

연립변형모드 구성된 복합재료의 파괴역학적 거동에 관한 연구

A Study on Fracture Behavior of Composite Material Subjected to Simultaneous Deformation Mode



김상철*

Kim, Sang Chel

요 약

콘크리트는 여러 구성 성분들이 불규칙적인 배열을 이루어 형성된 복합재료이지만, 과거에는 이 재료를 하나의 단종재료로 간주하여 해석하였기 때문에, LEFM에서 사용되는 파괴인성계수만으로는 콘크리트의 파괴역학적 접근이 어렵다는 것 이외에는 파괴인성계수들의 크기의존성에 대한 이유라든가, 실험을 통해서 관측된 구조물 두께 방향으로의 서로 다른 깊이의 균열진행 현상에 대해서는 설명하기가 어려웠다. 따라서 본 연구는 콘크리트를 하나의 복합재료로써 각각의 구성요소들이 차지하고 있는 체적비 및 배열상의 효과를 고려하여 복합재료의 파괴거동을 해석하고, 구성재료의 수와 파괴인성계수와의 상관관계를 분석하였다.

각각의 구성요소들을 연립변형모드(SD mode)로 배열시킨 조건에서 복합재료역학개념에 입각하여 해석한 결과, 일반적으로 실험이나 비선형파괴역학 해석과 같이 하중-변위 곡선 상단부에서 비선형 거동이 관측되었다. 또한 임계응력확대계수(K_{IIc})나 파괴에너지(G_c)는 구성원의 수나 보의 크기에 대해서 거의 무관한 값을 나타내지만, 임계균열선단개구변위(CTOD)는 크기에 영향을 받음을 보여 주었다. 균열의 진행속도는 균열이 진행될수록 감소하며, 파괴인성이 작은 구성원에서부터 균열이 발생되어 결과적으로 보의 두께 방향으로 서로 다른 크기의 균열길이 생성됨이 관측되었다.

* 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구소 책임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 8월 30일까지 학회로 보내주
시면 1997년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Abstract

Concrete is a composite and quasi-brittle material, but the previous concepts from Linear Elastic Fracture Mechanics or Non-Linear Elastic Fracture Mechanics do not account for the composite characteristics of concrete. Thus, these models can not explain the reason for the different crack growth across the specimen thickness and the size dependence of fracture material parameters. As one of methods to solve these problems, this study aims at the analysis of the fracture behavior of composite material in a micro-level using the concept of fracture mechanics. The result of analysis using simultaneous deformation (SD) mode showed that non-linear shape in the load-deflection curve was formed as observed in the experiments and non-linear analysis. In addition, critical stress intensity factor and fracture energy did not depend on the number of phases in the composite, but critical crack tip opening displacement did. From the crack growth profile study, it was found that a crack gradually initiates from the weakest phase of the constituents in the SD mode and crack length of the less tough constituents is longer than that of tougher constituents during crack propagation.

Keywords : composite, simultaneous deformation mode, crack growth, size dependence, stress intensity factor, fracture energy, crack tip opening displacement, crack length

1. 서론

시멘트를 성분으로 하는 재료의 파괴거동을 선형 탄성 파괴역학 (Linear Elastic Fracture Mechanics : LEFM) 개념을 이용하여 접근시키려는 연구는 Kaplan 이후로도 지속적으로 수행되어 왔다. 이들 대부분의 연구는 LEFM에서 전용적으로 사용되는 임계응력확대계수 K_{IC} 나 임계에너지 해방율 G_c 의 파괴인성계수를 콘크리트와 같이 시멘트를 기초로 하는 재료로부터 산출하려는 의도에서 수행되었으며, 차후 연구에서는 이들 파괴인성계수와 콘크리트내의 골재크기, 분사멘트비, 공기량, 강도, 재령, 하중 재하속도 등과의 서로의 상관관계를 구하는 데로 집중되었다^{1,2,3,4}.

그러나 콘크리트는 유리와 같은 완전취성재료와 달리 준취성재료(quasi-brittle material)로, 외력이 작용하기 이전에 블리딩과 수화에 따른 체적변화 및 건조수축 등으로 인해 조골재와 모르타르 경계면

에서 이미 미세균열(microcracks)이 형성되는 등 균열의 성상이 매우 복잡하다⁵. 또한 하중이 작용하는 동안에도 연속적인 주균열이 발생하기 이전에 광범위한 미세균열이 균열선단에 생성되어 상당한 량의 에너지가 손실된다. 이러한 점진적인 미세균열로 인한 파괴진행영역(fracture process zone)이라는 넓은 범위의 비선형영역때문에 LEFM 개념으로는 시멘트를 기초로 하는 재료에 있어서 균열의 진행을 시뮬레이션 할 수 없는 것으로 알려져 있다⁶. 이러한 문제를 해결하기 위해 비선형해석에 입각한 가상균열모델(Fictitious Crack Model)과 균열띠모델(Crack Band Model) 및 두 파라미터 파괴모델(Two Parameter Fracture Model)등 여러 모델들이 제안되었다^{7,8,9}.

이들 비선형 모델들은 콘크리트의 실제 거동과 어느 정도 잘 일치하고 있으나 이들은 2차원 해석에 근거를 하고 있기 때문에 균열의 진행에 따른 구조체의 두께 방향으로 동일한 크기의 균열이 진행되는 것으

로 간주하여야 하고, 재료의 파괴계수들의 크기효과 의존성에 대한 명확한 이유와 근거를 설명하기가 어려웠다. 그 이유중의 하나가 콘크리트와 같은 복합재료를 하나의 단중재료(single phase material)로 간주하여 해석했기 때문으로 판단된다.

본 연구는 이에 대한 해결 방안으로 콘크리트를 하나의 복합재료로 하고 각 구성재료의 영향을 미시적인 관점에서 고려하였다. 실제적으로 콘크리트는 내부에 차지하고 있는 구성인자의 체적비(volume fraction)나 공간적 배열에 따라서 파괴거동이 달라질 것이고, 이미 알려진 바와같이 파괴인성계수의 크기 의존성도 파괴진행영역의 존재 이외에 그 구성원 효과의 영향이 작지 않을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 그 구성원의 효과를 보다 간단하게 이해하고자 복합재료역학(composite mechanics)개념에 입각하여 각각의 구성재료는 균등한(homogeneous) 소재료로 LEFM이론에 따라 거동하는 것으로 하고 구성재료의 수 및 크기효과에 대해서 평가하였다.

2. 복합재료의 이상화

콘크리트는 자갈, 모래, 시멘트 등의 형상, 크기 및 성질이 서로 다른 구성재료들이 불규칙적으로 조합을 이루어서 하나의 특체체를 형성하는 복합재료로 파괴역학의 개념으로 표현하면 그림 1(a)과 같이 혼성 파괴모드(Hybrid Fracture mode : HC mode)의 범주에 속한다. 그러나 이러한 불규칙적인 재료의 조직으로는 각 구성재료들이 복합재료의 거동에 미치는 영향을 분석하기 매우 어려울 뿐 아니라 규칙성에 따른 일정한 경향을 찾기는 거의 불가능하다. 따라서 수치해석적으로 접근하기 위해서는 먼저 각 구성재료의 불규칙적 형상을 그림 1(b)와 같이 원형이나 구형 등의 규칙적인 형상으로 단순화시키고, 각 구성재료의 공간적 영역과 재료의 성질을 고려하여 복합재료에서 차지하는 공간적 비율을 달리하여 그림 1(c)와 같이 모델화시킬 필요가 있다. 그러나 이 모델화된 복합재료를 이용한 파괴역학적 분석은 수치해석의 수행에 많은 시간이 소요되고, 또 복잡한 계산 과정을 거쳐 해석을 수행하더라도 복잡하게 격자형으로 짜여진 상태에서는 각 구성재료의 조직 및 경계 효과에 따르는 영향을 평가하기란 쉽지 않다.

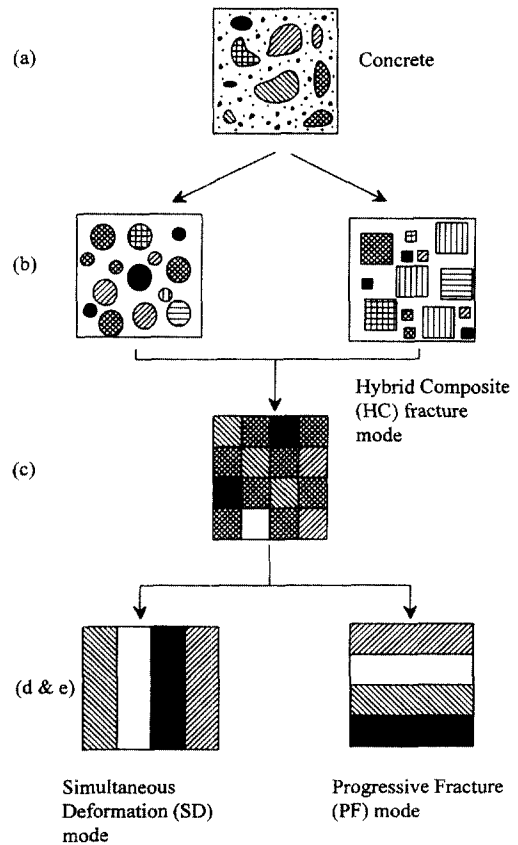


Fig. 1 Schematic idealization of concrete as a multi-phase material

따라서 구성효과가 복합체에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기 위해서는 그림 1(c)에 나타난 모델을 그림 1(d)와 (e) 같이 크게 2가지 방향의 모드로서 구분하여 나눠주면 각 구성재료의 효과를 보다 효율적으로 유추할 수 있을 것으로 사료된다.

이 두 가지 서로 다른 방향별 모드에 따른 매커니즘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 1) 연립변형모드(Simultaneous Deformation mode : SD mode)
복합재료를 구성하는 각 구성재료들이 하중 작용에 종방향으로 배열되어 각 구성재료들이 일정 방향으로 동일한 변형을 발생하는 모드
- 2) 진행파괴모드(Progressive Fracture mode : PF mode)
각 구성재료들이 하중 작용에 횡방향으로 배열

되어 균열이 복합재료 내의 각 구성재료를 관통하여 점진적으로 진행되는 모드

위에서 파괴계수들(fracture parameters)과 구성원 수와의 의존성을 각 모드별로 찾게 되면 콘크리트와 같은 복합재료에 있어서 구성원의 경계선(interface of basic constituents) 및 공간 영역의 효과를 쉽게 이해할 수 있고, 본 연구의 주요 관심사인 파괴계수들의 구조물 크기효과에 대한 평가도 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 먼저 복합재료가 연립변형모드(SD mode)에 있을 때의 구성재료의 수와 파괴계수의 상관 관계를 분석하고, 파괴계수의 크기효과 및 연립변형모드에 있을 때의 균열의 진행현황을 파악하였다.

3. 기본 조건

그림 2와 같이 구성재료들이 SD모드를 받도록 배열한 복합재료 보에 있어서 크기는 2.54cm × 2.54cm × 10.16cm(1" × 1" × 4")이고, 보의 깊이에 대한 노치(notch)길이의 비(a/b)가 0.5로 3점 휨 하중을 받는다고 가정하였다. 구성재료의 종류와 수의 영향을 평가하기 위하여 복합재료로 된 보들은 표 1과 같이 서로 다른 수의 구성재료 및 재료적 특성치를 갖도록 하였다. 또한 해석을 보다 단순화시키고 각 구성재료의 고유치인 임계응력확대계수(critical stress intensity factor : K_{Ic})의 효과만을 분석하기 위하여 각 구성재료들은 서로 동일한 탄성계수(elastic modulus)를 갖도록 하였다. 각각의 구성재료들은 독립적으로 LEFM의 이론에 따라 거동하고, 복합재료에 하중이 가해지는 동안 각 구성재료간 경계선상의 연결지점에서는 균열이 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 일반적인 경우에 대해서도 해석

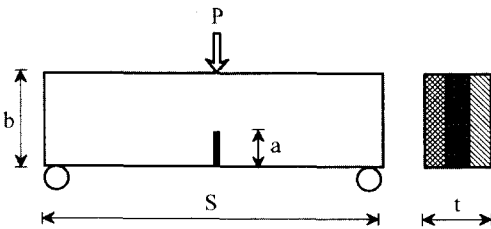


Fig.2 Configuration of three point bending test

이 가능할 수 있도록 해석에 탄성계수와 임계응력확대계수 및 하중과 변위는 무차원의 정규화시킨 값(normalized value)을 사용하였다. 노치의 비(a/b)가 0.5인 경우에 대한 하중과 변위의 관계식을 LEFM으로부터 유도하여 나타내면 다음과 같다.

$$\delta' < 4.97K_{Ic} \text{ 일 때, } P = 0.0939 / (4.97 / \delta') \quad (1)$$

$$\delta' \geq 4.97K_{Ic} \text{ 일 때, } P = 10.936K_{Ic} (\delta' / K_{Ic})^{2.9706}$$

- 여기서 P = 정규화시킨 작용하중 값 (= $P / t\sqrt{b}$)
- P = 작용하중
- δ' = 정규화시킨 변위값 (= $\delta \cdot E / \sqrt{b}$)
- δ = 변위값
- E = 탄성계수(Young's modulus)
- b = 보의 깊이
- t = 보의 두께

Table 1 Material parameters for the study of SD mode

Item	composite1	composite2	composite3	composite4
Number of phases	2	6	2	24
Critical stress intensity factor(K_{Ic})	0.5~1.0	0.5~1.0	0.5~1.0	0.5~1.0
Increase of K_{Ic}	1/2	1/10	1/22	1/46
Volume fraction(V)	1/2	1/6	1/2	1/24

Note : Young's modulus for all of phases = 1.0

4. SD 모드에서의 하중-변위량의 관계곡선

연립변형모드 방향으로 구성된 복합재료는 전술한 바와 같이 하중을 받을 때에 하중작용 방향으로 전 구성재료들은 동일한 크기의 변형을 일으킨다. 그러므로 복합재료에 작용되는 하중값은 체적비(volume fraction)를 고려한 각 구성재료의 산술적 하중평균치의 합계(weighted sum)로부터 계산할 수 있다. 그림 3은 이러한 개념을 토대로 구성재료의 수에 따라 정규화시킨 하중(P)과 변위(δ')와의 관계를 도시한 것이다.

그림 3에서 복합재료의 P' - δ' 곡선은 복합재료의 구성원 중에서 최대 인성치로 단종재료를 구성하는 보에 의해서 형성된 P - δ' 곡선과 그 복합재료의 구성원 중 최소 인성치로 단일보를 형성하는 보의 P - δ' 곡선간의 내부에 존재함을 알 수 있다. 또한 선형 해석에 따른 단종재료에서의 선형탄성파괴거동과는

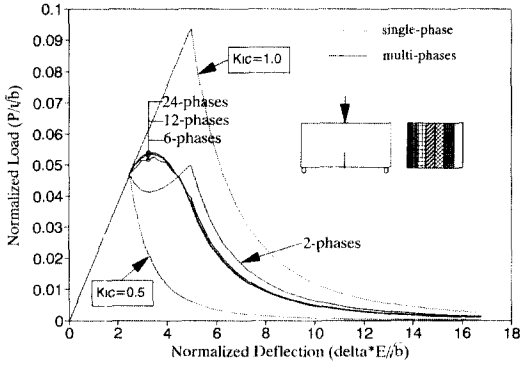


Fig. 3 Effect of number of phases on the normalized load versus load-line deflection curves during the SD mode(6-, 12-, 24-phase material)

달리 복합재료에서는 $P-\delta'$ 곡선의 극대값 주변 상단 부에서 비선형거동이 관측되었다. 이 비선형거동은 구성원의 수가 증가할수록 보다 원활한 곡선을 이루게 되어, 두 개의 재료로 구성되어 있는 복합재료의 경우는 곡선의 극대점이 두 개 존재하는 반면에 6개 이상의 재료로 구성되어 있을 때에는 원만한 포물선 곡선을 이루게 된다. 또한 구성재료의 수가 증가하여도 구성원의 위치와는 관계없이 단지 각 구성재료의 체적비가 일정하다면 곡선의 형상은 다소 차이가 있더라도 하중-변위 곡선 내부의 크기는 변하지 않고 있다. 따라서 파괴에너지를 $P-\delta'$ 곡선과 X-Y 좌표 축에 의해 둘러싸인 면적을 이용하여 산출하는 것에 기준한다면 SD모드 조건에서 구성재료의 수와 파괴에너지는 무관한 것을 알 수 있다.

만약 각 구성재료 별로 그 크기를 동일하게 하였을 때에 구성재료 수의 증가는 구조체의 크기 증가를 의미하므로 앞에서 관측한 결과에 의하면 SD모드에 따른 구조물의 파괴거동에서의 파괴에너지는 구조물 크기에 의존하지 않음(size-independent)을 나타낸다.

5. 저항응력확대계수와 균열선단개구 변위

5.1 저항응력확대계수와 균열선단개구 변위의 구성재료 수와의 상관관계

하중과 변위의 관계를 구하고, 이에 따르는 균열의 진행과 관련된 유효균열길이(effective crack length)는 다음에 표현된 식을^[10] 사용한 반복작업을 통해 구하였다.

$$\delta = \frac{24P}{Et} V_2(\alpha) + \frac{PS^3}{48EI} \left(1 + \frac{12\tau EI}{GAS^2}\right)$$

$$V_2(\alpha) = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^2 [5.58 - 19.57\alpha + 36.82\alpha^2 - 34.94\alpha^3 + 12.77\alpha^4] (S/b = 4일 때)$$

$$\tau = \frac{12 + 11\nu}{10(1 + \nu)}, \quad \frac{E}{G} = 2(1 + \nu), \quad \frac{I}{A} = \frac{b^2}{12}$$

여기서 a = 유효균열길이

α = 보 깊이에 대한 균열길이의 비(=a/b)

G, ν = 전단 탄성계수 및 포아송비

A, S = 부재 단면적 및 스패길이

따라서 저항응력확대계수(resistant stress intensity factor: K_r)와 균열선단개구 변위(CTOD)는 앞서 구한 유효균열길이와 LEFM에서 나타낸 식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^[10].

$$K_r = \frac{6P}{bt} \sqrt{\pi a} F(a)$$

$$F(a) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}}$$

$$CTOD(x=0.5) = \frac{24Pa}{btE} V_1(\alpha) \left[\left(1 - \frac{x}{a}\right)^2 + (1 - 1.149\alpha + 1.081) \left[\frac{x}{a} - \left(\frac{x}{a}\right)^2 \right]^{1/2} \right]$$

$$V_1(\alpha) = 0.76 - 2.28\alpha + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + \frac{0.66}{(1-\alpha)^2}$$

그림 4와 5는 K_r 과 균열-보깊이의 비(a/b)와 K_r 과 CTOD의 관계를 구성재료의 수 별로 그 관계를

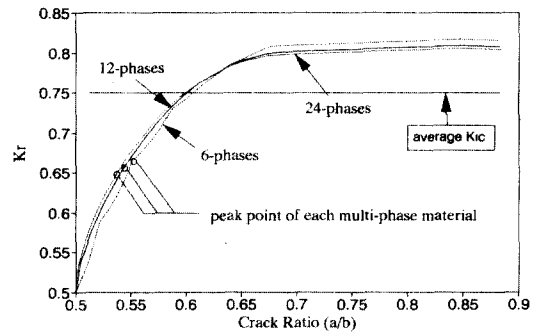


Fig. 4 Effect of number of phases on the normalized load versus load-line deflection curves during the SD mode(6-, 12-, 24-phase material)

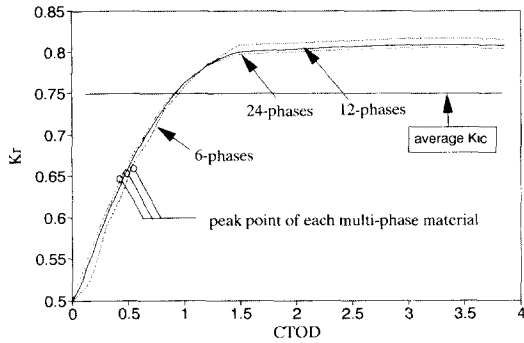


Fig. 5 Resistant stress intensity factor versus crack tip opening displacement plots in association with different number of phases in the SD mode

도시한 것이다.

그림 4는 균열이 진행함에 따라 K_I 값은 비선형적으로 증가하다 임의의 값에 도달하게 되면 거의 일정한 값에 접근함을 보여준다. 이 K_I 의 비선형거동 구간은 복합재료를 구성하는 구성재료 중에서 가장 파괴인성(fracture toughness)이 작은 재료로 구성된 단일보의 파괴거동에 가질 수 있는 최대 하중값(peak load)에서부터 출발하여, 파괴인성이 가장 큰 재료로 구성된 단일보의 최대 하중값까지 비선형 거동이 발생된다. 그림에서의 최대 K_I 값인 임계응력확대계수는 각 구성재료의 구성비를 고려한 파괴인성치의 산술적 평균치보다 크므로, 복합재료의 파괴인성치를 구하기 위해 단순히 각각의 구성재료가 가지고 있는 파괴인성치들을 산술적으로 평균하여 사용하게 되면 실제 복합재료가 지닐 수 있는 파괴인성치보다는 낮게 산정되게 됨을 알 수 있다.

예를 들면 각각 6개, 12개, 24개로 구성된 복합재료에 있어서 각 복합재료의 최대 저항응력확대계수 K_I 값은 각각 0.814, 0.806 및 0.802인데 반해, 각 복합재료의 구성원별 체적비를 고려하여 파괴인성치의 산술적 평균을 구하게 되면 0.75로써 실제보다 낮게 나타났다. 그 외에도 저항응력확대계수를 복합재료의 $P-\delta$ 곡선상의 극대점에서 산정하였을 때 6개, 12개, 24개의 구성재료로 된 복합재료의 경우 각각 0.663, 0.655, 0.649로써 산술평균치보다도 낮은 값을 보여 주었다. 따라서 SD모드 방향으로 균열이 진행하게 되면, 균열이 진행함에 따라 저항응력확대계수는 점차 증가하게 되고, 결국에는 각 구성재료의

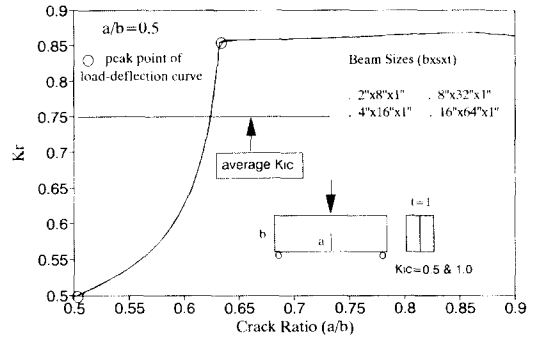


Fig. 6 Effect of specimen sizes on the resistant stress intensity factor in the 2-phase composite

임계응력확대계수(K_{Ic})의 가중합계값보다 커지게 되며, 이 값은 하중변위 곡선의 극대값에서 발생하는 것이 아니라 극대값에서 다소 벗어난 위치에서 발생됨을 본 연구는 보여 주고 있다. 그러므로 단종재료로 구성된 보에서 사용하는 일반적 방법처럼, 복합재료에서도 하중변위 곡선상에 최대 하중이 걸리는 부분에서 임계응력확대계수를 구하게 되면 낮은 임계응력확대계수가 산출될 것으로 판단된다. 저항응력확대계수와 CTOD의 관계곡선에서도 그림 5에서 보는 바와 같이 비선형 관계가 관측되었다.

5.2 저항응력확대계수와 균열선단개구변위의 크기효과

K_I 과 CTOD의 보 크기에 따른 의존성은 2개의 구성재료와 6개의 구성재료로 된 복합재료를 사용하여 검토하였다. 4개의 서로 다른 크기의 보, 5.08cm

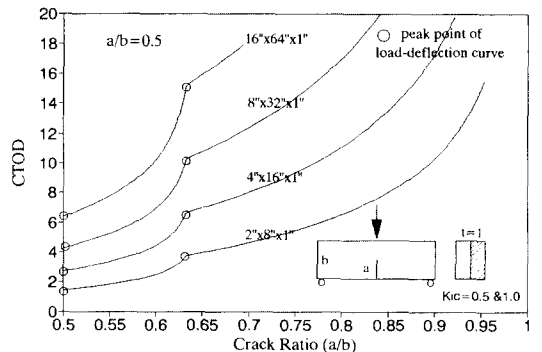


Fig. 7 Effect of specimen sizes on the crack tip opening displacement in the 2-phase composite

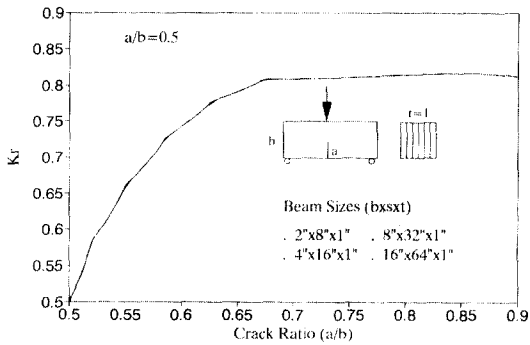


Fig. 8 Effect of specimen sizes on the resistant stress intensity factor in the 6-phase composite

× 20.32cm (2" × 8"), 10.16cm × 40.64cm (4" × 16"), 20.32cm × 81.28cm (8" × 32"), 와 40.64cm × 162.56cm (16" × 64"), 모두에 대해서 보의 두께는 2.54cm (1")로 고정하고, 각 구성원의 재료적 특성치는 표 1의 값을 사용하였다. 그림 6에서 그림 9는 균열의 진행과 함께 저항응력확대계수와 균열선단개구 변위값의 크기의존성을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 하중-변위 곡선상의 차이로 인해 2개로 구성된 복합재료와 6개로 구성된 복합재료는 서로 다른 형태의 K_{Ic} 과 균열 진행비 곡선을 보였으며, 저항응력확대계수는 그림 6과 8에서 보는 바와 같이 균열길이를 보의 깊이로 정규화(normalized)시키면, 보의 크기에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 균열선단개구 변위(CTOD)는 그림 7과 9와 같이 보의 크기에 의존하였다. 즉 보의 크기가 커지면 커질수록 CTOD의 값도 이와 대응하여 증가하였다.

그림 10은 보의 크기별 하중-변위 곡선상의 최대 하중 위치점에서 계측된 응력확대계수를 나타낸 것

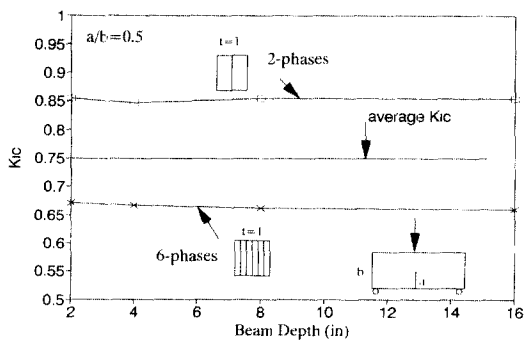


Fig. 10 Effect of specimen sizes on the critical stress intensity factor

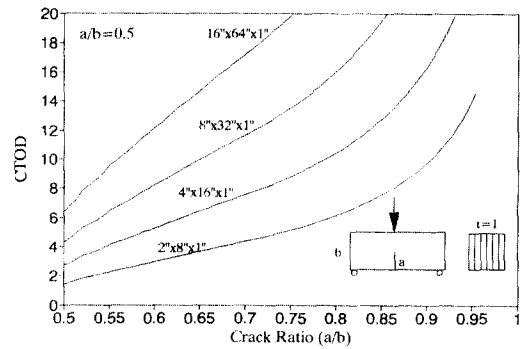


Fig. 9 Effect of specimen sizes on the crack tip opening displacement in the 6-phase composite

으로 2개의 재료로 구성된 복합재료의 K_{Ic} 값은 6개의 재료로 된 복합재료 값보다는 크지만 보의 크기가 커져도 거의 상수를 이루는 크기효과에 대해서는 무관함을 나타내었다. 그러나 임계균열선단개구 변위 (critical Crack Tip Opening Displacements, CTOD)는 그림 11과 같이 보의 크기가 커질수록 기울기가 감소하는 형태를 이루면서 CTOD_c 값이 증가하는 크기의존성을 보여주었다.

6. 균열 진행도(crack profile)

6개의 구성원으로 된 복합재료를 사용하여 하중에 따른 균열의 진행 상황을 분석하여 그림 12에서 15에 나타내었다.

첫 단계로서 보에 처음 하중이 가해졌을 때 그림 12에 나타난 바와 같이 파괴인성이 가장 낮은 구성재료($K_{Ic} = 0.5$)에서 먼저 균열이 발생하여, 정규화시킨 처짐 $\delta = 2.962$ 에 대해 0.1487만큼의 균열이 진행되

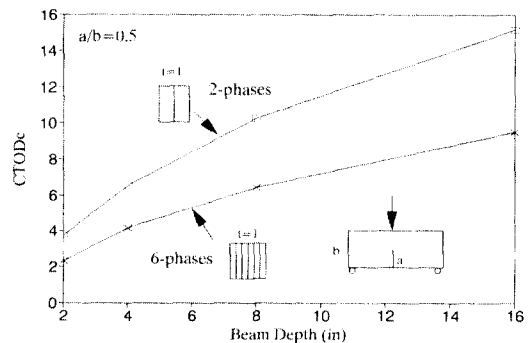


Fig. 11 Effect of specimen sizes on the critical crack tip opening displacement

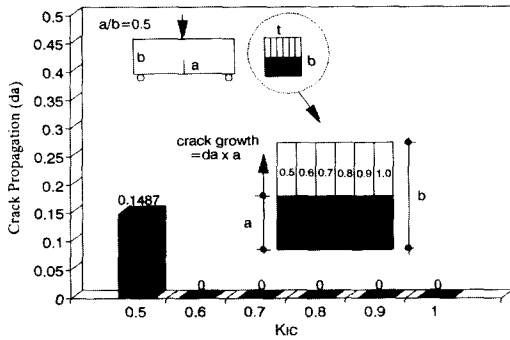


Fig. 12 Crack growth profile of the 6-phase composite when the deflection reaches 2.962(step1)

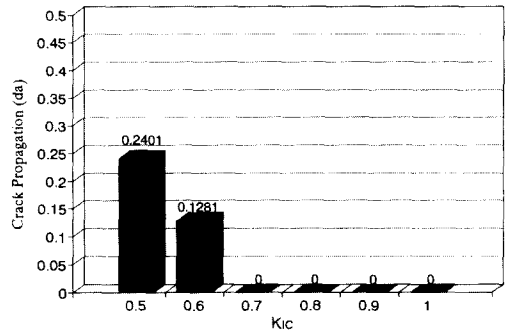


Fig. 13 Crack growth profile of the 6-phase composite when the deflection reaches 3.475(step 2)

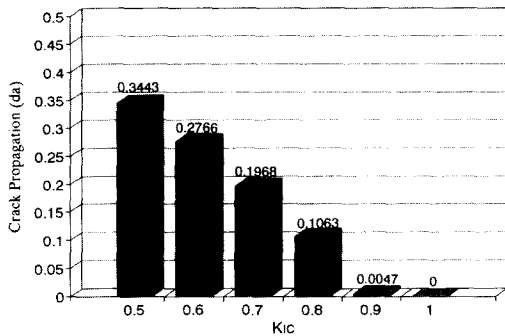


Fig. 14 Crack growth profile of the 6-phase composite when the deflection reaches 4.50(step 3)

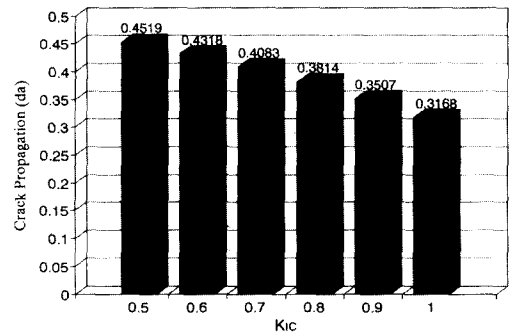


Fig. 15 Crack growth profile of the 6-phase composite when the deflection reaches 8.276(step 4)

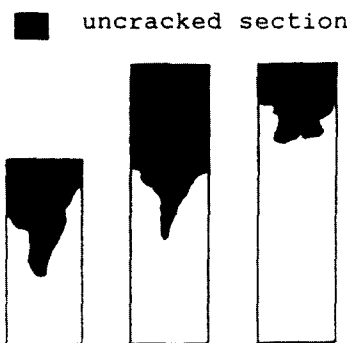


Fig. 16 Crack profile revealed from dye-penetration technique

었으나 다른 구성재료들은 그 처짐량에 대해 균열이 전혀 발생하지 않았다. 그러나 최고 하중 위치점에 도달하였을 경우에 해당하는 처짐량 3.475에 대해서는 $K_{Ic}=0.5$ 인 구성재료 이외에도 파괴인성이 $K_{Ic}=0.6$ 인 구성재료에서도 균열이 나타났다.

3단계(그림 14)에서는 처짐이 4.5 발생하여도 파괴인성이 가장 높은 구성재료 $K_{Ic}=1.0$ 은 균열을 보이지 않았고, 처짐이 8.276에 이르렀을 때 비로소 그림 15에 나타난 바와 같이 모든 구성재료들은 균열이 발생하였다. 본 단계에서 주지하여야 할 사항으로 가장 파괴인성이 큰 재료의 균열길이 0.3168과 가장 파괴인성이 낮은 구성재료($K_{Ic}=0.5$)에서 발생한 그림 14와 15와의 균열길이의 차 0.1076를 비교하면, 균열의 진행속도는 처음 균열이 발생할 때 빠른 속도로 진행되다 점차 속도가 늦추어짐을 알 수 있었다. 따라서 본 균열진행도를 통하여 SD모드를 받는 복합재료에서의 균열 특성을 살펴보면, 각 구성재료의 파괴특성치에 따라서 균열의 진행 및 길이가 동일단면에 있어서 서로 달라지며, 균열은 가장 파괴인성이 작은 구성원으로부터 발생하고 그 균열의 속도는 균열이 진행할수록 점점 줄어든다는 것을 제시한다.

실제로 dye-penetration 시험을 통해 콘크리트

보에 발생된 균열 단면을 측정한 결과에 따르면¹¹⁾, 그림 16과 같이 단면을 따라서 각기 균열의 진행 길이가 일정하지 않고 서로 다른 이유를 본 연구를 통해서 설명할 수 있을 것으로 사료된다.

7. 결론

복합재료에 있어서 구성재료의 방향 효과 및 각 구성원별로 전체 차지하는 체적비에 따라서 파괴계수가 의존할 것이라는 가정하에 방향별 모드에 따른 수치해석중 연립방향변형모드(SD mode)를 이용하여 구조물 크기 및 구성원 수의 영향을 검토하였다. 본 해석에서 복합재료를 구성하는 각각의 구성재료는 LEFM이론에 따라 거동하는 것으로 가정하고, 각각의 특성과유치인 파괴인성계수를 이용하여 해석을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 단종재료로 구성된 구조체에 LEFM을 적용한 선형탄성해석과는 달리, SD 모드를 받는 복합재료의 하중-변위 곡선은 최대 하중값 주변의 상단부에서 비선형거동이 발생되며, SD 모드를 받도록 배열된 복합재료의 경우에 얻어진 파괴에너지는 구성원의 수와 무관하다.

2) 하중작용 방향에 종방향으로 구성재료들이 배열된 복합재료내에서 균열이 진행하게 되면, 저항응력확대계수는 균열이 진행함에 따라 비선형거동을 하고, 최대응력확대계수는 각 구성재료별 파괴인성치의 산술적 평균치보다 크며, 하중-변위 곡선상의 극대점 이후에서 산정된다.

3) SD모드에서 임계응력확대계수는 크기효과에 무관하나, 임계균열선단개구변위는 보의 크기가 커질수록 증가하는 크기의존성을 나타낸다.

4) 복합재료의 균열은 파괴인성이 작은 구성재료에서부터 차례로 발생하고, 균열의 진행속도는 균열이 진행할수록 작아진다. 따라서 복합재료 단면에 있어서 위치별 균열진행길이는 각기 다른 값을 나타낸다.

본 연구를 통해 콘크리트와 같은 복합재료에 있어서 구성재료의 공간적 배열 위치에 따라서도 파괴계수가 구조물 크기의존성에 공헌하고 있음을 알 수 있고, 각각의 어떠한 인자가 계수에 영향을 미치는지 선별할 수 있었다. 또한 가장 취약한 위치에서의 균

열이 발생하는 이유에 대해서도 본 연구를 통해 설명이 가능한 것으로 사료된다. 본 연구는 하중이 작용하는 방향으로 배열된 구성재료에 대해 해석한 바, 구성재료의 위치별 특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 하중의 횡방향으로 배열된 진행파괴모드(PF mode)에서의 해석이 추가되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. Brown, J.H. and Pomeroy, C.D., "Fracture Toughness of Cement Paste and Mortars", *Cement and Concrete Research* 3, 1973, pp.475-480.
2. Kleinschrodt, H.D. and Winkler, H., "The Influence of the Maximum Aggregate Size and the Size of Specimen on Fracture Mechanics Parameters", *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Elsevier, 1986, pp.137-148.
3. Swamy, R.N., "Fracture Mechanics Applied to Concrete", *Developments in Concrete Technology* 1, Applied Science Publishers, 1979, pp.221-281.
4. Walsh, P.F., "Discussion of the Paper Measuring the Fracture Toughness of Cement Paste and Mortar", *Magazine of Concrete Research* 25, 1973, pp.220-221.
5. Hsu, T.T.C., Slate, F.O., Sturman, G.M., and Winter, G., "Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve", *Journal of the American Concrete Institute* 60, 2, 1963, pp.209-224.
6. Mindess, S., "Fracture Toughness Testing of Cement and Concrete", *Fracture Mechanics of Concrete: Material Characterization and Testing*, EAFM Series, Ed.A., Charpinteri & Ingraffea, Martinus Nijhoff Publishers, Hague, 1984, pp.67-110.
7. Bazant, Z.P. and Oh, B.H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", *Materials and Structures (RILEM)* 16, 1983, pp.155-177.
8. Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements", *Cement and Concrete Research* 6, 1976, pp.773-782.

9. Jenq, Y.S., and Shah, S.P., "Two Parameter Fracture Model for Concrete", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.111, NO.10, 1985, pp.1227-1241.
10. Tada, H., Paris, P.C., and Irwin, G.R., "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Del Research Corporation, Hellertown, PA., 1976
11. Kennedy, J.W., and Hudson, W.R., "Application of the Indirect Tensile Test to Stabilized Materials", Highway Research Record 235, Washington D.C., 1968, pp.36-48.
12. Higgins, D.D. and Bailey, J.E., "Fracture Measurement on Cement Paste", Journal of Material Science 11, 1976, pp.1995-2003.
13. Hordijk, D.A., Mier J.M., and Reinhardt, H.W., "Material Properties", Fracture Mechanics of Concrete Structures from Theory to Application, Technical Committee 90-FMA Fracture Mechanics to Concrete-Applications, RILEM, pp.67-127.
14. Petersson, P.E., "Fracture Energy of Concrete: Method of Determination", Cement and Concrete Research, Vol.10, 1980, pp.78-89.
15. Sih, G.C., "Mechanics of Material Damage in Concrete", Fracture Mechanics of Concrete: Material Characterization and Testing, EAFM Series, Ed.A., Charpinteri & Ingraffea, Martinus Nijhoff Publishers, Hague, 1984, pp.67-110.
16. Wolinski, S., Hordijk, D.A., Reinhardt, H.W., and Cornelissen, H.A.W., "Influence of Aggregate Size on Fracture Mechanics Parameters of Concrete", International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete 9(2), 1987, pp.95-103.

(접수일자 : 1996. 5. 30)