

댐시설의 내진성능평가와 대책



류민규

K-water 수자원관리처 차장
rmk2000@kwater.or.kr



정지우

K-water 수자원관리처 과장
matador@kwater.or.kr

1. 서론

지난 2016년 9월 12일 오후 7시 44분과 오후 8시 32분에 경북 경주에서 규모 5.1의 전진에 이어 규모 5.8의 본진이 발생했다. 규모 5.8은 1978년 관측 이후 한반도에서 발생한 가장 강력한 지진이다. 일주일이 지난 9월 19일 오후 8시 33분경 경주시에서 규모 4.5의 여진이 발생하는 등 2017년 1월 21일까지 570회의 여진이 발생하였다. 이에 앞서 지난 2016년 7월에는 울산 앞바다에서 규모 5.0의 지진이 발생하기도 했다.

국민안전처에 따르면 연평균 지진발생 횟수가 1990년대 26회, 2000년대 44회, 2010년부터 2015년까지 56회로 증가 추세에 있다. 또한 그동안 발생한 9차례의 규모 5.0 이상 지진 가운데 4차례가 2014년 이후였고, 2016년에만 3차례 발생하는 등 갈수록 지진이 빈발하고 규모도 커지는 추세임을

표 1. 연도별 국내 지진발생 횟수

평균	계	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
26	255	15	19	15	23	25	29	39	21	32	37
평균	계	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
44	436	29	43	49	38	42	37	50	42	46	60
평균	계	2010	2011	2012	2013	2014	2015	-	-	-	-
56	336	42	52	56	93	49	44	-	-	-	-

알 수 있다. 한반도는 유라시아 지각판 내부에 놓여 지진으로부터 비교적 안전하다고 알려져 있지만, 완전히 자유로운 것은 아니다. 조선왕조실록과 같은 사료는 우리나라에서도 과거 대규모 지진이 발생하였음을 알려 주고 있으며, 1976년 24만명이 숨진 규모 7.6의 중국 탄산 대지진도 판 내부에서 발생했다.

K-water는 다목적댐 19개소, 용수댐 14개소, 홍수조절용댐 2개소 등 전국 35개의 대형 댐을 운영·관리하고 있다. K-water의 35개 댐은 전국 댐 및 저수지의 총 저수용량 21,682백만m³ 중 약 72%를 차지할 정도로 규모가 크며, 중·소규모 저수지와는 비교할 수 없을 정도로 중요도가 높은 댐이다. 도로나 항만시설의 경우 사고가 발생하면 다른 도로나 항만시설로 대체가 가능지만, 댐은 대체가 불가능한 국가 핵심 SOC 자원이다.

본 원고에서는 댐의 내진평가 방법과 본체 및 주요 부속시설물인 취수탑에 대한 내진평가 결과를 살펴보고, 향후 댐의 지진대책 추진 방향을 제시하고자 한다.

2. 댐의 내진평가

댐 설계기준의 내진설계 부분은 1997년 건설교통부의 내진설계기준 연구에서 제시된 내진설계 성능기준 및 기타 연구결과를 참고하고 기존의 설계 체계를 정리하여 제정한 것으로, 댐체, 여수로 및 부대시설물의 내진성능을 확보하기 위하여 필요한 기준을 규정하고 있다.

1) 지진하중의 결정

시설물의 내진성능을 평가하기 위해서는 우선 평가에 적용할 지진하중의 크기를 결정해야 한다. 댐 내진평가의 기준이 되는 설계진도는 해당지역의 지진구역계수에 위험도계수와 중력가속도를 곱한 값으로 한다. 댐 설계기준에서는 우리나라의 지진구역을 <표 2>와 같이 구역 I, II로 구분하였다. 평균재현주기 500년의 지진지반운동에 해당하는 각 지진구역별 지진구역계수는 구역 I은 0.11, 구역 II는 0.07이다.

표 2. 지진구역 구분

지진구역		행정구역
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도남부(1), 충청남도, 충청북도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부(2)
II	도	강원도북부(3), 전라남도 남서부(4), 제주도

위험도 계수는 내진등급별 설계지진의 평균재현주기에 따라 500년 지진을 기준으로 하여 <표 3>과 같이 구분한다.

표 3. 위험도 계수

재현주기	500년	1000년	2400년
위험도계수	1.0	1.4	2.0

댐의 내진등급은 댐의 중요도에 따라 내진 I 등급 및 내진 특등급의 두 가지 등급으로 분류한다. 사회·안보·경제적인 측면에서 특별한 댐으로 발주처가 지정하는 댐, 법에 의하여 다목적댐으로 분류한 댐, 높이 45m 이상이고 총 저수용량 50백만m³ 이상인 댐이 내진 특등급 댐이며, 이외의 모든 댐은 내진 I 등급 댐이다. 댐 설계기준을 적용하여 산정한 K-water에서 관리중인 댐의 내진설계 기준은 <표 4>와 같다.

표 4. 댐 시설물 내진설계 기준

구분	지진구역계수(A)	위험도계수(B)	지진계수 (A×B)	해당시설
특등급	I 구역 = 0.11 (II 구역외)	1.4 (재현주기 1000년)	0.154g	다목적댐, 평화의댐, 군남댐 운문댐(50백만톤 이상)
I 등급	II 구역 = 0.07 (강원북부, 제주도)	1.0 (재현주기 500년)	0.11g	13개 용수댐 (운문댐 제외)

2) 댐 본체의 내진평가

댐의 내진성능 평가는 국가적인 관련 지침에 의거 예비평가와 상세평가로 진행된다. 하위평가단계에서는 보다 보수적인 평가방법을 적용하고 상위평가단계로 갈수록 고등해석기법을 적용하여 평가의 합리성과 경제성을 고려하였다.

예비평가는 댐에 대한 내진 성능 평가의 경제적 효율성을 높이기 위해 본격적인 내진성능 평가 전 단계에서 실시한다. 공사지, 준공도, 시방서 등의 기존의 자료를 최대한 사용하여 실시하며, 현장답사를 병행하여 내진성능 평가 1단계의 필요 여부를 결정하게 된다.

내진성능 1단계 평가는 현장 조사, 실내 시험, 간편 해석의 순서로 나누어 수행한다. 현장 조사에서는 육안 조사, 현장 시험 등을 이용하여 댐의 현재 상태를 파악하고 실내 시험을 수행하기 위한 제체 구성 재료의 시료를 채취한다. 제체에 대한 기본적인 물성 획득을 위하여 현장조사에서 채취한 시료를 이용하여 실내시험을 수행하고, 현장 조사 결과와 실내 시험 결과를 이용하여 간편 해석을 수행한다. 간편 해석은 크게 액상화에 대한 간편 해석과 제체의 유사 정적해석을 통해 안정성 평가를 수행하고 내진 성능 평가 2단계 실시 여부를 판정하게 된다.

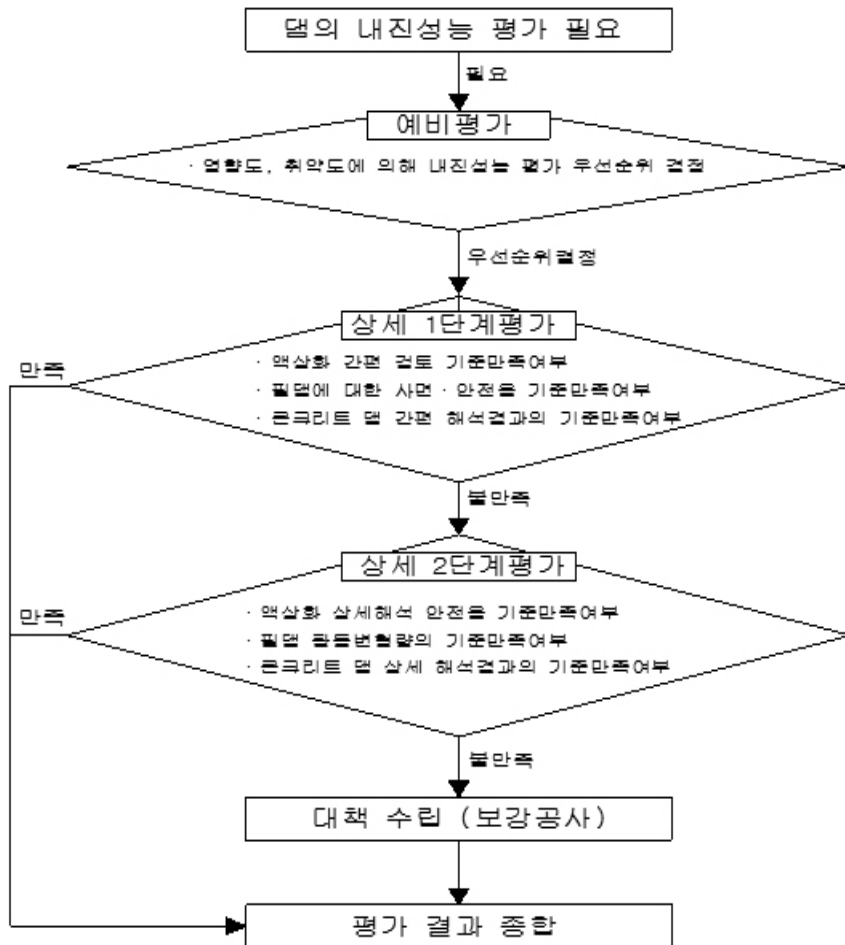


그림 1. 댐 내진성능 평가절차의 흐름도

내진성능 평가 1단계 결과, 제체 및 기초 지반의 내진 성능이 부족한 것으로 검토되었을 경우에는 정밀 해석을 수행한다. 2단계 평가는 현장 정밀 조사, 실내 시험, 상세 해석의 순서로 수행한다. 현장 정밀 조사시에는 시추조사, SPT 및 CPT, 크로스홀 및 다운홀 시험 등을 통하여 시료의 채취와 함께 동적 전단탄성계수 등의 물성자료를 수집한다. 채취한 시료를 이용하여 실내 시험을 통해 흙의 동적 물성 및 콘크리트의 정밀한 물성을 확보하며, 이 결과를 이용하여 상세 해석을 수행한다. 주로 전문화된 모델링을 이용한 컴퓨터 수치해석을 통하여 내진성능을 평가한다. 필암과 콘크리트댐의 재료 구성이 다르기 때문에 다른 해석방법을 적용하게 되어 있으며, 수치해석의 안정 조건은 댐 형식에 따라 다음과 같이 대별된다.

표 5. 댐 형식에 따른 수치해석 안정 조건

구분	안정 조건
콘크리트댐	- (전도에 대한 안전) 합력이 제체 수평단면의 중앙 허용치 이내에 들 것 - (활동에 대한 안전) 댐체 전단마찰 안전율이 최소안전율 이상일 것 - (지지력에 대한 안전) 댐체 하중조건이 지지력에 대해 안전할 것 - (응력에 대한 안전) 제체 내 응력이 허용응력 이내일 것
필댐	- (사면 안정) 지지력에 대한 사면안정 해석시 안전율이 확보될 것 - (변형 안정) 지지력에 의한 댐의 최대 침하량 또는 변형량이 일정치 이내에 들 것

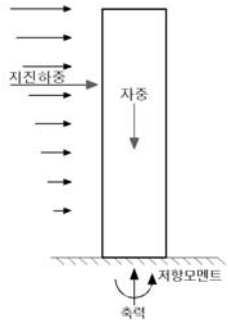
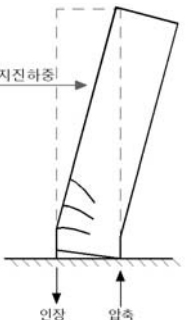
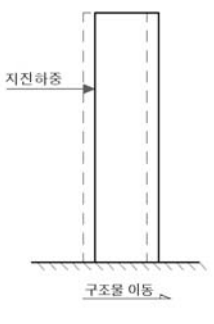
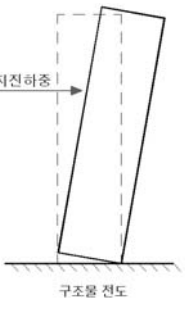
현재까지 내진 특등급 댐인 19개 다목적댐, 2개의 홍수조절댐과 운문댐 및 내진 I 등급 댐인 13개 용수댐의 내진성능 평가 결과, 본체는 모두 안정한 것으로 검토되었다.

3) 취수탑의 내진평가

2011년 취수탑, 발전소, 댐 관리동, 수로터널 등 댐의 부대시설물도 내진성능을 확보하도록 댐 설계기준이 개정·강화되었다. 이러한 부대 시설물은 댐과 일체가 되어 그 효용을 다하게 하는 시설물로, 그 중에서도 취수탑은 문제발생시 저수지로부터의 취수가 불가능하게 되어 대규모 단수사태로 인한 생활불편 및 공장운영 중단 등 막대한 사회적 피해를 가져오게 되는 매우 중요한 시설물이다.

기존 댐의 취수탑에 대한 내진해석의 기본 개념은 취수탑에 부분적 손상이 발생하는 것은 허용할 수 있으나 지진시 또는 지진 경과 후에도 용수공급 기능은 유지되어야 하며 통제가 불가능한 저수량의 유출상태는 있어서는 안 된다는 것이다. 어떤 경우에도 취수탑이 붕괴되지 않도록 활동이나 전도를 방지하기 위한 충분한 안전율을 확보해야 한다.

표 6. 취수탑의 내진안정 검토

작용하중과 저항력 개념	힘모멘트 검토	안정검토	
	힘파괴	활동	전도
			
허용값	1.1	4.0	Qa

취수탑의 내진해석에 있어서 사용한 방법은 응답스펙트럼 해석법과 유사정적 해석법이다. 응답스펙트럼 해석법은 구조물 지진응답의 동적특성을 반영한 해석방법이다. 이 방법은 구조물의 최대동적응답을 구하기 위하여 사용되며, 취수탑 내외부에 있는 유체가 취수탑의 동적 거동에 미치는 영향을 질량으로 모델링하여 구조물에 발생하는 최대 상대변위 및 최대 부재력을 구할 수 있다. 해석결과를 통해 지진시 취수탑의 휨모멘트 및 구조물의 안정을 검토한다.


등가정적 해석법은 구조물이 지진응답을 정적인 해석방법에 의해서 구하는 지진응답해석법이다. 이 방법에서는 구조물의 최대동적응답과 같은 응답을 발생시키는 등가의 정적인 하중을 산출하여 이를 정적구조해석 모델에 작용시킴으로써 동적해석법을 사용하지 않고 설계지진응답의 근사값을 계산한다.

표 7. 취수탑 내진해석 방법비교

구분	응답스펙트럼해석법	등가정적해석법	비고
모델링	Beam Element	Beam Element	
단면검토	휨-압축부재	휨부재	
동수압	부가질량법	정적하중	
관련기준	USBR	상수도시설 내진설계 연구	

K-water가 관리하는 용수전용댐인 OO댐에 응답스펙트럼해석법과 등가정적해석법을 활용하여 내진해석을 진행하였다. OO댐 취수탑의 전경사진과 제원은 다음 <표 8>과 같다.

표 8. OO댐 취수탑 전경사진 및 제원

	<p>1) 취수탑 제원</p> <ul style="list-style-type: none"> -형 식 : 원형 철근콘크리트 D 5.0m, H 33.0m -공도교 : 2경간 철근콘크리트 T형교 B 2.2m, L 40.4m <p>2) 사용프로그램 : MIDAS-Civil 2012</p>
---	--

등가정적 해석법과 응답스펙트럼 해석법에 의한 내진해석 결과 취수탑 최하단부에서 발생한 모멘트가 다소 차이를 보였으며, 이것은 지진시 동수압 및 관성력을 정적하중으로 산출할 때 좀 더 안전율을 고려하여 계산되기 때문으로 판단된다.

취수탑은 휨-압축부재로서 취수탑의 내하력 검토는 자중(축력)을 고려한 휨-압축부재로 검토하여 취수탑의 단면내하력과 지진하중에 의한 단면력을 비교하였다.

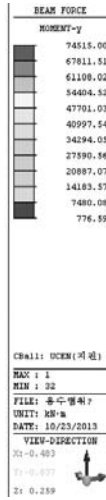
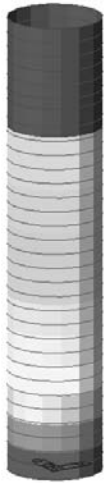


그림 2. 취수탑 모멘트

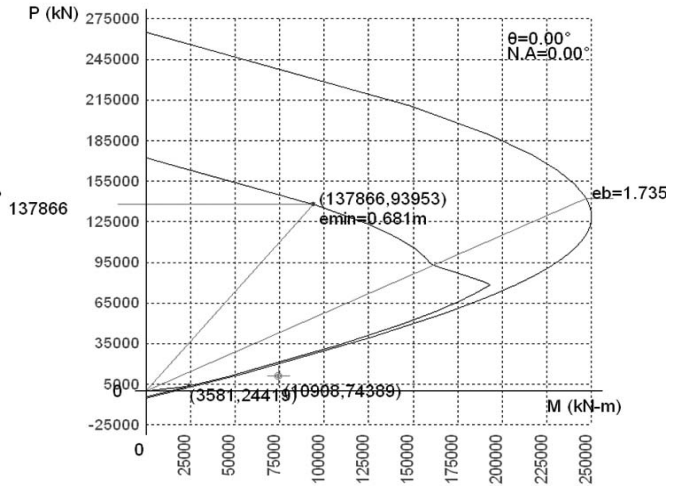


그림 3. P-M 상관도

표 9. 용수전용댐 17개 취수탑 내진평가 결과

구분	개수	해석결과		검토내용	비고
		OK	NG		
광동	—	—	—	—	
달방	1	○	—	—	
영천	3	1	○	—	
		2	○	—	
		농업	—	○	철근량부족
안계	2	1	—	○	철근량부족
		2	1번해석 결과 준용		
감포	1	○	—	—	
대곡	1	○	—	—	
사연	1	—	○	철근량부족	
대암	1	—	○	철근량부족	
선암	1	해석 미실시			
연초	1	—	○	철근량부족	
구천	1	○	—	—	
수어	1	○	—	—	
평림	1	○	—	—	
운문	2	1	—	○	철근량부족
		2	—	○	철근량부족
계	17	8	8		

14개 용수전용댐의 17개 취수탑에 대한 내진성능 평가 결과 영천댐, 안계댐 1·2, 사연댐, 대암댐, 연초댐, 운문댐 1·2 등 8개의 취수탑이 내진 안전성이 부족한 것으로 나타났다. 또한 선암댐 취수탑의 경우 내진안전성 해석에 필요한 콘크리트 강도나 철근배근 등 일부 정보가 부족하여 내진성능평가를 할 수 없었다. 취수탑에 대한 내진성능평가 결과는 <표 9>와 같다.

3. 댐의 내진성능 확보대책

정부는 중국, 일본 등 주변국의 대규모 지진재해 발생을 계기로 2008년「지진·화산재해대책법」을 제정하여 국가기반시설에 대한 내진설계기준 수립 및 내진성능의 확보를 의무화하였다. 2016년 5월에는 범정부 차원의「지진방재 개선대책」을 발표하고 지진정보 신속 전파, 시설물 내진대책(설계·평가·보강) 및 위기대응 강화를 추진 중이며, 경주 지진을 계기로 내진대책을 더욱 강화하고 있는 추세이다.

1) 댐 본체 및 취수탑

K-water에서 운영 중인 전 댐의 댐체는 내진성능을 확보하고 있는 것으로 검토되어 별도의 대책 마련의 필요는 없다. 내진성능이 부족한 경우에는 내진보강을 시행하는데, 보편적인 보강방안은 <표 10>과 같다.

표 10. 댐 형식에 따른 내진보강방법

구분	내진보강방법	비고
콘크리트댐	1) 앵커(Post-tensioned anchor) 공법 : 수직앵커, 경사앵커 2) 부벽설치공법 : 부분단면, 활동방지, 전단면 부벽 3) 기타공법 : 하류단 제방축조, 상류면 덧씌우기	
필댐	1) 사면활동 및 과대변위 대책 : 치환공법, 현장공법(그라우팅 등), 배수공법, 차수공법, 현장다짐공법 등 2) 제체의 균열 대책 : 치환공법, 현장공법(그라우팅)	

한편, 용수전용댐의 취수탑에 대한 내진성능 평가 결과 내진안전성이 부족한 것으로 나타난 6개댐의 8개 취수탑에 대해서는 내진보강이 필요하다. 기존 취수탑의 철근량 부족 등에 따라 휨 파괴가 발생하는 것으로 검토되어 대체 취수탑을 신설하거나, 취수탑의 단면을 확대하는 방법으로 내진안전성을 확보하도록 하였다. 관련정보가 부족하여 내진성능평가를 시행하지 못했던 선암댐 취수탑에 대해서는 철근탐사 등을 통해 필요한 정보를 획득하고 내진평가를 실시하여 필요시 보강대책을 마련할 예정이다. 또한, 내진안전성이 부족한 관리교를 신설하고, 노후된 밸브와 받침 등도 교체할 계획이다.

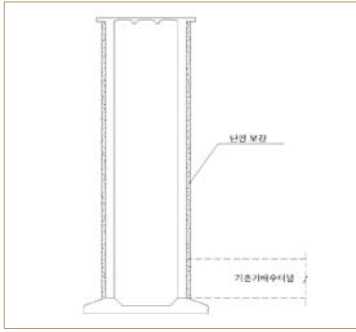


그림 4. 취수탑 단면보강

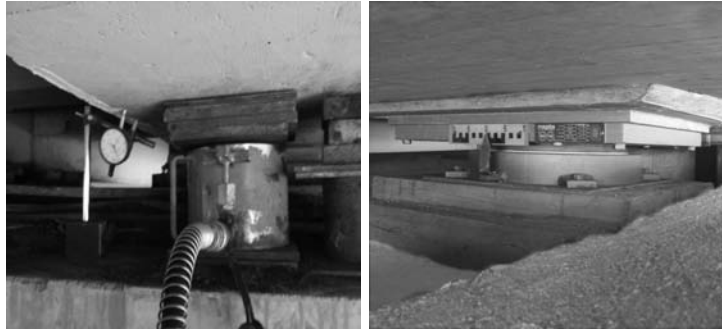


그림 5. 관리교 받침 교체

2) 댐 부속시설물

앞에서 언급된 것처럼 2011년 댐 설계기준 개정시 취수탑 및 공도교 등 부속시설물이 내진설계 대상에 반영되어 내진설계도입 대상 시설이 확대되었다. K-water의 내진설계 반영이 필요한 댐시설물은 총 721개이며, 그중 댐 본체 및 일부 여수로, 용수전용댐의 취수탑에 대해서는 내진성능평가가 완료된 상태이다.

표 11. K-water 댐시설물 내진성능 확보 현황

구 분	전체 시설물	내진설계반영	성능 평가완료			내진성능 평가대상	비고
			계	확보	미확보		
계	721	342	50	42	8	329	
댐 본체	36	7	29	29	-	-	
여수로	46	15	5	5	-	26	
취수탑	38	5	16	8	8	17	
취수탑(관리교)	31	1	-	-	-	30	
공도교	33	14	-	-	-	19	
수로터널	31	5	-	-	-	26	
발전소(하부구조)	27	8	-	-	-	19	
수문	131	57	-	-	-	74	
권양기	174	56	-	-	-	118	
현장조작반	174	174	-	-	-	-	

K-water에서는 내진성능 평가의 시급성을 고려, 평가대상 시설물 329개소 전체에 대해 용역을 통한 일괄 평가를 시행할 계획이다. 내진성능 평가는 과업량 및 예산 등을 고려하여 2017년부터 2018년까지 2년간 실시하고, 평가 결과 보강이 필요한 시설물에 대한 내진보강을 추진해 나갈 계획이다.

4. 결론

경주 지진 발생 이후 고윤화 기상청장은 "한반도에서 규모 6.0 초반대를 넘어서는 지진은 언제든 가능성이 있다"고 말했으며, 전문가들 역시 대규모 지진에 대비해야 한다고 지적하고 있다. 지진은 현대과학으로도 사전 예측이 사실상 불가능하므로, 철저한 사전 대비만이 대규모 지진에 따른 피해를 줄일 수 있는 유일한 길이다.

정부에서는 사회기반시설물의 내진안전성 확보의 필요성이 급격히 커짐에 따라 시설물 내진관련 법령을 제정하고 내진설계기준을 강화하는 한편, 범 정부 차원의 지진방재 개선대책을 수립·추진하는 등 내진대책 마련에 노력을 기울이고 있다.

해외의 댐 붕괴 사고사례에서 볼 수 있듯이, 대형 댐은 피해규모나 사회 경제적 파급성을 감안할 때 절대로 붕괴되어서는 안 되며, 한 순간 실수나 단 한 번의 오판도 용납될 수 없다. 또한 주요 부속시설물인 취수탑에 문제가 발생하면 저수지에서 물을 취수할 수 없어 광역단위의 상수도 공급 자체가 불가능하다. K-water에서 관리하는 용수전용댐은 울산, 포항, 여수 등 주요 공업도시에 생·공용수를 공급하고 있는데, 이들 지역에 대한 용수공급이 중단된다면 그 사회적 파장과 경제적 피해는 표현할 수 없을 정도로 심각할 것이다.

K-water는 국내 유일의 수자원 관리기관으로서 관리중인 시설물에 대한 내진성능 평가 및 보강 대책을 지속적으로 시행하여 댐을 안전하게 관리하는데 한 치의 소홀함이 없도록 성실히 그 임무를 수행해 나갈 것이다.

참고문헌

- 건설교통부·한국시설안전기술공단(2004), 기존 댐의 내진성능 평가 요령
 국민안전처(2016), 선제적 지진방재 구축을 위한「지진방재대책 개선추진단」구성·운영 보도자료 (2016.1.18.)
 국토해양부(2011), 댐설계기준
 최병섭·박천세·이경환·김윤정·권용길(2013), 용수댐 취수탑의 내진해석, 대한토목학회 학술대회, pp 1150-1151
 한국수자원공사(2014), 용수댐 안전성강화 마스터플랜
 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>)
 한국시설안전공단 홈페이지(<http://www.kistec.go.kr>)