

댐과 수압철관의 내진성능기법 적용성 및 취약도 분석

허소현, 최동영, 팍 멩하이, 권민호*
경상국립대학교 토목공학과

Applicability and Vulnerability Analysis of Seismic Performance for Dams and Hydraulic Pipes

So-Hyeon Heo, Dong-Yeong Choi, Menghay Phoeuk, Minh Kwon*
Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University

요약 최근 들어 국내 지진 발생 횟수와 규모가 커짐에 따라 행정안전부는 내진성능평가 기준을 상향하였으나 수력 플랜트 시설물의 주요 구성 요소 중 하나인 수압철관에 대한 내진성능 평가는 제외되어 있는 실정이다. 이에 본 논문은 국내 내진성능평가 기준 및 CAV 평가지표를 통해 지진 시 수압철관과 댐의 거동 특성과 지진취약도를 도출하여 취약부위를 분석하였다. 국내 개정 전 지진가속도계수 0.154 g와 개정 후 0.22 g를 적용한 결과 콘크리트 댐체체의 경우 개정 전후 평균 약 7% 차이를 보였으며 수압철관은 발생 최대응력이 항복응력의 35%에 해당하는 매우 작은 결과를 보였다. 이에 내진성능 기준 개정은 수압철관과 댐체의 응력변화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 보인다. 내진성능평가 기법 중 CAV 평가지표를 도입하여 적용성을 분석한 결과 PGA 증가에 따른 CAV 증가가 전체 지진가속도 중 30%만이 비례 관계를 보였다. 이는 지진가속도의 지진지속시간과 지반조건에 따라 다른 매개변수가 고려되지 못하였기 때문에 판단 된다. 수압철관의 지진취약도를 도출한 결과 수압철관의 경우 지진가속도계수 0.4 g에서 10%의 파괴확률을 시작으로 0.5 g에서 60%의 급격한 파괴확률 증가와 0.4 g 이후부터 입수구에서 출수구로 취약부위가 이동하는 것을 확인하였다. 댐체체 부위별 취약도 도출 결과 수압철관을 감싸는 콘크리트 부위가 가장 높은 압축 파괴 확률을 보였다. 이에 0.6 g 이후의 지진가속도계수 상황에서는 수압철관 출수구 부근의 급격한 파괴와 콘크리트 댐체의 인장파괴를 주의해야 한다.

Abstract The standard for seismic performance evaluation of structures has become stricter in South Korea. However, hydraulic steel pipes are excluded from the new standard. Therefore, the behavior characteristics and earthquake safety of hydraulic steel pipes and dams were analyzed using the domestic seismic performance evaluation standard and the CAV evaluation index. As a result, a concrete dam body showed an average difference of about 7% before and after revision. A hydraulic steel pipe showed relatively low maximum stress. When analyzing applicability, only 30% of the total seismic acceleration showed a proportional relationship with the increase in CAV due to the increase of PGA. This was mainly due to other parameters that were not considered, such as the earthquake duration and ground conditions of the earthquake acceleration. When deriving the seismic fragility of hydraulic steel pipes, the probability of failure increased rapidly from 10% to 60% when seismic acceleration coefficients of 0.4 g and 0.5 g were applied, respectively. The concrete around a pipe shows the highest probability of compression failure. Therefore, sudden failure near the outlet of a hydraulic steel pipe and tensile failure of a concrete dam body should be highly focused on when the coefficient is greater than 0.6 g.

Keywords : Dam, Hydraulic Steel Pipe, Finite Element Analysis, Seismic Performance Evaluation, CAV, Earthquake Fragility

본 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C1003007).

*Corresponding Author : Minh Kwon(Gyeongsang National Univ.)

email: kwonm@gnu.ac.kr

Received January 30, 2023

Revised March 27, 2023

Accepted May 12, 2023

Published May 31, 2023

1. 서론

최근 2016년을 시작으로 2년에 걸쳐 경주와 포항에서 규모 5.4 이상의 지진이 발생하였으며 2021년 제주도에서는 규모 4.9의 지진이 발생하여 우리나라도 지진의 안전지대가 아니라는 인식이 높아지고 있다[1]. 댐 구조물은 주요 SOC(Social Overhead Capital)시설물로 지진 발생으로 인한 붕괴 시 심각한 인명피해와 경제적 손실을 발생시킨다. 2019년 댐 시설안전 가이드라인 연구 자료에 따르면 노후화되어 교체시기가 도래한 댐은 64%로 전체 댐 중 43 %에 해당하는 댐이 사용연수가 30년 이상인 것으로 조사되었다[2]. 노후화된 댐의 안전성을 확보하지 못한다면 지진 상황 시 댐의 비상방류 기능이 제 역할을 못 할 가능성이 있다. 이에 행정안전부는 기존의 댐내진설계기준을 개정하여 내진성능 목표치를 상향시켰다[3].

국의 콘크리트 댐 보고서에 따르면 댐 내부 수압철관이 짧은 경우 진동에 의한 영향을 고려한 유한요소해석을 권고하였다[4]. Nam [5]에 따르면 국내 수압철관 길이가 짧은 경우가 대다수임을 알 수 있다. 또한 Lim [6]은 콘크리트 댐 단면이 급격히 변하는 부분은 지진 시 취약한 부위로 간주 된다고 보고하였다. 하지만 댐의 내진설계기준 공통적용사항에서는 수력 플랜트 시설물의 주요 구성 요소 중 하나인 수압철관에 대한 내진성능 평가는 제외되어 있으며 국내 댐 내부 수압철관의 3차원 유한요소해석에 대한 평가가 부족한 실정이다[3]. 이에 3차원 유한요소해석을 통해 상향된 내진성능평가 기준을 반영하여 지진 시 수압철관의 응력과 이 영향에 따른 콘크리트 중력식 댐의 손상 및 지진 취약 부위를 분석하였다.

2. 댐과 수압철관의 유한요소 해석모델

2.1 형상 모델링 및 물성치

해석모델 대상 댐은 사용연수가 40년인 중력식 콘크리트 다목적댐이다[7]. 범용 유한요소 해석법인 ABAQUS 해석 프로그램을 통해 아래 그림 Fig. 1과 같이 저수지로부터 용수를 발전소에 공급하는 2개의 수압철관과 콘크리트 댐체체를 모델링하였다. 실제 댐과 수압철관의 응력 상호작용과 거동을 묘사하여 동적해석의 정확도를 높이기 위해 ABAQUS 해석 프로그램의 비선형 물성치 (Concrete Damaged Plasticity)를 추가하여 해석을 수행하였다.

콘크리트 댐체체 부위별 콘크리트 강도는 현장에서 수행한 비파괴검사 결과로 도출하였다. 해석 모델에 사용된 4종의 콘크리트는 Table 1과 같이 밀도 및 포아송 비는 동일하나 각각 다른 영계수를 반영하였다. 비선형해석을 위해 추가적인 재료 물성치는 Table 2에 정리하였다. 수압철관에 대한 모델 특성값은 강재의 두께와 JIS 강재 기준에 따라 Fig. 2와 같이 SM41B(SM400B)와 SM50B(SM490B)의 물성치를 적용하였고 이에 따른 수압철관의 항복, 인장 및 허용응력은 Table 3과 같다 [8,9]. 콘크리트 댐체체와 수압철관의 Mesh는 사각형이며 수압철관의 곡면을 고려하여 수압철관을 둘러싸고 있는 콘크리트 부분은 Part로 나누어 삼각형인 Wedge 요소로 적용하였다.

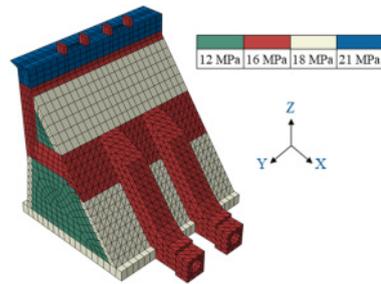


Fig. 1. Concrete dam body modeling and concrete strength by part

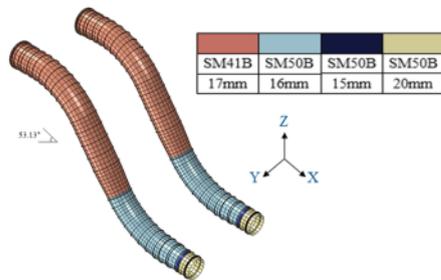


Fig. 2. Penstock modeling and steel material by part

Table 1. Properties of concrete parts

Concrete Strength	Mass Density (ton/mm ³)	Poisson's Ratio	Young's Modulus(MPa)
Concrete [12Mpa]	2.3E-9	0.2	21418.66
Concrete [16Mpa]			23072.55
Concrete [18Mpa]			23817.33
Concrete [21Mpa]			24854.15

Table 2. Nonlinear properties of concrete

Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
36.01°	0.1	1.16	0.667	0

Table 3. Properties of penstock

Steel Name	Mass Density (ton/mm ³)	Young's modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Allowable Stress (MPa)
SM41B	7.9E-9	205000	0.29	245	455	130
SM50B				325	550	175

2.2 하중조건

댐과 수압철관의 자중을 고려할 수 있도록 전체 댐모델에 중력 가속도를 적용하고 지진파를 X방향으로 가하였다. 댐체 하단에 X방향을 제외한 모든 자유도를 구속하여 10개의 서로 다른 가속도계수를 갖는 지진파를 댐체 하단에 댐 축방향과 직각인 x방향으로 가하였다.

적용된 지반가속도는 내진설계기준 공통적용사항에 명시된 표준설계 응답스펙트럼을 참고하여 이 값의 90%~130% 범위에 위치하는 지반가속도를 가력하였다 [3]. 실제 모델 대상 댐은 암반 위에 건설되어 있기 때문에 모델링에서는 암반과 댐체가 고정된 것으로 가정하여 지반가속도를 모델링된 댐체 하단에 가하였다.

향상된 내진성능 기준을 적용하여 비선형 모델의 거동 특성을 평가하기 위해 개정 전후의 가속도계수 0.154 g 와 0.22 g를 포함하여 가속도계수(0.1 g, 0.154 g, 0.22 g, 0.3 g, 0.4 g, 0.5 g, 0.6 g, 0.7 g, 0.8 g, 0.9 g, 1.0 g)를 10개의 지진가속도에 부가하여 총 110개의 시간이력해석을 수행하였다.

댐체 후면 유체는 이론적 공식을 통해 정수압과 동수압을 합한 값을 저수지의 상시 만수위인 53 m 높이로 댐 저면에서부터 수면까지 높이 변화에 따라 수압으로 적용하였다. 수압철관 내부는 유체가 완전히 채워진 상태로 고려하여 정수압 공식으로 도출된 수압을 발전소와 연결되기 직전까지의 콘크리트 댐체체에 매립되어 있는

Table 4. Load value of water

Type	Calculation formula	Pressure
Hydrostatic pressure	$P_w = W_w \times h$	$P_w = 1000 \times 9.81 \times h$
Hydrodynamic pressure	$P_d = \frac{7}{8} \times W_w \times K_1 \times \sqrt{H \times h}$	$P_d = \frac{7}{8} \times 9.81 \times 1000 \times 0.22 \times \sqrt{53000 \times h}$

수압철관 내부 면에 적용하였다. 적용한 동수압과 정수압 공식은 Table 4와 같다[10].

3. 시간이력해석

3.1 시간이력해석 기법

구조물의 내진성능평가를 위해 지진응답해석법 중 시간이력해석법을 도입하였다. 시간이력해석은 동적평형방정식인 Eq. (1)을 통해 구조물에 가해지는 하중과 구조물의 동적 특성을 임의의 시간에 따라 나타낸 것이다. 운동방정식은 지진에 의한 지반의 수평운동($u_g(t)$)과 지반에 대한 구조물의 상대변위($u(t)$)간의 관계식이며 m는 질량, c는 감쇠 k는 강성을 나타낸다.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) = f(t) \quad (1)$$

단자유도 방정식인 Eq. (2)는 n개의 자유도수와 지진 하중($F(t)$)에 대한 방정식이다. 우측항과 같이 지진의 동적하중은 구조물의 질량과 지진가속도를 곱한 값이며, 지진으로 인한 구조물의 질량과 지진가속도에 의한 관성력이 발생하고 그 방향은 지진방향과 반대로 작용한다.

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

3.2 국내 지진에 대한 시간이력해석 결과

댐모델의 국내 지진에 대한 비선형 거동 특성과 취약 부위를 확인하기 위해 시간이력해석을 수행하였다. 국내 내진설계 공통사항에 명시되어 있는 기준을 따라 SeismoArtif 프로그램에 의해 생성된 지반가속도를 0.22 g의 가속도계수로 적용하였다[3,11].

댐체체 상부 위어(weir)의 연결부위에서 최대 압축응력 2.786 MPa 이 발생하였으며, 이 값은 모델에 사용된 정적 압축강도 16 MPa의 약 17%로 매우 작은 결과값이다. 최대 인장응력은 휨인장강도인 2.52 MPa의 약 58.8%에 해당하는 1.482 MPa이 댐 상부 후면에 나타났다.

수압철관의 최대응력 47.05 MPa은 유체가 하강하기 시작하는 엘보(elbow)에 발생하였으나 콘크리트 댐체체의 경우 대부분의 지진 시간대에서 주로 수압철관을 감싸는 부위 중 출수구 부근에서 비교적 높은 인장, 압축응력이 발생하였다. 이에 국내 내진설계 기준에 부합하

는 지진 환경에서 댐은 지진의 영향을 주로 수압철관을 감싸고 있는 댐체체가 부담하는 것으로 보인다.

3.3 내진성능평가 기준 개정에 따른 분석

개정 전후의 가속도계수 0.154 g와 0.22 g를 부가한 Table 5와 같이 비선형모델의 시간이력해석결과 콘크리트 댐체체에서는 최대인장응력 2.693 MPa, 최대압축응력 22.654 MPa이 나타났다. 이때 Kim [12]의 선행연구에 따르면 지진가속도 NO.6은 원거리 지진으로 구조물과 비슷한 고유진동수로 인해 공진을 일으켰을 가능성이 있다.

댐체체의 경우 0.154 g에서 0.22 g로의 가속도계수 증가와 콘크리트의 응력 증가는 비례적인 관계를 보이지 않았다. 또한 개정 전후의 가속도계수가 평균 약 0.07의 차이로 댐체체 응력변화에 미미한 영향을 보였다. 수압철관의 발생 최대응력 60.489 MPa은 수압철관 항복응력의 35%이며 가속도계수 0.154 g와 0.22 g를 적용한 경우 발생한 응력의 차이는 크지 않았다. 결과적으로 개정 전후의 가속도계수 증가는 수압철관과 댐체의 응력변화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

4. CAV 적용성 분석

4.1 댐 구조물의 CAV 내진성능평가 기법

내진성능평가 방법 중 하나인 누적적대속도 (CAV, Cumulative Absolute Velocity)는 지진파의 가속도별 지속시간을 포함하고 있는 평가 지표이며, 주로 원전구조물의 내진설계에 적용되어 지진위험도를 판별하는 기준으로 사용되고 있다. CAV는 지진으로 인한 구조물의 손상을 평가하는데 높은 신뢰도를 가지는 매개변수로 매우 보수적인 평가지표이다[13]. 이에 중요 SOC시설인 댐 구조물을 대상으로 다방면의 내진성능을 평가하기 위해 개정된 내진성능평가 기준을 적용하여 관계식 Eq. (3)을 통해 CAV를 도출하였다. 국내 내진설계 개정 전후의 내진성능평가 최대지반가속도를 적용한 해석결과를 통해 CAV 값을 산출하고 기존연구와 비교하여 국내 댐 구조물에 부합하는 CAV 평가지표의 적용성을 확인하였다.

Kim [14]의 연구에서는 CAV 한계를 제시하기 위해 각기 다른 7개의 댐을 대상으로 여러 지진가속도를 적용하여 국내 내진성능평가 기준에 해당하는 관계식 Eq. (4)를 제안하였다. 위 연구는 5%의 파괴확률을 가지는 댐들의 내진성능값들 중 최솟값을 CAV의 한계값으로 선정하여 내진설계기준과 비교하였다. 해당 연구는 관계식

Table 5. Result of time history analysis according to revision of seismic design standard

Earthquake	Peak ground acceleration	Dambody		Penstock
		Maximum compression stress	Maximum tension stress	Max Mises
1	0.154 g	-5.67565	2.08404	59.4319
	0.22 g	-6.22166	2.1856	59.4319
2	0.154 g	-3.54059	1.7938	59.4319
	0.22 g	-3.54059	2.03834	59.4319
3	0.154 g	-3.54059	1.7938	59.4319
	0.22 g	-3.54059	1.7938	59.4319
4	0.154 g	-3.76065	1.7938	59.4319
	0.22g	-6.04016	2.17237	59.4319
5	0.154g	-5.18076	2.17132	59.4319
	0.22g	-4.78611	2.11289	59.4319
6	0.154g	-22.6544	2.69266	60.4894
	0.22g	-6.64332	2.17078	59.4319
7	0.154g	-5.29873	2.16315	59.4319
	0.22g	-6.59692	2.08368	59.4319
8	0.154g	-3.60312	2.16167	59.4319
	0.22g	-4.01069	2.02533	59.4319
9	0.154g	-5.26809	2.19107	59.4901
	0.22g	-6.71917	2.18556	59.4901
10	0.154g	-7.81957	2.27127	59.4901
	0.22g	-6.97382	2.2378	59.4901

Eq. (4)를 제안하여 개정 전의 내진성능평가 최대지반가속도 0.154 g에 해당하는 CAV 값은 0.13 g·sec, 개정 후 0.22 g에 해당하는 CAV는 0.18 g·sec를 제안하였다.

해석 대상 댐은 사용연수가 40년으로 노후된 댐이므로 이와 관련된 Nahar [15]의 선행 연구에서의 CAV 공식을 해석모델에 적용하여 비교하였다. 콘크리트 댐의 사용연수를 고려한 Eq. (5)에 의하면 CAV 관계식을 제안한 연구에 따르면 40년에 해당하는 CAV의 한계치는 0.355 g·sec이다.

$$CAV = \int_0^{t_{max}} |a(t)| dt \quad (3)$$

$$CAV_{Kim} = 0.8394PGA + 5 \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$CAV_{Nahar} = -0.0057t + 0.5827 \quad (5)$$

4.2 댐과 수압철관의 CAV 적용 결과

본 해석은 댐모델에 각각 0.154 g와 0.22 g의 가속도계수를 부가하여 총 20개의 지진가속도를 적용하였다. 댐체체의 가속도는 댐모델의 상부 중앙의 요소로부터 도출하였으며 두 개의 수압철관은 각각의 최상부 요소 2개의 평균값으로부터 도출하였다.

Fig. 3은 각 지진가속도의 CAV 결과와 선행연구된 CAV 내진설계 기준 값을 비교한 그래프이다. 댐체체에 도출한 CAV 결과 최솟값은 가속도계수 0.22 g의 지진 지속시간이 짧은 지진 No.1에서 0.129 g·sec으로 나타났으며 최댓값은 가속도계수 0.22 g의 지진지속시간이 긴 No.10에서 0.451 g·sec으로 나타났다. Fig. 3과 같이 관계식 Eq. (4)에 따른 최대지반가속도에 해당하는 CAV 값보다 댐모델의 CAV 값이 대체로 높은 결과를 보였다. 위 관계식에 따르면 PGA와 CAV는 비례관계이지만 해석결과는 전체 지진 중 30 %만이 비례관계를 보였다.

Fig. 4는 각 지진가속도의 지진지속시간에 따른 콘크리트 댐체체의 CAV 증가를 나타낸 그래프다. Fig. 3과 Fig. 4를 통해 0.154 g에서 0.22 g으로 가속도계수가 증가하거나 지진지속시간이 길어짐에 따라 구조물에 발생하는 CAV 값의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 각 지진가속도의 지진지속시간에 따른 CAV의 분포 그래프이다. 0.154 g와 0.22 g의 도출된 각각의 평균 CAV 값은 0.298 g·sec와 0.29 g·sec로 평균적으로는 안전 측에 속하지만 Fig. 5와 같이 지진의 지속시간이 긴 경우에 대해서는 약 35 % 확률로 사용연수 40년에 해당하는 제안식 Eq. (5)의 0.355 g·sec를 넘어서는 결

과를 보였다.

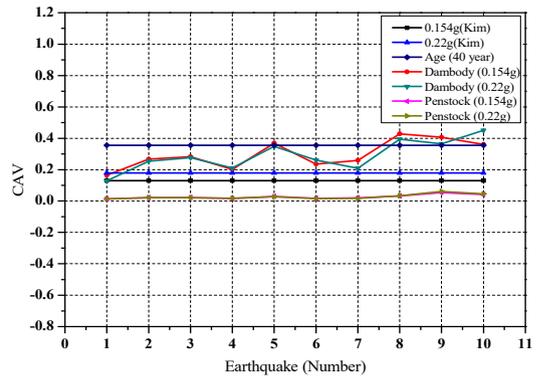
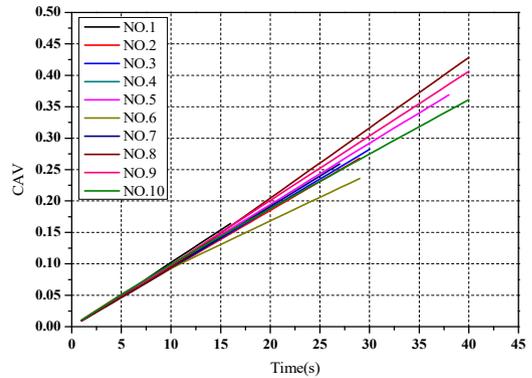
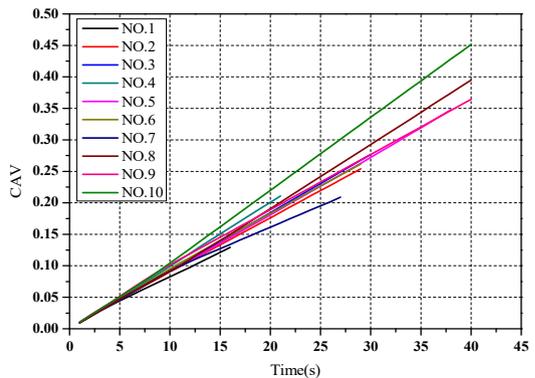


Fig. 3. Comparison graph of CAV results



(a) PGA 0.154 g



(b) PGA 0.22 g

Fig. 4. CAV results of concrete dams according to seismic acceleration time

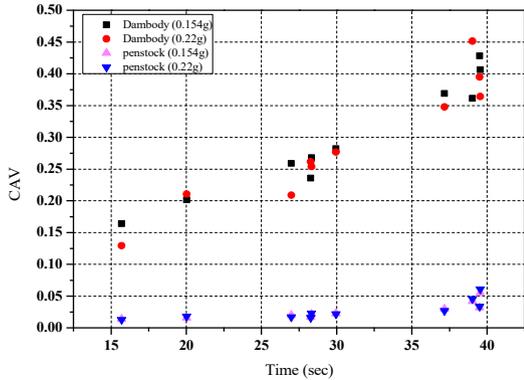


Fig. 5. Distribution of CAV according to earthquake duration

수압철관의 CAV 도출 결과 최소값은 0.0128 g·sec, 첫값 0.0608 g·sec으로 나타났다. 관계식 Eq. (3)을 통해 CAV를 대입하여 PGA를 계산한 결과 각각 0.0152 g, 0.072 g가 도출되었으며 이는 내진성능기준에 비해 매우 작은 수준이다. 이에 CAV는 댐 전체 구조물에 대한 유효한 평가지표가 되지만 수압철관과 같은 특이 단면부에 대해서는 CAV 평가지표가 효과적이지 않다고 판단된다.

CAV 평가지표는 누적된 가속도의 합을 나타내므로 지진의 지속시간이 길어질수록 CAV 값이 상승하며 약 40초의 지속시간을 가지는 지진에 대해 30초대의 지진보다 확연하게 높은 CAV 값이 도출되었다. 이는 동일한 지진계수를 부가하였음에도 불구하고 지진 지속시간에 따라 CAV 결과가 증가함을 나타냈다. 이에 선행연구의 CAV 내진설계 평가기준 산정 공식은 범용적으로 쓰기에 적절하지 않다고 생각한다. CAV 평가지표는 지진의 지속시간이 길어짐에 따라 누적되는 손상에 지표가 될 수 있으나 CAV 평가지표의 정확도를 높이기 위해서는 지진 지속시간과 각기 다른 지반의 특성에 따른 서로 다른 매개변수를 고려한 한계치가 필요하다고 판단된다.

5. 댐과 수압철관의 지진취약도 평가

5.1 취약부위 선정 및 한계상태 설정

지진취약도 곡선은 지진의 불확실성을 반영하여 구조물의 취약부를 중심으로 확률론적 지진위험도를 도출하고 이를 통해 내진성능을 검토하는 방안이다. 이에 Eq. (6)과 같이 표준 정규분포 함수의 누적확률분포인 파괴확률 $F_k(x)$ 을 지진의 특성에 따른 관계식으로 나타내었

고 Likelihood의 최대치를 이용하여 대수 누적정규분포의 중앙값 c_k 과 표준편차 ζ_k 를 추정하였다. 여기서 x 는 최대지반가속도(PGA)와 스펙트럼의 특성 등에 따라 적용되며 Φ 는 누적정규분포함수이다[16].

$$F_k(x) = \Phi \left[\frac{\ln(x/c_k)}{\zeta_k} \right] \quad (6)$$

구조물의 취약한 부분을 파괴 확률로 나타내기 위해 한계상태를 설정하였다. 댐체체는 콘크리트로 이루어진 구조물로 발생한 응력이 인장파괴와 압축파괴의 한계기준을 넘어서는 순간을 한계상태로 판단하였다. 인장파괴와 압축파괴의 한계기준은 댐내진설계기준과 콘크리트 구조기준(2012)을 참고하였다[17,18]. 댐내진설계기준의 동역학적 내진설계기준에 따라 인장파괴 기준을 쪼갠 인장강도의 1.5배를 적용하고 압축파괴는 정적 압축강도의 1.15배를 부가하여 설정하였다.

댐체체는 부위별로 구조용 콘크리트인 Part1, Part2, Part3과 수압철관을 둘러싸고 있는 외부콘크리트 Part4를 Fig. 6과 같이 구분하여 모델링하였다. 중력식 콘크리트댐에 대한 Parvathi [19]의 선행연구에서 2차원 해석 결과 균열에 가장 취약하다고 판단되는 부위는 댐체체 후면 상부와 중앙부 및 하단, 댐체체 전면의 경사 단면 전환 부분이다. 또한 3차원시간이력해석결과 대부분의 높은 응력은 댐체체 전면의 수압철관을 감싸고 있는 외부콘크리트와 댐체체 후면의 입수구에서 나타났다. 이에 선행연구와 시간이력해석결과를 반영하여 취약부로 예측되는 부위인 수압철관을 감싸고 있는 외부콘크리트와 입수구에 사용된 콘크리트의 압축강도인 16 MPa를 기준으로 한계상태를 설정하였다[20].

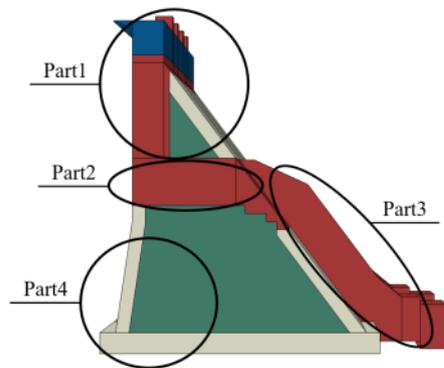


Fig. 6. Part selection for seismic fragility analysis

Table 6. Limit state of concrete dam body and penstock

Type	Failure mode	Limit state value(MPa)
Entire dambody(C)	Compression destruction of concrete at dambody	$f_{ck} \times 1.15 = 16 \times 1.15 = 18.4\text{MPa}$
Part1(C)		
Part2(C)		
Part3(C)		
Part4(C)		
Entire dambody(T)	Tension destruction of concrete at dambody	$0.57 \sqrt{f_{ck}} \times 1.5 = 0.57 \times \sqrt{16} \times 1.5 = 3.42\text{MPa}$
Part1(T)		
Part2(T)		
Part3(T)		
Part4(T)		
Limit state of penstock	Allowable Stress of steel penstock	$\sigma_a = 175\text{MPa}$

댐내진설계기준에서의 설계거동한계는 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분하고 있다. 붕괴방지수준은 수압철관과 같은 특이 단면부는 3차원 해석을 권고하고 있으며 상세부재의 응력을 검토하도록 하고 있다. 또한 댐의 부속시설은 설계강도 내에 있도록 규정하고 있으므로 수압철관은 설계 허용응력을 한계상태로 설정하여 Table 6과 같이 나타내었다.

5.2 콘크리트 댐체체의 부위별 지진취약도 평가

콘크리트 댐체체 부위 중 인장과 압축에 따른 지진 취약부위를 도출하기 위해 Fig. 7 ~ Fig. 10과 같이 댐체체 부위별 지진취약도를 나타내었다. X축은 구조물에 가력한 지진가속도(PGA)의 가속도계수 크기를 나타내고 Y축은 구조물이 파괴한 확률이다. 점은 발생한 파괴확률을 나타내며 대수정규분포로 표현한 실선과 점선은 각각 인장파괴와 압축파괴를 나타낸다.

Part1을 제외한 모든 부위는 지진가속도계수 0.4 g이 상부터 파괴확률을 보였으며 압축파괴가 지배적으로 나타났다. 콘크리트 댐체체의 상부인 Part1의 경우 0.5 g 이상의 가속도계수에서부터 파괴 확률을 보였으나 발생 최대 확률 0.2%로 비교적 작은 결과를 보였다. 그러나 댐체체의 상부는 위어(weir)와 같이 전체 댐 표면적보다 비교적 콘크리트 표면적이 작은 RC구조물을 포함하고 있으므로 인장파괴에 유의해야 할 것이다.

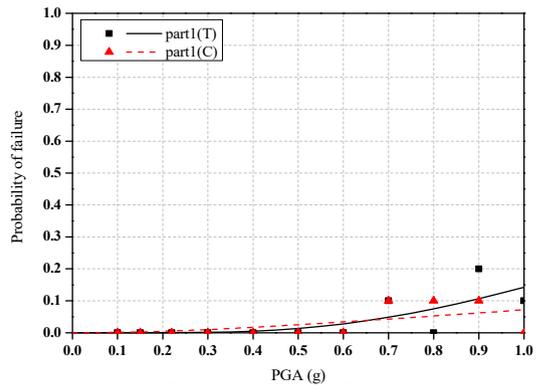


Fig. 7. Seismic fragility curves of tension and compression of part1

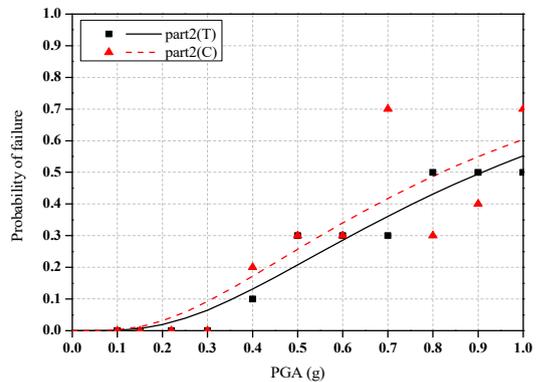


Fig. 8. Seismic fragility curves of tension and compression of part2

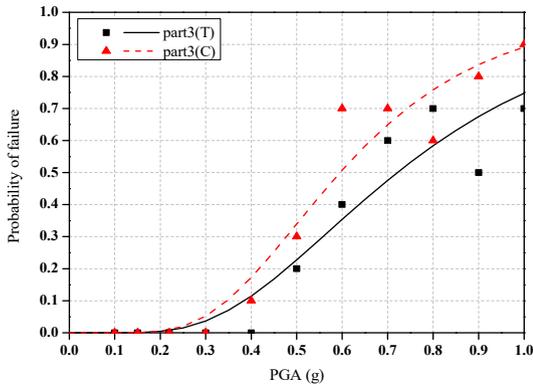


Fig. 9. Seismic fragility curves of tension and compression of part3

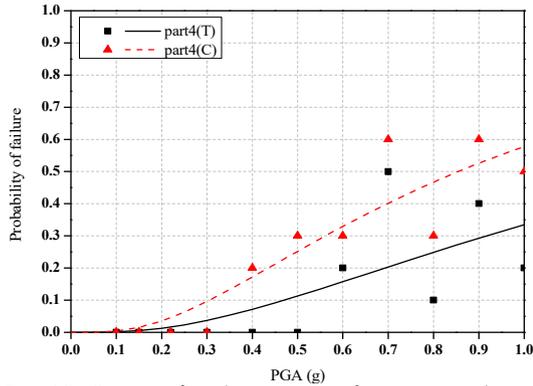


Fig. 10. Seismic fragility curves of tension and compression of part4

부위별 지진취약도 도출 결과 가장 취약한 파괴 확률을 보인 부위는 수압철관을 둘러싸고 있는 콘크리트 부위인 Part3에서 나타났다. 이는 콘크리트 단면형상 변화가 크고 콘크리트 두께 길이가 작을 뿐만 아니라 수압철관에 의한 진동을 일부 흡수하여 Part3에 높은 파괴확률이 나타난 것으로 보인다. 또한 댐체체의 입수구인 Part2는 압축파괴와 인장파괴 Part3에 높은 파괴확률이 나타난 것으로 보인다. 또한 댐체체의 입수구인 Part2는 압축파괴와 인장파괴에 유사한 확률로 취약함을 보였다. 댐체체의 최하단 부위인 Part4의 경우 인장파괴보다 압축파괴에 더욱 큰 파괴확률을 보였는데 이는 전체 댐의 단위중량 무게의 압축으로 인해 발생한 것으로 판단된다.

5.3 전체 콘크리트 댐체체와 수압철관의 지진취약도 평가

수압철관의 파괴확률 분석결과 Fig. 11과 같이 지진 가속도계수 0.4 g에서 10 %의 파괴확률 이후 0.5 g에서

60%의 급격한 파괴확률 증가를 보였으며 0.8 g 가속도계수 적용 이후부터 모든 지진가속도 상황에서 허용응력을 넘어서는 결과를 보였다. 수압철관의 강관은 앞선 진동시험과 같이 공진에 유효한 영향을 받는 구조물로 확인되었다. 특정 가속도의 공진에 의한 영향과 높은 가속도계수가 더해짐으로써 0.5 g 이상의 가속도계수에 대해 급격하게 한계 응력 상태를 넘어서는 결과가 나타난 것으로 판단된다.

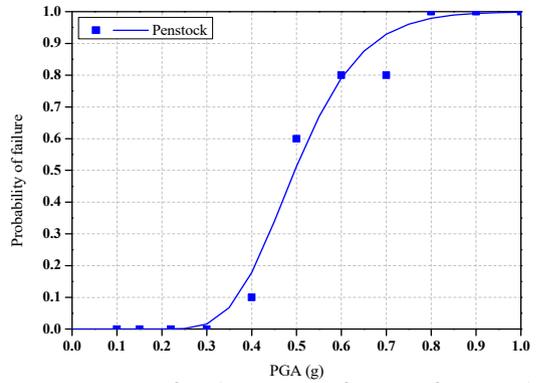


Fig. 11. Seismic fragility curves of stress of penstock

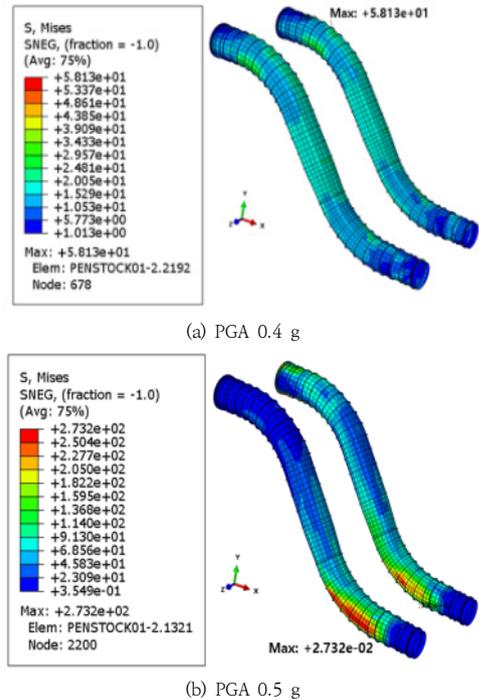


Fig. 12. Location of maximum stress

모든 지진가속도 해석에서 동일하게 수압철관의 한계 상태 도달 이전인 가속도계수 0.4 g 이하인 경우 수압철관 입수구에서 비교적 높은 응력대를 보였다. 그러나 0.5 g 이후부터는 출수구 이전 엘보 상부에서 가장 높은 응력이 나타났다. 이로써 지진발생 이후 단계별 취약부위가 입수구 부근에서 출수구 이전 엘보 부근으로 이동하는 것으로 판단된다. Fig. 12는 수압철관의 지진가속도계수에 따른 최대응력 발생 위치를 대표적으로 나타낸 그림으로 No.5의 지진가속도를 각각 0.4 g, 0.5 g의 가속도계수를 부가한 해석 결과이다.

본 해석은 매설된 수압철관에 대한 내진평가임에도 불구하고 0.5 g의 가속도계수에서부터 60 % 파괴확률을 나타냈으므로 노출된 수압철관의 경우 더욱 높은 파괴확률을 보일 것으로 예측된다. 또한 내진성능 평가 시 수압철관을 고정하고 있는 연결부재와 유체의 유동에 의한 영향 등과 같은 부수적인 환경요인을 고려하여 최대한 보수적으로 평가되어야 한다고 판단된다.

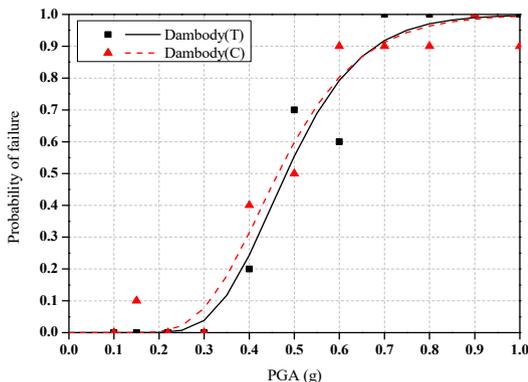


Fig. 13. Seismic fragility curves of tension and compression of concrete dam body

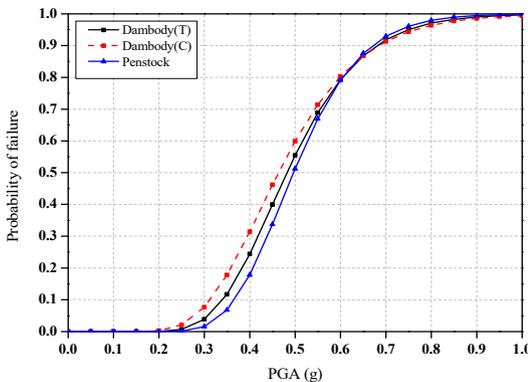


Fig. 14. Seismic fragility curves of tension and compression of penstock

전체 콘크리트 댐제체에 대한 지진취약도 그래프는 Fig. 13과 같다. 가속도계수 0.4 g 이후 인장파괴와 압축파괴가 나타났으며 0.7 g 이전으로 압축파괴가 지배적이었으나 이후는 인장파괴가 지배적으로 나타났다. 전체 댐제체와 수압철관의 취약부위 분석을 위한 지진취약도 도출 결과는 Fig. 14와 같다. 댐제체와 수압철관의 파괴확률을 통한 대수정규분포는 매우 유사한 파괴 양상을 보였으며 댐제체가 0.3 g와 0.6 g 사이의 가속도계수에서 수압철관보다 높은 파괴확률을 보였으나 0.5 g 이후 수압철관의 급격한 파괴확률이 나타났다.

수압철관의 최대응력이 발생한 해당 부위를 감싸고 있는 콘크리트 부위에서도 다른 콘크리트 부위보다 비교적 높은 응력을 나타냈다. 이로써 수압철관의 동적 지진거동으로 인한 응력 영향은 이를 감싸고 있는 댐제체에 유효한 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 결과적으로 댐제체는 0.5 g 이하의 가속도계수에서 압축파괴가 지배적이며 0.5 g 이상의 가속도계수에서는 수압철관의 급격한 파괴와 이에 따른 댐제체의 인장파괴 발생 가능성이 예측된다.

6. 결론

국내 노후화된 댐을 대상으로 콘크리트 댐 구조체와 수압철관을 조합한 모델을 제작하여 3차원 유한요소해석을 통해 상향된 내진설계기준을 적용한 내진성능평가 및 지진취약도를 도출하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 내진성능평가기준에 부합하는 지진가속도계수 0.22 g를 국내 지진에 부가하여 전체 댐모델에 적용한 결과 주로 수압철관을 감싸는 콘크리트의 출수구 부근에서 높은 인장, 압축 응력을 보였다. 이는 수압철관의 진동으로 인한 응력발생을 콘크리트가 일부 흡수함으로써 비선형 해석이 수압철관과 댐체의 응력 상호작용을 더욱 효과적으로 나타내는 것으로 판단된다.
- (2) 향상된 내진성능 기준을 적용하여 비선형 모델의 거동 특성을 평가하기 위해 개정 전후의 가속도계수를 부가한 시간이력해석 결과 수압철관의 경우 최대 발생 응력 항복응력의 35%로 나타났으며 콘크리트 댐제체는 평균 약 7 % 차이로 매우 작은 응력 결과를 보였다. 이에 개정 전 가속도계수 0.154 g에서 개정 후 0.22 g의 증가는 수압철관과 댐체의 응력변화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

- (3) 개정된 내진성능평가 기준을 적용하여 CAV를 도출한 결과 가속도계수가 증가하거나 지진지속시간이 길어짐에 따라 구조물에 발생하는 CAV 값의 차이가 커졌다. 하지만 전체 지진가속도 중 30%만이 PGA 증가에 따라 CAV 값이 증가하는 것을 확인하였다. 이에 CAV 평가지표는 지진의 지속시간이 길어짐에 따라 누적되는 손상의 지표가 될 수 있으나 CAV 평가지표의 정확도를 높이기 위해서는 지진 지속시간과 각기 다른 지반의 특성에 따른 서로 다른 매개변수를 고려한 한계치가 필요하다고 판단된다.
- (4) 콘크리트 댐체체의 부위별 지진취약도 도출 결과 수압철관을 감싸는 콘크리트 부위가 70%의 인장 파괴 확률과 90%의 압축파괴 확률로 가장 높은 파괴 확률을 보였다. 전체 댐체체 콘크리트는 지진가속도계수 0.5 g 이후로 압축파괴보다 인장파괴가 지배적인 것으로 확인되었다.
- (5) 댐체체에 매립된 수압철관의 경우 내진성능평가에서 매우 안전하게 평가되었으므로 현행과 동일하게 수압철관에 대한 내진성능평가를 다루지 않는 것이 적절한 것으로 판단되나 지진가속도계수 0.4 g에서 10%의 파괴확률을 시작으로 0.5 g 이상의 가속도계수에서 60% 이상으로 급격하게 한계응력상태를 넘어서는 결과를 보였다. 또한 최대응력 발생부위가 가속도계수 0.5 g를 전후로 입수구 부근에서 출수구 직전 엘보(elbow) 부근으로 이동하였다. 이에 지진가속도계수 0.5 g 이후부터는 수압철관의 취약 부위가 유체 하강 부위를 따라 발생하며 이를 둘러싼 콘크리트의 인장파괴를 주의해야 한다.

References

- [1] Korea Meteorological Administration (KMA), 2021 17:19 Earthquake Earthquake Analysis Report on the scale of 4.9 in Jeju's, Dec. 2021.
- [2] Korea Water Resources Corporation (K-water), Study on Public Safety around Dams and Dam Safety Guideline, pp.36-37, 2019.
- [3] Ministry of the Interior and Safety (MoIS), Common applications of seismic design standards, 2017.
- [4] M. Wieland, Seismic design of major components, International water power & Dam construction, pp.16-19, 2013.
- [5] M. J. Nam, J. Y. Lee, W. Y. Jung, Development of Water Hammer Simulation Model for Safety Assessment of Hydroelectric Power Plant, Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol21, No.1, pp.760-767, 2020.
- [6] J. Y. Lim, 2014, "A Comparison of Seismic Performance Evaluation Result of Concrete Dam Along the Direction of Dam Axis", Korea Concrete Institute, pp.91-92.
- [7] Ministry of Construction, Industrial Base Development Corporation (K-water), Daechong Multipurpose Dam Construction, 1981.
- [8] JIS, Steel standard, About SM490B, pp.1-2, 2014. DOI: <http://www.ishiharashouji.jp/QA.html>
- [9] JIS, Steel standard, About SM400B, pp.1-2, 2014. Available at: <http://www.ishiharashouji.jp/QA.html>
- [10] Korea Construction Standards Center (KCSC), Concrete gravity dam (KDS 54 50 00 : 2018), pp.1-5, 2018.
- [11] Seismosoft, Earthquake Software for Artificial Accelerograms Generation, 2020. DOI: <https://seismosoft.com/products/seismoartif/>
- [12] W. J. Kim, "Seismic Fragility Analysis of Multi-functional Weirs by Three-Dimensional Nonlinear Analysis", Master's thesis, Department of Civil Engineering Graduate School, Gyeongsang National University, 2017.
- [13] G. Hardy, K. Merz, N. Abrahamson, & J. Watson-Lamprey, "Program on technology innovation : Use of cumulative absolute velocity (CAV) in determining effects of small magnitude earthquakes on seismic hazard analyses", EPRI report MD, 1014099; Palo Alto, CA, and the US Department of Energy, Germantown, 2006.
- [14] National Disaster Management Research Institute, Development of Seismic Safety Evaluation Technology for Dam, Reservoir and Bridges, pp.149-162, 2019.
- [15] T. T. Nahar, A. T. Cao, D. K. Kim, "Risk Assessment of Aged Concrete Gravity Dam Subjected to Material Deterioration Under Seismic Excitation", International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol14, pp.1-17, 2020.
- [16] D. K. Kim, Dynamics of Structures, Goomibook, 2005.
- [17] Korea Construction Standards Center (KCSC), Seismic Design of Dam (KDS 54 17 00 : 2019), 2019.
- [18] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Structural Standards of Concrete, 2012.
- [19] S. Parvathi, M. Mahesh, D. V. V. Raj Kamal, "Critical crack lengths of concrete gravity dam by using fracture mechanics", Materials Today: Proceedings, Vol38, No.5, pp.3149-3159, 2021.
- [20] Korea Water Resources Corporation (K-water), Assessment of Safety of Power Plant Considering Construction Site of Hydroelectric Plant, pp.23, 2017.

허 소 현(So-Hyeon Heo)

[준회원]



- 2021년 2월 : 경상국립대학교 토목공학과 (공학사)
- 2023년 3월 : 경상국립대학교 토목공학과 (석사)

<관심분야>

철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가

권 민 호(Minho Kwon)

[정회원]



- 2000년 8월 : Univ.of Colorado Boulder (공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 12월 : Univ. of Colorado, Denver (Research Fellow)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 경상국립대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가

최 동 영(Dong-Yeong Choi)

[준회원]



- 2023년 3월 : 경상국립대학교 토목공학과 (석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 경상국립대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가

팍 멩 하 이(Menghay Phoeuk)

[정회원]



- 2018년 7월 : ITC, Cambodia (공학사)
- 2019년 10월 : Insa Rennes, France (석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 경상국립대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가