

원자력 발전소 급수배관내 벤추리 파울링 완화를 위한 코팅기술개발

임동석*, 이현철*, 이종찬*, 김영진*, 최원준**, 반치범**

*(주)미래와도전 미래에너지기술연구소

**부산대학교 기계공학과

e-mail: lds777@fnctech.com

Development of Coating Technology for Venturi Fouling Mitigation at Feedwater Line of Nuclear Power Plants

Dong-Seok Lim*, Hyun-Chul Lee*, Jong-Chan Lee*, Young-Jin Kim*, Wonjun Choi**, Chi-Bum Bahn**

*FNC Technology Co.,Ltd. 705-5, Gongse-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University

요약

본 논문은 원자력발전소 급수배관내 파울링 완화를 위한 금속표면 코팅기술의 개발을 위해 물질간의 Zeta Potential 차이를 이용한 파울링 방지 기술을 개발하는 것으로 이를 위해 무전해 도금을 이용한 Pd, Ni 코팅 및 PVD를 이용한 Ti, TiN, CrN 코팅을 주요 배관재질에 적용하여 부착력시험, 유동가속부식 시험등을 통해 각 코팅의 건전성 및 파울링 완화 효과를 확인하였으며 이를 통해 향후 실제 파울링으로 문제가 생기는 기기 (ex: 벤추리유량계 등) 과 같은 기기를 모사하여 실제 형상반영까지 고려한 코팅기술개발을 수행할 예정이다

1. 서론

2. 실험

고온 고압 조건에서 운전되는 급수배관에서는 계통내 배관에서 생성될 수 있는 미량의 철산화물(Fe_3O_4 , magnetite) 등에 의한 파울링(Fouling)이 발생하는 문제점이 있다. 이는 원자력발전소를 비롯하여 여러 플랜트에서 발생할 수 있는 현상이며 원전의 경우 2차측 주급수 계통(Main Feedwater System)에서 발생하는 파울링 문제로 벤추리 유량계의 차압 측정포트 내 파울링이 발생하는 문제가 있다.

파울링은 급수에 녹아있는 금속 입자들이 배관 표면에 부착되는 현상이며 입자상 물질의 물리적 침착이나 특정한 수화학, 수력학, 구조적 조건에서 금속 이온들이 상변화에 의해 표면에서 침전되는 현상으로 발생할 수 있다. 벤추리 유량계에서 발생하는 파울링은 급수 유량 측정에 오차를 발생시키며, 원자력발전소에서는 이러한 측정 유량의 불확실성을 고려하여 설계기준보다 낮은 열출력에서 운전하게 되므로 발전량 감소로 인한 경제적 손실이 초래된다.

따라서, 본 연구에서는 원자력발전소 및 여러 플랜트에 적용할 수 있는 파울링 완화 코팅기술을 개발을 통해 플랜트의 경제성, 운전 신뢰도 및 안전성을 향상하는 것을 최종목표로 한다.

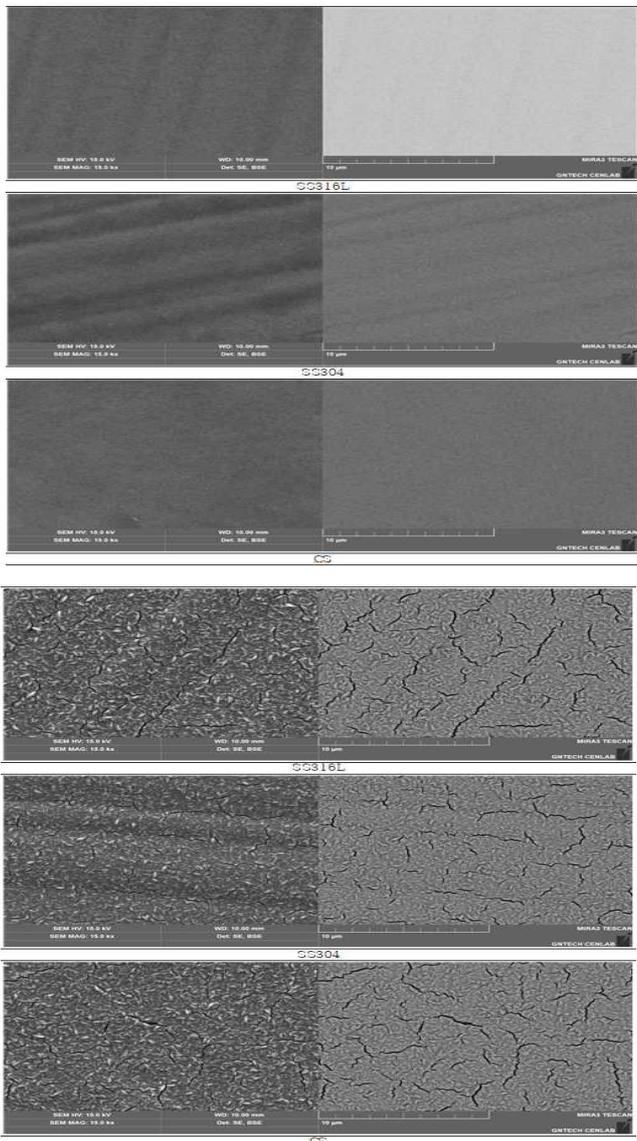
본 연구에서 개발하고자 하는 파울링 완화기술은 재료의 Zeta Potential 차이를 이용하여 배관에서 발생되어 주요기기에 파울링 현상을 발생시키는 철산화물 형태의 마그네타이트(Fe_3O_4)의 침적을 방지/완화하는 역할을 기대하였다.

이를 위해 최적화된 코팅재료를 선정하고자 선형 연구자료를 검토하여 다양한 코팅재료(Pd, Ni, Ti, TiN, CrN)의 Zeta Potential 특성을 확인하였으며 해당 코팅재료를 이용한 코팅, 부착력시험 그리고 부식시험을 수행하였다.

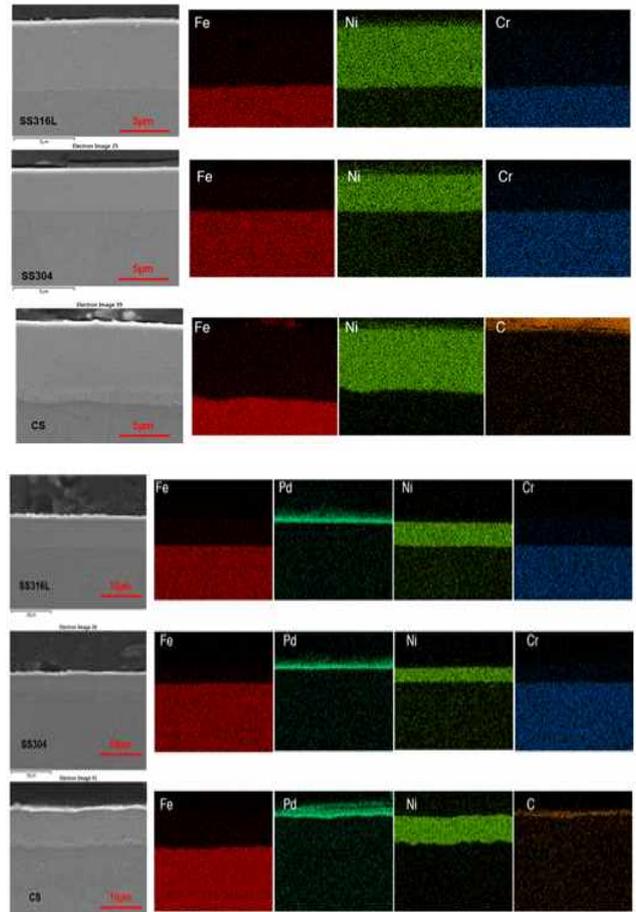
2.1 무전해도금

무전해 도금(Electroless Plating)은 금속이온을 용액 상태에서 석출시키는 방법으로 외부로부터 전기에너지를 사용하지 않고 자기촉매 방법에 의해 금속을 석출시키는 방법이다. 무전해 도금 방법은 치환법과 환원법으로 나누며 도금액 내 금속과 환원제의 반응으로 도금되는 방식인 자기 촉매형 화학 환원 도금이 국내에서는 널리 사용되고 있다. 이러한 특성으로 무전해도금은 현장에 이미 설치된 배관 및 기기들에 적용하기에 적합한 코팅 방법이다.

본 연구에서는 사전문헌조사에 의하여 원자력 수화학환경에서 내식성이 확인된 무전해 니켈도금[1] 과 팔라듐도금[2] 을 자체 제작하여 발전소 2차계통 운전조건과 동일한 고온/고압 수화학 환경에서 부식저항성을 평가하였다. SEM으로 분석한 무전해 Ni coating과 Pd coating의 표면과 단면도상태는 그림 1과 2에서 보여주고 있다. 무전해 Ni coating의 표면상태는 모재금속에 영향 없이 Ni layer가 코팅되었고, 약 4-6 μm 수준의 두께로 코팅이 수행되었다. 무전해 Pd coating은 1차 코팅된 Ni layer와 2차 코팅된 Pd layer의 특성차이에 의해 Pd coating layer에 일부 crack이 발견되었고 코팅 두께는 약 2 μm 수준으로 평가되었다.



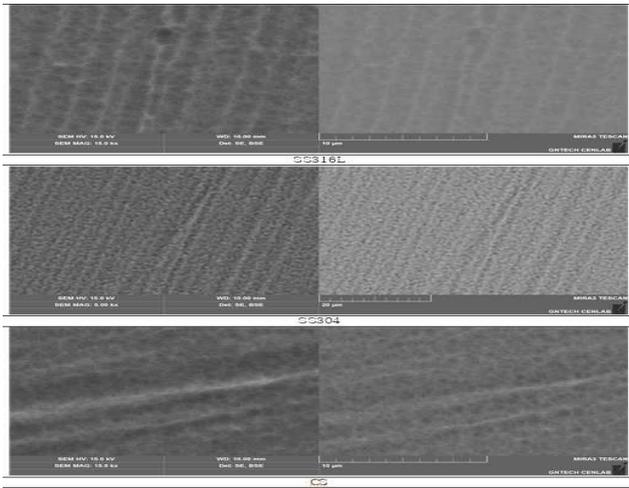
[그림 1] Surface morphology of electroless Ni and Pd coating



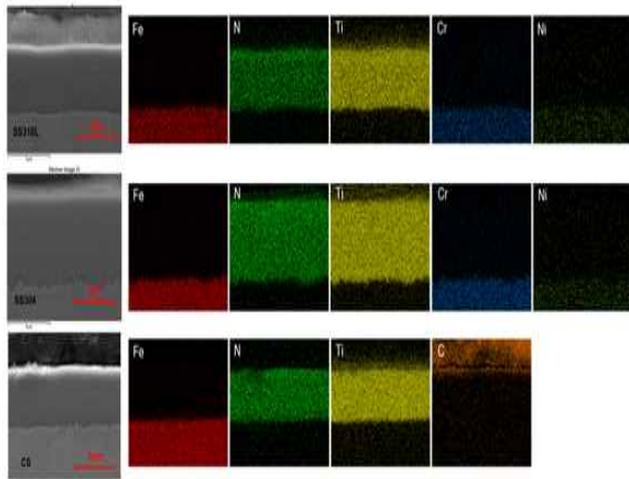
[그림 2] Cross-section view of electroless Ni and Pd coating

2.2 물리적기상증착(PVD)

PVD란 Physical vapor deposition의 약자로 전자소자나 일반 반도체 나노소자를 제작시 사용되는 박막형성 기법중 하나이다. PVD는 반응기 내에 substrate(기판)를 놓고 내부를 진공상태로 만든 뒤 target(코팅재료)물질을 물리적으로 입자화 시켜 떨어뜨려 substrate 표면을 코팅하는 방식이다. PVD는 신규제품에 코팅을 적용시 활용하는 것을 목표로 연구를 수행하였으며 이를 통해 Ti, TiN, CrN 코팅을 수행하였다. SEM으로 분석한 PVD-Ti, TiN, and CrN coating의 표면과 단면도상태는 그림 3과 4에서 보여주고 있다.



[그림 3] Surface morphology of various PVD coatings (TiN)



[그림 4] Cross-section view of various PVD coatings (TiN)

3. 실험결과

3.1 시편코팅

2차측 급수관 소재와 동일한 재질의 금속에 PVD, 무전해 도금 코팅을 적용하였으며, 코팅 후의 시료 모습은 그림 5와 같다.

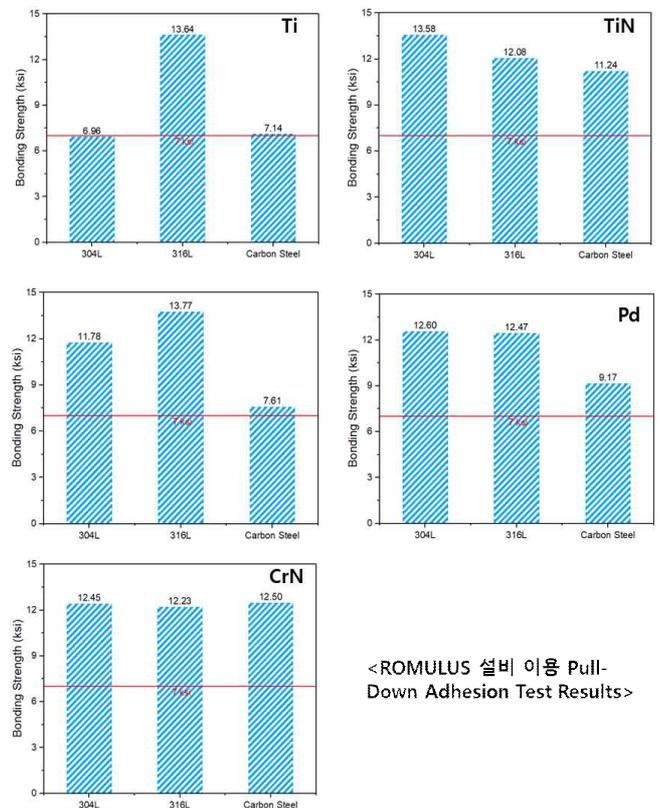
	304L	316L	CC
Ti			
TiN			
CrN			
AlN			
Pd			

[그림 5] 다양한 코팅재료 및 방법을 적용한 코팅시료

PVD 및 무전해 도금 모두 코팅이 균일하게 형성되었음을 확인하였으며 PVD 코팅에서 자주 발생하는 약간의 Pinhole 이 발생함을 확인하였지만 본 시편의 코팅 두께가 충분히 두꺼워 부식시험에는 큰 영향이 없을 것으로 판단되었다.

3.2 부착력시험

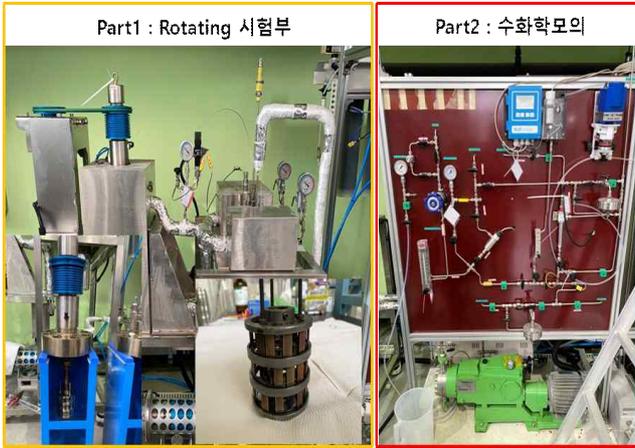
코팅된 시편의 건전성 확보를 위해 부착력 시험을 수행하였으며 ASTM D3359, ASTM D4541의 부착력시험을 모두 수행하였으며 두 시험 모두 코팅 밀착력 최고등급을 확인할 수 있었다. 앞선 두 시험법은 200 psi의 허용기준을 가지고 있어 그 이상의 부착력 세기에 대한 시험은 어려웠으며 해외 기술수준(7ksi)을 고려하여 추가적으로 10ksi까지 측정이 가능한 ROMULUS 사의 Pull-out test 장비를 사용하여 추가실험을 수행하였으며 모두 해외 기술 수준과 동등 또는 그를 상회하는 부착력을 보임을 확인하였다. 그림 6에는 수행된 부착력 시험 결과를 제시하였다.



[그림 6] ASTM D4541에 따른 부착력시험결과

3.3 유동가속부식시험

본 연구에서 개발하는 코팅이 적용되는 환경은 고온, 고압 조건에서의 급수배관이기 때문에 유동에 의한 코팅의 건전성 확보를 수행하였다. 이를 위해 수화학환경 모의 및 유동모사를 위한 magnetdrive rotating system을 구축하여 실험을 수행하였으며 실험에 사용한 장비는 그림 7과 같다.

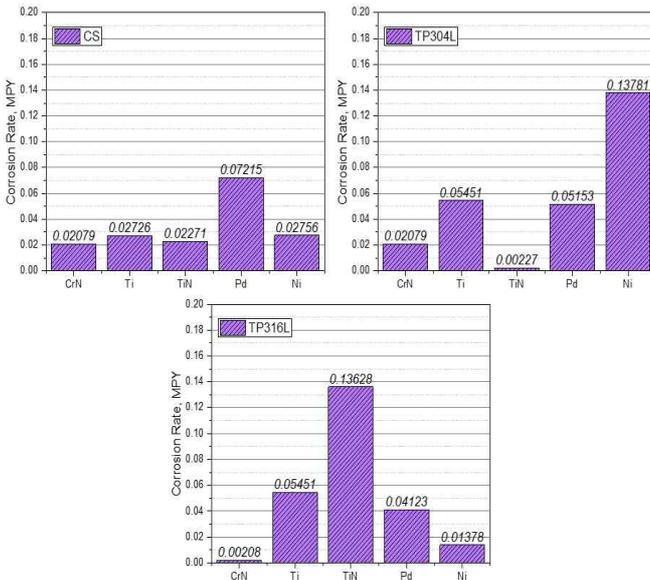


[그림 7] 유동가속부식시험설비

이러한 시험장비를 통해 약 7.8m/s의 유속을 모사하는 환경에서 실험을 수행하였으며 pH는 9.3, 1,200 psig, 235 °C의 온도압력 조건에서 약 1달간 실험이 수행되었다.

본 실험을 통해 실험 전후 시편의 질량을 측정하여 부식특성을 평가하였으며 그림8에 실험결과를 제시하였다.

Carbon steel에 코팅된 Pd 시편의 경우 모재와 코팅물질간의 재료적 특성 차이로 인해 코팅 불량현상이 나타나기도 하였지만 이외 다른 시편들은 전반적으로 우수한 내부식성을 보이는 것으로 판단된다.



[그림 8] 유동가속부식 시험결과

4. 결론

본 논문은 원자력발전소 급수배관내 파울링 완화를 위한 금속표면 코팅기술의 개발을 위해 물질간의 zeta potential 차이를 이용한 파울링 방지 기술을 개발하는 것으로 이를 위해 무전해 도금을 이용한 Pd, Ni코팅 및 PVD를 이용한 Ti, TiN,

CrN코팅을 주요 배관재질에 적용하였으며, 부착력시험, 유동가속부식 시험 등을 통해 각 코팅의 건전성 및 파울링 완화 효과를 확인하였다.

수행된 유동가속부식 시험결과는 2차 계통 급수관 수화학 환경 모사 조건에서 대부분의 코팅에서 무게 변화 없이 유동가속부식 및 표면 파울링 현상이 발생하지 않은 것으로 평가되었다.

이를 통해 향후 실제 파울링으로 문제가 생기는 기기 (ex: 벤추리 유량계 등) 과 같은 기기를 모의하여 실제 벤추리 유량계 형상 효과까지 고려한 발전소 현장 적용 코팅기술개발을 수행할 예정이다.

Acknowledgement

본 논문은 한국수력원자력(주)에서 재원을 부담하여 부산대학교 산학협력단/(주)미래와도전에서 수행한 연구결과입니다. (No. 2019-기술-09)

참고문헌

- [1] S. Kim, J. W. Kim, and J. H. Kim, "Enhancement of corrosion resistance in carbon steels using nickel-phosphorous/titanium dioxide nanocomposite coatings under high-temperature flowing water," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 698, pp. 267-275, 3/25/ 2017.
- [2] F. Pearlstein and R. F. Weightman, *Plating*, 56 (1986) 1158.