



용접잔류응력장을 전파하는 피로균열 개구거동의 유한요소법을 이용한 해석적 검토

박 응 준* · 김 응 준** · 유 승 현*

*아주대학교 기계공학부

**한밭대학교 신소재공학부

An Analysis of the Fatigue Crack Opening Behaviour in the Welding Residual Stress Field by the Finite Element Method

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

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

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

Abstract

The finite element analysis was performed for the cracks existing in residual stress fields in order to investigate the effects of configuration of residual stress distribution to the fatigue crack opening behaviour. And the variation of stress distributions adjacent to the crack caused by unloading was examined. The finite element model with contact elements for the crack plane and plane stress elements for the base material and the analytical method based on the superposition principle to estimate crack opening behaviour and the stress distribution adjacent to the crack subjected to unloading were used.

The results of the analysis showed that crack opening behaviours and variations of stress distribution caused by unloading were changed depending on the configuration of residual stress distribution. When the crack existed in the region of compressive residual stress and the configuration of compressive residual stress distribution were inclined, a partial crack opening just behind of a crack tip occurred during unloading. Based on the above results, it was clarified that the crack opening behaviour in the residual stress field could be predicted accurately by the finite element analysis using these analytical method and model.

* Corresponding author : stu209@unitel.co.kr

(Received August 20, 2003)

Key Words : Residual stress, Fatigue crack, Finite element analysis, Contact element, Plane stress element, Superposition principle, Partial crack opening

1. 서 론

용접잔류응력이 피로균열의 전파거동에 미치는 영향은 정량적으로 평가하기 위한 연구에 사용된 접근방법은 발전과정을 감안하면 다음 두 가지로 나눌 수 있다¹⁾. 첫째는 피로균열이 초기인장잔류응력장 또는 초기압축 잔류응력장만을 전파하는 경우에 한하여 용접잔류응력 분포로부터 구한 응력확대계수와 외하중에 의한 응력확

대계수를 중첩하여 유효응력확대계수범위를 구하는 방법²⁻⁹⁾으로, 이렇게 구한 유효응력확대계수범위를 이용하여 균열전파속도를 정리한 결과로부터 피로균열의 전파거동에 미치는 잔류응력의 영향을 평균응력의 영향 즉 응력비의 효과로 평가하는 것이다. 둘째는 잔류응력장에 존재하는 피로균열에 대하여 잔류응력과 외하중을 중첩한 응력분포로부터 균열의 개구양상을 추정하여 응력확대계수를 계산하는 방법¹⁰⁻¹²⁾으로, 잔류응력과 외하중을 중첩한 응력분포가 인장에서 압축으로 천이하는

영역에 피로균열이 존재하여 인장응력이 작용하는 쪽의 균열만이 부분적으로 열리는 것으로 추정하여 산정한 유효응력확대계수범위는 균열전파속도와 양호한 대응성을 보이는 것으로 보고되었다. 따라서 피로균열의 전파 거동에 미치는 용접잔류응력의 영향을 평가하기 위하여서는 잔류응력의 분포형상에 따른 하중증가의 균열의 개구거동을 파악하거나 또는 개구거동을 간접적으로 예측하는 방법으로 하중증가에 따른 균열근방의 응력분포의 변화를 파악하여야 한다. 그러나 균열의 개구양상이나 균열근방의 응력분포를 실험을 통하여 구하는 것은 기술적으로 곤란하며 이러한 이유에서 피로균열이 잔류응력장을 전파할 때 임의의 하중에서의 균열개구양상 및 균열근방의 응력분포를 구하는 타당한 해석방법을 수립하는 것은 잔류응력장에서의 균열개구거동을 평가하는데 있어서 매우 중요한 과제로 되어 있다.

본 연구에서는 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열의 개구거동에 미치는 용접잔류응력의 영향을 유한요소 해석에 의하여 검토하였다. 검토에 사용된 해석방법은 하중증가에 의하여 균열면이 열려가는 과정에 대하여 잔류응력과 외하중의 중첩을 연속적으로 수행하는 탄성 해석방법이다. 이러한 해석방법의 타당성은 외하중의 증가에 따른 개구부선단위치의 변화에 대한 해석결과를 잔류응력분포와 외하중을 중첩시킨 응력분포로부터 응력확대계수를 구하는 방법으로 얻어진 해석결과와 비교함으로써 검토하였다. 또한 잔류응력의 분포형상을 달리하여 수행한 해석결과는, 잔류응력장에서의 외하중의 증가에 따른 균열의 개구거동 및 균열근방의 응력분포의 변화는 잔류응력과 외하중과의 중첩원리를 이용한 탄성해석방법을 유한요소해석에 적용함으로써 높은 정확도로 예측이 가능함을 나타내고 있다.

2. 균열개구거동의 해석

2.1 유한요소법에 중첩원리의 적용

유한요소해석에 사용된 모델은 용접에 의하여 잔류응력장이 형성된 평판의 중앙부에 관통균열이 존재하는 경우로 해석모델의 기하학적 형상은 Fig. 1에서와 같이 길이 250mm, 폭 100mm, 두께 5mm이며 폭중앙에 길이 2c의 피로균열이 존재하는 것으로 하였다. 해석에 적용된 재료의 물성치는 구조용강재를 가정하여 탄성계수는 210GPa, 포아송비는 0.3으로 하였다.

유한요소해석은 잔류응력장에 균열이 존재하고 이 상태에서 외하중이 작용할 때 외하중의 증가에 따른 균열의 개구거동에 대하여 탄성해석으로 수행하였다. 해석에는 범용유한요소패키지인 ABAQUS(Ver. 6.2)를 사

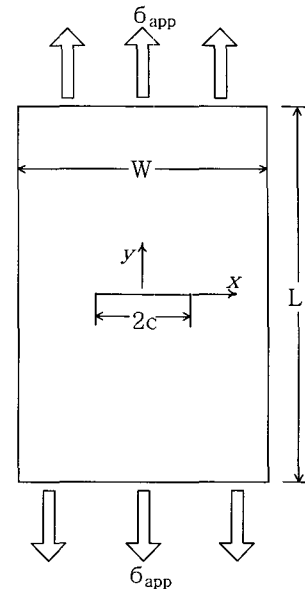


Fig. 1 The configuration of the finite element model

용하였으며¹³⁾ 해석에 사용된 요소는 균열면에는 압축잔류응력에 의한 균열면의 겹침을 방지하기 위하여 접촉요소를 사용하였고, 모재부에는 해석모델의 판폭과 길이에 비해 두께가 얇은 경우를 평면응력상태로 가정한 평면응력요소(CPS4 : 4-node bilinear element)를 사용하였다. 유한요소해석에서는 균열면에 작용하는 응력을 접촉요소를 구성하는 각 절점에서 구한 접촉응력으로 근사적으로 나타낼 수 있다. 본 해석에서는 무부하상태에서 임의의 길이의 균열면에 작용하는 잔류응력의 분포형상을 균열면상의 각 절점에 해당하는 위치의 초기잔류응력값을 각 접촉요소의 절점에 접촉응력으로 작용시킴으로써 구하였다. Fig. 2는 균열 양 선단부의 일정구간에 등분포의 압축잔류응력이 작용하여 무부하상태에서 선단부가 닫혀 있던 균열면이 외하중의 증가에 의하여 균열선단방향으로 열려가는 과정에서의 균열개구형상 및 균열근방의 응력분포의 변화를 잔류응력과 외하중과의 중첩원리를 이용하여 도식적으로 나타낸 것이다. 해석에서는 균열면이 열려가는 과정을 절점의 접촉응력변화로 나타나며 각 절점의 접촉응력이 0이 되는 시점에 절점은 열리며 이렇게 열리는 절점의 위치를 균열개구부선단 위치로 간주하였다.

Fig. 2(a)는 무부하시의 균열 선단부에 압축잔류응력이 작용하는 경우를 가정하여 잔류응력을 등분포 접촉응력(σ_c)의 형태로 나타낸 것이다. Fig. 2(b)는 동일한 해석모델에서 길이가 2a인 균열이 외하중에 의하여 형상변화를 일으켜 그 변화된 형상이 Fig. 2(a)의 균열길이 2c의 균열이 외하중에 의하여 변화된 균열의 형상과 같게 되었을 때 균열길이 2a인 균열선단전방의

균열연장선상의 각 절점에서 얻어진 응력을 나타낸 것으로 균열선단전방에서의 응력분포의 형상은 균열선단으로부터 균열선단전방방향으로 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 Fig. 2(b)의 첫 번째 절점 n_1 이서의 응력증가분(σ_{n1})이 Fig. 2(a)의 등분포 접촉응력의 크기와 같아지면 n_1 절점은 열리게 되며 아직 닫혀 있는 균열면 및 균열선단전방의 응력분포는 Fig. 2(a)의 같은 구간의 응력에서 Fig. 2(b)의 같은 구간의 응력을 더한 Fig. 2(c)의 응력분포가 된다. 외하중의 증가에 의하여 n_1 절점이 열린 후 균열선단방향으로 인접한 n_2 절점이 열리는 외하중은 Fig. 2(c)의 균열형상과 접촉응력의 상태를 초기상태로 보고 외하중의 증가에 따른 n_2 절점에서의 응력증가분이 Fig. 2(c)의 n_2 절점에서의 접촉응력과 같아지는 외하중으로 구할 수 있다. n_2 절점 이후의 균열선단방향으로 인접한 절점들이 열려가는 과정에 대하여서도 동일한 해석방법이 적용되었으며 이러한 해석방법에 의하여 잔류응력장에 존재하는 균열에 대하여 하중증가에 따른 개구거동과 균열근방의 응력분포의 변화를 구하였다.

Fig. 3은 해석에 사용한 요소의 크기가 해석결과에

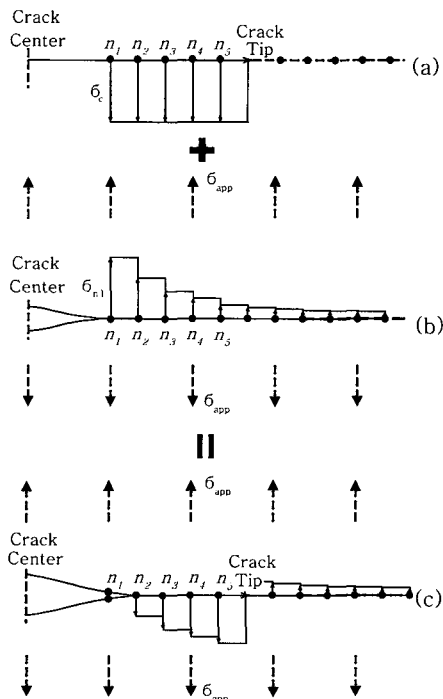


Fig. 2 Superposition model illustrating partial opening behaviour of tip closed crack by FEM. (a) Distribution of contact stress substituted for initial distribution of residual stress (b) Distribution of nodal stress generated by applied stress (c) Re-distributed contact stress and plane stress caused by applied stress

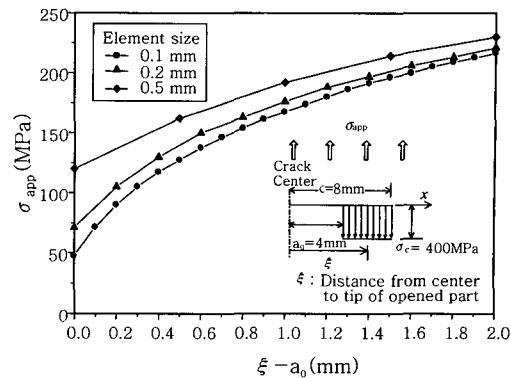


Fig. 3 Variation in the length of opened part of tip closed crack caused by change of element size

미치는 영향을 검토한 것으로 Fig. 2(a)에서와 같은 형태의 등분포 접촉응력에 의하여 닫혀 있던 균열선단부의 균열면이 외하중에 의하여 균열선단방향으로 열려가는 과정에서 외하중의 증가에 따른 개구부선단위치의 변화를 요소크기를 달리하여 유한요소해석에 의하여 구한 결과이다. 해석에 사용한 모델은 길이 $2c=16$ mm인 균열이 존재하고 균열의 양선단부에는 균열선단으로부터 균열중앙방향으로 4mm의 구간에 400MPa의 접촉응력(σ_c)이 등분포로 작용하는 것으로 하였다. 유한요소해석에서 닫힌 균열면의 첫 번째 절점이 열리기까지 소요되는 외하중의 크기는 요소의 크기가 큰 경우의 해석결과일수록 증가하며, 또한 요소의 크기가 커서 첫 번째 절점이 열리는데 소요된 외하중이 증가할수록 균열선단방향으로 같은 구간의 균열면이 열리는데 소요되는 외하중의 증가량은 감소한다. 이러한 경향은 실제 균열에서는 외하중의 작용과 동시에 닫혀 있던 균열면의 개구가 시작되나 유한요소해석에서는 닫힌 균열면의 첫 번째 절점이 열리기까지는 일정크기의 외하중이 소요되기 때문이며 두 번째 절점이후의 균열선단방향으로 같은 구간의 균열면이 열려가는 과정에서 요소의 크기가 커질수록 외하중의 증가량이 감소하는 것은 요소크기가 클수록 첫 번째 절점이 열리기까지 가해진 커다란 외하중으로 인하여 닫혀 있는 균열면에 남게 되는 접촉응력이 작아졌기 때문인 것으로 추정된다. 또한 이러한 해석결과는, 무부하상태에서 첫 번째 절점에서의 접촉응력이 0이고 균열선단방향으로 접촉응력이 직선적으로 증가하는 형태의 접촉응력분포의 경우에서와 같이 첫 번째 절점이 열리는데 소요되는 외하중이 없는 경우의 해석결과(Fig. 4)가 요소의 크기의 영향을 받지 않으므로 균열면에 작용하는 압축응력분포의 형상도 해석결과에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3 및 Fig. 4의 해석결과는 실제균열의 경우 외

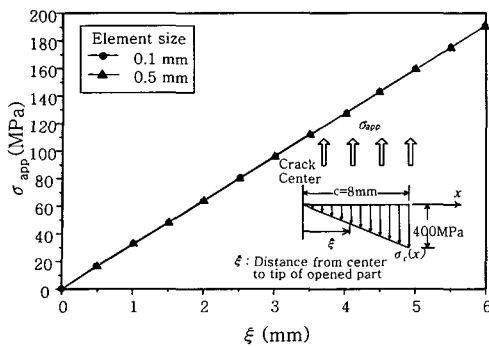


Fig. 4 Effect of configuration of residual stress on the length of opened part of tip closed crack

하중의 작용과 동시에 닫혀 있던 균열면의 개구가 시작되는 것으로 생각할 수 있으므로 요소의 크기가 작은 경우의 해석결과일수록 실제 균열의 경우에 근접한 해석결과일 것임을 시사하고 있다.

이상에서와 같이 균열선단부의 균열면이 열려가는 과정에서 외하중의 증가에 따른 균열의 개구형상과 균열 근방의 응력분포의 변화는 균열면의 압축응력에 외하중을 중첩하는 방법을 이용한 탄성해석모델을 유한요소법에 적용함으로써 해석적으로 추정하는 것이 가능하였다. 본 연구에서는 이러한 유한요소해석방법의 타당성에 대하여 균열선단부의 압축응력과 외하중을 중첩시킨 응력분포로부터 구한 응력확대계수를 이용하여 개구부 선단위치를 해석적으로 구하는 방법에 의하여 검토하였다.

2.2 유한요소해석방법의 타당성 검토

Fig. 5는 무한판 표면에 표시된 면AB의 일부구간에 압축잔류응력이 존재하고 외하중이 작용된 경우에 면AB에서의 응력분포의 변화를 중첩원리를 이용하여 나타낸 것이다. (a)에서 면AB는 유한요소해석에서의 균열길이와 같으며 유한요소해석에서 사용한 균열선단부의 압축잔류응력(σ_c)과 크기와 작용구간이 동일한 응력이 면AC와 면DB에 작용하고 있다. (b)는 면AB에 외하중이 작용한 경우로서 이때 외하중에 의한 응력 (σ_{app})과 면AB에 작용한 응력은 같다. (a), (b)를 중첩시키면 (c)에서와 같이 구간 AB에는 ($\sigma_c + \sigma_{app}$)의 분포응력이 작용하게 된다.

Fig. 5(c)의 응력상태에서 면 AB를 균열면으로 생각하면 균열면에 작용하는 인장응력($\sigma_c + \sigma_{app}$)으로 인하여 균열은 열리게 될 것이다. 이때, 균열의 양 선단 A, B에 있어서의 응력확대계수 K값은 $A \leq x \leq B$ 구간의 분포응력을 다음식의 $\sigma_0(x)$ 에 대입함으로써 구할 수 있다¹⁴⁾.

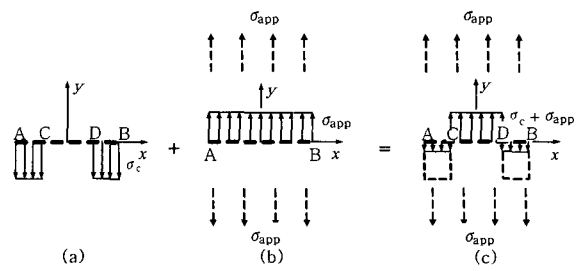


Fig. 5 A model for determination of stress distribution by means of superposition principle

$$K_f = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_0(x) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (1)$$

단, 이 경우의 식(1)의 2a는 균열의 전체길이(B-A)가 된다.

다음으로 Fig. 5의 경우 (b)의 외하중이 작아서 (b)의 면 AB에 작용하는 분포응력이 Fig. 6의 형상으로 된 경우를 생각하면, 균열은 균열중앙부의 인장응력과 균열 양 선단부의 압축응력 때문에 어느 길이만큼만 열리게 된다.

이 균열의 열려진 구간을 $E \leq x \leq F$ 라고 하면 E, F에 있어서의 응력확대계수 K값은 $E \leq x \leq F$ 구간의 응력분포를 균열면에 내압으로 작용시킨 경우의 K값으로, 식 (1)에 의하여 구할 수 있다. 따라서 E와 F의 위치가 정해지면 E, F에 있어서의 K값을 구할 수 있다. 그런데, 균열이 닫혀져 있는 구간인 면 AE와 FB에 있어서, 그 면이 균열면이므로 $E \leq x \leq F$ 구간에서 균열이 열려져 있어도 당연히 응력의 특이성이 생기지 않게 되어 E, F 위치에서의 K값은 0이 된다.

계산에 의해 E, F의 위치를 구하기 위해서는 Fig. 6에 나타난 균열의 개구부 $E \leq x \leq F$ 구간만을 균열로 간주하여 무한판 중에 길이 2a의 균열이 있고 그 균열면에 응력 $\sigma_0(x)$ 가 작용하는 경우의 균열선단 E, F에 있어서의 K값을 구한다. 여기서 E, F에 있어서의

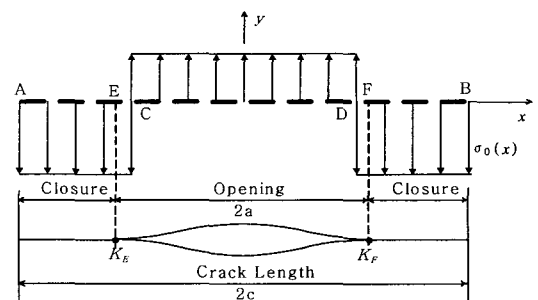


Fig. 6 Feature of crack opening caused by distributed stress

K값을 각각 K_E, K_F 라고 하면, K_E, K_F 는 식 (2), (3)에 의해서 구해진다.

$$K_E = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_0(x) \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} dx \quad (2)$$

$$K_F = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_0(x) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (3)$$

따라서 식 (2), (3)으로부터

$$K_E = 0, \quad K_F = 0 \quad (4)$$

가 되는 길이 2a에 의하여 E와 F의 위치를 구할 수 있게 된다.

Fig. 7은 이상에서 언급한 응력확대계수를 이용하여 기구부선단의 위치를 해석적으로 평가하는 방법에 의하여 얻어진 외하중의 증가에 따른 개구부선단위치의 변화를 Fig. 3의 유한요소해석결과와 함께 나타낸 것이다. 응력확대계수를 이용한 해석결과는 앞에서 언급한 실제균열의 경우에서와 같이 외하중이 작용함과 동시에 균열의 개구가 시작되고 있으며, 유한요소해석시 해석이 사용되는 요소의 크기가 0.1mm인 경우의 해석결과는 응력확대계수를 이용한 해석결과에 근접하고 있음을 알 수 있다.

이상에서와 같이 균열선단부의 압축응력에 의하여 닫혀있는 균열면이 외하중에 의하여 균열선단방향으로 열리는 과정에서 외하중의 증가에 따라 변화하는 균열 선단의 위치는 탄성해석방법을 적용한 유한요소해석에 의하여 그 추정이 가능하였다. 따라서 이와 같은 해석방법을 사용하여 구한 잔류응력장에서의 외하중의 증가에 따른 균열의 개구거동 및 균열근방의 응력분포의 변화는 타당한 결과로 간주할 수 있다.

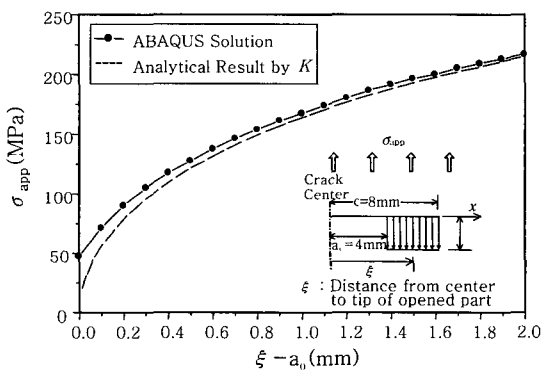


Fig. 7 Comparison of variation in the length of opened part of tip closed crack between the analytical result by stress intensity factor(K) and the result by ABAQUS

3. 해석 결과 및 검토

3.1 잔류응력분포형상과 균열의 부분개구

용접구조물내에 존재하는 용접잔류응력장은 균열의 전파방향에 따라 다양한 형상의 잔류응력분포를 갖게 되며 균열면에 수직인 방향의 잔류응력분포는 외하중의 증가에 따른 균열의 개구거동에 직접적인 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 균열면에 작용하는 잔류응력의 분포형상으로 인하여 하중증가에 따른 균열의 개구가 균열 중앙부 또는 균열 선단부로부터 부분적으로 시작될 것으로 추정되어 실험적으로는 이러한 현상을 규명하기가 곤란한 경우에 대하여 균열의 양 선단이 완전히 열리기까지의 하중범위를 대상으로 잔류응력분포가 피로균열 개구거동에 미치는 영향을 이상에서 언급한 해석방법에 의하여 검토하였다.

Fig. 8은 유한요소해석에서 사용한 잔류응력의 분포형상으로 그림에 A, B로 표시된 위치는 균열선단을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 균열중앙부에서 균열의 양 선단방향으로 직선적으로 증가하는 압축잔류응력의 분포형상으로 인하여 외하중의 증가에 따라 균열의 개구가 중앙부로부터 시작되는 것으로 추정되는 경우이며 Fig. 8(b)는 압축잔류응력분포가 A선단에서 B선단방향으로 직선적으로 증가하여 외하중의 증가에 따라 A 선단부로부터 개구가 시작되는 것으로 추정되는 경우이다. Fig 8(a), (b)의 경우에 대하여 공학적 의미를 부여한다면 Fig 8(a)의 경우는 시험편 중앙에 시험편 길이방향으로 용접선이 놓인 잔류응력분포에 압축의 외하중이 작용하였을 경우로 생각할 수 있으며, Fig 8(b)의 경우는 압축잔류응력장에서 발생하여 인장잔류응력으로 전파하는 균열에 외하중이 작용한 경우로 생각할 수 있다.

유한요소해석에서는 균열면에 작용하는 잔류응력의

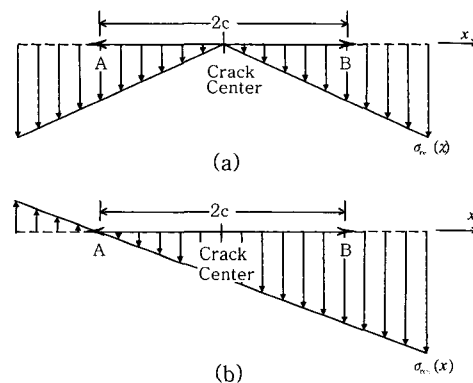


Fig. 8 Configurations of distributed residual stress applied to crack plane

분포형상과 접촉요소의 크기를 고려하여 계산된 접촉력을 각 절점에 작용시키는 방법에 의하여 Fig. 8의 잔류응력분포와 동일한 접촉응력분포를 재현하였다. 해석에서 사용한 접촉요소의 크기는 0.1mm이다. Fig. 8(a)의 경우는 균열중앙에서 접촉응력이 0이고 균열선단위치인 A, B에서 400MPa의 접촉응력이 존재하는 대칭분포형상으로 1/2 모델로 해석을 수행하였고 Fig. 8(b)의 경우는 A 선단에서 접촉응력이 0이고, B선단에는 100MPa의 접촉응력이 존재하는 비대칭분포형상으로 전체모델로 해석을 수행하였다.

3.2 균열면 및 균열선단전방의 응력분포

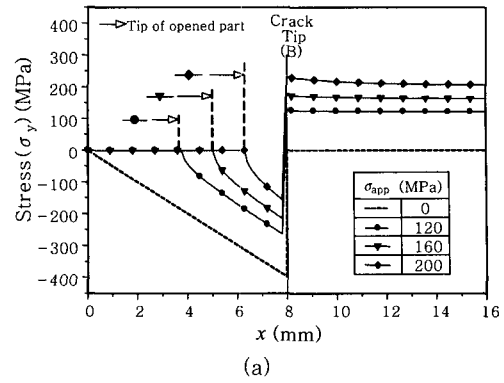
Fig. 9는 무부하시 닫혀 있던 균열이 외하중의 증가에 따라 열리는 과정에서의 균열면상의 응력과 균열선단전방의 균열연장선상의 응력의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 잔류응력분포가 Fig. 8(a)인 경우의 해석결과로 외하중이 증가함에 따라 균열면에 작용하고 있던 압축응력은 점차 감소하고 균열선단전방의 응력분포는 점차 상승하는 경향을 보이고 있다. 또한 임의의 하중에서의 균열선단전방의 응력분포는 균열선단에서 멀어질수록 점차 감소하는 분포를 나타내고 있어 Fig. 2에서 언급한 균열선단전방에서의 응력분포와 동일한 양상임을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 잔류응력분포가 Fig. 8(b)인 경우의 해석결과로 외하중이 증가함에 따라 먼저 열린 A선단부에는 응력집중이 발생하나 아직 닫혀 있는 B선단부에는 응력집중현상이 나타나지 않는다. 따라서 Fig. 8(b)인 경우의 균열의 개구거동은 외하중의 증가에 따라 A선단이 먼저 열린 이후 B선단이 열리기까지 A선단은 완전히 열려있는 상태에서 개구부 선단의 위치가 B선단방향으로 지속적으로 이동하였다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

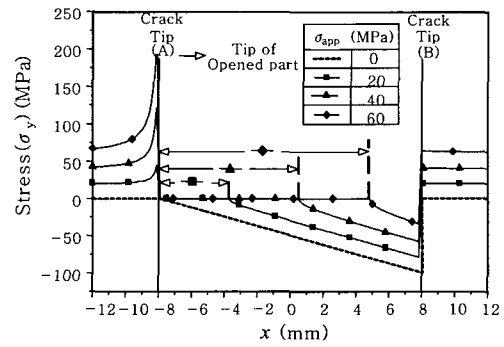
본 연구에서는 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열의 개구거동을 유한요소법에 의하여 재현하는 해석방법의 타당성에 대하여 검토하였고 잔류응력장에 피로균열이 존재하여 외하중의 증가에 따라 균열면에 부분적인 개구가 발생하는 경우를 대상으로 잔류응력이 균열개구거동에 미치는 영향을 검토하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열의 개구거동을 재현하기 위한 유한요소해석방법의 타당성은 부분개구부를 갖는 균열에 대하여 개구부선단의 위치를 응력확대계수를 이용하여 해석적으로 평가하는 방법에 의하



(a)



(b)

Fig. 9 Change of stresses distributed on the crack plane and the ligament during uploading. (a), (b) corresponds to Figure 8 (a), (b)

여 검토하였으며 양자의 해석결과는 양호한 대응성을 보였다.

2) 잔류응력 분포형상으로 인하여 하중증가시 균열면에 부분적인 개구부가 발생하는 경우의 균열의 개구거동은 잔류응력과 외하중과의 중첩원리를 이용한 탄성해석방법을 유한요소해석에 적용함으로써 재현이 가능하였다.

3) 외하중의 증가시 잔류응력분포형상에 따라 균열의 한쪽 선단부가 먼저 열리는 경우의 균열 개구거동은 다른쪽 선단이 열리기까지 먼저 열린 선단은 완전히 열려있는 상태에서 균열개구부선단의 위치가 다른쪽 선단방향으로 지속적으로 이동하는 것임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. E. J. Kim : Effect of welding residual stress on fatigue crack propagation behavior, J. of Korean Welding Society, Vol. 15, No 3(1997)
2. Maddox, S. J., Webber, D. : Fatigue crack propagation in aluminum-zinc-magnesium alloy fillet-welded joints, ASTM STP 648(1978), 159~184
3. Kadapia, B. M. : Influence of residual stresses on fatigue crack propagation in electroslag weld, ASTM STP 648(1978), 224~260
4. Glinka, G. : Effects of residual stress on fatigue crack

- growth in steel weldments under constant and variable amplitude loads, ASTM STP 677(1979), 198~214
5. Honda, K., Torii, T., Miyake, Y., Sakamoto, T. : Fatigue crack propagation in the region having tensile or compressive residual stress, J. of Japan Material, 29-325(1980), 1029~1034
 6. Bucci, R. J. : Effect of residual stress on fatigue crack growth measurement, ASTM STP 743(1981), 28-47
 7. Nelson, D. V. : Effect of residual stress on fatigue crack propagation, ASTM STP 776(1982), 172-194
 8. Kitsuai, Y. : Effect of specimen size and configuration on fatigue crack growth behavior of mild steel butt welded joints, J. of Japan Material, 32-354(1982), 66~71
 9. Nihei, K., Ono, H., Tsunenari, T. : Study on prediction of fatigue crack propagation life considering welding residual stress, J. of Japan N. A., No. 152 (1982), 390~396
 10. Parker, A. P. : Stress intensity factor, crack profiles and fatigue crack growth rates in residual stress fields, ASTM STP 776(1982), 13-31
 11. Mukai, Y., Nishimura, A. and Kim, E. J. : Effects of welding residual stress on fatigue crack opening behaviour, J. of the Japan Welding Society, 5-1(1987), 113~119
 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 field and prediction of the crack propagation behavior, J. of the Japan Welding Society, Vol. 5, No. 2(1987), 85~89
 13. ABAQUS User's Manual for revision 6.2 Vol. II, Hibbits, Karlsson & Sorensen, Inc. 2001
 14. Tada, H., Paris, P. C., Irwin, G. R. : The stress analysis of cracks handbook, Del research corporation (1973)