

필댐 3차원 내진 해석요소망 작성 기법

Mesh Generation for 3-D Dynamic Response Analysis of Fill Dam



하 익 수*

* 한국수자원공사 K-water 연구원 댐안전연구소 책임연구원

1. 개 요

본 문에서는 필댐의 3차원 동적해석을 위한 3차원 모델 생성 기법을 정립하기 위하여 현재 운영 중에 있는 횡성댐을 대상으로 여러 가지 모델 생성 방법을 적용한 3차원 동적해석을 수행하여 댐 정상부의 응답거동을 비교·분석해 보았다.

본 문에서는 댐 축방향으로 유한요소의 개수를 여러 가지로 변화시킨 3차원 동적해석을 수행하고 댐 정상부의 응답특성을 비교하여 2차원 해석과 구분되며, 3차원 응답 효과를 일관성있게 보여줄 수 있는 효율적인 댐 축방향 유한요소 개수 선정을 위한 기초자료를 제시한다. 또한 해석영역 크기에 따른 댐의 응답거동을 비교·분석하여 합리적인 해석영역 크기 설정 및 경계조건(자유장 경계조건, free field boundary condtion)의 적용성을 검증하고자 하였다.

2. 해석개요

2.1 해석 대상댐 개요

본 문에서 해석 대상인 횡성댐은 강원도 횡성에 위치한 다목적댐이다. 횡성댐의 제원은 높이 48.5m, 댐길이 205m,

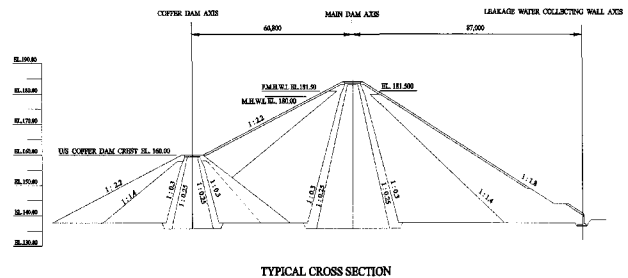


그림 1 횡성댐 대표단면

총저수용량은 86백만 m^3 이다. 횡성댐의 대표단면도는 그림 1과 같다.

2.2 해석프로그램 개요 및 경계조건

본 연구에서 3차원 동적해석을 수행하기 위하여 범용 유한차분 해석프로그램인 FLAC3D(ver.3.1)를 사용하였다. 지반구조물에 대한 지진응답을 수치해석을 통해 실시할 때, 입력 지진파는 암반에서부터 위로 진행하는 전달파를 사용한다. 이때 해석모델의 해석 경계는 자유장운동(Free-field motion)을 모사할 수 있어야 한다. 자유장 경계는 해석 경계가 자유장 운동을 하도록 모델링하여 반무한으로 전달되는 전달파가 경계에서 반사되지 않고 흡수되도록 하여 지반의 반무한성을 고려할 수 있는 경계조건이다. 그림 2에서

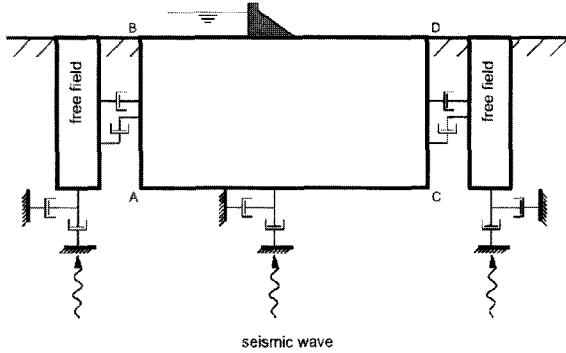


그림 2 자유장 경계(Free-Field Boundary)

처럼 FLAC에서는 해석모델의 수평경계가 dashpot을 통해 자유장 요소와 연결되어 자유장에서 불평형력이 모델의 경계에 작용하게 된다. 자유장 경계를 이용하면 양쪽 경계를 무한요소(infinite element)로 모델링한 것과 같이 거동하므로 모델의 저면에서 위로 전파되는 전단파가 경계에서 반사되는 것을 막을 수 있다. 그림 3은 본 문서에서와 같이 3차원 댐 동적응답 해석에 이용된 자유장 경계조건의 경계조건을 예로써 보여주는 그림이다.

2.3 입력지진동

동적해석 및 동적해석을 통한 민감도 분석을 위해 입력지진동은 인공지진파를 사용하였다. 인공지진파는 EQmaker 프로그램을 이용하여 생성하였다. 인공지진파의 지속시간은 10초로 하였다. 그림 4는 본 해석에 이용된 인공지진파 가속도 시간이력을 보여주는 것이다. 해석시 가진방향은 상하류방향(댐 축 직각방향)으로 작용시켰다.

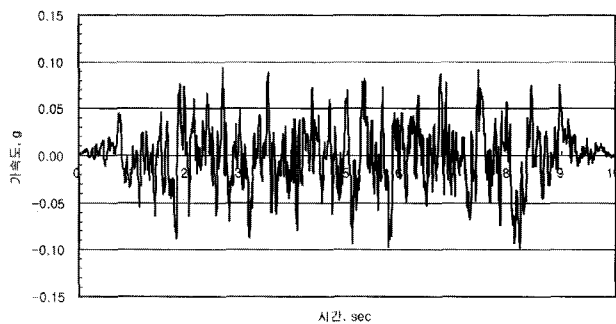


그림 4 입력 인공지진파 가속도 시간이력

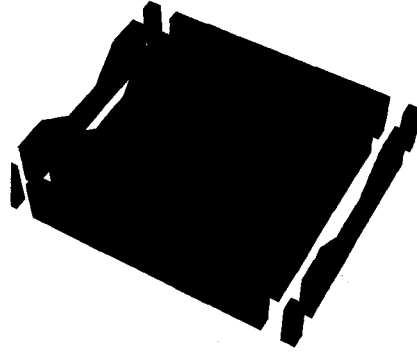


그림 3 자유장 경계조건 적용 예

2.4 입력물성

지반해석 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 정적 해석을 위한 입력물성은 공사지(형성다목적댐공사지, 한국수자원공사, 2002)에 작성된 설계값을 이용하였다. 정적해석 수행 후에 각 절점의 초기변위와 속도를 초기화한 후, 해석영역 바닥면에 그림 4의 인공지진파 가속도 시간이력을 입력하중으로 한 동적해석을 수행하였다.

동적해석을 위한 입력물성으로는 기초암반의 경우에는 표 1의 정적해석 입력물성을, 코어존의 경우 전체 댐 부피의 약 8%내로서 전단탄성계수는 경험적 제안식인 Sawada와 Takahashi(1975)의 코어존 깊이별 전단파속도 하한값 중 코어존의 중심 깊이에 해당되는 깊이에서의 값에 밀도를 곱하여 최대전단 탄성계수를 정하였고, 포아송비는 0.3을 적용하여 체적탄성계수를 산정하여 일정값으로 입력하였다. 사력존의 경우, 최대전단탄성계수는 아래 식을 이용하였는데, 본 문서에서는 2차원 동적해석에 의한 물성역산정 결과에 의한 $k_{2,max}$, 105를 적용하여 산정하였으며, 체적탄성계수는 산정된 전단탄성계수에 포아송비 0.3을 적용하여 산정하였다.

해석영역 및 물성구분은 그림 5와 같다.

$$G_{max} (Pa) = k_{2,max} \cdot 1000 \cdot \sqrt{\sigma'_m} \quad (\sigma'_m \text{ in Pa})$$

(Vrymoed, 1981)

여기서, σ'_m 은 평균유효구속응력이다.

표 1 정적해석 입력물성(공사지, 2002)

재료구분	단위중량, γ (kN/m ³)	체적탄성계수 (kN/m ²)	전단탄성계수 (kN/m ²)	마찰각 (°)	점착력 (kN/m ²)
사력존	20	6.46e4	2.98e4	41	0
기초암반	26	1.67e7	1.25e7	45	2000

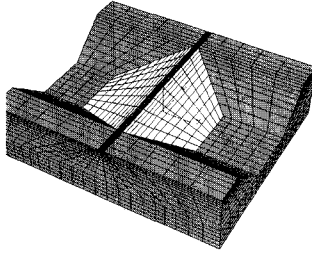
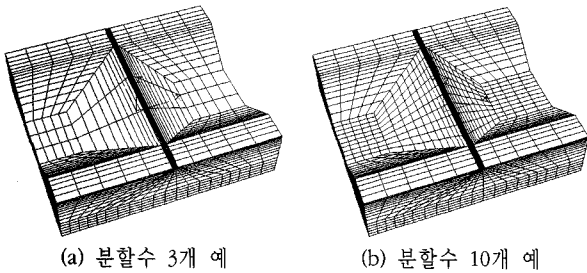


그림 5 해석영역 및 물성구분

3. 3차원 해석요소망 작성기법

3.1 댐 축방향 유한요소 개수 영향 평가

특정 유한요소 모델을 이용하여 댐의 동적응답해석으로부터 얻어진 결과의 정확성을 결정하는 가장 간단한 방법은 분할(discretization) 정도를 달리하는 유한요소 모델을 이용한 동일한 해석으로부터 얻어진 결과와 비교하는 것이다. 이러한 비교를 통해 구조물의 계산된 응답에 특정한 수준의 정확성을 얻기 위한 모델의 이산화 정도를 결정하는 기준을 정의할 수 있다. 댐 2차원 동적해석에 비해 댐 3차원 동적해석이란 결국 댐 축방향의 분할수와 관련이 있다. 많은 요소수로 분할하면 좋지만 해석시간과 노력이 많이 소요되게 된다. 본 연구에서는 0.098g의 최대가속도 진폭을 가지는 지속시간 10초의 인공지진파(그림 4 참조)를 입력하중으로, 그림 6에서 예로 보는 바와 같이 댐 축방향 요소 분할수를 3개, 5개, 8개, 10개, 12개로 변화시킨 동적해석을 수행하였다.



(a) 분할수 3개 예

(b) 분할수 10개 예

그림 6 동적해석에 이용된 댐 축방향 분할수에 따른 해석요소망 예

3.1.1 응답스펙트럼비(증폭함수) 분석

그림 7은 동적해석결과 나타난 일정감쇠비(5% 적용)에 대한 축방향 요소수에 따른 댐 정상부 증폭함수를 나타낸 것이다. 여기서 증폭함수란 댐 정상부의 5% 감쇠비에 대한 가속도 응답스펙트럼을 댐 기초에서의 5% 감쇠비에 대한 가속도 응답스펙트럼으로 나눈 응답스펙트럼비를 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이, 분할 요소수 8개 이상의 모델

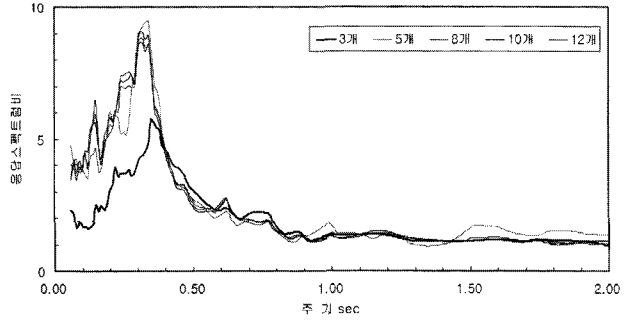


그림 7 축방향 요소수에 따른 댐 정상부 응답스펙트럼 비교

해석결과부터는 증폭함수 곡선형태가 거의 같으며, 산정된 고유주기는 0.34초, 고유진동수는 $1/0.34\text{초}=2.94\text{Hz}$ 로 같은 값을 산정함을 확인할 수 있다.

그림 7의 결과로부터 얻을 수 있는 일반적인 결론은 댐 축방향으로 분할 요소수를 작게 할수록 고유진동수는 작아지며, 이는 2차원모델에 비해 3차원모델이 제체 강성을 더 크게 평가하여 고유진동수가 실제로 더 크게 된다는 사실을 입증한다. 증폭함수의 특성만으로 판단하였을 때, 댐 3차원 모델은 최소한 댐 축방향으로 8개 이상 분할하여야 합리적인 응답거동을 보일 수 있을 것으로 예상되었다.

3.1.2 댐 정상부 응답가속도 시간이력 분석

그림 8은 댐 축방향 분할 요소수에 따른 댐 정상부 상하류방향 응답가속도 시간이력을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 8개로 분할한 경우 다소의 차이는 있으나 응답가속도 시간이력 곡선의 형태가 거의 동일하며, 10개 이상으로 분할한 경우에는 댐 정상부 응답가속도 시간이력 곡선이 완전히 동일한 것을 알 수 있다.

주파수 분석결과는 그림 9에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 8개 이상 분할한 경우부터 안정적인 응답 주파수를 보여주며 분할 수가 10개 이상인 경우에는 거의 주파수대 응답이 동일함을 확인할 수 있다.

따라서, 3차원 효과를 고려하고 안정적이고 일관성있는 정상부의 응답거동을 파악하기 위해서는 댐 축방향의 분할수는 10개 이상 분할, 또는 최소한 8개 이상으로 분할하는 것이 합리적인 모델 생성 방법일 것으로 판단된다. 8개 이상이라 함은 8개 이상으로 분할한 경우는 댐 정상부에서

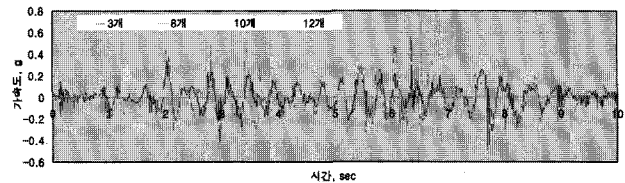


그림 8 댐 축방향 요소 분할 수에 따른 댐 정상부 응답가속도 시간이력 비교

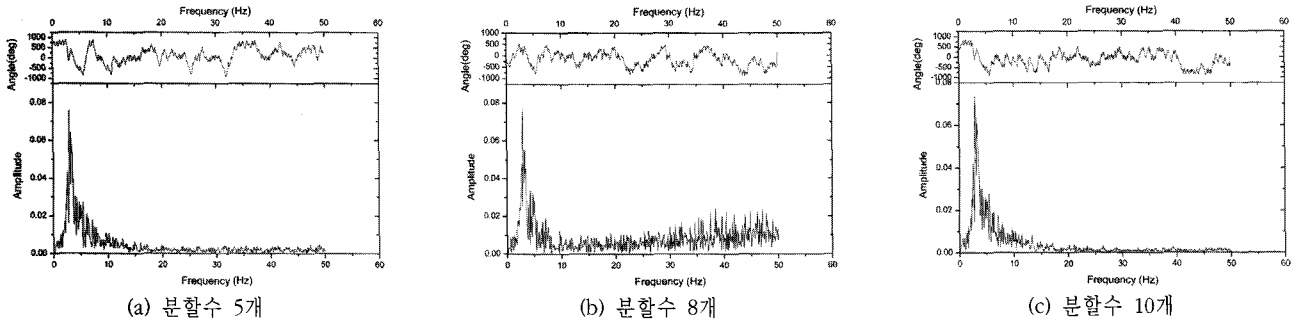


그림 9 댐 축방향 모델 분할수에 따른 정상부 응답가속도 주파수 분석 비교

댐 축방향으로의 길이에 대해서는 댐 정상부의 길이를 L 이라고 하면 정상부에서의 요소망의 댐 축방향으로의 크기가 최소한 $L/8$ 이하가 되어야 함을 의미한다.

3.1.3 최대 침하발생시 침하거동 분석

추가적으로 3차원 효과 반영 여부를 평가하기 위하여 해석결과 중 최대침하가 발생한 시점(해석시간 8초)에서 상하류방향 중앙단면에서의 침하양상과 댐 축 단면에서의 침하양상을 살펴보았다.

그림 10은 상하류 중앙단면에서의 해석시간 8초 후 댐 축방향 모델 분할수에 따른 침하양상을 보여주는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 분할 요소수가 8개 이상인 모델부터 침하패턴 및 침하량이 일관된 값을 보임을 알 수 있다.

그림 11은 댐 축단면에서의 해석시간 8초 후 댐 축방향 모델 분할수에 따른 침하양상을 보여주는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 분할 요소수가 10개 이상인 모델부터 침하패턴 및 침하량이 일관된 값을 보임을 알 수 있다.

이상으로부터 변위 측면을 고려하면 댐 축방향의 요소크기는 최소 댐 길이의 $1/10$ 이하이어야 함을 알 수 있다.

3.2 해석영역 크기 영향 평가

본 절에서는 동적해석시 해석영역의 크기가 댐 정상부 응답거동에 미치는 영향을 평가해 보았다. 본 연구에서 설정한 동적해석을 위한 해석영역 기본크기는 그림 12와 같

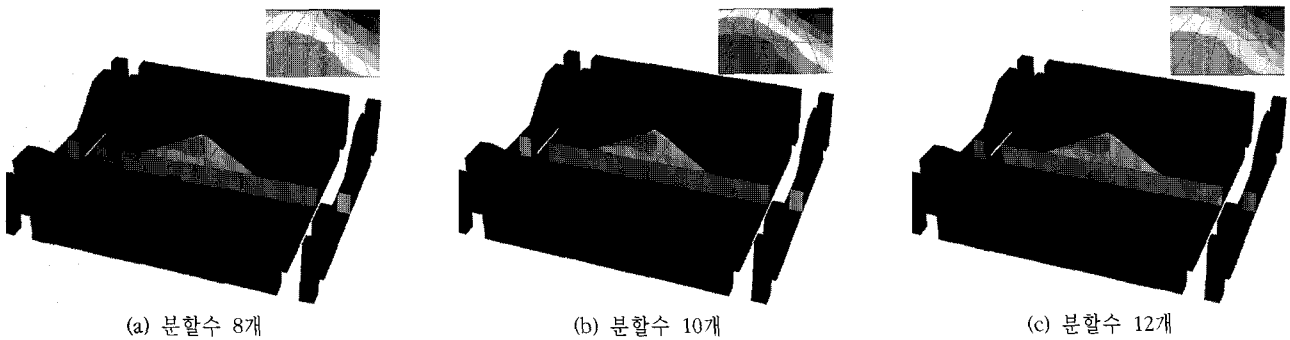


그림 10 댐 축방향 모델 분할수에 따른 침하거동(상하류 중앙단면)

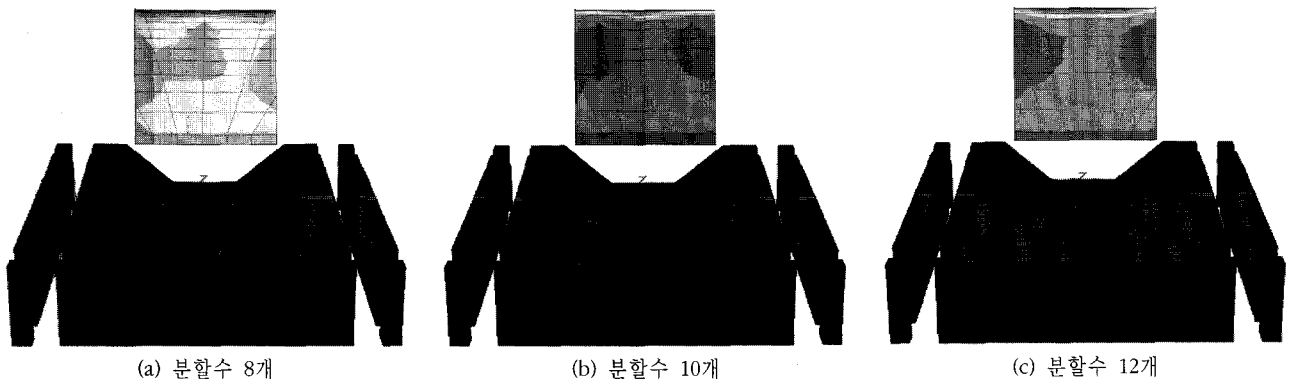


그림 11 댐 축방향 모델 분할수에 따른 침하거동(댐 축단면)

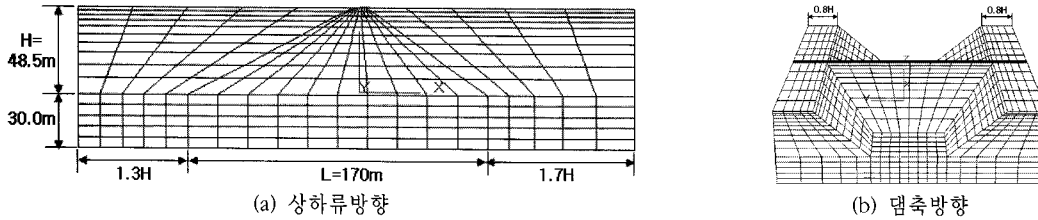


그림 12 동적해석 해석영역 기본형 영역크기

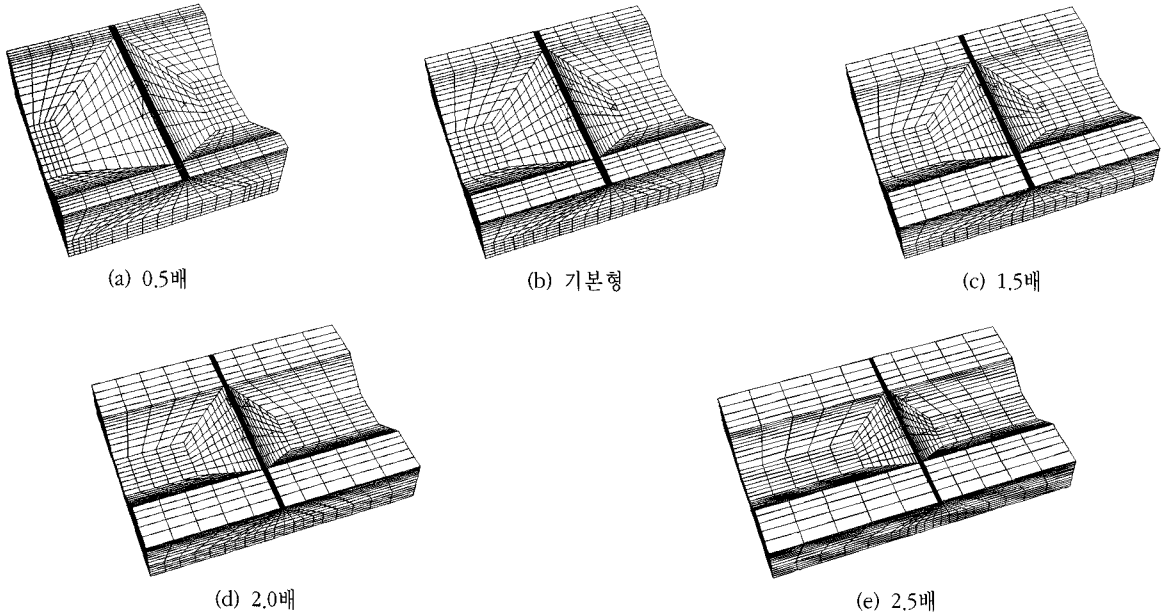


그림 13 동적응답해석 해석영역 크기 변화

다. 해석영역 크기에 따른 영향을 살펴보기 위하여 그림 12의 크기를 기본형으로 하고 댐 기초바닥에서 해석영역 바닥까지의 크기는 30m로 일정하게 하고, 상하류방향 및 댐 축방향으로 기본형에 대해 해석영역의 크기를 그림 13에서 보는 바와 같이 0.5배, 1.5배, 2.0배, 2.5배로 변화 시킨 해석을 수행하여 영역크기에 따른 댐 정상부 중앙부의 동적응답 차이를 비교해 보았다.

3.2.1 응답스펙트럼비 분석

그림 14는 해석영역 크기에 따른 정상부 증폭함수를 비

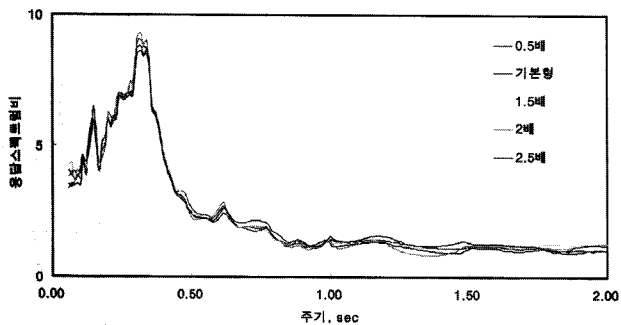


그림 14 해석영역 크기에 따른 정상부 응답스펙트럼비 비교

교하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 해석영역의 크기는 댐 정상부의 증폭이나 댐 체 고유진동수에는 거의 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. 이는 본 동적해석에서 적용한 경계조건인 자유장 경계조건이 유효하게 작용한 것을 증명하는 결과라고 할 수 있다. 즉, 본 해석에서 적용한 바와 같이 댐 3차원 동적해석시 자유장 경계조건을 적용하는 경우라면 해석영역의 크기는 댐 정상부의 증폭이나 산정되는 댐체 고유진동수에는 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다.

3.2.2 정상부 응답가속도 시간이력 분석

그림 15는 해석영역 크기에 따른 정상부에서의 응답가속도 시간이력을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 해석영역의 크기에 따른 정상부에서의 가속도 응답의 차이는 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 자유장 경계조건을 적용한 경우에는 상하류방향이나 댐 축방향으로의 해석영역의 크기는 댐 정상부의 가속도응답에는 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. 마찬가지로 해석영역 크기에 따른 응답주파수특성의 차이는 거의 없음도 확인하였다.

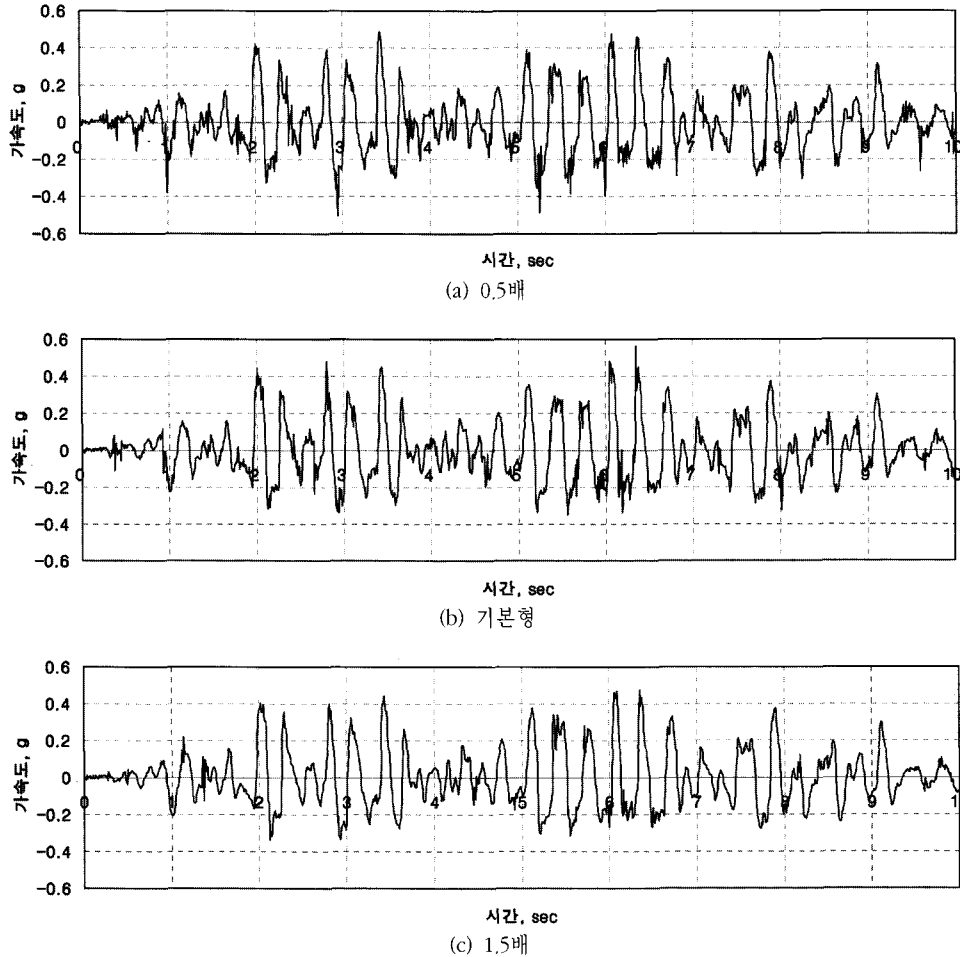


그림 15 해석영역 크기에 따른 댐 정상부 응답가속도시간이력 비교

4 결 론

- (1) 3차원 효과를 고려하고 안정적이고 일관성있는 정상부의 응답거동을 파악하기 위해서는 댐 축방향 유한요소의 크기는 최소 댐 정상부 길이의 1/8이하로 분할하는 것이 합리적이고 효율적인 모델 생성 방법일 것으로 판단된다.
- (2) 변위측면에서 댐체 전체가 3차원 효과를 반영할 수 있기 위해서는 댐 축방향 유한요소의 크기는 최소 댐 정상부 길이의 1/10이하로 분할하는 것이 합리적이고 효율적인 모델 생성 방법일 것으로 판단된다.
- (3) 필댐 3차원 동적해석시 경계조건을 자유장 경계조건 (free field boundary)을 적용하는 경우라면 해석영역의 크기는 댐 정상부의 증폭이나 산정되는 댐체 고유진동수에는 영향을 주지 않음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 한국수자원공사, 횡성다목적댐공사지, 2002
2. FLAC User's Manual
3. Mejia, L.H. and Seed, H.B., "Comparison of 2-D and 3-D dynamic analyses of earth dams", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.109, No.11, pp.1383-1398, 1983
4. Sawada, Y. and Takahashi, T., "Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dam", Proc. of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.695-702, 1975
5. Vrymoed, J., "Dynamic FEM model of Oroville dam", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 107, No.8, pp.1057-1077, 1981

[담당 : 최인길, 편집위원]