

콘크리트 중력식 댐의 내진 안전성 평가

Evaluation of the Seismic Safety of Concrete Gravity Dams

소진호*
So, Jin Ho

정영수**
Chung, Young Soo

김용곤***
Kim, Yong Gon

국문요약

최근 1995년 일본의 고베 및 1999년도에 터키와 대만 등지에서 일어난 강진으로 많은 사상자와 피해가 발생되었고 일본 및 대만의 경우 일부 댐의 피해가 발생되었다. 댐의 경우 지진 발생시 국부적인 구조물의 손상뿐만 아니라 주변 주거지역에 많은 인명피해를 유발하기 때문에 국내에서도 내진설계기준 강화 이전의 콘크리트 중력식 댐에 대한 내진 안전성 평가의 필요성을 인식하게 되었다. 본 연구에서는 미국, 일본 및 캐나다의 내진설계기준 및 안전성 평가기법을 분석하여 국내 실정에 적합한 내진 안전성 평가 지침을 마련하였다. 평가단계는 제3단계로 구성하였다. 제1단계는 기초 문헌자료를 이용한 내진 안전성 평가 필요여부를 구분하는 예비평가 단계이며 제2단계 평가는 진도법을 적용한 유사정적해석을 수행하여 성능기준 만족여부를 판단한다. 제3단계 평가는 제2단계를 만족하지 못하였을 경우 대상구조물에 동적해석을 적용하여 정밀한 평가를 수행한 후 성능기준을 평가한다. 본 연구에서는 현재 국내에서 운영중인 콘크리트 중력식 댐을 선정하여 본 평가 방법을 적용하였다.

주요어 : 콘크리트 중력식 댐, 내진안전성, 진도법, 유사정적해석, 동적해석

ABSTRACT

Recently, the seismic safety evaluation of concrete gravity dams is raised due to the damage or the failure of dams occurred by the 1995 Kobe earthquake, the 1999 Taiwan earthquake, etc. Failure of dam may incur loss of life and properties around the dam as well as damage to dam structure itself. Recently, there has been growing much concerns about 'earthquake-resistance' or 'seismic safety' of existing concrete gravity dams designed before current seismic design provisions were implemented. This research develops three evaluation levels for seismic safety of concrete gravity dams on the basis of the evaluation method of seismic safety of concrete gravity dams in U.S.A., Japan, Canada, and etc. Level 1 is a preliminary evaluation which is for purpose of screening. Level 2 is a pseudo-static evaluation on the basis of the seismic intensity method. Finally, level 3 is a detail evaluation by the dynamic analysis. Evaluation results on existing concrete gravity dam on operation showed good seismic performance under the designed artificial earthquake.

Key words : concrete gravity dams, seismic safety, seismic intensity method, pseudo-static analysis, dynamic analysis

1. 서 론

최근의 연이은 국내·외 지진 즉 1996년 영월지진, 1997년 경주지진, 1995년 일본 고베(Kobe)지진, 1999년 대만 지진(Jiji)지진 등으로 전세계적으로 강진의 발생 빈도가 높아짐에 따라 구조물의 피해도 증가되고 있으며 이에 따라 지진에 대한 국민적 관심이 고조되고 있다. 특히, 전세계적으로 지진에 의한 댐의 전면적인 붕괴는 현재까지 발생된 기록은 없지만, 지진 발생시 댐은 국부적 붕괴 및 손상뿐만 아니라 주변 주거지역의 많은 인명 피해를 유발할 수 있기 때문에 댐의 내진 안전성에 대한 필요성이 요구되고 있다. 국내에서는 1972년 원자력 구조물에 대하여 내진설계가 도입된 이후에 1988년에 건축법에서 UBC(uniform building code) 기준을 근거로한 내진설계 규정 도입을 기점으로 1992년에 도로교시방서, 1996년에 콘크리트표준시방서에 내진설계규정이 도입되었다. 댐의 경우 1979년 제정된 이후 1983년과 1993년에 개정된 댐시설기준에 지진관성력(진도법)에 대한

적용을 고려하도록 규정하고 있어 내진설계 도입의 역사가 길지는 않다. 그러나 국내의 대규모 댐 건설초기에는 일본의 댐 내진설계방법에 많은 부분을 의존하였기 때문에 설계진도의 차이는 있지만 진도법에 의한 내진설계는 이루어져 왔다. 현재 댐시설기준에 명시된 내진설계 규정은 설계기준이 명백하지 않고 안전성에 대한 기준 또한 정적인 기준에 한정되거나 지진시 단순한 활중계수만을 적용하도록 되어 있어 기존 댐 시설물에 대한 합리적인 내진 안전성 평가 방법에 대한 연구가 필요하다.

2. 국내·외 기술 개발 동향

댐 내진 안전성 평가는 내진 설계 기준과 밀접한 관련이 있으므로 본 장은 국내·외 내진 설계기준 및 안전성 평가 방법을 요약 기술하였으며 표 1은 댐 시설물에 대한 각국의 내진 설계 기준을 비교하였다.

2.1 국내

국내에서는 댐 내진설계에 관련하여 1996년의 한국건설기술연구원과 유비콘엔지니어링이 공동연구한 내진설계기준연구(I)에서 Koyna 댐(인도)의 지진 피해사례 및 국내의

* 중앙대학교 토목공학과, 석사과정

** 정희원 · 중앙대학교 토목공학과, 교수(대표저자 : chung47@cau.ac.kr)

*** 정희원 · 한경대학교 안전공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2002년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 11. 9 / 심사종료일 : 2002. 2. 15)

표 1 국내·외 댐 내진 설계 기준

구 분	한 국	일 본	미 국
발행기관	· 건설교통부 · 지진공학회	· 건설성 하천국 · 일본 하천협회	· U.S. Committee on Large Dams · U.S. Army Corps of Engineers
내진설계 기준 명	· 댐시설기준(1993) · 내진설계기준 II(1997)	· 필댐 내진설계지침(안)(1991) · 건설성 하천사방기술기준(안) 동해설(1997)	· Guidelines for Selecting Seismic Parameters for Dam project(1935) · Gravity Dam Design(1995)
내진등급	· 내진특등급, I 등급	· 구분 없음	· I ~ IV 등급
지진구역	· 지진구역도(I, II 구역) · 지진재해도	· 지진구역도(강진, 중진, 약진대) · 지반진도	· 지진구역도(0~4구역) · OBE/MCE 수준
지반영향	· 지반종별 지반계수 · 지반조건(1~4종)	· 지반종별 지반계수 · 지반조건(1~3종)	· 구분없음
해 석 법	· 진도법	· (수정)진도법	· 등가정적해석

설계진도에 대한 설명이 기술되어 있으며, 1997년의 한국지진공학회와 한국건설기술연구원의 내진설계기준연구(II)에서 USCOLD(United States committee on large dams)의 기준⁽¹⁾을 적용한 댐의 위험도계수산정방법을 적용한 댐 내진등급 및 등급별 내진 성능 목표 등을 기술하고 있다. 1998년에 건설교통부와 한국수자원공사의 기본계획보고서에서 지진을 energy의 방출이라는 관점에서 ductility와 energy dissipation에 대한 개념을 소개하고 있다. 또한 1998년 행정자치부 국립방재연구소에서는 기존 시설물의 내진성능평가를 위한 기초연구를 수행하였으나 교량과 건축물에 국한하였다.⁽²⁾ 특히, 댐의 내진 안전성 평가와 관련한 연구로서는 1997년부터 3년간 한국수자원공사에서 댐 내진 안전성에 관한 연구⁽³⁾를 수행하였으나 1997년의 내진설계기준연구(II)와 같이 내진 설계에 대한 포괄적인 내용과 연구대상이 주로 필댐에 국한되어 일반적인 적용은 제시하지 못하고 있다. 또한 국내 댐 내진관련 연구의 대부분이 댐시설기준과 연계성이 부족하여 2원적인 설계기준을 제시함으로써 실무자들에게 다소 혼란스러운 영향을 주고 있는 것이 사실이며 실제 예로써 설계수평진도에서도 약 2배 이상의 차이를 보이고 있어 상위 기준으로서의 명확한 규정이 필요하다.^{(4),(5)} 댐의 지진해석에 관련해서는 지진의 발생시 유체-지반-구조물의 상호작용(interaction)^{(18),(21)}이 댐의 거동이 많은 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구가 진행중이며 이와 함께 비선형 균열(crack)모델을 적용한 동적해석⁽²²⁾ 진행중이다.

2.2 일본

일본은 세계에서 최초로 1924년에 진도법(震度法)⁽⁶⁾을 적용하였고 현재 일본의 댐 내진 설계 기준의 기본을 이루고 있다. 댐 내진설계 기준으로는 일본 대담회가 정한 개정 댐설계기준(1993)과 하천협회에서 정한 건설성하천방재기술기준(안)(1997)이 있다. 이들 기준에서는 지진의 진동방향은 댐축에 직교하는 수평방향을 원칙으로 하고 있으며 댐의 설계수평진도의 산정시 콘크리트 중력식 댐에 대해서는 진도법을 적용하고 있다. 진도법에 의한 수평 방향 설계진도의 결

정은 지반진도를 토대로 이에 수정진도의 개념을 도입하여 설계진도는 지반진도에 댐 형식에 따른 계수 등을 곱하여 정하도록 되어 있다. 지반진도는 기초압반의 상태 및 댐의 중요도를 고려하여 결정한다. 연직 방향에 대해서는 수평진도의 1/3~1/2로 하는 경우가 많다. 지진시의 제체에 작용하는 외력은 제체 관성력외에 저수의 관성으로 발생하는 동수압이 있으며 동수압은 Westergaard 또는 Zanger 공식^{(7),(8)}을 이용하여 산출한다. 일본의 내진설계기준의 특징은 지역별 지반진도와 제체별 진도를 구분하여 적용하고 있어 보다 합리적이라고 할 수 있으며 설계 수평진도 산정시 진도법에 근거하여 댐 위치에서의 지반진도, 댐의 종류, 기초지반의 상태 및 댐의 중요성 등을 고려하여 적용하고 있다.

2.3 북미주

미국에서는 Bureau of Reclamation, USACE(U.S. army corps of engineers)⁽⁹⁾, 및 USCOLD(United States committee on large dams)⁽¹⁾ 등을 중심으로 댐에 대한 내진설계기준을 발전시켜왔다. 미국의 댐 내진설계 기준은 지진으로 인한 댐 파괴시 초래될 수 있는 피해규모를 정량적으로 추정하여 내진등급 및 목표성능을 결정하여 설계지진으로는 OBE (operational basis earthquake)와 MCE(maximum credible earthquake) 두 수준의 지진을 사용하도록 규정되어있다. 댐의 지진응답해석방법으로는 등가정적해석법이 널리 사용되어왔으나 최근에는 동적해석이 보편화되고 있다. 1990년에 NEHRP(national earthquake hazard reduction program)를 중심으로한 차세대 내진설계기준에 대한 논의가 국가적 차원에서 본격적으로 진행되고 있으며 이와 함께 1994년 NPDP (national performance of dams program)를 시작하면서 댐 내진설계에 대한 연구를 가속화하고 있다. 본 연구는 지난 30년간 사용되어오던 내진 설계 기준들을 재검토하여 새로운 개념에 기초한 차세대 내진 설계 절차와 시방서에 관한 연구이며 새로운 내진설계 개념에서는 지진이 발생하였을 때 실제 구조물의 성능을 명확하게 보장하도록 설계하는 방향으로 나아가고 있다. 구조물의 성능도 단일 단계의 지반진동 수준에 대한 평가에서 다단계 지반운동 수준에 대하여

일련의 성능 목표를 달성하도록 설계하는 다단계 내진성능 수준(multi-level performance level)의 채택이 유효하여지고 있다. 이러한 성능에 기초한 설계법은 큰 지진 발생시 구조물의 붕괴를 방지할 뿐만 아니라, 작은 지진에서도 기능수행에 관한 성능요구조건을 만족시킬 수 있도록 하는 설계개념이며, 성능목표를 설정함에 있어서는 확률론 개념을 도입하고 있다. 성능기초설계법에서는 내진역량(seismic capacity)을 연성도(ductility)나 에너지흡수능력으로 평가하고자 하며 종래에 사용되어 오던 강도(strength)접근법보다는 변형·변위 접근법의 사용을 고려하고 있다. 연구 성과에 따라 미국에서는 장차 5년에서 10년 내에 통일된 성능에 기초한 설계기준이 완성되어 적용될 것으로 전망되고 있다. 한편, 캐나다에서 사용되고 있는 지침 중에 내진성능평가에 대해 비교적 자세히 언급하고 있는 것은 CEA에서 사용하고 있는 지침서이다. CEA(Canadian electrical association)에서는 다른 나라의 지침에 비해 비교적 자세하게 평가 절차를 언급하고 있다. 평가 절차는 3단계로 이루어져 있다. 1단계로는 비교적 간단한 자료들을 가지고 예비 평가(screening analysis)를 실

시하도록 하여 2단계 평가여부를 판단하게 하였다. 2단계에서는 액상화 및 변형에 대한 간편해석을 실시하여 판단의 기준으로 삼게 하였다. 마지막 3단계로는 액상화 및 변형에 대한 상세 해석을 실시하여 내진 성능을 평가하였다.

3. 국내 댐 내진 안전성 평가

내진 안전성 평가절차는 제1단계 예비평가(정적해석), 제2단계 간편해석(유사정적해석), 제3단계 상세해석(동적해석)으로 총 3단계로 구성되어 있으며 기본적으로 본 평가절차는 대상 구조물의 내진 등급 및 지진계수의 산정은 한국지진공학회와 내진설계기준연구(II)(1997)를 기본으로 하였고 각 평가 단계에서 요구되는 성능 및 안전율은 미국 공병대(U.S. army corps of engineers)의 중력식 댐 설계(1995)⁽⁹⁾와 캐나다 전력협회(Canadian electrical association)의 지진력 작용시의 기존 댐에 대한 안전성 평가(1990)⁽¹⁰⁾를 검토하였다. 그림 1은 콘크리트 중력식 댐에 대한 내진 안전성 평가 흐름도이다.

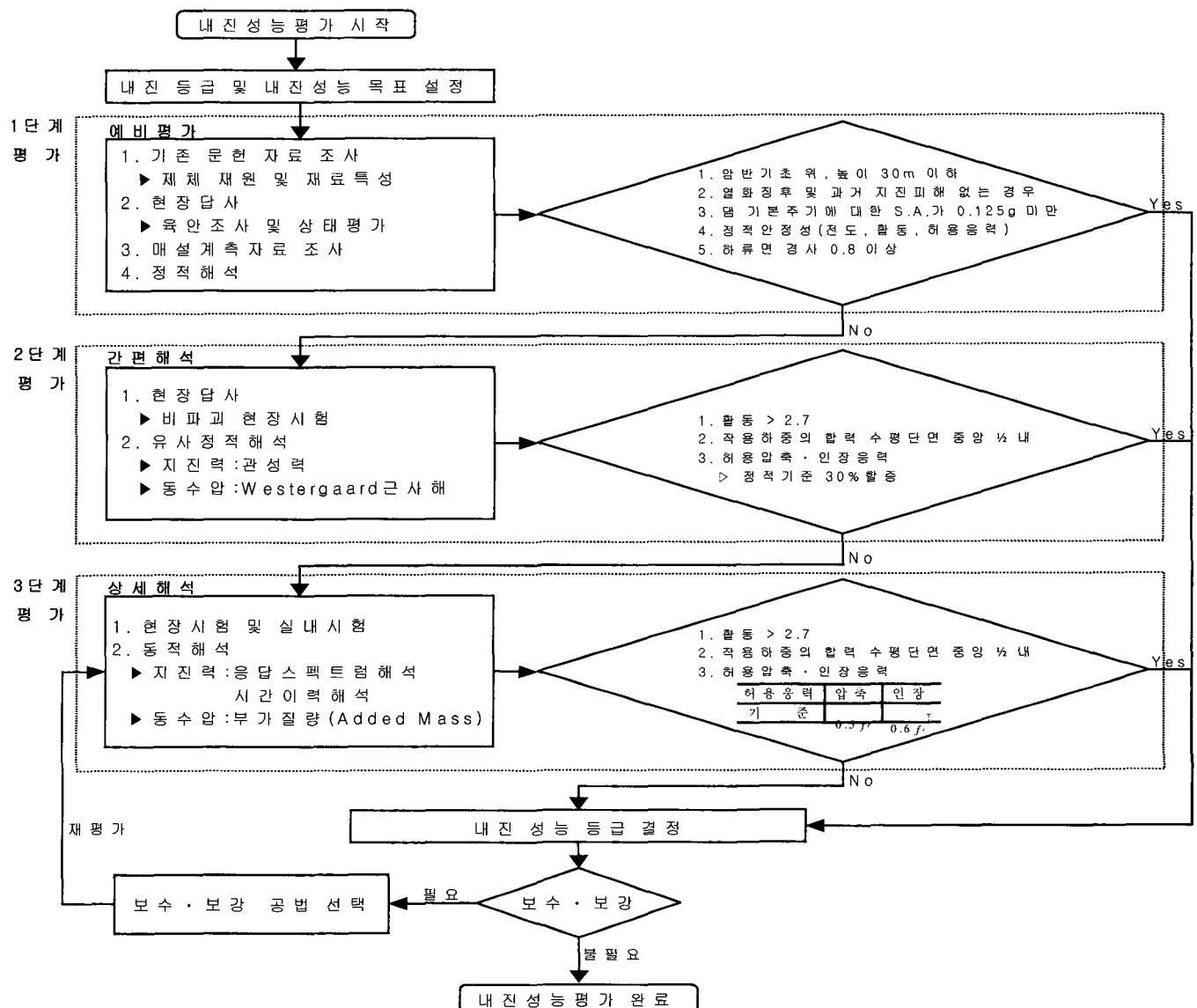


그림 1 콘크리트 중력식 댐에 대한 내진 안전성 평가 흐름도

3.1 제1단계 평가

제1단계 예비평가에서는 기존의 문헌자료(공사지, 설계도 등)를 기본으로 한 정적해석을 수행하여 5가지의 항목에 대한 내진 안전성 평가를 실시하여 실질적인 내진 성능 평가인 제2단계 간편해석의 필요여부를 판단하게 된다. 예비평가 5가지 항목은 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

- 1) 댐의 지반 조건이 경암 (S_A)인 경우 지진 발생시 지반의 침하 및 액상화로 인한 구조물의 피해를 방지할 수 있고 표 4에서 높이가 30m 이하인 경우 내진등급분류시 내진 특등급 구조물로 분류될 영향이 매우 작아진다.
- 2) 댐 주변 지역에 발생된 과거 지진에 의한 손상이 없는 경우 만약 과거 지진 발생다발 지역에 위치한 구조물은 지진에 의한 피해 확률이 높고 사용년수가 오래된 콘크리트 댐은 주재료인 콘크리트의 열화현상의 발생으로 재료적 강도 및 특성이 저하되어 구조물 전체의 성능이 저하된다.
- 3) 댐의 기본주기 (T_1)에 대한 스펙트럴가속도가 표준설계 응답스펙트럼에서 0.125g미만인 경우 그림 2와 같은 콘크리트 중력식 댐의 기본모드에 대한 형상함수는 식 (1)로 가정할 수 있으며 이때 저수와 지반의 영향을 고려한 주기보정계수(R)를 적용하여 4.2절의 식 (2)와 같은 콘크리트 중력식 댐의 기본 주기식을 유도할 수 있다. 그리고 기본주기 (T_1)에 대한 표준설계응답스펙트럼 곡선에서의 스펙트럴가속도를 구한다.^{(13),(14)}

$$\Psi_1(y) = a \left(\frac{y}{H} \right) + (1-a) \left(\frac{y}{H} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,

Ψ : 모드 형상함수(fundamental mode shape function)

a : 댐의 횡과 전단변형을 고려한 계수(0.18)

H : 댐의 최대 높이

- 4) 댐 시설기준에 근거한 전도 및 활동에 대하여 정적 안전성을 만족하는 경우.

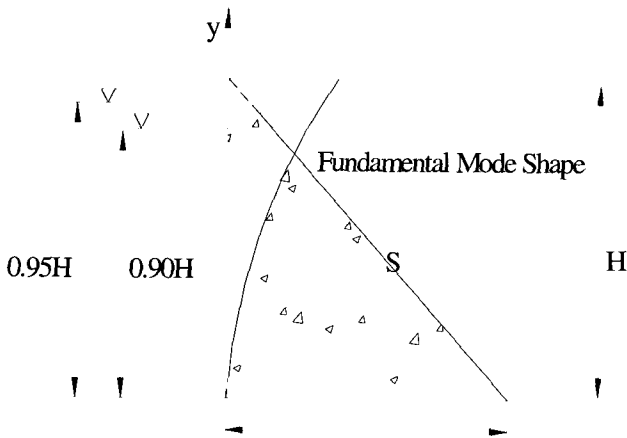


그림 2 콘크리트 중력식댐의 일반 단면도

- 5) 댐의 하류면 경사(S)가 0.8 이상인 경우 그림 2와 같이 콘크리트 중력식 댐의 일반단면에서 하류면 경사(S)에 대한 활동과 전도에 대한 안전율과의 관계는 그림 3, 4와 같다. 상시만수위는 일반적으로 댐 높이의 90~95% 정도 가정하였다. 그림 3에서 기울기(S)가 0.8일 경우 활동에 대한 안전율 2.7을 만족하는 댐의 최대 높이는 125m이며 현재 국내에 콘크리트 중력식 댐은 모두 100이하(국내 콘크리트 중력식 댐의 최대높이는 충주댐으로 97.5m)이고 그림 4의 결과와 같이 상시만수위가 댐 높이의 95% 즉, 0.95H인 경우 전도에 대한 안전율 4.0을 만족하는 최저 기울기(S)는 0.78이다.

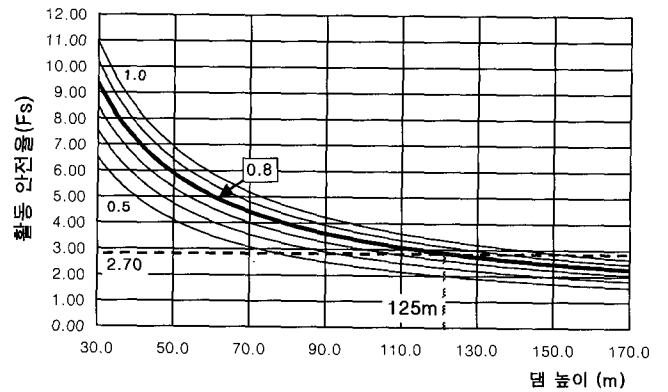


그림 3 댐 하류면 경사(S)에 대한 활동 안전율

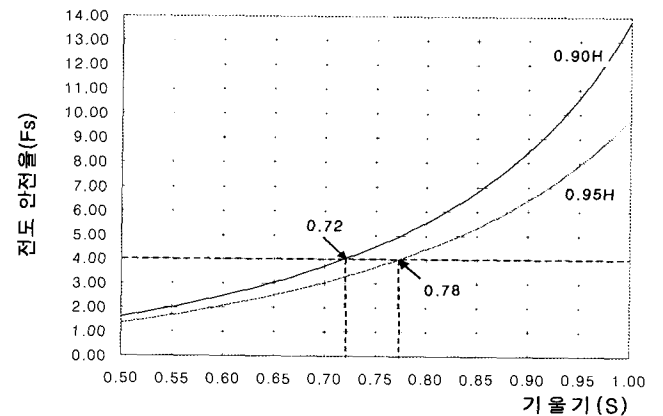


그림 4 댐 하류면 경사(S)에 대한 전도 안전율

3.2 제2단계 및 제3단계 평가

제2단계 간편해석에서는 기존 제1단계 예비평가 자료뿐만 아니라 비파괴 현장시험을 통해 얻은 자료를 추가하여 진도법을 기본으로 한 댐 구조물에 대한 유사정적해석을 수행하여 활동, 전도 및 체체 허용 응력의 세개항목에 대한 내진 안전성 평가를 수행한다. 제2단계에서 규정한 세개항목에 대한 안전율을 만족하지 못하면 제3단계 상세해석을 수행하는데 이 단계에서는 현장시험과 병행한 실내 정밀 시험을 수행하여 평가대상 구조물에 대한 정밀한 자료를 수집하여 동적해석을 수행한다. 3단계에서도 2단계와 같은 방법으로 활동, 전도 및 허용 응력에 대한 내진안전성 평가를 실시한다. 그러나 동적인 영향을 고려하여 각 평가항목

표 2 국·내외 활동, 전도 및 허용응력에 대한 안전율 기준

구분	국내 현행기준		일본		미국			제안 안전율			
	정적 하중	지진하중	정적 하중	지진 하중	정적 하중	지진하중		정 적 하 중	지진하중		
						OBE	MCE		유사정적해석	동적해석	
설계수평 전도(g)	0.22~0.05 중약진대		0.15~0.10 강진대		0.25~0.10 강진대			-			
활동	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	2.7	2.7	4.0	2.7	2.7	
전도	중앙 1/3	중앙 1/3	중앙 1/3	중앙 1/3	중앙 1/3	중앙 1/2	기초내	중앙 1/3	중앙 1/2	중앙 1/2	
허용 응력	압축	$0.25f_{ck}$	30% 할증	$0.25f_{ck}$	30% 할증	$0.3f_{ck}$	$0.5f_{ck}$	$0.9f_{ck}$	$0.25f_{ck}$	30% 할증	$0.5f_{ck}$
	인장	$0.42\sqrt{f_{ck}}$		$0.42\sqrt{f_{ck}}$		0	$0.6f_{ck}^{\frac{2}{3}}$	$1.5f_{ck}^{\frac{2}{3}}$	$0.42\sqrt{f_{ck}}$		$0.6f_{ck}^{\frac{2}{3}}$

에 대한 안전율은 2단계와 달리 적용한다. 각 단계의 내진 안전성 평가가 완료되면 최종적으로 평가구조물의 내진 안전성 여부를 판단하게 되며 내진 안전성이 부족할 경우에는 보강 공법 및 적용범위를 선정하여 재평가를 실시하도록 한다.

현재 국내의 댐 내진설계 규정에서 정하고 있는 설계전도와 활동, 전도, 허용응력에 대한 안전율 규정이 표 2와 같이 일본에 비하여 중약진대에 속하지만 설계수평전도는 일본보다도 높은 수준을 요구하면서도 안전율은 일본과 동일한 기준을 적용하고 있다. 지진 발생시 제체에 작용되는 외력(지진력, 동수압)이 증대됨에도 불구하고 활동과 전도에 대해서는 정적인 기준과 동일한 기준을 적용하고 있고 허용응력의 범위도 일본과 같이 정적기준에서의 할증만을 고려한 안전율을 채택하고 있어 본 연구에서는 국내 설계수평전도와 유사한 미국의 기준에서 OBE수준의 안전율을 적용하여 검토하였다. 표 2는 각국의 콘크리트 중력식 댐에 대한 설계수평전도와 활동, 전도 및 허용응력에 대한 안전율과 본 연구에서 제안하는 안전율을 비교한 것이다.^{(6),(9),(11)}

4. 댐 내진 안전성 평가 해석

현재 국내에서 운영중인 콘크리트 중력식 댐을 선정하여 본 연구에서 제안하는 절차와 안전율 기준을 적용한 내진 안전성 평가 해석을 수행한 결과이다.

4.1 내진 등급 및 내진성능목표 설정

본 구조물의 내진등급 및 내진 성능목표 설정에 필요한 기본적인 제원은 표 3과 같다. 본 댐의 경우 총 위험계수(표 4 참조)의 합은 36으로 내진 특등급 구조물로 분류된다. 내진 등급 분류시 소개인구와 하류피해 정도는 댐의 근거리주거지역이 위치하고 있어 모두 높음으로 가정하였다.

지진구역도에서 본 댐은 전라북도에 위치하고 있으므로 지진구역 I에서의 구역계수(Z) 0.11g에 해당되며 내진안전성 평가는 붕괴방지 수준을 기본으로 하기 때문에 재현주기 2,400년(내진특등급, 붕괴방지수준)의 위험도계수 2.0, 지반계수(경암지반) 1.0을 선택하여 지진계수는 0.22g로 산정하였다.⁽¹²⁾

표 3 해석 댐의 기본 제원

구 분	제 원	비 고
형 식	콘크리트 중력식	
위 치	전라북도	
높이 · 길이	64 m / 344.2 m	
제체저면길이	53.312 m	
상시 만수위	60.4 m	
퇴 사 고	13.7 m	
저 수 량	$466 \times 10^6 \text{ m}^3$	
지 반 조 건	경암지반 (S_A)	
설계수평전도	0.05 g	

표 4 해석 댐의 위험계수 (내진특등급 : 31이상)

위험 인자	높음	중간	낮음	극히낮음
저수량(10^6 m^3) (위험계수)	120이상 (6)	120~1 (4)	1~0.1 (2)	0.1이하 (0)
높 이(m) (위험계수)	45이상 (6)	45~30 (4)	30~15 (2)	15이하 (0)
소개인구(인) (위험계수)	1000이상 (12)	1000~100 (8)	100~1 (4)	없음 (0)
하류 피해 (위험계수)	높음 (12)	중간 (8)	낮음 (4)	없음 (0)

4.2 1단계 평가

내진 성능 평가를 위한 기초자료를 기본으로 1단계 예비 평가를 실시한 후 내진 안전성 평가 2단계(간편해석) 실시 여부를 결정하는데 예비평가단계에서는 제 3.1절의 5가지 평가 항목에 대한 검토를 실시한다.

- 1) 본 댐은 지반 조건은 경암 (S_A) 이지만 높이 64m로 30m 이상이다.
- 2) 본 댐 주변 지역에 발생된 지진에 의한 손상은 발생하지 않았지만 사용연수가 30년 이상 경과되어 열화현상이 진행중이다.
- 3) 본 댐은 기본주기 (T_1)⁽¹⁰⁾는 다음의 식 (2)로 계산할 수 있으며 계산된 기본주기 (T_1)에 대한 스펙트럴 가속도가 그림 5의 표준 설계 응답스펙트럼⁽¹²⁾에서 0.225g로 0.125g이상이다.

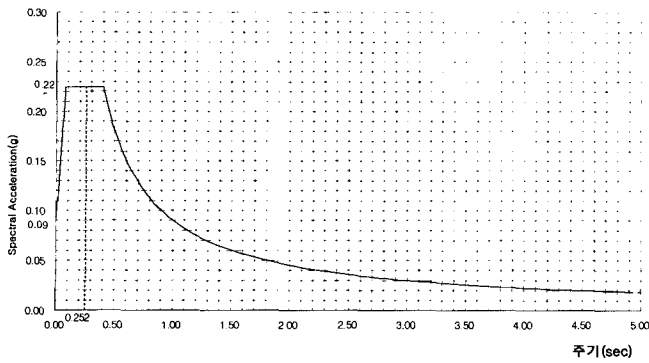


그림 5 표준설계응답스펙트럼(5% 한계감쇠비, 구역 I, 경암 S_A지반)

$$T_1 = 1.21 \times \frac{RH}{\sqrt{E_s}} = 1.21 \times \frac{1.815 \times 64}{\sqrt{1.25 \times 2.5 \times 10^5}} = 0.252 \quad (2)$$

여기서,

H : 댐의 최대 높이(64m)

R : 주기보정계수(1.47~2.16 : 1.815)

E_s : 콘크리트 동적탄성계수(정적탄성계수의 1.25배)

- 4) 본 댐의 공사지와 기존 안정도 평가 자료에서 댐 시설기준에 근거한 전도 및 활동에 대하여 정적 안전성을 모두 만족하고 있다.
- 5) 본 댐의 하류면 경사(S)는 0.833로써 하류면 경사가 0.8이상이다.

본 댐의 내진 안전성 1단계 예비평가 실시 결과에서 5가지 평가항목 중 3가지(1, 2, 및 3항목) 조건을 만족하지 못하므로 내진 성능 평가 2단계를 수행하도록 한다.

4.3 2단계 평가

내진 안전성 평가 2단계에서는 기존 문헌자료 및 현장 비파괴 시험(반발경도법, SASW법)을 통하여 얻은 자료를 기본으로 동적하중인 지진력은 진도법을 적용하여 수평진도 0.22g를 적용하였고 동수압에 대해서는 Westergaard의 근사해⁽⁷⁾를 적용한 유사정적해석을 수행하여 활동, 전도 및 허용응력에 대한 검토를 실시한다. 구조물의 허용응력 검토를 위해 유한요소해석 프로그램을 이용한 유사정적해석을 수행하였다.

해석 모델은 월류부 블록에서 1개의 블록을 선정하여 8절점 육면체 solid요소를 적용한 3차원 모델을 적용하였다. 댐의 제원은 표 3과 같고 제체와 기초부의 지반물성값은 표 5와 같다. 표 6은 기본삼각형 수평단면에서 댐시설기준에서 정한 상시만수위를 기준으로 하중조합 조건⁽¹¹⁾에 따른 작용하중을 산정하였다.

4.3.1 활동

콘크리트 중력식 댐의 활동에 대한 안정은 댐 제체와 기초의 접촉면에서의 전단마찰 안전율을 다음의 식 (3)으로 계산하고 안전율은 2.7이상으로 한다. 본 해석 댐의 경우 아래 계산 결과와 같이 활동에 대해 2.7이상의 안전율을 확보하고 있으므로 전단에 대해 안전하다.^{(9),(11)}

$$F_s = \frac{f \cdot \sum V + r \cdot S \cdot A}{\sum H} = \frac{0.7 \times 3437.380 + 250 \times 53.312}{3211.883} = 4.9 > 2.7 \quad (3)$$

여기서, f : 내부마찰계수(0.7)

r · S : 허용 전단 강도(250tonf/cm²)

A : 전단 저항 면적(m²)

위의 활동의 결과는 표 2의 현행기준 적용시에도 허용안전율(4.0)을 만족하는 것으로 나타났다.

표 5 해석 댐의 제체 및 지반물성값(2단계평가)

구 분		물성값
제 체 물성값 (콘크리트)	설계기준강도	170 kgf/cm ²
	탄성계수	2.30 × 10 ⁶ tonf/m ²
	단위중량	2.33 tonf/m ³
	포아송비	0.2
	감 쇠 비	5 %
지 반 물성값 (경암)	탄성계수	2.75 × 10 ⁶ tonf/m ²
	단위중량	2.65 tonf/m ³
	포아송비	0.333
	감 쇠 비	10 %
	지반반력계수	58,016.528(tonf/m)

표 6 해석 댐의 작용 하중 및 모멘트(기본삼각형 수평단면)

작용 하중	하중(tonf)	작용점(m)	모멘트(tonf · m)	비 고
자 중(V)	3,974.943	35.541(x)	141,274.764	콘크리트 단위중량(공사지) : 2.33 kgf/cm ³
정수압(H)	1,830.125	20.167(y)	36,907.521	상시만수위 : 60.4 m
퇴사압(H)	37.538	4.567(y)	171.424	토사 단위중량 : 1.80 kgf/cm ³ , 수평토압계수 : 0.5
양압력(V)	537.563	35.541(x)	19,105.694	상류단 : 상시만수위, 하류단 : 0.0 m
관성력(H)	874.487	21.333(y)	18,655.731	수평진도 : 0.22 g
동수압(H)	469.733	24.200(y)	11,367.539	수평진도 : 0.22 g, Westergaard 근사해
ΣH	3,211.883	ΣH · y	67,102.214	정수압, 퇴사압, 관성력, 동수압
ΣV	3,437.380	ΣV · x	122,169.070	자중, 양압력

4.3.2 전도

설계하중의 합력의 작용점은 기본삼각형의 수평단면의 중앙 1/2내에 있어야 한다. 편심거리는 다음의 식 (4)로 계산하는데 편심거리(e)는 10.64로서 편심허용길이(L/4)는 13.328m 이내에 존재하고 있어 전도에 대해 안정하다.^{(9),(11)}

$$e = \frac{L}{2} - \frac{\sum V \cdot x - \sum H \cdot y}{\sum V}$$

$$= 10.64 \text{ m} < \frac{L}{4} = 13.328 \text{ m} \quad (4)$$

여기서,

L : 제체저면길이(m)

$\sum V \cdot x$: 전도저항모멘트 합(tonf · m)

$\sum H \cdot y$: 전도모멘트 합(tonf · m)

앞의 전도의 결과는 표 2의 현행기준 적용시 편심허용길이(L/6)인 8.89m에는 만족하지 못한 결과를 나타내었다.

4.3.3 허용응력

2단계 평가에 따른 제체 발생응력의 결과는 표 7과 같고 그림 6과 7은 압축·인장응력의 분포도이다. 그림에서 최대 압축응력은 하류 배면부에서 발생하였으며 최대인장응력은 상류면에서 발생하였다. 수문이 위치한 피어부에서의 단면 변화부에 응력이 집중되는 경향을 보이고 있다. 2단계 평가에서는 제체에 발생된 응력과 콘크리트의 허용응력을 비교하기 위하여 현행 콘크리트 표준시방서 기준을 적용하였다. 콘크리트 댐에서는 정적하중 작용시 제체내 임의 지점에서 발생하는 압축응력은 4.0이상의 안전율을 가져야 하며 특히 지진력 작용시에는 콘크리트의 변형률 속도가 증가됨에 따라 압축응력도 증가하게 되므로 정적 표준허용응력의 30% 이내의 값을 증가시킨 값을 허용압축응력으로 한다. 본 댐의 허용압축 및 인장응력은 다음의 표 7과 같다. 허용 응력에 대한 검토결과 압축 및 인장응력이 모두 허용응력 기준을 만족하고 있다.⁽¹⁵⁾

내진 안전성 2단계 평가 결과 활동, 전도 및 허용응력 모두 허용 안전율기준에 만족하기 때문에 본 댐은 충분한 내진 안전성을 보유하고 있음을 알 수 있다. 실제적으로 2단계 평가기준을 모두 만족하면 3단계 평가는 수행하지 않아도 되지만 본 연구에서는 허용응력에 대한 3단계 평가도 실시하였다.

표 7 2단계 평가에 따른 제체 발생 응력 및 콘크리트 허용응력 기준

구 분	압축응력 (kgf/cm ²)	인장응력 (kgf/cm ²)	비 고
2단계 평가	19.20	4.90	표 3 참조
허용응력	정적하중	5.48	$f_{ck}=170 \text{ kgf/cm}^2$
	지진하중	7.12	정적기준의 30% 할증

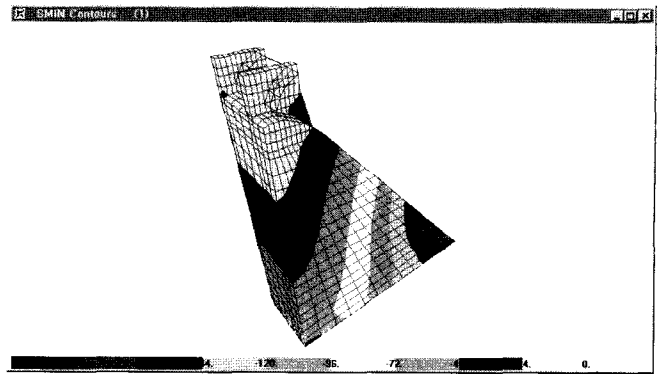


그림 6 제체의 압축응력분포(2단계 평가)

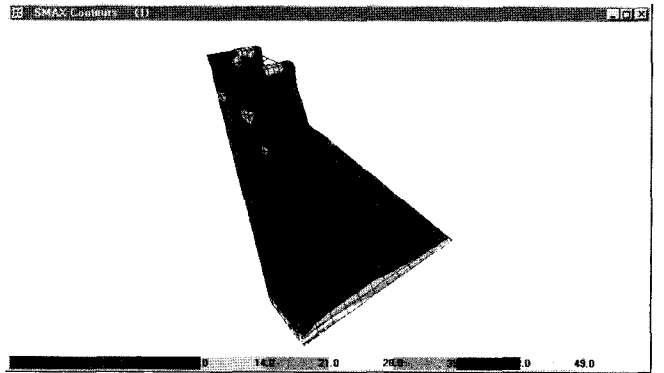


그림 7 제체의 인장응력분포(2단계 평가)

4.4 3단계 평가

내진 성능 평가 3단계에서는 기존의 유사정적해석법은 하중산정의 편리성, 해석의 간편성, 경제성 등에는 유리하지만 지진의 동적 특성을 제대로 고려할 수 없어 해석의 신뢰성이 떨어지는 단점을 가지고 있어 이를 보완하기 위하여 동적해석을 수행한다. 제체의 물성값은 1단계와 2단계 평가에서 적용한 자료와 달리 제체의 현상태를 평가할 수 있는 실내시험을 통한 보다 정확한 제체 물성값(표 8참조)을 근거로 하였고 지반에 대한 물성값도 실내 정밀시험을 통한 물성값을 적용해야 하지만 본 연구에서는 2단계 평가에 적용한 물성값과 동일한 값을 사용하여 기초지반의 강성을 고려한 탄성계수값을 산정하여 해석시에는 지반을 spring으로 대체하여 모델링 하였다. 동수압의 경우에는 그림 8과 같은 포물선 분포를 나타내는데 제체에서 유체와 접하고 있는 각 지점(절점)에 대한 유체의 질량을 계산하여 제체에 부가하여 제체와 같이 진동하는 것으로 해석을 수행하였다. 그림 8에서 A지점에서의 부가질량은 동수압의 분포에서 빗금친 부분에

표 8 해석 댐의 제체물성값(3단계평가)

구 분	물 성 값	
제 체 물성값 (콘크리트)	강도(실내시험)	300 kgf/cm ²
	탄 성 계 수	$2.89 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
	단 위 중 량	2.36 tonf/cm ³
	포 아 송 비	0.13
	감 쇠 비	5%

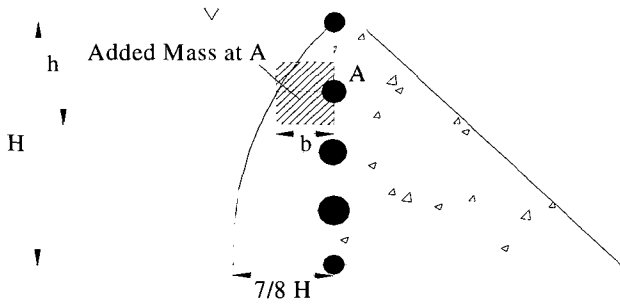


그림 8 부가질량(Added Mass), $b = 7/8\sqrt{H \cdot h}$

해당한다. 동적해석 방법에는 응답스펙트럼 해석과 시간이력해석법이 있는데 본 해석에서는 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석을 수행하기 위해서는 입력과형으로 실측된 파형이나 인공지진 파형을 사용하여 해석을 수행하는데 본 해석에서는 그림 9의 한국도로공사에서 작성한 KHC(Korea highway corporation) 인공지진파를 사용하였다. KHC 인공지진파는 토질조건에 있어서 암반 또는 경질의 토질층이며 지속시간은 24초이고 PGA(peak ground acceleration)는 0.22g이다. KHC 인공지진은 그림 10과 같이 지배주기가 1.75Hz이다.

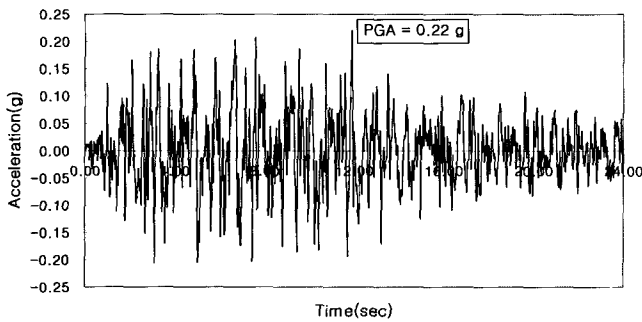


그림 9 KHC 인공지진파

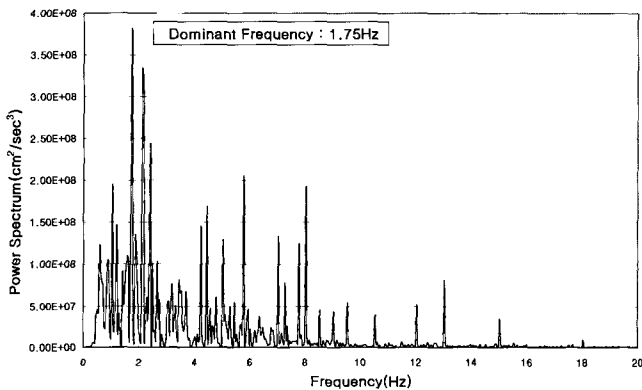


그림 10 KHC 인공지진의 가속도 스펙트럼

4.4.1 활동 및 전도

콘크리트 중력식 댐의 활동 및 전도에 대한 안정은 2단계 평가와 동일한 식 (3)과 (4)를 이용하고 작용하중 산정시에는 현장조사를 통한 자료를 이용하여 작용하중을 산정한다. 2단계 평가 결과에서 활동, 전도 및 허용응력에 대하여 제한 안전율을 모두 만족하였기 때문에 활동과 전도에 대한 3단계 평가는 하지 않고 허용응력에 대한 검토만을 실시하였다.

4.4.2 허용응력

3단계 평가에 따른 제체 발생응력의 결과는 표 9와 같고 그림 11과 12는 압축·인장응력의 분포도이다.

2단계 유사정적해석에 비하여 3단계 동해석결과 최대 압축응력과 인장응력이 각각 2배에서 3배 정도 증가되는 경향을 보이고 있으며 이는 기존의 유사정적해석보다는 저수의 부가 동수압을 부가질량(added mass)개념을 도입하고 실제 발생지진이나 인공지진파를 적용하여 지진력의 동적특성을 고려한 동적해석으로 인한 결과로 사료된다.

3단계 평가에서는 허용응력 검토를 위해 미국 공병대(U.S. army corps of engineers)의 콘크리트 댐 설계기준을 근거로 하여 국내 지진발생 빈도와 지진의 규모를 고려하여 미국의 OBE(operating basis earthquake)수준의 지진하중을 기준으로 허용응력 기준을 작성하였다. 일반적으로 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 10%를 표준으로 하는데 본 예제에서는 실내시험을 통한 콘크리트의 압축강도를 기준으로한 인장강도는 30kgf/cm²으로 표 9의 허용인장응력(27kgf/cm²)이 콘크리트의 인장응력은 허용하지 않는다. 제안 허용응력 기

표 9 3단계 평가에 따른 제체 발생 응력 및 콘크리트 허용응력 기준

구분	압축응력 (kg/cm ²)	인장응력 (kg/cm ²)	비고
3단계 평가	40.00	18.80	표 3 참조
허용응력	제안기준	150.00	26.90
	현행기준	55.25	7.12

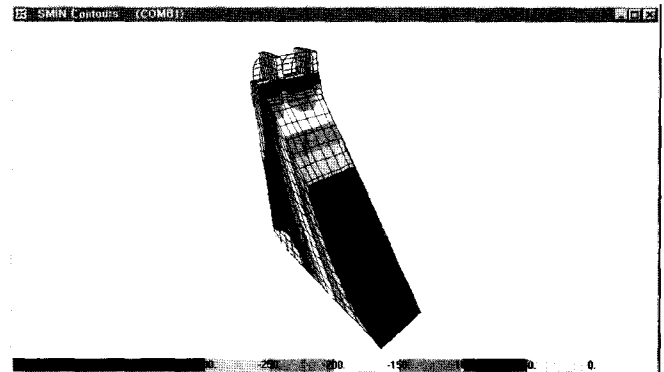


그림 11 제체의 압축응력분포(3단계평가)

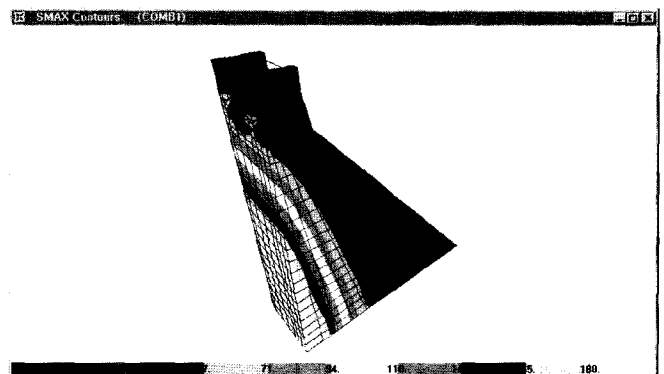


그림 12 제체의 인장응력분포(3단계평가)

준에 대한 검토결과 압축 및 인장응력이 모두 허용응력 기준을 만족하고 있으나 현행 기준에는 만족하지 못한 결과를 나타내었다.

5. 결론 및 향후 연구

- 1) 현재 국내 운영중인 콘크리트 중력식 댐에 대하여 본 연구에서 제안한 방법과 기준으로 내진 안전성 평가를 실시한 결과 제안한 안정기준에 부합하는 내진성능을 보유하고 있음을 알 수 있었으나 1개 댐에 대한 적용만으로 일반화가 어렵기 때문에 기존 댐에 대한 더 많은 적용 및 검토가 필요하다.
- 2) 기존 국내 댐시설기준에서는 정적하중에 대한 기준에 국한되어 있거나 정적기준에 대한 단순한 할증계수만을 적용하여 동적하중(지진하중)에 대한 기준을 고려하고 있어 구조물에 따라 요구되는 내진 성능 수준에 따른 안전성 평가를 수행에 어려움이 있다.
- 3) 유사정적해석과 동적해석(시간이력해석)을 수행한 결과 제체내 발생 응력이 압축응력은 2배 인장응력은 3배 정도의 차이를 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 기존의 유사정적해석보다는 저수의 부가 동수압을 부가질량개념을 도입하고 실제 발생지진이나 인공지진파를 적용하여 지진력의 동적특성을 고려한 동적해석이 보다 합리적이라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국지진공학회(과제번호 99-S17-01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. USCOLD, *Guidelines for Selecting Seismic Parameters for Dam Projects*, 1985.
2. 국립방재연구소, "내진설계 제도 및 기준에 관한 연구(II)", 보고서, 행정자치부, 1998.
3. 수자원공사 수자원연구소, "댐 내진 안정성에 관한 기초 연구", 보고서, 수자원공사, 1997.
4. 시설안전기술공단, 한국지진공학회, "기존시설물에 대한 내진성 평가기법 개발 연구보고서", 보고서, 건설교통부, 2000. 12.

5. 건설교통부, 한국건설기술연구원, "내진설계기준연구(I)", 보고서, 건설교통부, 1996.
6. 日本建設省 河川局, 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・設計編(I), 1997.
7. 日本建設省 土木研究所, 댐構造研究室, "コンクリートダムに作用する地震時動水壓に關する實驗的檢討", 報告書, 日本建設省, 1991.
8. 농지개발사업계획설계기준(콘크리트댐편), 농림수산부, 1989.
9. US Army Corps of Engineers, *Gravity Dam Design EM1110-2-2200*, 1995.
10. Canadian Electrical Association, *Safety Assessment of Existing Dams for Earthquake Conditions-Vol. C-4, Seismic Analysis of Concrete Dams*, CEA, 1990.
11. 댐 시설 기준, 건설교통부, 1993.
12. 건설교통부, 한국지진공학회, "내진설계기준연구(II)", 보고서, 건설교통부, 1997.
13. Chavez, J. W. and Fenves, G. L., "Earthquake analysis and response of concrete gravity dams including base sliding," *UCB/EERC-97/07*, 1993. 12.
14. Chopra, A. K., Corns, C. F., Schrader, E. K., and Tarbox, G. S., *Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation*, Van NOSTRAND REINHOLD.
15. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1999.
16. 국립방재연구소 "지진에 대비한 내진설계", 보고서, 행정자치부, 1998.
17. 소진호, 김용곤, 정영수, "콘크리트 중력식댐의 내진성능 평가에 관한 연구", 2000년도 가을학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제12권, 제2호, 2000, pp. 325-330.
18. Wolf, J. P., *Dynamics Soil-Structure Interaction*, Prentice-Hall Inc, 1985.
19. Wepf, D. H., Wolf, J. P., and Backmann, H., "Hydrodynamic-stiffness matrix based on boundary elements for time-domain dam-reservoir-soil analysis," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, 1988.
20. Kim, J. K., "Application of the Boundary Element Method to Elastic Wave Scattering Problems," Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 1990.
21. 양신추, 윤정방, "지반-구조물 상호 작용 해석을 위한 동적 무한 요소", 대한토목학회 논문집, 제11권, 제3호, 1999, pp. 47-58.
22. 이지호, "콘크리트 댐의 비선형 지진해석에서의 유한요소망 영향", 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 2001. 12.