



# 압축잔류응력에 의하여 선단부가 닫힌 균열의 개구거동에 대한 유한요소법에 의한 해석방법의 제안

김 응 준\* · 박 응 준\*\* · 유 승 현\*\*

\*한밭대학교 신소재공학부

\*\*아주대학교 기계공학부

## A Proposal of an Analytical Method for Estimating the Opening Behaviour of Tip-Closed Crack in Compressive Residual Stress by Finite Element Method

Eung-Joon Kim\*, Eung-Joon Park\*\*, and Seung-Hyun Yoo\*\*

\*Advanced Materials Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-764, Korea

\*\*Mechanical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

### Abstract

For the purpose of clarifying the influence of welding residual stress to the fatigue crack propagations behaviour, an analytical investigation based on finite element method is performed to examine the opening behaviour of tip-closed crack in the compressive residual stress.

A finite element model comprised of contact elements for the crack plane and plane stress elements for the base material is used to evaluate crack opening stress of the crack existing in the residual stress field. Also an analytical method based on the superposition principle to estimate the length of opened part of tip closed crack and the stress distribution adjacent to the crack during uploading is applied to the finite element model. The software for the analysis is ABAQUS, which is a general purpose finite element package.

The results show that stresses distributed on the crack surfaces are reduced and approached to zero as the applied stresses are increased up to crack tip opening stress and no mechanical discontinuity is found at the boundary of contact elements and plane stress elements. It is verified that the opening behavior of the fatigue crack in the residual stress can be predicted by finite element method with the proposed analytical method.

\* Corresponding author : ejkim@hanbat.ac.kr

(Received July 30, 2003)

Key Words : Fatigue Crack, Residual Stress, Crack Propagation, Finite Element Method, Contact Stress, Plane Stress, Superposition Principle

### 1. 서 론

1960년대 초 Paris<sup>1)</sup>가 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 이용하여 피로균열의 전파속도  $da/dN$ 을 정리함으로써 1950년대 Irwin이 취성파괴의 연구<sup>2)</sup>에서 제안한 응력확대계수  $K$ 가 피로균열전파특성의 연구에 도입되기 시작하였다. 따라서 그때까지는 피로균열의 발생, 전파 그리고 파괴의 전과정이 재료의 피로강도라는 하나의

관점에서 취급되었던 피로강도평가의 연구방향은 피로균열의 전파거동에 중점을 둔 전파속도의 정량적 평가로 바뀌게 되었으며, 이에 따라 용접구조물의 피로강도 평가에 관한 연구도 잔류응력이 피로균열 전파속도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하는 내용이 주를 이루게 되었다.

용접이음부의 피로균열은 균열선단근방에 압축잔류응력이 존재하면 무부하상태에서도 균열선단부가 닫히게 되어 균열선단이 완전히 열리기 전까지 작용된 외하중

은 균열전파에 영향을 미치지 않는 것으로 보고되어져 왔다<sup>3)</sup>. 따라서 용접이음부에서의 피로균열전파에 대해서는 주로 잔류응력의 영향에 중점을 두어 잔류응력이 균열전파에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하여야 한다. 이러한 관점에서 지금까지 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열을 대상으로 잔류응력이 피로균열의 전파에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하는 시도가 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다<sup>4-12)</sup>.

본 연구에서는 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열의 전파거동에 미치는 잔류응력의 영향을 유한요소해석법에 의하여 검토하기 위한 연구의 기초적 단계로서, 균열면에 압축잔류응력이 작용하는 경우를 대상으로 외하중의 증가에 따른 피로균열의 개구거동을 유한요소해석법에 의하여 검토하기 위한 탄성해석방법을 제안하였다. 또한 제안된 해석방법에 의하여 용접잔류응력장에 존재하는 피로균열에 대하여 하중증가에 따른 균열면 및 균열선단전방의 응력분포의 변화를 구하였다.

## 2. 피로균열의 전파거동에 미치는 용접잔류 응력의 영향평가에 관한 연구동향

용접잔류응력이 피로균열의 전파에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 지금까지 수행된 연구에 대하여 각 연구에 사용된 평가방법과 평가에 고려된 사항을 중심으로 정리한 결과를 Table 1에 나타내었다. 60년대에는 용접이음부에 대한 피로강도의 평가방법으로 다양한 형상의 용접이음부 대하여 실시된 피로실험결과가 용접구조물의 피로설계시 rule에 의한 설계의 규격으로 사용되어져 왔다. 그러나 이러한 규격은 적용 가능한 용접이음의 형상이 한정되어 있어 복잡한 형상의 용접이음이 채용되는 용접구조물에 대하여서는 해석에 의한 설계의 도입이 필요하게 되었다. 해석에 의한 설계는 70년대 용접에 의한 용접선 방향 잔류응력의 분포특성에 주목하여 피로한계를 고려한 잔류응력의 영향

을 평가하는 것으로 시작되었으며 용접부 근방에 국부적인 항복이 발생할 때 용접부의 피로강도는 저하하게 된다는 것을 이론적으로 설명함으로써 S-N선도 개념의 용접부 피로강도의 해석적 평가방법을 제시하였다<sup>5-6)</sup>. 한편 80년대에는 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열의 전파속도를 용접잔류응력과 외하중에 의한 응력확대계수를 중첩함으로써 구하여진 유효응력확대계수를 이용하여 정리함으로써 피로균열의 전파거동에 미치는 잔류응력의 영향을 평균응력의 영향 즉 응력비의 효과로 평가할 수 있음을 시사하였다. 그러나 이렇게 피로균열의 전파거동에 미치는 잔류응력의 영향을 응력비의 효과로 평가할 수 있는 경우는<sup>7-11)</sup>, 해석의 대상을 인장 잔류응력장 또는 압축잔류응력장 만을 전파하는 피로균열로 한정하고 있어 예를 들어 잔류응력의 분포가 압축에서 인장으로 천이되는 영역에 피로균열이 존재하는 경우에 대하여서는 잔류응력의 영향을 평가하지 못하는 단점이 있었다. 반면 80년대 후반에는 부분개구를 고려하는 해석방법이 발표되어 잔류응력의 분포가 인장에서 압축으로 천이하는 영역에 피로균열이 존재하는 경우의 해석이 가능해지는 등 균열전파거동에 미치는 잔류응력의 영향을 포괄적으로 검토할 수 있는 계기가 마련되었다<sup>12)</sup>.

## 3. 유한요소법에 의한 잔류응력영향 평가방법의 제안

앞에서 언급한 바와 같이 용접잔류응력이 용접부의 피로균열 전파특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로는 용접잔류응력과 외하중을 중첩한 응력장에 균열이 존재하는 경우에 대하여 균열 양 선단에서의 응력확대계수를 구하는 방법<sup>12)</sup>이 이용되어져 왔다. 또한 용접잔류응력과 외하중을 중첩한 응력분포의 형상에 따라서는 균열의 부분개구현상이 일어나기도 하며 이에 대응한 응력확대계수의 산정법도 검토되었다.

**Table 1** Review of researches for the effects of welding residual stress on fatigue strength of welded joints<sup>4)</sup>

Years	Characteristics of evaluation method		Effect of residual stress	Significant phenomenon for evaluation	Criteria of evaluation	Remark
1960	Fatigue strength depending on the welded joint configuration			Failure	Experiment	Application of fatigue data to design rules
1970	Effect of residual stress on fatigue limit		Mean stress	Yielding	Fatigue limit	Approach to theoretical evaluation
1980	Stress intensity factor from residual stress distribution ( $K_{res}$ )	For the simple residual stress distribution	Mean stress	Stress ratio	Fracture mechanics	Quantify the effect of residual stress
		For the crack at the transition between tensile and compressive residual stress	$K_{res}$ corresponding to partial opening	Partial opening	Fracture mechanics	Analytical evaluation for actual distribution of residual stress

그러나 이러한 해석방법은 응력확대계수의 산정방법에만 한정되어 있어 해석결과의 타당성을 균열면 및 균열선단전방에 분포하는 응력으로부터 검토할 수가 없으며, 또한 사용된 응력확대계수의 산정모델에 시험편의 판폭효과가 고려되지 않은 탓으로 해석방법을 실제 구조물에 적용하는데 있어 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 피로균열의 개구거동에 미치는 용접잔류응력의 영향을 유한요소법을 이용하여 평가하기 위한 해석방법을 제안하였으며, 이러한 해석방법을 이용하여 용접잔류응력장에 존재하는 피로균열에 대하여 하중증가에 따른 균열면 및 균열선단전방에서의 응력분포의 변화특성과 더불어 해석방법의 타당성을 검토하였다.

3.1 해석모델

유한요소해석에 사용된 모델은 평판의 중앙에 관통균열이 존재하고 균열선단부에 작용하는 압축잔류응력으로 인하여 균열면이 닫힌 경우에 대하여 하중조건, 균열의 대칭성 및 균열면의 접촉문제 등을 고려하여 Fig. 1과 같이 1/2 모델로 하였다. 이때 균열선단부에 존재하는 압축잔류응력은 균열면을 닫히게 하는 접촉응력으로 간주하여 해석에 사용하였다. 해석모델의 기하학적 형상은 250mm의 길이, 100mm의 폭과 5mm의 두께를 갖고 중앙에 균열전체길이 2c의 균열이 존재하는 것으로, 재료의 물성치는 구조용강재를 가정하여 탄성계수는 210GPa, 포아송비는 0.3으로 하였다. 유한요소해석은 범용 유한 요소 패키지인 ABAQUS (Ver. 6.2)를 이용하였고, 압축잔류응력에 의하여 무부하시 선단부가 닫힌 균열이 열리는 과정의 검토는 탄성해

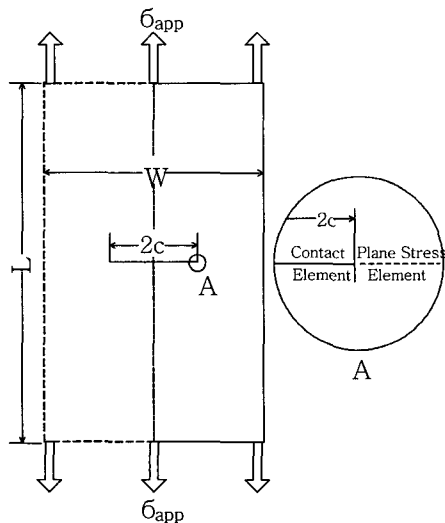


Fig. 1 The configuration of the finite element model

석에 의하여 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 해석모델의 판폭과 길이에 비해 두께가 얇은 경우를 평면응력 상태로 가정한 평면응력요소(CPS4 ; 4-node bilinear element)<sup>13)</sup>이며, 선단부의 압축잔류응력을 재현하기 위하여 균열면에 접촉요소를 사용하였다.

3.2 해석방법

유한요소해석에서는 균열면에 작용하는 압축잔류응력을 접촉요소를 구성하는 각 절점에서 구한 접촉응력으로 근사적으로 나타낼 수 있다. 본 해석에서는 무부하 상태에서 균열면에 작용하는 잔류응력의 분포형상을 Fig. 2에서와 같이 균열 양선단부의 일정구간 R에 작용하는 등분포의 압축응력으로 하였다. 유한요소해석에서는 R 구간내의 접촉요소 크기와 압축잔류응력의 크기로부터 구한 접촉력을 각 절점에 작용시키는 방법에 의하여 Fig. 2의 압축잔류응력의 분포와 동일한 접촉응력분포를 구하였다.

Fig. 3은 유한요소해석에서 선단부가 닫혀 있는 균열이 외하중의 증가에 의해 선단방향으로 열려가는 과정을 중첩원리를 이용하여 모식적으로 나타낸 것이다. Fig. 3은 균열선단부에 Fig. 2에서 보인 압축잔류응력 분포와 동일한 분포의 접촉응력이 작용하는 상태에서 외하중의 작용에 의하여 절점이 열리는 과정을 나타낸 것으로 본 해석에서는 절점의 접촉응력이 0이 되는 시점에 절점이 열리는 것으로 간주하였다.

Fig. 3에서와 같이 무부하시 닫혀 있던 균열의 선단부가 외하중의 증가에 의하여 열려갈 때 균열면의 각 절점에 작용하는 접촉응력의 변화양상을 보면, Fig. 3(a)에 나타난 무부하시의 균열 선단부의 등분포 접촉응력은 외하중의 작용에 의하여 Fig. 3(b)의 균열면의 각 절점에 표시한 접촉응력 크기만큼 감소하게 된다. 따라서 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)을 중첩하면 Fig. 3(c)와 같이 외하중이 작용하는 상태에서의 균열 형상 및 균열면의 각 절점에서의 접촉응력을 추정할 수 있다. 즉, Fig. 3(b)의 첫 번째 절점 n1에서의 응력감소분이 Fig. 3(a)의 등분포 접촉응력의 크기와 같아지면 n1 절점은 열리게 되며 아직 닫혀 있는 n2 ~ n5 구간의 균

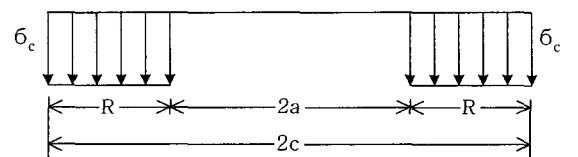


Fig. 2 Compressive residual stresses distributed on the crack surfaces

열면의 응력분포는 Fig. 3(a)의 같은 구간의 응력에서 Fig. 3(b)의 같은 구간의 응력을 뺀 Fig. 3(c)의 접촉 응력분포가 된다. 이 때 Fig. 3(b)에 표시한 절점  $n_1$ 에서의 접촉응력의 감소분은 Fig. 2의 해석모델에서 길이 2a의 균열이 존재하고 이 균열의 형상이 Fig. 3(a)의 상태에서 외하중에 의하여 변화된 균열의 형상과 같게 되었을 때 균열 2a 선단전방의 균열연장선상의 각 절점에서 얻어진 응력과 같은 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 4는  $n_1$ 절점이 열림으로써 접촉응력이 재분포한 상태에서 외하중이 증가하여 두 번째 절점인  $n_2$ 가 열리게 되는 과정을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 Fig. 3(c)와 동일한 균열 형상과 접촉응력의 분포를 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)상태로부터 외하중의 증가에 의한 균열면에서의 응력감소분을 나타낸 것으로  $n_2$ 절점에서의 응력감소분이 Fig. 4(a)의  $n_2$ 에서의 접촉응력과 같아지는 외하중( $\sigma_{app2}$ )에서  $n_2$ 절점은 열리게 되며 Fig. 4(c)의 균열면에는 Fig. 4(a)의 응력분포에서 Fig. 4(b)의 응력분포를 뺀 접촉응력이 분포하

게 된다. 따라서 Fig. 3(a)와 같이 균열선단부에 접촉 응력이 분포하고 있는 무부하 상태에서부터  $n_1, n_2$  절점이 열리기까지 소요된 전체 외하중은 Fig. 3의  $\sigma_{app1}$ 과 Fig. 4의  $\sigma_{app2}$ 를 합한 값이 된다.  $n_2$ 절점 이후의 균열선단방향으로 인접한 절점들이 열러가는 과정에 대하여서도 동일한 해석방법을 적용하였으며 이러한 해석 방법에 의하여 무부하시 선단이 닫힌 균열이 선단방향으로 열러가는 과정에서 균열면의 임의의 위치의 절점이 열리는 외하중을 구하였다. 또한 본 해석에서는 이렇게 외하중에 의하여 열리는 절점의 위치를 균열면이 열러가는 균열의 개구부선단 위치로 간주하였다.

### 3.3 해석결과 및 고찰

압축응력장에 존재하는 피로균열의 균열면이 외하중에 의하여 열러가는 과정에서의 균열개구부선단위치와 외하중의 관계는 본 연구에서 제안한 탄성해석모델을 적용한 유한요소해석에 의하여 추정이 가능하며 이러한

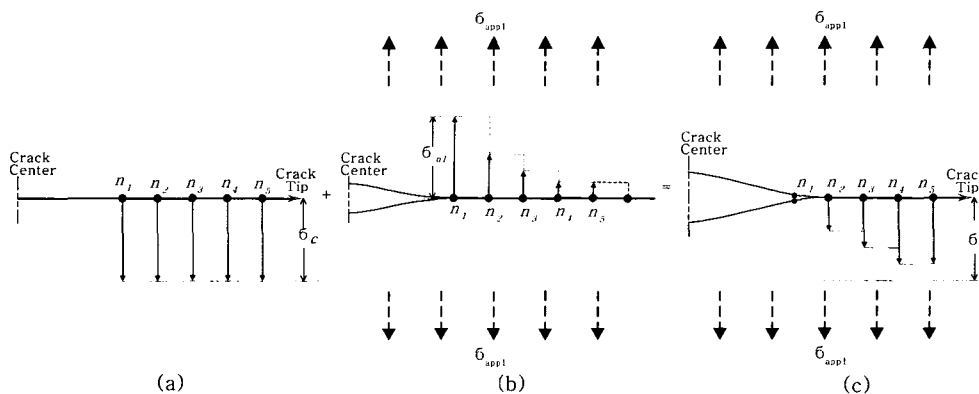


Fig. 3 Superposition model illustrating partial opening behaviour of tip closed crack by FEM  
 (a) Distribution of contact stress substituted for initial distribution of residual stress  
 (b) Distribution of nodal stress generated by applied stress  
 (c) Re-distributed contact stress caused by applied stress

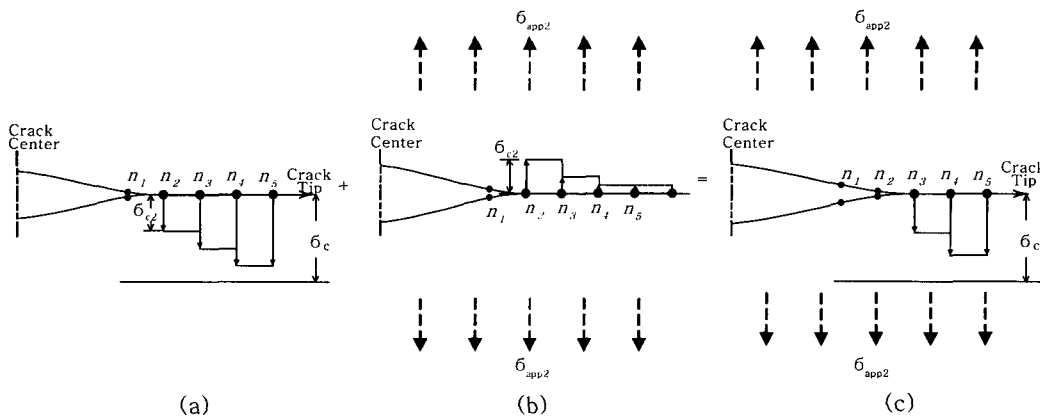


Fig. 4 Extension of partial opening on tip closed crack by increase of applied stress

유한요소해석에 의하면 Fig. 3과 Fig. 4에서 보인 중첩모델로부터 임의의 외하중에서의 개구부선단의 위치와 균열면에서의 응력분포를 구할 수 있다. 또한 임의의 외하중에서 균열선단 전방의 균열연장선상에서의 응력분포는 외하중에 의한 균열개구부의 확장에 기인하여 균열면에 존재하는 압축응력의 감소와 동시에 발생하는 인장응력의 분포이다.

Fig. 5는 이상에서 언급한 유한요소해석을 균열전체 길이  $2c=16\text{mm}$ 인 균열의 양선단부에 균열양선단으로부터 균열중앙방향으로  $4\text{mm}$ 의 구간에 작용하는  $400\text{MPa}$ 의 등분포 압축잔류응력으로 인하여 무부하시 닫혀 있던 균열이 외하중의 증가에 의하여 균열선단부의 균열면이 균열선단방향으로 열려가는 과정에 대하여 수행한 결과로서 외하중의 증가에 따른 개구부선단의 위치변화를 나타낸 것이다. 해석결과에서는 첫 절점이 열리기까지 소요된 외응력이  $50\text{MPa}$ 로 나타나고 있다. 이 값은 해석에 사용한 요소의 크기( $0.1\text{mm}$ ) 및 잔류응력의 분포 등 해석조건에 관계되는 값으로 해석조건을 실제 균열문제에 근접시키기 위한 방법에 대하여 현재 검토를 진행하고 있다. 또한 해석결과는 외하중이 증가함에 따라 개구부선단의 위치가 균열선단방향으로 이동하고 있으며 개구부 선단위치가 균열선단에 가까워질수록 단위길이의 개구에 소요되는 외하중의 증가량은 감소하는 경향을 나타내고 있으며 균열선단이 완전히 열리는 하중레벨에서는 균열면에 잔류응력이 존재하지 않게 된다.

Fig. 6은 외하중의 증가에 따라 개구부가 균열선단방향으로 확장되는 과정에서 구한 균열면의 응력분포의 변화와 균열선단전방의 균열연장선상에서 구한 응력분포의 변화를 동시에 나타낸 것이다. 해석결과로부터 외하중의 증가에 의하여 개구부가 균열선단방향으로 확장됨에 따라 균열면에 작용하는 압축응력분포는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 개구부 확장시 각각의 개구부선단위치에서의 균열선단전방의 응력분포는

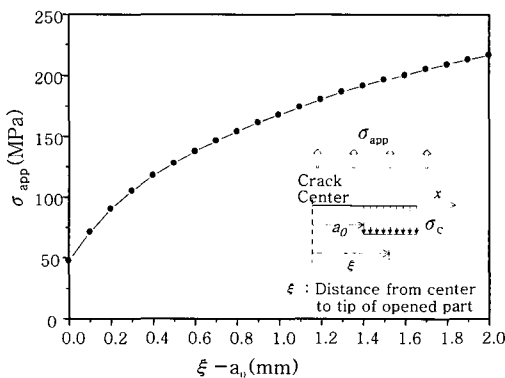


Fig. 5 Variation in the length of opened part of tip closed crack during uploading

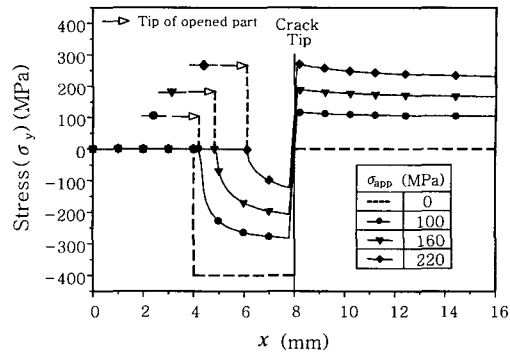


Fig. 6 Change of stresses distributed on the crack plane and the ligament during uploading

균열선단에서 약간 높아지는 분포의 경향을 나타내며 개구부의 확장에 따라 응력분포는 전체적으로 상승하는 추세를 보이고 있다.

Fig. 7은 Fig. 6에서 나타낸 외하중의 증가에 따른 균열면 및 균열선단전방의 응력분포를 무부하상태로부터의 응력변화량으로 환산하여 나타낸 결과이다. 무부하상태로부터 임의의 외하중에 이르기까지의 응력의 변화량의 분포는 개구부선단에서 약간 높아지고 개구부선단에서 선단전방으로 멀어질수록 완만하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며 외하중의 증가에 따라 응력의 변화량의 분포는 전체적으로 상승하는 경향을 나타내고 있다. 특히 해석결과에서는 접촉요소와 평면응력요소의 경계에 해당하는 균열선단부근에 어떠한 응력의 불연속성도 나타나지 않으므로 균열선단부의 닫혀 있는 균열면과 균열선단전방의 모재부는 역학적으로 동일한 것으로 간주할 수 있었다.

또한, 이러한 해석결과로부터 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열의 개구거동은 균열면에 접촉요소를 사용하고 모재부에 평면응력요소를 사용한 유한요소해석모델에 잔류응력과 외하중을 중첩함으로써 해석적으로 재현이 가능하다는 것을 알 수 있다.

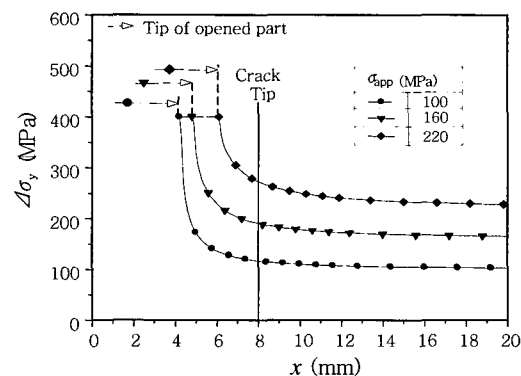


Fig. 7 Variation in the length of opened part of tip closed crack during uploading

#### 4. 결 론

본 연구는 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열의 개구거동에 미치는 잔류응력의 영향을 유한요소법에 의하여 검토하기 위한 기초적 연구로서, 압축잔류응력의 영향으로 균열선단부가 닫힌 균열에 대하여 외하중의 증가에 따른 균열면 및 균열선단전방의 응력분포의 변화를 유한요소해석법에 의하여 구하는 해석방법을 제안하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 피로균열의 개구거동에 미치는 압축잔류응력의 영향은 접촉요소와 평면응력요소로 구성된 유한요소모델에 외하중과 잔류응력의 중첩원리를 이용한 탄성해석방법을 적용하여 해석적으로 추정이 가능하다.

2) 압축잔류응력의 영향으로 인하여 닫혀 있던 균열면이 외하중의 증가에 의하여 개구되어 감에 따라 균열면에 작용하는 압축잔류응력의 분포는 크기가 감소하는 경향을 나타내고 있으며 균열선단이 완전히 열리는 하중 레벨에서는 균열면에 잔류응력이 존재하지 않게 된다. 또한 균열 선단전방의 응력분포는 전체적으로 외하중의 증가에 따라 크기가 상승하는 추세를 보이고 있다.

3) 임의의 외하중에서의 균열면 및 균열선단전방의 응력분포를 무부하상태로부터의 응력변화량으로 환산하여 나타낸 결과 접촉요소와 평면응력요소의 경계에 해당하는 균열선단부근에 어떠한 응력의 불연속성도 나타나지 않으므로 닫혀 있는 균열면과 균열선단전방의 모재부는 역학적으로 동일한 것으로 간주할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Paris, P.C., and Erdogan, F.: A critical analysis of crack propagation laws. Trans. ASME, J. Basic Engng, Vol. 85(1963), 528~534
2. Irwin, G. R. : Plastic zone near a crack and fracture toughness. Safamore Research Conference Proceeding, Vol. 4(1961)
3. Elber, W. : The significance of fatigue crack closure, ASTM STP 486(1971), 230~242
4. E. J. Kim : Effect of welding residual stress on fatigue crack propagation behavior, J. of Korean Welding Society, Vol. 15, No 3(1997)
5. F. V. Lawrence, W. H. Munse : Fatigue crack propagation in butt weld containing joint penetration defects, Weld. Res. Suppl. May, 1973, 221-225
6. N. J. I. Adams : Crack Growth in the vicinity of welds, Weld. Res. Suppl., Nov., 1973, 508s-513s
7. Ohta A., Sasaki E., Kamakura M., Nihei M. : Effect of residual tensile stresses on threshold level for fatigue crack propagation in welded joints of SM50B steel, Trans. of the Japan Welding Society, Vol. 12, No. 1(1981), 31~38
8. R. J. Bucci : Effect of residual stress on fatigue crack growth measurement, ASTM STP 743(1981), 28-47
9. Mori, T., Horikawa, K. : The effect of welding residual stresses on fatigue crack propagation rate, Quarterly J. of the Japan Welding Society, Vol. 1(1983), 43 6~442
10. Nelson, D. V. : Effect of residual stress on fatigue crack propagation, ASTM STP 776(1982), 172-194
11. A. P. Parker : Stress intensity factor, crack profiles and fatigue crack growth rates in residual stress fields, ASTM STP 776(1982), 13-31
12. Mukai, Y., Murata, M. and Kim, E. J. : A proposal for stress intensity factor range calculation method by partial opening model of fatigue crack under weld residual stress filed and prediction of the crack propagation behavior, J. of the Japan Welding Society, 5-2(1987), 85~89
13. ABAQUS User's Manual for revision 6.2 Vol. II, Hibbits, Karlsson & Sorensen, Inc. 2001