

균열면의 압력을 고려한 응력확대계수의 결정에 관한 연구

A Study on the Calculation of Stress Intensity Factors considering Pressure of Crack-Face

진치섭* 최현태** 이홍주**
Jin, Chi Sub Choi, Hyun Tae Lee, Hong Ju

요 약

매시브 콘크리트 구조물의 균열선단의 응력확대계수를 구하는 데 표면적분법을 도입하였다. 표면적분법은 경로적분인 J-적분법을 단적으로 하여 유도가 된다. J-적분법에서는 균열면의 압력과 구조물의 물체력을 고려할 수가 없는 반면에 본 이론은 이러한 일반 하중조건을 고려할 수가 있으므로 보다 정확한 균열선단부의 응력상태를 고찰하는 데 유용하다. 또한 균열선단부의 특이성을 표현하기 위해 특이요소 사용하거나 균열선단부의 세밀한 요소분할을 요하는 등의 불편함을 제거할 수 있는 기법이다. 본 이론을 바탕으로 응력확대계수 K_I , K_{II} 를 구하는 프로그램을 작성하였으며 8절점 등매개 변수요소를 사용하여 K_I , K_{II} 를 검증하였으며 실제 댐 구조물에 적용시켜 응력확대계수의 변화를 살펴보았다.

Abstract

The determination of the stress intensity factors is investigated by surface integral method around the crack tip of the massive concrete structure. The surface integral method is naturally derived from the standard path integral J. However, in the J integral method, pressure in the crack-face and body forces can not be considered, while this theory has advantage of considering many kind of forces, so this theory will be useful in investigating more accurate stress states around crack tip. Furthermore, this method can eliminate unnecessary process of using singular elements and fine mesh around crack tip which is used in modelling the singularity around crack tip. A computer program for determining K_I and K_{II} is developed by applying this theory. K_I and K_{II} values using 8-noded isoparametric elements which was proved and variation of the stress intensity factor was investigated by application of dam structures.

Keywords : stress intensity factors, surface integral, J integral

* 정희원 · 부산대학교 토목공학과 교수
** 정희원 · 부산대학교 대학원 박사과정 수료

• 본 논문에 대한 토의문 1995년 8월 31일까지 학회로 보내
주시면 1995년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

일반적으로 콘크리트 구조물에 균열이 발생하면 균열선단부에는 미세균열 영역이 발생하고 이의 파괴기동을 조사하려면 비선형 파괴역학을 적용하여야 한다. 그러나 콘크리트 중력식 댐과 같이 거대한 콘크리트 구조물이 고려되는 경우에는 이러한 미세균열이 생기는 영역의 크기가 무시될 수 있으며 이 구조물은 선형탄성기동을 하는 것으로 가정할 수가 있다. 규모가 큰 콘크리트 구조물은 취성파괴에 의하여 파괴되고 작은 규모의 콘크리트 구조물은 소성분괴에 의하여 파괴가 생긴다. (3.1.12.13) 콘크리트 구조물에 선형탄성파괴역학을 적용하는 것은 콘크리트 재료의 특성으로 볼 때 어디까지나 임시적인 해석에 속한다고 말할 수 있으나 그 크기가 댐과 같이 큰 콘크리트 구조물에 대하여는 선형탄성파괴역학을 적용하여도 유용한 결과가 얻어질 수 있을 것이다.

본 논문의 목적은 콘크리트 중력댐에 균열이 발생했을 때 댐을 파괴에 도달하게 하는 균열진전의 여부를 조사하기 위하여 균열선단부의 정확한 응력확대계수를 선형탄성파괴역학을 이용하여 알아보고자 하는 것이다. 균열의 진전 여부조사는 재료의 파괴 인성치와 구조물의 응력확대계수를 비교함으로써 알 수가 있는데, 여기서 파괴인성치는 재료실험에 의해 구해지는 값이고 응력확대계수는 수치적인 계산을 통하여 구해지게 된다. 이의 계산법으로는 변위상관법(displacement correlation method), 가상균열확장법(virtual crack extension technique), J적분법 등이 있다. 그런데 1984년 Babuška와 Miller^(1,2)는 유한요소해석 결과로부터 직접 응력확대계수를 구할 수 있는 표면적분법을 제안하였고, 그 후 1987년 Droz⁽³⁾도 이를 응용하려 노력하였다. 그렇지만 이들 제안에 있어서 먼저 Babuška와 Miller는 균열선단 부근의 변위장을 점근 전개식(Asymptotic Expansion)⁽⁴⁾의 형태로 유도하고 있어서 난해할 뿐만 아니라 식의 유도과정에 있어서도 몇가지 오류를 발견할 수가 있었다. 그리고 Droz가 응용한 표면적분법은 해석해와 차이가 매우 큰 것을 알 수 있었다. (1.2.3.5)

이러한 관점에서, 본 논문은 통상의 J적분법을 변형시켜서 표면적분법을 유도하고 또한 Jin et al⁽⁵⁾이 제안한 평활곡선함수(smooth curve function)를 사용하여, 일반 유한요소해석에서 얻어진 변위를 이용하는 후처리기법에 의하여 응력확대계수를 간편하게 구하는 방법을 제시하는 데에 그 목적을 두고 있다. J적분법에서는 물체력(자중)과 균열면의 압력을 고려할 수가 없는 반면에 본 연구에서의 표면적분법은 댐 벽체에 작용하는 외력, 물체력 그리고 균열면의 압력까지의 일반자중을 모두 고려할 수가 있어서 균열선단부의 응력상태를 보다 잘 나타낼 수 있는 방법이다. 본 논문에서는 이러한 표면적분법을 유도하여 타 이론과 비교 후 그 타당성을 검증하고 실제 댐 구조물에 직접 적용하여서 수위에 따른 댐 균열선단부의 응력확대계수를 파악하여 댐 구조물의 파괴예측에 대한 기초적인 토대를 마련하고자 한다.

2. 표면적분법

일반적으로 균열선단의 응력상태를 나타내는 응력확대계수를 구하는 방법들 중에서 변위상관법은 균열선단에서 응력의 특이성을 나타내기 위하여 세밀한 요소분할과 특이요소의 사용을 필요로 하며, 또한 J적분법은 선적분을 행하기 위하여 미리 적분경로를 지정해 주어야 하는 등의 불편한 점이 있었다. 이에 반하여 본 논문에서 제시하는 표면적분법은 위에서 열거한 물체점들을 해결할 수 있으며 부재의 물체력은 물론 균열면에 작용하

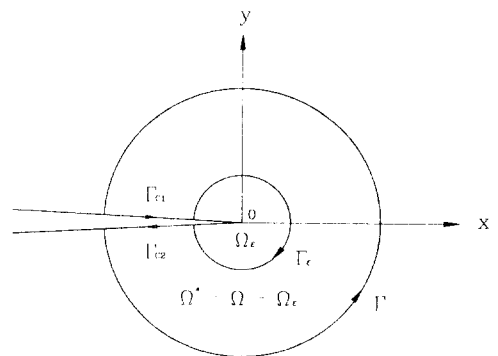


Fig.1 Closed contour Γ^*

는 압력까지도 고려하여서 응력 확대 계수 K_I 과 K_{II} 를 분리하여 계산할 수 있는 수치해법이다.

2.1 표면적분법의 이론

그림 1과 같이 균열을 둘러싸고 있는 영역 Ω_e 을 가지는 작은경로 Γ_e 가 있다. 또한 경로 Γ 는 영역 Ω 를 한정하는 더 큰 경로이고 경로 Γ_{c1} 과 Γ_{c2} 는 균열면을 따라서 Γ 와 Γ_e 에 연결된다. 이 경우에 폐경로(closed contour) Γ^* 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Gamma^* = \Gamma + \Gamma_{c1} + \Gamma_e + \Gamma_{c2} \quad (1)$$

이때 경로 Γ_e 와 영역 Ω_e 내에서는 값이 1이고 경로 Γ 와 영역 Ω 외측에서는 값이 0인 평활곡선함수 ϕ 를 고려하면 폐경로 Γ^* 에 관한 적분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J = - \int_{\Gamma^*} (w n_1 - t_1 u_{1,1}) \phi \, ds \quad (2)$$

여기서 n_1 은 dy/ds 로서 외향단위법선벡터이다. 위의 식은 Γ^* 경로가 닫혀있고 또한 특이성(singularity)을 나타내지 않으므로 Green정리를 이용하여 Ω^* 영역에 대한 표면적분으로 바꾸어 놓을 수가 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$J = - \frac{1}{2} \int_{\Omega^*} [(\sigma_{22} u_{1,2} - \sigma_{11} u_{1,1}) \phi_{,1} - 2(\sigma_{12} u_{1,1}) \phi_{,2}] \, d\Omega \quad (3)$$

한편 유한요소의 계산에서 얻어지는 변위의 값은 균열선단 주위에서는 해석해에 대한 근사치로 생각할 수 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{v} \approx \underline{u} = K_I \underline{u}^I + K_{II} \underline{u}^{II} \quad (4)$$

응력장에 대해서도 같은 방법으로 생각하면 다음과 같이 된다.

$$\underline{\sigma}(\underline{v}) \approx \underline{\sigma}(\underline{u}) = K_I \underline{\sigma}(\underline{u}^I) + K_{II} \underline{\sigma}(\underline{u}^{II}) \quad (5)$$

이제 식(4) 및 식(5)를 식(3)에 대입하고 모드 I, II에 대하여 분리하여 함수 $\Phi(\underline{v}, \underline{u}^I, \phi)$ 를 고려한 후 정리하면 다음과 같이 K_I 를 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$K_I = - \frac{E^*}{2} \Phi^I = - \frac{E^*}{2} \Phi(\underline{v}, \underline{u}^I, \phi); \alpha = I, II \quad (6)$$

여기서

$$E^* = \begin{cases} E & : \text{평면응력 상태} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & : \text{평면변형률 상태} \end{cases}$$

2.2 평활곡선함수

본 연구에서는 포물선 형태의 평활곡선함수를 사용하였으며 이를 Babuška and Miller^(1,2)와 Droz⁽³⁾가 각각 제안한 함수와 비교하여 나타내었다. 그리고 진치섭과 장희석⁽⁵⁾에서 이미 본 연구에서 사용한 평활곡선 함수가 타 논문^(1,2,3)의 함수보다 우수함을 입증하였다.

a) Babuška 와 Miller의 평활함수^(1,2)

$$\phi(r) = \begin{cases} 1 & 0 \leq r < \frac{1}{2}R_c \\ 1 - \frac{4(r - \frac{1}{2}R_c)^2}{R_c^2} & \frac{1}{2}R_c \leq r < R_c \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $r^2 = x^2 + y^2$ 이며 R_c 는 外側적분반경을 나타낸다.

b) Droz의 평활함수⁽³⁾

$$\phi(r) = \begin{cases} 1 - \frac{r^2}{R_c^2} & r < R_c \\ 0 & r \geq R_c \end{cases} \quad (8)$$

c) 본 연구에서 사용하는 평활함수⁽⁵⁾

$$\phi(r) = \begin{cases} 1 & r \leq R_1 \\ \frac{-1}{(R_c - R_1)^2} + \frac{2R_1}{(R_c - R_1)^2} + \frac{R_c(R_c - 2R_1)}{(R_c - R_1)^2} & R_1 < r \leq R_c \end{cases} \quad (9)$$

여기서 R_1 는 내측적분반경을 가리킨다. 이 함수

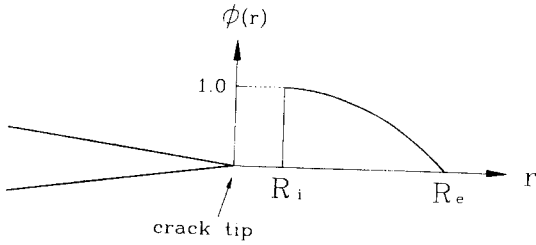


Fig.2 Parabolic smooth curve function ϕ

는 균열선단부근에서는 값이 1 이 되고, 임의 거리만큼 떨어진 곳에서는 0 의 값을 갖는다. 그리고 이 사이에서는 평활한 포물선 함수이다.

3. 균열면에 작용하는 물체력 및 압력을 고려한 표면적분법

앞서 전개한 표면적분법의 기본이론은 균열면에 압력을 받지않고 어떠한 물체력도 작용하지 않는 경우에 대하여 전개된 반면에 본 연구에서는 이 2가지 모두를 고려하는 경우에 대하여 응력확대계수를 평가 하고자 한다.

먼저 앞의 그림 1에서 물체력 f_1 가 작용하는 경우에는 균열선단 주위의 경로에 독립된 결과를 주는 적분을 생각하고 이 적분을 J' 라 하면 다음식이 성립한다.

$$J' = \int_{\Gamma} (w n_1 - t_i u_{i,1}) ds - \int_{\Omega} f_i u_{i,1} d\Omega \quad (10)$$

이는 물체가 변형을 받을 때의 포텐셜 에너지에 관한 식으로 부터 유도할 수 있으며 평활곡선함수 ϕ 를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

폐경로 Γ^* 와 이것으로 둘러싸인 영역 Ω^* 에 대하여

$$J' = - \int_{\Omega^*} f_i u_{i,1} \phi d\Omega - \int_{\Omega^*} \{ (w - \sigma_{11} u_{1,1}) \phi_1 - (\sigma_{12} u_{1,1}) \phi_2 \} d\Omega + \int_{\Omega^*} f_i u_{i,1} \phi d\Omega \quad (11)$$

한편 유한요소 해석에서 얻어진 변위 v 는 외력 이외에 물체력도 함께 고려하여 얻어진 해석해 u 의 근사치로 생각하여 다음과 같이 표현 할 수 있

다.

$$\begin{aligned} v &\approx u = (u_g) + K_I u^I + K_{II} u^{II} \\ \sigma(v) &\approx \sigma(u) = (\sigma_g) + K_I \sigma^I + K_{II} \sigma^{II} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 u_g, σ_g 는 각각 물체력만에 의한 변위와 응력이다. 식(12)를 (11)에 대입하고 물체력에 관한 함수 $\Psi(f, u^x, \phi)$ 를 고려하여 정리하면 다음과 같이 물체력을 포함할 때의 응력확대계수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_2 &= -\frac{1}{2} E^* \Phi(v, u^x, \phi) - \frac{1}{2} E^* \Psi(f, u^x, \phi) \\ &: \alpha = I, II \end{aligned} \quad (13)$$

다음으로 균열면에 압력이 작용할 경우에 대해 그림 1과 비슷한 폐경로 Γ^* 를 고려하면 $\Gamma^* = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4$ 로 이루어지며 균열선단을 포함하지 않는 것으로 한다.

한편 contour의 정의 중에서 $\Gamma_3 = \Gamma_\epsilon$ 으로 하고 $\epsilon \rightarrow 0$ 일때 $\Gamma_2 + \Gamma_4 \rightarrow \Gamma_\epsilon$ 로 표시하여 균열면에 압력이 작용하는 경우의 J적분을 J'' 라 표기하면 J'' 는 contour Γ_1 에 대한 J적분 값과 contour Γ_ϵ 에 대한 것의 합으로써 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$J'' = J - \int_{\Gamma_\epsilon} p u_{2,1} ds \quad (14)$$

p 는 균열면에 작용하는 압력이다.

여기서 폐경로 Γ^* 는 균열선단을 포함하지 않으며 그림 3과 같이 정의를 해 놓는다.

$$\Gamma^* = \Gamma_\epsilon + \Gamma_c + \Gamma_1 \quad (15)$$

앞절에서 정의된 평활곡선함수 ϕ 를 사용하고 Γ_ϵ contour 내부에서 균열면을 따르는 contour를 Γ_{xc} 로 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J'' = - \int_{\Gamma^*} (w n_1 - t_i u_{i,1}) \phi ds - \int_{\Gamma_c - \Gamma_{xc}} p u_{2,1} \phi dx \quad (16)$$

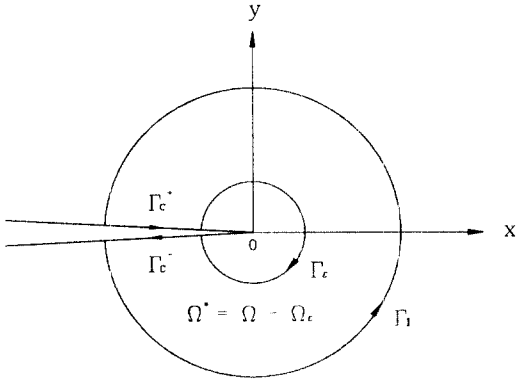


Fig.3 Definition of Contour Γ^*

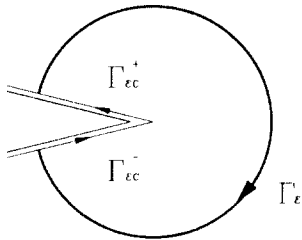


Fig.4 Definition of Contour Γ

위의 식에서 폐경로에 대한 첫번째 적분은 균열 선단의 특이성을 포함하지 않으므로 Green정리에 의해 Γ^* 로 둘러싸인 영역 Ω^* 에 대한 표면적분으로 바꾸어서 적분을 행하면 다음과 같이 된다.

$$J^* = -\frac{1}{2} \int_{\Omega^*} \{ \sigma_{12} u_{i,2} - \sigma_{11} u_{i,1} \} \phi_{,1} - 2(\sigma_{12} u_{i,1}) \phi_{,2} d\Omega - \int_{\Gamma_c} p u_{2,1} \phi dx \quad (17)$$

유한요소해석에 의하여 얻어지 해 \underline{v} 는 해석해 \underline{u} 의 근사치인데, 지금까지와는 달리 \underline{u} 는 균열면에 작용하는 압력에 의하여 생기는 해인 \underline{u} 를 추가로 갖는 것으로 하여 다음과 같이 놓을 수가 있다.

$$\underline{v} \simeq \underline{u} = \underline{\dot{u}} + k_{\parallel} \underline{u}^{\parallel} + k_{\perp} \underline{u}^{\perp} \quad (18)$$

$$\underline{\sigma}(\underline{v}) \simeq \underline{\sigma}(\underline{u}) = \underline{\dot{\sigma}} + k_{\parallel} \underline{\sigma}^{\parallel} + k_{\perp} \underline{\sigma}^{\perp}$$

식(18)을 식(17)에 대입하고 모드 I, II로 분리

하여 J^* 를 표시하면 다음과 같이 된다.

$$J^* = K_{\perp} \left\{ -\frac{1}{2} \Phi(\underline{v}, \underline{u}^{\perp}, \phi) - \frac{1}{2} \int_{\Gamma_c} p u_{2,1}^{\perp} \phi dx \right\} - K_{\parallel} \left\{ \frac{1}{2} \Phi(\underline{v}, \underline{u}^{\parallel}, \phi) \right\} \quad (19)$$

식(19)를 살펴보면 본 논문에서 취급하는 균열은 수평균열이므로 균열면에 작용하는 압력은 모드 I에만 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그래서 K_{\perp} 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$K_{\perp} = -\frac{E^*}{2} \Phi(\underline{v}, \underline{u}^{\perp}, \phi) - \frac{E^*}{2} \int_{\Gamma_c} p u_{2,1}^{\perp} \phi dx \quad (20)$$

이상의 이론들을 토대로 표면적분법에 의한 응력확대계수 계산은 복잡한 하중조건들에 대해 선형적인 결함으로 나타내는 것이 가능하므로 외력, 물체력 그리고 균열면에 작용하는 압력을 동시에 고려할 때 응력확대계수를 다음 식과 같이 표시할 수가 있다.

$$K_{\perp} = -\frac{1}{2} E^* \Phi(\underline{v}, \underline{u}^{\perp}, \phi) - \frac{1}{2} E^* \Psi(\underline{f}, \underline{u}^{\perp}, \phi) - \frac{1}{2} \int_{\Gamma_c} p u_{2,1}^{\perp} \phi dx \quad (21)$$

$$K_{\parallel} = -\frac{1}{2} E^* \Phi(\underline{v}, \underline{u}^{\parallel}, \phi) - \frac{1}{2} E^* \Psi(\underline{f}, \underline{u}^{\parallel}, \phi) \quad (22)$$

4. 수치예 및 고찰

본 연구에서 개발한 표면적분법을 프로그램을 통하여 검증해 보고 이의 실용성을 조사해 보기 위해 실제 댐 구조물에서 각 수위에 따른 응력확대계수를 평가 하였다.

4.1 프로그램의 검증

프로그램 검증의 정도를 높이기 위하여 Owen & Fawkes⁽⁶⁾의 문헌에 나와있는 예제를 그대로 사용하였다.

그림 5와 같이 폭이 10m, 높이가 50m이고 균열

이 중앙에 있으며 폭에 대한 균열의 비가 0.4인 판을 취급하였다. 이러한 판에서 외력, 균열면의 압력, 그리고 y축방향의 물체력을 고려할 때 대칭임을 고려하여 판의 절반만을 해석한 경우에 대하여 다음 사항들을 검증하였다. 첫째, 본 이론에 대한 선형유한요소 정식화 과정의 유도과정에서 오류가 없음을 확인하기 위해 각각의 하중이 작용하는 경우와 전체하중이 함께 작용하는 경우에 대한 응력확대계수 값의 차이가 없는지에 대하여 조사하여 보았으나 표 1에서 보는 바와 같이 이상이 없음을 확인할 수 있었다. 둘째, 균열열림모드 K_{II} 에

대해서 그 값의 타당성을 검증하기 위해 본 이론에 의한 결과와 삼각형 특이요소를 사용한 변위상관법에 의한 결과를 비교하여 보았다. 본 이론에 의한 결과를 보면 표면적분법의 수렴구간⁽⁵⁾으로 볼 수 있는 $1/3 Re_{max} \sim Re_{max}$ 에서 K_I 은 412.86

Table 1 Stress intensity factors of tension plate

(단위 : $t.f/m^{3/2}$)

하중상태	SIF	K_I	K_{II}
외력		199.5753	74.83979
물체력(하중)		-111.3774	-39.98805
균열면의 압력		324.4802	9.25934
각 하중의 합		412.6781	44.11108
전체하중		412.6581	43.91308

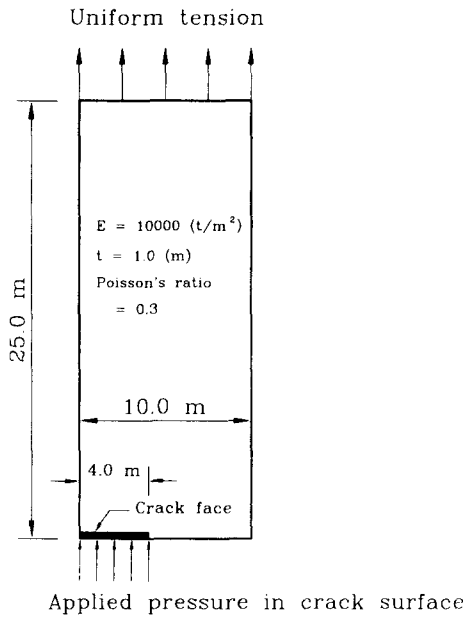


Fig.5 Centre Cracked Plate

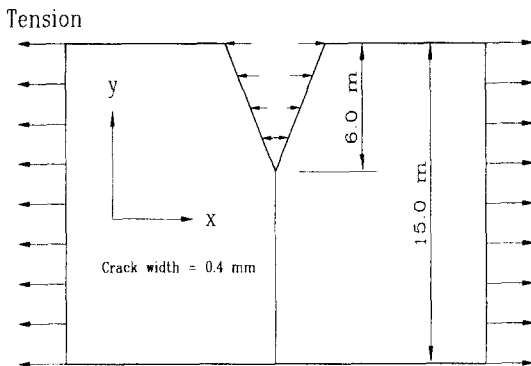


Fig.6 Symmetric tension plate with crack

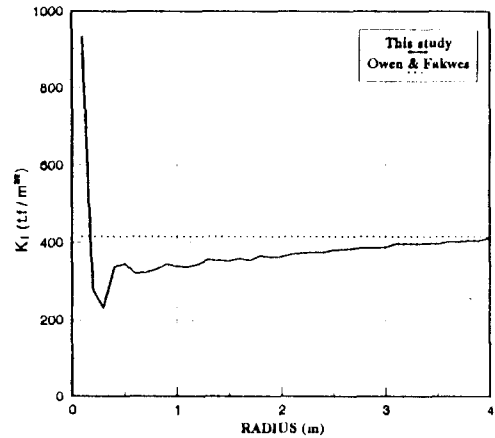


Fig.7 Comparison with solution.

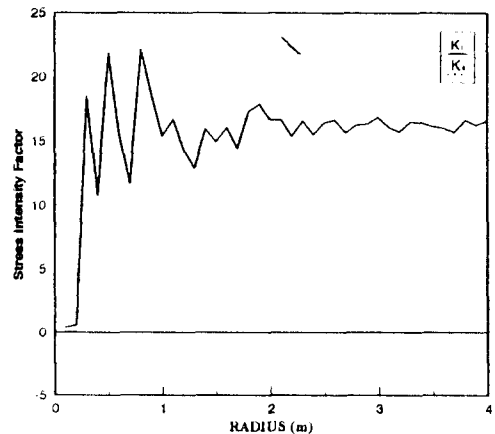


Fig.8 Stress Intensity Factors.

으로 변위상관법의 해석결과인 416.59와 잘 일치함을 알 수 있었으며 그림 7에 나타내었다. 셋째, 균열전단모드 K_{II} 의 타당성을 이론적으로 검증하기 위해 그림 6과 같은 대칭 인장판을 전체하중에 대하여 해석 하였다 외력은 판의 양단에서 인장력이 동일한 힘으로 작용하고 균열축이 y축과 일치하고 있으며 물체력의 방향도 균열축과 일치하므로 전단에 의한 균열모드는 거의 0의 값을 가져야 한다는 것을 알 수 있으며 계산결과 그림 8에서 보는 바와 같이 K_{II} 는 역시 0의 값을 보이고 있었으며, K_I 은 16.3으로 나타났다. 이상의 결과들을 고려해 볼 때 본 이론은 타당성이 있음을 알 수 있었다.

4.2 댐 구조물에의 적용

본 이론의 실용성을 위해 실제 댐구조물에 적용하여 검토하여 보았다. 댐 구조물은 부산시 금정구 회동동 소재의 회동댐을 선정하였는데 원래는 월류식 댐이지만 상부단면을 수위 조절식 댐으로 수정하였다. 단면의 크기는 그림 9와 같으며 유한요소망은 그림 10,11과 같다. 만수위 30.215m에서 최저수위 3.3176m까지를 각 수위별과 2가지 유한요소망에 대해서 균열전단부의 K_I , K_{II} 를 구하였다. 각 수위별에 따른 결과를 2가지 유한요소망에

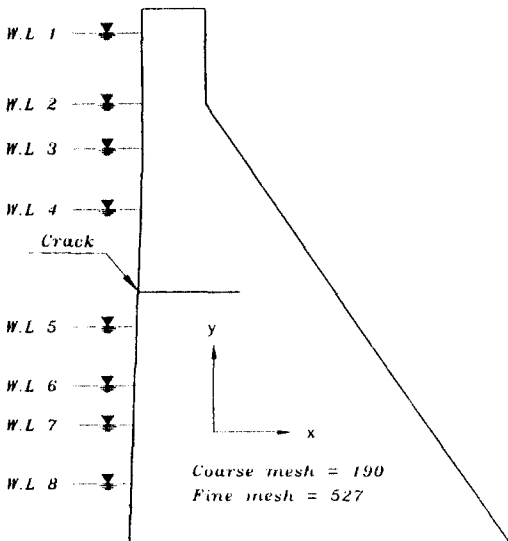


Fig.9 Dam structures with crack(crack length : 3.4m)

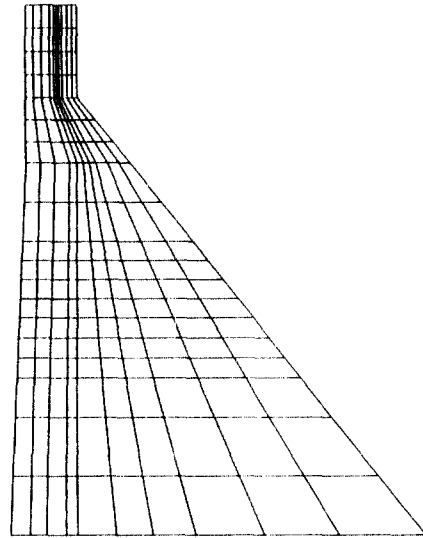


Fig.10 Finite element mesh diagram(190)

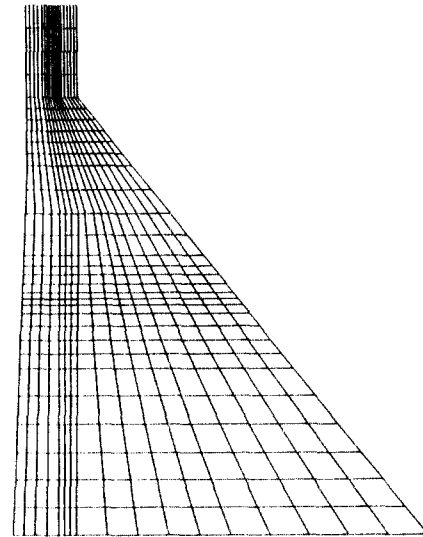


Fig.11 Finite element mesh diagram(527)

Table 2 Stress Intensity Factor to water level

(단위 : $t.f/m^{3/2}$)

Water Level (No.)	Coarse Mesh(Nel. 190)		Fine Mesh(Nel. 527)		Water Level(m)
	K_I	K_{II}	K_I	K_{II}	
1	-9.91581	12.86959	-13.72944	13.67676	30.215
2	-89.17670	10.90287	-87.45731	10.92811	26.06
3	-117.78619	8.63698	-118.4049	8.36664	23.42
4	-152.01258	5.54608	-151.01487	4.56423	19.8157, 19.1389
5	-182.42340	5.09935	-176.41171	4.27777	12.925, 12.4412
6	-182.48791	5.41720	-171.86403	4.77919	9.4, 9.9529
7	-182.63740	5.35131	-176.36777	4.69189	7.05, 6.6353
8	-192.18974	5.27897	-176.45013	4.62866	3.525, 3.3176

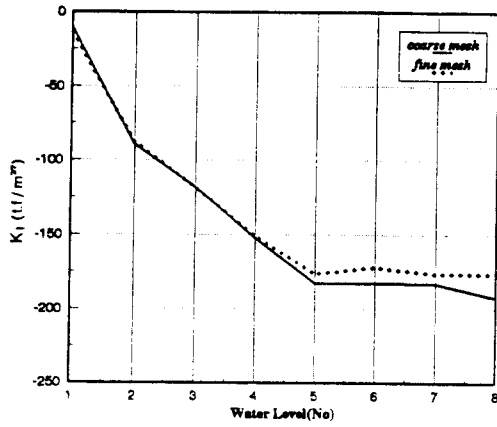


Fig.12 K_I to the water level

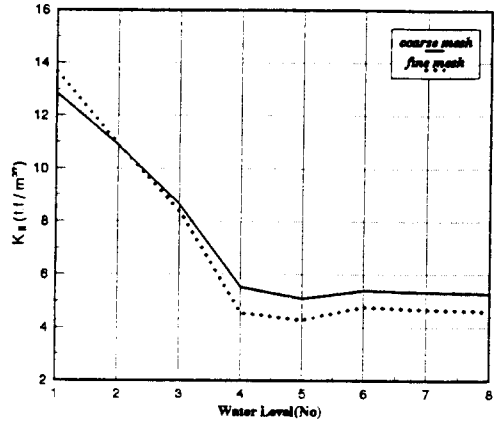


Fig.13 K_{II} to the water level

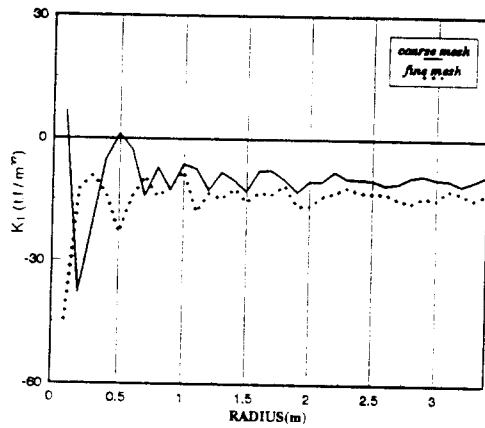


Fig.14 Convergence of K_I (W.L 1)

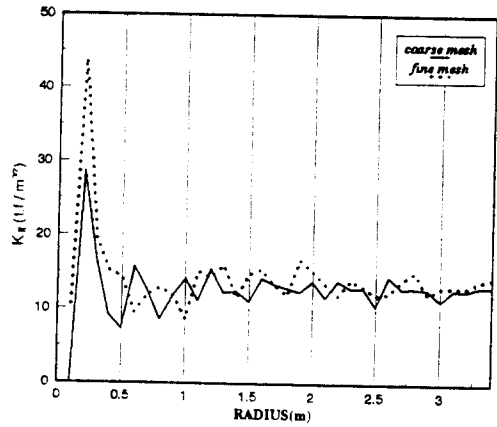


Fig.15 Convergence of K_{II} (W.L 1)

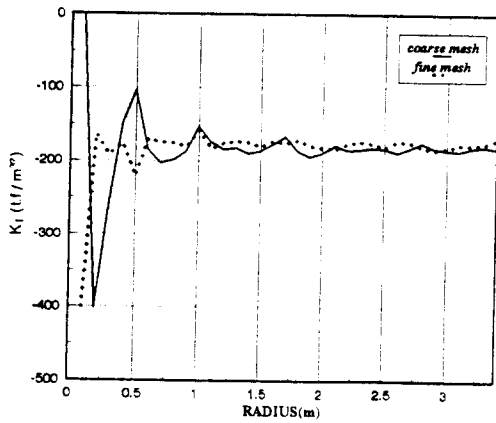


Fig.16 Convergence of K_I (W.L 5)

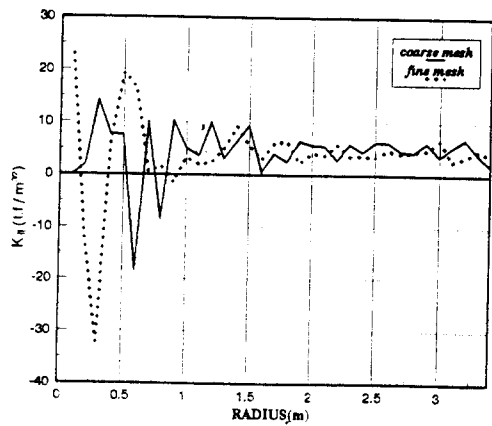


Fig.17 Convergence of K_{II} (W.L 5)

대하여 표 2와 그림 12, 13에 나타내었으며 이들 계산결과들은 수렴구간인 $1/3 Re_{max} \sim Re_{max}$ 값들을 산술평균한 값들이다. 각 수위의 변화에 따른 현상을 설명하면 다음과 같다. 먼저 K_1 의 값은 수위가 내려감에 따라 댐 벽체에 작용하는 외력(수압)이 점점 감소하므로 자중의 효과가 상대적으로 크게 작용하여 값이 점점 작아지게 된다. 여기서 부(-)의 부호를 갖는다는 것은 물리적으로는 별 의미가 없으며 열림모드에 대하여 반대의 힘이 작용한다는 의미로 볼 수 있겠다. 또한 K_1 의 값은 그 추이를 정확히 설명하기는 힘들지만 일반적으로 볼 때 균열면을 기점으로 상부구조와 하부구조로 나눌 수가 있으며 모드 II의 정(+)의 부호가 되는 경우는 상부가 우측으로 밀리고 하부가

좌측으로 밀려 전단될 때인데 수위가 하강함에 따라 균열면의 상부구조는 우측으로 밀리는 힘이 약해지므로 당연히 그 값이 감소하게 됨을 알 수 있고 결과도 그렇게 나타나고 있었다. 그리고 균열의 위치는 수위 번호 4와 5사이이며 수위가 균열 발생 지점보다 더 하강하면 응력확대계수에는 별 변화를 주지 않는 것으로 나타났다.

다음으로 요소망의 크기에 따른 해석결과를 해의 수렴속도에 대하여 검토하여 보았다. 요소망의 세분화에 따른 표면적분법의 직분반경에 대한 수렴속도는 그림 14~17에서와 보는 바와같이 요소망이 가늘수록 수렴이 빠른 것을 알 수 있었다. 그림은 지면 관계상 8개의 수위 중 수위번호 1번(만수위), 5번(균열직후 수위)에 대한 것만을 K_1 과

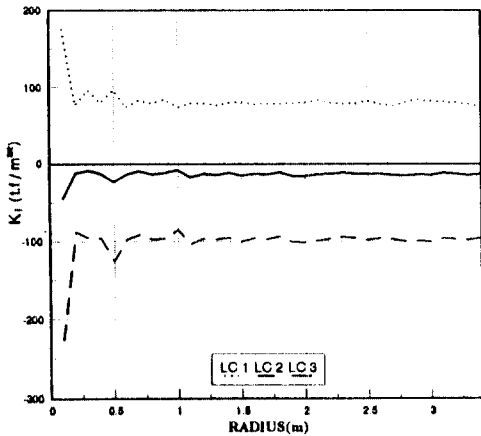


Fig.18 K_1 to combination of loads(W.L 1)

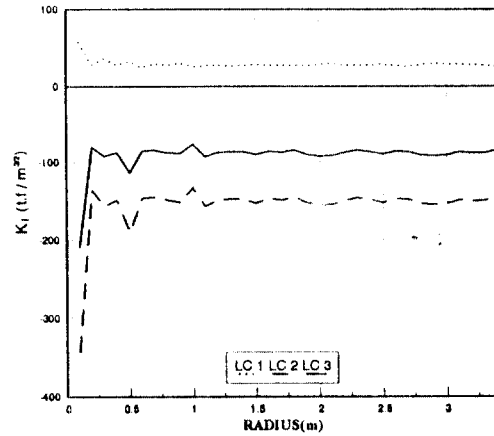


Fig.19 K_1 to combination of loads(W.L 2)

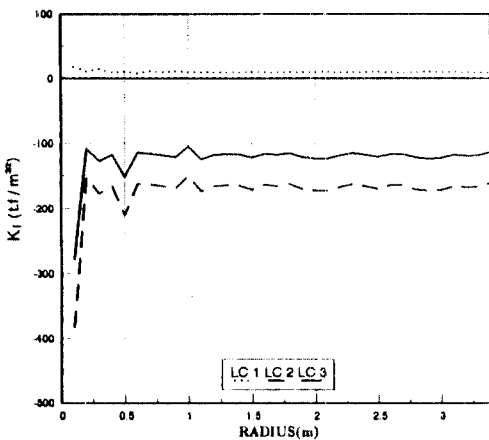


Fig.20 K_1 to combination of loads(W.L 3)

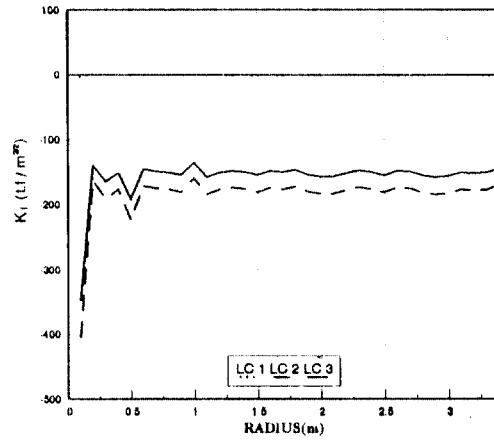


Fig.21 K_1 to combination of loads(W.L 4)

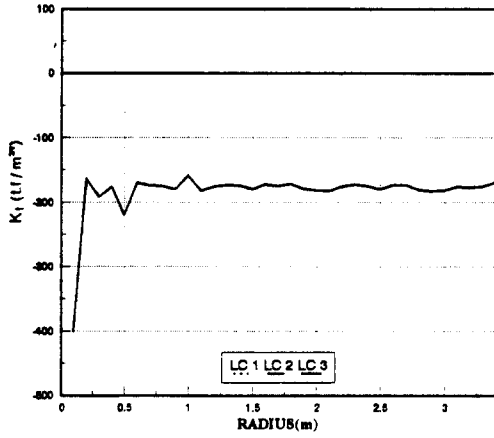


Fig.22 K_I to combination of loads(W.L 5)

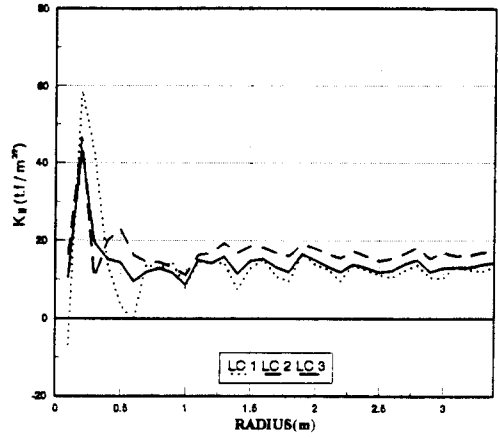


Fig.23 K_{II} to combination of loads(W.L 1)

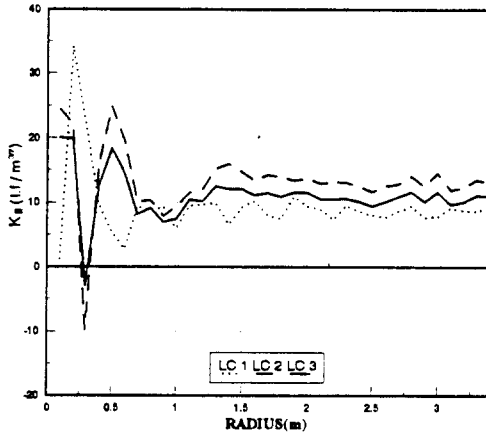


Fig.24 K_{II} to combination of loads(W.L 2)

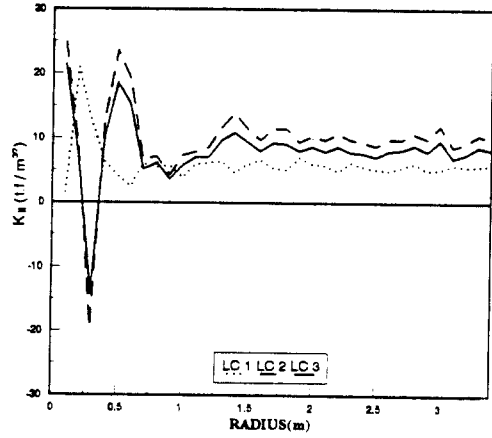


Fig.25 K_{II} to combination of loads(W.L 3)

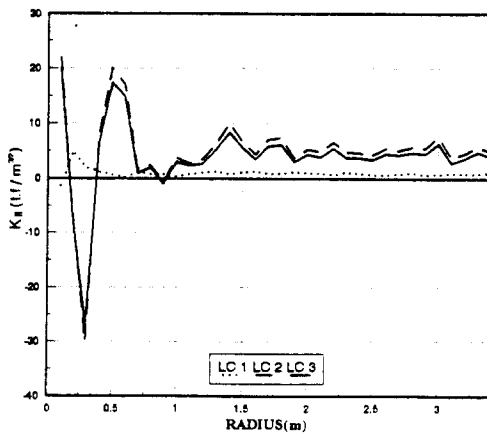


Fig.26 K_{II} to combination of loads(W.L 4)

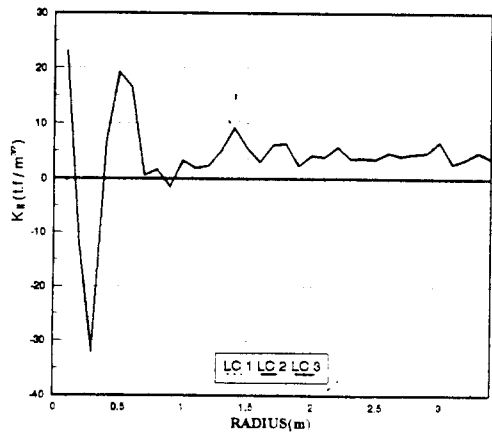


Fig.27 K_{II} to combination of loads(W.L 5)

K_{II} 에 대하여 각각 표시 하였다.

다음에는 균열면에 작용하는 압력이 균열선단의 응력확대계수에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해 다음 각 하중상태에 대한 응력확대계수를 수위번호 1~5에서 평가하였다. 즉 LC1, LC2, LC3로써 하중조건을 표시하였는데 LC1은 벽체에 작용하는 외력만 고려하였을 때이고, LC2는 벽체에 작용하는 외력과 댐의 물체력(자중)을 동시에 고려하였을 때, 그리고 LC3는 벽체에 작용하는 외력과 댐의 물체력 그리고 균열면에 작용하는 압력을 모두 고려하였을 때이다. 균열면에 압력이 작용할 수 있는 수위(W.L 1~W.L 4)와 균열면 이하의 수위(W.L 5)를 2가지 요소망에 대하여 해석하였고 요소망의 크기에 따른 차이가 거의 없었으므로 조밀한 요소망(요소수 : 527개)에 대해서 그 결과를 그림 18~27에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 하중조건 LC2에 비하여 하중조건 LC3인 경우에 K_I 이 크게 증가하였으나 K_{II} 는 거의 변화하지 않았으며 균열면 이하의 수위에 대한 결과는 균열면에 압력이 작용하지 않으므로 당연히 LC2와 LC3이 동일하게 나타나고 있다. 이상으로 중력댐에 수평균열이 발생하여 균열면에 압력이 작용하게 되면 K_I 이 증가하여 균열의 진전에 많은 영향을 미치게 되는 것을 알았고 결국 매시브한 콘크리트 댐에서는 균열면에 수압이 작용하는 경우를 고려 하여야만 정확한 K_I 값을 평가할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 선형탄성구조물의 응력확대계수를 표면적분법에 의하여 수치적으로 계산하기 위하여, 표면적분법의 이론을 전개하고 이에 따른 수치연산을 행할 수 있는 프로그램을 작성하였다. 이 프로그램에서는 균열선단부근에서 특이요소 아닌 통상의 8 절점 등대개변수요소를 이용하고 유한요소해석을 한 후, 절점번호, 절점좌표 및 유한요소해석에서 얻어진 절점변위만을 입력자료로 사용하면, 임의로 주어진 적분반경에 대하여 응력확대계수가 직접적으로 계산되도록 하였다. 또한

일반 선적분 기법으로는 고려할 수 없는 물체력의 영향과 균열면에 압력이 작용하는 경우도 포함될 수 있도록 하였다. 본 연구에서 작성된 프로그램을 수치예제에 적용해 봄으로써 얻어진 결과는 다음과 같다.

내측적분반경은 0 으로 두고 외측적분반경을 $1/3 Re_{max} \sim Re_{max}$ 로 취하였을 때 이론해나 다른 수치해에 매우 가까운 응력확대계수를 얻을 수 있었다.

요소망의 크기에 따른 응력확대계수의 값을 볼 때 그 차이가 별로 크지 않음을 알 수 있었다. 단지 세밀한 요소분할이 수렴속도를 조금 빠르게 할 뿐이지 응력확대계수의 값 자체에는 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

댐 벽체에 수평균열이 발생하여 균열면에 압력(수압)이 작용하였을 때에는 벽체에 작용하는 외력과 물체력만을 고려하였을 경우보다 K_I 의 값이 증가하여 균열의 진전에 많은 영향을 미치게 되는 것을 알았고 결국 매시브한 콘크리트 댐에서는 균열면에 수압이 작용하는 경우를 고려 하여야만 정확한 K_I 값을 평가할 수 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과에서, 표면적분법의 이론을 근거로 하여 본 연구에서 작성한 프로그램을 이용하면 다른 기법에 비하여 직접적이고 합리적으로 응력확대계수를 쉽게 결정할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 이를 토대로 하여 균열의 진행방향과 길이를 검토하면, 균열전파의 추적 및 파괴예측이 가능할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 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, 1984, pp.1085-1109.
2. 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, 1984, pp. 1111-1129.
3. 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, 1987, pp.1-148.
 4. Olver, F.W.J., "Asymptotic Methods", Handbook of Applied Mathematics (Pearson, C.E. Ed.), Van Nostrand Reinhold Co. 1974, pp.645-710.
 5. 진치섭, 장희석, "균열선단 응력확대계수 결정을 위한 후처리기법", 대한토목학회 논문집, 제11권, 1호 1991년, 3월 pp.17-27.
 6. Owen, D.R.J. and Fawkes, A.J., "Engineering Fracture Mechanics", Pineridge Press Ltd. 1983.
 7. 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, 1968, pp.379-386.
 8. Kaplan, M.F., "Crack Propagation and the Fracture of Concrete", Journal of American Concrete Institute, Vol. 58, No. 5, 1961, pp. 591-609.
 9. Saouma, V.E., Ingraffea, A.R. and Catalano, D.M., "Fracture Toughness of Concrete : K_{IC} Revisited", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, vol. 108, 1982, pp.1152-1166.
 10. Hillerborg, A., "Numerical methods to simulate softening and fracture of concrete", Fracture mechanics of concrete, Sih, G.C. and DiTommaso, A. Ed., Martinus Nijhoff Publishers, 1985, pp.141-170.
 11. 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, 1985, pp.1-94.
 12. Atluri, S.N., "Path-Independent Integrals in Finite Elasticity and Inelasticity, with Body Forces, Inertia and Arbitrary Crack-Face Conditions", Engineering Fracture Mechanics, Vol.16, No.3, pp.341-364, 1982.
 13. Kishimoto, K., Aoki, S. and Sakata, M., "On the Path Independent Integral-J", Engineering Fracture Mechanics, Vol.13, pp.841-850, 1980.
 14. 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄, "數値破壊力學", 實教出版社, pp.1-7, 48-66, 1980.
 15. 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-An International Journal, Vol.3, No.3, accepted for publication, 1995
(접수일자 : 1995. 3. 29)