2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 유동관에 대한 동적유체질량 평가

Assessment for Hydrodynamic Masses of HANARO Flow Tubes

류정수, 김두기, 박진호, 조영갑, 우종섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

수중에 잠긴 하나로 육각형 유동관에 작용하는 유체에 의한 동적유체질량이 유동관의 동적거동과 지진응답에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 우선 유동관의 주변 유체를 유한요소로 모형화하여 수중에 잠긴 유동관의 단위길이당 작용하는 동적유체질량을 구하였다. 유한요소법으로 구한 동적유체질량을 사용하여 수중에 잠긴 실제의 육각형 유동관에 대하여 동특성해석과 응답스펙트럼해석을 수행하고 유동관의 모우드실험으로부터 계측한 결과와 비교 검증하였다. 여러가지 방법을 사용하여 유동관에 작용하는 유체의 동적유체질량을 구한 후, 이를 사용하여 수중에 잠긴 유동관을 지진응답해석을 수행하였다. 여기서 구한 결과들을 비교 평가하여 유동관의 동적해석에 실제로 사용할 수 있는 집중(lumped) 동적유체질량의 적합한 기준을 제시하였다.

Abstract

The effect of hydrodynamic masses is investigated in dynamic characteristics and seismic response analyses of the submerged HANARO hexagonal flow tubes. Consistent hydrodynamic masses of the surrounding water are calculated by the finite element method, in which arbitrary cross-sections of submerged structures and boundary conditions of the surrounding fluid can be considered. Then, modal analyses and response spectrum analyses are performed using hydrodynamic masses obtained from infinite and finite ideal fluid assumptions and are verified by comparing the results measured from modal tests. Practical criteria based on parametric studies are proposed as the lumped hydrodynamic masses for HANARO flow tubes.

1. 서 론

하나로(HANARO)의 노심내 구조물은 수중에 잠긴 23개의 육각형 유동관과 8개의 원형 유동관으로 구성되어 있으며, 유동관의 내부는 핵연료로 장전되어 있다. 유동관의 주요기능은 핵연료를 지지하는 것으로 유체유발진동이나 지진하중을 받을 경우에 유동관들끼리의 충돌이 발생되지 않아야 한다.[1]

수중에 잠긴 유동관에 대한 동특성해석을 수행할 경우에 유체와 유동관들 사이의 동적 상호작용의 효과를 엄밀하게 고려하여야 한다. 이를 위해서는 유체-구조물 상호작용을 고려한 3차원 해석을 수행하여야 한다. 그러나, 원자로 노심구조물은 수중에 잠긴 매우 복잡한 구조물이므로, 엄밀한 3차원 유체-구조물의 상호작용해석은 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서, 유체가 구조물의 동적거동에 미치는 영향을 간략화된 방법으로 고려하기 위하여 단위길이당 유동관에 작용하는 동적유체질량을 산정한 후, 유동관의 질량에 부가 집중질량으로 더하여 사용할 수 있다.[2,3]

구조물의 동적유체질량을 구하는 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫번째 방법으로서 무한유체에 놓인 단순한 형상의 구조물에 대하여 해석적인 방법으로 동적유체질량을 구할 수 있다.[4] 이 방법은 간편한 공식 등을 사용하여 쉽게 구조물의 동적유체질량을 구할 수는 있으나, 다중 구조물의 경우에 구조물간의 상호작용과 구조물의 복잡한 단면형상과 함께 유체의 다양한 경계조건을 고려하기가 어렵다. 두번째 방법으로서 구조물의 주변 유체를 유한요소로 모형화하여, 구조물의 단위길이당 작용하는 동적유체질량을 구하는 방법이다.[5] 이 방법은 다양한 구조물의 형상과 경계조건을 고려할 수는 있으나, 다중 구조물의 경우에 Consistent 동적유체질량으로 산정되므로, 구조물의 부가질량으로서 상용전산프로그램에서 쉽게 사용할 수 있는 집중(lumped) 동적유체질량으로 적용하기가 매우 어렵다.

본 연구에서는 수중에 잠긴 하나로 육각형 유동관에 작용하는 동적유체질량을 산정하고 평가하여 유동관의 동적거동과 지진응답에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 우선 유동관의 주변 유체를 유한요소로 모형화하여 수중에 잠긴 유동관의 단위길이당 작용하는 동적유체질량을 구하였다. 이를 사용하여 수중에 잠긴 육각형 유동관의 동특성해석을 수행하고, 실물 실험모형을 만들어 고유진동수 측정실험[6] 결과와 비교 평가하였다. 그리고 유동관에 작용하는 동적유체질량을 여러 방법으로 산정하고 평가하여 동특성해석과 지진응답스펙트럼해석을 수행하였으며, 해석 결과들로부터 유동관의 동특성해석에 사용될 수 있는 집중 동적유체질량의 적합한 기준을 제시하였다.

2. 동적유체질량

2.1 정의

정지(靜止) 중인 유체에 놓인 구조물의 운동은 유체압을 발생시키며, 이때 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \tag{1}$$

여기서 M, C, K는 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬; X, $\dot{X}$, $\ddot{X}$는 구조물의 응답으로 각각 변위벡터, 속도벡터, 가속도벡터; 그리고, F는 구조물에 작용하는 유체압으로 다

음과 같이 나타낼 수 있다.[7]

$$F = - M_a \ddot{X} - C_v \dot{X} \tag{2}$$

여기서 M_a와 C_v는 각각 유체의 동적유체질량행렬과 감쇠계수행렬이며, 동적유체질량과 구조물의 질량의 합을 구조물의 가상질량(virtual mass) 혹은 겉보기 질량(apparent mass)이라고 한다. 유체의 동적유체질량은 구조물의 고유진동수에 주로 영향을 주고, 유체의 감쇠계수는 구조물의 운동속도에 따른 거동의 감쇠에 영향을 미치며, 비점성 유체의 경우에 C_v는 영(零)행렬이다.

2.2 유한요소법을 사용한 정식화

동적유체질량에 관한 개념은 1843년 Stoke[8]에 의해 처음으로 제안된 후, Fritz[9]에 의해 구조물의 동적해석에 사용되었다. Chen[10]은 원형관의 배열에 대한 해석적인 해를 구했으며, Levy와 Wilkinson[11]은 유한요소법을 사용한 수치해를 구하였다. 동적유체질량의 기본개념은 유체 중에서 구조물의 운동에 의해 변형된 유체의 운동에너지의 증가이다. 이러한 유체의 운동에너지의 증가는 구조물의 동적해석시에 반드시 고려해야 하며, 구조물의 실질적인 질량을 증가함으로써 고려된다. 일반적으로 동적유체질량을 유도하기 위한 가정으로서 유체는 비점성/비압축성의 이상유체이며, 대변형 등과 같은 유체의 비선형성은 무시한다. 대개 핸드북을 이용하면 간단한 구조물의 단면형상에 대해서는 동적유체질량을 구할 수는 있지만, 다양한 구조물의 단면형상, 유체의 경계조건, 그리고 다중구조물의 상호작용의 효과 등을 고려한 동적유체질량을 구하기는 어렵다. 하나로 유동관의 경우에는 유동관들 사이의 간격이 2.5 mm로 설계되어 있으므로 유동관들 사이의 상호작용과 간극수의 경계조건 등을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 구조물의 임의의 단면형상과 유체의 경계조건에 대하여 동적유체질량을 구하였다.

구조물의 단위길이당 작용하는 유체의 동적유체질량을 구하기 위해, 우선 구조물의 단위가속도운동에 의해 구조물과 인접한 경계면에서의 유체에 발생하는 압력을 산정한다. 여기서 구한 압력을 인접면에 대하여 적분을 하면 동적유체질량을 구할 수 있다. 인접면에서의 구조물의 단위가속도 운동에 의한 구조물에 작용하는 유체압을 구하기 위해 다음과 같은 Laplace 방정식을 푼다.

$$\nabla^2 p = 0 \quad \text{in} \quad V \tag{3a}$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = - \rho a_n \quad \text{on} \quad S \tag{3b}$$

여기서 V와 S는 유체영역과 구조물과 유체의 경계면; ∇^2은 Laplace 연산자; p는 유체압; n은 구조물과 유체의 경계면에 연직한 법선방향벡터; a_n은 구조물의 가속도운동의 크기이다. 식 (3a)와 (3b)를 유한요소법을 사용한 근사적인 방정식을 구하면 아래와 같다.

$$KP = R \tag{4}$$

여기서 시스템 행렬 K와 벡터 R은 요소들의 조합으로부터 구할 수 있으며, P는 유체의 압력벡터이다.

$$K = \sum_e k^e \tag{5a}$$

$$R = \sum_e r^e \tag{5b}$$

여기서 k^e와 r^e는 각각 요소들로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$k_{ij}^e = \int B_i^T B_j d\Omega^e \tag{6a}$$

$$r_i^e = \rho \int_{S^e} N_i^T dS^e \tag{6b}$$

여기서 윗첨자 e는 요소수준을 나타내고, 아랫첨자 i와 j는 절점 i와 j를 나타낸다. N_i은 i 번째 형상함수이고, B_i는 변위-변형도 행렬로서 형상함수 N_i의 1차 미분값이다. 동적유체질량은 식 (4)에서 구한 구조물에 작용하는 압력의 적분 합으로 단위가속도(a_n=1) 작용 시에 다음과 같다.[5]

$$M_a = \int_S P\,dS \tag{7}$$

2.3 수치적 검증

그림 1과 같은 동심(同心)을 갖는 2개의 육각형 실린더(tube 1과 tube 2)의 간극이 물로 채워져 있다. 간극수에 의한 2개의 단위길이당 실린더에 작용하는 Consistent 동적유체질량을 그림 1과 같이 선형 사각형 유한요소로 모형화하여 구한 후에, 선형 삼각형 유한요소를 사용한 Chung과 Chen[3]에 의한 결과와 서로 비교/검증하였다. 표 1에 보인 바와 같이 두 결과가 서로 잘 일치함으로써, 본 연구에서 유동관의 동적유체질량을 산정하기 위해 사용할 유한요소법을 검증할 수 있었다. 여기서 유한요소법을 사용하여 다중 구조물의 동적유체질량을 구할 경우에 집중질량의 형태가 아닌, 구조물 상호간에 영향을 고려할 수 있는 Consistent 동적유체질량이다. 그림 1에서의 길이의 단위는 cm이며, 해석에 사용한 물의 단위중량은 1 g/cm^{3}이다. 또한, 표 1에서 자유도의 아랫첨자는 각각 실린더 tube 1과 tube 2를 나타내며, 해석결과인 유체의 동적유체질량의 단위는 g/cm이다.

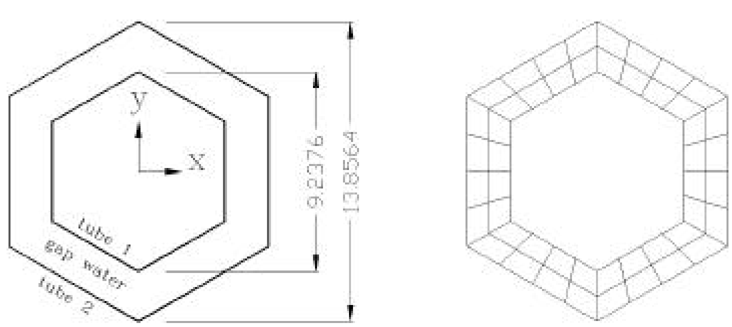


그림 1 동심을 갖는 2개의 육각형 실린더와 간극수의 유한요소모형

표 1 동심을 갖는 2개의 육각형 실린더에 대한 동적유체질량 행렬의 비교 (g/cm)

일련번호	Chung & Chen				Present study			
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_1	y_1	x_2	y_2
x_1	**14.852**	-0.00	-20.395	0.00	**14.940**	-0.00	-20.482	0.00
y_1	0.00	**14.835**	-0.00	-20.379	-0.00	**14.940**	0.00	-20.482
x_2	-20.395	0.00	**32.867**	-0.00	-20.482	0.00	**32.952**	-0.00
y_2	-0.00	-20.379	0.00	**32.850**	0.00	-20.482	-0.00	**32.952**

3. 지진응답스펙트럼 해석

3.1 기본가정 및 실험모형

유동관의 고유진동수의 측정을 위해 제작한 실험모형은 그림 2와 같으며, 사용된 육각형 유동관은 하나로에서 사용하고 있는 유동관과 동일하며 단면은 그림 3과 같다. 외부 아크릴 원통 내부에 7개의 실제의 육각형 유동관을 2.5 mm의 순간격(clearance)으로 설치한 후에, 물로 채워서 모두 잠기게 하였다.[6] 외부 아크릴 통은 높이가 1200 mm로 수중에 유동관을 충분히 담을 수 있으며, 유동관 7개를 모두 포함할 수 있도록 내경을 270 mm로 하였고, 유동관의 두께인 1.6 mm에 비해 상대적으로 충분한 횡방향 휨강성을 갖도록 두께를 15 mm로 하였다. 여기서 유동관의 재질은 Zircaloy로써 질량밀도와 탄성계수는 각각 6555 kg/m^{3}과 9.5143×10^{10} Pa이다.

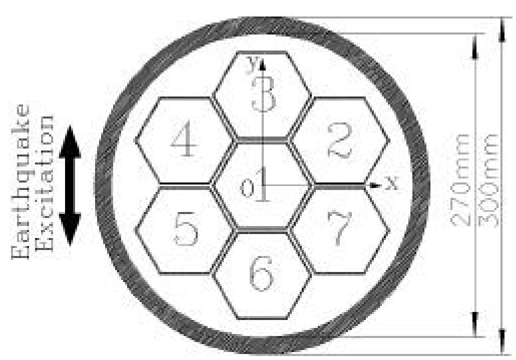


그림 2 육각형 유동관의 고유진동수 측정 실험모형 (평면도)

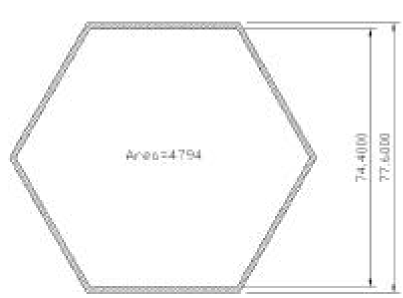


그림 3 육각형 유동관의 단면형상 (mm)

지진응답스펙트럼 해석을 수행하기 위한 기본 가정들은 아래와 같다.

(1) 유체는 비점성, 비압축성 물로써 단위중량은 1000 kg/m^3 이다.

(2) 유동관의 연직방향과 원주방향으로의 강성은 횡방향으로의 강성보다 매우 크므로, 횡방향으로의 휨진동모우드만을 해석하였다. 그림 2에 보인 바와 같이 유동관의 휨강성이 상대적으로 작은 y 방향으로 발생하는 것으로 가정하였다.

(3) 아크릴 원통의 휨강성은 유동관의 휨강성보다 상대적으로 매우 크므로 아크릴 원통과 접하는 유체의 경계조건은 고정경계로 가정하였다.

(4) 유체의 동적유체질량을 구할 때, 유체에 비해 강성이 매우 큰 아크릴 원통과 유동관을 강체라고 가정하였다.

(5) 보수적인 응답스펙트럼해석을 위해 유동관의 침수가 유동관의 구조적 감쇠에 미치는 영향을 무시하였으며, 구조물의 모드별 감쇠는 3%로 가정하였다.

(6) 수평방향 SSE지진의 크기는 0.2g이며, 이때의 사용된 가속도 층응답스펙트럼(FRS)은 그림 4와 같다.[12]

(7) 구조물의 최대응답은 SRSS법을 사용하여, 모든 모드별 응답을 조합하였다.

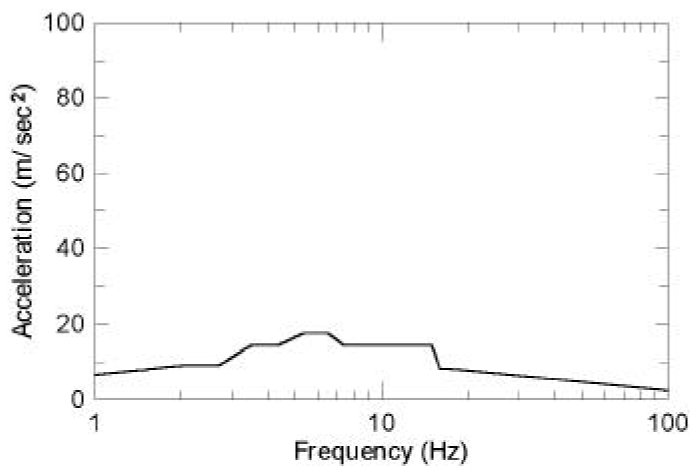


그림 4 유동관의 가속도 층응답스펙트럼

3.2 단일 육각형 유동관

단일 육각형 유동관을 보요소를 사용하여 그림 5와 같이 세분화한 후에 모우드해석과 지진응답스펙트럼해석을 수행하였다. 모우드해석에서 구한 고유진동수를 캔틸레버 보의 고유진동수에 관한 공식으로 구한 결과 및 다중 유동관에서의 계측결과와 서로 비교하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 여기서 고유진동수실험 결과는 다중 유동관들의 상호간의 작용이 고려된 결과로 그림 2의 1번 유동관에 가속도계를 설치한 후에, 공기중과 수중에서 진동가속도를 계측하여 분석한 결과이다.[6] 그리고, 수중에 잠긴 유동관에 대하여 외부유체는 무한유체로 가정하여 구한 해석적인 동적유체질량[4]을, 내부유체는 유동관내에 포함된 물의 질량을 사용하였다. 따라서, 유동관에 작용하는 단위길이당 동적유체질량(M_a)은 아래와 같다.

$$
\begin{aligned}
M_a &= M_i + M_o \\
&= \rho A_i + 0.867 \rho \pi R_o^2 \\
&= (1000 kg/m^3)(4.794 \times 10^{-3} m^2) + 0.867\pi(1000 kg/m^3)(0.0448 m)^2 \\
&= 4.794 kg/m + 5.467 kg/m \\
&= 10.261 kg/m
\end{aligned} \quad (8)
$$

여기서 M_i와 M_o는 각각 유동관의 내부/외부의 동적유체질량이고, A_i와 R_o는 유동관의 내부 면적과 외경이다.

표 2 단일 육각형 유동관의 고유진동수의 비교 (Hz)

방법 \ 모형	공기중		수중	
	1차	2차	1차	2차
유한요소법	**58.2**	363	**26.3**	168
공식	**58.2**	365	**26.8**	165
고유진동수실험	**58.5**	328	**29.0**	159

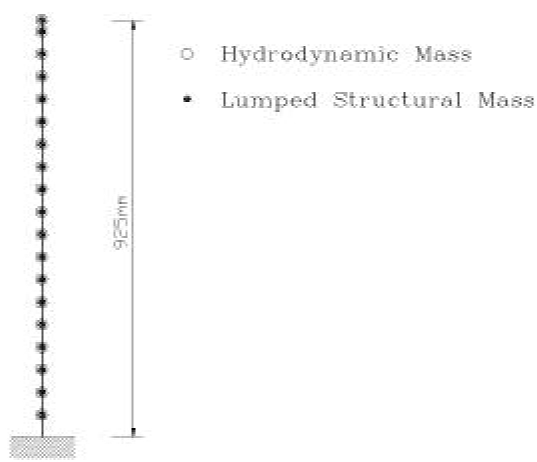


그림 5 보요소를 사용한 유동관의 모형화

표 2에 보인 바와 같이 유한요소법의 모우드해석으로 구한 유동관의 1차 고유진동수는 공식으로 구한 결과와 서로 잘 일치하였으므로, 본 연구에서 사용한 유한요소법의 모우드해석을 검증할 수 있었다. 그러나 고유진동수실험 결과와 비교했을 때 공기중에서는 서로 잘 일치하였으나, 수중에서는 차이를 나타내었다. 이러한 차이는 모우드해석과 공식에서 사용한 유동관에 작용하는 동적유체질량은 유동관의 순간격과 유동관들간의 상호작용의 영향을 고려하지 않았으므로, 동적유체질량이 실제보다 크게 평가되었기 때문인 것으로 판단된다. 여기서 유동관의 고유진동수를 구하기 위해 사용된 공식은 다음과 같다.

$$f_i = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{\lambda_i}{L}\right)^2 * \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad ; \quad i = 1, 2... \tag{9}$$

여기서 f_i는 i번째 고유진동수(Hz)이고, L, EI, m은 유동관의 길이와 휨강성 그리고 단위길이당 질량이며, λ_i는 i번째 고유진동수와 관련된 상수이다.

그림 6에는 유한요소법을 사용하여 구한 수중에서의 유동관의 모드형상을 나타내었고, 이때의 모드형상은 일반질량으로 정규화하였다. 그림 7에는 응답스펙트럼해석으로 구한 공기중과 수중에서의 유동관의 최대변위를 보이고 있다. 본 논문에서는 응답스펙트럼해석을 수행하였으나 비선형성이 큰 동적모델에서는 시간영역해석[13]을 수행할 수 있다. 그림 6과 그림 7에서 알 수 있듯이, 유동관의 최대변위에 주로 고유진동수가 작은 1차 모드가 영향을 주는 것을 알 수 있으며, 수중 유동관의 최대변위는 다중 유동관들간의 상호작용을 고려하지 않은 보수적인 결과이지만, 공기중에서보다 수중에서의 유동관의 최대변위가 6.61배(=0.291/ 0.044)나 크게 증가하였다. 이는 수중에서 유동관의 고유진동수가 동적유체질량의 부가로 공기중에서보다 급격히 감소하였으며, 유동관의 고유진동수의 감소는 그림 4에 보인 유동관의 가속도 층응답스펙트럼에서 알 수 있듯이 응답의 증가를 가져오기 때문이다.

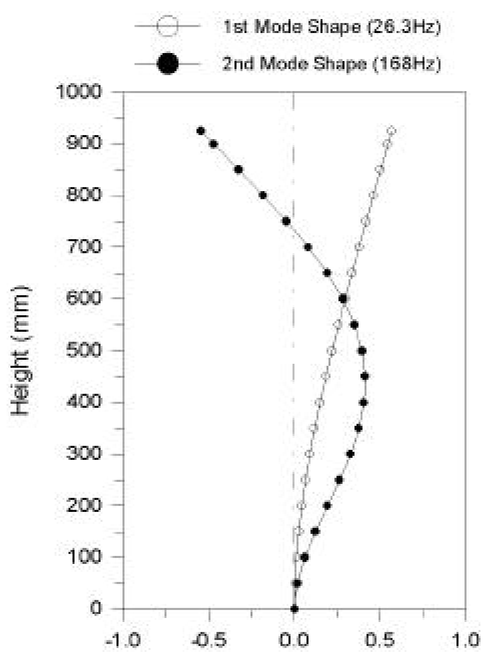


그림 6 수중에서의 유동관의 모드형상

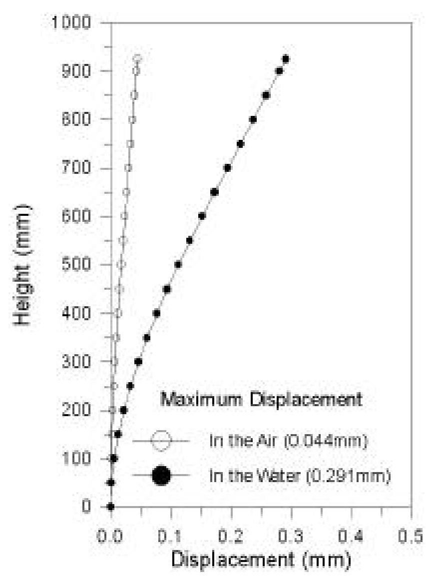


그림 7 단일 유동관의 최대변위

3.3 동심 육각형 유동관

수중 유동관들간의 순간격이 유동관의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해, 그림 8과 같이 동심을 갖는 유동관의 간극수에 의한 동적유체질량의 영향에 대해 검토하였다. 내부

유동관의 단위길이당 작용하는 간극수에 의한 동적유체질량을 표 3에 보인 4가지의 경우와 같이 설정하였다. 경우 2에서는 그림 8과 같이 유한요소로 모형화하였으며, 간극수의 외부경계조건은 고정경계(fixed)이고, 내부경계조건은 자유경계(free)로 가정하였다. 여기서 유동관 내부유체의 동적유체질량은 단일 육각형 유동관과 동일한 값을 사용하였다.

표 3 동심 육각형 유동관 간극수에 의한 동적유체질량의 산정방법

경우	동적유체질량 (kg/m)	산정방법
1	0.695	간극수의 총질량
2	0.323	유한요소법으로 구한 y 방향으로의 간극수의 동적유체질량
3	5.467	간극수를 무한유체로 가정했을 경우에 구한 동적유체질량
4	2.733	경우 3에서 구한 동적유체질량의 50%

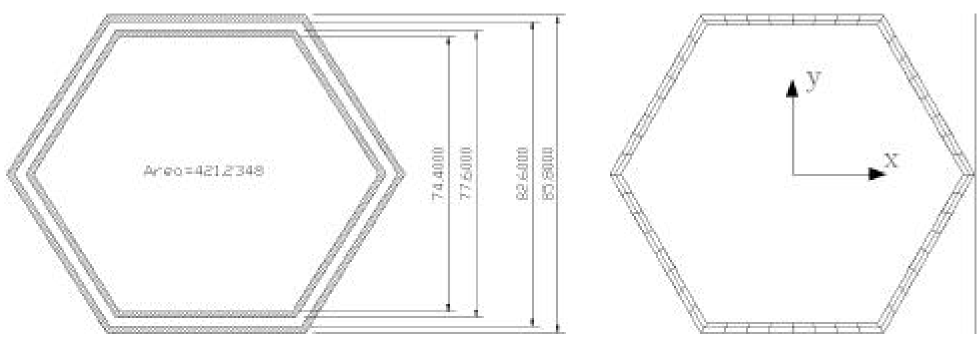


그림 8 동심을 갖는 유동관(mm)과 간극수의 유한요소 모형화

표 4와 그림 9에 표 3의 4가지 경우에 대하여 유동관의 첫번째 고유진동수와 최대변위를 나타내었다. 경우 1과 2를 사용하여 구한 유동관의 첫번째 고유진동수는 계측한 고유진동수인 29Hz보다 큰 값을 나타내었고, 경우 3은 작은 값을 보였으며, 경우 4의 결과가 계측치와 가장 근사한 값을 나타내었다. 즉, 경우 1과 2는 실제보다 과소한 최대변위를 나타낼 것으로 예상되고, 경우 3은 유동관의 최대변위에 대하여 너무 보수적인 결과를 줄 것으로 판단되며, 경우 4가 실제와 가장 근사한 값을 주는 것으로 판단되었다.

표 4 동심 안쪽 유동관의 첫번째 고유진동수의 비교 (Hz)

	계측	경우			
		1	2	3	4
동적유체질량 (kg/m)		0.695	0.323	5.467	2.733
고유진동수 (Hz)	29.0	33.1	33.9	26.3	29.6

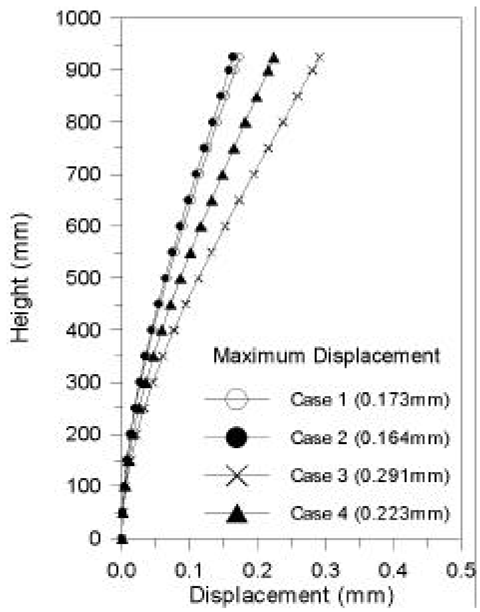


그림 9　**동심 안쪽 육각형 유동관의 최대변위**

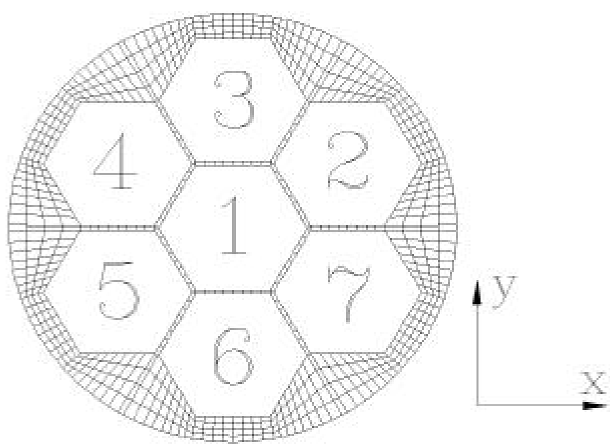


그림 10　**다중 유동관의 간극수에 대한 유한요소 모형화**

3.4 다중 육각형 유동관

다중 유동관에서의 간극수에 의한 동적유체질량이 유동관의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해, 그림 2**에 보인 고유진동수 측정 실험모형에 대해 응답스펙트럼해석을 수행하였다. 표** 5**에 보인 바와 같이 간극수의 동적유체질량을** 3**가지의 경우로 산정하였다. 경우** 1**은 그림** 10**과 같이 선형 삼각형 및 사각형 유한요소로 간극수를 모형화하여서, 간극수에 의한** Consistent **동적유체질량을 구하였으며,** y **방향으로의 동적유체질량을 표** 6**에 나타내었다. 여기서 사용한 유동관의 일련번호는 그림** 2**와 그림** 10**에 보인 유동관의 번호와 동일하다. 일반적으로 상용전산구조해석용 프로그램에서는 부가질량으로 집중질량을 사용한다. 따라서 경우** 2**는** 3.2**절에서 구한 외부유체에 관해 산정한 무한유체에서의 동적유체질량을 사용하였다. 경우** 3**은 경우** 2**에서 구한 유동관 외부의 동적유체질량의** 50%**를 사용하였다. 여기서도**

각 유동관 내부의 동적유체질량은 앞에서와 같은 값을 사용하였다.

표 5 다중 육각형 유동관 간극수에 의한 동적유체질량의 산정방법

경우	산정방법
1	유한요소법을 사용하여 구한 Consistent 동적유체질량 (표 6 참조)
2	간극수를 무한유체로 가정했을 경우에 공식으로 구한 동적유체질량
3	경우 3에서 구한 동적유체질량의 50% (Mo=2.733kg/m)

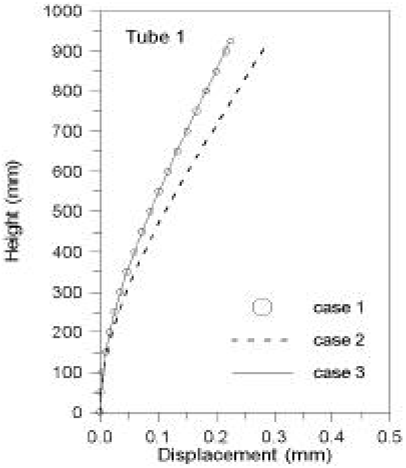
표 6 Consistent 동적유체질량 행렬 (kg/m)

일련번호	1y	2y	3y	4y	5y	6y	7y
1y	**51.52**	-0.17	-24.35	-0.16	-0.17	-24.34	-0.17
2y	-0.17	**18.06**	4.39	1.12	-1.11	-5.84	-14.61
3y	-24.35	4.40	**33.12**	4.32	-5.73	-5.89	-5.84
4y	-0.16	1.12	4.32	**17.58**	-14.02	-5.75	-1.11
5y	-0.17	-1.11	-5.73	-14.02	**17.35**	4.30	1.12
6y	-24.34	-5.84	-5.89	-5.75	4.30	**33.00**	4.41
7y	-0.17	-14.61	-5.84	-1.11	1.12	4.41	**18.06**

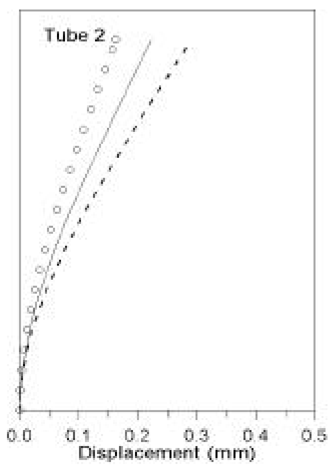
표 5의 3 가지 경우로 구한 간극수의 동적유체질량을, 보요소로 모형화한 7개의 유동관에 분포시킨 후에, 응답스펙트럼해석을 수행하였다. 유동관의 첫번째 고유진동수는 경우 3의 29.6 Hz의 고유진동수는 유동관 1번의 고유진동수 측정치인 29.0 Hz와 매우 유사하다. 응답스펙트럼해석으로부터 유동관들의 최대변위를 표 7과 그림 11에 보였다. 경우 1의 경우는 가장 엄밀한 응답스펙트럼해석으로서 고정경계조건으로 가정한 아크릴 원통의 영향을 가장 적게 받는 1번 유동관에서 가장 큰 최대변위(0.225 mm)가 발생하였다. 경우 2는 유동관 외부의 유체를 무한유체로 가정한 것으로 가장 큰 유동관 변위(0.291 mm)를 나타냈으며, 경우 3은 유동관의 최대변위(0.223 mm)에 대해 보수적이면서도 경우 1의 경우와 가장 근접한 결과를 보였다. 따라서 육각형 유동관에 대한 동적해석시 무한유체로 가정하여 구한 단일 유동관의 동적유체질량에 0.5의 보정계수를 사용하는 것이 매우 합리적인 값임을 알 수 있었다.

표 7 다중 유동관의 최대변위의 비교 (mm)

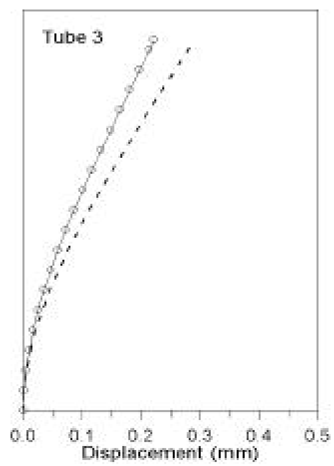
유동관 번호	경우 1	경우 2	경우 3
1	0.225	0.291	0.223
2	0.163		
3	0.222		
4	0.162		
5	0.163		
6	0.222		
7	0.163		



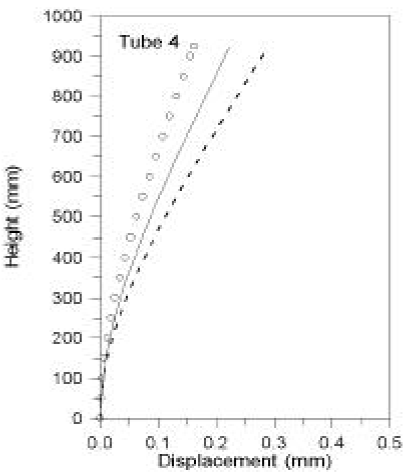
(가) 유동관 1



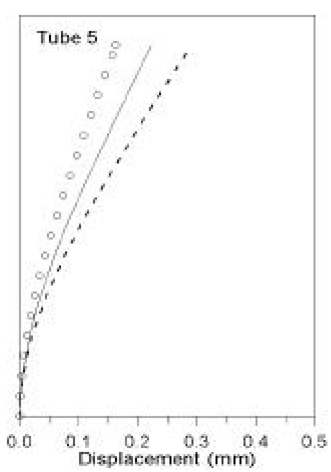
(나) 유동관 2



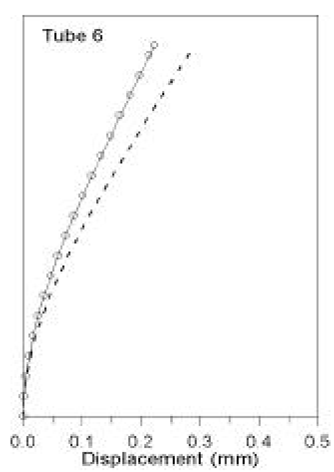
(다) 유동관 3



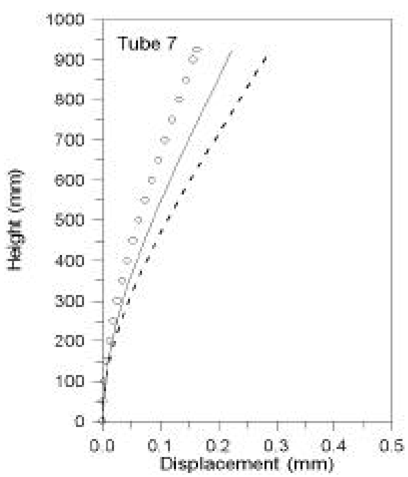
(라) 유동관 4



(마) 유동관 5



(바) 유동관 6



(사) 유동관 7

그림 11 다중 유동관의 최대변위 비교

4. 결 론

본 연구에서는 수중에 잠긴 하나로 유동관에 작용하는 유체에 의한 동적유체질량을 산정하여 평가한 후, 유동관의 동적거동과 지진응답에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 본 연구의 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1) 수중에 잠긴 유동관을 동적해석할 경우에 반드시 유체에 의한 동적유체질량을 고려하여야 하며, 무한유체에 잠긴 단일 육각형 유동관의 경우에 응답스펙트럼해석으로 구한 지진에 의한 최대변위응답이 공기중에서의 유동관에 비해 최대 6.6배나 증가하였다.
2) 수중에 잠긴 다중 유동관의 유체를 유한요소로 모형화하여 Consistent 동적유체질량을 구한 후에, 지진에 의한 유동관의 응답스펙트럼해석을 수행하였다. 주변 유체의 아크릴 원통에 의한 고정경계조건에 가장 영향을 적게 받는 가운데 유동관이 가장 큰 최대변위응답을 나타내었다.
3) 또한 유동관 외부의 유체를 무한유체로 가정한 경우는 지나치게 큰 변위를 보여주었고, 무한유체로 가정하여 구한 동적유체질량의 50%를 사용한 경우에서 유동관들의 최대변위가 Consistent 동적유체질량을 사용하여 해석한 경우와 가장 근접한 결과를 보여주었으며 보수적이다.
4) 따라서 육각형 유동관에 대한 동적해석시 무한유체로 가정하여 구한 단일 유동관의 동적유체질량에 0.5의 보정계수를 사용하는 것이 매우 합리적인 값임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 한국원자력연구소의 기관고유사업으로 수행되었다.

5. 참고 문헌

[1] 류정수, "*HANARO 핵연료 유동관의 동하중 해석 및 시험*", KAERI/TR-595/95, 한국원자력연구소, 1995.5.

[2] S.S. Chen and H. Chung, "*Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass; Part I: Circular Cylindrical Structures*", ANL-CT-76-45, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 1976.

[3] H. Chung and S.S. Chen, "*Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass; Part II: Non-Circular Cylindrical Structures*", ANL-CT-78-49, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 1978.

[4] R.D. Blevins, *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1979.

[5] J.F. Loeber, "*Consistent Hydrodynamic Mass for Parallel Prismatic Beams in a Fluid-Filled Container*", KAPL-4170, Knolls Atomic Power Laboratory, Schenectady, NY, 1983.

[6] 박진호, 김태룡, 류정수, "*하나로 핵연료집합체의 고유진동수 측정*",KAERI/RR-1810/97, 한국원자력연구소, 1998.1.

[7] S.S. Chen, M.W. Wambsganss, and J.A. Jendrzejczyk, "*Added Mass and Damping of a Vibrating Rod in Confined Viscous Fluids*", Trans. ASME 98; J. Appl. Mech. 43, 325-329, 1976.

[8] G.G. Stokes, "*On Some Cases of Fluid Motion*", Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Vol. 8, pp.105-137, 1843.

[9] R.J. Fritz, "*The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids*", Journal of Engineering for Industry, Vol. 94, 167-173, 1972.

[10] S.S. Chen, "*Vibrations of a Row of Circular Cylinders in a Liquid*", Journal of Engineering for Industry, Vol. 97, 1212-1218, 1975.

[11] S. Levy and J.PO.D. Wilkinson, "*Calculation of Added Water Mass Effects for Reactor System Components*", Transactions of the 3rd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper F2/5, 1975.

[12] J.K. Biswas, A.S. Banwatt, and S.A. Usmanl, "*Stress Analysis Interface Data for the Korea Multipurpose Research Reactor*", ACEL 37-31000-200-900, Rev.1, 1993.

[13] Myung Jo Jhung, Jong Keun Hwang, and Yeon Seung Kim, "Fuel Assembly Modelling for Dynamic Analysis of Reactor Internals and Core", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 27, No. 5, Oct. 1995.