

## 필댐의 내진 성능 평가 기준에 대한 고찰

# A Study on the Criteria for the Earthquake Safety Evaluation of Fill Dams

추연욱<sup>1)</sup> · 이세현<sup>2)</sup> · 김무광<sup>3)</sup> · 김동수<sup>4)</sup>

Choo, Yun Wook · Lee, Sei Hyun · Kim, Mu Kwang · Kim, Dong Soo

**국문 요약** >> 현행 국내 내진 성능 평가 기준에서 사용하고 있는 필댐의 동적 상세 해석에 대한 안전성 평가 기준은 지진 하중 조건에 의해 발생하는 댐마루 연직방향, 횡방향 최대 변위가 정적하중에 의한 변위를 포함하여 체재 높이의 1% 이하로 규정하고 있다. 그러나 이는 이론적 근거가 부족하여, 평가 기준에 대한 합리성 검토가 필요하다. 중약진 지역에 속하는 국내 지진학적 특성상 지진시 댐 계측 데이터로 근거를 마련하기가 어려운 실정으로, 본 연구에서는 국외 계측 데이터 D/B 등 다양한 자료를 바탕으로 안전성 평가 기준을 검토하였다. 추가적으로 원심모형시험과 수치해석을 함께 수행하여, 변형 기준을 검토하였다. 또한, 수치시뮬레이션을 통하여 매개 변수 분석을 수행하고, 댐체의 횡방향 변위와 침하에 대한 영향을 분석하고 변형 기준과 비교, 검토하였다.

**주요어** 필댐, 내진 성능, 평가 기준, 지진 계측 D/B, 동적원심모형시험, 수치시뮬레이션

**ABSTRACT** >> The current Korean criteria for seismic performance evaluated by dynamic analysis regulates that the horizontal displacement and vertical settlement of a dam body, including the static deformation, should be within 1% of the dam height. However, there has been weak theoretical support, so that the current criteria have to be validated. Korea is in a region of low or moderate seismicity located inside the Eurasian plate, and few earthquakes with considerable magnitudes and intensities have been recorded in the area. Therefore, in this study, published data measured in overseas countries were collected in order to construct a database and validate the current criteria. In addition, dynamic centrifuge tests and a parametric study using numerical simulations were performed in order to investigate the effect on the horizontal displacement and settlement of a dam body and to validate the current criteria.

**Key words** Fill dams, Seismic performance, Evaluation criteria, Earthquakes, Dynamic centrifuge test, Numerical simulation

## 1. 서론

지진은 인명과 재산에 가공할 피해를 가져올 수 있는 자연재해 중 하나이다. 최근 들어 국내외적으로 지진의 발생 빈도가 증가하고, 인접 국가에서는 큰 규모의 지진으로 인한 심각한 피해사례들이 보고되고 있다. 1995년 일본 효고 현을 강타한 고베 지진은 매우 낮은 지진 활동성으로 평가된 지역에서 발생하여 5,500여명의 사망자와 20만 명의 이재민, 약 200조원에 달하는 경제적인 손실을 초래하였고,

1988년 아르메니아 지진의 경우 내진설계가 전무했던 지역으로 25,000명 이상의 사망자가 발생하였다. 그러나 1989년 미서부 캘리포니아주의 Loma Prieta 지진은 큰 규모임에도 불구하고 단 62명의 사망자가 발생하였고, 2001년 시애틀 지진은 사망자가 단 1명에 불과하였다. 지진에 대한 대비태세의 유무에 따라 피해정도는 극명하게 달라져 내진설계에 대한 필요성 인식과 투자가 증대하고 있다.

사회 간접자본시설인 중요 대형 토목 구조물은 시민생활과 도시기능 유지 및 국가산업시설의 운영에 있어 필수불가결한 기본시설이기 때문에, 지진과 같은 자연재해로 인한 파손은, 직접적인 피해 뿐 아니라 2차 피해를 유발할 수 있다. 다른 시설과의 상호 의존성이 높기 때문에, 피해 복구가 빨리 이루어지지 않을 경우 사회 경제 시스템의 기능이 장시간 마비될 수 있어, 내진설계기준 및 해석방법을 보다 체계화할 필요가 있다. 특히, 인간 생명과 직결되는 수자원을 담고 있는 댐은 주요 국가 주요 시설물로서 지진 대비 안전성을 확보할 필요가 있다. 최근 중국에서 발생한 쓰촨(四川)

<sup>1)</sup> 정희원·KAIST 건설및환경공학과, 연구교수

<sup>2)</sup> 정희원·한국원자력안전기술원, 선임연구원

<sup>3)</sup> 현대엔지니어링(주), 사원

<sup>4)</sup> 정희원·KAIST 건설및환경공학과, 교수  
(교신저자: dskim@kaist.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 9. 9 / 수정일 : 2011. 10. 17 / 게재확정일 : 2011. 10. 18)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

성 지진(규모 8.0)과 일본에서 발생한 이와테/미야기 지진(규모 7.2)은 진앙지 주변지역에 위치한 많은 댐들에 크고 작은 피해를 발생시켰다. 특히, 중국 쓰촨성 대지진은 쓰촨성 일대 약 400여개의 중대형댐에 크고 작은 손상을 입힘으로써 지진대비 안전 관리에 대한 필요성이 부각되고 있다.

역사기록에 의하면 우리나라도 인명과 재산 피해를 초래한 강진이 몇 차례 있었지만, 지진에 대한 안전지대라는 인식이 강하여 대비가 전무하였고, 원자력 발전소(1972년), 건축물(1988년), 교량(1992년) 등에 내진설계가 제한적으로 적용되어 왔다. 그러나 최근에 발생한 울진해역 지진(2004, 규모 5.2), 후쿠오카 지진(2005, 규모 7.0), 오대산 지진(2007, 규모 4.9) 등은 큰 규모의 지진은 아니지만 작간접적으로 국내에 영향을 미치면서 내진설계 적용 대상 구조물의 범위가 확대되면서 내진설계의 중요성이 강조되고 있다. 1997년 건설교통부에서 내진설계 상위개념인 내진설계기준연구Ⅱ를 제정한 이후 본격적인 내진설계가 실시되기 시작되었으나, 당시에는 현업에서 활동하는 공학자들이 지반지진공학에 대한 인식 및 개념정립이 미비하여 외국의 기준을 그대로 사용하였고, 또한, 교량 및 건축물에 집중되어 댐과 같은 지반구조물의 내진설계기준은 미비한 실정이었다.

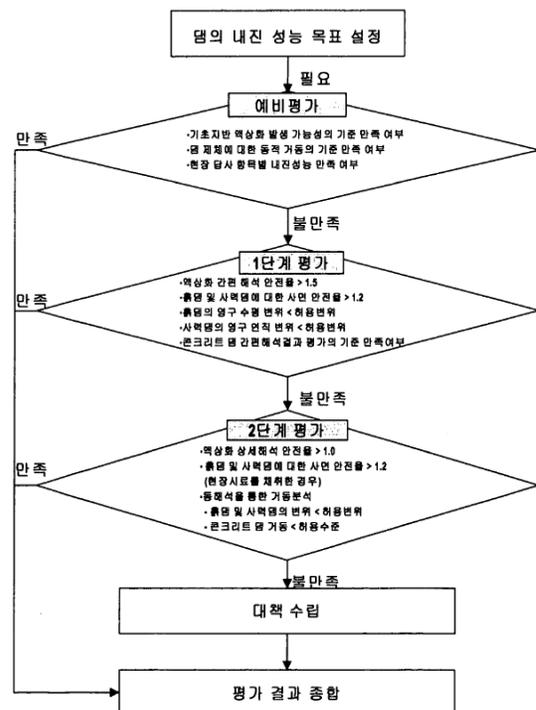
댐 구조물의 경우, 안전을 관리하는 기관이 한정되어 있고(시설안전기술공단, 수자원공사 등), 과거 설계기준에 의해 건설된 댐은 내진설계의 부재로 인하여 내진능력이 부족할 수 있다. 이에 따라 기존 댐의 지진시 동적 안전성을 평가하기 위해, 2004년 “기존댐의 내진성능 평가 및 향상요령”이 발간되었다.<sup>(1)</sup> 본 평가 요령은 댐의 내진성능 예비평가와 상세평가를 위한 동적 물성치 추정방법, 간편 및 상세 해석 기법, 안전성 평가기준 등을 포함하고 있다. 현행 기준에서는 댐의 동적 상세 해석에 대한 안전성 평가 기준으로 지진 하중 조건에 의해 발생하는 댐마루 침하와 횡방향 최대 변위가 정적하중에 의한 변위를 포함하여 제체 높이의 1% 이하로 규정하고 있다. 그러나, 중약진 지역에 속하는 국내 지진학적 특성상 지진시 댐 계측 데이터로 근거를 마련하기가 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 국외 계측 데이터 D/B 등 다양한 자료를 수집하여, 이를 바탕으로 내진 성능 평가 기준에 대한 합리성을 검토·보완하고, 근거를 마련하고자 하였다. 추가적으로 원심모형시험과 수치해석을 함께 수행하여, 댐의 내진 성능 평가 기준인 변형 기준에 대한 실험적인 검토와 수치시물레이션에 의한 매개 변수 분석을 수행하였다. 수집된 계측데이터 분석을 보완하고, 변형 기준에 대한 이론적 근거를 마련하였다.

## 2. 현행 국내 댐의 내진 성능 평가 기준

현재 국내 댐의 내진안정성은 그림 1과 같은 흐름에 따라 평가되고 있다. 내진 성능 평가시 경제적 효율성을 높이기 위해 1단계 및 2단계 상세평가의 전 단계로 예비 평가를 실시한다. 예비 평가는 현장 답사를 통한 대상 댐의 육안 조사와 기존 조사 자료로 수행되고, 상세평가의 실시 여부에 대한 스크린 과정인 만큼 보수적인 판정 기준을 사용하고 있다.

예비 평가 과정에서 내진성능이 불충분한 것으로 판정되면 순서대로 1단계, 2단계 상세 평가를 실시하도록 한다. 평가 항목으로는 기초 지반의 액상화 가능성, 상류 및 하류 사면의 안전율, 수평 및 연직 변위가 있다. 액상화 가능성은 1단계 평가시 1.5, 2단계 평가시 1.0의 기준 안전율을 만족하여야 하고, 사면 활동에 대한 안전율은 1.2를 제시하고 있다. 또한 변형에 대해서는 “동적 하중조건에 의해 발생하는 댐마루 연직방향, 횡방향 최대변위가 정적하중에 의한 변위를 포함하여 제체 높이의 1% 이하여야 한다”고 명시하고 있다.<sup>(1)</sup> 이 변형에 의한 평가 기준 1%에 대해서는, 다른 기준에 대한 결과와 관계없이 대부분의 수치해석 결과가 만족으로 평가되는 경향을 보이고 있어, 본 기준의 타당성 검토가 제기되고 있으나, 중약진 지역에 속하는 국내 지진학적 특성상 지진시 댐 계측 데이터로 근거를 마련하기 어려운 실정이다.



〈그림 1〉 댐 내진성능평가 절차의 흐름도<sup>(1)</sup>

### 3. 국외 필댐 지진 계측 자료의 수집 및 분석

#### 3.1 국외 필댐 지진 계측 자료의 수집

본 연구에서는 필댐의 상세 해석시 적용되는 변형에 대한 안정성 평가 기준을 검토하기 위하여, 필댐 지진 계측 자료를 문헌으로부터 수집하고, 데이터베이스(D/B)를 구축하였다. 우리나라는 지진 계측이 상대적으로 최근에 활성화되었고, 지진학적으로 규모 및 발생 빈도가 낮아 댐의 안전성에 영향을 줄 만큼 큰 규모의 지진이 발생한 적이 없기 때문에 D/B 구축은 국외의 댐 계측 자료를 활용하였다.

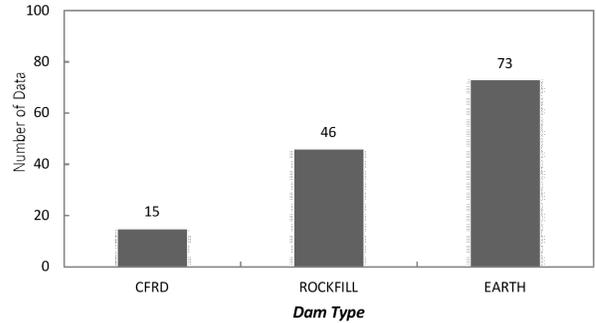
데이터 필드(Field)는 크게 댐 정보 및 제원, 지진 정보, 지진시 댐 거동, 댐 피해 현황의 네 가지로 구분된다. 댐 정보 및 제원의 세부적인 필드는 댐 이름, 댐 위치 국가, 댐 종류, 댐 높이, 상하류 사면 경사로 이루어져 있다. 또한 지진 정보의 세부적인 필드는 지진 이름, 지진 발생 날짜, 지진 규모, 진원 거리이다. 지진시 댐 거동은 기반암 최대 가속도, 댐마루 최대 가속도, 댐마루 침하량 및 침하비, 댐마루 횡변위 및 변위비로 구성되어 있다. 마지막으로 문헌에 명시된 댐 피해 현황과 출처로 기술하였다. 총 134건의 자료를 10개의 문헌으로부터 수집하였으며, 전체 D/B과 문헌의 출처는 각각 부록 표 9에 나타내었다.

구축된 D/B의 댐 타입별, 국가별, 댐 높이별 분포 현황을 그림 2와 같다. 댐 타입별 현황을 살펴보면, 전체 134건의 자료 중 CFRD(표면차수형 석괴댐) 15건, 사력댐 46건, 흙댐 73건으로 CFRD 댐의 비율이 가장 작고, 흙댐의 비율이 높았다. 또한 국가별 현황은 미국, 일본, 인도, 멕시코, 칠레 순으로 자료의 수가 많으며, 이는 지진의 발생 빈도가 높고 국가적 지진 계측 시스템이 구축된 시기가 이른 나라 순으로 계측 자료가 확보되었음을 나타낸다. 댐 높이별 현황은, 단순히 용수 공급을 위해 축조된 소규모 댐들의 계측자료가 많은 수를 차지하고, 높이가 높아질수록 확보된 자료의 수가 감소한다.

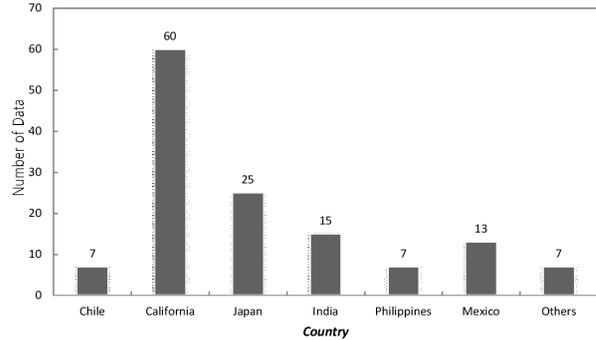
D/B구축을 위해 필요한 모든 정보를 가진 데이터는 수집된 자료 수에 비해 많지 않다. 신뢰성 있는 D/B구축을 위하여, 지속적인 문헌 연구로부터 데이터를 추가로 확보할 필요가 있고, 현재 구축되어 있는 국내 댐 지진 계측 시스템을 더욱 활성화하여 국내 필댐 자료를 확보할 필요가 있다.

#### 3.2 필댐의 지진에 의한 변형 경향

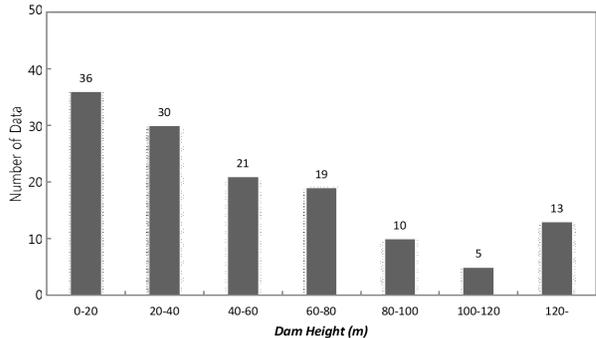
지진시 댐마루 침하량의 분포를 확인하기 위해 최대 기반암 가속도에 대한 댐마루 침하비의 분포를 그림 3에 나타내었고, 추세선, 상한선, 하한선도 함께 나타내었다. 최대 기반



(a) 댐 타입별 데이터 분포



(b) 나라별 데이터 분포



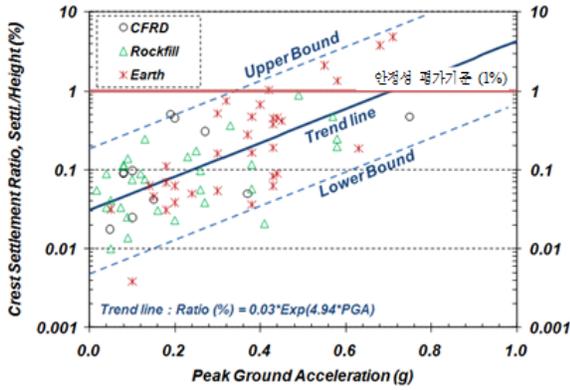
(c) 댐 높이별 데이터 분포

〈그림 2〉 구축된 D/B의 분포 현황

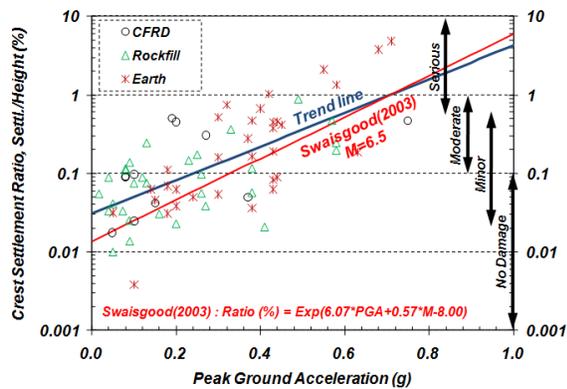
암 가속도가 0.4g 보다 작은 지진의 경우, 댐마루의 침하량은 대부분 댐 높이의 1%를 넘지 않고 있다. 최대 기반 가속도가 0.4g 보다 큰 경우, 일부 흙댐에서 1% 이상의 침하량이 계측되었지만 사력댐과 CFRD에서는 1% 침하가 발생하지 않았다.

본 연구의 D/B의 추세선은 기반암 가속도가 증가함에 따라 댐 마루에서 계측되는 침하비는 증가한다. Swaisgood<sup>(2)</sup>은 침하량비에 따른 댐 손상정도(Relative Degree of Damage)를 제안하였고, 이를 그림 4에 본 연구의 D/B와 함께 나타내었다. Swaisgood<sup>(2)</sup>은 No Damage, Minor, Morderate, Serious의 4가지 수준으로 구분하였고, 또한 지진 규모 및 최대 기반암 가속도에 따라 침하량비의 경험식을 제시하였다. 국내 기준 지진 규모 6.5조건의 경험식을 그림 4에 함께 나타내었다.

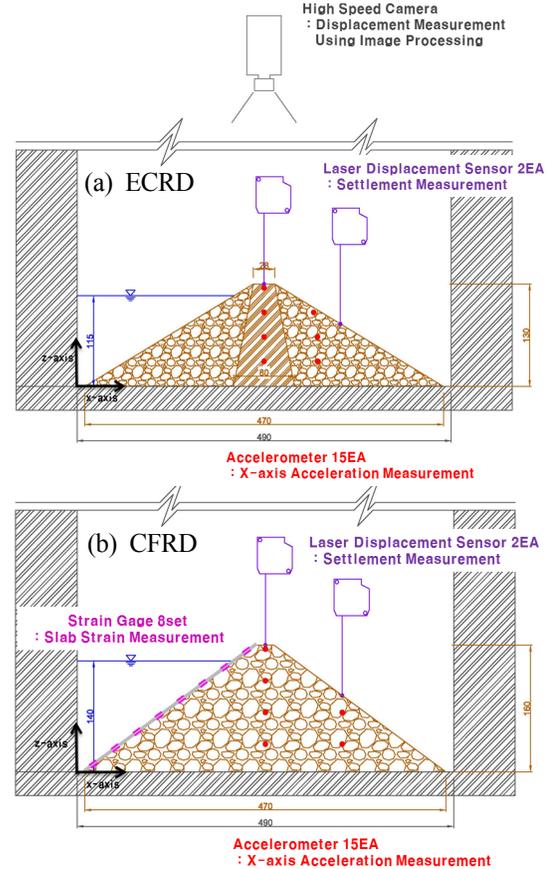
현행 국내 댐 내진설계기준 및 내진성능 평가 지침서의



〈그림 3〉 최대 기반암 가속도와 침하량비의 관계



〈그림 4〉 본 연구의 추세선과 Swaisgood<sup>(2)</sup>과의 비교



〈그림 5〉 시험 단면 및 센서 배치

최대 설계 기반암 가속도는 내진 특등급 붕괴 방지수준은 재현주기 1000년 지진 (0.154g), 내진 1등급 붕괴 방지수준은 재현주기 500년 (0.110g) 지진을 적용하고 있다.<sup>(1),(3)</sup> 그림 3와 그림 4의 결과를 보면, 국내 기준에 따른 댐 내진설계 및 내진성능 평가를 수행하면, 1%의 침하량이 발생할 확률은 극히 적을 것으로 판단되며, Swaisgood<sup>(2)</sup>이 제시한 댐 손상도는 Minor 또는 Moderate에 그칠 것으로 예상된다. 1% 침하량 발생을 위해서는, 최소 0.4g 이상의 기반암 가속도 수준이 필요하며, 이는 국내 지진학적 조건상 발생하기 힘든 지진 가속도 수준이다. 내진성능 보장이 필요한 댐에 대해, 사면 활동에 대한 등가 정적 해석시 안전율이 불충분 조건으로 판정되었다 하더라도, 동적 해석을 수행하여 내진성능이 충분하다는 결론을 도출할 수 있는 불합리성이 나타날 수 있어, 이에 대한 개선의 필요성이 제기된다.

#### 4. 원심모형시험 결과

본 연구에서 수행된 바와 같이 계측자료의 D/B분석을 통한 연구가 가장 신뢰성이 높으나, 체계적인 연구를 수행할 만큼 충분한 자료가 확보되기 어렵고, 특히 국내 자료의 양

은 열악하다. 이를 위한 보완으로, 수치해석, 모형시험 등을 통해 수행될 수 있다. 현장의 응력 조건을 재현할 수 있는 원심모형시험을 통한 지반구조물 연구가 최근 각광 받고 있으며, 수치해석기법과 원심모형시험이 병행된 연구가 가장 신뢰성 있는 연구로 받아들여지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 ECRD(중심 코어형 락필댐)과 CFRD에 대해 원심모형시험을 수행하여 진술한 D/B자료를 보완 분석하였다. 이후 수치 시뮬레이션을 캘리브레이션하여 국내 댐 대표적인 제원에 대한 매개변수 연구를 수행하고, 그 결과를 5장에 기술하였다.

#### 4.1 원심모형 시험 조건

원심모형시험을 위한 단면과 매설 센서는 그림 5와 같다. 토조 크기의 한계로 인해 댐 모형의 크기가 제한되었기 때문에 실제 댐에 비해 상대적으로 작은 원형 높이(ECRD 5.2m, CFRD 6.4m)의 댐을 모사하였으나, 그 외 사면경사 및 준별 조성 조건은 국내 댐 현황에 준하여 조성하였다. ECRD와 CFRD 모형의 상하류 경사는 각각 1.7, 1.4이다. 수위는 상시만수위 조건을 비례에 맞게 적용하였다. 자세한 시험 조건은 Kim 등<sup>(4)</sup>에 소개되어 있다.

〈표 1〉 기반암 가속수준별 시험조건 및 변형기록 (Kim 등<sup>(4)</sup>)

시험명	ECRD (코아형 락필댐)			CFRD (콘크리트 표면차수형 락필댐)		
	기반암 가속도 (g)	증폭비	댐정상 침하량 (mm)	기반암 가속도 (g)	증폭비	댐정상 침하량 (mm)
001	0.065	2.00	-0.22	0.092	0.99	-0.09
002	0.082	2.16	-0.25	0.125	1.43	-0.06
003	0.087	1.77	-0.02	0.166	1.53	-0.63
004	0.098	2.00	0.42	0.221	1.50	0.30
005	0.116	1.29	0.33	0.288	1.63	2.02
006	0.145	1.57	0.56	0.371	1.43	-0.84
007	0.221	1.75	1.88	0.417	2.43	-3.31
008	0.348	1.84	13.36	0.437	3.99	-5.51
009	-	-	-	0.570	3.37	9.72

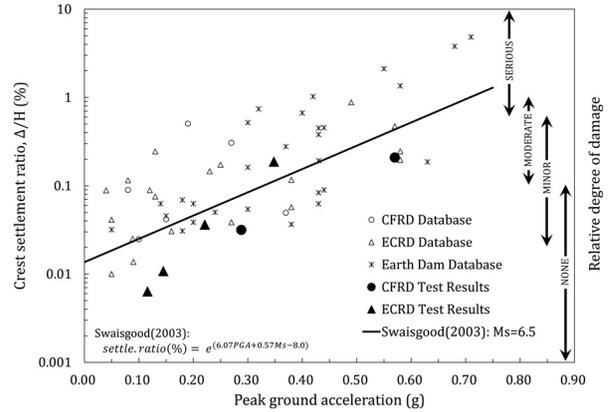
※ 모든 시험은 40g의 원심가속에서 Ofunato지진파를 가진

### 4.2 원심모형 시험 결과

지진파 가진 시, 침하량, 횡방향 변위량, 가속도가 계측되었고, 각 계측값은 표 1과 같다. 본 연구에서는 ECRD는 기반암 가속도 0.348g까지 가진되었고, CFRD는 기반암가속도 0.570g까지 가진되었다.

기반암 가속도 대비 댐 정상에서의 증폭비는 표 1에 나타내었다. ECRD와 CFRD의 증폭특성이 다르게 나타났으며, 특히, 심벽으로 인해 기반암 가속수준 0.35g 수준까지는, 코아형 락필댐이 심벽재의 영향으로 증폭이 크게 나타났다. 0.35g 이상에서, CFRD는 증폭이 급격하게 증가하는 현상이 나타났으며, 이는 댐체의 내부 변형과 관련되어 나타난 현상으로 추정된다. CFRD의 경우, 연속적인 기반암 가진으로 인하여 나타나는 잔류 침하량의 경향이 0.35g 이상에서 다른 경향을 보이면서, 융기(Heaving)가 나타났다. 이는 댐체의 변형이 항복 상태에 도달하여 팽창 경향이 나타났고, 이러한 변형이 가속도 증폭 현상에 반영된 것으로 판단된다. 결과적으로 CFRD의 경우, 0.5g의 기반암 가속수준에서 3.37배의 큰 증폭을 나타내었다.

기반암 가속도 0.2g까지는 ECRD와 CFRD 모두 상대적으로 매우 작은 잔류 침하량이 발생하였다. 0.2g이상에서 ECRD와 CFRD 모두 침하량에 변화가 나타나기 시작하였고, ECRD에서는 비교적 큰 침하가 발생하였고, CFRD의 경우, 0.35g 이상에서 전술한 바와 같이 융기(Heaving)가 발생하였고, 연속적인 기진으로 0.57g에서는 상대적으로 큰 침하가 발생하였다. ECRD의 최대 잔류 침하량은 13.36mm, CFRD의 경우 9.72mm이고, 이를 댐 높이에 대한 비로 나타내면, ECRD는 0.21%, CFRD는 0.19%로 댐변형기준



〈그림 6〉 원심모형시험 결과와 계측D/B와의 비교 (Kim 등<sup>(4)</sup>)

1%에 상당히 못미치는 결과가 나타남을 확인하였다. 원심 모형시험 결과를 Swaisgood<sup>(2)</sup>의 결과와 비교하면 그림 6과 같다. 시험결과가 Swaisgood<sup>(2)</sup>의 결과와 잘 부합하고 있고, 손상 수준은 ‘None’ 또는 ‘Moderate’ 정도로 분류되었으며, 실험완료 후 육안 검사한 결과에서도, 손상이 거의 관측되지 않았다.

댐 마루에서 나타난 최대 횡방향 변위량은, ECRD의 경우 최대로 측정된 값은 5.0mm가, CFRD의 경우, 51.2mm 계측되었다. 이 수치들은 원형 스케일이며, 댐 높이에 대한 비로 나타내면, ECRD는 0.10%, CFRD는 0.80%이다. 최대 횡방향 변위량비가 0.8% 발생한 경우가 있으나, 이는 댐 마루가 크게 파손되었다기 보다는 큰 가속도 증폭으로 국부적으로 골재가 쓸려 내려가는 현상이 발생하여 나타난 것으로 판단된다. 이는 지진하중 작용시, 댐 표면의 고속촬영 결과를 통해 확인하였으며, 실제 댐 마루 변형은 이보다 작을 것이라 판단된다.

## 5. 수치시뮬레이션을 이용한 매개변수 연구

### 5.1 매개변수 연구 조건

내진 성능 평가 기준의 검토를 위하여, 수치모델링을 통하여 매개변수 연구를 수행하였고, 수치모델링은 상용 해석 프로그램 FLAC 2D<sup>(5)</sup>을 사용하였다. 원심모형시험으로 계측된 모형댐의 지진시 거동을 먼저 수치시뮬레이션을 수행하여 검증작업을 수행하였고, 매개변수 연구에서 적용할 수치모델을 검증하였다. 자세한 검증 결과는 Kim 등<sup>(4)</sup>에 발표되었다.

매개변수 연구를 위하여, 국내 댐의 현황을 조사하여 표준단면을 결정하였고, 제체 조건에서 주요 매개변수들을 변경하여 그 영향을 확인하였다. 조사된 국내 댐의 제원 현황

〈표 2〉 국내 댐 제원 현황

명칭	높이 (m)	상류 경사	하류 경사	상류 심벽 경사	하류 심벽 경사	정상폭 (m)	수위비 (%)	사력재 물성				심벽재 물성				기반암 물성			
								$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$\phi$ (deg)	c (t/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$\phi$ (deg)	c (t/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$\phi$ (deg)	c (t/m <sup>2</sup> )
대담댐	27.0	2.0	2.0	0.25	0.25	7.0	-	2.10	0.30	43.0	2.00	2.04	0.30	25.1	2.90	2.50	0.20	45.0	50.00
소양강댐	123.0	2.3	2.0	-	-	-	92.3	2.00	-	33.0	0.00	2.07	-	27.0	3.80	2.70	-	45.0	5.60
안동댐	83.0	2.0	1.7	-	-	-	87.6	1.92	-	43.0	0.00	2.10	-	28.0	7.50	-	-	-	-
영천댐	42.0	2.7	2.5	0.20	0.20	-	-	2.00	0.30	43.0	2.00	2.10	0.30	30.8	2.50	2.50	0.20	45.0	50.0
임하댐	73.0	-	-	-	-	-	93.2	2.02	-	42.0	0.00	2.03	-	31.2	5.10	-	-	-	-
주암(본)댐	58.0	2.2	1.8	0.20	0.20	-	88.8	1.90	-	41.0	0.00	1.87	-	28.4	0.28	-	-	-	-
형성댐	48.5	2.2	1.8	0.25	0.25	-	-	1.93	0.30	41.0	2.00	1.99	0.35	20.0	2.80	2.60	0.20	45.0	200.0
무주양수댐	60.7	1.8	2.3	-	-	10.0	94.2	2.20	0.35	30.0	0.00	2.00	0.42	21.8	1.12	2.40	0.26	45.0	3.00
최대	123.0	2.7	2.5	0.3	0.3	10.0	94.2	2.2	0.4	43.0	2.0	2.1	0.4	31.2	7.5	2.7	0.3	45.0	200.0
최소	27.0	1.8	1.7	0.2	0.2	7.0	83.5	1.9	0.3	30.0	0.0	1.9	0.3	20.0	0.3	2.4	0.2	45.0	3.0
평균	58.4	2.2	2.0	0.23	0.21	8.5	89.9	2.01	0.31	39.5	0.75	2.03	0.34	26.5	3.25	2.54	0.22	45.0	61.7
본연구	60.0	2.2	2.0	0.20	0.20	8.0	90.0	2.00	0.30	40.0	0.75	2.00	0.35	27.0					

\* 각 댐의 제원은 수자원연구소 발행 ‘내진 안정성 평가를 위한 수공 댐 관련 정보집’ 참조<sup>6)</sup>

〈표 3〉 매개변수 연구 수치해석 입력물성치

Properties	Bedrock	Rockfill	Core
Mass-Density (kg/m <sup>3</sup> )	2600	2000	2000
Shear modulus (GPa)	2.60	매개변수	매개변수
Poisson's ratio	0.2	0.3	0.35
Bulk modulus (GPa)	3.47	매개변수	매개변수
Young's modulus (GPa)	6.24	매개변수	매개변수
Cohesion (kPa)	500	7.5	32.5
Friction angle (deg)	45	40	27
Max. zone size (m)	2.00	2.00	2.00
Max. frequency (Hz)	12.00	12.00	12.00

〈표 4〉 매개변수를 위한 사력재와 심벽재의 전단탄성계수의 변화 조건

깊이 (m)	사력재 (MPa)			심벽재 (MPa)		
	Lower	Average	Upper	Lower	Average	Upper
0~5	115	134	207	74	131	204
5~10	194	323	424	87	152	237
10~15	318	487	592	129	215	323
15~20	441	637	737	179	281	407
20~25	562	779	869	209	349	526
25~30	682	915	991	244	407	609
30~35	801	1045	1105	412	618	866

중에서, 대표적인 댐과 본 연구에서 결정한 표준단면의 제원을 표 2에 나타내었다. 표준단면으로부터 매개변수 해석을 위한 입력 물성을 산정하였고, 표 3과 같다.

입력 물성에서 전단탄성계수는 구속압에 의존하므로, 댐 높이별 구속압 수준에 따른 전단탄성계수를 산정하여 입력

하였다. 존별 재료의 구속압에 따른 전단탄성계수 변화는 김종태 등<sup>7)</sup>의 결과를 토대로 표 4와 같이 산정하였다.

입력지진파는 단주기와 장주기를 대표하는 Ofunato지진파와 Hachinohe지진파를 선정하여 주파수에 따른 영향을 고려하고자 하였다. 지진파의 크기는 PGA 0.154g로 보정되어 입력지진파로 적용되었다.

댐 거동에 영향을 줄 수 있는 매개변수들을 결정하였고, 댐 높이, 댐 사면 경사, 사력재 강성, 코어존 강성을 선정하였다. 각 매개변수 연구에 해당하는 변수 외의 조건은 앞서 산정된 표준단면의 제원을 그대로 사용하였다. 매개변수 연구를 통해서, 지진하중에 의한 댐의 횡방향 변위와 침하에 대한 영향을 확인하였다.

## 5.2 매개변수 연구 결과

### 5.2.1 댐 높이 변화

댐 높이에 대한 횡방향 변위와 침하의 영향을 분석하기 위하여, 댐 높이를 20m, 40m, 60m, 90m, 120m로 변화시키면서 내진해석을 수행하였다. 댐 높이 변화에 따른 매개변수 연구 결과는 표 5와 같다.

해석 결과, 댐 높이가 높아질수록 댐 높이에 대한 횡방향 변위 비율과 침하 비율이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 댐 높이가 높아질수록, 지진시 댐체의 많은 부분이 소성영역을 경험하고, 경험하는 변형률 수준도 커지면서 나타나는 비선형 거동으로 전단탄성계수가 감소되면서, 많은 변형이 발생했을 거라고 판단된다.

〈표 5〉 댐 높이 변화에 따른 매개변수 연구 결과

댐 높이	수평변위/댐높이 (%)			침하/댐높이 (%)		
	Hachi-nohe	Ofunato	평균	Hachi-nohe	Ofunato	평균
20m	0.017	0.018	0.018	0.002	0.001	0.002
40m	0.037	0.045	0.041	0.013	0.027	0.020
60m	0.085	0.067	0.076	0.053	0.060	0.057
90m	0.061	0.089	0.075	0.040	0.054	0.047
120m	0.096	0.091	0.094	0.060	0.065	0.063

〈표 6〉 댐 사면 변화에 따른 매개변수 연구 결과

댐 높이	수평변위/댐높이 (%)			침하/댐높이 (%)		
	Hachi-nohe	Ofunato	평균	Hachi-nohe	Ofunato	평균
1:1.6	0.417	0.455	0.370	0.353	0.386	0.370
1:1.8	0.121	0.120	0.096	0.088	0.105	0.097
1:2.0	0.084	0.067	0.056	0.053	0.060	0.057
1:2.3	0.036	0.037	0.021	0.012	0.030	0.021
1:2.6	0.025	0.027	0.011	0.005	0.017	0.011

〈표 7〉 사력재 전단탄성계수 변화에 따른 매개변수 연구 결과

댐 높이	수평변위/댐높이 (%)			침하/댐높이 (%)		
	Hachi-nohe	Ofunato	평균	Hachi-nohe	Ofunato	평균
하한	0.070	0.057	0.064	0.056	0.070	0.063
평균	0.084	0.067	0.076	0.053	0.060	0.056
상한	0.071	0.077	0.074	0.037	0.060	0.048

5.2.2 댐 사면 경사

댐 사면 경사에 대한 횡방향 변위와 침하의 영향을 분석하기 위하여, 댐 하류사면 경사를 1:1.6, 1:1.8, 1:2.0, 1:2.3, 1:2.6으로 변화시키며 동적해석을 수행하였다. 국내 댐 제원의 분석 결과, 일반적으로 상류사면이 하류사면 경사보다 0.2정도 큰 것으로 나타나서, 본 해석에서도 상류사면은 하류사면보다 0.2씩 크게 모델링 하였다. 댐 사면 경사 변화에 따른 매개변수 연구 결과는 표 6과 같다.

해석 결과를 분석해 보면 댐 사면 경사가 급해질수록 댐 높이에 대한 횡방향 변위 비율과 침하 비율이 급격히 커지는 경향을 나타내었다.

5.2.3 사력재 전단탄성계수 변화

사력재 강성에 대한 매개변수 연구를 위하여, 표 4에 나타난 바와 같이, 대표물성의 하한치, 평균치, 상한치로 변화시켜 동적해석을 수행하였다. 사력재 강성 변화에 따른 매개변수 연구 결과는 표 7과 같다.

해석 결과를 분석해 보면 사력재 강성이 커질수록 댐 높

〈표 8〉 심벽재 전단탄성계수 변화에 따른 매개변수 연구 결과

댐 높이	수평변위/댐높이 (%)			침하/댐높이 (%)		
	Hachi-nohe	Ofunato	평균	Hachi-nohe	Ofunato	평균
하한	0.092	0.085	0.089	0.048	0.052	0.050
평균	0.084	0.067	0.076	0.053	0.060	0.056
상한	0.055	0.056	0.056	0.040	0.074	0.057

이에 대한 침하 비율이 줄어들었다. 반면, 댐 높이에 대한 횡방향 변위 비율은 일정한 경향을 나타내지 않는 것으로 판단된다. 이는 사력존의 강성은 횡방향 변위에는 영향을 미치지 않으며, 침하에 보다 큰 영향을 미친다고 판단된다.

5.2.4 심벽재 전단탄성계수 변화

심벽재 전단탄성계수에 대한 횡방향 변위와 침하의 영향을 분석하기 위한, 심벽재 전단탄성계수 변화의 하한치, 평균치, 상한치는 표 4와 같다. 심벽재 전단탄성계수에 따른 매개변수 결과가 표 8과 같다.

해석 결과를 분석해 보면, 심벽재 전단탄성계수가 커질수록 댐 높이에 대한 횡방향 변위 비율이 줄어드는 경향을 확인하였다. 반면, 침하 비율은 일정한 경향을 나타내지 않는 것으로 판단된다. 심벽재의 전단탄성계수는 침하에는 영향이 작으며, 횡방향 변위에 많은 영향을 미친다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 필댐의 내진성능 평가를 위하여 사용되고 있는 변형기준인 ‘제체 높이의 1%이하’의 규정에 대한 이론적인 검토를 위하여, 국외 계측 데이터를 수집하여 분석하여, 내진 성능 평가 기준을 검토하였다. 추가적으로 원심모형시험과 수치해석을 함께 수행하였고, 변형 기준 검토를 위하여 수치시뮬레이션을 통한 매개 변수 연구를 수행하였다. 다음과 같은 결론을 획득하였다.

1. 다양한 문헌연구를 바탕으로 국외 필댐 지진 계측 자료를 수집하였고 지진시 댐 거동 D/B를 구축하였고, D/B의 자료에서 국내 내진 기준인 기반암가속도 0.154g에서 발생한 댐체의 침하는 0.5%미만의 상당히 작은 침하가 계측되었다. 국내 필댐 내진성능평가 기준인 댐마루 침하 및 횡방향 최대 변위가 댐 높이의 1%이내라는 기준은 안전성을 평가하는 기준으로서 불합리한 면을 내포하고 있어, 개선의 여지가 있다고 판단된다.
2. 원심모형시험 결과에서도 기반암 가속수준이 0.3g에서

- ECRD와 CRFD 모두 상당히 미미한 변형이 발생하였고, 원심모형시험의 모형 댐체에 발생한 가장 큰 손상은 약간의 용기와 댐마루 표면이 약간 굴러 떨어지는 손상으로 관측되었다.
- 수치시뮬레이션을 통하여, 국내 댐의 평균적인 단면으로부터, 댐 높이, 댐 사면 경사, 사력재 강성, 코어존 강성을 변화시켜가면서 시험을 수행하였고, 그 결과, 횡방향 변위 및 침하의 크기가 제체높이 0.5% 미만의 상당히 작은 변형을 보였다.
  - 원심모형시험 및 수치시뮬레이션 결과 모두, 국외 D/B자료의 결론과 유사한 결과를 보이고 있어, 국내 필댐 내진 성능 평가에 사용되는 횡방향 변위와 침하량에 대한 댐 높이의 1% 기준은 상당히 큰 값으로, 추후 보완의 여지가 있다고 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2011-0000314).

### 참고 문헌

- 한국시설안전기술공단, 기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령, 건설교통부, 2004.
- Swaigood, J.R., "Embankment dam deformations caused by earthquakes," *Proc. of 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Christchurch NZ, 2003.
- 한국수자원학회, 댐 설계기준, 건설교통부, 2005.
- Kim, M.K., Lee, S.H., Choo, Y.W., Kim, D.S., "Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rockfill dams by dynamic centrifuge tests," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, No. 11, 1579-1593, 2011.
- FLAC version 5.0, *User's Guide*, Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- 한국수자원공사 수자원연구원, "댐 타입별 내진 안정성 평가 기법 연구," 연구보고서, KIWE-DRC-04-14, 한국수자원공사, 2004.
- 김종태, 김동수, 박헌준, 권혁기, "필댐 제체 재료의 동적 물성치 평가 : I 현장 진단과 속도 주상도," 한국지반공학회논문집, 제25권, 제12호, 69-85, 2009.
- US. Geological Survey, *The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989 - Earth Structures and Engineering Characterization of Ground Motion*, US. Geological Survey Sional Paper 1552-D, United States Government Printing Office, Washington, 1998.
- Yamaguchi, Y., Iwashita, T., and Mitsuiishi, S., "Preliminary Investigation of Dams Stricken by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008," *Proc. 5th East Asia Area Dam Conference*, 2008.
- Krinitzsky, E.L., Hynes, M.E., "The Bhuj, India, earthquake : lessons learned for earthquake safety of dams on alluvium," *Engineering Geology*, Vol. 66, 163-196, 2002.
- Bureau, G., Volpe, R.L., Roth, W.H., Udaka, T., "Seismic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams," *Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance*, ASCE, 479-508, 1985.
- Verdugo, R., Peters, G., "Observed seismic behavior of three Chilean large dams," *Earthquake geotechnical case histories for performance-based design*, 409-430, 2009.
- Nagayama, I., Yamaguchi, Y., Sasaki, T., Nakamura, A., Kawasaki, H., Hirayama, D., "Damage to Dams due to Three Large Earthquakes Occurred in 2003, in Japan," *36th Joint Meeting Panel on Wind and Seismic Effects*, Gaithersburg, US, 2004
- Wieland, M., "Earthquake Safety of Existing Dams," *keynote lecture, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 2006.
- Shannon, D.A., "Dam Damage: Evaluating and Learning from the Wenchuan Earthquake's Impact to China's Dams," *TCLÉE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, ASCE, 1371-1382, 2009.

부 록

〈표 9〉 지진시 댐 피해 자료 D/B

No.	댐명	국가	형식*	댐고 (m)	사면경사**		지진명	년도	규모	진앙 km	PGA(g)		정상변위		손상 사례	문헌****
					상류	하류					정상	기반 압	침하,cm (비,%)***	변위,cm (비,%)***		
1	Almaden	미국, CA	ER	33.5			Loma Prieta	1989	7.1	9.6		0.44	3.0 (0.09)		Minor Longitudinal Crack at Junction of Dam Crest and U/S Conc. Face	(2) (8)
2	Almaden	미국, CA	ER	11.6			Loma Prieta	1989	7.1	11.2		0.43			No Reported Damage	(8)
3	Ambuklao	필리핀	RF	120				1990	7.7	10		0.49	110.0 (0.88)		Serious	(2)
4	Aratozawa	일본	RF	74.4			Iwate-Miyagi	2008	7.2		0.54		20.0 (0.27)			(9)
5	Aromos	칠레	RF	43.0				1985	7.8	45		0.25	9.0 (0.17)		Minor	(2)
6	Austrian	미국, CA	ER	56.4	3.0	3.0	Loma Prieta	1989	7.1	1.6		0.58	76.2 (1.35)	45.7 (0.81)	Serious Settlement, Transverse and Longitudinal Cracking, Spillway Damage	(2) (8)
7	Aya	필리핀	RF	102.0				1990	7.7	6		0.58	20.0 (0.20)		Minor	(2)
8	Bay Street	미국, CA	ER	8.2			Loma Prieta	1989	7.1	16		0.48			Minor Surficial Cracking on Crest	(8)
9	Bhukhi	인도	ER	23.4			Bhuj	2001	7.9	80.0		0.50			Minor cracks on crest	(10)
10	Calero	미국, CA	ER	27.4			Loma Prieta	1989	7.1	12.8		0.38	1.0 (0.04)		No Reported Damage	(2) (8)
11	Canili	필리핀	RF	70.0				1990	7.7	18		0.38	4.0 (0.06)		Minor	(2)
12	Chatsworth No.2	미국, CA	ER	12.0				1930	5.3	1		0.4	8.0 (0.67)		Moderate	(2)
13	Cogoti	칠레	CF	82.7	1.4 2	1.5 0	Illapel	1939	8.3	16.0		0.20	38.1 (0.45)		Minor rock slides, No face cracks	(11)
14	Cogoti	칠레	CF	82.7	1.4 2	1.5 0		1943	7.9	90.0		0.19	41.7 (0.50)		Several longitudinal cracks, transversal cracks, settlements in the conc. slab, large disp. of the rockfill	(2) (12)
15	Cogoti	칠레	CF	82.7	1.4 2	1.5 0		1949					12.3 (0.15)			(12)
16	Cogoti	칠레	CF	82.7	1.4 2	1.5 0		1997	7.1	16.0		0.27	25.3 (0.31)		Moderate	(2) (12)
17	Cogswell	미국, CA	CF	81.0				1991	5.8	7		0.37	4.0 (0.05)		Minor	(2)
18	Cogswell	미국, CA	CF	81.0				1994	6.7	53		0.1	2.0 (0.02)		Minor	(2)
19	Coit	미국, CA	ER	16.5			Loma Prieta	1989	7.1	30.4		0.18			No Reported Damage	(8)
20	Cowell	미국, CA	ER	15.2			Loma Prieta	1989	7.1	17.6		0.48			No Reported Damage, Reservoir Empty	(8)
21	Coyote	미국, CA	RF	42.7				1984	6.2	0		0.63	8.0 (0.19%)		Minor	(2)
22	Coyote	미국, CA	RF	42.7			Loma Prieta	1989	7.1	22.4		0.19			No Significant Damage	(8)
23	Debell	미국, CA	ER	16.2			Loma Prieta	1989	7.1	7.2		0.48			No Reported Damage	(8)
24	Demi-1	인도	ER	17.0			Bhuj	2001	7.9	90.0		0.20			Superficial disturbances	(10)
25	Diayo	필리핀	RF	60.0				1990	7.7	18		0.38	7.0 (0.12%)		Minor	(2)
26	El Infiernillo	멕시코	RF	146.0	1.7 5	1.7 5		1975 (1)	7.2	23		0.09	2.0 (0.01%)		None	(2) (6)

형식\* : ER: Earth Dam, RF: Earth-Core Rockfill Dam, CF: Concrete-Faced Rockfill Dam

사면경사\*\* : 수평길이/수직높이, (비,%)\*\*\* : 변위/댐체높이, 문헌\*\*\*\* : 참고문헌 번호

〈표 9〉 지진시 댐 피해 자료 D/B(계속)

No.	댐명	국가	형식	댐고 (m)	사면경사		지진명	년도	규모	진앙 km	PGA(g)		정상변위		손상 사례	문헌
					상류	하류					정상	기반 압	침하,cm (비,%)	변위,cm (비,%)		
27	El Infiernillo	멕시코	RF	146.0	1.75	1.75		1975 (2)	5.9	20.0	0.28	0.09	3.7 (0.03%)		None	(2) (6)
28	El Infiernillo	멕시코	RF	146.0	1.75	1.75		1979	7.6	110.0	0.35	0.12	13.0 (0.09%)	4.5 (0.03%)	Minor Settlement, Slope distortions, Cracking	(2) (11)
29	El Infiernillo	멕시코	RF	146.0	1.75	1.75		1981	7.3	55		0.05	6.0 (0.04%)		None	(2)
30	El Infiernillo	멕시코	RF	146.0	1.75	1.75		1985	8.1	76	0.46	0.13	11.0 (0.08%)		Minor	(2) (6)
31	Elmer J. Chesbro	미국, CA	ER	29.0				1984	6.2	22		0.18	2.0 (0.07%)		Minor	(2)
32	Elmer J. Chesbro	미국, CA	ER	29.0			Loma Prieta	1989	7.1	12.8		0.43	11.0 (0.38%)		Moderate longitudinal crest cracks, minor transverse cracks at Abutment	(2) (8)
33	Fategadh	인도	ER	11.6			Bhuj	2001	7.9	32.0		0.70			Severe damage throughout; tilting of displaced blocks	(10)
34	Gajod	인도	ER	14.0			Bhuj	2001	7.9	75.0		0.30			Superficial disturbances	(10)
35	Gosho	일본	RF	52.0				1983	7.7							(6)
36	Gosho	일본	RF	52.0				1983	6.6							(6)
37	Guadalupe	미국, CA	ER	43.3	2.50	2.50	Loma Prieta	1989	7.1	9.6		0.43	19.5 (0.45%)	4.6 (0.11%)	Moderate crack at top of U/S berm, Spalling of U/S concrete panels	(2) (8)
38	Hawkins	미국, CA	ER	21.9			Loma Prieta	1989	7.1	33.6		0.23			Minor longitudinal cracks on crest and U/S slope, reservoir empty	(8)
39	Hebgen	Montana	ER	25.0				1959	7.6	0		0.71	169.0 (4.83%)		Serious	(2)
40	Hollister WW PD	미국, CA	ER	4.0			Loma Prieta	1989	7.1	25.6		0.28			Moderate Cracking, Reservoir Empty	(8)
41	Ishibuchi	일본	CF	53.0	1.30	1.50	Miyagi-Oki	2003	7.1	84.9	0.27	0.15			Deformation was not confirmed. Increase of water leakage	(13)
42	Ishibuchi	일본	CF	53.0	1.30	1.50	Iwate-Miyagi	2008	7.2	10.0	1.50		50.0 (0.94%)		No severe damage was found in the concrete face.cracks on Crest	(9)
43	Kalaghogh a	인도	ER	14.9			Bhuj	2001	7.9	65.0		0.30			Small cracks along edges of crest; masonry dam undamaged	(10)
44	Kamiohsawa Dam	일본	ER	19.0			Iwate-Miyagi	2008	7.2				14.4 (0.78%)		A few cracks with max. 10mm width occurred on the crest pavement	(9)
45	Kaswati	인도	ER	16.2			Bhuj	2001	7.9	25.0		0.70			Major longitudinal cracks, lateral displacements	(10)
46	Kelly Cabin	미국, CA	ER	9.8			Loma Prieta	1989	7.1	28.8		0.18			No Reported Damage	(8)
47	Kiseyama	일본	RF	95.0	2.50	2.20		1969	6.8		0.10					(11)
48	Koda	일본	RF	43.5			Iwate-Miyagi	2008	7.2				3.8 (0.09%)	5.5 (0.13%)		(9)
49	Kuttari	일본	RF	28.0			Tokaci-Oki	2003	8.0							(14)
50	Kuzuryu	일본	RF	120.0	2.60	1.80	Gifu	1969	6.6	40.0	0.04	0.02			No Reported Damage	(11)
51	L.SanFernando	미국, CA	ER	38.0				1994	6.7	9		0.44	20.0 (0.45%)		Serious	(2)
52	La Calera	멕시코	RF	28.0	1.50	-		1964	VII							(11)
53	La Villita	멕시코	RF	60.0	2.50	2.50		1975 (1)	4.9	50.0	0.35	0.07	2.0 (0.03%)			(6)
54	La Villita	멕시코	RF	60.0	2.50	2.50		1975 (2)	5.9	20.0	0.21	0.04	2.0 (0.03%)			(6)
55	La Villita	멕시코	RF	60.0	2.50	2.50		1979	7.6	110.0	0.36	0.10	4.5 (0.08%)	3.0 (0.05%)	Minor settlement	(11)

〈표 9〉 지진시 댐 피해 자료 D/B(계속)

No.	댐명	국가	형식	댐고 (m)	사면경사		지진명	년도	규모	진앙 km	PGA(g)		정상변위		손상 사례	문헌
					상류	하류					정상	기반 압	침하,cm (비,%)	변위,cm (비,%)		
56	La Villita	멕시코	RF	60.0	2.50	2.50		1981	7.3	20.0	0.43	0.09	8.3 (0.14%)			(6)
57	La Villita	멕시코	RF	60.0	2.50	2.50		1985 (1)	8.1	43	0.71	0.13	33.0 (0.24%)		Minor	(2)
58	La Villita	멕시코	RF	60.0	2.50	2.50		1985 (2)	7.5	61		0.04	12.0 (0.09%)		None	(2)
59	Lake Ranch	미국, CA	ER	11.6			Loma Prieta	1989	7.1	6.4		0.43			2 Embankments with Minor Longitudinal and Transverse Cracking	(8)
60	Laurel Spring	미국, CA	ER	8.5			Loma Prieta	1989	7.1	32		0.18			No Reported Damage	(8)
61	Leroy Anderson	미국, CA	RF	71.6	2.50	2.50	Morgan Hill	1984	6.2	1.6	0.63	0.41	1.5 (0.02%)	0.9 (0.01%)	Longitudinal cracks, small duration, diff. settle. between core and shell	(11)
62	Leroy Anderson	미국, CA	RF	71.6	2.50	2.50	Loma Prieta	1989	7.1	20.8	0.43	0.26	4.0 (0.06%)		Minor Longitudinal Cracking on New Crest Fill	(8)
63	Lexington	미국, CA	ER	62.5	5.50	3.00	Loma Prieta	1989	7.1	3.2	0.45	0.45	25.9 (0.41%)	7.6 (0.12%)	Moderate longitudinal and transverse Crack, 0.9 feet of settlement	(8)
64	Los Angeles	미국, CA	ER	47.0				1994	6.7	10		0.43	9.0 (0.19%)		Moderate	(2)
65	Lower Franklin	미국, CA	ER	31.0				1994	6.7	18		0.3	5.0 (0.16%)		Moderate	(2)
66	Lower Howell	미국, CA	ER	11.9			Loma Prieta	1989	7.1	2.4		0.43			1/4 Inch Longitudinal Crack on Crest	(8)
67	Magat	필리핀	RF	100.0				1990	7.7	81		0.05	1.0 (0.01%)		None	(2)
68	Makio	일본	RF	77.0			Nagno-Seibu	1984	6.8	5	0.76	0.57	50.0 (0.47%)		Minor	(2)
69	Makubetsu	일본	ER	26.9	3.50	2.20	Tokaci-Oki	2003	8.0	140.6	0.26	0.18	3.0 (0.11%)	2.0 (0.07%)	Sliding of the protective rock layer on the earth blanket	(13)
70	Malpasso	Peru	CF	78.0	0.50	1.33		1938	VI+			0.10	7.6 (0.10%)	5.1 (0.07%)	Moderate Settlement	(11)
71	Mamioka	일본	RF	52.0			Nihonkai-Chubu	1983	7.7	146	0.23	0.08	5.7 (0.11%)			(6)
72	Masiway	필리핀	ER	25.0				1990	7.7	3		0.68	106.0 (3.79%)		Serious	(2)
73	Matahina	뉴질랜드	RF	86.0			Edgecumbe	1987	6.3	23.0	0.43	0.33	31.1 (0.36%)		Moderate	(6)
74	Mathal	인도	ER	21.0			Bhuj	2001	7.9	100.0		0.30			Small cracks along edges of crest	(10)
75	Miboro	일본	RF	131.0	2.50	1.75	Kitamin o	1961	7.0	16.0		0.20	3.0 (0.02%)	5.0 (0.04%)	Minor settlement	(11)
76	Mill Creek	미국, CA	ER	23.2	3.00	1.50	Loma Prieta	1989	7.1	19.2		0.28			Minor Longitudinal Cracks on Crest	(8)
77	Minase	일본	CF	66.5	1.35	2.00		1964 (1)	6.9			0.02				(6)
78	Minase	일본	CF	66.5	1.35	2.00	Nigata	1964 (2)	7.5	16.0		0.08	6.1 (0.09%)	4.0 (0.06%)	Minor joint damage at the concrete face, Cracking on crest	(11)
79	Minase	일본	CF	66.5	1.35	2.00	Iwate-Miyagi	2008	7.2				14.0 (0.21%)			(9)
80	Morena	미국, CA	RF	50.0	0.50	1.30		1940	IV			0.02			No Reported Damage	(11)
81	Murry	미국, CA	ER	16.5			Loma Prieta	1989	7.1	35.2		0.13			No Reported Damage	(8)
82	Nagara	일본	RF	52.0				1987	6.9	29		0.27	2.0 (0.04%)		n/a	(2)

〈표 9〉 지진시 댐 피해 자료 D/B(계속)

No.	댐명	국가	형식	댐고 (m)	사면경사		지진명	년도	규모	진앙 km	PGA(g)		정상변위		손상 사례	문헌
					상류	하류					정상	기반 압	침하,cm (비,%)	변위,cm (비,%)		
83	Namioka	일본	RF	52.0				1983	7.7	145		0.08	6.0 (0.12%)		None	(2)
84	Newell	미국, CA	RF	55.5			Loma Prieta	1989	7.1	9.6		0.43			1 to 9' wide Longitudinal Cracks in Upper U/S Slope, Increased Seepage	(8)
85	Niikappu	일본	RF	103.0			Tokachi-Oki	2003	8.0		0.28	0.16				(14)
86	Niruna	인도	ER	34.4			Bhuj	2001	7.9	65.0		0.50			Minor cracks on crest, some major displacements on shoulders	(10)
87	North Dike	미국, CA	ER	36.0				1994	6.7	10		0.43	3.0 (0.08%)		Moderate	(2)
88	North Fork	미국, CA	ER	30.5			Loma Prieta	1989	7.1	36.8		0.13			No Reported Damage, Reservoir Virtually Empty	(8)
89	Oak Site	미국, CA	ER	13.1			Loma Prieta	1989	7.1	15.2		0.33			No Reported Damage	(8)
90	Ono	일본	ER	41.0				1923	8.2	98		0.3	27.0 (0.52%)		Serious	(2)
91	Oroville	미국, CA	ER	235.0	2.75	2.00	Oroville	1975	5.7	6.9	0.12	0.10	0.9 (0.00%)		The crest continued to oscillate in free vibrations for about 10 sec or more	(11)
92	Paloma	칠레	RF	82.0				1997	7.6	45		0.23	14.0 (0.15%)		Minor	(2)
93	Pantabangan	필리핀	RF	114.0				1990	7.7	6		0.58	28.0 (0.25%)		Moderate	(2)
94	Peabody	미국, CA	ER	19.2			Loma Prieta	1989	7.1	19.2		0.23			No Reported Damage	(8)
95	Pinzanes	멕시코	RF	67.0	1.20	1.30		1957	7.5			0.05			No Reported Damage	(11)
96	Puna	인도	ER	18.3			Bhuj	2001	7.9	115.0		0.20			Superficial disturbances	(10)
97	R Simoni Irrigation	미국, CA	ER	13.4			Loma Prieta	1989	7.1	9.6		0.43			No reported damage, reservoir virtually empty	(8)
98	Rangmati	인도	ER	15.0			Bhuj	2001	7.9	110.0		0.20			Superficial disturbances; masonry dam undamaged	(10)
99	Rinconada	미국, CA	ER	12.2			Loma Prieta	1989	7.1	9.6		0.38	2.0 (0.16%)		4 Tears in Rubber Liner Seams, Cracked Concrete Intake Vault	(9)
100	RobertMat-Thews	미국, CA	ER	46.0				1992	6.9	64		0.07	0.0 (0.00%)		None	(2)
101	Rudramate	인도	ER	27.4			Bhuj	2001	7.9	40.0		0.70			Cracks on crest	(10)
102	San Justo	미국, CA	RF	41.1			Loma Prieta	1989	7.1	27.2	0.40	0.26	4.0 (0.10%)		No Reported Damage	(8)
103	SantaFelicita	미국, CA	ER	65.0				1994	6.7	33		0.18	2.0 (0.03%)		Minor	(2)
104	Santa Juana	칠레	CF	113.4	1.50	1.60		1997	6.8	55.0	0.23	0.05	2.0 (0.02%)		None	(12)
105	Sapada	인도	ER	20.5			Bhuj	2001	7.9	105.0		0.20			Superficial disturbances	(10)
106	Sasoi	인도	ER	20.0			Bhuj	2001	7.9	120.0		0.20			Superficial disturbances along crest; masonry dam undamaged	(10)
107	Selvage No. 2	미국, CA	ER	12.8			Loma Prieta	1989	7.1	11.2		0.38			No Reported Damage	(8)
108	Sempervirens	미국, CA	ER	12.8			Loma Prieta	1989	7.1	19.2		0.28			No Reported Damage	(8)
109	Soda Lake	미국, CA	ER	10.7			Loma Prieta	1989	7.1	8.8		0.33			4 Tailings dams - liquefaction of tailings, slumping of 10-Ft west dam	(8)
110	SouthHawe	미국, CA	ER	25.0				1952	7.7	151		0.05	2.0 (0.03%)		Minor	(2)

〈표 9〉 지진시 댐 피해 자료 D/B(계속)

No.	댐명	국가	형식	댐고 (m)	사면경사		지진명	년도	규모	진앙 km	PGA(g)		정상변위		손상 사례	문헌
					상류	하류					정상	기반 압	침하,cm (비,%)	변위,cm (비,%)		
111	StevensCreek	미국, CA	ER	37.0				1989	7.1	16		0.3	2.0 (0.05%)		None	(2)
112	Suvi	인도	ER	15.0			Bhuj	2001	7.9	10.0		0.70			Severe damage throughout	(10)
113	Takami	일본	RF	120.0	2.60	1.95	Tokaci-Oki	2003	8.0	140.4	0.33	0.06			Longitudinal cracks at the crest (160m long, maximum width was 50mm)	(13)
114	Tapar	인도	ER	13.5			Bhuj	2001	7.9	10.0		0.70			Severe damage to undamaged	(10)
115	Tarumizu	일본	RF	43.0	3.70	2.40	Miyagi	1978	7.4	100.0	0.36	0.24			No Reported Damage	(11)
116	Tokachi	일본	RF	84.0			Tokaci-Oki	2003	8.0			0.04				(14)
117	Torata	페루	CF	120.0				2001	8.3	100		0.15	5.0 (0.04%)		Minor	(2)
118	Tsengwen	대만	RF	131.0				1976	5.3	8	0.27	0.16	4.0 (0.03%)		n/a	(2)
119	U. San Fernando	미국, CA	ER	25.0				1994	6.7	10		0.42	44.0 (1.02%)		Serious	(2)
120	U. San Fernando	미국, CA	ER	25.0				1971	6.6	2		0.55	91.0 (2.15%)		Serious	(2)
121	Upper Howell	미국, CA	ER	11.0			Loma Prieta	1989	7.1	2.4		0.43			No Reported Damage	(8)
122	UpperLakeMary	Arizona	ER	13.0				1993	5.5	77		0.02	0.0 (0.00%)		None	(2)
123	UpperMura-Yama	일본	ER	24.0				1923	8.2	18		0.32	20.0 (0.74%)		Moderate	(2)
124	Uvas	미국, CA	ER	32.0				1967	5.3	11		0.2	2.0 (0.06%)		Minor	(2)
125	Uvas	미국, CA	ER	32.0				1984	6.2	29		0.14	2.0 (0.06%)		Minor	(2)
126	Uvas	미국, CA	ER	32.0			Loma Prieta	1989	7.1	8.8		0.43	2.0 (0.06%)		None	(2)
127	Vasona	미국, CA	ER	10.0				1989	7.1	9		0.37	5.0 (0.28%)		Minor	(2)
128	Vasona Percolation	미국, CA	ER	10.4			Loma Prieta	1989	7.1	8.8		0.38	4.9 (0.47%)	2.7 (0.26%)	Minor longitudinal crest crack, minor transverse crack near spillway	(8)
129	Vermilion	미국, CA	ER	50.0				1980	6.3	22		0.24	5.0 (0.05%)		None	(2)
130	Vessey	미국, CA	ER	6.1			Loma Prieta	1989	7.1	20.8		0.33			Minor Longitudinal Cracking on Crest, Reservoir Empty	(8)
131	WideCanyon	미국, CA	ER	26.0				1992	7.5	30		0.2	1.0 (0.04%)		Minor	(2)
132	Yucaipa No.1	미국, CA	ER	13.0				1992	6.6	28		0.15	1.0 (0.05%)		Minor	(2)
133	Yucaipa No.2	미국, CA	ER	15.0				1992	6.6	28		0.15	0.0 (0.00%)		Minor	(2)
134	Zipingpu	중국	CF	156	1.40	1.50	Wenchuan	2008	7.9	17.0	2.00	0.75	73.5 (0.47%)	38.0 (0.24%)		(15)