

# EFG법을 사용한 다수균열 함유 강부재의 피로균열 성장거동 해석

## Fatigue Crack Growth Analysis by EFG Method in Steel Components with Multiple Cracks

이 상 호\*                      윤 영 철\*\*  
Lee, Sang-Ho                      Yoon, Young-Cheol

### 요 지

본 연구에서는 요소를 사용하지 않는 새로운 해석방법인 EFG(Element-Free Galerkin)법을 사용하여 복수의 초기균열을 지닌 강재가 반복피로하중을 받는 경우 균열들이 점진적으로 성장하여 부재가 파단에 이르는 과정을 해석적으로 규명하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 일반적인 피로균열성장법칙을 EFG법을 이용한 균열해석 알고리즘에 적용하여 복수의 균열들이 각각의 응력상태에 따라 차별적으로 성장해 나가는 과정을 해석할 수 있는 알고리즘을 도입하고 이를 바탕으로 다양한 하중상태하에서 복수의 균열들의 성장경로를 추정함과 동시에 이에 따른 잔존수명을 산정할 수 있는 기법을 제시하였다. 본 연구에서 제안된 해석방법을 피로균열 발생빈도가 큰 몇가지의 강부재 형태에 적용해 본 결과 다수균열 함유 부재의 피로균열 성장거동과 균열들의 피로수명을 성공적으로 예측할 수 있었다.

**핵심용어** : EFG법, 복수균열, 피로균열성장경로, 피로수명

### Abstract

The simultaneous multiple crack growth analysis in a steel structural component under cyclic fatigue loading using a meshfree computational method called Element-Free Galerkin (EFG) Method has been studied. The modeling of multiple cracks gradually propagating from the given initial defects or notches like crack condition simulating the component crack failure mode has been achieved. A general fatigue crack growth law has been applied to the EFG stress analysis of steel components with multiple cracks. An algorithm that calculates the remaining fatigue life of the component has been developed based on the technique which can predict a unique multiple crack growth path for various stress state with accuracy. The developed method was used to analyze two structure components (1) a plate with two initial punched holes and (2) a cross shaped plate with two initial cracks at the coped region under various loading conditions. The results show most probable crack growing path and rate as well as the remaining fatigue life for the analyzed components under given loading condition.

**Keywords** : Element-Free Galerkin method, multiple cracks, crack growth path, fatigue life

\* 정회원 · 연세대학교 토목공학과, 조교수  
\*\* 정회원 · 연세대학교 토목공학과, 박사과정

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

강재는 제작의 질에 따라 미세균열, 용접부의 결함, 공극과 같이 다양한 초기결함을 지니고 있으며 구조물의 공용기간동안 반복적인 피로하중에 의해 균열로 발전하고 계속적으로 성장하게 된다.

균열진전현상의 해석적 연구는 Anderson<sup>1)</sup>이 탄소성 파괴역학문제를 유한요소법을 이용하여 접근한 이후로 수많은 연구들이 이루어졌다. Malluck과 King<sup>2)</sup>은 초기균열에서 유한요소의 경계를 따라 균열의 성장을 해석하는 Nodal Release Method를 제안하였고, Swenson과 Ingraffea<sup>3)</sup>는 이와 같은 Nodal Release 기법과 균열선단주위의 세밀한 요소망을 사용해 균열성장을 예측하였다. Lim 등<sup>4)</sup>은 혼합모드의 균열문제에 대해 선형탄성파괴역학에 기초한 균열성장방향에 대한 기준, 파괴기준과 함께 자동으로 요소망을 재구성하는 기법을 이용하여 균열 성장시 발생한 소성이 고려된 균열성장 해석기법을 제시하였다. Schlangen과 Mier<sup>5)</sup>는 미리 계산된 균열의 경로상에 강성이 매우 큰 스프링으로 연결된 두개씩 쌍을 이루는 절점들을 배치하여 균열의 성장현상을 묘사하려고 하였으며, Al-Ostaz와 Jasiuk<sup>6)</sup>는 항복한계에 도달한 요소를 제거하는 기법으로 균열성장과정을 해석하려 하였다. 그러나 이러한 방법들은 성장하는 균열을 모형화하기 위해 요소망을 재구성하는 방법을 사용하고 있어서 피로균열의 전파문제에 적용해도 역시 요소망을 반복적으로 재구성해야 하는 문제에 부딪히게 되며, 피로균열성장을 위한 적분과 함께 이때 필요한 응력확대계수범위의 계산 역시 요소망의 수정에 맞추어 반복적으로 수행해야 하는 어려움이 있다.

한편, 균열진전해석에서 필수적인 응력확대계수를 계산하기 위한 기법으로는 유한요소법<sup>7),8)</sup>이나 경계요소법<sup>9),10)</sup>, 대안적으로 변형된 유한요소법<sup>11)</sup>과 p-version 유한요소법<sup>12)</sup> 등을 이용한 일반적인 목적의 수치해법들이 수정되어 사용되어 왔다.

공학적인 피로균열성장문제의 해석에 있어서는 파괴역학에 기반을 두고 개발된 모형들이 자주 사용되어 왔다. 대표적으로 균열선단의 다양한 소성변형양상에 기초하여 Paris<sup>13)</sup>가 제안한 균열성장법칙(이것은 Wheeler<sup>14)</sup>와 Willenborg 등<sup>15)</sup>의 모형을 포함한다), Crack Tip Opening Displacement(CTOD)를 이용

한 방법<sup>16)</sup>과 Elber의 관계식<sup>17)</sup> 등이 제안되었다. 여기서, CTOD방법은 균열선단의 소성변형을 피로균열성장의 특징을 직접적으로 규정짓는 파라메타로서 사용하며, Elber의 닫힘모형은 피로균열 표면에서의 소성변형을 고려한 것으로 Paris 법칙으로부터 나온 또 하나의 모형이다. Wheeler와 Willenborg 등이 제안한 지연(retardation)모형 역시, Paris 법칙을 변형하여 균열성장비에 대한 과대하중의 효과를 소성역의 변화를 이용해서 고려하고 있다. Paris 법칙은 균열성장비와 응력확대계수범위 사이에서 로그좌표상의 선형관계를 사용하는데 이 관계를 균열성장비에 대한 응력확대계수의 문턱값(threshold stress intensity factor) 등의 요소들을 이용하여 영역 III까지 사용할 수 있도록 수정한 Forman의 공식<sup>18)</sup>, 응력비의 효과가 보완된 Walker의 공식<sup>19)</sup> 등이 제안되기도 하였다. 이와 같은 방법들에서 균열선단의 거동을 표현하는 파라메타로 응력확대계수범위를 적용함에 있어 각각의 제안된 목적에 맞게 수정하여 사용하고 있다.

한편, 균열은 항상 직선으로 자라지는 않는다. 때로는 꺾이면서 성장하게 된다. 이러한 혼합모드의 균열이 복잡한 하중상태에서 연속적으로 꺾이면서 자라는 거동을 해석적으로 예측하는 것은 그 동안 쉽지 않았다. 여기에는 반드시 고려되어야 하는 기본적인 몇 가지 사항이 있는데 그것은 혼합모드상태에서도 사용할 수 있는 파괴기준과 균열의 성장경로를 추정하기 위한 균열진전방향에 대한 기준, 그리고 균열이 성장하는 물리적 현상을 표현할 수 있는 수치기법이다. 본 연구에서 다루려고 하는 강재에 존재하는 복수의 초기균열들이 피로하중을 받아 성장하는 문제는 균열이 다수라는 점이나 혼합모드를 고려해야 하는 난점 외에도 균열들이 상호영향을 미치면서 피로하중 재하횟수에 따라 연속적으로 성장하는 과정을 묘사해야 하기 때문에 기존의 방법들로는 다루기 어려운 점이 많이 있다.

이런 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 요소를 사용하지 않는 새로운 수치해석방법으로서 최근 활발히 연구되고 있는 무요소법의 하나인 Element Free Galerkin(EFG)법<sup>20)</sup>을 이용하여 다수의 피로균열 성장문제에 접근하였다. 즉, EFG법을 이용한 균열 해석기법에 여러가지 방식으로 수정된 여타의 피로 균열성장비에 대한 이론들을 도입함에 앞서 비교적 간

편하게 피로균열성장을 묘사할 수 있는 Paris가 제안한 피로균열모형을 도입하였다. Paris법칙은 피로균열의 성장을 묘사함에 있어 균열선단의 소성변형과 응력확대계수간의 유일한 관계를 규정하여 그 적용이 간단하고, 균열선단의 소성역이 작은 경우에 계산결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 밝혀져 있다.

본 논문에서는 먼저 EFG법의 정식화과정과 EFG법을 이용한 균열해석기법에 대해 간략하게 살펴 본 후, 피로균열 성장모형을 도입하여 다수의 피로균열이 성장하는 메카니즘을 해석할 수 있는 기법을 제시하였다. 다음으로 대표적인 다수의 피로균열성장 문제에 대한 수치예제를 통하여 피로균열의 성장경로를 추정함과 동시에 그에 상응하는 피로수명을 해석적인 방법으로 산정하여 제안된 기법의 적용성을 검증하였다.

## 2. EFG법을 이용한 균열해석

### 2.1 EFG법의 개요

EFG법에서는 이동최소제곱근사법(Moving Least Squares Approximation)을 이용하여 근사변위함수  $u_i^h$ 를 공간의 차수를 표현하는 다항식벡터  $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ , 그리고 다항식벡터와 절점 상호간의 위치에 따른 가중함수(weight function)  $w_I(\mathbf{x})$ 의 곱으로 표현되는 매트릭스  $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ 와  $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ 에 의해 다음과 같이 정의한다.

$$u_i^h(\mathbf{x}) = \sum_I \sum_{n=1}^m p_I(\mathbf{x})(\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{B}(\mathbf{x}))_{II} u_{In} \\ = \sum_{I=1}^{n_m} \Phi_I(\mathbf{x}) u_{In} \quad \mathbf{x} \in \Omega \quad (1)$$

이때, 근사변위함수는 기준점으로부터 일정한 크기의 영향영역내에 포함되는  $n_{sm}$ 개의 절점들만을 대상으로 근사화과정이 이루어지게 되며,  $n_{sm}$ 개 절점들의 영향값의 합에 의해 표현될 수 있다는 점이 기존의 수치해석방법과 크게 다른 점이라 할 수 있다. 따라서 어느 기준점  $\mathbf{x}$ 를 중심으로 일정한 크기의 영향영역내에 위치하는 임의의  $I$ 번째 절점의 형

상함수  $\Phi_I(\mathbf{x})$ 는 결국 식(2)와 같이 표현할 수 있으며, 매트릭스  $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ 와  $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ 는 각각 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_I(\mathbf{x}) = \sum_I P_I(\mathbf{x})(\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{B}(\mathbf{x}))_{II} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^{n_m} w(\mathbf{x}-x_I) \mathbf{p}(x_I) \mathbf{p}^T(x_I) \quad (3)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = [w(\mathbf{x}-x_1) \mathbf{p}(x_1), \dots, w(\mathbf{x}-x_{n_m}) \mathbf{p}(x_{n_m})] \quad (4)$$

요소를 사용하지 않는 EFG법에 있어서 각 절점의 근사변위함수와 형상함수를 결정하기 위해 사용하는 영향영역은 일반적으로 원이나 사각형의 형태를 취한다. 영향영역 내에는 적절한 개수의 절점이 포함되도록 해야 수치해의 정도를 보장하면서 동시에 빠른 계산을 수행할 수 있다.

무요소법의 정식화를 위한 또 하나의 중요한 요소는 가중함수를 결정하는 일이다. 가중함수  $w_I(\mathbf{x}) = w(\mathbf{x}-x_I)$ 는 기준점  $\mathbf{x}$ 의 영향영역내에 포함된 임의의 절점  $x_I$ 들이 갖게 되는 거리에 따른 가중치를 결정해 주는 함수로서,  $x_I$ 가 기준점  $\mathbf{x}$ 에 가까울수록 커지고 반대로  $x_I$ 가 멀어질수록 작아지며,  $x_I$ 가 영향영역 밖에 위치할 경우는 그 값이 0이 되는 특성을 갖고 있다. 본 연구에서는 지수함수형태의 Gaussian 가중함수와 quartic spline형태의 가중함수를 사용하였으며, 절점의 밀도에 따라 크기를 적절히 변화시킬 수 있는 원형형태의 영향영역과 함께 선형다항함수를 사용하여 EFG법에 의한 정식화 과정을 수행하였다. EFG법에 의한 정식화과정은 참고문헌<sup>20)</sup>에 자세히 나와 있다.

### 2.2 균열의 모형화와 EFG법을 이용한 균열해석기법

EFG법을 사용하여 균열을 모형화하는 과정에 있어서 적절히 배치된 절점들만을 이용하여 균열의 불연속성과 특이성을 표현하는 것이 중요하다. 이 과정에서 수치적인 기법을 이용하여 균열의 위치를 인식시키고 처리하는 과정의 도입이 필요하며, 또한 균열이 진전하는 경우에는 균열의 성장경로를 따라

가면서 새로운 균열의 기하학적 형상을 묘사해주어야 한다. EFG법에 파괴역학이론을 접목하여 정적·동적 균열성장문제를 해석할 수 있는 기법에 대한 연구동향과 함께 균열을 모형화하는 기법 그리고 본 연구자들에 의한 혼합모드균열의 진전해석기법에 대한 상세한 설명은 이상호 등<sup>28), 29)</sup>을 참조할 수 있다.

본 연구에서 균열해석을 위해 필요한 응력확대계수의 계산은 가상의 응력장을 이용하여 영역적분을 수행하는 교차적분법<sup>21)</sup>을 사용하였다. 한편 균열의 성장방향을 결정하기 위한 균열성장각  $\theta$ 는 균열이 최대 hoop응력에 직각인 방향으로 진전하는 것으로 가정하는 최대주응력한계론<sup>22)</sup>을 이용하여 계산하였다. 혼합모드상태에 대해서는 모드별 응력확대계수값을 등가의 모드 I 응력확대계수값으로 바꾸어 적용하였다.

균열해석에 사용하는 EFG 형상함수는 균열선단에서 나타나는 응력장의 특이성과 균열로 인해 불연속해질 수 있다. 즉, 형상함수가 균열선단 주변에 위치하여 영향영역내에 균열선단이나 균열을 포함하는 경우에는 부드럽지 못하고 불연속해지는 것이다. 이러한 형상함수는 적절하게 수정되어야 균열선단주변에서 연속성을 유지하며 정도 높은 해를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 균열선단주변에서 해의 정도향상을 꾀하기 위하여 형상함수를 구하려는 절점과 영향영역내에 들어온 절점간의 거리를 수정하여 가중함수와 다항식벡터에 적용하는 방법<sup>23)</sup>을 사용하였다. 이 방법에서는 영향영역을 불연속하게 만드는 균열이 빛의 통과를 막는 장애물이라고 생각하고 빛이 회절하는 원리를 적용함으로써 균열선단주위의 형상함수에 연속성을 부여하는 것이다. 이 방법은 균열 반대편에 있는 절점에 대한 영향도 적절히 고려할 수 있게 해주어 매끄럽고 연속적인 형상함수와 근사변위함수의 도출을 가능하게 해 준다.

### 3. 피로균열성장법칙을 이용한 다수균열의 성장해석

#### 3.1 피로균열성장 미케니즘

피로과정은 본래 반복적이다. 피로균열의 성장모형은 균열모형이 하중의 한 주기 동안 일어나는 과

정을 설명함으로써 균열진전 미케니즘을 묘사할 수 있다. 미시적으로 보면 균열성장의 미케니즘은 재료를 이루는 입자들이 어긋나게 위치하게 되고 이 입자들이 이동하여 발생하는 현상이지만, 공학적으로 이용하기 위해서는 다른 방식의 접근이 필요하다. Paris<sup>13)</sup>는 일정진폭의 주기하중에 대해 피로균열성장비가 하중의 크기보다는 균열선단의 응력확대계수 범위의 영향을 더 많이 받는다는 것을 관찰하고 거시적인 관점에서 파괴역학 파라미터의 함수들로 피로균열 성장에 관한 경험적인 식을 식(5)와 같이 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

이 식은 피로균열이 발생하고 안정적으로 성장하여 급격히 파괴에 이르게 되는 성장단계를 간단한 수식으로 표현한 것으로 여기서,  $a$ 는 균열길이,  $N$ 은 피로하중주기,  $\Delta K$  (즉,  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ )는 피로하중에 대한 응력확대계수범위이며,  $C$ 와  $m$ 은 재료와 관련된 상수이다. Paris법칙에서는 균열성장실험의 결과를 토대로 하여 어떤 값 이하에서는 피로균열이 성장하지 않게 되는 문턱값의 개념을 도입하는데, 본 연구에서 고려하는 하중이 단순반복인장하중이므로 문턱값  $\Delta K_{\text{threshold}}$ 를  $5.5 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$  ( $6 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ )로 가정하여 균열진전해석을 수행하였다.<sup>24)</sup> 그러나 Paris법칙은 응력비의 효과나 변동하중, 그리고 피로균열의 지연현상을 고려할 수 없음을 기억할 필요가 있다.

#### 3.2 일정진폭하중을 받는 다수균열의 성장 알고리즘

강부재 내에 다수의 균열이 존재하는 경우에는 하중상태나 경계조건, 또는 균열의 형상에 따라 균열선단주변에서의 응력장이 달라지므로 균열들이 서로 다른 양상으로 성장하게 된다. 따라서, 일정범위를 갖는 반복적인 피로하중에 의해 다수의 균열들이 각각의 응력상태에 따라 차등적으로 성장할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 이러한 연구는 Flemming<sup>25)</sup>에 의해 연구된 바 있으며, 본 연구에서는 그 연구 결과를 바탕으로 다수의 균열을 동시에 성장시키기 위한 알고리즘을 다음과 같이 제시하였다.

먼저 각각의 균열에 대해 등가의 모드 I 응력확대계수범위,  $\Delta K_{Ieq}$  를 구한 다음, 이 값이 가장 큰 균열에 대해 미리 가정한 허용균열진전량,  $\Delta a_{max}$  만큼 자랄 수 있는 피로하중주기를 계산한다. 다음으로, 계산된 횟수만큼의 하중을 균열이 포함된 강부재 전체에 작용시켜, 각각의 균열에 대해 계산된 응력확대계수범위를 바탕으로 각 균열들의 진전량을 계산하면 다수균열의 진전상태를 판단할 수 있다. 이 과정을 반복적으로 수행하면 일정진폭하중을 받는 다수의 피로균열들의 성장경로와 그에 따른 피로수명을 계산할 수 있게 된다. 여기서 주의할 점은 피로균열의 성장에 대한 적분을 수행할 때 균열진전량을 적절하게 가정해 주어야 계산시간을 절약하는 동시에 균열이 성장하는 경로를 정확히 추정할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 균열전파과정의 해석시 균열선단의 특이성을 나타내는 영역이 국부적이라고 가정하여 균열들이 그 선단 앞쪽의 압축영역으로 인해 서로 반발하는 현상(shielding 현상)과 인접하는 균열선단들 사이의 상호작용을 균열형상에 따른 응력해석시 고려되는 사항으로 간주하였으며 응력확대계수를 계산할 때에는 이런 영향을 고려할 수 있는 항들을 따로 도입하지 않았다.

본 연구에서 사용한 다수의 피로균열성장 알고리즘을 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다.

#### 4. 다수균열함유 강재의 피로파괴거동 해석

##### 4.1 원공에서 발생한 복수의 초기균열의 성장

본 절에서는 평판내에 존재하는 두개의 원공에 위치한 초기균열들의 성장문제를 다루었다. 그림 2는 해석을 위한 모형을 나타낸 것으로 100psi(7.031kgf/cm<sup>2</sup>)의 단순인장하중이 작용할 때, 해석대상모델을 평면응력상태로 가정하고 초기균열은 두개의 원공에서 각각  $\alpha = +18^\circ$ ,  $\beta = -18^\circ$  씩 경사지게 발생한 것으로 가정하였다. 평판의 탄성계수는  $3.0 \times 10^7$  psi ( $4.25 \times 10^8$  kgf/cm<sup>2</sup>), 포아송비는 0.25를 사용하였으며, 최대허용 균열진전량은 매 단계마다 0.3 inch로 가정하고 12단계에 걸쳐 해석을 수행하였다.

그림 3은 본 연구에서 제시한 다수의 균열을 성

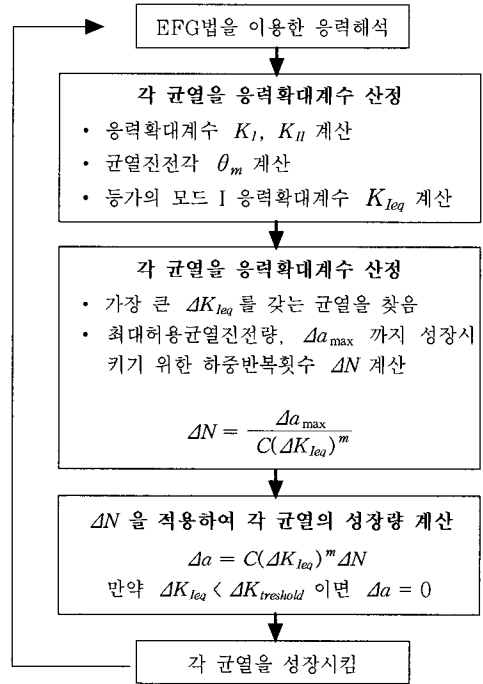


그림 1 다수의 피로균열 성장 알고리즘

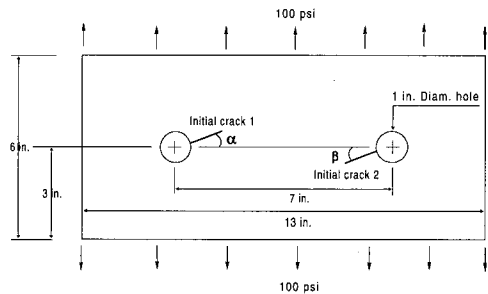


그림 2 인장하중을 받는 두개의 원공에서 발생한 피로균열의 성장

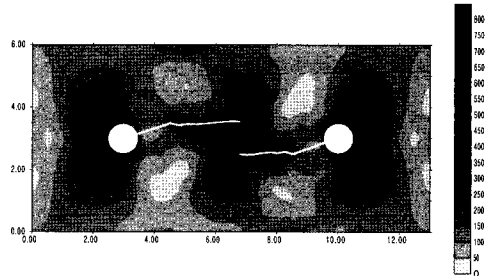


그림 3 두개의 균열이 인접한 시점의 von Mises 응력분포도(단위: psi)

장시킬 수 있는 알고리즘을 적용하여 각 균열이 어느 정도 자라서 서로 영향을 미치고 있는 상태의 von Mises 응력분포를 나타낸 것이다. 여기서 균열들이 성장하여 균열선단들이 가까이 접근하면서 평판의 중앙부에 큰 응력집중부가 형성된 것을 볼 수 있으며, 초기균열의 선단이 위치했던 부분에 집중되었던 응력들은 이완된 것을 확인할 수 있다. 이 문제에서 보듯이 균열을 포함한 강부재는 단순한 인장하중을 받고 있지만 균열들이 하중의 방향에 대해 기울어져 배치되어 있기 때문에 혼합모드의 성장거동을 보이고 있다. 그림 4는 피로균열의 성장과정을 몇 개의 단계로 나누어 도시한 것으로 EFG해석을 위한 절점의 배치와 균열의 성장에 따른 새로운 절점의 생성 및 재배치 과정을 볼 수 있으며, 균열선단의 앞쪽에 형성되는 압축응력영역으로 인하여 균열의 선단이 서로 만나지 않고 피하면서 상당한 길이까지 성장해 나가는 부재의 파괴모드를 보여주고 있다. 이와 같은 해석결과는 Solveig<sup>26)</sup>가 마주보고 성장하는 균열에 대해 이론적·실험적으로 연구한 결과나 Belytschko 등<sup>27)</sup>이 두 개의 원공에서 성장하는 두 균열의 성장거동과 초기균열의 경사에 따른 bridging효과에 대해 연구한 결과를 통하여 그 타당성을 확인할 수 있다.

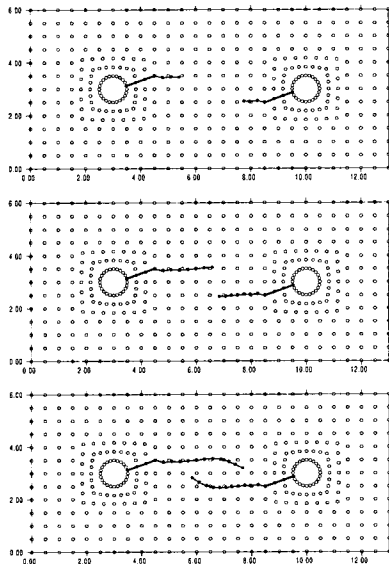


그림 4 원공에 발생한 피로균열의 단계별 성장경로

#### 4.2 다축응력을 받는 십자형 직각절취단부에서 발생한 복수 균열의 성장

본 절에서는 강교량 등의 연결부에 존재할 수 있는 직각절취부를 갖는 십자형 강부재에 발생한 균열이 다축응력을 받는 경우의 문제를 다루었다. 수평과 수직방향의 하중크기가 다른 네가지 경우에 대한 균열진전해석을 통하여 응력상태에 따라 각각의 균열이 서로 다른 경로와 수명으로 진파되는 과정을 수치적인 방법으로 추정할 수 있음을 보였다. 그림 5에는 수평방향과 수직방향으로 단순반복인장하중을 받고 있는 2개의 초기균열을 지닌 십자형 해석모형을 도시하였으며, 표 1에는 서로 다른 네가지의 하중조합에 대한 각각의 응력상태를 나타내었다. 대상모델의 탄성계수는  $3.0 \times 10^7 \text{ psi}$  ( $4.25 \times 10^8 \text{ kgf/cm}^2$ ), 포아송비는 0.25, 재료의 파괴인성치는  $185 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ 를 사용하였다. 그리고 균열성장비와 관련된 재료 상수  $C$ ,  $m$ 은 각각  $6.6 \times 10^{-9}$ 과 2.25를 이용하였으며, 최대허용 균열진전량은 현실적으로 조금 큰 값이지만 해석상의 편의를 도모하기 위하여 1 inch로 가정하고 평면응력상태로 해석을 수행하였다.

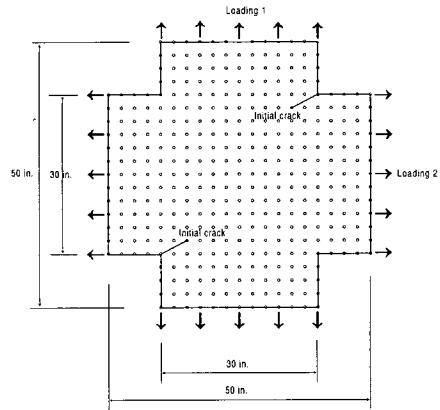


그림 5 초기균열을 지닌 다축응력상태의 십자형 부재 모형

표 1 하중조건에 따른 다축응력상태

Case	Loading 1 (수직방향)	Loading 2 (수평방향)
1	30 ksi	10 ksi
2	10 ksi	30 ksi
3	20 ksi	20 ksi
4	10 ksi	20 ksi

그림 6에는 본 논문에서 제안된 기법을 이용하여 해석한 결과를 바탕으로 선별된 반복피로하중의 재하횟수에 대하여 네가지 하중상태에 따른 피로균열의 성장정도를 비교하여 나타냈으며 이와 함께 최종적인 부재의 파괴형상을 도시하였다. 이때 각 하중 경우에 대해 균열이 진전하면서 취대응력확대계수가 가정한 파괴인성치를 초과하면 부재가 파단되는 것

으로 가정하였다. 그림 6의 결과를 살펴보면 하중조건에 따라 균열의 성장경로가 각기 다를 수 있다. Case 1은 수직방향 하중이 상대적으로 크게 작용하므로 균열들이 하중과 직각을 이루는 수평한 방향으로 성장하였고, 반면에 Case 2는 수평하중의 크기가 상대적으로 크기 때문에 균열들이 수직 방향으로 성장하는 경향을 보였다. 수평과 수직

하중재하 횟수	하 중 조 건			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
16,000회				
32,000회				
54,000회				
87,000회				
부재의 파괴형상				

그림 6 다축응력상태에 따른 피로균열의 성장속도 및 파괴모드

방향의 하중의 크기가 동일한 Case 3 역시 전형적인 혼합모드 양상을 보였으며 균열이 경사진 상태로 성장하다 균열선단의 상호작용에 의해 서로 내측으로 휘어지면서 성장하는 현상을 보였다. 이러한 결과는 4.1절의 결과와 유사한 사례이다. Case 4는 Case 2에 비해 수평하중의 크기만이 감소된 경우인데, 두 경우의 피로균열 성장경로는 비슷하지만 Case 4의 균열성장속도가 훨씬 느린 것을 알 수 있다.

그림 7은 각각의 하중상태에 대해 계산된 피로수명을 보여주고 있는데 경사진 초기균열로 인해 수평과 수직방향 하중의 상대적 비에 따라 피로균열의 성장에 유리하거나 또는 불리한 조건이 형성될 수 있음을 알 수 있다. 즉, 균열의 진전시 모드 I과 모드 II의 영향이 동시에 나타나는데, 모드 I의 영향을 많이 받을수록 균열이 빠르게 성장하는 경향을 나타냈다. 주어진 초기균열의 형상에 대해 Case 1이 피로수명이 가장 짧고, 하중조합이 2, 3, 4경우로 갈수록 수명이 길어졌다. 이것은 앞서 언급한 것처럼 초기균열의 성장이나 수명은 응력상태에 따른 균열의 성장모드와 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이다.

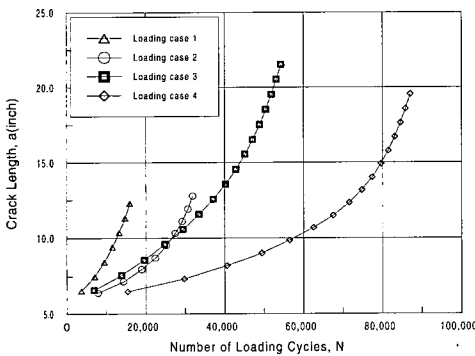


그림 7 하중조건에 따른 피로성장 곡선

## 5. 결론

본 논문에서는 일반적인 피로균열성장법칙을 EFG법을 이용한 균열해석기법에 적용하여 복수의 균열들이 각각의 응력상태에 따라 차별적으로 성장해 나가는 과정을 해석할 수 있는 알고리즘을 개발하였으

며, 이를 이용하여 반복피로하중하에 있는 복수의 초기균열을 함유한 강부재의 파괴과정을 해석적으로 규명하였다. 연구결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 개발된 방법을 사용하여 다수균열 함유 부재의 피로균열 성장거동과 균열들의 피로수명을 성공적으로 예측할 수 있었다.

2) 혼합모드 문제에 있어 일정진폭의 주기하중을 받는 피로균열은 하중조건이나 균열들의 기하학적 형상에 의존하는 응력장에 따라 서로 다른 성장경로와 피로수명을 나타내었고 주어진 파괴인성치를 통해 부재의 파단시점을 예측할 수 있었다.

3) 균열이 발생한 강구조물의 사용성을 판단하여 보수나 보강의 필요성 여부나 그 시기를 결정하는데 있어 본 연구의 성과가 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원 방재기술연구센터의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. Anderson, H., "A finite element representation of stable crack growth", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 21, 1973, pp.337~356
2. Malluck, J. F. and King, W. W., "Fast fracture simulated by conventional finite elements: A comparison of two energy-release algorithms", *Crack arrest methodology and applications, ASTM STP*, Vol. 711, 1980, pp.38~53
3. Swenson, D. V. and Ingraffea, A. R., "Modeling mixed-mode dynamic crack propagation using finite elements: Theory and applications", *Computational Mechanics*, Vol. 3, 1988, pp.381~397



4. Lim, I. L., Johnston, I. W., Choi, S. K., and Murti, V., Improved numerical inverse isoparametric mapping technique for 2D mesh rezoning", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 41, No. 3, 1992, pp.417~435
5. Schlangen, E. and Mier, J. G. M., "Experimental and numerical analysis of micro-mechanisms of fracture of cement-based composites", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 14, 1992, pp.105~118
6. Al-Ostaz, A. and Jasiuk, I., "Damage initiation and propagation in an elastic brittle material with randomly distributed holes", *ASME*, In 1995 winter annual meeting.
7. Tracey, K. M., "3D elastic singularity element for evaluation of K along an arbitrary crack front", *International Journal of Fracture*, Vol. 9, 1973, pp.340~343
8. Banks-Sills, L., "Application of the finite element method to linear elastic fracture mechanics", *Applied Mechanics*, Rev., Vol. 44, 1991, pp.447~461
9. Heliot, J., Labbens, R. C. and Pellissier-Tanon, A., "Semi-elliptical cracks in a cylinder subjected to stress gradients", *ASTM STP*, Vol. 677, 1979, pp.341~364
10. Isida, M. and Noguchi, H., "Tension of a plate containing an embedded elliptical crack", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 20, 1984, pp.387~408
11. Nishioka, T. and Atluri, S. N., "Analytical solution for embedded elliptical cracks and finite element-alternation method for elliptical surface cracks subjected to arbitrary loadings", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 17, 1983, pp.247~268
12. Andersson, B., Babu ka, I., Petersdorff, T. von and Falk, U., "Reliable stress and fracture mechanics analysis of complete aircraft components using a h-p version of FEM", *FFA TN 1992-17*, The Aeronautical Research Institute of Sweden Stockholm.
13. Paris, P. C. and Erdogan, F., A critical analysis of crack propagation laws, *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. D85, 1963, pp.528~534
14. Wheeler, O. E., "Spectrum loading and crack growth, *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 94, 1972, pp.181~186
15. Willenborg, D. J., Engle, R. M. and Wood, H. A., "A crack growth retardation model using an effective stress concept", AFFDL TM-71-1-FBR, 1971
16. Wells, A. A., Application of fracture mechanics at and beyond general yield, *British Welding Journal*, Vol. 10, 1963, pp.563~570
17. Elber, W., Fatigue crack closure under cyclic tension, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 2, 1970, pp.37~45
18. Forman, R. G., Kearney, V. E. and Engle, R. M., "Numerical analysis of crack propagation in a cyclic-loaded structure", *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 89, 1967, pp.459~464
19. Walker, K., "The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum", in *Effect of environment and complex load history on fatigue life*, ASTM STP 462, Philadelphia, 1970
20. Belytschko, T., Lu, Y. Y. and Gu, L., "Element-free Galerkin methods", *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 37, 1994, pp.229~256
21. Moran, B. and Shih C. F., "Crack tip and associated domain integrals from momentum and energy balance", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 27, 1987, pp.615~641
22. Erdogan, F. and Shi, G. C., "On the crack extension in plates under loading and transverse shear", *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, 1963, pp.519~527

23. Organ, D., Fleming, M., Terry, T. and Belytschko, T., "Continous meshless approximations for nonconvex bodies by diffraction and transparency", *Computational Mechanics*, Vol. 18, 1996, pp.225~235
24. Barsom, J. M. and Rolfe, S. T. *Fracture and fatigue control in structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987, p.284
25. Flemming, M., "The Element-free Galerkin method for fatigue and quasi-static fracture", Ph. D. thesis, Northwestern University, 1997
26. Solveig, M., "Why do cracks avoid each other?", *International Journal of Fracture*, Vol. 23, 1982, pp.37~45
27. Belytschko, T., Lu, Y. Y., Gu, L. and Tabbara, M., "Element-free Galerkin methods for static and dynamic fracture, *International Journal of Solids & Structures*, Vol. 32, No. 17/18, 1995, pp.2547~1570
28. 이상호, 김효진, "Element-Free Galerkin Method를 이용한 균열진전해석", *전산구조공학*, 제11권 제3호, 1998, pp.44~54
29. 이상호, 윤영철, "Element-Free Galerkin법을 이용한 혼합모드상태 균열의 균열진전해석", *한국전산구조공학회 논문집*, 제12권 제3호, 1999, pp.485~494

(접수일자 : 1999. 9. 30)