

원자로 내부배럴집합체 상부면 측정위치 선정

Selection of Measurement Locations at Inner Barrel Assembly Top Plate in the Reactor

고도영† · 김규형* · 김성환*

Do-Young, Ko, Kyu-Hyung Kim and Sung-Hwan Kim

Key Words : RVI(원자로내부구조물), CVAP(종합진동평가), APR1400(신형경수로1400), IBA(내부배럴집합체), Measurement(측정)

ABSTRACT

A comprehensive vibration assessment program for the Advanced Power Reactor 1400 reactor vessel internals is established in accordance with the United States Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.20 Revision 3. This paper is related to instruments and measurement locations based on the vibration and stress response analysis results at the inner barrel assembly top plate in the reactor. The analysis results of the inner barrel assembly top plate in the reactor show that the deterministic stress and deformation due to the reactor coolant pump induced pressure pulsations are larger than the random stress and deformation induced by the flow turbulence. The selection of the instruments and measurement locations at Inner barrel assembly top plate in the reactor is essential requirements and very important study process for the vibration and stress measurement program in comprehensive vibration assessment program for the Advanced Power Reactor 1400 reactor vessel internals.

1. 서 론

원전의 설계 수명기간 동안 원자로냉각재의 유동에 의한 응력과 진동에 대해 원자로내부구조물의 건전성을 확인하기 위해 수행하는 것이 원자로내부구조물 종합진동평가(RVI CVAP : reactor vessel internals comprehensive vibration assessment program)이다. RVI CVAP는 미국원자력규제위원회 규제지침(US NRC RG : US nuclear regulatory commission regulatory guide) 1.20⁽¹⁾에 근거하여 해당 원전의 CVAP이 분류되고 계획이 수립된다.

가압경수로형(PWR) 원자로내부구조물은 크게 노심지지배럴(CSB : core support barrel), 상부안내구조물(UGS : upper guide structure), 하부지지구조물(LSS : lower support structure) 및 노심슈라우드(CS : core shroud)로 구성된다⁽²⁾. APR1400 원전의 내부배럴집합체(IBA : inner barrel assembly)는 원자로 상부안내구조물 집합체의 일부로써, OPR1000 원전의 상부안내구조물 집합체와 비교할 때 내진이나 원자로냉각재에 의한 유동유발진동(flow induced vibration)에 대해 더 안전하도록 설계 개선된 구조물이다^(3~8).

APR1400 원전의 RVI CVAP 측정프로그램을 수행하기 위해, 이전 연구에서 계측기는 압력계, 가속도계, 응력계로 선정하였고⁽⁹⁾, 측정위치 선정 기준과 측정시험 허용기준도 수립된 바 있다^(9~11). 본 논문은 원자로내부구조물의 내부배럴집합체 상부면(IBA top plate)에 대한 응력 및 진동응답 결과에 근거한 계측기와 설치위치에 관련된 것이다.

† 교신저자; 고도영, 한수원중앙연구원
E-mail : kodoyoung@khnp.co.kr
Tel : 042-870-5774, Fax : 042-870-5779
* 한수원중앙연구원

2. 응답 해석 결과

2.1 Modal Analysis

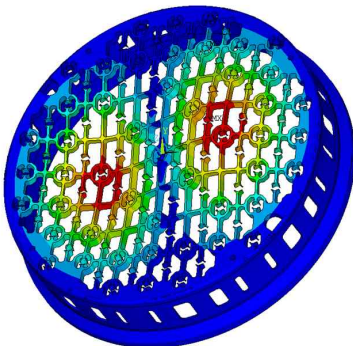
본 연구에서는 3차원 유한요소(finite element)를 이용하기 위해 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS로 전산해석을 수행하여 구조응답을 계산하였다.

모달해석(modal analysis)은 구조물 고유의 동특성을 조사하기 위한 것으로 구조응답 해석의 기초자료가 된다. IBA top plate의 고유주파수(natural frequency)와 모드형상(mode shape)을 예측하기 위해 Block Lanczos method를 적용하였다^(12,13).

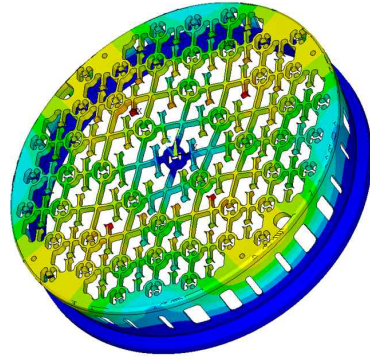
Table 1은 IBA top plate의 모달해석을 결과로 산출된 고유주파수와 모드형상을 나타낸다. Table.1에서 보는 바와 같이, 1차 모드가 28.47 Hz에서 발생하고 있으며 2차와 3차 모드의 고유주파수는 55.68 Hz와 56.35 Hz로 각각 나타났다. 6차 모드까지는 Plate 모드를 보였으며, 7차 모드에서는 IBA top plate와 내부배럴 상부 실린더(inner barrel upper cylinder)가 동시에 반응하는 Complex 모드를 보였다. Fig. 1 (a)와 (b)는 IBA top plate의 3차 및 7차 모드형상을 각각 묘사한 것이다.

Table 1 Natural frequency and mode shape of IBA top plate

	Natural frequency	Mode shape
1st	28.47 Hz	Plate
2nd	55.68 Hz	Plate
3rd	56.35 Hz	Plate
4th	88.24 Hz	Plate
5th	93.01 Hz	Plate
6th	95.94 Hz	Plate
7th	123.59 Hz	complex



(a) 3rd mode shape of IBA top plate



(b) 7th mode shape of IBA top plate

Fig. 1 Mode shape of IBA top plate

모달해석 결과를 통해 IBA top plate에 가해지는 하중의 위험주파수(critical frequency)와 하중에 대한 구조물의 거동에 대해 예측할 수 있을 뿐 아니라, 측정위치 및 계측기 선정에 있어서 중요한 근거자료 중 하나가 된다.

예를 들면, 고유주파수는 계측기의 주파수 특성에 반영되고, 모드형상은 계측기 종류에 영향을 준다. 반대로, 향후 측정된 데이터로 예측된 고유주파수와 모드형상을 확인하기 위한 측정 후 데이터 해석기법 즉, PSD(power spectral density), Cross-PSD, Coherence 등을 결정하는 근거가 되기도 한다.

2.2 Structural Response Analysis

원자로의 유동유발진동에 의한 구조물의 응답을 계산하기 위해서는 먼저 외력의 특성에 대해 조사하였다. RVI CVAP에서 원자로내부구조물에 가해지는 하중은 발생 원인에 따라 두 가지로 나눌 수 있다^(10~15). 하나는 원자로 냉각재 펌프(RCP : reactor coolant pump)의 맥동에 의한 주기적 수력 하중(deterministic loads)이고, 다른 하나는 유체의 난류에 의한 랜덤 수력 하중(random loads)이다. 전체 응답은 SRSS(square root of sum of square)법을 이용하여 산출하였다^(12~15). 이 하중은 RCP 운전조건(operating conditions), 온도 및 압력에 따라 달라지는데, 본 연구에서는 Table 2의 해석조건에 의해 계산되었다.

(1) Deterministic Response Analysis 결과

RCP의 압력 맥동에 의한 맥동 발생 주파수는 펌프 블레이드(blade)와 주파수에 의해 결정된다. 주기

적 맥동 하중에 대한 구조응답은 ANSYS의 하모닉 해석(harmonic analysis)을 적용하여 응답 계산을 수행하였다.

원자로내부구조물에 가해지는 맥동 압력은 총 6개의 주파수(20Hz, 40Hz, 120Hz, 240Hz, 360Hz, 480Hz)로 분리되며, 이 주파수들은 20Hz와 120Hz의 배수로 되어있다^(12~15).

주기적 응답해석 결과를 계산하기 위해 IBA top plate에 가해지는 압력을 모든 주파수에서 추출한 후, 그 하중을 구조물의 표면노드에 적용하였다. 또한 구속조건(constraint condition)과 부가질량(added mass) 등의 해석조건은 모달해석과 동일하게 유지하여 6개 주파수에서의 각 하중에 대한 IBA top plate의 응답을 각각 계산하였다.

주기적 구조해석 결과, 응력은 20 Hz에서 666.5 psi로 가장 크게 산출 되었고, 변위도 20 Hz에서 0.0145 inch로 가장 크게 계산 되었는데 Fig. 2와 3에 각각 나타내었다. Fig. 2의 응력 분포는 IBA top plate와 내부배럴 상부 실린더에서 동시에 응력이 발생하는 것을 볼 수 있고, Fig. 3의 변형은 IBA top plate 중앙부분에서 큰 변위가 발생함을 확인할 수 있다.

주기적 응답해석 결과에 근거하여, IBA top plate에 응력과 변위를 측정할 수 있는 변형률계(strain gage)와 가속도계(accelerometer)를 선정할 수 있다.

Table 2 Analysis conditions in this study

Number of RCPs	4 pumps
Temperature	291 °C
Pressure	2220 psi
Mass flow rate	20,979 kg/s

D: 20
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Frequency: 20 Hz
 Phase angle: 0 °
 Unit: psi
 2012-09-07 오전 11:10
 666.49 Max
 592.44
 518.38
 444.33
 370.27
 296.22
 222.16
 148.11
 74.056
 0.00021803 Min

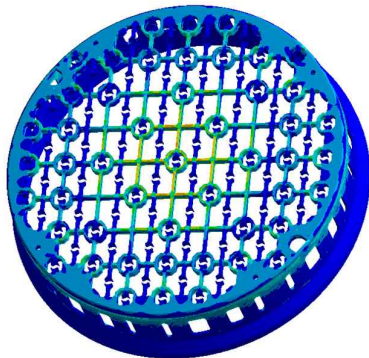


Fig. 2 Stress distribution at 20Hz in deterministic response analysis [psi]

D: 20
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Frequency: 20 Hz
 Phase angle: 0 °
 Unit: psi
 2012-09-07 오전 11:10
 666.49 Max
 592.44
 518.38
 444.33
 370.27
 296.22
 222.16
 148.11
 74.056
 0.00021803 Min

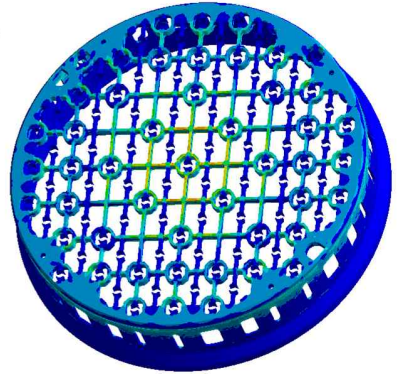


Fig. 3 Deformation at 20 Hz in deterministic response analysis [inch]

(2) Random Response Analysis 결과

불규칙 구조응답 해석은 입력값이 불규칙한 성분을 갖기 때문에 각 노드별 응답이 PSD로 계산되며, 가우스 분포(Gauss distribution)를 따르는 것으로 간주하여, PSD 결과를 적분하여 분산을 계산하였다. 이를 이용하여 99.97%의 확률을 갖는 3σ 응력 및 3σ 변위를 계산할 수 있었다. 여기서 3σ는 다른 불규칙 응답값 보다 높을 확률이 99.97%라는 것을 의미한다.

Fig. 4와 5는 불규칙 구조해석 결과를 나타낸다. Fig. 4의 응력분포는 IBA top plate와 내부배럴 상부 실린더에서 주로 발생하는 것을 볼 수 있는데 최대값은 416.0 psi 이다. Fig. 5의 변형은 주기적 응답 해석과 동일하게 IBA top plate 중앙부분에서 주로 변위가 발생함을 알 수 있고 최대값은 0.846 mils 이다.

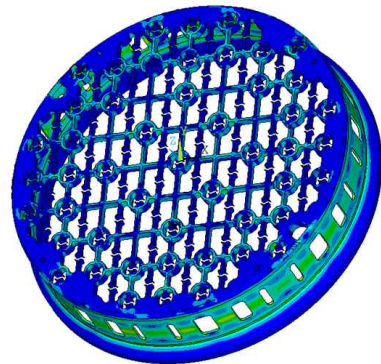


Fig. 4 Stress distribution in random response analysis [psi]

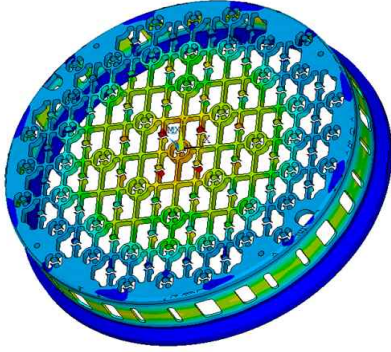


Fig. 5 Deformation in random response [inch]

3. 측정위치 및 계측기 선정

Fig. 6은 본 연구의 IBA top plate의 구조응답 결과에 근거하여 선정된, APR1400 RVI CVAP 측정 프로그램용 IBA top plate 측정위치 및 계측기를 묘사하고 있다.

가속도계(A1, A2)는 구조응답 해석결과 가장 큰 변위를 나타낸 IBA 상부면 Z방향의 가속도를 확인하기 위해서 중앙 부분으로 선정하였는데, 예측된 모드형상을 확인하기 위해서 2개의 가속도계를 각각 90°와 180°의 중앙에 선정하였다.

변형률계는 IBA 상부면의 변형을 측정하기 위해 중앙 부분과 가장자리 부분에 각각 2개씩의 변형률계를 X, Y방향으로 선정하여 주파수 특성과 모드형상의 비교가 가능하도록 선정하였다.

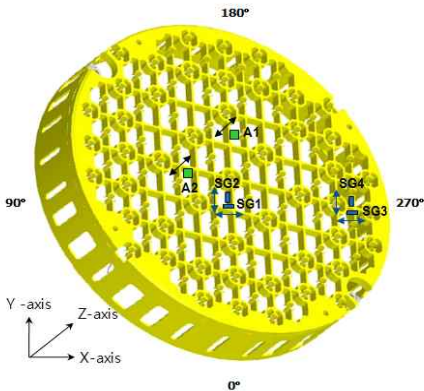


Fig. 6 Measurement locations at IBA top plate
(A : accelerometer, SG : strain gage)

5. 결 론

IBA는 APR1400 원자로내부구조물에 최초로 설계된 상부안내구조물 집합체의 일부이다. 본 논문에서는 IBA top plate에 대한 구조해석을 추가로 수행한 결과, 주기적 하중에 의한 응답결과가 불규칙 하중에 의한 응답결과 보다 훨씬 큰 것으로 확인되었다.

구조해석 응답결과에 근거하여 선정된 측정위치 및 계측기는 RVI CVAP 측정시스템 설계를 위한 기본자료가 되며, 선정된 위치의 해석결과(고유주파수, 모드형상, 응력, 변위)는 향후 측정값과 비교되어 될 것이다.

참 고 문 헌

- (1) US Nuclear Regulatory Commission, 2007, March, Regulatory Guide 1.20, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals During Preoperational and Initial Testing, Rev. 3.
- (2) Ko, D. Y., Lee, J. G., Kang, Y. C. and Kim, S. H., 2009, Development of a measurement system of gap between CSB and RV to shorten a nuclear reactor installation period, Nuclear Engineering and Design, 239(2009), pp. 495~500.
- (3) Korea Electric Power Corp., 2000, Report on the Observation and Synthesis about CVAP in KNGR RVI.
- (4) KEPCO Engineering and Construction Company Inc., 2008, Design Specification for Reactor Vessel Core Support and Internal Structures.
- (5) KEPCO Engineering and Construction Company Inc., 2008, Fluid System and Component Engineering Design Data for Plant Safety, Containment and Performance Analyses.
- (6) KEPCO Engineering and Construction Company Inc., 2008, System Description for Reactor Internals Assembly.
- (7) KEPCO Engineering and Construction Company Inc., 2008, Reactor Vessel Core Support and Internal Structures System Design Requirements.
- (8) KEPCO Engineering and Construction

Company Inc., 2008, Design Data for The Hydraulic Loads on Reactor Internals During Normal Operation.

(9) Ko, D. Y. and Lee, J. G., 2011, A Review of Measuring Sensors for Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program in Advanced Power Reactor 1400, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 47~55.

(10) Ko, D. Y. and Kim, K. H. and Kim, S. H., 2011, Selection Criteria of Measurement Locations for Advanced Power Reactor 1400 Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 8, pp. 708~713.

(11) Ko, D. Y. and Kim, K. H. and Kim, S. H., 2011, Response Instrumentation Test Acceptance Criteria for APR1400 RVI CVAP, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 1306~1042.

(12) Kim, K. H., Ko, D. Y. and Kim, Y. S., 2009, Hydraulic and Structural Analysis Methodology of RVI CVAP in Shin-Kori 4, Transaction of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, pp. 1113~1114.

(13) Gu, J. Y., Kim, K. H. and Kim, Y. S., 2010, Development and Validation of Structural Analysis Methodology for Comprehensive Vibration Assessment for Reactor Vessel Internals, Proceeding of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 950~955.

(14) Kim, K. H., Ko, D. Y. and Kim, S. H., 2011, Vibration Stress Analysis for Reactor Vessel Internals of Advanced Power Reactor 1400 by Pulsation of Reactor Coolant Pump, Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 1098~1103.

(15) Kim, K. H., Ko, D. Y. and Gu, J. Y., Deterministic Hydraulic Load Analysis on Reactor Internals of APR1400, Transaction of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, pp. 26~27.