

무한 평면체에 존재하는 복수 표면균열의 성장에 대한 수명예측용 시뮬레이션 개발에 관한 연구

황 남 성* · 서 창 민** · 남 승 훈***

(97년 10월 2일 접수)

A Program Development of Life Prediction Simulation for Multi-Surface Cracks on the Finite Plate

Nam-Seong Hwang* · Chang-Min Suh** · Seung-Hoon Nahm

Key Words : Simulation(시뮬레이션), Small Crack(작은 균열), High Temperature Fatigue(고온 피로), Crack Closure(균열닫힘), Coalescence(합체), Expert System(전문가 시스템)

Abstract

The social demand urges us to use some equipments and structures in high temperature environment. By this occasion, the necessity of studying the fatigue crack growth is an important aspect of new materials. However, the present situation is rarely to accumulate the fatigue data. Especially, 1Cr-1Mo-0.25V steel and 304 stainless steel have been increased to be used under the severe condition of high temperature. And so, the fatigue estimation of those materials is important and appropriate.

Fatigue tests have been carried out to examine the crack initiation, growth behaviour for the small fatigue crack of 1Cr-1Mo-0.25V steel and 304 stainless steel at room temperature and 538°C.

The remote measurement system which has many merits of checking and saving the image for detailed examination was applied to closely detect the crack length.

Generally, the fatigue crack initiated in the form of multiple cracks and grew each other. And then it coalesced to become a major crack. The major crack governed the rest of the fatigue life. In the growing process, each peripheral cracks interact and grow for a certain period. After then, it coalesced and fractured.

On the basis of the above experimental data for the small crack, a simulation program was developed to predict the residual life time and to estimate the integrity of machine elements and structures. At the same time, the simulation was extended to 1Cr-1Mo-0.25V

* 정회원, 영남전문대학 기계과

** 정회원, 경북대학교 기계공학부

*** 정회원, 한국표준과학연구원

steel. The simulation results have shown a good agreement to those of the experimental ones for both materials of 1Cr-1Mo-0.25V steel and 304 stainless steel with small cracks. The NASCRAC has applied to compare the fatigue life with the experimental results. And so, it can be said that the simulation program is valuable tools to the industrial fields.

1. 서론

대형사고의 원인 분석을 보면 대부분 피로에 의한 파괴라는 것은 잘 알려져 있다. 특히 표면에 존재하는 작은 균열(small crack)로부터 발생, 성장한 경우가 많고 인접된 균열과 합체가 되면서 갑자기 파단에 이른다. 이러한 피로파괴는 인재인 동시에 대형사고의 주원인으로 반드시 풀어야 할 중요한 과제이다.

예로서 성수대교의 붕괴나 삼풍 백화점의 붕괴 사고가 피로파괴라는 분석¹⁾이 제기되면서 이에 대한 관심과 경각심을 더욱 갖게 해 주고 있다. 피로 파괴에 관련된 연구를 살펴보면 Suh 등²⁾, Yuuki 등³⁾, Murakami 등⁴⁾이 복수 균열 상호간 간섭의 영향하에서 응력확대계수를 계산하여 이를 시뮬레이션 하는 연구를 수행한 바 있다.

최근에 徐 등⁵⁾에 의해 복수 표면균열에 대한 합체 성장거동에 대한 시뮬레이션을 개발하여 재료 상수 C, m과 파괴인성치, 하중조건, 응력비와 초기 균열의 크기 및 균열간격 등을 입력해서 피로수명과 표면균열의 2차원 그래프를 구하는 시뮬레이션을 행하였다. 또한 崔 등^{6,7)}에 의해 시뮬레이션 프로그램이 시도되었고, 노치의 수가 2개인 경우에 대해 파괴 역학적 해석이 수행되었다.

또한 표면균열의 성장에 대한 파괴 역학적 해석은 응력확대계수만으로 평가를 하게 되면 과대하게 나타나기 때문에 균열단형현상을 적용한 유효응력확대계수로 나타내는 것이 더욱 유효하다. 이와 같은 유효응력확대계수에 관한 연구로는 Hudak 등⁸⁾과 Pelloux 등⁹⁾에 의해서 다양한 실험을 통하여 표면균열이 발생하고 성장하는 거동에 관한 실험 및 시뮬레이션에 관한 연구가 수행되었다.

結城 등¹⁰⁾은 복수균열 데이터로 'Mi-Crack'이란 시뮬레이션 프로그램을 개발하였고, 미국 SIA社는 'pc-CRACK'이란 소프트웨어를, 미항공우주국 나사(NASA)에서는 NASCRAC이란 NASa CRACK

Analysis Code를 개발하였다.

따라서 본 연구에서는 복수 균열을 가진 1Cr-1Mo-0.25V강 및 304 스테인리스강에 대한 상온 및 538℃ 하에서 실험을 실시하였다. 그리고 이 실험자료를 이용하여 실제의 구조물과 기기에서 발견할 수 있는 복수균열을 가진 결함재와 무한 평면체의 개재물중에서 성장하는 작은 균열에 대한 발생, 성장과 합체거동에 대한 해석을 수행하였다. 이 해석을 수행하기 위하여 큰 균열의 경우는 반원형의 노치를 방전가공한 평판 시험편을 사용하였다. 또한 이 결과는 상용 프로그램인 NASCRAC과 비교하여 시뮬레이션의 결과를 비교 검토하였다.

2. 시험편 및 연구방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 화력 발전소의 터빈 로터에 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V강 및 고온용 부재 및 고온 기기에 널리 사용되고 있는 304 스테인리스강이다.

Fig. 1에는 작은 균열의 피로거동을 알아보기 위하여 상온 및 538℃에서 피로시험을 실시한 시험편의 형상을 나타낸다. Cr-1Mo-0.25V강의 경우에는 표면균열의 성장 특성을 이해하기 위하여 표면균열의 성장방향이 모재의 길이 방향이 되도록 시험편을 채취하였다. 또한 균열의 발생, 성장 및 합체거동을 용이하게 측정할 수 있도록 시험편의 형상을 한 쪽면이 오목한 모래시계형으로 제작하였다. 작은 균열 실험에 사용된 304 스테인리스강의 시험편은 균열의 성장 방향이 압연방향에 직각이 되도록 채취하였다.

Table 1은 두 가지 재료의 기계적 성질을 나타내었고, Table 2에는 화학적 조성을 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of specimen materials

Material	Temperature (°C)	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Hardness (Hv)
1Cr-1Mo-0.25V	24	665.2	823.1	18.8	59.4	266
	538	533.5	580.6	22.7	55.5	-
STS304	24	313.8	647.2	57.0	72.0	179
	538	208.0	505.2	40.8	66.5	-

Table 2 Chemical properties of specimen materials(wt., %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
1Cr-1Mo-0.25V	0.31	0.23	0.76	0.006	0.001	0.36	1.11	1.32	0.27	0.006	0.005	0.001
STS304	0.07	0.35	1.89	0.032	0.014	8.5	18.0	-	-	-	-	-

Fig. 1에 나타낸 작은 균열에 대한 실험에서는 고활성 분위기하에서 작은 표면균열의 성장거동을 용이하게 관찰하기 위하여 304 스테인리스강으로 만든 시험편과 1Cr-1Mo-0.25V강으로 만든 시험편의 일부에 Nd : YAG 레이저를 사용하여 표면 중앙부에 직경 160 μ m, 깊이 400 μ m 크기의 인공 결함을 만들었다. 나머지 1Cr-1Mo-0.25V강의 시험편은 재료내에 존재하는 자연결합에서 존재하는 표면균열의 성장거동을 관찰하기 위하여 인공결합을 가공하지 않은 평활 시험편을 사용하였다. 이때 균열길이

를 용이하게 측정하기 위하여 1 μ m의 다이아몬드 연마제를 이용하여 연마한 후 초음파로 세척하였다.

2.2 실험방법

위의 방법으로 준비된 시험편으로 피로시험기(MTS 810, 최대용량=250kN)를 이용하여 축인장 피로시험을 실시하였다. 使用응력파형은 정현파이고, 응력비는 R=0.05, 주파수는 10Hz로서 ASTM E647규격¹¹⁾에 맞추어 실시하였다.

본 실험은 상온과 538 $^{\circ}$ C하에서 각각 실시하였고, 온도조절기(온도편차 \pm 2%)를 사용하여 overshoot가 생기지 않게 하였다. 피로균열의 성장을 측정하기 위해 작은 균열의 경우는 원거리 측정시스템(remote measurement system)¹²⁾를 사용하여 전기로 내의 시험편 표면을 관찰하였다. 또 좋은 화상을 얻기 위해 광섬유의 광원 앞에 알루미늄 경통의 집광렌즈를 부착시켜 300mm정도의 거리에서 전기로 내부의 시험편의 표면을 관찰할 수 있게 하였다. 작은 표면균열의 관찰 및 측정을 용이하게 하기 위해서 피로시험기가 정지중에 상온에서는 항복강도의 60~95% 수준, 538 $^{\circ}$ C의 고온 불활성 가스 분위기에서는 항복강도의 60~90% 수준으로 응력을 가한 상태에서 균열길이를 측정한 후 컴퓨터의 균열의 화상을 저장하였다. 이는 작은 균열의 선단을 발견하지 못했을 경우 이미 저장된 균열의 화상을 역추적하여 균열 길이를 정확히 측정할 수

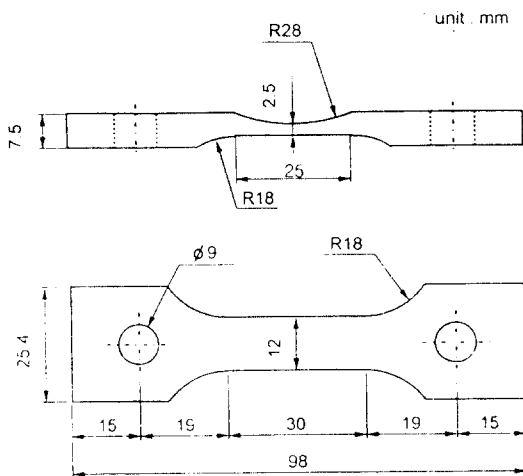


Fig. 1 Geometry of specimen with the small crack

있게 하기 위함이다. 그리고 인공결함이 있는 시험편에는 각 실험온도에서 항복강도의 70~80% 수준으로 응력을 가한 상태에서 균열의 길이를 측정, 저장하였다.

1Cr-1Mo-0.25V강의 경우에는 538°C의 고온이 되면 표면에 산화막이 생겨 균열의 생성과정과 길이측정이 어려워 아르곤 가스를 5N l/min의 유속으로 전기로 내를 유입시켜 실험하였다. 그러나 불활성가스를 사용하여도 산화를 완전히 방지하지 못하기 때문에 4시간 정도 실험한 후에는 실험을 중단하고 산화막을 제거하고 계속 피로시험을 실시하였다.

3. 실험결과

3.1 S-N 특성

Fig. 2는 상온 및 538°C하에서 평활재인 1Cr-1Mo-0.25V강에 대한 최대인장응력과 파단반복수와의 관계를 표시한 S-N선도를 나타낸다. 여기에서 ●, ■표시는 파단시의 수명을 표시하며, 화살표 표시가 붙은 마크는 파단이 일어나지 않는 경우에 해당된다. 본 피로시험에서 파단은 균열길이가 4.8mm(2b/W=0.4)가 되어 급격히 파단되기 직전의 상태를 말한다. 본 실험에서 파단을 4.8mm로 잡은 것은 균열길이가 이 이상 성장하게 되면 불안정 파괴가 되므로 그 이전에 실험을 중단하고 파단이라 간주하였다.

상온의 경우 637MPa의 응력이 가해졌을 때 파단 반복수가 544MPa의 응력이 가해졌을 때 보다 훨씬 크게 나타났다. 이는 대부분의 다른 균열은 표면 근처에 몰려 있던 개재물에서 균열이 발생하여 균열이 성장한 반면 637MPa의 경우는 표면 안쪽의 개재물에서 균열이 성장했기 때문이다. 이런 결과로부터 표면결함이 피로수명에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

538°C의 경우에도 상온의 결과와 같이 표면 근처에 있던 개재물에서 균열이 발생된 후 성장하였다. 또한 그 개재물의 위치에 따라 피로수명이 차이를 보였으며 표면 근처의 개재물에서 균열이 발생하는 것이 표면의 안쪽에 있는 개재물에서 균열이 발생하는 것보다 피로수명이 작았다.

따라서 피로수명에 영향을 미치는 인자는 개재물이 존재하는 위치이며 표면 근처에 개재물이 존재할 경우가 피로균열이 발생하기 쉬웠으며 또한 피로수명도 낮았다.

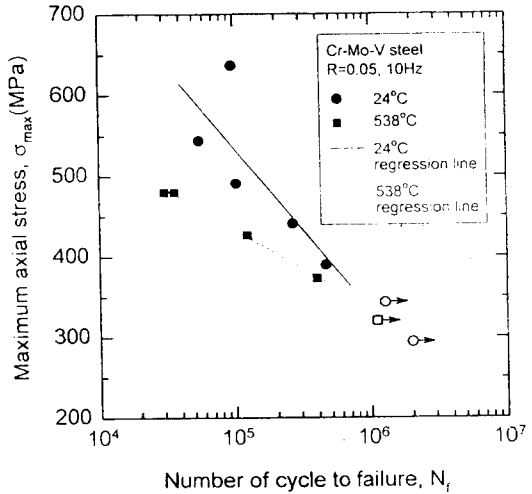


Fig. 2 Relationship between the maximum axial stress and the number of cycles to failure for 1Cr-1Mo-0.25V steel

3.2 균열 형상비의 변화

Fig. 3은 균열의 두께에 대한 깊이를 나타낸 b/t와 균열의 형상비 b/a와의 관계를 나타낸 선도이다. 작은 균열의 형상비는 균열성장의 초기인 수십 μm일 때에는 1보다 컸지만 균열이 진전함에 따라 점차 감소하다가 b/t가 0.5근처에서는 0.84에 수렴하였다.

또한 큰 균열의 경우에는 동일한 크기의 노치가 2개 및 3개인 시험편을 고온에서 피로시험을 행하여 얻어진 결과의 균열형상비 변화를 나타낸 경우는 균열이 성장함에 따라 균열의 형상은 반원형에서 형상비(b/a)가 0.8 보다 작은 반타원형으로 변화하였다. 이것은 균열의 길이방향에서의 간섭효과가 깊이방향의 간섭효과 보다 더 크게 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 또한 크기가 다른 균열이 2개 및 3개인 경우의 균열형상비 변화 b/a는 b/t가 변화함에 따라 약 0.85로 수렴하였다.

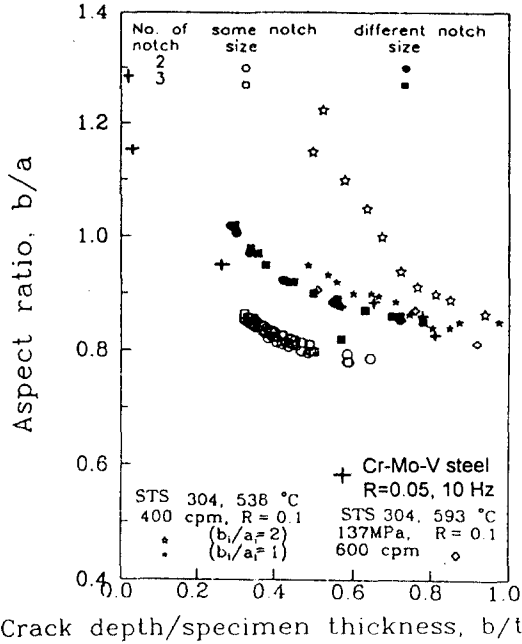


Fig. 3 Variation of aspect ratio, b/a against the ratio of crack depth and crack thickness, b/t

크기가 다른 노치가 복수로 존재하는 경우와 1개의 노치가 존재하는 경우에는 균열이 성장함에 따라 형상비의 변화가 피로수명의 80% 이후에는 타원형으로 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수

있다. 또한 단일 노치를 갖는 高温材의 경우에는 균열의 형상비가 0.84이었다³⁾. 이러한 결과는 노치의 크기나 수에 관계없이 균열 형상비가 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있고 이러한 결과는 다른 실험데이터와 잘 일치하고 있다¹³⁾.

3.3 파면(fractography) 해석

Fig. 4에서는 538°C의 304 스테인리스강 상의 작은 표면결합에서 발생, 성장한 균열이 파단에 이르는 모습을 예로서 나타낸 것이다. 이때 작은 결함은 Nd : YAG레이저를 이용하여 만든 인공 결함(직경 160 μ m, 길이 80 μ m)이며 고온에서 피로시험을 실시한 후 저온 파단시킨 후 파면을 촬영한 SEM사진이다. 즉 인공결합에서 발생한 표면균열은 반타원 모양으로 성장한 경우를 사진에서 관찰 할 수 있다.

3.4 표면균열의 파괴 역학적 해석

應力擴大係數범위로 표면균열에 대한 파괴 역학적 해석을 하는 방법은 여러 근사해와 경험식이 있으나 본 연구에서는 均一引張應力을 받는 表面균열의 깊이 및 表面방향의 應力擴大係數를 동시에 고려할 수 있도록 3차원 有限要素法을 이용하여 數式化하여 信賴性이 인정받고 있는 Newman-Raju 식¹⁴⁾을 사용하였다.

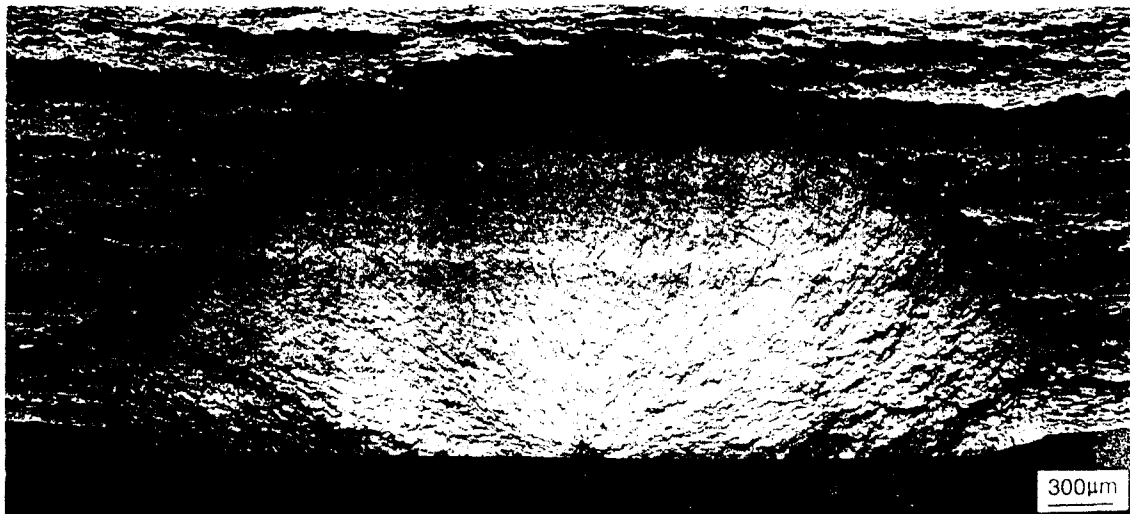


Fig. 4 Fractography of type 304 stainless steel specimen with an artificial defect

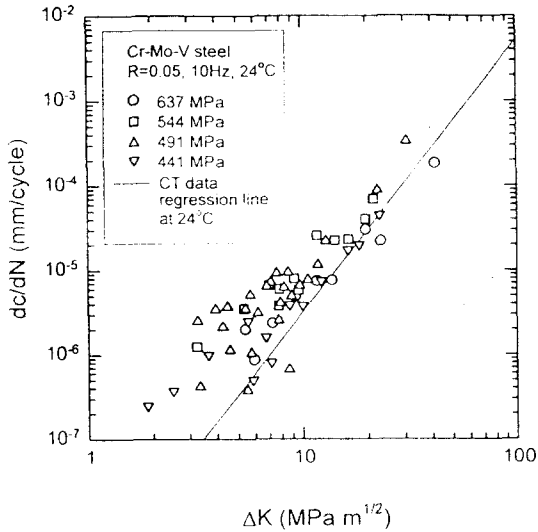


Fig. 5a Dependence of the surface crack growth upon stress intensity factor range for 1Cr-1Mo-0.25V steel specimens without an artificial defect at room temperature

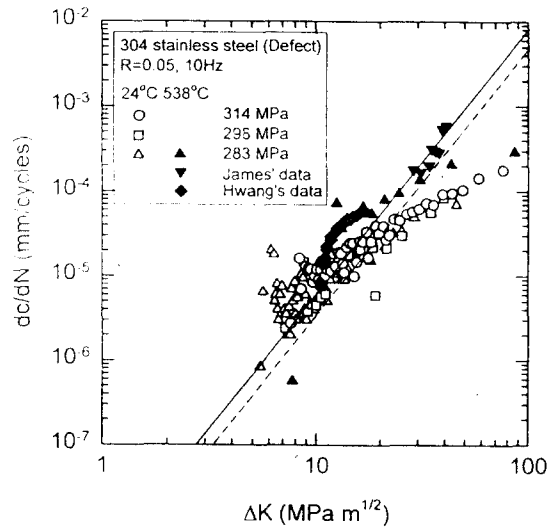


Fig. 5c Dependence of the surface crack growth rate upon stress intensity factor range for 304 stainless steel specimens with an artificial defect

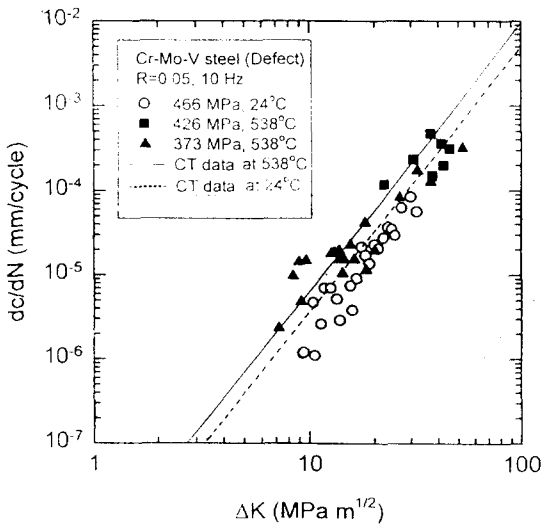


Fig. 5b Dependence of the surface crack growth upon stress intensity factor range for 1Cr-1Mo-0.25V steel specimens without an artificial defect at room temperature and 538°C

Fig. 5a는 1Cr-1Mo-0.25V강의 평활재에 대한 상온 실험결과를 응력확대계수 범위와 표면 균열 성장속도와의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다. 응력확대계수범위가 $15\text{MPa m}^{1/2}$ 이하인 표면균열의 성장속도는 실선으로 나타낸 CT시험편의 상온자료보다 매우 불규칙하며 빠르다. 이것은 균열의 길이가 작아서 부하응력레벨이 높으므로 국부적 소성변형이 발생한 것이다^{5),15)}.

Fig. 5b는 1Cr-1Mo-0.25V강의 작은 인공결합재의 상온 및 538°C에서의 피로균열성장속도를 나타낸 것이다. 고온하의 인공결합재의 표면 균열성장속도는 상온의 성장속도보다 빠르지만, 실선으로 나타낸 538°C의 CT시험편 성장특성과 비슷하였다. 또 Fig. 5b상에 나타낸 점선의 CT 상온 특성과는 상온의 결함의 특성과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 작은 표면균열의 경우에는 수십 μm 의 작은 인공결합재의 균열성장 데이터로 평활재의 균열성장 데이터를 추적하여 활용할 수 있을 것으로 판단된다¹⁶⁾.

Fig. 5c는 작은 인공결합이 있는 304 스테인리스

강의 상온과 538°C에서 피로시험 결과를 응력확대계수와 성장속도와의 관계로 나타낸 것이다. 응력확대계수범위가 15 MPa m^{1/2} 이하에서는 균열성장속도의 흐트러짐이 약간 크지만 그 이상에서는 하나의 직선위에 데이터가 모이고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5c에서는 다른 연구결과^(13),17)와 본 연구를 비교하였는데 James의 자료는 CT시험편을 사용하여 40cpm으로 피로시험한 결과이고 황의 결과는 전보⁽¹³⁾의 결과이다. 또 Fig. 5c상의 실선과 점선은 Fig. 5b상에 나타낸 실선과 점선으로 비교하기 위하여 나타낸 것이다.

538°C의 고온에서 균열이 발생하여 성장하는 거동을 살펴보면 응력계수범위에서 균열성장속도가 빠르며 일단 균열이 성장하면 상온보다 더 빠른 성장속도로 균열이 성장함을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션 프로그래밍

4.1 시뮬레이션 構成 및 Flow chart

본 연구에서의 피로균열의 성장, 합체에 관한 시뮬레이션 프로그램은 동일 평면상에 존재하는 複數表面균열이 균열의 표면길이와 균열 깊이쪽인 판 두께 방향으로 반복되는 軸荷重에 의해서 發生 成長하면서 干涉, 合體를 반복하여 파괴에 이르는 과정을 線形破壞力學의 데이터를 기초로 하여 실시하였다. 또 이때 시뮬레이션하는 시험편의 크기는 폭 12.0mm x 두께 3.0mm의 크기로 하였다.

解析 프로그램의 구성은 입력부와 해석부 및 출력부의 세 가지로 구성했으며 그래픽이 용이하고 처리속도가 빠른 터보 C-언어를 사용하였다. Fig. 6에서는 본 연구에서 작성한 시뮬레이션의 흐름도(flow chart)를 나타내었다.

(1) 데이터의 입력부

입력부에서는 시험편의 형상 및 성질에 관계되는 값을 입력 데이터로 넣게 된다. 시험편의 재료상수(C, m), 재료의 파괴인성치(K_{IC}), 하중조건(MPa), 응력비(R) 및 초기 균열의 개수(n)와 크기(a) 및 균열간 간격(e)을 입력하게 된다.

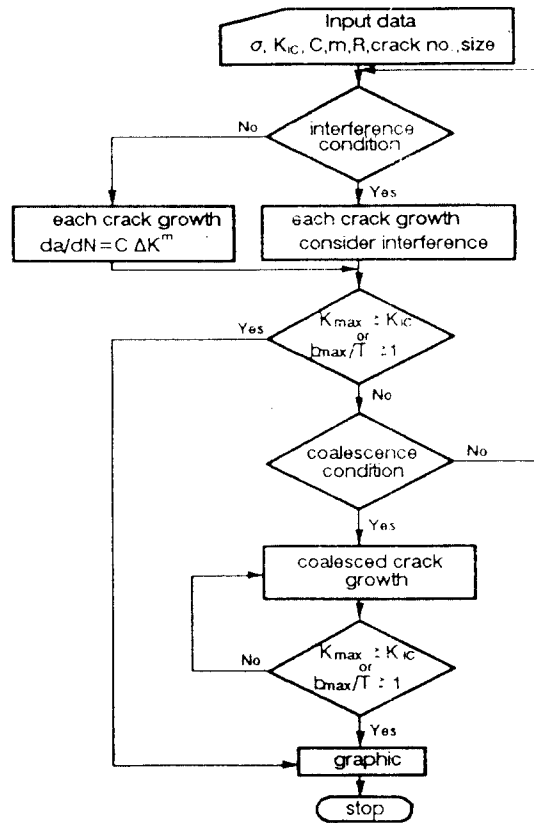


Fig. 6 Flow chart of the simulation

(2) 해석부

해석부에서는 먼저 각 표면균열에 대한 응력확대계수를 계산하여 균열의 불안정파괴 여부를 결정하고 이어서 응력확대계수와 균열성장식을 사용하여 균열성장량을 계산하게 된다. 이때 성장하는 각 표면균열은 매 사이클마다 균열간 간격과 간섭구간을 비교하여 균열간 간격이 간섭영역 내에 있을 경우에는 간섭효과를 고려하여 성장하게 되고 간섭영역 밖에 있을 경우에는 간섭영향을 받지 않고 성장하게 된다. 또 각각 성장한 균열은 합체조건에 따라서 합체하게 되고 합체한 균열의 균열깊이가 시편두께보다 크게 되거나 응력확대계수 값이 파괴인성치 K_{IC}보다 크게 되면 파단되는 것으로 판정되어 프로그램은 종료하게 된다. 여기서 얻어진 데이터는 화일로 저장되어 출력부에 이용되도록 하였다.

(3) 출력부

시뮬레이션 프로그램의 실행과 동시에 각 균열에서 발생한 균열이 성장하다가 간섭구간에 들어오면 간섭조건을 영향을 받다가 합체하여 파단되는 데이터를 나열시키고 이어서 해석부에서 얻은 이 데이터를 이용하여 복수표면균열의 成長 및 合體에서 파단에 이르는 변화 등을 그래픽으로 처리하도록 하였다.

4.2 응력확대계수범위의 계산

응력확대계수범위에 대한 계산은 3.4절의 실험 결과를 선형 파괴 역학적으로 처리했던 Newman-Raju식¹⁴⁾을 동일하게 사용하였다.

4.3 複數 表面균열의 干涉과 合體

(1) 複數表面 균열의 干涉

Table 3은 2개의 3차원 표면균열에 대한 간섭영향을 체적력법¹⁸⁾을 통해 얻은 결과를 정리한 것이다. 여기서 a_1, a_2 는 간섭영향을 받는 두 표면균열의 반길이를 나타내며 e 는 간섭영향을 받는 두 균열간거리를 큰 쪽 표면균열의 반길이인 a_1 에 대한 비로 나타난 값이다. 그리고 $\Gamma_{A1}, \Gamma_{A2}, \Gamma_{B1}, \Gamma_{B2}$ 는 표면균열의 간섭계수를, r_{C1}, r_{C2} 는 균열깊이방향의 간섭계수를 나타낸다. 이들 간섭계수는 단일 표면균열의 응력확대계수에 대한 두개의 표면균열의 응

력확대계수의 비로 정의되고 있으며 복수균열의 最近點에서의 응력확대계수는 단일균열일때의 응력확대계수와 간섭계수와와의 곱으로 구해지게 된다.

Table 3에서 나타난 것과 같이 두 균열사이의 거리가 작아짐에 따라 간섭의 영향이 크게 나타나며 균열사이의 거리가 같을 때에는 두 균열의 크기 비가 커짐에 따라 큰 균열은 간섭의 영향을 작게 받고 작은 균열은 상대적으로 간섭의 영향이 커짐을 알 수 있다.

본 연구에서는 전보⁵⁾의 시뮬레이션 결과에 따라 3차원 표면균열에 대한 간섭조건중 Murakami & Nemat-Nasser가 제안한 간섭조건⁴⁾을 주간섭조건으로 적용하였다.

(2) 複數表面 균열의 合體거동

본 연구에서는 동일 평면상에서 複數龜裂이 서로 간섭을 받으며 성장하다가 균열간격 δ 가 합체가 이루어지는 기준점 δ_0 가 될 때 균열은 합체하여 새로운 반타원 균열로 성장하는 것으로 간주하여 시뮬레이션을 실시하였다. 기준점 δ_0 를 결정하는 합체조건은 다음과 같은 세 가지 경우를 고려하여 각각의 특성을 비교하였다.

(1) 표면점의 연결(surface point connection, SPC)¹⁸⁾

$$\delta_0 = 0$$

(2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.

Table 3 Interaction coefficient of Murakami and Nemat-Nasser⁴⁾

e	a_2/a_1	Γ_{A1}	Γ_{B1}	r_{C1}	Γ_{A2}	Γ_{B2}	r_{C2}
0.25	0	1.00	1.0	1.0	1.48	1.48	
	0.125	1.01	1.00	1.00	1.24	1.39	1.26
	0.25	1.02	1.02	1.00	1.15	1.34	1.16
	0.5	1.08	1.01	1.01	1.08	1.28	1.08
	1.0	1.22	1.03	1.03	1.03	1.22	1.03
0.5	0	1.0	1.0	1.0	1.23	1.23	
	0.25	1.00	1.00	1.00	1.10	1.17	1.10
	0.5	1.01	1.01	1.00	1.05	1.15	1.06
	1.0	1.05	1.05		1.05	1.15	
1.0	0	1.0	1.0	1.0	1.09	1.09	
	0.5	1.00	1.00	1.00	1.03	1.06	1.03
	1.0	1.04	1.04		1.04	1.08	

X I¹⁹⁾

$$\delta_o = \min(b_1, b_2) \times 2$$

(3) BSI PD 6493²⁰⁾

$$\delta_o = a_1 + a_2$$

여기서 a_1, a_2 는 표면균열의 반길이며 b_1, b_2 는 인접균열의 깊이이다.

또 두 표면균열이 합체 후에는 식(1)과 같은 조건으로 새로운 반타원균열로 형성되어 성장하는 것으로 계산하였다.

$$\text{균열길이} b = \max(b_1, b_2)$$

$$\text{표면균열 반길이} a = a_1 + a_2 + \delta_o/2 \quad (1)$$

본 연구에서는 표면점결(SPC)조건을 사용하여 시뮬레이션을 실시하였고 또 그래픽 처리하였다. 왜냐하면 이 SPC조건으로 실시된 시뮬레이션 그래픽이 전보¹³⁾의 결과에서 보여준 것처럼 피로 시험 결과와 유사한 균열성장, 합체형태의 좋은 결과를 얻었기 때문이다.

4.4 複數 表面龜裂의 성장속도

표면균열의 성장거동은 표면에서의 길이방향 성장특성과 균열깊이의 최심점에서의 성장거동에 의해서 표면균열의 성장거동이 지배된다고 단순화하여 해석하였다.

본 연구에서는 각 균열의 중심점을 기준으로 균열의 좌우방향과 깊이방향으로 각각 독립적으로 균열을 성장시키면서 표면균열의 성장에 干涉影響을 고려하였다. 또 표면균열에서는 응력장의 차이에 의해 깊이 및 길이 방향의 성장이 다르게 나타나고 있으며 표면길이 방향의 균열닫힘거동을 고려하여 Paris의 균열 성장식²¹⁾에 균열닫힘(crack closure)현상²²⁾을 고려한 식(2)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} da/dN &= C(0.91 \Delta K_a)^m \\ db/dN &= C(\Delta K_b)^m \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ΔK_a 는 균열의 표면점방향으로의 응력 확대계수범위이고 ΔK_b 는 균열깊이 방향의 응력 확대계수범위이며, da/dN 는 표면방향의 성장률, db/dN 는 깊이방향의 성장률이며, C와 m은 재료상

수이다. 재료상수 C와 m은 실험결과에서 얻은 자료를 이용하였다.

5. 實驗結果 및 시뮬레이션 결과의 比較

5.1 작은 균열에 대한 시뮬레이션

Fig. 7은 본 연구 및 여러 실험을 통해 얻어진 C와 m을 모아 그 관계를 나타낸 선도이며, 이 데이터는 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 프로그램에 입력되는 입력 데이터로 활용되었다²³⁾.

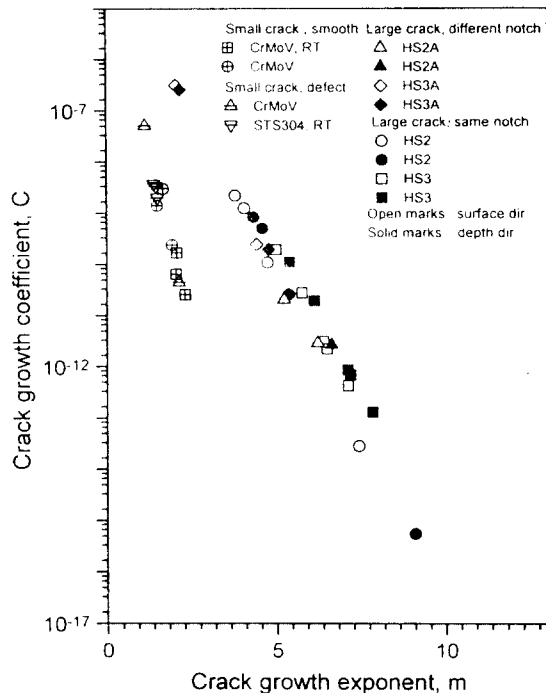


Fig. 7 Comparison of crack growth coefficient, C and exponent, m with the former report¹³⁾

Fig. 8은 1Cr-1Mo-0.25V강 및 304 스테인리스강에 대한 실험결과인 Fig. 7의 C와 m을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸다.

Fig. 8a는 평활재인 1Cr-1Mo-0.25V강의 상온 및 538°C하의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있는데 (1)은 응력레벨이 491MPa, (2)는 480MPa의 경우를 각각 나타낸다. 이 시뮬레이션 결과는 실험결과와 최대 -0.91%의 근소한 차이를 가지고 있어 최대

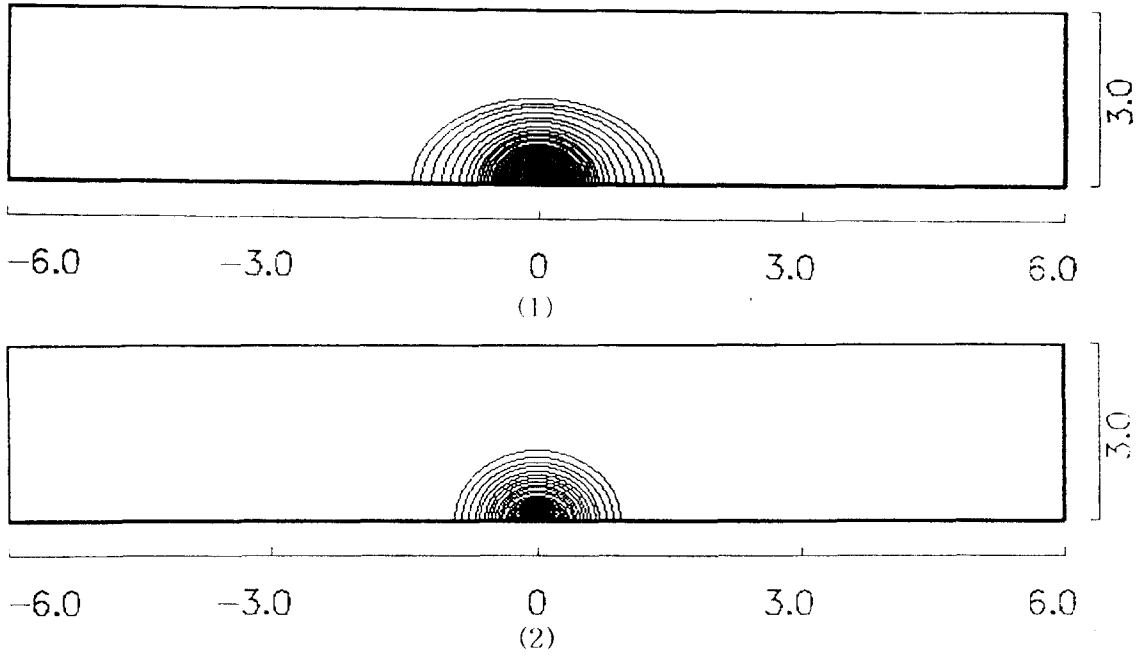


Fig. 8a Simulation results of 1Cr-1Mo-0.25V steel without an artificial defect at both room temperature and 538°C (1) 491MPa (2) 480MPa

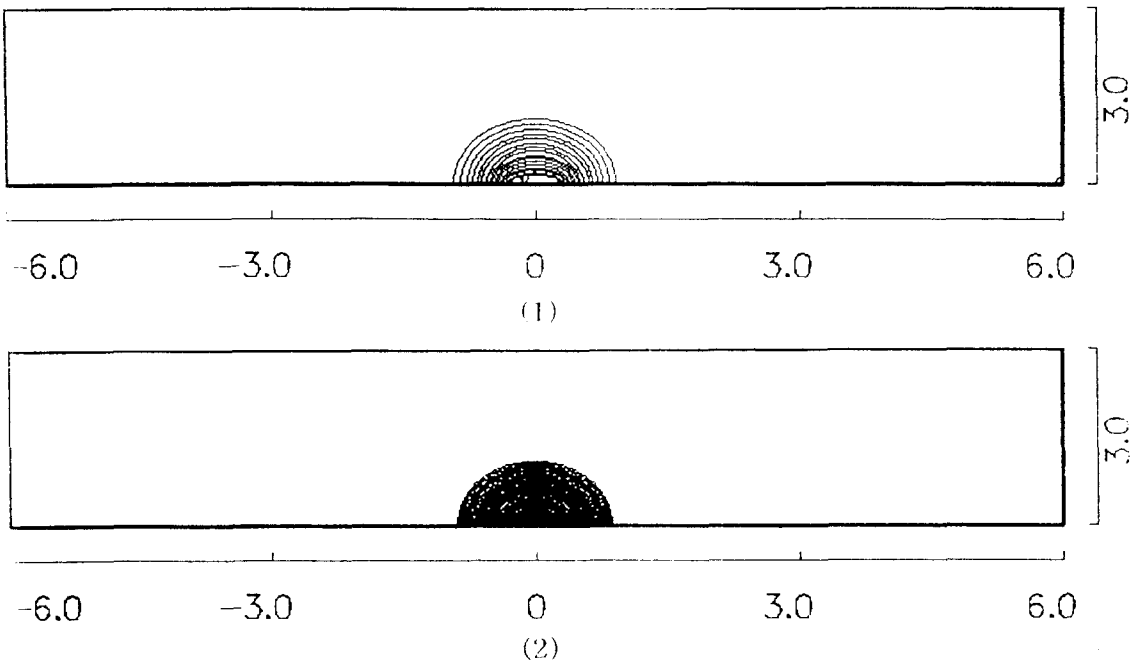


Fig. 8b Simulation results of 1Cr-1Mo-0.25V steel and type 304 stainless steel with an artificial defect (1) 426MPa (2) 314MPa

5.25%의 차이를 가진 NASCRAC보다 본 시뮬레이션의 결과가 실험값에 더 일치하며 유효하였다.

Fig. 8b는 인공결합체인 1Cr-1Mo-0.25V강의 538℃에서의 실험 데이터와 304 스테인리스강의 상온 실험 결과인 C와 m을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있는데 응력레벨이 (1)은 426MPa인 경우이고 (2)는 314MPa의 경우를 각각 나타낸다. 여기서 시뮬레이션의 결과가 실험결과와 최대 0.22%의 차이를 갖고 있어 본 시뮬레이션이 유효함을 나타내었다.

이상의 실험결과를 토대로 시뮬레이션을 실시한 결과와 NASCRAC의 결과를 Table 4에 비교하여 나타내었는데 도표에서 보는 바와 같이 미소한 차이가 있으나 그 결과는 실험결과와 서로 잘 일치하는 결과를 나타내고 있다.

Fig. 9는 피로균열의 성장거동을 NASCRAC으로 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 9a는 평합체인 1Cr-1Mo-0.25V강의 성장거동을 나타내며 (1)은 491MPa인 상온의 경우이고, (2)는 480MPa의 538℃의 경우에 대해서 NASCRAC으로 시뮬레이션한 결과인데 Table 4에 정리한 것과 같이 7.98%와 2.07%의 근소한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9b의 (1)은 결합체인 1Cr-1Mo-0.25V강의 성장거동을 나타내고 있는데 응력레벨은 426MPa

이었고, 538℃의 고온의 경우이다. 또한 (2)는 304 스테인리스강에 대한 상온의 결과로서 응력레벨은 314MPa의 경우로서 NASCRAC으로 시뮬레이션하였는데 Table 4와 같이 -32.58%와 -3.58%의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 NASCRAC이 단순히 PARIS 법칙에 의한 재료상수 C와 m으로 해석하는 방식으로 인한 오차이며 이로서 본 연구에서의 시뮬레이션 결과가 더 타당함을 알 수 있다.

5.2 작은 복수균열에 대한 시뮬레이션

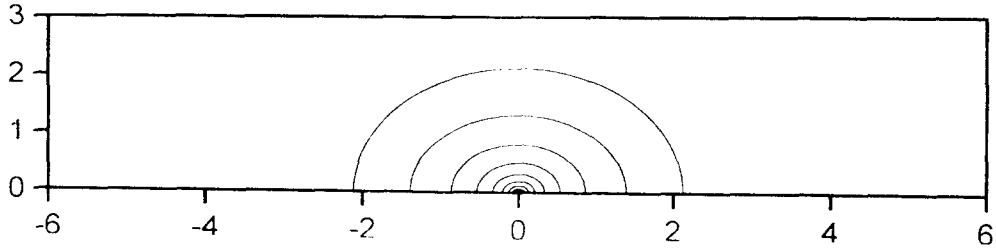
본 연구에서 실험한 결과를 이용하여 균열이 2개인 경우에 대한 시뮬레이션을 실시한 것이 Fig. 10이다.

Fig. 10a는 고온에서의 결합체인 1Cr-1Mo-0.25V강에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있는데 (1)은 426MPa의 경우이고 (2)는 373MPa의 경우를 나타낸다. 또한 Fig. 10b는 304 스테인리스강에 작은 2개의 균열을 갖는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 여기서 (1)은 응력레벨이 314MPa의 경우이며 (2)는 283MPa의 경우이다.

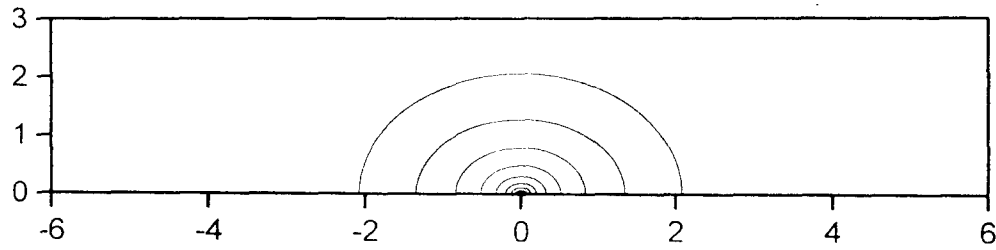
NASCRAC은 단일 균열에 대한 코드이기 때문에 복수 균열에 대한 피로수명을 비교할 수 없었으나 본 연구에 의한 시뮬레이션은 아래의 Table 5

Table 4 Comparison of the simulation results with the experimental results¹³⁾

Specimen				Experimental result (cycles)	Simulation result (cycles)	NASCRAC result (cycles)	Ratio between experimental result and simulation one(NASCRAC) (%)
Material	Temperature (℃)	Geometry	Stress (MPa)				
Cr-Mo-V	24	Smooth	491	76,700	76,000	82,825	-0.91 (7.98)
	538	Smooth	480	31,000	31,000	30,358	0.0 (2.07)
		Defect	426	14,000	14,000	18,561	0.0 (-32.58)
STS304	24	Defect	314	148,000	148,000	153,293	0.0 (-3.58)

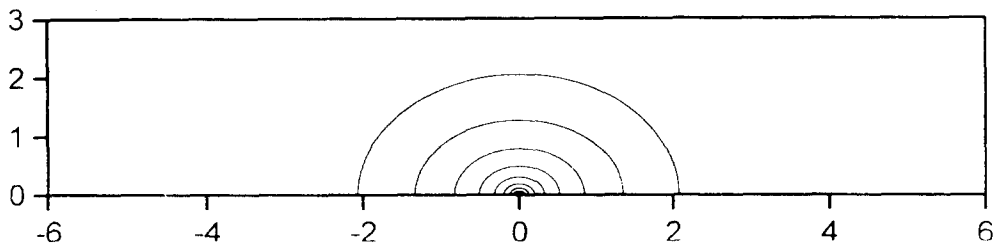


(1)

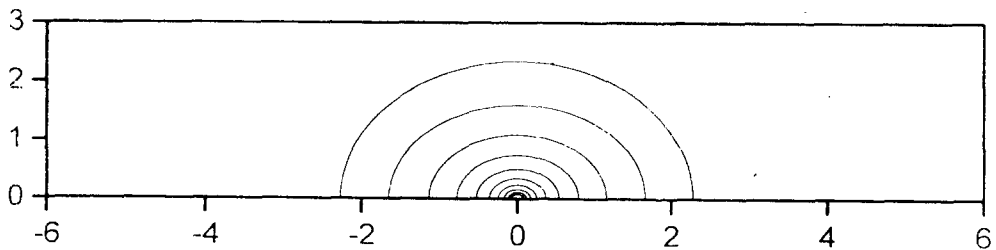


(2)

Fig. 9a The simulation results of crack growth behavior by NASCRAC for 1Cr-1Mo-0.25V steel of smooth specimen (1) 491MPa (2) 480MPa



(1)



(2)

Fig. 9b The simulation results of crack growth behavior by NASCRAC for a 1Cr-1Mo-0.25V and a 304 stainless steel of defect specimen (1) 1Cr-1Mo-0.25V steel, 426MPa (2) 304 stainless steel, 314MPa

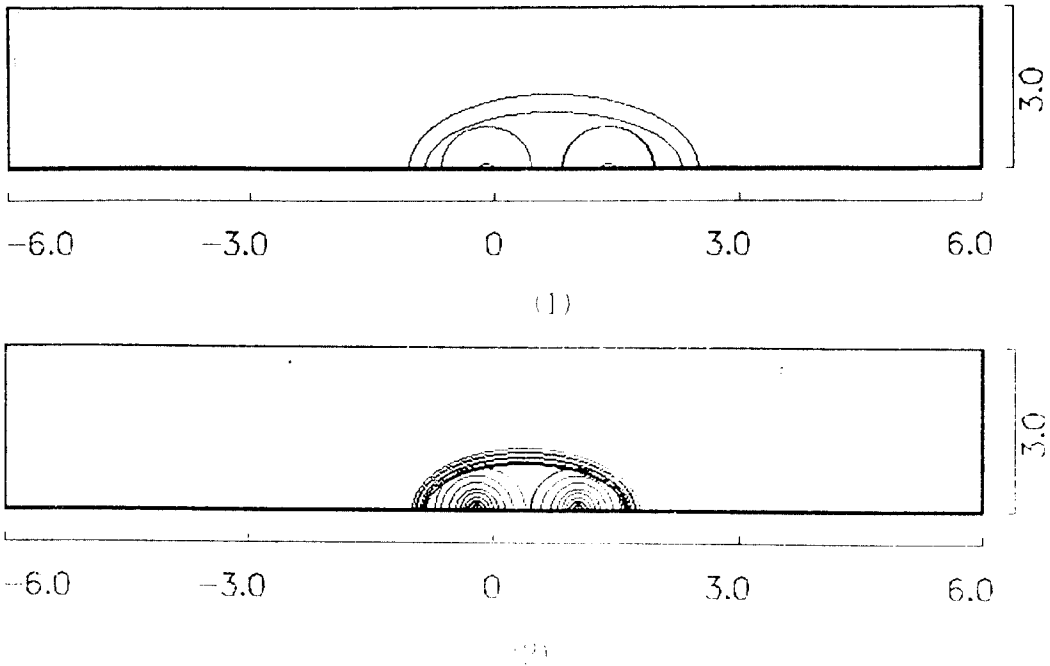


Fig. 10a Simulation results of 1Cr-1Mo-0.25V steel with the multi-small cracks by the simulation
(1) 426MPa (2) 373MPa

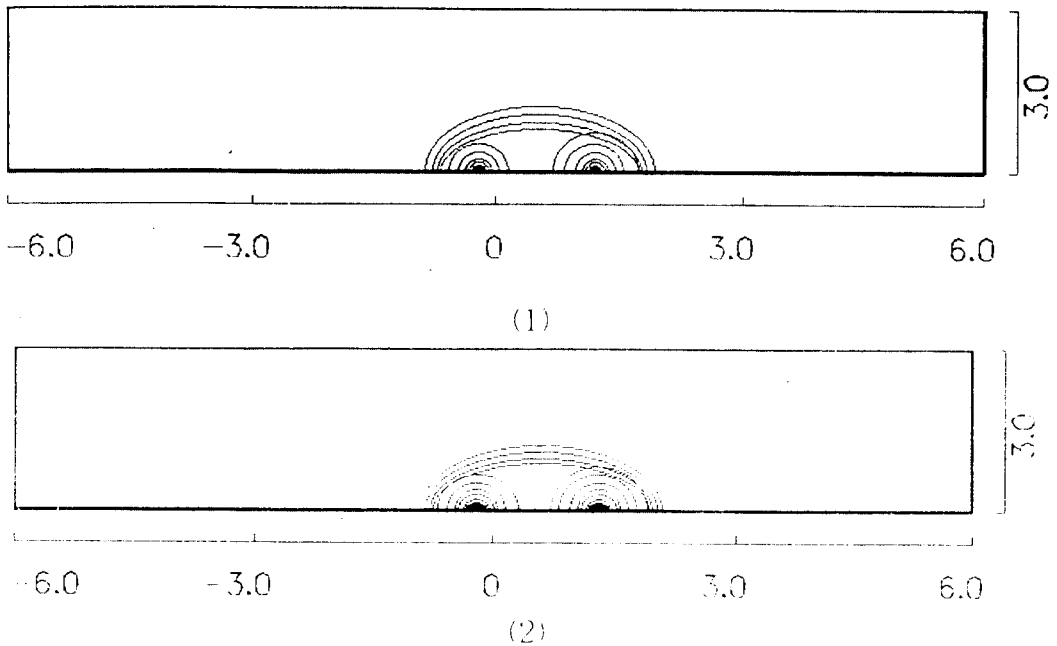


Fig. 10b Simulation results of 304 stainless steel with the multi-small cracks by the simulation
(1) 314MPa (2) 283 MPa

같이 작은 복수 균열에 대한 시뮬레이션을 수행할 수 있었다. 따라서 재료의 종류에 관계없이 재료특성만 주어지면 단일 및 복수균열에 대한 시뮬레이션을 본 연구에서 작성된 시뮬레이션 프로그램을 적용할 수 있다.

Table 5 Simulation results for the multi-small cracks by the simulation program

Specimen				Simulation result (cycles)
Material	Temperature (°C)	Geometry	Stress (MPa)	
Cr-Mo-V	538	Defect	426	12,000
			373	89,000
STS304	24	Defect	314	119,000
			283	211,000

6. 결론

본 연구에서는 평활재와 작은 인공 결함재인 1Cr-1Mo-0.25V강 및 304 스테인리스강과 큰 균열을 가진 304 스테인리스강에 대한 상온 및 고온인 538°C 하에서의 피로시험을 통해 얻어진 결과를 토대로 하여 시뮬레이션 프로그램과 NASCRAC을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 작은 표면 균열의 거동에 대한 시뮬레이션을 실시하여 얻은 시뮬레이션 결과와 실험결과가 근소한 차이를 보였다. 따라서 큰 균열의 시뮬레이션을 위해 작성된 시뮬레이션 프로그램을 작은 표면 균열에 대한 해석에까지 확장할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 304 스테인리스강에 대한 시뮬레이션을 위해 작성된 시뮬레이션 프로그램을 1Cr-1Mo-0.25V강에 적용하여 본 결과 재료의 종류에 관계없이 실험결과와 시뮬레이션 결과가 근소한 오차로 일치되어 시뮬레이션 프로그램의 유효성을 확인할 수 있었다.

3. 1Cr-1Mo-0.25V강의 경우는 수십 μm 의 크기

를 가진 인공 결함재의 균열성장속도는 노치가 없는 평활재의 실험 데이터와 거의 일치하기 때문에 평활재에 대한 성장 데이터로 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제(06-E-0148) 연구비에 의하여 연구되었으므로, 이에 관계자에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) Lee, S.B, "Fatigue Failure of Welded Vertical Members of a Steel Truss Bridge", Engng. Failure Analysis, Vol.3, No.2, pp.103~108, 1996
- 2) Suh, C.M, J.J. Lee, Y.G. Kang, H.J. Ahn and B.C. Woo, "A Simulation of the Fatigue Crack Process in Type 304 Stainless Steel at 538°C", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol.15-7 pp.671-684, 1992
- 3) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, "高温におけるステンレス鋼の表面き裂の疲労き裂成長特性", 材料, 第34-344, pp. 500-504, 1982
- 4) Murakami. Y. and S. Nemat-Nasser, "Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws under Tension and Bending ", Engng. Fract. Mech., Vol. 16, pp. 373-386, 1982
- 5) 徐昌敏, 黃南性, 朴明圭, "복수 표면피로균열의 성장 합체거동과 시뮬레이션에 관한 연구", 大韓機械學會誌, 第18卷 第2號, pp.716~728, 1994
- 6) 崔鎔湜, 金永鎮, 이진호, "일정 진폭하중하에서의 복수 표면균열의 피로 성장거동 예측", 大韓機械學會, 90年度 秋季學術大會論文集, pp.74~77, 1990
- 7) 崔鎔湜, 染源鎬, 金永鎮, 金在元, "2個의 對稱表面龜裂材의 龜裂形狀變化 豫測 解析", 大韓機械學會, 90年度 秋季學術大會論文集, pp.86~91, 1990

- 8) Hudak, S.J. Jr. and Davidson, D.L., "The Dependence of Crack Closure on Fatigue Loading Variables", ASTM STP 982, pp.121~138, 1988
- 9) Pelloux, R.M., M. Faral and W.M. McGee, Fracture Mechanics, Proceedings of the 12th National Symposium on Fracture Mechanics, ASTM STP 700, Philadelphia pp.35~48, 1980
- 10) 吉田敏雄, 結城良治, "鋼構造物の疲労き裂進展寿命評價システム", JHPI, Vol. 24, No. 3, pp. 115-123, 1986
- 11) "Standard Test Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standards, Part 10, E647, pp.674~701, 1992
- 12) Nahm, S.H., Lee, H.M. and Suh, C.M., "A Study on Observation and Growth Behavior of Small Surface Cracks by Remote Measurement System", J. KSME, Vol. 10, No. 4, pp.396~404, 1996
- 13) 서창민, 황남성, 정대운, 신형섭, "고온하 304 스테인리스강의 복수표면균열의 성장거동에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회지, 제9권, 제1호, pp.63~72, 1995
- 14) Newman, J.C. Jr. and I.S. Raju, "Stress Intensity Factors Equation for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies", ASME STP 791 pp.238~265, 1983
- 15) Kitagawa, H., Takahashi, S., Suh, C.M. and Miyashita, S., "Quantitative Analysis of Fatigue Process-Microcracks and Slip Lines under Cyclic Strains", ASTM STP 675, pp. 420~449, 1979
- 16) Nahm, S.H., Jang, S.Y., Suh, C.M. and Kim, S.C., "Measurement of Surface Fatigue Cracks at Elevated Temperature by Remote Measurement System", Proceedings of The KSME Autumn Annual Meeting '95 (I), Seoul, pp.692~698, 1995
- 17) James, L.A., "Hold Time Effect on the Elevated Temperature Fatigue-Crack Propagation of Type 304 Stainless Steel", Nuclear Tech., 16 pp. 521~530, 1972.
- 18) Yuuki, R and T. Yoshida, "Fatigue Life Prediction System for Structures", JHPI, Vol.24, No.3, pp.115-123, 1986
- 19) ASME ; Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. X I Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components, Appendix A, 1980
- 20) BSI ; PD 6493 Guidance on Some Methods for the Deviation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints, 1980
- 21) Paris, P.C., and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME, J. Basic Eng, Vol.85, pp.528-534, 1963
- 22) Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, PP.230~242, 1971
- 23) 서창민, 황남성, 윤기봉, "고온하 복수 표면균열의 성장 합체거동과 시뮬레이션에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제9권 제1호, pp.142~151, 1995