

중력식 콘크리트 댐에 작용하는 양압력이 응력확대계수에 미치는 영향

이영호^{1)*} · 장희석²⁾ · 김태완¹⁾ · 진치섭¹⁾

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 ²⁾ 부경대학교 건설공학부

(2004년 8월 2일 원고접수, 2004년 9월 30일 심사완료)

An Effect of Uplift Pressure Applied to Concrete Gravity Dam on the Stress Intensity Factor

Young-Ho Lee^{1)*}, Hee-Suk Jang²⁾, Tae-Wan Kim¹⁾, and Chi-Sub Jin¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

²⁾ Division of Construction Engineering, Pukyong National University, Busan, 608-739, Korea

(Received August 2, 2004, Accepted September 30, 2004)

ABSTRACT

The modeling of uplift pressure within dam, on the foundation on which it was constructed, and on the interface between the dam and foundation is a critical aspect in the analysis of concrete gravity dams, i.e. crack stability in concrete dams can correctly be predicted when uplift pressures are accurately modelled. Current models consider a uniform uplift distribution, but recent experimental results show that it varies along the crack faces and the procedures for modeling uplift pressures are well established for the traditional hand-calculation methods, but this is not the case for finite element (FE) analysis.

In large structures, such as dams, because of smaller size of the fracture process zone with respect to the structure size, limited errors should occur under the assumptions of linear elastic fracture mechanics (LEFM). In this paper, the fracture behaviour of concrete gravity dams mainly subjected to uplift pressure at the crack face was studied. Triangular type, trapezoidal type and parabolic type distribution of the uplift pressure including uniform type were considered in case of evaluating stress intensity factor by surface integral method. The effects of body forces, overtopping pressures are also considered and a parametric study of gravity dams under the assumption of LEFM is performed.

Keywords : uplift pressure, stress intensity factor, surface integral method, LEFM

1. 서 론

중력식 콘크리트 댐은 단계별 연속 시공으로 인한 이음부의 발생 및 매스콘크리트의 수화열의 영향 등으로 인해 공용 초기부터 균열을 포함하고 있는 경우가 대부분이다¹⁾. 이러한 초기 균열의 성장이 댐의 구조적 강성을 저하시켜서 댐 구조물이 더 이상 작용 하중을 지지하지 못한다면 이는 막대한 손실로 이어질 수가 있다. 따라서 균열이 생긴 댐에서 허용하중 및 균열의 안정성 평가는 향후 유지관리 및 보수·보강 계획에 절대적으로 필요하다^{2,3)}.

콘크리트 중력식 댐의 설계시 고려되는 양압력은 댐의 안정을 감소시키는 외력으로 작용한다. 또한 댐에 발생한 균열도 댐의 안정을 감소시키는 요인으로 작용하는 데, 양

압력이 작용하는 댐의 파괴 역학적인 거동을 조사하는 것은 댐 체체의 안정성 평가 및 댐의 유지관리에 유용한 자료로 사용될 수 있다. 특히, 댐과 지반이 접하는 경계면은 많은 균열 발생이 예상되는 부분으로써 이 균열 사이에 작용하는 양압력의 모델링은 중력식 콘크리트 댐 해석시 매우 중요한 요소이다¹⁾. 즉, 콘크리트 댐의 균열 안정성 평가는 정확한 양압력의 모델링이 선행되어야 올바른 예측이 가능하다. 댐에 있어서 양압력의 취급은 단지 댐 체체 안정성 평가를 위한 전형적인 수 계산 방법으로 널리 사용되고 있으나, 양압력에 대한 유한요소 모델링 방법은 아직 연구가 부족한 실정이다⁴⁾.

일반적으로 콘크리트 구조물에 균열이 발생하면 균열 선단부에는 미세 균열영역이 발생하며, 이 미세균열 영역의 파괴거동을 조사하려면 비선형 파괴역학을 적용하여야 한다. 그러나 콘크리트 중력식 댐과 같이 거대한 콘크리트 구조물을 고려하는 경우에는 이러한 미세균열이 생기

* Corresponding author

Tel : 051-510-1534 Fax : 051-513-9596

E-mail : rlstkfkd@chol.com

는 영역의 크기를 무시할 수 있으며, 구조물은 선형탄성 거동을 하는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 콘크리트 구조물에 선형탄성 파괴역학을 적용하는 것은 콘크리트 재료의 특성으로 볼 때 어디까지나 거시적인 해석에 속한다고 말할 수 있으나, 그 크기가 댐과 같이 큰 콘크리트 구조물에 대하여는 선형탄성 파괴역학을 적용하여도 유용한 결과를 얻을 수 있다⁴⁾.

본 연구에서는 댐 체체와 지반이 접하는 경계면에 균열의 발생을 가정한 증력식 콘크리트 댐에 대하여 상부면 수압, 윗류수압, 댐의 자중 및 균열면에 작용하는 양압력의 영향에 따른 댐의 파괴거동을 표면적분법을 이용한 선형탄성 파괴역학을 적용하여 해석하였다. 현재 사용하고 있는 양압력의 분포형상은 등분포로 가정한 간략 해석법이 사용되고 있으나, 최근 연구 결과⁷⁾에 의하면 양압력 분포형상이 균열면에 따라 변화함을 보이고 있어, 본 연구에서는 수압의 형태를 등분포 형상 외에 삼각형 분포 및 다양한 포물선 분포 형상에 대해서도 각각 고려하여 각 분포형상별 양압력이 응력확대계수에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 표면적분법

2.1 표면적분법의 기본이론

Fig. 1에서와 같이 균열선단을 둘러싸고 영역 Ω_ϵ 을 갖는 내측경로 Γ_ϵ 을 고려한다. 또한 경로 Γ 는 영역 Ω 를 정의하는 외측경로인데, 경로 Γ_ϵ 과 균열면 위에 있는 경로 Γ_{C1} 및 Γ_{C2} 를 연결하여 폐경로 Γ^* 를 이룬다.

$$\Gamma^* = \Gamma + \Gamma_{C1} + \Gamma_\epsilon + \Gamma_{C2} \quad (1)$$

이 경우 Fig. 1에서 주어진 선적분의 방향을 고려하면 경로 Γ_ϵ 에 대한 J-적분은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

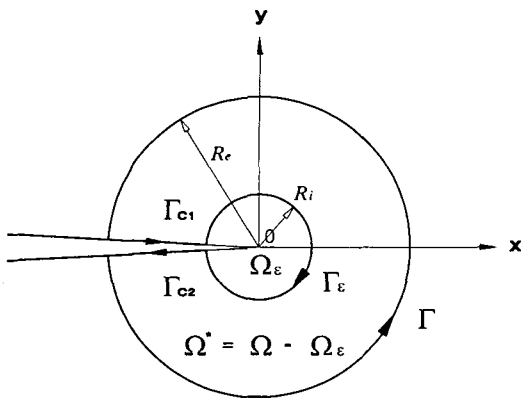


Fig. 1 Contours and domain of surface integral

$$J = - \int_{\Gamma_\epsilon} (w dy - \mathbf{t}_i \mathbf{u}_{i,1} ds) \quad (2)$$

식 (2)에서 \mathbf{t}_i 는 외력벡터, \mathbf{u}_i 는 변위벡터를 각각 나타내며, w 는 변형률 에너지 밀도 (strain energy density) 로서 선형거동을 하는 재료에서는 $\int_\epsilon \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$ 로 주어진다.

여기서, 경로 Γ_ϵ 과 영역 Ω_ϵ 내에서는 값이 1 이고, 경로 Γ 와 영역 Ω 외측에서는 값이 0 이며, 경로 Γ_ϵ 과 Γ 사이에서는 평활한 평활곡선함수 (smooth curve function) ϕ 를 고려하면 식 (2)는 폐경로 Γ^* 에 대한 적분으로 확장시킬 수 있다.

$$J = - \int_{\Gamma^*} (w n_1 - \mathbf{t}_i \mathbf{u}_{i,1}) \phi ds \quad (3)$$

식 (3)의 n_1 은 ds 에 외향으로 수직인 단위벡터의 x 성분을 나타낸다. 식 (3)에서 사용한 평활곡선함수 ϕ 를 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다⁸⁾.

$$\phi(r) = \begin{cases} 1 & : r \leq R_i \\ -\frac{r^2}{(R_e - R_i)^2} + \frac{2R_i r}{(R_e - R_i)^2} \\ + \frac{R_e(R_e - 2R_i)}{(R_e - R_i)^2} & : R_i < r \leq R_e \end{cases} \quad (4)$$

식 (3)은 Green 정리를 적용하여 J-적분식을 Ω^* 영역에 대한 면적 적분으로 바꾸고, 또한 응력확대계수 K_I , K_{II} 로 표현될 수 있는 균열선단의 변위장을 고려하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = -\frac{1}{2} \cdot K_I \cdot \Phi(\mathbf{y}, \mathbf{u}^I, \phi) - \frac{1}{2} \cdot K_{II} \cdot \Phi(\mathbf{y}, \mathbf{u}^{II}, \phi) \quad (5)$$

여기서, 함수 Φ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi(\mathbf{y}, \mathbf{u}^\alpha, \phi) &= \int_{\Omega^*} [\{ \sigma_{i2}(\mathbf{u}^\alpha) \mathbf{v}_{i,2} - \sigma_{11}(\mathbf{y}) \mathbf{u}_{i,1}^\alpha \} \phi_{,1} \\ &\quad - \{ \sigma_{2i}(\mathbf{u}^\alpha) \mathbf{v}_{i,1} + \sigma_{12}(\mathbf{y}) \mathbf{u}_{i,1}^\alpha \} \phi_{,2}] d\Omega \\ &\quad , \alpha = I, II \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)와 혼합모드에서의 J-적분과 응력확대계수의 관계를 등치시키면 식 (7)과 같이 응력확대계수를 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$K_\alpha = -\frac{E^*}{2} \cdot \phi^\alpha \quad (7)$$

$$= -\frac{E^*}{2} \cdot \phi(\mathbf{y}, \mathbf{u}^\alpha, \phi), \alpha = I, II$$

식 (7)에서 E^* 값은 다음의 값이다.

$$E^* = \begin{cases} E & : \text{Plane stress} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & : \text{Plane strain} \end{cases}$$

표면적분법에 의한 응력확대계수의 계산은 선형탄성이론에 근거를 두고 있으므로 여러 하중조건을 동시에 고려해야 하는 경우에는 이들 기여분의 선형적인 결합을 통하여 응력확대계수를 구할 수 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 콘크리트 중력식 댐의 균열 문제에서는 댐 상부면에 작용하는 수압, 율류수압, 댐의 자중 및 균열면에 작용하는 양압력에 대한 응력확대계수의 계산이 필요하다. 따라서, 댐의 자중 및 균열면에 작용하는 양압력을 고려하는 경우, 식 (7)을 아래와 같이 새로운 항을 추가시켜 나타낼 수 있다.

$$K_I = -\frac{1}{2} \cdot E^* \cdot \phi(\mathbf{y}, \mathbf{u}^I, \phi)$$

$$-\frac{1}{2} \cdot E^* \cdot \psi(\mathbf{f}, \mathbf{u}^I, \phi) \quad (8)$$

$$-\frac{1}{2} \cdot E^* \cdot \int_{\Gamma_1} \mathbf{p} \mathbf{u}_{2,1}^I \phi \, dx$$

$$K_{II} = -\frac{1}{2} \cdot E^* \cdot \phi(\mathbf{y}, \mathbf{u}^{II}, \phi) \quad (9)$$

$$-\frac{1}{2} \cdot E^* \cdot \psi(\mathbf{f}, \mathbf{u}^{II}, \phi)$$

식 (8) 과 식 (9)에서 첫 번째 항은 식 (7)에 해당된다. 또한 이들 식들의 두 번째 항은 물체력(자중)을 고려한 수정항인데, \mathbf{f} 는 물체력 벡터를 의미하며, 함수 ψ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\psi(\mathbf{f}, \mathbf{u}^\alpha, \phi) = \int_{\Omega} \mathbf{f}_i \mathbf{u}_{i,1}^\alpha \phi \, d\Omega, \alpha = I, II \quad (10)$$

식 (8)의 세 번째 항은 균열면에 작용하는 수압을 고려할 경우의 수정항을 나타낸 것으로 \mathbf{p} 는 균열면에 작용하는 수압을 의미한다. 이들 수정항으로부터, 균열면 수압을 고려하는 데 따른 수정항은 단지 K_I 값에만 영향을 주고 있음을 알 수 있다⁹⁾.

2.2 균열면 수압의 분포형상 모델링

댐에 작용하는 양압력 분포형상의 기존 모델링 방법은 균열면 내에서는 등분포로 가정하고 비균열면에서는 선형 변화하는 것으로 가정하였다. 그러나 최근의 균열면에 작용하는 수압분포에 관한 연구 결과⁷⁾에 의하면 균열면에서의 수압 분포형상은 균열 시작점에서 임계 균열열림변위(critical crack opening displacement) COD_{wo} 까지는 수압이 등분포 형상을 나타내나, 그 이후로는 균열열림변위 및 수압강도의 함수형으로 표현되는 곡선형태로 점차 감소하다가 균열선단에서는 수압이 0이 됨을 보였다(Fig. 2).

따라서 기존의 양압력 모델링 방법은 균열면에서의 양압력이 과대 평가된 형태라 볼 수 있으며, 양압력의 보다 정확한 모델링을 위해서는 실험 결과와 유사한 형상인 포물선형 또는 제형의 양압력 분포를 고려하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 균열면 및 비균열면에 작용하는 양압력이 응력확대계수에 미치는 영향을 알아보기 위해, 균열면에서의 5가지 서로 다른 양압력 분포형상(A-Type)과 균열면 및 비균열면에 작용하는 양압력 분포형상(B-Type) 3가지를 각각 고려하여 해석을 수행하였다.

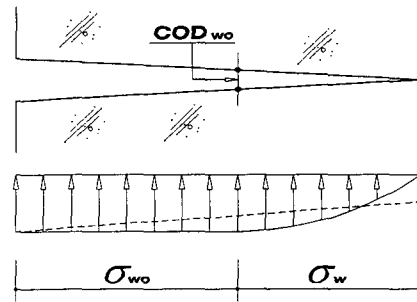
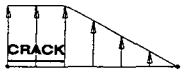
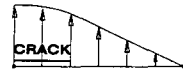
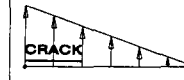


Fig. 2 Uplift pressure distribution proposed in Ref.[7]

Table 1 Uplift pressure distribution type (A-type)

A1 - type	A2 - type	A3 - type	A4 - type	A5 - type
Uniform	Parabolic	Trapezoidal	Parabolic	Triangular

Table 2 Uplift pressure distribution type (B-type)

B1 - type	B2 - type	B3 - type
Uniform	Parabolic	Trapezoidal
		

2.3 균열면 수압의 분포형상에 따른 수정항 계산

균열면에 작용하는 수압을 고려하여 응력확대계수를 구하는 경우 필요한 수정항은 식 (8)에서 다음과 같이 주어진다.

$$P_{\psi} = -\frac{E^*}{2} \cdot \int_{r_1} p u_{2,1}^I \phi dx \quad (11)$$

윗 식에서 p 가 수압에 해당되며 수압이 등분포 형태로 작용되는 경우 상수값이 된다. 또한 삼각형 분포 및 포물선 분포로 작용할 경우 균열 선단으로부터 임의의 거리 r 떨어진 위치에서의 수압강도는 Fig. 3으로부터 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = p_m \cdot \left(\frac{r}{L}\right) \quad : \text{Triangular - Type}$$

$$p = \frac{p_m}{L^2} \cdot (2rL - r^2) \quad : \text{Parabolic - Type} \quad (12)$$

식 (12)에서 L 은 균열 길이를 의미하고 p_m 은 균열 시작점에서의 수압강도를 나타낸다. 식 (12)를 식 (11)에 대입하고 평활곡선함수 및 변위성분을 함께 고려하여 적분을 하면 각 분포형상별 수정항이 계산된다¹⁰⁾. W_{ψ} 를 식 (13)과 같이 정의하고 등분포의 경우를 나타내면 식 (14)와 같다.

$$W_{\psi} = \frac{E^*}{4\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{(k+1)}{G} \cdot \frac{1}{(R_e - R_i)^2} \quad (13)$$

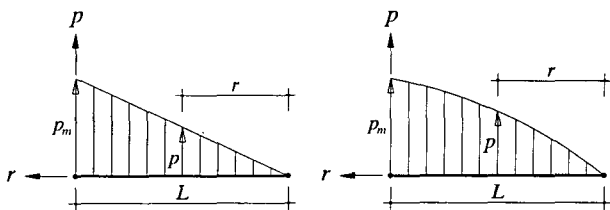


Fig. 3 Uplift water pressure intensity at arbitrary point on crack face

$$P_{\psi} = W_{\psi} \cdot p \cdot \left(\frac{8}{5} R_e^{\frac{5}{2}} - \frac{8}{3} R_i R_e^{\frac{3}{2}}\right) \quad (14)$$

여기서, G 는 전단탄성계수이고, k 는 응력상태에 따라 다음의 값을 갖는다.

$$k = \begin{cases} \frac{3 - \nu}{1 + \nu} & : \text{Plane stress} \\ 3 - 4\nu & : \text{Plane strain} \end{cases}$$

삼각형 분포의 경우는 다음 식과 같다.

$$P_{\psi} = W_{\psi} \cdot \frac{p_m}{L} \cdot \left(\frac{8}{21} R_e^{\frac{7}{2}} - \frac{8}{15} R_i R_e^{\frac{5}{2}}\right) \quad (15)$$

포물선 분포를 하는 경우에는 다음과 같다.

$$P_{\psi} = W_{\psi} \cdot \frac{p_m}{L^2} \cdot \left\{ 2L \left(\frac{8}{21} R_e^{\frac{7}{2}} - \frac{8}{15} R_i R_e^{\frac{5}{2}} \right) - \left(\frac{8}{45} R_e^{\frac{9}{2}} - \frac{8}{35} R_i R_e^{\frac{7}{2}} \right) \right\} \quad (16)$$

제형분포의 경우는 등분포와 삼각형 분포 수정항의 조합으로써 나타낼 수 있다.

$$P_{\psi} = W_{\psi} \cdot \left\{ p_t \left(\frac{8}{5} R_e^{\frac{5}{2}} - \frac{8}{3} R_i R_e^{\frac{3}{2}} \right) - \frac{(p_t - p_m)}{L} \left(\frac{8}{21} R_e^{\frac{7}{2}} - \frac{8}{15} R_i R_e^{\frac{5}{2}} \right) \right\} \quad (17)$$

식 (17)에서 p_t 는 균열선단에서의 수압강도를 의미하는데 $p_t = 0$ 인 경우에는 식 (15)와 같아진다.

3. 해석 예 및 고찰

3.1 해석 모델링

본 연구에서는 중력식 콘크리트 댐에 작용하는 자중(SW), 상부면 수압(FR), 월류수압(OT) 및 양압력(UP)의 분포형상에 따른 파괴역학적 거동을 파악하기 위해 Fig. 4와 같이 높이(H) 31.6m, 기초 폭(B) 24.4m의 댐 구조물을 선정하여 수치해석을 하였다. 초기 균열은 하중의 영향을 가장 크게 받을 것으로 예상되는 지점인 댐과 기초가 접하는 경계면에 발생된 것으로 가정하였으며, A-Type, B-Type의 각 양압력이 작용할 경우, 균열길이의 증가에 따른 응력확대계수를 계산하였다.

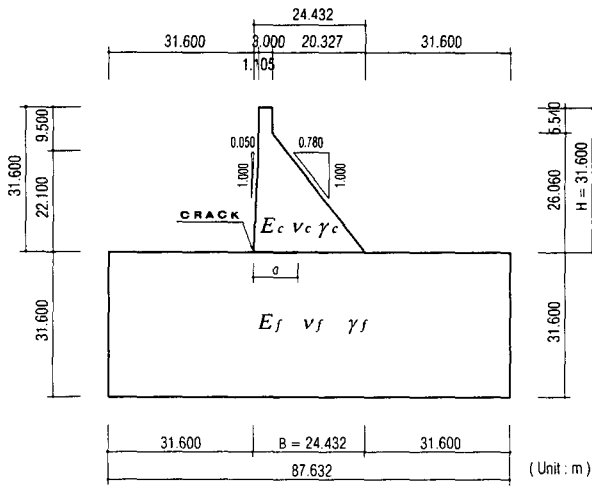


Fig. 4 Geometry of dam adopted for the numerical analyses

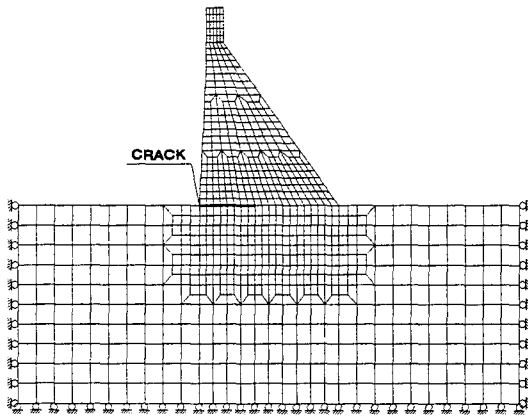


Fig. 5 Finite element mesh & boundary condition

Table 3 Material property

E_c (MPa)	20,700	20,700	20,700
E_f (MPa)	27,600	20,700	16,560
E_c / E_f	0.75	1.00	1.25
ν_f, ν_c	0.2	0.2	0.2
γ_c (kN/m ³)	23.6	23.6	23.6
γ_f (kN/m ³)	18.9	18.9	18.9

Table 4 Load combination

COMB	SW	FR	OT	UP
C1	O	O		
C2	O	O	O	
C3	O	O		O (A-Type)
C4	O	O		O (B-Type)
C5	O	O	O	O (A-Type)
C6	O	O	O	O (B-Type)

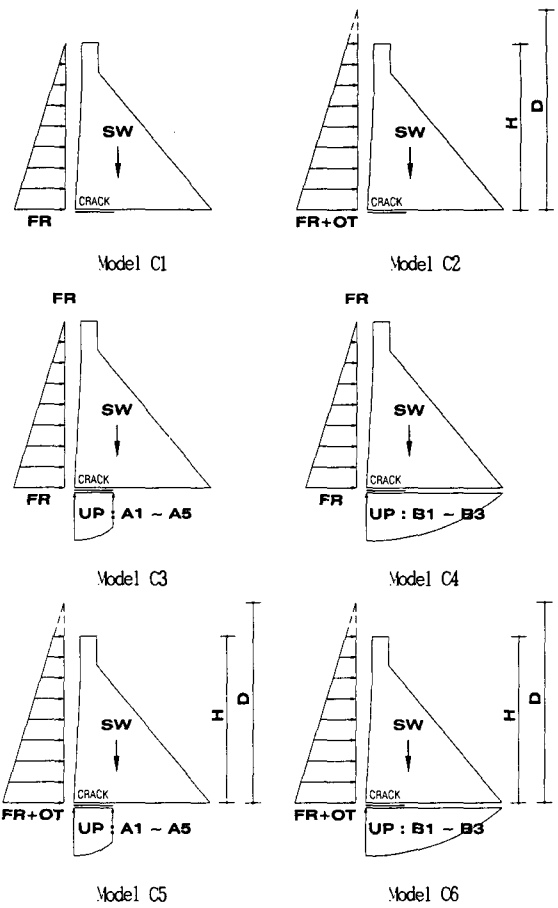


Fig. 6 Modeling type of load combination

특히 균열의 진행이 이종재료의 경계면에 발생될 경우 응력확대계수는 탄성계수비에 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로⁶⁾ 탄성계수비에 따른 응력확대계수의 계산도 함께 수행하였다. 해석시 사용한 유한요소 모델은 8절점 등매개변수요소(isoparametric element)를 사용하였으며, 응력확대계수의 계산에는 표면적분법을 사용하였다. 지반의 모델링 범위는 Saint - Venant 의 원리에 따라 최소 댐 구조물 크기 이상의 범위를 선정하여 모델링하였다¹⁾.

모델링시 사용한 재료 물성치는 Table 3 과 같다. 또한 각 하중 조합의 경우와 이에 따른 해석 모델링의 종류를 Table 4 및 Fig. 6 에 각각 나타내었다.

3.2 해석결과 및 고찰

Fig. 7 은 댐에 작용하는 각 하중별 응력확대계수의 해석결과를 나타낸 그래프로 가로축은 균열비 ($a = a / B$) 를 나타내며, 세로축은 응력확대계수를 무차원화하여 표현한 것이다⁶⁾. 해석 결과, 댐의 자중은 균열이 증가함에 따라 K_I 값을 감소시키는 반면 K_{II} 값은 미소하게 증가시키는 것으로 나타났으며, 상부면 수압, 월류수압 및 양압력은 모두 자중과 반대의 경향을 나타내었다.

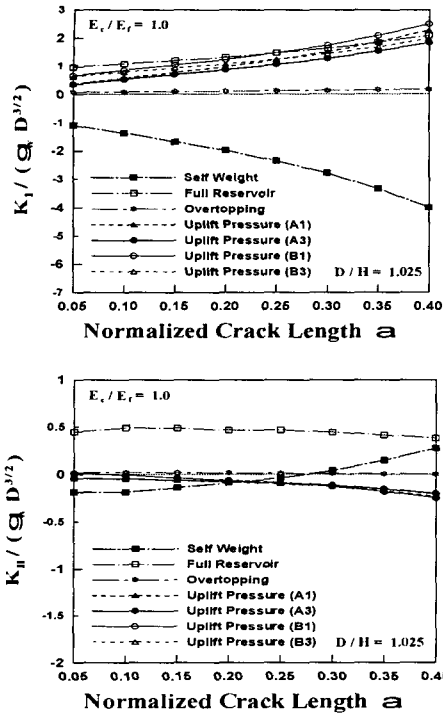


Fig. 7 Normalized stress intensity factors related to the single load acting on the dam versus normalized crack length

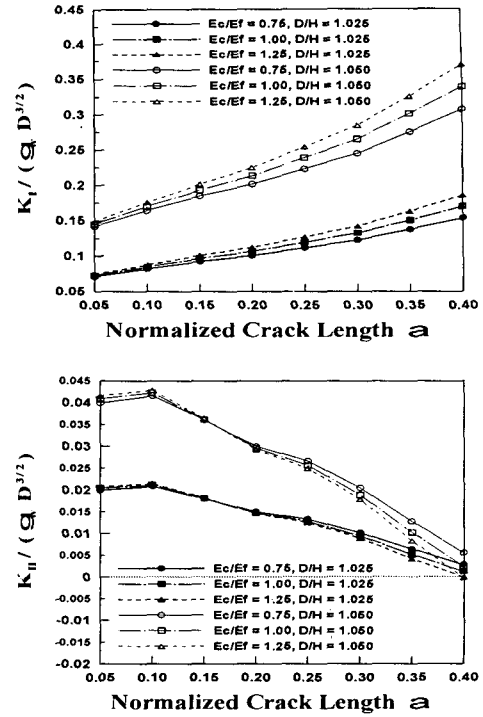


Fig. 9 Normalized stress intensity factors versus normalized crack length for overtopping loads ($D/H = 1.025, 1.050$) and three different Young's modulus ratio E_c/E_f

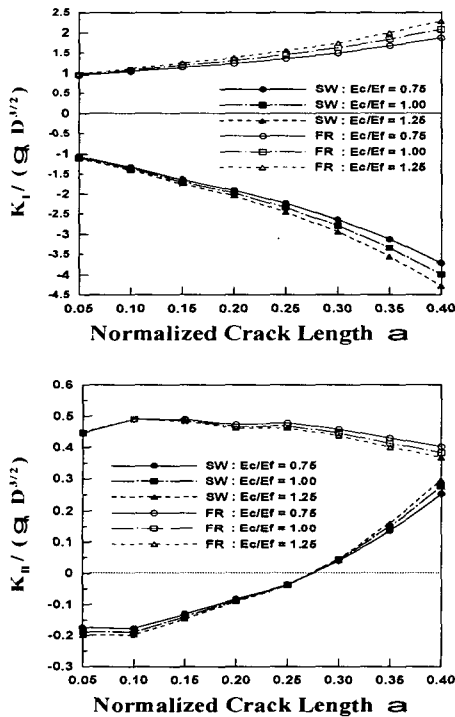


Fig. 8 Normalized stress intensity factors versus normalized crack length for self weight & full reservoir loads and three different Young's modulus ratio E_c/E_f

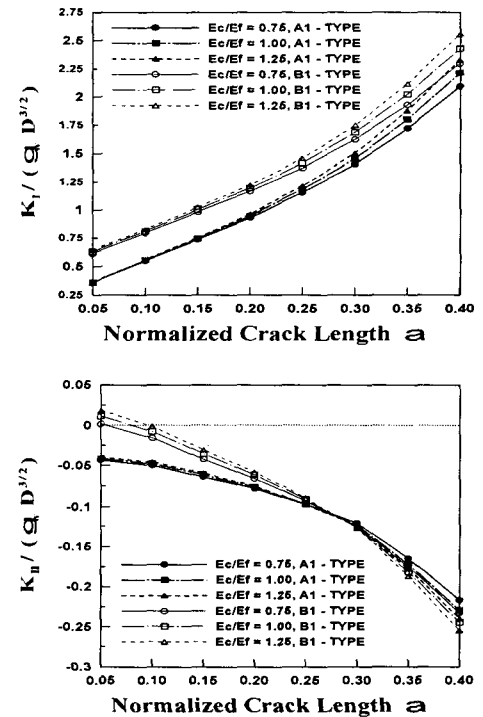


Fig. 10 Normalized stress intensity factors versus normalized crack length for uplift pressure loads (A1, B1 - Type) and three different Young's modulus ratio E_c/E_f

댐에 작용하는 각 하중의 응력확대계수에 대한 기여도를 살펴보면, Fig. 7의 K_I 에 관한 그래프에서 양압력의 경우가 월류수압에 비해 K_I 값에 대한 기여도가 상대적으로 크을 볼 수 있으며, 0.25 이상의 균열비에서는 양압력 분포형상에 따라 상부면 수압을 상회하는 것으로 나타났다. 균열면 및 비균열면에 모두 양압력이 작용하는 B1-Type 과 상부면 수압과의 기여도를 서로 비교해 볼 때, 초기 균열비에서 상부면 수압의 약 70%에 가까운 기여도를 나타내었으며, 균열면에만 양압력이 작용하는 A1-Type 과의 비교에서도 상부면 수압의 약 40% 정도의 기여도를 나타내고 있어 균열 해석시 양압력에 대한 영향이 크을 보여주고 있다.

Figs. 8 ~ 10은 댐에 작용하는 각 하중의 탄성계수비에 따른 응력확대계수의 변화를 균열비에 대해 나타낸 그래프이다. 해석 결과로부터 초기 균열비에서는 응력확대계수가 탄성계수비의 영향을 비교적 적게 받는 것으로 나타났으나 균열비가 커짐에 따라 응력확대계수의 변화 폭은 점차 증가하였다. 또한 상부면 수압, 월류수압 및 양압력은 탄성계수비가 클수록 K_I 값을 증가시킨 반면, K_{II} 값은 초기 균열에서는 증가하였지만 일정 균열길이 이상에서는 감소되었으며 그 변화폭은 미소하였다. 자중에 의해서는 K_I , K_{II} 값 모두 상부면 수압, 월류수압 및 양압력과는 서로 상반된 경향을 나타내었다.

Fig. 11은 균열비 $\alpha = 0.20$, $D/H = 1.050$ 의 경우에 대하여 탄성계수비에 대한 추가 해석($E_c/E_f = 0.50, 1.50$)을 수행하여 탄성계수비에 따른 응력확대계수의 변화를 각 하중별로 나타낸 것으로 그래프의 명확한 표현을 위해 각 해석점에 해석 결과를 수치로 나타내었다. 해석 결과로 볼 때, 이중재료의 경계면에 균열이 발생할 경우 응력확대계수는 탄성계수비의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 다양한 양압력의 분포형상에 따른 응력확대계수의 변화를 균열비에 대해 표현한 그래프이다. Fig. 12의 해석 결과로부터 동일 Type (A 또는 B-Type) 양압력 모델의 해석 결과를 서로 비교해 볼 때, 균열비가 작을 경우에는 양압력의 분포형상이 응력확대계수에 큰 영향을 주지 않지만 균열비가 증가함에 따라 응력확대계수의 변화 폭이 커짐을 볼 수 있다.

또한 K_I 값에 대한 A1 ~ A3-Type과 B1 ~ B3-Type의 해석 결과 그래프로부터, 비균열면에서 양압력의 응력확대계수에 대한 기여도는 균열비가 증가함에 따라 상대적으로 감소하는 것을 볼 수 있는 데, 최대 균열비에서 두 양압력 모델간에는 최대 약 10% 정도의 차이를 나타냈으며⁶⁷⁾, 댐의 배수효과를 고려한다면 그 기여도는 더욱 작아질 것으로 판단할 수 있다.

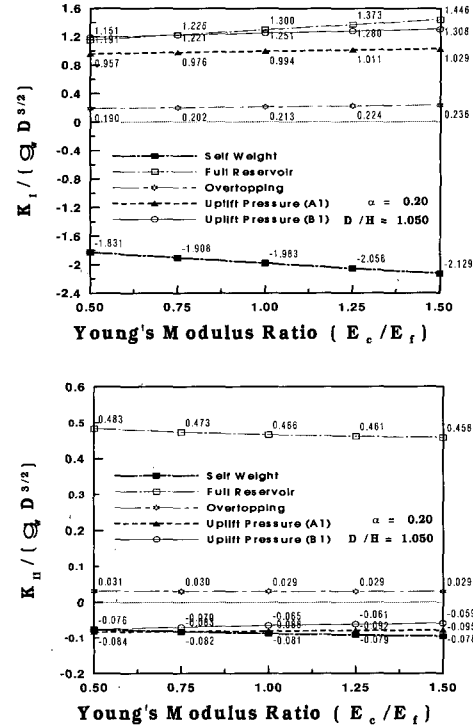


Fig. 11 Normalized stress intensity factors versus Young's modulus ratio for normalized crack length $\alpha = 0.20$ and $D/H = 1.050$

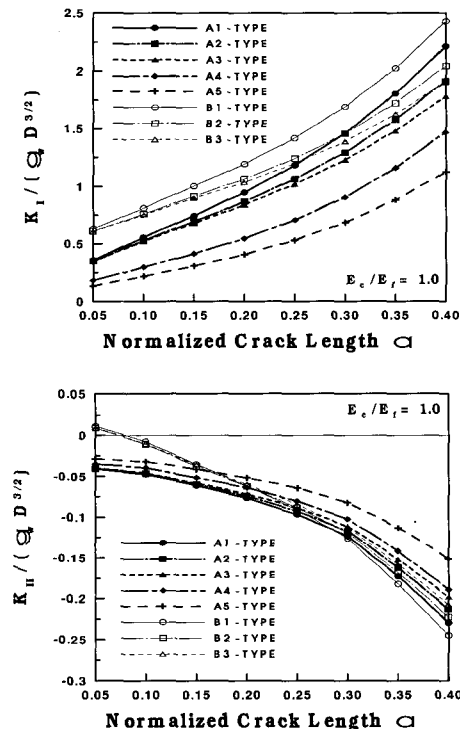


Fig. 12 Normalized stress intensity factors versus normalized crack length for different uplift pressure distribution type

균열면에만 양압력이 작용하는 A-Type 모델을 서로 비교해 보면, 최대 균열비에서 양압력에 의한 응력확대계수의 최소값(A4, A5)은 최대값(A1)의 약 60%, 그 중간 형태(A2, A3)는 최대값(A1)에 대해 약 80% 수준을 나타내 정확한 양압력 모델링이 응력확대계수에 중요한 요소임을 알 수 있다.

Fig. 13은 양압력 분포 형상에 따른 각 하중조합을 그래프로 나타낸 것으로 양압력을 고려하지 않은 C1-Model과 양압력을 고려한 C3, C4-Model을 비교할 때, 균열비가 증가함에 따라 K_I 값은 큰 폭으로 증가함을 보인 반면 K_{II} 는 그 값이 감소함을 보였으나, 상대적으로 미소한 변화를 나타내었다. 따라서 댐 균열 해석시 양압력의 분포 형상이 응력확대계수의 변화에 민감한 영향을 주고 있으며, K_{II} 값보다 K_I 값에 더 기여도가 크음을 알 수 있다.

Figs. 14 ~ 15는 동일 균열 길이에서 월류수압 강도에 따른 양압력 분포 형상별 응력확대계수의 관계를 표현한 것으로 K_I , K_{II} 값 모두 선형변화를 보이고 있다. 이 경우도 마찬가지로 양압력의 분포형상에 따라 응력확대계수의 값이 민감하게 변하고 있음을 볼 수 있는데, K_{II} 값에 비해 K_I 값의 변화 폭이 크음을 알 수 있다.

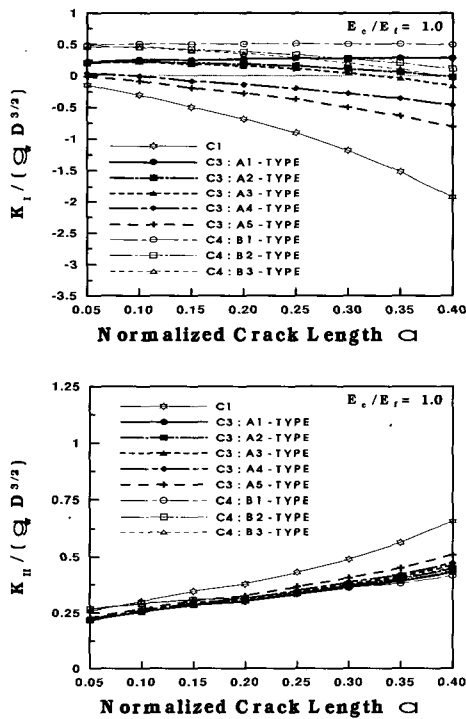


Fig. 13 Normalized stress intensity factors versus normalized crack length for load combination C1, C3 and C4

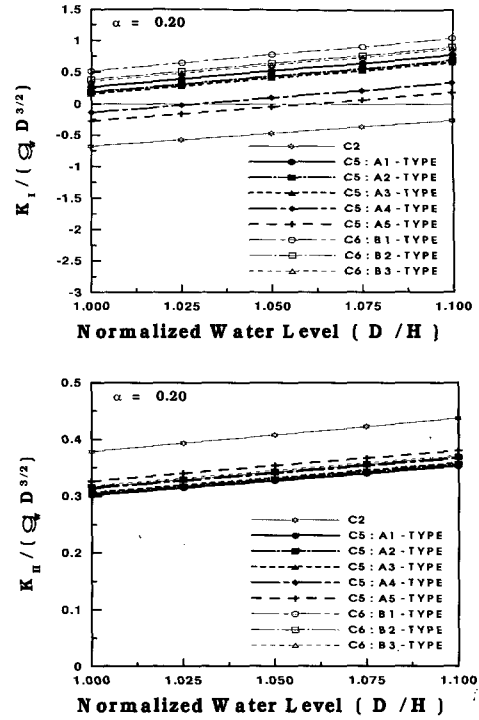


Fig. 14 Normalized stress intensity factors versus normalized water level for load combination C2, C5 and C6 and normalized crack length $\alpha = 0.20$

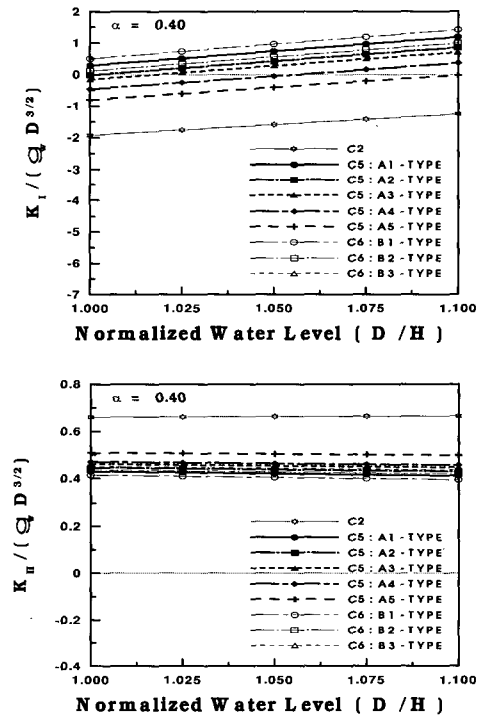


Fig. 15 Normalized stress intensity factors versus normalized water level for load combination C2, C5 and C6 and normalized crack length $\alpha = 0.40$

또한 균열비가 증가함에 따라 응력확대계수의 변화 폭이 증가함을 볼 수 있어 균열비가 큰 균열에서의 정확한 양압력 모델링이 댐 안정해석에 중요한 요소임을 다시 한번 확인할 수 있다.

4. 결 론

자중, 상부면 수압, 월류수압 및 댐과 지반의 경계면에 발생된 균열면 및 비균열면에 작용하는 다양한 분포형상의 양압력 영향에 따른 콘크리트 중력식 댐의 응력확대계수 해석으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 중력식 댐의 응력확대계수 계산시 양압력의 영향을 고려할 경우, 균열이 증가함에 따라 K_I 값은 K_{II} 값에 비해 상대적으로 크게 증가함을 보였으며, 다른 하중에 의한 응력확대계수 값의 기여도와 비교해 볼 때, 그 크기가 무시할 수 없을 정도로 나타나 댐의 균열 해석시 반드시 양압력의 영향을 고려해야 정확한 응력확대계수 값을 평가할 수 있다.
- 2) 균열비가 증가함에 따라 양압력에 의한 응력확대계수 값은 탄성계수비의 영향을 받고 있으며, 탄성계수비가 클수록 K_I 값은 증가하였고, K_{II} 값은 초기 균열비에서는 미소한 변화 폭으로 증가하였으나 최대 균열비에서는 감소함을 나타내었다.
- 3) 양압력의 분포형상에 따라 균열비가 커질수록 K_I 값에 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 비균열면에 작용하는 양압력에 의한 응력확대계수의 변화는 균열면에만 양압력이 작용하는 경우에 비해 상대적으로 적은 기여도를 나타내었다.
- 4) 월류수압이 작용할 경우, 응력확대계수는 균열면에 작용하는 양압력의 분포 형상에 따라 민감한 변화를 보였으며, 균열비가 커질수록 K_{II} 값에 비해 K_I 값의 변화 폭은 증가하였다. 따라서 양압력을 받는 콘크리트 중력식 댐에서 균열비가 큰 균열은 월류수압 강도가 커짐에 따라 Mode II 보다는 Mode I의 지배를 더 받고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Resher, O. J., "Importance of Cracking in Concrete Dams," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.35, 1990, pp.503~524.
2. Linsbauer, H. N., Ingraffea, A. R., Rossmannith, H. P., and Wawryzynek, P. A., "Simulation of Cracking in Large Arch Dam : Part I," *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.7, 1989, pp.1599~1615.
3. Linsbauer, H. N., Ingraffea, A. R., Rossmannith, H. P., and Wawryzynek, P. A., "Simulation of Cracking in Large Arch Dam : Part II," *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.7, 1989, pp.1616~1630.
4. Plizzari, G. A. "LEFM Application to Concrete Gravity Dams," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.123, No.8, 1997, pp.808~815.
5. Dewey, R. R., Reich, R. W., and Saouma, V. E., "Uplift Modeling for Fracture Mechanics Analysis of Concrete Dams," *Journal of Structural Division*, Vol.120, No.10, 1994, pp.3025~3044.
6. Plizzari, G. A. "On The Influence of Uplift Pressure in Concrete Gravity Dams," *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, Vol.59, No.3, 1998, pp.253~267.
7. Brühwiler, E. and Saouma, V. E. "Water Fracture Interaction in Concrete - Part II : Hydrostatic Pressure in Cracks," *ACI Material Journal*, Vol.93, No.4, 1995, pp.383~390.
8. Jin, C. S., Jang, H. S and Choi, H. T., "The Calculation of Stress Intensity Factors by the Surface Integral Method," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.3, No.6, 1995, pp.541~554.
9. 진치섭, 최현태, 이홍주, "균열면 압력을 고려한 응력확대계수의 결정에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 7권, 3호, 1995, pp.175~186.
10. 장희석, "균열면에 수압을 받는 중력식 콘크리트 댐의 파괴거동에 관한 연구", 전산구조공학회 논문집, 9권, 4호, 1996, pp.189~198.

요 약

전 세계적으로 많은 수의 크고 작은 댐이 사용되고 있으나, 콘크리트 댐의 안전성 평가에 있어서 댐 내에 필연적으로 존재하는 균열을 함께 고려한 실질적 해석은 아직 미진한 실정이다. 따라서 향후 건설될 댐에 대해서는 설계 단계에서부터 이러한 파괴역학적 해석이 뒷받침 되어야 댐의 안전성 확보에 매우 유리하다고 볼 수 있다. 특히 댐 체체와 지반이 접하는 경계면은 많은 균열 발생이 예상되는 영역으로써 이 균열 사이에 작용하는 양압력의 모델링은 중력식 콘크리트 댐 해석시 매우 중요한 요소이다. 즉, 콘크리트 댐의 균열 안정성 평가는 정확한 양압력의 모델링이 선행되어야 올바른 예측이 가능하다. 댐에 있어서 양압력의 취급은 단지 댐 체체 안정성 평가를 위한 전형적인 수계산 방법으로 널리 사용되고 있으나, 양압력에 대한 유한요소 모델링 방법은 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 중력식 콘크리트 댐과 지반이 접하는 부분에 발생된 균열에 양압력이 작용할 경우, 선형탄성파괴역학의 관점에서 접근하여 양압력이 응력확대계수에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 양압력의 분포형상은 현재 등분포로 가정한 간략 해석법으로 수행되고 있으나 최근의 연구 결과에 의하면 양압력 분포형상이 균열면에 따라 변화함을 보이고 있어, 본 연구에서는 수압의 형태를 등분포 형상 외에 삼각형 분포, 제형분포 및 포물선 분포 형상에 대해서도 각각 고려하여 각 분포형상별 응력확대계수를 평가하였다. 응력확대계수의 계산은 일반 8 절점 등매개변수요소를 사용한 표면적분법을 사용하였으며, 자중의 영향 및 월류 수압의 영향도 함께 고려하여 해석 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 양압력, 응력확대계수, 표면적분법, 선형탄성 파괴역학
