

● 論 文

高溫下 304 스테인리스鋼의 複數表面龜裂의 成長舉動에 관한 實驗的 研究

서 창 민* · 신 형 섭** · 황 남 성*** · 정 대 윤****

(94년 12월 19일 접수)

An Experimental Study on the Growth Behavior of Multi-Surface-Cracks in
Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature

C. M. Suh · H. S. Shin · N. S. Hwang and D. Y. Jung

Key Words : elevated-temperature fatigue(고온피로), multi-surface crack(복수 표면균열),
crack growth behavior(균열성장거동), aspect ratio(균열형상비), coales-
cence (합체)

Abstract

The crack which is discovered in various structures and machine elements is multi-cracks. Multi-cracks may cause serious problems because they grow individually, and coalesce into one and it leads to fracture.

Fatigue tests have been carried out to study the growth and coalescence behavior of multi-surface-cracks initiated at the semicircular surface notch in type 304 stainless steel at elevated temperature.

The results are as follows:

When multi-surface-cracks are lying on the surface of material, the major surface crack has greater influence on the the fatigue life than the subcracks.

The aspect ratio of multi-surface-cracks is lower than that of single crack because of

* 경북대학교 공대 기계공학부.

** 안동대학교 공대 기계공학과.

*** 영남전문대학 기계과.

**** 경북대학교 대학원 기계공학과.

the interaction and coalescence of surface cracks.

Crack growth shape turns to semiellipse from the semicircle notch. After coalescence, the surface crack length increases rapidly, and it leads to fracture.

Further, the slope transition of Paris law was found in the $da/dN-\Delta K_I$ plots.

I. 서 론

최근 산업화의 경향으로 구조물 및 기기는 점차 대형화되고, 고온, 고압, 고속 등과 같은 열악한 환경 하에서 사용되는 경우가 증가되고 있다. 이에 따라 부재의 건전성과 안전성 평가의 중요성이 증대되고 있으며 여러 보고에 따르면 기기 및 구조물의 파손원인중 60% 이상이 반복하중하에서 발생하는 피로파괴임이 알려져 있다[1, 2].

특히 원자력과 같은 중요기기 및 구조물에서의 파괴원인은 반복하중에 의하여 부재의 표면에 존재하는 작은 결함에서 발생된 표면균열들이 성장, 합체하는 경우가 많은 것으로 분석되고 있다[3]. 또 실제로 부재에 존재하는 피로균열은 종래의 연구대상이 되어온 관통균열보다는 그 길이의 측정과 해석이 어려운 표면균열로 존재하는 경우가 대부분이다.

이러한 표면균열은 표면방향뿐만이 아니고 깊이 방향으로도 성장하므로 이의 측정과 해석에 관한 연구는 공학적 및 공업적으로 매우 중요하다[4]. 표면균열에는 표면부근의 평면응력상태와 내부의 평면변형률상태가 동시에 존재하고 또 방향에 따라 성장저항에 차이가 있다. 따라서 균열의 형상 및 응력상태가 단순하지 않아 이러한 균열에 대한 평가는 어려움이 있으며, 또한 피로균열 진전거동을 일차적으로 지배한다고 생각되는 균열단힘거동[5]의 검출이 용이하지 않은 관계로 표면균열에 대한 연구는 관통균열에 비하여 그다지 많지 않다.

그리고, 구조물이나 기기에서 발견되는 이러한 작은 표면균열은 대부분 복수표면균열(multi-surface crack)로 존재하며 사용환경이나 온도, 하중형태의 영향을 받으며, 균열간의 간격에 따라 균열 상호간의 간섭영향하에 성장, 합체, 파단에 이르므로 해석상의 어려움이 더욱 크다. 그러나, 파

괴 역학적 개념을 이용한 기기의 설계, 검사 및 안전성 평가를 위하여 작은 표면균열(small surface crack)의 성장 특성에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

복수표면균열에 대한 연구로는 Suh 등[6], Yuuki 등[7], Murakami 등[8]이 균열 상호간 간섭의 영향하에서 응력확대계수를 계산하였으며, 서 등[9]은 표면균열재에서의 균열형상비 변화와 균열간 간섭의 영향을 연구하였다.

또 고온에서 사용되는 부재에 대한 온도의 영향, 높은 산화성 분위기와 조직 변화 및 입내파괴에서 입계파괴로의 파괴형태, 시간 인자(반복 속도, 변형률속도, 변형률 파형, 또는 응력파형등)의 영향 및 온도의 상승에 따른 재료의 연화 등 피로 파괴의 역학적인 연구가 진행되었다.

현재까지 진행된 고온 표면피로균열에 대한 연구로 Yuuki 등[10]은 538℃의 고온 하에서 톱니형 하중 파형을 이용하여 304 스테인리스강의 CT시험편 및 작은 표면노치재에 대한 연구에서 피로균열의 성장특성에 대한 주파수의 영향을 연구한 바가 있다. 또, Shahinian 등[11]은 4가지의 오스테나이트계 스테인리스강을 이용한 고온피로시험에서 응력확대계수에 따른 균열 성장률을 연구한 바 있고, James[12]는 304 스테인리스강을 이용한 고온피로시험에서 피로균열성장에 대한 주파수의 영향에 대해 조사하였다. 그리고, Hour 등[13]은 고온에서 균열 성장률에 대한 응력비와 하중 주파수의 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 고온하 복수표면피로균열의 성장, 합체 거동을 해석하기 위하여 4종류의 반원형의 표면노치를 방전가공한 평판시험편을 이용하여 538℃의 고온 대기 중에서 편진인장 축하중 피로시험을 실시하고 복수표면균열의 거동을 파괴역학적으로 해석하였다.

II. 시험편 및 실험방법

2-1. 시험편

본 실험에 사용된 시험편의 재료는 304 스테인리스강이며, Table 1과 Table 2에 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of specimen (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.07	0.35	1.89	0.032	0.014	-	8.5	18.0

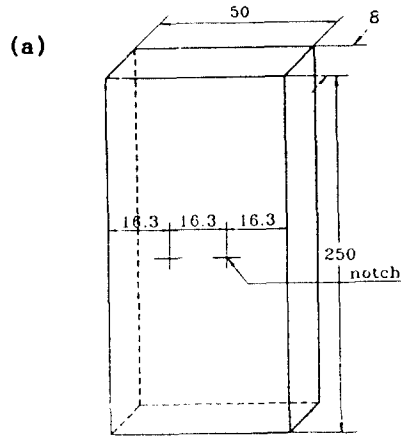
Table 2. Mechanical properties of specimen

Mechanical properties	Temperature (°C)	Yield point 0.2% offset (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Hardness (H _p)
Standard	R.T.	min 206	min 520	min 40	min 60	max 187
Specimen A	R.T.	313.8	647.2	57.0	72.0	179
Specimen B	538	208	505.2	40.8	66.5	-

시험편은 304 스테인리스 강판에서 균열의 성장 방향이 압연방향과 직각이 되도록 절단 채취하였으며, 시험편의 형상은 Fig. 1과 Fig. 2와 같은 SCT(surface crack tension)형이고, 시험편의 앞면에 방전가공기(electric discharging machine, EDM)를 사용하여 표면노치를 가공하였다.

시험편은 Fig. 1과 같이 표면길이 6 mm, 깊이 3 mm로 크기가 같은 노치를 하중작용방향과 수직 방향으로 2개(HS2라 칭함) 및 3개(HS3라 칭함)를 각각 일직선상에 가공하였다. 또 크기가 다른 경우는 Fig. 2와 같이 표면길이 3mm, 깊이 1.5mm인 큰 노치와 표면길이 1.5mm, 깊이 0.7mm인 작은 노치를 각각 1개씩 2개(HS2A)가공한 시험편과, 큰 노치 한개를 중앙에 양 가장자리에 2개의 작은 노치를 가공한 즉 3개(HS3A)의 크기가 다른 노치를 각각 가공하였다.

피로시험중 시험편의 노치부에서 발생, 성장하는 피로균열의 길이측정을 용이하게 하기 위하여 노치부의 표면부근을 에머리 페이퍼 1200번까지 연마한 후 산화크롬으로 비핑하였다.



HS2

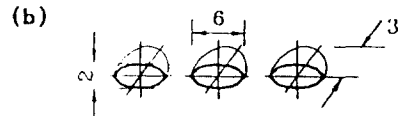
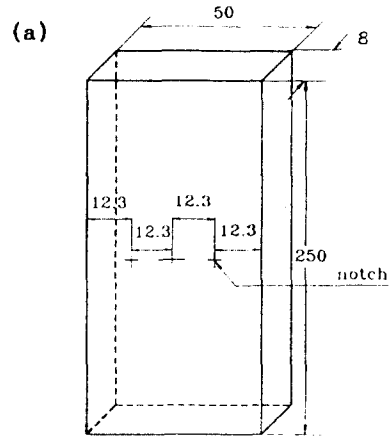


Fig. 1 Configuration of HS2 specimen with the same surface notches (unit : mm)

(a) geometry (b) details of notch



HS3A

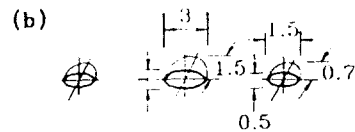


Fig. 2 Configuration of HS3A specimen with the two different surface notches (unit : mm)

(a) geometry (b) details of notch

2-2. 실험방법

본 실험에 사용된 시험기는 서보유압식(servo-hydraulic) 피로시험기(Instron 1342)이며, 유압척(hydraulic chuck)사이에서 시험편을 고정시키고 분리형 전기로를 부착하여 고온에서 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 538°C하에서 응력비 R=0.1, 하중 주파수 10 Hz인 일정진폭의 편진축하중을 가하여 실시하였고 정현파를 사용하였다.

고온피로시험을 실시하기 위한 시험편의 가열은 전기저항식 전기로를 사용하였으며, 시험편 온도는 자동온도 조절장치로서 538°C로 일정하게 유지시켰다. 또, Cromel-Alumel 열전대를 이용하여 전기로내에서 시험편표면의 온도를 측정하여 본 결과 시험편표면의 온도가 설정온도의 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내인 것을 확인할 수가 있었다.

피로시험은 전기로 내의 온도가 538°C에 도달한 후 30분 이상의 몰입시간(soaking time)을 가진 후에 실시하였다. 표면균열의 길이를 정밀하게 측정하기 위하여 표면레프리카법을 이용하였다. 즉 일정박수마다 시험기를 정지시켜 시험편을 냉각시킨 후 표면레프리카를 채취한 후 광학현미경을 이용하여 균열길이를 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3-1. S-N선도

Fig. 3은 Fig. 1 및 2와 같이 노치배열을 달리한 4가지 시험편으로 538°C하에서 인장축하중 피로시험을 실시했을 때의 최대인장응력(σ_{\max})과 피로파단수명(N_f)과의 관계를 동시에 나타낸 S-N선도이다. 이 그림상에는 상온하에서 실시한 연구결과[9]도 동시에 나타내었다.

이 그림상에는 본 실험에서 사용한 응력레벨은 147.2 MPa, 196.2 MPa, 245.3 MPa이며, ○, □, △, ◇ 표시한 고온실험의 결과와 ●, ■, ▨, ✱로 표시한 상온의 결과를 각각 나타내었다. Fig. 3의 자료를 온도와 노치계수 및 응력레벨에 따른 결과를 비교 분석하여 다음과 같은 특징을 알 수 있다.

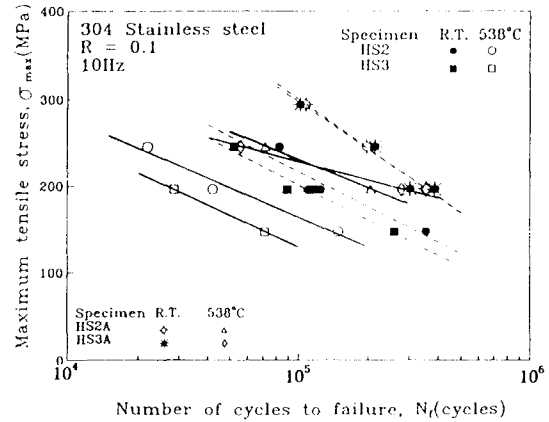


Fig. 3 Relation between maximum tensile stress, σ_{\max} , and number of cycles to failure, N_f .

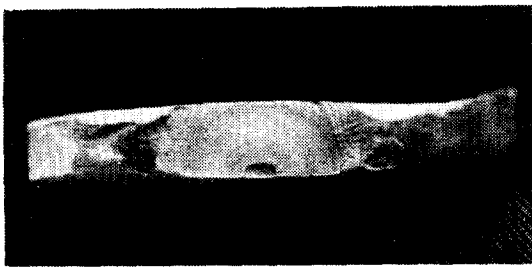
첫째, 상온과 고온에서 노치의 크기나 수와는 관계없이 시험편의 피로수명은 하중레벨이 증가할수록 일정하게 감소하였다. 즉 147.2 MPa에서 동일한 크기의 노치가 2개 및 3개인 HS2 및 HS3 시험편들의 상온과 고온에서의 피로수명차이는 상온을 기준으로 각각 58.2 % 와 72.6 % 생겼다. 또, 196.2 MPa에서 크기가 다른 노치인 경우에는 시험편들의 상온과 고온에서의 피로수명차이는 상온에 비해 각각 42.6 %와 27.8 %이다. 상온과 고온하에서 응력레벨, 노치의 수 및 노치의 크기에 따른 피로수명의 차이를 살펴보면 고온에서의 피로수명이 상온보다 감소하는데 그 이유는 온도의 상승에 따른 재료의 연화와 고온에서의 높은 산화성분위기 때문인 것으로 생각되며 Shahinian 등[11]은 균열선단의 소성영역의 크기를 결정짓는 역학적 인자들이 온도에 따라 변화하기 때문인 것으로 설명하고 있다.

둘째, 상온과 고온에서 동일한 크기의 노치가 2개 및 3개인 경우에 노치개수에 따른 각 온도에서 피로수명의 차이를 하중이 147.2 MPa인 경우에서 살펴보면 상온의 경우는 노치의 개수가 2개인 경우는 피로수명에서의 차이가 26.7 %이고 고온에서는 51.9 %였다.

셋째, 크기가 다른 노치가 2개 및 3개인 HS2A 및 HS3A 시험편의 경우에 각 온도레벨에서 노치갯수에 따른 피로수명에서의 차이는 196.2 MPa의 경우에 상온의 피로수명에서의 차이가 7.2 %, 고온은 26.3 %이다. 이 결과는 동일한 크기의 노치가 존재하는 둘째의 경우보다 피로수명에서의 차이가 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 크기가 다른 노치가 있는 시험편에 있어서 노치갯수에 따른 피로수명의 차이를 살펴보면 작은 노치에서 발생한 보조균열이 시험편의 피로수명에 미치는 영향은 매우 적다는 것을 알 수 있다.



(a) HS2



(b) HS3A

Fig. 4 Fractography of the specimen with the same and different notch size at 538°C
(a) HS2 (b) HS3A

이와 같은 현상은 고온피로시험이 끝난 후 시험편의 파단면 사진을 관찰하여 보면 잘 알 수 있다. Fig. 4는 시험편의 파단면 사진을 나타내고 있다. Fig. 4(a)에는 HS2 시험편의 경우의 파단면 사진으로 각 노치에서 균열이 발생하여 각각 성장한 후 합체가 일어나면서 급격히 성장 파단에 이르는 관

찰할 수 있다.

Fig. 4(b)는 노치크기가 다른 HS3A 시험편의 경우의 파단면 사진이다. 그림(b)와 같이 노치의 크기가 큰 중앙의 노치에서 발생한 주균열(major crack)이 성장하여 시험편을 관통하여 파단에 이르렀고, 좌우의 작은 노치에서 발생한 보조균열은 거의 성장하지 않았다. 즉 크기가 다른 노치가 존재하는 경우에 가장 큰 노치에서 발생한 주균열이 시험편의 피로수명을 지배함을 알 수 있다. 이러한 현상은 상온의 연구결과[9]와 고온의 연구결과[6]와도 일치한다.

3-2. 피로균열의 반길기와 반복수비와의 관계

Fig. 5는 고온 피로균열의 발생 성장 합체거동을 비교하기 위해 동일한 크기의 노치에서 발생한 균열의 자료와 크기가 다른 노치에서 발생한 균열의 자료에서의 균열의 반길기(a)와 반복수비(N/N_r)와의 관계를 동시에 나타낸 것이다.

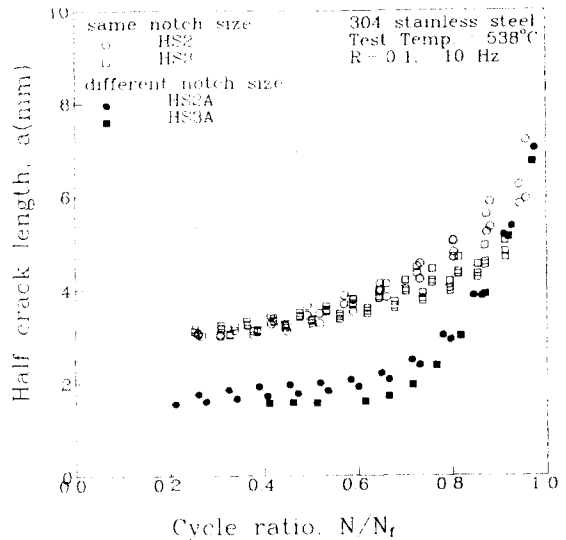


Fig. 5 Relation between half crack length, a and cycle ratio, N/N_r

이 그림의 특징은 2a-N선도에서 나타난 수명차이에도 불구하고 비교적 좁은 밴드 내에 데이터들이 모이고 있음을 알 수 있다. 또 시험편의 노치에

서 발생하는 피로균열은 수명의 20% 이전에 발생하여 원활하게 성장하다가 파단수명의 약 80~85% 이상에서 합체가 일어나면서 급격하게 파단됨을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 다른 연구결과들과도 잘 일치한다[14, 15].

3-3. 균열형상비의 변화

Fig. 6은 Fig. 4와 같은 파단면에 형성되는 균열길이에 대한 깊이방향의 성장거동을 시험편이 피로파단된 후에 측정하여 그 자료를 정리한 것이다. 즉, 균열길이(b)의 성장에 대한 표면균열의 형상비(b/a)의 변화를 알아보기 위하여 횡축에 균열길이(b)를 두께(t)로 무차원화한 변수, b/t 를 취하고 종축에 표면균열의 형상비, b/a 를 취하여 정리한 것이다.

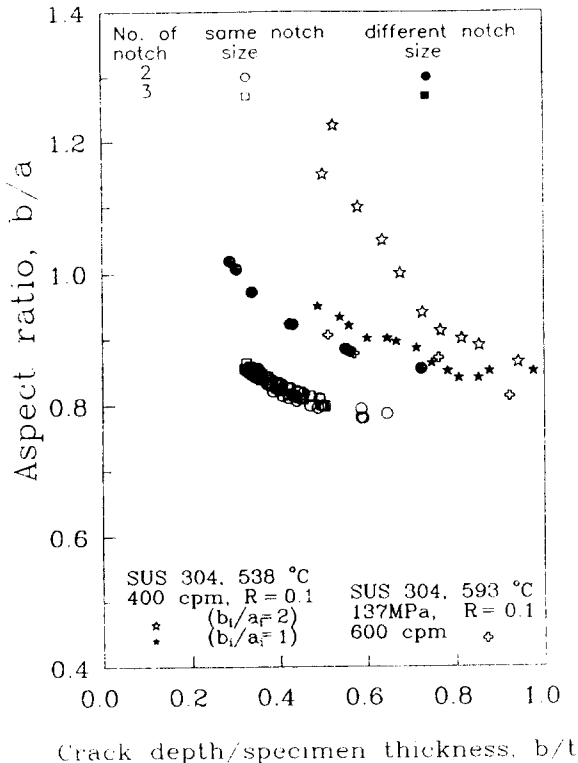


Fig. 6 Variation of aspect ratio, b/a against the ratio of crack depth and crack thickness, b/t

Fig. 1과 같이 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 변화하고 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 균열의 길이방향에서의 간섭효과가 깊이방향의 간섭효과 보다 더 크게 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 결과는 2개의 대칭균열재의 균열형상비에 대한 해석적 결과와도 잘 일치한다[3]. 이러한 표면길이 a 와 균열길이 b 와의 관계를 이용하여 최소자승법으로 구하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$b = 0.77a + 0.59 \quad (1)$$

또한 Fig. 2와 같이 크기가 다른 균열이 2개 및 3개인 경우의 균열형상비 변화를 Fig. 6상에 나타내고 있다. 이 경우에는 b/a 는 b/t 가 변화함에 따라 약 0.85로 수렴하고 있음을 관찰할 수 있다.

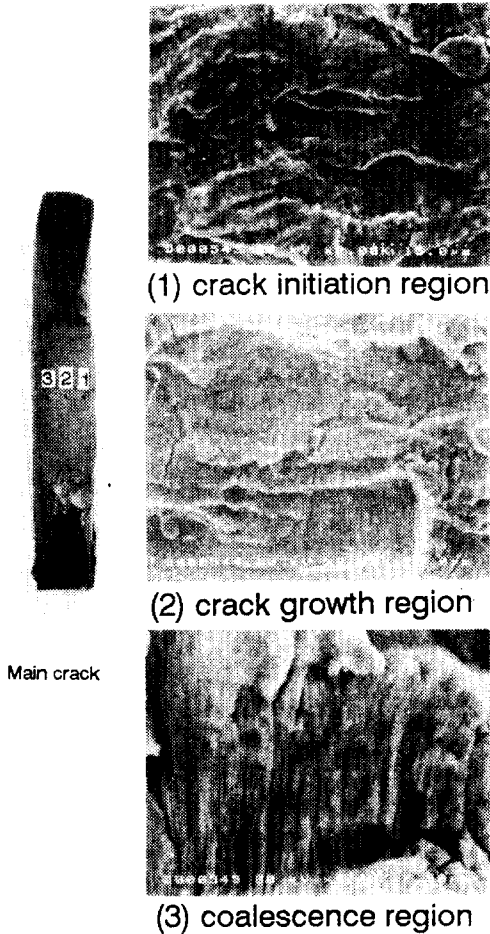
그리고 Fig. 6에서는 본 실험의 결과와 균열의 성장특징을 비교하기 위하여 다른 연구자들의 실험결과를 동시에 나타내었다[7]. 복수의 노치가 존재하는 시험편과 1개의 노치가 존재하는 시험편들과의 균열형상비의 변화를 비교하여 보면 동일 크기의 노치가 복수로 존재하는 시험편들의 균열형상비는 0.85 보다 작은 값에 수렴하지만 크기가 다른 노치가 복수로 존재하는 경우에는 형상비가 약 0.85에 수렴하고 있으며, 1개의 단일노치가 존재하는 경우에도 초기의 노치의 형상비와는 관계없이 균열의 형상비가 약 0.85로 수렴하고 있다.

즉 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 단일노치를 갖는 高温材의 경우에는 균열의 형상비가 0.84였다[10]. 이러한 결과는 노치의 크기가 다른 복수 균열재의 결과와 비슷하였다. 이 결과에서 크기가 다른 노치가 복수로 존재하는 경우에 작은 노치에서 발생한 보조균열은 큰 노치에서 발생한 주균열의 형상비 변화에 거의 영

향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3-4. 표면균열의 파면해석(fractography)

Fig. 7은 주균열 1개에 좌우에 보조균열을 하나씩 가진 노치의 크기가 다른 HS3A재에 대한 SEM사진을 나타내고 있다. 사진상의 (1)은 주균열의 발생부, (2)와 (3)은 성장부를 각각 SEM으로 촬영한 것이다.



(1)영역인 균열발생 영역에서는 장시간 고온대기중에 노출되므로 산화막과 산화물의 성장(oxide growth)특징이 뚜렷하게 나타나며 대체로 평탄한 균열 형성면을 관찰할 수 있다. 또 (2, 3)영역에서도 산화막을 관찰할 수 있지만, (1)영역보다 균열 전파속도가 빠르기 때문에 산화물과 산화막의 형성은 적지만 피로균열의 특성을 잘 나타내는 불규칙적인 연성줄무늬(striation)를 관찰할 수 있다. 이러한 표면균열의 발생, 성장거동은 HS2재에서도 유사한 양상을 관찰할 수 있으며 (2)와 (3)영역과 같이 연성 줄무늬를 넓게 관찰할 수 있다.

HA3A재의 보조균열상의 SEM사진의 경우에는 주균열에 비교하여 성장이 적으므로 균열의 성장부를 약간 벗어나면 피로균열이 급속하게 합체되었으므로 파면상에서는 대부분 인장파면에서 관찰되는 딩플(dimple)을 관찰할 수 있었다. 그리고 딩플의 방향에 따라 주균열에서 전파되어 합체되는 주균열의 근원지를 유추할 수 있었다. 따라서 균열의 크기가 다른 시험편에서의 피로균열의 성장은 주균열에 의해 지배됨을 파면사진을 통해 확인할 수 있었다.

IV. 표면균열의 성장속도에 대한 파괴역학적 정리

실험으로부터 얻어진 연구결과를 기초로 하여 표면균열의 성장 및 합체에 이르는 과정에 대해 파괴역학적인 평가를 시도하였다.

반타원 표면균열의 Mode I 응력확대계수 K_{I1} 은 시험편 표면에서의 평면응력 상태와 내부점에서의 평면변형률 상태, 그리고 그 중간 점에서는 혼합된 응력상태이다. 즉, 균열선단 곡선의 위치에 따라 응력상태가 변화하는 3차원적 특성을 지니므로 아직까지 응력확대계수에 대한 엄밀한 해석해는 구해지지 않고 있으며, 근사해, 실험치, 또는 이들 결과를 이용하여 얻은 경험식이 다수 제안되고 있다 [16].

본 연구에서는 표면균열의 응력확대계수 평가를 위해 3차원 유한요소법에 의한 결과로부터 수

Fig. 7 Scanning electron micrographs of fracture surface for the major crack of HS3A specimen (1) crack initiation region (2), (3) crack growth region

식화되어 있고 균열의 표면 및 길이방향을 동시에 고려할 수 있도록 제한하고 있는 신뢰성이 높은 Newman-Raju식[17]을 이용하여 실험결과의 해석을 시도하였다.

4-1. $db/dN - \Delta K_b$ 특성

Fig. 8a 및 8b는 304 스테인리스강의 균열진전 거동을 검토하기 위하여 위의 식을 이용해서 구한 응력확대계수범위(ΔK_b)에 대하여 균열의 길이방향에서의 피로균열의 성장속도 db/dN 을 나타낸 그래프이다.

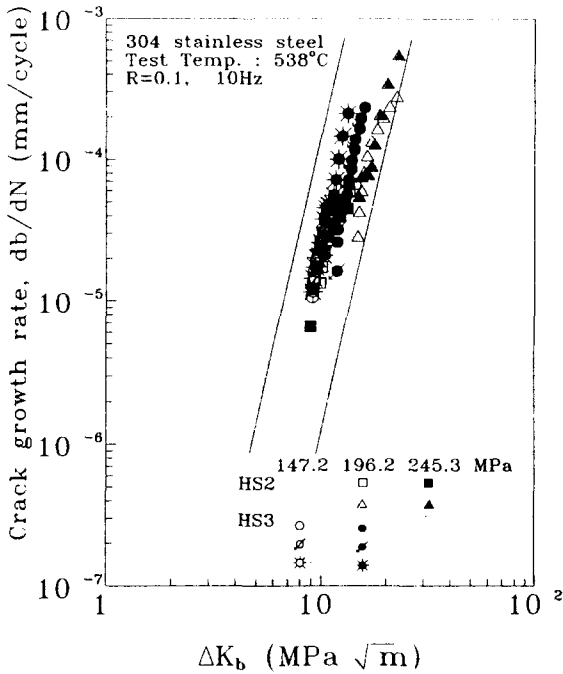


Fig. 8a Dependence of crack growth rate upon stress intensity factor range with multi-surface cracks for specimens with the same notch size

이 그림에서 균열성장속도 db/dN 은 $i+1$ 번째 하중반복수 N_{i+1} 일 때의 균열길이 b_{i+1} 와 N_i 일 때의 균열길이 b_i 를 측정하여 Secant법을 사용하여 구하였다.

Fig. 8a에는 동일한 크기의 노치가 2개 및 3개인 경우에 길이방향의 db/dN 과 ΔK_b 와의 관계를 대수좌표상에 나타낸 것이다. 이 그림에서 균열성장률은 ΔK_b 에 따라 직선적으로 증가하다가 임의의 ΔK_b 값 이상에서는 그 성장이 둔화되는 현상이 부분적으로 나타난다. 즉, Paris[18]의 식을 사용하여 자료들을 정리하면 기울기 m 의 값이 변화하는 영역이 나타난다. 그림에서 균열성장률은 응력레벨의 증가에 따라 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 노치의 수와 응력레벨에 관계없이 그 결과들이 실선으로 표시된 좁은 밴드 내에 비교적 잘 모이고 있음을 알 수 있다.

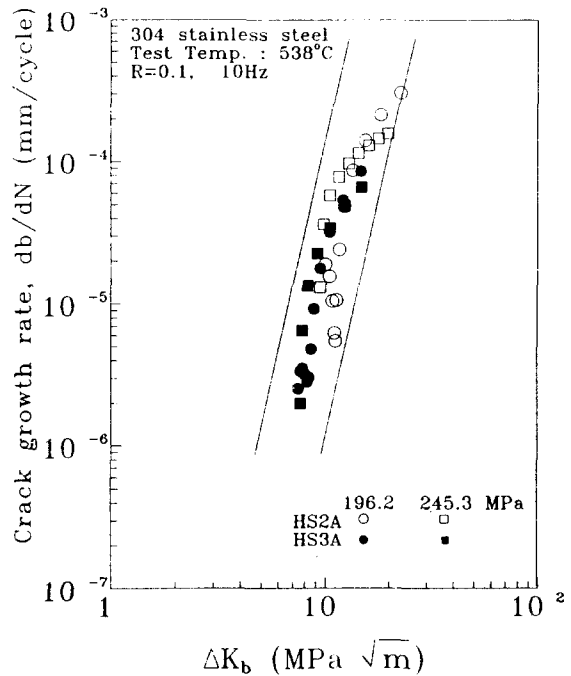


Fig. 8b Dependence of crack growth rate upon stress intensity factor range with multi-surface cracks for specimens with the different notch size

Fig. 8b에는 크기가 다른 초기 노치가 2개 및 3개인 경우의 균열성장률과 응력확대계수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 균열성장률은 Fig.

8(a)에서와 같이 초기에는 직선적으로 성장하다가 후반부에 그 성장이 둔화되는 현상이 나타나고 있다. 또 균열성장률은 응력레벨이 높을수록 크게 나타나며 노치수와 응력레벨 및 노치크기의 차이에도 불구하고 그 결과들이 잘 모이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8a와 Fig. 8b에서 이러한 균열성장률의 둔화현상은 실험에 사용된 재료가 고온에서 나타나는 특성으로 생각되며 이러한 경향들은 CT시험편을 이용한 James의 실험결과[12]와 알루미늄합금을 이용한 다른 연구자들의 결과[19, 20]와 유사하다.

V. 결 론

본 연구에서는 고온용 부재로 널리 사용되고 있는 304 스테인리스강을 사용하여 상온 및 538°C에서 인장축하중 피로시험을 실시하여 4가지 종류의 시험편 즉, 동일한 크기의 노치 2개와 3개를 갖는 시험편과 크기가 다른 노치 2개와 3개를 갖는 시험편에서 복수표면피로균열의 발생, 성장 및 합체 거동을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 크기가 다른 노치를 갖는 시험편의 경우 작은 보조균열은 주균열에 비해 그 성장량과 피로수명에 미치는 영향이 매우 적었다. 즉, 주균열이 피로수명의 대부분을 차지하였다.

2. 복수표면노치에서 발생, 성장하는 복수표면균열의 형상비는 균열간의 간섭효과로 인해 단독균열일때 보다 그 형상비(b/a)가 감소하는 경향을 나타내었다.

3. 복수표면노치의 피로수명은 피로균열의 발생, 성장에 대부분 소비되고 균열형상이 반원형에서 반타원형으로 변화되면서 인접한 균열과 합체한 후 균열의 표면길이가 급격히 증가하여 파단되었다.

4. 고온하의 피로균열 성장률은 Paris식에서 기울기 m의 천이영역이 부분적으로 발생하였다.

후 기

본 연구는 93년도 한국과학재단의 연구비(과제번호 931-1000-017-2)에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

參 考 文 獻

- 1) Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons, New York, pp. 1~6, 1980
- 2) 서 창민, "피로파괴와 파괴역학에 관하여", 대한기계학회지, Vol. 26, No. 5, pp. 382~388, 1986
- 3) Jolley, M. and Tortoriello, V., "Geometry Variations during Fatigue Growth of Surface Flaws", ASTM STP 791, pp. I-297~I-307, 1983
- 4) Suh, C.M., J. J. Lee and Y. G. Kang, "Fatigue Microcracks in type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 13-5, pp. 487~496, 1990
- 5) Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp. 230~242, 1971
- 6) 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.
- 7) 吉田敏雄, 結城良治, "鋼構造物の疲労き裂進展壽命評價システム", JHPI, Vol. 24, No. 3, pp. 115~123, 1986
- 8) Murakami, Y. and S. Nemat-Nasser, "Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws under Tension and Bending", Engng. Frac. Mech., Vol. 16, pp. 373~386, 1982
- 9) 徐昌敏, 黃南性, 朴明圭, "複數表面疲勞균열의 성장 거동 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1991

- 열의 成長·合體舉動과 시물레이션에 관한 研究”, 大韓機械學會論文集, 第18卷 第3號, pp. 716~728, 1994
- 10) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, “高溫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.
- 11) Shahinian, P., Smith, H. H., and Watson, H. E., “Fatigue Crack Growth Characteristics of Several Austenitic Stainless Steels at High Temperature”, ASTM STP 520, pp. 387~400, 1973
- 12) James, L. A., “Frequency Effects in the Elevated Temperature Crack Growth Behavior of Austenitic Stainless Steels – A Design Approach”. J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 101, pp. 171~175, 1979
- 13) Hour, K. Y., Stubbins, J. F., “Fatigue Crack Growth Behavior of Alloy 800H at Elevated Temperature”, J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 113, pp. 271~279, 1991
- 14) 徐昌敏, 姜用求, “2.25 Cr-1Mo鋼의 작은 표면균열의 成長에 관한 基礎的 研究”, 韓國海洋工學會誌, 第1卷, 第1號, pp. 104~110, 1987
- 15) 徐昌敏, 權五憲, 李正州, “작은 表面缺陷에서 發生 成長하는 表面疲労균열의 成長特性에 관한 研究”, 大韓機械學會誌論文集, 第11卷, 第2號, pp. 191~197, 1987
- 16) Murakami, Y., “Stress Intensity Factors Handbook”, Pergamon Press, Oxford, 1986
- 17) Newman, J. C., Jr. and Raju, I. S., “Stress Intensity Factors Equation for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies”, ASTM STP 791 pp. 238~265, 1983
- 18) Paris, P. C., and F., Erdogan, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Trans. ASME, J. Basic Eng. Vol. 85, pp. 528~534, 1963
- 19) Tanaka, K., Matsuoka, S., Schmidt, V. and Kuna, M., “Influence of Specimen Geometry on Delayed Retardation Phenomena of Fatigue Crack Growth in HT-80 Steel and A5083 Aluminum Alloy”, Advance in Fracture Research, Prints of the International Conference on Fracture(ICFS), Cannes France, Vol. 4, pp. 1789~1798, 1981
- 20) 城野政弘, 宋智浩, 岡部雅彦, 江口直紀, “發生初期微小疲労き裂から弾塑性巨視疲労き裂までのき裂進展速度と開閉口舉動”, 材料, Vol. 33, No. 368, pp. 560~565, 1984