

APR1400 증기발생기 습분분리기 진동 특성에 관한 연구

A Study on Vibration Characteristics of Moisture Separator for APR1400 Steam Generator

조민기† · 박태정* · 하창훈* · 박누가*
Minki Cho, Taejung Park, Changhoon Ha and Luke Park

Key Words : Steam Generator(증기발생기), APR1400(신형경수로 1400), Moisture Separator(습분분리기), Vibration Characteristics(진동 특성), CVAP(종합진동평가 프로그램)

ABSTRACT

A Comprehensive Vibration Assessment Program (CVAP) for steam generator internals (SGI) of Advanced Power Reactor 1400 (APR1400) is being performed in accordance with the United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC) Regulatory Guide 1.20 (RG 1.20) revision 3. This paper studies the vibration characteristics of moisture separator assembly as part of the vibration and stress analysis program for APR1400 SGI CVAP. The natural frequencies, mode shapes, and structural behavior of moisture separator assembly were investigated through modal analysis using finite element method and experimental measurement. Since the moisture separator consists of several items with complicated shape, an idealized shell model was used in the finite element analysis. Group of local modes caused by moisture separators and significant modes of shroud and separator support plate were identified. The results of this paper are to be utilized in the structural response analysis of moisture separator assembly.

1. 서 론

미국 원자력규제위원회(United States Nuclear Regulatory Commission) 규제지침서 (Regulatory Guide) 1.20⁽¹⁾은 유동유발진동에 대해 구조적 건전성을 확보하기 위한 종합진동평가 프로그램을 제시한다. 이 규제지침서는 원자력발전소의 원자로내부구조물(Reactor Vessel Internals)의 평가에 적용되어왔으나⁽²⁾, 미국 비등수형원자로(Boiling Water Reactor)의 출력 증가 시 증기건조기(Steam Dryer)의 파손사례에 기인하여 2007년 확대 개정되었다. 개정된 규제지침서는 증기발생기 내부구조물(Steam Generator Internals)에 대하여 발생 가능한 잠재적 유동 손상 효과에 대한 평가를 수행하

도록 권고하고 있으며, 이에 따라 두산중공업은 APR1400 증기발생기 내부구조물에 대한 종합진동평가 프로그램을 수행하고 있다.

본 논문에서는 증기발생기 내부구조물 중 하나인 습분분리기의 진동특성을 분석하기 위해 유한요소 해석 모델을 수립하고 모드 해석(Modal Analysis)을 수행하여 습분분리기의 고유주파수와 모드형상을 확인하였다. 습분분리기의 모드 해석 결과는 진동시험 결과와의 비교를 통해 검증되었다.

2. 진동특성 분석

2.1 해석 모델 수립

증기발생기 상부구조물에 대한 3차원 모델을 CATIA를 활용하여 Figure 1과 같이 작성하여 습분분리기 집합체의 상세 형상 및 경계조건을 분석하였다. 습분분리기는 표면에 다수의 구멍이 존재하고 내부에 메시 와이어(Mesh Wire), 회전 날개(Spinner Blade) 등이 설치되며 습분분리기 지지대

† 교신저자; 두산중공업

E-mail : minki1.cho@doosan.com

Tel : (055)278-5926, Fax : (055)278-8497

* 두산중공업

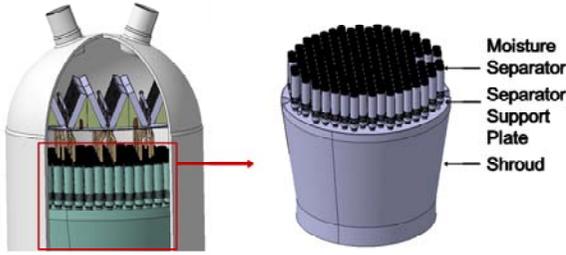


Figure 1 3D Model for Steam Generator Internals

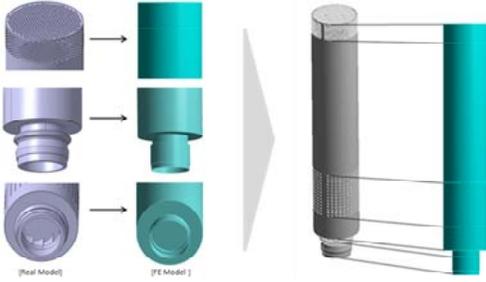


Figure 2 Moisture Separator Model Simplification

(Separator Support)와 커플링(Coupling)을 통해 연결되는 매우 복잡한 형상을 갖는다. 유한요소법을 활용한 모드 해석으로 습분분리기 집합체의 진동 특성을 분석하기 위해 습분분리기의 표면 및 내부 구조물들을 Figure 2와 같이 단순화하고 전체 구조물을 쉘 형상으로 이상화하여 유한요소모델을 작성하였다.

2.2 습분분리기 모드 해석 및 검증

습분분리기 집합체에 대한 모드 해석을 수행하기 전에 앞서 이상화한 습분분리기 유한요소모델의 적합성을 확인하기 위해 단일 습분분리기에 대한 모드 해석을 수행하여 진동 시험 측정 결과와 비교하였다. 모드 해석은 유한요소해석 프로그램 ANSYS를 사용하여 수행되었으며, 모드 추출을 위해 고전적 Lanczos 알고리즘에 다수의 벡터를 사용하여 효율을 높인 Block Lanczos 법을 적용하였다. 진동 시험은 습분분리기에 가속도계(Accelerometer)를 설치한 후 충격 해머(Impact Hammer)로 습분분리기를 가진하여 주파수응답함수(Frequency Response Function)를 측정하고 결과를 분석하는 방법으로 수행되었다.

단일 습분분리기에 대한 모드 해석 주요 결과는 Figure 3에 나타나있으며 진동 시험 측정값과의 비교 결과는 Figure 4에 나타나있다. Figure에서 확인되는 바와 같이, 유한요소해석을 통해 얻은 고유진

동수와 진동 시험을 통해 얻은 고유진동수는 매우 잘 일치하며 이상화한 모델이 실제 습분분리기의 진동 특성을 적합하게 모사하고 있음을 알 수 있다.

2.3 습분분리기 집합체 모드 해석

시험과의 비교를 통해 검증된 습분분리기 모델을 적용하여 습분분리기 집합체에 대한 모드 해석을 수행하였다. 쉬라우드(Shroud) 영역의 유체부가질량(Fluid Added Mass)은 ASME B&PV Code⁽⁶⁾에 따라 계산했으며, 습분분리기 지지판(Separator Support Plate)의 유체부가질량은 증기발생기 유동 해석 결과로부터 계산하여 적용하였다. 모드 해석 시 고유진동수는 0~100Hz 주파수 범위에서 추출하였으며, 단일 습분분리기 해석과 동일하게 Block Lanczos 법을 적용하여 모드를 추출하였다.

Figure 5는 모드 해석 결과 도출된 0~100Hz 범위에서의 습분분리기 집합체의 고유주파수를 나타낸다. Figure에서 380여개의 고유주파수가 유사한 주파수 범위에서 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 Figure 6에서 확인되는 바와 같이 단일 습분분리기 고유주파수와 유사한 범위에서 다수의 습분분리기들의 1차 모드 형상이 조합되어 나타나는 국부 모드(Local Mode)들이 발생한 것이다. 국부 모드 발생 주파수 범위를 지나면서 쉬라우드 및 습분분리기 지지판에 의한 모드들이 나타난다. Figure 6에서 쉬라우드와 습분분리기 지지판의 변형이 습분분리기의 변형에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

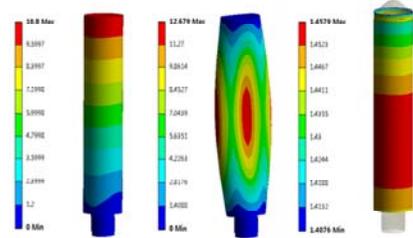


Figure 3 Mode Shapes of Moisture Separator

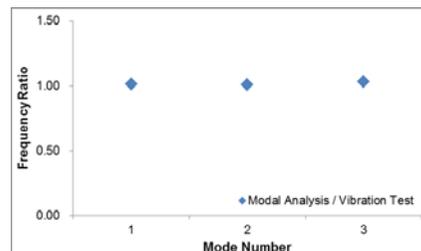


Figure 4 Comparison of Modal Analysis and Vibration Test Results

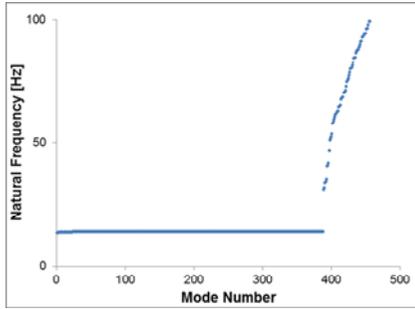


Figure 5 Natural Frequencies of Moisture Separator Assembly

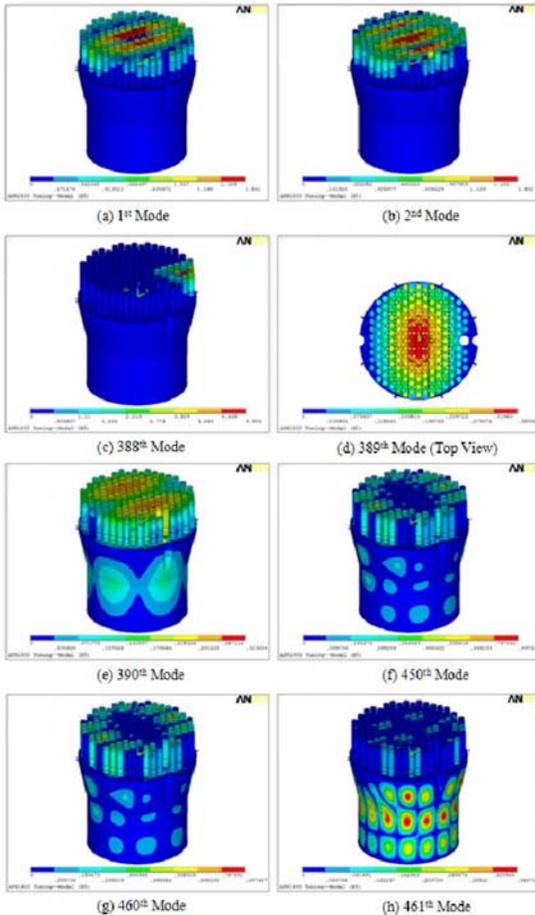


Figure 6 Mode Shapes of Moisture Separator Assembly

3. 결론

규제지침서 1.20에 따른 APR1400 증기발생기 내부구조물 종합진동평가 프로그램을 위하여 습분분

리기 집합체에 대한 모드 해석을 수행하여 진동 특성을 분석하였다. 이상화된 습분분리기 모델을 적용하였으며 진동 시험 측정 결과와 비교하여 작성된 모델을 검증하였다. 습분분리기 집합체의 모드 해석을 통해 0~100Hz 범위에서 고유진동수와 모드형상을 추출한 결과 습분분리기에 의한 다수의 국부 모드들의 발생과 쉬라우드 및 습분분리기 지지판에 의한 모드들의 발생을 확인하였으며 습분분리기 집합체의 거동 특성을 알 수 있었다.

본 연구에서 작성된 유한요소해석 모델과 모드 해석 결과는 향후 습분분리기 집합체에 대한 진동 응답 해석 및 구조 해석에 활용될 예정이다.

참고 문헌

- (1) U.S. NRC, Regulatory Guide 1.20, 2007, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals during Preoperational and Initial Startup Testing.
- (2) Lim, N. H., Ko, D. Y., and Kim, K. H., 2012, Status of the CVAP on Advanced Power Reactors, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 211~212.
- (3) Ko, D. Y., Kim, K. H., and Kim, S. H., 2012, Structural Analysis and Measuring Locations of Upper Guide Structure Assembly in APR1400, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 306~311.
- (4) Kim, K. H., Ko, D. Y., and Kim, S. H., 2012, Validation of Vibration and Stress Analysis Methodology for APR1400 Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 300~305.
- (5) Kim, K. H., Kim, D. H., and Kim, T. S., 2011, Analysis on Vibration Characteristics of Steam Generator Separator Assembly of Advanced Power Reactor 1400, Proceedings of the KPVP Annual Conference.

(6) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Rules for Construction of Nuclear Facility Components, 2007 Edition with 2008 Addenda.