



THEME 02

스마트 원자로 기계 기술검증

박진석 | 한국원자력연구원 기술검증부, 실장 | e-mail : jspark1@kaeri.re.kr

이원재 | 한국원자력연구원 기술검증부, 부장 | e-mail : wjlee@kaeri.re.kr

이 글에서는 중소형 원자로인 스마트 원자로의 표준설계인가를 받기 위하여 수행한 기계 기술검증시험, 원자로계통의 안전성 평가에 필요한 자료를 생산하기 위하여 수행한 시험, 그리고 기술현안 사항을 해결한 시험에 대하여 소개하고자 한다.

현재 상업운전 중인 원자력발전소는 1호기당 1,000MWe 정도의 전기를 생산하지만, 상업운전 발전보다 규모가 작은 중소형 일체형원자로 스마트(Syatem-integrated Modular Advanced Reactor) 1기는 인구 10만인 도시에 전기와 물을 동시에 공급할 수 있는 원자로이다. 중소형원자로는 소규모 전력망이나 인구가 분산되어 있는 국가 및 지역에 적합한 원자로로서 우리나라를 비롯하여 선진국에서 연구하고 있지만 상업운전을 하는 국가는 아직 없는 상태이다. Babcock & Wilcox mPower에서 중소형 원자로의 건설허가를 받기 위하여 여러 가지 중요한 시험 계획을 가속화하고 있고, Nuscale Power는 원자로 안전성을 강화한 중소형 원자로를 개발하고 있다.

원전 관련 설계기술은 1960년대 원전 개발 당시의 알려진 기술을 적용하였기 때문에 2000년대 기술과 비교할 때 낙후된 기술도 있다. 스마트 원자로는 1997년 개념설계부터 시작하여 2011년 말까지 스마트 기술검증 및 표준설계 인가를 받기 위하여 노력하고 있으며, 2000년 현재 향상된 기술을 적용하기 때문에 1960년대 적용한 기술보다 신뢰성 높은 원자로를 설계할 수 있다. 상용원자로 설계기술의 국산화는 대부분 원전 관련 기술을 복제한 것이라면, 스마트 설계기

술은 기존의 기술 위에 향상된 기술을 검증하여 적용하기 때문에 스마트 원자로 계통의 설계 완성 여부는 우리나라가 원자로 계통 기술개발의 선진국이 될 수 있는 이정표를 세우는 기회가 될 것이다.

원자로내부구조물 진동시험 및 유동하중시험

원자로내부구조물의 동적 특성은 구조물과 물(water)의 상호작용으로 인하여 공기 중의 구조물 동특성이 달라진다. 원자로 압력용기 내부에 설치된 여러 개의 원통실린더 사이에 존재하는 물로 인하여 공기 중 원통실린더의 진동특성이 달라지지만 아직까지 물 속에 있는 원자로내부구조물의 진동특성을 집중적으로 검증한 예는 없다. 스마트 원자로내부구조물의 동적 특성을 검증하기 위하여 2009년부터 2011년까지 연세대에서 1/12로 축소한 원자로내부구조물에 대하여 진동시험을 수행하였다. 원자로내부구조물의 원형을 이용하여 진동시험을 수행하는 것은 시간과 경제적으로 낭비이기 때문에 축소원자로 내부구조물의 진동시험을 통하여 3차원 유한요소해석 방법론을 검증한 후에 원형원자로 내부구조물의 진동특성을 예측하는 것이다.



그림 1 축소 원자로 내부구조물 진동 시험장치

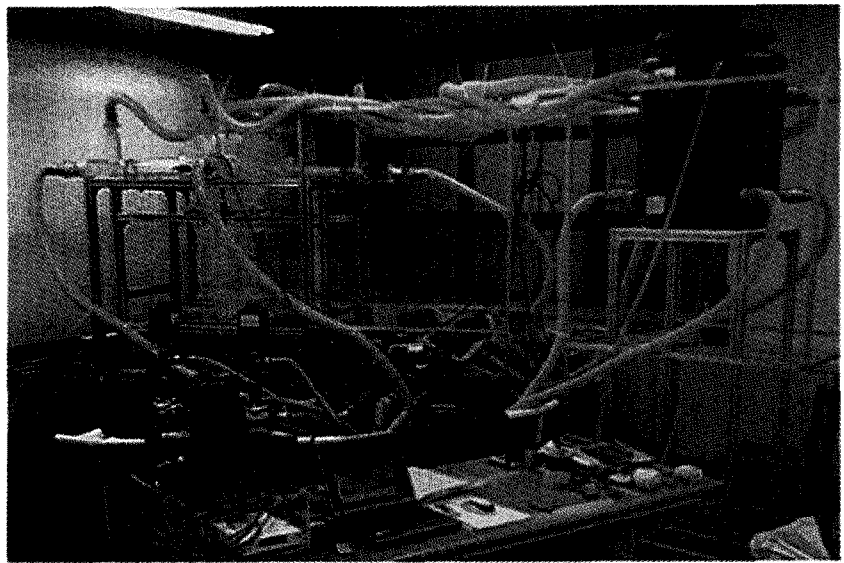


그림 2 축소 원자로 내부구조물 유동하중 시험장치 (연세대에서 구성한 유동하중 시험장치)

검증된 원자로내부구조물의 3차원 유한요소해석 방법은 구조물 각각의 기계적 건전성과 진동특성을 예측하는 데 사용할 수 있다. 그러나 발전소 부지에서 발생한 지진에 의한 원자로 계통 전체의 내진평가를 수행하기 위해서 수천만 자유도의 3차원 유한요소해석 모델을 사용할 수 없다. 3차원 유한요소해석 모델의 자유도를 줄여서 수백의 자유도로 구성되는 빔(beam) 모델을 사용하여 내진해석에 사용한다. 빔모델로 변환한 구조물 내부의 물을 집중질량으로 치환하고 구조물과 구조물 사이에 있는 물은 유체요소로 치환하여 만든 내진해석용 빔모델의 신뢰성을 평가하였다. 원자로내부구조물이 물에 잠겨 있는 경우에 대하여 내진해석모델의 방법론을 검증한 사례는 국내뿐만 아니라 국외에서도 찾아보기 어려운 연구 사례이다.

원자로냉각재펌프의 냉각재 유동에 의하여 원자로 내부구조물에 발생하는 유동하중 특성을 평가하기 위하여 2009년부터 2011년까지 연세대에서 1/10로 축소된 원자로내부구조물에 대하여 유동하중시험을 수행하였다. 냉각재의 유동으로 인하여 원자로내부구조물

에 일정한 유동하중이 작용할 것이라고 예상해 왔지만 아직까지 정량적으로 유동하중을 평가한 예는 별로 없다. 원형 원자로에 대하여 유동하중시험을 수행하기에는 시간과 경제적으로 어려움이 있기 때문에 축소원자로 내부구조물의 유동하중 시험을 통하여 전산유체해석 방법론을 검증하였으며, 검증된 전산유체 방법론을 사용하여 원형 원자로내부구조물에 작용하는 유동하중을 평가하였다.

원자로내부구조물의 유동경로의 각 위치에서 측정된 정압과 전산유체해석에서 구한 정압의 일치를 통하여 전산유체해석 방법을 검증하였다. 검증된 전산해석방법을 사용하여 원자로내부구조물 특정 위치에서 발생하는 원주방향 유동하중 형태와 원자로냉각재 펌프에 의한 압력맥동 크기의 형태를 관찰할 수 있었다. 검증된 전산유체해석 방법으로 냉각재 유동이 원자로내부구조물에 작용하는 축방향 유동하중, 원주방향 유동하중, 그리고 압력맥동 하중을 정량적으로 평가할 수 있었으며, 국내와 국외의 관련 연구 분야에 큰 공헌을 하였다고 할 수 있다.

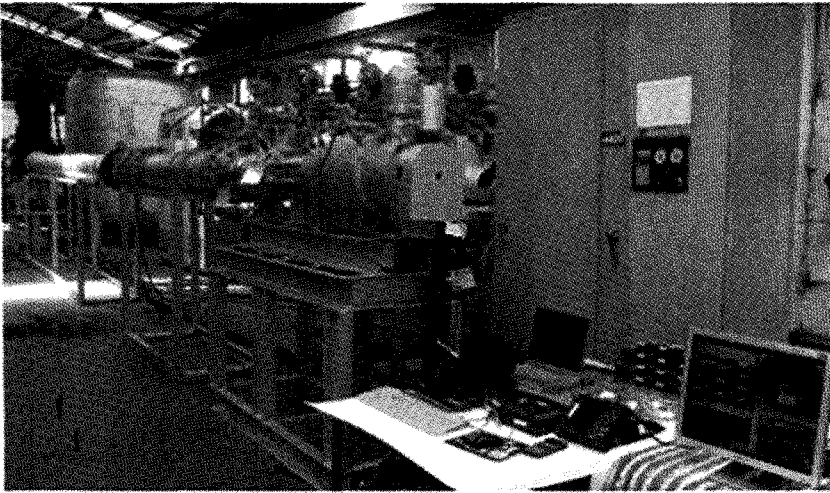


그림 3 원자로냉각재펌프 성능시험장치

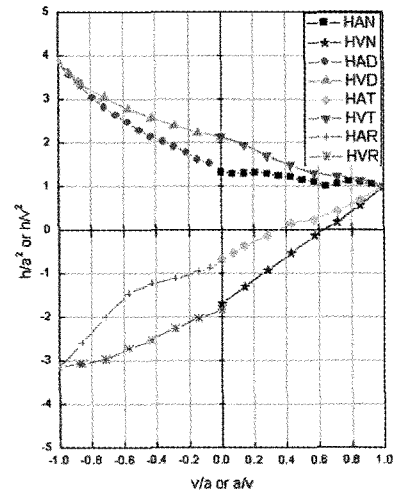


그림 4 펌프 안전특성 곡선

원자로냉각재펌프 수력학 성능 검증시험

원자로냉각재펌프는 원자로 핵 연료의 열원에서 뜨거워진 냉각재를 강제순환 시켜서 증기발생기로 보내는 역할을 한다. 증기발생기에서는 원자로 외부에서 공급하는 이차수와 고온의 냉각재의 상호 열교환으로 이차수가 증기로 변환한다. 원자로냉각재펌프가 작동하지 않으면 핵연료의 열원을 냉각할 수 없기 때문에 핵연료의 온도가 지속적으로 상승하여 원자로 압력용기를 녹여 방사선 물질을 외부로 방출하게 된다. 2011년 3월에 일본 후쿠시마 원전에서 냉각수를 순환시키는 펌프의 중단으로 인하여 핵연료가 녹아 내려 방사선 물질이 외부로 누출된 최악의 사고가 발생할 수 있었던 것이다.

원자로 계통의 안전성을 확보하기 위하여 원자로냉각재펌프의 안전특성 자료를 얻어야 한다. 화학플랜트나 일반 산업계에서 사용하는 펌프는 정격성능에 대한 자료만 있으면 되지만 원자로냉각재펌프는 정격

펌프의 안전특성 곡선은 임펠러 정회전-정유량, 정회전-역유량, 역회전-정유량, 역회전-역유량 조건일 때 유량-수두 곡선을 나타내는 것으로서 펌프의 비정상 운전 시 원자로 냉각 계통의 안전성을 평가할 때 필요한 자료이다.

성능 이외에 펌프의 비정상 운전 시 유량-수두 및 유량-토크 자료가 필요하다. 비정상 운전이란 펌프의 임펠러가 정회전 시 역유량이 발생하는 경우, 임펠러가 역회전할 경우 정유량이 발생하는 등과 같은 현상을 말한다. 이 밖에 회전축의 파손 또는 회전축이 고착되었을 경우에 임펠러를 통과하는 유량 등에 대한 수력자료가 필요하다.

비정상 운전 조건에서 펌프의 성능을 구하기 위한 시험은 일반펌프의 시험과 달리 또 다른 시험기술을 요구한다. 펌프의 안전성능을 구하기 위하여 시험펌프 이외에 별도의 보조펌프가 필요하다. 보조펌프의 용량이 시험펌프보다 크기 때문에 시험루프가 매우 커지는 경향이 있으며 원자로 냉각재펌프 자체의 용량이 매우 크기 때문에 원형펌프에 대한 수력성능 시험보다는 수력학적인 상사법칙에 따라 축소된 축소펌프에 대하여 수력성능 시험을 수행한다. 2000년 초반까지 국내에서 원자로냉각재펌프의 설계기술이나 수력성능시험에 대한 연구가 없었으나 일체형원자로 원자로냉각재펌프를 개발하면서 원자로냉각재펌프 설

비정상 운전 조건에서 펌프의 성능을 구하기 위한 시험은 일반펌프의 시험과 달리 또 다른 시험기술을 요구한다. 펌프의 안전성능을 구하기 위하여 시험펌프 이외에 별도의 보조펌프가 필요하다. 보조펌프의 용량이 시험펌프보다 크기 때문에 시험루프가 매우 커지는 경향이 있으며 원자로 냉각재펌프 자체의 용량이 매우 크기 때문에 원형펌프에 대한 수력성능 시험보다는 수력학적인 상사법칙에 따라 축소된 축소펌프에 대하여 수력성능 시험을 수행한다. 2000년 초반까지 국내에서 원자로냉각재펌프의 설계기술이나 수력성능시험에 대한 연구가 없었으나 일체형원자로 원자로냉각재펌프를 개발하면서 원자로냉각재펌프 설

계 및 시험분야에 많은 기술을 개발하였으며, 관련 기술들을 학계 및 산업계로 전파하였다.

증기발생기 전열관 중성자 조사 후 재료시험

상용원전의 증기발생기는 원자로 바깥에 설치되기 때문에 중성자 조사에 의한 재료의 취화로 인한 문제를 고려하지 않아도 된다. 그러나 스마트 증기발생기는 원자로 압력용기 내부에 장착되며, 노심에 가까이 있기 때문에 중성자 조사량이 매우 높다. 증기발생기 수명기간 동안 중성자 조사를 받아도 전열관 재료는 조사취화가 되지 않아야 한다. 따라서 스마트 증기발생기 재료인 Alloy 690 소재의 중성자 조사에 따른 기계적 특성 및 열물성치 특성을 확보할 필요성이 대두된 것이다.

스마트 증기발생기 전열관 재료인 Alloy 690의 경우 중성자 조사취화 환경에서 장기간 사용된 경험이 없고, 현재까지 대부분의 조사취화 연구는 압력용기강과 스테인리스강에 집중되어 있기 때문에 Alloy 690 재료에 대한 조사취화 시험 결과가 거의 없는 실정이다. Alloy 690이 오스테나이트계 스테인리스강과 비슷한 거동을 보이기 때문에 특정 조사량 범위 내에서는 조사취화에 민감하지 않을 것으로 판단되지만, 중성

자 조사재의 인장특성이나 파괴인성 특성 등의 정량적 평가를 통해 증기발생기 수명기간 Alloy 690 재료의 조사취화 여부를 알아야 한다.

한국원자력연구원의 연구용 원자로인 하나로 노심 내부 및 노심 외부에서 Alloy 690 시편의 중성자 조사하였으며, 조사재시험시설에서 조사시편의 인장시험, 파괴인성 시험, 열전도도 시험 등을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 Alloy 690의 중성자 조사재 재료특성 자료는 국내외에서 기본 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

나선형 증기발생기 가동 중 검사

상용원전의 증기발생기 전열관은 U자 형태의 튜브로서 원전가동 중 검사용 보빈(bobbin) 와전류 탐촉자로 결함탐지 검사를 수행할 수 있다. 스마트 증기발생기 튜브는 나선형이며, 튜브의 직경이 상용원전 증기발생기 전열관 튜브보다 직경이 작다. 나선 감김수가 최소 10회전 이상인 나선형 튜브 내부에 보빈 탐촉자 케이블을 삽입할 때 과도한 마찰력으로 인하여 삽입할 수 없는 문제가 발생하였으며, 소구경의 나선형 튜

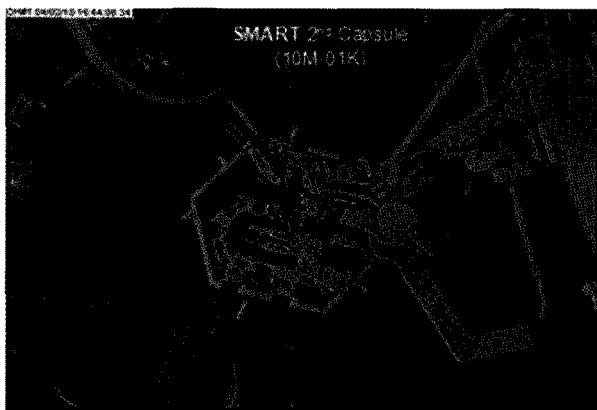


그림 5 하나로에서 Alloy 690 중성자 조사

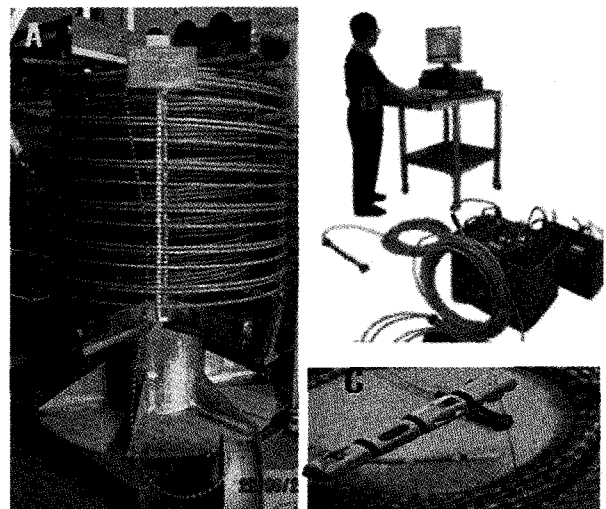


그림 6 나선형 튜브 가동 중 검사용 저 마찰 케이블

브의 결함을 탐지할 수 있는 보빈 와전류 탐촉자의 개발이 필요하였다.

일본에서는 몬주 나선형 증기발생기의 가동 중 검사를 수행하기 위하여 공압장치로 탐촉자 케이블을 삽입하는 연구를 수행한 바 있지만, 현재까지 국내외의 알려진 기술로는 스마트 나선형 증기발생기 튜브의 가동 중 검사 현안을 해결할 수 없었다. 보빈 와전류 탐촉자의 케이블은 튜브 내면에서 미끄러지면서 삽입되는 방식으로서 직관일 때의 마찰력은 접촉 길이에 선형적으로 증가하지만 나선형 튜브 내면에서는 접촉 길이의 지수함수로 마찰력이 증가한다. 스마트 증기발생기 나선형 튜브 전 길이에 삽입할 수 있는 탐촉자 케이블을 개발하기 위하여 미끄럼 마찰 방식에서 구름마찰 방식으로 변경한 저 마찰 케이블을 개발

하였다.

상용 증기발생기 튜브에 비해 직경이 작고, 두께가 두꺼운 나선형 튜브의 가동 중 검사를 수행할 수 있는 저 마찰 소형 와전류 탐촉자의 결함 탐지 성능을 검증하였다. 국내특히로 등록된 저 마찰 소형 와전류 탐촉자의 사용성은 매우 다양하다. 일반 산업계에서 사용하는 나선형 튜브 열교환기의 결함 검사를 수행하지 못한 곳에서도 저 마찰 케이블을 활용할 수 있으며, 현재 해외에서 개발하고 있는 중소형 원자로에서 적용하는 나선형 증기발생기의 가동 중 검사에 활용할 수 있다. 본 연구에서 개발한 저 마찰 케이블은 국외의 나선형 열교환기 결함 검사에 활용할 수 있는 활로를 찾을 경우 국내 기술의 부가가치를 높일 수 있는 기회가 될 것이다.



기계용어해설

산수소용접(酸水素鎔接; Oxyhydrogen Welding)

압축한 산소와 수소의 혼합 가스를 연소시켜 그 열로 금속을 용접, 절단하는 방법.

위험속도(Critical Speed)

회전축 및 축에 고정되어 있는 회전체는 한 몸이 되어 회전하고 있으나, 진폭이 급증해서 위험한 상태일 때의 회전속도.

크로스형 가스터빈(Cross-compound Gas Turbine)

고압 압축기를 저압 터빈에서, 저압 압축기를 고압 터빈에서 구동시켜 가스 터빈의 성능을 높이는 형식의 일종.

크로스형 증기터빈(Cross-compound Steam Turbine)

대형 터빈에서 몇 개로 분할한 터빈 차실을 축이 평행이 되도록 가로로 배치한 터빈.

발전제동(發電制動; Dynamic Brake)

전동기를 작동시키고 그 출력을 저항기에 소비시켜 에너지를 흡수하는 제동방법.

산소창(酸素槍; Oxygen Lance)

강재 절단부의 일부를 가늘고 긴 강관으로 연소반응 온도까지 가열한 후, 이 부분에 강관 내부에 차 있는 산소만을 분출하여 강재의 산화열로 절단하는 방법.

침수건조(浸水乾燥; Water Seasoning)

일정 염분을 함유한 물 속에 목재를 담가 두어 목재 속의 수액과 외부의 수분을 바꾸어 이후의 건조를 쉽게 하는 것.

연수장치(軟水裝置; Water Softening Plant)

넓은 의미로는 수중의 용해물질을 제거하는 장치이며, 일반적으로는 수중에 용해한 칼슘염, 마그네슘염을 침전시켜 제거하는 장치.

크로스헤드(Crosshead)

원동기에서 피스톤 봉과 연결봉을 연결시켜, 피스톤 및 피스톤봉의 직선운동을 안내하고 연결봉으로부터의 스트러스트를 지지하는 부품.