

국내의 신형원전 CVAP 수행현황 (Status of the CVAP on Advanced Power Reactors)

임 남 희*·고 도 영*·김 규 형*

Nam-Hee Lim, Do-Young Ko and Kyu-Hyung Kim

1. 서 론

US NRC RG(nuclear regulatory commission regulatory guide) 1.20에 명시된 CVAP(comprehensive vibration assessment program)은 발전소 설계수명동안 정상 및 과도 운전조건에서 유동유발 진동(flow-induced vibration, FIV)을 견딜 수 있도록 설계되었는지 입증하기 위한 것으로, 원자로내부 구조물의 배열, 설계, 크기 및 운전조건이 효실훈형 발전소와 본질적 동일성 정도에 따라 해당 원전의 CVAP 수행내용을 결정한다⁽¹⁾.

본 논문은 차세대 원전의 효율적인 CVAP 기술개발 활용을 위해 US NRC 설계인증(design certification, DC)을 신청한 해외 신형원전과 APR1400의 국내최초 건설원전으로 2014년도 준공 예정인 신고리 3,4호기 CVAP 수행현황에 대해 조사하였다.

2. CVAP 설계인증 및 수행 현황

2.1 AP1000

Westinghouse의 약 1,000[MWe] 출력 원전으로 AP600의 개량형이며, 설계원형(prototype)으로 분류하였다. 2006년 NRC로부터 DC를 받았으나 이후 건설비용 절감, 원전보안강화 등의 이유로 노형의 설계 일부를 변경하여 2011년 12월 NRC가 개정된 DC를 발급하였다. AP1000은 원자로 가진함수를 RCP 펌프맥동에 의한 주기적 수력하중과 난류 유동에 의한 불규칙적인 수력하중으로 구분하였고, 유사 원전의 축소모델시험(scale model test, SMT)을 통해 얻어진 수력하중을 이용하여 구조응답 해석을 수

행하였다⁽²⁾. 측정단계에서 해석결과를 기반으로 측정위치를 선정하였고, 일부는 불측정 계측기에 대비해 수량과 위치를 이중화하였다. 31개의 가속도계, 53개의 변형률계, 5개의 압력계, 8개의 변위계로 원자로내부구조물에 90개, 외부 Reactor vessel closure head 영역에 7개를 설치하여 총 97개의 계측기로 측정시스템을 설계하였다. AP1000 노형의 첫 건설원전인 Sanmen 1호기(중국)는 설계 변경으로 인한 기기공급 지연에 따라 CVAP 측정프로그램이 2013년 상반기에 수행될 것으로 예상된다.

2.2 US-APWR

APWR은 미쓰비시 중공업의 1700[MWe] 원전으로 오랜 운영경험을 통해 입증된 4-Loop plant를 기반으로 설계되었지만 원자로 내부의 크기, 배열 및 운전조건 차이로 설계원형으로 분류되었다. 2007년 12월에 NRC DC 신청서를 제출하였으나, NRC에서 내진관련 재분석 요구로 2015년으로 설계인증이 연기된 상태이다.

US-APWR 역시 원자로 내부구조물의 가진 수력하중으로 RCP에 의해 발생하는 펌프맥동의 주기적 수력하중과 난류에 의해 불규칙적인 수력하중으로 구분하였다. J-APWR을 참조한 1/5의 SMT를 통해 측정된 데이터를 이용하여 수력하중 해석을 수행하였고, 구조물에 대한 응답을 구하기 위해 유한요소법(finite element method, FEM)이 사용되었다⁽³⁾. 해석결과를 반영, 원자로 내부구조물의 진동감시 영역을 선정하였으며 측정시스템은 변형률계 31개, 가속도계 11개, 변위계 2개 그리고 압력계 4개로 총 48개의 계측기로 설계되었다.

2.3 US-EPR

US-EPR은 AREVA의 1600[MWe] 출력 원전으로 프랑스 N4와 독일 Konvoi의 설계에서 파생되었다. 참조원형과 비교시, 원자로 내부구조물이 기존과

† 교신저자; 정회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail : limnh1643@khnpp.co.kr
Tel : (042)870-5272, Fax : (042)870-5768

다른 특성을 나타내고 원자로 내부의 크기, 배열 및 운전조건의 차이로 설계원형으로 분류되었다. 2013년 6월 DC를 목표로 2007년 12월 설계인증신청서를 제출하였으나 2010년 7월 EPR 설계 복잡성, 독립성에 대한 문제가 제기되어 2013년 8월까지 개정된 보고서를 제출하기로 하여 설계인증은 지연되고 있으나, 핀란드, 프랑스, 중국에서는 건설사업이 추진되고 있다.

US-EPR은 참조원형의 1/8의 SMT를 통해 얻어진 데이터를 이용하여 Full scale의 이론적 해석을 수행하였다⁽⁴⁾. 계측기의 종류 및 수량과 설치위치는 해석결과를 반영하여 수립되었다.

진동측정시 이용될 계측기는 압력계, 변위계, 변형률계, 가속도계로 상부 내부구조물에 18~19개, 하부 내부구조물에 36~37개로 총 54~56개의 계측기를 설치할 예정이다.

2.4 APR1400

한국수력원자력(주)의 1400[MWe] 원전으로 Palo Verde 1호기(미국)가 원형원전이다. 2002년 국내 설계인증, 2003년 건설허가를 받았고, 2013년과 2014년 각각 신고리3,4호기의 상업운전을 계획하고 있다.

APR1400의 최초 건설사업인 신고리3,4호기 CVAP은 비원형범주 I (Non-prototype category I)로 건설허가를 받아 해석 및 전체검사로 수행되고 있다. 추가로 한수원은 사업자 자체 기술개발 및 설계검증을 위해 제한적 측정이 포함된 비원형범주 II로 원자로 내부구조물 CVAP 기술개발을 진행 중이다⁽⁵⁾. 한수원은 비원형범주 II CVAP 기술개발을 위해 해석프로그램에서 주기적 수력하중(원자로냉각재 펌프 맥동)은 ANSYS의 음향해석, 불규칙 수력하중(RVI 구조물의 유체 난류)은 ANSYS CFX의 난류 해석을 수행하였다.

측정단계에서는 내부배럴집합체(inner barrel assembly) 상부판에 2개의 가속도계, 4개의 변형률계와 제어봉집합체(core element assembly) 슈라우드에 8개의 변형률계와 1개의 압력계, 상부안내구조물(upper guide structure) 하부판에 2개의 가속도계 2개의 압력계 4개의 변형률계로 총 23개의 계측기를 이용하여 2013년 9월 진동 측정을 계획 중이다(6~7).

3. 결 론

국내의 CVAP 수행현황 조사를 통해, 원전 선진국과 국내 CVAP 기술(신고리 4호기)을 비교할 때 유사한 해석방법과 대등한 진동측정 기술로 수행되고 있음을 확인하였다.

현재까지 개발된 3차원 진동해석과 함께 향후 수행될 측정 및 검사를 모두 완료하면 국내 원자로 내부구조물 CVAP 기술자립이 가능하며, 후속호기와 연구개발 중인 차세대 원전에서 원자로 내부구조물 설계에 대한 사업자 검증기반이 확보될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals during Preoperational and Initial Startup Testing, Regulatory Guide 1.20, Rev. 3.
- (2) Westinghouse, 2007, AP1000 Reactor Internals Flow-Induced Vibration Assessment Program, Rev. 2.
- (3) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, 2009, Comprehensive Vibration Assessment Program for U.S APWR Reactor Internals, Rev. 2.
- (4) AREVA NP Inc, 2009, Comprehensive Vibration Assessment Program for U.S EPRTM Reactor Internals Technical Report, Rev. 0.
- (5) Ko, D. Y. and Lee, J. G., 2011, A Review of Measuring Sensors for RVI CVAP in APR1400, Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 47~55.
- (6) Ko, D. Y., Kim, K. H. and Kim, S. H., Selection Criteria of Measurement Locations for APR1400 RVI CVAP, Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 8, pp. 708~713.
- (7) Ko, D. Y., Kim, K. H. and Kim, S. H., Response Instrumentation Test Acceptance Criteria for APR1400 RVI CVAP, Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 1036~1042.