

● 論 文

## 고온하 복수 표면균열의 성장 합체거동과 시뮬레이션에 관한 연구

서 창 민\* · 황 남 성\*\* · 윤 기 봉\*\*\*

(95년 2월 28일 접수)

### Fatigue Crack Growth, Coalescence Behavior and its Simulation on Multi-Surface Cracks Under the Elevated Temperature

C.M Suh\* · N.S Hwang\*\* · K.B Yoon\*\*\*

**Key Words** : Multi-surface cracks(복수표면균열), simulation program(시뮬레이션 프로그램), fatigue life prediction(피로수명예측), crack growth(균열성장), coalescence(합체)

#### Abstract

A simulation program concerned with multi-surface fatigue cracks which initiated at the semi-circular surface notches has been developed to predict their growth and coalescence behaviors at the elevated temperature. Three kinds of coalescence models such as SPC(surface point connection), ASME and BSI(British Standards Institution) conditions were applied, and the results of the simulation were compared with those of the experiment.

This simulation is able to enhance the reliance and integrity of structures especially under the elevated temperature which have lots of difficulties in experiments and applications. This shows that the simulation result has utility for fatigue life prediction.

Even though all the specimens were the same shape, the error rate was increased in accordance with the applied stress to the specimen. Among the material constants C and m in the narrow band, the results applied upper values of the band to the simulation has shown quite small error compared with the experiment results.

\* 경북대학교 기계공학과

\*\* 영남전문대학 기계과

\*\*\* 한국표준과학연구원

## 1. 序 論

원자력발전소와 화학 플랜트 등 고온 및 고압하에서 작동되는 기기 및 구조물은 고온하에서 장시간 노출되므로 파괴사고가 발생될 가능성이 높다. 또한 이런 사고의 원인을 분석해보면 표면에 존재하는 개재물이나 결함에 의하여 표면피로균열이 대부분을 차지하고 있다고 보고되고 있다<sup>1-5)</sup>.

기기 및 구조물에서 발생하는 피로균열은 재료 및 부하방식에 따라 그 차이가 있지만 균열길이의 측정 혹은 파괴역학적 해석이 어려운 표면균열의 형태로 존재하는 경우가 많아 이 표면균열에 대한 균열성장기구를 규명, 해석하고 그 잔존수명을 예측하는 기술은 공학적 및 산업적으로 중요한 의의를 가진다<sup>6)</sup>. ASME Code Sec.X I<sup>7)</sup>에서는 표면결함일 경우는 원이나 타원으로 치환하여 破壞力學的인 해석을 하고 있다.

실제 表面균열은 단일균열이 아닌 複數균열로 존재하는 경우가 대부분이다. 또 이 複數균열은 반복하중, 환경, 온도의 영향을 받으면서 成長, 合體되어 破斷에 이르므로 균열의 해석은 상당히 어렵다.

이상과 같은 작은 表面균열에 대한 연구는 北川<sup>7)</sup>, 徐 등<sup>7-9)</sup>, Coffin<sup>10)</sup>과 Shahinian<sup>11)</sup> 등에 의해서 상온 및 고온하에서 수행되었다.

北川, 徐 등<sup>7-9)</sup>은 상온 및 고온하의 피로균열의 성장에 관한 실험을 통해 표면상의 미소 복수 표면균열의 성장, 합체에 대한 시뮬레이션 프로그램을 제안하였다. Coffin<sup>10)</sup>은 고온피로의 문제를 노치선단에서 발생, 성장된 균열의 성장, 합체거동을 노치의 소성역을 고려한 고변형률 균열성장과 탄성균열성장의 문제로 보았다. Shahinian 등<sup>11)</sup>은 4가지의 오스테나이트계 스테인리스강을 이용한 고온피로 시험에서 응력확대계수에 따른 균열 성장률을 연구하였다.

본 연구에서는 전보<sup>12)</sup>에서 발표한 복수표면균열의 발생, 성장 및 합체거동에 관한 실험결과를 이용하여 複數表面균열의 成長舉動에 대한 시뮬레이션을 실시한 것이다.

## 2. 시험편 및 實驗方法

본 연구에서 사용된 실험결과는 전보<sup>12)</sup>에서 얻은 결과이다. 304 스테인리스강板에 放電加工機로 인공노치의 크기가 동일한 시험편과 노치의 크기가 다른 두 종류의 것을 제작, 사용하였다.

인공노치의 크기가 동일한 시험편은 表面길이 6mm, 깊이 3mm인 표면노치를 2개 및 3개로 하여 노치간의 거리를 일정하게 하였으며 각각 HS2 및 HS3재로 칭하기로 한다.

또 인공노치의 크기가 다른 경우는 큰 노치와 작은 노치를 혼합하였다. 여기서 큰 노치란 表面길이 3mm, 깊이 1.5mm인 경우이고 작은 노치는 表面길이 1.5mm, 깊이 0.7mm인 것이다. 노치의 크기가 다르고갯수가 2개인 시험편은 큰 노치 1개와 작은 노치를 1개를 각각 1개씩 가공한 시험편이고, 노치의 갯수가 3개인 시험편은 큰 노치를 시험편 중앙에 1개 가공하고 작은 노치 2개를 좌우에 각각 방전가공한 것으로 각각 HS2A와 HS3A라 칭하기로 하였다.

실험방법은 사용된 시험기는 서보유압식 피로 시험기(Instron 1342)를 사용하였다. 피로시험은 538℃하에서 응력비 R=0.1, 하중 주파수 10Hz인 일정진폭의 인장축하중을 가하여 실시하였고 정현파를 사용하였다.

피로시험중 표면균열의 길이측정은 일정반복수마다 시험기를 정지시켜 시험편을 상온 까지 서냉시킨 후 표면테프리카를 채취하고, 이것을 광학현미경으로 균열길이를 정밀하게 측정하였다.

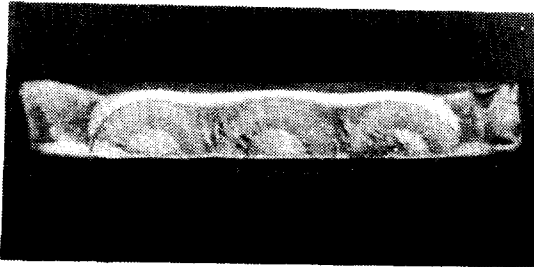
## 3. 실험결과

### 3-1. 파단면상의 균열성장 합체 특성

Fig. 1은 전보<sup>12)</sup>에서 얻은 연구결과를 나타내고 있다. 즉 Fig 1(a)에는 동일한 크기의 노치가 2개와 3개인 경우의 파단면 사진으로 각 노치에서 균열이 발생하여 각각 성장한 후 합체가 일어나면서 파단에 이르는 과정을 관찰할 수 있다.

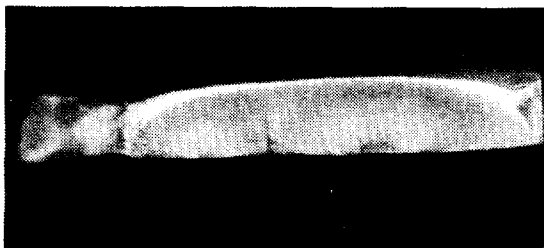


(a) HS2

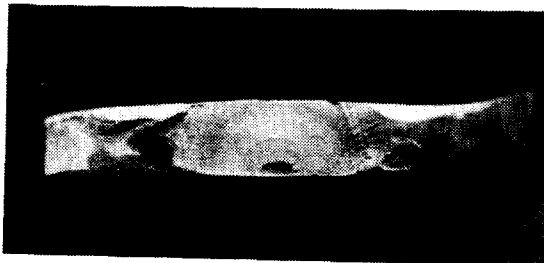


(b) HS3

Fig. 1a Fractography of the specimen with the same notch size at 538°C (a) HS2 (b) HS3



(a) HS2A



(b) HS3A

Fig. 1b Fractography of the specimen with the different notch size at 538°C (a) HS2A (b) HS3A

Fig. 1(b)는 크기가 다른 노치가 2개와 3개인 경우의 파단면 사진이다. 이 그림에서 1개의 중앙노치에서 발생한 주균열(major crack)이 성장하여 시험편을 관통하여 파단에 이르는 동안 좌우의 작은 노치에서 발생한 보조균열(sub crack)의 성장은 매우 적었다. 즉 크기가 다른 노치가 존재하는 경우에는 큰 노치에서 발생한 주균열이 시험편의 피로수명을 지배하는 것을 알 수 있다.

### 3-2. 표면균열의 성장속도에 대한 파괴역학적 정리

Fig. 2는 복수 표면균열의 성장특성을 나타내는 2a-N 곡선의 일례이다. 이러한 곡선에서 표면의 결함에서 발생, 성장하는 피로균열은 발생초기에는 많은 시간이 요구되지만 점차 성장이 빨라짐을 알 수 있다. 이 2a-N곡선을 이용하여 파괴역학적인 평가를 실시한 것이 Fig. 3이다.

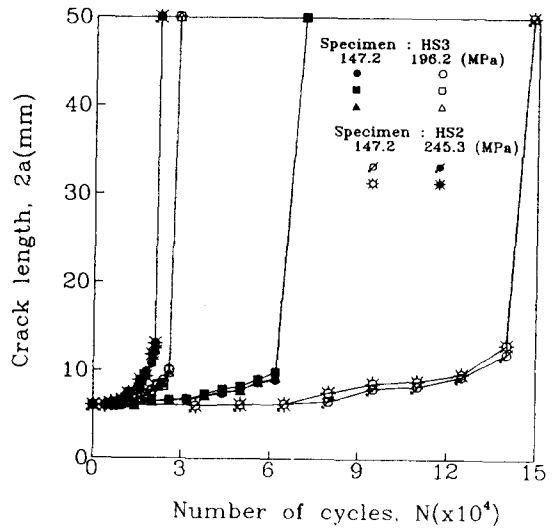


Fig. 2 Relation between crack length, 2a and number of cycles, N for HS2 and HS3 specimen with the same notch size

반타원 표면균열의 응력확대계수  $K_t$ 은 시험편 표면응력상태를 내부점에서 평면변형률상태, 그리고 그 중간 점에서는 혼합된 응력상태를 나타낸다.

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<sup>13)</sup>.

본 연구에서는 표면균열의 응력확대계수 평가를 위해 3차원 유한요소법에 의한 결과로부터 수식화되어 있고 균열의 표면 및 깊이방향을 동시에 고려할 수 있도록 제안하고 있는 신뢰성이 높은 Newman-Raju식<sup>14)</sup>을 이용하여 본 연구의 실험결과를 해석하였다.

3-2-1 db/dN- $\Delta K_b$  특성

Fig. 3(a) 및 3(b)는 304 스테인리스강에 대한 균열성장거동을 검토하기 위하여 Newman-Raju 식을 이용해서 구한 응력확대계수범위  $\Delta K_b$ 에 대하여 균열이 깊이방향에서의 피로균열의 성장률 db/dN과의 관계로 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 균열성장속도 db/dN은 i+1번째 하중반복수  $N_{i+1}$ 일 때의 균열길이  $b_{i+1}$ 와  $N_i$ 일때의 균열길이  $b_i$ 를 측정함 다음, Secant법을 사용하여 구하였다.

Fig. 3(a)에는 동일한 크기의 노치가 2개 및 3개인 HS2 및 HS3재의 경우에 깊이방향의 균열성장률 db/dN과 깊이방향에서의 응력확대계수범위  $\Delta K_b$ 에 따라 성장속도가 직선적으로 증가하다가 임의의  $\Delta K$ 값 이상에서는 그 성장이 완만하게 둔화되는 현상이 나타났다. 즉 Paris<sup>15)</sup>의 식을 이용하여 각 자료들을 정리하면 기울기 m의 값이 변화하는 영역이 나타났다. 여기서 균열성장률은 응력레벨의 증가에 따라 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 노치의 수와 응력레벨에 관계없이 그 결과들이 좁은 밴드내에 잘 모이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3(b)에는 크기가 다른 초기노치가 2개 및 3개인 HS2A 및 HS3A재의 경우의 균열성장률과 응력확대계수와의 관계를 나타낸 것으로 균열성장률 Fig. 3(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 좁은 밴드내에 잘 모이고 있음을 알 수 있다.

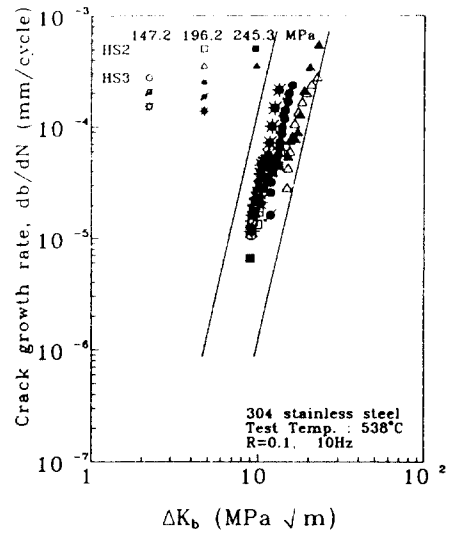


Fig. 3a Dependence of crack growth rate upon stress intensity factor range with multi-surface cracks for HS2 and HS3 specimens with the same notch size

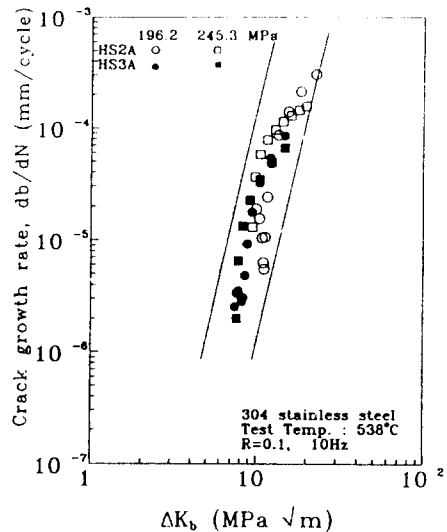


Fig. 3b Dependence of crack growth rate upon stress intensity factor range with multi-surface cracks for HS2A and HS3A specimens with the different notch size

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 이러한 균열성장률의 둔화현상은 실험에 사용된 재료가 고온에서 나타나는 특성으로 생각되며 이러한 경향들은 CT시험편을 이용한 James의 실험결과<sup>16)</sup>와 알루미늄합금을 이용한 다른 연구자들의 결과<sup>17,18)</sup>와 일치하는 경향을 나타낸다.

### 4. 시뮬레이션

#### 4-1. 고온피로시험의 결과와 시뮬레이션의 비교

이러한 피로시험을 통해 얻어진 연구결과를 식 (1)과 같은 균열성장률과 응력확대계수범위와의 관계에서 Paris법칙을 통한 재료상수 C와 m을 구하였다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{Ia})^m \tag{1}$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{Ib})^m$$

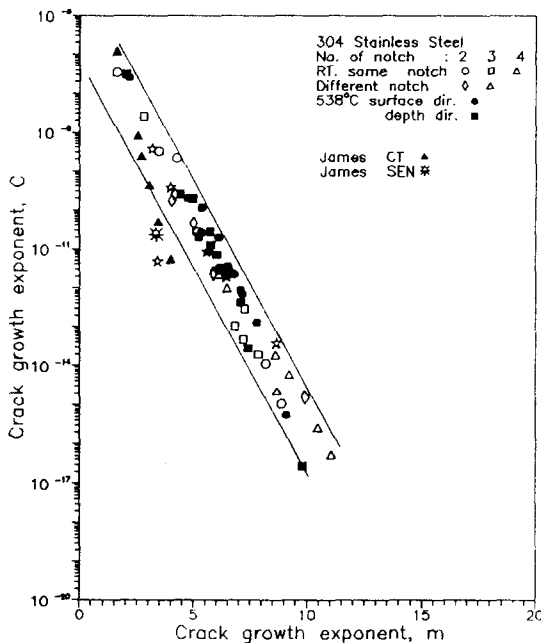


Fig. 4 Relation between crack growth coefficient, C and crack growth exponent, m compared with those of James results[15]

Fig. 4에는 위의 방법을 통해 구한 C와 m값과 James의 CT시험편과 SEN시험편의 실험결과를 동시에 나타내었다. 그림과 같이 많은 자료들이 좁은 밴드내에 모이고 있음을 알 수 있다. 여기서 ● 표시는 본실험에서 사용한 304 스트레인리스강의 표면방향용, ■ 표시는 깊이방향의 재료상수인 C와 m을 각각 나타내고 있다. 또한 ○, □, △ 및 ◇ 표시는 전술한 시험편에 대한 상온결과를, ▲과 ※ 표시는 James의 결과를 나타낸다.

본 실험에서 행한 538°C의 고온실험으로부터 구한 재료상수 C와 m을 이용하여 본 연구에서 C언어로 작성한 시뮬레이션 프로그램<sup>19)</sup>에 그 값을 대입하여 이론적으로 파단수명(N<sub>f</sub>)을 구하였고 그 관계를 나타내는 파면의 시뮬레이션은 Fig. 5에 나타내었다.

Table 1. Comparison of experimental data and simulation ones for 304 stainless steel at 538°C

Results		Experiment	Simulation	Comparison of Simulation data (%)
Specimen	Notch shape	× 10 <sup>1</sup> (N <sub>f</sub> )	× 10 <sup>1</sup> (N <sub>f</sub> )	
HS2-2K1	Same notch size	14.8	14.8	0.0
HS2-2K2		14.8	16.1	8.8
HS2-3K1		2.1	2.2	4.5
HS2-3K2		2.1	1.9	-9.5
HS3-1K1		2.85	2.8	-1.8
HS3-1K2		2.85	3.0	5.3
HS3-1K3		2.85	3.4	19.3
HS3-2K1		7.13	7.2	1.0
HS3-2K2		7.13	7.2	1.0
HS3-2K3	7.13	8.4	17.8	
HS2A-1	Different notch size	20.5	20.5	0.0
HS2A-2		7.18	7.8	7.9
HS3A-1		27.8	27.8	0.0
HS3A-2		5.6	5.7	1.8

또 Table 1에는 실험결과와 본 연구에서 실시한 시뮬레이션 결과를 비교한 것이며 그 오차는 10%이내로 상당히 적음을 알 수 있다. 다만 HS3-

1K3와 HS3-2K3의 경우는 19.3%와 17.8%의 약간 큰 오차를 보이고 있다. 이것은 복수균열의 하나 하나에 대한 피로균열성장률을 응력확대계수범위  $\Delta K$ 로 나타낸 오차라 생각된다.

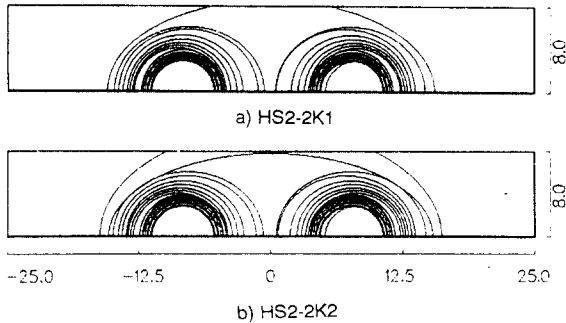


Fig. 5a Simulation results of crack growth behavior for two same notched specimen, HS2

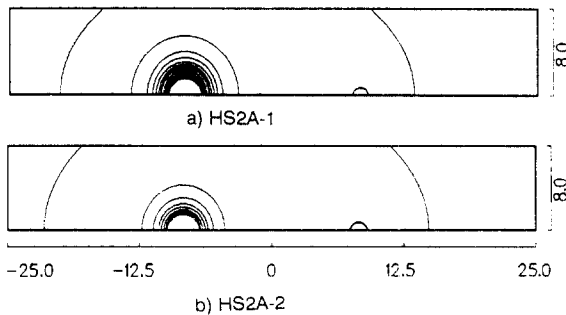


Fig. 5b Simulation results of crack growth behavior for two different notched specimen, HS2A

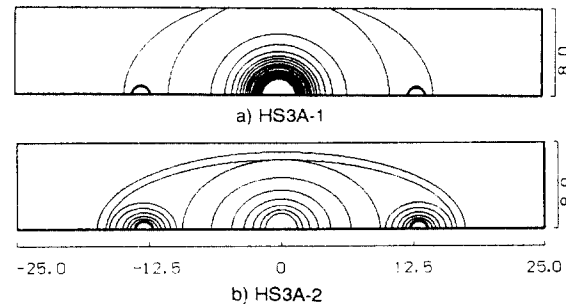


Fig. 5c Simulation results of crack growth behavior for three different notched specimen, HS3A

Fig. 5a는 노치의 크기가 동일하고 그 갯수가 2개인 HS2시험편의 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있는데 그 결과는 실험치와 10% 이내의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 이 시뮬레이션 결과는 Fig. 1a의 실험결과와 같은 양상으로 반원에서 시작된 균열이 점차 반타원의 형태로 성장하다가 반원의 형태로 된 후 관통이 되어 파단에 이르는 과정을 알 수 있다.

Fig. 5b와 Fig. 5c는 노치의 크기가 다른 노치의 수가 2개 및 3개인 HS2A와 HS3A시험편의 경우의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. Fig. 1b 및 Fig. 1c에서의 결과와 같이 크기가 작은 보조균열은 성장하지 않다가 주균열의 성장으로 파단에 이르는 과정을 잘 나타내고 있다. 그 오차범위는 약 8%로서 매우 실험치와 근사함을 알 수 있다. 따라서 실험결과의 데이터 베이스(data base)를 가진다면 실험을 행하지 않고 시뮬레이션 프로그램을 이용해서 효율적으로 수명평가를 할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4-2. C와 m의 변화에 따른 시뮬레이션 결과의 비교

Fig. 4에서 나타낸 C와 m의 밴드중에서 상, 중, 하의 3개 밴드의 C와 m 즉 상한선은  $C=2 \times 10^{10}$ ,  $m=4.5$ , 중앙선은  $C=1 \times 10^{11}$ ,  $m=6$ 을 하한선은  $C=8 \times 10^{13}$ ,  $m=7$ 을 정해서 본 연구에서 작성한 C프로그램으로  $N_f$ 를 시뮬레이션한 결과를 Fig. 6(a), 6(b), 6(c) 및 6(d)에 나타내었다. 여기서 표기의 편의상 상한선을 '1'형, 중앙선을 '2'형으로, 하한선을 '3'형이라 칭하였다. 여기서 사용된 합체조건은 상온실험<sup>19)</sup>에서 실험결과와 가장 신뢰성이 큰 SPC조건(surface point connection)을 사용하였다.

Fig. 6(a)에서는 노치의 크기가 동일한 2개의 HS2시험편의 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 실험결과와 비교해보면 1형의 경우가 2.2%의 오차로서 가장 작았고, 2형과 3형은 실험치와 비교했을때 더 작은 수명을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 노치의 크기가 동일한 3개의 HS3

재인 경우에 대해서 1, 2 및 3형의 C와 m을 대입한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있는데 2형의 경우가 가장 실험치와 근사함을 알 수 있다.

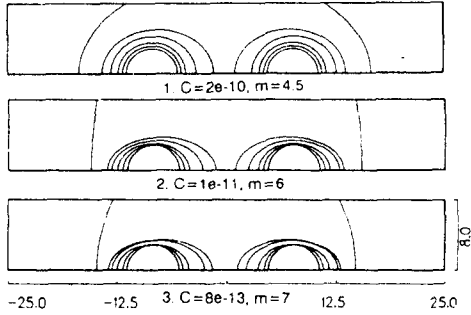


Fig. 6a Simulation results applied to three types of C and m for two same notched specimen, HS2

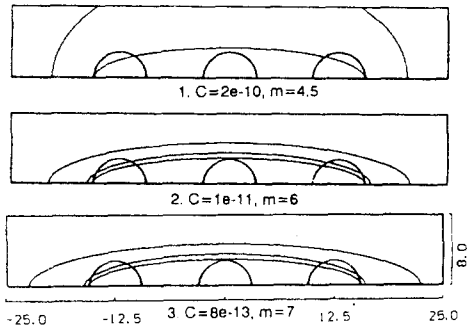


Fig. 6b Simulation results applied to three types of C and m for three same notched specimen, HS3

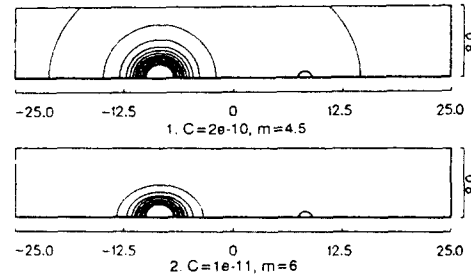


Fig. 6c Simulation results applied to two types of C and m for two different notched specimen, HS2A

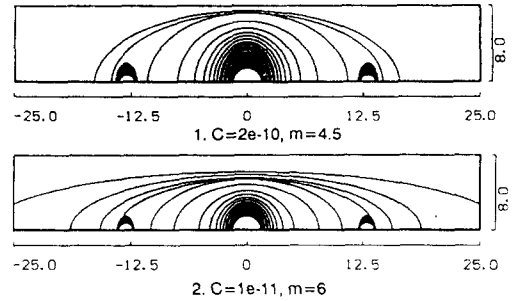


Fig. 6d Simulation results applied to two types of C and m for three different notched specimen, HS3A

Fig. 6(c)는 노치의 크기가 다르고 갯수가 2개인 HS2A를 나타내었고, 또한 Fig. 6(d)는 HS3A 시험편에 대한 1, 2 및 3형의 C와 m을 대입하여 시뮬레이션을 행한 결과를 나타내고 있는데 1형의 결과가 실험치와 근사하게 각각 -4.4%, -14.7%를 나타내고 있다. 또한 실험치와 시뮬레이션과의 관계를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Comparison of simulation results for three different C and m

Specimen	Type of C and m	Fatigue life ( $N_f \times 10^3$ )	Experimental result ( $N_f \times 10^3$ )	Ratio between fatigue life and experiment result(%)
HS2	1	41	41.9	2.2
	2	39		-6.9
	3	37		-11.7
HS3	1	32	28.5	12.2
	2	28		-1.8
	3	27		-5.3
HS2A	1	19.6	20.5	-4.4
	2	14.9		-27.3
	3	-		-
HS3A	1	23.7	27.8	-14.7
	2	16.6		-40
	3	-		-

도표에서 보여주는 결과와 같이 노치의 크기가

동일한 경우인 HS2와 HS3재는 시뮬레이션의 결과와 실험결과와의 사이에는 10% 내외의 근소한 오차를 보여주고 있으나 노치의 크기가 다른 HS2A와 HS3A재의 시뮬레이션결과는 다소 큰 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해서 재료상수인 C와 m만으로도 상온과 고온의 구별없이 동일한 시뮬레이션만으로 충분히 그 파괴 수명을 평가할 수 있음을 알 수 있다.

4-3. 합체조건에 따른 파단수명의 변화

Fig. 7은 동일 크기의 균열이 3개인 HS3재의 경우에 균열이 성장, 합체되는 과정을 아래와 같은 3

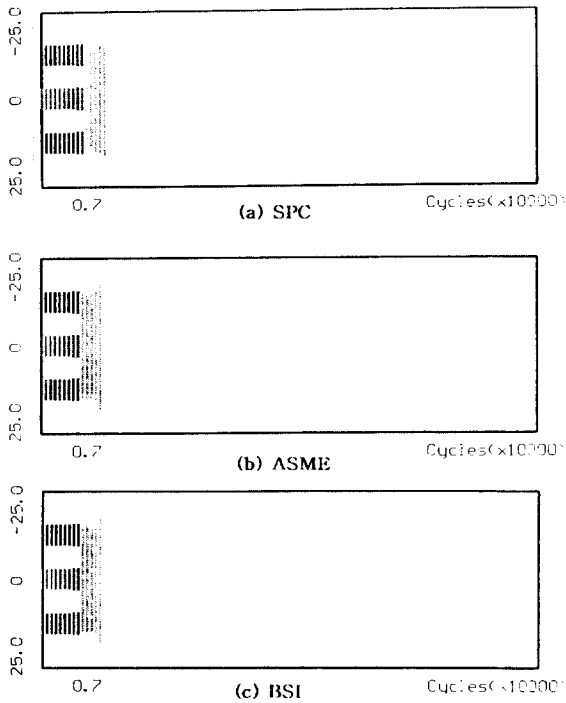


Fig. 7 Comparison of the surface crack coalescence under different coalescence conditions for same notched specimen, HS3 (Unit:mm)  
 (a) Surface point connection(SPC)  
 (b) ASME  
 (c) BSI(British Standards Institution)

가지 합체조건에 따라 균열 표면길이와 파단 반복수와의 관계를 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 그래픽 처리한 결과이다. 균열이 성장하여 합체되는 과정을 시뮬레이션의 그림책으로 나타내고 있다.

이때 간섭조건은 본 시뮬레이션에서 주간섭 조건으로 사용한 Murakami & Nemat-Nasser<sup>20)</sup>을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 합체조건은 표면점연결(SPC)조건으로 도시한 경우가 Fig. 7(a)와 같으며, 미국기계학회(ASME)에서 추천하고 있는 합체조건으로 도시한 경우가 Fig. 7(b)와 같고, 영국표준협회(BSI)에서 추천한 조건인 경우가 Fig. 7(c)이다.

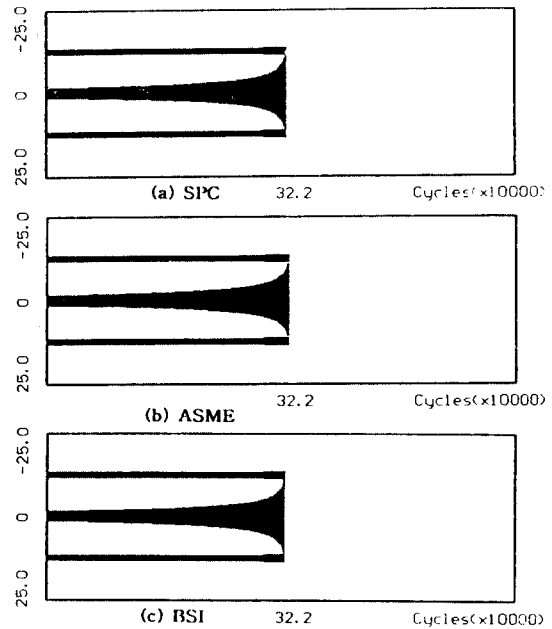


Fig. 8 Comparison of the surface crack coalescence under different coalescence conditions for different notched specimen, HS3A (Unit:mm)  
 (a) Surface point connection(SPC)  
 (b) ASME  
 (c) BSI(British Standards Institution)

이러한 세가지 조건중 BSI, ASME, 표면점연결 순서로 균열의 합체가 빨라지고 있으며 실험결과와는 (a)의 경우와 잘 일치하고 있음을 알 수 있



다. 즉 합체가 피로수명의 초기에 형성될수록 합체한 후 균열깊이방향으로 성장이 깊어짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 같은 시물레이션 조건으로 큰 노치 한 개와 작은 노치가 각각 좌우에 있는 HS3A시험편의 경우에 대한 균열의 발생 및 성장에 대한 시물레이션의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 SPC 조건, (b)는 ASME조건, (c)는 BSI조건을 나타내고 있다. 그 시물레이션의 결과는 동일한 노치재의 경우와 유사하게 (b)의 ASME조건과 (c)의 BSI 조건은 (a)의 표면점연결조건 보다 빨리 합체가 진행되어 파단되었다.

그러나 실험치의 결과와 잘 일치하는 조건은 SPC조건이지만 설계에 적용할 경우에는 ASME나 BSI조건이 더 안전함을 보여주고 있다. 또한 그림 상으로 그 차이를 자세히 관찰해보면 세 조건이 다 비슷한 양상을 보여주고 있고, 이 점이 고온의 시물레이션이 상온의 시물레이션 결과<sup>19)</sup>와 다른 점이기도 하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 304 스테인리스강을 사용하여 상온 및 고온에서 인장축하중제어 피로시험을 실시하여 얻은 결과를 기초로 하여 고온에서의 복수표면피로균열의 발생, 성장 및 합체거동에 관한 시물레이션을 실시하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 실험결과를 근거로 하여 시물레이션을 실시한 결과 실험치와 10%이내의 오차를 보였으며 노치의 크기가 다른 시험편의 경우가 단일균열의 형태로 실험데이터와의 오차가 적음을 알 수 있고, 이를 통해 시물레이션 프로그램의 유용성을 확인할 수 있었다.

2. 동일한 시험편이라도 적용되는 조건에 따라 시물레이션과의 오차가 크게 발생하는 경향을 보였다. 특히 응력이 커질수록 그 오차범위가 커졌다.

3. 상온 및 고온실험을 통하여 구한 C와 m의 값을 좁은 밴드로 나타낸 경우의 시물레이션 프로그램에서 밴드의 상한치를 적용한 1형이 오차가

가장 적었다.

## 參 考 文 獻

- 1) 서창민, "피로파괴와 파괴역학에 관하여", 대 한기계학회지, Vol. 26, No. 5, pp. 382~388, 1986.
- 2) Suh C.M J.J. Lee, Y.G Kang and H.J. Ahn, "Fatigue Crack Initiation and Growth Life Prediction with Statistical Consideration", KSME & JSME Joint Conf, pp. 684~689, 1990.
- 3) Uchino, "Fatigue Fracture and Prevention of Welding Structure" Text of Japan Industrial Manager Seminar, 1971.
- 4) Thomas, D. Copper and Clifford, A. Kelto, "Fatigue in Machines and Structure-Aircraft" ASM Material Science Seminar, pp. 29~56, 1978.
- 5) ASME ; Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.X I Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Appendix, A, 1980.
- 6) Jolles, M. and Tortoriello, V., "Geometry Variations during Fatigue Growth of Surface Flaws", Vol.1, ASTM STP 791, pp. I297~I307, 1983.
- 7) Kitagawa, H., Kawahara M. Yuuki, R. and Suh, C.M., "Consideration of Short Crack in High Stress Fatigue Design", ASME PVP Congress-June 19~24, 1983.
- 8) Suh, C.M., Ritchie, R.O., Kang, Y.G., "Growth Behavior of Short Surface Fatigue Crack in 2 1/4 Cr-1 Mo Steel", J. of KSME, Vol.3, No.2, pp. 78~85, 1989.
- 9) 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.

- 10) Coffin, L.F, JR., "Fatigue at High Temperature" ASTM STP 520, pp. 5~34, 1972.
- 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) 서창민, 황남성, 정대운, 신형섭, "高温下 304 스테인리스 鋼의 複數表面龜裂의 成長舉動에 관한 實驗的 연구", 한국해양공학회 논문집, 1995.
- 13) 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, 1986.
- 14) Suh, C.M., Kitagawa, H., Kim, G.N., Yuuki, R., "Quantitative Analysis of Surface Microcracks in Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", ASME, PVP, 98(1), pp. 137~142, 1985.
- 15) Paris. P.C., and F., Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME, J. Basic Eng. Vol. 85, pp. 528~534, 1963.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 城野政弘, 宋智浩, 岡部雅彦, 江口直紀, "發生初期微小疲勞き裂から塑性き弾塑性巨視疲勞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.
- 19) 徐昌敏, 黃南性, 朴明圭, "複數 表面疲勞균열의 成長 合體舉動과 시뮬레이션에 관한 研究", 大韓機械學會論文集, 第18卷 第2號 pp. 716~728, 1994.
- 20) 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.
- 21) Murakami, Y., "Stress Intensity Factors Handbook", Pergamon Press, Oxford, 1986.