

# 표면차수벽형 석괴댐과 락필댐의 내진성능 비교를 위한 진동대시험 Shaking Table Test for Comparison of Seismic Performance of Concrete-Face Rockfill Dam and Earth Core Rockfill Dam

하익수\*      임은상\*\*      서민우\*\*\*      김용성\*\*\*\*  
Ha, Ik Soo   Lim, Eun Sang   Seo, Min Woo   Kim, Yong Seung

---

## ABSTRACT

In this study, 1-g shaking table tests on the model of CFR(Concrete-Face Rockfill) type "D" dam in operation and the model of virtual ECRD(Earth Core Rockfill Dam) of which static stability is about the same compared to the model of CFRD were carried out.

The purpose of this study is to compare the seismic performance of CFRD and ECRD from the analysis of model test results. Displacement response behavior of the dam was examined through the measurement of vertical and horizontal displacement of model dam crest. Also, amplification characteristics of accelerometers installed with dam height were examined through the measurement of acceleration with dam height. Also, in the case of ECRD, patterns of excess pore pressure generation with dam height were examined. From the test results, it was found that accelerations of dam crest of CFRD and ECRD were amplified about 1.52 times and 2 times compared to the accelerations of dam bottom, respectively. amplification was outstanding at three quarters of dam height from the bottom of dam. This phenomenon was outstanding in case of ECRD. And it was estimated that vertical and horizontal displacement of prototype dam of CFRD were 6.8cm (0.1% of dam height) and 12.3cm (0.2% of dam height), respectively. Also, it was estimated that vertical and horizontal displacement of prototype dam of ECRD were 4.3cm (0.1% of dam height) and 5.5cm (0.11% of dam height), respectively.

---

## 1. 서론

일반적으로 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete-Face Rockfill Dam, 이하 CFRD)은 콘크리트를 차수벽으로 이용하기 때문에 차수재로 점성토를 사용하는 중심코아형 락필댐(Earth Core Rockfill Dam, 이하 ECRD)에 비해 상대적으로 체체 강성이 크고, 차수가 댐 상류부 표면에서 이루어져 체체가 건조상태이므로 액상화나 과잉간극수압 증가에 따른 체체 재료의 강도저하가 없고,

\*    정회원.한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소, 선임연구원  
\*\*   비회원.한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소, 박사후과정  
\*\*\* 비회원.한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소, 선임연구원  
\*\*\*\* 비회원.한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소, 선임연구원

규모가 큰 지진에 대해 차수벽에 균열이 발생하여 누수량이 증가할 수 있으나 차수벽 지지존과 선택존을 통해 누수가 안정하게 처리되기 때문에 지진에 안정된 형식의 댐으로 알려져 있다(Seed et al., 1985).

본 연구에서는 현재 운영중인 CFR 형식의 D댐에 대해 상사비를 적용한 진동대 시험과 D댐과 높이가 같고 수치해석을 통해 거의 같은 정적안정성을 가지는 가상의 락필댐 시험단면을 결정하고 결정된 시험단면에 대해 진동대시험을 수행하여 그 결과를 비교·검토하여 CFRD와 ECRD의 댐 타입별 내진성능을 비교해 보았다. 실제 댐 제체 구성재료의 입도상사비를 고려하여 제작된 시료로 모형을 제작하고 모형댐에 대해 상시만수위까지 담수를 수행한 후, 댐이 위치한 지점의 설계 응답스펙트럼에 부합되는 인공지진파를 작성하여 모형체 바닥에 가하였다. 댐 정부의 연직·수평 변위를 계측하여 변위응답거동을 살펴보고, 제체 높이별로 설치된 가속도계 계측값을 통해 대상 댐의 가속도 증폭특성을 살펴보고, ECRD의 시험단면의 경우 깊이별 간극수압계를 설치하여 과잉 간극수압 발생 양상을 살펴 보았다.

## 2. 1-g 진동대시험을 위한 상사법칙

Iai (1989)는 평형방정식, 구성방정식, 변형을 정의 등을 연관한 지배방정식을 이용, 지반-구조물-유체 시스템에 관한 연구를 수행하여 1-g 진동대시험에 적용될 수 있는 상사관계를 표 1과 같이 제시하였다. 포화된 흙의 거동은 다음의 2가지 유형으로 분류된다; (1) 지반의 변형이 진동동안에는 계속 증가되나 진동이 멈추는 순간에는 바로 멈추는 경우, 지반거동은 Cyclic Mobility 유형으로 분류된다; (2) 지반변형이 진동이 멈춘 후에도 지속적으로 발생할 경우, 지반거동은 변형연화(strain softening) 유형으로 분류된다. Cyclic Mobility 유형의 경우, 지반구조물 시스템의 응답을 이해하기 위해서 변형율에 대한 상사비를 고려하는 것이 중요하다. 모형지반의 전단파 속도를 알 때 변형율 상사계수(Scaling factor)는 아래 식 (1)로 정의된다(표 1의 유형I). 전단파 속도를 모르는 경우에는 전단탄성계수는 구속압의 제곱근에 비례한다는 가정 하에서 변형율 상사계수는 식 (2)로부터 얻어질 수 있다(표 1의 유형II).

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left[ \frac{(V_s)_m}{(V_s)_p} \right]^2 \quad (1)$$

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5} \quad (2)$$

국내 및 일본 항만구조물의 경우, 유형 II의 상사계수를 적용하고 있으며 실제 댐구조물의 경우, 우리나라의 설계지진 하에서 구조물 거동이 대변형을 수반하지 않는 것을 전제로 하여 본 연구에서는 유형 II의 상사계수를 사용한 모형시험을 수행하였다.

## 3. 1-g 진동대시험 개요

### 3.1 대상 CFRD의 제원 및 관련정보

운영중인 D댐은 CFRD이다. 대표단면 및 단면구성은 그림 1과 같다. D댐은 경상남도 지역에 위치해 있으며 댐 높이는 52m이고 총저수량은 28.5백만 $m^3$ 이다. Graded rockfill zone의 평균입경은 55mm이고, Rockfill zone의 평균입경은 150mm이다.

표 1. 1-g 진동대시험을 위한 주 상사계수들 (Iai, 1989)

Quantity	Scaling factors (prototype/model)			
	Generalized scaling factor	Scaling factors in practice		
		Type I	Type II	Type III
		$\lambda_\rho=1$	$\lambda_\epsilon=\lambda^{0.5}, \lambda_\rho=1$	$\lambda_\epsilon=1, \lambda_\rho=1$
Length	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$
Density	$\lambda_\rho$	1	1	1
Time	$(\lambda_\rho \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda_\rho \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Acceleration	1	1	1	1
Displacement	$\lambda \lambda_\epsilon$	$\lambda \lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	$\lambda$
Stress/Pore Press.	$\lambda \lambda_\rho$	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$
Strain	$\lambda_\epsilon$	$\lambda_\epsilon$	$\lambda^{0.5}$	1

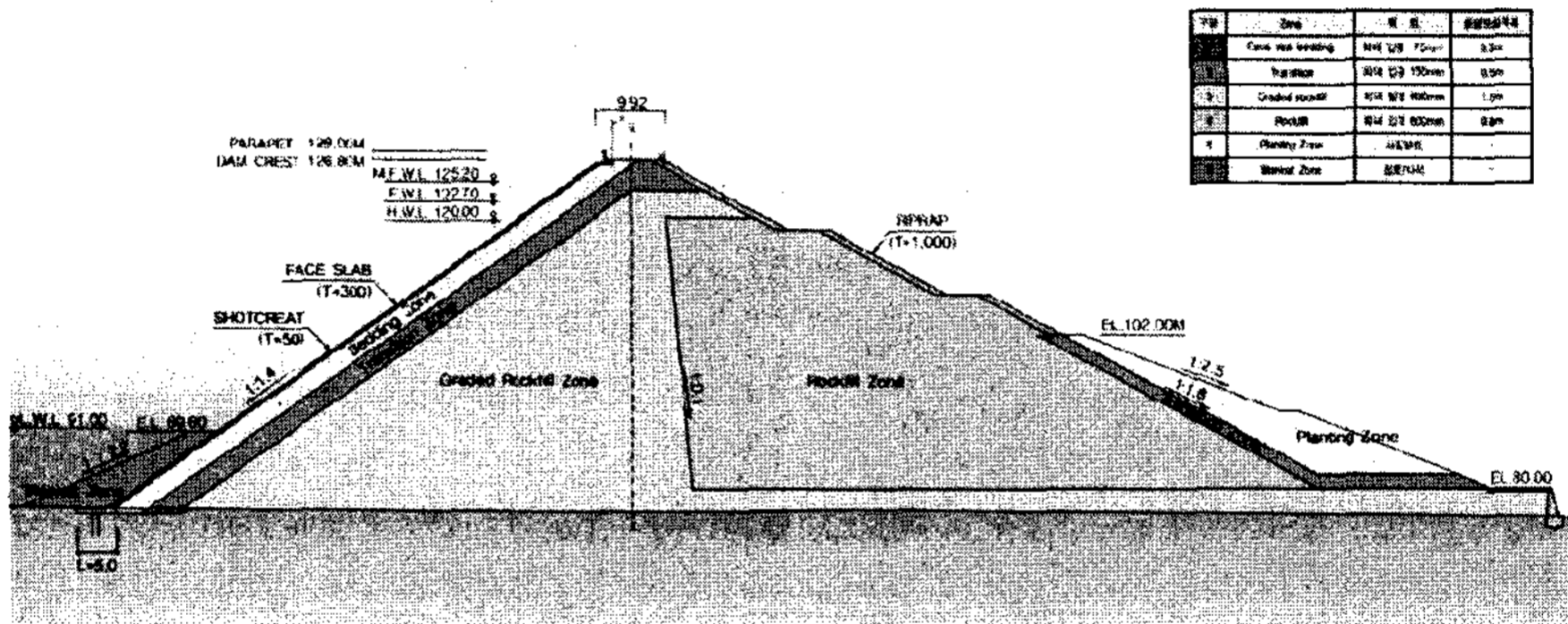


그림 1. D댐의 단면구성

### 3.2 상사비의 결정

모형화에 앞서 우선적으로 시험장비의 특성과 모형이 거치되는 모형상자의 크기를 고려하여 원형을 모형화하는데 요구되는 길이 상사계수를 결정하여야 한다. 원형 댐 높이가 52m이고 전단상자의 높이와 폭을 고려해 모형 전체가 전단상자안에 모형화 될 수 있는 최대크기를 고려한 결과, D댐은 모형상자 안에서 높이 35cm로 모형화되었다. 따라서, 길이 상사계수는 52/0.35하여  $\lambda=143$ 으로 결정하였다. 길이 상사비 결정과 표 1에 따라 결정한(유형 II 사용) 주요 상사계수는 표 2와 같다.

### 3.3 시험 모델 단면의 작성

#### 3.3.1 CFRD 모델 단면의 작성

길이에 대한 상사계수를 이용하여 모형체의 해석단면 및 계측기 배치도를 작성하였다. 그림 2는 해석 모형단면과 계측기 배치도를 나타낸 그림이다. 가속도 증폭특성을 살펴보기 위해서 모형바닥과 깊이별로 6개의 가속도계를 설치하였고 댐 정상부의 수직, 수평변위를 계측하기 위해 2개의 변위계를 설치하였다. CFRD는 담수가 되더라도 내부는 건조하기 때문에 담수는 비닐팩을 이용하여 물을 채워 담수에 의한 수압만이 고려될 수 있도록 하였다.

표 2. 시험에 적용된 주요 상사계수

구분	상사계수	1/143 모델의 상사계수
길이	$\lambda$	143
시간	$\lambda^{0.75}$	41.35
가속도	1	1
변위	$\lambda^{1.5}$	1710
응력/간극수압	$\lambda$	143

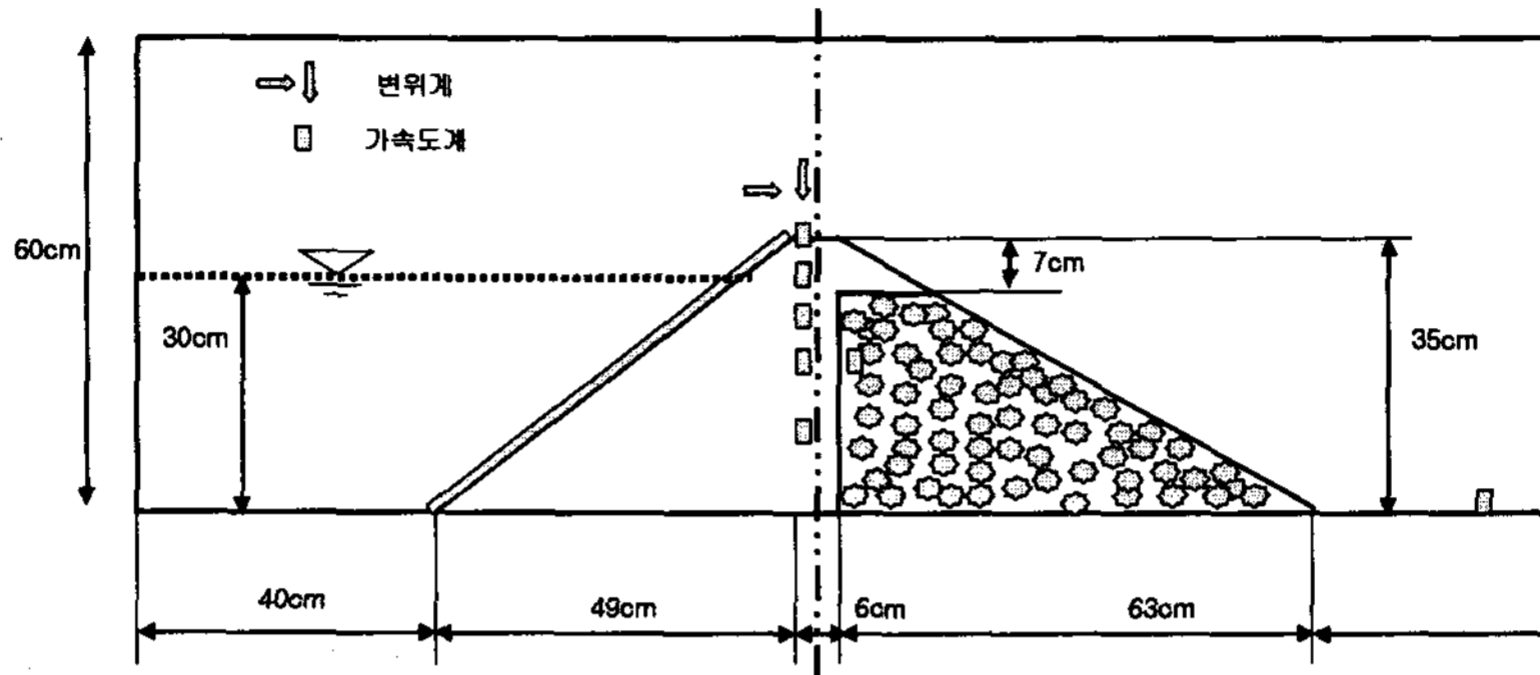


그림 2. CFRD 해석 단면 및 계측기 배치도

### 3.3.2 ECRD 모델 단면의 작성

CFRD와 ECRD의 동적 거동만을 비교·검토하기 위해서 우선 CFRD 시험단면(그림 3)에 대해 정적 수치해석을 수행하여 CFRD의 최대침하량을 산정하고, CFRD와 높이는 같고 댐사면의 기울기를 4가지(상·하류 1:1.8, 1:2.0, 1:2.2, 1:2.4)로 변화시킨 ECRD 단면(그림 4 참조)에 대해서도 각각 정적 수치해석을 수행하여 최대침하량을 산정한 후, CFRD의 최대침하량과 거의 같은 최대침하량을 갖는 사면의 기울기를 갖는 가상 ECRD 단면을 진동대 시험단면으로 결정하였다.

수치해석 결과, CFRD와 ECRD의 최대침하량은 댐 중앙부에서 발생하는 것으로 나타났으며, ECRD의 경우 Rockfill zone의 사면경사가 완만해질수록 최대침하량이 더 작아지는 것으로 나타났다. 그러나 Rockfill zone의 경사가 상당히 완만해지더라도 CFRD보다는 ECRD의 최대침하량이 항상 크게 발생하였는데 이는 ECRD의 최대침하량이 사면 경사보다는 core zone의 강성에 크게 의존하는 것에 기인하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 시험에서는 본 해석결과 중에서 CFRD와 최대침하량이 가장 근접한 경사를 가지고 시험 모형토조 크기에 부합하는 1:2.4 경사의 ECRD 단면을 시험단면으로 정하였으며 이상의 과정을 거쳐 작성한 시험단면은 그림 5와 같다.

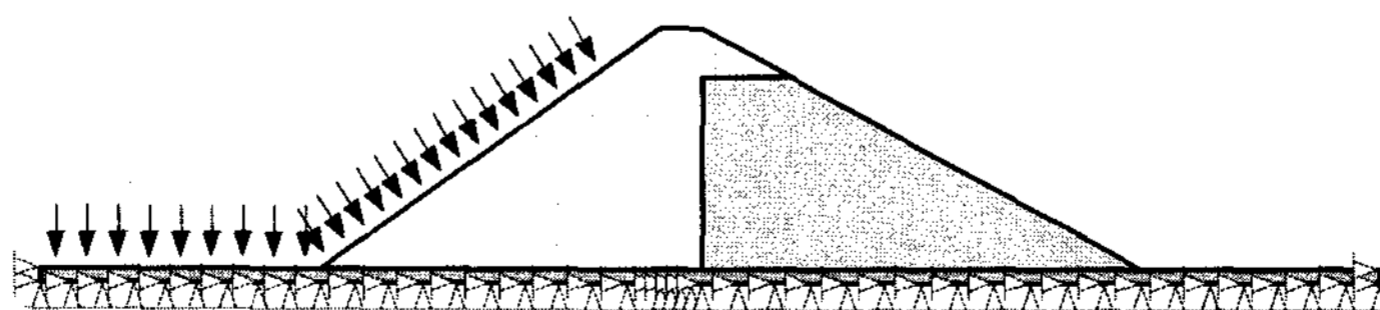


그림 3. CFRD의 단면 구성(상·하류 사면경사 1:1.4, 1:1.8)

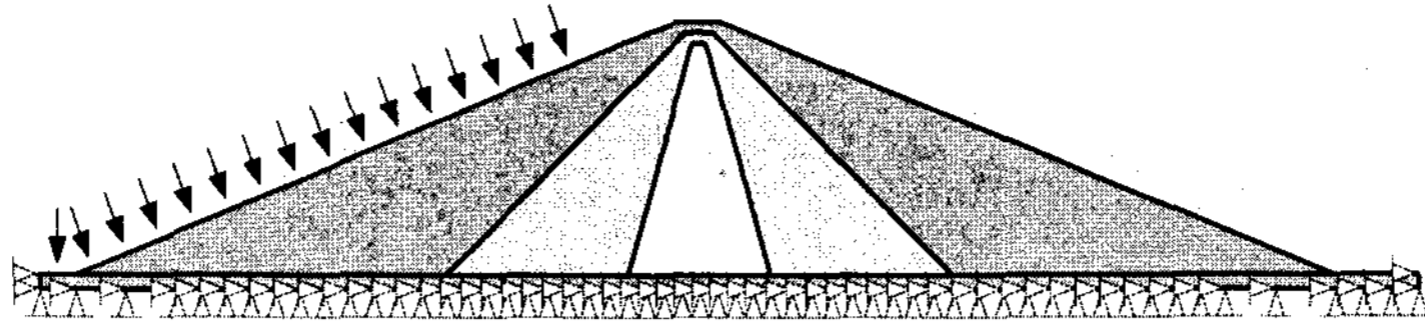


그림 4. ECRD의 단면 구성(상·하류 사면경사 1:2.4)

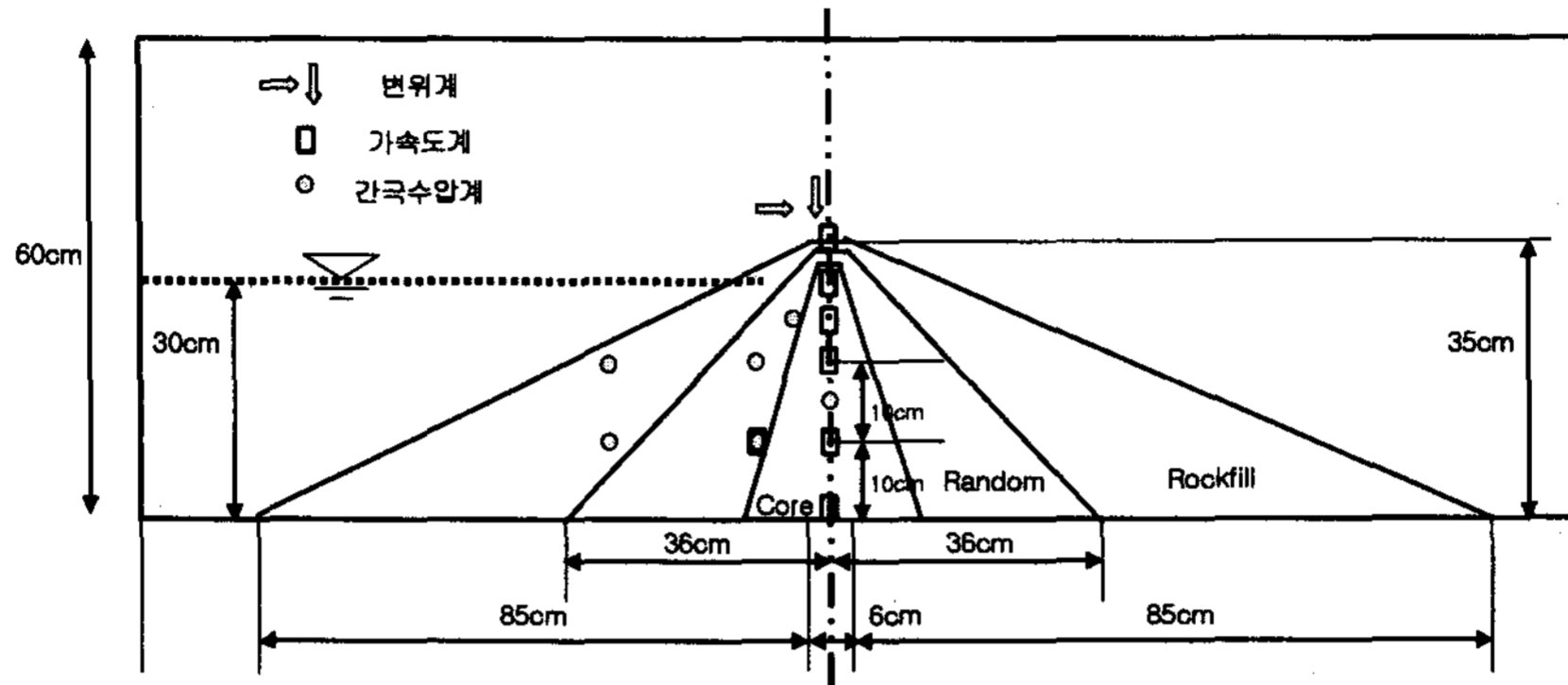


그림 5. 락필댐 시험단면도 및 계측기 배치도

### 3.4 시료의 준비

#### 3.4.1 CFRD 시료준비

시료는 길이 상사계수를 적용하여 준비하였다. Rockfill zone의 경우 원형 사석재의 평균입경이 150mm이므로 길이 상사비를 적용하여 평균입경이 약 1.0mm인 입도가 좋은 자갈-모래 혼합재료를 이용하였고, Graded rockfill zone의 경우 원형 사석재의 평균입경이 55mm이므로 길이 상사비를 적용하여 평균입경이 약 0.4mm인 입도가 좋은 모래 혼합재료를 이용하였다.

#### 3.4.2 ECRD 시료준비

가장 최근에 지어진 ECRD들에 사용되어진 사석재료의 평균입경을 조사한 결과, Rockfill은 150mm, Random은 45mm 인 것으로 조사되었다. 따라서, 상사비를 고려하여 CFRD 시험에 사용된 재료 중 Rockfill zone에 사용되었던 평균입경 1.0mm의 입도가 좋은 자갈-모래 혼합재료를 Rockfill 재료로 사용하였고 Graded rockfill zone에 사용되었던 평균입경 0.4mm인 입도가 좋은 모래 혼합재료를 Random 재료로 사용하였다. 코어재로는 점성토를 이용하였다.

### 3.5 설계지진계수 및 입력지진동의 결정

설계지진계수는 댐설계기준(2003)에 준하여 0.11g로 결정하였다. 대상댐이 위치한 지역의 설계응답스펙트럼에 부합하는 가속도의 최대크기가 0.11g이고 하중지속시간은 40초인 인공지진파를 생성하였다. 실제 진동대시험시에는 원형 가속도시간이력이 아닌 상사비가 적용된, 모형에서의 가속도시간이력이 입력된다. 따라서, 원형 가속도시간이력은 표 2에서 계산된 상사계수를 이용하여 시험용 가속도 시간이력이 생성되어야 한다. 이러한 절차로 생성된 입력지진 가속도시간이력은 그림 6과 같다.

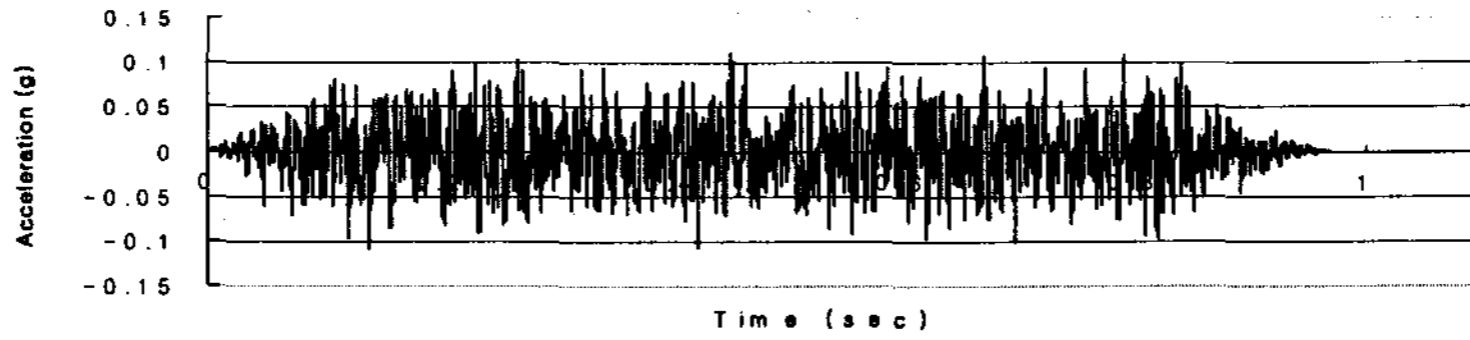


그림 6. 입력지진 가속도 시간이력

#### 4. 시험 결과 및 분석

##### 4.1 가속도 응답특성 분석

그림 7은 댐 타입별 댐 높이에 따른 최대 응답가속도의 증폭특성을 나타낸 것이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 CFRD와 ECRD 모두 댐높이에 따라 가속도의 증폭특성이 나타나고 댐 정상부는 댐 저부에 비해 CFRD는 약 1.52배, ECRD는 약 2배 정도 증폭되는 것으로 나타났다. 또한, 이러한 가속도 증폭은 댐 높이 3/4지점에서 급속하게 증폭됨을 확인할 수 있었고 이러한 급격한 가속도의 증폭 특성은 ECRD의 경우 더 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 등가정적해석을 위한 설계진도 입력시 댐 타입별 댐 정상부에서의 가속도의 증폭특성이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

##### 4.2 정상부 변위 응답특성 분석

CFRD와 ECRD의 원형으로 환산된 정상부 변위응답을 비교해 본 결과, 댐 정상부의 수평변위는 CFRD의 경우에는 12.3cm, ECRD의 경우에는 5.5cm로 나타났고, 댐 정상부의 수직변위는 CFRD의 경우에는 6.8cm, ECRD의 경우에는 4.3cm로 나타나 수평, 수직변위 모두 CFRD가 ECRD보다는 다소 크게 나타났다. 그러나, 두 형식의 댐 모두 수평·수직변위가 모두 댐 높이의 1% 보다 훨씬 작은 값으로 나타났다.

##### 4.3 ECRD 간극수압 발생 양상

그림 8은 ECRD 과잉간극수압 응답 시간이력을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 rockfill zone이나 random zone에서는 위치에 따라 다르기는 하나 과잉간극수압이 발생하는 반면, core zone에서는 과잉간극수압이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

표 3은 액상화 발생 여부를 판단하기 위해 각 위치에서의 락필댐 최대 과잉간극수압비를 나타낸 것이다. 여기서, 과잉간극수압비란 발생된 과잉간극수압을 유효연직응력으로 나눈 값으로 정의된다. 즉, 과잉간극수압비가 1이 되면 과잉간극수압과 유효연직응력이 같아짐을 의미하며 이는 곧, 그 위치에서 개략적으로 액상화가 발생되었음을 의미한다.

표 3과 그림 8에서 보는 바와 같이 상류사면 천부(P6 위치)에서는 순간적이거나 최대 과잉간극수압비가 1에 근접하여 액상화 발생 가능성이 있었음을 알 수 있다. 그러나, 발생위치나 그 범위가 매우 협소하여 전체적인 댐 안정성에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단되었다.

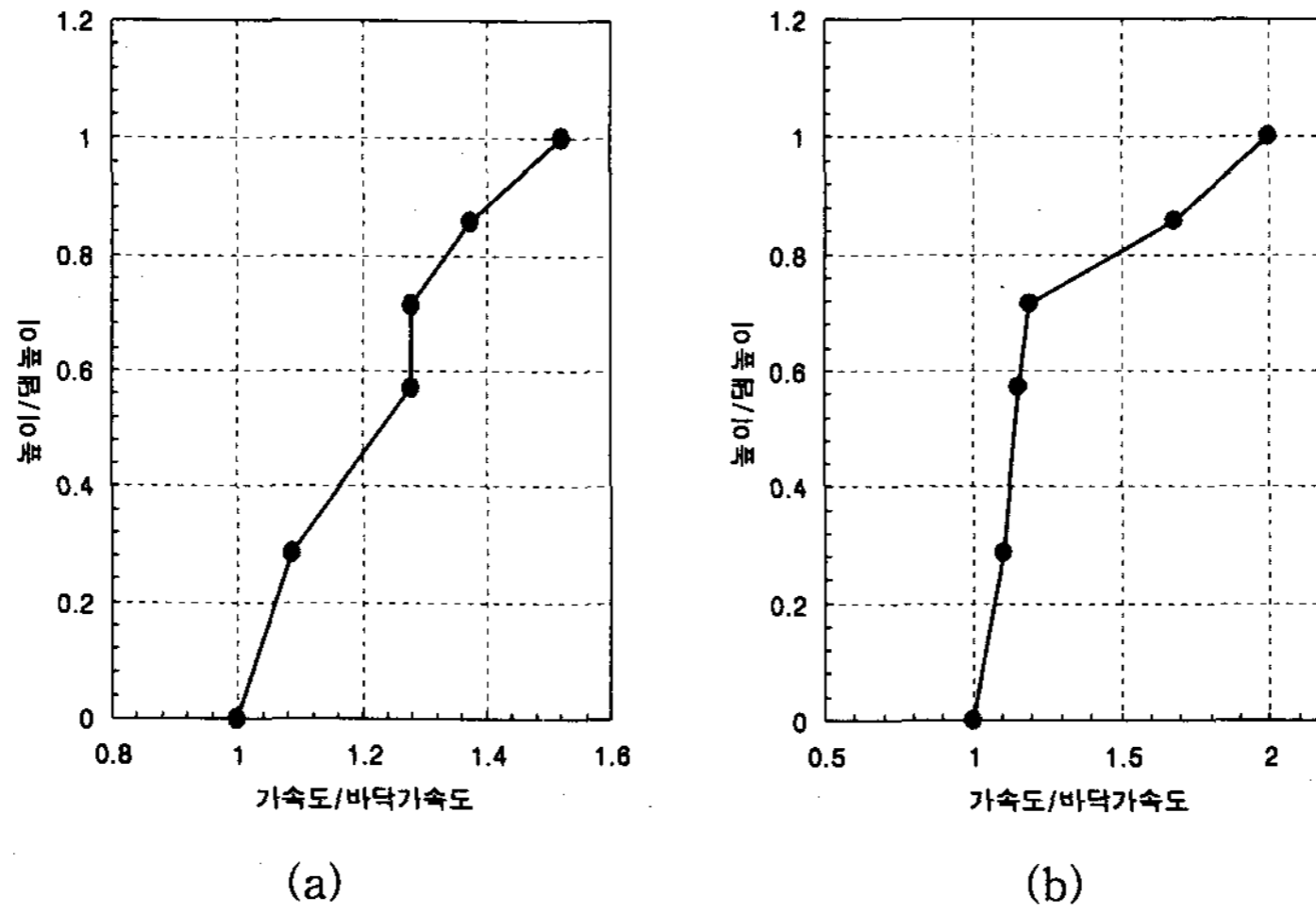


그림 7. 댐 높이별 가속도 증폭 특성: (a) CFRD; (b) ECRD

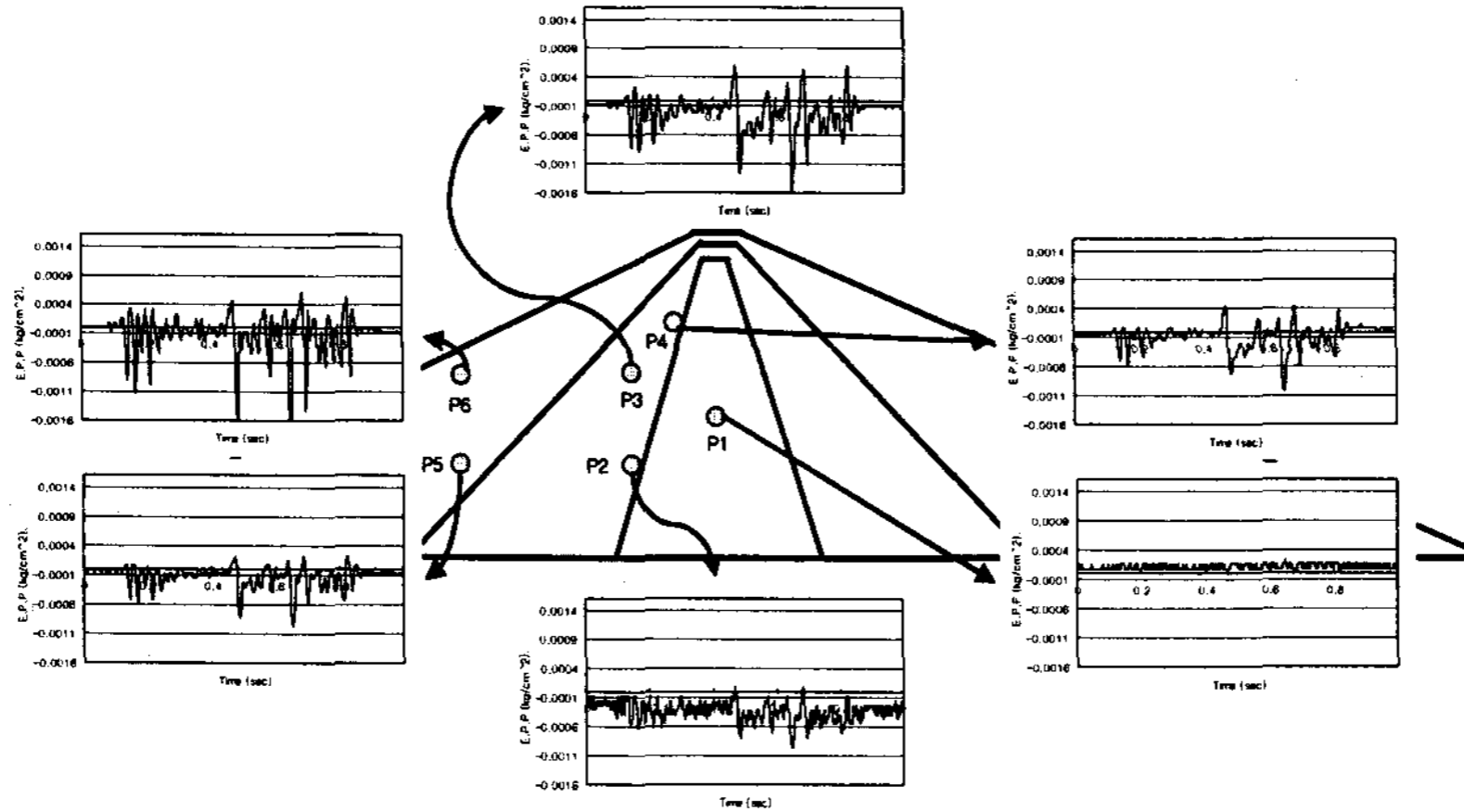


그림 8. ECRD 과잉간극수압 시간이력

표 3. 위치에 따른 락필댐 최대 과잉간극수압비

구분	계측기위치					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
유효연직응력(kg/m <sup>2</sup> ), $\sigma_v'$	0.0176	0.0178	0.0098	0.0112	0.0096	0.0016
발생과잉간극수압(kg/m <sup>2</sup> ), $p$	0.0002	0.0009	0.0016	0.001	0.0009	0.0016
과잉간극수압비, $\sigma_v' / p$	0.01	0.05	0.16	0.09	0.10	1.0

### 5. 결론

표 4는 본 진동대시험을 통해 얻어진 CFRD와 ECRD의 지진시 거동을 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 정상부 변위의 경우, CFRD가 ECRD에 비해서는 수직, 수평변위 모두 다소 크게 발생하였으나 그 크기는 두 형식 모두 댐 높이의 1%에 훨씬 못 미치는 것으로 나타났다. 댐 높이에

따른 가속도의 증폭특성은 두 형식 모두 댐 높이의 3/4이상부터 응답가속도가 급격히 증폭되는 것으로 나타났고 이러한 경향은 ECRD의 경우에 더욱 뚜렷하였다. CFRD의 경우 제체 내부에는 간극수가 존재하지 않으므로 액상화 발생 가능성은 없으나 ECRD의 경우 상류부 중단 천부에서 순간적이거나 액상화 발생이 예상되었다. 그러나, 그 위치나 범위가 협소하여 댐 전체 안정성에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단되었다.

전반적으로 두 형식의 댐 모두 설계지진가속도에 대해 안정한 것으로 나타났고 CFRD의 시공상 편의, ECRD의 큰 사면구배와 액상화의 가능성 등을 고려한다면 CFRD의 페이스 슬라브 시공과 관리만 잘 이루어진다면 CFRD의 내진성능은 우수한 것으로 판단된다.

모형의 크기가 작아 실험상의 오차가 실험결과에 영향을 미칠 수 있으나 향후 모형크기를 키우고 상사비에 대한 심도 깊은 연구가 수행된다면, 해석적 방법 외에 상사비를 적용하여 수행하는 진동대시험이 댐의 내진안정성 평가에 합리적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 진동대시험을 통한 CFRD와 ECRD 지진시 거동 비교

댐형식		CFRD	ECRD
거동 구분			
변위거동 (정상부 변위)	수직변위/댐높이, %	0.10	0.10
	수평변위/댐높이, %	0.20	0.11
	안정성평가 (기준: 댐높이 1%)	안정	안정
가속도 증폭 특성	정상부 가속도 증폭비	1.52배	2.0배
	증폭특성	댐 높이 3/4지점부터 급속 증폭	댐 높이 3/4지점부터 급속 증폭, 이러한 특성이 CFRD에 비해 훨씬 뚜렷함
간극수압 변화	과잉간극수압변화	간극수압 발생 없음	전반적으로 미미하나 상류부 중단 천부에서 순간적으로 큰 과잉간극수압 발생
	액상화 안정성	절대안정	과다 발생위치와 범위가 협소하여 전체안정성은 보장
전체 안정성 평가		안정	안정

참고문헌

1. 한국수자원학회(2003), 댐설계기준, pp.453~471
2. Iai, S.(1989), "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1-g gravitational field", Soils and Foundations, 29(1), pp.105~118.
3. Seed, H.B. and Seed R.B.(1985), "Seismic Design of Concrete Faced Rockfill Dams", Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction, and Performance, Pro. of a Sym. by Geotech. Engineering Div. of ASCE, pp.459~478.