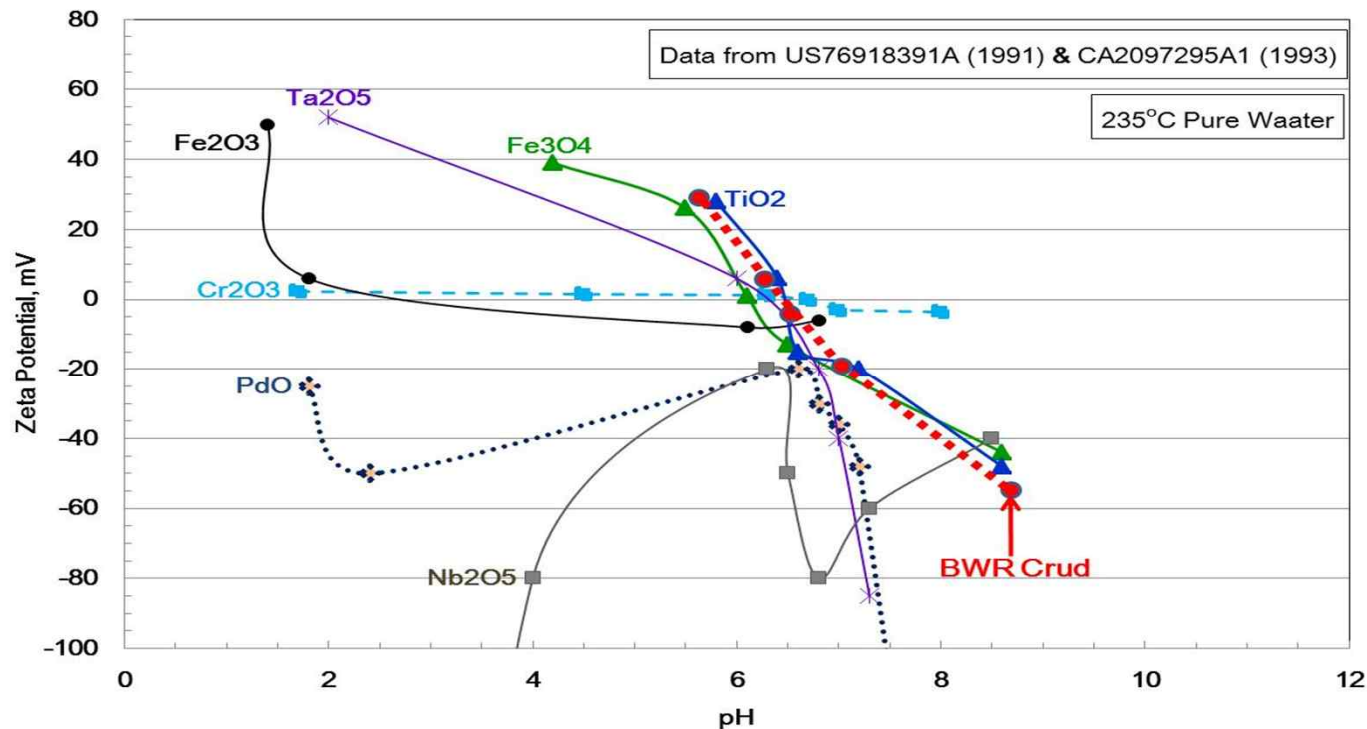


2. 연구내용 및 결과

■ 금속표면 코팅 재료 선정 및 코팅 기술 개발

▶ 파울링 완화 금속 표면코팅 재료 선정

- 파울링 원인물질(Fe 산화물)과 벤추리 유량계 표면과의 Zeta Potential 차이를 이용한 Interaction 발생 방지
- 코팅 재료 후보군의 원전 2차측 수화학 조건에서 Zeta Potential 확인



2. 연구내용 및 결과

■ 금속표면 코팅 재료 선정 및 코팅 기술 개발

▶ 파울링 완화 금속 표면코팅 재료 선정

- 벤추리 유량계 및 관련 계통 재질 특성 조사 → Carbon Steel, SS316L, SS304L
- 코팅 재료 후보군 도출 → Teflon, TiO₂, TiN, Pd, NiO, CrN 등
- 건설/가동원전의 설계 적용을 위한 다양한 코팅 방법 도출 → CVD, PVD, Electro Less Plating 등

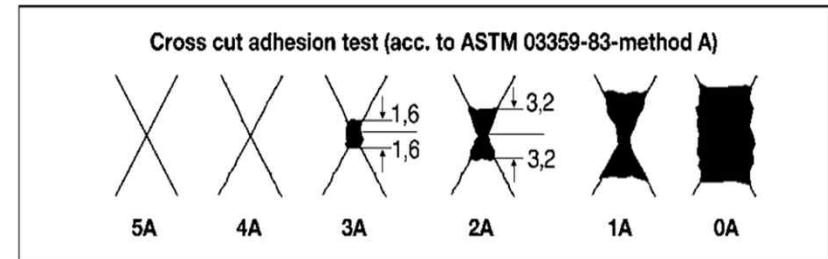
	PVD-CrN	PVD-Ti	PVD-TiN	CVD-CrN	EP-Ni	EP-Pd	Teflon-PTA	Teflon-PTFE
SS316L								
SS304								
CS								

2. 연구내용 및 결과

■ 금속표면 코팅 재료 선정 및 코팅 기술 개발

▶ 파울링 완화 금속 표면코팅 재료 선정

- Substrate : Carbon Steel, SS316L, SS304L, Coating Material : TiO_2 , TiN, Pd, NiO, CrN 등
- 최적 파울링 완화 금속표면 코팅재료 선정을 위하여 코팅 후보군 부착력 시험 수행 (ASTM D 3359, ASTM D 4541)



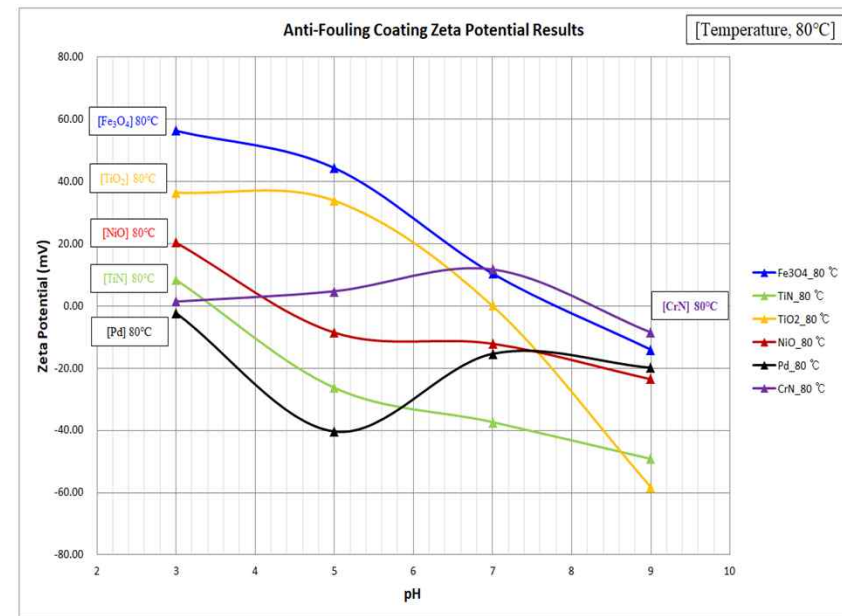
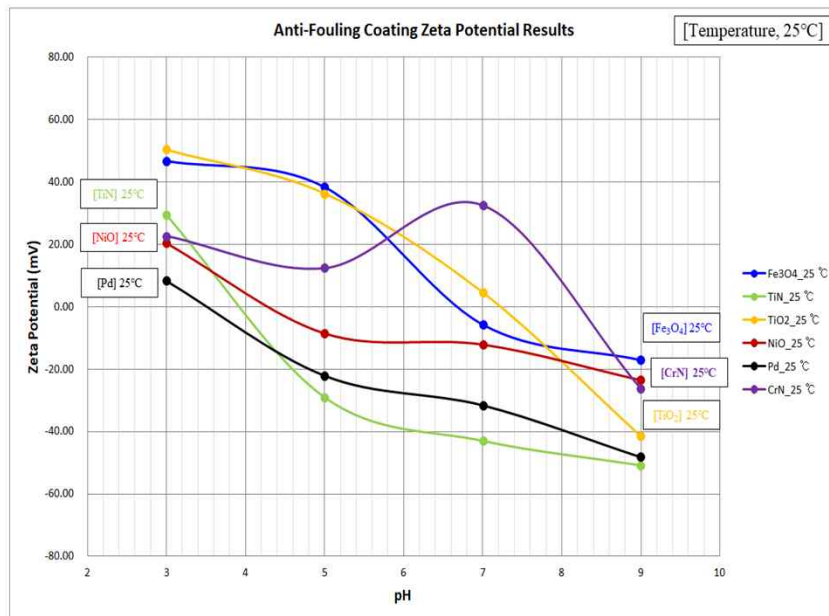
5A	박리 또는 탈착 없음
4A	절개면 또는 교차점을 따라 박리 또는 탈착 있음
3A	절개면을 따라 양쪽으로 1.6mm (1 / 16in.)까지 톱니 형태의 탈착 있음
2A	절개면을 따라 양쪽으로 최대 3.2mm (1 / 8in.)까지 톱니 형태의 탈착 있음
1A	테이프 및 X 영역의 대부분이 탈착
0A	X의 영역을 넘어서도 탈착

2. 연구내용 및 결과

■ 금속표면 코팅 재료 선정 및 코팅 기술 개발

▶ 파울링 완화 금속 표면코팅 재료 선정

- Substrate : Carbon Steel, SS316L, SS304L, Coating Material : TiO_2 , TiN, Pd, NiO, CrN 등
- 최적 파울링 완화 금속표면 코팅재료 선정을 위하여 코팅 후보군 Zeta Potential 측정 수행 : Fe_3O_4 , Fe_2O_3 vs. TiO_2 , TiN, Pd, NiO, CrN Coating

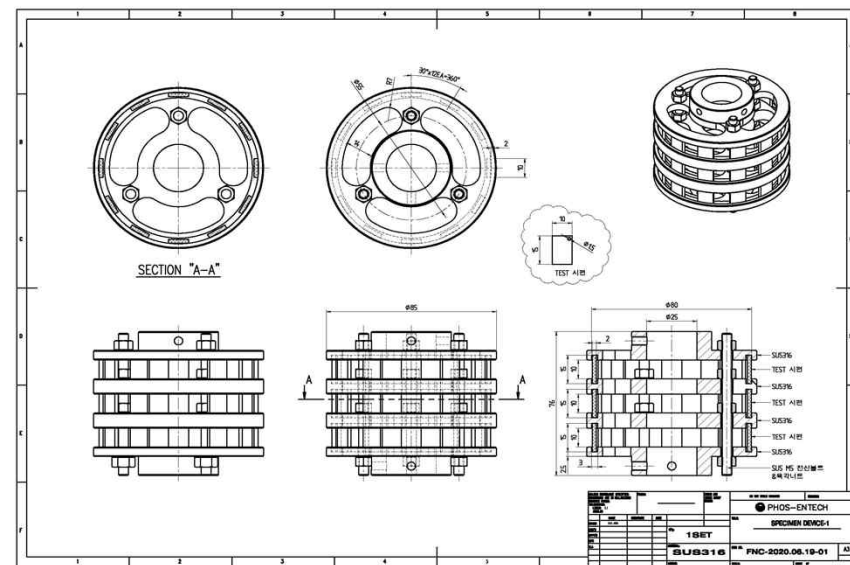
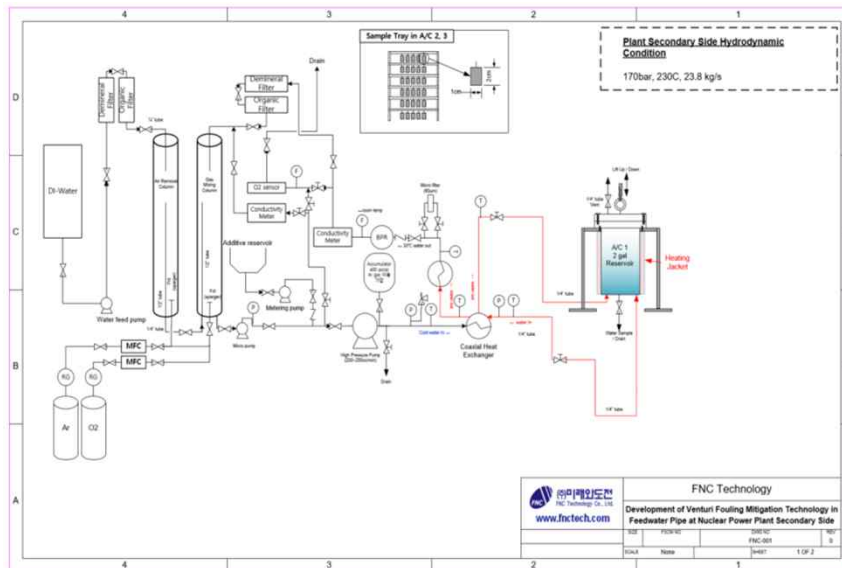


2. 연구내용 및 결과

■ 금속표면 코팅 재료 선정 및 코팅 기술 개발

▶ 파울링 완화 금속 표면코팅 재료 선정

- Substrate : Carbon Steel, SS316L, SS304L, Coating Material : TiO_2 , TiN, Pd, NiO, CrN 등
- TiO_2 , TiN, Pd, NiO, CrN Coating 재료 적용시 계통 내부 수화학 환경에서 적용성 확인을 위한 계통 운전 환경 모사장치 개발 → Flow Accelerated Corrosion Test Facility 개발



2. 연구내용 및 결과

■ 2차측 급수관 수화학 조건 모의 시험장치 설계 및 구축

▶ 국내 원전 2차측 급수관 내 벤추리 유량계 설계사항 및 운전조건 자료 검토 완료

▶ 코팅 재료의 부식 특성평가 수화학 조건 도출 완료

▶ Temperature : 235 °C

▶ Pressure : 1,200 psig

▶ Waterchemistry Condition : pH 8.5 – 10.0, ETA, N₂H₄ 60 ppb

▶ Dissolution Oxygen : < 5 ppb

▶ Flow velocity : < 5 m/s (시험설비 Magnetdrive 설계조건 고려)

▶ pH sensor 1식

▶ DO sensor 1식 [SWAN AMI Oxytrace, 0-20ppm, Accuracy 0.3%, Max. 50°C]

▶ Conductivity sensor 1식 [Titanium, 1/2 "NPT, 2-electrode, 0.1 cm⁻¹, 0.01-2,000 us/sm]

▶ Thermal Couple

▶ Pressure Transmitter [Max. 250 bar]

▶ Heating System, HX(Heat Exchanger) System

▶ Facility Coolant System

▶ Back Pressure Regulator [TESCOM, STS316, 25-4,000 psig, -40°C to 74°C]

▶ Chemical Mixing Tank and Storage Tank

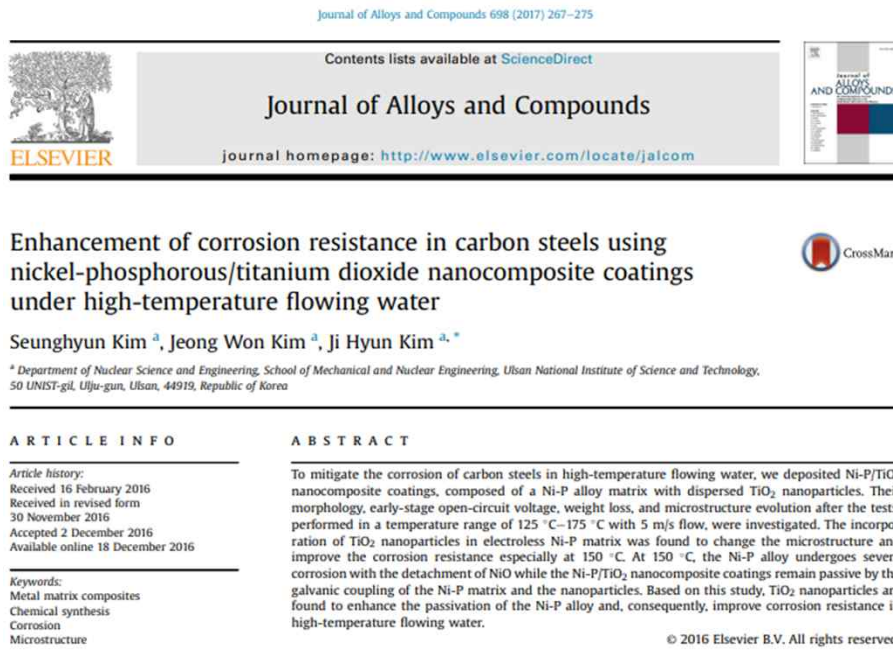
2. 연구내용 및 결과

■ 벤추리 파울링 완화 코팅 재료 선정 및 기술개발

▶ Ni/Pd Electroless Plating 자체 수행 개요

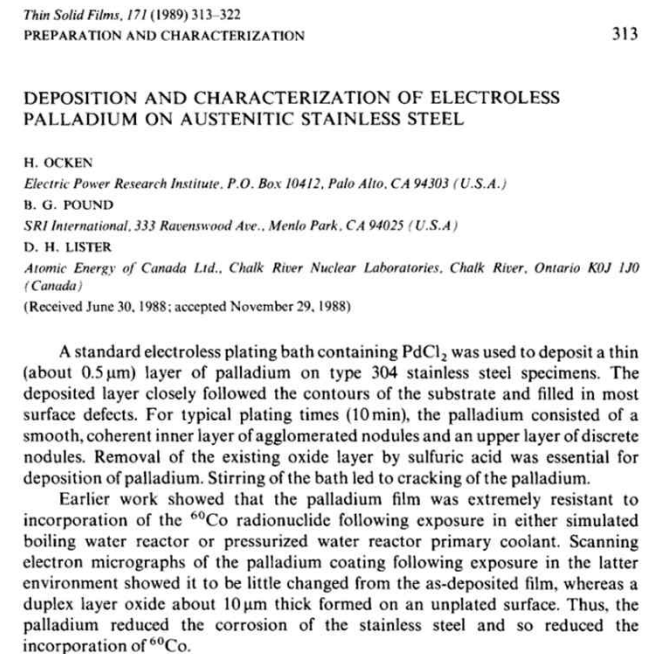
▶ Ni 무전해도금(S.Kim et al)

- 연마 → 세척 → 도금 → 열처리



▶ Pd 무전해도금(H.Ocken et al)

- 연마 → 세척 → 도금 → 건조



2. 연구내용 및 결과

■ 벤추리 파울링 완화 코팅 재료 선정 및 기술개발

▶ Ni/Pd Electroless Plating

● Ni 도금 수행



Ni 도금액 제조



도금중
(pH, Temp 제어)



Heat treatment(304/316)



No Heat treatment(304/316)
도금완료

● Pd 도금 수행



Pd 도금액 제조



도금중
(Temp 제어)



Heat treatment(304/316)



No Heat treatment(304/316)

3. 결론

■ 결론

- 다양한 코팅 재료(Pd, Ni, CrN, Ti, TiN, Teflon) 및 코팅 기술(PVD, Electroless 등)을 적용하여 지난 반기에 기 수행된 1차 코팅 시료의 미세구조 분석 결과 및 국내외 선행 연구자료(Zeta Potential)를 검토하여 벤추리 유량계 운전 환경에서 파울링을 최소화 할 수 있는 코팅 방법론 최적화 작업을 수행 예정
- 선별된 코팅 재료의 코팅 조건(코팅 시간, 코팅 두께 등)을 변경하여 2차 코팅 작업을 수행 예정
- 2차 코팅 작업(Pd, Ni, Ti, TiN)으로 산출된 코팅 재료의 표면 특성을 분석하여 벤추리 유량계 운전 환경에서 파울링 최소화가 가능한 코팅 재료 및 기술 도출 예정
- 본 과제 수행기관에서 기 보유하고 있는 설비를 국내 원전 2차측 벤추리 유량계 운전조건(pH, Temperature, Pressure, Water Chemistry) 모의 및 유동가속부식(Recirculation System) 및 일반부식(Static System) 특성평가를 위한 설비로 일부 설계 변경 및 보완
- 원전 2차측 벤추리 유량계 운전조건에서 장기 운전 이전에 설비의 설계 변경 및 보완 이후 시운전 수행 예정
- 최적화된 코팅이 적용된 시료(Pd, Ni, Ti, TiN)가 적용된 시편을 장입하여 벤추리 유량계 운전 조건(pH, Temperature, Pressure, Water Chemistry)에서 유동가속부식(Recirculation System) 및 일반부식(Static System)에 대한 저항 특성평가 예정
- 유동가속부식 및 일반부식에 대한 저항 특성평가 이후 산출된 결과물의 시편 표면을 분석(AFM, XRD, SEM, EDX, TEM 등)하여 최적화된 코팅의 부식저항성 결과 도출 예정



www.fnctech.com

**본 사 : 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13, 32층(영덕동, 흥덕아이티밸리 타워동) 우)16954
TEL. 031-8065-5114 / FAX. 031-8065-5111**

**연구소 : [본관] 경기도 용인시 기흥구 탑실로 46 (주)미래와도전 부설 미래에너지기술연구소 우)17084
TEL. 031-8005-6010 / FAX. 031-8005-6014
[신관] 경기도 용인시 기흥구 탑실로 44 (주)미래와도전 부설 미래에너지기술연구소 우)17084
TEL. 031-8005-5939 / FAX. 031-8005-7377**

**대전 지사 : 대전시 유성구 대덕대로 593, 10층 1004-2호 우)34112
TEL. 042-867-5114 / FAX. 042-867-5110**