

원자로내부구조물 종합진동평가프로그램 해석 방법론 고찰

Overview for the Analysis Methodology of Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program

김규형† · 고도영* · 김태순*

Kyu-Hyung Kim Do-Young Ko and Tae-Soon Kim

1. 서 론

신규로 건설되는 원전은 미국 원자력규제위원회 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) 1.20⁽¹⁾에 따라 상업운전 전 원전 수명 동안 냉각재에 의해 발생하는 진동에 대해 원자로내부구조물(reactor vessel internal, RVI)의 구조적 건전성을 평가하기 위해 종합진동평가프로그램 (comprehensive vibration assessment program, CVAP)을 수행한다. CVAP은 구조적 건전성을 이론적으로 평가하는 해석, RVI에 계측기를 설치하여 연료 장전 전 고온기능시험(hot functional test, HFT) 동안 실측하여 건전성을 평가하는 측정, 진동 경험 전후 응력집중부위 및 취약부의 손상을 검사하는 검사프로그램으로 구성된다.

본 논문에서는 영광3,4부터 신고리1,2까지 수행되어 온 OPR1000 RVI CVAP⁽²⁻⁵⁾ 및 사업자 자체검증 목적으로 수행하고 있는 APR1400 RVI CVAP의 해석방법론⁽⁶⁾에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. OPR1000 CVAP 해석방법론

2.1 해석 일반론

유체유발 수력하중에 의한 RVI 동적응답을 계산하기 위해서는 수력하중 계산, 고유진동수 및 모드형상의 구조물 동특성 계산, 그리고 변위 및 응력의 구조물 응답계산으로 구성된다. 수력하중은 시간에 대한 변화 여부에 따라 주기적 수력하중과 불규칙적

수력하중으로 구분한다. 주기적 수력하중은 원자로 냉각재펌프에 의해 주기적으로 발생하는 수력하중이고 불규칙적 수력하중은 냉각재의 난류 유동에 의해 발생하는 하중으로 물리적으로 서로 다른 원인으로 발생한다고 가정하여 각각 수력하중을 계산한다. 구조물은 냉각재에 잠겨 있기 때문에 유체와 연성(coupled)되어 있다. 이러한 관계를 구조물에 부가하기 위해서 동수력적 질량(hydrodynamic mass)을 구조물의 질량에 추가하여 계산한다. 구조물의 응답은 각 수력하중에 대하여 별도로 계산하여 최종적으로 두 응답을 합하여 구한다.

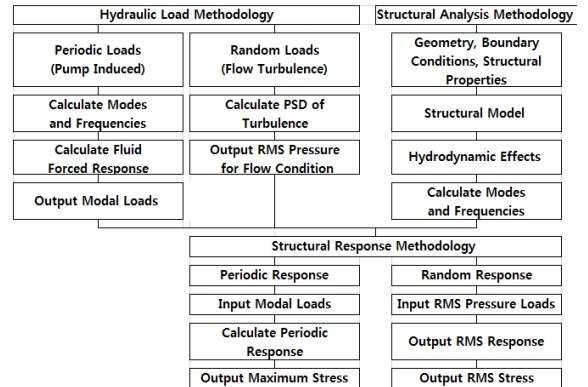


Fig. 1 Summary of Analysis Method and Procedure in OPR1000 CVAP

2.2 수력하중 계산 방법

RVI에 작용하는 주기적 수력하중은 RCP (reactor coolant pump)에 의해 발생하는 유체압력의 펌프맥 동으로 인해 발생한다. RCP 축 회전주파수 20 Hz와 날개통과주파수(blade passing frequency) 120 Hz의 배수인 6개 주파수(20 Hz, 40 Hz, 120 Hz, 240 Hz, 360 Hz, 480 Hz)에서 발생되며, 냉각재의 유속과는 독립적으로 압력과의 형태로 전달되는 음

† 교신저자; 정회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원

E-mail: khkim123@khnp.co.kr

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

* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

향이기 때문에 음향해석 (acoustic analysis)으로 계산한다. 이들 압력의 크기와 공간 분포는 펌프의 토출압력의 진폭의 변화, 펌프들의 위상차, RCP 가동 수 및 배치, 유로의 형상과 온도의 함수인 액체 내에서 음속 등에 의해 달라진다. 수학적 해석과 원형 원전 CVAP 결과를 사용하여 하중의 크기, 주파수 및 분포 등을 계산한다.

난류에 의해 발생하는 불규칙적 하중은 불규칙적인 현상이기 때문에 통계적인 방법인 파워스펙트럼 밀도 (power spectral density, PSD)의 형태로 주파수에 대한 PSD 값의 크기를 정한다. PSD는 단위 주파수당 압력의 제곱 대 주파수로 표시되며, 원형 원전 CVAP 시험결과를 기초하여 상관관계식으로 계산된다.

2.3 고유진동수 해석 방법

물속에서 구조물의 고유진동수와 모드형상은 각 구조물을 최대한 단순화한 유한요소해석모델이나 다자유도 집중질량 해석모델을 사용하여 계산한다. 동수력적 질량을 구조물의 질량에 더하여 계산하기 위해 이전 원전 시험결과 및 문헌을 이용한다. 구조물의 강성도는 재료의 성질, 기하학적 형상 및 경계조건에 따라 달라진다. 고유진동수 해석을 위해 구조물에 따라 ASHSD, HYDRO, STARDYNE, ANSYS 코드를 사용한다.

2.4 구조응답 계산 방법

원자로내부구조물의 동적응답은 주기적 하중과 불규칙적 하중에 대하여 응답을 각각 계산한다. 각각의 응답은 하중의 크기, 주파수와 공간 분포 그리고 구조물의 고유진동과 모드형상에 따라 달라진다. 응답과 이들 인자들의 관계는 가진력이 주기적이나 혹은 불규칙적이냐에 따라 달라진다. 주기적 구조응답은 시간에 따라 동일한 조화적(harmonic) 변화를 가진다. 여러 모드에서 주요 응답이 있는 구조물의 경우는 모드 중첩 방법을 사용하여 전체 응답을 구한다. 사용 코드는 구조물에 따라 STEADYSTATE, SSPOT, STARDYNE, ANSYS 등이다.

불규칙 진동해석을 위하여 통계적인 방법을 사용한다. PSD로 표시된 하중, 주파수 응답 특성 혹은 전달함수의 곱을 주파수 영역에서 적분하여 응답의 RMS (root mean square)를 산출한다. 불규칙적 구

조응답 해석에는 구조물에 따라 STARDYNE, ANSYS 코드 등을 사용한다. 총 응답은 주기적 하중 및 불규칙적 하중으로 인한 각각의 응답의 합으로 계산한다.

3. APR1400 CVAP 해석방법론

3.1 해석 일반론

APR1400 RVI CVAP의 해석프로그램을 수행하기 위해 수립된 방법론은 Figure 1의 OPR1000 CVAP 방법론과 동일하게 하중을 물리적 성질에 따라 주기적 성분과 불규칙적 성분으로 구분할 수 있어 주기적 하중 및 불규칙적 하중을 계산 후 각각 구조응답을 예측한다. 각 해석분야별 및 구조물별로 사용하였던 CVAP 시험결과, 상관관계식, 각종 코드를 대신하여 모든 해석에 상용해석코드인 ANSYS Mechanical 및 CFX를 사용하여 3차원 상세해석이 가능하도록 APR1400 RVI CVAP 해석방법을 수립하였다.

3.2 수력하중 계산 방법

주기적 하중을 계산하기 위해 ANSYS Mechanical의 3차원 유체요소인 FLUID30을 사용하여 유한요소모델을 생성하고, RCP에 의해 발생하는 조화하중을 입구노즐에 입력하여 조화해석(harmonic analysis)으로 예측한다. 구조응답해석에 입력하기 위해 각 유한요소별 압력하중을 6개의 주파수별 구조물에 접한 유체의 압력을 추출한다.

불규칙적 수력하중은 난류에 의해 발생되므로 CFX를 사용하여 3차원 난류해석으로 산출한다. 난류해석에 사용하는 난류모델로 DES (detached eddy simulation) 모델을 사용한다. 구조응답해석에 입력하기 위해 구조물에 접한 유체의 시간에 따른 압력변동을 FFT(fast Fourier transform)를 사용하여 PSD로 변환한다.

3.3 고유진동수 및 구조응답해석 방법

구조물의 고유특성을 보기 위한 고유진동 해석은 원자로내부구조물을 ANSYS Mechanical의 3차원 구조요소인 SOLID185로 3차원 모델로 수행한다. 원자로내부구조물은 원자로냉각재에 잠겨 있기 때문에 발생하는 동수력적 질량은 ASME B & PV

Section III에 따라 계산하여 구조물에 추가한다. 고유진동수 및 고유모드 계산은 상용프로그램에서 많이 쓰이는 Block Lanczos법을 사용한다.

구조응답은 고유진동해석과 같은 3차원 상세 구조모델을 사용하여 주기적 수력하중에 대해 조화해석, 불규칙적 수력하중에 대해 스펙트럼해석(spectrum analysis)을 수행한다. 주기적 구조응답의 합은 SRSS (square root of the sum of the squares)법으로 계산하고, 구조응답 총합은 구조응답의 합 및 불규칙적 구조응답 RMS의 단순 합으로 정의한다.

3. 결 론

원자로내부구조물 종합진동평가프로그램의 해석은 구조물에 가해주는 수력하중의 물리적 성질에 따라 주기적 수력하중과 불규칙적 수력하중으로 분리하여 계산하고, 각각의 하중에 대한 구조물의 반응을 구한다. 이러한 해석 구조는 OPR1000 CVAP 및 APR1400 CVAP에서 동일하다. OPR1000 CVAP 해석에서는 단순화된 수학적 해석, 이전 건설원전의 CVAP 시험결과를 이용한 계산 및 단순 모델을 사용하는 여러 종류의 해석코드를 이용한다. 그러나 APR1400 CVAP에서는 상용해석 코드인 ANSYS Mechanical 및 CFX를 사용하여 3차원 상세해석 방법으로 모든 유동 및 구조해석을 수행하는 차이가 있다.

참 고 문 헌

- (1) U.S. NRC, Regulatory Guide 1.20, 2007, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals during Preoperational and Initial Startup Testing.
- (2) Combustion Engineering, Inc., 1984, A Comprehensive Vibration Assessment Program for the Prototype System 80 Reactor Internals (Palo Verde Nuclear Generating Station Unit 1), CEN-202(V)-P.
- (3) KEPCO, 1995, A Comprehensive Vibration Assessment Program for Yonggwang Nuclear Generating Station Unit 4, 10487-ME-TE-240-03.
- (4) KOPEC, 2004, A Final Report for Vibration

Analysis of Reactor Vessel Internals for Ulchin Nuclear Power Plant Unit 6, KOPEC/NED/TR/04-021, Rev. 0.

- (5) KEPCO E&C, 2010, A Final Report for Vibration Analysis of Reactor Vessel Internals for Shin-Kori Nuclear Power Plant Unit 1, KOPEC/NED/TR/10-005, Rev. 0.

- (6) Kim, K. H., Ko, D. Y. and Kim, S. H., 2013, Validation of Vibration and Stress Analysis Method for APR1400 Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 308~314.