

동수압을 고려한 콘크리트 중력식 댐의 내진안전성 평가

김 용 곤

한경대학교 안전공학과

(2005. 12. 6. 접수 / 2006. 2. 2. 채택)

Seismic Safety Evaluation of Concrete Gravity Dams Considering Dynamic Fluid Pressure

Yongon Kim

Department of Safety, Hankyong National University

(Received December 6, 2005 / Accepted February 2, 2006)

Abstract : Seismic safety evaluation of concrete gravity dams is very important because failure of concrete gravity dam may incur huge loss of life and properties around the dam as well as damage to dam structure itself. Recently, there has been growing much concerns about earthquake resistance or seismic safety of existing concrete gravity dams designed before current seismic design provisions were implemented. This research develops the dynamic fluid pressure calculation using 'added mass simulation'. The actual analysis using structural analysis package was performed. According to the analysis results, the vibration which is transverse to water flow seems to be very critical depending on the shape of the dam.

Key Words : concrete gravity dam, dynamic fluid pressure, seismic performance evaluation

1. 서 론

댐 시설물에 대한 지진 피해는 단순히 시설물의 피해뿐만 아니라 하류지역에 위치한 주거 지역 등의 피해를 유발하여 심각한 인명, 재산상 피해가 발생할 수 있으며 이는 막대한 사회경제적 비용을 필요로 한다. 최근 국내에서도 지진발생 빈도가 증가함에 따라 내진에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 대한 기준의 강화 및 적용은 바람직한 현상이라고 할 수 있다. 그러나 이와 같은 내진 측면의 접근은 대부분 신설 시설물의 설계에 국한되어 있으며^{1,6)}, 내진 기준 강화 이전의 기존 시설물에 대한 관심 및 적용은 미비한 실정이다. 최근 들어 기존시설물에 대한 내진성능에 대한 관심이 고조되어 현재는 시설물 별로 내진성능평가기준이 마련되어 있으나³⁾ 아직도 구체적인 항목에서는 불충분한 측면이 있고 제체의 지진 파괴에 의한 피해를 예방하기 위해서 기존 댐 시설물의 내진 성능에 대한 평가 기법의 연구

와 표준화가 필요한 실정이다. 본 논문에서는 댐에 작용하는 여러 가지 하중에 대한 분석과 평가를 통하여 콘크리트 중력식 댐의 내진성능의 평가방법을 연구하였다. 특히 동수압에 대한 해석을 위하여 Westergaard의 근사식과 부가질량법을 이용한 실제 해석결과를 제시하였다.

2. 댐에 작용하는 하중

콘크리트 중력식 댐의 안전성을 검토하기 위해 고려해야 할 하중은 다음과 같다.

2.1. 제체의 자중

제체는 무근콘크리트로 단위중량이 큰 콘크리트일수록 유리하며 양질의 골재 사용 시에는 $2.3\text{tonf}/\text{m}^3$ 을 넘기도 하지만 일반적으로 $2.3\text{tonf}/\text{m}^3$ 으로 하며 제체의 체적을 곱하면 연직방향으로 작용하는 제체의 자중을 구할 수 있다.

2.2. 정수압

정수압 계산을 위한 수위는 상시만수위에 파의 높이를 더한 수위로 계산하도록 하며 댐에 작용하는 정수압은 댐의 상류면에 수직으로 작용하고 수압은 수심에 비례한다.

$$P_h = W_w \cdot h \quad (1)$$

여기서, P_h : 정수압(tonf/m^2),
 W_w : 물의 단위중량(tonf/m^3),
 h : 수위(m)이다.

2.3. 퇴사압

댐에 유입되는 저수는 상당한 양의 토사를 운반하기 때문에 토사의 퇴적을 고려하여야 하며 일반적으로 댐의 설계 시에는 100년간의 퇴사량을 기준으로 한다.

$$P_s = K_a \cdot \gamma_{sub} \cdot d \quad (2)$$

여기서, P_s : 퇴사압(tonf/m^2),
 K_a : 수평토압계수(0.4~0.6),
 γ_{sub} : 퇴사의 수중단위중량($0.95 \sim 1.1 \text{tonf/m}^3$),
 d : 퇴사 깊이(m)이다.

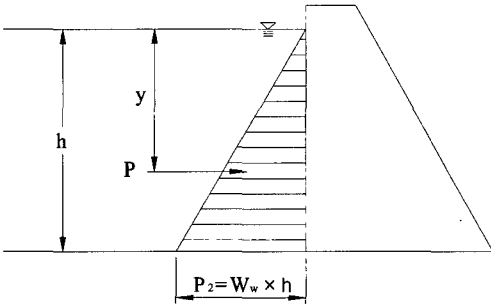


Fig. 1. Static hydropressure.

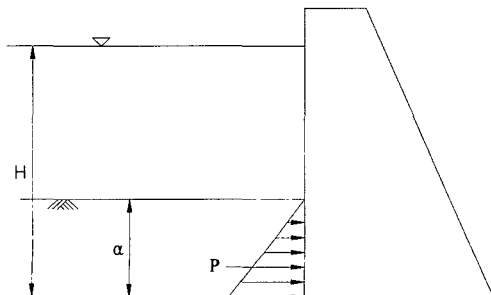


Fig. 2. Pressure from sediment.

2.4. 양압력

양압력은 제체와 기초압반의 접촉면, 제체 내의 이음매, 또는 기초지반의 공극균열 등에서 발생하는 내부수압이며, 임의의 수평단면에 대하여 수직 방향으로 작용하는 수압이다. 양압력은 댐의 국부적인 현상의 측정으로서 침투 경로의 형성과 깊은 관계를 갖고 있어 댐의 안전관리에 매우 중요한 역할을 하는데 미리 시간 경과에 따른 양압력의 변화상태를 측정하여 각 개소마다 임의의 시간과 최종 양압력의 비를 구한 다음 평상시에 측정된 값에 이 비를 곱하여 양압력을 추정한다. 지진 발생시 댐 및 주변 지역에는 횡방향 뿐만 아니라 연직 방향의 추가적인 반복 하중도 작용하게 되며 이로 인해 연직 방향의 수압이 더욱 증가할 수 있다. 따라서 양압력에 대한 지진시 거동 예측은 평상시의 계측 자료를 토대로 반드시 선행되어야 한다.

양압력의 감소를 위해 제체내부 및 기초에 배수공을 설치하는데 배수공의 유·무와 함께 위치 및 간격 등에 따라 양압력이 변화한다. 계측자료가 없는 경우에는 배수공의 유·무에 따라 각각 다음의 식을 사용한다.

2.4.1. 배수공이 없는 댐의 경우

$$P_{u1} = \gamma_w \cdot \left[\frac{1}{3}(H_1 - H_2) + H_2 \right] : \text{상류단} \quad (3)$$

$$P_{u2} = \gamma_w \cdot H_2 : \text{하류단} \quad (4)$$

여기서, P_{u1} : 상류단 양압력(tonf/m^2),
 P_{u2} : 하류단 양압력(tonf/m^2),
 γ_w : 유체의 단위중량(tonf/m^3),
 H_1 : 상류면 수위(상시만수위 : m)
 H_2 : 하류면 수위(m)

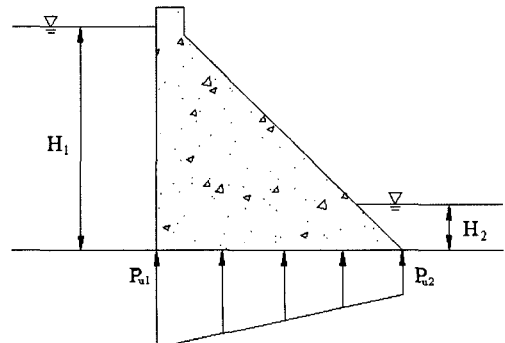


Fig. 3. Buoyancy pressure(without Drain Hole).

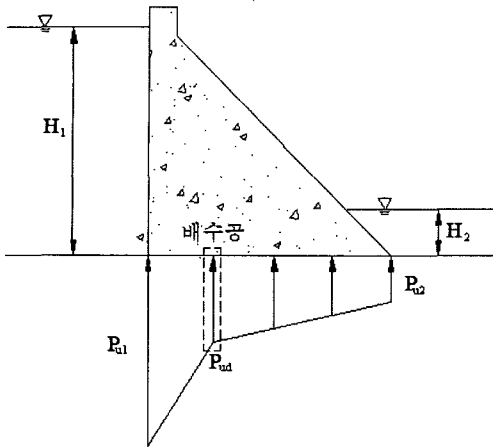


Fig. 4. Buoyancy pressure(with Drain Holes).

전양압력의 작용점은 기초 저면폭의 $\frac{1}{3}L$ 지점에서 작용한다.

$$P_{ut} = \frac{1}{2} \cdot (P_{u1} + P_{u2}) \cdot L \quad (5)$$

여기서, L : 기초 저면 폭(m)

2.4.2. 배수공이 있는 댐의 경우

$$P_{u1} = \gamma_w \cdot H_1 : \text{상류단} \quad (6)$$

$$P_{ud} = \gamma_w \cdot \left[\frac{1}{5}(H_1 - H_2) + H_2 \right] : \text{배수공위치} \quad (7)$$

$$P_{u2} = \gamma_w \cdot H_2 : \text{하류단} \quad (8)$$

여기서, P_{u1} : 상류단 양압력(tonf/m^2),
 P_{ud} : 배수공 양압력(tonf/m^2),
 P_{u2} : 하류단 양압력(tonf/m^2),
 γ_w : 유체의 단위중량(tonf/m^3),
 H_1 : 상류면 수위(상시만수위 : m)
 H_2 : 하류면 수위(m)

3. 관성력

지진하중에 대한 동력학적 해석을 수행하는 것이 관성력의 영향을 정확히 산정하는 방법이나 콘크리트댐과 같이 탄성변형이 적은 강체로 간주할 수 있는 구조물에서는 간편한 해석을 실시할 경우 관성력을 정력학적으로 취급할 수도 있으며 댐체에 작용

하는 관성력은 제체의 자중에 설계진도를 곱한 값으로 하고, 수평으로 작용하는 것으로 한다. 그리고 연직진도는 일반적으로 진원지 부근이 아니면 수평진도의 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 이하로 산정한다.

$$I = W \cdot K_D \quad (9)$$

여기서, I : 지진시 댐체에 작용하는 관성력(t/m^3),
 W : 댐체의 단위중량(t/m^3),
 K_D : 제체의 설계진도이다.

$$K_D = A \cdot S \cdot \gamma_2 \quad (10)$$

여기서, A : 지역별 지반진도(지진구역도 이용 Zone I = 0.11, Zone II = 0.07),
 S : 지반 조건에 따른 정수(1.0~2.0),
 γ_2 : 댐 종류에 따른 정수(중력댐 : 1.0, 아치댐 : 2.0)이다.

4. 동수압의 해석방법

4.1. 기본가정

Wastergaard는 동수압의 해를 구하기 위하여 다음의 가정을 사용하였다.

- (1) 댐 제체와 저수지의 상류측은 수직이다.
- (2) 저수지는 수평인 저면을 가진 2차원의 반무한체이다.
- (3) 저수의 점성은 무시한다.
- (4) 댐의 상류면에서 댐 제체의 수평방향 변위와 유체의 수평방향 변위는 서로 같다.
- (5) 수면에서는 응력이 작용하지 않는다.(표면파의 파고 영향을 무시)
- (6) 저수지 바닥에서의 유체의 수직방향 변위는 0이다.
- (7) 저수지의 무한원방에서 동수압은 0이다.

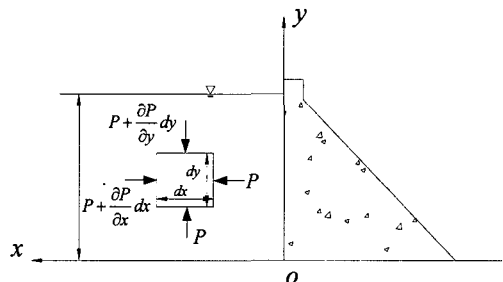


Fig. 5. Two dimensional coordinate system.

좌표계를 Fig. 5와 같이 표시하면 동수압의 기본 파동방정식으로써 다음과 같은 파동방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{1}{C_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (11)$$

여기서, $p(x, y, t)$ 는 동수압이고 $C_0 = \sqrt{\frac{gK}{W_0}}$ 로써 수중에서 탄성파의 전파속도이다.

입력진동에 의한 댐 상류면의 경계조건은 가정 (4)를 고려하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial(a, y, t)}{\partial x} = -\frac{W}{g} a_0 e^{i\omega t} \quad (12)$$

여기서, a_0 는 입력가속도진폭, w 는 조화진동의 각진동수이다.

또, 가정 (5)에서 저수표면의 조건은 다음 식으로 표시된다.

$$p(x, H, t) = 0 \quad (13)$$

같은 방법으로 가정 (6)에서 얻을 수 있는 저수지의 저면에 대하여 다음의 경계조건이 설정된다.

$$\frac{\partial p(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

또한, (7)의 경계조건으로부터 다음 경계조건이 성립된다.

$$p(\infty, y, t) = 0 \quad (15)$$

4.2. 동수압의 급수해

파동방정식은 변수분리법을 이용하여 풀 수 있다. 즉, 동수압 $p(x, y, t)$ 는 입력진동과 같은 진동수의 조화진동이므로 결국 파동방정식의 해는 다음과 같이 된다.

$$p(x, y, t) = \sum_r \frac{2W_0}{gH} \frac{(-1)^{r+1}}{\lambda_r \cdot J_r} \cos(\lambda_r y) e^{-J_r x} a_0 e^{i\omega t} \quad (16)$$

여기서,

$$\lambda_r = \frac{(2r-1)\pi}{2H} \quad (r = 1, 2, 3, \dots) \quad (17)$$

$$J_r = \sqrt{\lambda_r^2 - \frac{\omega^2}{C_0^2}} \quad (J_r \text{은 실수}) \quad (18)$$

이다.

4.3. 동수압해의 성질

Westergaard의 가정을 기본으로 얻어진 동수압의 해는 위의 파동방정식의 해로 표시되지만 식 (12)의 필요조건에서 $\omega < \frac{\pi C_0}{2H} = \omega_0$ 의 경우에만 해가 존재한다. 그리하여 댐 상류면의 동수압은 간단한 근사식으로 나타낼 수 있고, 특히 동수압의 분포를 포물선으로 근사한 경우에는 입력진동의 주기에 관계없이 다음과 같은 근사식으로 표시될 수 있다.

$$p = \frac{7W_0}{8g} a_0 \sqrt{H \cdot h} \quad (19)$$

여기서, W_0 : 유체의 단위중량, g : 중력가속도, a_0 : 입력 가속도진폭이다.

4.4. 부가질량법(Added Mass Method)

Westergaard의 해에서는 부가질량의 개념을 도입할 수 있다. 식 (19)를 상세히 관찰해보면 유체에 의하여 댐 체체에 가해지는 동수압은 유체의 질량과 지진에 의한 가속도의 곱, 그리고 약간의 추가적인 수치의 곱으로 이루어짐을 발견할 수 있다. 즉, 식 (19)에서 다음의 항을 분리해 내어 식 (20)의 물리량이 물과 맞닿은 댐체의 표면에 추가적으로 붙어 있는 질량이라고 생각한다면 나머지 항들은 그 질량에 지진가속도가 가해져서 발생하는 관성력을 표시하는 항이라고 볼 수 있다.

$$m_w = \frac{7W_0}{8g} \sqrt{H \cdot h} \quad (20)$$

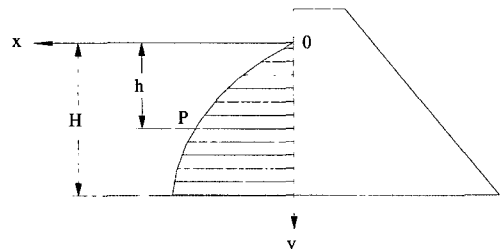


Fig. 6. Hydro-Dynamic pressure on the dam surface.

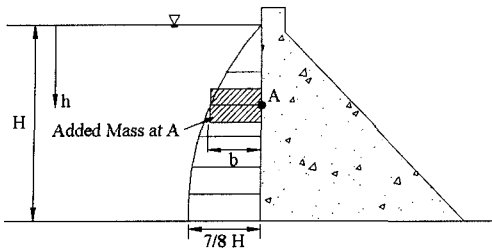


Fig. 7. Use of added mass concept.

즉, 구조해석 프로그램을 이용할 때에는 Fig. 7에서 보여 주듯이 각 지점 A에서 식 (20)에서 표시되는 만큼의 유체가 물과 맞닿은 댐체 표면에 부가적으로 붙어있다고 가정하여 댐체의 형상과 질량에 관한 데이터를 입력한 후 동적해석을 실시하면 동수압을 감안한 동적구조해석이 되는 것이다.

5. 해석방법

콘크리트댐의 지진응답해석은 먼저 지진의 영향을 증가의 정적하중으로 환산하여 정적해석을 수행하는 유사정적해석법이 있다. 더 정밀한 결과를 얻기 위한 동적해석 방법으로는 실측된 지진파 또는 인공적으로 생성한 지진파를 이용한 시간이력해석과 스펙트럼 가속도를 이용한 응답스펙트럼 해석이 있는데 본 연구에서는 표준응답스펙트럼⁸⁾을 이용하여 동적해석을 실시하였다.

5.1. 응답 스펙트럼 해석

지진파기록은 보통 시간과 진폭 등의 기록, 즉, time domain의 정보로 표시되는데 일반적으로 time domain의 지진파형은 일차적인 내진설계에 유용하지 않아 이런 time domain정보로부터 지진파의 진동수, 위상(phase), 진폭 등의 유용한 정보를 얻어내어 표준화된 응답스펙트럼을 작성하고 작성된 응답스펙트럼을 적용하여 구조물의 응답을 해석하는 방법이 며 주로 구조물의 설계 시에 적용하는 방법이다. 지반운동에 따른 구조물의 응답은 다음의 동적 평형 방정식과 같다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = m\ddot{u}_g \tag{21}$$

여기서, m : 질량행렬, c : 감쇄행렬,
 k : 강성행렬, \ddot{u}_g : 지반가속도
 \ddot{u}, \dot{u}, u : 구조물의 변위, 속도, 가속도

상기 방정식에 응답 스펙트럼을 적용하는데 지반 가속도는 시간에 따른 수치화된 스펙트럼 가속도의 응답스펙트럼곡선이며 지반진동은 3방향에서 동시에 발생할 수 있다. 즉 XY평면에서 두 개의 중립축 원방향과 Z방향이다. 최대변위와 부재력(또는 응력)을 얻기 위해, 하중의 특정 방향과 관련되는 모드 응답들이 먼저 계산되고 난 후 CQC(Complete Quadratic Combination)해법 등을 사용한 조합이 이루어진다. 그리고 전체 구조물의 응답은 SRSS(Square Root of the Sum of the Squares)해법에 의해 3방향으로부터의 응답들을 조합하면서 계산되어진다.

5.2. 설계응답스펙트럼의 작성

지역적인 특성과 지반성질을 고려한 설계지반운동의 특성은 기본적으로 응답스펙트럼으로 표시하며 Fig. 8의 5% 감쇠비에 대한 표준설계응답스펙트럼의 완전한 결정을 위해 요구되는 지진계수 C_a 와 C_v 의 값은 Table 1에 지반종류별, 지진구역별로 각각 주어져 있다. 필요시 구조물의 구조특성과 설계법을 고려하여 작성된 설계응답스펙트럼을 사용할 수 있으며 이 때의 설계응답스펙트럼은 그림에 주어진 표준설계응답스펙트럼보다 안전 측이어야 한다.

지진에 의한 지반운동은 지반의 특성에 따라 달라지므로 지반의 특성을 반영할 수 있게 하기 위하여 지반을 분류하여 그에 따른 지진계수(Table 1 참조)를 정의하도록 한다. 지반분류는 국지적인 토질 조건, 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 원칙적으로 지반을 다음의 Table 1과 같이 $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F$ 의 6종으로 분류한다. 여기서 지반종류 S_F 는 부지의 특성조사가 요구되는 다음 경우에 속하는 지반에 해당한다.

(1) 액상화가 일어날 수 있는 흙, Quick Clay와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반

Table 1. Earthquake coefficient

지반 종류	지진계수 C_a		지진계수 C_v	
	구역 I	구역 II	구역 I	구역 II
S_A	0.09	0.05	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08	0.18	0.11
S_D	0.16	0.11	0.23	0.16
S_E	0.22	0.17	0.37	0.23

(2) 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반 (지층의 두께, $H > 3m$)

(3) 매우 높은 소성을 가진 점토지반 ($H > 7m$ 이고 $PI = 75$)

(4) 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토 ($H > 35m$)

다음의 Fig. 8은 지반조건 S_A 와 S_B 일 때 지진구역 I 및 II에서의 재현주기 500년을 기준으로 작성한 표준설계응답스펙트럼이다.

5.3 유효모드 질량(Effective Modal Mass)

응답스펙트럼 또는 시간이력해석에서 모드 중첩을 사용할 때에는 계산의 효율성을 증대시키기 위하여 구조계의 자유도 보다 작은 수의 모드를 사용하는데 해석에 포함시켜야할 모드수를 정하는 기준으로 유효모드 질량을 사용한다. 동적 해석시 i 번째 모드에 대한 유효모드 질량은 다음의 식 (22)와 같다.

$$Effective\ Modal\ Mass = \frac{L_i^2}{\mu_i} \quad (22)$$

Table 2. Foundations types

지반종류	상부 30.480m에 대한 평균 지반 특성			
	전단파속도 (m/s)	표준관입시험 N (blow/foot)	비배수전단강도 s_u (kPa)	
S_A	경암지반	1500 이상	-	-
S_B	보통암지반	760~1500	-	-
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360~760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사지반	180~360	15~50	50~100
S_E	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

유효모드 질량을 전체 모드에 대하여 합하면 구조계의 전체 질량이 되며 n 번째 유효모드까지의 질량의 합은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{\mu_i} &= \{L\}^T \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_n \end{bmatrix} \{L\} \\ &= (\{\phi\}^T [M] \{1\})^T (\{\phi\}^T [M] \{\phi\})^{-1} (\{\phi\}^T [M] \{1\}) \\ &= \{1\}^T [M]^{-1} \{\phi\} \{\phi\}^{-1} [M] \{\phi\}^T [M] \{1\} \\ &= \{1\}^T [M] \{1\} \\ &= \sum_{i=1}^n M_i (Total\ Mass) \end{aligned} \quad (23)$$

해석에 포함된 유효모드 질량의 합이 전체 질량의 90% 이상이 되도록 모드 수를 정하였다.

6. 해석결과

6.1. 고유치 해석

지진하중의 작용방향은 대상구조물에 대하여 임의의 방향이지만 해석의 편의를 위하여 설계응답스펙트럼은 세 개의 직교방향 성분으로 각각 독립된 입력운동에 대한 응답을 구한 다음, 이들 세 성분에 의한 응답을 조합하여 방향성을 고려하고 있다. 따라서, 지반운동의 방향성을 X, Y, Z방향 중에 한 방향을 기준으로, 나머지 두 방향은 30%를 적용하여 다음과 같은 3가지 경우로 분류하였다.

Case 1 : X축(상·하류)방향으로의 지진영향의 100%, Y축(댐축)방향으로의 지진영향의 30%, Z축(연직)방향 지진영향의 30%를 조합.

표준설계응답스펙트럼

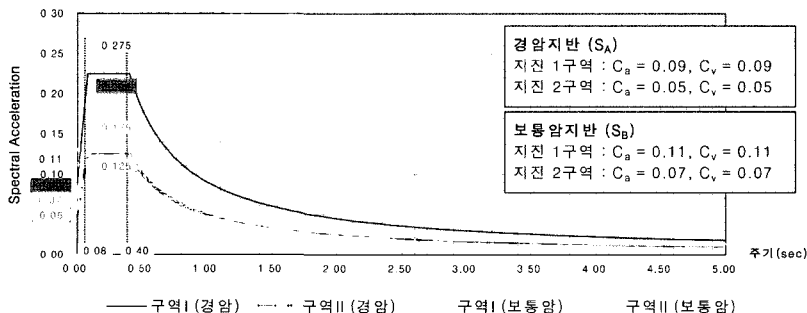


Fig. 8. Standard design response spectrum(5% Damping, Area I & II, Hard rock & Medium rock).

Case 2 : X축(상·하류)방향으로의 지진영향의 30%, Y축(댐축)방향으로의 지진영향의 100%, Z축(연직)방향 지진영향의 30%를 조합.

Case 3 : X축(상·하류)방향으로의 지진영향의 30%, Y축(댐축)방향으로의 지진영향의 30%, Z축(연직)방향 지진영향의 100%를 조합.

고유치는 구조물이 가지고 있는 고유한 특성으로 강성과 질량의 함수로 표현되며, 설계응답스펙트럼 해석시 선형 다자유도 진동계의 지진응답은 각 진동모드를 중첩하여 계산한다. 다중모드 스펙트럼 해석결과는 해석모형에 대한 고유 진동모드의 개수에 따라 달라지므로 주요 모드의 포함여부와 적정 수준의 질량참여도 여부를 확인하여야 한다.

본 해석에서는 상·하류방향(X방향)과 연직방향(Z방향)에 대한 질량참여도를 90%이상 확보하였으며 댐축 방향(Y방향)에 대해서는 좌·우안부 측면의 댐축 방향(Y방향)으로의 구속효과에 의하여 전체질량에 대한 피어의 질량인 3.55%를 확보하였다. 또한, 고유치 해석결과 X방향의 기본주기(Fundamental Period)는 0.291초에서 61.41%로 나타났고, Z방향은 0.106초에서 81.98%로 나타났으며, 세부내용은 Table 3과 같다. 이에 따른 모드형상은 총 25개로 Fig. 9에 나타내었다.

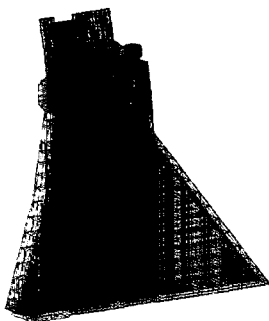
Table 3. Effect of resonant frequency and mass on the mode

Mode	고유진동수 (cycle/Sec)	고유주기 (Sec)	X방향		Y방향		Z방향	
			MASS	SUM	MASS	SUM	MASS	SUM
1	3.194	0.313	0.00	0.00	2.21	2.21	0.00	0.00
2	3.439	0.291	61.41	61.41	0.00	2.21	0.53	0.53
3	6.356	0.157	0.00	61.41	0.15	2.37	0.00	0.53
4	7.372	0.136	28.68	90.09	0.00	2.37	0.88	1.41
5	9.474	0.106	0.01	90.10	0.00	2.37	80.57	81.98
6	10.142	0.099	0.00	90.10	0.58	2.95	0.00	81.98
7	12.190	0.082	5.93	96.03	0.00	2.95	0.07	82.05
8	16.527	0.061	0.78	96.81	0.00	2.95	0.10	82.15
9	17.618	0.057	0.00	96.81	0.13	3.08	0.00	82.15
10	18.524	0.054	1.30	98.11	0.00	3.08	5.36	87.51
11	19.824	0.050	0.00	98.12	0.00	3.08	0.00	87.51
12	19.937	0.050	0.00	98.12	0.11	3.19	0.00	87.51
13	21.384	0.047	0.51	98.63	0.00	3.19	5.16	92.67
14	22.160	0.046	0.34	98.98	0.00	3.19	0.23	92.90
15	22.237	0.045	0.00	98.98	0.25	3.44	0.00	92.90
16	22.973	0.044	0.00	98.98	0.03	3.47	0.00	92.90
17	23.353	0.043	0.00	98.98	0.00	3.47	0.11	93.01
18	24.814	0.040	0.00	98.98	0.02	3.49	0.00	93.01
19	25.894	0.039	0.33	99.31	0.00	3.49	1.69	94.70
20	26.262	0.038	0.00	99.31	0.03	3.52	0.00	94.70
21	26.645	0.037	0.00	99.31	0.00	3.52	0.95	95.64
22	27.703	0.036	0.00	99.31	0.02	3.54	0.00	95.64
23	29.395	0.034	0.01	99.32	0.00	3.54	0.17	95.81
24	29.513	0.033	0.00	99.32	0.01	3.55	0.01	95.82
25	31.530	0.032	0.01	99.33	0.01	3.55	0.01	95.83

6.2. 응력분포

응력계산의 결과가 Table 4와 Fig. 10에 보여져 있다. Case 1(상·하류방향)의 경우, 피어와 웨어의 접합부 및 트러니온 앵커 블록 부위의 압축응력은

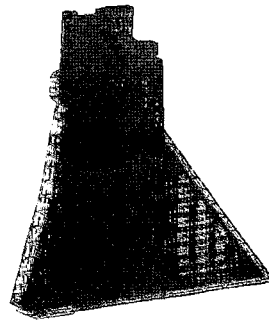
각각 23.12kgf/cm², 37.20kgf/cm²로 나타났고, 인장응력은 각각 41.05kgf/cm², 15.10kgf/cm²로 나타나 웨어의 접합부에서 인장응력이 가장 크게 나타나 있다.



<Mode 1>

```

MIDAS/CIVIL
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE
FREQUENCY
(CYCLE/SEC)
3.19829
NATURAL PERIOD
(SEC)
0.313104
NPM(1)
DY* 0.000860
DY* 2.212590
DZ* 0.000000
SX* 0.000000
SY* 0.000000
SZ* 0.000000
Mode 1
FILE: 동해의 FEMA
UNIT: (cm)
DATE: 09/28/2002
VIEW-DIRECTION
X
2 0 259
    
```



<Mode 2>

```

MIDAS/CIVIL
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE
FREQUENCY
(CYCLE/SEC)
3.438837
NATURAL PERIOD
(SEC)
0.290796
NPM(1)
DX* 61.408632
DY* 0.000000
DZ* 0.829223
SX* 0.000000
SY* 0.000000
SZ* 0.000000
Mode 2
FILE: 동해의 FEMA
UNIT: (cm)
DATE: 09/28/2002
VIEW-DIRECTION
X
2 0 259
    
```

동수압을 고려한 콘크리트 중력식 댐의 내진안전성 평가

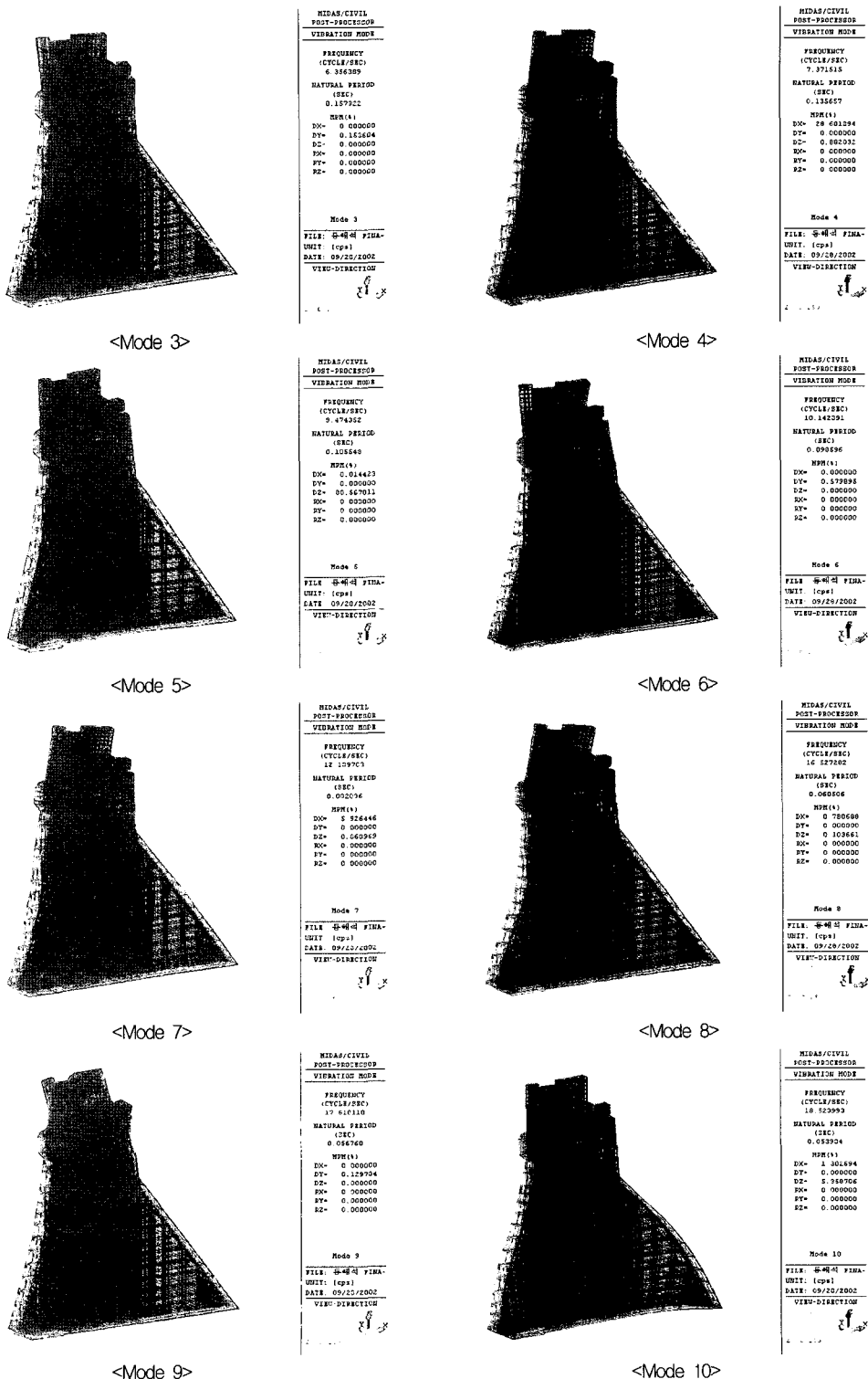
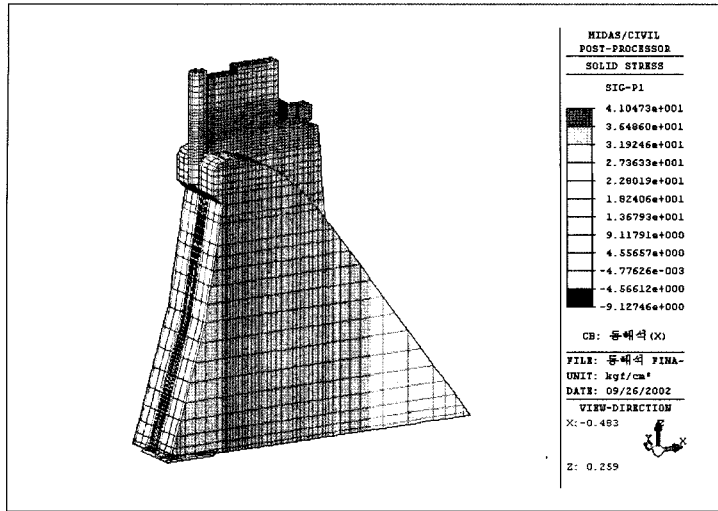
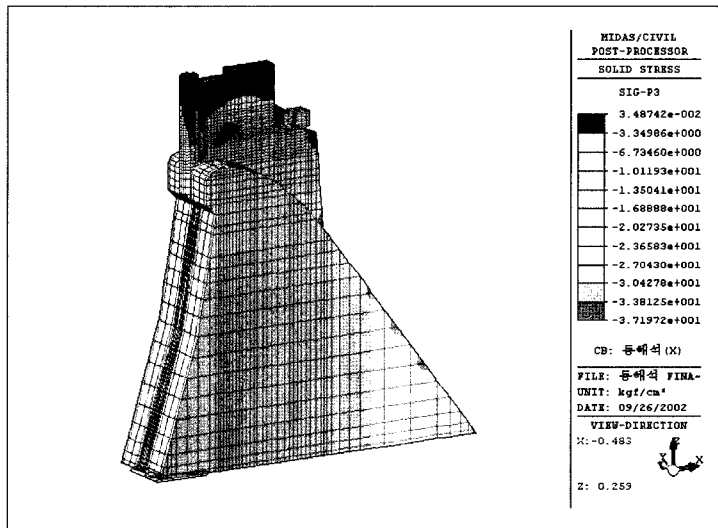


Fig. 9. Displacement from each Mode.



최대주응력 분포도



최소주응력 분포도

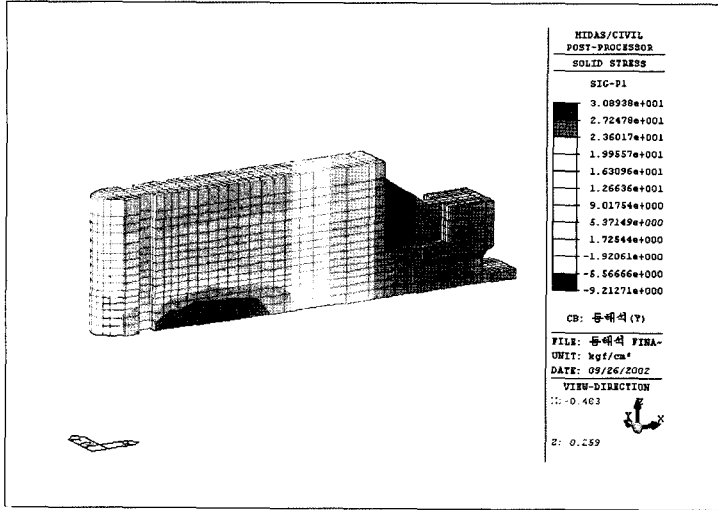
Fig. 10. Case 1 : Principal stress caused by x-direction earthquake.

또한, Case 2(댐축방향)의 경우는 댐체에 가장 취약한 상태로 나타났으며, 피어와 웨어의 접합부 및 트리니온 앵커 블록 부위에서 압축응력은 각각 67.64 kgf/cm², 39.89kgf/cm²로 다른 경우에 비하여 가장 크게 나타났으며, 인장응력은 각각 68.71kgf/cm², 30.89 kgf/cm²로 나타나 모든 경우에서 가장 큰 응력상태를 보이고 있다. Case 3(연직방향)의 경우는 상·하류방향과 댐축 방향의 응답을 혼합한 형태로 수평방향의 지반운동에 비해 상대적으로 작은 값을 보이고 있으며 피어와 웨어의 접합부 및 트리니온 앵커 블록 부위에서 압축응력은 각각 20.80kgf/cm², 32.11

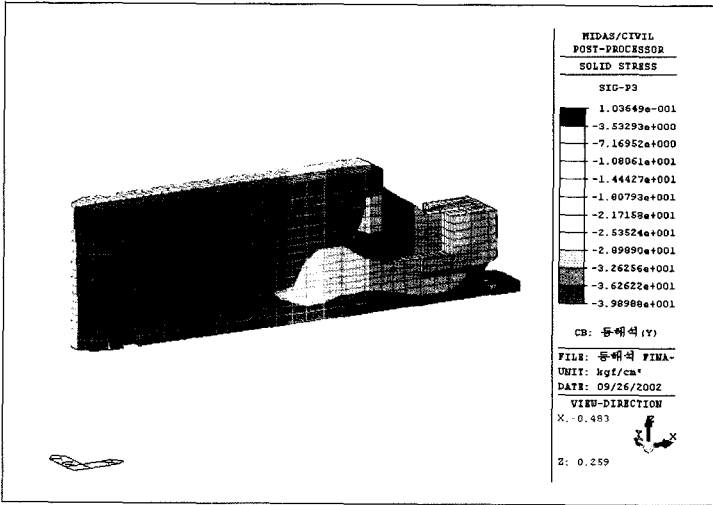
kgf/cm²이며, 인장응력은 각각 27.04kgf/cm², 11.34kgf/cm²로 나타나 대체로 양호한 상태를 나타내고 있다.

피어의 상단부는 다른 부분에 비하여 응력이 상대적으로 작은 상태로 나타났으며, 이는 댐체 상단의 권양기와 공도교의 관성력이 존재하더라도 지진 발생시 변위가 자유스러운 상태가 되기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 댐축 방향의 지진에 대해서 피어와 웨어의 접합부는 68.71kgf/cm²로 상당히 큰 인장응력이 발생되어 가장 취약한 상태로 나타났다. 이는 지진시 정수압과 동수압이 집중되는 트리니온 앵커 블록 부위보다 강성의 차이가 큰 피어와 웨어의 접

동수압을 고려한 콘크리트 중력식 댐의 내진안전성 평가



댐축 방향 지진하중에 대한 최대주응력 분포도



댐축 방향 지진하중에 대한 최소주응력 분포도

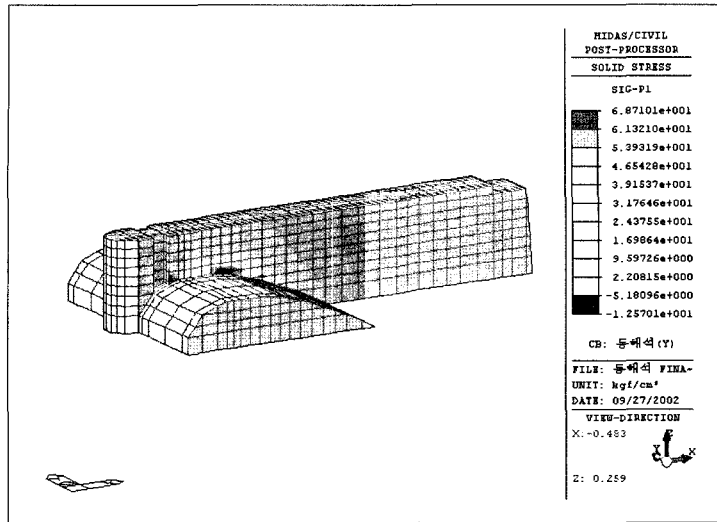
Fig. 11. Principal stress near trunnion anchor block.

합부가 관성력에 의해 더 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

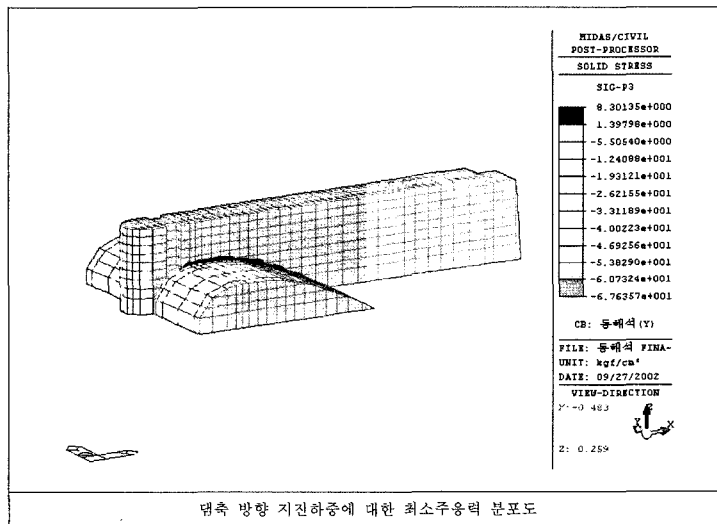
트러니온 앵커 블록 부위에 대한 댐축 방향 지진 시 최대주응력 분포도 및 최소주응력 분포도는 Fig. 11과 같이 나타나 있다. 트러니온 앵커 블록 부위는 지진시 수문에 작용하는 정수압과 동수압을 지지하기 때문에 상·하류방향의 지진이 주된 영향을 미칠 것으로 판단하였으나, 실제로는 댐축 방향 지진시 인장력이 약 2배정도 더 큰 것으로 나타나 지진의 방향성에 의한 영향은 댐축방향의 지진이 주된 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 4. Stress in the dam structure (단위 : kgf/cm^2)

구 분	발생부위	주응력	
		최대 인장응력	최대 압축응력
Case 1 (상·하류 방향 지진)	피어와 웨어의 접합부	41.05	23.12
	트러니온 앵커 블록 부위	15.10	37.20
Case 2 (댐축방향 지진)	피어와 웨어의 접합부	68.71	67.64
	트러니온 앵커 블록 부위 (상류부 긴장력 도입부)	30.89	39.89
Case 3 (연직방향 지진)	피어와 웨어의 접합부	27.04	20.80
	트러니온 앵커 블록 부위	11.34	32.11



댐축 방향 지진하중에 대한 최대주응력 분포도



댐축 방향 지진하중에 대한 최소주응력 분포도

댐축 방향 지진하중에 대한 최소주응력 분포도

Fig. 12. Principal stress near the connection of pier and wear part.

피어와 웨어의 접합부에 대한 댐축 방향 지진시 최대주응력 분포도 및 최소주응력 분포도는 Fig. 12와 같다. 특히, 댐축 방향의 응력은 상·하류방향에 비해 약 1.7배정도 크게 나타나 댐축 방향 지진이 피어와 웨어의 접합부에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

댐체 저면에서의 인장 및 압축, 전단응력의 응력 분포도는 Fig. 13과 같으며, 각 조건별 응력은 Table 4와 같다. Table 5에 보이는 바와 같이 인장, 압축, 전단응력은 상류 저수지의 정수압과 동수압의 영향으로 상·하류방향의 지진에서 가장 큰 응력이

발생되는 것으로 나타났다.

Table 5. Stress under the dam (단위 : kgf/cm²)

구 분	인장응력 (σ_{xx})	압축응력 (σ_{zz})	전단응력 (τ_{xz})
Case 1 (상·하류방향 지진)	4.78	18.36	3.50
Case 2 (댐축방향 지진)	-	14.56	2.80
Case 3 (연직방향 지진)	-	12.49	2.80
허용응력	5.98	39.0	3.56

동수압을 고려한 콘크리트 중력식 댐의 내진안전성 평가

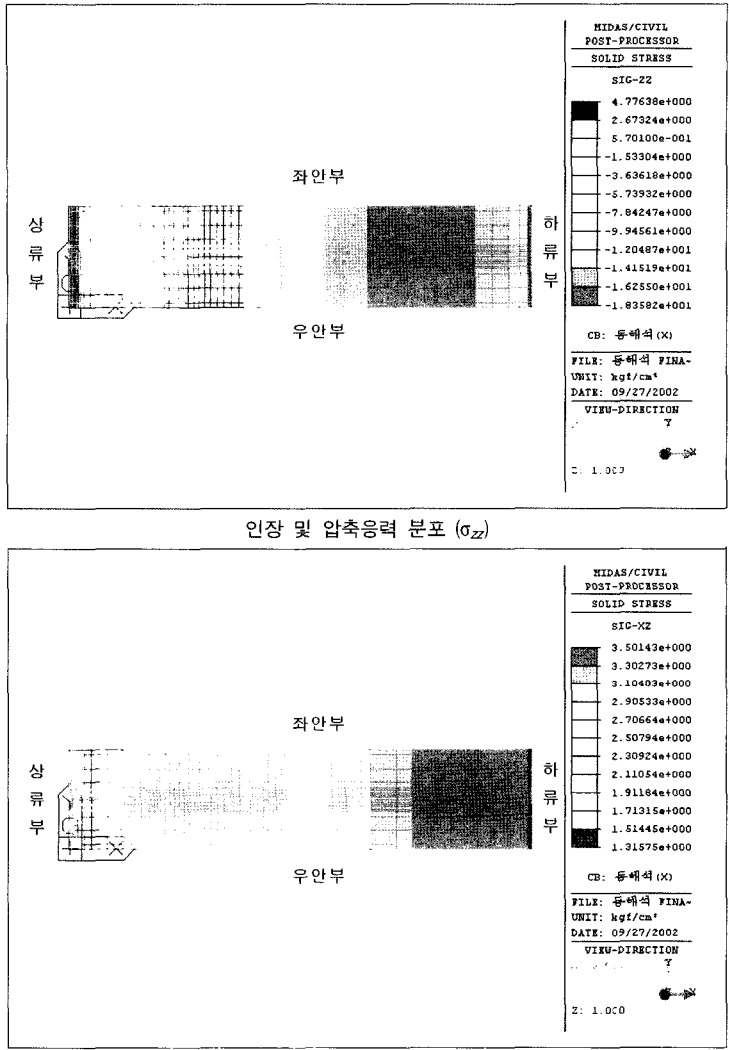


Fig. 13. Case 1 : Stress distribution under dam from x-direction earthquake.

7. 결론 및 향후 연구방향

본 연구를 통하여 정수압, 퇴사압, 양압력, 관성력, 동수압 등의 하중에 대한 구조적 해석을 고려한 콘크리트 중력식 댐의 내진안전성 평가가 이루어졌다. 특히 내진 안전성 평가에서 관성력을 정적하중으로 작용시켜 계산하는 등가정적해석을 실시하던 기존의 방법을 탈피하여 동수압의 영향을 정밀하게 평가하고자 부가질량법의 개념을 이용한 동적해석을 실시하였다. 해석의 결과로서 다음과 같은 사항들이 발견되고 고찰되어졌다.

1) 댐의 모양이 불균일하거나 기하학적으로 복잡한 경우에는 댐의 상하류 방향 지진 만이 아닌 댐축 방향 지진에 대한 해석이 반드시 필요하다는 것이 밝혀졌다. 일반적으로 내진안전성 평가에서 댐의 상하류 방향 해석에 집중하고 기타 방향에 대하여는 경시하거나 심지어 무시하는 경향이 있으나 실제로 댐체의 형태에 따라서는 댐축 방향이나 연직방향의 해석결과가 더 심각하게 나올 수도 있다는 것을 알 수 있었다. 이는, 단면의 급변화로 인한 강성의 차이가 댐축 방향이 가장 크기 때문인 것으로 판단되며 피어의 경우에는 자유단으로 되어있어 관성력의

영향을 크게 받기 때문으로 보여진다. 본 해석에서 적용한 조건과 같은 방향의 지진이 발생할 경우 피어와 웨어의 접합부는 인장응력이 크게 발생할 것으로 판단된다.

2) 또한 향후에는 댐의 안전을 위한 지진취약성 분석, 균열손상해석 등 더 체계적인 연구를 통하여 현재 사용되고 있는 내진설계기준 및 내진성능 평가기준의 적정성을 검사하는 것이 필요하다고 보여진다. 실제 지진 발생시 댐체에 발생하는 응력이 본 해석결과와 정량적인 값에 차이는 있을지라도 안전성이 취약한 부위는 확인되었으므로 이에 대해서는 주기적인 관찰과 관리가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 건설교통부, “댐 시설 기준”, 1993.
- 2) 소진호, 정영수, 김용곤, “콘크리트 중력식 댐의 내진 안전성 평가”, 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제1호, pp. 33~41, 2002.2.
- 3) 시설안전기술공단, “댐 내진성능 평가지침”, 2001.11.
- 4) 한국도로공사, “한반도의 지진특성과 도로교의 내진설계”, 1995.12.
- 5) J. Lee, G. Fenves, “A plastic damage concrete model for earthquake analysis of dam”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 27, 937~956, 1998.
- 6) USCOLD, “Guidelines for selecting seismic parameters for dam projects”, 1985.
- 7) 김용곤, 권혁기, “콘크리트 중력식 댐의 향상된 내진성능 평가방법”, 한국방재학회 논문집, 제4권, 제1호, pp. 1~14, 2004.3.
- 8) 건설교통부, “내진설계 기준연구”, 1997.12.