

# 기존 콘크리트 중력식 댐의 내진성능 평가

## Evaluation of the seismic Capacity of Existing Concrete Gravity Dams

소진호\*                      김용곤\*\*                      정영수\*\*\*  
So, Jin Ho                      Kim, Yong Gon                      Chung, Young Soo

---

### ABSTRACT

The necessity of the seismic capacity evaluation of existing concrete gravity dams is discussed through the Izmit, Turkey and JiJi, Taiwan earthquake in 1999. In this study, the method of seismic capacity evaluation of existing concrete gravity dams in U.S.A., Japan and Canada is reviewed, applied them to the concrete gravity dam in use. Evaluation of the seismic capacity approach using three levels that are level 1 - Screening, level 2 - Pseudostatic Method, level 3 - Dynamic Analysis. Method.

---

### 1. 서론

최근 들어 전세계적으로 강진의 발생 빈도가 높아짐에 따라 구조물의 피해도 증가되고 있으며 특히 댐의 경우에는 국부적인 구조물의 손상뿐만 아니라 많은 주변 주거지역의 인명 피해를 유발할 수 있기 때문에 댐의 내진 안정성에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근 대만 지진(1999년)으로 인해 Shih-Kang 댐이 붕괴되는 피해가 발생되었지만 다행히 댐의 규모가 작아 인명과 재산의 손실을 크게 발생되지 않았다.

국내에서는 내진 측면의 접근은 대부분 신설 시설물에 국한되어 있어 내진 설계 기준 강화 이전의 기존 시설물에 대한 관심 및 적용은 극히 미비한 실정이다. 따라서 댐 구조물의 지진파괴에 의한 피해를 예방하기 위해서는 기존 댐 시설물의 내진 성능에 대한 평가 기법 연구가 필요하다.

### 2. 국내 기술 개발 동향

국내 댐 내진 성능 관련 기술개발 동향으로는 1996년의 한국건설기술연구원과 유비콘엔지니어

---

\* 중앙대학교 토목공학과 석사과정, 학생회원  
\*\* 한경대학교 안전공학과 교수, 정회원  
\*\*\* 중앙대학교 토목공학과 교수, 정회원

링이 공동연구한 내진설계기준연구(I)에서 Koyna댐(인도)의 지진 피해사례 및 설계진도에 대한 간략한 설명이 기술되어 있으며, 1997년의 한국지진공학회와 한국건설기술연구원의 내진설계기준연구(II)에서 댐의 내진등급 및 총위험계수와 등급별 내진 성능 목표 등을 기술하고 있다. 1998년에 건설교통부와 한국수자원공사의 “기본계획보고서”에서 지진이라는 것이 결국 Energy의 방출이라는 관점에서 Ductility와 Energy Dissipation에 대한 개념정도를 소개하고 있다. 또한 1998년 행정자치부 국립방재연구소에서 고려대학교에 위탁하여 “기존 시설물의 내진성능 평가를 위한 기초연구”를 수행하였으나 교량과 건축물에 국한하였다.

댐의 내진성능 평가와 관련한 연구로서는 1997년부터 한국수자원공사에서 댐 내진 안정성에 관한 연구를 현재까지 수행하고 있으며 과학기술처 특정연구기술개발사업의 일환으로 “특수구조물의 내진설계 및 내진성능 향상기법 개발에 대한 연구”를 수행하고 있으나, 일반적인 적용에 관한 연구 성과로서는 아직까지 제시하지 못하고 있는 실정이다.

### 3. 국외 내진 설계 기준 및 성능 평가

댐 내진 성능 평가는 내진 설계 기준과 밀접한 관련이 있으며 다음은 일본과 미국의 내진 설계 기준 및 성능 평가 방법이다. 다음의 표 1은 댐 시설물에 대한 각국의 내진 설계 기준을 비교하였다.

#### 3.1 일본

현재 일본의 댐 내진 설계 기준으로는 일본 대담회가 정한 개정 댐설계기준(1965-1971년)이 있다. 이 기준에서는 지진의 진동방향은 댐축에 직교하는 수평방향을 원칙으로 하고 연직방향은 고려하지 않는다. 댐의 지진응력 산정은 콘크리트 중력댐에 대해서는 진도법을 적용하고 있다.

수평 방향 설계진도의 결정은 지반진도를 토대로 이에 수정진도의 개념을 도입하여 설계진도는 지반진도에 댐 형식에 따른 계수를 곱하여 정하도록 되어 있다. 지반진도는 기초암반의 상태 및 댐의 중요도를 고려하여 결정한다. 연직 방향에 대해서는 수평진도의 1/3~1/2으로 하는 경우가 많다.

지진시의 제체에 작용하는 외력은 제체관성력외에 저수의 관성으로 일어나는 동수압이 있으며 동수압은 Westergaard 또는 Zanger 공식을 이용하여 산출한다. 일본의 내진설계기준은 지역별 지반진도와 제체별 진도를 구분하여 적용하고 있어 보다 합리적이라고 할 수 있다. 일본의 경우 내진설계는 진도법에 근거하여 댐지점의 지반진도, 댐의 종류, 기초지반의 상태 및 댐의 중요성 등을 고려하여 적용하고 있다.

#### 3.2 미국

미국에서는 지난 30년간 사용되어오던 내진 설계 기준들을 재검토하여 새로운 개념에 기초한 차세대 내진 설계 절차와 Code에 관한 연구를 이미 1990년에 시작하였다.

새로운 내진 설계 개념에서는 지진이 발생하였을 때 실제 구조물의 성능을 명확하게 보장하도록 설계하는 방향으로 나아가고 있다. 구조물의 성능도 단일 단계의 지반진동 수준에 대한 평가에서 여러 단계 지반운동 수준에 대하여 일련의 성능 목표를 달성하도록 설계하는 다단계 내진성

능수준(Multi-Level Performance Level)의 채택이 유력하여지고 있다.

이러한 성능에 기초한 설계법(Performance-Based Design)은 큰 지진 발생시 구조물의 붕괴를 방지할 뿐만 아니라 작은 지진에서도 기능수행에 관한 성능요구조건을 만족시킬 수 있도록 하는 설계개념이며, 성능목표를 설정함에 있어서는 확률의 개념을 도입하였다.

성능기초설계법에서는 내진역량(Seismic Capacity)을 Ductility나 Energy 흡수능력을 평가하고자 하며 종래에 사용되어 오던 강도(Strength) 접근법보다는 변형/변위 접근법의 사용이 고려된다.

현재 미국에서는 이러한 차세대 내진설계기준에 대한 논의가 NEHRP(National Earthquake Hazard Reduction Program)를 중심으로 국가적 차원에서 본격적으로 진행되고 있으며, 장차 5년에서 10년내에 통일된 성능에 기초한 설계기준이 완성되어 적용될 것으로 전망되고 있다.

표 1. 국내·외 내진 설계 기준

구분	한 국	일 본	미 국
발행기	· 건설교통부 · 지진공학회	· 건설성 하천국 · 일본 하천협회	· U.S. Committee on Large Dams · U.S. Army Corps of Engineers
내진설계기준명	· 댐시설기준 (1993) · 내진설계기준II (1997)	· 필댐 내진설계지침(안) (1991) · 건설성 하천사방기술기준(안)동해설 (1997)	· Guidelines for Selecting Seismic Parameters for Dam project (1985) · Gravity Dam Design (1995, 6)
내진등급	· 내진특등급 · 내진 I 등급	· 구분 없음	· I ~ IV 등급
가속도수계	· 행정구역별 지진구역도	· 지진구역 · 지반진도	· OBE / MCE 수준 · 지진구역도
지반반향	· 지반종별 지반계수 · 지반조건(1~4)	· 강진대 구역 · 중진대 구역 · 약진대 구역	
지진력산정	· 진도법	· (수정)진도법	· 유사정적해석
안전검토	· 전단마찰안전율고려 · 진도 · 콘크리트 응력	· 전단마찰안전율고려 · 진도 · 콘크리트 응력	· 전단마찰안전율고려 · 진도 · 콘크리트 응력

#### 4. 댐 내진 성능 평가(안)

다음의 그림 1은 현재 연구 진행중인 콘크리트 중력식 댐에 대한 내진 성능 평가 지침(안)의 흐름도이다. 내진 성능 평가 절차는 예비평가, 1단계 평가, 2단계 평가로 총 3단계로 구성되어 있으며 예비평가에서는 기존의 문헌자료를 기본으로 한 정적해석을 수행하여 5가지의 항목에 대한 평가를 실시하여 실질적인 내진 성능 평가인 1단계 평가의 필요여부를 판단하게 하였다. 1단계 평가에서는 비파괴 현장시험을 통한 자료의 수집과 진도법을 기초로 구조물에 대한 동적정적 해석을 수행하여 활동, 전도 및 제체 허용 응력에 대한 평가를 수행한다. 1단계 평가를 만족하지 못하면 2단계 정밀 평가를 수행하는데 이 단계에서는 실내 정밀 시험을 수행하며 댐 구조물에 대한 동적해석을 수행하여 1단계와 같은 방법으로 활동, 전도 및 허용 응력에 대한 평가를 실시한다. 대상 구조물의 내진 등급 및 지진계수는 내진설계기준연구(II)를 기본으로 하였고 각 평가 단계에서 요구되는 성능은 미국 공병대(U.S. Army Corps of Engineers)의 기준을 참고로 작성하였다. 최종적으로 내진 성능이 부족할 경우에는 보강여부를 결정하여 재평가를 실시하도록 한다.

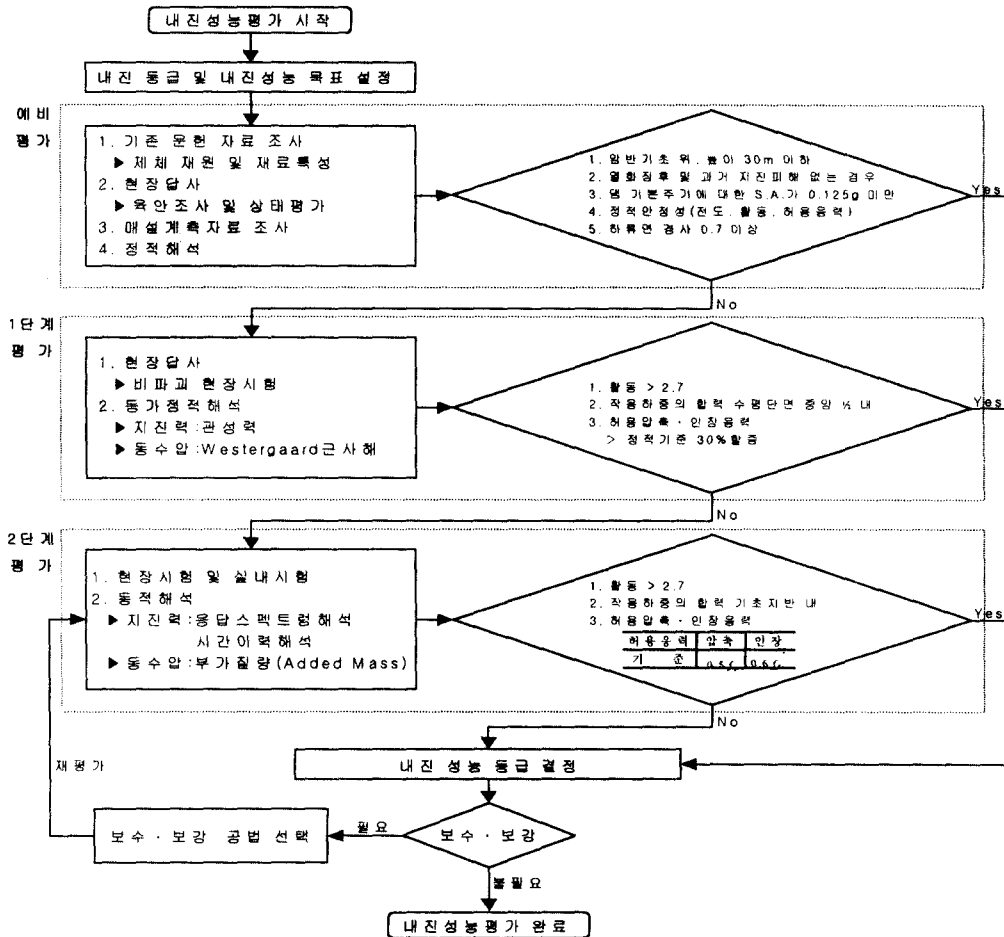


그림 1. 콘크리트 중력식 댐의 내진 성능 평가 흐름도

### 5. 댐 내진 성능 평가 예제

다음의 예제는 현재 국내에서 가동중인 콘크리트 중력식 댐을 선정하여 내진 성능 평가 흐름도를 따라 평가를 수행한 결과이다. 예제 구조물은 지진구역 I에 위치한 내진 특 등급 구조물로서 붕괴 방지 수준을 고려한 평가를 수행하였으며 본 댐의 지진계수는 0.22g이다.

#### 5.1 예비평가

내진 성능 평가 1단계 여부를 결정하는 예비평가 5개 항목 중에서 3개 항목(1,2 및 3)을 만족하지 못하여 내진 성능 평가 1단계를 수행한다.

#### 5.2 1단계 평가

구조물은 8절점 육면체 Solid 요소를 적용한 3차원으로 모델로 전체 구조물 중 1개의 블록을

선정하여 해석을 수행하였고 댐의 상세 제원과 적용 물성값은 다음 표 5와 같다. 다음의 표 2는 예제 구조물의 제원 및 물성값이고 표 3은 평가 단계별 작용하중의 조합이다.

표 2. 구조물 제원 및 물성값

구분	내용	
단면	높이	62.8 m
	기초폭	53.312 m
	상시만수위	60.4 m
재원	좌사각	1 m (좌사압 무시)
	탄성계수	$2.89 \times 10^6 \text{ tonf/m}^2$
제체	단위중량	$2.36 \text{ tonf/m}^3$
	포아송비	0.13
물성값	감쇠비	5 %
	탄성계수	$2.75 \times 10^6 \text{ tonf/m}^2$
지반	단위중량	$2.65 \text{ tonf/m}^3$
	포아송비	0.333
물성값	감쇠비	10 %
	지반반력계수	$k_r = \frac{E}{B(1-\nu^2)} = 58,016.528 (\text{tonf/m}^3)$

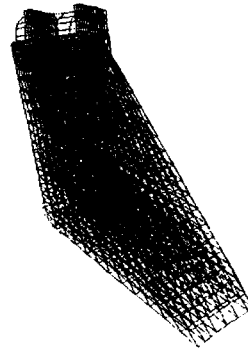


그림 2. 유한요소 모델

표 3. 해석 조건에 따른 하중조합 (상시만수위 기준)

평가 단계	하중 조합
예비 평가(정적해석)	자중, 정수압, 양압력
1 단계 평가 (등가정적해석)	자중, 정수압, 양압력, 동수압(Westergaard 근사해), 지진력(관성력)
2 단계 평가 (동해석)	자중, 정수압, 양압력, 동수압(부가질량), 지진력(인공지진)

(1) 해석결과

1단계 평가에서는 지진력은 관성력(수평진도 0.22g)을 동수압에 대해서는 Westergaard의 근사해를 적용한 등가정적해석을 수행하는데 본 예제에서는 제체에 발생하는 응력만을 검토하였다. 아래 표 4와 그림 3과 4는 1단계 해석결과이다.

표 4. 제체 발생 응력에 대한 1 단계 평가 결과

구분	압축응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	비고
1 단계 평가	19.2	4.9	

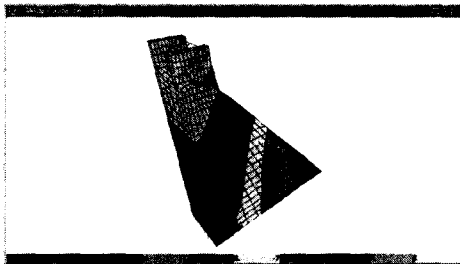


그림 3. 제체의 압축 응력분포 (1단계평가)

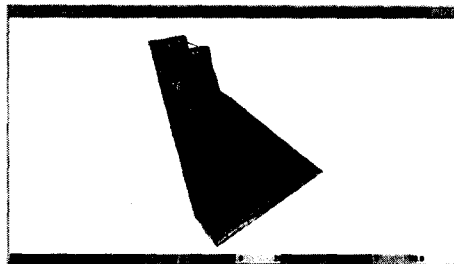


그림 4. 제체의 인장 응력분포 (1단계평가)

(2) 평가 기준

1 단계 평가에서는 지진하중 작용시 발생된 응력과 제체의 허용응력을 비교하기 위하여 「콘크리트 표준시방서」를 기준을 적용하였다. 콘크리트 댐에서는 제체내 임의 지점에서 발생하는 압축응력은 4이상의 안전율을 가져야 하며 특히 지진시에는 콘크리트의 변형률 속도가 매우 커서 압축응력도 크게 되므로 표준허용응력의 30%이내의 값을 증가시킨 값을 기준으로 하며 본 예제의 허용응력은 다음의 표 4와 같다.

표 4. 콘크리트 허용응력 기준 (1단계 평가)

구	분	허용압축응력 : $f_{ca}=0.25f_{ck}$	허용인장응력 : $f_{ta}=0.42\sqrt{f_{ck}}$	비 고
$f_{ck}=300kg/cm^2$	정 하 중	$75.00kgf/cm^2$	$7.3kgf/cm^2$	
	지진하중	$97.5kgf/cm^2$	$9.5kgf/cm^2$	30% 할증

허용 응력에 대한 검토결과 표 3과 4의 결과에서와 같이 압축과 인장에 대해 허용응력을 초과하지 않아 제체 발생응력에 대해 안전한 결과를 얻었다.

1단계에서 평가기준을 만족하면 2단계 동해석을 수행하지 않아도 되지만 본 연구에서는 2단계 평가도 실시하였다.

### 5.3 2단계 평가

과거에는 댐 해석시 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산하여 정적인 방법에 의거하여 해석이 수행되어 왔으나 이 방법은 하중산정의 편리함, 해석의 간편성, 경제성 등에서 유리하지만 지진의 동적인 특성을 제대로 고려할 수 없기 때문에 해석결과에 대한 신뢰도가 떨어지는 단점이 있어 2 단계 평가에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 댐의 동적거동특성 파악을 위하여 동적 해석을 수행한다. 동해석 방법에는 응답스펙트럼 해석과 시간이력해석법이 있는데 본 예제에서는 시간이력해석을 수행하였다.

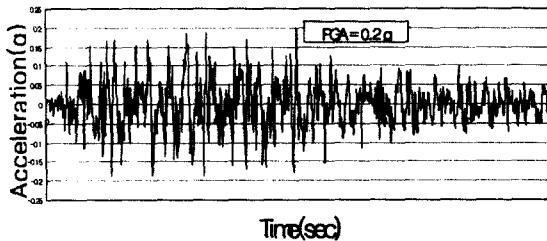


그림 5. T2 인공지진

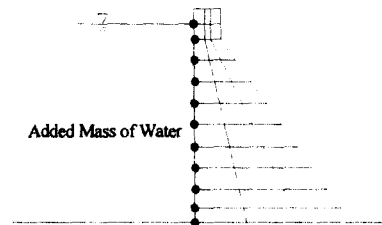


그림 6. 부가질량 (Added Mass)

#### (1) 해석결과

2 단계 평가를 위해서는 입력파형으로 실측된 파형이나 인공지진 파형을 사용하여 해석을 수행하는데 본 예제에서는 그림 5의 한국도로공사에서 작성한 T2 인공지진 (경암지반, PGA=0.2g, 지속시간 24sec)을 사용하였다. 동수압은 그림 6과 같이 Westergaard의 근사식으로부터 유도된 부가질량을 계산하여 제체와 같이 진동하는 것으로 하여 해석을 수행하였다. 아래 표 6과 그림 7과 8는 2단계 해석결과이다.

표 6. 제체 발생 응력에 대한 2 단계 평가 결과

구 분	압축응력 ( $kgf/cm^2$ )	인장응력 ( $kgf/cm^2$ )	비 고
2 단계 평가	40.0	18.8	

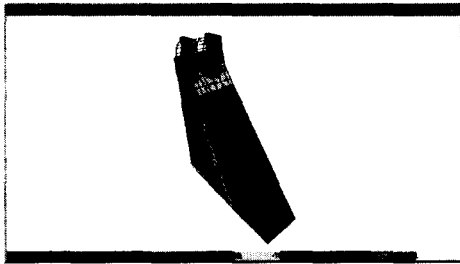


그림 7. 제체의 압축 응력분포 (2단계평가)

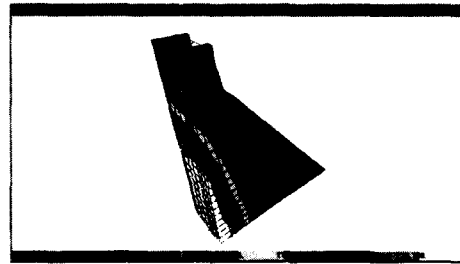


그림 8. 제체의 인장 응력분포 (2단계평가)

(2) 평가기준

2 단계 평가에서는 허용응력 검토를 위해 미국 공병대(U.S. Army Corps of Engineers)의 콘크리트 댐 설계 기준을 근거로 하여 지진발생 빈도와 지진의 규모를 고려하여 OBE(Operating Basis Earthquake)수준을 기준으로 허용 응력 기준을 작성하였다.

표 7. 콘크리트 허용응력 기준 (2단계 평가)

구 분	허용압축응력 : $f_{ca}=0.5f_{ck}$	허용인장응력 : $f_{ct}=0.6\sqrt{f_{ck}}$	비 고
$f_{ck}=300kg/cm^2$	$150.0kgf/cm^2$	$26.9kgf/cm^2$	

허용 응력에 대한 검토결과 표 6과 7의 결과에서와 같이 압축과 인장에 대해 허용응력을 초과하지 않아 제체 발생응력에 대해 안전한 결과를 얻었다.

6. 결론 및 향후연구

(1) 콘크리트 댐의 내진 안정성 평가 지침(안)을 기준으로 제체 내 발생응력에 대한 안전성 검토결과 1·2 단계 평가 모두 허용응력을 초과하지 않아 충분한 내진 성능을 보유하고 있음이 판정되었다.

(2) 기존의 국내 댐시설기준에서는 제체 발생 응력에 대한 기준이 정적기준에 대한 할증만을 고려하고 있어 구조물에 따라 요구되는 내진 성능 수준에 따른 안정성 평가를 수행할 수 없었다.

(3) 본 콘크리트 댐의 내진 안정성 평가 지침(안)의 확정을 위해 국내 기존 댐에 대한 적용 검토가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 건설교통부와 시설안전기술공단의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 농림수산부, 농업진흥공사(1989) “농지개량사업계획설계기준(콘크리트댐편)”
2. 건설교통부(1993), “댐 시설 기준”
3. 건설교통부(1997), “내진설계기준연구(II),” 한국지진공학회
4. 日本建設省 土木研究所, ダム構造研究室 (1991) “コンクリートダムに作用する地震時動水壓に関する實驗的検討”
5. US Army Corps of Engineers(1995), “Gravity Dam Design”
6. 소진호, 김용근, 정영수(2000), “콘크리트 중력식댐의 내진성능 평가에 관한 연구” 2000년도 가을 학회 논문집, 제12권 2호, pp325-330