

## 진동대시험을 이용한 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐의 내진성능 평가 Evaluation of Resistance of Concrete-Face Rockfill Dam to Seismic Loading Using Shaking Table Test

하익수<sup>1)</sup>, Ik-Soo Ha, 김용성<sup>1)</sup>, Yong-Seong Kim, 서민우<sup>1)</sup>, Min-Woo Seo, 박동순<sup>1)</sup>, Dong-Soon Park

<sup>1)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Water Resources Corporation

**개요(SYNOPSIS) :** In this study, seismic safety of CFRD(Concrete-Face Rockfill Dam) type "D" dam in operation is evaluated from the results of 1-g shaking table test using similitude laws. Model dam is made by similitude law considering the grain size of prototype dam component. After the model dam is impounded to the normal water level(N.W.L), it is excited by artificial earthquake wave corresponding to standard design respond spectrum of the "D" dam site. Displacement response behavior of the dam is examined through the measurement of vertical and horizontal displacement of dam crest. Also, amplification characteristics of acceleration with dam height is examined through the measurement of acceleration with dam height. Finally, the purpose of this study is to evaluate seismic safety of "D" dam in operation. From the results of acceleration measurement, it was found that acceleration of dam crest was amplified about 1.52 times compared to the acceleration of dam bottom and amplification phenomenon is outstanding at three quarters of dam height from the bottom of dam. From the analysis of displacement behavior, it was estimated that vertical displacement of prototype dam is 6.8cm (0.1% of dam height) and horizontal displacement 12.3cm(0.2% of dam height). These percentages is much lower than 1% of dam height(general stability criteria). Therefore, it was concluded that seismic stability of "D" dam against an estimated earthquake is guaranteed.

**주요어(Key words) :** shaking table test, similitude law, CFRD, seismic safety, dam, amplification

### 1. 서 론

콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(concrete-face rockfill dam, 이하 "CFRD"라 한다.)이란 그림 1과 같이 댐단면이 물과 접하는 상류부에 차수를 위한 프린스(plinth) 및 콘크리트 표면차수벽과 차수벽을 지지하는 차수벽 지지존 및 암석존으로 구성되는 댐을 말한다. CFRD는 콘크리트를 차수벽으로 이용하기 때문에 차수재로 점성토를 사용하는 락필댐에 비해 상대적으로 체체 강성이 크고, 차수가 댐 상류부 표면에서 이루어져 체체가 건조상태이므로 액상화나 과잉간극수압 증가에 따른 체체 재료의 강도저하가 없고, 규모가 큰 지진에 대해 차수벽에 균열이 발생하여 누수량이 증가할 수 있으나 차수벽 지지존과 선택존을 통해 누수가 안전하게 처리되기 때문에 일반적으로 지진에 안정된 형식의 댐으로 알려져 있다 (Seed et al., 1985).

본 연구에서는 현재 운영중인 CFRD 형식의 D댐에 대해 상사비를 적용한 1-g 진동대시험을 수행하여 D댐의 내진안정성을 평가하였다. 실제 댐 체체 구성재료의 입도상사비를 고려하여 제작된 시료로 모형을 제작하고 모형댐에 대해 상시만수위까지 담수를 수행한 후, 댐이 위치한 지점의 설계응답스펙트럼

에 부합되는 인공지진파를 작성하여 모형체 바닥에 가하였다. 댐 정부의 연직·수평 변위를 계측하여 변위응답거동을 살피고, 제체 높이별로 설치된 가속도계 계측값을 통해 대상 댐의 가속도 증폭특성을 살펴봄으로써 대상댐의 내진안정성을 평가하여 현재 운영 중인 댐의 내진안정성을 실험적으로 평가해 보았다.

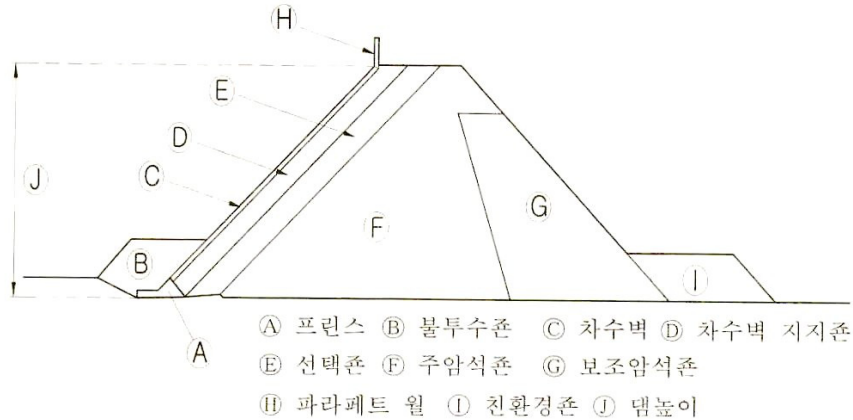


그림 1. CFRD 표준단면도(댐설계기준, 2003)

## 2. 1-g 진동대시험을 위한 상사법칙

1-g 진동대시험에서는 다음의 2가지 요소가 중요시 된다.; (1) 모형의 거동은 원형구조물을 모사할 수 있어야 한다; (2) 지반 구조와 간극수압 등 사이의 평형방정식과 질량 균형(mass balance)의 기본법칙이 모형과 원형 모두에 만족되어야 한다.

Iai (1989)는 평형방정식, 구성방정식, 변형률 정의 등을 연관한 지배방정식을 이용, 지반-구조물-유체 시스템에 관한 연구를 수행하여 1-g 진동대시험에 적용될 수 있는 상사관계를 다음의 표 1과 같이 제시하였다.

포화된 흙의 거동은 다음의 2가지 유형으로 분류된다; (1) 지반의 변형이 진동동안에는 계속 증가되거나 진동이 멈추는 순간에는 바로 멈추는 경우, 지반거동은 Cyclic Mobility 유형으로 분류된다; (2) 지반변형이 진동이 멈춘 후에도 지속적으로 발생할 경우, 지반거동은 변형률연화(strain softening) 유형으로 분류된다.

Cyclic Mobility 유형의 경우, 지반구조물 시스템의 응답을 이해하기 위해서 변형률에 대해 상사비를 고려하는 것이 중요하다. 모형지반의 전단파 속도를 알 때 변형률 상사계수(Scaling factor)는 아래 식 (1)로 정의된다(표 1의 유형I). 전단파 속도를 모르는 경우에는 전단탄성계수는 구속압의 제곱근에 비례한다는 가정 하에서 변형률 상사계수는 식 (2)(표 1의 유형II)로부터 얻어질 수 있다.

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

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

변형률연화 유형의 경우, 대변형이 연루되기 때문에 변형률 상사계수는 적용될 수 없다. 따라서, 모형의 거동은 모형지반의 상대밀도가 원형지반의 상대밀도에 비해 낮은 경우에만 원형의 거동을 모사할 수 있다. 이러한 경우에는 표 1의 유형 II의 상사계수가 적용될 수 있다.

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

표 1. 진동대시험을 위한 주 상사계수들 (Iai, 1989)

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

### 3. 1-g 진동대시험 개요

#### 3.1 대상 댐의 제원 및 관련정보

D댐의 형식은 CFRD이다. 대표단면 및 단면구성은 아래의 그림 2와 같다. D댐은 경상남도 지역에 위치해 있으며 댐 높이는 52m이고 총저수량은 28.5백만 $m^3$ 이다. Graded Rockfill zone의 평균입경은 55mm이고, Rockfill zone의 평균입경은 150mm이다.

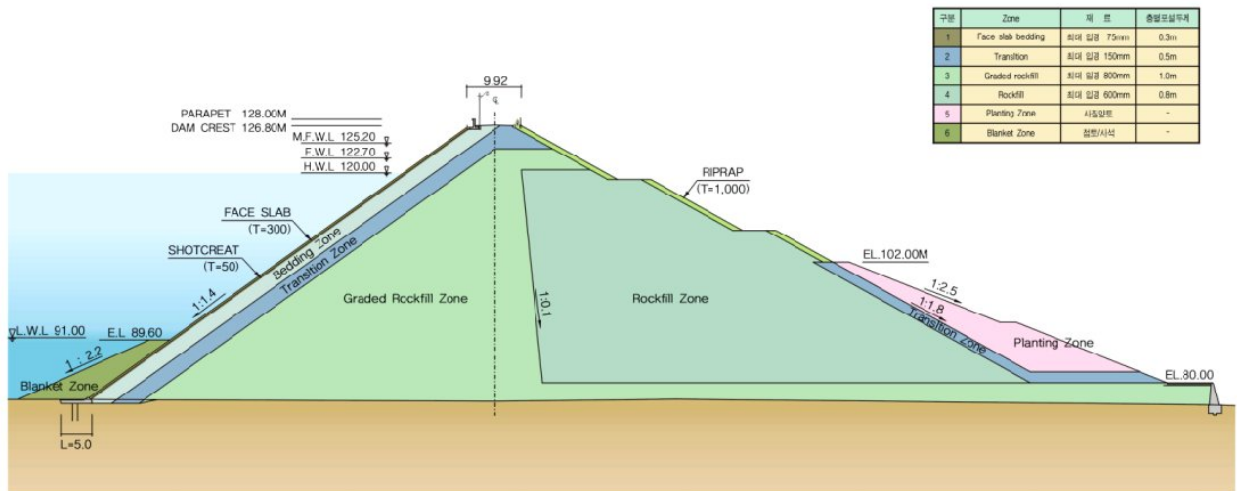


그림 2. D댐의 단면구성

### 3.2 상사비의 결정

모형화에 앞서 우선적으로 시험장비의 특성과 모형이 거치되는 모형상자의 크기를 고려하여 원형을 모형화하는데 요구되는 길이 상사계수를 결정하여야 한다. 그림 3은 시험에 사용된 전단상자를 보여주는 그림이다. 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  $52/0.35$ 하여  $\lambda=143$ 으로 결정하였다. 길이 상사비 결정과 표 1에 따라 결정한(유형 II 사용) 주요 상사계수는 표 2와 같다.

### 3.3 시험 모델 단면의 작성

길이에 대한 상사계수를 이용하여 모형체의 해석단면 및 계측기 배치도를 작성하였다. 그림 4는 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.

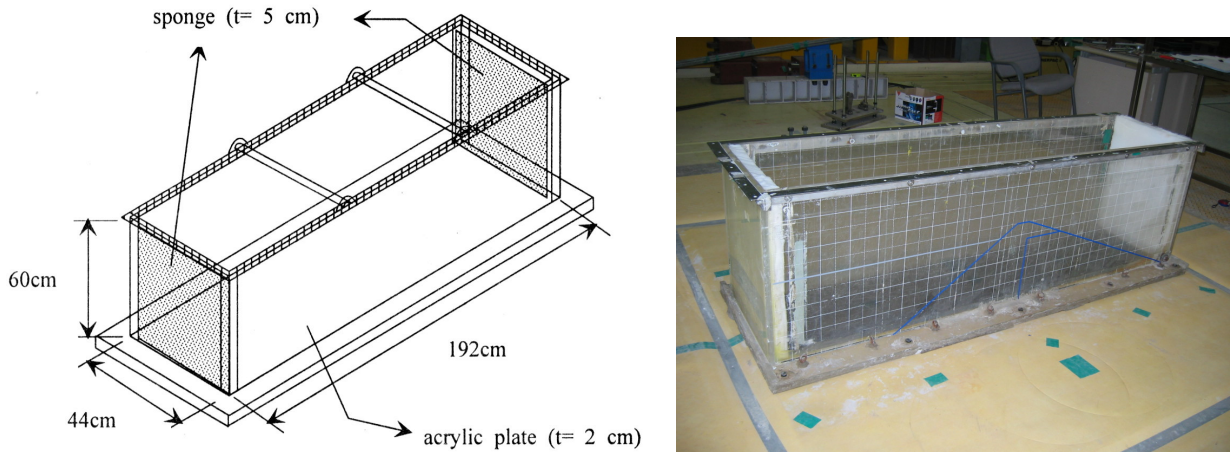


그림 3. 시험에 사용된 전단상자

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
힘(N)	$\lambda^3$	2924207

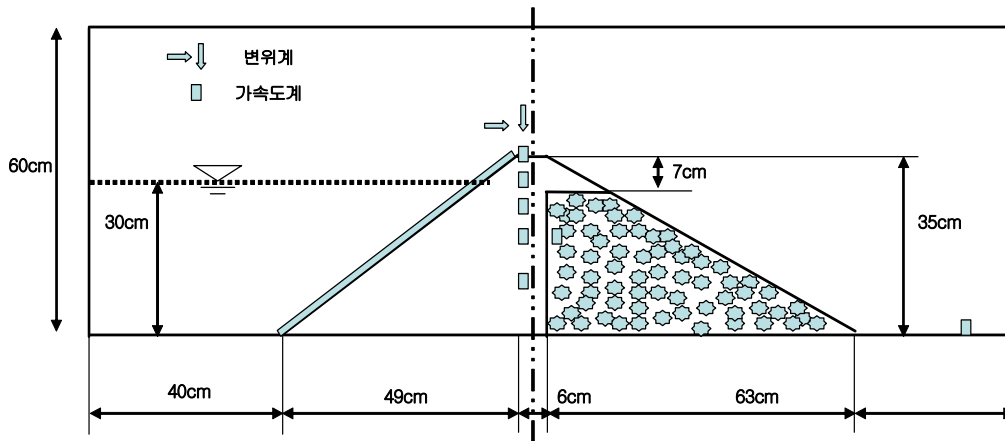


그림 4. 해석 단면 및 계측기 배치도

### 3.4 시료의 준비

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

### 3.5 설계지진계수 및 입력지진동의 결정

설계지진계수는 댐설계기준(2003)에 준하여 표 3과 같이 결정하였다. 대상댐이 위치한 지역의 설계응답스펙트럼에 부합하는 가속도의 최대크기가 0.11g이고 하중지속시간은 40초인 인공지진파를 생성하였다. 실제 진동대시험시에는 원형 가속도시간이력이 아닌 상사비가 적용된, 모형에서의 가속도 시간이력이 입력된다. 따라서, 원형 가속도시간이력은 표 2에서 계산된 상사계수를 이용하여 시험용 가속도 시간이력이 생성되어야 한다. 이러한 절차로 생성된 입력지진 가속도시간이력을 그림 5에 나타내었다.

표 3. D댐 설계지진계수

대곡댐	지진구역구분	구역계수(I)	위험도계수 (500년 빈도)	설계지진계수 (g)	비고
	경상남도	0.11	1.0	0.11	

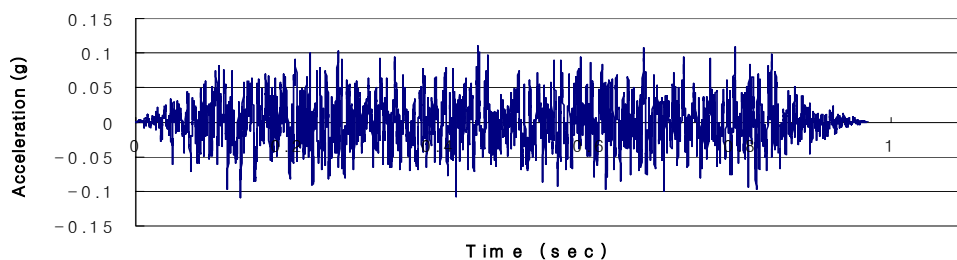


그림 5. 입력지진 가속도 시간이력

## 4. 시험 결과 및 분석

### 4.1 가속도 응답특성 분석

그림 6은 댐 높이별 가속도 응답 시간이력 결과이며, 그림 7은 댐 높이에 따른 최대 응답가속도를 나타낸 그림이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 높이에 따라 가속도의 증폭특성이 나타나고 댐 정상부는 댐 저부에 비해 약 1.52배 정도 증폭되는 것으로 나타났다. 또한, 이러한 가속도 증폭은 댐 높이 3/4지점에서 특히 증폭됨을 확인할 수 있다. 따라서, 등가정적해석을 위한 설계진도 입력시 이러한 댐 정상부에서의 가속도의 증폭특성을 고려해야 할 것으로 사료된다.

### 4.2 변위 응답특성 분석

그림 8은 댐 정상부의 응답변위 시간이력을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 수직변위는 0.04mm, 원형상에서는 6.8cm( $0.04 \times \lambda^{1.5} = 0.04 \times 1710$ ), 수평변위는 입력하중 중 주 하중이 가해지는 시각에서 최대변위가 발생하였으며 모형상에서는 0.072mm, 원형상에서는 12.3cm( $0.072 \times \lambda^{1.5} = 0.04 \times 1710$ )로 나타났다.

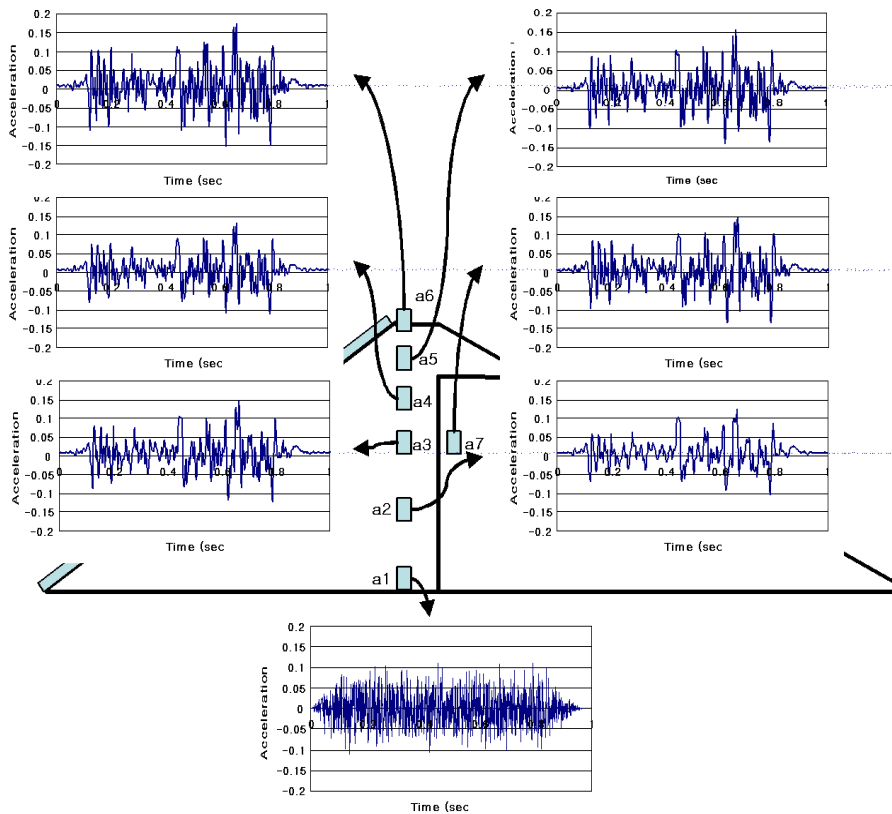


그림 6. 응답가속도 시간이력

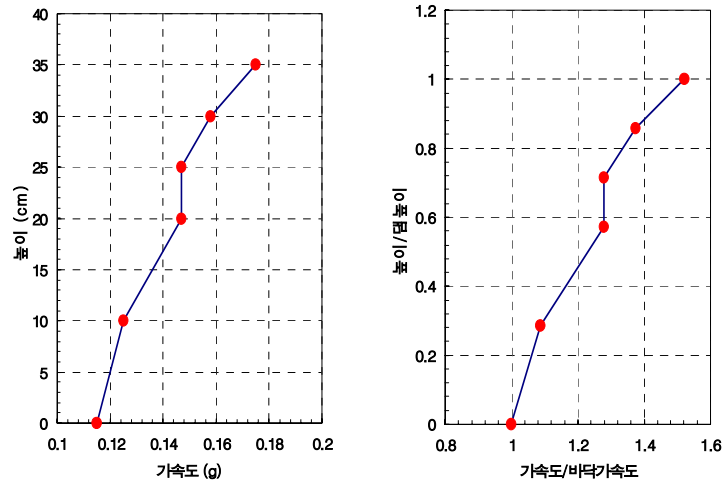


그림 7. 댐 내 가속도 증폭 특성

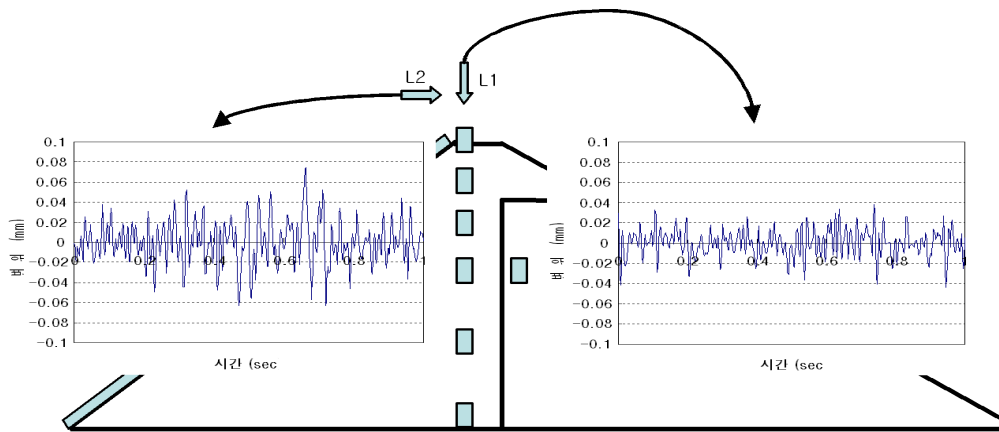


그림 8. 응답변위 시간이력

### 4.3 안정성 평가

응답변위 해석으로부터 수직변위는 6.8cm로 댐 높이의 0.1%이고, 수평변위의 경우는 12.3cm로 댐 높이의 0.2%로 모두 댐 높이의 1%에 비해 훨씬 작은 변위이므로 “기존 댐의 내진성능 평가 및 향상 요령, 2004” 기준과 비교하여 D댐은 예상 지진(g)에 대해 안전한 것으로 판단되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 현재 운영중인 CFRD 형식의 D댐에 대해 상사비를 적용한 1-g 진동대시험을 수행하여 D댐의 내진안정성을 실험적으로 평가하였다. 모형댐에 설치한 가속도계와 변위계 계측자료를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 댐 저부에서의 가속도는 댐 높이가 증가함에 따라 커지는 가속도의 증폭특성이 나타났고 댐 정상부에서의 가속도 응답은 댐 저부의 가속도에 비해 약 1.52배 증폭되는 것으로 나타났다. 이러한 가속도 증폭은 댐 높이 3/4지점에서 특히 두드러지는 것으로 나타났다. 따라서, 등가정적해석을 위한 설

- 계진도 입력시 이러한 댐 정상부에서의 가속도의 증폭특성을 고려해야 할 것으로 판단된다.
2. 입력지진하중에 대한 댐 정상부의 응답변위 시간이력을 살펴본 결과, 원형댐의 수직변위는 6.8cm(댐 높이의 0.1%), 수평변위는 12.3cm(댐 높이의 0.2%)로 추정되어 모두 댐 높이의 1%에 비해 훨씬 작은 변위이므로 “기존 댐의 내진성능 평가 및 향상 요령, 2004” 기준과 비교하여 D댐은 예상 지진(g)에 대해 안전한 것으로 판단되었다.
  3. 모형의 축소비가 작아 실험상의 오차가 실험결과에 영향을 미칠 수 있으나 향후 모형크기를 키우고 상사비에 대한 추가적인 연구가 수행된다면, 해석적 방법 외에 상사비를 적용하여 수행하는 진동대 시험이 댐의 내진안정성을 합리적으로 평가할 수 있는 좋은 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 한국수자원학회(2003), **댐설계기준**, pp.453~471.
2. 한국시설안전기술공단(2004), **기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령**, pp.98~99.
3. 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.
4. 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 in Conj. with ASCE Convention in Detroit, Michigan*, pp.459~478.