

## 용접잔류응력장에서 피로균열의 전파에 따른 잔류응력 재분포에 대한 해석적 평가

박 응 준\* · 김 응 준\*\*

\*주성대학교 컴퓨터응용기계과

\*\*한밭대학교 신소재공학부

### An Evaluation of Residual Stress Redistribution in the Welding Residual Stress Field Caused by Fatigue Crack Propagation by Finite Element Method

Eung-Joon Park\* and Eung-Joon Kim\*\*

\*Dept. of Computer Applied Mechanical Engineering, Juseong University, ChungCheongBuk-do, 363-794, Korea

\*\*Dept. of Advanced Materials Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

\*Corresponding author : stu209@nate.com

(Received October 1, 2008 ; Revised October 23, 2008 ; Accepted December 10, 2008)

#### Abstract

An investigation was performed to predict residual stress redistribution for the crack propagation initially through tensile residual stress field. The analytical method, which is based on Dugdale model by finite element analysis using elastic analysis method considering the superposition principle, was proposed to estimate the redistribution of residual stress caused by crack propagation. The various aspect of distribution of residual stress caused by crack propagation was examined based on the configuration change of specimen. The analysis results show that the aspect of redistribution of residual stress caused by crack propagation depends on the width of the specimen provided that the initial distribution of residual stress is identical.

Key Words : Crack propagation, Residual stress, Redistribution, Finite element method, Plastic zone, superposition principle

#### 1. 서 론

용접구조물에 발생할 수 있는 파괴 중에서 피로에 의한 것이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이러한 용접구조물의 피로 파괴의 원인으로는 첫째 용접부에 존재하는 각종 결함과 둘째 용접부 근방에 존재하는 재료의 항복응력 크기에 상당하는 인장잔류응력을 들 수 있다. 용접잔류응력이 피로균열의 전파거동에 미치는 영향에 관한 연구는 같은 외하중 조건에서 인장 잔류응력장으로부터 발생한 피로균열의 전파속도가 모재에서보다 빠르다는 사실에서 비롯되었다. 그 후 초기잔류응력분포

형상이 확인된 경우에 있어서는 인장 잔류응력장에서 발생한 피로균열의 전파거동이 외하중에 인장잔류응력을 더한 하중이 작용하는 경우의 균열전파거동과 같을 것이라고 추정하게 되었다. 또한 이러한 추정을 바탕으로 수행된 일련의 연구에서는 균열전파거동에 미치는 잔류응력의 영향을 응력비에 미치는 평균응력의 효과로 간주하게 되었다<sup>1-4)</sup>. 그러나 용접잔류응력은 분포하여 존재하므로 균열이 전파함에 따라 응력비에 미치는 평균응력의 효과는 변화하게 되며, 결국 용접잔류응력이 피로균열의 전파거동에 미치는 영향은 외하중이 가해질 경우에 균열선단이 열리는 외하중의 범위로부터 구한 유효응력확대계수범위에 의하여 평가하기에 이르렀다.

한편, 피로균열이 초기 인장 잔류응력장으로부터 전파하면 균열전파에 따라 균열선단 전방의 잔류응력은 재분포하게 된다. 이러한 잔류응력의 재분포 양상은 유한폭판의 시험편의 경우에 있어서는 초기 인장 잔류응력장으로부터 전파한 피로균열의 선단이 용접선 중앙부에서 떨어진 초기 압축 잔류응력장에 진입한 이후에도 균열선단 전방에는 여전히 인장응력의 집중이 발생한다는 실험결과가 보고되어져 있으나<sup>5)</sup>, 균열선단 전방의 소성역까지를 고려한 잔류응력의 재분포 거동을 해석적으로 추정할 수 있는 타당한 해석방법은 보고되어져 있지 않다. 또한 맞대기 용접이음부의 판폭이 비교적 넓어 잔류응력의 분포영역이 전체 판폭에 비하여 상당히 작은 경우에 있어서는 초기 인장 잔류응력장에서 발생한 피로균열이 초기 압축 잔류응력장을 통하여 초기에 잔류응력이 존재하지 않았던 영역까지 전파하는 균열전파의 모든 과정에 대한 잔류응력의 재분포 거동을 실험적으로 검토하는 것은 매우 곤란할 뿐만 아니라, 이 경우에 대하여서도 소성역을 고려한 균열선단 전방의 잔류응력의 재분포 거동을 해석적으로 검토하는 방법은 제안된 바가 없다.

본 연구에서는 인장 잔류응력장으로부터 균열이 전파하는 경우, 균열전파에 따른 균열의 개구형상 등 균열의 전파거동을 추정할 수 있는 잔류응력의 재분포 거동을, Dugdale 모델의 개념을 탄성해석에 의한 분포응력을 중첩하는 유한요소해석방법에 도입함으로써 검토하였다. 유한폭판 및 무한폭판에서 얻어진 해석결과에 대하여서는 무한폭판의 경우는 파괴역학적 파라미터를 사용하여 해석방법의 타당성을 검토하였으며, 유한폭판에 대하여서는 실험적으로 얻어진 잔류응력의 재분포 거동과의 대응성을 확인함으로써 인장 잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포 거동에 대한 포괄적인 검토를 시도하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석 방법

관통균열이 존재하는 무한평판에 균등한 외하중이 작용하는 경우에 평판에 생기는 응력이나 변형은 탄성 파괴역학의 관점에서 중첩의 원리를 이용하는 방법으로 설명된다. 이러한 방법은 일반적으로 균열을 가진 물체의 응력확대계수를 설명하는데 이용되고 있으나 균열선단 전방의 응력분포에 관하여서도 중첩의 원리는 성립되어질 것이다. 이러한 관점에서 중앙부에 관통균열이 존재하는 평판에 균등한 외하중이 작용하는 경우를 대

상으로 균열선단 전방의 응력분포를 중첩의 원리를 이용하여 검토하였다.

Fig. 1은 중앙에 균열이 존재하는 평판에 외응력이 작용할 때의 응력확대계수(K)를 중첩의 원리로 설명하는 모델을 이용하여 균열선단 전방의 응력분포를 구하는 방법을 설명한 것이다. Fig. 1(a)는 2c의 균열이 존재하는 상태에서 외응력( $\sigma_0$ )이 작용하는 경우를 나타낸 것으로 균열선단 바로 전방에 인장응력이 집중하는 응력( $\sigma_y$ )가 분포하게 될 것이다. Fig. 1(b)는 균열면에 외하중과 같은 크기의 등분포 응력을 내압으로 작용시켰을 때 균열선단 전방에 발생하는 응력분포( $\sigma_y'$ )를 나타낸 것이며 Fig. 1(c)는 균열이 없는 평판에 외응력이 작용한 경우의 응력분포를 나타낸 것으로 평판단면에는 등분포응력( $\sigma_0$ )이 분포하게 된다. 따라서 Fig. 1(b)의 응력분포( $\sigma_y'$ )와 Fig. 1(c)에서의 응력분포( $\sigma_0$ )를 중첩하면 Fig. 1(a)의 응력분포 ( $\sigma_y$ )가 얻어진다<sup>6)</sup>.

Fig. 2는 인장 잔류응력장에서 피로균열이 전파하는 경우를 가정하여, 피로균열의 전파에 따라 재분포하는 무부하시 균열선단 전방의 잔류응력분포를 Dugdale 모델의 개념을 이용하여 구하는 방법을 나타낸 것이다<sup>7)</sup>. Fig. 2(a)는 용접이 완료된 상태에서 용접선 근방에 존재하는 용접선 방향의 잔류응력 분포( $\sigma_R$ )를 나타낸 것이다. 용접선(y축)방향의 인장 잔류응력과 압축 잔류응력은 전체적으로 평형을 이루고 있다. Fig. 2(a)의 상태에서 2c 구간을 균열로 간주하면 2c 구간에 분포하던 인장 잔류응력에 의하여 균열은 개구하게 되며 균열선단 전방에는 2c 구간에 존재하던 잔류응력의 해방에 의하여 균열선단 바로 전방에 인장응력이 집중하는 응력이 분포하게 될 것이다. 이 분포응력과 Fig. 2(a)의 2c 구간 바깥쪽에 분포하던 잔류응력을 중첩하면

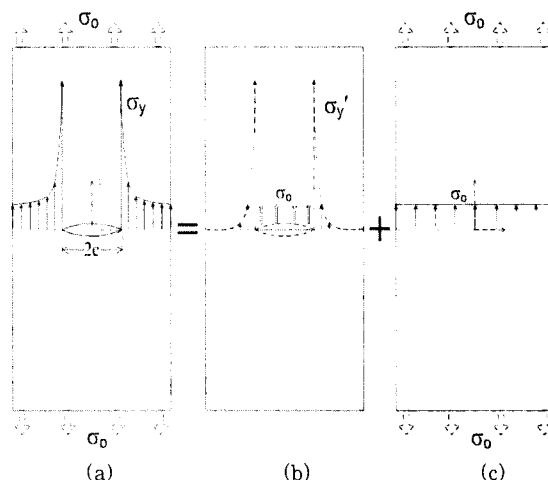


Fig. 1 Illustration of superposition principle

Fig. 2(b)에서 보인 바와 같은 분포응력( $\sigma_R'$ )이 얻어지게 된다. Fig. 2(a')의 분포응력( $\sigma_R'$ )은 잔류응력장에서 균열전파에 의하여 재분포한 잔류응력분포의 탄성 해석 결과가 된다. 본래 Dugdale 모델은 Fig. 2(a')와 Fig. 2(b)에서 구한 응력확대계수(Stress Intensity Factor : K)의 절대값이 같게 되는 조건으로부터 소성역 구간(R)을 구하고 있어 해석의 대상이 무한판으로 한정되는 문제점을 가지고 있다. 그러나 본 유한요소해석에서 Dugdale 모델의 적용은 Fig. 2(c)의 응력분포로부터 소성역 선단의 응력값이 재료의 항복응력이 되도록 Fig. 2(b)에서 재료의 항복응력에 해당하는 압축 응력을 균열선단에서 균열 중심방향으로 일정구간에 내압으로 작용시키는 방법을 수행하였다. 따라서 본 연구에서의 균열선단으로부터 균열 중심방향으로의 일정구간을 Dugdale 모델에서 소성역에 해당하는 구간으로 간주하였으며, 소성역 선단의 응력값이 재료의 항복응력이 되었을 때 얻어진 소성역 선단전방의 응력분포(Fig. 2(c))가 균열 2c에 의하여 균열선단 전방에 재분포한 잔류응력분포( $\sigma_{PR}$ )가 된다.

2.2 해석 모델

유한요소해석은 무한폭판과 길이 250mm, 판폭 200mm인 유한폭판에 대하여 수행하였으며 무한폭판, 유한폭판 어느 경우에 있어서도 모델의 중앙에 길이 2c인 균열이 존재하는 것으로 균열의 전파는 균열길이를 점차 증가시키는 것으로 해석을 수행하였다. 해석모델의 재질은 연강인 SS410로 탄성계수는 210GPa, 포아송비는 0.3, 항복응력은 260MPa로 하였다. 유한요소해석은 범용유한요소패키지인 ABAQUS(Ver. 6.4)를 사용하였으며, 해석에 사용된 요소는 균열면에는 압축 잔류응력에 의한 균열면의 겹침을 방지하기 위하여 접촉요소를 사용하였고, 모재부에는 해석모델의 판폭과

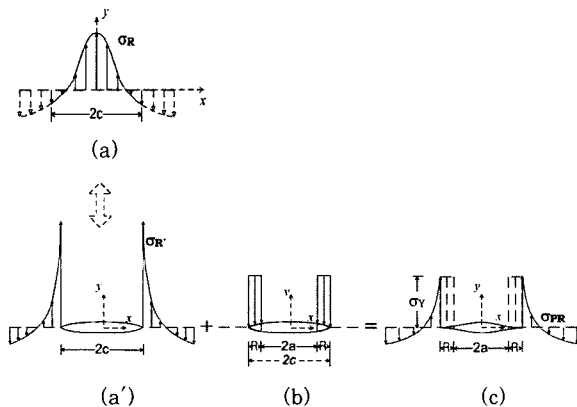


Fig. 2 Modified Dugdale model

길이에 비해 두께가 얇은 판재의 경우를 가정한 평면응력 상태로 하여 평면응력요소(CPS4)와 무한평면요소(CINPS4)를 사용하였다<sup>8)</sup>.

3. 해석 결과

Fig. 3은 무한폭판에 존재하는 잔류응력장을 균열이 전파하는 경우, 균열전파에 따른 응력확대계수(K)의 변화를 나타낸 것이다. 응력확대계수의 변화를 구하는데 사용한 초기 잔류응력의 분포형상은 두 개의 연강 평판을 구속이 없는 상태에서 맞대기 용접하였을 때 용접선 근방에 발생한 인장 잔류응력과 용접선에서 떨어진 위치에 발생한 압축 잔류응력의 분포형상을 장방형으로 단순화 한 것이다. 이때 잔류응력의 특성을 고려하여 인장 잔류응력의 면적과 압축 잔류응력의 면적을 같게 하였다. Fig. 3에서 해석의 대상을 무한폭판으로 한 것은 초기 잔류응력의 분포응력에 해당하는 응력을 균열면에 내압으로 작용시키는 방법에 의하여 응력확대계수(K)를 구하는 해석방법이 무한폭판의 경우에서만 성립되기 때문이다<sup>9)</sup>. 균열전파에 따른 응력확대계수의 변화의 양상은 균열이 초기 인장 잔류응력장을 전파하는 동안에는 점차 증가하다가 균열선단이 초기 압축 잔류응력장으로 진입함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 그림에서 응력확대계수의 값이 0이 된 균열길이에서 균열선단은 닫히게 되고 이보다 긴 균열길이에서 균열선단은 닫힌 상태를 계속할 것이므로 K 값을 0으로 간주하였다.

Fig. 4는 인장 잔류응력장으로부터 균열이 전파하는 경우에 대하여 유한요소해석방법을 사용하여 임의의 균열길이에서 구한 균열선단의 형상과 균열선단 근방의 잔류응력의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 Fig. 2(a')의 상태 즉 균열전파에 따른 잔류응력 재분포의

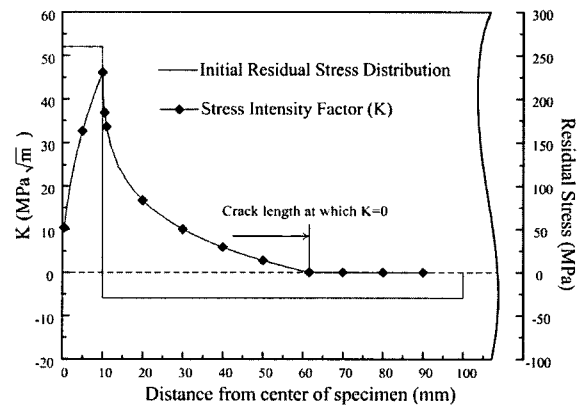


Fig. 3 Initial residual stress distribution and stress intensity factor due to crack propagation in the residual stress field by FEM

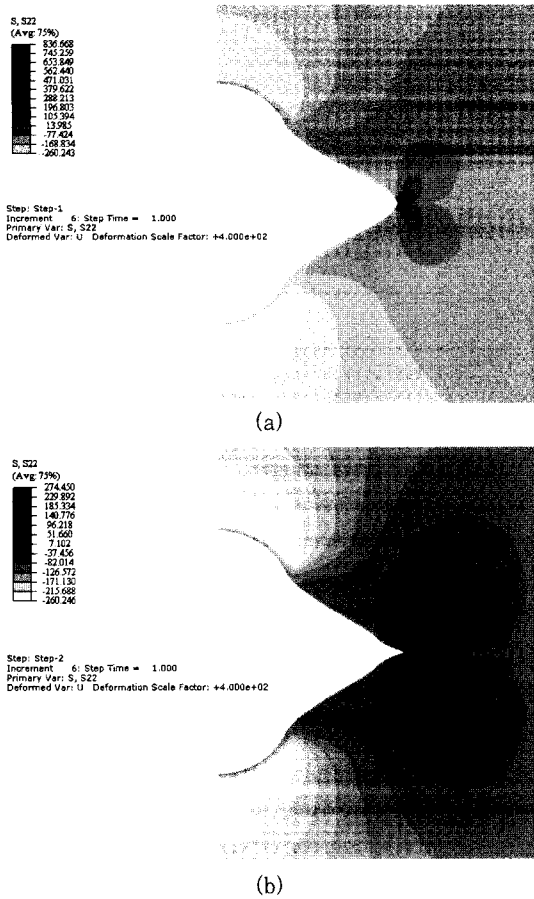


Fig. 4 An example of crack tip opening shape and stress distribution obtained from FEM

탄성해석 결과이며 균열선단부에 항복응력 이상의 응력 집중을 나타내고 있으며 균열선단은 완전히 열려져 있음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 Fig. 2(c)의 상태 즉 균열선단 전방의 소성역이 고려된 해석결과이며 균열선단 전방의 분포응력이 항복응력 이하의 값을 나타내고 있으며 균열선단부는 상대적으로 닫혀 있는 형상을 보인다.

Fig. 5는 임의의 유한폭판의 맞대기 용접이음부의 경우에 대하여 시험편 중앙부에 존재하는 초기 인장 잔류 응력장으로부터 피로균열이 전파할 때 균열전파에 따른 균열선단 전방의 잔류응력분포를 Fig. 2에서 언급한 Dugdale 모델을 이용한 유한요소해석방법에 의하여 구한 결과(Fig. 2(c))와 유한요소법을 이용한 탄성해석에 의하여 구한 결과(Fig. 2(a'))를 비교하여 나타낸 것이다. 이때 사용한 초기 잔류응력 분포도 Fig. 3에 나타낸 잔류응력 분포와 동일한 것이다. 균열전파에 따른 균열선단 전방의 잔류응력의 분포 경향은 소성역 유무의 결과가 소성역 보정의 관점<sup>10)</sup>에서 높은 정확도로 일치하고 있어 Dugdale 모델을 이용한 유한요소해석방법은 균열전파에 따른 소성역을 고려한 잔류응력의 재

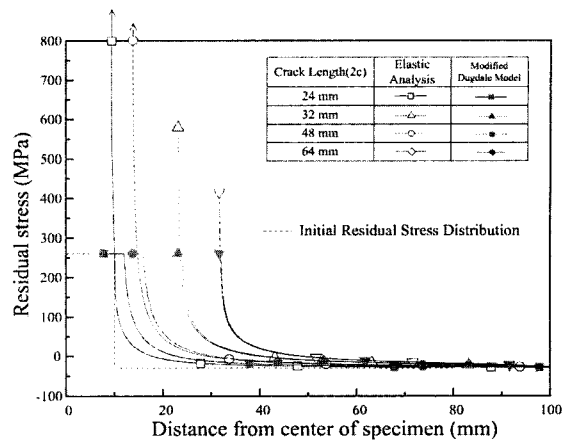


Fig. 5 Difference in redistribution of residual stress between with/without consideration of plastic deformation ahead of crack tip

분포를 구하는 합리적인 방법임을 알 수 있다.

또한 Dugdale 모델에서는 응력확대계수의 중첩을 이용하여 소성역을 구하고 있으므로 Dugdale 모델의 적용은 무한폭판에 한정된다. 그러나 본 연구에서의 Dugdale 모델을 이용한 유한요소해석방법은 탄성해석에 의한 분포응력의 중첩으로부터 소성역의 크기를 구하고 있으므로 판폭에 상관없이 그 적용이 가능하다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 유한폭판에 대하여 검토한 해석방법을 무한폭판에 적용한 것으로, 무한폭판의 중앙부에 존재하는 인장잔류응력장으로부터 균열이 전파하는 경우 이상에서 언급한 Dugdale 모델을 이용한 유한요소해석방법으로 구한 균열전파에 따른 균열선단부의 소성역 크기의 변화를 나타낸 것이다.

균열전파에 따른 소성역의 크기의 변화는 균열이 초기인장잔류응력장을 전파하는 동안에는 점차 증가하다가 균열선단이 초기압축잔류응력장으로 진입함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며, 소성역의 크기와 Fig.

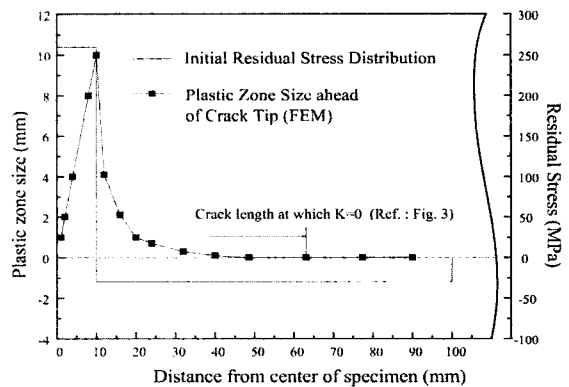


Fig. 6 Variation of plastic zone size due to crack propagation in the residual stress field by FEM

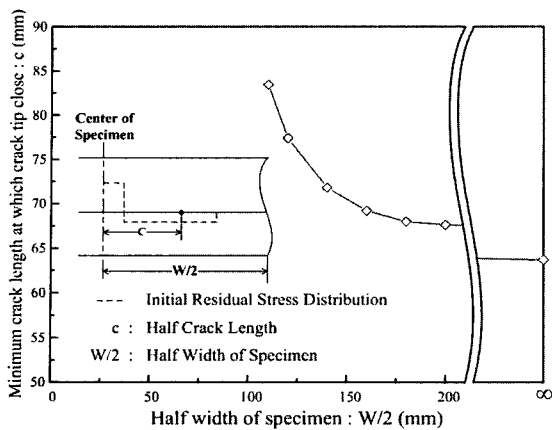


Fig. 7 Minimum crack length at which crack tip close depending on the width of specimen

3에서 나타낸 응력확대계수의 값이 거의 동일한 균열길이에서 0의 값을 나타내고 있어 본 연구에서 검토한 Dugdale 모델을 이용한 유한요소해석방법이 파괴역학의 관점에서도 타당함을 나타내고 있다.

이상에서와 같이 Dugdale 모델을 이용한 유한요소해석방법에 의하여 유·무한폭판의 경우에 대하여 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포 거동을 검토하였다.

Fig. 7은 Dugdale 모델을 이용한 유한요소해석방법에 의하여 동일한 초기 잔류응력 분포를 갖지만 판폭은 각기 다른 시험편에 대해서 균열전파 시 균열선단에 소성역이 나타나지 않는 균열길이를 나타낸 것이다. 여기서 균열선단에 소성역이 발생하지 않는다는 것은 Fig. 2와 Fig. 3에서 보인 바와 같이 그 균열길이에서의 응력확대계수의 값이 0이 되거나 균열선단 전방에 응력집중이 발생하지 않는다는 의미로 생각할 수 있다. 동일한 초기 잔류응력 분포의 경우 시험편의 폭이 좁은 경우에는 균열전파 전 구간에서 균열선단에 소성역이 발생하지 않지만 시험편 판폭이 넓어지면 넓어질수록 소성역이 발생하지 않게 되는 균열길이는 점차 짧아지고 있음을 알 수 있다. 따라서 유한폭판 시험편의 경우 시험편 중앙부의 인장 잔류응력장으로부터 균열이 전파하는 경우 실험적으로 얻어진 잔류응력의 재분포 경향 즉 균열전파의 전 구간을 통하여 균열선단 전방에는 인장 응력의 집중이 생긴다는 실험결과는 해석적으로도 증명되는 것임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초기 인장 잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우, 균열전파에 따른 균열선단 전방의 잔류응력의 재분포 형상을 중첩원리에 Dugdale모델의

개념을 도입하여 예측할 수 있는 유한요소해석방법에 대하여 검토하였다.

본 연구에서 얻어진 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 초기 인장 잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우에 대하여, Dugdale 모델의 개념을 중첩의 원리에 도입하는 유한요소해석방법에 의하여 시험편의 폭에 상관없이 소성역이 고려된 잔류응력의 재분포를 예측할 수 있다.

2) 비교적 판폭이 좁은 유한폭판의 경우에 있어서는 균열전파 전 구간 중 균열선단 전방에는 항상 인장 잔류응력의 집중이 생기며 이러한 해석결과는 지금까지의 실험결과에서 얻어진 경향과 잘 일치한다.

3) 무한폭판의 경우에 있어서는 균열이 전파하여 균열선단 전방에 응력집중이 생기지 않는 균열길이에서, 균열면에 분포하는 초기 잔류응력으로부터 산정된 응력확대계수의 값도 0의 값을 나타낸다.

#### 참 고 문 헌

1. R. J. Bucci, : Effect of residual stress on fatigue crack growth measurement, ASTM 743(1981), 28~47
2. D. V. Nelson, : Effect of residual stress on fatigue crack propagation, ASTM STP 776(1982), 172~194
3. A. Ohta, E. Sasaki, M. Kamakura, and M. Nihei, : Effect of residual tensile stresses on threshold level for fatigue crack propagation in welded joints of SM50B steel, Trans. of the Japan Welding Society, 12-1(1981), 31~38
4. K. Nihei, H. Ono, and T. Tsunenari, : Study on prediction of fatigue crack propagation life considering welding residual stress, J. of Japan N. A., No. 152(1982), 390~396
5. Y. Mukai, A. Nishimura, and E. J. Kim, : Redistribution of residual stress caused by crack propagation initially through residual stress field, J. of the Japan Welding Society, 4-1(1986), 154~159
6. K. Masubuchi, Monthly Report of Transportation Technical Research Institute. 8, 12 (1959).
7. E. J. Kim, E. J. Park, S. H. Yoo, : An analysis of the redistribution of residual stress due to crack propagation initially through residual tensile stress field by finite element method, Journal of KWS, 21-7(2003), 71~77(in Korean)
8. ABAQUS User's Manual for revision 6.3 Vol. II, Hibbits, Karlsson & Sorensen, Inc. 2002
9. H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin, : The stress analysis of cracks handbook, Del Research Corporation(1973)
10. F. A. McClintock, and Irwin, G. R., ASTM STP-381 (1965), 87