



조 형 희 | 연세대학교 기계공학부, 교수 | e-mail : hhcho@yonsei.ac.kr  
김 경 민 | 연세대학교, BK21 연구교수 | e-mail : kimkm@yonsei.ac.kr

이 글에서는 일체형 원자로에서의 펌프에 의한 유동하중 평가 방법을 소개하고, 이를 위해 연세대학교에서 수행 중인 실험 방법 및 수치해석 방법에 대해 소개하고자 한다.

## 한국형 원자로 SMART 및 열수력 안전

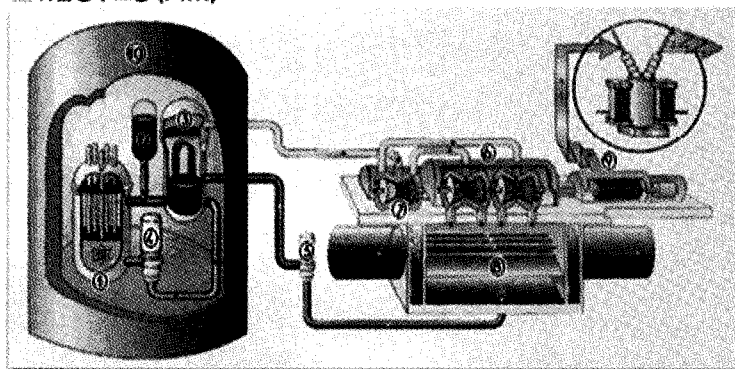
원자력발전 방법은 우라늄의 핵분열을 이용해 발생한 열을 냉각하는 냉각재(coolant)에 따라 가스로 냉각시키는 방법과 물로 냉각시키는 방법으로 나눌 수 있다. 냉각재로 물을 이용한 기술은 경수형(H<sub>2</sub>O) 원자로와 중수형(D<sub>2</sub>O) 원자로가 있으나, 국내 원전 노형은 그림 1과 같은 가압경수로형(PWR) 원전이다. 가압경수로형 원전은 감속재와 냉각재로 경수를 사용하고 핵연료는 우라늄 235를 약 2~4%로 농축하여 사용한다. 이와 같이 원자로 내에서 핵분열로 발생된 열은 증기발생기로 보내져 열교환시키는 계통 시설과, 증기발생기에서 발생된 증기로 터빈을 돌린 후 복수기를 거쳐 물로 환원시킨 다음, 다시 증기발생기로 순환되는 터빈과 발전기 계통에 관련되는 시설로 구분된다.

원자로 내 열전달 매체인 냉각재는 원자로에서 약 320℃까지 가열되며, 비등하지 않도록 약 15MPa로 가압된다. 따라서 원자로 내 일정한 엔탈피를 유지하기 위하여 압력을 조정하는 가압기, 원자로와 증기발생기 사이에 냉각재를 순환시켜

주는 냉각재 펌프가 있다. 이 후, 증기발생기에서 발생한 증기를 이용하여 터빈을 돌려 터빈축에 연결된 발전기에서 전력을 생산하는 원리는 화력발전소의 원리와 같다.

1997년부터 한국원자력연구원이 독자적으로 개발해 2002년에 기본 설계가 완성된 중소형 원자로인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)는 현재 상용화를 위한 기술 검증 중이다. 그림 2와 같은 SMART 원자로는 전기를 생산하는 동시에 바닷물을 민물로 바꿀 수 있는 해수 담수화용 원자로라는 것이

◆ 가압경수로형 (PWR)



- ① 원자로    ② 가압기    ③ 증기발생기    ④ 냉각재펌프    ⑤ 주급수펌프
- ⑥ 저압터빈    ⑦ 고압터빈    ⑧ 복수기    ⑨ 발전기    ⑩ 원자로건물

그림 1 가압경수로형 원전의 발전원리  
(<http://rosetwo.pe.kr/energy/txt/1-3b.htm>)

특징이다. 다시 말해 한 개의 원자로로 전기를 만드는 것은 물론 바닷물을 민물로 바꾸거나 지역난방을 하는 등 다양한 용도로 활용할 수 있는 똑똑한 원자로라는 중의적 의미를 담고 있다. SMART 원자로의 하나의 장점은 모든 장치가 압력용기 안에 들어가 있는 일체형이라는 데 있다. 가압기, 냉각펌프, 증기발생기 등이 원자로 외부에 배관으로 연결된 대형 원자로와는 달리 SMART 원자로는 한 개의 압력용기 안에 주요 부품과 배관을 집어넣은 일체형으로 설계되어 있다. 배관이 없다는 것은 배관이 파열돼 대형사고가 나는 것을 막을 수 있다는 의미이다. 또 방사능 물질의 외부 누출 개연성을 사전에 차단할 수 있다는 얘기도 된다. 또 일체형이기 때문에 스마트 원자로는 공장에서 완제품을 제작하여, 현장으로 가져가 곧바로 설치할 수 있다는 장점도 있다. [주간조선, 2010. 11. 14.]

하지만 대용량 원자로에 비해 발전단가가 높은 단점과 일체형으로 제작되어 펌프에서 발생하는 유동하중 맥동을 감쇄하기 힘들다는 단점이 있다. 높은 발전단가

는 단순화, 모듈화, 표준화 개념을 통해 경제성을 높일 수 있으나, 펌프에 의한 맥동하중은 안전성과 직접적으로 관련이 있기 때문에 일체형 원자로인 SMART에서는 맥동하중 전파에 대한 연구가 필요하다.

원자력 안전은 1979년 미국 TMI원전사고, 1986년 구소련의 체르노빌 원전사고와 2011년 일본 후쿠시마 원전사고로 인해 한 나라뿐만 아니라 주변 국가까지 큰 영향을 초래하는 재앙이라는 것이 판명되었다. 이와 같은 사고에도 불구하고 원자력 발전은 화석연료 고갈 문제를 해결하기 위한 현실적인 대안이며, 원자력 발전이 인류에 기여하는 바가 크기 때문에 앞으로 원자력 발전은 꾸준히 증가할 것이다. 이러한 상황 속에서 가장 중요한 것은 원자력발전소 설계, 건설 및 운전 적용되는 기준 및 표준이 일반 산업설비에 비하여 매우 엄격해야 한다는 것이다. 특히, 원자력 발전소의 안전을 위해서는 정상운전 중이나 사고 시 방출하는 방사선을 차단하거나 노심을 냉각시켜서 노심 용해를 막아야 한다. 또한, 지진 및 내부 펌프 유동에 의해 발생된 주파수가 내부구조물의 고유진동수와 일치하지 않게 설계하여야 한다.

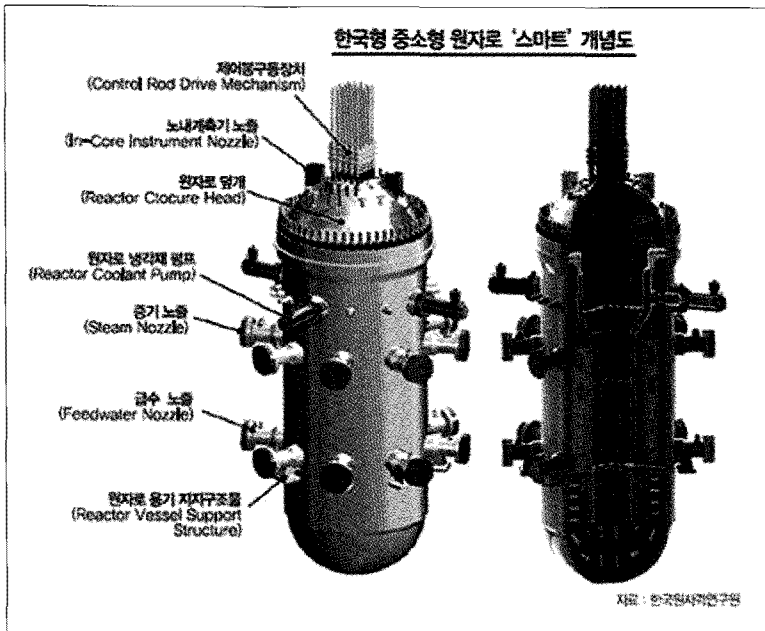
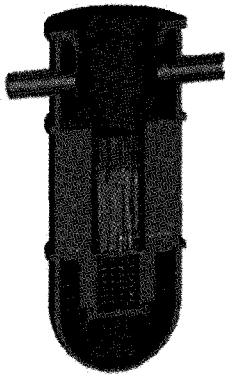


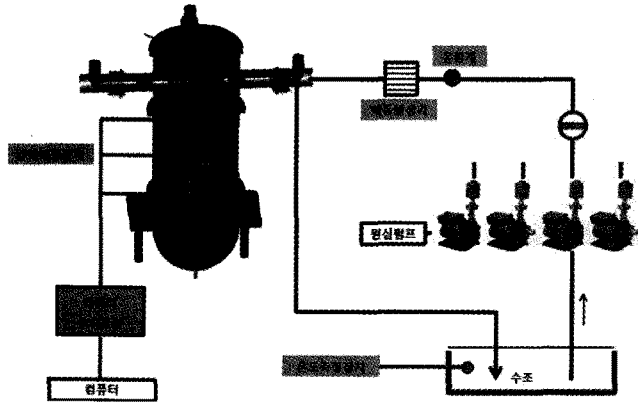
그림 2 한국형 중소형 원자로 SMART(<http://www.kaeri.re.kr/>)

### 축소 실험로 내부구조물 유동하중 시험 및 해석

일체형 원자로인 SMART의 원자로내 부구조물은 사용 수명 기간 동안 정상 상태 및 과도운전 상태의 진동 하중에 견딜 수 있도록 설계되어야 하므로, 설계 시 구조물에 진동특성과 구조물에 작용하는 다양한 하중에 대한 분석과 평가가 필요하다. 특히, 원자로 운전 시 원자로 내부를 순환하는 냉각재는 원자로 구조물에 작용하는 주요한 하중이 될 수 있으므로 이에 대한 평가와 평가



(a) SMART 축소 실험로



(b) 축소 모형의 냉각재 유동시스템

그림 3 축소 모형 실험장치

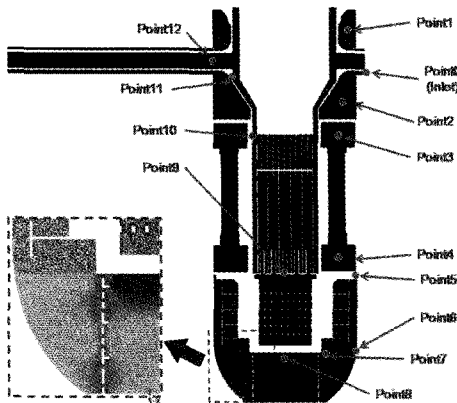
기법의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 냉각재의 유동으로 인하여 원자로 내부구조물에 미치는 하중을 평가하기 위한 전산해석을 수행하고, 전산해석의 유효성을 검증하기 위해 축소모형 시험을 수행하였다.

우선, 실제 크기에 SMART 원자로에서의 열수력적 특성을 실험적으로 유동하중을 측정하는 것은 많은 비용과 시간이 들기 때문에 힘들다. 따라서 그림 3과 같이 축소모형을 통한 실험 및 수치해석을 통해 실제 SMART에서의 수치해석에 사용할 수치해석 코드 및 수치모델을 검증하여야 한다. 따라서 축소 SMART 원자로를 구성하고 이에 삽입되는 내부구조물을 축소하고 또한 복잡한 구조물의 형상을 유동특성에 적합한 형태로 단순화한 모사모형을 제작하였다. 제작된 모사모형을 사용하여 유동시험을 수행하고 축소모형에 대한 전산 유동해석을 수행하여 비교함으로써 축소모형에 대한 유동해석의 타당성을 입증한 후, 원형 SMART 원자로에 대한 전산해석을 통해 SMART원자로의 유동하중을 평가하는 방법을 사용하였다.

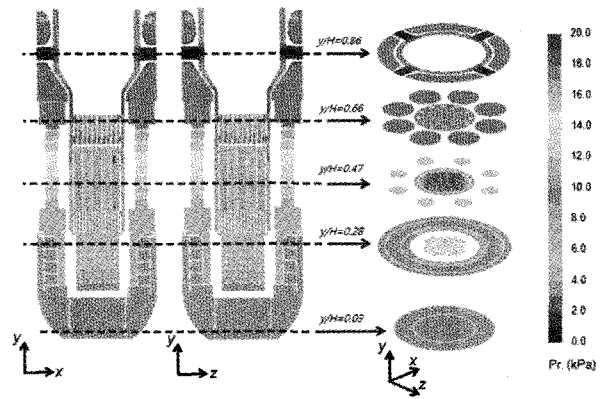
축소모형에 대한 유동하중시험은 축소모형 내부를 순환하는 냉각재의 순환 유량과 가동되는 펌프수, 펌프 배치가 변경될 때 축소모형의 구조물 표면의 압력변화를 시간에 따라 측정하여, 분석함으로써 축소모형에 작용하는 정적하중 및 난류하중을 평가하고, 펌프의 맥동

에 의해 발생하는 주기적인 하중을 평가하였다. 전산해석으로 얻은 축소모형에 대한 해석결과와 시험결과를 비교하여, 축소모형에 대한 해석방법을 확정하고, 이를 이용하여 원형 원자로에 대한 전산해석을 수행하고 유동하중을 평가하였다.

시험장치에 대한 유동시험 결과와 수치해석 결과를 비교하려면 펌프의 입구압력을 시험과 수치해석에서 일치시킨 다음 전체 원자로 내 유동 및 압력분포를 우선적으로 확인해야 한다. 유체 유동이 발생하는 내부 유동영역의 유속, 난류강도, 압력분포를 전산해석으로 구하고 전산해석으로 얻은 압력분포를 시험결과와 비교하고 수치해석의 타당성을 확인하여 실험모델의 수치해석의 방법론을 검증하기 위해 전산해석을 수행하였다. 축소모형의 수치해석 모델은 시험장치와 동일하도록 모델링하여 해석을 진행하였다. 유동해석 모델에서는 해석진행의 효율성을 높이기 위해, 우회유로부를 삭제하였다. 또한, 해석시간의 효율성이 고려되어 시험장치에서 형상이 단순화된 내부구조물을 사용하였다. 그림 4는 유동 및 압력분포 해석을 위해 모델링한 축소된 원자로 형상의 단면을 보여주고 있다. 해석모델에서 증기발생기 배치 및 수량은 시험장치와 동일하게 원주방향으로 8개를 배치하였다. 노심부 역시 다수의 원봉으로 이루어진 사각기둥의 다발구조로 그 형상이 매우 복

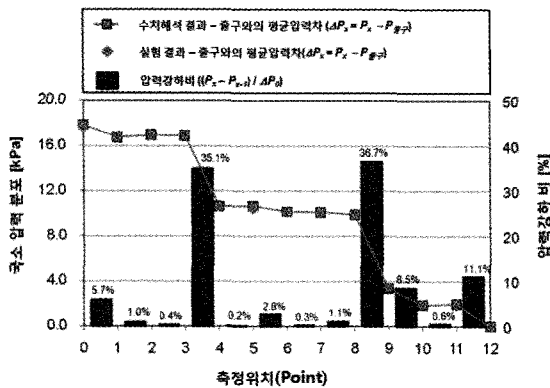


(a) SMART 수직 모델링

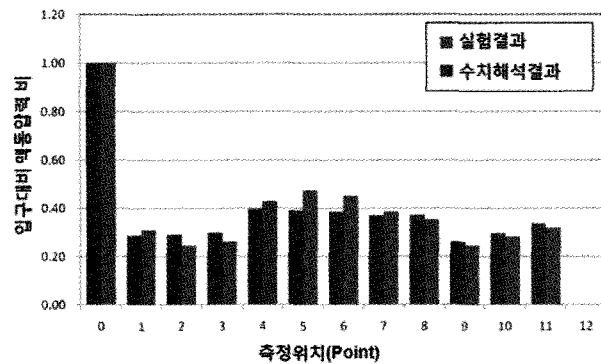


(b) 수치해석 결과(압력분포)

그림 4 축소 모형 수치해석 및 결과



(a) 평균압력 결과 비교



(b) 압력맥동 결과 비교

그림 5 펌프 유동에 의한 축소 모형 수치해석 결과

잡하여, 해석모델에 그대로 사용하여 해석하는 것은 불가능하다. 노심부는 유동하중 해석에 있어 주요 관심영역에 해당하지 않는 영역이다. 따라서 주유동이 유동하중에 미치는 영향을 최소화하는 범위 내에서 다공판으로 단순화하였다.

수행된 수치해석 결과는 그림 5와 같이 평균압력 및 맥동하중 모두 시험결과와 유사한 압력강하 분포를 보여주고 있으며 그 차이는 5% 이내이다. 이와 같은 결과를 이용하여 실제 원자로에서의 펌프의 압력맥동에 대한 다양한 운전조건을 적용할 수 있는 유동하중 분포

해석의 수치모델을 검증하여 그 특징을 연구하였다.

### 실제 SMART 원자로에서의 열수력 해석 및 압력하중 평가

실제 SMART 원자로 내부구조물의 열수력 및 압력하중 특성은 구조물과 유체의 상호작용으로 인하여 구조물 내부에서의 그 특성은 달라진다. 이는 일체형 구조이기에 그림 5(a)와 같이 각 부분에서 압력강하가 나타나게 된다. 따라서 냉각재 유동이 일반 가압경수로와

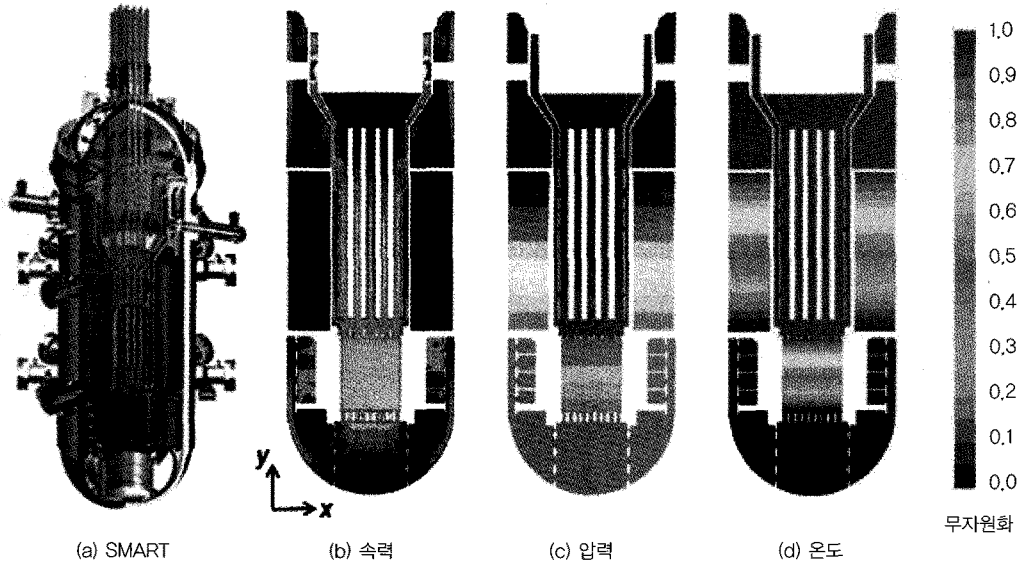


그림 6 실모형 SMART에 대한 수치해석 결과

달리 중요해진 것이다. 따라서 실제 SMART에 수치모델을 적용하기 위해 1/10로 축소된 원자로내부구조물에 대하여 유동하중시험을 수행하였고 이 연구에서 검증된 수치모델을 이용하여 그림 6과 같이 해석을 진행하였다. 이는 실제 원자로에 대하여 유동하중시험을 수행하기에는 시간과 경제적으로 어려움이 있기 때문에 축소원자로 내부구조물의 유동하중 시험을 통하여 전산유체해석 방법론을 검증하여, 검증된 전산유체해석 방법론을 사용하여 원형 원자로내부구조물에 작용하는 유

동하중을 평가한 것이다.

더욱이 이처럼 검증된 코드를 이용하면, 그림 6과 같이 압력분포는 물론 속도분포와 온도분포 등을 예측할 수 있고, 이와 더불어 운전모드에 따른 유량, 압력, 온도, 수도손실 등의 열수력학적 변수 계산은 물론 기기 용량 산정에도 큰 공헌을 할 것으로 예상된다. 그리고 냉각재펌프가 작동을 멈추는 사건 및 증기발생기가 작동을 하지 않는 사건들에 대해서도 내부 유동에 변화 등을 예측할 수 있는 기반을 마련한 것이라 할 수 있다.



기계용어해설

수관보일러(Water Tube Boiler)

다수의 작은 지름으로 된 수관을 보일러의 증발 전열면에 형성하고, 관 속의 물을 관 밖에서 가열하는 방식의 보일러.

점화온도(Ignition Temperature)

가연성 혼합기체가 자기 착화 하는 최저 온도, 또는 공기 중에 들어진 고체가 착화하는 최저 온도.

간접 측정(Indirect Measurement)

측정량과 일정한 관계에 있는 양을 측정한 후 그 값을 계산 또는 환산표로 산출하여 측정값을 알아내는 방식.

위빙(Weaving)

용접을 할 때 아크를 유효적절하게 써서 완전한 용접을 하기 위하여 용접봉의 끝을 용접선 양쪽으로 교대로 움직여 진행되는 용접봉의 운봉법.