

# 범용유한요소해석 프로그램의 확장유한요소법 성능 검증을 위한 2차원 모델 해석

이 영 환<sup>1</sup> · 김 동 환<sup>2</sup> · 박 재 균<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(주)아이소, <sup>2</sup>단국대학교 토목환경공학과

## Two-Dimensional Model Analysis for Extended Finite Element Method(XFEM) Verification of General Purpose Finite Element Analysis Program

Young Hwan Lee<sup>1</sup>, Donghwan Kim<sup>2</sup> and Jaegyun Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>IISO Inc., Seoul, 06978, Korea

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University, Yongin, 16890, Korea

### Abstract

In this study, numerical analysis is applied to a two - dimensional model for verifying the general finite element program, Abaqus' s extended finite element method(XFEM). The cohesive element model used in the existing research has a limitation in simulating the actual crack because of the disadvantage that the crack path should be predicted and the element should be inserted. For this reason, the extended finite element method(XFEM), which predicts the path of cracks based on the directionality and specificity of stress, is emerging as a new solution in crack analysis. The validity of the XFEM application was confirmed by comparing the cohesive element analysis with the XFEM analysis by applying the crack path to the self - evident two - dimensional model. Numerical analysis confirms stress distribution and stress specificity immediately before crack initiation and compares it with actual crack initiation path. Based on this study, it is expected that cracks can be simulated by performing actual crack propagation analysis of complex models.

**Keywords** : cohesive element, crack propagation, XFEM, general purpose FEM program

### 1. 서 론

균열은 구조물의 현재 안정성 상태를 직관적으로 판단할 수 있는 지표이다. 규모가 큰 콘크리트 구조물을 자세히 보면 수많은 균열들이 보인다. 이러한 균열들은 규모가 큰 구조물의 경우에 구조적으로 문제가 되지 않지만 파단균열(failure crack)의 경우 구조물의 붕괴로 이어지므로 사전에 발생원인과 위치가 판단이 된다면 미리 보강이 가능하다. 또한 구조물 뿐만 아니라 폭발매개체, 압축재료 등과 같은 균열의 발생 유무에 민감한 재료들이 존재한다. 본 연구를 통해 재료에 대한 기본적인 물성이 제공되고 범용유한요소해석 프로그램에서 균

열 진전 시뮬레이션이 XFEM으로 가능하게 된다면 안전성도 확보될 것으로 기대된다.

기본적으로 균열의 발생유무는 응력분포를 통해 예측이 가능하다. 하지만 응력분포는 균열 발생 구역, 즉 영역에 대한 정보만을 제공하기 때문에 균열의 가시적인 확인은 훨씬 더 정확한 정보를 제공할 수 있다. 철근 콘크리트 구조물을 예로 들어 설명하면 응력분포를 통해 균열 발생영역에 대한 정보를 얻고 영역 전체에 대한 진단보강을 할 수 있다. 하지만 영역 전체에 대한 보강은 당연히 과보강이 될 수 밖에 없으며 균열을 가시적으로 확인할 수 있다면 세부적으로 진단보강이 이루어 질 수 있기 때문에 합리적인 보강대책을 세울 수 있게 된다.

\* Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3473; E-mai: jpark@dankook.ac.kr

Received June 4 2018; Revised August 1 2018;

Accepted August 16 2018

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

취성 재료의 균열해석에는 여러 가지 방법이 제안되어 왔다. 콘크리트 균열해석의 고전이라고 할 수 있는 Bazant와 Oh (1983)를 시작으로 Cox와 Yang(2005) 등은 응집요소(cohesive element)를 이용하여 해석을 수행하였고, 최근에는 Moes 등 (1999)의 논문에서 시작된 XFEM을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 국내에서는 Ha(2009), Yoo와 Kim(2016) 등에서 응집요소와 확장유한요소법을 이용한 콘크리트 구조물의 해석이 이루어졌다.

현재는 상용소프트웨어인 Abaqus, ANSYS 등에 XFEM 해석 틀이 내장되어 있고, 여기에 응집요소의 물성을 이용하는 것이 가능하므로 본 연구에서는 기존의 균열 해석 모델인 응집 요소 해석과 XFEM 해석을 같이 수행하고 이를 비교함으로써 XFEM 해석이 실질적으로 응집요소 해석의 결과와 같다는 것을 보이고 균열 발생경로가 자명한 2차원 모델에 적용하여 실제 균열 모사 가능 정도를 확인하였다. 재료모델에 대한 기본적인 정보를 제공하고 균열해석에 있어 필수적인 물성을 확보하고 수치해석을 수행하였다. 파괴역학에서 제공하는 기본 파괴 모드의 형상을 reference 모델로 하여 수치해석을 수행하였다. 본론에서는 수치해석 결과 비교에 앞서 확장유한요소법에 대한 간단한 정리로 확장유한요소법의 기본적인 메카니즘을 소개하고 수치해석 결과를 분석할 수 있도록 기술하였다.

## 2. 응집요소와 확장유한요소를 사용한 2차원 모델 해석 및 비교

이 장에서는 확장유한요소법에 대한 간략한 소개와 함께 응집요소(cohesive element)모델 해석과 확장유한요소법(XFEM)을 적용한 해석을 비교 분석하였다.

### 2.1 확장유한요소법

확장유한요소법은 GFEM(generalized finite element method)와 PUM(partition of unity method)을 기반으로 하고 있다. 기존의 유한요소법은 요소의 형상에 의존하는 계산 결과를 보이지만 확장 유한요소법은 요소의 형상과는 무관하게 리메쉬(remesh)과정을 거치지 않는다. 앞서 언급한대로 확장 유한요소법은 기존의 유한요소법에서 해결하지 못한 문제에 대하여 해결책을 제시하기 위해 처음 제안되었다. 확장유한 요소법은 기존의 유한요소법에 확장 자유도의 개념을 추가하여 균열 선단에서의 요소의 변위 불연속성을 해결하기 위한 목적으로 연구되었으며, 균열의 발생으로 인한 경계면에서의 불연속성도 정의할 수 있다.

균열이 발생한 영역을 표현하기 위한 변위장은 불연속 점프가

일어나는 요소에서의 확장변위와 균열 선단을 포함하는 요소에서의 확장변위를 포함하여 다음과 같은 형태를 가정한다.

$$u = \sum_{i \in I} N_i u_i + \sum_{j \in J} b_j N_j H(X) + \sum_{k \in K} N_k \sum_{l=1}^4 c_{kl} F_l(X) \quad (1)$$

위 식들에서  $N_i$ 들은 일반적인 유한요소의 형상함수,  $H(X)$ 는 Heaviside step fn. 이다. 첫 항은 일반적인 유한요소의 연속 변위장, 두 번째 항은 점프가 일어나는 요소의 변위장, 마지막 항은 균열선단의 변위장(파괴역학이론해,  $F_l(X)$ )을 포함한다.

### 2.2 Abaqus에서 균열 진전방향의 결정

파괴역학에서는 에너지의 관점이 아닌 균열 주위에서의 응력 및 변형량의 크기의 관점에서 균열 선단에서의 응력 분포를 결정한다. 응력확대계수(stress intensity factor)의 산정은 복소평면 또는 Airy의 응력 함수와 같은 수학적의 전개를 필요로 한다. 이는 균열에서 나타나는 응력상태를 정의하는 파라미터로 물리적인 의미로 균열 선단 부위에서의 응력장을 표현하는 물리량이다.

아래의 식에서  $K_I, K_{II}, K_{III}$  는 균열 발생 모드 I, II, III에 대한 응력확대계수이다.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0) \quad (2-1)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yx}(r, 0) \quad (2-2)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yz}(r, 0) \quad (2-3)$$

이미 존재하는 균열이 진전하는 각도를 결정하는 여러 가지 기준이 제안되어 왔다. 이러한 여러 가지 기준에는 최대접선응력 기준(maximum tangential stress criterion, Erdogan and Sih, 1963), 최대주응력 기준(maximum principal stress criterion, Maiti and Smith, 1983), 최대 에너지 방출률 기준(maximum energy release rate criterion, Palaniswamy and Knauss, 1978; Hussain, Pu, and Underwood, 1974), 최소 탄성에너지밀도 기준(minimum elastic energy density criterion, Sih, 1973), 그리고 T-기준(T-criterion, Theocaris, 1982) 등이 있다. 이러한 기준들은 초기 균열의 진전에서 약간 다른 방향들을 주지만, 전부 다 균열 선단에서  $K_{II}=0$ 을 암시하고 있다(Cotterell and Rice, 1980).

Abaqus/Standard에서는 균질(homogeneous), 등방성

(isotropic), 선형 탄성(linear elastic) 물질에 대하여 세 가지 기준을 제공한다: 최대접선응력 기준, 최대에너지 방출을 기준, 그리고  $K_{II}=0$  이다.

• 최대 접선응력 기준(maximum tangential stress criterion)  
 균일한 등방성 선형 탄성 재료에 대한 near crack tip stress 는 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2}\theta (K_I \cos^2 \frac{1}{2}\theta - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta) \quad (3)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2}\theta [K_I \sin \theta + K_{II}(3\cos \theta - 1)]$$

여기서,  $r, \theta$ 는 균열 정면에 수직인 평면에서 균열 선단을 중심으로 한 극 좌표이다.

$$\partial \sigma_{\theta\theta} / \partial \theta = 0 \text{ or } \tau_{r\theta} = 0; \quad (4-1)$$

$$\hat{\theta} = \cos^{-1} \left( \frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (4-2)$$

여기서, 균열 진전 각도는 균열 평면에 대해 결정되며,  $\hat{\theta}=0$ 은 "직선"방향의 균열 진전을 나타낸다.  $\hat{\theta}<0$  일 경우  $K_{II}>0$ 이고,  $\hat{\theta}>0$  일 경우  $K_{II}<0$ 이다.

• 최대 에너지 방출을 기준(maximum energy release rate criterion)

Fig. 1과 같이 균열평면에서 각도  $\hat{\theta}$ 로 구부러져 발생하는 균열의 길이를 보자. 세 가지 기준을 비교하였다.

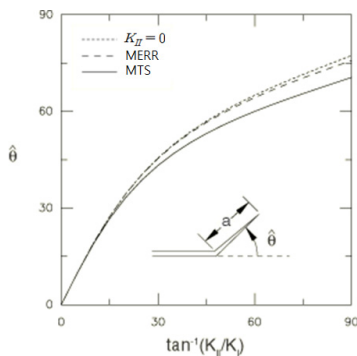


Fig. 1 A curve for the J-integral evaluation

$a$ 가 다른 모든 기하학적 길이(모재 균열의 길이 포함)와 비교하여 극소로 작으면, 추정 균열의 끝에서 응력 강도 계수  $K_I^k$  및  $K_{II}^k$ 는  $K_I$ 와  $K_{II}$ 의 선형 조합으로 표현될 수 있으며, 응력 강도 계수는 모재 균열의 kinking 발생 전에 존재한다.

$$K_I^k = c_{11}K_I + c_{12}K_{II} \quad (5)$$

$$K_{II}^k = c_{21}K_I + c_{22}K_{II}$$

$c_{ij}$ 의  $\hat{\theta}$ -dependence는 Hayashi와 Nemat-Nasser(1981)와 He와 Hutchinson(1989)에 의해 주어진다.

균열 진전에 관해서도 아래 식으로 표현된다.

$$G^k = \frac{1}{E} (K_I^k{}^2 + K_{II}^k{}^2) \quad (6)$$

최대 에너지 방출 속도 기준은 균열이 초기에  $G^k$ 를 최대화하는 방향으로 진전한다고 가정한다.

•  $K_{II}=0$  Criterion

이 기준은 균열이 처음에 발생된 방향으로 진전된다고 가정한다. Fig. 1에서 최대 에너지 방출 기준과 거의 일치하는 균열 진전 각을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 비교하여, 최대 접선 응력 기준은 더 작은 균열 진전 각도를 예측한다.

### 2.3 응집요소(Cohesive Element) 해석

응집요소의 경우 XFEM과의 비교가 목적이고 해석의 불안정성 때문에 임의의 상수를 적용하여 해석을 진행하였다. 응집 요소를 적용하기 위한 손상(damage)모델을 선택하고 포함 되어있는 상수를 정의하였다. 손상모델 선택 시에 해석의 수렴

Table 1 Property table of the material model

Problem type	Static, General				
Solution technique	Solution technique	Newton raphson method			
Step	Time period	1			
	Increment size	0.01			
	Stabilize	0.0002			
	Allsdtol (auto damping)	0.05			
Load condition					
Material					
Elastic	Young`s modulus	571	psi		
	Poisson`s ratio	0.47			
Maxs_Damage (traction seperation)	Damage initiation	120.4	150	150	psi
	Damage evolution_Energy_BK	3.074	3.074	3.074	psi
	Stabilization	1e-05			
	Elastic_Traction	571000	285000	285000	

성을 위해 적절한 모델을 선택하는 것이 중요하다. Abaqus에 내장된 응집요소해석에 대한 손상모델은 주응력 조건에 대한 파단을 정의하지 못하기 때문에 최대 응력으로 파단을 정의하였다. 물성의 상세는 아래와 같다. 응집요소와의 비교를 목적으로 해석을 진행한 XFEM의 물성은 아래의 물성에서 Maxps\_Damage를 사용하였다.

응집요소를 사용한 해석모델과 해석결과는 아래 Fig. 2, 3과 같으며 본래 예상된 자명한 경로로 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다. 응집요소의 경우는 경로를 예측하여 요소를 삽입하였기 때문에 Fig. 3과 같은 결과를 보이는 것이 자명하다.

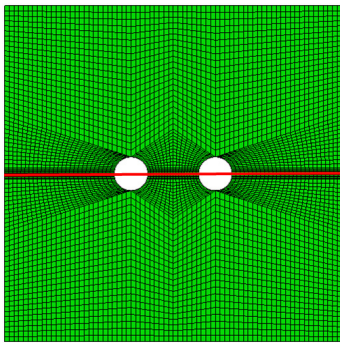


Fig. 2 Cohesive element model and its path (pre-determined)

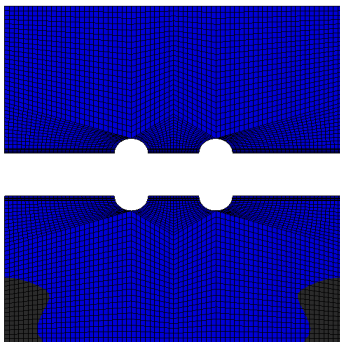


Fig. 3 Analysis result by cohesive element

#### 2.4 XFEM 해석(구멍 1개인 시편의 인장해석)

Abaqus에서 제공하는 XFEM 기능에 대한 확인을 위하여 구멍 있는 시편을 대상으로 인장 과정에서 발생하는 균열 진전 해석을 수행하였다. 해석 모델은 Abaqus Benchmarks Guide에 나와 있는 예제 모델을 이용하였으며 그 형상은 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 인장 시편이 좌우 대칭인 점을 감안, 절반만을 모델링하였으며 경계면에 대칭 조건을 부여하였다.

해석 모델 상에 초기 균열은 존재하지 않는다고 가정하였으며 해석 편의 상 해석 모델 전체를 균열 진전이 가능한 영역으로 지정하였다.

XFEM 적용 시 균열 발생 여부는 개별 유한 요소에서의 응력

또는 변형률 값을 기반으로 하여 판별을 하게 되므로 균열 진전 해석 시 유한 요소의 크기와 요소의 배치 형태에 따라서 해석 결과가 달라질 가능성에 대해서도 확인을 하여 보았다. 이를 위하여 Fig. 5, 6의 인장 시편을 Fig. 7에서와 같이 유한 요소의 균일성 여부와 요소의 조밀한 정도를 달리하여 해석 결과를 상호 비교하였다.

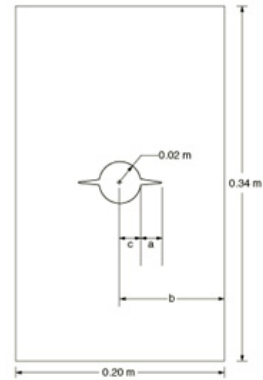
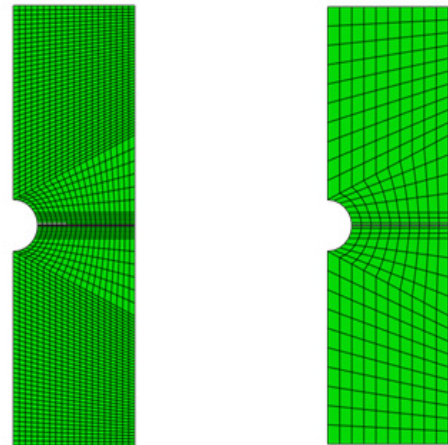
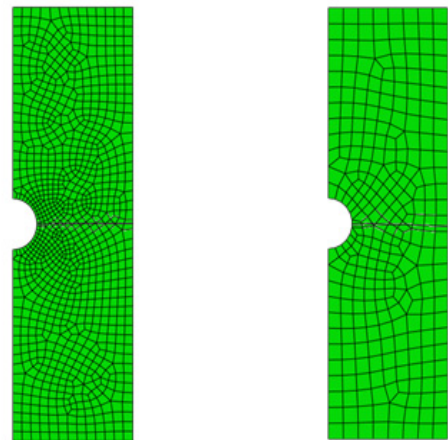


Fig. 4 Tensile analysis model of one hole specimen



(a) Fine structured mesh (b) Coarse structured mesh

Fig. 5 Structured mesh model

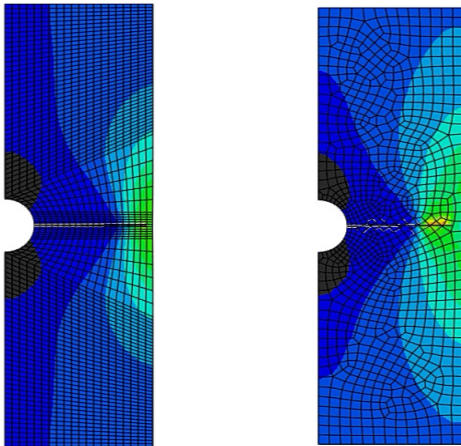


(a) Fine unstructured mesh (b) Coarse unstructured mesh

Fig. 6 Unstructured mesh model

2.4.1 구멍 1개인 시편의 인장 해석 결과

Fig. 5, 6의 인장 시편에 대한 인장 과정에서 발생하는 균열 진전 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 요소의 균일성 여부와 상관없이 조밀한 요소의 경우 균열의 발생 및 이후 진전으로 인한 재료 파단 과정을 해석을 통하여 확인할 수 있다.



(a) Structured mesh (b) Unstructured mesh

Fig. 7 Tensile crack propagation analysis result of a specimen with one hole

Fig. 8~11은 유한 요소의 조밀성, 균일성 여부에 따른 해석 결과를 그래프 형태로 나타낸 것으로 인장에 따른 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 유한 요소가 조밀하게 배치된 경우에는

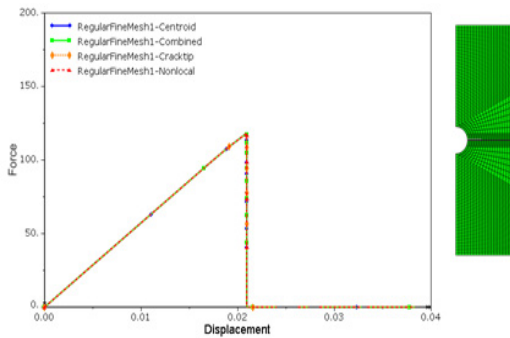


Fig. 8 Load-Displacement plot of a structured fine mesh model analysis result

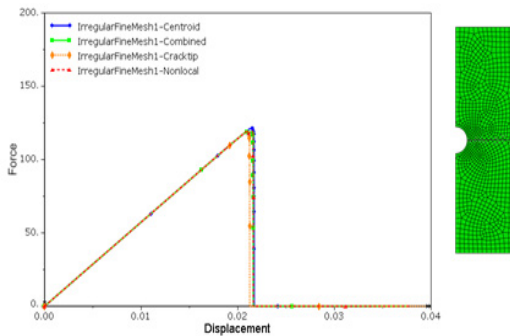


Fig. 9 Load-Displacement plot of an unstructured fine mesh model analysis result

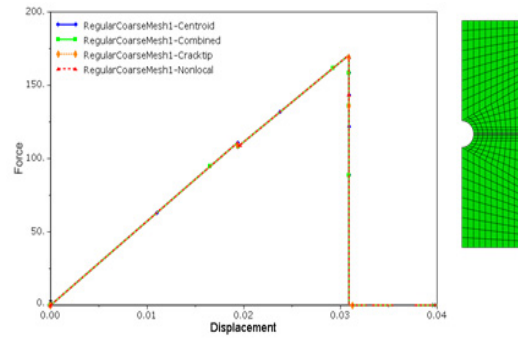


Fig. 10 Load-Displacement plot of a structured coarse mesh model analysis result

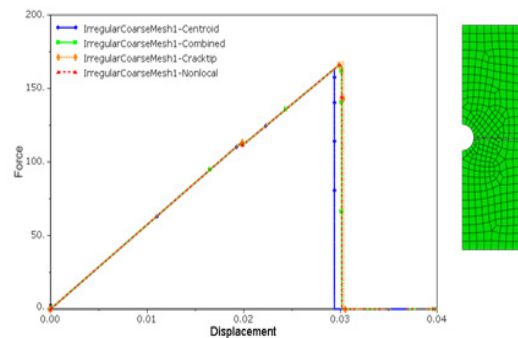


Fig. 11 Load-Displacement plot of an unstructured coarse mesh model analysis result

요소들의 균일성 여부나 균열 발생 여부를 판단하는 위치 차이에 상관없이 일정한 형태의 하중-변위 선도를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 유한 요소가 성긴 모델의 경우에는 시편의 파단 발생 시점이 늦게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 결국 해석 모델 상의 응력의 크기가 일정 수준이 되었을 때 파단이 개시되는 XFEM 해석 방법의 특성 상 응력이 집중되는 영역의 요소가 조밀하게 배치되지 않을 경우 계산을 통해 얻어지는 응력 수준이 실제에 비하여 낮아지게 되고 이로 인하여 파단 개시 시점이 늦춰지는 것으로 판단된다.

이러한 해석 결과로 미루어 XFEM을 적용한 균열 진전 해석의 경우라도 응력이 집중되어 재료 파단이 발생할 가능성이 높은 영역에 대해서는 응력 수준이 정확히 계산될 수 있도록 충분히 조밀한 형태로 유한 요소 모델을 구성할 필요가 있다.

2.5 XFEM 해석(구멍 2개인 시편의 인장해석)

여러 곳에서 균열이 발생하는 경우에 대한 균열 진전 해석 여부를 확인하기 위하여 2개의 구멍이 있는 시편의 인장 시에 발생하는 균열 진전 해석을 수행하였다.

해석 모델은 앞서 Fig. 5, 6의 인장 시편을 변형하여 수평으로 2개의 구멍이 있는 것으로 가정하였으며 Fig. 12에 그

형상을 나타내었다. 시편 형상 외 다른 조건들은 모두 이전과 동일하게 설정을 하였으며 균열 발생 가능 영역은 전과 동일하게 전체 영역을 설정하였다.

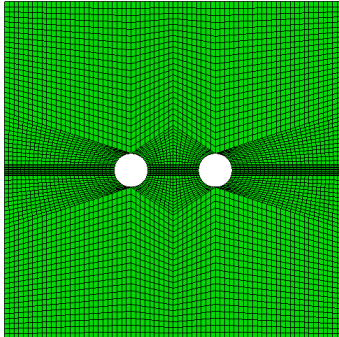


Fig. 12 Tensile analysis specimen model with two holes

### 2.5.1 구멍 2개인 시편의 인장 해석 결과

Fig. 13은 2개의 구멍이 있는 시편의 인장에 따른 균열 진전 해석 결과를 나타낸 것이다. 해석 결과는 일반적으로 예측되는

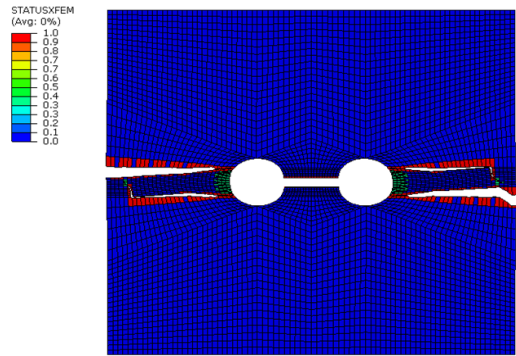
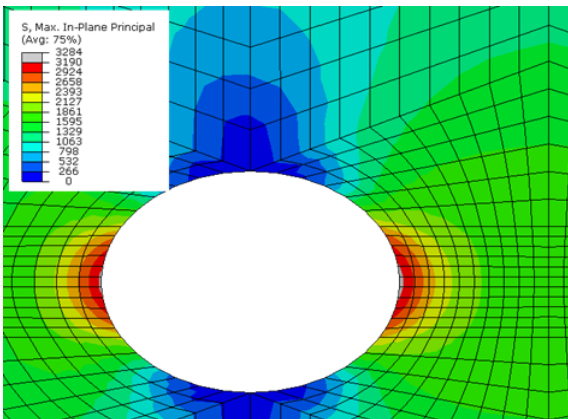


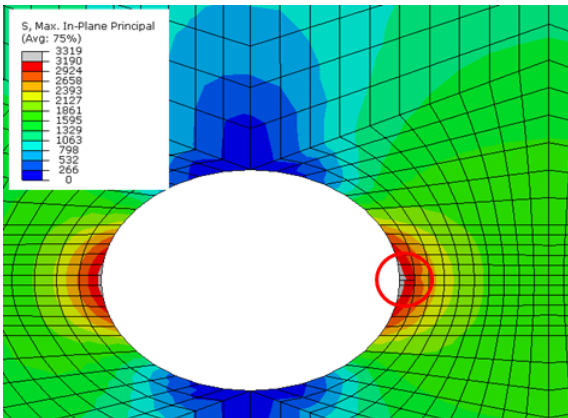
Fig. 13 Crack propagation analysis result of a specimen with two holes

균열 양상과 다른 양상을 보이는데 특히 첫 번째 균열 이후 2번째 균열 부분의 발생 위치와 균열 진전 양상은 대칭적 양상을 나타내지 않고 있다.

Fig. 14는 2개의 구멍 사이에서 발생하는 첫 번째 균열 시점에서 균열이 발생하는 상황을 보여주고 있다. 주응력이

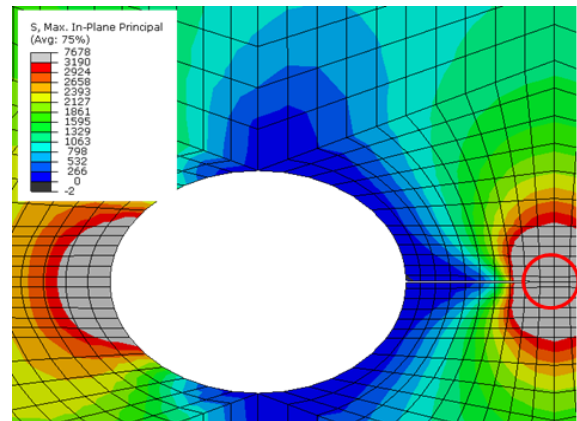


(a) Stress distribution just before the initial crack development

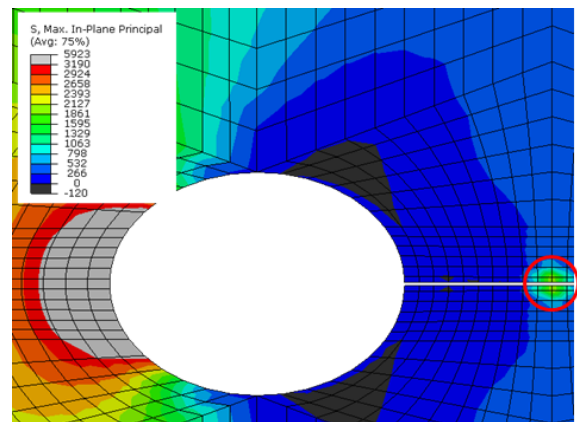


(b) Stress distribution just after the initial crack development

Fig. 14 Crack propagation analysis result of a specimen with two holes



(a) Stress distribution when the initial crack propagates



(b) Stress distribution when the initial crack is fully developed to the end of the specimen

Fig. 15 Crack propagation analysis result of a specimen with two holes after the initial crack development

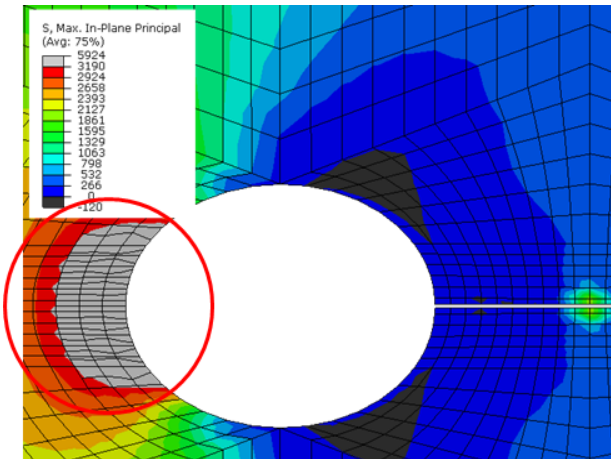


Fig. 16 Crack propagation analysis result of a specimen with two holes when additional cracks developed

3190 psi에 도달한 시점에서 첫 번째 균열이 발생하였다.

Fig. 15는 첫 번째 균열이 진전하는 상황을 보여주고 있다. 첫 번째로 발생한 균열이 진전하는 동안 균열 반대편의 응력은 균열이 발생하기 시작하는 수준을 넘어섭에도 불구하고 균열이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이후 Fig. 16에서 보는 바와 같이 첫 번째 균열이 완전히 진전되어 파단이 발생한 이후에야 첫 번째 균열의 반대편에서 균열이 발생하게 된다. 이때에는 이미 많은 영역이 균열 발생 응력 이상의 응력 상태에 이미 도달한 상태이므로 동시다발적으로 균열이 발생하는 형태의 해석 결과가 얻어짐을 알 수 있다. 이후에는 여러 부위에서 동시에 발생한 균열들 중 하나가 진전되면서 완전 파단 상태에 이르게 된다.

이로 미루어 Abaqus에서의 XFEM을 적용한 균열 진전 해석은 여러 곳의 균열이 발생할 경우 올바르게 처리가 되지

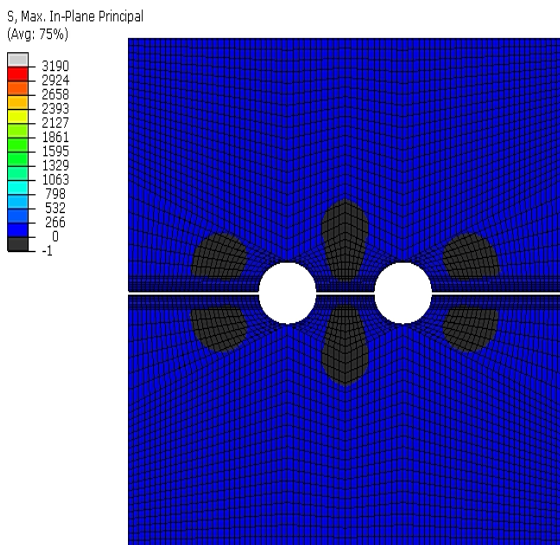


Fig. 17 Crack propagation analysis result of a specimen with two holes and pre-cracks

않는 것으로 보인다. 일단 균열이 발생하게 되면 이 균열이 완전히 진전되어 파단이 된 이후에야 다른 부위의 파단 여부를 판단하는 방식으로 다중 균열을 처리하는 것으로 판단되며 이는 다중 균열 진전 해석에 대한 한계라고 판단된다.

다중 균열 발생 시의 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 균열이 발생할 가능성이 있는 위치에 미리 초기 균열을 만들어 놓는 방법이 있다. 이에 해석 결과가 Fig. 17에 나타나 있으며 시편이 이상적으로 두 쪽으로 갈라진 모습을 볼 수 있다. 이 결과는 Fig. 3의 응집요소(cohesive element)와 같은 결과이다.

### 3. 결 론

본 연구는 기존의 균열 진전 해석에 적용되었던 응집요소를 사용한 해석과 확장유한요소법에 응집요소의 물성을 적용한 균열 해석을 수행하여 두 방법이 가장 기본적인 모델의 경우 일치하는 것을 보였다. XFEM을 적용한 두 가지 2차원 단순 모델 해석을 통해 실제 자명한 균열진전을 확인하였으나 한계점도 발견되었다. Abaqus에 내장된 확장유한요소법은 단순균열에 대한 가시적인 균열 형상을 표현하는데 아주 강력한 툴이나 균열 해석에서 가장 중요한 동시 다발적인 다중균열의 모사는 아직 완전하지 않은 것으로 보인다. 시간증분을 조절하여 균열의 초기 발생 유무 및 진전 순서 등을 조작하는 세부 작업이 수반된다면 충분히 다중균열을 가시적으로 표현할 수 있을 것이다. 하지만 이러한 세부작업은 프로그램 내에서의 코딩작업들이 수반되며 사용자가 직접 조작하기에 매우 어렵고 현재로서는 개발사의 도움없이 불가능 할 것으로 판단된다.

초기 균열이 발생되어 균열선단에서의 응력이 무한대가 되는 응력 특이성으로 균열의 발생을 표현하는 Abaqus는 한 영역 안에서 다른 균열을 발생시키는 응력의 진전을 감지하지 못하는 것으로 해석결과는 나타낸다. 이에 사용자가 가장 간단하게 다중균열을 구현하는 방법은 XFEM을 적용하는 영역을 분할 하는 것이다. Abaqus에서는 20개 까지 영역을 분할하여 XFEM을 적용할 수 있으나 이또한 균열의 발생지역을 예측하고 구역을 분할하여야 하기 때문에 응집요소 모델 해석과 같은 단점이 발생한다. 결과적으로 현재의 Abaqus에서는 실제와 완전하게 유사한 다중균열의 해석이 불가능한 것으로 최종 판단된다. 본 연구를 바탕으로 프로그램 내에서의 문제와 응력 특이성을 판단하는 기준에 대한 수정이 필요하며 첫 번째 균열의 진전 후에 바로 옆에서 또는 같은 영역에서 균열 발생 응력 조건에 도달한 요소를 감지하는 알고리즘이 개발되어야 한다. 이러한 프로그램상의 한계점을 해결하게 된다면 매우 복잡한 구조물에서 발생하는 다중균열에 대한 해석이 가능할 것이다.

### 감사의 글

본 연구에 도움을 주신 국방과학연구소의 박재범, 정규동 박사님께 감사의 말씀을 전합니다.

### References

- Abaqus** (2014) Abaqus Analysis User's Guide Version 6.14, Dassault Systems Simulia Corp.
- Alfarah, B., Lopez-Almansa, F., Oller, S.** (2017) New Methodology for Calculating Damage Variables Evolution in Plastic Damage Model for RC Structures, *Eng. Struct.*, 132, pp.70~86.
- Bazant, Z.P., Oh, B.H.** (1983) Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Mater. & Struct.*, 16, pp.155~177.
- Belytschko, T., Black, T.** (1999) Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 45(5), pp.601~620.
- Budyn, E., Zi, G., Moes, T., Belytschko, T.** (2004) A Method for Multiple Crack Growth in Brittle Materials without Remeshing, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 61, pp.1741~1770.
- Cox, B., Yang, Q.** (2005) Cohesive Models for Damage Evolution in Laminated Composites, *Int. J. Fract.*, 133, pp.107~137.
- Georgiou, I., Hadavinia, H., Ivankovic, A., Kinloch, J., Tropsa, V., Willians, G.** (2003) Cohesive Zone Models and the Plastically Deforming Pell Test, *J. Adhes.*, 79, pp.239~265.
- Ha, S.** (2009) Numerical Simulations of Crack Initiation and Propagation Using Cohesive Zone Elements, *J. Comp. Struct. Eng. Inst. Korea*, 22(6), pp.519~526.
- Kral, P., Hradil, P., Kala, J., Hokes, F., Husek, M.** (2017) Identification of parameters of a Concrete Damage Material Model, *Proc. Eng.*, 172, pp.578~585.
- Moes, N., Dolbow, J., Belytschko, T.** (1999) A Finite Element Method for Crack Growth without Remeshing, *IJNME*, 46, pp.131~150.
- Slowik, M., Nowicki, T.** (2012) The Analysis of Diagonal Crack Propagation in Concrete Beams, *Comput. Mech.*, 52, pp.261~267.
- Rabczuk, T., Belytschko, T.** (2006) Application of Particle Methods to Static Fracture of Reinforced Concrete Structures, *Int. J. Fract.*, 137, pp.19~49.
- Rabczuk, T., Bordas, S., Zi, G.** (2007) A Three Dimensional Meshfree Method for Continuous Multiple-crack Initiation, Propagation and Junction in Statics and Dynamics, *Comput. Mech.*, 40, pp.473~495.
- Slowik, M., Nowicki, T.** (2012) The Analysis of Diagonal Crack Propagation in Concrete Beams, *Comput. Mater. Sci.*, 52, pp.261~267.
- Snozzi, L., Molinari, J.F.** (2013) A Cohesive Element Model for Mixed Mode Loading with Frictional Contact Capability, *IJNME*, 93(5), pp.510~526.
- Sumer, Y., Aktas, M.** (2015) Defining Parameters for Concrete Damage Plasticity Model, *Chall. J. Struct. Mech.*, 1(3), pp.149~155.
- Yoo, H., Kim, H.** (2016) Simulation of Multi-Cracking in a Reinforced Concrete Beam by Extended Finite Element Method, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(2), pp.201~208.

### 요 지

범용유한요소프로그램인 Abaqus의 확장유한요소법(XFEM)의 사용성 검증을 위하여 2차원 모델에 적용하여 수치해석을 수행하였다. 기존의 연구에 많이 사용되었던 응집요소(cohesive element) 모델은 균열 경로를 예측하고 요소를 삽입하여야 하는 단점 때문에 실제 균열을 모사하는데 한계가 있다. 이러한 이유로 응력의 방향성 및 특이성을 바탕으로 균열의 경로를 예측하는 확장유한요소법(XFEM)이 균열 해석에 있어서 더 발전된 방법으로 이용되어 왔다. 이번 연구에서는 균열의 경로가 자명한 2차원 모델에 사용하여 응집요소해석과 XFEM에 응집요소의 물성을 적용한 해석을 비교하고 XFEM 적용의 타당성을 확인하였다. 수치해석으로 균열 발생 직전의 응력분포 및 응력 특이성을 확인하고 실제 균열 발생경로와의 비교를 한다. 본 연구를 바탕으로 몇 가지의 한계를 극복하면 실제 복잡한 모델의 실제 균열진전해석을 수행하여 균열을 모사할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 응집요소, 균열진전, XFEM, 범용유한요소프로그램