

# APR1400 원자로 내부구조물 종합진동평가 측정데이터 활용 방안

## Utilization Plan of Measured Data of Comprehensive Vibration Assessment Program for APR1400 Reactor Internals

고도영† · 김규형\* · 김동학\*

Do Young Ko, Kyu Hyung Kim and Dong Hak Kim

### 1. 서 론

상업운전을 위해 신규 건설되는 원전은 수명기간 동안 냉각재로 인한 유동유발진동(flow induced vibration)에 대한 건전성을 확인하기 위해 원자로 내부구조물 종합진동평가(RVI CVAP : reactor vessel internals comprehensive vibration assessment program)를 수행한다<sup>(1)</sup>. 건설되는 원전은 유효원형(valid prototype)과의 본질적 동일성 정도에 따라 RVI CVAP의 수행내용이 달라진다. 신형경수로 APR1400(Advanced Power Reactor 1400 [MWe]) 원전은 설계인증시 국내 규제기관으로부터 비원형범주(non-prototype category) I로 분류되어 해석 및 검사를 수행한다. 한국수력원자력은 인허가와 별도로 사업자 자체 독립검증 및 기술개발 등의 목적으로 해석, 제한적 측정 및 검사로 구성되는 비원형범주 II로 RVI CVAP 기술개발 중이다. 측정은 원전 건설 후 시운전 기간 중 고온기능시험(HFT : hot functional test)시 수행되는데, 본 논문은 이 때 측정된 시험데이터에 대한 활용 방안에 대해 고찰해 보고자 한다.

### 2. 측정데이터 활용 방안

#### 2.1 CVAP 해석결과와 비교

##### (1) 개별 측정데이터 비교

APR1400 RVI CVAP 측정을 위해 설치되는 계측기는 가속도계(accelerometer), 변형률계(strain gage) 그리고 압력계(pressure transducer)이다<sup>(2)</sup>.

가속도계와 변형률계는 기본적인 가속도(변위)와 변형률에 대한 측정결과를 구조해석 결과<sup>(3)</sup>와 비교하는 데 활용할 수 있다. 즉, 해석으로 계산된 18개 원자로 운전조건과 운전조건별 6개 주요 관심주파수에 대한 변위와 변형률을 측정데이터의 분석결과와 비교할 수 있다.

가속도계에 의해 측정되는 가속도는 푸리에 변환(fourier transform)을 통해 PSD(power spectral density)로 나타내면 원자로 내부구조물의 진동특성을 대표하는 고유주파수(natural frequencies)를 확인할 수 있다. 이 고유주파수들은 CVAP 해석에서 계산된 고유주파수와 비교/분석되고, CVAP 구조해석에서 사용된 동적 해석방법론(dynamic analysis methodology)과 해석조건 및 경계조건 등 사용된 매개변수(parameters)들의 타당성과 유효성을 검증하는 방법으로 활용될 수 있다.

변형률계에 의해 측정되는 변형률은 부착지점에 발생된 응력(stress) 형태로 환산할 수 있으므로 다양한 원자로 운전조건에서의 관심주파수별 응력분포를 해석결과와 비교하는 것이 가능하다. 또한 측정된 원자로 내부구조물별 최대 응력값(peak stress)과 해석된 최대 응력값을 비교하여 최종적으로 허용기준(acceptance criteria)의 만족여부를 확인한다.

압력계에 의해 측정되는 압력은 압력계가 부착된 위치의 압력상태이며, 냉각재 펌프 맥동에 의한 주기적 하중과 냉각재 난류유동에 의한 불규칙적 하중에 의해 원자로 내부구조물을 가진(excitation)시키는 수력하중(hydraulic loads)이다. 측정된 압력은 CVAP 유동해석에서 계산된 수력하중<sup>(3)</sup>의 적합성을 확인하기 위해 사용된다. 또한 측정된 압력은 유사한 신형 원자로 개발시 유동유발하중 적용이 곤란한 경우, 원자로의 CVAP 측정 유동유발하중으로 사용할 수 있는데 이럴 경우 적절한 weighting과 margin을 반영하여 사용하고 있다<sup>(4)</sup>.

† 교신저자; 정회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원

E-mail : kodoyoung@khnp.co.kr

Tel : (042)870-5732, Fax : (042)870-5768

\* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

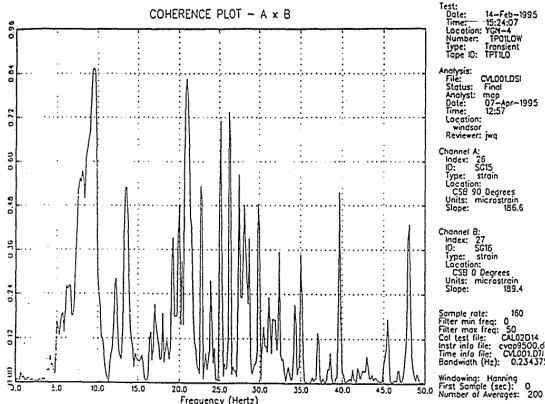


Fig. 1 Coherence plot of 2 strain data measured in OPR1000 RVI CVAP

## (2) 2개 측정데이터 비교

가속도와 변형률은 측정 위치별로 얻은 데이터를 각각 2개씩 XPSD(cross power spectral density)와 Coherence로 분석한 후 해석결과와 비교하는데 활용한다.

XPSD와 Coherence로부터 산출된 결과는 해석프로그램에서 예측된 원자로 내부구조물의 모드형태(mode shape) 및 고유진동수와 비교하는데 이용되며, 해석모델에 사용된 파라미터 검증에도 활용된다. Fig. 1은 OPR1000 RVI CVAP 노심지지배럴에서 취득된 2개 변형률 측정데이터의 Coherence의 한 예를 나타내고 있다.

## 2.2 CVAP 검사프로그램과 비교

CVAP 검사는 원자로 Pre-core HFT 전후를 비교하기 위하여 Baseline Inspection 및 Post-HFT Inspection으로 2번 수행된다. 검사는 사진촬영(macro photographs)를 포함한 육안검사(visual inspection)이다. 원자로 내부구조물의 검사수는 대략 350개 정도이며 검사결과는 해석결과와 측정결과의 정량적이고 정성적인 확인을 위해 활용된다.

## 2.3 상업운전 감시데이터와 비교

상업운전시에는 원자로 외곽에 90° 간격으로 설치된 노외 핵계측기(ex-core neutron detector)가 원자로 외부로 누설되는 방사선을 측정하여 노심 핵반응 상태를 3차원적으로 계산할 수 있는 IVMS(internals vibration monitoring system)가 작

동된다. 노외 핵계측기에 측정되는 신호에는 원자로 내부구조물의 진동에 의해 원자로 용기와 핵연료 사이에 위치하는 감속재 두께 변화에 의해 발생된 잡음 성분을 포함하며 이를 분석하여 원자로 내부구조물의 진동 거동을 파악할 수 있다. 그러므로 CVAP 측정데이터와 노외 핵계측기의 잡음 신호의 차이를 분석하면 원자로 내부구조물의 장기간 운전에서 열화(degradation) 손상 및 이상상태(abnormal condition)를 가동중검사(in-service inspection) 이전에 확인할 수 있다<sup>(4)</sup>.

## 3. 결론

RVI CVAP 구성요소 중 측정프로그램은 물적, 인적 및 시간적 자원을 가장 많이 필요로 한다. 그러나 원자로 내부구조물의 건전성을 이론적으로 확인한 해석결과를 실제 검증하기 위해서는 측정데이터와의 비교/평가가 요구된다. 또한 측정데이터는 검사 프로그램과 비교뿐 아니라 상업운전시 원자로계통 구조 건전성 감시시스템의 일종인 IVMS의 감시데이터와 비교/분석을 통한 원전 안전성 향상에도 활용할 수 있다고 판단된다.

## 참고 문헌

- (1) US Nuclear Regulatory Commission, 2007, Regulatory Guide 1.20, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals During Preoperational and Initial Testing, Rev.3
- (2) Ko, D.Y. and Kim, K.H., 2013, Design of Vibration and Stress Measurement System for an Advanced Power Reactor 1400 Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program, Nuclear Engineering and Technology Vol. 45, No.2, pp. 249-256.
- (3) Ko, D.Y. and Kim, K.H., 2013, Structural analysis of CSB and LSS for APR1400 RVI CVAP, Nuclear Engineering and Design Vol. 261, pp. 76-84.
- (4) Korea Electric Power Corp., 2000, Report on the Observation and Synthesis about CVAP in KNGR RVI.