

## 필댐의 지진응답 해석 Dynamic Response Analysis of Rockfill Dam

이종욱\*                  신동훈\*\*                  오병현\*\*                  정우성\*  
Lee, Jong-Wook          Shin, Dong-Hoon          Oh, Byung-Hyun          Jung, Woo-Sung

---

### ABSTRACT

When we design the large rockfill dams, the safety of dams against the quake must be considered. Generally, pseudostatic analysis method has been used for slope stability and evaluation of safety but the case of dynamic response analysis of earthquake was not in general in Korea. Therefore, we need to perform the dynamic response analysis of rockfill dams, from these results we analyze the dynamic behavior of dam body such as response displacement and response acceleration.

Consequently, we analyse the selected model of rockfill dam, using the FLAC-2D(FDM) program.

---

### 1. 서론

최근에 국내의 지진발생 빈도가 증가하고 지진규모가 커지고 있어 가까운 장래에 인명과 사회-경제 시스템에 큰 피해를 초래할 수 있는 대규모 지진 발생이 우려되고 있다. 이러한 지진발생에 따른 지진재해에 대응하기 위하여 건설교통부 등의 관련기관에서 국가적 차원의 차세대 내진설계 기준 연구를 하였으며, 과학기술부에서는 각종 주요시설물의 내진안정성 및 내진성능향상에 관한 연구가 진행되고 있다. 외국의 경우에도 미국, 유럽, 일본 등의 국가에서 주요 구조물의 내진설계 기준 및 내진안정성 평가가 재검토되고 있다. 일반적으로 지진에 대한 댐의 거동분석은 사면안정 해석과 응력-변형해석에 의한 지진응답분석으로 나누어진다. 현재 건설되어 운영중이거나 건설중인 댐들은 댐시설기준(건교부, 1993)에 의해 지진에 대한 안정성을 정역학적인 방법에 의해 고려하고 있으며 지진발생시의 사면안정해석은 일반적으로 사용되고 있다.

지진시의 댐의 지진응답을 정밀하게 분석할 필요가 있으나 현재 국내에서 동적응답해석(Dynamic Response Analysis)을 한 예는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 사력댐을 대상으로 지진에 의한 동적응답을 유한차분(FDM) 프로그램인 FLAC-2D를 이용해서 해석하고 그 거동특성을 분석하고자 한다.

---

\* 한국수자원공사 수자원 연구소, 연구원

\*\* 한국수자원공사 수자원 연구소, 선임연구원

## 2. 동적해석방법

지진에 대한 댐의 거동해석은 댐체의 정적해석(static analysis)과 동적해석(dynamic analysis)으로 구분되며 그림 1에 자세히 설명된다. 해석의 흐름을 간단히 설명해보면 우선 정적해석시 축조 재료의 정적특성치를 이용하여 댐의 축조과정을 모델링 하고 일정 저수위 조건으로 칩투류 해석을 하여 정적응력과 변형을 산정해낸다. 앞에서 해석한 정적응력-변형 상태에 입력지진파와 축조 재료의 동적물성치를 결정하고 동적해석을 하여 동적응력과 변형을 산정한다.

위의 정적해석과 동적해석에 사용된 FLAC의 경우 지배방정식의 해를 구하는 방법은 유한 차분법으로서 이는 요소의 각 절점에 구성된 아주 적게 세분된 timestep으로 이전의 timestep에서 구한 값을 초기값으로 방정식의 해를 구하는 방법이며 평형상태에 도달할 때까지 반복계산을 수행하여 최종해를 구하는 것이다. 또한 어떠한 프로그램이든지 동적해석을 하는데 있어서 대개 수치 알고리즘 상에는 나타나지 않지만 손실을 고려할 필요가 있으며 본 프로그램에서는 Rayleigh Damping을 사용하고 있다

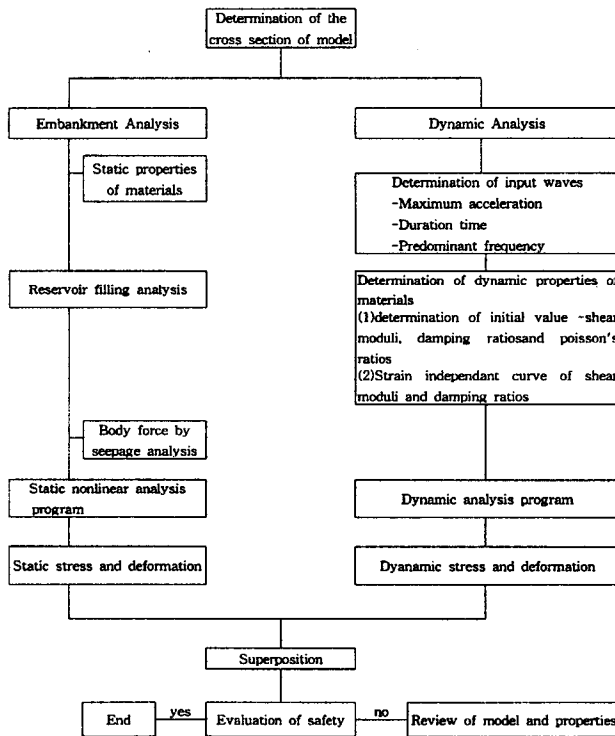


그림 1 동적해석 순서

### 3. 해석대상 댐의 제원

대상 댐의 주요제원은 다음의 표 1과 같으며, 해석단면은 다음의 그림 2와 같다.

표 1 대상 댐의 주요제원

댐 타입	높이(H)	저폭(L)	상류사면 기울기	하류사면 기울기
중심코아형 록필댐	123 m	543 m	1:2.6	1:2.0

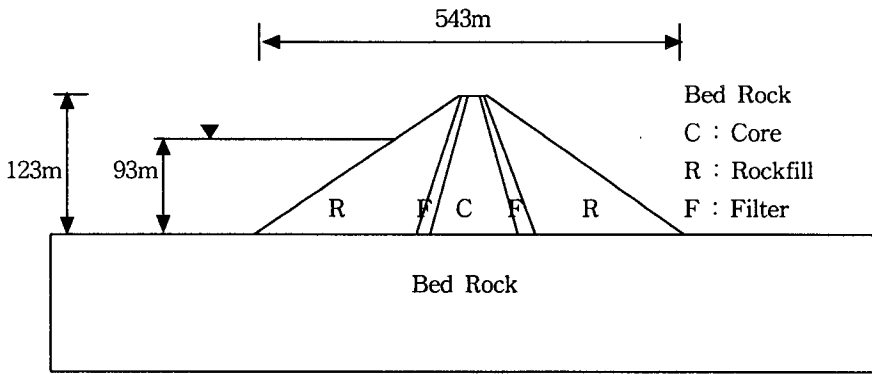


그림 2 동적해석 단면 모델

### 4. 해석 대상 댐의 입력지반 특성

본 연구에서 사용한 축조재료의 입력물성치는 동적삼축압축시험 또는 resonant column 시험에 의하여 실험적으로 구해야 하지만 실제 시험을 하지 못한 관계로 외국의 유사한 형태의 댐의 입력지반물성치를 사용하였다. 다음의 표 2의 값들은 동적해석 프로그램의 입력지반 물성치이다. 일반적으로 대부분의 동적변형해석 프로그램들에서는 동적 변형에 대한 재료 내부의 에너지 손실 즉 감쇠정수(Damping ratio)를 고려할 필요가 있으며, 구조물의 연속체 해석시 자유진동모드를 감쇠 시키는데 일반적으로 Rayleigh Damping을 사용한다. 감쇠정수(Damping ratio)의 경우 일반적으로 토체의 경우 2~5%의 값이 적정하며 이중 4%로 결정하였다. 자연진동수(Natural Frequency)는 중앙차수벽형 사력댐의 경우 댐체의 높이에 따른 다음의 경험식 식 1에 의하여 1.63HZ로 결정하였다.

$$T = 0.005H \quad (\text{식 1})$$

$$f_n = \frac{1}{T} \quad (\text{식 2})$$

여기서 T : natural period  
H : height of dam(m)  
 $f_n$  : natural frequency

표 2 축조재료의 입력물성치

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Shear Modulus (MPa)	Bulk modulus (MPa)	Permeability k (cm/sec)	internal friction (degree)	Cohesion (MPa)
Zone 1 (Core)	2200	18.52	55.56	$5 \times 10^{-9}$	36°	0.037
Zone 2 (Filter)	1900	36.15	78.33	$1 \times 10^{-6}$	38°	0
Zone 3 (Rockfill)	2100	54.17	72.22	$1 \times 10^{-4}$	45°	0
Bed Rock	2400	833.33	111.11	$1 \times 10^{-11}$	45°	0.8

## 5. 입력지진파

FLAC에서의 입력지진파는 모델의 x-y축에 해당하는 x 방향과 y 방향으로 가할 수 있으며, 또는 모델의 경계면에 직각방향 및 전단방향으로도 가할 수 있다. 본 연구에서는 수평방향 즉 x축방향으로만의 동적해석을 수행하였다. 해석에 사용된 입력지진파는 수정SMSIM11을 이용하여 인공지진파를 작성하였으며 그의 가속도는 0.1g이고 지속시간은 5초이다. 입력지진파는 그림 3에 보여진다.

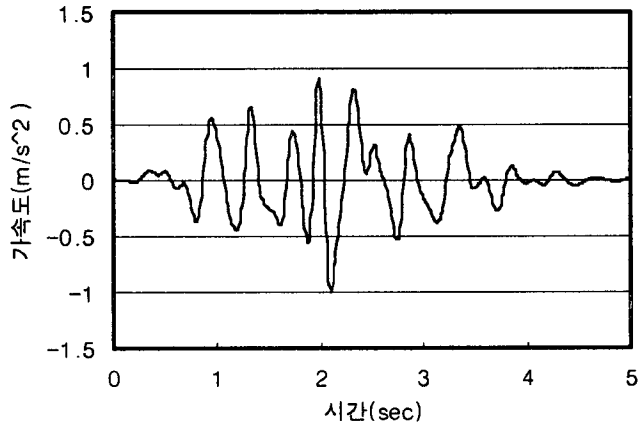


그림 3 입력지진파(0.1g 5sec)

## 6. 해석결과

### 6.1 변위특성

댐체에 가속도 0.1g의 입력지진파를 5초간 가하여 동적변위응답을 측정한 결과 최대수평변위는 상류사면 상단부(약 100m 지점)와 하단부(약 50m지점)에서 일어났으며 최대 수직변위는 댐 정상부로부터 댐전체 높이의 1/3지점에서 일어났다. 수평방향 및 수직방향 각각에 대한 변위는 다음의 그림 4 와 5에 보여지며 지진파가 가해진 후 댐체의 전체적인 변위 양상은 다음의 그림 6과 같다.

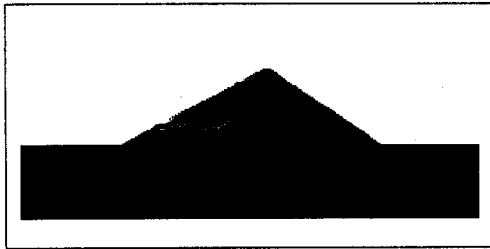


그림. 4 수평변위

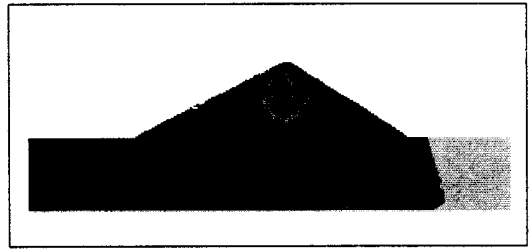


그림 5 수직변위

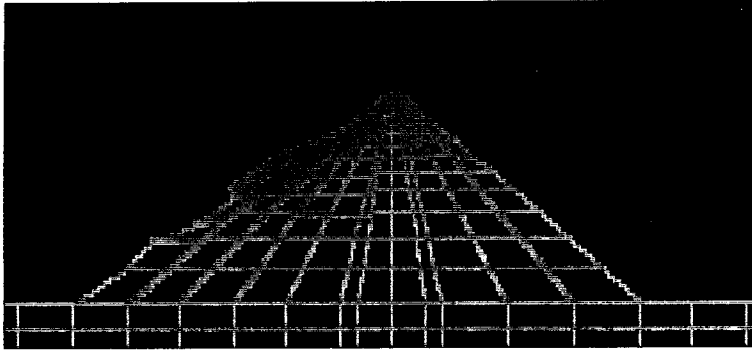


그림 6 지진파에 의한 상류사면의 변형

### 6.2 댐체 높이별 지진응답가속도

일반적으로 댐체에 지진파가 가해졌을 때 댐정상부로 갈수록 지진응답가속도는 증폭되는 현상을 나타낸다. 모델 댐에 지진응답해석을 한 결과 다음의 그림 7, 8, 9, 10와같이 높이에 따라서 지진응답가속도를 측정하였다. 높이별 수평가속도를 시간에 따라서 도시한 결과 그림 11와 같은 경향을 나타내었다. 그림 12는 높이별 최대수평가속도 분포를 도시한 것으로 기초저면에서 댐체저면까지는 증가되는 경향을 나타내었으며 댐체저면에서 댐 정상부의 경우에는 체체의 중간높이까지는 감소하다가 다시 약간의 증가현상을 나타내었다..

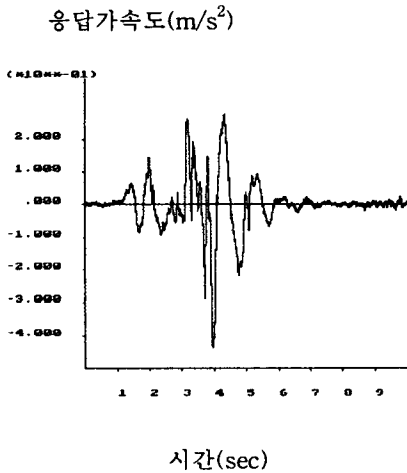


그림 7 댐정상부에서의 지진응답

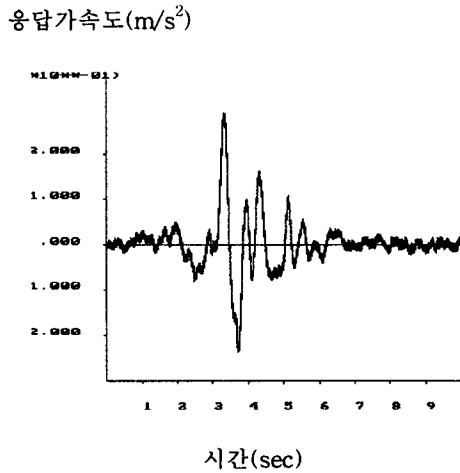
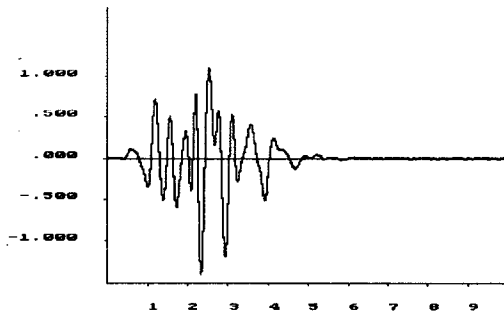


그림 8 댐체 중간높이에서의 지진응답

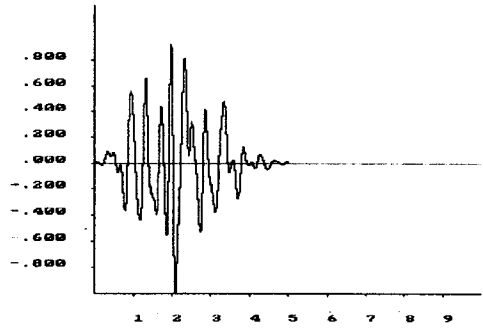
응답가속도(m/s<sup>2</sup>)



시간(sec)

그림 9 램체의 저면에서의 지진응답

응답가속도(m/s<sup>2</sup>)



시간(sec)

그림 10 기초저면에서의 지진응답

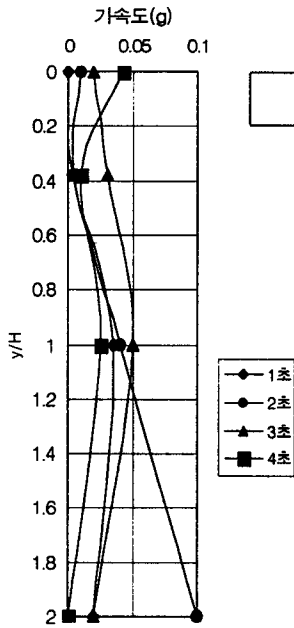


그림 11 시간에 따른 수평가속도 변화 분포

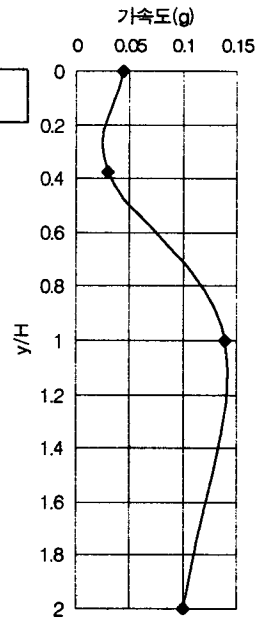
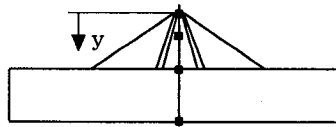


그림 12 높이에 따른 최대수평가속도 분포

## 7. 결론

인공지진파를 이용하여 사력댐에 대하여 동적해석을 결과 상류사면 하단부에서 상류방향으로 최대수평변위가 일어났으며 최대 수직변위는 댐 정상부로부터 댐전체 높이의 1/3지점에서 발생되었다.

일반적으로 댐체에 지진파가 가해졌을 때 높이에 따라서 지진응답가속도는 증폭현상을 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 모델 댐에 지진응답해석을 한 결과 최대응답가속도가 댐체 저부에서 정상부(crest)로의 중간높이까지는 감소하다가 다시 약간 증가되는 특성을 확인하였다. 또한 입력지진파의 작용위치 및 기초의 심도의 깊이에 따라서 해석결과에 영향을 미치는 것으로 판단되며 앞으로의 연구에 입력지진파의 작용위치와 기초의 깊이에 따른 수평가속도 분포특성에 미치는 영향을 고려해야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 국내에 기존에 측정된 입력지진파에 대한 데이터의 부족으로 인공지진파를 사용하여 해석을 수행하였으며 또한 축조재료의 동적물성치에 대한 데이터 부족으로 외국의 유사한 댐의 입력물성치를 이용하였다. 사력댐에 대한 지진응답해석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 사력댐 축조재료의 동적특성을 실험연구를 통하여 결정해야하며 실제 지진시의 응답계측결과와 비교 검토가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 과기부산하 STEPI의 지진재해대응기술개발사업의 일환으로 연구비를 지원 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 오병현, 신동훈, 김형수, 정우성, "댐 내진 안정성에 관한 기초 연구", 한국수자원공사, 수자원 연구소, 1997, 12
2. ITASCA Consulting Group, "FLAC User's Manual", 1996
3. 日本 土木學會, "エネルギー-施設", 動的解析と耐震設計 第3卷 1989, 6.
4. Norihisa Matsumoto et al, "Dynamic Analysis of a Rockfill Dam", Technical Memorandum of PWRI No. 2637, May, 1988