

# 댐 취수탑 3차원 내진안전성 평가에서의 동수압 적용방법에 관한 연구

## Application of Hydrodynamic Pressure for Three-dimensional Earthquake Safety Analysis of Dam Intake Towers

송광석<sup>1)</sup> · 민경욱<sup>1)</sup> · 배정주<sup>2)</sup> · 이지호<sup>1)\*</sup>

Song, Gwang-Seok<sup>1)</sup> · Min, Kyoung-Uk<sup>1)</sup> · Bea, Jungju<sup>2)</sup> · Lee, Jeeho<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>동국대학교 건설환경공학과, <sup>2)</sup>한국시설안전공단

<sup>1)</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University-Seoul, <sup>2)</sup>Korea Infrastructure Safety Corporation

### / A B S T R A C T /

In the present study, effective hydrodynamic pressure modeling methods for three-dimensional earthquake safety analysis of a dam intake tower structure are investigated. Time history analysis results using the Westergaard added mass and Chopra added mass methods are compared with the one by the CASI (Coupled Acoustic Structural Interaction) method, which is accepted as giving almost exact solutions, to evaluate the difference in displacement response, stress and dynamic eccentricity. The 3D time history analysis of a realistic intake tower, which has the standard geometry widely used in Korea, shows that the Chopra added mass method gives similar results in displacement and stress and less conservative results in dynamic eccentricity to CASI ones, while the Westergaard added mass yields much more conservative results in all measures. This study suggests to use the CASI method directly for three-dimensional earthquake safety analysis of a dam intake tower, if computationally possible.

**Key words:** Earthquake safety, Intake tower, Hydrodynamic pressure, Added mass, Fluid-structure interaction, Acoustic element

## 1. 서론

최근 들어 환태평양 지진대를 중심으로 강한 지진 활동이 잦아지고 있으며, 한반도 내륙 지역인 경주와 포항에서 규모 5 이상의 지진이 2년 연속으로 발생하여 지진에 대한 안전성 확보가 중요 사회문제로 대두되고 있다. 특히 국민의 삶과 직결되는 국가 사회기반시설물의 파괴 시, 국가 시스템의 마비로 인한 사회적 경제적 차원에서 막대한 2차 지진 피해가 예상되어 진다. 2011년 개정된 댐 설계기준 [1]에서는 내진설계 기준을 강화하여 댐 본체 외에도 취수탑, 발전소등 댐 부대시설물에 대한 내진설계를 의무화하는 규정을 마련하였다. 하지만 제시된 설계기준에서는 명확한 내진 설계 및 해석

규정이 마련되어 있지 않는 상태이며, 특히 취수탑이 경우, 콘크리트 중력 댐의 내진설계를 참조하도록 되어 있다.

댐 취수탑은 댐 본체와 달리 전체 면이 호소부에 잠겨있어 구조물의 모든 방향에서 수압이 작용하며, 취수탑 내부 담수에 의한 내부 수압 또한 존재하는 특징을 가지고 있다. 이로 인하여 지진발생시 취수탑 내 외부에 작용하는 동수압은 취수탑의 거동에 큰 영향을 주며, 내진해석 시, 이러한 취수탑의 거동을 명확하게 확인하기 위해서는 기존 댐 적용방법과 다른 취수탑의 기하학적 특징을 고려한 정확한 동수압 산정방법이 필요하다.

내진동해석 시, 구조물에 동수압을 적용하는 방법으로는 동수압을 등가의 부가질량으로 치환하는 부가질량법과 유체를 직접 Acoustic 요소로 모델링하는 CASI (Coupled Acoustic Structural Interaction) 기법 [2, 3] 등이 있다. 부가질량법은 계산이 간편하고 적용이 용이하여 실무에 많이 사용되고 있으며, Westergaard [4]가 2차원 강체 수직벽의 동수압으로부터 유도한 부가질량식을 이용하는 방법과 Chopra and Goyal [5]이 제안한 취수탑 동수압에 대한 부가질량법이 대표적이다. CASI 기법은 구조와 유체 영

\*Corresponding author: Lee, Jeeho

E-mail: jeeholee@dgu.edu

(Received February 19, 2018; Revised March 21, 2018; Accepted March 28, 2018)

역의 지배방정식을 비유동 유한요소로 해석하는 방법으로, 대류 등의 유체 움직임이 없는 경우, 구조물과 유체의 상호작용이 포함된 정확한 해석이 가능하며, 이에 따라 부가질량법으로 구현이 불가능한 3차원 비정형 형상의 구조물-유체 경계면에서의 동수압 분포의 재현이 가능하다. 다만 호소부 모델링에 많은 유한요소가 필요하여 계산시간이 부가질량법을 사용하는 경우보다 크게 증가하는 단점이 있다. Matthew [6]는 CASI 기법을 사용하여 댐-호소부 상호작용에 의한 동수압 효과를 검증하였다.

국내 댐 설계기준 [1]에서는 콘크리트 중력댐의 지진에 의한 동수압에 대하여 Westergaard 부가질량식을 사용하도록 되어 있으나 취수탑 구조물의 동수압에 대한 규정은 미비하다. Chopra and Goyal [5]이 제안한 부가질량법 (Chopra 부가질량법)은 미국에서 주로 사용되는 원형과 타원형 단면의 취수탑을 위한 식을 기반으로 하였으며, 국내에서 주로 사용되는 사각 단면의 취수탑에는 등가 단면의 근사식으로 변환하여 사용하여야 한다. 이로 인하여 국내 취수탑 구조물의 시간이력해석에서 Westergaard 부가질량법을 관습적으로 사용하는 경우가 빈발하는 것이 현실이다.

본 연구에서는 3차원 형상을 고려하여 동해석이 수행되어야 하는 댐 취수탑 구조물의 내진안전성 해석에서 사용될 수 있는 동수압 적용방법에 대하여 고찰한다. 먼저 취수탑 해석에 앞서 3차원 수치모형에서 Westergaard 부가질량식 및 Chopra-Goyal 부가질량식을 사용한 동수압 분포를 CASI 기법으로 계산된 동수압 결과와 비교하여 각 부가질량법의 유효성을 검증한다. 이후 Westergaard 부가질량법, Chopra 부가질량법과 CASI 기법을 사용하여 국내 사각 단면 취수탑의 대표 형상에 대한 3차원 시간이력지진해석을 수행하고, 이를 국내 규정의 내진안전성 평가과정에 사용하여 각 동수압 모형의 적용성을 논의한다.

## 2. 구조물-유체 상호작용에 따른 동수압 산정

### 2.1 부가질량법

#### 2.1.1 Westergaard 부가질량법

일반적으로 내진해석에서 댐과 같은 수중벽체구조물에 작용하는 동수압은 1933년 Westergaard가 제안한 Westergaard 부가질량식 [4]을 사용하여 산출한다. Westergaard 부가질량식은 댐체에 작용하는 동수압을 식 (1)과 같은 2차원 파동방정식을 지배방정식으로 하여 유도하며, 이때 댐은 강체로 고려하였고 물의 압축성과 점성은 무시한다. 또한 댐 구조물과 호소부의 접촉면은 연직하며, 호소부의 저면은 수평한 것으로 가정한다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서,  $p(x, y, t)$ 는 동수압,  $x$ 는 수평 위치,  $y$ 는 수직 위치,  $c$ 는 물의 파속,  $t$ 는 시간이다. 이에 대한 Westergaard 부가질량식은 Fig. 1과 같은 경계조건을 가진다.

- a) 호소부 자유수면에서의 동수압은 0이다.

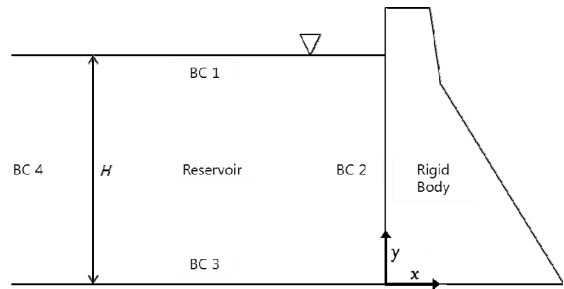


Fig. 1. Boundary conditions for Westergaard hydrodynamic pressure

- b) 댐 상류면에서 구조물과 유체의 수평방향 변위는 서로 같다.
- c) 호소부 저면에서 유체의 수직방향 변위는 0이다.
- d) 호소부 상류면 윗역은 정상상태로 동수압은 0이다.

$$p(x, H, t) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} p(0, y, t) = -\ddot{u}_0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} p(x, 0, t) = 0 \quad (4)$$

$$p(-\infty, y, t) = 0 \quad (5)$$

여기서,  $\ddot{u}_0$ 는 댐체 수평방향 가속도,  $H$ 는 호소부 높이이다.

가정된 조건과 경계조건에 따라 유도된 동수압에 대한 해는 식 (6)과 같으며, 지진력에 의한 댐체에 작용하는 관성력으로 적용할 수 있도록 식 (7)과 같은 부가질량식으로 표현할 수 있다.

$$p(0, y, t) = -2\rho H \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\mu_n H)^2} (-1)^{n+1} \cos(\mu_n y) \right] \ddot{u}_0 \quad (6)$$

$$m(0, y, t) = 2\rho H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\mu_n H)^2} (-1)^{n+1} \cos(\mu_n y) \quad (7)$$

여기서,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\mu_n = \pi(2n-1)/2H$ 이다.

#### 2.1.2 Chopra 부가질량법

Chopra and Liaw [7]은 1974년 원형 취수탑에 대한 내-외부 동수압 부가질량식을 제안하였으며, 이를 확장하여 1989년 Chopra and Goyal [5]이 원형 취수탑 외에 사각형, 팔각형과 같은 대칭성을 갖는 형상에 대한 내-외부 동수압 부가질량식을 제안하였다. 이 방법은 현재 미공병단 기준 [8, 9]으로 적용되어 있으며, 국내 상수도 설계기준 [10, 11]의 취수탑 동수압 산정에 있어서도 일부 준용하고 있다.

Chopra 부가질량식에서는 Westergaard 부가질량식과 동일하게 물의 압축성과 점성이 무시되며, 구조물과 호소부의 접촉면은 연직하고, 호소부

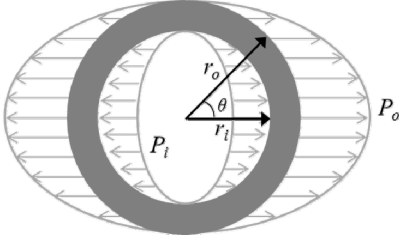


Fig. 2. Cylindrical coordinate system for Chopra hydrodynamic pressure

의 저면은 수평한 것으로 가정한다. Fig. 2와 같은 원통좌표계 상에 원형 취수탑의 동수압에 대한 지배방정식은 식 (8)과 같다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

여기서,  $p(r, \theta, z, t)$ 는 동수압,  $r$ 는 취수탑 내·외부 반경,  $z$ 는 수직 위치,  $\theta$ 는 방향각,  $t$ 는 시간이다. 이에 대한 Chopra 부가질량식은 다음과 같은 경계 조건으로부터 유도된다.

- 호소부 저면에서 유체의 수직방향 변위는 0이다.
- 취수탑 내·외부 자유수면에서의 동수압은 0이다.
- 취수탑 구조물의 변위와 유체의 변위는 서로 같다.
- $\theta = 0$ 인 면을 기준으로 대칭이다.

$$\frac{\partial}{\partial z} p(r, \theta, H, t) = 0 \quad (9)$$

$$p(r, \theta, 0, t) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} p(r_o, \theta, z, t) = \rho \ddot{u} n_i ; \quad \frac{\partial}{\partial r} p(r_i, \theta, z, t) = \rho \ddot{u} n_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} p(r_i, 0, z, t) = \frac{\partial}{\partial \theta} p(r_i, \pi, z, t) \quad (12)$$

여기서,  $r_o$ 는 취수탑 외부 반경,  $r_i$ 는 취수탑 내부 반경,  $\ddot{u}$ 는 구조물 수평방향 가속도,  $n_i$ 는 취수탑 외부면의 바깥쪽 수직 벡터이다.

이를 통하여 원형 취수탑의 높이에 대한 내·외부 동수압을 부가질량식으로 유도하면 식 (13), (14)와 같다 [7].

$$m_a^o(z) = (\rho \pi r_o^2) \left[ \frac{16}{\pi^2} \frac{H_o}{r_o} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} E_m \left( \alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) \cos \left( \alpha_m \frac{z}{H_o} \right) \right] \quad (13)$$

$$m_a^i(z) = (\rho \pi r_i^2) \left[ \frac{16}{\pi^2} \frac{H_i}{r_i} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} D_m \left( \alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right) \cos \left( \alpha_m \frac{z}{H_i} \right) \right] \quad (14)$$

여기서,  $r_o$ 는 취수탑 외경,  $r_i$ 는 취수탑 내경,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $z$ 는 호소부 저면으로부터의 높이,  $H_o$ 는 취수탑 외부 수위,  $H_i$ 는 취수탑 내부 수위,  $\alpha_m = (2m-1)\pi/2$ 이다. 또한  $E_m$ 과  $D_m$ 은  $I_n$ 과  $K_n$ 을 사용하여 식 (15)와

(16)과 같이 정의 되고,  $I_n$ 은 제 1종 변형 Bessel 함수,  $K_n$ 은 제 2종 변형 Bessel 함수이다.

$$E_m \left( \alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) = \frac{K_1 \left( \alpha_m r_o / H_o \right)}{K_o \left( \alpha_m r_o / H_o \right) + K_2 \left( \alpha_m r_o / H_o \right)} \quad (15)$$

$$D_m \left( \alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right) = \frac{I_1 \left( \alpha_m r_i / H_i \right)}{I_o \left( \alpha_m r_i / H_i \right) + I_2 \left( \alpha_m r_i / H_i \right)} \quad (16)$$

원형 형상과 동일조건에서의 사각형, 팔각형과 같은 대칭성을 갖는 형상에 대해서는 단면형상을 타원형으로 치환하여 내·외부 동수압 부가질량 값을 산출한다. 이러한 다각형 형상은 원형 형상과 달리 부가질량 값이 Bessel 함수를 사용하여 수식화할 경우 수렴성이 다소 좋지 않게 나타나는 문제점이 있다 [5]. 이에 따라 Chopra and Goyal [5]은 유한요소해석을 통하여 구조물의 주요 형상비의 높이별 동수압 ( $m_{\infty}$ )을 구조물의 높이가 무한한 경우의 동수압 ( $m_{\infty}$ )으로 정규화하여 근사하는 방법을 제안하였다. 본 연구의 Chopra 부가질량법에서는 Chopra and Goyal [5]이 제안한 정규화 부가질량식을 사용하여 동수압을 산출하였다.

## 2.2 CASI 기법

CASI 기법은 유한요소해석에서 사용되는 FSI 해석방법의 한 종류로 유체를 Acoustic 요소로 모델링하여 구조물과 유체의 상호작용이 고려된다. Acoustic 요소는 유체 미소 체적처럼 모든 방향으로 동일한 압력을 갖는 특징을 가지고 있으며 (Fig. 3), 대류나 확산 등의 유동특성을 반영하지는 못한다. 그러나 댐, 취수탑 구조물과 같이 규모가 크고, 유동의 대류 영향이 미미한 경우에는 Acoustic 요소를 사용하여 구조물의 변형을 함께 고려할 수 있어 일반적인 유동해석기반 FSI 해석보다 효율적이며 정확한 FSI 해석이 가능하다.

Acoustic 요소의 평형방정식 및 구성방정식은 식 (17) 및 (18)과 같으며, 이를 통한 Acoustic 요소의 운동방정식은 식 (19)와 같다. Acoustic 요소의 운동방정식은 파동방정식과 같이 압력에 대한 변수로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma \dot{u}^f + \rho_j \ddot{u}^f = 0 \quad (17)$$

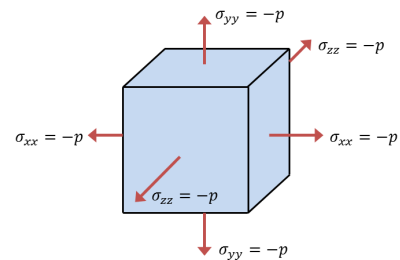


Fig. 3. Acoustic element in spherical pressure

$$p = -K_f \frac{\partial}{\partial x} u^f \tag{18}$$

$$\frac{1}{K_f} \ddot{p} - \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \tag{19}$$

여기서,  $p$ 는 동수압,  $\gamma$ 는 유체 체적 항력,  $\rho_f$ 는 유체 밀도,  $x$ 는 유체 위치 벡터,  $u^f$ 는 유체 변위 벡터,  $\dot{u}^f$ 는 유체 속도 벡터,  $\ddot{u}^f$ 는 유체 가속도 벡터,  $K_f$ 는 체적 탄성계수이다.

Abaqus에서는 Acoustic 요소와 구조 요소간의 상호작용을 위하여 결합 기능을 이용한 경계면 기반의 방법과 Acoustic 경계 요소 (ASIN)를 이용한 요소 기반의 방법을 사용한다. 이를 통하여 Acoustic 요소는 구조 요소로부터 변위 정보를 받고, 구조 요소는 Acoustic 요소로부터 압력 정보를 받아 Acoustic 요소와 구조 요소간의 상호작용을 고려한 해석을 수행한다. 본 논문에서는 요소망을 새로 구성해야 하는 요소 기반의 방법보다 적용이 간편한 경계면 기반의 방법을 사용하여 CASI 해석을 진행하였다.

### 2.3 부가질량법과 CASI 기법의 동수압 비교

3차원 수치모형에서 부가질량법과 CASI 기법의 동수압 효과의 유효성을 검증하고, 그 분포 특징을 확인하기 위하여, Fig. 4와 같은 3종류의 표준적인 구조 형태에 대한 3차원 유한요소 수치해석을 수행하였다. 3차원 수치 해석에는 CASI 기법을 적용하여 구조물-유체 경계면에 작용하는 동수압을 측정하였으며, 그 결과를 각 부가질량법의 동수압과 비교하였다.

#### 2.3.1 주요 경계조건 및 재료 물성치

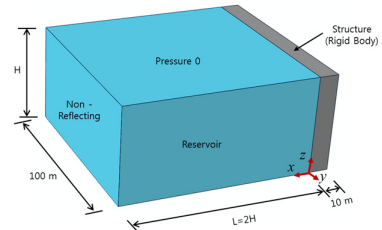
3차원 수치모형의 경계조건 및 재료 물성치는 이론적인 부가질량법의 가정 및 경계조건과 동일하게 적용하였다. 이에 따라 구조물과 호소부 유체의 물성은 강체 및 비압축성으로 적용하였으며, 호소부의 자유수면은 정상 상태로 적용하였다. 또한 호소부의 원역의 경계에는 흡수 경계조건을 적용하여, 원역에서의 파의 반사에 의한 영향을 최소화하였다.

구조물에 작용하는 지진력은 수평 일방향 (x방향)으로 작용하며, 최대 가속도 1 m/sec<sup>2</sup>인 주기 1초의 sine파를 총 0.5초 동안 구조물 기초 저면에서 직접 가진하였다. 수치해석 시간간격은 0.01 초이며, 수치해석 프로그램은 범용 유한요소 프로그램인 Abaqus [8]를 사용하였다.

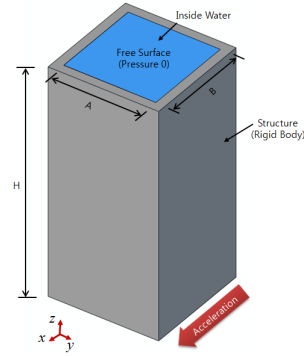
#### 2.3.2 수치모형

Fig. 4 (a)는 댐과 같은 수중 벽체 구조물의 3차원 수치모형으로 구조물의 길이 (A)는 10 m, 구조물의 폭 (B)은 100 m, 그리고 구조물의 높이 (H)는 25 m, 50 m, 75 m로 가정하였다. 호소부 높이는 구조물의 높이와 동일하며, 호소부의 길이 (L)는 호소부의 높이 (H)의 2 배로 결정하여 원역의 영향을 최소화하였다.

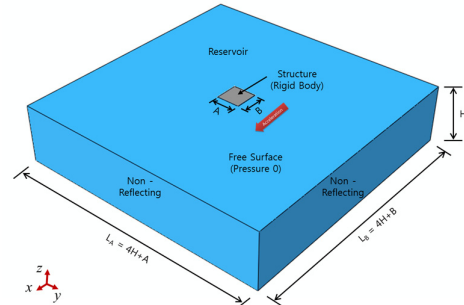
Fig. 4 (b)와 (c)는 취수탑과 같은 구조물 전면에 내·외부 동수압이 작용하는 형상적 특징을 갖는 구조물에 대한 3차원 수치모형으로 Fig. 4 (b)는 구조물 내부에 동수압이 작용하는 수치모형이며, Fig. 4 (c)는 구조물 외부



(a) Submerged wall structure model



(b) Inside water model



(c) Surrounding water model

Fig. 4. Numerical test models for hydrodynamic pressure

Table 1. Finite element models for hydrodynamic pressure tests

Tests	A×B×H (m)	Domain	Nodes	Elements
Submerged wall structure models	10×100×25	Structure	2,255	1,600
		Reservoir	9,471	8,000
	10×100×50	Structure	4,305	3,200
		Reservoir	35,301	32,000
	10×100×75	Structure	6,355	48,000
		Reservoir	77,531	72,000
Inside water models	20×20×50	Structure	2,288	1,100
		Reservoir	3,146	25,00
	40×20×50	Structure	3,328	1,600
		Reservoir	6,006	5,000
	20×40×50	Structure	3,328	1,600
		Reservoir	6,006	5,000
Surrounding water models	20×20×50	Structure	3,146	2,500
		Reservoir	318,240	300,000
	40×20×50	Structure	6,006	5,000
		Reservoir	344,760	325,000
	20×40×50	Structure	6,006	5,000
		Reservoir	344,760	325,000



에 동수압이 작용하는 수치모형이다. 두 형상 모두 구조물 높이(H)는 50 m이며, 구조물 폭과 길이는 구조물 형상비 (A/B)에 따라 10 m/20 m, 20 m/20 m, 20 m/10 m로 가정하였다. 구조물 내·외부 수위는 구조물의 높이와 동일하며, Fig. 4 (c)의 구조물 외부 호소부의 길이 ( $L_A, L_B$ )는 호소부 높이의 4배 이상으로 하여 원역의 영향을 최소화하였다.

수치모형의 구조물 요소망은 Abaqus 8절점 Solid 요소 (C3D8) [3]를 사용하였으며, 유체의 요소망은 Abaqus 8절점 Acoustic (AC3D8) [3] 요소를 사용하였다. 요소의 크기는 Acoustic 요소의 동수압 분포와 해석시간 등을 고려하여 2 m×2 m로 결정하였다. 수치모형의 형상제원 및 요소망 구성은 Table 1과 같다.

### 2.3.3 수치해석 결과

전체 시간이력 중 최대 가속도  $1 \text{ m/sec}^2$ 이 작용하는 시점 ( $t=0.25 \text{ sec}$ )에서의 구조물-유체 경계면에서의 동수압을 분석하였다. Acoustic 요소를 통하여 도출된 구조물-유체 경계면에 작용하는 동수압 분포 중 대표 형상제원에 대한 결과는 Table 2와 같다. 동수압 분포특징을 확인한 결과, 수중 벽체 수치모형과 취수탑 내부동수압 수치모형의 동수압은 가속도 진행 직각방향 (y방향)에 대하여 일정한 동수압을 갖는 분포를 갖는다. 이와 달리 취수탑 구조물 외부동수압 수치모형은 가속도 진행 직각방향에 대하여 포물선 동수압 분포를 가지며, 최대 동수압은 경계면 중심 ( $y=0$ )에서 나타난다.

CASI 기법을 통하여 산출된 동수압 결과를 기존 부가질량법과 비교하였다. 수중벽체 수치모형의 경우 경계조건상 Westergaard 부가질량법과 비교하였으며, 취수탑 내부동수압 및 외부동수압 수치모형은 Chopra 부가질량법과 비교하였다. 추가적으로 취수탑 외부동수압 수치모형에 대해서는 Westergaard 부가질량과의 추가 비교를 실시하여, 취수탑 구조물에 대한 외부 동수압 산정의 적정성을 확인하였다. Chopra가 제안한 취수탑의 동수압 부가질량 값은 단위면적에 대한 부가질량값이 아닌 구조물 높이별 총 부가질량으로 산출된다. 따라서 CASI 기법을 적용한 3차원 유한요소 수치해석 결과와 Chopra 부가질량 값을 비교하기 위하여 Acoustic 요소의 각 절점별 단위 높이에 대한 유효면적과 수치해석을 통하여 산출된 각 절점의 동수압을 곱하여 합산하는 방법으로 취수탑 내·외부의 각 높이별 총동수압을 계산하였다.

수중벽체 수치모형에서 구조물 높이별 동수압 비교 결과는 Fig. 5와 같

다. 높이 25 m, 50 m, 75 m의 수중 벽체 수치모형에 대하여 Westergaard 부가질량 값과의 최대 오차는 0.5% 미만으로 나타났다. 취수탑 내·외부동수압 수치모형의 구조물 높이별 총동수압 비교 결과는 Figs. 6 및 7과 같다. 구조물 내·외부 형상비 1/2, 1/1, 2/1의 수치모형에 대하여 수치모형 내부동수압과 Chopra 내부동수압 부가질량 값과의 최대 오차는 0.3% 미만으로 나타났으며, CASI 수치모형 외부동수압과 Chopra 외부동수압 부가질량 값과의 최대 오차는 2% 미만으로 나타났다. CASI 수치모형 외부동수압과 Westergaard 부가질량 값과의 최대 오차는 112.5%로 나타났다.

3차원 수치모형에서의 동수압 산정 결과를 분석한 결과, 수중벽체 구조

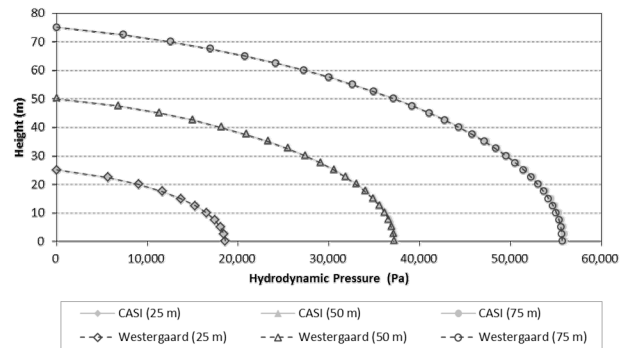


Fig. 5. Comparison of hydrodynamic pressure values for submerged wall structures

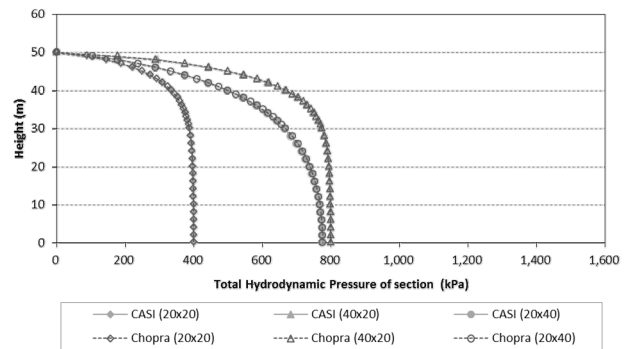


Fig. 6. Comparison of hydrodynamic pressure values for towers associated with inside water

Table 2. Hydrodynamic pressure distributions on reservoir-structure boundary surfaces

Submerged wall structure model (10×100×50)	Tower structures	
	Inside water model (20×20×50)	Surrounding water model (20×20×50)

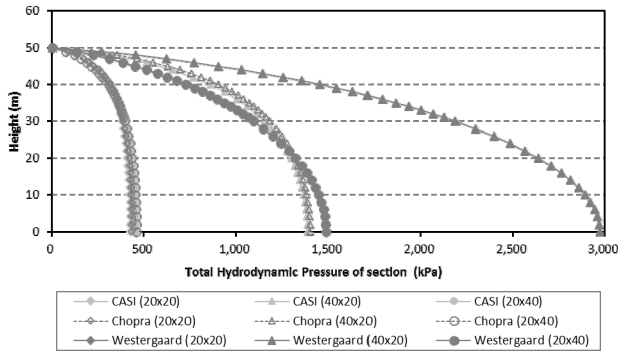


Fig. 7. Comparison of hydrodynamic pressure values for towers associated with surrounding water

물에 대하여 Westergaard 부가질량 값과 CASI 수치모형 결과가 동일하게 나왔으며, Westergaard 부가질량식이 댐체와 같은 벽체 모양에서는 매우 정확한 동수압식이라는 것을 확인하여 준다. 취수탑 구조물의 내부 동수압의 경우에 대해서는 Chopra 부가질량 식과 CASI 수치모형 결과가 동일하게 나타났다. 취수탑 구조물의 외부동수압의 경우 Chopra 부가질량식이 CASI 수치모형 결과가 매우 근접하게 나타난 반면, Westergaard 부가질량식은 모든 경우에서 동수압을 과다하게 산정하는 것을 보여준다. Chopra 부가질량식의 경우, 높이별 부가질량식이며, 단면 주변에 따른 동수압 분포식이 존재하지 않아 동일 높이에서 단면의 구조물-유체 경계 절점에 부가질량 값을 균등하게 분할해야만 한다. 이에 따라 CASI 기법의 결과와 구조물 높이별 작용하는 외부 동수압력 합력은 동일하지만 외부동수압의 3차원 분포 차이에 따른 구조물 응력 결과의 상이성이 발생할 수 있다.

### 3. 댐 취수탑 구조물에 대한 동적내진해석

실제 댐 취수탑 구조물에 부가질량법과 CASI 기법을 적용하여, 동적 내진해석을 실시하고, 수치해석 결과를 통한 구조물의 변위응답 및 진도에 대한 동적 안정성, 응력분포 등의 내진성능을 국내 규정으로 제안된 방법 [12]에 따라 비교 분석하였다.

#### 3.1 취수탑 제원 및 수치모형 모델링

대상 취수탑의 제원은 Fig. 8과 같은 국내에서 일반적으로 많이 사용되는 철근콘크리트 구조의 사각형 단면 취수탑으로 기초형식은 직접기초이며, 취수탑 최상부까지의 높이는 62.0 m이다. 취수탑 내부는 Fig. 9와 같은 물을 취수할 수 있는 담수 공간이 존재한다. 호소부의 높이는 상시만수위를 기준으로 하여 45.5 m로 결정하였으며, 내부 담수부의 높이는 호소부와 동일하다고 가정하였다.

수치모형에 적용한 주요 하중으로는 지진에 의한 관성력, 정수압, 동수압, 취수탑 자중 및 부속시설물 자중이 있으며, 동수압은 Westergaard 부가질량법, Chopra 부가질량법, CASI 기법을 각각의 수치모형에 적용하였다. Chopra 부가질량법의 경우, 높이별 총동수압에 대한 동수압 분포식이 없기 때문에 구조물-유체 경계 절점에 균등 분할하여 적용하였다. 지진하중에 대한 인공지진파의 지반가속도 계수는 지진구역계수 및 위험도계수, 지

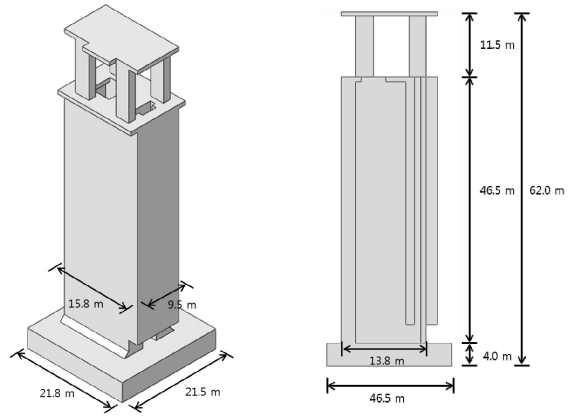


Fig. 8. Dam intake tower

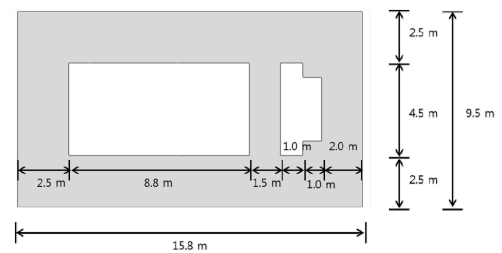


Fig. 9. Cross-section of dam intake tower

Table 3. Parameters for artificial earthquake generation

Parameters	Values	Evaluation conditions	
Seismic zone factor	0.11	Seismic zone	1
Importance factor	1.4	Return period	1,000 years
Seismic coefficients ( $C_a / C_v$ )	0.09 / 0.09	Site class	SA

반계수를 Table 3 [1, 12]과 같이 가정하여 0.126 g로 결정하였으며, 취수탑 전면에 대한 동수압 효과를 고려하기 위하여 수평 2방향(x, y방향)과 연직방향(z방향)으로 총 15초 동안 기초 저면에서 직접 가진하였다(x, y, z방향은 Fig. 12 참고). 연직방향 지진력은 댐 설계기준 [1]에 따라 수평방향 지진력의 1/2을 적용하였다.

취수탑의 콘크리트 물성치는 댐설계기준 [1]에 따라 결정하였으며, 국내 내진안전성 평가과정에 따라 구조체는 선형탄성체로 단순화하였다. 취수탑 구조물의 감쇠비는 저류수에 의한 감쇠효과를 고려하여 5% 적용하였다. CASI기법 적용시, 호소부의 모델링에 따른 유체의 물성치는 유체의 압축성 효과를 고려하여 적용하였다.

취수탑 구조물의 수치모형은 Abaqus 8절점 Solid 요소 (C3D8) [3]를 이용하여, 13,924개 절점과 10,106개 요소로 구성하였으며, 경계조건은 취수탑 저면의 자유도를 모두 구속하여 구조물-지반 상호작용을 강제 조건으로 적용하였다. 호소부는 동수압 적용방법에 따라, 부가질량법을 사용한 수치해석은 구조물 경계면의 각 절점에 동수압과 등가의 부가질량을 방향성을 두어 절점질량으로 적용하였으며, CASI법을 적용할 경우, 호소부를 직접 모델링하여 적용하였다. 호소부 크기는 원역의 영향을 최소화하기 위하여, 취수탑을 중심으로 호소부의 높이의 약 2 배의 크기인 200 m×200 m로 설정하였으며, Abaqus Acoustic 요소 (AC3D8) [3]를 사용하여 절점

242,369개, 요소 227,806개로 구성하였다. 호소부의 원역의 경계에는 흡수 경계조건을 적용하였으며, 호소부 및 담수부의 자유수면은 정상상태로 설정하였다.

### 3.2 동적내진해석 결과

#### 3.2.1 변위응답

지진하중에 의한 취수탑의 거동을 확인하기 위하여, 취수탑 상부 ( $z=50.5\text{ m}$ )에서의 수평방향 변위응답을 분석하였다. Figs. 10-11은 전체 가진시간 15초 동안의 x방향과 y방향의 변위응답 시간이력을 나타내며, 각 방향에 대한 최대 발생변위 및 오치는 Table 4와 같다. Figs. 10(a)와 11(a)와 같이 CASI 기법 적용 수치모형의 변위응답 시간이력은 Chopra 부가질량 적용 수치모형의 변위응답 시간이력과 매우 근사하게 나타나, 2.3절의 수치해석 결과 등을 고려했을 때 구조물에 작용하는 수평방향 동수압력이 동일할 것으로 사료된다. 반면에 Figs. 10(b)와 11(b)의 CASI 기법 적용 수치모형과 Westergaard 부가질량 적용 수치모형의 변위응답은 상당한 차이를 보이며, 최대 변위 및 최대 변위 발생시점이 상이하게 나타났다. 특히 y 방향 최대변위는 Westergaard 부가질량법이 CASI 기법 적용수치모형과 비교하여 68.87% 크게 나타났으며, 이러한 결과로 보았을 때 댐 취수탑과 같은 구조물의 3차원 지진해석 동수압 모형에 Westergaard 부가질량법 적용은 부적절한 것으로 판단된다.

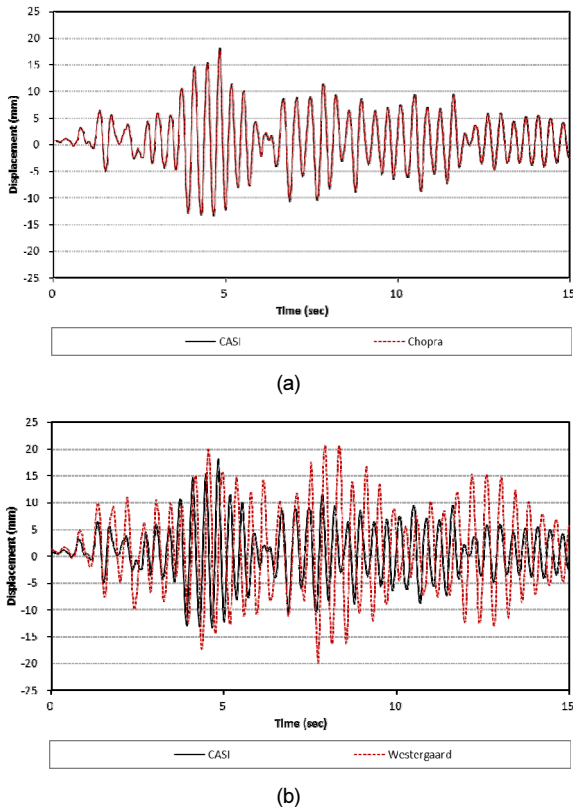


Fig. 10. (a) Comparison of x-direction displacement response histories (CASI, Chopra), (b) Comparison of x-direction displacement response histories (CASI, Westergaard)

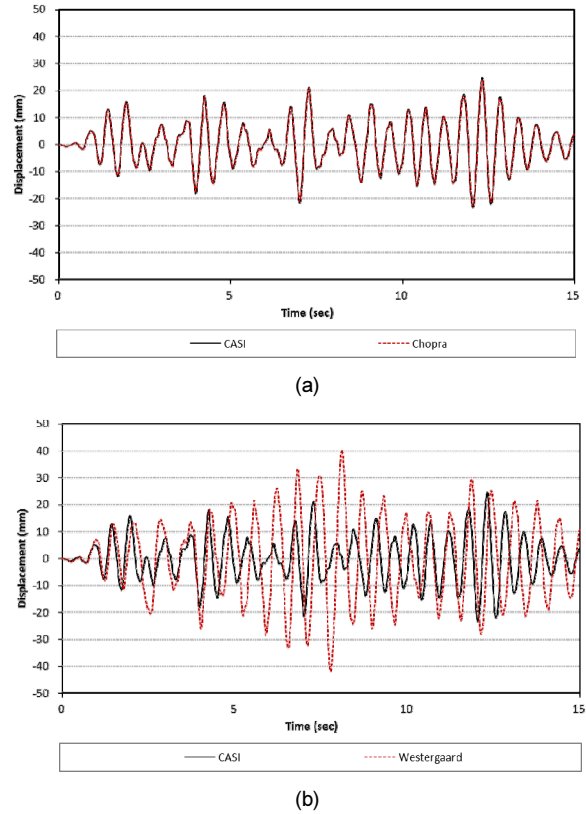


Fig. 11. (a) Comparison of y-direction displacement response histories (CASI, Chopra), (b) Comparison of y-direction displacement response histories (CASI, Westergaard)

Table 4. Maximum absolute values of displacement responses evaluated by CASI, Chopra and Westergaard hydrodynamic pressure methods

Hydrodynamic pressure methods	Maximum absolute values of x-direction displacement (mm)	Maximum absolute values of y-direction displacement (mm)
CASI method	18.126	24.718
Chopra added mass	17.850	24.027
Westergaard added mass	20.649	41.741

#### 3.2.2 전도에 대한 동적 안정성

구조물 내진안전성 검토에서 매우 중요한 전도에 대한 동적 안정성을 취수탑 구조물 저면에 작용하는 반력 편심비 (eccentricity ratio)의 시간이력을 분석하여 평가하였다. 편심비 계산식 [1, 12]은 식 (20)와 같다.

$$eccentricity\ ratio = - \frac{M_{\beta}(t)/N_{\beta}(t)}{B/2} \quad (20)$$

여기서,  $M_{\beta}(t)$ 는 구조물-지반 경계에 작용하는 지진 하중에 의한 모멘트,  $N_{\beta}(t)$ 는 구조물-지반 경계에 작용하는 수직항력,  $B$ 는 구조물 저면 길이이다. 편심비의 절대값이 1을 넘어가면 구조물-지반 경계에 작용하는 반력이 경계면 외부에 위치하여 전도현상이 일어나는 것을 의미한다. 편심비가 +1



보다 크면 댐체 상류방향으로 전도, -1 보다 작으면 하류방향으로 전도를 의미한다.

각 동수압 적용방법 별 동적시간이력해석을 통하여 계산된 편심비의 최대값은 Table 5와 같다. CASI 기법과 Chopra 부가질량법 적용 수치모형의 최대편심비를 비교하였을 때, CASI 기법 적용 수치모형의 최대편심비가 10.9% 큰 값을 보임으로써 약간 보수적인 결과를 도출하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 3차원 동수압 분포의 차이와 구조물 하부에 작용하는 수직 동수압이 CASI 기법 적용 수치모형에서 다소 작게 나타나기 때문으로 보인다. Westergaard 부가질량법 적용 수치모형은 CASI 기법 적용 결과보다 29.4% 큰 최대편심비를 보여 전도에 대한 불안정성을 매우 큰 폭으로 과다 평가하는 것으로 나타났으며, 그 원인은 부가질량에 의한 모멘트 값이 다른 수치모형에 비해 매우 크게 나타났기 때문이다. 이러한 사실은 Table 6에 나타난 동수압 적용방법별 절대최대주응력 값과 발생시간을 보

면 확인할 수 있다. CASI 기법과 Chopra 부가질량법은 매우 유사한 결과를 보이는 반면, Westergaard 부가질량법은 상당히 큰 응력과 다른 절대최대주응력 발생시기를 보여준다. Fig. 12의 최대주응력분포도에서도 같은 사실을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 3차원 형상을 고려하여 동해석이 수행되어야 하는 댐 취수탑의 내진안전성 평가과정에서의 동수압 적용방법을 고찰하기 위하여, Westergaard 부가질량법과 Chopra 부가질량법을 사용한 3차원 취수탑의 동수압 수치해석과 시간이력지진해석 결과를 정해에 근접하는 CASI 기법 결과와 비교, 분석하였다. 이를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

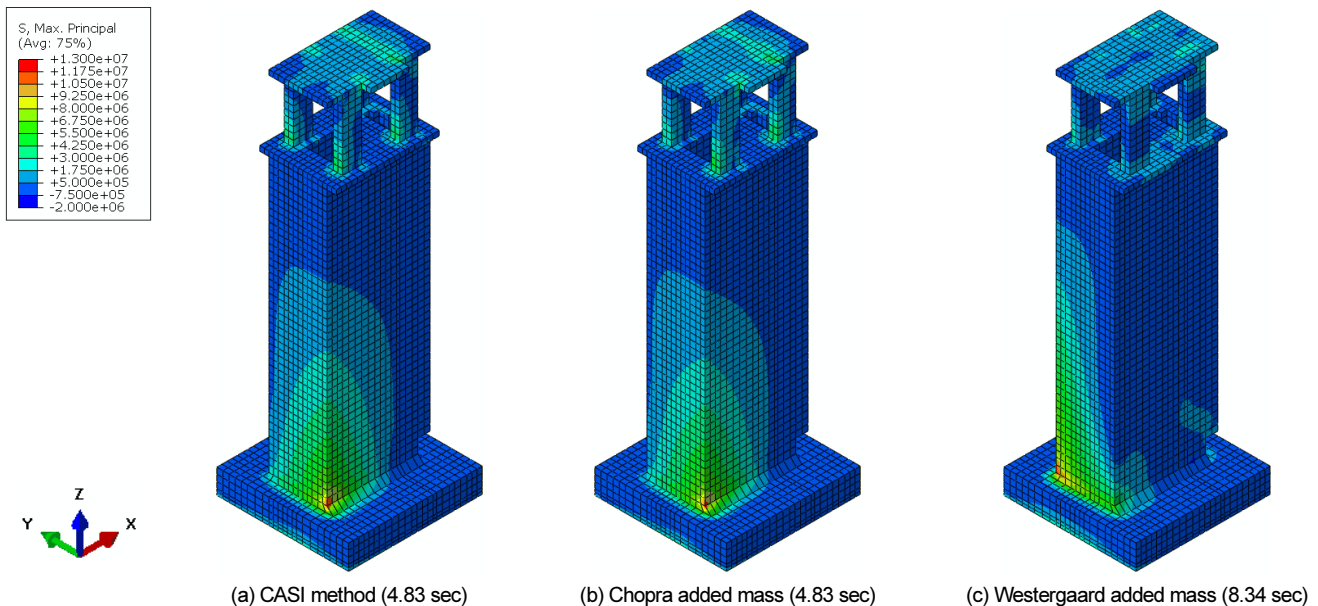
- 1) 국내 및 일본에서 주로 사용되는 사각형 단면의 취수탑 구조물을 모사한 여러 형상의 수치모형을 동해석한 결과, Chopra 부가질량법은 모든 경우에서 내부 동수압에 대하여 CASI 기법의 해와 동일한 값을, 외부 동수압에 대하여는 매우 근접한 결과를 보여주었다. 반면 무한 폭의 강체 수직벽에 대하여 유도된 Westergaard 부가질량법을 사용한 결과는 모든 경우에서 과다한 동수압을 초래하였다.
- 2) 각 동수압 적용방법을 사용하여 국내 취수탑의 전형적 제원에 대한 3차원 시간이력지진해석을 수행하였으며, 변위응답에서 Chopra 부가질량법 수치모형은 CASI 기법 모형과 거의 동일한 결과를, Westergaard 부가질량법 수치모형은 CASI 기법 모형보다 약 68% 까지 큰 결과를 나타냄으로써, 상대적으로 Westergaard 부가질량법이 크게 부정확한 결과를 초래할 수 있는 예를 보여주었다.
- 3) 3차원 취수탑 시간이력지진해석 결과들로부터 동적 편심비를 산정한 결과, Westergaard 부가질량법 수치모형은 CASI 기법 모형보다 약 29% 큰 최대편심비 값을 보여주었으며, 이는 Westergaard 부가질량법을 사용할 경우 크게 비경제적인 설계 또는 보강요구를 초래할 수 있다

**Table 5.** Maximum of absolute eccentricity ratio history values for dam intake tower evaluated by CASI, Chopra and Westergaard hydrodynamic pressure methods

Hydrodynamic pressure methods	Maximum of absolute eccentricity ratio in x-direction	Maximum of absolute eccentricity ratio in y-direction
CASI method	0.506	0.513
Chopra added mass	0.451	0.457
Westergaard added mass	0.655	0.664

**Table 6.** Maximum of absolute maximum principal stress history values for dam intake tower evaluated by CASI, Chopra and Westergaard hydrodynamic pressure methods

Hydrodynamic pressure methods	Maximum of absolute maximum principal stress (MPa)	Time (sec)
CASI method	11.23	4.83
Chopra added mass	11.50	4.83
Westergaard added mass	12.23	8.34



**Fig. 12.** Maximum principal stress contours for dam intake tower



는 것을 나타낸다. 반면에 Chopra 부가질량법 수치모형은 CASI 기법 모형보다 약 10% 과소 평가된 최대편심비 값을 보여주었으며, 동적 변위응답에서의 유사성에도 불구하고, 내진성능평가에서의 적용성 문제가 제기될 수 있다는 점을 보여주었다.

국내 댐 취수탑의 전형적 제원에 대한 단일 예를 통해서도 Westergaard 부가질량법과 Chopra 부가질량법을 적용한 동수압 모형은 3차원 내진안전성 평가에서 모두 부적합할 수 있다는 점을 고찰할 수 있으며, 반드시 3차원 형상을 고려하여야 하는 댐 취수탑 및 유사구조물의 내진해석 및 평가에서는, 계산시간과 계산자원이 크게 소요됨에도 불구하고, CASI 기법을 사용한 FSI 해석을 수행하여 정확하게 동수압을 반영할 필요가 있다고 판단된다.

### / 감사의 글 /

본 연구는 한국시설안전공단 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### / REFERENCES /

1. MOLIT, Dam design standard, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, c2011.
2. NISA, Seismic capacity investigation on power generation facilities, Nuclear and Industrial Safety Agency of Japan, c2012.
3. Dassault Syst ms, Abaqus 6,13 Analysis User's Manual, Dassault Systèmes, USA, c2013.
4. Westergaard HM, Water pressure on dams during earthquake, Transaction of the American Society of Civil Engineers, 1933;98: 418-433.
5. Chopra AK, Goyal A, Earthquake analysis and response of intake-outlet towers, EERC-89/04, University of California at Berkeley, c1989.
6. Muto M, Gersdorff N, Duron Z, Knarr M, Effective modeling of dam-Reservoir interaction effects using acoustic finite elements, USSD Conference: Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management, LA, USA, 2012;1161-1167.
7. Chopra AK, Liaw CY, Earthquake resistant design of intake-outlet towers, Journal of Structural Division, ASCE, 1975;101:1349-1366.
8. USACE, Structural Design and Evaluation of Outlet Works, EM 1110-2-2400, U.S. Army Corps of Engineers, c2003.
9. USACE, Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures, EM 1110-2-6053, U.S. Army Corps of Engineers, c2007.
10. Ministry of Environment, Waterway facilities standard, Korean Association of Waterway and Sewage, c2010.
11. Ministry of Environment, Research for provision of seismic design standard of waterway facilities, Ministry of Environment, c1999.
12. KISTEC, Seismic capacity evaluation and retrofitting manual for existing dams (draft), Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, c2011.