

II. 학술 · 기술기사 (6편)

수질-수량 연계 강화를 위한 댐-보 운영 고도화 방안 (김현식 차장, K-water)

불확실성 증가에 따른 댐 · 저수지 위험도 평가 (임정열 수석연구원, K-water)

콜롬비아 이투안고 댐 건설 중 수재해 위험 사례 (김남룡 책임연구원, K-water)

『내진설계기준 공통적용사항』 제정에 따른 『댐 내진설계기준』 개정 (유진권 선임연구원, 김선옥 차장, 오병동 차장, 양승인 차장, K-water)

내진설계기준 강화에 따른 댐 내진안정성 평가 (조성배 선임연구원, 김태민 선임연구원, 김남룡 책임연구원, K-water)

파키스탄 Patrind 수력발전사업 소개 (임경희 차장, K-water)

『내진설계기준 공통적용사항』 제정에 따른 『댐 내진설계기준』 개정



유진권 선임연구원
(K-water)



김선옥 차장
(K-water)



오병동 차장
(K-water)

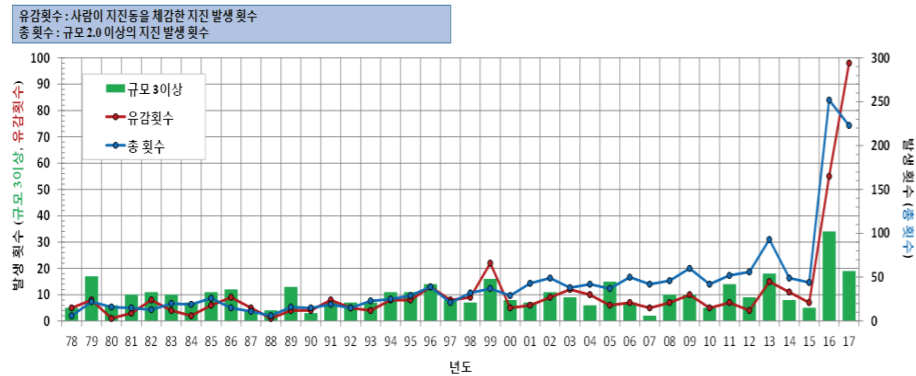


양승인 차장
(K-water)

개요

우리나라는 위치적으로 동쪽으로는 태평양판(Pacific plate), 남동쪽으로 필리핀판(Philippine plate), 북동쪽으로는 북아메리카판(North American plate)과 마주하고 있는 유라시아판(Eurasian plate) 내부에 위치하고 있어 판 경계부에 위치한 주변국들과는 달리 지진의 발생빈도가 낮고 재발 주기가 상대적으로 긴 특징을 지니고 있다. 하지만 최근 2년간 국내 지진 발생빈도는 가장 큰 폭으로 증가하고 있는 추세이며, 특히 2016년 9월 12일 경상북도 경주시 남남서쪽 8km에서 발생한 규모 5.8의 9.12 지진은 기상청에서 지진관측을 시작한 이래 기록된 가장 큰 규모의 강진으로도 기록된 바 있다. 9.12 지진으로 인해 인명 및 재산피해가 발생하였음은 물론이고 지진이 발생한 주변 지역뿐만 아니라 전국적으로도 대다수 국민들의 지진에 대한 경각심을 불러일으키는 계기가 되었다.

그림 1. 연도별 국내 지진 발생 추이 (가상칭)



내진설계기준 공통적용사항

2018년까지 관련 중앙행정기관의장이 반영해야 할 『내진설계기준 공통적용사항』의 주요 변경사항은 다음과 같다.

1) 설계지반운동수준

1997년 건설교통부에서 제정한 국내 내진설계기준의 상위개념인 내진설계기준연구 II에서는 행정구역을 이용하여 설계지반운동수준을 결정하는 방법을 제시한 바 있다. 이는 우리나라 각 행정구역 별로 분류된 지진구역(I, II)과 재현주기 500년에 해당하는 지진의 설계지반가속도를 의미하는 지진구역계수(Z), 그리고 재현주기 500년 빈도의 지진에 대하여 각기 다른 재현주기를 갖는 설계지진의 지반가속도비를 나타내는 위험도계수(I)로 표현된다. 『내진설계기준 공통적용사항』을 통해 명시된 지진구역 구분 및 계수, 위험도계수는 다음과 같다.

표 1. 지진구역 계수 (내진설계기준 공통적용사항, 2017)

지진구역	행정 구역		지진구역 계수(Z)
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종	0.11g
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부*	
II	도	강원 북부**, 제주	0.07g

* 강원 남부 : 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백

** 강원 북부 : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

표 2. 위험도 계수 (내진설계기준 공통적용사항, 2017)

재현주기(년)	50	100	200	500	1,000	2,400
위험도 계수(I)	0.4	0.57	0.73	1.00	1.40	2.0

기존 지진구역 구분 중 전라남도 남서부에 해당하는 지역이 지진구역 I 로 변경되었으며, 세종시가 새롭게 추가되었다. 또한 국제적 추세에 따라 위험도 계수 2.0의 4,800년에 해당하는 재현주기

가 새롭게 규정되었다.

2) 지반분류체계

「내진설계기준 공통적용사항」이 제정되기 이전까지 국내의 지반조건과는 상이한 미서부 지역의 내진설계기준(UBC-1997)의 지반분류체계를 준용하여 사용하여 왔다. 이에 따라 국내 현장지반 부지응답해석 결과와의 불일치 문제가 지속적으로 제기되어 온 것이 사실이다. 이번 내진설계기준 공통적용사항에서는 이러한 문제점을 해결하고자 기반암이 얇은 국내 지반환경을 고려하여 새로운 지반 분류체계가 제시되었다. 이를 위해 지표면으로부터 30m의 평균전단파속도($V_{s,30}$)를 적용하던 기존의 분류방식에서 벗어나 기반암의 깊이(H)와 기반암 상부 토층의 평균전단파속도($V_{s, soil}$)를 근거로 하여 표 3과 같이 총 6가지($S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$)로 지반을 분류하였다.

표 3. 지반분류체계(내진설계기준 공통적용사항, 2017)

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H(m)	토층 평균 전단파속도, $V_{s, soil}$ (m/s)
S_1	암반 지반	1 미만	-
S_2	알고 단단한 지반	1~10 이하	260 이상
S_3	알고 연약한 지반		260 미만
S_4	깊고 단단한 지반	20초과	180 이상
S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
S_6	부지 고유의 특성 평가 및 지반응답해석이 요구되는 지반		

여기서 기반암은 전단파속도가 760m/s 이상을 나타내는 지층을 의미하며, 기반암의 깊이와 무관하게 토층 평균 전단파속도가 120m/s 이하인 지반은 S_6 로 분류된다.

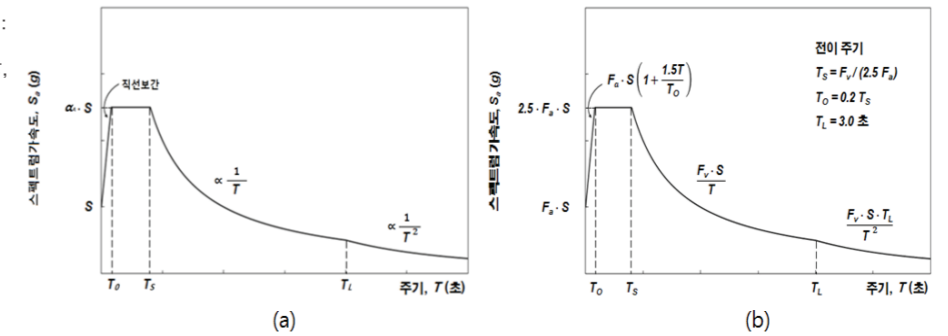
기존의 댐 내진설계기준에서는 1,500m/s의 전단파속도를 기준으로 경암지반과 보통암지반으로 구분하여, 상대적으로 단단한 경암지반의 경우에는 보통암에 비해 지진하중을 감소시켜 설계에 적용하였다. 하지만, 새로이 제정된 「내진설계기준 공통적용사항」에서는 760m/s 이상의 암반에 대해서 일괄적인 기준을 적용하고 있어 경암지반에 건설되는 댐의 경우에는 기존보다 상대적으로 큰 지진하중을 작용시키게 되었다.

3) 설계응답스펙트럼

지역적 특성과 지반조건이 고려된 설계응답스펙트럼은 다양한 주기의 구조물에 대해서 각 주기별로 지진 시 발생가능한 최대값을 나타낸다. 일반적으로 설계기준에서는 5%의 감쇠비를 기준으로 하는 「표준설계응답스펙트럼」을 제시하고 있으며, 내진 설계나 내진성능평가 시 스펙트럴 매칭을 통한 지진하중 산정을 산정하고 구조물의 응답을 통한 안정성 평가 시에 활용하고 있다. 제정된 「내진설계기준 공통적용사항」에서는 기존의 설계기준과 달리 암반지반과 토사지반을 구분하여 표준설계응답스펙트럼을 제시하였다. 국내에서 발생한 지진 이벤트 및 지반조건에 대한 분석을 통해 단주기에서의 설계조건을 강화하는 한편, 장주기에서의 설계지진하중을 기존 대비 감소시킴과 동시에 유효수평지반가속도(S)가 증가함에 따라 지반의 비선형거동에 의한 응답이 감속하는 특성과

함께 반영하였다. 그 결과, 토사지반의 스펙트럼 가속도에 비해 암반지반에서의 표준설계응답스펙트럼이 다소 증가하였으며 대부분의 다목적댐 및 용수댐들이 암반지반 위에 건설되는 점을 고려하였을 때 기존의 설계조건보다 설계지진하중이 상대적으로 강화되었다고 판단할 수 있다.

그림 2. 가속도 표준설계응답스펙트럼: (a) 암반지반, (b) 토사지반 (내진설계기준 공통적용사항, 2017)



토사지반으로 분류되는 S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 지반의 5% 감쇠비에 대한 설계지반운동의 가속도 표준설계응답스펙트럼은 기반암의 스펙트럼 가속도와 지표면의 스펙트럼 가속도의 증폭비율을 의미하는 「지반증폭계수(F_a, F_v)」를 통해 산출할 수 있다. 「내진설계기준 공통적용사항」에서는 유효수평지반가속도(S)에 따라 새로운 지반분류체계에 따른 단주기 지반증폭계수(F_a)와 장주기 지반증폭계수(F_v)도 함께 제시되었다.

표 4. 지반증폭계수 (내진설계기준 공통적용사항, 2017)

지반분류	단주기 증폭계수, F_a			장주기 증폭계수, F_v		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
S_2	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
S_3	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
S_4	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
S_5	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

4) 내진등급별 내진성능수준

내진성능수준은 시설물이 각각의 설계지진 재현주기에 따라 최소한으로 확보하고 있어야 할 내진성능수준을 의미하며, 이번 「내진설계기준 공통적용사항」에서는 기존의 2단계(기능수행, 붕괴방지)로 구분되어 있던 내진성능수준이 총 4단계(기능수행, 즉시복구, 장기복구/인명보호, 붕괴방지)로 변경되었다. 「기능수행」수준은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 발생한 손상이 경미하여 그 구조물이나 시설물의 기능이 유지될 수 있는 성능수준을 말하며, 「즉시복구」수준은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 발생한 손상이 크지 않아 단기간 내에 즉시 복구되어 원래의 기능이 회복될 수 있는 성능수준을 의미한다. 또한 「장기복구/인명보호」수준은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 큰 손상이 발생할 수 있지만 장기간의 복구를 통하여 기능 회복이 가능하거나, 시설물에 상주하는 인원 또는 시설물을 이용하는 인원에 인명손실이 발생하지 않는 성능수준을 의미한다. 마지막으로 「붕괴방지」수준은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 매우 큰 손상이 발생할 수는 있지만 구조물이나 시설물의 붕괴로 인한 대규모 피해를 방지하고, 인명 피해

를 최소화하는 성능수준을 의미한다. 이와 같은 내진성능수준의 분류는 향후 손상수준제어 내진설계를 대비한 조치로 판단되며, 다음의 표에는 개정된 시설물 내진등급별 내진성능수준과 내진등급 분류체계를 나타내었다.

표 5. 시설물의 내진등급별 내진성능수준(내진설계기준 공통적용사항, 2017)

설계지진 재현주기 (년)	내진성능수준			
	가능수행	즉시복구	장기복구/인명보호	붕괴방지
50	내진 II 등급			
100	내진 I 등급	내진 II 등급		
200	내진특등급	내진 I 등급	내진 II 등급	
500		내진특등급	내진 I 등급	내진 II 등급
1,000			내진특등급	내진 I 등급
2,400				내진특등급
4,800				내진특등급

표 6. 내진등급 분류체계(내진설계기준 공통적용사항, 2017)

내진성능수준	정의
내진특등급 (다목적댐)	· 지진 시 매우 큰 재난이 발생하거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 큰 영향을 줄 수 있는 시설의 등급
내진 I 등급 (용수댐)	· 지진 시 큰 재난이 발생하거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 큰 영향을 줄 수 있는 시설의 등급
내진 II 등급	· 지진 시 재난이 크지 않거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 영향이 크지 않은 시설의 등급

댐 내진설계기준 개정

국가 산업발전의 기반이자 국민에게 편의와 공익 제공을 목적으로 하는 사회기반시설은 건립 당시의 설계 및 시공뿐만 아니라 준공후의 유지관리 및 안전진단 또한 매우 중요하다. 특히 내진성능 평가는 안전진단에 있어 가장 대표적인 절차이며, 최근들어 과거에 발생하였던 지진에 비해 상대적으로 큰 규모의 지진이 빈번하게 발생함에 따라 내진설계기준이 지속적으로 강화되고 있는 실정이다.

2018년 현재 국내의 댐 내진설계와 내진성능평가는 2011년 개정된 「댐 설계기준(2011)」이 명시하는 바에 따르고 있다. 현행 기준으로 높이 45m 이상이고 총 저수용량 50백만^m 이상, 또는 다목적 댐과 같이 사회·경제적으로 중요한 댐을 내진특등급으로, 그 외의 모든 댐은 내진 I 등급으로 분류한다. 댐의 내진등급별 지진위험도계수는 타 시설과 달리 내진특등급, 내진 I 등급 시설물에 대해 각각 재현주기 1,000년(위험도계수 1.4), 500년(위험도계수 1.0)을 적용하고 있다. 댐의 내진성능은 지진계수를 적용하여 정역학적으로 평가하는 진도법을 기본으로 하고 있으며, 시간이력해석을 활용하는 경우에 한하여 내진특등급 및 내진 I 등급 시설물에 대하여 각각 위험도계수 2.0 및 1.4로 할증하여 적용하고 있다.

「내진설계기준 공통적용사항」의 제정과 함께 기존에 내진설계나 내진성능평가 시에 적용되었던 기준이 2018년 말까지 일부 변경될 예정이다. 새로 개정된 「댐 내진설계기준(2018)」에는 「내진설계기준 공통적용사항」을 통해 제정된 내용을 포함하여 내진설계 기법 및 시설물 설계지진의 재현주기와 관련한 주요변경사항들이 포함된다.

1) 선진 내진설계 기법 기준화

현행 「댐 내진설계기준(2011)」 및 일반적인 내진성능평가 시에는 정적해석방법이 가장 기본적인 내진해석기법으로 적용되고 있으며, 여기에 지반에서 발생하는 가속도시간이력역이 고려된 동적해석 방법이 보조적인 검토수단으로 사용되고 있다. 또한 댐 사면의 소성활동량 분석을 통해 댐의 안정성을 평가하는 Newmark 방법도 빈번하게 적용되고 있다. 하지만 정적해석방법의 경우, 상대적으로 간편하게 지진발생으로 인한 영향을 평가할 수 있다는 장점을 지니고 있지만 실제 지반의 거동을 고려한 지반과 구조물간의 상호작용(SS)을 고려하지 못하는 치명적인 단점을 지니고 있다. 마찬가지로 Newmark 방법의 경우에도 활동면 상부를 강제로 가정함으로써 실제 지진 이벤트가 발생하였을 시의 댐 거동과는 상이한 모습을 나타내는 단점을 지니고 있다. 이러한 이유로 전 세계적으로도 정적해석방법 대신 보다 진보적인 선진 내진해석기법인 동적해석방법 활용을 적극적으로 권장하고 있다(ICOLD, 2010). 개정이 진행되고 있는 「댐 내진설계기준(2018)」에서는 이러한 세계적인 추세에 발맞추어 동적해석방법을 내진성능평가를 위한 정적해석방법의 보조적인 수단이 아닌 기본해석방법으로 규정하는 방안이 검토되고 있다.

2) 시설물 설계지진 재현주기

「내진설계기준 공통적용사항」에는 “가능수행”수준 이외에 하나 이상의 내진성능수준을 선택하여 적용하도록 명시하고 있다. 개정된 「댐 내진설계기준(2018)」에서는 기존과 동일한 “가능수행”수준과 “붕괴방지”수준을 만족하도록 설계하되, 「내진설계기준 공통적용사항」의 개정된 내진등급별 내진성능수준을 고려하여 “붕괴방지”수준에서 내진 I 등급 댐의 경우 1,000년, 그리고 내진특등급 댐의 경우에는 2,400년 재현주기의 지진하중에 대해 설계하는 방안이 검토되고 있다. 또한 관리주체의 필요 시 재현주기 4,800년 이상의 지진하중을 극대지진(MCE)으로 하여 댐의 안정성을 평가하는 방안이 함께 모색 중에 있다.

본 기술기사에서 2017년 7월, 시설물별 내진설계기준의 일관성 유지를 위해 국민안전처(현 행정안전부)에서 제정된 「내진설계기준 공통적용사항」의 주요 개정 내용 및 「댐 내진설계 기준(2018)」을 통해 새롭게 포함될 내용들에 대해 다루었다. 대표적 사회기반시설의 하나인 댐의 사회적 중요도나 최근 우리나라에서 빈번하게 발생하고 있는 지진 이벤트들의 규모를 고려해 보았을 때, 전 세계적인 동향 및 최신의 연구결과가 반영된 내진설계기준의 개정은 시기적으로 매우 적절한 조치로 판단된다. 하지만 댐 시설물의 특수성 및 전문적인 지식을 필요로 하는 동적해석관련 국내 연구 결과가 많지 않다는 점을 고려해 보았을 때, 앞으로 보다 다양하고 심도있는 관련분야 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

제언

참고문헌

- 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(II)
- 국토해양부(2011), 댐 설계기준
- 국민안전처(2017), 내진설계기준 공통적용사항
- ICOLD(2010), Selecting seismic parameters for large dams, Revision of Bulletin 72
- Newmark, N. M.(1965), “Effects of earthquakes on dams and embankments”, Geotechnique, 15(2), 139-160.