<응용기술논문> DOI https://doi.org/10.3795/KSME-C.2017.5.2.127 ISSN 2288-3991(Online)

펌프 맥동하중에 대한 노심지지배럴 집합체의 음향-구조 연성해석

이장원*·문종성*·김정규*·성기광*·김현민*
* 한국전력기술 기계설계그룹

Acoustic Structure Interaction Analysis of the Core Support Barrel for Pump Pulsation Loads

Jang Won Lee*†, Jong Sung Moon*, Jung Gyu Kim*, Ki Kwang Sung* and Hyun Min Kim*
* Dept. of Mechanical & Design Engineering, KEPCO-ENC,

(Received January 20 2017; Revised June 17, 2017; Accepted June 29, 2017)

Key Words: Core Support Barrel(노심지지배럴), Reactor Internals(원자로내부구조물), Acoustic Structure Interaction Analysis(음향-구조 연성해석), CVAP(종합진동평가프로그램)

초록: 원자로내부구조물은 다양한 진동하중조건에서 안전성과 건전성을 유지해야한다. 그러므로 미국원자력규제 위원회는 펌프 압력 맥동에 의한 진동을 포함하여 음향으로 유발되는 진동을 평가하기 위한 규제지침서 1.20을 제시하고 있다. 본 논문은 음향-구조 연성해석 기법을 사용하여 펌프 맥동 가진으로 인한 해석을 위해 노심지지배럴 주변의 유체와 구조의 연성을 고려하여 해석하는 방법론을 제안하였다. 해석결과는 미국 Palo Verde 1호기 종합진동평가 프로그램 발전소 시험결과와 잘 일치한다. 따라서 제안된 해석 방법론은 펌프 압력맥동에 대한 노심지지배럴의 구조응답을 평가하기 위한 효과적 방법으로 판단된다.

Abstract: The reactor internals shall be secured in safety and structural integrity under various vibrational loading conditions. Thus, U.S. NRC, Regulatory Guide 1.20 requires the evaluation for the reactor internals due to acoustic induced vibration including the response to the reactor coolant pump pressure pulsation. This paper suggests a methodology to develop an analytical model of the core support barrel accounting for the fluid around the structure and to analyze the responses to the pump pulsation loads using acoustic structure interaction analysis. The analysis results were compared with those of US Palo Verde 1 CVAP and showed a good agreement. Thus, it is expected that the suggested methodology could be an efficient way to evaluate the response of the core support barrel to the pump pulsation loads.

1. 서 론

원자로내부구조물은 노심을 지지하고 냉각재 유로를 안내하는 구조물로 원자로용기 내의 수중에서 진동을 유발하는 하중을 받는다. 미국 NRC 규제지침서 1.20은 발전소 상업 운전 전에 원자로내부구조물의 진동을 종합적으로 평가하도록 요구하고 있다. 이것은 원자로내부구조물의 설계에 안전성과 건전성을 확보하기 위한 종합진동평가프로그램(Comprehensive Vibration Assesment Program ;CVAP[1])으로 해석, 측정, 검사로 구성되어지며 측정과 검사는 원자로 상업운전 이전에 수행되어 진다. 규제지침서 1.20은 원자로내부구조물의 진동을 가진원에 따라 유동유발진동(FIV, Flow Induced Vibration), 음향공진(AR,

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016. 12. 14-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표내용을 토대로 한 논문임.
† Corresponding Author, jwlee1@kepco-enc.com
ⓒ 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

Acoustic Resonance), 음향유발진동(AIV, Acoustic Induced Vibration) 및 기계유발진동(MIV, Mechanical Induced Vibration)으로 분류한다. 이 중에서 음향유발진동의 원인 가운데 하나인 펌프 맥동하중은 원자로 냉각재펌프 블레이드가 주기적으로 회전하면서 발생시키는 압력파가 냉각재를 매질로 배관을 지나 원자로내부구조물에 작용하는 하중이다.

Kim 등[2]은 음향해석을 통해 펌프 맥동하중에 의한 원자로내부구조물의 압력분포를 구한 뒤 이를 구조해석에 적용하였으며, Moon 등[3]은 음향-구조 연성해석을 통해 펌프 맥동파의 전달과 원자로내부구조물의 응답을 동시에 구하였다. 한편 Lee 등[4]은 음향-구조 연성해석기법을 활용한 최적설계기법을 제안하였다.

본 논문에서는 Moon 등의 원자로내부구조물 음향-구조 연성해석 방법을 다음과 같이 개선하였다. 첫째, 원자로내부구조물의 핵심 부품인 노심지지배럴(CSB)에 대한 해석의 신뢰성을 높이고 동시에 효율적으로 수행할 수 있도록 CSB 주변 구조물인 상부안내구조물(UGS), 하부지지구조물(LSS), 노심슈라우드 및 노심의 단순화 모델을 개발하여 CSB 해석모델에 포함하였다. 둘째, 4개 펌프의 맥동 위상(Phase)에 대한 불확실성을 보완하기 위해 각 펌프 맥동에 대한 해석을 각각 수행하고, 후처리 작업에서 위상에 대한 동시성을 고려하도록 하였다. 마지막으로, 본 해석 방법의 검증을 위해 기존 CVAP 측정[5]에서 취득한 압력을 입력하여 해석한 뒤 측정 자료의 응력과 비교하였다. 이러한 검증을 통해서 본 논문에서 제안된 음향-구조 연성해석 방법이 펌프 맥동하중에 대한 노심지지배럴의 구조 응답 계산에 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

2. 노심지지배럴 해석모델

2.1 노심지지배럴 주변 구조물의 단순화

노심지지배럴 내부에는 상부안내구조물, 하부지지구조물, 노심슈라우드 및 노심이 위치하고 있으며, 이 구조물들은 노심지지배럴과 연결되어 있어 노심지지배럴에 부가질량으로 작용하기도 하고 구속조건으로도 작용한다. 효율적인 작업을 위해 노심지지배럴만 해석하지만 이러한 영향이 고려되도록 **Fig.** 1과 같이 주변 구조물을 단순화하여 해석에 포함하였다.[9] 상부안내구조물과 Tube Bank의 경우에는 실제 단

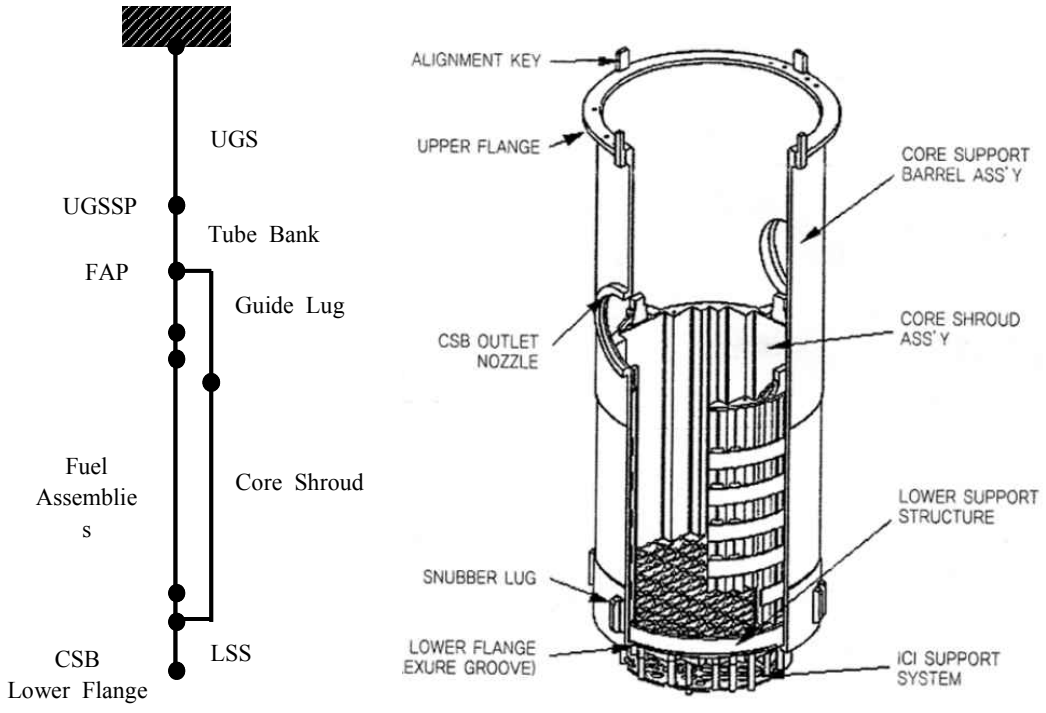


Fig. 1 Structures near the CSB[9]

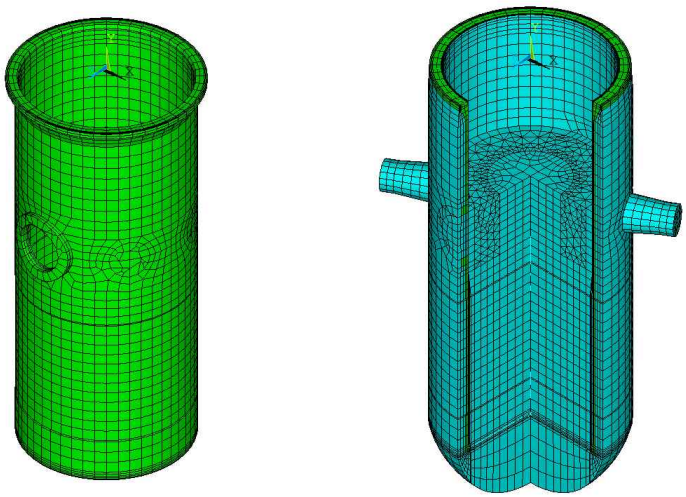
면 특성의 빔 요소를 사용하고, 핵연료집합체(Fuel Assemblies)는 시험 데이터를 이용한 물성치와 결합요소를 사용하였다. 하부지지구조물은 격자보로 용접된 구조물로 상대적으로 강한 강성을 가지므로, 하부지지구조물 중심에서 노심지지배럴 하부 플랜지에 강체보를 통해 연결하였다. 노심슈라우드는 실제 무게를 유지하면서 상세 유한요소 모델에서 구한 강성을 가지도록 재료 물성치와 단면 특성을 결정하였다. 노심슈라우드 상부의 Guide Lug과 핵연료정렬판(FAP)은 원주방향으로 구속되어 있으므로 결합요소를 사용하여 연결하였다. 상부안내구조물 지지판(UGSSP), 핵연료정렬판 및 하부지지구조물 절점에는 구조물들의 무게를 집중질량으로 추가하였다.

노심지지배럴은 원자로용기 플랜지와 누름링(Holddown Ring) 사이에서 구속된다. 누름링은 노심지지배럴과 상부안내구조물의 진동을 완충시켜주기 위한 구조물로 노심지지구조물을 완전히 구속하지 않는다. 이러한 경계조건을 모사하기 위해 노심지지배럴 상부 플랜지 하단은 모든 방향 자유도를 구속하지만, 하단은 스프링 요소를 사용하여 누름링의 스프링력 내에서 플랜지의 회전을 허용하도록 하였다.

2.2 유체로 인한 영향 고려

물 속에 잠긴 구조물은 공기 중에서와 다른 동특성을 가지므로 부가질량 등을 통해 그 영향을 고려할 수 있다. 그러나, 구조물 주변에 다른 구조물이 배치되어 있는 경우에는 연성효과가 작용하여 단순한 부가질량만으로는 유체로 인한 영향을 적절히 고려하기 어렵다. 따라서, Park[6] 및 Moon 등[3]과 같이 노심지지배럴과 원자로용기 사이에 직접 유체요소를 모델링하여 유체가 구조물 동특성에 미치는 영향을 고려하였다. 또한, 원자로용기 입구 노즐 내에 유체도 모델링에 포함하여 음향해석의 펌프 맥동하중 입력을 용이하게 하였다.

한편, 구조물 내부의 유체는 구조물이 거동할 때 같이 이동하므로 일반적으로 구조물의 요소에 유체 무게를 추가하여 유체 영향을 쉽게 고려할 수 있다. 그러나, 노심지지배럴과 상부안내구조물 사이에는 작은 유체 간격이 존재하고, 구조물이 인접해 있을수록 연성효과가 커지기 때문에 Fritz[7]의 부가질량 등과 같은 추가적인 고려가 필요하다. 본 논문에서는 노심지지배럴 안쪽에도 유체 요소를 사용하여 추가로 모델링하였다. **Fig.** 2는 노심지지배럴과 그 주변의 유체를 포함한 유한요소 해석모델을 나타낸다.



(a) CSB Structure only (b) Structures and Fluid around CSB

Fig. 2 FE Model of the CSB Assembly

2.3 모드해석

앞 절에서 작성된 유한요소모델에 대한 모드해석을 수행하였으며, 동적모델이 적절히 모사되었는지 확인하기 위해 종합진동평가프로그램(Comprehensive Vibration Assesment Program :CVAP) 측정 결과[5]와 비교하였다. Table 1은 유체를 포함한 노심지지배럴 모델을 사용한 모드해석 결과를 나타내며, 첫 번째 모드가 CVAP 측정 결과와 동일함을 확인하였다. **Fig.** 3은 주변 구조물이 고려된 노심지지배럴의 수중 모드 형상을 나타낸다.

Table 1 Natural Frequencies of the CSB

Mode*	Natural Frequencies (Hz)
M=1, N=1	7.72
M=2, N=1	15.11
M=3, N=1	26.14
M=1, N=2	41.65
M=3, N=2	46.23
M=4, N=2	51.86

* M : Circumferential, N : Axial

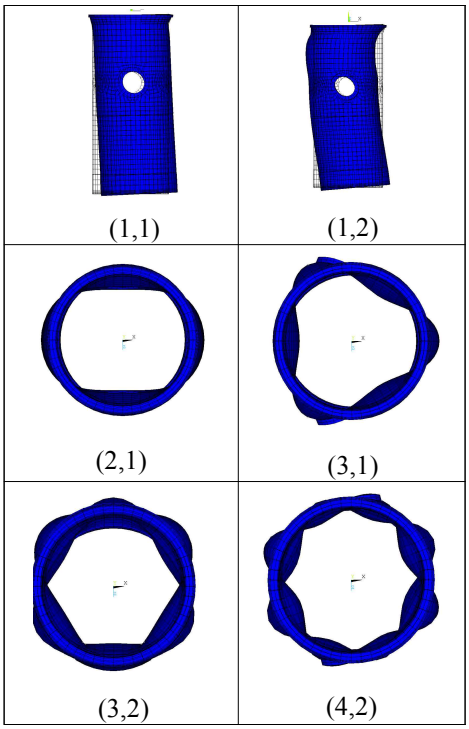


Fig. 3 Mode Shapes of the CSB

* (M, N) M : Circumferential, N : Axial

3. 펌프맥동하중에 대한 응답

3.1 음향-구조 연성해석

음향해석은 선형 파동 방정식(Linear Wave Equation)을 사용하여 압력파의 전파를 모사하는 것으로 유체 자체의 흐름은 없는 것으로 가정한다. 음향해석은 압력파의 전파만을 모사한 순수 음향해석(Pure Acoustic Analysis) 뿐만 아니라 구조물과의 연성효과를 고려한 음향-구조 연성해석(Acoustic Structure Interaction Analysis)이 구현 가능하다. 순수 음향해석에서 압력파의 전파는 식 (1)의 동적 방정식[8]을 이용하여 계산한다.

$$[M_F]\ddot{P}_e+[C_F]\dot{P}_e+[K_F]P_e=\{f_F\} \tag{1}$$

여기서, $[M_F]$, $[C_F]$, $[K_F]$는 각각 유체의 질량, 감쇠, 강성행렬을 의미하며 $\{f_F\}$는 음향 유체 내에서 외부가진 행렬을 의미한다. 또한, P_e는 음향 압력(Acoustic Pressure)을 의미한다.

또한, 음향-구조 연성해석은 식 (2)와 같이 구조물과의 완전 결합된(Fully Coupled) 동적 방정식[8]을 이용하여 압력파와 구조물의 응답을 동시에 계산한다.

$$\begin{bmatrix}[M_S] & 0\\ \overline{\rho_0}[R]^T & [M_F]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\ddot{u}_e\}\\ \{\ddot{p}_e\}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[C_S] & 0\\ 0 & [C_F]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\dot{u}_e\}\\ \{\dot{p}_e\}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[K_S] & -[R]\\ 0 & [K_F]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{u_e\}\\ \{p_e\}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\{f_S\}\\ \{f_F\}\end{Bmatrix} \tag{2}$$

여기서, $[M_S]$, $[C_S]$, $[K_S]$는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬을 의미하며$[M_F]$, $[C_F]$, $[K_F]$는 각각 유체의 질량, 감쇠, 강성행렬을 의미한다. 그리고 $\{f_S\}$는 구조물의 외부가진 행렬을 의미하고 $[R]$은 결합 행렬로 유체와 구조물 사이 연계지점에서의 결합조건을 나타낸다. 또한, ρ_0는 유체의 밀도를 의미하며 u_e는 구조물의 변위를 나타낸다.

Table 2 Pump condition of the analysis

Ref. 3			This Paper	
Freq. (Hz)	Pump		Freq. (Hz)	Pump
20	All	1A,2B	20	1A
				1B
		2A,1B		2A
				2B
40	All	1A,2B	40	1A
				1B
		2A,1B		2A
				2B
120	All	1A,2B	120	1A
				1B
		2A,1B		2A
				2B
240	All	1A,2B	240	1A
				1B
		2A,1B		2A
				2B
360	All	1A,2B	360	1A
				1B
		2A,1B		2A
				2B
480	All	1A,2B	480	1A
				1B
		2A,1B		2A
				2B

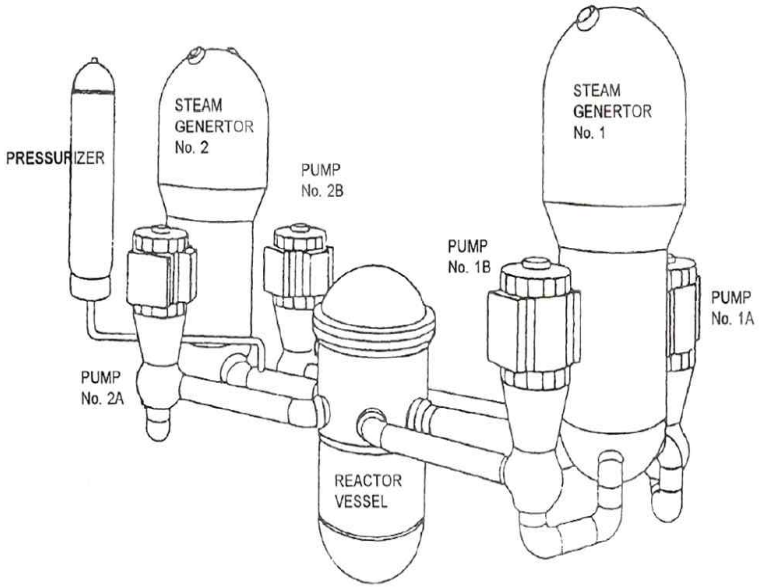


Fig. 4 Layout for the Reactor Coolant System[10]

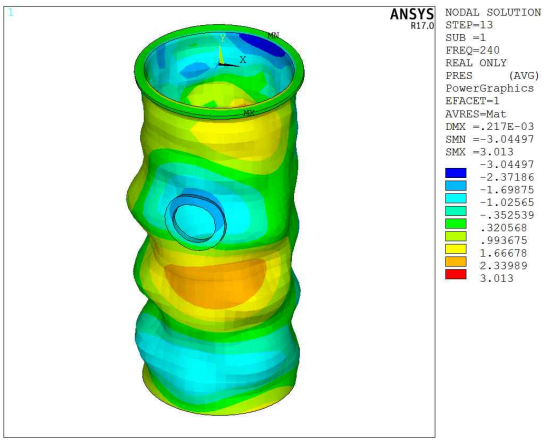


Fig. 5 Pressure distribution response to pump pulsation loads (240Hz)

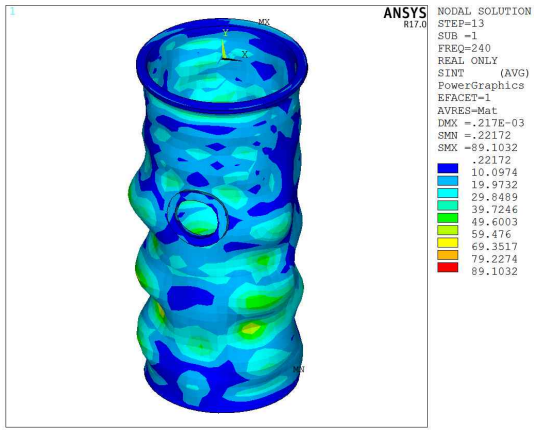


Fig. 6 Stress intensity response to pump pulsation loads (240Hz)

3.2 노심지지배럴에 대한 해석조건

본 논문에서는 앞 절 식 (2)의 유체와 구조물이 완전 결합된 동적 방정식을 이용하였으며, 원자로용기 입구노즐에서의 압력을 외부 가진력으로 입력하여 노심지지배럴의 압력분포와 응답을 동시에 계산하였다. 노심지지배럴에 대한 응답해석을 위해 사용된 입구노즐에서의 가진압력으로는 CVAP 측정 자료[5]를 이용하였다. 측정 압력은 불규칙적 성분과 주기적 성분이 포함되어 있는데, 주기적 성분은 20/40/120/240/360/480 Hz 주파수별로 분류되어 있다. 본 논문에서는 이렇게 주파수별로 분류된 주기적 성분을 조화해석을 통해 응답을 계산하였다.

Moon 등[3]은 Table 2와 같이 1/2 대칭모델에 입력할 수 있는 2개의 펌프 위상을 동일하거나 또는 180° 차이가 나도록 해석조건을 지정하였다. 하지만, 본 논문에서는 Full 모델을 사용하여 4개의 펌프 가진함수에 대해 각각 독립적으로 응답해석을 수행하고, 후처리 작업에서 각 운전 모드별 응답을 조합하여 실제 운전조건에 보다 부합하는 해석 조건을 고려하였다. 따라서 본 논문에서는 펌프의 위상차를 고려한 해석을 수행하여 Table 2와 같이 펌프의 위치에 따라 1A, 1B, 2A, 2B로 표기하였다. 펌프를 포함한 원자로냉각재 시스템의 배치도[10]는 **Fig. 4**에 나타내었다.

Table 3 Maximum Stress Intensity of the CSB(SRSS Combination)
(unit : psi)

CSB	Nominal	+10% Shifted	-10% Shifted
Upper Flange	74	82	99
Upper Cylinder	75	99	111
Nozzle Cylinder	89	90	117
Center Cylinder	114	97	81
Lower Cylinder	78	92	71
Lower Flange	46	55	54

Table 4 Maximum Stress Intensity of the CSB(Absolute Sum Combination)
(unit : psi)

CSB	w/o Core	with Core
Upper Flange	328	314
Upper Cylinder	316	309
Nozzle Cylinder	336	316
Center Cylinder	238	336
Lower Cylinder	219	215
Lower Flange	177	172

3.3 노심지지배럴에 대한 해석결과

Fig. 5 및 6은 1개 펌프의 240 Hz 가진함수에 대한 노심지지배럴 압력 및 응력강도의 분포를 나타내며, 펌프 맥동하중에 대한 노심지지배럴의 전형적인 응답 형태를 보여준다. Table 3은 후처리 작업을 통해 조합된 최대 응력강도를 나타낸다. 4개의 펌프로 인한 최대응답이 동시에 발생하지 않는다는 가정하에 Table 2의 조건에 따라 계산된 응답을 SRSS(Square Root of the Sum of the Squares) 조합한 것으로 실제 CVAP 조건과 유사하다고 판단할 수 있다. 추가로 해석적 불확실성을 고려하기 위해 가진함수의 주파수를 ±10% 증감시켜(Shifted) 평가하였다. Table 3의 해석결과는 CVAP 응력 측정자료[5]보다 약 2~3배 정도 크게 나타남을 확인하였다. 전술한 바와 같이 펌프별 가진함수 위상의 불확실성을 적절히 고려하기 위해 펌프별 가진함수에 대한 각각의 응답해석을 별도로 수행한 후 조합하였다. 그러므로 실제 운전조건은 4개 펌프의 6개 가진주파수가 관심지점에서 모두 동일한 위상을 가질 수도 있고, 모두 다른 위상을 가질 수 있다. 또한 측정 위치는 해석 결과의 최대응답 발생지점과 일치하지 않을 수 있다. CVAP 수행 시에 측정 위치의 제한이나 가용한 측정 자료 부족 등으로 인한 불확실성을 고려한다면 노심지지배럴에 대한 CVAP 측정결과와 해석결과는 타당한 것으로 판단된다.

해석적인 관점에서 4개 펌프로 인한 최대응답이 동시에 발생할 수도 있고, 각 주파수 가진함수로 인한 최대응답도 동시에 발생할 수 있기 때문에 Table 4와 같이 절대합의 조합을 통해 결과를 산출했다. 절대합의 조합은 SRSS 보다 보수적인 결과를 얻을 수 있음은 물론, 낮은 가능성이지만 4개 펌프 위상의 동시성을 고려할 수 있으므로 SRSS 조합 방법에 비해 보다 바람직한 방법으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 노심지지배럴의 유한요소모델을 개발하였으며, 음향-구조 연성해석을 통해 펌프 맥동하

중에 대한 응답을 계산하는 방법을 제시하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 노심지지배럴에 대해 주변의 구조물과 유체 영향을 고려한 최적의 해석 모델을 개발하였으며, 첫 번째 고유진동수가 실제 CVAP 측정 자료와 거의 동일함을 확인하였다.

(2) 펌프 맥동하중에 대한 노심지지배럴의 응답 계산을 위해 펌프 위상차를 고려한 음향-구조 연성해석 기법을 적용하여 압력파의 전달과 구조물의 응답을 동시에 구하였으며, 응력 결과가 실제 측정 자료와 유사함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 모델링 및 해석 방법론이 펌프 맥동하중에 대한 노심지지배럴의 응답 계산에 활용할 수 있는 효율적인 방안이 될 것으로 기대한다.

참고문헌

(1) US NRC, 2017, Regulatory Guide 1.20, Rev.4, “Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals During Preoperational and initial Startup Testing.”

(2) Kim, K. H., 2011, “원자로냉각재 펌프 맥동에 대한 APR1400 원자로내부구조물의 진동 및 응력계산,” 한국소음진동공학회 논문집, 제 21권, 제 2호, pp. 1098 ~ 1103.

(3) Moon, J. S., Kim, J. G., Sung, K. K. and Lee, D. H., 2015, “Acoustic Structure Interaction Analysis of the Reactor Internals for Pump Pulsation Loads,” KPVP.

(4) Soon Mok Lee, 2014, "Optimal Shape Design of Pyeongyeong Considering Structural and Acoustical Characteristics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng A*, Vol.38, No.3., page 8.

(5) Combustion Engineering, Inc., 1985, “A Comprehensive Vibration Assessment Program for Palo Verde Nuclear Generating Station Unit 1 (System 80 Prototype).”

(6) Park, J. B., 2014, “Modal Characteristics Analysis of the APR1400 Nuclear Reactor Internals for Seismic Analysis,” *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.46, No.5.

(7) Fritz, R. J., 1971, “The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids,” *ASME Publication*, 71-Vibr-100.

(8) ANSYS, Inc., 2012, "ANSYS theory manual," ANSYS Ver. 12.

(9) KAERI, 2016, “http://mdportal.kaeri.re.kr/nuclear-materials/655-d20150026.”

(10) KAERI, 2016, “http://mdportal.kaeri.re.kr/nuclear-materials/657-d20150028.”