

물성이 다른 콘크리트로 축조된 콘크리트댐의 동적거동 특성

Dynamic Behavior of Concrete Dam Constructed with Different Concretes in Mechanical Properties

임 정 열*

Lim, Jeong-Yeul

국문요약

일반적으로 콘크리트댐은 비파괴 검사를 실시한 물성값을 이용하여 정적 및 동적 안전성 평가를 실시한다. 그러나 이런 값을 이용하여 수치해석을 할 경우 경험적인 물성값을 적용하기 때문에 안전성 평가에 대한 결과는 현실적 요소를 반영하기 어렵다. 또한 댐은 품질관리가 중요한 요소 중 하나이지만, 과거 건설된 몇몇 댐에 대해서 축조시기, 타설시기가 달라 재료적 특성에 따른 안전성 문제가 대두되어 관심이 되었다. 따라서, 본 연구에서는 오랜기간 동안 건설중단 된 후 완공된 콘크리트 댐의 내부상태를 조사하고(BIPS), 시추코아에 대한 물리특성 실험을 실시하여 물성값 차이로 인해 발생하는 동적특성 결과를 비교분석하였다.

주요어 : 콘크리트댐, 동적특성, 품질관리

ABSTRACT

A large concrete dam, of which construction work had not been continued for more than 20 years because of social problem, was investigated with emphasis on its seismic performance. Mechanical properties of the concrete dam material were estimated by performing uniaxial compression tests for obtained the samples from dam body. Borehole Image Processing System (BIPS) was used to investigate the susceptible faults developed in the interface between old and new concretes. Using the results of several laboratory and field tests earthquake response analysis for the dam were done. The results of such investigations show that its physical and mechanical conditions are in a good condition, and the results earthquake response analysis imply that the dam, even it consists of two different concretes, show good seismic performance.

Key words : concrete dam, dynamic characteristics, quality control

1. 서 론

댐의 안전성 평가는 지반조건, 축조재료, 수치해석결과, 주변환경조건 등 여러 가지 복합적인 상관관계에 의해 결정되고, 지반조건과 축조재료는 댐 건설지역에 따라 설계 이전에 결정되어지는 중요한 요소중의 하나이다. 댐체의 댐체를 설계할 때 중요한 것은 축조재료의 강도이기 때문에 재료에 대한 사전실험과 시공중의 품질관리에 만전을 기하도록 하고 있으며, 콘크리트댐은 설계시 배합설계에 큰 비중을 두어 배합비에 대한 정확한 검토가 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 그러나, 품질관리의 경우 사력댐은 댐 축조시기, 축조단계에 따른 축조재료의 품질관리, 콘크리트댐은 콘크리트 타설과 양생에 대한 어려움이 많았다. 댐 시공 및 평가는 품질관리가 중요한 요소로 반영되고 있으나, 시공당시의 재료시험결과 조건을 고려하여 안전성 평가를 실시하는 경우는 현실적으로 어려움이 많다. 이에 따라, 기존 댐에 대한 안전성 평가는 댐재료특성에 대한 성질을 모두 반영하는 것이 어려워 일부 재료에 대한 실내시험, 비파괴시험, 경험적인 방법을 이용하여 얻은 물성값을 반영하여 안전성 평가를 실시하고 있다. 또한 대부분 기존 댐은 건설당시에는 댐 내진설계에

대한 기준이 없어 정적해석방법인 관성력을 고려한 진도법(유사정적해석)을 적용하여 내진설계에 반영하도록 하였으나⁽²⁾, 재료특성에 따른 동적해석에 대한 필요성과 관심이 지속되고 있어, 본 연구에서는 타설시기가 다른 콘크리트댐을 대상으로 비파괴시험을 통한 물리시험 결과와 시추코아에 대한 물리시험 결과를 적용하여, 신규 콘크리트로 타설된 댐의 동적거동에 대한 결과를 분석 하였다.

2. 콘크리트댐 시추코아 재료 시험 및 결과 분석

본 연구대상 댐은 1940년 착공하여 1965년 준공된(2차례 건설중단) 콘크리트 댐으로 타설시기가 달라 신규 콘크리트로 구성되어 있으며, 대표단면 최대 높이가 62m(비월류부, Block 17)이고, 댐체 신규 콘크리트는 그림 1과 같다.(점선) 댐체 재료의 물리적인 성질은 비파괴시험 자료의 분석과 그림 1과 같이 댐체(Block. 17)에 대한 시추를 실시하고(총 62.4m) 신 콘크리트와 구 콘크리트에서 콘크리트 코어를 채취하여 물성 실험을 실시하였다. 또한 댐체 시추공을 이용하여 콘크리트 댐 내부의 균열 및 분리면, 신규 콘크리트의 접합면 등과 같은 구조물 위해 요소의 분포 유무를 확인하고자 시추공 영상촬영(BIPS : Borehole Image Processing System)을 실시하였다.

콘크리트 시추 코아 재료에 대한 시험은 ASTM 기준에 따라 압축시험, 강도시험, 탄성계수 및 포아송비, 탄성과 속

* 정회원 · 수자원연구원 댐안전연구소, 선임연구원

(내표저자:passion@kowaco.or.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2004. 4. 26 / 심사종료일 : 2004. 8. 11)

도 시험을 실시하였고⁽³⁾, 시험 시료는 대상 콘크리트 댐에서 채취한 코아를 시험시편(코아 길이 5.2cm) 6개(구콘크리트부 3개, 신콘크리트부 3개)로 나누어서 시험을 실시하였으며, 시험 방법은 표 1과 같다.

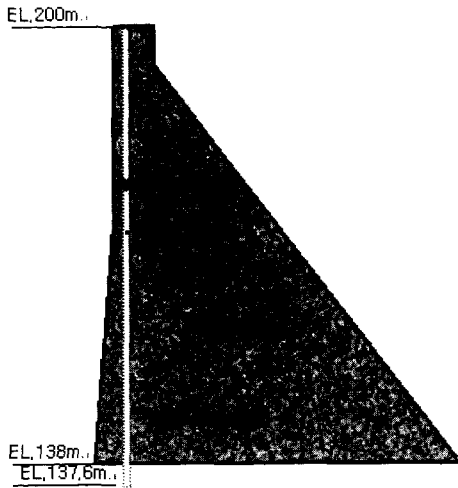


그림 1 댐체 구성 및 시추공(BL.17)

표 1 시추코아 재료 시험 방법

시험	기준(ASTM)	비고
압축시험	D2664-95	
강도시험	D4554-90/D2936-95	
탄성계수, 포아송비	D3148-96	
탄성과 속도	D2845-00	

댐체 시추코아에 대한 압축강도와 탄성과 속도 시험을 통하여 응력과 변형률에 대한 관계를 알아보려고 그림 2와 그림 3과 같이 시험을 실시하였다. 코아재료 시편에 대한 보정방법은 여러 가지 원인이 있으나, 본 연구에서는 높이/직경비 영향(KS F 2422)과 채취위치와 방향의 영향을 고려하여 반영하였다.

일반적으로 해석 및 설계시 콘크리트 변형 거동을 취급함에 있어서 거동에 대한 복잡성과 경제적인 면을 고려해 대부분 등방 탄성체로 간주하여 적용하고 있으며, 이와 같이 등방 탄성체로 고려할 때 반드시 필요한 입력 매개변수는

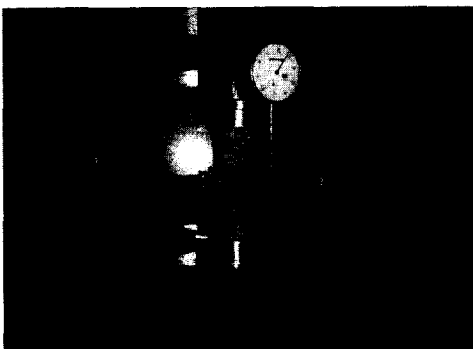


그림 2 댐체 시추코아 압축강도 시험

(동)탄성 계수와 포아송비를 들 수가 있다. 콘크리트의 탄성 계수와 포아송비는 콘크리트에 대한 일축압축 강도시험이나, 삼축 압축 시험 중에서 축차 응력 작용시에 연직방향 변형률과 수평방향 변형률을 계측하여 구하는 것이 일반적이고, 계측 결과를 나타내는 응력-변형률 곡선의 일반적인 개략적 모습도는 그림 4, 5와 같다.^{(4),(5)}

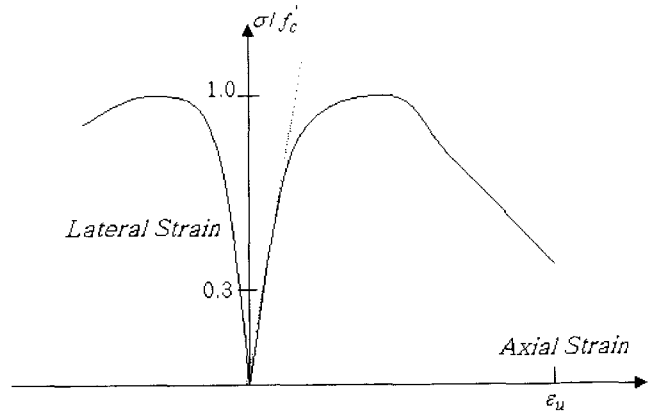


그림 4 Typical plots of compressive stress vs. axial and lateral strains

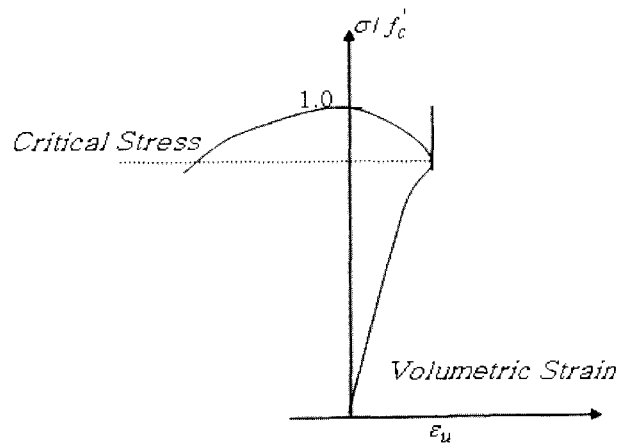


그림 5 Typical plots of compressive stress vs. volumetric strain

기존 비파괴검사를 이용한 탄성계수는 구 콘크리트 경우 $2.62 \times 10^5 \sim 3.05 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이고, 신 콘크리트 $2.62 \times 10^5 \sim$

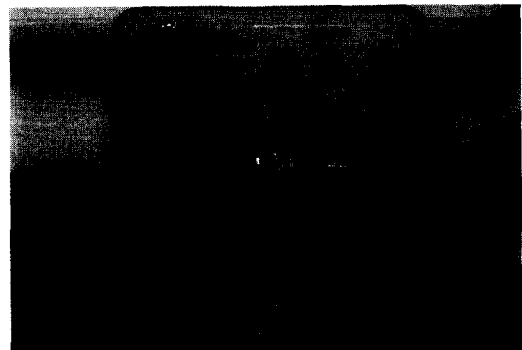


그림 3 댐체 시추코아 탄성과 속도 시험

표 2 코아재료에 대한 시험결과 (신·구 콘크리트)

Specimen No.	Wave Velocity (m/s)		Compressive Strength (kgf/cm ²)	Young's Modulus (×10 ³ kgf/cm ²)	Poisson's Ratio	Remark
1744 - 1	2,000	4,460	367	0.69	0.12	Old Concrete Core
1744 - 2	1,950	3,820	295	0.62	0.17	
1744 - 3	2,210	4,430	367	1.40	0.13	
평균	2,050	4,240	347	0.91	0.14	
1745 - 1	2,070	4,360	347	1.15	0.09	New Concrete Core
1745 - 2	2,280	4,860	408	1.60	0.14	
1745 - 3	2,120	4,210	388	1.20	0.11	
평균	2,160	4,480	377	1.32	0.11	

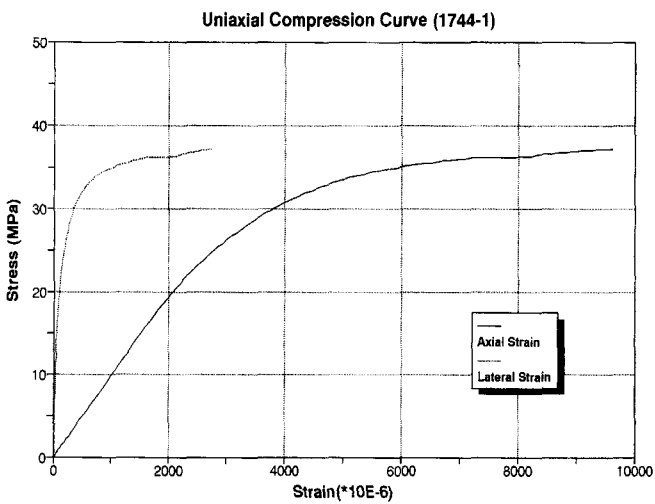


그림 6 시편 시험결과(Old)

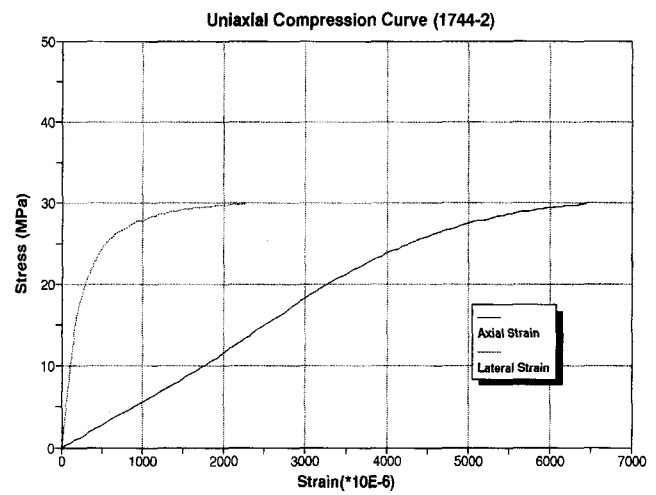


그림 7 시편 시험결과(Old)

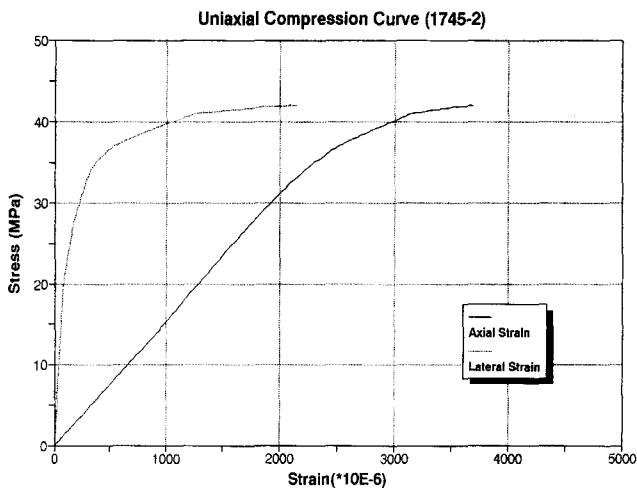


그림 8 시편 시험결과(New)

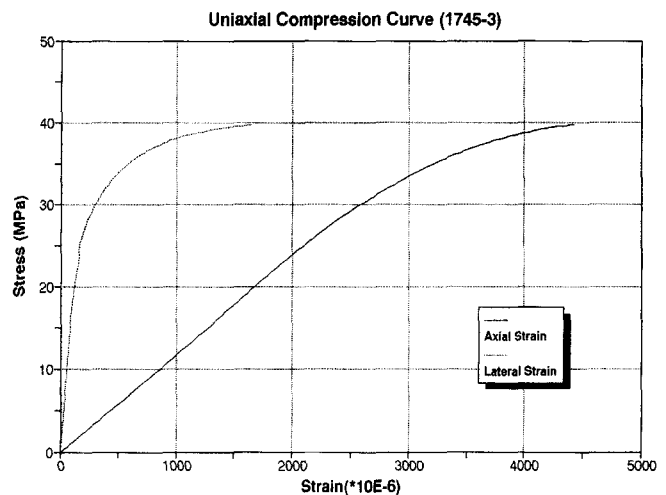


그림 9 시편 시험결과(New)

3.05×10³kg/cm²로 나타났다. 표 2는 신·구 콘크리트의 코아재료 시편에 대한 물리적인 시험결과를 나타낸 것이고, 그림 6~9는 시험결과에 대한 그래프이다.

본 연구에서 비파괴시험(그림 10, 12)과 시추코아시험(그림 11, 13)에 대한 결과를 비교해 볼 때, 해석에 적용

한 탄성계수 E(Young's Modulus)는 비파괴시험을 통하여 압축강도를 탄성계수로 환산한 값과 시추코아시험 결과 값은 최대 2배정도 차이를 보이고 있으며, Poisson's Ratio는 코아시험 결과가 전체적으로 낮은 경향을 보이고 있다.

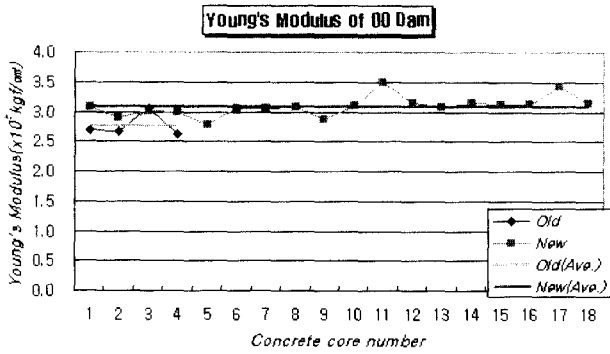


그림 10 Young's Modulus(비파괴)

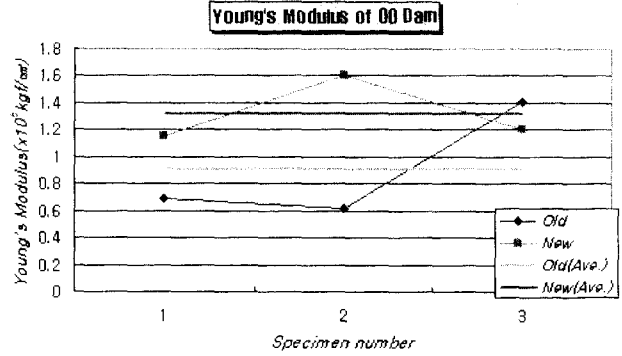


그림 11 Young's Modulus(코아시험)

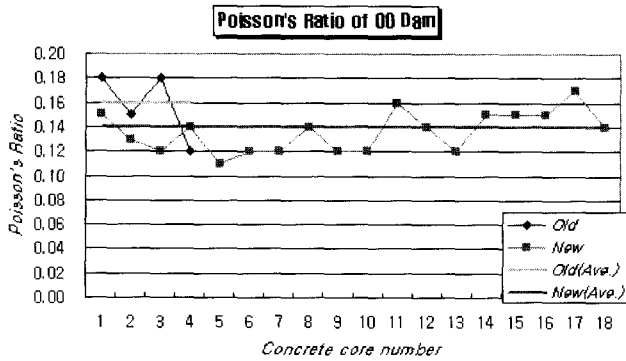


그림 12 Poisson's Ratio(비파괴)

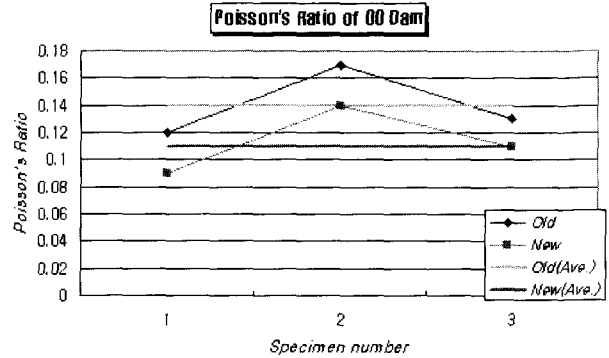


그림 13 Poisson's Ratio(코아시험)

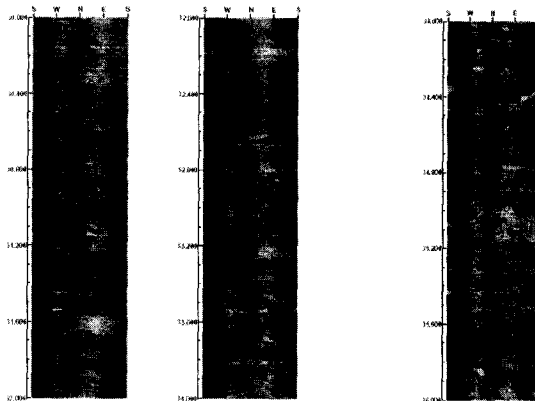


그림 14 30~34m 깊이

그림 15 34~38m 깊이

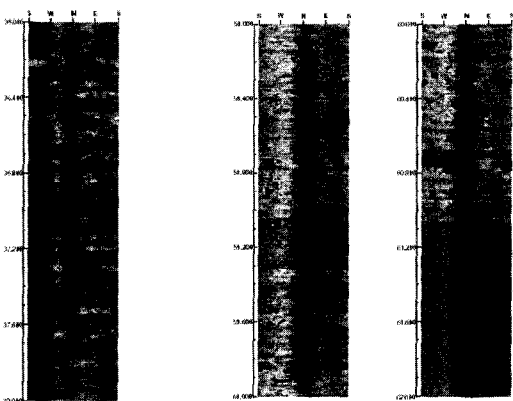


그림 16 댐체와 기반암

또한 본 댐체는 산구 콘크리트로 타설이 되어 타설된 면의 접합 상태와 내부 콘크리트 상태를 확인하기 위하여 시추공에 대한 영상촬영을 실시하였다. 시추공 촬영 깊이는 62.4m로 댐체보다 기반암으로 40cm 정도 더 깊이 촬영을 실시하였으며, 댐체 촬영 결과는 그림 14~16과 같다. 그림 14, 15은 산구 콘크리트가 접합된 구간으로, 관찰결과 특이한 사항을 발견할 수 없으며, 그림 16은 댐체와 기반암 접합부에 대한 결과로 암반과 콘크리트 접합면이 비교적 깨끗하다.

3. 시험결과에 따른 동적거동 특성 분석

본 연구에서는 비파괴시험결과와 댐 시추 코아재료에 대

한 시험결과를 이용하여 산구 콘크리트로 구성된 댐 단면 (BL.17)에 대하여 그림 18과 같이 대상 댐체를 모델링하여 지진응답해석(시간이력해석)방법에 따라 동적거동 특성을 분석하였다.

3.1 해석조건

본 연구 대상 댐의 해석 모델은 그림 17과 같으며, 시추 조사 대상인 BL.17을 대상(그림 1)으로 모델을 결정하였고, 해석시 적용한 물성값은 각각 비파괴시험결과와 코아재료시험결과를 참고하여 기본 물성값(E, ν 등)결정하였다. 해석 시 경계조건은 그림 16에서 댐체와 지반면(암반)을 확인한 결과 견고하게 부착이 되어 있다고 판단되어, 댐 기초지반

을 강체(제체저면 고정경계)로 모델링한 선형탄성해석을 수행하였다.⁽⁶⁾

본 해석에서 적용한 범용구조해석 프로그램은 GT-STRU DL을 이용하였으며, 유한요소 모델은 2차원 평면(X-Y 평면)에서 평면변형율(Plane Strain)을 이용하였고⁽⁷⁾, 해석단면에 대한 제원은 표 3과 같다.

표 3 해석 단면 제원

제원(높이/길이)	64m / 344.2m
상시만수위(N.H.W.L)	EL 196.5m
Model Joint number	808
Model Element number	899
Damping	5%
Mode	20

그림 17 대상댐 모델링

3.2 동수압 및 지진파

본 해석에서 콘크리트 댐에 작용하는 수하중은 표 3에서 제시한 상시만수위(N.H.W.L)를 기준으로 설정하였으며, 지진시 발생하는 동수압은 그림 18과 같이 Westergaard의 가정을 기본으로 지진시 동수압의 근사해로부터 지진력 작용시 물의 질량이 댐에 부가하고 댐과 같이 거동하는 것처럼 관성력을 계산하여 댐에 주는 동수압의 영향을 고려할 수 있다. 이때의 부가질량은 댐체 상류면의 각 절점에 합산하여 해석을 수행하며, A_m 은 다음 식(1)로 표현되는 동수압 근사식으로부터 유도된 물의 부가질량(Added Mass)이다.^{(8),(9)}

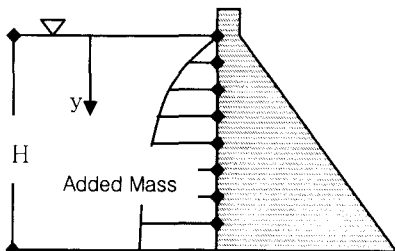


그림 18 Westergaard Added Mass

$$A_m = \frac{7\gamma_w}{8g} \sqrt{H \cdot y} \quad (1)$$

여기서, γ_w : 물의 단위중량 g : 중력가속도

H : 댐높이 y : 임의점까지 수위

본 연구에서 지진응답해석에 사용한 지진동은 대표적인 장주기파로 알려진 Hachinohe NS파(1968년 Tokachi-Earthquake, Peak 5.47sec, 0.2374g)이며, 해석시 지진파의 최대가속도를 1.5092 m/sec²(0.154g)로 조정하여 사용하였고, 지진동은 그림 19에 표시하였다.

3.3 수치해석

본 연구에서는 물성이 다른 산구 콘크리트로 축조된 댐에 대한 동적 거동특성을 분석하고자, 해석시 적용한 입력 물성값(E, ν 등)은 비파괴시험을 통하여 산정된 결과와 시추코아의 실험을 통하여 결정된 시험값을 각각 적용하여 지진응답해석을 실시하였고, 그에 따른 동적 거동에 대한 특성을 비교하였다.

3.4 해석결과

1) Mode

수치해석은 각 방향(x-y 평면)에 대한 유효 모드 질량 기여도가 90% 이상이 되도록 수행하여 20차 모드까지 실시를 하였다. 비파괴시험값(EM:공수위, EM(AM):만수위)과 시추코아시험값(CM:공수위, CM(AM):만수위)에 대한 모드 해석결과 시추코아시험값을 적용한 경우 주기가 크게 나타났다으며, 또한 상시만수위(N.H.W.L)시 주기가 공수위(Empty)보다 동수압에 의해서 증가함을 보였다.

2) 지진응답해석에 의한 변위

지진응답해석에 따른 변위 결과 최대 변위는 댐 정부에서 수평방향으로 Hachinohe 지진파 적용시 EM은 1.41mm, EM(AM)은 2.37mm, CM은 6.05mm, CM(AM)은 8.70mm가 발생되었다. 그림 21의 댐 높이에 따른 발생변위를 보면 동수압의 영향으로 약 2mm(상부) 변위차를 보이고 있으나, 비파괴시험값과 시추코아시험값을 적용한 결과를 보면 변위차는 약 5mm(정부)정도로 동수압의 영향보다 큰 차이를 나타내고 있다.

그림 22에서 댐 상부(Crest)의 발생변위는 경향은 입력지진동과 유사한 결과를 보이고 있으며, 변위 결과는 적용 물성값 차이로 시추코아시험값을 적용한 경우가 비파괴시험값을 적용한 경우보다 큰 경향을 보이고 있다. 그러나 전체 변위와 비교해 볼 때, 산구 콘크리트가 접하는 부분의 경계면에서 미소한 부분에 대한 변위차(그림 23, 24)는 크지 않은 것으로 나타났다.

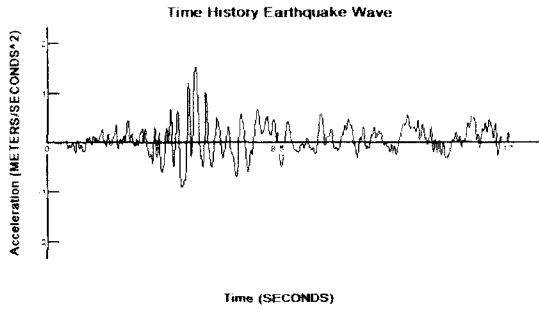


그림 19 Hachinohe NS Wave

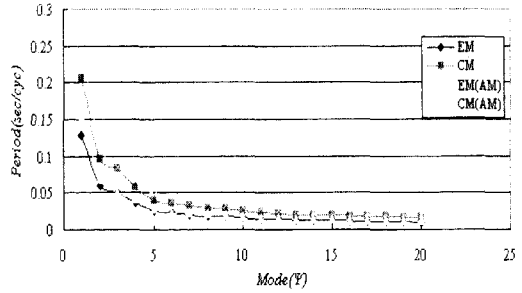


그림 20 Mode Analysis Result

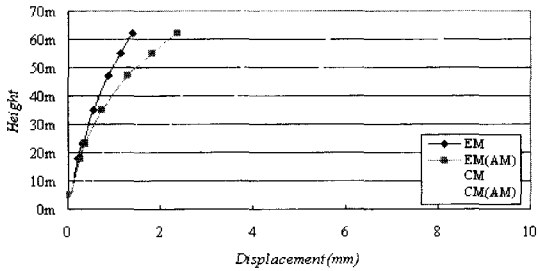


그림 21 Displacement for Height

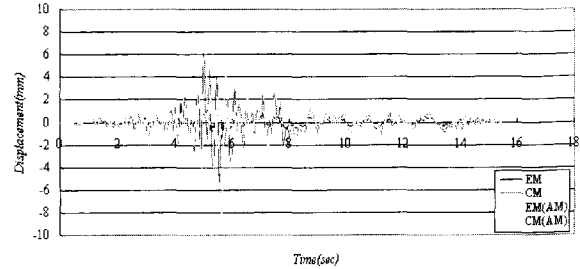


그림 22 Displacement for Analysis Case(Crest)

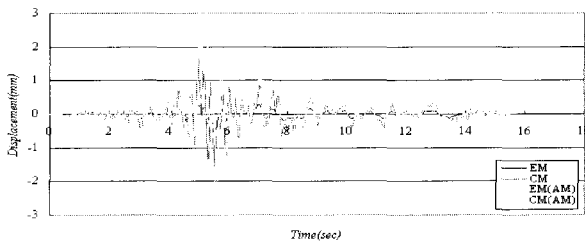


그림 23 Response Displacement(경계면-하)

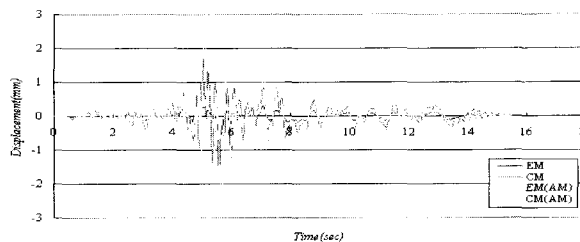


그림 24 Response Displacement(경계면-상)

3) 지진응답해석에 의한 응력 분포

댐은 지진시 발생하는 인장응력의 크기와 분포가 중요하다.⁽¹⁰⁾ 따라서, 본 연구에서는 지진응답해석시 물성값 차이로 발생하는 댐체 응력의 분포와 경향을 비교분석 하였다.

그림 25~28 응력 분포 결과 적용 지진파에 대하여 댐하류사면 2/3 지점 부근과 댐 상류 하단부에 응력이 집중되는 것을 볼 수 있으며, 각 Case별로 응력분포는 비슷한 경향을 보이고, 발생 수평방향 응력(σ_x)은 $1.2\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 2.9\text{kgf}/\text{cm}^2$ 를 나타내고 있다. 지진시 수하중으로 인한 동수압의 영향으로(그림 27, 28) 최대발생 인장력은 약 50%,

물성값 차이에 따른 수평방향 응력(σ_x)은 약 62%(동수압 고려시) 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 물성값 차이로 발생하는 응력 분포는 큰 차이를 보이지 않고, 신규 콘크리트가 접하는 미소부분의 응력전이 경향 역시 큰 변화가 없는 것으로 나타났지만, 하류사면에 발생된 인장응력 범위는 시추코아시험결과를 적용한 경우가 조금 크게 나타난 것으로 판단된다. 그림 29~32의 발생 최대주응력(S_1)은 $6.3\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 10.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ 를 나타내고 있으며, 전체적인 응력 분포경향은 각각의 시험값을 적용한 경우 모두 비슷한 경향을 보이고 있다.

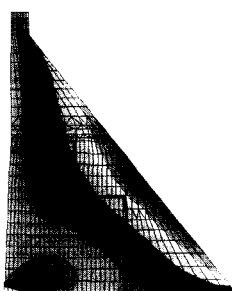


그림 25 EM Stress(σ_x)

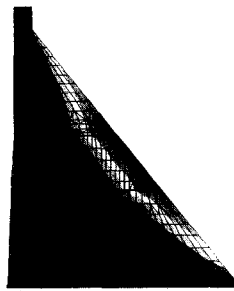


그림 26 CM Stress(σ_x)

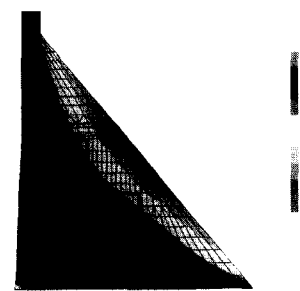


그림 27 EM(AM) Stress(σ_x)

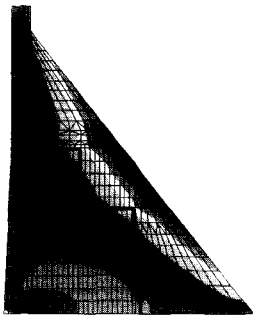


그림 28 CM(AM) Stress(σ_x)

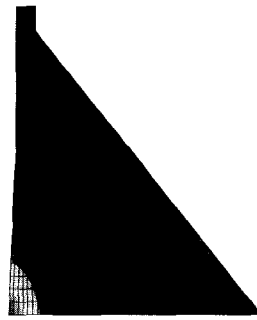


그림 29 EM Principal Stress(S1)

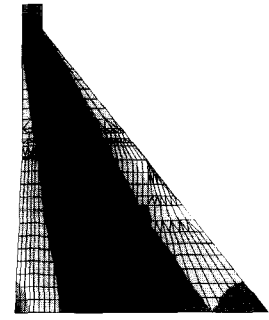


그림 30 CM Principal Stress(S1)

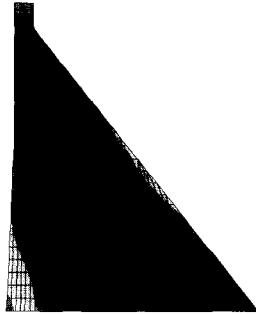


그림 31 EM(AM) Principal Stress(S1)

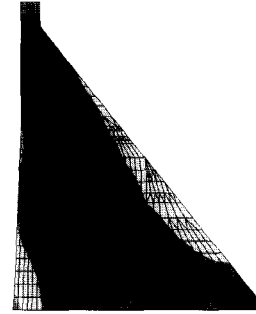


그림 32 CM(AM) Principal Stress(S1)

그러나, 비파괴시험값을 적용한 경우 발생 응력분포는 주로 댐체 뒷굽쪽을 중심으로 큰 응력이 발생되고 있지만, 시추코어시험값을 적용한 경우 발생되는 인장응력은 댐체 뒷굽과 하류사면을 중심으로 인장응력의 분포가 증가하고 있음을 알 수 있다(그림 30, 32). 이는 동일 물성체로 판단하여 적용한 비파괴시험결과값을 사용한 경우보다 산구 콘크리트의 물성값을 적용한 경우 물성값의 영향으로 구조체의 재료적물리적 성질의 차이로 인하여 응력의 분포가 크게 달라지는 것으로 판단된다. 응력발생 분포와 경향은 기존 연구 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다.⁽¹¹⁾

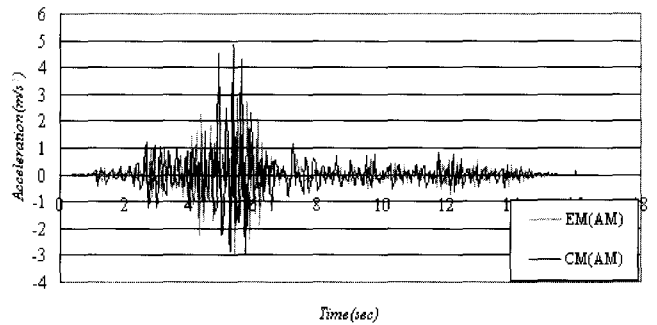


그림 34 Response Acceleration(Crest-AM)

4) 가속도 및 댐체 증폭

그림 33, 34는 댐체 상부에서 발생한 응답가속도로 댐체 상단(Crest)에서 발생한 응답가속도 결과 입력가속도의 약 1.7배(비파괴시험값 적용)와 약 3.6배(시추코어시험값 적용)가 증폭하고 있으며, 그림 33, 34에서 CM은 댐 상류측으로, CM(AM)은 동수압의 영향으로 댐 하류측으로 주된 증폭을 보이고 있다.

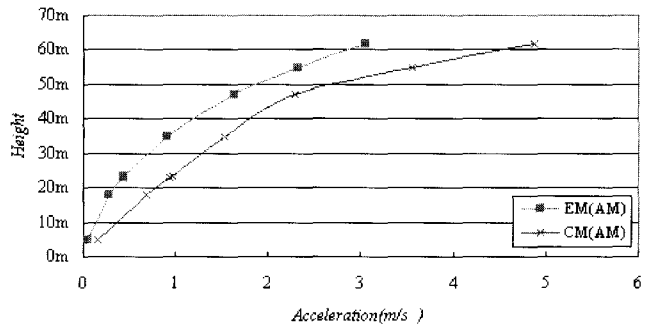


그림 35 Acceleration for Analysis Case

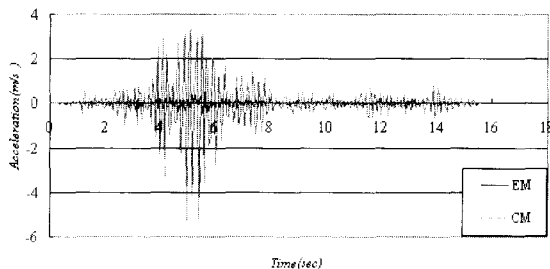


그림 33 Response Acceleration(Crest)

그림 35는 높이별 증폭현상을 나타낸 것으로, 댐 높이별 증폭 현상은 각각 물성값을 적용한 경우 높이에 따른 증폭 경향은 비슷하고, 댐 중간 높이 이후에서부터 크게 증폭하고 있다는 결과를 얻었다. 또한 EM(AM)과 CM(AM)의 증폭 현상이 조금 차이를 보이고 있는 것은 물성값의 차이로 인하여 발생된 결과로 보인다.

4. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 산구 콘크리트로 축조된 모델 댐을 대상으로 각각 비파괴시험값과 시추코아시험값을 적용하여 지진 응답해석을 실시하고, 물성값이 다른 콘크리트로 축조된 댐의 동적거동 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 모델댐의 경우 지금까지 물성이 다른 콘크리트 재료로 축조되어 댐 축조재료에 대한 물리적 특성을 도출하는 것과 내부 변화상태의 확인이 어려웠으나, 콘크리트 댐 내부상태를 조사한 결과 재료변화, 콘크리트면 탈락과 균열 부분을 찾을 수 없었으며, 산구 콘크리트 접합부, 댐체와 기반암 접합부 역시 깨끗한 상태를 나타내고 있다.
- 2) 동적해석 결과 물성값 차이로 인한 변위는 시추코아시험을 이용한 물성값의 경우가 댐체 상부에서 약 5mm 정도 크게 발생되었고, 응력분포결과는 댐체 입력 물성값의 차이에 따라 약 62%(동수압고려) 정도 증가하는 경향을 보이고 있으나, 산구 콘크리트가 접하는 부분에서의 변위의 급격한 변화, 접합부에서 응력의 과도한 변형과 집중현상은 찾아 볼 수 없었으나, 전체적으로 시추코아시험값을 적용한 경우 변위와 응력이 증가하는 것을 알 수 있다.
- 3) 산구 콘크리트로 구성되어 있는 콘크리트 댐의 거동 특성과 같이 재료 특성에 따라 댐의 거동특성을 분석하는 것은 설계값 또는 비파괴시험 방법을 이용한 것보다는 현장실험결과를 바탕으로 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 추후 재료특성에 따른 안전성 평가, 위험도 분석등을 통하여 댐 안전성에 대한 합리적인 결과를 도출하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국수자원공사, "한국의 댐", 보고서, 2002.
2. 건설부, 댐시설기준, 1993.
3. ASTM International, *Annual book of ASTM standards. Section 4*, ASTM International, West Conshohocken, PA. 5. 2002.
4. W.F.Chen and D.J.Han, *Plasticity for Structural Engineering*, Springer-Verlag, NewYork, Berlin, Heidelberg, 1988.
5. P. Kumar Metha and Paulo J. M. Monteiro, *Concrete (Structure, Properties and Materials)*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
6. 日本國水資源開發公團, "第15回 技術交流會議 資料", 보고서, 1998.
7. *GT-STRUDL user's Manual*.
8. 한국수자원학회, 댐설계기준, 2003.
9. 소진호, 정영수, 김용곤, "콘크리트 중력식 댐의 내진 안전성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제1호, 2002, pp. 33-41.
10. Anil K. Chopra, "Earthquake resistant design of concrete gravity dam," *ASCE*, Vol.104, No. ST6, 1978, pp. 953~971.
11. P. Chakrabarti and Anil K. Chopra, "A Computer program for earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction," EERC, Report No. 73-7.