

<연구논문>

## SMART 유동혼합헤더집합체의 동수력 질량 특성 고찰

이규만<sup>†</sup>·안광현\*·이강현\*·이재선\*

### Investigation of Hydrodynamic Mass Characteristic for Flow Mixing Header Assembly in SMART

Gyu Mahn Lee<sup>†</sup>, Kwanghyun Ahn\*, Kang-Heon Lee\* and Jae Seon Lee\*

(Received 10 April 2020, Revised 18 May 2020, Accepted 20 May 2020)

#### ABSTRACT

In SMART, the flow mixing header assembly (FMHA) is used to mix the coolant flowing into the reactor core to maintain a uniform temperature. The FMHA is designed to have enough stiffness so the resonance with reactor internal structures does not occur during the pipe break and the seismic accidents. Since the gap between the FMHA and the core support barrel assembly is very narrow compared with the diameter of FMHA, the hydrodynamic mass effect acting on the FMHA is not negligible. Therefore the hydrodynamic mass characteristics on the FMHA are investigated to consider the fluid and structure interaction effects. The result of modal analysis for the dry and underwater conditions, the natural frequency of primary vibration mode for the horizontal direction is reduced from 136.67 Hz to 43.76 Hz. Also the result of frequency response spectrum seismic analysis for the dry and underwater conditions, the maximum equivalent stress are increased from 13.89 MPa to 40.23 MPa. Therefore, reactor internal structures located in underwater condition shall consider carefully the hydrodynamic mass effects even though they have sufficient stiffness required for performing its functions under the dry condition.

**Key Words :** SMART (SMART 원자로), Modal characteristics (진동특성), Flow mixing header assembly (유동혼합헤더집합체), Hydrodynamic mass(동수력 질량), Frequency response spectrum (주파수응답스펙트럼)

#### 기호설명

$M_1$  = mass terms of inner cylinder

$M_2$  = mass terms of outer cylinder

$M_{11}, M_{22}$  = diagonal term of hydrodynamic mass matrix

$M_{12}, M_{21}$  = off-diagonal term of hydrodynamic mass matrix

$\ddot{u}_1, \ddot{u}_2$  = absolute accelerations for cylinders

$x_1, x_2$  = relative displacements for cylinders

$k_1, k_2$  = stiffness terms for cylinders

$L$  = length of cylinder

$\rho$  = mass density of fluid

$a, b$  = radius of the inner and outer cylinder

$f_{water}, f_{air}$  = natural frequencies in water and air

$M_S$  = mass of solid structure

$M_H$  = hydrodynamic mass effected on solid structure

#### 1. 서 론

원자로압력용기 내부에 설치되는 원자로내부구조물은 원자로냉각재에 잠겨있는 구조물로서 이들의 진동특성은 유체의 연성효과에 크게 영향을 받는다. 물속에 잠긴 구조물과 유체의 연성효과를 고려한 초기 연구는 단순한 원통 및 판 형상의 구조물에 대한 이론적 접근이 주를 이루었다. Fritz<sup>(1)</sup>는 물

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail: gmlee@kaeri.re.kr

TEL: (042)868-8390

\* 한국원자력연구원

로 찬 환형 공간(water annulus)에서 움직이는 실린더에 대한 동수력 질량의 영향을 수식화한 바 있으며 이 이론은 대부분의 냉각재 영역이 환형공간을 이루고 있는 상용 원자로의 설계 특성과 부합하여 원자로 내부구조물의 동특성 파악 및 해석에 널리 적용되고 있다. 이러한 원자로 내부구조물의 설계 특성은 원전의 주기적 안전성평가 심사지침<sup>(2)</sup>의 기본자료로 활용된다. System integrated modular advanced reactor (SMART)와 같은 중소형원자로의 경우, 원자로내부구조물의 형상이 복잡해짐에 따라 단순화된 이론의 적용에 한계가 있어서 3차원 해석 모델을 이용한 정확한 수치해석의 필요성을 보여주는 연구<sup>(3)</sup>들이 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 단순화된 3차원 모델을 활용하는 기존 연구를 확장하여 단순화되지 않은 실제 형상의 3차원 해석모델을 활용하여 SMART의 유동혼합헤더집합체 (flow mixing header assembly, FMHA)에 대한 유체·구조 상호작용 효과를 고려한 수치해석을 수행하여 이론적으로 특정하기 어려운 수중 동특성 변화를 고찰하고자 하였다.

## 2. FMHA의 기능 및 구조

한국원자력연구원에서 개발한 중소형일체형원자로인 SMART는 가압기, 증기발생기 및 냉각재펌프를 원자로압력용기에 내장하고 있다<sup>(4)</sup>. 또한, 원자로압력용기 하부에는 원자로 노심, 노심지지배럴집합체 그리고 FMHA가 동심원 형상으로 배치된다. FMHA는 증기발생기 하부에서 노심지지배럴집합체의 하단부를 둘러싸고 있는 구조물로서 증기발생기를 통과한 후 노심으로 유입되는 원자로냉각재를 골고루 혼합하여 냉각재 온도를 균일하게 유지시키는 기능을 한다. 따라서 원자로의 정상운전상태 뿐만 아니라 원자로냉각재펌프 또는 증기발생기의 기능 상실이 발생하더라도 노심으로 유입되는 온도는 일정하게 유지된다. Fig. 1과 2에서는 SMART 원자로집합체와 FMHA의 형상을 도시하였다.

FMHA는 노심지지배럴집합체와 원자로압력용기 사이에 위치하고 원자로냉각재 속에 잠겨있으므로 원자로냉각재에 의한 유체와 구조물의 연성효과를 고려하여야 한다. 구조물이 유체 속에 잠기면 공기 중의 상태보다 고유진동수가 낮아지고 응답의 크기가 감소하며 이러한 진동특성의 변화는 유체 속의

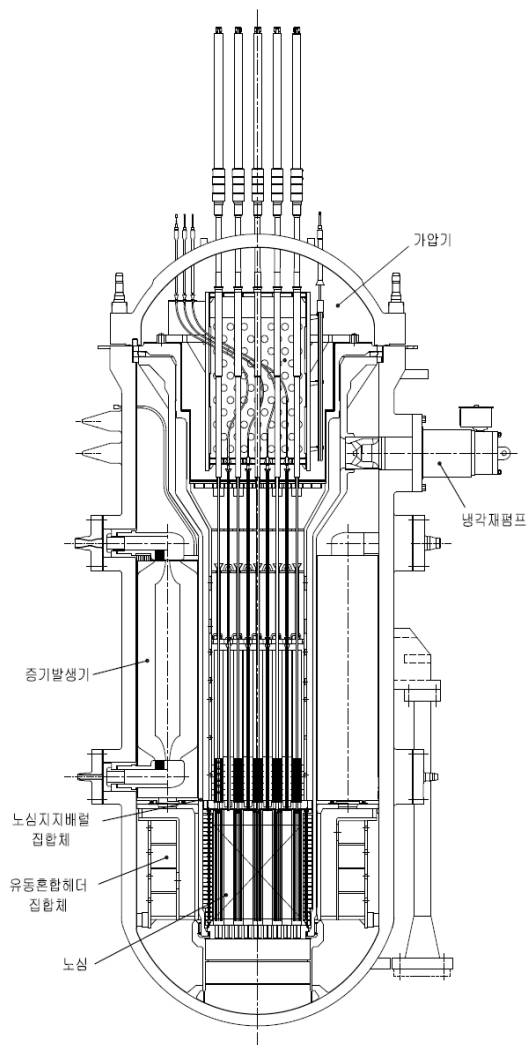


Fig. 1 SMART reactor vessel assembly

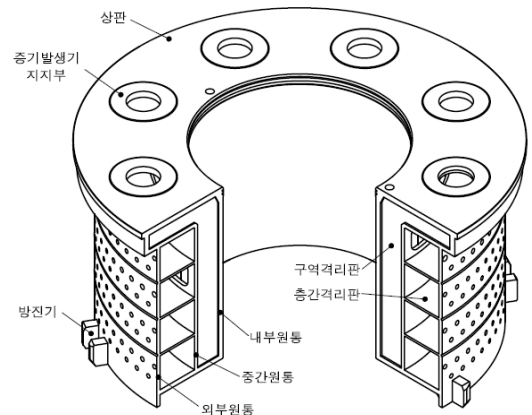


Fig. 2 FMHA configuration

구조물 간의 경계가 근접할수록 더욱 현저하게 나타난다. FMHA에서 내부원통과 노심지지베럴집합체 사이에는 3~5 mm, 외부원통과 원자로압력용기 사이에는 50~260 mm의 간격이 유지되며 이 틈새에는 원자로냉각재가 채워진다. 이들 간극은 FMHA의 반경과 비교하면 매우 좁으므로 FMHA 주변에 채워진 원자로냉각재로 인하여 구조물 상호 간에 동수력 질량효과가 크게 발생하고 구조물의 동특성도 크게 변화한다.

### 3. FMHA의 진동특성

FMHA의 진동특성을 분석하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench (Ver. 18.2 with acoustic module)를 사용하였다. FMHA 재질은 304 계열의 스테인리스강이며 원자로냉각재의 물성값과 재료의 특성값은 원자로의 정상운전상태에서의 환경조건을 적용하였으며, 해석에 적용된 요소들의 특성값은 Table 1과 같다.

Table 1 Element properties

	Structure	Fluid
Material	SA240 Type 304	-
Density	7641.6 kg/m <sup>3</sup>	676.2 kg/m <sup>3</sup>
Elastic Modulus	174.3 GPa	-
Speed of Sound	-	Infinite (incompressible)
Element Type	Solid186 Solid187	Fluid220 Fluid221
Mass	63,468 kg	-

#### 3.1 해석조건

FMHA는 상판 하단부의 가장자리 원둘레 전체부분이 원자로압력용기 내벽에 형성된 지지턱에 얹혀서 지지되고 외부원통 하부에 부착된 방진기는 원자로압력용기 내벽에 형성된 방진기지지대에 끼워져서 수평방향 자유도가 구속된다. 유한요소모델에서 동일한 경계조건을 부과하기 위하여 상판 하단부 전체 둘레에 3방향 변위를 구속하였으며 방진기 내면에는 frictionless support 조건을 적용하였다. 또한, FMHA를 둘러싸는 유체요소의 표면은 강체조건을 적용하였다. 공기중 및 수중 조건에 대한 FMHA의 유한요소모델은 Fig. 3 및 4와 같다.

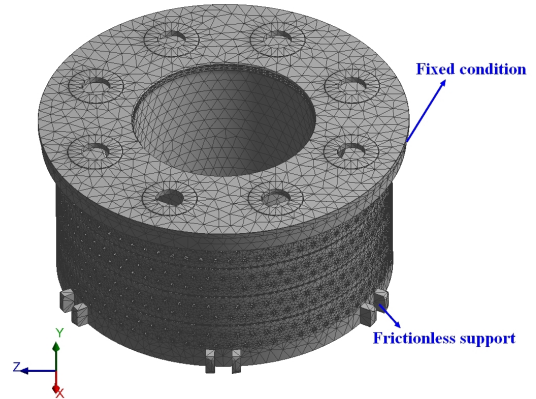


Fig. 3 Finite element model of FMHA under dry condition

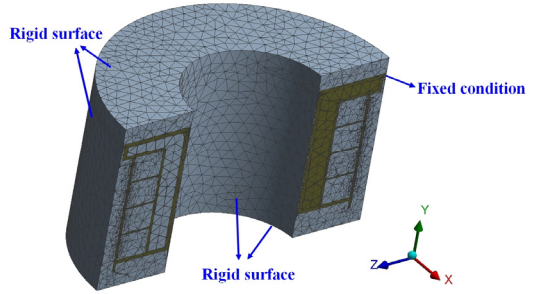


Fig. 4 Finite element model of FMHA under underwater condition

#### 3.2 공기중 진동특성

공기중 조건에서 FMHA에 대한 모드해석 결과, FMHA의 대표적 진동모드에 대한 고유진동수 및 모드형상은 Table 2 및 Fig. 5에 나타내었다. 공기중에서 FMHA의 1차 모드는 내부원통의 수직방향 병진거동을 나타내었으며, 2~5차 모드는 내부원통의 쉘거동을 나타내었고 6차 모드는 외부원통의 쉘거동을 나타내었다.

Table 2 Natural frequencies and mode shapes under dry condition

Serial mode No.	Natural frequency (Hz)	Mode shape
1	64.88	Inner cylinder vertical translation
2	136.67	Inner cylinder shell mode
3~5	152.15~156.89	Inner cylinder shell mode
6	194.78	Outer cylinder shell mode

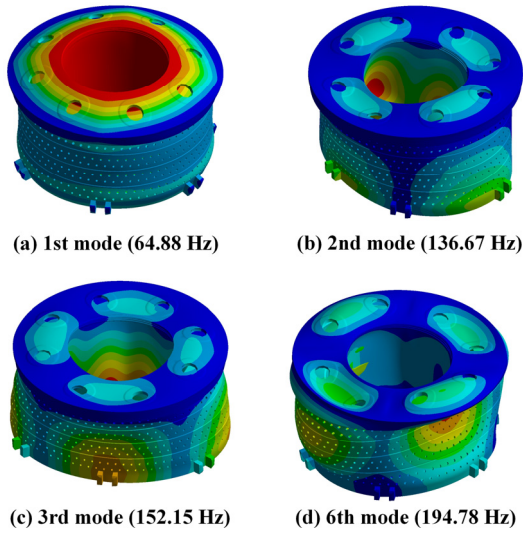


Fig. 5 Mode shapes under dry condition

나타내었다. 또한 FMHA의 큰 강성으로 인하여 각 진동모드의 고유진동수는 모두 64.88 Hz 이상으로 나타났으며 이것은 지진 및 배관파단과 같은 가진 하중 (excitation load)의 영주기진동수 (zero period acceleration) 범위에 위치한다.

### 3.3 수중 진동특성

수중 조건에 대한 FMHA의 모드해석 결과는 Table 3 및 Fig. 6에 나타내었다. 수중 조건에서 FMHA의 1차 모드는 내부원통의 수직방향 병진거동, 2~9차 모드는 내부원통의 쉘거동, 그리고 10차 모드는 외부원통의 쉘거동을 나타내었다. 공기중 조건에서 대표적인 진동모드인 1차, 2차 및 6차 모드에 대응하는 수중 조건에서 진동모드는 1차, 2차 및 10차 모드에서 발생하였다. 수중 조건에서 고유

Table 3 Natural frequency and mode shape under underwater condition

Serial mode No.	Natural frequency (Hz)	Mode shape
1	40.57	Inner cylinder vertical translation
2	43.76	Inner cylinder shell mode
3~9	56.39~84.08	Inner cylinder shell mode
10	98.22	Outer cylinder shell mode

진동수는 수직방향 거동에 대해서는 공기중 조건의 62%로 감소하였으며, 수평방향 거동은 공기중 조건의 32%~50%로 감소하였다.

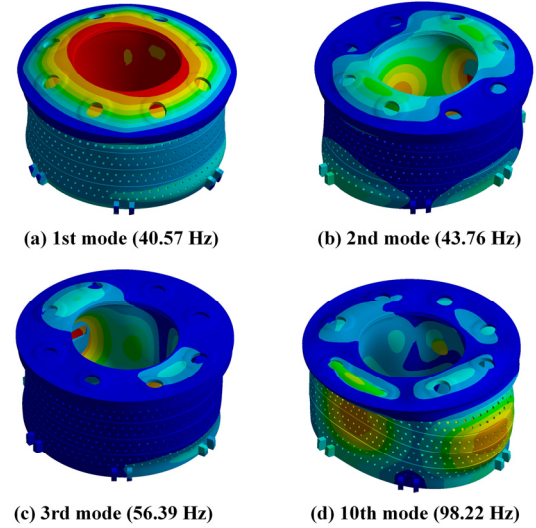


Fig. 6 Mode shape under underwater condition

Fig. 7과 같이 동심원으로 배치된 원통형 구조물이 수평방향으로 움직이면 구조물에 작용하는 동수력 질량은 식 (1)~(4)와 같이 수식으로 정량화 되어 있다<sup>(5)</sup>.

$$\left( \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$M_{11} = \pi a^2 L \rho \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (2)$$

$$M_{12} = M_{21} = -2\pi a^2 L \rho \left( \frac{b^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (3)$$

$$M_{22} = \pi b^2 L \rho \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (4)$$

Fig. 8에 도시한 원자로압력용기, FMHA 그리고 노심지지배럴집합체가 동심원상에 배치되는 형상에서, FMHA 내부원통에 작용하는 동수력 질량은 FMHA 내부의 노심지지배럴집합체와 FMHA 내부원통의 상호작용 때문에 발생하므로 식 (4)를 적용하여 개략적인 값을 계산할 수 있으며, FMHA 외부원통에 작용하는 동수력 질량은 원자로압력용기와

FMHA 외부원통의 상대운동에 의하여 발생하므로 식 (2)를 적용하여 개략적인 값을 계산할 수 있다. 식 (4)와 (2)를 적용하여 계산된 FMHA 내부원통과 FMHA 외부원통에 작용하는 원자로냉각재의 동수력 질량은 각각 다음과 같다.

$$M_{22} = 7.487 \times 10^5 \text{ kg} \quad (5)$$

$$M_{11} = 2.656 \times 10^5 \text{ kg} \quad (6)$$

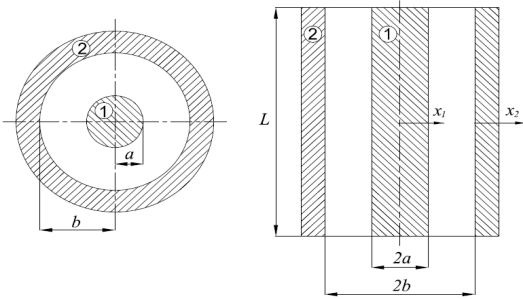


Fig. 7 Concentric cylinders configuration

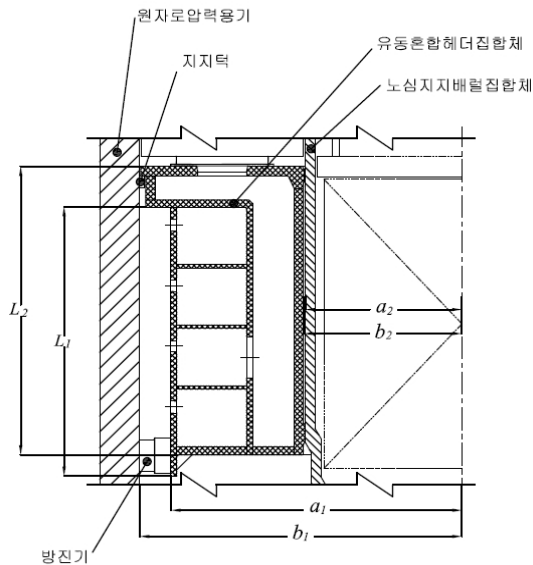


Fig. 8 FMHA arrangement in reactor pressure vessel

실제의 FMHA는 상판이 원자로압력용기에 형성된 지지턱에 얹혀서 지지가 되고 방진기에 의하여 수평방향 자유도가 구속되며, 또한 내부원통과 외부원통의 형상은 완전한 원통형 구조물이 아니며 인접하는 구조물 사이의 간격도 일정하지 않다. 따라서 실제 FMHA에 작용하는 동수력 질량 값은 식 (2) 및

(4)로 계산된 동수력 질량 값보다 작게 발생한다.

FMHA에 부가되는 동수력 질량을 내부원통과 외부원통에 적용하고 공기중과 수중 조건에서의 고유진동수를 단순하게 비교하면 유한요소해석 과정에서 적용된 부가질량의 개략적 값은 아래의 식 (7)로 단순하게 유추할 수 있다.

$$f_{water} = \sqrt{\frac{M_S}{M_S + M_H}} f_{air} \quad (7)$$

식 (7)을 적용하면 내부원통과 외부원통의 주요진동모드인 2차 및 10차 모드에서 부가된 원자로냉각재의 동수력 질량 값은 아래와 같이 계산된다.

$$M_{H(2nd \text{ mode})} = 5.556 \times 10^5 \text{ kg}$$

$$M_{H(10th \text{ mode})} = 1.861 \times 10^5 \text{ kg}$$

이 값들은 각각 식 (5)와 (6)에서 이론적으로 계산된 FMHA의 내부원통과 외부원통에 작용하는 동수력 질량값의 70~74% 정도에 해당되며, 또한 FMHA 구조물 질량의 9배 및 3배에 해당되는 큰 값으로서 FMHA의 진동특성에 미치는 영향이 크다. 따라서 수중에 위치하는 구조물에서 동수력 질량효과가 클 것으로 예상될 경우에는 반드시 이것이 구조물의 응답에 미치는 영향을 고려하여 한다.

## 4. FMHA의 내진특성

수중 조건에서의 FMHA에 발생하는 동수력 질량 효과로 인하여 구조물의 고유진동수는 감소하며 이것은 가진하중 (excitation loads)의 주파수응답 특성에 따라 구조물의 동적거동이 변화한다. FMHA에 대하여 대표적인 가진하중으로서 지진하중의 가속도 주파수응답스펙트럼을 적용하여 공기중 및 수중 모델에 대한 내진해석을 수행하였다.

### 4.1 주파수응답스펙트럼

SMART 원자로의 내진해석시 첨두지반가속도 (peak ground acceleration)에 해당하는 통제진동수는 50Hz를 적용하였으며, 공기중에서 FMHA는 주요진동모드가 64Hz를 상회하므로 지진거동을 적용시 단순하게 첨두가속도를 적용하여 해석할 수 있다. 그러나 수중에서 FMHA의 주요진동모드가 통제진

동수 아래인 40Hz 부근에서 발생하므로 FMHA는 주파수응답특성을 고려한 내진해석이 수행되어야 한다. FMHA에 대한 내진특성을 검토하기 위하여 2개의 수평방향과 1개의 수직방향의 안전정지지진 (safe shutdown earthquake)의 가속도 주파수응답스펙트럼을 동시에 적용하여 내진해석을 수행하였다. Fig. 9는 해석에 적용된 지진하중의 3방향 가속도 응답스펙트럼으로, SMART의 원자로건물 및 원자로집합체 전체 내진해석 결과 중 FMHA의 상판 지지턱 위치에서 발생하는 가속도의 응답스펙트럼을 발췌한 값이다.

### 4.2 내진해석 및 해석결과

Fig. 10은 FMHA에 대한 공기중 및 수중 조건의 각각에 대하여 Fig. 8의 원자로압력용기 지지턱의 고정 경계조건 위치에 3방향 가속도 응답스펙트럼을 부여하여 해석한 내진해석 결과이다. Fig. 9의 응답스펙트럼은 SMART 원자로집합체의 안전정지지진하중에서 FMHA지지 위치에 작용하는 가속도에 대한 주파수별 최대 응답을 의미하므로 본 해석은 SMART의 지진 발생 조건에서 FMHA가 겪는 가장 보수적인 결과라 할 수 있다. Fig. 10에서 도시한 바와 같이 최대응력은 공기중 및 수중 조건 모두에서 중간원통이 수평방향과 수직방향으로 연결되는 부위에서 발생하였다. 최대 등가응력은 공기중 조건에서는 13.89 MPa를 나타내었으며 수중 조건에서는 40.23 MPa를 나타내었다. 이 응력은 304 계열의 스테인리스강의 허용응력인 84.40 MPa<sup>(6)</sup>의 48% 이하 이므로 FMHA는 구조적으로 충분히 건전함을 예측할 수 있다.

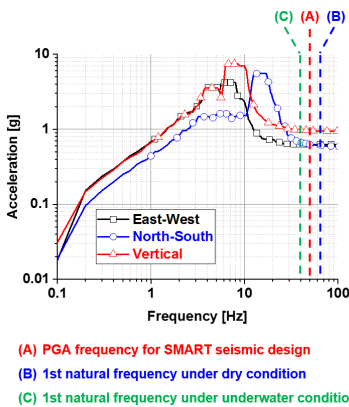


Fig. 9 Acceleration frequency response spectrum

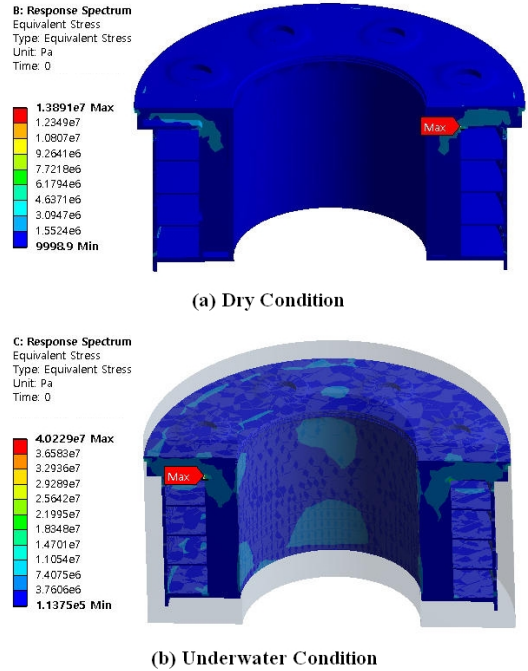


Fig. 10 Equivalent stress occurred on FMHA

수중 조건에서 FMHA에 발생하는 응력은 공기중 조건보다 290% 정도 크게 발생하였다. 따라서 구조물 틈새에 채워지는 유체의 동수력 질량효과로 인하여 구조물의 주요 진동모드가 통제진동수 이내로 이동할 경우에는 구조물의 동적해석에서는 반드시 유체의 연성효과를 고려하여 해석을 수행하여야 함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 SMART의 원자로압력용기 내부에서 원자로냉각재에 잠겨있는 구조물인 FMHA에 대하여 원자로냉각재가 미치는 동수력효과를 고찰하기 위하여 공기중과 수중조건에 대한 동특성해석과 가속도 주파수응답스펙트럼을 이용한 내진해석을 각각 수행하였다. 본 연구를 통해 얻을 수 있는 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) FMHA는 원자로압력용기 및 노심지지배럴집합체와 함께 동심원 형태로 배치되고 구조물 사이의 간격이 좁아서 구조물의 상대운동에 의한 동수력 질량효과는 구조물의 질량의 3~9배 정도로 크게 발생하였다. FMHA를 감싸는 원자로냉각재의 동수

력 질량효과로 인하여 수중 조건에서 고유진동수는 수직방향 거동에 대해서는 공기중 조건의 63% 범위로 감소하였으며, 수평방향 거동은 공기중 조건의 32%~50% 범위로 감소하였다.

(2) 공기중 조건에서 FMHA의 주요 진동모드는 SMART 원자로집합체의 내진해석시 적용한 통제진동수 50Hz보다 높게 나타났으나 수중 조건에서는 FMHA의 주요 진동모드는 통제진동수 이하인 40Hz 부근에서 발생하여 수중 조건을 적용한 내진특성의 평가가 요구되었다. FMHA에 대한 내진해석 결과 수중 조건에서의 최대 등가응력은 공기중 조건보다 290% 정도 크게 발생하였다.

(3) FMHA를 포함한 원자로냉각재에 잠겨있는 원자로내부구조물은 구조물의 틈새에 채워지는 유체의 동수력 질량효과로 인하여 구조물의 주요 진동모드의 고유진동수는 가진하중에서 하중의 강도가 큰 주파수 영역으로 이동될 수 있고 이로 인하여 동적응답이 공기중 조건에서 보다 매우 크게 발생할 수 있다. 이러한 특징을 가지는 구조물에 대한 동적해석에서는 유체의 연성효과에 의한 동수력 질량효과를 주의 깊게 고려하여야 한다.

## 후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음. (NRF-2020M2D7 A1079180)

## 참고문헌

- (1) Fritz, R. J., 1972, "The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 94, No. 1, pp. 167-173. doi:<https://doi.org/10.1115/1.3428107>
- (2) Lee, K. H., Park, J. S., Ko, H. O. and Jung, M. J., 2013, "Development of Safety Review Guide for Periodic Safety Review of Reactor Vessel Internals," *Trans. of the KPVP*, Vol. 9, No. 1, pp. 20-24.
- (3) Choi, Y., Lim, S., Ko, B. H., Park, K. S., Park, N. C., Park, Y. P., Jeong, K. H. and Park, J. S., 2013, "Dynamic characteristics identification of reactor internals in SMART considering fluid-structure interaction," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 255, pp. 202-221. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.10.010>
- (4) Kim, K. K., Lee, W., Choi, S., Kim, H. R. and Ha, J., 2014, "SMART: The First Licensed Advanced Integral Reactor," *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 8, pp. 94-102. doi:[10.17265/1934-8975/2014.01.011](https://doi.org/10.17265/1934-8975/2014.01.011)
- (5) ASCE Standard, 1986, *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures*, American Society of Civil Engineers, NY.
- (6) ASME BPVC Sec.II, 2015, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D - Properties (Metric)," American Society of Mechanical Engineers, NY.