

경계요소법에 의한 콘크리트 원통형관의 파괴해석

Fracture Analysis of Concrete Cylinder by Boundary Element Method

송 하원* 전 재홍** 변 근주***
Song, Ha-Won Jun, Jae-Hong Byun, Keun-Joo

Abstract

Fracture mechanics does work for concrete, provided that one uses a proper, nonlinear form of fracture mechanics in which a finite nonlinear zone at fracture front is being considered. The fracture process zone is a region ahead of a traction-free crack, and the development of model of fracture process zone is most important to describe fracture phenomena in concrete. This paper is about fracture behavior of concrete cylinder under lateral pressure. Concrete cylinders were made of high strength normal concrete, steel fiber reinforced concrete and steel fiber reinforced polymer-impregnated concrete and the fracture behavior such as cracking propagation and ultimate load are observed. The fracture process zone is modelled by a Dugdale-Barenblatt type model with linear tension-softening curve and are implemented to the boundary element technique for the fracture analyses of the cylinders. The experimental results are compared with analysis results and tension-softening curves for the steel fiber reinforced concrete and steel fiber reinforced polymer-impregnated concrete are obtained by back analyses.

1. 서론

물질의 운송등에 사용되는 콘크리트 원통형관은 매장압축력에 견딜 수 있는 적합한 강도와 두께가 필요하다. 경우에 따라서 원자력 중·저준위 방사성 폐기물용기의 제작에서와 같이 콘크리트관의 제작에 고강도의 콘크리트를 사용하는 경우가 있다. 본 연구는 고강도의 보통콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머침투콘크리트 원통형관이 매장압축력과 같은 횡방향 상태에서 정적하중을 받고 있을때 원통형관의 균열 및 극한강도등의 파괴거동에 관한 연구이다. 콘크리트에 대해 파괴역학을 적용하여 복잡한 파괴현상을 하려는 연구가 활발히 행해지고 있다. 콘크리트에서 파괴현상을 복잡하게 만드는 한 요인은 균열선단에서의 미시적 현상과 균열진행영역(fracture process zone)의 존재이다. 따라서 콘크리트의 파괴현상을 해석적으로 예측하기 위해서는 이 균열진행영역의 역학모델로 나타내는 것이 필요하다. 본 논문은 Dugdale-Barenblatt형 모델에 의해 모델화된 균열진행영역을 2차원 경계요소 모델링하였으며 원통형관의 파괴해석을 실시하였다. 수치해석결과와 실험결과를 비교하였으며 역해석에 의하여 강섬유보강 콘크리트와 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 한계균열개구변위를 추정하였다.

2. 콘크리트 원통형관의 제작

2.1 콘크리트의 제조

본 연구에서는 고강도 보통콘크리트(NC)를 제조하는데 있어서 고강도 배합설계, 즉 물-시멘트비 25%, 고유동화제 0.75%, 실리카흄은 시멘트량의 12%로 각각 배합설계하였으며 기존의 보통 콘크리트의 단점인 취성 파괴를 연성으로 유도하기 위한 강섬유보강 콘크리트(SFRC)에 대해서는 강섬유 3%를 추가하여 배합설계하였다.(표 1)

표 1 배합설계표(NC, SFRC*)

용 적	시멘트 (kg)	실리카흄 (kg)	물 (kg)	굵은골재 (kg)	잔골재 (kg)	유동화제 (kg)	강섬유* (kg)
m ³	550	66	154	1083	650	21	73.5

강섬유보강 폴리머침투콘크리트(SFPIC)의 배합설계는 표 1로 작성된 배합표를 토대로 강섬유보강 콘크리트를 제작한 후 28일동안 양생을 실시, 일정시간동안 건조시킨 다음에 폴리머합침을 하여, 일정시간 온도로 열을 가하는 폴리머 입자를 고형화 시키는 과정인 중합을 통하여 제작할 수 있다.¹⁾ 이때 고분자 화합물인 폴리머는 콘크리트의 미세공극에 침투하여 강도를 증진시키는 역할을 한다. 표 2는 폴리머의 구성 및 혼합비율을 나타낸다.

* 연세대학교 토목공학과 조교수
** 연세대학교 토목공학과 석사과정
*** 연세대학교 토목공학과 교수

표 2 폴리머의 구성

구분	구성재료	혼합비율
단량체	MMA (Methyl Methacrylate)	일정량
개시제	AIBN (Azobisisobutyronitrile)	MMA의 2%
촉진제	DMA (Dimethyl Aniline)	MMA의 1%

2.2 원통형관의 제작

원통형관은 길이 360mm, 직경 290mm, 두께 30mm의 제원으로 위의 배합을 토대로, 고강도 보통콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머침투콘크리트를 제작하였다. 탄성계수, 포아송비, 일축압축 파괴강도를 얻기 위하여 본연구는 보통 콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머침투콘크리트 $\phi 10 \times 20$ cm의 시편을 각각 제작하여 각 하중단계에 따른 응력변화와 변형률을 측정하였다. 표 3은 실험에서 얻어진 고강도 보통콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 재료별 물성치이다.

표 3 콘크리트별 물성치

	NC	SFRC	SFPIC
E (kg/cm^2)	285933	401036	607697
ν	0.17	0.17	0.23
σ_{ck} (kg/cm^2)	814	967	1209

3. 원통형관의 정적하중실험

원통형관의 실험장치는 한국산업규격의 KS F 4404,²⁾ 즉 무근콘크리트관과 철근콘크리트관의 시험조건을 따라 사진 1과 같이 원통형관의 밑판과 윗면에 고무패드를 놓고 윗면의 하중재하판은 고무패드위에 강재판을 사용하여 설치하였다. 제작한 고강도 보통콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머침투콘크리트 원통형관을 그림 1과 같이 횡방향으로 위치시킨 후 횡방향 정적분포하중을 주었다. 측정을 위해 정적하중을 주는 중앙지점의 원통안쪽(1번)과 옆면의 안쪽(2번) 바깥쪽(3번), 각각 3지점에 스트레인 게이지를 부착하였다.

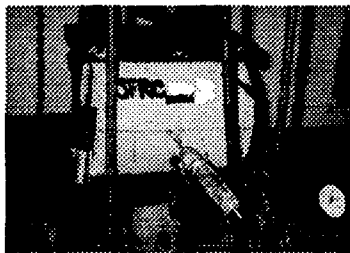


사진 1 원형관의 횡하중 실험

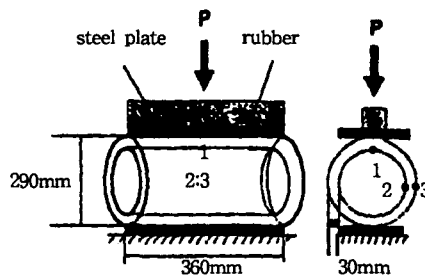


그림 1 원통형관의 게이지 부착위치

그림 2는 고강도 보통콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머 침투콘크리트의 원통형관의 1,2,3번 측정점에서의 하중-변형률곡선의 실험결과를 나타낸 것이다. 극한하중은 보통 콘크리트 원통형관은 1240kg이었고, 강섬유보강 콘크리트 원통형관은 1370kg, 강섬유보강 폴리머침투콘크리트 원통형관은 1520kg이었다. 원통형관은 하중증가에 따라 재료에 관계없이 윗면 안쪽, 아랫면 안쪽, 옆면 바깥쪽에 동시에 길다란 수평균열이 발생되어 파괴되었다. 즉, 윗면 안쪽과 옆면 바깥쪽에 인장력이 발생되어 파괴되었음을 알 수 있다. 사진 2,3은 각각 횡하중에 파괴된 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 원통형관을 보여준다.

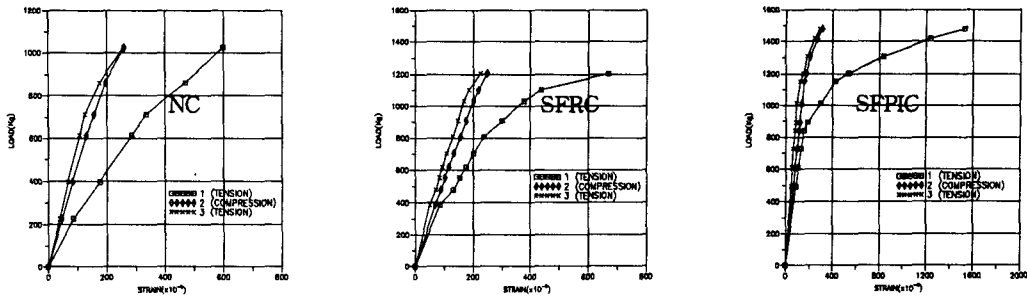


그림 2 콘크리트 원통형관의 하중-변형률 관계 곡선



사진 2 파괴된 SFRC 원통형관

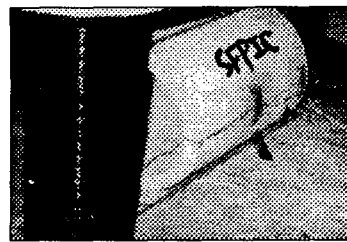
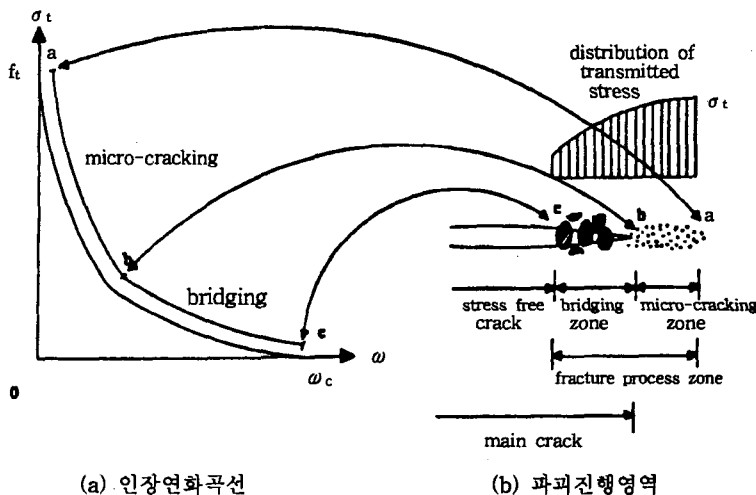


사진 3 파괴된 SFPIC 원통형관

4. 비선형 파괴해석

압축강도의 10% 정도로 낮은 콘크리트의 인장강도로 인하여 소홀히 되었던 콘크리트의 인장거동은 파괴 역학의 도입으로 콘크리트 구조물의 진행성균열에 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 원통형관에 대한 실험결과 뒷면 안쪽과 옆면 바깥쪽에 인장력에 의해 동시에 발생한 균열은 진행되어 관의 파괴에까지 이르렀으며 이때 파괴거동과 극한하중등을 예측하기 위해서는 진행성균열에 대한 이해가 필요하다. 작용하중에 대하여 콘크리트에는 미시적 균열의 분포에 의한 변형률연화, 중극파괴에 미치기 이전의 균열의 국소화, 그리고, 균열선단의 거시 균열면에서의 응력의 전달 현상이 일어나며 특히 균열선단에 발생하는 비선형 균열진행영역은 콘크리트의 파괴거동을 지배한다.

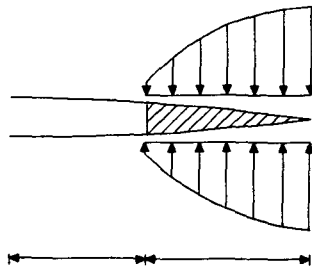


(a) 인장연화곡선

(b) 파괴진행영역

그림 3 인장연화곡선과 파괴진행영역

콘크리트의 파괴를 지배하는 미커니즘을 규명하는 것은 콘크리트의 균열진행해석을 위한 모델과 수치해석 프로그램을 개발하는데 필수적이다. 콘크리트의 인장파괴현상을 이해하기위해 인장파괴 단면에서 균열면의 변위를 제어하는 방법에 의해 일축인장시험을 실시하면 균열면에서 인장응력이 인장강도에 도달한 후에도 균열면에서 응력이 전달된다. 콘크리트의 전달응력(transmitted stress : σ_t)이 인장강도(f_t)에 도달한 후 균열 개구변위(crack opening displacement : w)의 증가에 따른 균열면에서의 전달응력은 감소되는 인장연화(tension-softening)현상이 발생하며 균열면 전달응력과 탄성변형을 제외한 균열개구변위와의 관계를 나타내는 곡선을 인장연화곡선(tension-softening curve : 그림 3)이라 하며 콘크리트의 파괴에 관한 특성을 나타낸다. 콘크리트에 균열발생시 균열선단에서의 파괴진행영역은 인장연화상태에 있으며 콘크리트의 파괴거동을 지배한다. 즉 파괴진행영역의 각 점들(그림 3의 a, b, c점)은 인장연화곡선상의 점들과 대응된다. 이러한 인장연화상태에 있는 파괴진행영역은 그림 3에서 보는 바와 같이 미세균열의 발생과 성장이 지배적인 microcracking영역과 골재 경계면의 상호작용 마찰등에 의해 거시적으로 균열면에서 응력전달이 이루어 지는 bridging영역으로 나누어진다. 본 논문에서는 균열진행영역을 그림 4에서 보는 것처럼 Dugdale-Barenblatt형 모델을 사용하여 모형화 하였으며 이 균열진행영역의 인장연화 상태를 그림 5에서 처럼 선형으로 가정하였.



stress free crack fracture process zone
그림 4 Dugdale-Barenblatt형 모델

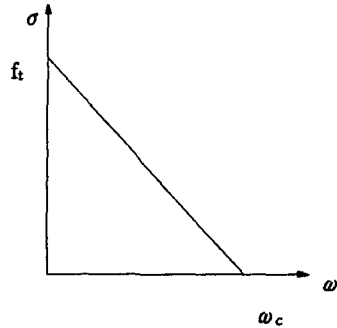


그림 5 선형 인장연화곡선

5. 경계요소해석

경계적분방정식(Boundary Integral Equation Method: BIEM) 혹은 경계요소법(Boundary Element Method: BEM)은 1980년 이래 여러분야에서 활발히 사용되고 있다. 유한요소법을 균열문제에 적용할 경우 균열선단에서의 응력 특이성에 의해 균열의 진전과 함께 보통 기존의 요소틀 재분할하는 번거로움이 발생한다.⁴⁾ 경계요소법은 경계에서의 미지수에 관한 적분방정식에 기본하여 대상문제를 1차원 낮게 다룰수가 있어 변수 및 입력 데이터수가 대폭 감소된다.⁵⁾ 또한 균열문제와 같은 경계의 기하형상이 변화하는 문제에 대해 상대적으로 유리하다.⁶⁾ 본 논문에서는 경계요소법의 균열문제에 대한 정식화와 이산화를 통해 얻어진 수치해석 프로그램을 이용 콘크리트 원통형관의 파괴진행을 해석하였다.

5.1 경계요소법에 의한 균열문제의 정식화

체적력이 작용하지 않는 선형 탄성체의 경계치 문제의 지배방정식(Navier equation)은 식(1)과 같다.

$$\mu [u_{i,jj} + \frac{1}{1-2\nu} u_{i,jj}] = 0, \quad u_i = f_i \text{ on } S_1, \quad t_i (= \sigma_{ij} n_j) = g_i \text{ on } S_2 \text{ -----(1)}$$

이 식에 Green공식을 사용하면 Navier식은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_V [v_i \sigma_{ij,j}^* - u_i \sigma_{ij,j}^*] dv = \int_S [v_i t_i^* - u_i t_i^*] ds \text{ -----(2)}$$

여기서 t_i^* 와 $\sigma_{ij,j}^*$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$t_i^* = \mu [u_{i,j} n_j + u_{j,i} n_j + \frac{2\nu}{1-2\nu} u_{j,i} n_j], \quad \sigma_{ij,j}^* = \mu [u_{i,jj} + \frac{1}{1-2\nu} u_{i,jj}] \text{ -----(3)}$$

Navier식에 대한 기본해 $G(x, \bar{x})_i^{(k)}$ 은 다음식을 만족하도록

$$\mu [G(x, \bar{x})_{i,jj}^{(k)} + \frac{1}{1-2\nu} G(x, \bar{x})_{i,jj}^{(k)}] = -\delta(x - \bar{x}) \delta_{ik} \text{ -----(4)}$$

식(2)에 $v_i = G_i^{(l)}$ 을 U_{ij} 를 대입하면 다음의 Somigliana 항등식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} u_i(\bar{x}) &= \int_S U_{ij}(x, \bar{x}) t_j(x) dS(x) - \int_S T_{ij}(x, \bar{x}) u_j(x) ds(x) \\ &= \int_{S_1} U_{ij} t_j dS - \int_{S_1} T_{ij} f_j dS + \int_{S_2} U_{ij} g_j dS - \int_{S_2} T_{ij} u_j dS \text{ -----(5)} \end{aligned}$$

식(5)는 경계에서의 변위와 트랙션에 의한 내부점(\bar{x})의 변위를 표시하며 내부점이 경계점(x_0)에 도달하게

함으로써 경계에서 미지의 변위와 트랙션에 관한 경계 적분식을 얻는다. 즉 식(5)의 한계설정에 의하여 다음 (6)을 유도할 수 있고, 다음 식(6)은 경계에서의 조건을 만족시켜준다.

$$\frac{1}{2} u_i(x_0) = \int_S U_{ij}(x, x_0) t_j(x) dS(x) - p.v. \int_S T_{ij}(x, x_0) u_j(x) dS(x). \quad (6)$$

여기서 $p.v. \int$ 는 Cauchy의 주된값을 나타내며 $U_{ij}(x, x_0)$, $T_{ij}(x, x_0)$ 는 다음과 같다.

$$U_{ij}(x, x_0) = \frac{1}{8\pi\mu(1-\nu)} [-(3-4\nu) \log |\eta| \delta_{ij} + l_j l_i] \quad (7)_a$$

$$T_{ij}(x, x_0) = -\frac{1}{4\pi(1-\nu)} [-(1-2\nu)(l_j m_i - l_i m_j) \frac{1}{\eta}] \quad (7)_b$$

식(6)을 이용하면 경계치 문제는 경계 (S_2)에서의 미지함수 $u_i(x_0)$ 와 (S_1)에서의 $\sigma_j(x_0)$ 에 대한 변위경계 적분식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} f_i(x_0) &= \int_{S_1} U_{ij}(x, x_0) t_j(x) dS - p.v. \int_{S_1} T_{ij}(x, x_0) f_j(x) dS \\ &+ \int_{S_2} U_{ij}(x, x_0) g_j(x) dS - p.v. \int_{S_2} T_{ij}(x, x_0) u_j(x) dS, \quad x_0 \in S_1. \end{aligned} \quad (8)_a$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} u_i(x_0) &= \int_{S_1} U_{ij}(x, x_0) t_j(x) dS - p.v. \int_{S_1} T_{ij}(x, x_0) f_j(x) dS \\ &+ \int_{S_2} U_{ij}(x, x_0) g_j(x) dS - p.v. \int_{S_2} T_{ij}(x, x_0) u_j(x) dS, \quad x_0 \in S_2. \end{aligned} \quad (8)_b$$

식(8)을 풀면 경계에서의 미지함수를 구할 수 있고 다시 식(5)에 의해 내부점의 변위를 얻을 수 있다. 한편 내부점의 변위를 \bar{x} 에 대해 미분하고 이를 응력-변위의 관계식에 대입하면 내부점의 응력은 다음식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_{ij}(\bar{x}) = \int_S D_{kij}(x, \bar{x}) t_k(x) dS - \int_S S_{kij}(x, \bar{x}) u_k(x) dS. \quad (9)$$

여기서,

$$D_{kij}(x, \bar{x}) = \frac{1}{4\pi(1-\nu)r} [(1-2\nu)(\delta_{kr} r_j + \delta_{kr} r_i - \delta_{ij} r_k) + 2r_j r_i r_k] \quad (10)_a$$

$$\begin{aligned} S_{kij}(x, \bar{x}) &= \frac{2\mu}{4\pi r^2(1-\nu)} [2 \frac{\partial r}{\partial n} [(1-2\nu) \delta_{ij} r_k + \nu(\delta_{ik} r_j + \delta_{jk} r_i) - 4r_j r_i r_k] \\ &+ 2\nu(n_j r_i r_k + n_i r_j r_k) + (1-2\nu)(2n_k r_j r_i + n_j \delta_{ik} + n_i \delta_{jk}) - (1-4\nu)n_k \delta_{ij}] \end{aligned} \quad (10)_b$$

트랙션의 경계 적분식을 유도하기 위하여 변위 경계 적분식의 유도와 마찬가지로 내부점 (\bar{x})를 경계점 (x_0)에 접근시키는 것에 의하여 $D_{kij}(x, \bar{x})$ 와 $S_{kij}(x, \bar{x})$ 의 한계치 $D_{kij}(x, x_0)$, $S_{kij}(x, x_0)$ 를 구할 수 있다. 따라서 내부점 \bar{x} 에서의 응력식(9)에 대해 내부점을 경계상의 점 x_0 에 접근시키는 것에 의해 트랙션에 대한 다음의 경계적분식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} \sigma_{ij}(x_0) = p.v. \int_S D_{kij}(x, x_0) t_k(x) dS - Pf \int_S S_{kij}(x, x_0) u_k(x) dS. \quad (11)$$

여기서 $Pf \int$ 는 Cauchy적분의 유한부분을 나타낸다.

식(11)에 의하여 얻어지는 경계상의 트랙션 경계 적분식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} t_i(x_0) &= p.v. \int_{S_1} D_{kij}(x, x_0) t_k(x) n_j(x_0) dS(x) - Pf \int_{S_1} S_{kij}(x, x_0) f_k(x) n_j(x_0) dS(x) \\ &+ p.v. \int_{S_2} D_{kij}(x, x_0) g_k(x) n_j(x_0) dS(x) - Pf \int_{S_2} S_{kij}(x, x_0) u_k(x) n_j(x_0) dS(x), \quad x_0 \in S_1. \end{aligned} \quad (12)_a$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} g_i(x_0) &= p.v. \int_{S_1} D_{kij}(x, x_0) t_k(x) n_j(x_0) dS(x) - Pf \int_{S_1} S_{kij}(x, x_0) f_k(x) n_j(x_0) dS(x) \\ &+ p.v. \int_{S_2} D_{kij}(x, x_0) g_k(x) n_j(x_0) dS(x) - Pf \int_{S_2} S_{kij}(x, x_0) u_k(x) n_j(x_0) dS(x), \quad x_0 \in S_2. \end{aligned} \quad (12)_b$$

트랙션 경계 적분식(12)과 변위 경계 조건식(8)은 등가이므로 탄성문제를 위해서는 두 식중 어느 하나의 식을 사용하면되나 균열문제는 두식이 모두 필요하다.

5.2 균열문제에서의 경계 적분식

그림 6과같이 균열을 가진 탄성체에서 전체경계는 일반경계 (S)와 균열경계 (Γ)로 나뉜다. 균열 경계(Γ)에는 4개의 벡터 (u^+ , t^+ , u^- , t^-)가 존재한다.(여기서 윗첨자 +, -는 균열경계의 위, 아래를 지칭한다.) 주어진

4개의 경계벡터를 통하여 2개의 선형 독립적인 다음과 같은 식을 정할 수 있다.

$$u_i^+(x) + u_i^-(x) = v_i(x), \quad u_i^+(x) - u_i^-(x) = \omega_i(x). \text{-----(13)}$$

$$t_i^+(x) + t_i^-(x) = p_i(x), \quad t_i^+(x) - t_i^-(x) = q_i(x). \text{-----(14)}$$

예를들어 균열에 응력이 작용하지 않으면 $p_i = q_i = 0$ 이며 압력 p 가 균열표면에 적용될때 $p_i = 0, q_i = -2pn_i$ 가 된다. 트랙션이 윗면에 작용하고 변위가 아랫면에 작용한다면 경계 조건은 다음과 같다.

$$t_i^+(x) = r_i(x), \quad u_i^-(x) = s_i(x). \quad x \text{ on } \Gamma$$

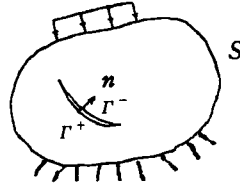


그림 6 균열문제

(13)(14)식 중에서 네개의 조합중 두개의 독립적인 선형 조합이 주어진다면 다른 두개의 선형조합들은 미지의 값이다. 경계점 (x_0) 가 일반경계 S 에 위치할때 균열 경계를 고려한 변위 경계 적분방정식은 다음식과 같다.

$$\frac{1}{2} u_i(x_0) = \int_S U_{ij}(x, x_0) t_j(x) dS - p.v. \int_S T_{ij}(x, x_0) u_j(x) dS + \int_{\Gamma} U_{ij}^+(x, x_0) [t_j^+(x) + t_j^-(x)] dS - \int_{\Gamma} T_{ij}^+(x, x_0) [u_j^+(x) - u_j^-(x)] dS, \quad x_0 \in S. \text{-----(15)}$$

또한 경계점 (x_0) 가 균열경계(Γ)에 위치하는 경우 14(식)의 두개의 독립된 선형조합의 값은 기지의 값이고 다른 두개의 독립된 선형조합의 값은 미지의 값이므로 두개의 미지의 값을 결정하기 위해서 두 방정식이 필요하다. 이때 앞에서 유도한 변위 경계 적분방정식(8)과 트랙션 경계 적분방정식(12) 둘다 사용함으로써 균열 문제의 답을 얻을 수 있다. 즉 경계의 점 (x_0) 이 균열 경계 (Γ)에 위치 하였을때 경계 적분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} [u_i^+(x_0) + u_i^-(x_0)] = \int_S U_{ij}(x, x_0) t_j(x) dS - \int_S T_{ij}(x, x_0) u_j(x) dS + \int_{\Gamma} U_{ij}^+(x, x_0) [t_j^+(x) + t_j^-(x)] dS - p.v. \int_{\Gamma} T_{ij}^+(x, x_0) [u_j^+(x) - u_j^-(x)] dS, \text{-----(16)a}$$

$$\frac{1}{2} [t_i^+(x_0) + t_i^-(x_0)] = \int_S D_{kij}(x, x_0) t_k(x) dS n_j^+(x_0) - \int_S S_{kij}(x, x_0) u_k(x) dS n_j^+(x_0) + p.v. \int_{\Gamma} D_{kij}^+(x, x_0) [t_k^+(x) + t_k^-(x)] dS n_j^+(x_0) - P.f. \int_{\Gamma} S_{kij}^+(x, x_0) [u_k^+(x) - u_k^-(x)] dS n_j^+(x_0). \text{-----(16)b}$$

경계 (S)에서의 식(15)와 균열경계 (Γ)에서의 식(16)은 균열에서의 경계 적분방정식을 형성한다. 즉 주어진 경계 조건을 경계 적분방정식에 대입시키면 경계에서의 미지수를 풀 수 있으며 경계에서의 값들을 이용하여 다음에 내부점의 변위와 응력을 구한다.

6. 파괴해석 결과

그림 7은 원통형관의 대칭성을 고려한 2차원 경계요소 모델을 나타낸다. 본 해석에 있어서 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 1/10으로 가정하였으며, 한계균열개구변위(ω_c)는 보통콘크리트에서의 값인 0.0025cm를 사용하였으며 원통형관은 실험에서 지점의 동시성을 고려하여 하중이 작용하는 지점의 인장부가 파괴에 도달한다고 가정하였다. 해석결과 원통형관의 파괴진행에 따른 작용하중 관계곡선을 얻었으며 파괴하중을 관의 길이에 대한 단위 응력으로 환산한 보통콘크리트의 극한응력은 35.27kg/cm²이었다 그림 8은 보통콘크리트 원통형관의 해석결과와 실험결과(34.44kg/cm²)의 비교이다.

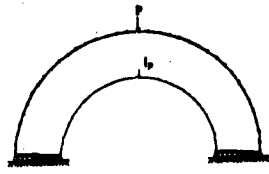


그림 7 원통형관의 2차원 경계요소 modeling

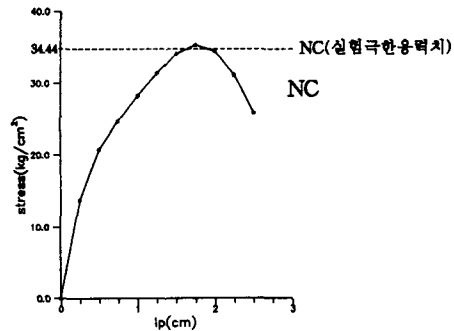


그림 8 해석결과와 실험결과와의 비교($\omega_c=0.0025\text{cm}$)

강섬유보강 콘크리트(SFRC)와 강섬유보강 폴리머침투콘크리트(SFPIC)의 한계균열개구변위(ω_c)에 대한 역해석을 실시하였다. 역해석의 결과와 실험결과와의 비교(그림 9)로부터 강섬유보강 콘크리트(SFRC)의 최적의 한계균열개구변위는 0.0018cm이고 강섬유보강 폴리머침투콘크리트(SFPIC)의 경우 0.0014cm를 얻었다. 역해석 결과 구해진 인장 변화곡선은 그림 10과 같다.

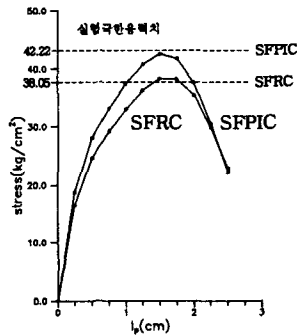


그림 9 역해석결과와 실험치의 비교

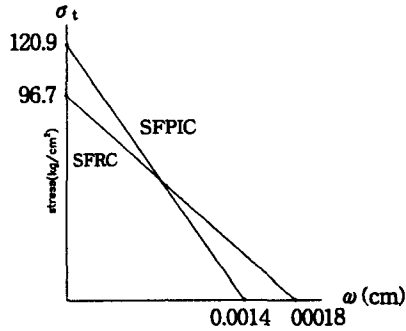


그림 10 도출된 인장 변화곡선

7. 결론

본 논문은 고강도 보통콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머콘크리트 원통형관의 횡방향 하중에서의 파괴거동에 관한 연구이다. 각각의 콘크리트에 대해 원통형관을 제작하여 균열과 극한하중을 포함한 파괴거동을 관찰하였으며 균열진행영역의 모델링에 의한 경계요소법에 의한 해석을 실시하였다. 실험결과와 해석결과와의 비교로부터, 고강도 보통콘크리트에 대하여 구한 결과는 실험값과 잘 일치함을 알았으며 강섬유보강 콘크리트와 강섬유보강 폴리머침투콘크리트에 대해서는 동일한 해석기법을 사용한 역해석을 통하여 인장변화 곡선을 얻을 수 있었다. 구해진 인장 변화곡선은 강섬유보강 콘크리트, 강섬유보강 폴리머침투 콘크리트 구조물에 대한 파괴해석에 사용되어질 수 있다.

8. 참고 문헌

1. Byun, K. J., Jeong, H. S., Song, Y. C., "Mechanical Behaviors of Steel Fiber Reinforced Polymer-Impregnated Concrete", 8th ICPIC Conference, Belgium, 1995.
2. 한국공업표준협회, 한국공업규격, 무근콘크리트 관, F 4404, 1991.
3. 송하원, 이주영, 서철, 심별, "콘크리트 파괴진행의 유한요소해석", '94 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp, 225-228 1994.
4. 송하원, "경계요소법에 의한 두개의 원공을 가진 평판의 응력집중에 관한 해석적 연구", 석사학위논문, 연세대학교 대학원, 1985.
5. Cruse T.A., *Boundary Element Analysis in Computational Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, 1988.