



원자로 압력용기 손상 보수 신기술 ASME 기술기준 승인

기술 개발 현황 및 향후 전망

황성식

한국원자력연구원 원자력재료개발부 책임연구원



연세대 금속공학 학사, 석사, 박사

한국원자력연구원(1989~)

금속 재료 부식 및 방지 방안 연구

충북대, 연세대 강사 역임

과학기술연합대학원대학교(UST)

교수(1995~)

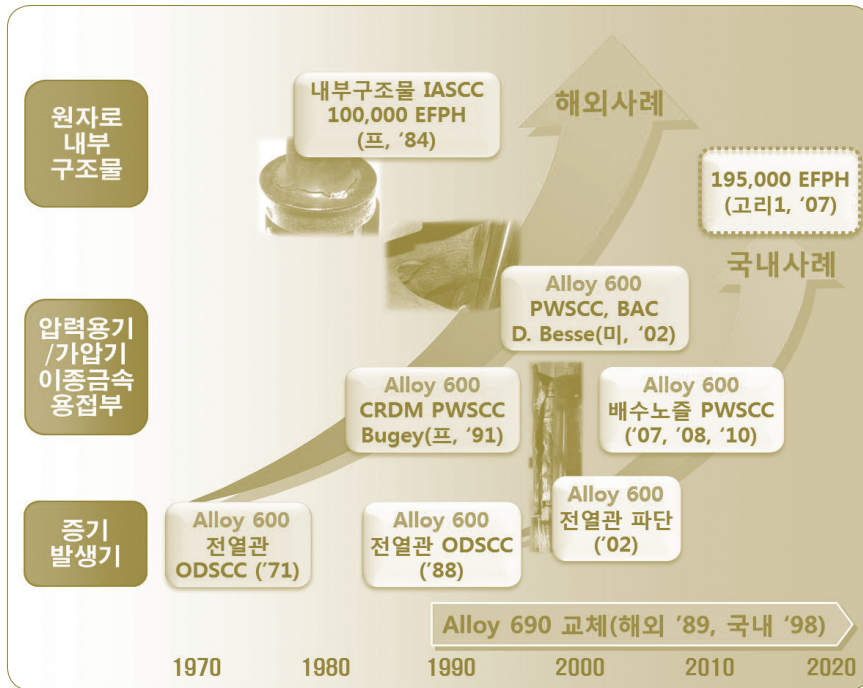
원자력발전소 안전에 대한 관심

2011년 3월 11일 일본 후쿠시마 원전에서 발생한 사고 이후에 원자력발전소의 안전에 대한 국민의 관심이 크게 증가하였다. 사고가 발전소 부품의 부식 열화로 인한 것은 아니나 국내에서 운영되고 있는 발전소의 안전에 대한 관심도 더불어 커지고 있다. 일반적인 기계 부품도 사용 시간의 경과에 따라 고장과 손상이 증가하듯이 원자력발전소 부품도 가동 연수 증가에 따라 재료 부식이 증가하는 것은 당연한 일이다. 사람의 몸이 나이가 먹을수록 병이 생겨 어려움을 겪는 것과 같은 이치라고 할 수 있다.

최근 국내 원전의 부품 부식 손상 이슈가 커지고 있는 것도 20년 이상 운전에 따른 노화 현상(경년열화, aging)으로 보아야 한다. (<그림 1> 참조) 우리나라의 재료 열화 전문가는 물론 세계 원자력 전문가들도 이러한 피할 수 없는 재료 열화를 대처하는 방안으로 ① 사고로 이어지기 전에 조기에 결함을 탐지하여 대처하는 일, ② 최적의 보수 방안을 사전에 강구하여 사안 발생 시에 적절히 대처하는 일, ③ 조만간 일어날 것으로 예상되는 손상에 대해서는 현재는 문제로 인식되지 않으나 과거의 경험에 비추어 사전 대처 차원의 관리 전략을 마련하는 일 등의 전략으로 발전소의 재료 열화 문제에 대응하고 있다.

원자로의 기능

원자로는 내부에 핵연료를 담아 연쇄 반응을 일으켜 생기는 뜨거운 물을 증기발생기로 내보내는 작용을 하는 구조물이다. <그림 2>는 원



〈그림 1〉 원자력발전소 주요 부품 열화 추세

자료를 포함한 발전소의 계통을 도식적으로 나타낸다. 340℃ 부근의 고온에서 물이 끓지 않도록 하기 위해 높은 압력을 견뎌야 하므로 압력용기 강재로는 강도가 높고 인성이 좋은 저합금강(SA 508등)을 사용한다. 또한 표면에는 6mm 두께의 스테인리스강으로 부식에 대한 보호층(clad)을 만드는데 이 보호 피막이 여러 이유로 벗겨지면 내식성이 적은 저합금강이 1차수에 노출되는 문제가 발생하게 된다.

Ni도금 보수 기술

이번에 개발한 기술은 가동 중인 원자로 압력용기 내부에 손상이 발생했을 때 냉각수가 채워진 고방사능 수중 조건에서 열적 손상을 줄 수 있는 용접 작업 없이 도금 기술을 이용해서 원격으로 손상부에 금속 보호막을 만들어 보수하는 기술이다.

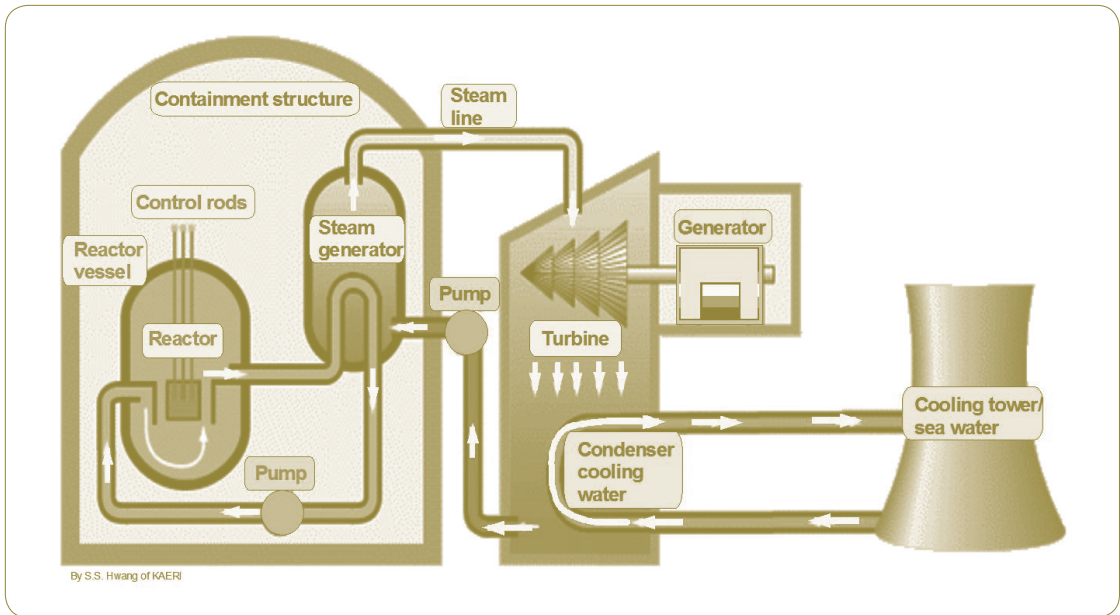
〈그림 3〉에 도금의 원리를 나타냈다. 도금하고자 하는 금속이온이 용액 중에 녹아있고, 음극 전류(혹은 전

압)를 인가하면, 금속이온이 도금하고자 하는 전극에 전착된다. 이때 반대쪽 전극에서는 주로 산소가스가 생성되는 반응이 일어난다. 또한 도금층이 형성되는 전극에서도 부반응으로 수소 발생 반응이 일어날 수 있다.

도금 특성에 영향을 주는 주요 인자에는 전류 밀도, 전류 인가 방식, duty cycle, 온도, pH 등 매우 다양하다. 따라서 용도에 따라 최적의 도금 조건을 찾아야 한다. 도금층 형성 시, 도금층의 재료 특성도 중요하지만 밀착층의 특성이 좋지 않으면 이용 중 기지층과 분리될 수 있다. 따라서 밀착층의 건전성 여부가 매우 중요하다.

〈그림 4〉는 도금층 물성 중 가장 중요한 특성인 접착력을 확인하는 방법을 나타낸다. 기지층 위에 도금층을 형성한 시편을 zig를 이용해 구부린 후 계면 관찰을 통해 계면 건전성을 평가한다. ASME section IX QW-160 SIDE BEND TEST에 따라 시험한 결과, 본 과제에서 셋업한 조건으로 도금 시 기지층과의 분리없이 안정한 피막이 유지됨을 확인하였다. (〈그림 5〉 참조)

또한 정량적인 접착력 평가를 위해 SA508과 SS309



〈그림 2〉 원자력발전소 모식도

를 지지층으로 하여, 밀착층과 도금층을 차례로 전착한 후, 〈그림 6〉과 같이 시편을 가공하여, 인장시험을 진행하였다. 이때 만일 밀착층이 건전하지 않다면 도금층과 기관이 겹쳐있는 부분이 미끄러져 떨어져 나갈 것이다. 그러나 밀착층의 특성이 우수하다면 도금층이 먼저 끊어질 것이다.

SA508 기관에 대해서 밀착층의 겹침 면적이 1mm × 4mm 인 경우에는 도금층과 겹침층이 분리된 반면, 4mm × 4mm, 8mm × 4mm 가 겹쳐 있을 때에는 도금층만 존재하는 부위가 끊어졌다. SS309 를 기관으로 사용할 때에는 1mm × 4mm 에서도 겹침층이 떨어지지 않았다. 이로부터 결합력을 구할 수 있으며 실제 도금 기술을 정비 기술로 적용 시, 정비할 곳의 면적을 결정하는데 활용된다.

원자로 압력용기는 고강도-고인성의 탄소강재로 제작하고 냉각수 환경에 더 잘 견딜 수 있도록 용기 내부 표면을 스테인리스 소재 피복재로 마감하는데, 두께 6mm의 피복재가 손상되면 1차 냉각수가 침투해 압력용기 본체가 부식될 위험이 있음은 앞에서 언급한 바와 같다.

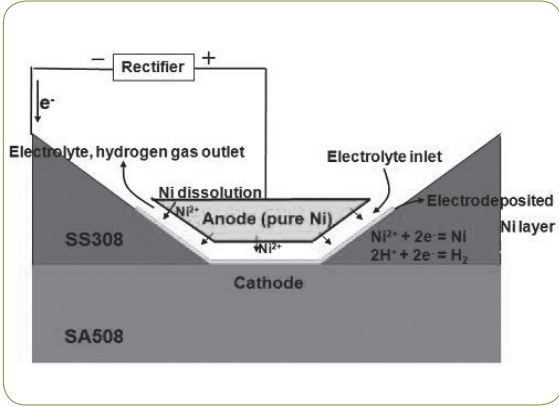
본 연구팀은 고구 성분을 이용해 압력용기 내 손상

부위를 정밀하게 본을 뜬 뒤, 손상 부위에 맞게 특수 제작된 도금 수조를 압력용기에 투입해서 연결관을 통해 니켈(Ni) 성분을 함유한 도금액을 손상 부위에 공급함으로써 니켈 금속 보호막을 생성하는 방법을 고안해냈다. (〈그림 7〉 참조)

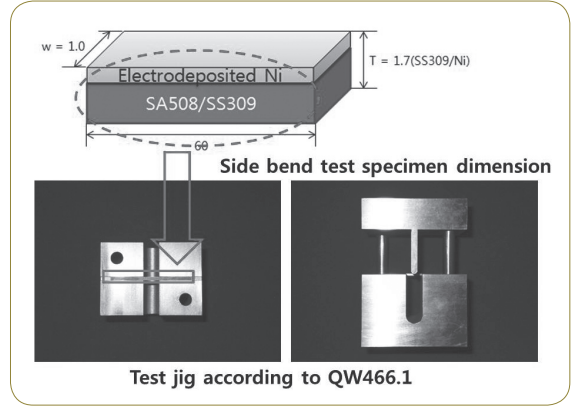
기존의 용접을 통한 보수 기술은 압력용기에 높은 열을 가해 소재의 성질이 변할 우려가 있고 추가 열처리 작업이 요구되어 보수에 오랜 시간이 걸리는 것과 달리, 개발된 기술은 보수 전후에 압력용기에 열적 변화가 일어나지 않을 뿐 아니라 수중 환경을 유지한 상태에서 원격 작업으로 보수가 완료되는 것이 장점이다.

개발된 기술은 국내외 특허를 획득하고 학술논문 등을 통해 기술의 우수성을 확인했을 뿐 아니라 원전 설계의 사실상 국제 표준으로 적용되는 ASME 기술기준 표준 중 발전소 보수의 표준을 담은 섹션 11에 code case로 등록되어 기술력이 국제적으로 입증되었다. (〈그림 8〉 참조)

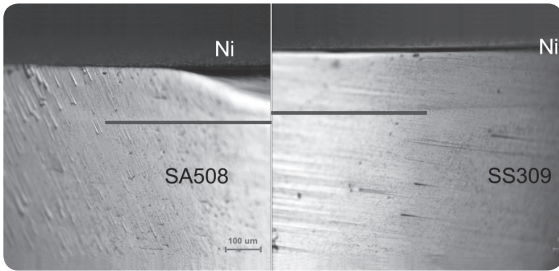
ASME(American Society of Mechanical Engineers)는 각종 기계류 제작 및 조립에 사용되는 부품/재료에 대한 기술기준과 표준규격을 제정하는 비영리 단체로,



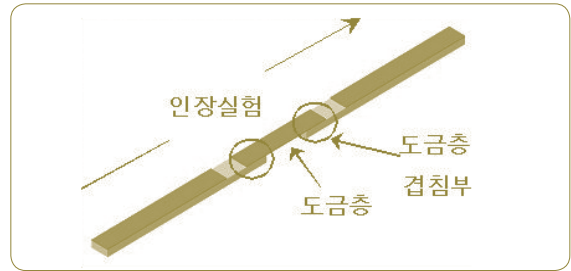
〈그림 3〉 SS308과 SA508이 기지층으로 존재하는 곳에 도금 시 도금 원리와 반응들



〈그림 4〉 Side bend test 방법과 zig 사진



〈그림 5〉 Side bend test 결과 계면 부위 접착력 확인



〈그림 6〉 접착력 평가를 위한 시편 설계도면

특히 ASME 원자력 분야 표준은 세계 각국에서는 이를 그대로 사용하거나 이를 기반으로 자국의 설계기준을 제정해 원자료를 설계/운영하는 등 국제표준으로 인정받고 있다.

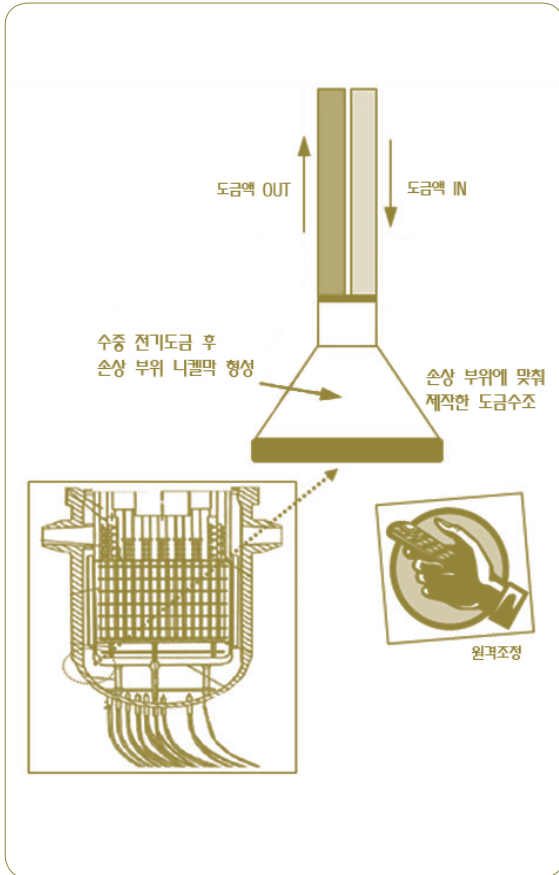
원자로 손상부 보수 기술 국제표준 제정 경과

ASME 국제표준의 제정 과정에는 2008년에 결성된 Korea ASME Mirror Committee (KAMC)의 활동 창구를 시작으로 2011년에 ASME 안에 공식 조직으로 승인된 Korea international working group (위원장 : 한국 원자력연구원 구경희 박사)의 후원이 큰 힘이 되었다.

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 Subgroup에서 위원들의 반대 의견을 설득해야 하는 어려운 과정을 거쳐야 했다. 2013년 11월의 최종 표결에서는 2건의 반대 의견이 다시 제기되었으나 그 위원들에게 대면 설명하여 최종 승인됨으로써 3년간의 긴 여정을 성공으로 마무리 했다. 아래에 그 간의 활동 경과를 요약했다.

- 2008.8 : 국내 개발 기술의 국제 표준화 및 이를 통한 국내 원전의 보수 기술의 표준화 필요성 제기
- 2008.10 : Korea ASME Mirror Committee (KAMC)의 활동 창구를 활용한 국제 표준화 활동 착수
- 2011.11 : 기술적 논의를 위한 Task group 결성 승인
- 2013.2 : 표준(Code case)안이 Working group에서 승인



〈그림 7〉 수중 도금 기술의 원리

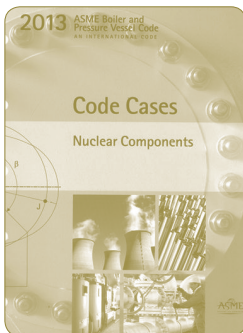
- 2013.5 : 표준 (Code case) 안이 Subgroup에서 승인
- 2013.8 : Section XI STD committee에서 표결에 부치기로 승인
- 2013.12 : 반대 의견 2개 있었으나 기술적 설명으로 무난히 해소하고 최종 승인
- 2013.12.23 : 국내 일간지에 성과로 소개됨

원자력 국제표준 제정의 의의와 향후 전망

지금까지 국내 발전소 설계 및 운전 현안을 해결하기 위해 기존 ASME 기술기준 내용을 국내 실정에 적용할 수 있게 바꾸는 ‘개정’ 활동은 몇 차례 있어 왔지만 원천 기술 개발을 통해 새로운 기술기준을 세우고 표준으로 ‘제정’ 된 것은 처음이라 그 의미가 크다. 이는 우리나라 원자력 기술의 국제적 위상을 나타내는 쾌거로서 원자력 원천 기술의 세계 수준 달성의 좋은 본보기이다.

손상부를 용접 보수할 경우 그 비용이 1건에 200억원 내외인 것과 개발된 기술이 기존 기술보다 보수 시간을 단축해 100억원(정비를 위한 가동 정지 10일 간 경제 손실) 이상 절감할 수 있는 것을 감안할 때 연간 수백억원의 수입 대체 효과를 기대할 수 있으며, 원전뿐 아니라 고방사능 환경 속 손상 기기 보수에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

더불어 한국의 원자력 R&D능력을 국제적으로 인정받는 계기가 되었고, 이를 기반으로 세계 원자력발전소 보수 시장에 진출하는 기틀이 마련되었다.



〈그림 8〉 ASME 표준 기술 (Code case) 문서

한국경제 2013년 12월 23일 월요일 A18면 종합 12.0 x 8.1 cm

원자로 압력용기 보수 기술, 국제 표준 채택

황성식 박사팀 원 상계와 관련된 원천기술 개발을 통해 새로운 기준을 세우고 표준으로 제정된 것은 이번이 처음이다. 이 기술은 가동 중인 원자로 압력용기 내부에 손상이 발생했을 때 나뉜 도금을 이용해 원자로로 금속 보호막을 만들어 보수하는 기술이다. 원자로 압력용기 손상을 복구하는 방식은 방사능과 냉각수가 가득 찬 용융 방식으로 보수하면 열로 인해 오일이 손상이 심해질 수 있다. 후기 원자로 작업 때문에 시간도 오래 걸린다.

국내 연구진이 개발한 원자로 압력용기 보수 기술이 국제 표준으로 채택됐다. 미래창조과학부는 22일 한국원자력연구원 원자로재료개발부의 황성식 박사팀이 원자로발전소 핵심부품인 원자로 압력용기의 손상부위를 용접하지 않고 보수할 수 있는 신기술을 개발했다고 발표했다. 이 기술은 전 세계 원전 설계·운영 기준인 미국 기계학회(ASME) 기술 표준으로 채택됐다. 원

김보영 기자 wing@hankyung.com

국제표준 제정 성과 소개 기사



ASME 표준제정위원회 활동 모습