

연구논문

인장잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우 잔류응력의 재분포거동에 대한 해석적 검토

김 응 준* · 박 응 준** · 유 승 현**

* 한밭대학교 신소재공학부

** 아주대학교 기계공학부

An Analysis of the Redistribution of Residual Stress Due to Crack Propagation Initially Through Residual Tensile Stress Field 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

In this study, an investigation based on the superposition principle to predict residual stress redistribution caused by crack propagation itself initially through residual tensile stress field was performed by finite element method. The tendency in residual stress redistribution caused by crack propagation recognized both from the analytical results and experimental result was the residual stress concentration consecutively occurred in the vicinity of crack tip even the situation that the crack propagated to the region initially residual compressive stress existed. The software for the analysis is ABAQUS, which is a general purpose finite element package. The analytical method that attempt to take the plastic deformation at the crack tip due to tensile residual stress into the consideration of residual stress redistribution caused by crack propagation was proposed. The plastic zone size at the tip of fatigue crack and redistributed residual stresses were calculated by finite element method on the bases of the concept of Dugdale model. Comparing these analytical results with experimental results, it is verified that the residual stress redistribution caused by crack propagation can be predicted by finite element method with the proposed analytical method.

* Corresponding author : ejkim@hanbat.ac.kr

(Received October 22, 2003)

Key Words : Fatigue Crack, Residual Stress, Crack Propagation, Stress Redistribution, Finite Element Method, Plastic Zone, Superposition Principle

1. 서 론

용접구조물의 파괴원인을 분류한 보고에 의하면 전체 구조물의 파괴 중 피로에 의한 것이 가장 많다. 이러한 용접구조물의 피로파괴의 원인으로는 용접부에 존재하는 각종 결함과 용접부 근방에 분포하여 존재하는 최대 재료의 항복응력에 상당하는 인장잔류응력을 들 수 있다. 용접잔류응력이 피로균열의 전파거동에 미치는 영향에 관한 연구는 용접부의 인장잔류응력장으로부터 발

생한 피로균열의 전파속도가 같은 외하중 조건에서의 모재에서보다 빠르다는 사실에서 비롯되었다. 그 후 인장잔류응력장에서 발생한 피로균열의 전파거동이 외하중에 인장잔류응력을 가산한 하중이 작용하는 경우의 균열전파거동과 같을 것이라고 추정하게 되었다. 이러한 추정을 바탕으로 하여 수행된 일련의 연구¹⁻⁸⁾에서는 균열전파거동에 미치는 잔류응력의 영향을 응력비에 미치는 평균응력의 효과로 간주하고 있다. 그러나 용접잔류응력은 분포하여 존재하므로 균열이 전파함에 따라 응력비에 미치는 평균응력의 효과는 변화하게 되어, 결

국 용접잔류응력이 피로균열의 전파거동에 미치는 영향은 외하중 부하시 균열선단이 열려있는 외하중범위로부터 구한 유효응력확대계수범위($\Delta K_{eff.}$)에 의하여 평가되어 왔다고 할 수 있다. 따라서 피로균열의 전파거동에 미치는 용접잔류응력의 영향에 대한 정확한 평가는 용접잔류응력장에서 피로균열의 개구거동, 즉 균열전파에 따른 무부하시의 균열형상의 변화와 외하중부하에 따른 개구거동을 파악함으로서 가능해진다는 것을 알 수 있다. 그러나 용접잔류응력장에 존재하는 피로균열의 형상을 실험적으로 규명하는 것은 기술적으로 어려움이 있으며, 또한 균열전파나 하중부하에 의한 균열의 개구거동을 예측하기 위한 타당한 해석방법도 개발되어 있지 않은 실정이다.

이러한 배경으로부터 본 연구에서는 인장잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우 피로균열의 개구거동에 미치는 용접잔류응력의 영향을 정량적으로 검토하기 위한 기초적 연구로서 용접잔류응력장을 전파하는 피로균열을 대상으로 균열전파에 따른 무부하시의 균열형상 변화 및 잔류응력의 재분포현상을 중첩원리를 이용한 탄성해석방법에 의하여 검토하였다. 또한 탄성해석방법을 유한요소해석에 적용하여 얻어진 잔류응력 재분포의 해석결과를 Dugdale 모델을⁹⁾ 이용함으로서 인장잔류응력에 의한 균열선단부의 소성역을 고려한 잔류응력분포로 환산하였으며 이러한 결과를 피로균열 전파실험으로 얻어진 잔류응력의 재분포 결과와 비교하였다.

2. 해석모델 및 해석방법

2.1 해석모델

유한요소해석에 사용된 모델은 평판의 중앙에 관통균열이 존재하고 균열면 및 균열선단전방의 모재부에 인장잔류응력장과 압축잔류응력장이 존재하는 경우에 대하여 하중조건, 균열의 대칭성 및 균열면의 접촉문제 등을 고려하여 Fig. 1과 같이 1/2 모델로 하였다. 이

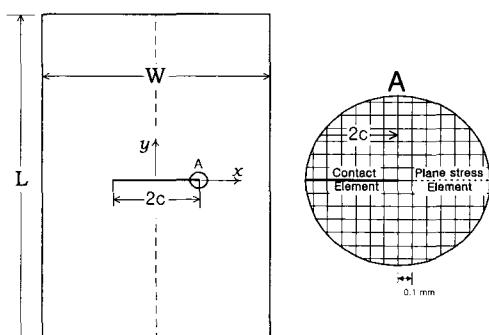


Fig. 1 The configuration of the finite element model

때 분포된 잔류응력은 균열면 및 균열연장선상에 접한 요소에 존재하는 응력으로 간주하여 해석에 적용하였다. 해석모델의 기하학적 형상은 실험에 사용된 시험편의 형상을 고려하여 길이 200mm, 폭 190mm와 두께 5mm를 갖는 경우와 길이 1000mm, 폭 900mm와 두께 5mm를 갖는 경우에 균열전체길이 2c의 균열이 해석모델의 중앙에 존재하는 것으로, 재료의 물성치는 시험편의 재질을 고려하여 탄성계수는 210GPa, 포아송비는 0.3으로 하였다. 유한요소해석은 범용 유한 요소 페키지인 ABAQUS (Ver. 6.3)를 이용하였고, 잔류응력장에 존재하는 균열에 대한 해석은 탄성해석방법을 이용하였다¹⁰⁾. 해석에 사용된 요소는 해석모델의 판폭과 길이에 비해 두께가 얇은 경우를 평면응력상태로 가정한 평면응력요소(CPS4 : 4-node bilinear element)이며, 균열면의 겹침을 방지하기 위하여 접촉요소를 사용하였다.

2.2 해석방법

잔류응력이 분포하여 존재하는 재료를 탄성체로 가정하면 인장잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우 피로균열의 전파에 따른 잔류응력의 재분포는 초기 잔류응력분포를 이용한 탄성해석에 의하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 유한요소해석에 의하여 얻어진 균열선단전방의 응력분포에는 특이성이 나타나지 않는 점에 주목하여 인장잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우 피로균열의 전파에 따른 잔류응력의 재분포를 중첩의 원리를 이용하는 탄성해석방법에 의하여 검토하였다. 또한 검토된 해석방법을 유한요소해석에 적용함으로서 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포를 구하였다. 또한 유한요소해석을 통하여 얻어진 임의의 균열길이에서의 잔류응력의 분포는 그 길이에서의 균열의 형상과 함께 결정되어지는 값이다.

Fig. 2는 인장잔류응력장으로부터 균열이 전파하는 경우 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포의 해석방법을 중첩의 원리를 이용하여 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 용접이 완료된 상태에서 용접선 근방에 존재하는 용접선방향 잔류응력의 분포(σ_R)를 나타낸 것이다. 그럼에서 y축은 용접선을 나타낸 것으로 용접선의 근방에는 인장잔류응력이 존재하고, 용접선에 수직한 x축 방향으로 용접선에서 떨어진 위치에는 압축잔류응력이 존재하는 분포양상을 나타내고 있으며 x축상의 인장잔류응력과 압축잔류응력은 전체적으로 평형을 이루고 있다. 인장잔류응력영역에 표시된 2c는 앞으로 균열(2c)이 위치하게 될 구간을 나타낸 것이다. Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)는 Fig. 2(a)의 초기잔류응력분포를 길이 2c의 균열이

위치하게 될 구간의 안쪽과 바깥쪽으로 분리하여 나타낸 것이다. 이 상태에서는 $2c$ 가 아직 균열이 아니므로 분리에 따른 응력집중등에 의한 잔류응력분포의 변화는 발생하지 않게 된다. 여기서 Fig. 2(b)의 상태에서 $2c$ 구간을 균열로 간주하면 $2c$ 구간에 분포하던 인장잔류응력에 의하여 Fig. 2(b')에서 보인 바와 같이 균열은 개구하고 균열선단 전방에는 인장응력이 집중하는 응력분포(σ_a)가 발생하게 된다. 따라서 Fig. 2(b')의 응력분포를 Fig. 2(c)의 응력분포와 중첩하면 Fig. 2(d)의 분포가 얻어지게 된다. 결국 Fig. 2(d)의 응력분포는 Fig. 2(a)의 초기인장잔류응력장에서 발생한 균열이 길이 $2c$ 까지 전파할 때 균열전파에 의하여 재분포한 잔류응력분포(σ_{Ra})라고 할 수 있다.

Fig. 3은 초기잔류응력장으로부터 길이 $2c$ 의 균열이 전파함에 따라 잔류응력이 재분포한 Fig. 2(d)의 잔류응력분포의 상태로부터 다시금 균열이 전파하여 균열길이가 $2c+2\delta$ 가 되었을 때의 잔류응력의 재분포의 해석방법을 Fig. 2에서와 같이 중첩의 원리를 이용하여 나타낸 것이다. Fig. 3(a)의 잔류응력분포는 Fig. 2(d)와 같은 것으로 그림에 표시된 $2c+2\delta$ 는 현재길이 $2c$

로부터 전파한 길이 2δ 의 균열이 위치하게 될 구간을 나타낸 것이다. Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)는 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)에서와 같이 Fig. 3(a)의 잔류응력분포를 길이 $2c+2\delta$ 의 균열이 위치하게 될 구간의 안쪽과 바깥쪽으로 분리하여 나타낸 것이다. Fig. 3(b)의 상태에서 $2c+2\delta$ 구간을 균열로 간주하면 $2c$ 와 $2c+2\delta$ 사이의 구간에 분포하던 인장잔류응력에 의하여 Fig. 3(b')에서 보인 바와 같이 길이 $2c+2\delta$ 의 균열은 개구하고 균열선단 전방에는 인장응력이 집중하는 응력분포가 발생하게 된다. 따라서 Fig. 3(b')의 응력분포를 Fig. 3(c)의 응력분포와 중첩하면 Fig. 3(d)의 분포가 얻어지게 되며 Fig. 3(d)의 응력분포는 Fig. 3(a)에 나타낸 균열길이 $2c+2\delta$ 에서의 잔류응력분포로부터 균열길이가 $2c+2\delta$ 까지 전파함으로서 재분포한 잔류응력분포가 된다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 탄성해석결과

2절에서 언급한 균열전파에 따른 잔류응력 재분포의 해석은 탄성해석방법에 의하여 수행되었으므로 이론적

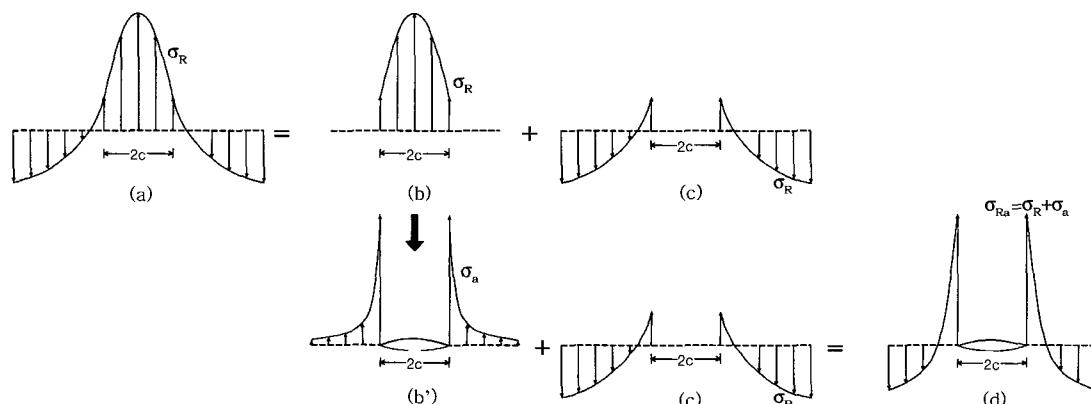


Fig. 2 A model illustrating the procedure to determine the redistribution of residual stress caused by crack propagation using initial residual stress distribution

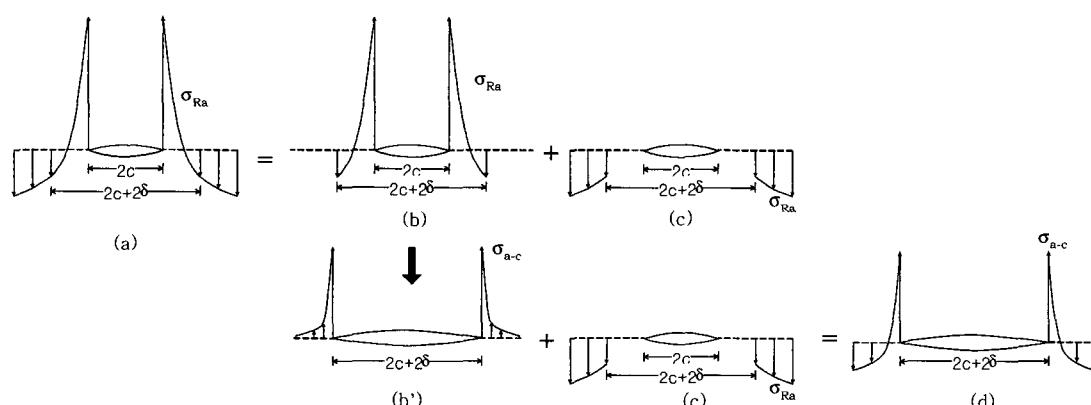


Fig. 3 A model illustrating the procedure to determine redistribution of residual stress caused by crack propagation using redistributed residual stress

으로는 Fig. 2(b')와 Fig. 3(b')의 균열선단에서 인장응력값이 무한이 되는 응력분포의 특이성을 나타나게 된다. 또한 그 결과 Fig. 2(d)와 Fig. 3(d)에서도 균열선단에서의 인장잔류응력은 무한값을 가지게 될 것이다. 그러나 본 연구에서는 2절의 해석방법을 유한요소해석에 적용하여 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포의 해석을 수행하였으므로 균열선단전방에서의 응력분포는 특이성을 나타내지 않고 균열선단에서의 인장응력값은 유한값을 나타내게 된다. 따라서 Fig. 2와 Fig. 3에서와 같이 중첩의 원리를 이용하는 탄성해석방법을 유한요소법에 적용하는 해석방법은 임의의 균열길이에서도 균열선단근방의 응력분포에 특이성이 나타나지 않기 때문에 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포를 항상 초기응력분포로부터 구하던 종래의 해석방법과 비교하여 임의의 균열길이에서의 잔류응력분포로부터도 균열전파에 따른 균열형상과 잔류응력의 재분포를 추정할 수 있는 장점을 갖는다. 이러한 점에서 균열이 발견된 용접구조물에 대하여 본 해석방법의 적용이 가능하다는 공학적 의미를 갖고 있다.

Fig. 4는 임의의 초기잔류응력분포에 대하여 Fig. 2와 Fig. 3에서와 같이 균열길이 $2c$ ($c=16$ mm)에서 잔류응력분포를 구하고 이 분포를 사용하여 균열길이 $2c+2\delta$ ($c+\delta=24$ mm)에서 다시 구한 잔류응력 재분포의 해석결과를 초기잔류응력분포로부터 한번에 $2c+2\delta$ 의 균열길이에 대하여 수행한 잔류응력 재분포의 해석결과 쪽이 균열길이 $2c$ 를 거친 해석결과와 비교해서 균열선단 부근에서의 응력값이 약간 큰 값을 보이고 있으나 전반적으로

는 거의 동등한 값을 나타내고 있다. 이렇게 초기잔류응력분포로부터 한번에 $2c+2\delta$ 의 균열길이에 대하여 수행한 잔류응력 재분포의 해석결과가 균열길이 $2c$ 에서의 분포를 사용하여 $2c+2\delta$ 에서의 분포를 구하는 해석결과와 비교해서 약간 큰 값을 보이는 것은 후자의 해석결과 쪽이 유한요소해석을 두 번 수행함으로서 균열선단근방에서의 응력분포의 특이성이 두 번 무시되는 것에서 비롯한 것으로 이러한 두 해석결과의 차이는 요소크기를 작게 할수록 감소하게 된다.

이상에서 언급한 해석방법을 사용하여 인장잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우의 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포를 구하였다. 초기잔류응력분포는 실험적으로 얻어진 분포를 사용하였으며 임의의 균열길이에서의 잔류응력분포의 유한요소 해석결과는 초기잔류응력분포로부터 얻어진 결과이다.

피로균열전파실험에 사용한 시험편은 HT800강판에 전자빔 용접에 의한 melt run을 실시한 후 시험부의 길이 214mm, 폭 190mm, 두께 5mm의 Fig. 1의 형상으로 기계가공하여 제작하였다. 초기잔류응력분포 및 피로균열전파에 따라 재분포하는 잔류응력을 측정하기 위하여 피로균열이 전파하게 될 시험편 단면의 표면에 게이지 길이 1mm의 2축 또는 3축의 스트레인 게이지를 부착하였다¹¹⁾. Fig. 5는 피로균열전파실험에 의한 잔류응력 재분포의 실험결과¹¹⁾를 잔류응력 재분포의 유한요소해석결과와 동시에 나타낸 것이다. 균열전파에 따라 무부하상태에서 측정한 잔류응력의 재분포 경향은 균열선단 전방에 항상 인장잔류응력이 집중해서 존재하는 경향을 나타내고 있으며 이러한 경향은 균열이 초기에 압축잔류응력이 존재하던 위치까지 전파하더라도 여전히 나타나고 있다. 실험결과와 비교해서 해석결과 쪽이 균열선단에서의 인장잔류응력의 집중도가 크게 나타나고 있는 것은 해석결과가 탄성해석에 의한 것으로 균열선단에서의 인장잔류응력의 집중에 의한 소성변형이

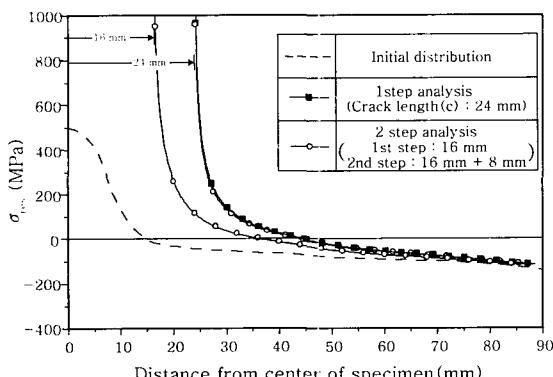


Fig. 4 Comparison of redistributed residual stresses between the result of 1 step analysis (24 mm) and 2 step analysis(16mm+8mm)

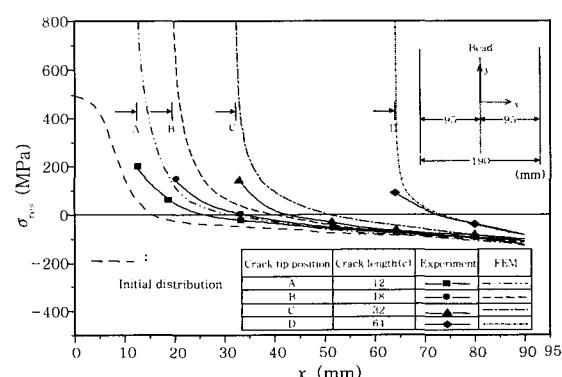


Fig. 5 Comparison of residual stress redistributions caused by fatigue crack between experimental result and analytical result by FEM

고려되지 않았기 때문인 것으로 추정된다. Fig. 5에서와 같이 인장잔류응력장으로부터 균열이 전파하는 경우에는 균열이 초기에 압축잔류응력장이었던 위치까지 전파하여도 균열선단전방에는 반드시 인장잔류응력의 집중이 발생하였다. 이것은 균열전파중에 균열선단이 무부하상태에서도 항상 열려 있는 데에 기인한 것으로 추측할 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 Fig. 5의 결과는 시험편 폭이 한정되어 있어 인장잔류응력장으로부터 전파한 균열이 압축잔류응력장쪽으로 얼마만큼 전파하기 까지 균열선단전방에는 인장잔류응력의 집중이 생기는 현상이 계속될 것인가에 대한 검토는 불가능하였다. 따라서 판폭이 충분히 넓은 경우의 잔류응력분포를 대상으로 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포를 검토하였다. 실험에 사용한 시험편은 폭 450mm, 길이 1000mm, 두께 5mm의 두 장의 SM500 강판을 길이 방향으로 맞대어 MAG 용접에 의하여 제작하였다. 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포실험은 시험편의 크기 때문에 피로균열전파실험에 곤란한 이유와 피로균열과 소-컷(saw cut)의 경우 선단에서의 응력집중정도가 피로균열의 경우가 률 뿐 전체적인 잔류응력분포는 같은 경향을 나타내는 실험결과¹¹⁾를 고려하여 소-컷에 의하여 수행하였다. 초기잔류응력분포 및 소-컷에 의한 노치(notch)길이의 변화에 따라 재분포하는 잔류응력의 측정에는 소-컷을 실시하는 단면을 중심으로 판재 전후면의 동일한 위치에 게이지 길이 1mm의 2축 스트레이인 게이지를 부착하여 수행하였다. 이 때 소-컷(saw cut)에 의한 노치의 폭은 약 1mm이었다¹¹⁾. Fig. 6은 이상의 실험결과¹¹⁾를 해석결과와 동시에 나타낸 것이다. 초기잔류응력값을 나타내는 측정점의 위치가 스트레이인 게이지의 부착위치이며 각각의 기호로 표시된 노치길이에서 잔류응력의 측정값을 같은 기호로 나타내었다. 노치길이의 변화에 따른 잔류응력의 재분포는 노치길이를 초기에 잔류응력이 거의 존재하지 않는 영역까지 늘어나도록 노치선단전방에는 반드시 인장잔류응력이 집중해서 존재하는 경향을 나타내고 있다. 실험결과와 비교해 서 해석결과쪽이 균열선단에서의 인장잔류응력의 집중

도가 약간 크게 나타나고 있다. 이것은 Fig. 5에서와 같이 해석결과가 탄성해석에 의한 것인데 반하여 실험결과에는 균열선단에서의 인장잔류응력의 집중에 의한 소성변형이 반영되었기 때문인 것으로 추정된다.

3.2 탄소성해석결과

Fig. 5에서 보인 바와 같이 피로균열전파에 의한 잔류응력의 재분포 경향은 균열선단에서 인장잔류응력의 집중의 정도는 유한요소해석에 의한 탄성해석의 결과가 실험결과보다 다소 높은 경향을 보였으며 이러한 경향은 실험결과에는 균열선단부에서의 응력집중에 의한 재료의 소성변형이 반영된 반면 해석결과에는 이러한 소성변형이 고려되지 않았기 때문인 것으로 추정되었다. 본 연구에서는 유한요소해석으로 얻어진 균열전파에 따른 잔류응력 재분포의 탄성해석결과에 Fig. 7의 Dugdale 모델을 적용함으로서 균열선단에 소성역이 존재하는 경우의 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포를 해석적으로 구하는 방법에 대하여 검토하였다. 본래 Dugdale 모델은 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에서 구한 응력확대계수(K)의 합이 0이 되는 조건으로부터 소성역 구간 R을 구하고 있으나, 본 해석에서 Dugdale 모델의 적용은 균열전파에 따라 균열선단부에 인장응력이

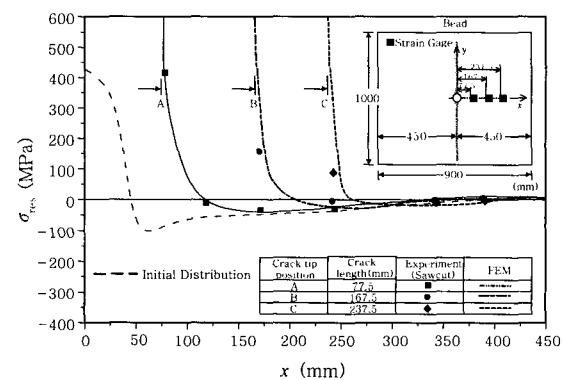


Fig. 6 Comparison of residual stress redistributions between experimental result by sawcut and analytical result by FEM

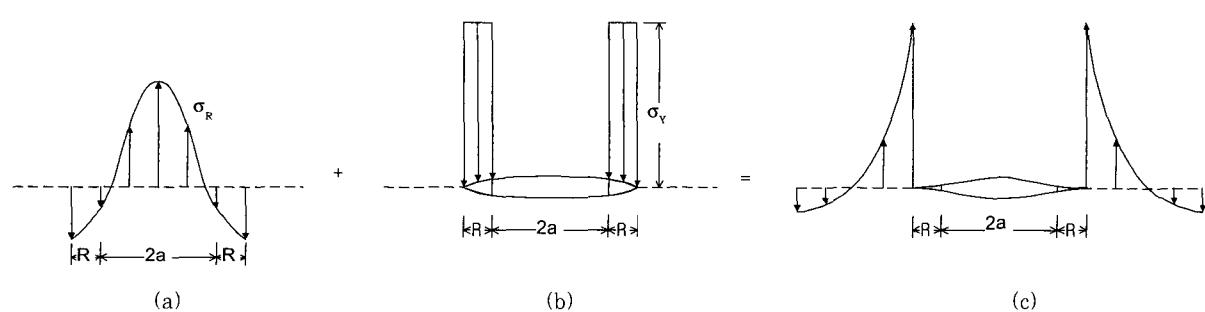


Fig. 7 Modified Dugdale model

집중하는 형태로 재분포한 잔류응력 분포의 탄성해석결과로부터 균열선단의 응력값이 재료의 항복응력이 되도록 재료의 항복응력에 해당하는 압축응력을 균열선단으로부터 균열중심방향으로 일정구간에 작용시키는 방법으로 수행하였다. 본 연구에서는 균열선단의 응력이 항복응력이 되는 균열선단부로부터 균열중심방향으로의 일정구간을 Dugdale 모델에서의 소성역에 해당하는 구간으로 간주하였다.

이렇게 함으로서 재료의 항복응력에 해당하는 압축응력이 작용한 균열선단으로부터 균열중심방향으로의 일정구간은 소성역이 되고 또한 소성역 선단 전방에는 항상 항복응력 이하의 응력값이 존재하도록 하였다.

Fig. 8은 이상에서 언급한 Dugdale 모델을 이용하여 Fig. 5에서의 초기잔류응력분포로부터 균열길이의 변화에 따른 균열선단 전방의 소성역의 크기의 변화를 구한 결과이다. 균열길이의 변화에 따라 소성역의 크기는 균열이 초기인장잔류응력장을 전파하는 동안에는 약간 증가하다가 잔류응력값의 감소와 함께 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 이렇게 균열이 용접선 부근의 초기인장잔류응력장을 전파하는 동안 소성역의 크기가 증가하는 것은 이 구간에서 잔류응력의 분포는 급격한 변화를 나타내지 않아 잔류응력이 마치 균등응력(uniform stress)과 같은 효과를 보인 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 5에서 보인 균열전파에 따른 잔류응력 재분포의 탄성해석결과에 Dugdale 모델¹⁰⁾을 적용함으로서 균열선단전방에 소성역이 존재하는 경우의 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포를 구한 결과이다. 소성역이 고려되지 않은 탄성해석결과와 비교해서 소성역이 고려된 해석결과는 실험결과와 양호한 대응성을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 인장잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우의 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포는 유한요소해석에 의한 탄성해석방법과

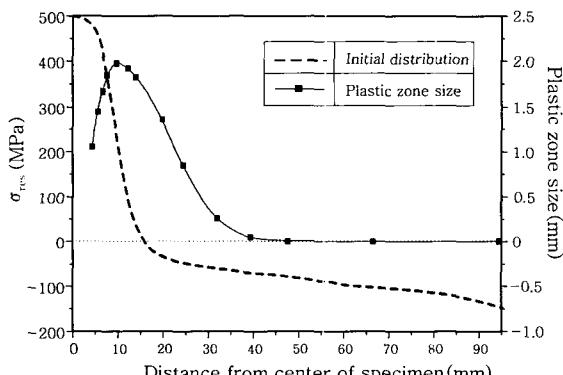


Fig. 8 Variation of plastic zone size caused by crack propagation in the residual stress field

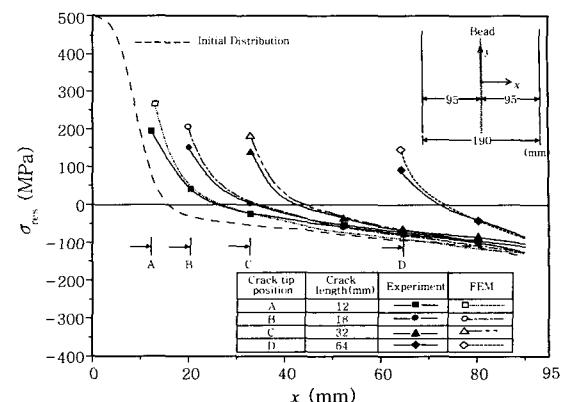


Fig. 9 Comparison of redistributed residual stresses between experimental result and analytical result considering plastic deformation at the crack tip

Dugdale 모델을 이용한 해석방법에 의하여 높은 정확도의 재현이 가능함을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 균열선단전방에 소성역의 존재가 고려된 균열전파에 따른 잔류응력 재분포의 탄성해석방법은 다음 사항으로부터 타당성을 염볼 수 있다. 즉 균열선단전방의 소성역을 고려치 않는 경우에 잔류응력 재분포의 해석을 유한요소해석에 의하여 수행하는 과정에서 균열선단전방의 응력분포에 특이성이 무시되는 해석상의 오차가 발생하게 된다. 그러나 균열선단전방의 소성역을 고려치 않는 경우에 잔류응력 재분포의 해석결과로부터 Dugdale 모델에 의하여 균열선단전방의 소성역을 산정하는 해석과정에서 이러한 오차와 극성이 반대인 오차가 발생하게 된다. 결국 Dugdale 모델에 의하여 균열선단전방의 소성역을 고려하는 경우의 잔류응력 재분포의 유한요소해석결과는 해석과정에서 균열선단전방의 응력분포의 특이성이 상쇄된 타당한 해석결과임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 인장잔류응력장으로부터 피로균열이 전파하는 경우 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포현상을 중첩원리를 이용한 탄성해석방법에 의하여 검토하였으며 이러한 탄성해석방법을 유한요소해석에 적용하여 잔류응력의 재분포를 해석적으로 구하였다. 또한 Dugdale 모델을 이용하여 균열선단부의 소성역을 고려한 잔류응력분포를 구하였으며 이러한 해석결과를 피로균열 전파 실험으로 얻어진 잔류응력의 재분포 결과와 비교하였다. 본 연구에서 얻어진 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 균열전파에 따른 잔류응력 재분포의 해석을 유한요소해석에 의하여 수행하면 균열선단전방에서의 응력

분포가 특이성을 나타내지 않고 균열선단에서의 인장응력값이 유한값을 갖기 때문에 임의의 균열길이에서의 잔류응력분포로부터도 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포를 추정할 수 있었다.

2) 유한요소해석으로 얻어진 균열전파에 따른 잔류응력 재분포의 탄성해석결과에 Dugdale 모델을 적용함으로서 균열선단전방에 소성역이 존재하는 경우의 균열전파에 따른 잔류응력의 재분포를 해석적으로 구할 수 있다.

3) 잔류응력 재분포의 해석을 유한요소해석에 의하여 수행함으로서 균열선단에서의 인장응력값이 유한값으로 나타나는 해석에 따른 오차는 Dugdale 모델에 의하여 소성역 구간을 산정하는 과정에서 상쇄되게 된다.

참 고 문 헌

1. Komine, A., Nakanishi, E., and Komine, K. : Residual stress at fatigue surface of heat treated high strength steels, J. of Japan Material, 27-294 (1976), 245~250
2. James, L. A. : Fatigue crack propagation behavior of several pressure vessels and weldments, W. J., 56-12(1977), 386~391
3. 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
4. Bucci, R. J. : Effect of residual stress on fatigue crack growth measurement, ASTM STP 743(1981), 28-47
5. 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, 12-1(1981), 31~38
6. Nelson, D. V. : Effect of residual stress on fatigue crack propagation, ASTM STP 776(1982), 172-194
7. Parker, A. P. : Stress intensity factor, crack profiles and fatigue crack growth rates in residual stress fields, ASTM STP 776(1982), 13-31
8. 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
9. Dugdale, D. S. : Yielding of steel sheets containing slits, Int. J. Mech. Phys. Solids, 8-100(1960), 10 0~104
10. ABAQUS User's Manual for revision 6.3 Vol. II, Hibbits, Karlsson & Sorensen, Inc. 2002
11. Mukai, Y., Nishimura, A. and Kim, E. J. : Redistribution of residual stress caused by crack propagation initially through residual stress field, J. of the Japan Welding Society, 4-1(1986), 154~159