

# 중력식콘크리트댐의 동적거동분석

## The Analysis of Dynamic Behavior of Concrete Gravity Dam

임정열<sup>1)</sup>

이종욱<sup>2)</sup>

오병현<sup>3)</sup>

Lim, Jeong Yeul Lee, Jong Wook Oh, Byung Hyun

---

### ABSTRACT

In this study, it was performed that the seismic response analysis using long period earthquake wave and short period earthquake wave on dynamic behavior of concrete gravity dam. The results showed that if the same magnitude earthquake waves acted on concrete dam, the maximum displacement and stress at dam crest of long period wave(Ofunato wave) were about 30 % larger than those of short period wave(Hachinohe wave). And the response acceleration of dam crest was amplified about 5 times in long period earthquake wave and about 3 times in short period earthquake wave.

---

### 1. 서론

댐의 거동을 분석하는데는 크게 정적과 동적거동으로 나눌 수 있다. 특히 댐의 동적거동은 정적거동과 구별이 되며, 지진하중은 댐의 동적거동에 큰 영향을 미칠수 있는 동적하중으로 근래 들어 국내에서 발생하는 지진은 횡수가 증가하고 그 규모도 커지고 있어 이에 대비한 내진설계 및 지진응답해석이 필요하다. 이에따라 지진재해에 대응하기 위하여 건설교통부 등의 관련기관에서 국가적 차원의 차세대 내진설계기준 연구를 하였으며(건설교통부, 1997), 과학기술부에서는 각종 주요시설물의 내진 안정성 및 내진성능향상에 관한 연구가 진행되고 있다.

동적하중은 하중의 방향과 시간, 그리고 외부조건에 따라 변하고 정적하중과 같이 일정한 방향으로 작용하는 것이 아니기 때문에, 작용하는 동적하중은 위의 조건을 고려하여 지진응답해석을 실시하여야 한다. 이러한 하중은 시간적 변화에 따라서 댐의 동적 거동 응답 특성과 결합되어 정적거동과 전혀 다른 효과를 가져온다.

따라서 본 연구에서는 기존 콘크리트댐을 모델로 실측된 장·단주기 지진파를 이용하여 댐체의

---

1) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

2) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

3) 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

지진응답 증폭현상 및 동적거동 특성을 분석하고자 지진응답해석을 실시하였다.

## 2. 댐 거동 분석 방법

### 2.1 해석조건

중력식 콘크리트댐의 해석 단면은 설계최대단면을 설정하였으며, 콘크리트 물성치는 설계기준 강도(내구년수에 따라 강도 증가)를 기준으로 결정하였다.<sup>(3)</sup>

콘크리트댐의 경우 제체와 기초암반을 포함해 모델화하여 기초암반에 지진동을 입력하는 경우와 댐 체체만을 모델화하여 제체저면(고정경계)에 지진동을 입력하는 경우가 있다. 전자의 경우가 보다 엄밀한 방법이라고 생각할 수 있지만, 지표에서 관측된 지진동에서 암반까지의 입력지진동을 동일하게 정해야 할 필요가 있어 복잡하기 때문에 중력식 콘크리트 댐의 경우는 보다 간편한 후자의 방법을 쓰는 경우가 많다.<sup>(5)</sup>

따라서 본 연구에서는 전자의 해석방법을 실시하기 전, 댐체의 지진응답 증폭에 대한 동적거동 특성을 알아보고자 댐체만을 해석대상으로 모델링하고 제체저면은 고정경계로 하여 해석을 실시하였다.

### 2.2 적용 프로그램

모델댐의 해석은 범용 구조해석프로그램인 GT STRUDL(Georgia Tech STRUctural Design Language)를 이용하였고, 이용한 유한요소 모델은 2차원 평면에서 평면변형율(Plane strain)을 이용하였으며, 유한요소 모델은 사각형 요소는 4 node를 갖는 IPLQ(Isoparametric Linear Quadrilateral) 모형을 이용하여 동적해석을 실시하였다.<sup>(2)(4)</sup>

### 2.3 하중 산정

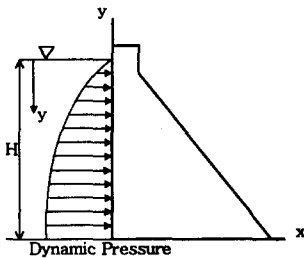


그림 1. 동수압 분포

본 해석에서 사용한 하중에서 정적하중은 크게 사하중과 정수압이고, 정수압은 댐의 상시만수위(N.H. WL)를 기준으로 설정하였으며, 댐체에 작용하는 각 요소에 대해서 댐의 형상에 따라 수압이 작용하도록 하였다. 동적하중은 동수압과 지진하중을 작용하였으며, 동수압은 Westergaad 공식을 이용하여 결정하였다.

$$P = \frac{7}{8} k \gamma_w \sqrt{Hy} \quad (1)$$

여기서, P : 동수압, k : 수평지진계수,  $\gamma_w$  : 물의 단위체적중량

H : 저수심, y : 저수표면에서 단면의 거리

또한 해석에 사용한 지진하중은 장·단주기파를 이용하였는데 장주기파는 OFUNATO 지진파(Peak Time 5.917sec)이며, 단주기파는 HACHINOHE 지진파(Peak Time 5.38sec)로서 실제 원파형은 <그림2>, <그림3>과 같다. 해석에 적용한 지진파는 최대가속도 0.16g로 조정하여 사용하였다.

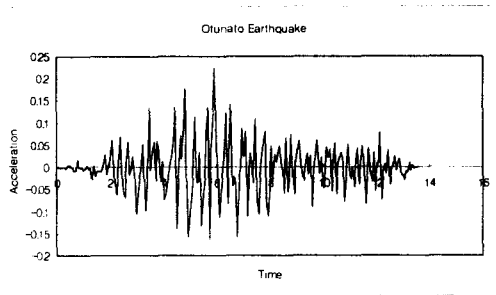


그림 2. OFUNATO 지진파

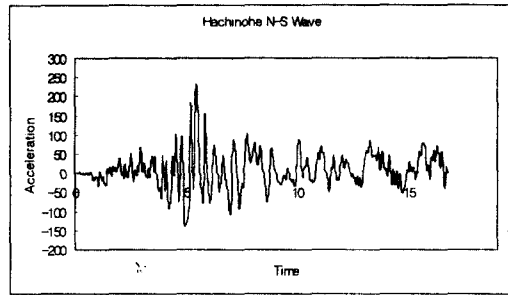


그림 3. HACHINOHE 지진파

### 3. 모델댐 지진응답해석

#### 3.1 해석모델

본 중력식콘크리트댐(S댐)은 1997년도 내진설계기준연구에 따라 모델댐 지역의 지진재현주기 2400년의 지진계수(0.16g)를 적용시켰으며, 실제 장·단주기파에 따라 지진응답해석을 실시하여 댐 높이에 따른 댐체의 증폭 변화 등 동적거동을 분석하였다.

표 1. 해석 단면 제원

구분	모델댐	설계기준강도	180(kgf/cm <sup>2</sup> )
형식	콘크리트 중력댐	포아송비	0.17
길이	344.2m	절점수	208개
높이	64m	요소수	180개

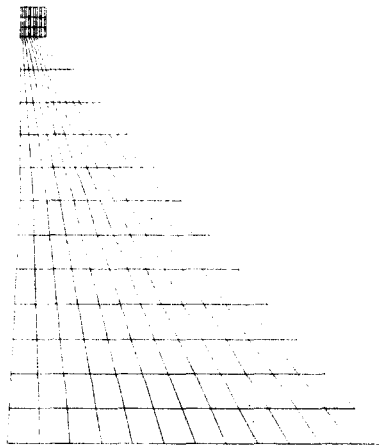


그림 4. 모델링

### 3.2 지진응답해석 결과

모델댐의 지진응답해석에 적용한 지진계수는 댐 지역을 고려하여 적용하였으며, <sup>(6)(7)</sup> 지진파에 대한 변위, 응력·주응력 분포, 그리고 응답가속도 등의 해석결과에 따라 댐의 동적거동 특성을 분석하였다.

#### 1) Mode

본 해석에서는 각 방향(x-y 평면)에 대한 Mode 질량 기여도가 90% 이상이 되도록 수행한 결과 1차 Mode에서 30차 Mode까지 실시를 하였다. 각 방향에 대한 질량기여도는 x축 방향으로 99.50%, y축 방향으로 96.76%가 나타났으며, 각 Mode의 결과는 다음 <그림5~7>과 같다.

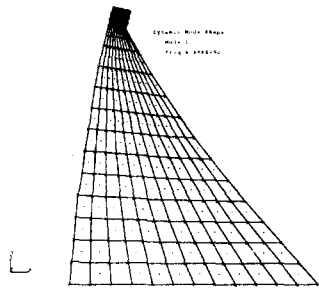


그림 5. 1차 Mode

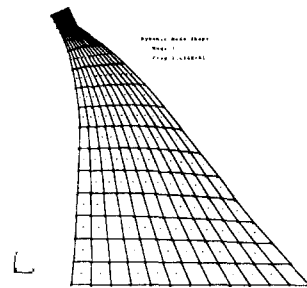


그림 6. 3차 Mode

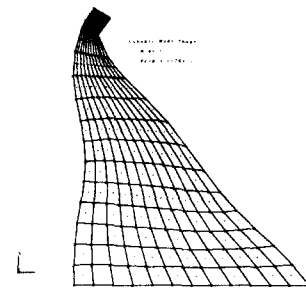


그림 7. 6차 Mode

#### 2) 변위

본 지진응답 해석결과에서 Ofunato지진파와 Hachinohe지진파에 대한 각각의 최대변위 형상은 <그림8,9>와 같고, 댐체 상단의 응답변위를 살펴보면 <표2>와 같다.

표 2. 각 지진파의 최대변위(mm)

구분	Ofunato		Hachinohe	
	x 방향 변위	y 방향 변위	x 방향 변위	y 방향 변위
J-196	6.14	1.89	4.72	1.42
Time	5.856sec		5.125sec	

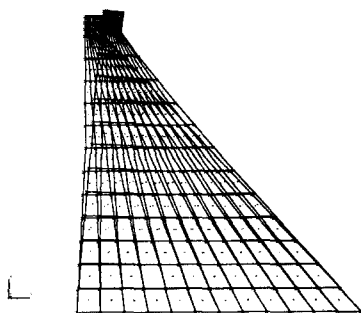


그림 8. Ofunato파 작용시 최대변위 형상

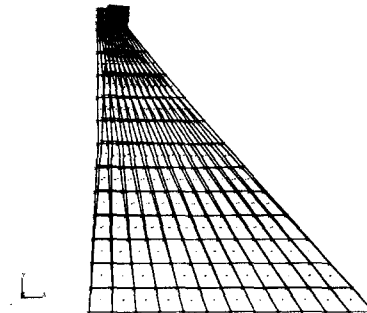


그림 9. Hachinohe파 작용시 최대변위 형상

<그림10>과<그림11>의 변위 결과를 보면 댐체의 최대 변위는 작용 지진파의 최대가속도 발생지점과 비슷한 위치를 나타내고 있으며, 장주기파인 Ofunato 지진파 작용시 댐체 상부의 최대변위(J-196)가 단주기파인 Hachinohe 지진파 작용시 보다 약 1.4mm 더 크게 나타나고 있다.

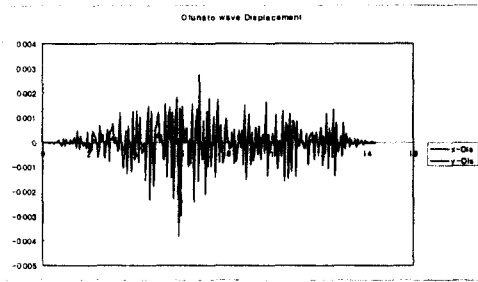


그림 10. Ofunato 지진파 작용시  
최대 변위(J-196)

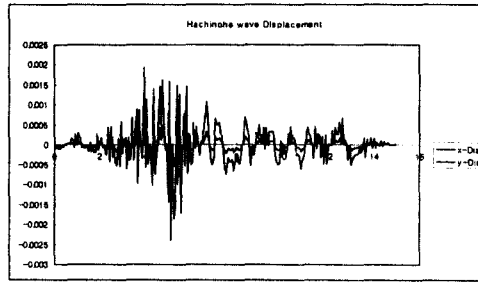


그림 11. Hachinohe 지진파 작용시  
최대 변위(J-196)

### 3) 가속도

적용 지진파에 대한 댐체의 가속도 증폭을 알아보기 위하여 댐체 하부(J-19), 댐2/3지점(J-110) 그리고 댐체 상부(J-196)의 가속도를 나타내면 다음과 같다.

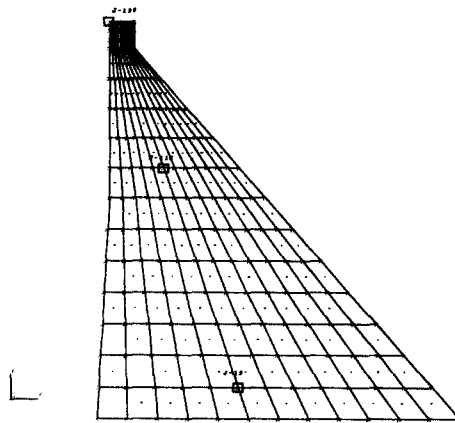


그림 12. 댐체 가속도 위치

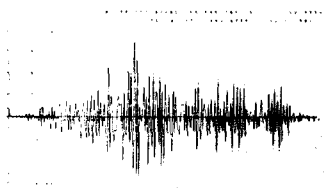


그림 13. 0-J-19

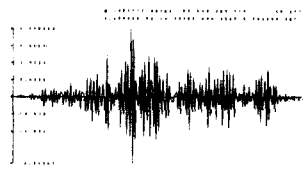


그림 14. 0-J-110



그림 15. 0-J-196

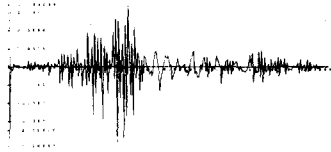


그림 16.H-J-19

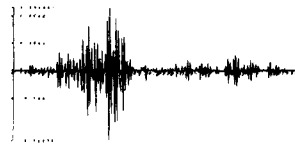


그림 17.H-J-110

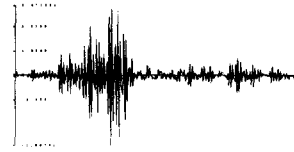


그림 18.H-J-196

댐체에 발생하는 응답가속도 분포는 일반적으로 알려진 것과 같이 댐체 하단 < 댐체 2/3 부분 < 댐체 상단 순서로 다소 차이는 보이나 증폭하고 있음을 알 수 있으며, x 방향의 가속도 분포를 보면 장주기파인 Ofunato와 작용시 약 5배정도, 단주기파인 Hachinohe와 작용시 약 3배 정도 증폭하고 있음을 알 수 있다. 콘크리트 댐의 경우는 재료의 특성상 일반 사력댐이나 CFRD 보다는 응답가속도의 증폭량이 대체적으로 큰 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup>

댐체 높이(총 13 point)에 대한 x, y 방향의 응답가속도 분포를 보면 다음과 같다.

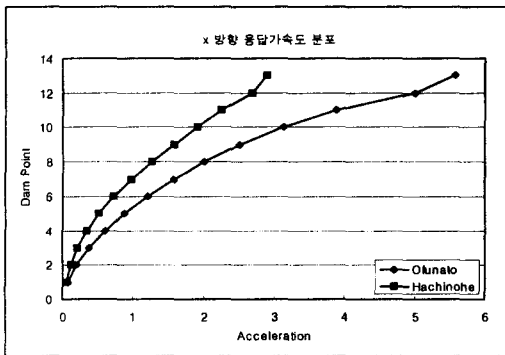


그림 19. x 방향 응답가속도 분포

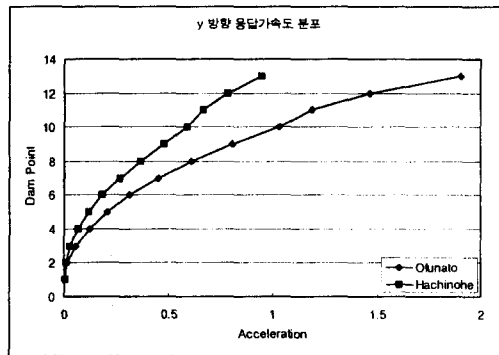


그림 20. y 방향 응답가속도 분포

#### 4) 응력

적용한 지진파에 대한 응력 분포를 보면 다음과 같다.

02X MID CONTOUR STEP 4.00000 TON/M\*\*2  
LD Com3 MIN =17.3201 MAX 34.6624

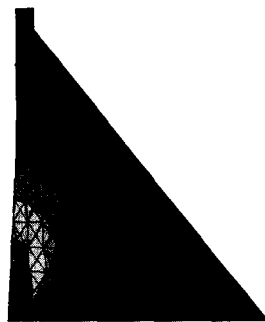


그림 21. 0-Sxx 응력분포

01 MID CONTOUR STEP 20.00000 TON/M\*\*2  
LD Com3 MIN 0.62339 MAX 210.1039

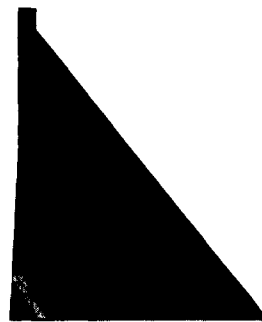


그림 22. 0-S1 응력분포

23X MID CONTOUR STEP 1.000000 TON/M\*\*2  
ID Contour MIN -31.0912 MAX 10.9150

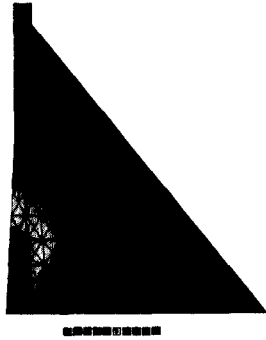


그림 23. H-Sxx 응력분포

24X MID CONTOUR STEP 20.000000 TON/M\*\*2  
ID Contour MIN 0.3820 MAX 184.2351

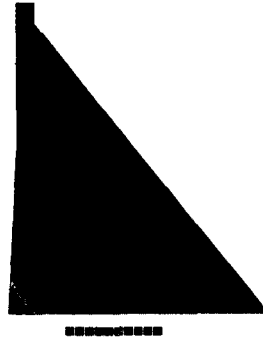


그림 24. H-S11 응력분포

응력분포의 경우 Ofunato 지진파를 적용시킨 경우가 응력( $S_{xx}, S_{yy}$ ) 및 주응력( $S_1, S_2$ )을 비교해 보면 Hachinohe 지진파를 적용시킨것보다 약  $3\text{kg}/\text{cm}^2$  이내로 크게 나타나고 있으며, 주응력의 경우는 Ofunato 지진파 작용시 응력분포 범위가 커지고 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구

본 연구는 중력식콘크리트댐에 실측파인 장·단주기파인 Ofunato 지진파와 Hachinohe 지진파를 이용하여 1997년 내진설계기준연구(0.16g)에 따라 콘크리트댐의 지진응답해석을 통한 동적거동 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 댐체에 동일한 크기의 지진파가 작용할 경우 장주기파(Ofunato 지진파)인 경우 최대변위 및 응력 분포가 단주기파(Hachinohe 지진파)인 경우보다 댐체 상단에서의 최대변위, 응력이 대략 30%정도 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.
2. 응답 변위의 양상은 콘크리트댐 자체 강성 때문에 최대지진가속도의 부근에서 최대변위가 발생하는 것을 알 수 있다.
3. 응답가속도는 장주기파인 경우 댐체 상단부(Crest)에서 약 5배정도 증폭을 나타내고 있으며, 단주기파인 경우는 약 3배 정도의 증폭을 나타내고 있었다. 입력지진가속도 크기에 따른 증폭율에 대한 추가적인 연구가 더 필요할 것 같다.

본 연구에서는 실제 콘크리트댐의 댐체만을 모델로 장·단주기파를 이용하여 지진응답해석을 실시하여 응력 분포와 변위크기, 응답가속도 분포를 분석하고자 하였으며, 추후 연구로는 콘크리트댐의 여러 가지 형상 및 다양한 입력파에 대해 지진응답해석을 실시하여 추가적인 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 한국수자원공사(2000), "수자원시설물의 내진성능평가에 관한 연구(I)"
2. Anil K. Chopra(1995), *Dynamic of Structures*, Prestice Hall
3. 오병환(1996) 외 , 최신콘크리트공학. 한국콘크리트학회
4. GT-STRUDL user's Manual
5. 日本國水資源開發公團(1998), "第15回 技術交流會議 資料"
6. 건설부(1993), 댐시설기준
7. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(II)
8. 도덕현(1992), 내진공학, 효성출판사
9. Anil K. Chopra(1978), "Earthquake Resistant Design of Concrete Gravity Dam", ASCE, Vol.104, No.ST6 pp 95  
3~971