

## 니켈 도금법을 이용한 원자로 압력용기 피복재 손상부 정비 기술



**황성식**

한국원자력연구원 책임연구원

- 연세대학교 금속공학 학사·석사·박사
- 충북대학교 강사
- 연세대학교 강사
- ANL(USA) Visiting Scientist
- UST(과학기술연합대학원대학교) 교수
- 한국원자력연구원 책임연구원

### 들어가는 말

우리 몸은 세상에 태어난 후 자라면서 힘이 세지고 할 수 있는 일도 많아진다. 의학기술이 눈부시게 발달하고 좋은 음식으로 영양섭취가 좋아지면서 평균수명 100세를 보게 될 날도 멀지 않아 보인다. 그러한 20~30대 나이의 최고상태 체력도 나이를 들어가면서 관절이 부실해지고 각종 장기에 암 등의 병이 생겨 잘 관리하지 못하는 사람은 일찍 죽기도 한다.

많은 산업설비나 늘 몸에 가지고 다니는 휴대전화기도 처음 만들 당시의 건전한 성능을 꾸준히 유지할 수 없다는 것은 사람의 몸의 노화에서 보는 현상과 다르지 않다. 이와 같이 원자력발전소의 일상적인 운전조건에서의 재료 열화(Materials degradation)는 사람의 노화와 같은 현상으로 비유할 수 있고, 설비의 운전 중에 생기는 각종 사고로 인한 부품의 고장은 사람이

일상생활 중에 뼈가 부러지거나 산업재해로 인한 신체의 고장에 비유할 수 있다.

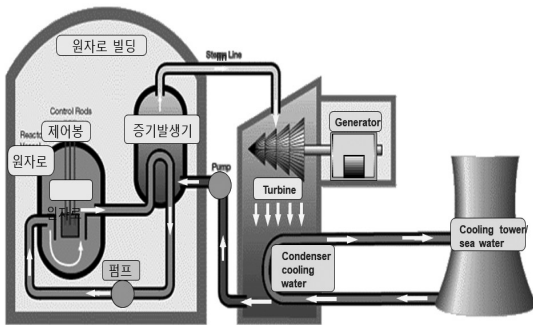
원자력발전소의 노심용융(Core melt)에 의한 방사능 누출의 가능성은 수백만 분의 1이하로 설계하고 있으며, 각 부품의 금속재료들도 60년 이상을 사용하여도 안전여유도가 충분하다. 그러나 고온 고압의 고 방사능 환경에서 재료가 겪는 기계적 성질의 변화는 연구자들로 하여금 끊임없는 경각심을 유발하고 그 대안을 마련하도록 요구한다. 이것이 바로 재료열화에 의한 부품 건전성평가 및 각 부위의 사용가능 수명 예측연구가 필요한 이유이다.

부품의 고장도 재료의 열화가 있는 경우 더 빨라 질 수 있는데 그 중 원자로 용기와 같이 핵분열 반응이 일어나는 핵심부품의 성능 유지는 최우선으로 관리되어야 할 사항이다. 원자로 용기 내면은 물속에서 부식되지 않도록 내식성이 좋은 약 6mm 두께의 스테인레스강으로 덮여 있

다. 이 부위를 클래딩층(Cladding)이라고 부르는데 이 층이 여러 요인으로 인해 벗겨지면 내식성이 적은 탄소강이 물에 노출되어 압력용기의 구조적 건전성이 떨어질 수 있는 문제가 발생할 수 있다.

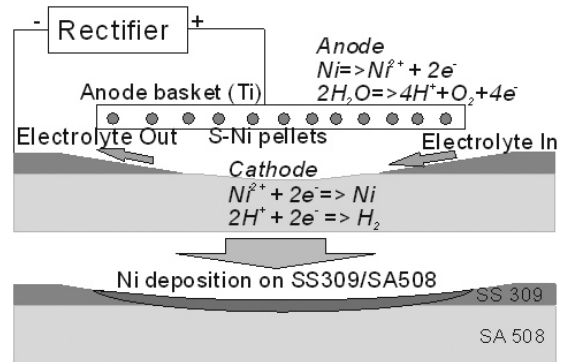
본고에서는 이 클래딩층을 보수하는 기술과 현장 적용을 위한 국제기술표준 개발 성과 및 원자력 규제기관의 인증 전략에 대해 소개하고자 한다.

### 니켈(Ni) 도금에 의한 원자로 내면 보수기술



[그림 1] 원자력 발전소 계통도

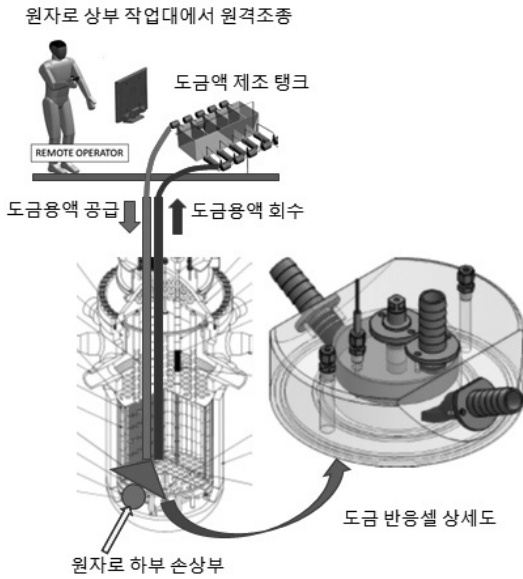
[그림 1]은 원자력 발전소의 일반적인 계통도이다. 원자로내에서 핵분열이 일어나며 320도의 고온 고압수가 1차 계통에 흐른다. 이러한 가혹한 조건을 견뎌야 하는 원자로 압력용기 내면의 손상은 그 깊이가 크지 않을 경우 기기건전성에 큰 위협요인은 아니다. 그러나 적절한 보수 기술이 있다면 장기간 물속에서의 부식을 원천적으로 막을 수 있는 방안이 될 것이다.



[그림 2] 원자로 용기 내면 니켈 도금 기술 원리

이번에 개발한 기술은 가동 중인 원자로 압력용기 내부에 손상이 발생했을 때 냉각수가 채워진 고 방사능 수증 조건에서 열적 손상을 줄 수 있는 용접 작업이 아닌 도금법을 이용해서 원격으로 손상부에 금속 보호막을 만들어 보수하는 기술로서 [그림 2]에 도금의 원리를 나타냈다. 도금하고자 하는 금속이온이 용액 중에 녹아있고, 음극전류(혹은 전압)를 인가하면 그 금속이온이 음극 전극에 전착된다. 도금층이 형성되는 전극에서는 부반응으로 수소 발생반응이 일어난다. 도금특성에 영향을 주는 주요인자에는 전류밀도, 전류인가방식, duty cycle, 온도, pH 등 매우 다양하므로 용도에 따라 최적의 도금조건을 찾아야 한다. 도금층 형성 시, 도금층의 재료 특성도 중요하지만, 밀착력이 좋지 않으면, 이용 중 기지층과 분리될 수 있다. 따라서 밀착층의 건전성 여부가 매우 중요하다.

[그림 3]은 원자로 하부에 위치하는 손상부를 보수하는 과정을 묘사한 그림이다. 'Ni 도금법을 이용한 클래딩 손상 보수기술'은 원자로 상부



[그림 3] 원격 도금 보수장치 개념도

에 설치한 전기도금장치 및 도금수조에서 용액을 원격 공급한다. 손상부를 감싸는 도금 반응셀([그림 4] 참조)내부에 니켈(Ni) 성분을 함유한 도금액을 공급하고 전류를 흘려 보호막을 생성하는 원리다. 이 공정에서 가장 중요한 절차는 도금 반응이 일어나는 도금셀을 손상부까지 접근시키고 견고하게 부착하는 일이다. 정밀하게 설계된 손상부의 모습을 본뜬 도금셀을 제작하고 6축 로봇을 이용하여 손상부에 접근시키면 준비작업이 마무리 된다. 도금용액이 셀 외부로 누설되지 않음을 확인한 후 표면 기름제거, 초층형성 및 본 도금의 순서로 이루어진다. 시간과 전류밀도를 조절하면 원하는 두께의 니켈 도금층이 손상부를 감싸 보호피막을 만들 수 있는 것이다.



[그림 4] 핵심도금장치인 도금셀

이 도금공정은 약 60도의 저온에서 수행되므로 직접 열을 가하여 금속이 녹는 용접으로 인한 재료의 변성(Embrittlement, 취화)이 없고 방사선의 원자로 내부에 들어갈 필요가 없으므로 작업자에 대한 방사선 노출을 원천적으로 없앤 획기적인 기술로서 [그림 4]는 핵심도금장치인 도금셀의 상세모습이다.

### 국제표준기술개발 성과

한국원자력연구원 연구팀은 정부가 추진하는 원자력 연구개발사업 중 증기발생기 전열관 균열보수기술 개발에서 얻은 아이디어에 기반한 이 기술은 국내외 특허를 획득하고 학술논문 등을 통해 기술의 우수성을 확인했다.

원자력발전소에 적용할 수 있는 기술이 되기 위해서는 원전 설계, 건설, 운영의 사실상 국제 표준으로 적용되는 ASME 기술기준 표준 중 발전소 보수의 표준을 담은 섹션11에 등재하는 것이 필수 과정이라 할 수 있다. ASME(American

Society of Mechanical Engineers)는 각종 기계류 제작 및 조립에 사용되는 부품/재료에 대한 기술기준과 표준규격을 제정하는 비영리 단체다. ASME 원자력 분야 표준은 세계 각국에서는 이를 그대로 차용하거나 이를 기반으로 자국의 제도를 반영한 설계기준을 제정해 원자로를 설계/운영하는 등 국제표준으로 인정받고 있다.

지금까지 국내 발전소 설계 및 운전 현안을 해결하기 위해 기존 ASME 기술기준 내용을 국내 실정에 적용할 수 있게 바꾸는 개정활동은 몇 차례 있어 왔지만 원천 기술 개발을 통해 새로운 기술기준을 세우고 표준으로 제정된 것은 처음이라 그 의미가 크다. 또한 이 기술은 기술 개발의 초기단계(TRL, Technology readiness level) 3단계 정도의 수준인 원천기술에서 출발하여 적용 실증 시험을 거치고 현장에 적용할 수 있는 장치까지 개발(TRL 8)하여 기술성숙도를 이룬 대표적인 기술로서의 평가되고 있다.

이 ASME국제표준의 제정과정에는 2008년에 결성된 Korea ASME Mirror Committee (KAMC)의 활동창구를 시작으로 2011년에 ASME안에 공식조직으로 승인된 Korea international working group(KIWG)의 위원들이 각 검토단계에서 기술적 문제점들은 세밀히 확인하여 본 연구진이 미국에서의 Code 위원회에서 답변할 자료로 만들어 가는데 공동기여한 작품이라고 할 수 있다.

본 표준을 제정하기 위해서 최초의 기술적 논의가 이루어진 Task group의 결성(2008.2)과

최초 안에 대한 승인에 이어 2013년 초에 그 상위 위원회인 Working group과 Sub group에서 위원들의 반대의견을 설득해야 하는 어려운 과정을 거쳐야 했다. 2013년 11월 최종표결에서는 2건의 반대 의견이 다시 제기되었으나 그 위원들에게 대면 설명하여 최종승인 됨으로써 3년간의 긴 여정을 성공으로 마무리 하고 2014년 1월에 Code case N-840을 발간하게 되었던 것이다.

### 규제기관 인증 전략

원자력 규제기관(미국의 경우 USNRC, 한국의 경우 KINS)은 ASME 기술 표준(Code case 등)의 핵심 변수를 정의하는 문서에 대한 기술적 검증을 통해 이 기술의 현장적용이 가능한지를 판단하고 승인한다. 니켈도금 보수기술 사업자는 용접공정에 필요한 WPS(Welding Procedure Specification)와 같은 성격의 문서인 '도금 절차 사양서(EPS, ELECTRODEPOSITION PROCESS SPECIFICATION ([그림 5]참조))'를 반드시 보유해야 하며 이 문서를 만들기 위해 장치개발 연구를 추가로 수행해야 했다.

한편 원자력연구원은 미국 전력연구소(EPRI)와 공동으로 본 기술의 미국 규제기관승인을 위한 작업에 착수하였다. 미국과 유럽의 EPRI 회원사 중 몇 곳은 이 기술을 해당 발전소 손상부 보수에 적용하고자 의사를 피력한 바 있으며 USNRC 승인을 위해 공동대응하기로 하였다.



일반적인 경우 미국이나 국외의 경험사례를 중요 참조기준으로 하는 국내 원전 실정을 고려하여 미국 규제기관이 이 기술에 대한 승인을 한

다면 국내 적용은 물론 세계시장으로 수출도 가능할 것이다. **KAIF**

| Draft<br>EPS   |  | Coupon No. 1 of 5  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
|--|--|--|--------------|----------------------------|---------------------------|--|------------------|----|--------------------------------|---|----|--------------------------------|---|------|--------------------------------------|---|----|-----|---|--------|--|---|--|--|
| <b>도금 절차 사양서</b><br>ELECTRODEPOSITION PROCESS SPECIFICATION (EPS)  |  |  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 사양서 번호<br>EPS NO. <b>DA EPS-001</b>  |  | 일자<br>DATE <b>Dec. 10, 2018</b>  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 개정 번호<br>REVISION NO. <b>1</b>   |  | 일자<br>DATE <b>Mar. 18, 2019</b>  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 관련시행 번호<br>SUPPORTING PQR NO. <b>None</b>  |  | 필터 수동 반자동 자동 기계<br>TYPE <input type="checkbox"/> Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semi-auto <input type="checkbox"/> Auto <input type="checkbox"/> Machine   |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 도금 방법<br>PLATING PROCESS <b>Ni Electrodeposition</b>   |  | 도금 절차<br>Electrodeposition Process   |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>시약</th> <th>분자식</th> <th>사양</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>가성소다</td> <td>NaOH</td> <td>시약급</td> </tr> <tr> <td>황산</td> <td>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></td> <td>"</td> </tr> <tr> <td>붕산</td> <td>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></td> <td>"</td> </tr> <tr> <td>염화니켈</td> <td>NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O</td> <td>"</td> </tr> <tr> <td>염산</td> <td>HCl</td> <td>"</td> </tr> <tr> <td>니켈설페이트</td> <td>Ni(SO<sub>4</sub>NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O</td> <td>"</td> </tr> </tbody> </table> |  | 시약   | 분자식          | 사양                         | 가성소다                      | NaOH   | 시약급              | 황산 | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | " | 붕산 | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> | " | 염화니켈 | NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O | " | 염산 | HCl | " | 니켈설페이트 | Ni(SO <sub>4</sub> NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O | " |  |  |
| 시약   | 분자식  | 사양   |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 가성소다   | NaOH   | 시약급  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 황산   | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                       | "  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 붕산   | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>                                       | "  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 염화니켈   | NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                                 | "  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 염산   | HCl  | "  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 니켈설페이트   | Ni(SO <sub>4</sub> NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O | "  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| <b>III 도금체 Base Metal</b><br>P NO. <u>1, 3, 12A, 12B, 12C</u> Gr. NO. <u>none</u><br>TO P NO. <u>none</u> Gr. NO. <u>none</u><br>OR SPEC. AND GRADE <u>TO</u>  |  |  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| <b>면적 Area</b><br>maximum area : <u>100 in.<sup>2</sup> (65,000 mm<sup>2</sup>)</u><br>maximum depth : <u>no greater than 1/4 in. (6 mm) or 10% of the base metal thickness</u>  |  |  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| <b>IV 밀착층 형성 Strike Layer Formation [1]</b><br>용액/Solution: <u>10% NiCl<sub>2</sub> + HCl</u><br>온도/Temperature: <u>Room Temp</u><br>두께/Thickness: <u>0.5 ~ 1 μm</u><br>전류밀도/Current Density: <u>10 ~ 20 A/dm<sup>2</sup></u><br>적용시간/Apply Time: <u>10 ~ 15 min</u>   |  | <b>도금층 형성 Electrodeposition [2]</b><br>용액/Solution: <u>20% Ni sulfamate + 10% HCl</u><br>온도/Temperature: <u>30 ± 1°C</u><br>두께/Thickness: <u>0.05 ~ 0.1 mm</u><br>전류밀도/Current Density: <u>5 ± 0.4 A/dm<sup>2</sup></u><br>적용시간/Apply Time: <u>30 min</u><br>pH : <u>3.5 ~ 4.5</u> |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| <b>양극 구성 Anode assembly</b>  |  |  |              |                            |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| 양극재료<br>Anode Material   |  | 양극 조성<br>Compo. W%   | 용기<br>Basket | 용기 매쉬<br>Size              | 여과포<br>Filter             | 전류밀도/극성(Current density/Polarity)            | 침베내 유량/Flow rate |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| S-Ni Pellet (Sulfur contained)   | Ni>99.97, S:0.022~0.030  | Ti   | Max 3 mm     | Poly propylene             | 5 ± 0.4 A/dm <sup>2</sup> | Direct Current (+ Anode, - cladding surface) | Min. 25          |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| Prepared by Researcher   |  | Reviewed by Project manager  |              | Approved by Team manager   |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |
| Min Su Kim<br>12/10/2018   |  | Seong Sik Hwang<br>12/22/2018  |              | Dong Jin Kim<br>12/28/2018 |                           |  |                  |    |                                |   |    |                                |   |      |                                      |   |    |     |   |        |  |   |  |  |

[그림 5] 도금 절차 사양서