

장 윤 석 경희대학교 원자력공학과 교수 | e-mail : yschang@khu.ac.kr

이 글에서는 현재 원자력발전 기기 및 구조물의 건전성 입증을 위한 재료 및 파괴 분야의 기술과 향후 전망에 대해 소개하고자 한다.

원자력발전소는 원자핵 반응에서 나오는 높은 에너지를 이용하여 물을 끓여 증기를 생산하고 이 수증기의 힘으로 터빈을 돌려서 전기를 생산한다. 그림 1과 같이 우리나라는 세계에서 유래가 없을 정도로 빠른 기술의 발전을 이루어 왔으며, 이 중 주력 기종인 가압형 경수로(원자로)에서 만들어진 고온에너지를 원자로냉각재를 통해 증기발생기로 전달하는 1차 계통과 증기발생기에서 만들어진 증기를 터빈으로 보내 전기를 생산하는 2차 계통이 분리되어 방사성물질이 외부로 누출될 가능성을 낮추는 방식을 채택하고 있다. 원자력발전소의 설계 및 운영에 있어 무엇보다 우선하는 개념은 안전성이며, 1차 냉각재를 포함하고 있는 압력경계(RCPB: Reactor Coolant Pressure

Boundary) 내의 주요기기는 물론 이를 보호하기 위해 설치된 격납건물의 건전성이 입증되어야 한다. 현재 산업체에서 고려하고 있는 사항과 연구사례 및 향후 전망을 간략히 기술하면 다음과 같다.

기기건전성 확보를 위해 고려하는 사항

그림 2는 압력경계를 구성하는 원자로압력용기 및 원자로내부구조물, 증기발생기, 가압기, 펌프, 배관 등의 개략적인 형상을 나타낸 것으로서 전력산업기술기준(KEPIC: Korea Electric Power Industry Code)에 수록된 요건에 따라 설계, 제작, 시공, 시험, 검사, 운전되고 있다. 주요기기에 대해서는 기본적인

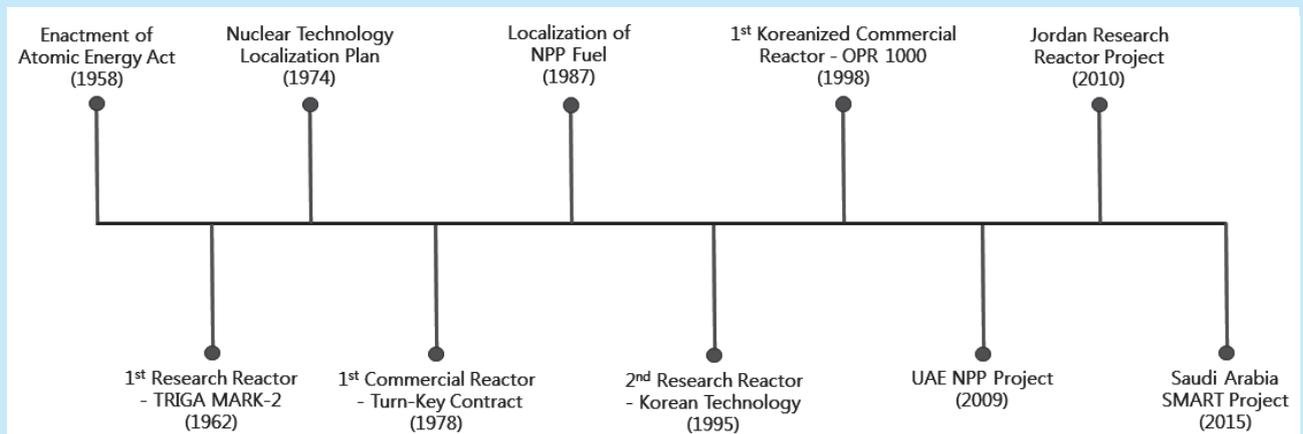


그림 1 우리나라 원자력발전 기술의 발자취(한국원자력협력재단, 2015, 자료 인용)



그림 2 RCP를 구성하는 주요 기기의 개략도(티움 솔루션즈 제공)

로 여유도가 충분한 형상, 작용하중을 견딜 수 있는 강도 그리고 다수의 정상 및 비정상 과도상태 반복을 감안한 피로파손 방지 설계가 필요하며, 이를 위해 광범위한 해석, 실험, 평가가 이루어지고 있음은 주지의 사실이다. 아울러 설계요건에 명시되어 있지 않다 하더라도, 크게 두 가지 관점의 잠재적 손상기구에 따른 환경영향을 분석할 필요가 있다.

첫 번째는 다양한 형태의 부식에 의한 영향이다. 대표적인 예로서 응력부식균열(SCC: Stress Corrosion Cracking)은 운전환경과 높은 인장응력하에서 민감 재료의 균열을 생성하는 손상기구이다. 재료 측면에서 Type 316, Type 347, CF3 및 CF3M과 같은 저탄소 오스테나이트 스테인리스강은 고온 냉각재 환경에서 입계응력부식균열(IGSCC: Intergranular SCC) 저항성이 있으며, Type 304NG, Type 304L, Type 316L 또한 적합한 것으로 알려져 있다. 고강도 저인성 탄소강의 경우 최소 항복강도가 240MPa 이하이면 적합하고, 오스테나이트 스테인리스강은 용접이나 성형 후 고용화 열처리 및 담금질하는 것이 좋다. 응력 측면에서는 적합한 열처리를 수행하거나 슛피닝

(shot peening) 또는 기계적 방법 등으로 압축응력을 부여하여 잔류 인장응력을 완화함으로써 SCC를 저감시킬 수 있으며, 화학제어 개선 및 오염 저감을 통해 발생빈도를 줄일 수 있다. 일반부식(general corrosion)은 부식환경에 의해 금속이 다소 균일하게 얇아지거나 손실되는 손상기구이다. 감육(wall thinning)과 부식 생성물의 축적 등을 유발하며, 이는 기기의 파손이나 누설 또는 다른 문제로 이어질 수 있다. Cr, Mo, Al을 많이 함유한 합금은 부식 저항성이 높으며, 탄소강의 내부식성 향상을 위해 소량의 Cu 또는 Ni을 첨가하기도 한다. 피복이나 코팅 등 적합한 방식을 적용하여 저항성을 높일 수도 있으나, 부식억제제를 첨가할 경우 세심한 주의가 필요하다. 입계부식공격(IGA: Intergranular Corrosion Attack)은 입계 또는 그 근처에서 불순물이나 합금 성분의 과잉 또는 결핍에 의해 국부적 부식이 일어나는 손상기구이다. 약 400~815℃ 범위에서 가열 또는 서냉되는 오스테나이트 스테인리스강이나 Type 430과 같은 고크롬 페라이트 스테인리스강의 경우 IGA에 민감할 수 있으므로 고용화 열처리, 저탄소 함량, 탄소 안정화 성분 첨가 등을 대안으로 고려하여야 한다. 오스테나이트 스테인리스강 또는 Alloy 600 용접부에서는 예민화가 발생할 수 있기 때문에 일반적으로 용접 후 열처리(PWHT: Post Weld Heat Treatment)를 수행하지 않는다. 페라이트 배관재료에 오스테나이트 스테인리스강을 용접하는 경우 PWHT가 수행될 수 있기 때문에 주의가 필요하며, 용접 입열(heat input)은 고품질의 건전한 용접부를 만들기 위해 최소로 하여야 한다. 부식피로 및 균열성장은 반복하중 조건에서 냉각재 환경의 영향이 추가된 손상기구이다. 아직까지 운전 중인 기기의 파손이 원자로냉각재의 영향에 의한 것이라는 결정적 근거는 없으나 고온, 높은 용존 산소량, 큰 변형률 진폭, 낮은 변형률 속도가 조합된 조건에서 피로수명 감소 현상이 나타나기 때문에 환경영향에 기여하는 과도상태를 최소화할 필요가 있

으며, 시험결과를 반영한 상세해석이 요구된다. 유동 가속부식(FAC: Flow Accelerated Corrosion)은 환경에 의해 재료의 용해율이 증가하는 손상기구이다. 난류와 와류를 일으키는 형상을 최소화하거나 2% 크롬 합금강과 같이 저항성이 있는 재료를 이용하고, FAC를 유발하는 계통의 기타 조건을 고려해야 하며, 민감한 계통에서 기기의 주기적인 검사는 필수적이다. 침식(erosion)은 유체 내 부유 고형물에 의한 기계적 마모이며, 침부식(erosion-corrosion)은 침식과 부식이 동시에 일어나는 손상기구이다. 일반적으로 스테인리스강 및 니켈합금, 코발트계 합금과 같이 경도, 강도, 변형률에너지, 가공경화율이 높은 재료를 선택하거나 인성 증가를 위한 열처리, 손상 예방을 위한 코팅 등을 통해 저항성을 증진시킬 수 있다.

두 번째는 취화에 의한 영향이다. 조사유기응력부식균열(IASCC: Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking)은 방사선 및 고온수 환경에 노출된 스테인리스강 및 니켈합금의 입계균열 손상기구이다. 재료 측면에서 오스테나이트 스테인리스강이 IASCC에 가장 민감하다고 단언할 수는 없으나, 크롬 결핍이 가장 중요한 원인인 것으로 알려져 있기 때문에 불순물과 함께 크롬 함량을 최소화하여야 한다. Type 304 및 Type 316 오스테나이트 스테인리스강의 IASCC 민감도는 물의 용존산소 함유량이 줄어들수록 감소하므로 수화학 제어를 통해 완화시킬 수 있다. 중성자 조사를 많이 받는 기기의 운전하중과 제작 중 발생하는 잔류응력을 최소화하여야 하며, 예민화 열처리에도 주의할 필요가 있다. 열취화(TE: Thermal-aging Embrittlement)는 고온에서 장기간 노출될 때 재료의 노치 충격특성 및 파괴인성이 상실되는 손상기구이다. 이에 영향을 미치는 금속학적 인자는 페라이트상의 존재이며, 민감도는 페라이트 함량에 좌우된다. TE는 정련한 니켈합금 및 니켈-크롬-철 합금에서 발생하지 않고, 탄소강 및 저합금강의 경우 무시할 수 있을 정도이며, Type 304, Type

316, Type 347 합금의 용접재도 기본적으로 취화에 둔감한 것으로 알려져 있다. 탄소강 및 저합금강의 경우 냉간변형을 최소화하는 제작과정을 따르도록 하고, 정련한 오스테나이트 스테인리스강과 주조 오스테나이트강은 TE 최소화를 위해 탄소 및 페라이트 함량을 낮추는 방식 등으로 강도요건을 충족시켜야 한다. 조사취화(RE: Radiation Embrittlement)는 중성자 조사에 의한 미세조직 변화로 항복강도 및 인장강도가 증가하고 연성 및 파괴인성이 감소하는 손상기구이다. 재료 측면에서 망간 및 니켈 등의 원소와 섞인 구리 과잉 석출물 또는 공동이 민감재료의 경화 특성에 영향을 주는 주요 인자이며, 인화물과 작은 탄화물도 일부 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 조사량이 증가함에 따라 연성-취성 천이온도가 증가하고 최대 흡수에너지는 감소하며 압력-온도 운전한도에도 영향을 미치게 된다. 따라서 낙중시험, 샤르피 충격시험, 파괴저항 시험 등과 이에 상응하는 해석을 통해 RE의 영향을 분석하여야 한다. 이 외에도 두 접촉면이 매우 작은 진폭의 반복운동을 받을 때 발생하는 프레팅(fretting), 열적 주기하중이나 열성층(thermal stratification) 또는 난류관통(turbulent penetration)과 같은 현상에 기인하는 열피로(thermal fatigue)에 대한 연구가 장기간에 걸쳐 수행되고 있으며, 수소취화(hydrogen embrittlement) 및 지연균열(delayed cracking), 진동 및 수격하중(water hammer)에 의한 동하중 영향, 크리프(creep) 등에 의한 환경영향 분석 지침도 개발 중이다.

기기건전성 연구 동향 및 전망

우리나라 최초의 원자력발전소가 운전을 시작한 이후 약 40년에 걸쳐 일일이 열거할 수 없을 만큼 다양한 연구가 이루어져 왔다. 이에 그치지 않고 최근에는 각종 기기뿐만 아니라 격납건물의 안전성에 대한 검증이 요구되는 등 기기건전성 평가의 대상과 범위

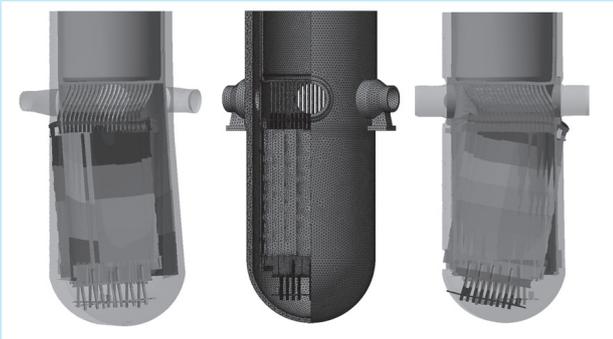


그림 3 원자로내부구조물 3차원 연성해석 사례

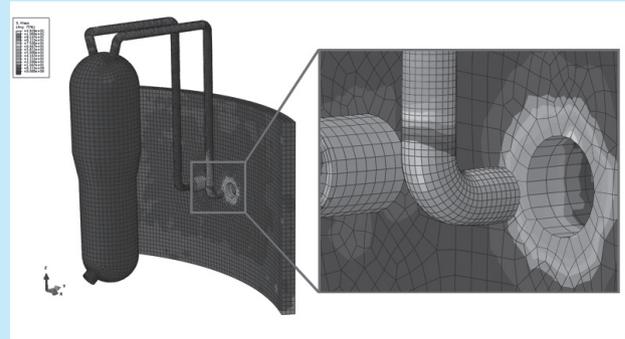


그림 4 주증기배관 제트하중 해석 사례

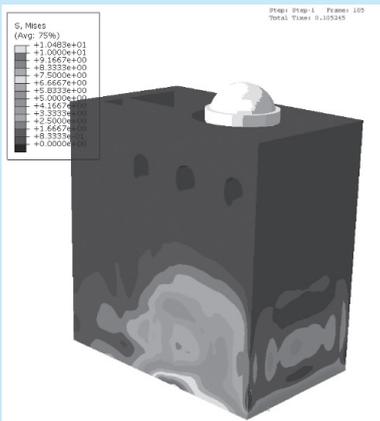


그림 5 원자로공동 증기폭발 해석 사례

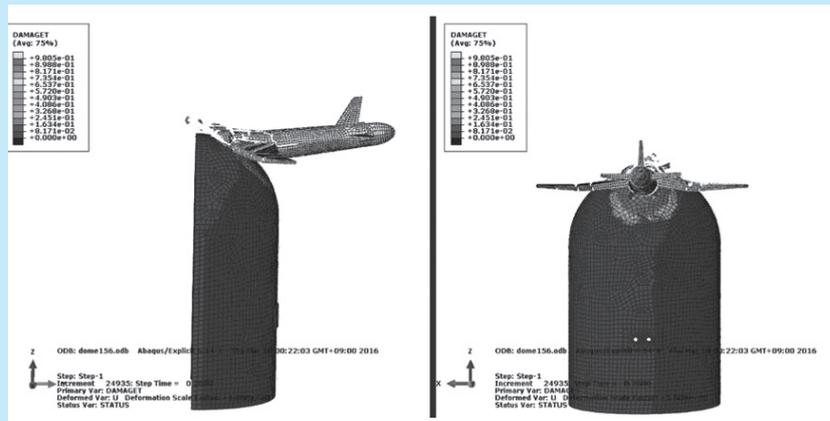


그림 6 격납건물-항공기 충돌 해석 사례

는 더욱 넓어지고 있다. 원자로압력용기의 경우 교체가 거의 불가능하므로 어떤 기기보다도 많은 안전 여유도를 가지고 설계 및 제작되는데, 30여 년 전에는 상상하지도 못했던 정밀시험 및 해석, 평가 기술의 개발을 통해 신뢰도가 매우 높아졌고, 이에 따라 발전소의 장기가동 추진도 설득력을 갖게 되었다. 일례로 조사취화 실험연구가 미국을 비롯하여 국제협력으로 진행되고 있고, 고강도 압력용기강의 적용을 추진하려는 움직임에 맞추어 정밀평가 기술의 적용이 확대되고 있으며, 확률론적 안전성 평가와 관련한 파손확률 정량화 기법의 개선도 지속적으로 이루어지고 있다. 원자로내부구조물은 기능이 상실될 경우 핵연료 집합체의 손상 및 제어봉 삽입 실패와 같은 중대한 사고로 이어질 수 있으며, 떨어져 나온 일부 부속품이

원자로냉각재 유로를 따라 이동하면서 노심 유로를 차단하거나 다른 기기에 손상을 줄 수도 있다. 따라서 운전 환경, 재질 및 하중 등의 복합 작용으로 인해 발생할 수 있는 경년열화 현상을 보다 정확하게 예측 및 평가하고 관리하기 위한 기술의 개발이 요구되고 있다. 그림 3은 유체-구조 상호작용을 고려한 원자로내부구조물의 3차원 모드해석 사례를 보여주는 것이다. 가압기는 응력부식균열 저항성이 크게 향상된 Alloy 52/152 재질로 보수용접을 시행하는 등 손상 저항성이 강화된 새로운 재료의 개발 및 적용, 주기적인 감시, 검사, 시험 및 정비 등 손상 예방활동 강화 및 최적화, 보다 정확한 파괴역학적 건전성 평가방법의 개발 및 적용 등 개별적인 사안에 대한 기반기술 연구가 진행 중이다. 증기발생기도 전열관의 재질을 응력부

식균열 저항성이 크게 향상된 Alloy 690으로 대체한 바 있으며 마모 손상에 대한 저항성이 강화된 신소재의 개발 및 적용, 결함의 탐지 능력이 우수한 새로운 비파괴검사 기법의 개발 및 적용, 주기적인 감시, 검사, 시험 및 정비 등을 포함한 체계적인 건전성 관리 프로그램의 강화 및 최적화 연구가 진행 중이다. 배관의 경우 FSWOL(Full Structural Weld Overlay) 등과 같은 예방 정비와 검사, 실제적인 균열형상을 고려한 개선된 파단전누설 평가, 기상 배관과단과 관련된 동적 영향 연구(그림 4 참조), 확률론적 누설률 예측 모델 및 균열 평가모델 개선, 환경피로, 열취화 및 조사취화를 반영한 기기건전성 평가 및 실시간 감시시스템 구축 연구가 지속되고 있다. 한편 주요기기와 강재 플레이트 및 지지대는 물론 철근이 포함된 원자로

공동 콘크리트 구조물까지를 일괄하는 응력 및 파괴역학 해석 연구가 진행되고 있으며(그림 5 참조), 격납건물-항공기 충돌에 의한 손상 평가 연구도 추진되고 있다.(그림 6 참조)

우리나라 원자력 산업은 상용 발전소 및 연구로의 해외 완공 및 운영과 최초의 운영정지를 앞두고 있을 뿐만 아니라 사용후핵연료 관리방안의 수립 및 이행 문제 등을 해결해야만 하는 중차대한 시점에 직면해 있다. 새로운 도약을 위해 산업계, 연구계, 학계의 전문가들이 사명감을 갖고 각고의 노력을 기울이고 있으며, 정보기술과 의사소통 능력이 뛰어난 청년 후학들이 결실을 맺기 위한 자부심과 더불어 창의적 융합기술의 개발 및 접목을 위해 끊임없이 노력하고 헌신해 줄 것을 기대하고 있다.