

# 선형탄성파괴역학을 이용한 단일 개재물을 갖는 비균질재료의 응력확대계수 변화에 대한 연구

## Analysis of stress intensity factors of a non-homogeneous material with a single inclusion using LEFM

조용건<sup>1</sup>, 서기정<sup>2</sup>, 최병호<sup>3</sup>, 이정무<sup>4</sup>

Y. J. Zhao<sup>1</sup>, K. J. Seo<sup>2</sup>, B. H. Choi(bhchoi@korea.ac.kr)<sup>3</sup>, J. M. Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 고려대 대학원 기계공학과, <sup>2</sup> 고려대 공학기술연구소, <sup>3</sup> 고려대 기계공학과, <sup>4</sup> LG 화학 테크센터

Key words : Inclusion, Linear elastic fracture mechanics(LEFM), Stress intensity factor(SIF)

### 1. 서론

최근 들어 수요 및 적용분야가 증대되고 있는 폴리머 재료에 대한 소재개발의 속도가 급속히 이루어짐에 따라 이에 대응하는 피로 및 파괴평가의 필요성이 대두되고 있다. 개재물이 포함된 구조 및 요소는 강성의 변화에 따른 재료적 불연속성과 형상에 따른 기하학적 불연속성을 동시에 내재하기 때문에 피로 및 파괴역학적 해석이 용이하지 않다. LEFM 하에서 유용하게 사용되는 SIF는 표준시험편 형태에 따라 비교적 간단한 경험식을 통해 계산될 수 있으나 개재물이 포함된 시험편에서의 SIF는 수치적 해석을 통해 접근이 가능하다. 이러한 이유로 개재물 또는 결함이 포함된 재료에 대한 SIF의 계산은 대부분 유한요소해석을 통해 이루어지고 있다.<sup>1-3)</sup> 기존의 개재물 또는 결함이 포함된 재료에 대한 피로평가는 금속재료에 대하여 널리 수행되었으나 폴리머 재료에 대한 평가는 미흡한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 개재물 또는 결함이 포함된 폴리머 재료에 대하여 유한요소해석을 통해 SIF를 계산하고 이로부터 피로특성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 결함이 없는 균질재료, 결함을 갖는 균질재료 그리고 개재물을 갖는 비균질재료에 대하여 각각 SIF를 계산하였고 그 결과를 비교 고찰하였다.

### 2. 유한요소모델

본 연구에서는 개재물의 기계적 물성, 형상 그리고 위치에 따라서 SIF의 변화를 평가하고자 유한요소해석을 수행하였다.

Fig.1 에는 유한요소해석에서 사용된 시험편의 형상 및 치수 그리고 해석모델의 요소를 표현하였다. Fig.1 에서  $a_0$ 는 초기균열길이를 그 크기는 10 mm 이다.  $c$ 와  $b$ 는 타원형상의 개재물에 대한 중형방향의 길이이며,  $b$ 는 1.5 mm 이다.  $d$ 는 개재물의 중심과 시험편의 중심 사이에 대한 거리이다.  $x$ 는 초기균열선단과 시험편 폭 중심 간의 거리이다.

응력확대계수를 계산하기 위하여 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 해석모델에 대한 요소는 CPS8(8-node bi-quadratic plane stress)을 사용하였고 다양한 해석조건에 대하여 평균적으로 870 개의 요소와 1270 개의 절점이 사용되었다. 모드 I 하중 하에서 재료의 균열선단에 작용하는 원거리 응력은 12.5 MPa의 크기를 갖고 재료의 푸아송 비는 0.4, 탄성계수는 1250 MPa 이다.  $a/W=0.33$ 인 초기균열길이를 부터  $a/W$ 가 0.6이 될 때까지 균열을 하중의 수직방향으로 일정 증분의 크기로 전파시켜 SIF를 계산하였다.

Table 1 에는 본 연구에서 수행된 유한요소해석의 조건에 관하여 두 가지 형태로 구분하여 case I과 case II로 표기하였다.  $d/x$ 가 0 일 경우 개재물은 시험편의 길이 및 폭에 대하여 그 중앙에 위치한다. 또한  $c/b$ 가 1 일 때 개재물의 형상은 원형이다. 여기서  $E_2/E_1$ 은 개재물의 기계적 물성을 탄성계수비로 표현한 값으로  $E_1$ 과  $E_2$ 는 각각 기재료 및 개재물의 탄성계수이다.  $E_2/E_1$ 이 0 인 경우 개재물이 아닌 결함

Table 1 Classification of analysis conditions in each case

	$d/x$	$c/b$	$E_2/E_1$
Case I	0	0.4, 1, 2	0, 0.2, 0.4, 0.7, 1, 2, 5, 10
Case II	0.3	1	

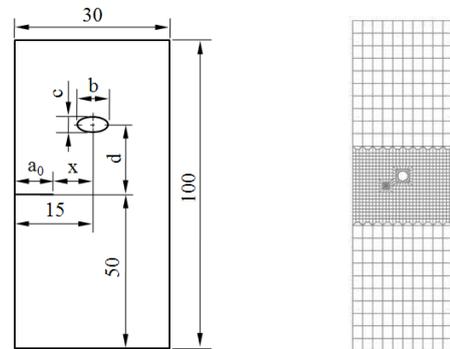


Fig. 1 Geometry of specimen and FEA model with inclusion

을 포함한 균질재료이며  $E_2/E_1$ 이 1 일 때 결함이 없는 균질재료의 시험편을 의미한다.

### 3. 해석결과 및 고찰

본 절에서는 균열전파길이에 따른 SIF의 변화를 개재물의 위치 및 형상에 따라 고찰하고자 한다.

Fig. 3 에 case I의 조건에서 개재물의 형상이 원형이고  $a/W$ 가 0.40 일 때 탄성계수비에 따른 응력분포 및 응력의 크기를 표현하였다. 여기서 붉은색 점선은 원공 및 개재물의 위치 및 크기를 투영하여 나타낸 것이다.  $E_2/E_1$ 이 0, 0.2, 1 그리고 2 일 때 응력의 크기는 각각 173, 159, 143 그리고 138 MPa의 크기를 보였다.  $E_2/E_1$ 이 1을 기준으로 원공결함이 있는 경우 응력은 더 크게 기재보다 탄성계수가 큰 개재물을 포함한 경우 응력은 더 작게 나타났다.

Fig. 3, 4, 그리고 5 에는 case I의 조건에서  $a/W$ 에 따른 SIF 값의 변화를  $E_2/E_1$ 의 크기에 따라 나타내었다. Fig. 3는 개재물의 형상이 원형이고 그 위치는 시험편의 중앙일 때의 결과이다. 균질체인  $E_2/E_1=1$  일 때 SIF는 균열이 전파함에 따라 꾸준히 증가한다. 개재물 이전 구간에서는 SIF 값은  $a/W$ 가 대략 0.40을 기준으로  $E_2/E_1$ 이 0과 0.2인 경우 SIF 값은 급격히 증가하였다. 여기서  $E_2/E_1$ 이 0인 경우 개재물이 아닌 원공결함을 의미하고 이는 기하학적 불연속성에 의한 전형적인 결과이다.<sup>4-5)</sup>  $E_2/E_1$ 이 1 미만인 경우 개재물의 효과는 미비하여 SIF 값의 거동은 원공결함의 경우와 유사한 추이를 보인다. 반면  $E_2/E_1$ 이 2, 5 그리고 10 일 때 SIF는 감소하였다. 개재물의 내부에서 균열이 전파하는  $0.45 < a/W < 0.55$  구간에 대한 SIF 값의 변화는 개재물 이전구간에 비해 확연한 차이를 보였다.  $E_2/E_1$ 이 0.2의 조건을 제외한 모든 조건에서 SIF 값은 증가하였다. 특히,  $E_2/E_1=10$ 과  $E_2/E_1=5$ 의 경우 그 증가세는 매우 컸다. 균열이 개재물을 벗어나기 직전인  $a/W=0.53$ 에서  $E_2/E_1=10$ 의 SIF 값은

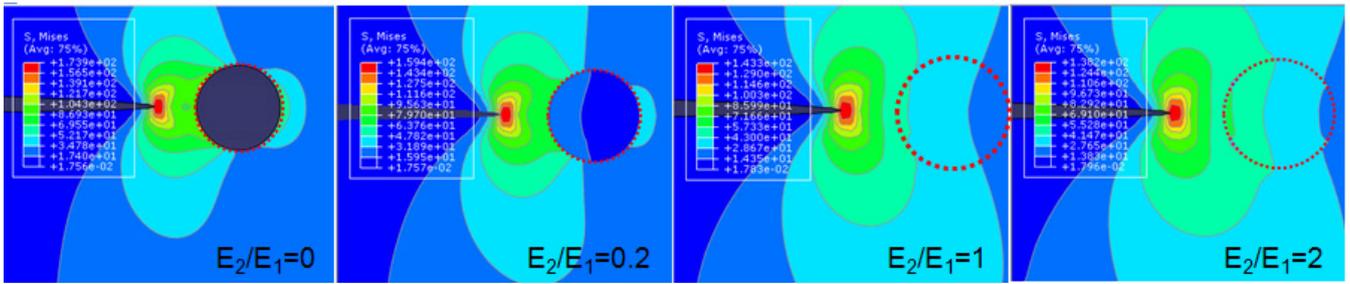


Fig. 2 FE stress analysis for the ratio of modulus of elasticity ( $d/x=0, c/b=1$ )

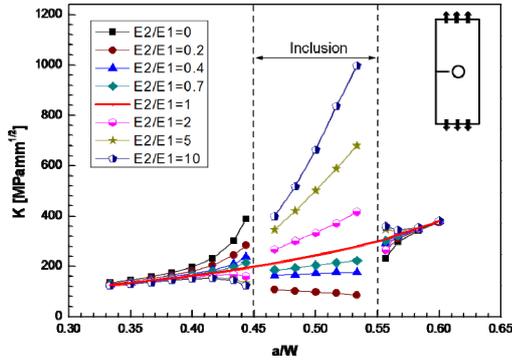


Fig. 3 SIF vs.  $a/W$  ( $d/x=0, c/b=1$ )

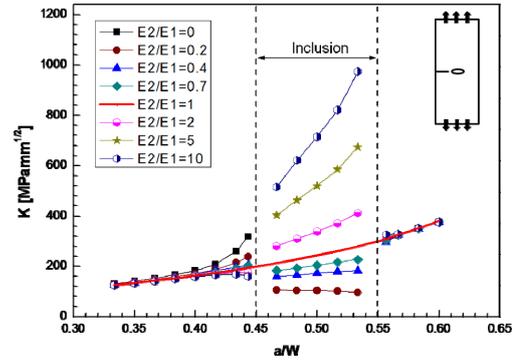


Fig. 4 SIF vs.  $a/W$  ( $d/x=0, c/b=0.4$ )

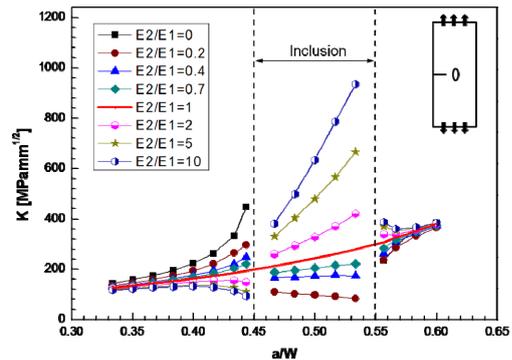


Fig. 5 SIF vs.  $a/W$  ( $d/x=0, c/b=2$ )

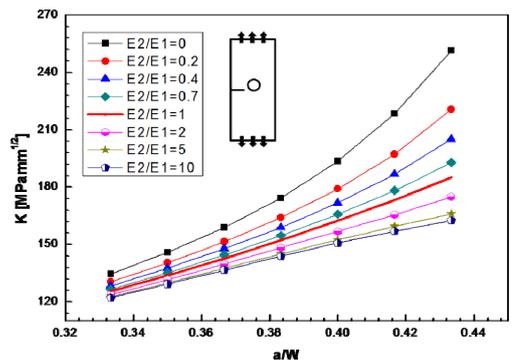


Fig. 6 SIF vs.  $a/W$  ( $d/x=0.3, c/b=1$ )

$E_2/E_1=0.2$  보다 12 배 정도 크게 나타났다. 균열이 개재물을 벗어난 후  $E_2/E_1=2, 5$  그리고 10의 조건에서는 SIF 값이  $0.55 < a/W < 0.57$  구간까지 감소한 후  $a/W=0.57$  구간 이후 서서히 증가하였고 그 이외의 조건에서는 감소 없이 증가하였으며  $a/W=0.6$  일 때는 같은 값을 보였다. 이렇게 균열이 전파함에 따라 개재물의 계면을 기준으로 SIF 값의 거동 변화는 탄성계수의 차이 즉, 기재와 개재물 사이의 변형량의 차이로 재료의 불연속성에 기인하는 것이다.

Fig. 4 는  $c/b=0.4$  인 타원형상의 개재물을 갖는 시험편에 대한 SIF 값의 변화이다. Fig. 3 와 유사한 거동을 보였으나 그 크기는 차이를 보였다.  $a/W=0.45$  그리고  $a/W=0.55$  인 개재물의 계면부근에서 각각의 조건에 대한 SIF 값의 차이는 Fig. 3 보다 작게 나타났다. 이러한 결과는 개재물의 형상이 원형인 Fig. 3 와는 다르게 개재물이 노치와 유사한 타원형상을 갖기 때문이다. 다시 말해 기하학적인 불연속성에 의한 SIF 값의 변화가 재료의 불연속성에 의한 SIF 값의 변화를 상쇄시켰기 때문으로 판단된다.

Fig. 5 는 개재물의 형상이 타원이고 종횡비가 2 일 때 SIF 값의 변화이다. Fig. 5 에서도 마찬가지로 SIF 값의 거동은 Fig. 3 그리고 4 와 전반적으로 유사하게 나타났다. 개재물의 계면 부근인  $a/W=0.443$  일 때 Fig. 4 에서는  $E_2/E_1=0$  에 대한  $E_2/E_1=10$  의 SIF 값의 차이는 대략 2 배였고, Fig. 5 에서는 대략 4.8 배 정도의 차이를 보였다. 또한  $a/W=0.556$  일 때  $E_2/E_1=0$  에 대한  $E_2/E_1=10$  의 SIF 값은  $c/b$  가 0.4 인 Fig. 4 에서 약 1.1 배로 상당히 유사한 값을 보였고,  $c/b$  가 0.2 인 Fig. 5 에서는 1.7 배로 나타났다. Fig. 4 와 Fig. 5 는 상

반된 형상의 개재물을 갖는 조건으로 그 형상이 노치효과의 대소를 가늠하게 해주는 중요한 인자로 작용함을 알 수 있다.

Fig. 6 에 개재물의 case II 에 대한 SIF 값의 변화를 나타내었다. 균열전파에 따라 개재물을 포함한 경우  $E_2/E_1=1$  보다 작은 조건에서의 SIF 값이  $E_2/E_1=1$  보다 큰 조건에서 보다 높게 나타났다. 이러한 원공 또는 개재물의 탄성계수비에 따른 SIF 값의 차이는 Fig. 2 의 결과로 설명될 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 비균질의 폴리머 재료에 대한 피로특성을 평가하기 위한 일환으로 다양한 조건에서의 균열전파에 따른 SIF 의 변화를 비교하였다. 그 결과 결함이나 개재물이 없는 균질의 폴리머 재료에 비하여 비균질의 폴리머 재료에 대한 SIF 는 기재에 대한 개재물의 탄성계수비와 개재물의 형상 그리고 위치에 따라 서로 다른 크기를 갖는 것으로 확인되었다. 또한 동일한 탄성계수비에서 균열의 전파에 따라 개재물에 인접하는 과정과 개재물 내에서 균열이 전파하는 경우 그리고 개재물을 벗어나 전파하는 경우에 대하여 각기 다른 경향을 보임을 알 수 있었다. 따라서 좀 더 다양한 형상의 개재물과 위치에 따른 SIF 의 크기를 비교 평가할 필요가 있으며, 특히 기재와 개재물 사이의 계면에 대한 추가적인 연구가 더 필요한 것으로 확인되었다.