

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, 김선욱 차장, 오병동 차장, 양승인 차장, K-water)

내진설계기준 강화에 따른 댐 내진안전성 평가
(조성배 선임연구원, 김태민 선임연구원, 김남룡 책임연구원, K-water)
파키스탄 Patrind 수력발전사업 소개 (임경희 차장, K-water)

내진설계기준 강화에 따른 댐 내진안전성 평가



조성배 선임연구원 (K-water) 김태민 선임연구원 (K-water) 김남룡 책임연구원 (K-water)

1. 서론

최근 중국, 일본, 뉴질랜드, 네팔, 칠레 등 전 세계적 사례에서 살펴볼 수 있듯이 불시에 발생하는 대규모 지진은 수많은 인명피해와 막대한 경제적 손실을 야기한다. 특히, 지진에 의한 대규모 사회 기반시설의 붕괴는 인접 지역의 사회 · 경제적 손실을 가중한다.

2016년 9월 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진은 한반도 내에 과학적 지진계측이 시작된 이래 최대 규모의 지진으로, 한반도 대부분 지역에서 유감 진동이 관측되고 경상도 지역에 막대한 재산피해를 유발함에 따라 지진에 대한 국가적, 국민적 경각심과 시설물의 내진안전성에 대한 대중의 불안 심리가 가중되었다. 따라서 대형 댐의 설계, 시공, 유지관리 과정에서 지진에 대한 안전성 평가는 공학적으로 매우 중요한 사항이다.

기존의 내진설계기준들은 1997년 건설교통부의 「내진설계기준연구(Ⅱ)」를 내진설계 상위개념으로 간주하여 제 · 개정되었으며 현행 댐설계기준(2011) 또한 이를 바탕으로 하고 있다. 2017년 7월 행정안전부(舊 국민안전처)는 일관성 있는 내진설계기준을 위하여 「내진설계기준 공통적용사항」을 공표 및 제정하였다. 이를 바탕으로 2018년 12월까지 각 시설물의 내진설계기준을 개정하여야 하며 댐 설계기준의 내진설계편도 현재 개정(안)이 검토 중에 있다.

이러한 상황에서 국가 중요 기간시설인 댐에 대하여 해당 기준의 개정에 의한 내진안전성 검증

2. 설계기준 강화사항

은 K-water의 중요한 의무이며, 내진안전성의 검증, 보강, 안전관리는 국가적 대국민 신뢰를 제고하여 안전국토와 효과적 물 관리를 구현하는 것이 K-water의 사회적 책무이다. 국가적 차원의 공통적용사항 및 시설물별 내진설계기준의 제 · 개정은 댐의 지리적 또는 구조적 특성에 따라 강화된 지진하중이 적용될 것으로 판단되며, 강화된 설계기준에 의한 댐의 안전성 재평가가 요구되었다.

따라서 본 기사에서는 K-water융합연구원에서 수행중인 「내진설계기준 강화에 따른 댐 내진안전성 평가기술 연구」(2018~2019)를 소개하고 결과 일부를 공유하고자 한다.

「내진설계기준 공통적용사항」은 이전의 「내진설계기준연구(Ⅱ)」에서 제시한 것과 비교하여 지반 분류, 지반증폭계수, 내진성능분류체계 세분화 등 다양한 내용을 재정립하였으며 본 기술기사에서는 댐의 내진성능평가, 특히 동적시간이력 해석에 영향을 줄 수 있는 변경사항에 한하여 다루고자 한다.

① 지반분류 - 일반 일원화

- 현행 댐설계기준(2011)에서는 암반을 경암과 보통암으로 분류하고, 경암의 유효지반가속도(설계지진계수)를 보통암의 80%로 설정하였다. 하지만 금회 「내진설계기준 공통적용사항」은 암반 분류를 일원화함으로써 이전 설계기준에서의 보통암 유효지반가속도로 통일하였다. 따라서 경암지반으로 분류되어 있는 댐들의 경우 향후에 내진성능평가 시 설계지진가속도의 수준에 대하여 검토가 필요하다.

표1
지반분류에 따른 유효지반가속도(S) 비교

댐설계기준(2011)			댐설계기준 개정(안)		
지반종류	지반종류의 호칭	유효지반가속도(S) (재현주기 2,400년) (지진구역 I)	지반종류	지반종류의 호칭	유효지반가속도(S) (재현주기 2,400년) (지진구역 I)
S _A	경암지반	0.176g	S ₁	암반 지반	0.22g
S _B	보통암지반	0.22g			

※ 유효지반가속도(S) = 지진구역계수(Z) × 위험도계수(I)

* 동적설계 방법 사용 시 재현주기 상향 적용 (재현주기 1,000년 → 2,400년) - 댐설계기준(2011)

② 내진성능수준 - 등급별 재현주기 상향

- 「내진설계기준연구(Ⅱ)」에서는 내진특등급의 붕괴방지수준에 대하여 설계지진 재현주기를 2,400년으로 제시하였고, 이를 바탕으로 일반적인 SOC 시설물의 내진설계기준 또한 2,400년으로 명시하고 있다. 하지만 현행 댐설계기준(2011)에서는 내진특등급댐의 붕괴방지수준에 대한 설계지진 재현주기가 1,000년으로 설정되어 있다. 「내진설계기준 공통적용사항」은 내진특등급시설물의 붕괴방지수준을 2,400년(필요시 4,800년)으로 다시 한 번 명시하고 있으며 이를 반영토록 규정화 하였다. 하지만 현행 댐설계기준(2011)에 따르면, 동역학적해석 방법을 사용 시 설계지진 재현주기를 1,000년에서 2,400년으로 상향시켜 적용하므로 동역학적해석방법을 사용할 경우 재현주기의 변화는 없다.

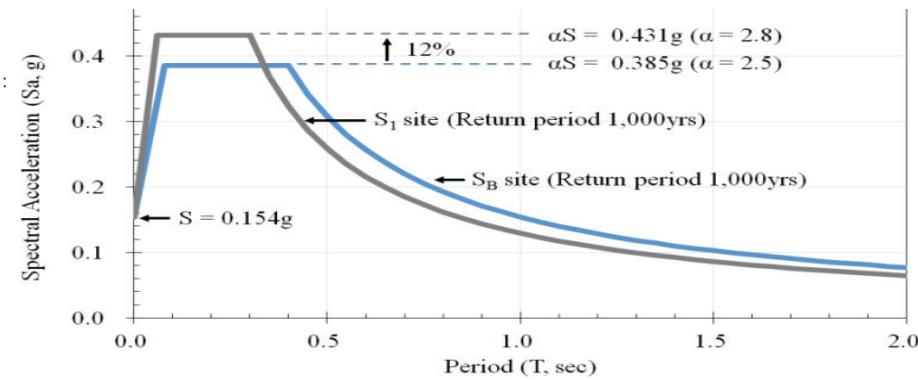
표2. 내진성능수준에 따른 설계지진의 평균재현주기 비교

내진등급	구분	설계지진의 평균재현주기	
		담설계기준 (2011)	담설계기준 개정(안)
내진 특등급담	<ul style="list-style-type: none"> • 사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 담으로 발주처가 지정하는 담 • 법에 의하여 다목적담으로 분류한 담 • 높이 45m 이상이고 총저수용량 50백만 m³ 이상 담 	1,000년	2,400년
내진 I 등급담	• 내진 특등급 담 이외의 모든 담	500년	1,000년

③ 표준설계응답스펙트럼

- 기존의 담설계기준(2011)에서는 암반과 토사지반의 구분 없이 표준설계응답스펙트럼을 공통으로 사용하였다. 하지만 「내진설계기준 공통적용사항」에서는 암반의 표준설계응답스펙트럼을 별도로 구분하였으며 일부 주기에서의 스펙트럴가속도가 상향되었다. 그림 1과 같이 기존 지반분류에 따라 S_B 지반의 보통암으로 분류된 지반은 새로운 지반분류를 적용할 경우 S₁에 해당한다. 이에 대한 표준설계응답스펙트럼을 비교할 경우 일부 구간에서 약 12% 증가함을 알 수 있다. 스펙트럴 가속도의 증가는 시간이력해석에서 사용하는 지진파의 주파수 성분 강화를 의미한다. 하지만 특정 주기의 특성을 갖는 구조물에서만 이러한 영향이 나타나므로 표준설계응답스펙트럼 상향이 무조건적인 설계지진하중 강화를 의미하지 않는다.

그림 1. 표준설계응답스펙트럼 비교 (담설계기준(2011) : S_B, 내진설계기준 공통적용사항 : S₁)



금회 변경된 사항은 보다 과학적인 방법을 적용한 고도의 연구성과에 기반하여 국내 지진발생특성과 지반조건에 적합한 보다 합리적이고 개선된 내진설계기준으로, 향후 담 시설의 내진설계 및 내진성능평가의 근간이 되는 기준으로 활용될 것으로 판단된다.

3. 입력지진파

국내에서는 동적시간이력 해석법을 사용하여 내진성능평가를 수행할 경우, 일반적으로 국외 지진파를 주로 사용하고 있다. 특히, 일본의 Ofunato (Miyagi-oki 지진, 1968, M_L=7.9), Hachinohe (Tokachi-oki 지진, 1978, M_L=7.4) 지진파를 국내 설계기준에서 제시하는 설계지진 PGA(Peak Ground Acceleration) 값으로 수정하여 적용하였다.

「내진설계기준 공통적용사항」은 표준설계응답스펙트럼에 대응하는 가속도시간이력 작성 기준을 제시하고 있고 실지진기록을 활용한 가속도시간이력 작성 시에도 설계응답스펙트럼에 맞추어 보정(Spectral Matching) 하는 방법을 추천하고 있다.

본 연구에서는 공통적용사항에서 제시하고 있는 가속도시간이력 작성 기준에 따라 시간이력 구간선형 포락함수(그림2, 표3)를 만족하고 표준설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진파(그림 3)를 작성하여 이를 동적시간이력해석에 적용하였다. 암반에 작용하는 입력지진파의 PGA는 지진구역 I, 재현주기 2,400년을 기준으로 0.22g 로 설정하였다. 현행 담내진설계기준(2011)에 부합하는 동적시간이력은 표준설계응답스펙트럼만 달리 적용하여 작성하였다.

그림2. 가속도시간이력의 구간선형 포락함수

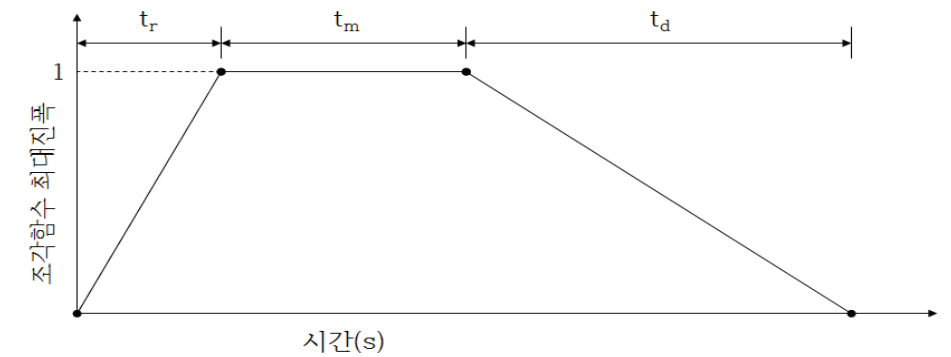


표3. 가속도시간이력 구간선형 포락함수에 대한 지진규모별 지속시간

지진규모	상승시간 (t _r)	강진동지속시간 (t _m)	하강시간 (t _d)
7.0이상-7.5미만	2	12.5	13.5
6.5이상-7.0미만	1.5	9	10.5
6.0이상-6.5미만	1	7	9
5.5이상-6.0미만	1	5.5	8.0
5.0이상-5.5미만	1	5	7.5

그림3. 포락함수를 적용한 인공지진 파 시간이력

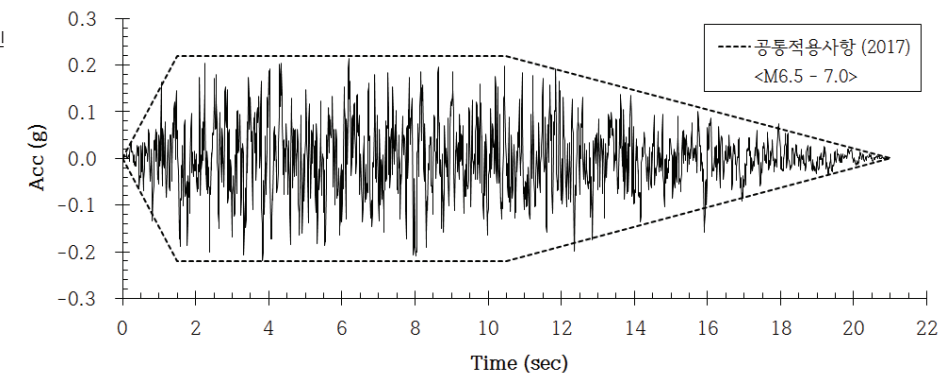
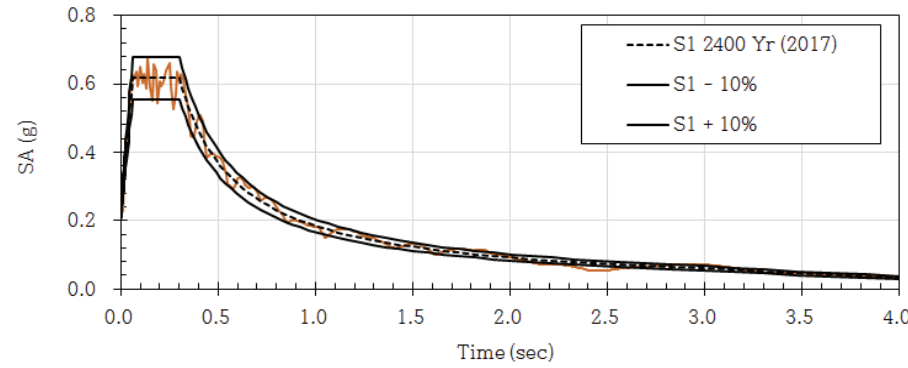


그림4
표준설계응답스펙트럼에
부합하도록 보정한 인공지진파
결과

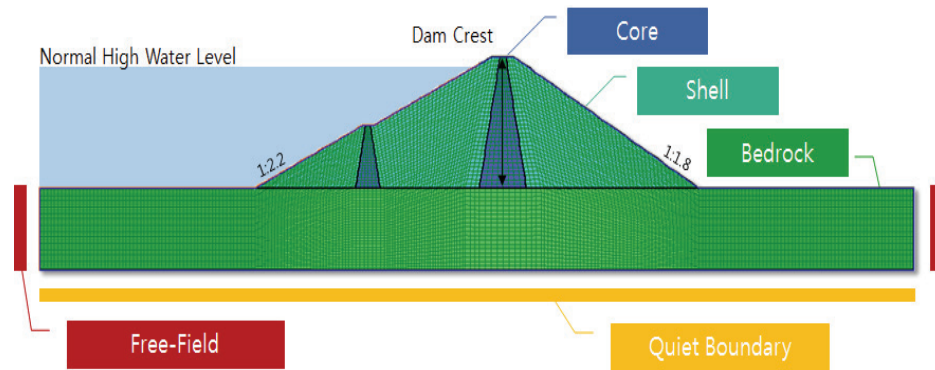


4. 필댐

① 모델링

필댐의 내진성능평가를 위하여 유한차분해석(Finite difference analysis)프로그램인 FLAC v7.0 (Itasca)을 사용하였으며 암반 위에 중심코어, 사력부를 모델링 하였다. 지진의 반사파에 대한 입력지진의 왜곡을 방지하고 지표면 전달 반사파의 흡수가 가능하도록 FLAC에서 제공하는 Quiet boundary 및 Free-Field 경계조건을 사용하였다(그림 5).

그림5
수치해석 모델링



② 해석절차

본 해석의 목적이 표준설계응답스펙트럼 변화에 따른 영향검토이므로 댐체의 시공순서는 고려하지 않았으며, 정적해석을 통하여 제체에 응력상태를 생성하였다. 이후 침투해석을 위해 상시만수위(NHML) 조건을 적용하였고 정상상태에서의 포화 침윤선 결과를 얻을 수 있다. 이 결과를 바탕으로 동적해석을 수행하였으며 지진시 침투 및 간극수압의 변화는 고려하지 않았다. 따라서 동적 해석 시에는 상류 측의 수압을 압력으로 대체하여 적용하였다.

③ 입력물성

댐의 물성은 문헌조사를 통하여 설정하였다. 공사지와 정밀안전진단, 기타 지반조사자료 등을 종합적으로 분석하여 적정값을 선정하였다. 동적해석 시 가장 중요한 재료의 특성은 변형률(γ)에 따른 전단탄성계수(G) 감소곡선과 깊이에 따른 최대전단탄성계수(G_{max})이다. 중심코어와 사력부는 각각 Vucetic & Dobry (1991), Rollins et al.(1998) 가 제안한 식을 이용하여 그림 6~7 과 같이 입력하였으며 깊이별 최대전단탄성계수(G_{max})의 변화는 다운홀 현장실험 및 Sawada(1975) 가 제

안한 식을 이용하여 적용하였다(그림 8). 깊이가 증가함에 따라 구속압이 증가하고 이로 인하여 최대전단탄성계수가 증가함을 그림 9 와 같이 확인할 수 있다.

그림6
전단탄성계수 감소곡선
(중심코어)

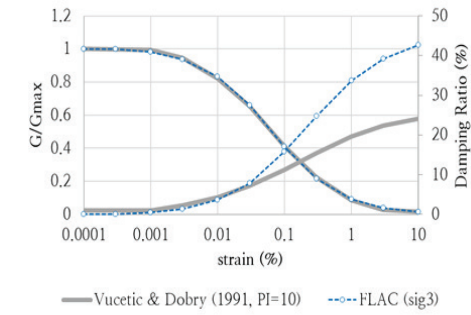


그림7
전단탄성계수 감소곡선
(사력부)

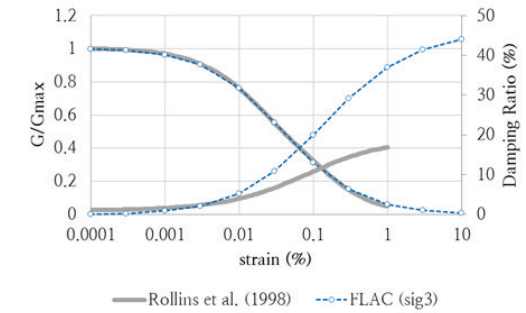


그림8
깊이별 전단파속도 변화

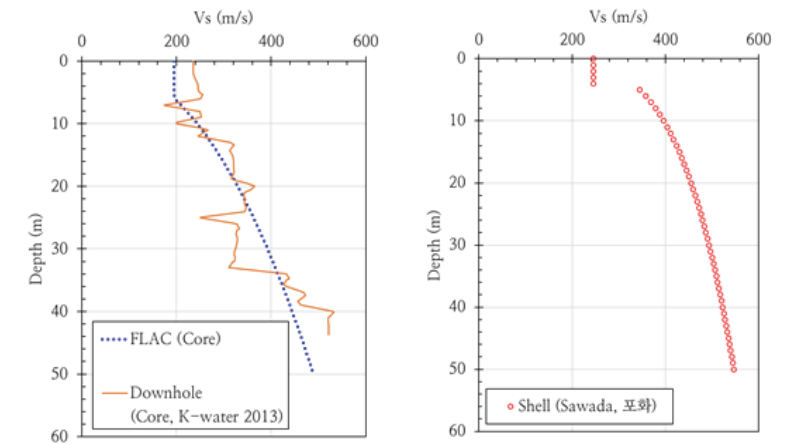
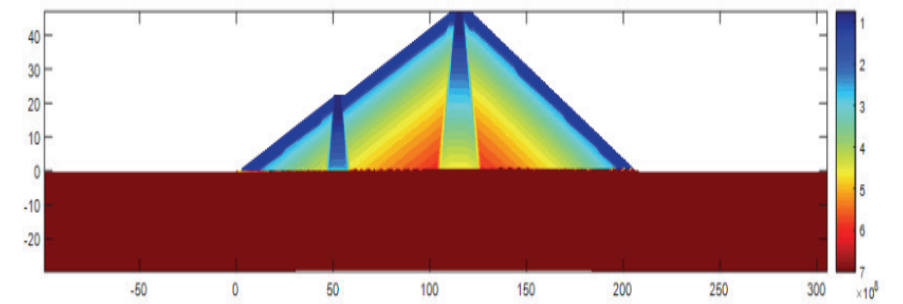


그림9
전단탄성계수 입력 결과



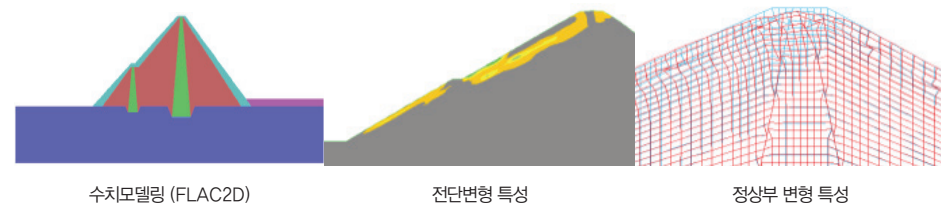
④ 해석결과비교

본 연구에서는 운문댐과 주암 본댐에 대하여 동적소성해석을 수행하였으며 댐 정상부 침하가 모두 30cm 이내로 발생함을 확인하였다. 또한 「내진설계기준 공통적용사항」에 의한 입력지진 강화 영향은 미비한 것으로 나타났다.

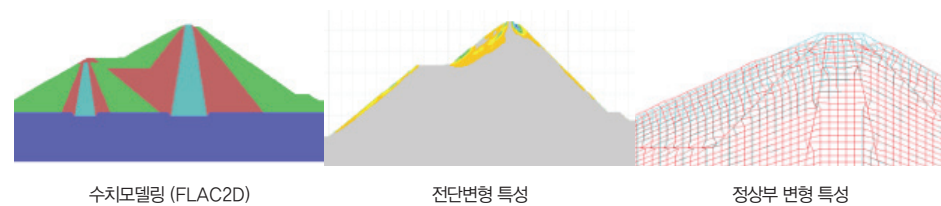
정상부침하는 중심코어의 중심을 기준으로 산정하였다. 운문댐의 경우 기준변경 전 대비 4.28 cm 감소하였으며 주암 본댐의 경우 기준변경 전 대비하여 1.0 cm 증가하였다.

코어 부분은 양쪽의 사력재로 인하여 수평변형이 크지 않았으며 수직 침하가 주로 발생하였다. 상하류의 사력재는 수평변형을 동반하여 활동파괴형태를 보이며 일부 사면에서는 배부름 현상이 발생하였지만 댐체의 크기에 비하여 매우 일부분의 변형 형상이므로 안전에는 영향이 없는 것으로 판단하였다.

운문댐(ECRD) 정상부침하 28.4cm : 제체높이 1% 미만, 기준변경 전 대비 4.28cm 감소



주암본댐(ECRD) 정상부침하 24.6cm : 제체높이 1% 미만, 기준변경 전 대비 1.0cm 증가



5. 콘크리트 차수벽 석괴댐(CFRD)

① 모델링

콘크리트 차수벽 석괴댐의 경우, 현 댐설계기준(2011)의 내진설계에서는 차수벽을 모델링 하지 않는 것으로 명시되어 있다. 하지만 본 연구에서는 좀 더 현실성 있는 해석을 위하여 차수벽을 라이닝으로 모델링 하였으며, 사력재와의 접촉부는 인터페이스(interface) 요소를 활용하여 상대마찰 각에 의한 상호거동을 허용하였다. 그 외 모델링에 대한 사항은 필댐과 유사하다.

② 해석절차

콘크리트 차수벽 석괴댐의 특성상 댐체에서의 침투는 허용하지 않는다. 따라서 해석 시 에도 차수벽에 작용하는 수압을 압력으로 적용하고 침투는 고려하지 않았다. 상시만수위(NHWL) 조건에 해당하는 압력을 깊이별로 증가하도록 설정하였고 이후 정적해석과 동적해석을 순서대로 수행하였다.

③ 입력물성

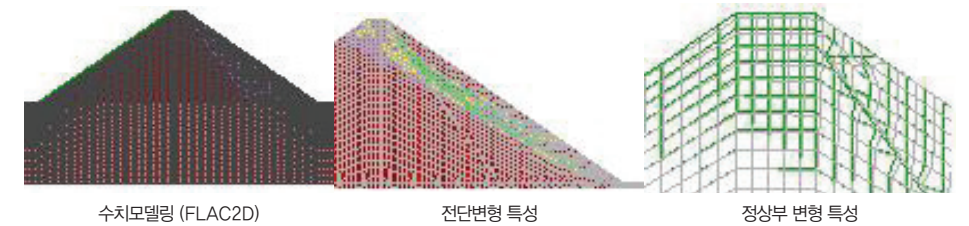
콘크리트 차수벽의 물성과 댐체의 물성은 정밀안전진단 자료를 참고하였다. 콘크리트 차수벽은 탄성체로 가정하였으며, 댐체의 동적특성 및 입력물성 설정 절차는 필댐과 유사하다.

④ 해석결과비교

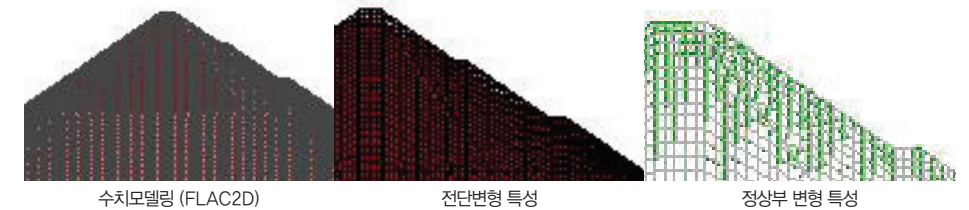
콘크리트 차수벽 석괴댐은 용담댐과 밀양댐을 대상으로 동적소성해석을 수행하였으며 각각 정상부 침하가 54.5 cm, 21.4 cm 발생하였다. 용담댐의 경우 정상부 침하가 30 cm를 초과하는 것으로 나타났지만 댐설계기준(2011)에서 허용하는 소성 변형량 60 cm 이내를 만족하며, 기준 변경 전 입력지진파에 대한 결과보다 약 4.9 cm, 2.1 cm 증가하였다. 해석 결과에 따르면 콘크리트 차수벽 석괴댐의 경우 내진설계기준 강화에 따른 영향이 크지 않다고 판단된다.

특히 콘크리트 차수벽 석괴댐은 차수벽의 영향으로 상류측은 변형 거동은 크지 않았으며 하류측 사면에서 변형이 집중됨을 알 수 있었다.

용담댐(CFRD) 정상부침하 54.5cm : 제체높이 1% 미만, 기준변경 전 대비 4.9cm 증가



밀양댐(CFRD) 정상부침하 21.4cm : 제체높이 1% 미만, 기준변경 전 대비 2.1cm 증가



본 연구에서는 2017년 7월 행정안전부(舊 국민안전처)에서 고시한 「내진설계기준 공통적용사항」의 후속조치에 따른 댐 설계기준 내진설계의 개정(안)에 대한 영향을 선제적으로 검토하고자 하였

6. 결론