

하나로 유동관의 동적유체질량

Hydrodynamic Masses of HANARO Flow Tubes

류 정 수*

김 두 기**

Ryu, Jeong-Soo

Kim, Doo Kie

(논문접수일 : 2000년 1월 12일 ; 심사종료일 : 2001년 10월 30일)

요 지

본 연구에서는 수중에 잠긴 하나로 유동관에 작용하는 유체에 의한 동적유체질량이 유동관의 동적 거동과 지진응답에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 우선 구조물의 주변 유체를 유한요소로 모형화하여 수중에 잠긴 유동관의 단위길이당 작용하는 동적유체질량을 구하였다. 유한요소법으로 구한 동적유체질량을 사용하여 수중에 잠긴 실제의 육각형 유동관에 관하여 동특성 해석과 지진응답스펙트럼 해석을 한 후에, 유동관의 동적특성실험으로부터 측정한 결과와 비교/검증하였다. 여러가지 방법을 사용하여 유동관에 작용하는 유체의 동적유체질량을 구한 후에, 이를 사용하여 수중에 잠긴 유동관을 동적 해석하였다. 여기서 구한 결과들을 비교/검토하여 실제의 하나로 유동관의 동적 해석에 사용할 수 있는 적합한 기준을 제시하였다.

핵심용어 : 동적유체질량, 유동관, 하나로, 유한요소법, 지진응답스펙트럼 해석

Abstract

In this study, the effect of hydrodynamic masses is investigated in the dynamic characteristics and earthquake response analyses of the submerged HANARO flow tubes. First, the consistent hydrodynamic masses of the surrounding water are obtained by finite element method. Then, modal analyses and response spectrum analyses are performed and verified by comparing the results with those measured from an experiment. Arbitrary cross-sections of submerged structures and boundary conditions of the surrounding fluid can be considered by using the general benefits of a finite element method comparing with the conventional analytical methods. Practical criteria based on parametric studies are proposed to evaluate the dynamic characteristics of HANARO flow tubes including the hydrodynamic masses.

Keywords : hydrodynamic mass, flow tubes, HANARO, finite element method, response spectrum analysis

1. 서 론

하나로(Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor: HANARO)의 노심내 구조물(Chimney Structures)은 Fig. 1과 같이 수중에 잠긴 23개의 육각형 유동관과 8개의 원형 유동관으로 구성되어 있으며, 유

동관의 내부는 핵연료로 장전되어 있다. 유동관의 주요 기능은 핵연료를 지지하는 것으로, 지진하중을 받을 경우에 유동관들 끼리의 충돌이 발생하지 않아야 하며, 이를 위해 유동관의 내진설계시에 유동관의 최대변위가 변위제한조건을 만족하여야 한다. 하나로 유동관의 내진설계시에는 유동관의 상단과 하단은 각각 자유단과

* 정희원 · 한국원자력연구소, 선임연구원

** 정희원 · 유니슨기술연구소, 선임연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2002년 3월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

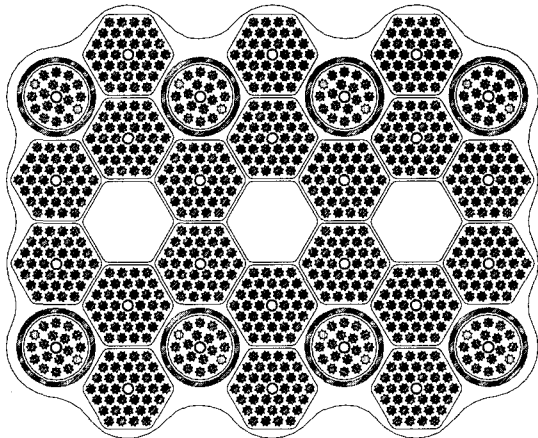


Fig. 1 하나로 원자로 노심내 구조물(평면도)

고정단으로 가정하며, 노심구조물의 외벽은 유동관에 비해 상대적으로 두께가 두껍고 휨강성이 매우 크므로, 일반적으로 고정경계조건을 사용한다. 또한, 유동관들 사이의 설계상 순간격이 2.5mm이므로, 유동관의 내진설계시에 상단의 최대변위가 1.25mm 이내로 제한변위조건을 사용한다.¹⁾

수중에 잠긴 유동관의 지진응답스펙트럼 해석을 할 경우에 유체와 유동관들 사이의 상호작용의 효과를 엄밀하게 고려하기 위해서는 유체와 구조물 상호작용을 고려한 3차원 해석을 하여야 한다. 그러나, 전술한 바와 같이 원자로 노심구조물은 수중에 잠긴 매우 복잡한 구조물이므로, 엄밀한 3차원 유체-구조물의 상호작용해석은 엄청난 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서, 실제 유동관의 내진설계시에는 유체가 구조물의 동적 거동에 미치는 영향을 고려하기 위해, 간략화된 방법으로 단위길이당 유동관에 작용하는 유체의 동적유체질량을 산정하여, 유동관의 질량에 부가질량으로 더하여 사용한다.^{2,3)} 유체의 동적유체질량을 구하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째 방법은 반무한 유체에 놓인 단순한 형상의 구조물에 대하여 해석적으로 동적유체질량을 구하는 방법이다.⁴⁾ 이 방법은 공식 등을 사용하여 쉽게 유체의 동적유체질량을 구할 수는 있으나, 다중 구조물(Multiple Structures)의 경우에 구조물간의 상호작용을 고려할 수 없으며, 구조물의 단면형상이 복잡한 경우와 다양한 경계조건을 갖는 경우는 고려하기 어렵다. 두번째 방법은 구조물의 인근 유체를 유한요소로

모형화하여 동적유체질량을 구하는 방법이다.⁵⁾ 이 방법은 다양한 구조물의 형상과 경계조건을 고려할 수는 있으나, 다중 구조물의 경우에 분포(Consistent) 동적유체질량으로 산정되므로, 구조물의 부가질량으로서 집중(Lumped) 질량을 사용하는 공인된 상용전산프로그램에 적용하기가 매우 어렵다. 따라서 현재 하나로 원자로 유동관의 내진설계시에는, 유동관들 사이의 상호작용효과와 순간격 등을 고려하여, 첫번째 방법을 사용하여 구한 유동관에 작용하는 동적유체질량의 50%를 사용하고 있다.¹⁾

본 연구에서는 수중에 잠긴 하나로 육각형 유동관에 작용하는 동적유체질량을 산정하고 평가하여 유동관의 동적 거동과 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 측정실험⁶⁾ 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 유한요소법을 사용한 정식화

정지(靜止) 중인 유체에 놓인 구조물의 운동은 유체압력을 발생시키며, 이때의 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

여기서 M , C , K 는 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이고, X , \dot{X} , \ddot{X} 는 구조물의 응답으로 각각 변위 벡터, 속도벡터, 가속도벡터이며, F 는 구조물에 작용하는 유체압력으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.²⁾

$$F = -M_f \ddot{X} - C_f \dot{X} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{M}_a 와 \mathbf{C}_v 는 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 미치고, 유체의 감쇠계수는 구조물의 운동속도에 따른 거동의 감쇠에 영향을 미치며, 비점성 유체의 경우에 \mathbf{C}_v 는 영(零)행렬이다.

동적유체질량에 관한 개념은 1843년 Stokes⁷⁾에 의해 처음으로 제안된 후, Fritz⁸⁾에 의해 구조물의 동적 해석에 사용되었다. Chen⁹⁾은 원형관의 배열에 대한 해석적인 해를 구했으며, Levy와 Wilkinson¹⁰⁾은 유한요소법을 사용한 수치해를 구하였다. 동적유체질량의 기본개념은 유체 중에서 구조물의 운동에 의해 변형된 유체의 운동에너지의 증가이다. 이러한 유체의 운동에너지의 증가는 구조물의 동적 해석시에 반드시 고려해야 하며, 이 경우에 증가된 구조물의 질량으로써 고려한다. 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. 따라서 하나로 유동관의 경우에는 유동관들 사이의 상호작용효과와 간극수의 경계조건 등을 고려하기 위해서, 본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 구조물의 임의의 단면형상과 유체의 경계조건에 대하여 동적유체질량을 구하였다.

구조물의 단위길이당 작용하는 유체의 동적유체질량을 구하기 위해, 우선 구조물의 단위 가속도운동에 의해 구조물과 인접한 경계면에서의 유체에 발생하는 압력을 산정한다. 여기서 구한 압력을 인접면에 대하여 적분을 하여 동적유체질량을 구하였다. 인접면에서의 구조물의 단위가속도 운동에 의한 구조물에 작용하는 유체압력을 구하기 위해 다음과 같은 Laplace 방정식을 푼다.

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

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

여기서 V 와 S 는 유체영역과 구조물과 유체의 경계면, ∇^2 은 Laplace 연산자, p 는 유체압력; n 은 구조물과 유체의 경계면에 연직인 법선방향벡터, a_n 은 경계면에서의 법선방향으로의 가속도운동의 크기이다. 식(3a)와 (3b)를 유한요소법을 사용한 근사적인 방정식을 구하면 아래와 같다.

$$\mathbf{K} \mathbf{P} = \mathbf{R} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{K} , \mathbf{P} , \mathbf{R} 은 각각 유체의 강성행렬, 압력벡터, 하중벡터이며, 강성행렬과 하중벡터는 요소강성행렬과 요소하중벡터의 조합으로 구할 수 있다.

$$\mathbf{K} = \sum_e \mathbf{k}^e \quad (5a)$$

$$\mathbf{R} = \sum_e \mathbf{r}^e \quad (5b)$$

여기서 \mathbf{k}^e 와 \mathbf{r}^e 는 각각 요소강성행렬과 요소하중벡터로 아래와 같다.

$$\mathbf{k}_{ij}^e = \int \mathbf{B}_i^T \mathbf{B}_j d\Omega^e \quad (6a)$$

$$\mathbf{r}_i^e = \rho \int_{S^e} \mathbf{N}_i^T dS^e \quad (6b)$$

여기서 윗첨자 e 는 요소수준을 나타내고, 아랫첨자 i 와 j 는 절점 i 와 j 를 나타낸다. \mathbf{N}_i 은 i 번째 형상함수이고, \mathbf{B}_i 는 변위와 변형도의 관계를 나타내는 행렬로서 형상함수 \mathbf{N}_i 의 1차 미분값이다. 동적유체질량은 식(4)에서 구조물과 유체의 경계면에 연직인 법선방향으로의 가속도의 크기(a_n)가 1일 경우에 구조물에 작용하는 압력의 합으로 다음과 같다.

$$m_a = \int_S \frac{\partial p}{\partial n} dS \quad (7)$$

2.2 수치적 검증

기존의 방법과의 수치적인 비교/검증을 위해 Fig. 2와 같은 동심(同心)을 갖는 2개의 육각형 실린더

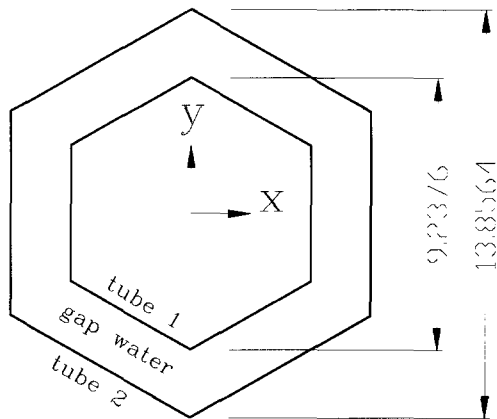


Fig. 2 동심을 갖는 2개의 육각형 실린더(단위 : m)

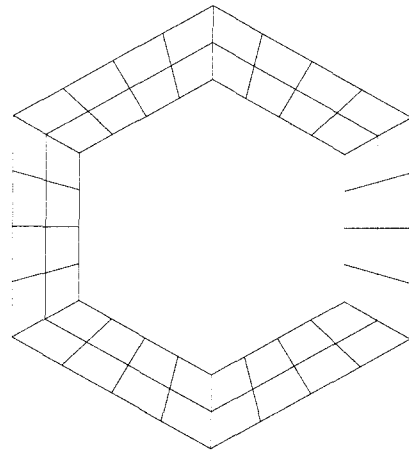


Fig. 3 간극수의 유한요소 모형화

Table 1 동적유체질량행렬의 비교(단위 : ton/m)

자유도	Chung & Chen ³⁾				Present study			
	x_1	y_1	x_2	y_2	x_1	y_1	x_2	y_2
x_1	148.52	-0.00	-203.95	0.00	149.40	-0.00	-204.82	0.00
y_1	0.00	148.35	-0.00	-203.79	-0.00	149.40	0.00	-204.82
x_2	-203.95	0.00	328.67	-0.00	-204.82	0.00	329.52	-0.00
y_2	-0.00	-203.79	0.00	328.50	0.00	-204.82	-0.00	329.52

(Tube 1과 Tube 2)의 간극이 물로 채워져 있는 모형을 사용하였다. 간극수에 의한 2개의 단위길이당 실린더에 작용하는 동적유체질량을 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 선형 사각형 유한요소를 사용하여 모형화하여 구한 후에, 선형 삼각형 유한요소를 사용한 Chung과 Chen³⁾에 의한 결과와 서로 비교/검증하였다. Table 1에 보인 바와 같이 두 결과가 서로 잘 일치함으로써, 본 연구에서 유동관의 동적유체질량을 산정하기 위해 사용할 유한요소 전산프로그램을 검증할 수 있었다.

여기서 두 결과의 미세한 차이는 서로 다른 종류의 유한요소를 사용했기 때문인 것으로 사료된다.

또한, 여기서의 동적유체질량은 유한요소법을 사용하여 다중 구조물의 동적유체질량을 구할 경우에 집중 질량의 형태가 아닌, 구조물 상호간에 무시할 수 없는 연성(Coupling) 효과를 포함한 분포 질량이다. Fig. 2에서의 길이의 단위는 m이며, 해석에 사용한 물의 단위중량은 1ton/m^3 이다. Table 1에서 자유도의 아랫첨자는 각각 유동관 1과 2를 나타내며, 해석결과인 유

체의 동적유체질량의 단위는 ton/m이다.

3. 지진응답스펙트럼 해석

3.1 기본가정 및 실험모형

유동관의 고유진동수의 측정을 위해 제작한 실험모형은 Fig. 4와 같으며, 사용된 유동관은 하나로 유동관과 동일한 유동관으로서 Fig. 5와 같다. 외부 아크릴 원통 내부에 7개의 실제의 육각형 유동관을 실제의 2.5mm의 순간격(clearance)으로 설치한 후에, 물로 채워서 모두 잠기게 하였다.⁶⁾ 외부 아크릴 통은 높이가 1200mm로 수중에 유동관을 충분히 담을 수 있으며, 유동관 7개를 모두 포함할 수 있도록 내경을 270mm로 하였고, 유동관의 두께인 1.6mm에 비해 상대적으로 충분한 횡방향 휨강성을 갖도록 두께를 15mm로 하였다. 여기서 유동관의 재질은 Zircaloy로써 질량밀도와 탄성계수는 각각 6555kg/m^3 과 95.143GPa 이다.

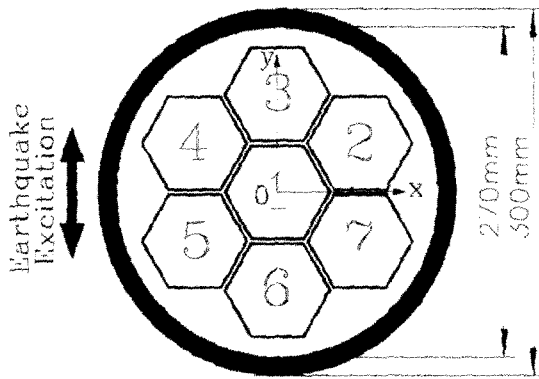


Fig. 4 유동관의 고유진동수 측정 실험모형(평면도)

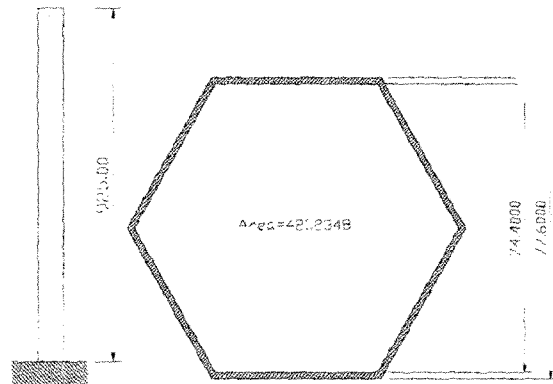


Fig. 5 유동관(단위 : mm)

유동관의 지진응답스펙트럼 해석을 위해 사용한 가정은 아래와 같다.

- (1) 유체는 비점성, 비압축성 물로써 단위중량은 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 이다.
- (2) 실제 원자로의 운전시의 유동의 방향은 연직방향이나, 유동관의 지진시 응답만을 고려하기 위해, 정지상태의 유체에 유동관에 연직인 방향인 횡방향으로의 SSE(Safe Shutdown Earthquake) 크기의 지진이, Fig. 4에 보인 바와 같이 유동관의 휨강성이 상대적으로 작은 방향으로 발생하는 것으로 가정하였다. 여기서 가진방향으로의 유동관의 강성과 질량, 그리고 유체의 동적유체질량을 고려하였다.
- (3) 유동관의 연직방향과 원주방향으로의 강성은 횡방향으로의 강성보다 매우 크므로, 횡방향으로의 휨진동모드만을 해석하였다.
- (4) 아크릴 원통의 휨강성은 유동관의 휨강성보다 상대적으로 매우 크므로, 유한요소를 사용하여 유체의 동적유체질량을 구할 때 아크릴 원통과 접하는 유체의 경계조건은 고정경계로 가정하였다.
- (5) 유체의 동적유체질량을 구할 때, 유체에 비해 강성이 매우 큰 아크릴 원통과 유동관을 강체라고 가정하였다.
- (6) 보수적인 지진응답스펙트럼 해석을 위해 유동관의 침수가 유동관의 구조적 감쇠에 미치는 영향을 무시하였으며, 구조물의 모드별 감쇠는 1%로 가정하였다.
- (7) 수평방향 SSE지진의 크기는 $0.2g$ 이며, 이때의 사용된

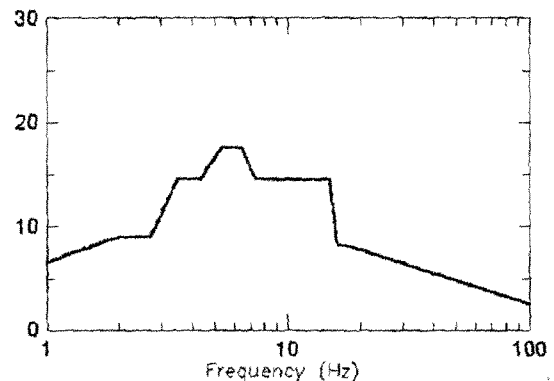


Fig. 6 유동관의 가속도 응답스펙트럼

가속도 응답스펙트럼(FRS : Floor Response Spectrum)은 Fig. 6과 같다.¹¹⁾

- (8) 구조물의 최대응답은 SRSS(Square Root of Sum of Squares)를 사용하여, 모든 모드별 응답을 조합하였다.

3.2 단일 육각형 유동관

단일 유동관을 보요소를 사용하여 Fig. 7과 같이 세분화한 후에 모드해석과 지진응답스펙트럼 해석을 하였다. 모드해석에서 구한 고유진동수를 외팔(Cantilever)보의 고유진동수에 관한 공식으로 구한 결과 및 다중 유동관에서의 계측결과와 서로 비교하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. 여기서 계측결과는 다중 유동관들의 상호간의 작용이 고려된 결과로 Fig. 4의 1번 유동관에 가속도계를 설치한 후에, 공기중과 수중에서 진동가속도를 계측한 결과이다.⁶⁾ 또한, 수중에

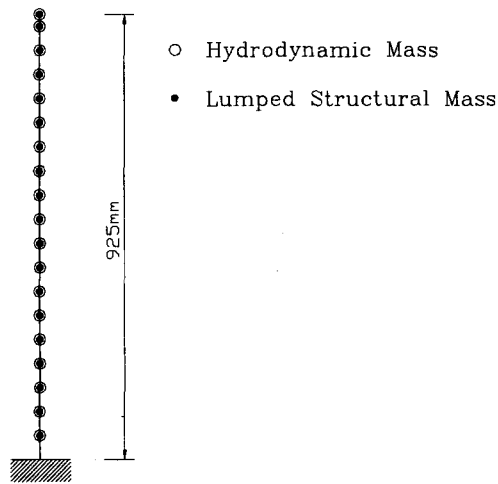


Fig. 7 보요소를 사용한 유동관의 모형화

Table 2 유동관의 고유진동수의 비교(Hz)

방법	공기중		수중	
	1차	2차	1차	2차
유한요소법	58.2	363	26.3	168
공식	58.2	365	26.8	165
계측	58.5	328	29.0	159

잡긴 유동관에 작용하는 동적유체질량을 구할 때에는 무한유체를 가정하여 구한 해석적인 동적유체질량에 관한 공식⁴⁾을 사용하였다. 즉, 유동관에 작용하는 단위길이당 동적유체질량은 아래와 같다.

$$M_a = M_i + M_o$$

$$= \rho A_i + 0.867 \rho \pi R_o^2 = 10.261 \text{ kg/m} \quad (8)$$

여기서 M_i 와 M_o 는 각각 유동관의 내부/외부의 동적유체질량이고, A_i 와 R_o 는 유동관의 내부 면적과 외경경이다.

Table 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 유동

관들간의 상호작용의 영향을 고려하지 않았으므로, 동적유체질량이 실제보다 크게 평가되었기 때문인 것으로 판단된다. 여기서 유동관의 고유진동수를 구하기 위해 사용된 공식은 다음과 같다.

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_i}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad \text{여기서 } i=1, 2, \dots \quad (9)$$

여기서 f_i 는 i 번째 고유진동수(Hz)이고, L , EI , 및 m 은 유동관의 길이와 휨강성 그리고 단위길이당 질량이며, λ_i 는 i 번째 고유진동수와 관련된 상수이다.

Fig. 8에는 유한요소법을 사용하여 구한 수중에서의 유동관의 모드형상을 나타내었고, 이때의 모드형상은 일반질량으로 정규화하였다. Fig. 9에는 응답스펙트럼해석으로 구한 공기중과 수중에서의 유동관의 최대변위를 보이고 있다. 본 논문에서는 응답스펙트럼해석을 수행하였으나, 비선형성이 큰 동적모델에서는 시간영역해석을 수행할 수 있다. Fig. 8과 9에서 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 결과일지라도, 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 Fig. 6에 보인 유동관의 가속도 총응답스펙트럼에서 알 수 있듯이 응답의 증가를 가져오기 때문이다.

수중 유동관들간의 순간격이 유동관의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해, Fig. 10과 같이 동심을 갖는 유동관의 간극수에 의한 동적유체질량의 영향에 대해 검토하였다. 내부 유동관의 단위길이당 작용하는 간극수에 의한 동적유체질량을 Table 3에 보인 4가지의 경우와 같이 설정하였다.

경우 2에서는 Fig. 11과 같이 유한요소로 모형화하였으며, 간극수의 외부경계조건은 고정경계(fixed)이고, 내부경계조건은 구조물과 유체의 경계면의 법선 방향으로 단위가속도를 주는 경계조건으로 가정하였다. 즉, 유동관들간의 상호작용효과는 고려하지 않았다. 경우 4는 현재 실제의 하나로 원자로 유동관의 동역학 해석시에 간극수의 동적유체질량의 산정을 위해 사용하고 있는 방법이다.¹⁾

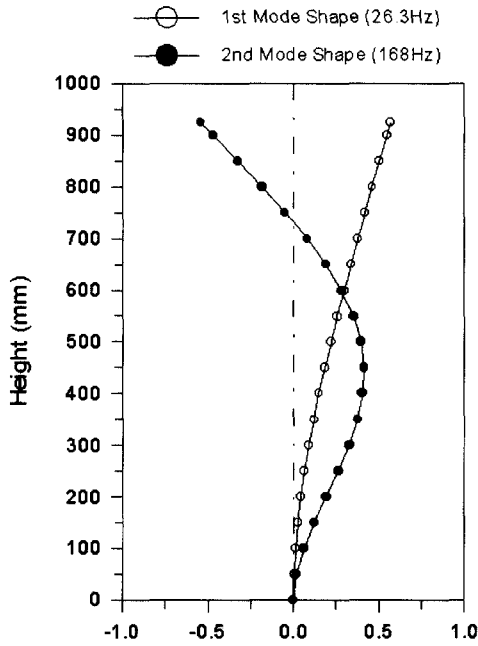


Fig. 8 수중에서의 유동관의 모드형상

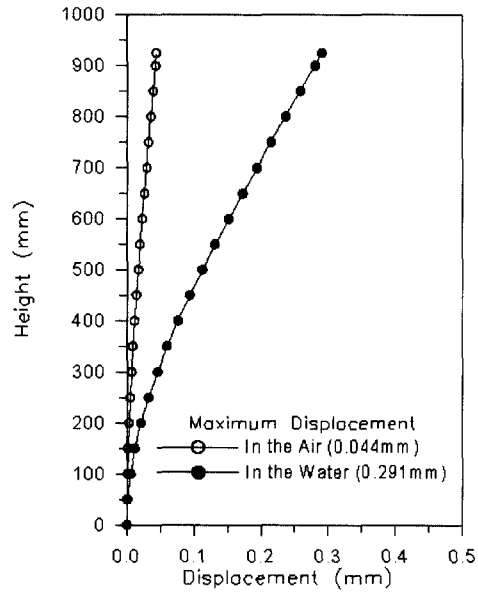


Fig. 9 단일 유동관의 최대변위

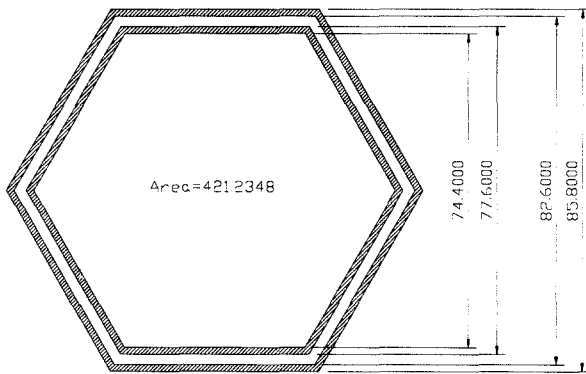


Fig. 10 동심을 갖는 유동관(단위 : mm)

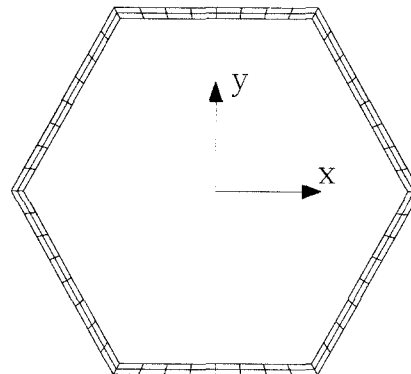


Fig. 11 간극수의 유한요소 모형화

Table 3 간극수에 의한 동적유체질량의 산정방법

경우	동적유체질량 (kg/m)	산정방법
1	0.695	간극수의 총질량
2	0.323	유한요소법으로 구한 y방향으로의 간극수의 동적유체질량
3	5.467	간극수를 반무한 유체로 가정했을 경우에 공식으로 구한 동적유체질량
4	2.733	경우 3에서 구한 값의 50%

Table 4와 Fig. 12에 전술한 4가지 경우에 대하여 수치해석으로 구한 유동관의 첫번째 고유진동수와 최대변위를 나타내었다. 경우 1과 2를 사용하여 구한 유동관의 첫번째 고유진동수는 계측한 고유진동수인 29Hz 보다 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 예상되며, 경우 3은 유동관의 최대변위에 대해서 너무 보수적인 결과를 줄 것으로 판단되며,

Table 4 유동관의 첫번째 고유진동수의 비교(단위: Hz)

구분	측측	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

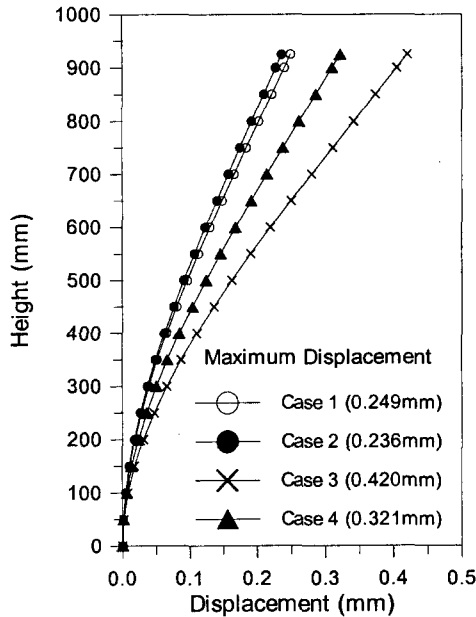


Fig. 12 유동관의 최대변위

경우 4가 실제와 가장 근사한 값을 줄 것으로 판단되었다.

3.3 다중 육각형 유동관

다중 유동관에서의 간극수에 의한 동적유체질량이 유동관의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해, Fig. 4에 보인 고유진동수 측정 실험모형에 대해 지진응답스펙트럼 해석을 하였다. Table 5에 보인 바와 같이 간극수의 동적유체질량을 3가지의 경우로 산정하였다. 경우 1은 Fig. 13과 같이 선형 삼각형 및 사각형 유한요소로 간극수를 모형화하여서, 간극수에 의한 분포 동적유체질량을 구하였으며, y방향으로의 동적유체질량을 Table 6에 나타내었다. 여기서 사용한 유동관의 일련번호는 Fig. 4와 13에 보인 유동관의 번호와 동일하다. 일반적으로 상용전산 구조해석용 프로그램에서는

Table 5 간극수에 의한 동적유체질량의 산정방법

경우	산정방법
1	유한요소법을 사용하여 구한 분포 동적유체질량 (Table 6 참조)
2	간극수를 무한 유체로 가정했을 경우에 공식으로 구한 동적유체질량
3	경우 3에서 구한 동적유체질량의 50% ($M_0=2.733\text{kg/m}$)

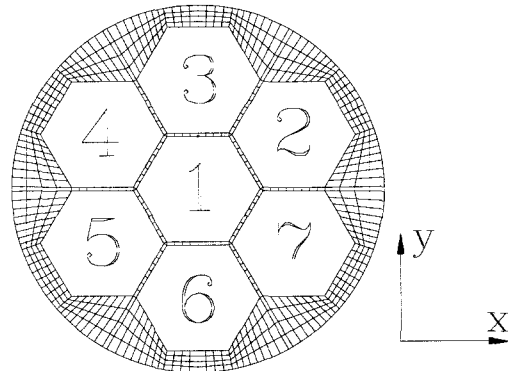


Fig. 13 다중 유동관의 간극수에 대한 유한요소 모형화

Table 6 분포 동적유체질량행렬(단위 : 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

부가질량으로 집중질량을 사용한다. 따라서 경우 2에서는 3.2절에서 구한 외부유체에 관해 산정한 무한유체에서의 동적유체질량을 사용하였다. 경우 3은 경우 2에서 구한 유동관 외부의 동적유체질량의 50%를 사용하였다. 여기서도 각 유동관 내부의 동적유체질량은 앞서와 같은 값을 사용하였다.

Table 5의 3 가지 경우로 구한 간극수의 동적유체질량을, 보요소로 모형화한 7개의 유동관에 분포시킨 후에, 지진응답스펙트럼해석을 수행하였다. 유동관의 첫번째 고유진동수는 경우 3의 29.6Hz의 고유진동수는 유동관 1번의 고유진동수 측정치인 29.0Hz와 매우

Table 7 다중 유동관의 최대변위의 비교(단위 : mm)

유동관 번호	경우		
	1	2	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		

유사하다. 응답스펙트럼해석으로부터 유동관들의 최대 변위를 Table 7에 보였다. 경우 1의 경우는 가장 엄밀한 응답스펙트럼해석으로서 고정경계조건으로 가정한 아크릴 원통의 영향을 가장 적게 받는 1번 유동관에서 가장 큰 최대변위(0.225mm)가 발생하였다. 경우 2는 유동관 외부의 유체를 무한유체로 가정한 것으로 가장 큰 유동관 변위(0.291mm)를 나타냈으며, 경우 3은 유동관의 최대변위(0.223mm)에 대해 보수적이면서도 경우 1의 경우와 가장 근접한 결과를 보였다. 따라서 육각형 유동관에 대한 동적 해석시 무한유체로 가정하여 구한 단일 유동관의 동적유체질량에 0.5의 보정 계수를 사용하는 것이 매우 합리적인 값을 알 수 있었다.

4. 결 론

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

- 1) 수중에 잠긴 유동관을 동적 해석할 경우에 반드시 유체에 의한 동적유체질량을 고려하여야 한다. 무한유체에 잠긴 단일 육각형 유동관의 경우에 응답스펙트럼해석으로 구한 지진에 의한 최대변위응답이 공기중에서의 유동관에 비해 최대 6.6배나 증가하였다. 여기서의 동적 해석의 결과는 유체의 유동저항과 점성의 영향을 고려하지 않았으므로 보수적인 값을 나타내므로, 실제의 경우 본 연구의 해석으로 구한 값보다 작은 값을 나타낼 것으로 판단된다.
- 2) 수중에 잠긴 다중 유동관의 유체를 유한요소로 모

형화하여 분포 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 분포 동적유체질량을 사용하여 해석한 경우와 가장 근접한 결과를 보여주었으며 보수적이다.
- 4) 따라서 육각형 유동관에 대한 동적 해석시 무한유체로 가정하여 구한 단일 유동관의 동적유체질량에 0.5의 보정계수를 사용하는 것이 매우 합리적인 값임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 류정수, 우종섭, 이지복, "HANARO 핵연료 유동관의 동하중 해석 및 시험", KAERI/TR-595/95, 한국원자력연구소, 1995.5
2. Chen, S. S. and Chung, H., *Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass; Part I: Circular Cylindrical Structures*, ANL-CT-76-45, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 1976
3. Chung H. and Chen, S. S., *Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass; Part II: Non-Circular Cylindrical Structures*, ANL-CT-78-49, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 1978
4. Blevins, R. D., *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1979
5. Loeber, J. F., *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. Stokes, G. G., *On Some Cases of Fluid Motion*, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Vol. 8, 1843, pp.105~137
 8. Fritz, R. J., *The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids*, Journal of Engineering for Industry, Vol. 94, 167-173, 1972
 9. Chen, S. S., *Vibrations of a Row of Circular Cylinders in a Liquid*, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 97, 1212-1218, 1975
 10. Levy, S. and Wilkinson, J. P. O. D., *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
 11. Biswas, J. K., Banwatt, A. S. and Usmanl, S. A., *Stress Analysis Interface Data for the Korea Multipurpose Research Reactor*, ACEL 37-31000-200-900, Rev.1, 1993