

## 국내 저수지 댐의 내진 성능 평가

### Evaluation of Aseismic Performance for Reservoir Dams in Korea

박인준<sup>†</sup> · 김승욱\* · 장웅희\* · 김현태\* · 유찬호\*

Park, Innjoon<sup>†</sup> · Kim, Seungwook\* · Jang, Woonghee\* · Kim, Hyuntae\* · Yoo, Chanho\*

#### Abstract

Recently, lots of lives and properties have been lost because comparatively large magnitude earthquakes were occurred in relatively safe regions and nations. It has been reported that number of earthquakes was increased rapidly in Korea. Hence, recently civil constructions were ensured against risks about earthquake not only large-scale structures but also comparative small-scale structures such as reservoir dams and life line by systematic aseismic design. Therefore, in this study, the seismic stability was ensured to evaluate aseismic performance for major planned reservoir dams in Korea. The seismic response analyses were conducted using SHAKE program on new reservoir dams under short-period, long-period and artificial seismic wave. The liquefaction potential for reservoir dams was assessed by using results from seismic response analysis (simplified assessment method for liquefaction potential). Also, fully coupled analysis--interaction of pore-pressure and soil--was performed to investigate both the development of excess pore water pressure and the characteristic of dynamic shear strain.

**Keywords :** Aseismic Performance, Fully Coupled Numerical Analysis, Liquefaction, Reservoir Dams

#### 요 지

최근 지진에 대해서 상대적으로 안전하다고 생각되던 지역 및 나라에서 비교적 큰 규모의 지진이 발생하여 수많은 인명 및 재산피해를 발생시키고 있으며, 국내에서 발생하는 지진의 횡수도 급증하고 있는 것으로 보고되어지고 있다. 이러한 이유로 최근의 건설공사는 대형 구조물뿐만 아니라 비교적 규모가 작은 저수지 댐까지 체계적인 내진설계를 거쳐 지진에 대하여 안정성을 확보하도록 계획하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 신설되는 주요 저수지 댐에 대하여 지진에 대한 안정성 확보 여부를 확인하고자 내진성능 평가를 수행하였다. 신설되는 저수지 댐에 대하여 단주기파, 장주기 파 및 인공지진파로 SHAKE 프로그램을 이용한 지진응답해석을 시행하였으며, 그 결과를 활용해 저수지 댐의 지반 액상화에 대한 안정해석을 시행하였다(액상화 간편예측법). 또한 가능한 실제 지반의 거동과 유사하게 수치해석을 모사하기 위해서 간극수압-지반 상호작용을 고려하는 완전연계해석(Fully Coupled Analysis)을 수행하여 과잉간극수압변화와 지반 동적 변형특성을 검토하였다.

**주요어 :** 내진설계, 완전연계해석, 액상화, 저수지 댐

#### 1. 서 론

국내에서 발생하는 지진은 주로 천발지진으로, 지구 조력에 의한 판의 경계부가 아닌 판 내부의 축적된 탄

성변형에너지에 의한 지각변형이 주된 원인으로 알려져 있다. 판구조론으로 볼 때, 주로 판과 판의 경계에서는 지각운동이 활발하여 지진 발생이 많은 편이며, 그 규모도 큰 것으로 널리 알려져 있다. 일본의 경우에

<sup>†</sup> 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수(E-mail : geotech@hanseo.ac.kr)

\* 정회원, 한국농촌공사 농어촌연구원 연구원

는 유라시아 판과 태평양 판이 만나는 조산대가 위치하고 있어 지진활동에 직접적으로 영향을 받는 반면, 우리나라의 경우에는 조산대와 떨어져 유라시아 판 내부에 위치하고 있기 때문에 일본과는 달리 지진활동이 활발하지 않은 편이다. 이러한 이유로 우리나라는 지진활동에 크게 영향이 없다고 생각되어져 왔다. 그러나 최근 국외에서는 지진에 대해서 안전하다고 생각되던 곳에서 비교적 큰 규모의 지진이 발생하여 수많은 인명 및 재산피해를 발생시키고 있으며, 지난 몇 해동안의 지진기록을 살펴보면 국내에서 발생하는 지진도 다시 급증하고 있는 것으로 보고되어지고 있다. 16~17세기에 지진이 다소 활발했던 한반도는 18~19세기에는 정지기를 거쳤으나 1993년에 23회, 1994년에 25회, 1995년에 29회, 1996년에 39회 그리고 2001년 43회, 2002년에 49회의 지진이 발생하는 등 매년 급증하는 추세이다(기상청, 2005).

지진에 의해 동반되는 피해로는 쓰나미, 토석류, 댐 및 건물의 붕괴가 있으며, 이는 대형 재난으로 연결되게 된다. 특히 저수지 댐의 경우에는 지진으로 인하여 붕괴되거나, 지반의 액상화로 인하여 댐 제체에 급격한 변위를 유발시켜 붕괴되는 것이 단순히 저수지 댐 붕괴로 그치지 않고 홍수로 연결되게 되어 큰 인명 및 재산피해를 일으킬 수 있다.

이러한 이유로 최근의 건설공사는 대형 구조물뿐만 아니라 비교적 규모가 작은 저수지 댐까지 체계적인 내진설계를 거쳐 지진에 대하여 안정성을 확보하도록 계획하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내의 주요 저수지 댐에 대하여 지진에 대한 안정성 확보 여부를 확인하고자 내진성능 평가를 수행하였다. 신설되는 저수지 댐에 대하여 단주기파, 장주기파 및 인공 지진파를 이용하여 지진응답해석을 시행하여 액상화에 대한 안정해석을 시행하였으며, 유한차분수치해석을 이용한 내진해석을 수행하여 신설되는 저수지 댐에 대한 내진성능을 평가하였다.

## 2. 국내 지진발생 현황조사

### 2.1 개요

본 연구에서는 국내에서 신설되는 저수지 댐에 대하

여 내진성능을 평가하여, 각각 저수지 댐의 지진에 대한 안정성 확보여부를 평가하고자 하였다. 본 연구를 위하여 우선 국내의 지진발생 현황과 지진빈도를 알아보았으며, 1978년부터 2004년까지의 통계자료를 활용하여 국내 지진 현황을 알아보았다.

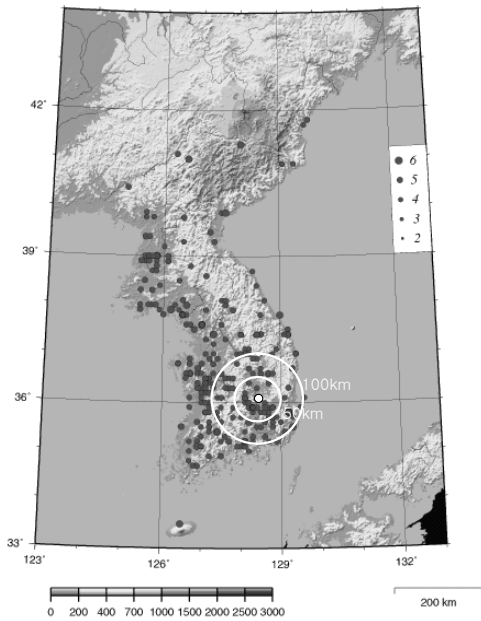
### 2.2 국내 지진발생 현황

세계적으로 연간 지진은 800,000회가 발생하지만 이 중에서 사람들이 느낄 수 있는 진도 3.5이상은 37,000회 정도, 건물 등에 상당한 피해를 입히는 규모인 진도 6.2이상은 100회 이상 발생하는 것으로 보고되고 있다. 국내에서 발생하는 지진은 1978년부터 2004년까지 27년간 진도 3.0이상의 지진은 모두 641회가 발생하여 년 평균 약 23회의 발생빈도를 보이며 이 중에 규모 3.0이상은 203회로 연평균 약 8회를 나타내고 있다. 지진활동을 규모별 기간별로 살펴보면, 1978년부터 1982년까지는 비교적 중규모 지진이 자주 발생하다가 1986년부터 1991년까지는 규모나 발생 횟수면에서 감소하는 경향을 보이며 1993년부터 지진 발생횟수가 다시 많아지고 규모도 강해지는 것으로 나타났다.

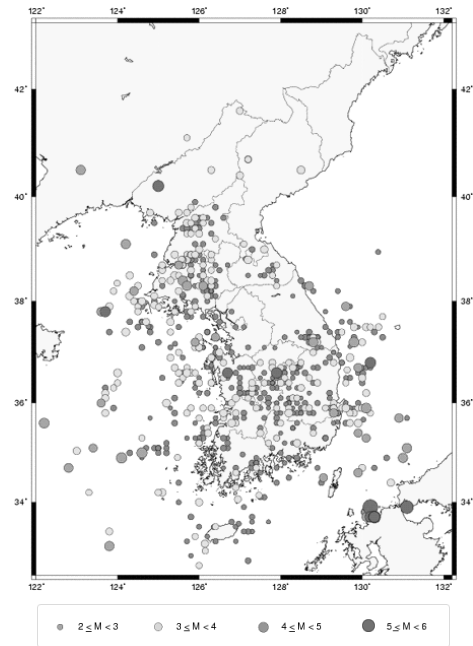
이와 같은 경향은 1990년대 이후 지진 관측망이 조밀해지고 장비의 성능도 우수해진 영향도 있겠으나 1999년부터 2003년까지 진도 3.0이상의 유감지진이 점차 증가하여 년 평균 발생횟수가 29회로 전반적으로 '90년대 이후로 지진발생 현황이 증가하는 추세를 보이고 있다. 국내의 지진관측은 기간이 외국에 비해 짧은 관계로 통계분석 자체가 특별한 의미가 없을 수 있으나, 국내에서 발생하는 지진은 점차 증가하고 있으며, 진도 5.0이상 규모의 지진도 발생할 가능성이 있음을 시사하고 있다.

### 2.3 지진발생 현황 및 빈도

한반도의 경우 지진자료는 크게 역사지진(2~1904년), 초기계기지진(1905~1977년) 및 최근 계기지진(1978년 이후)으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 국내의 주요 저수지 댐에 대하여 내진성능검토를 수행하기 위하여 국내에서 발생한 지진현황을 조사하였다. 조사 방법은 기존 지진 연구에서 이용 가능한 문헌자료를 토대로 역사지진(2~1898)과 최근 계기지진(1978~



(a) 역사지진(2~1904)



(b) 계기지진(1978~2004)

그림 1. 한반도에서 발생한 지진의 진앙분포도(기상청, 2005)

2004)으로 구분하고 진앙분포도를 나타내었으며 그 결과는 그림 1과 같다.

역사지진은 지진계가 설치되기 이전의 역사문헌 자료로부터 추정된 약 2,000년 동안의 지진으로 현재까지 밝혀진 역사 기록상의 유감지진은 약 1,843회에 달하여 한반도에서 사람들이 피부로 감지할 수 있을 정도의 지진이 적어도 매년 1회 또는 2회 이상 발생하였다. 그림 1은 우리나라 역사지진에 대하여 지진 정도와 진앙위치를 확인한 결과, 진도 5이상의 지진이 약 400회 발생하고 인명 및 재산피해를 수반한 진도 7이상의 지진은 약 45회 이상 발생하였다.

### 3. 국내 저수지 댐의 내진성능 평가

#### 3.1 내진성능 평가목적

최근 국내에서의 지진발생 빈도가 증가함에 따라 내진에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이와 더불어 주변 국가의 심각한 지진 피해 사례를 계기로 시공 중이거나 시공 예정인 시설물에 대해서는 내진 설계가 이루어지고 있다. 특히 기존의 여러 시설물 중에서도 댐의 경우에는 지진에 의한 파괴가 발생할 경우 단순히 구조물의 파괴에 그치는 것이 아니라 하류지역에서의 인

명 및 재산상의 심각한 피해를 유발하게 된다. 따라서 본 연구 내진성능 평가에서는 신설되는 댐 시설물에 대하여 여러 가지 내진성능 평가기법을 적용하여 지진에 대한 안정성을 확보할 수 있도록 하고, 아울러 원지반에 대한 액상화 검토를 통하여 구조물 및 지반 전체의 내진안정성을 확보하는데 목적이 있다.

#### 3.2 내진성능 평가내용

본 내진성능 평가는 댐 체제 및 기초지반에서 수행된 현장 및 실내시험 결과를 토대로 다음과 같은 내용에 대하여 진행하도록 하였다.

- 지반조사 자료를 이용하여 댐 기초지반에 대한 개략적인 안정성 평가
- 현장 및 실내시험 결과를 토대로 한 지진응답해석
- 유사정적 해석결과 및 액상화 평가결과를 바탕으로 가장 불리한 댐에 대하여 수압-지반 완전연계 해석(Fully Coupled Analysis)을 이용한 정밀 동적해석

#### 3.3 내진성능 평가절차

본 연구에서는 국내 저수지 댐의 내진성능 평가에서 지반조사 결과 및 내진설계 기준 고찰을 토대로 대상

댐에 대한 효율적인 내진 안정성 검토를 수행하였다. 본 연구에서 수행된 내진 성능 평가 흐름도는 그림 2와 같으며, 내진성능 평가는 2차원 유한차분해석에 바탕을 둔 동적해석법을 사용하였다. 본 연구에서는 내진성능평가와 관련하여 우선 SIMQKE 프로그램 및 SHAKE 프로그램을 이용하여 인공지진파 생성 후, 지진응답해석을 수행하여 지반의 액상화에 대한 내진 안정성 확보여부를 평가하였으며, 아울러 FLAC 프로그램을 이용하여 저수지 댐 및 기초지반에 대한 내진해석을 수행하였다. 실내시험으로는 지반의 전단탄성계수와 감쇠비를 얻을 수 있는 공진주 시험을 수행하여

내진성능평가에 기초자료로 활용하였다.

### 3.4 내진성능 평가대상

본 연구에서는 국내에서 계획되고 있는 신설 저수지 11개소의 저수지를 대상으로 하여 액상화 및 지진에 대한 내진성능을 평가하였으며, 수행된 내진성능 평가대상 저수지의 형식 및 특성은 표 1에 요약 및 정리하였다.

## 4. 국내 저수지 댐의 내진해석 및 안정성평가 결과

### 4.1 공진주시험

#### 4.1.1 개요

지반이 동적인 하중을 받을 때, 저변형률 상태의 동적 물성치를 획득하기 위해서 일반적으로 공진주 시험을 실시한다. 공진주 시험은 전단변형률의 크기에 따른 지반의 동적 물성치(전단탄성계수, 감쇠비 등)의 변화를 측정하는 시험으로, 전단변형률은 시료 전체에 걸쳐 일정하지 않은 점을 고려하여, 공시체의 상부 중앙에서 반지름의 0.8배 되는 지점에서 결정하였으며, 감쇠비는 자유진동 감쇠곡선(Free Vibration Decay Curve), 또는 진동수반응곡선(Frequency Response

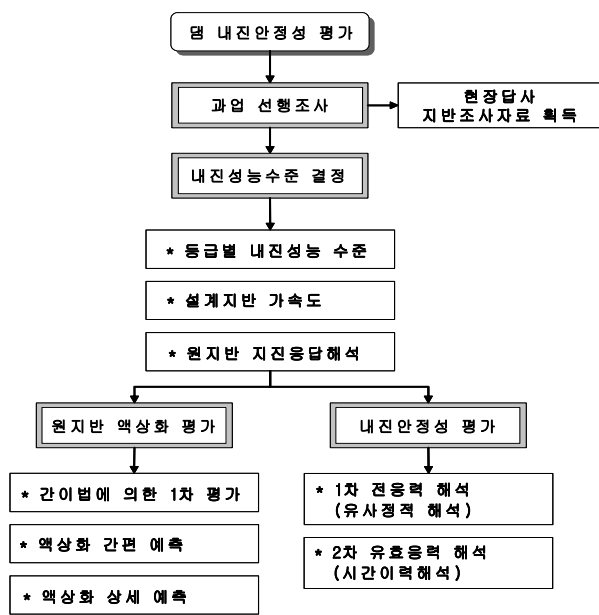


그림 2. 내진성능 평가 흐름도

표 1. 내진성능 평가대상 저수지 특성

지구	저수지	제 당			저수지 유역			저수지 하류유역		
		형식	높이 (m)	길이 (m)	유역 면적 (ha)	만수 면적 (ha)	주하천 연장 (km)	하천명	유역 면적 (km <sup>2</sup> )	하천 연장 (km)
송강	송강	필댐	43.0	291.0	440	10.0	2.0	송강천	40.85	9.00
천태	천태	"	15.0	108.0	881	35.5	3.8	행정천	126.63	10.00
석동	석동	"	27.6	174.0	323	10.0	3.5	보석천	12.08	5.50
동화	동화	"	70.6	474.0	5,880	127.0	16.4	백운천	1.78	1.60
	용립	"	59.9	260.0	1,520	45.0	6.8	용립천	17.90	12.20
	마곡	"	37.5	380.0	340	11.0	2.2	수지천	22.60	7.70
월정	운북	"	37.0	205.0	299	16.0	-	치천	-	-
성주	성주	"	60.0	430.0	14,960	205.0	26.3	대가천	236.95	30.90
우각	우각	"	46.3	286.0	1,600	43.4	5.6	곡강천	-	-
기계	은천	Con'c	17.0	224.0	5,303	45.2	1.6	기계천	134.29	19.20
돈담	돈담	필댐	26.5	210.0	167	14.2	12.7	옥계천	82.20	9.50

Curve)을 이용하여 결정하였다. 본 연구에서는 평가 대상 저수지 체체의 정확한 동적특성 반응을 위하여 각각의 저수지 체체에서 교란시료를 채취하여 시험실에서 현장에서 시공한 다짐도에 맞게 재성형한 후, 공진주 시험을 수행하였다. 공진주 시험은 압축공기를 사용하여 등방의 구속응력을 재하하는 방법으로 진행하였으며, 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 구하였다. 공진주시험은 배수상태로 수행하였으며, 다양한 구속응력에 대한 변형특성(전단탄성계수, 감쇠비)을 측정하기 위하여 현장지반의 평균유효응력을 기준으로 1/2배, 1배, 2배의 구속응력에서 시험을 진행하였다.

#### 4.1.2 시험결과

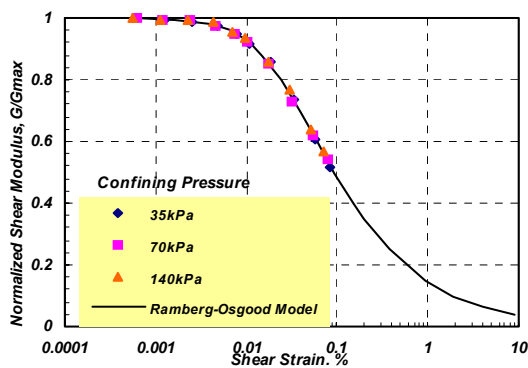
본 연구에서는 공진주시험으로 각각의 저수지 지반의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 증가곡선을 결정하였으며 그 결과를 지진응답해석에 반영하였다. 공진주 시험은 구속압을 저수지 시료조건에 따라

서 다양하게 바꾸어 가면서 수행하였으며,  $G_{max}$ 의 크기는 저수지 위치에 따라 다양하게 28.763~87.078 MPa의 범위를 갖는 것으로 평가되었다. 대표적인 공진주 시험결과는 그림 3에 나타내었다.

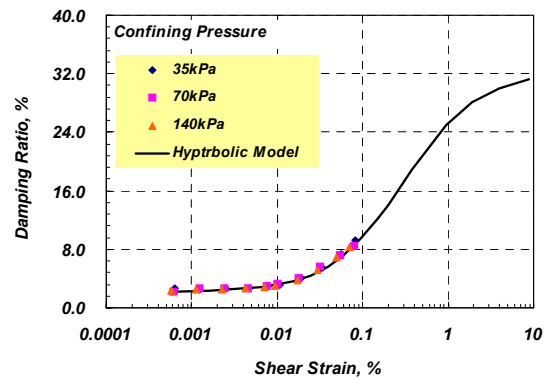
### 4.2 액상화간편예측

#### 4.2.1 개요

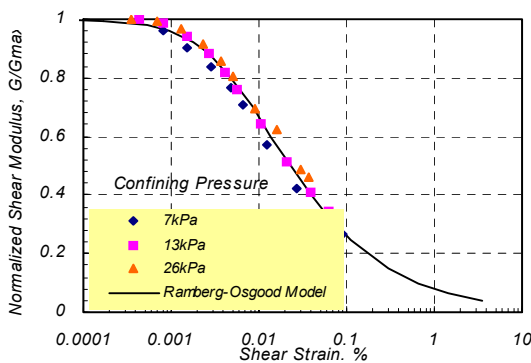
본 연구에서는 평가대상 저수지의 체체 및 기초지반이 액상화에 대한 안정성 확보여부를 평가하기 위하여 현장조사 및 시험과 간편 실내시험을 통하여 획득한 물성을 이용하여 지진응답해석 및 액상화 간편예측을 수행하였다. 액상화 간편예측은 각각의 저수지 인근에서 채취된 시료를 이용하여 공진주시험을 시행한 후 지반의 전단탄성계수와 감쇠비 곡선을 획득한 후, 이를 액상화 간편 예측에 반영하였다. 각각 저수지 인근 지반의 동적 특성을 산정한 후에 SHAKE 프로그램을 이용하여 지진응답해석을 수행한 후, 그 결과를 토대



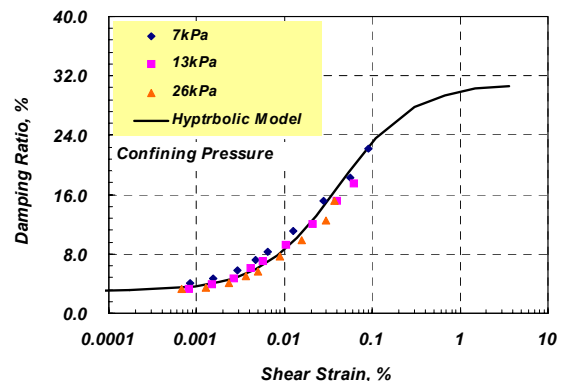
(a) 공진주시험결과 정규화 전단탄성계수 감소곡선(동화댐)



(b) 공진주시험결과 감쇠비 증가곡선(동화댐)



(c) 공진주시험결과 정규화 전단탄성계수 감소곡선(은천저수지)



(d) 공진주시험결과 감쇠비 증가곡선(은천저수지)

그림 3. 공진주 시험결과 예

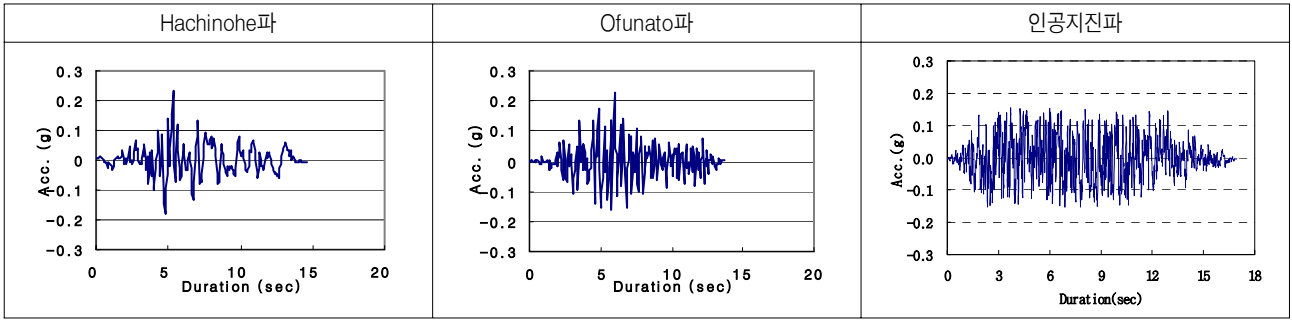


그림 4. 입력 지진파

로 각각 저수지의 액상화 간편 예측을 수행하였다.

액상화 간편예측에서는 보다 다양한 분석을 위하여 Tokachi-oki(1968)와 Miyagi-ken-oki(1978) 지진 발생시 조사된 대표적 단주기, 장주기파인 Hachinohe 파와 Ofunato파 이외에도 인공지진파를 이용하여 지진응답해석을 수행하였으며, 해석을 위한 인공지진파는 SIMQKE 프로그램을 이용하여 지진등급에 맞게 작성하고 설계스펙트럼 부합여부를 확인한 후 최종적으로 결정하였다. 지진응답해석에 적용된 지진파는 그림 4에 나타내었다.

지진응답해석에서 필요한 각각의 저수지 댐 지진등급은 저수지 댐의 규모 및 지진시 피해정도를 고려하여 모두 내진 1등급 붕괴방지수준으로 결정하였으며, 설계 지진계수는 지역적인 특성을 고려한 재해도를 이용하여 0.140g~0.154g로 결정하였으며, 이 값을 토대로 지진응답해석을 수행하였다.

#### 4.2.2 액상화 간편예측 방법

액상화에 대한 간편해석으로는 표준관입시험 결과를 이용한 방법, 콘 관입 저항치를 이용하는 방법 및 Euro Code에서 처음 채용하고 현재 계속 연구 진행 중인 전단파 속도를 이용한 방법 등 크게 세 가지가 있으나, 본 연구에서는 대부분의 나라에서 주로 채용하고 있는 표준관입시험을 통한 액상화 간편예측을 수행하였다. 실무에서는 액상화 평가를 위하여 Seed와 Idriss(1971)의 평가법을 주로 사용하고 있는 실정이다.

본 연구의 표준관입시험을 이용한 액상화 간편예측은 국내 지반 조건에 맞게 수정한 수정 Seed & Idriss의 방법을 이용하여 수행하였다. Seed & Idriss의 방법은 많은 지진기록과 피해사례에 대한 분석을 통하여 액상화 진동저항응력비와 지진에 의한 전단응력의 산

정 방법을 제시하여 액상화에 대한 안전율을 산정할 수 있도록 한 경험적인 이론이다.

표준관입시험을 이용하여 액상화 간편예측을 수행하는 방법은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- ① 액상화에 대한 안전율은 지진시 발생하는 지반내 한 점의 진동전단응력비( $\tau_d/\sigma'_v$ ; Cyclic Stress Ratio(CSR))와 액상화에 저항하려는 액상화 진동저항응력비( $\tau_\ell/\sigma'_v$ ; Cyclic Resistance Ratio(CRR))를 비교하여 산정한다.
- ② 지진력을 표현한 진동전단응력비( $\tau_d/\sigma'_v$ )는 다음과 같이 산정한다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \quad (1)$$

여기서,  $a_{max}$  : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 최대 가속도(지진응답해석 결과)

$g$  : 중력가속도

$\sigma_v$  : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 상재압

$\sigma'_v$  : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 유효 상재압

$\tau_d$  : 지반의 진동전단응력

$\tau_\ell$  : 지반의 액상화 전단응력

- ③ 액상화 진동저항응력비( $\tau_\ell/\sigma'_v$ ) 산정시에는 표준 관입시험(SPT) 결과인 N값을 이용하며 산정방법은 다음과 같다.

i) 유효상재압을 이용하여 보정계수를 산정한다(Liao and Whitman, 1986).

$$C_N = \left(\frac{10}{\sigma'_v}\right)^{0.5} \quad (2)$$

여기서,  $C_N$  : 보정계수

ii) 보정계수를 이용하여 표준관입저항치를 보정한 환산  $N$ 을 식 다음과 같이 산정한다.

$$N_1 = NC_N \quad (3)$$

여기서,  $N$  : 표준관입시험(SPT) 결과,  $N_1$  : 환산 $N$  값

iii) 산정된 환산  $N$  값으로부터 지진규모 6.5 기준의 자료를 이용하여 액상화 진동저항응력비를 산정한다.

iv) 지반의 액상화 진동저항응력비와 지진시 발생하는 진동전단응력비의 비교를 통해 다음 식과 같이 안전율을 산정하여 액상화를 평가한다.

$$F = \frac{\tau_e/\sigma'_v}{\tau_d/\sigma'_v} = \frac{\text{액상화 진동저항응력비 (CRR)}}{\text{진동전단응력비 (CSR)}} \quad (4)$$

본 연구에서는 상기된 액상화 간편예측 방법을 이용하여 평가대상 저수지에 대해서 액상화 간편예측을 수행하였으며, 보다 상세한 액상화 예측을 위하여 지반-간극수압의 상호작용을 동시에 고려할 수 있는 수치해석으로 지반 액상화에 대한 예측이 수행되었다.

### 4.2.3 액상화 간편예측 결과

각각의 저수지에 대해서 SHAKE 프로그램을 이용한 지진응답해석결과, 지진응답해석에 의한 지반의 수

평가속도를 각각의 저수지 별로 나타내면 다음 그림 5와 같다. 그림 5의 결과를 살펴보면, 지진응답해석 후 hachinohe 파에 의한 수평가속도는 0.112~0.16g 정도로 평가되었으며, ofunato 파에 의한 수평가속도는 0.111~0.15g 정도로, 또 인공지진파에 의한 수평가속도는 0.153g~0.217g 정도로 평가되었다. 인공지진파를 적용한 경우가 수평가속도의 증폭이 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 설계지진계수와 비교할 때, 1.6%~ 40.9% 정도 증폭되는 것으로 평가되었다. 특히, 운북저수지의 수평가속도가 0.217g로 제일 크게 증폭되는 것으로 평가되었다.

평가대상 저수지의 체체 및 기초지반이 액상화에 대한 안정성 확보여부를 평가하기 위하여 액상화 간편예측을 수행하였으며, 이때에는 지진응답해석에 의해 증폭된 수평가속도를 이용하였다. 액상화 간편예측은 식 4를 이용하였으며, 그 결과는 그림 6에 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 모든 저수지의 안전율이 액상화 간편예측 최소기준안전율인 1.5를 상회하는 상태로 액상화에 대한 안정성을 확보하고 있는 상태로 평가되었다.

## 4.3 내진해석

### 4.3.1 개요

포화된 지반에 지진과 같은 급속한 하중이 가해지면 지반은 비배수 거동을 하게 되며, 이때 변위 및 응력은 과잉간극수압에 의해 많은 영향을 받게 된다. 따라서 실제와 유사하게 수치해석을 모사하기 위해서는 간극

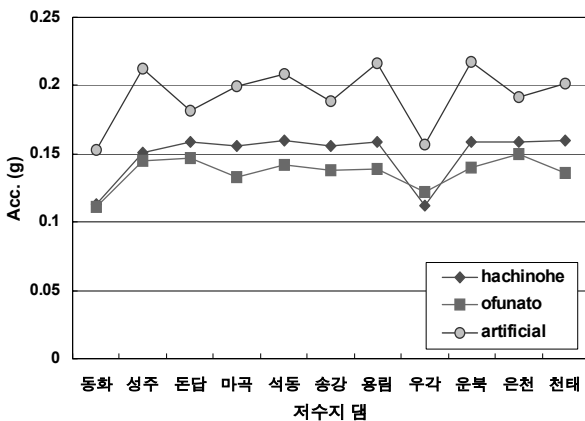


그림 5. 지진응답해석 결과에 의한 최대지반가속도

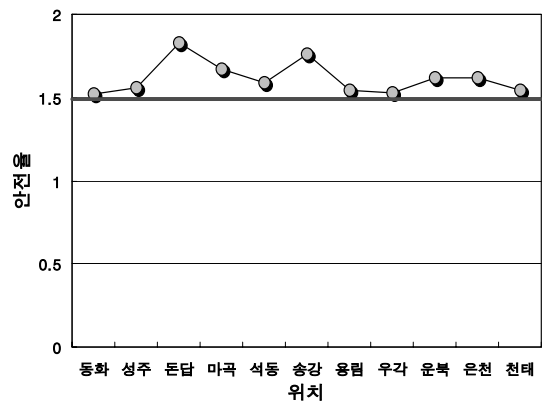


그림 6. 평가대상 저수지의 액상화 안전율

수압-지반 상호작용을 고려하는 완전연계해석(Fully Coupled Analysis)을 수행하여 과잉간극수압 증가와 변형을 검토하여야 한다. 본 연구에서는 평가대상 저수지 모두에 대하여 범용 유한차분해석 프로그램인 FLAC 2D Ver 4.0을 이용하여 완전연계해석을 수행함으로써, 평가대상 저수지에 대해 내진해석을 수행하였다.

FLAC은 보, 케이블, 말뚝 요소 그리고 셀 요소로 구조물을 모형화할 수 있으며 Modified Cam-Clay 모델, Bilinear strain-hardening 및 softening 모델 등과 같은 기존의 구성모델뿐 아니라 FISH Function을 이용하여 사용자가 새로운 모형을 도입할 수 있도록 되어 있다. 특히 유한요소해석 프로그램과 달리 구조물계 전체에 대한 강성도 역행렬을 구성하지 않으므로, 댐과 같은 대단면 모델에 대하여 효율적인 해석이 가능하다. 또한 간극수압-지반 완전연계해석이 가능하므로 댐 체체내 침투에서부터 지진하중에 대한 응답 거동 해석까지의 일련의 과정에 대한 순차해석이 이루어지게 된다.

본 연구 내진해석은 평가대상 저수지에 대해 정해석을 수행한 이후, 지진하중을 작용시키는 동해석을 수행하였다. 지반 및 저수지 댐에 대한 지반적용모델은 정해석시 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 사용하였으며, 동해석 시에는 유효응력 해석으로 과잉간극수압의 누적변화를 계산할 수 있는 Finn Model을 적용하였다(Martin 등, 1975). 동해석에서는 지진에 의한 저수지 체체의 변형특성뿐만 아니라 과잉간극수압의 변화를 이용하여 저수지 댐 및 기초지반의 액상화 발생여부를 함께 평가하였다.

### 4.3.2 해석조건

평가대상 저수지의 내진해석에서는 경계조건의 영

향을 최소화하기 위하여 저수지 댐을 중심으로 충분한 해석 영역을 두었다. 경계조건은 정해석시에는 격자요소망 좌, 우 및 바닥을 고정경계로 두었으나, 내진해석에서는 지진에 의한 하중이 고정경계에서 반사되어 지반으로 작용되는 것을 방지하기 위하여 흡수경계로 바꾸어 내진해석을 수행하였다. 해석에 이용된 지층별 강도정수 등은 기본적으로 공진주시험결과와 실내시험 결과를 활용하였으며, 본 연구에서 수행된 특정 댐의 내진 해석조건은 표 2에 요약, 정리하였다.

해석에 입력된 지진파는 장, 단주기 특성을 모두 반영하여 생성한 인공지진파이며, 간극수압이력은 체체 좌측을 중심으로 분포하고 있는 풍화토층 및 모래층에서 파악하였다. 내진해석에서 지진파를 입력할 때에는 인공지진파 자체를 그대로 기반암에 하중으로 재하하는 것이 아니라, 반드시 지진응답해석을 통하여 역산된(De-convolution) 가속도 시간이력을 입력하여야 하기 때문에 본 연구에서는 역산된 입력지진파를 기반암에 작용시켰다. 내진해석에서 입력된 대표적인 지진파는 그림 4에 나타난 인공지진파를 이용하였다.

수치해석에서는 원지반 응력특성을 그대로 반영하기 위하여 원지반 초기화, 흐름경계 적용 후 정상침투(Steady-State Flow)해석에 의하여 Phreatic Line 및 간극수압 분포를 결정하였다. 또한 지진동 재하 후 간극수압-지반 완전상호 연계해석(Fully Coupled Analysis)을 수행하였으며, 저수지 댐 코어부의 투수계수를 점토의 투수계수인  $1.0 \times 10^{-14} (m/s)$  이하로 낮게 적용하고 하류측 지표의 간극수압은 없으므로 경계조건을 “간극수압=0”으로 고정시킨 후 정상 침투해석을 수행하였다.

수치해석에 적용된 모델의 격자요소망 및 흐름경계 조건은 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

표 2. 내진해석 조건

해석 조건		비 고
사용 프로그램		FLAC-2D Ver 4.0
해석영역	2D : 동화댐	수평영역 175.0m, 수직영역 46.5m
경계조건	정해석	좌우 및 바닥 고정경계 (Fixed Boundary)
	동해석	흡수경계(Quiet Boundary)
하중조건		인공지진파를 기반암에 작용



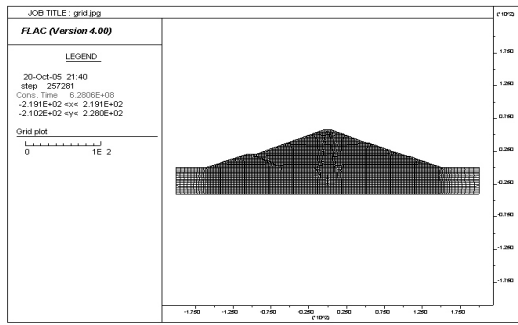


그림 7. 내진해석에 이용된 격자요소망(동화댐)

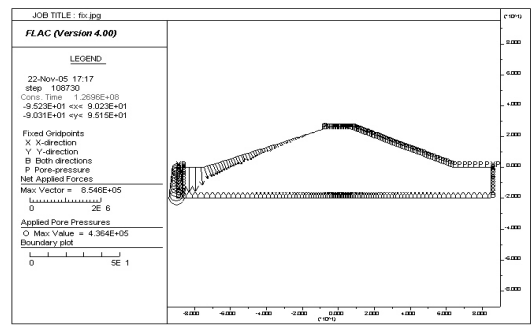


그림 8. 흐름경계 조건(동화댐)

### 4.3.3 해석결과

평가대상 저수지에 지진동 재하 후, 간극수압-지반 완전상호 연계해석(Fully Coupled Analysis)을 수행한 저수지의 간극수압 분포 결과는 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 내용을 살펴보면, 저수지 제체에는 큰 간극수압이 작용하지 않는 것으로 평가되었으나, 기초지반의 경우에는 간극수압의 크기가  $-1,000\text{kPa}$ 에서부터  $20,000\text{kPa}$ 까지 지반 구성상태에 따라서 간극수압이 매우 다양하게 분포하는 것으로 평가되었다.

Finn Model(FLAC 2D manual) 적용시 간극수압 시간이력을 파악한 결과 대부분 구간의 제체 좌측부에

서 시간에 따른 간극수압의 증가가 상대적으로 크게 나타났고, 모든 저수지 댐에서 지진동 재하 후 발생한 과잉간극수압은  $9.81\text{kPa}$  미만으로 작게 나타났다.

아울러 본 연구 내진해석에서는 지진하중이 작용하는 동안 저수지 댐의 변형특성을 분석하였으며, 유효 응력해석으로 지반의 액상화를 평가하였다. 지반의 액상화 평가는 과잉간극수압비가 1이 되는 시점으로 결정하였으며, 과잉간극수압비는 지반의 유효구속압에 대한 지진으로 발생한 최대과잉간극수압의 비로 결정하였다.

내진해석을 통해 얻어진 저수지 댐의 변형특성과 각각의 저수지에 대한 과잉간극수압비는 그림 10 및 그림

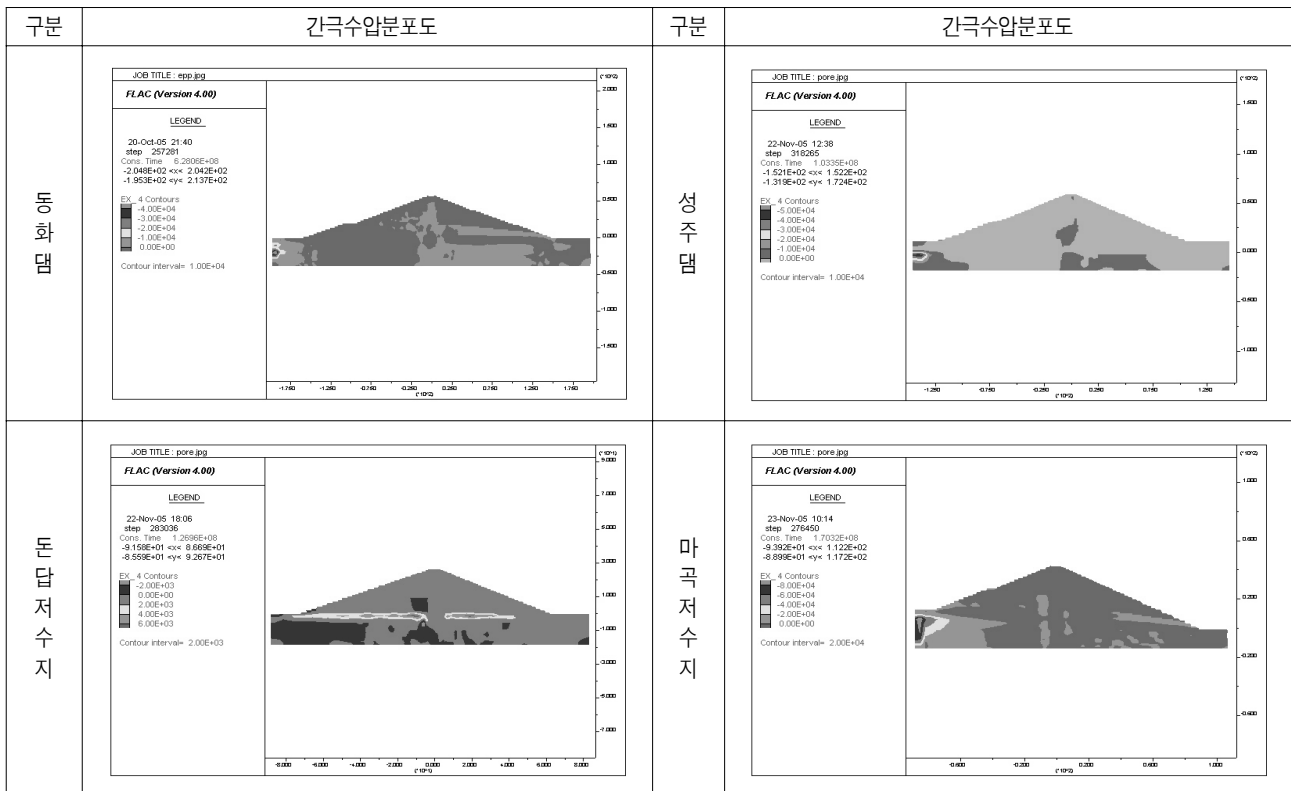


그림 9. 저수지 댐 별 간극수압분포도

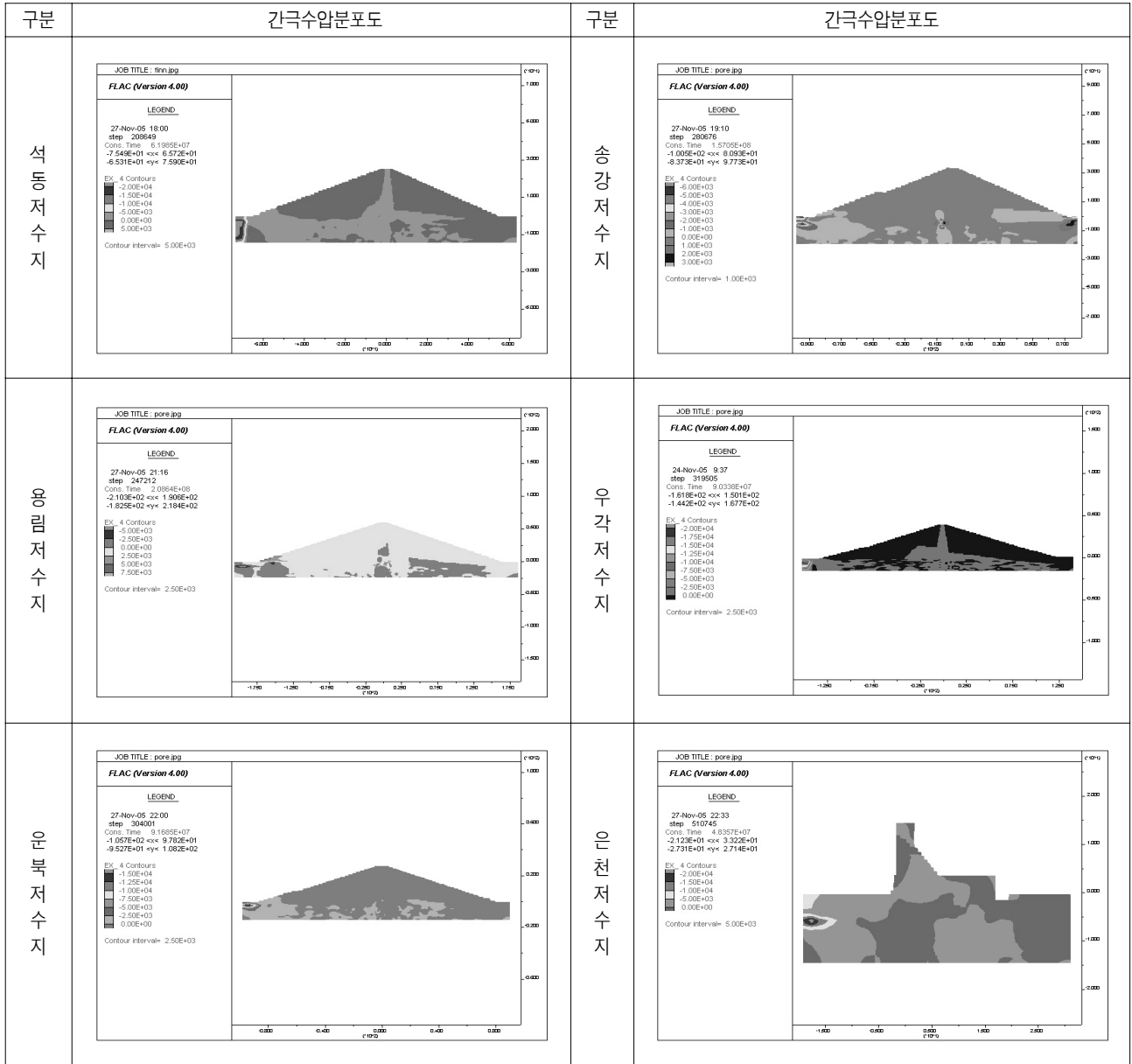


그림 9. 저수지 댐 별 간극수압분포도 (계속)

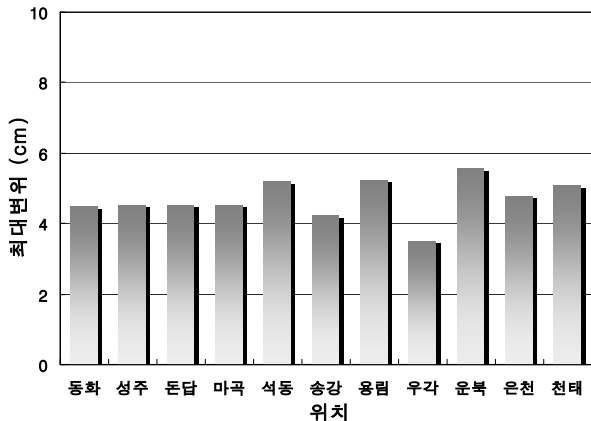


그림 10. 평가대상 저수지의 최대변위

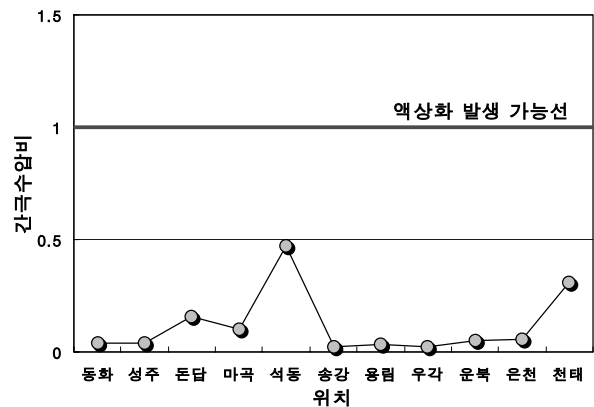


그림 11. 평가대상 저수지의 간극수압비

11에 나타내었다. 그림 10의 내용을 살펴보면, 평가대상 저수지 댐은 지진하중 작용시 3.52cm~5.57cm의 변위가 발생하는 것으로 평가되었으며, 특히 지진응답 해석시 지반증폭이 크게 나타난 운북 저수지가 5.57cm의 비교적 큰 변위를 보이는 것으로 평가되었다. 그러나 호안 안벽구조물의 지진시 허용변위량이 30cm 임을 감안할 때, 이는 비교적 작은 변위로 판단되며 평가대상 저수지는 지진시 허용변위에 대해서는 소정의 안정성을 확보하고 있는 상태로 판단된다. 그림 11의 과잉간극수압비의 결과를 살펴보면, 평가대상 저수지는 0.022~0.47 범위의 과잉간극수압비를 갖는 것으로 평가되어, 액상화가 발생할 수 있는 과잉간극수압비 1에 미치지 못해 본 평가대상 저수지 댐 모두는 지반 액상화에 대해서 소정의 안정성을 확보하고 있는 상태로 평가되었다. 과잉간극수압비는 석동 저수지가 0.47로 가장 크게 나타났으며, 지반의 증폭과 변위가 크게 나타난 운북저수지는 과잉간극수압비가 0.052정도로 비교적 작게 평가되었다. 수치해석 결과, 과잉간극수압의 분포가 재료가 유사한 저수지 체체에서는 큰 차이가 없고 기초지반에서 과잉간극수압의 분포가 매우 다양하게 분포하는 것으로 보아, 지반의 액상화는 지진수평가속도도 중요한 변수이지만 댐 기초 및 체체 지반의 구성상태가 더 큰 영향을 미치는 변수임이 확인되었다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내의 주요 저수지 댐에 대하여 지진에 대한 안정성 확보 여부를 확인하고자 내진성능 평가를 수행하였다. 신설되는 저수지 댐 11개소에 대하여 단주기파, 장주기파 및 인공지진파를 이용하여 지진응답해석을 시행하여 액상화에 대한 안정해석을 시행하였으며, 유한차분수치해석을 이용한 내진해석을 수행하여 신설되는 저수지 댐에 대한 내진성능을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

(1) 지진응답해석 결과, 수평가속도는 0.153g~0.217g 정도로 평가되었으며 이는 설계지진계수와 비교할 때, 1.6%~40.9% 정도 증폭되는 것으로 평가

되었다. 특히, 운북 저수지의 수평가속도가 0.217g로 제일 크게 증폭되는 것으로 평가되었다.

(2) 평가대상 저수지의 체체 및 기초지반이 액상화에 대한 안정성 확보여부를 평가하기 위하여 액상화 간편예측을 수행한 결과, 모든 저수지의 액상화 안전율이 액상화 간편예측 최소기준안전율인 1.5를 상회하는 상태로 평가대상 저수지 댐 모두는 액상화에 대한 안정성을 확보하고 있는 상태로 평가되었다.

(3) Finn & Byrne Model(1991) 적용한 내진해석 결과, 모든 구간의 체체 좌측부에서 시간에 따른 간극수압의 증가가 상대적으로 크게 나타났고, 모든 저수지 댐에서 지진동 재하 후 발생한 과잉간극수압은 9.81kPa 미만으로 작게 나타났다.

(4) 내진해석결과, 평가대상 저수지 댐은 지진하중 작용시 3.52cm~5.57cm의 변위가 발생하는 것으로 평가되었으며, 특히 지진응답해석시 지반증폭이 크게 나타난 운북 저수지가 5.57cm의 비교적 큰 변위를 보이는 것으로 평가되었다. 그러나 호안 안벽구조물의 지진시 허용변위량이 30cm 임을 감안할 때, 이는 비교적 작은 변위로 판단되며 평가대상 저수지는 지진시 허용변위에 대해서는 소정의 안정성을 확보하고 있는 상태로 판단된다.

(5) 과잉간극수압비의 결과를 살펴보면, 평가대상 저수지는 0.022~0.47 범위의 과잉간극수압비를 갖는 것으로 평가되어, 액상화가 발생할 수 있는 과잉간극수압비 1에 미치지 못해 본 평가대상 저수지 댐 모두는 지반 액상화에 대해서 소정의 안정성을 확보하고 있는 상태로 평가되었다.

(6) 과잉간극수압비는 석동 저수지가 0.47로 가장 크게 나타났으며, 지반의 증폭과 변위가 크게 나타난 운북 저수지는 과잉간극수압비가 0.052정도로 비교적 작게 평가되었다. 이로 미루어보아, 지반의 액상화는 지진수평가속도도 중요한 변수이지만 지반의 구성상태가 더 큰 영향을 미치는 변수임이 확인되었다.

## 감사의 글

구개발사업(04핵심기술C01) 및 한국농촌공사지원 으  
로 이루어졌습니다.

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기  
술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연

(접수일 : 2006. 7. 20 심사일 : 2006. 8. 14 심사완료일 : 2006. 10. 9)

## 참고 문헌

1. 기상청(2005), 지진자료실, 기상청 홈페이지
2. Itasca Consulting group, Inc.(2002), FLAC 2D manual(Ver. 4.0)
3. Liao, S. S. and Whitman, R. V.(1986), Overburden Correction Factors for SPT in Sand, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 112, No 3, pp. 373~377
4. Martin, G. R.,W. D. L. Finn and H. B. Seed.(1975), Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 101, No. 5, pp. 423~438
5. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1971), Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 97, No. 9, 1971, pp.1249~1273