

균열면에 수압을 받는 중력식 콘크리트 댐의 파괴거동에 관한 연구

On the Fracture Behaviour of the Concrete Gravity Dam Subjected to Water Pressure at the Crack Faces

장 희 식*
Jang, Hee-Suk

요 약

콘크리트 중력댐 상부면의 균열에 작용하는 수압의 영향을 주로 고려하여 댐의 파괴거동을 조사하였다. 첫째, 표면적분법에 의하여 응력확대계수를 구하는 경우에 작용하는 수압의 형태를 등분포형태 외에, 삼각형분포 및 포물선분포도 고려하여 보았다. 둘째, FRANC(FRacture ANalysis Code)를 이용하여 균열면에 작용하는 수압의 형태에 따른 기존균열의 전파방향을 추적하였다. 셋째, 월류수위 아래에서 균열이 전파되지 않을 수 있는 한계균열길이를 수압의 분포형태에 따라 구분하여 구하여 보았다.

표면적분법으로 수압의 형태에 따라 응력확대계수를 구한 결과는 FRANC를 이용하여 얻어진 결과와 비교 되었으며 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 균열면에 작용하는 수압의 형태가 삼각형분포의 경우에 균열의 전파방향은 등분포의 경우에 비하여 댐의 기초쪽으로 기우는 것을 알 수 있었으며, 또한 월류수위 아래에서 한계균열길이는 댐높이의 대략 $2/5 \sim 1/2$ 되는 곳에서 최대가 됨을 알 수 있었다.

Abstract

The fracture behaviour of concrete gravity dam mainly due to uplift pressure acting at the crack face was studied. Triangular type and parabolic type distribution of the uplift pressure including uniform type were first considered in case of calculating stress intensity factor(SIF) by the surface integral method. Second, the directions of crack propagation according to the uplift pressure distribution were pursued by FRANC(FRacture ANalysis Code). Third, critical crack lengths according to the uplift pressure distribution under the overflow depth were calculated.

The SIF values obtained from the surface integral method were compared with those by FRANC and relatively good agreements could be obtained between both of them. And it could be seen that the direction of crack propagation in case of triangular pressure distribution was a little benter to the dam base than the one by the uniform type. Maximum critical crack lengths under the overflow depth were obtained at about $2/5 \sim 1/2$ of the dam height.

Keywords : concrete gravity dam, pressurized crack, SIF, direction of crack propagation, critical crack length.

* 정회원 · 부경대학교 공대 토목공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 1997년도 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

댐은 수력발전, 관개, 홍수조절, 음료수 및 산업용수의 공급 및 레크리에이션 등을 위한 저수지를 만들기 위하여 건설되며 콘크리트 댐은 댐의 재료적인 분류에서 볼때 전세계적으로 17%정도를 차지하고 있고 아아치형식, 중력식, 그리고 부벽식 등으로 구성되어 있다.¹⁾

댐에서 균열의 성장이 댐의 구조적 강성을 저하시켜서 댐구조물이 더이상 작용하중을 저항하지 못하면 이는 막대한 손실로 이어질 수가 있다. 따라서 균열이 생긴 댐에서 허용하중의 평가는 보수계획에 절대적으로 필요하다.^{2,3)} 현재 파괴역학의 공학적인 문제에 대한 응용은 급속도로 진전하여 교량, 중력식 댐등 대규모 콘크리트 구조물에 많이 적용되고 있다. 선형탄성파괴역학의 이론은 균열선단의 미소균열영역(fracture process zone)의 크기가 구조물의 크기에 비하여 상대적으로 훨씬 작은 경우에 잘 적용된다는 것은 일반적으로 널리 알려져 있다.^{4,5)} 따라서 콘크리트 중력식 댐의 경우에는 선형탄성파괴역학의 이론으로 균열의 문제를 취급할 수가 있다. 여기에서 균열의 불안정상태는 작용하중과 구조물의 형태에 따라 정해지는 응력확대계수에 의하여 판단되는 것으로 하고 있다.

응력확대계수의 계산법에는 여러방법이 있지만 그 중에서도 J-적분법⁶⁾의 이론을 바탕으로 하는 표면적분법(surface integral method)^{7,8,9)}에 의하면 수치계산시 J-적분법이 갖는 특성을 이용할 수 있는 반면에 적분경로를 통과하는 요소를 일일이 지정해 주어야 하는 J-적분법에서의 불편함을 다소 피할 수가 있다. 아울러 표면적분법에서는 적분반경을 점차로 변화시켜 나가면서 응력확대계수를 계산할 수가 있으므로 얻어진 응력확대계수값들의 수렴도에 의하여 계산의 정확성을 쉽사리 판단해볼 수가 있다. 그러나 이 표면적분법은 J-적분법의 이론을 바탕으로 하고 있으며, J-적분법에서는 기본가정으로서 물체력을 고려하지 않고 또한 균열면에는 외력이 작용하지 않는 것으로 하고 있다. 따라서 표면적분법으로 균열의 문제를 취급

할 때 자중이나 균열면에 작용하는 수압을 고려하는 것이 불가능해진다. 그러나 자중을 고려하는 문제는 앞서 다루어 졌으며^{10,11)} 또한 균열면에 작용하는 외력에 관한 문제도 최근에 해결되었다.¹²⁾ 하지만 위의 연구에서는 균열면에 작용하는 외력을 일정한 값으로 보고 조사하였으므로, 이의 연구결과를 댐의 균열면에 작용시키려 한다면 균열의 쏠길이에 걸쳐서 일정한 크기의 수압을 적용할 수 밖에 없다. 댐 상부면에 균열이 발생한 경우 균열을 따라서 누수가 없는 상태에서는 균열면에 작용하는 수압의 형태는 정수위에 해당하는 크기의 등분포형태가 된다. 그러나 균열면에서 누수가 있으면 균열면에 작용하는 수압의 분포형태는 등분포형태가 아닌 다른 형태로 고려되어질 수 있다.^{13,14)} 따라서 본 연구에서는 표면적분법의 이론에서 균열면에 작용하는 압력의 분포형태를 등분포 뿐만이 아니라 삼각형분포와 2차포물선분포도 취급할 수 있도록 수정 보완하였으며, 이 이론에 의하여 균열면에 작용하는 수압의 형태를 삼각형 분포 및 2차포물선분포 형태로 주고 이들의 분포 형태에 따른 응력확대계수 값을 구하여 보았다. 아울러 경사방향으로 발생한 균열에 대하여도 고려하였다. 이 결과들을 최근에 파괴역학 분야의 구조해석 프로그램으로서 각광을 받고 있는 FRANC(FRacture ANalysis Code)¹⁵⁾에 의하여 얻어진 결과와 서로 비교하였다.

균열면에 작용하는 수압형태에 따른 기준균열의 전과과정을 추적하여 비교하여 보았다. 이 과정에서는 균열의 전파에 따른 구조물의 연속적인 요소재분할 과정이 요구되므로, 이러한 상황에 대하여 뛰어난 기능을 가지고 있는 FRANC를 이용하여 전과과정을 추적하였다.

댐의 월류수위 아래에서 기존의 균열이 전파되지 않을 수 있는 한계균열길이를 FRANC를 이용하여 구하여 보았다. 한계균열길이를 조사해보는 것은 댐의 유지관리 차원에서 매우 필요한 사항이라고 판단된다. 이에 대하여 기존의 연구들이^{16,17)} 있으나 여기서는 계산된 응력확대계수 K_{I1} (-) 값을 갖는 경우에도 안전측으로 이 값을 무시하고 한계균열길이를 구하고 있다. 따라서 댐 천단 아

래의 수위에서도 한계균열길이를 구하는 것이 가능하였다. 그러나 응력확대계수 K_I 이 (-) 값을 갖는데도 불구하고 한계균열길이를 구하는 것은 다소 모순이 있다고 여겨져, 본 연구에서는 월류 수위만에 대한 한계균열길이를 수압의 분포형태에 따라 구분하여 구하고 이를 분석하여 보았다.

균열이 생긴 댐의 거동을 정확히 알기 위하여는 3차원적인 분석이 요구되지만 본 연구에서는 현재 2차원의 범위내에서만 행하였다.

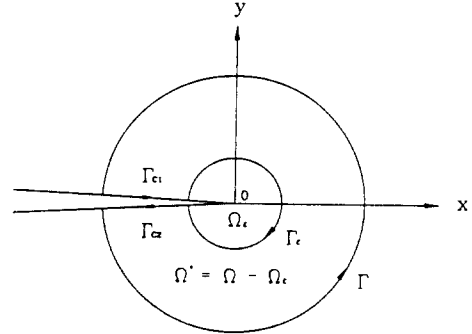


그림 1 폐경로 Γ'

2. 표면적분법

2.1 표면적분법의 기본이론

그림 1에서와 같이 균열선단을 둘러싸며 영역 Ω_ϵ 을 가지는 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(closed contour) Γ' 를 이룬다. 즉 아래와 같다.

$$\Gamma' = \Gamma + \Gamma_{c1} + \Gamma_\epsilon + \Gamma_{c2} \tag{1}$$

이 경우에 그림 1에서 주어진 선적분의 방향을 고려하면 경로 Γ_ϵ 에 대한 J 적분은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$J = - \int_{\Gamma_\epsilon} (W dy - t_i u_{i,1} ds) \tag{2}$$

여기서 경로 Γ_ϵ 와 영역 Ω_ϵ 내에서는 값이 I 이고 경로 Γ 와 영역 Ω 외측에서는 값이 0 이며 또한 경로 Γ_ϵ 과 Γ 사이에서는 평활한 평활곡선함수(smooth curve function) ϕ 를 고려하면 윗식은 폐경로 Γ' 에 대한 적분으로 확장시킬 수가 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$J = - \int_{\Gamma'} (W n_1 - t \mu_{i,1}) \phi ds \tag{3}$$

윗식은 다시 Green의 정리를 이용하여 폐경로 Γ' 로 이루어진 영역 Ω' 에 대한 표면적분으로 변환시킬 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$J = - \frac{1}{2} \int_{\Omega'} [\{ (\sigma_{22} u_{i,2} - \sigma_{11} u_{i,1}) \phi_{,1} - 2(\sigma_{21} u_{i,1}) \phi_{,2} \} d\Omega \tag{4}$$

한편 유한요소의 계산에서 얻어지는 변위벡터 \mathbf{u} 및 응력벡터 $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u})$ 의 값은 해석해에 대한 근사치로 생각할 수 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{u} \simeq \mathbf{u} = K_I \mathbf{u}^I + K_{II} \mathbf{u}^{II} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) \simeq \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) = K_I \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}^I) + K_{II} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}^{II}) \tag{6}$$

윗 식에서 $\mathbf{u}^I, \mathbf{u}^{II}$ 는 균열선단 주위에서의 변위벡터를 나타낸다.⁹⁾ 이제 식(5), (6)을 식(4)에 대입한 후, 모드 I, II에 대한 항으로 분리하여 정리하면 다음과 같이 응력확대계수 K_a 를 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$K_a = - \frac{E'}{2} \Phi(\mathbf{u}, \mathbf{u}^a, \phi) \quad a = I, II \tag{7}$$

윗식에서 E' 는 평면응력상태에서 E이고 평면변형률 상태에서는 $\frac{E}{(1-\nu^2)}$ 이다. 또한 함수 Φ 는 식(8)과 같다.

$$\Phi(\mathbf{u}, \mathbf{u}^a, \phi) = \int_{\Omega} [\{ \sigma_{22}(\mathbf{u}^a) v_{i,2} - \sigma_{11}(\mathbf{u}) u_{i,1}^a \} \phi_{,1} - \{ \sigma_{21}(\mathbf{u}^a) v_{i,1} + \sigma_{22}(\mathbf{u}) u_{i,1}^a \} \phi_{,2}] d\Omega, \quad a = I, II \tag{8}$$

2.2 댐 상부면에 작용하는 수압, 물체력 및 균열면에 작용하는 수압을 동시에 고려한 표면적분법.

표면적분법에 의한 응력확대계수의 계산은 선형탄성이론에 근거를 두고 있으므로 여러 하중조

건을 동시에 고려해야 하는 경우에는 이들 기여분의 선형적인 결합을 통하여 응력확대계수가 구해질 수 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 콘크리트 중력댐의 균열문제의 경우에는 댐 상부면에 작용하는 수압, 댐의 자중 및 균열면에 작용하는 수압에 대한 응력확대계수의 계산외에 댐의 자중 및 균열면에 작용하는 수압에 대하여 표면적분시에 적분면적에 독립되게끔 하는 수정항의 계산이 각각 요구되며, 그 결과 응력확대계수는 다음과 같이 나타낼 수가 있다.¹²⁾

$$K_I = -\frac{1}{2}E' \Phi(\nu, u^I, \phi) - \frac{1}{2}E' \Psi(b, u^I, \phi) - \frac{1}{2}E' \int_{\Gamma_I} p u_{2,1}^I \phi dx$$

$$K_{II} = -\frac{1}{2}E' \Phi(\nu, u^{II}, \phi) - \frac{1}{2}E' \Psi(b, u^{II}, \phi) \quad (9)$$

윗 식에서 첫번째 항들은 여러 작용력들로부터 얻어진 값이며 앞의 식(7)에 해당된다. 두번째 항들은 물체력에 관한 수정항인데 b 는 물체력벡터를 의미하며 함수 Ψ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Psi(b, u^a, \phi) = \int_{\Omega} b_i u_{i,1}^a \phi d\Omega; \quad a = I, II \quad (10)$$

K_I 식중에서 세번째 항은 균열면에 작용하는 수압에 관한 수정항으로서, p 는 균열면에 작용하는 수압을 의미한다.

3. 균열면에 작용하는 수압의 분포형태에 따른 응력확대계수의 산정

본 장에서는 균열면에 작용하는 수압의 분포형태를 등분포, 삼각형분포 및 포물선분포로 구분 가정하고, 표면적분법에 의하여 응력확대계수를 계산할 때 분포형태에 따라 필요한 수정항의 내용을 구하고 이에 따른 수치를 다루어 보고자 한다. 아울러 댐 상부면에서 균열이 수평방향이나 기울기 방향으로 기울어져 발생한 경우도 고려하고자 한다.

3.1 수압의 분포형태에 따른 수정항의 계산.

수압의 분포형태를 그림 2와 같이 세가지 형태로 나누어 구분하였다. 첫번째 경우는 등분포상태로서 균열 전길이에 걸쳐서 정수위만큼의 일정한 수압이 작용하는 경우이다. 두번째 경우는 균열시작점(crack mouth)에서는 정수위에 해당하는 크기의 수압이 작용하고 균열선단(crack tip)에서는 수압이 0이며 그사이의 직선변화하는 경우이다. 세번째 경우는 두번째 경우와 유사한데 단지 균열입구와 균열선단 사이에 직선변화하는 대신 포물선변화하는 상태이다.

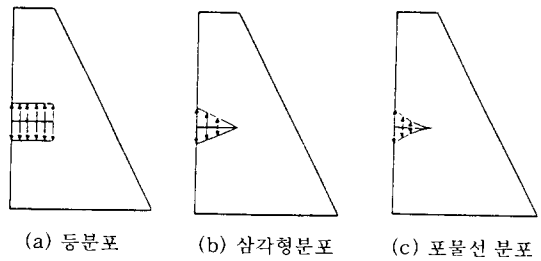


그림 2 균열면에 작용하는 수압의 분포형태

균열면에 작용하는 수압을 고려하여 응력확대계수를 구하는 경우에 필요한 수정항은 식 (9)에서 다음과 같이 주어져 있다.¹²⁾

$$-\frac{E'}{2} \int_{\Gamma_I} p u_{2,1}^I \phi dx \quad (11)$$

윗식에서 p 가 수압에 해당되며 수압이 등분포형태로 작용되는 경우에는 p 는 상수항이 된다. 또한 삼각형분포 및 포물선분포로 작용되는 경우에 균열선단으로부터 임의거리 r 떨어진 곳에서의 수압의 크기는 그림 3으로부터 식(12) 및 식(13)과 같이 주어진다.

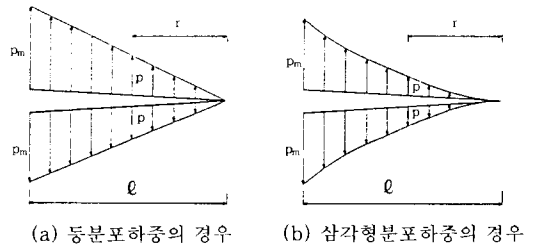


그림 3 균열면 내 임의점의 수압크기

삼각형 분포시 : $p = \frac{x}{l} p_m$ (12)

포물선 분포시 : $p = (\frac{x}{l})^2 p_m$ (13)

윗식에서 l 는 균열길이를 가리키고 p_m 은 균열 시작점에서 수압이다.

수정항의 구체적인 계산에서 먼저 등분포하는 경우에 수압 p 와 변위성분 $w_{z,1}$ 및 평활곡선함수 ϕ 를 함께 고려하면 수정항은 다음과 같아진다.

$$\frac{E'}{4\sqrt{2\pi}} \frac{(k+1)}{G} p \frac{1}{(R_e - R_i)^2} \left(\frac{8}{5} R_e^{\frac{5}{2}} - \frac{8}{3} R_i R_e^{\frac{3}{2}} \right) \quad (14)$$

윗 식에서 평활곡선함수 ϕ 는 다음의 식을 사용하였는데 R_e 는 외측적분반경을 가리키고 R_i 는 내측적분반경에 해당한다.

$$\phi(r) = \begin{cases} 1 & ; r \leq R_i \\ \frac{-1}{(R_e - R_i)^2} r^2 + \frac{2R_i}{(R_e - R_i)^2} r + \frac{R_e(R_e - 2R_i)}{(R_e - R_i)^2} & ; R_i < r \leq R_e \end{cases} \quad (15)$$

또한 식 (12) 및 (13)의 p 를 식(11)에 대입한 경우에 수정항은 구체적으로 다음과 같이 유도된다.

먼저 삼각형분포하는 경우에

$$\frac{E'}{4\sqrt{2\pi}} \frac{(k+1)}{G} \frac{p_m}{l} \frac{1}{(R_e - R_i)^2} \left(\frac{8}{21} R_e^{\frac{7}{2}} - \frac{8}{15} R_i R_e^{\frac{5}{2}} \right) \quad (16)$$

또한 포물선분포하는 경우에

$$\frac{E'}{4\sqrt{2\pi}} \frac{(k+1)}{G} \frac{p_m}{l^2} \frac{1}{(R_e - R_i)^2} \left(\frac{8}{45} R_e^{\frac{9}{2}} - \frac{8}{35} R_i R_e^{\frac{7}{2}} \right) \quad (17)$$

3.2 경사균열에 대한 수압의 고찰
 댐의 상부면에 경사방향의 균열이 발생하게되

면 균열면에 작용하는 수압의 크기는 균열 시작점과 균열선단에서 정수위가 달라지게 되므로 이에 따라 수압의 형태도 그림 4와 같이 사다리꼴로 분포하게 된다. 물론 이 경우는 정수위만큼의 수압이 그대로 균열면에 작용한다고 가정하는 경우에 속한다.

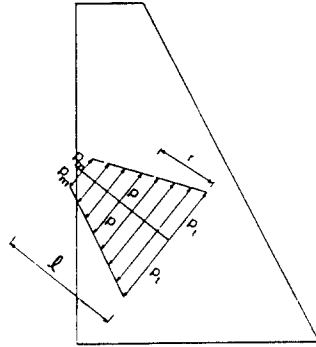


그림 4 경사방향 균열에 작용하는 수압

이 경우에 균열선단에서 임의거리 r 떨어진 곳의 수압의 크기 p 는

$$p = p_m + \frac{(p_t - p_m)}{l} (l - r) \quad (18)$$

로 주어진다. 윗식에서 p_t 는 균열선단에서의 수압이다. 식(18)로 주어진 p 를 식(11)에 대입하면 수정항은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{E'}{4\sqrt{2\pi}} \frac{(k+1)}{G} \left[p_t \frac{1}{(R_e - R_i)^2} \left(\frac{8}{5} R_e^{\frac{5}{2}} - \frac{8}{3} R_i R_e^{\frac{3}{2}} \right) - \frac{(p_t - p_m)}{l} \frac{1}{(R_e - R_i)^2} \left(\frac{8}{21} R_e^{\frac{7}{2}} - \frac{8}{15} R_i R_e^{\frac{5}{2}} \right) \right] \quad (19)$$

물론 윗 식에서 $p_t = 0$ 으로 하는 경우에는 식 (16)과 같아지게 된다.

3.3 수치예

본 절에서는 균열면에 작용하는 수압의 분포형태를 달리한 경우를 고려할 수 있도록 수정된 표

면적분법의 프로그램을 이용하여 수치예제를 다루어 보았다. 이 결과를 FRANC를 이용하여 비교 검증하였다.

3.3.1 기존의 자료와 FRANC에 의한 해석결과와의 비교

균열면에 작용하는 수압의 형태에 관한 본 연구의 결과와 FRANC에서 얻어진 결과를 비교하기 전에, 앞서의 문헌¹²⁾에서 수치예로 사용된 댐 구조물(그림 5)에 대하여 얻어진 결과들을 FRANC에 의하여 구한 값들과 비교하여 보았다. 이 문헌에 따르면 2개의 댐 모델링으로부터 얻어진 결과들을 분석하여 보았을 때 사용된 유한요소 크기의 정도는 계산결과에 크게 영향을 주지 않았다고 보고되어 있으므로 여기서는 이 문헌에서의 굵은요소망(coarse mesh)을 이용하였다. 수위의 변화에 따른 응력확대계수의 계산결과는 표 1과 같이 정리되었다.

표 1 수위의 변화에 따른 응력확대계수의 비교

수위 (m)	SIF(t/m ^{3/2})			
	K _I		K _{II}	
	문헌 ¹²⁾	FRANC	문헌 ¹²⁾	FRANC
30.215	-9.9	-4.1	12.9	11.5
26.06	-89.2	-86.4	10.9	10.3
23.42	-117.8	-121.3	8.6	8.4
19.816	-152.0	-153.6	5.5	5.8

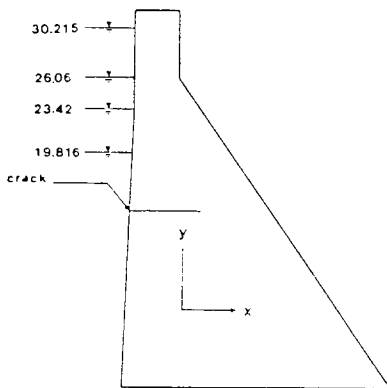


그림 5 댐 구조물

표 2 하중조건에 따른 응력확대계수의 비교

하중조건	SIF(t/m ^{3/2})			
	K _I		K _{II}	
	문헌 ¹²⁾	FRANC	문헌 ¹²⁾	FRANC
댐상부면에 작용하는 수압	31.0	35.6	8.2	6.9
댐상부면에 작용하는 수압, 물체력	-151.7	-150.7	13.4	13.0
댐상부면에 작용하는 수압, 물체력, 균열면의 수압	-89.2	-86.4	10.9	10.3

다음으로 하중조건으로서 댐 상부면에 작용하는 수압, 물체력 및 균열면에 작용하는 수압을 점차로 중첩시켜 나가면서 계산하였는데 수위는 26.06m이고 균열면에 작용하는 수압의 형태는 등분포로 하였다. 계산결과는 표 2에 나타내었다.

이상 표 1, 2의 계산 결과에서 알 수 있듯이 앞서의 문헌에서 얻어진 결과와 FRANC에 의한 계산결과는 비교적 서로 좋은 정확도를 갖는 것으로 분석될 수 있다. 그러나 표 1에서 수위가 30.215m인 경우에 K_I의 값만은 서로의 결과가 100% 이상의 차이를 보이고 있다. 이에 대하여는 댐 상부면에 작용하는 수압, 물체력 및 균열면에 작용하는 수압의 영향들이 서로 상쇄되는 과정에서 다른 수위들에 비하여 작은 값을 남기게 되어 상대적으로 큰 오차를 나타낸 것으로 추측되지만 추후 다른 프로그램에 의하여 재차 정밀히 분석해 보고자 한다. 표 1에서 K_I 값들에 (-)부호가 나온 것은 균열의 벌어짐이 전혀 없는 상태를 의미한다. 아울러 댐 콘크리트의 파괴인성치로서 최소한 약 100 t/m^{3/2}의 값을 사용하므로,^{1, 16)} 댐의 천단을 넘지 않은 수위 아래에서는 댐상부면의 균열은 전파되지 않는 것으로 평가할 수 있다.

3.3.2 수압의 분포형태에 따른 비교분석

수압의 분포형태에 따른 응력확대계수의 계산결과는 표 3, 4와 같이 정리되었다. 수평방향의 균열에 대하여 2개의 수위에 대한 계산결과만을 나타내었는데, 표에서와 같이 포물선 분포에 대하여는 FRANC로서 값을 구할 수가 없었다. FRANC 프로그램의 설명서에 의하면 포물선분포도 취급

할 수 있게 되어 있었으나 실제 계산결과에서는 전혀 불합리한 값이 나와서 본 표에는 포함시키지 않았다. 그러나 본 연구에 의한 값은 FRANC의 결과와 비교는 안되었지만 다른 형태의 수압분포와 비교해볼 때 매우 타당성이 있는 값이라고 판단될 수 있다. 본 연구에서 얻어진 값들은 표면적 분법에서 균열길이의 1/3에서 부터 균열길이까지 외측적분반경만을 점차로 증가시켜가면서 얻어진 값들을 산술평균한 결과이다.

표 3 수압의 분포형태의 따른 응력확대계수의 비교 (수위 30.215m)

수압분포형태	SIF(t / m ^{3/2})			
	K _I		K _{II}	
	본 연구	FRANC	본 연구	FRANC
등 분 포	84.2	86.7	-3.4	-3.6
삼각형 분포	38.9	37.7	-2.2	-2.3
포물선 분포	26.2		-1.6	

표 4 수압의 분포형태의 따른 응력확대계수의 비교 (수위 26.06m)

수압분포형태	SIF(t / m ^{3/2})			
	K _I		K _{II}	
	본 연구	FRANC	본 연구	FRANC
등 분 포	62.5	64.4	-2.5	-2.7
삼각형 분포	30.2	28.0	-1.6	-1.7
포물선 분포	20.0		-1.2	

3.3.3 경사방향의 균열에 대한 조사.

댐상부면에서 균열이 수평방향이지 아니고 그림 4와 같이 기울어져 발생한 경우에는 정수위에 해당하는 수압을 균열면에 작용시킨다고 하여도 균열면의 수압의 분포형태는 사다리꼴 형태가 된다. 이 경우에 3.2절에서 유도된 식을 사용하여 댐 상부면에 작용하는 수압, 물체력 및 균열면에 작용하는 수압을 점차로 중첩시켜 나가면서 수위 26.06m 아래에서 계산한 결과는 다음 표 5와 같다. 이 표를 수평균열인 경우의 표 2와 비교해보면 댐 상부면에 작용하는 수압만 작용하는 경우에 경사 균열인 경우가 수평균열의 경우보다 K_I의 값이 줄어들고 K_{II} 값의 부호가 바뀐 것은 주목할 만 하다. 이에 대하여는 앞으로 계속 조사하고자 한다.

표 5 경사방향 균열에서 하중조건에 따른 응력확대 계수의 비교

하중조건	SIF(t / m ^{3/2})			
	K _I		K _{II}	
	본 연구	FRANC	본 연구	FRANC
댐상부면에 작용하는 수압	15.7	14.1	-23.5	-29.1
댐상부면에 작용하는 수압, 물체력	-131.9	-126.8	26.7	27.4
댐상부면에 작용하는 수압, 물체력, 균열면의 수압	-65.4	-59.8	30.0	30.2

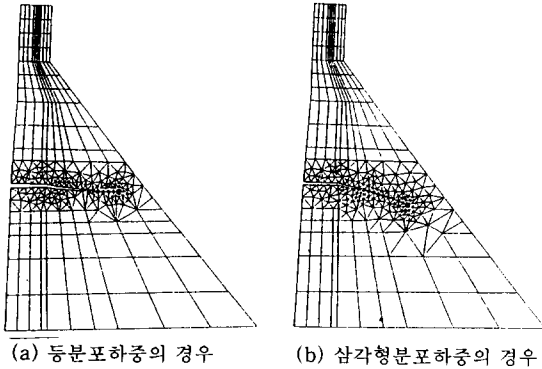
4. 수압의 분포형태에 따른 균열의 전파방향

앞 장에서 그림 5의 댐구조물에 대하여 댐의 천단 아래의 수위에서는 균열은 전파하지 않는 것으로 평가될 수 있었다. 이는 자중만에 의하여는 K_I 값이 (-)부호를 갖게되며, 이 값은 댐 상부면에 작용하는 수압과 균열면에 작용하는 수압에 의하여 생기는 K_I 값보다 절대치가 크므로 결과적으로 K_I 값이 (-)부호를 갖게되기 때문이었다. 따라서 본 절에서는 지진 혹은 홍수의 영향등으로 댐을 월류하는 수위가 발생하는 경우를 가정하고, 이러한 경우에 대하여 균열면에 작용하는 수압의 분포형태에 따른 균열의 전파방향을 FRANC 프로그램을 이용하여 추적 비교하였다. 균열전파방향을 정하기 위한 이론으로서는 Erdogan et al.¹⁸⁾의 최대원주방향 인장응력이론을 사용하였다.

그림 6은 그림 5의 댐구조물에 대하여 5m의 월류수위를 가정하고 한번에 1m 씩 7회의 균열진전

표 6 균열진전에 따른 응력확대계수의 변화

균열진전 횟수	SIF(t / m ^{3/2})			
	등분포 하중		삼각형 분포하중	
	K _I	K _{II}	K _I	K _{II}
1	157.5	15.4	112.6	16.2
2	178.5	-11.3	122.3	-9.1
3	199.4	6.0	130.5	8.1
4	228.2	-6.6	144.8	5.0
5	265.4	6.5	154.7	-5.4
6	319.6	-12.5	170.6	8.6
7	403.0	-13.4	188.1	7.5
8	562.4	-18.4	210.9	6.2



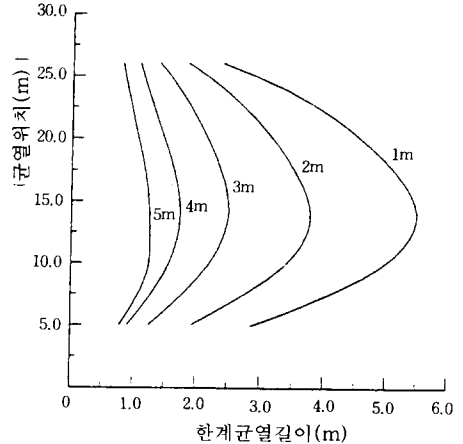
(a) 등분포하중의 경우 (b) 삼각형분포하중의 경우
 그림 6 균열면에 작용하는 수압의 분포형태에 따른 균열의 전파방향

을 시킨 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 균열면에 작용하는 수압을 삼각형분포하중으로 고려한 경우는 전파방향이 등분포하중으로 고려한 경우에 비하여 댐의 기초 쪽으로 더 기우는 것을 알 수 있었다. 따라서 포물선분포하중으로 고려하는 경우는 이러한 경향이 더 많이 나타날 것으로 판단될 수 있다. 표 6은 균열진전에 따른 응력확대계수의 값을 나타내고 있다.

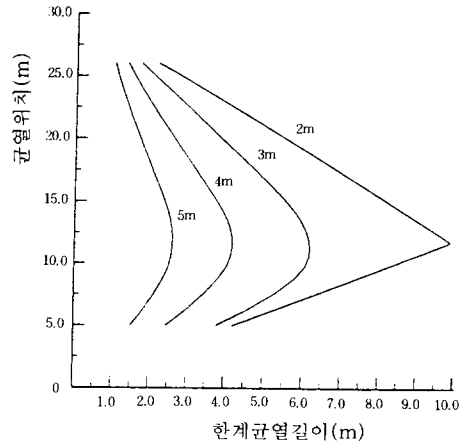
5. 월류수위 아래에서의 한계균열길이

댐 천단을 월류하는 수위에 대하여 FRANC에 의하여 한계균열길이를 구하여 이 결과에 대한 분석을 행하였다. 수치예로서 3장에서 사용된 댐 구조물을 재차 사용하였다. 균열면에 작용하는 수압은 등분포형태 및 삼각형분포로 하였으며 균열위치는 다음 표 7, 8에서와 같이 5곳으로 하였다. 이 표에서 균열위치는 댐의 하단으로부터의 높이를 가리키며 월류수위는 댐 천단으로부터 1m 씩 증가시켜 5m 까지 고려하였다. 계산결과 각 균열위치와 월류수위에 따른 한계균열길이는 표 7, 8과 같이 정리되었다.

수압이 삼각형분포하는 경우는 작용하는 수압의 양이 작아지는 이유로 한계균열길이는 등분포하는 경우에 비하여 길어지게 되는데, 위의 표 7,8에서 이 결과를 알 수 있다. 월류수위 1m 아래에서의 전 균열위치와 그리고 2m 아래에서 균열위치 7.05m 되는 곳에서는 한계균열길이가 너무



(a) 수압이 등분포하는 경우



(b) 수압이 삼각형 분포하는 경우

그림 7 월류수위에 따른 한계균열길이

표 7 균열위치에 따른 한계균열길이 (수압이 등분포하는 경우)

균열위치 (m)	한계균열길이(m)				
	월류수위 1m	월류수위 2m	월류수위 3m	월류수위 4m	월류수위 5m
7.05	4.30	2.85	1.85	1.35	1.20
11.75	5.61	3.81	2.51	1.76	1.24
16.39	5.57	3.78	2.58	1.78	1.28
23.42	3.83	2.69	1.84	1.22	0.89
26.06	2.39	1.84	1.39	1.08	0.80

표 8 균열위치에 따른 한계균열길이
(수압이 삼각형분포하는 경우)

균열위치 (m)	한계균열길이(m)				
	월류수위 1m	월류수위 2m	월류수위 3m	월류수위 4m	월류수위 5m
7.05	-	-	5.86	3.71	2.29
11.75	-	9.91	6.61	4.62	2.84
16.39	-	7.51	5.21	3.43	2.21
23.42	-	3.79	2.66	1.83	1.24
26.06	-	2.17	1.71	1.35	1.02

길어져서 값을 구할 수가 없었다.

위의 표의 결과를 그림으로 나타내면 그림 7과 같으며 이로부터 각각의 월류수위에 대하여 최대 한계균열길이는 대략 댐 높이의 $2/5 \sim 1/2$ 되는 곳에서 발생함을 알 수 있다. 따라서 댐 저면이나 상부 가까이에서 발생된 균열은 한계균열길이가 짧은 이유로 주의깊게 다루어져야 함을 알 수가 있었다.

6. 결 론

표면적분법으로 응력확대계수를 계산할 때 균열면에 작용하는 압력을 다양한 형태로 고려할 수 있도록 기본이론을 보완하여, 이에 따른 수치예제를 다루어 보았다. FRANC 프로그램을 이용하여 균열면에 작용하는 압력의 형태에 따른 기존균열의 전파방향을 조사해보았으며, 또한 임의의 월류수위에 대한 한계균열길이를 구하여 보았다. 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 댐구조물과 같이 균열면에 수압이 작용되는 경우에 표면적분법에 의하여 응력확대계수를 계산할 때 수압의 분포형태를 등분포형태가 아닌 삼각형분포, 포물선분포도 취급할 수 있도록 이론식을 유도하였으며, 이에 따른 수치예제의 결과를 FRANC 프로 그램에서 얻어진 결과와 비교하여 볼 때 비교적 정확한 값이 얻어졌음을 알 수 있었다. 아울러 경사방향으로 생긴 균열도 취급할 수 있도록 하였다.

2. 균열면에 작용하는 수압의 분포형태에 따른

기존균열의 전파방향을 조사하였다. 그 결과 삼각형분포하중의 경우에 균열의 전파방향은 등분포하중의 경우에 비하여 상대적으로 댐의 기초쪽으로 더 기우는 것을 알 수 있었다.

3. 월류수위에 대한 한계균열길이의 분포상황을 자세히 알 수 있었으며, 이러한 값들은 댐의 유지 관리 차원에서 유용하게 사용될 수 있으리라고 판단된다. 본 연구에서는 수평방향의 균열에 대하여만 취급하였으므로 앞으로 경사방향의 균열에 대하여 계속하여 조사하고자 한다.

4. 임의의 월류수위에 대하여 최대 한계균열길이는 대략 댐높이의 $2/5 \sim 1/2$ 되는 곳에서 발생하였다. 따라서 댐 저면이나 상부 가까이에서 발생된 균열은 한계균열길이가 짧은 이유로 신중히 다루어져야 함을 알 수가 있었다.

참 고 문 헌

1. A. H. Chahrouh, M. Ohtsu, "Crack growth prediction in scaled down model of concrete gravity dam", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 21 pp. 29-40, 1994.
2. H. N. Linsbauer, A. R. Ingraffea, H. P. Rossmannith, P. A. Wawryzynek, "Simulation of Cracking in Large Arch Dam : Part I", Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 7, pp. 1599-1615, 1989.
3. H. N. Linsbauer, A. R. Ingraffea, H. P. Rossmannith, P. A. Wawryzynek, "Simulation of Cracking in Large Arch Dam : Part II", Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 7, pp. 1616-1630, 1989.
4. Ingraffea, A. R. and Saouma, V. E., "Numerical modeling of discrete crack Propagation in reinforced and plain concrete", 'Fracture Mechanics of Concrete' (Sih, G. C. and DiTommaso, A. Ed.), Martinus Nijhoff Publishers, pp. 171-225, 1985.

5. Bažant, Z. P., "Mechanics of fracture and progressive cracking in concrete structures", Fracture mechanics of concrete, Sih, G. C. and DiTommaso, A. Ed., Martinus Nijhoff Publishers, pp. 1-94, 1985
6. Rice, J. R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, pp. 379-386, 1968.
7. Babuška, I. and Miller, A., "The Post-Processing Approach in the Finite Element Method-Part 1 : Calculation of Displacements, Stresses and Other Higher Derivatives of the Displacements", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 20, pp. 1085-1109, 1984.
8. Babuška, I. and Miller, A., "The Post-Processing Approach in the Finite Element Method-Part 2 : The Calculation of Stress Intensity Factors", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 20, pp. 1111-1129, 1984.
9. Droz, P., "Modele numerique du comportement non-lineaire d'ouvrages massifs en beton non arme", pour l'obtention du grade de docteur es sciences techniques, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, pp. 1-148, 1987.
10. 진치섭, 장희석, "균열선단 응력확대계수 결정을 위한 후처리기법", 대한토목학회 논문집, 제11권, 1호, pp. 17-27, 1991.
11. 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, pp. 541-554, 1995.
12. 진치섭, 최현태, 이홍주, "균열면의 압력을 고려한 응력확대계수의 결정에 관한 연구", 콘크리트 학회지, 제7권, 3호, pp. 175-186, 1995.
13. M. L. Ayari, "Static and Dynamic Fracture Mechanics of Concrete Gravity Dams", Ph. D. thesis, University of Colorado, 1988.
14. H. N. Linsbauer and H. P. Rossmann, "Back Face Rotation Correction for Trapezoidal Specimens", Engineering Fracture Mechanics Vol. 19, No. 2, pp. 195-205, 1984.
15. P. Wawrzynek, A. R. Ingraffea, "FRAN-C2D. A two-dimensional crack propagation simulator. Version 2. 7 User's Guide", pp. 1-59, 1995.
16. A. R. Ingraffea, "Case studies of simulation of fracture in concrete dams", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, No. 1/2/3, pp. 553-564, 1990.
17. Shan-Wern S. Lin and A. R. Ingraffea, "Case studies of cracking of concrete dams-a linear elastic approach." Department of Structural Engineering, Research Report 88-2, p. 116, 1988.
18. Erdogan, F., Sih, G. C., "On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear", ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 519-527, 1963.

(접수일자 : 1996. 9. 13)