

# 원자로냉각재펌프 운전조건에 따른 APR1400 노심지지배럴 구조응답해석

## Structural Response Analysis on APR1400 Core Support Barrel according to Operation Conditions of Reactor Coolant Pump

김규형† · 고도영\* · 김성환\*

Kyuhyung Kim, Doyoung Ko and Sunghwan Kim

### 1. 서 론

신규 건설되는 원자로의 내부구조물은 상업운전 전 구조적 건전성을 평가하여야 한다. 평가 방법은 미국 원자력규제위원회의 규제지침서 1.20에 정의되어 있고, 해석, 측정, 검사 프로그램으로 구성된다. 해석프로그램은 원자로에 흐르는 유체에 의해 유발되는 진동 및 수력하중에 대한 원자로내부구조물(reactor vessel internal, RVI)의 구조응답을 예측하여 이론적으로 RVI의 구조적 건전성 평가한다.

원자로내부구조물은 핵연료지지, 원자로 내 냉각재의 적절한 유동경로 제공, 제어봉 보호 등의 역할을 하며, 주로 노심지지통(core support barrel, CSB), 하부지지구조물(lower support structure, LSS), 상부안내구조물(upper guide structure, UGS) 집합체로 구성된다. 본 논문에서는 유동유발진동에 대한 APR1400 CSB의 구조적 건전성을 이론적으로 확인하고자 한다.

### 2. 유동 및 구조해석

#### 2.1 수력하중 예측

원자로 내에서 발생하는 수력하중은 원자로냉각재펌프(RCP)의 압력맥동에 의한 주기적 수력하중과 난류에 의한 불규칙적 수력하중으로 구성된다. RCP에 의해 발생하는 주기적 수력하중은 본질적으로 유동과 독립적인 음향이고 펌프 축 회전주파수(20Hz)

와 날개통과주파수(120Hz)의 배수의 주파수에서 발생한다. 유체내에서 음향진달을 정의하는 파동방정식을 계산하기 위하여 ANSYS 유체요소인 FLUID30 요소를 사용하여 음향해석으로 압력맥동을 계산하였다. 본 연구에서의 냉각재 온도와 압력은 정상운전 상태의 온도와 압력조건이고, Table 1과 같은 여러 RCP 운전조건으로 해석하였다. 음향해석은 6개 주파수 별 조화해석(harmonic analysis)로 계산하였고 구조응답해석에 입력하기 위해 CSB에 접한 유체의 모든 노드의 압력을 추출하였다. Figure 1 (a)는 RCP 4대가 운전되는 해석조건 5, 120Hz에서 CSB의 압력분포로 inlet에서 들어온 압력파가 CSB 전체로 전달되는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Operation conditions of RCP

No	Loop 1		Loop 2	
	1A	1B	2A	2B
1	off	off	on	off
2	off	off	on	on
3	on	off	on	off
4	on	off	on	on
5	on	on	on	on

불규칙적 수력하중은 난류에 의해 발생되고 전산 유체해석 도구인 CFX를 이용하여 난류해석을 수행하였다. 난류모델은 DES(detached eddy simulation) 모델을 사용하였고, 난류에 의한 압력변동을 계산하기 위한 transient 해석의 time interval은 0.001초로 설정하였다. Figure 1 (b)는 해석조건 5에서 난류에 의해 발생한 CSB 표면에서의 압력분포를 보여주는 것으로 입구노즐로 유입된 유체가 CSB에 충돌하는 지역에서 높은 압력을 보여준다. 시간에 따른 압력변동을 주파수 기반인 power spectral density

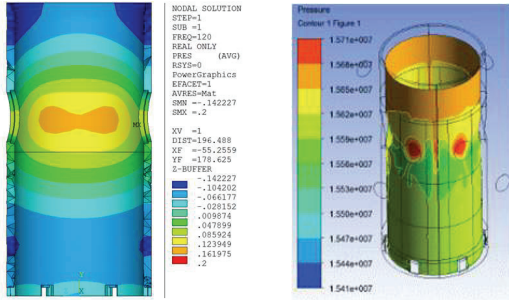
† 교신저자; 정회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원

E-mail: khkim123@khnp.co.kr

Tel : 042-870-5775, Fax : 042-870-5779

\* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

(PSD)로 변환하기 위해 난류가 안정될 수 있도록 충분히 해석시간이 지난 후 512개의 data를 취득하였다. 구조응답해석을 위해 CSB의 표면을 25개의 면으로 분할하고 각 면에서 면-평균 값의 압력 PSD를 계산하였다.



(a) Deterministic(120Hz, psi) (b) Random(Pa)

Figure 1 Pressure contour of CSB on analysis condition 5

## 2.2 구조응답해석

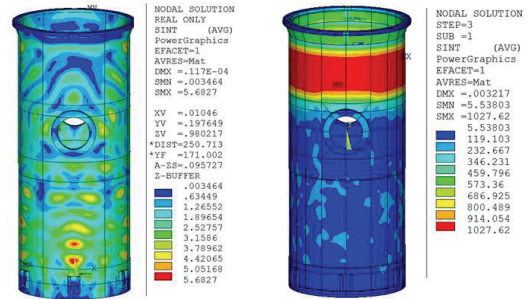
원자로내부구조물의 구조응답은 수력하중에 따라 주기적 및 불규칙적 구조응답을 계산하여 그 결과들을 조합하여 최종 응답을 계산한다.

구조응답을 위한 모델은 ANSYS 3차원 solid 요소(SOLID185)로 16,000개의 노드로 구성하였다. 구속조건으로 CSB 상부플랜지의 원자로 헤드에 의한 구속과 하부 6개 스너버 러그의 원자로 stabilizing 러그에 의한 구속을 설정하였다. 또한 원자로내부구조물은 냉각재 속에 있기 때문에 유체에 의한 영향을 고려하기 위해 동수력질량을 ASME Code의 방법으로 계산하여 3차원 요소의 표면에 SURF154를 이용하여 추가하였다.

주기적 수력하중에 대한 구조응답은 CSB 표면과 상응하는 유체에서 추출된 압력을 구조물의 각 노드에 입력하고, 6개 주파수에 대해 ANSYS 조화해석(harmonic analysis)을 수행하였다. Figure 2 (a)는 해석조건 5, 120Hz에 대한 해석결과로 최고 응력강도가 발생한 지점은 스너버 러그의 용접부로 나타났다.

불규칙적 수력하중에 대한 구조응답은 CSB 표면에 해당하는 난류해석 모델 면에서 동압력 PSD를 추출하여 CSB 표면에 입력하고, ANSYS 스펙트럼해석(spectrum analysis)을 수행하였다. Figure 2 (b)는 해석조건 5에 대한 구조응답해석 결과로 입구노

즐 상부에서 가장 높은 응력강도가 예측되었는데, 이는 CSB가 보 형상으로 변형이 되면서 나타난 것으로 판단된다.



(a) Deterministic(120Hz, psi) (b) Random(psi)

Figure 2 Stress intensity contour of CSB on analysis condition 5

## 2.3 건전성 평가

원자로내부구조물의 건전성 평가기준으로 ASME Code의 설계피로곡선으로부터  $10^{11}$ 사이클에 해당하는 피로한계치(endurance limit) 13.6 ksi와 비교한다. 모든 해석조건 중 최대 응력강도는 루프 2에서 RCP 2대가 운전하는 조건(해석조건 2)에서 4,471 psi으로 가장 크게 예측되었다. 이 값은 피로한계치 대비 2.85의 피로 여유도(fatigue margin)를 가지고 있으므로 APR1400 CSB는 충분히 구조적으로 건전하다고 판단할 수 있다.

## 3. 결론

RVI CVAP을 위해 CSB에 영향을 주는 수력하중을 펌프맥동에 의한 주기적 수력하중과 난류에 의한 불규칙적 수력하중으로 정의하고, 3D 상세모델로 수력하중과 구조응답을 예측하였다. 최대 구조응답은 1개 루프에서 RCP 2대가 비대칭적으로 운전될 때 나타났고, 피로한계치 대비 2.85의 피로 여유도를 가지고 있어 CSB는 구조적으로 충분히 건전함을 이론적으로 확인하였다.

향후 신고리4호기에서 측정을 통해 해석 방법론을 검증하여 APR1400 CSB의 구조적 건전성을 최종 확인할 예정이다.