

〈技術論文〉

복수 표면피로균열의 성장합체거동과 시뮬레이션에 관한 연구

서창민* · 황남성** · 박명규**

(1993년 4월 30일 접수)

Fatigue Crack Growth, Coalescence Behavior and Its Simulation on Multi-Surface Cracks

C. M. Suh, N. S. Hwang and M. K. Park

Key Words : Fatigue(피로), Multi-Surface Cracks(복수 표면균열), Simulation Program(시뮬레이션 프로그램), Fatigue Life Prediction(피로수명예측), Crack Growth(균열성장), Coalescence(합체)

Abstract

In this paper, fatigue tests were carried out to study the behavior of growth and coalescence of multi-surface cracks which were initiated at the semi-circular surface notches, and a simulation program was developed to predict their growth and coalescence behavior. By comparing the experimental result with those of the simulation based on SPC(surface point connection), ASME and BSI(British Standards Institution) conditions, we tried to enhance the reliance and integrity of structures. This shows that the simulation result has utility for fatigue life prediction.

1. 서 론

구조물 및 기기는 각각의 성능, 구조, 사용환경 및 온도영향 등에 의하여 발생하는 파괴손상에는 그 종류와 형식은 다양하지만 파괴사례의 대부분에는 작은 표면균열로부터 발생하는 疲勞현상이 관여하고 있다.^(1~3)

특히 원자로, 압력탱크, 고압배관계, 차축 및 항공기 등에서의 파괴, 파손의 원인은 표면에 존재하는 작은 결함에서 발생한 피로균열의 성장, 합체에 의한 경우가 많은 것으로 분석되고 있다.^(2~5)

하중을 받는 실제의 부품 또는 부재에 발생하는 자연균열(natural flaw)은 특수한 경우를 제외하고는 해석이 비교적 용이한 관통균열(through-thickness crack)의 상태보다는 표면균열(surface crack)

또는 부분 관통균열(part-through crack)이라 하는 3차원 특성을 지닌 균열형태로 나타나는 것이 많아 표면균열에 대한 균열성장기구는 공학적으로 매우 중요하다.⁽⁶⁾

그러나 표면균열에 대한 연구가 관통균열에 대한 연구 보다 그다지 많지 않는 이유는 다음과 같다. 즉, 표면균열에서는 표면부근의 평면응력 상태와 내부의 평면변형률 상태가 동시에 존재하여 각각 다른 성장저항을 가지고 방사형으로 성장하면서 균열형상이 형성되기 때문에 각각의 상태에 표면균열의 형상 및 응력상태가 단순하지 않다.

또 균열선단 대부분이 재료내부에 존재하므로 균열성장 평가에 필수적인 균열형상 및 크기의 평가가 쉽지 않고 피로균열성장을 지배하는 균열닫힘거동(crack closure behavior)을 검출하기가 매우 어렵기 때문이다.

따라서 실제 표면균열은 기하학적 3차원 균열이지만 이것을 파괴역학적으로 평가하기 위해서는 단

*정회원, 경북대학교 기계공학과

**정회원, 경북대학교 기계공학과 대학원

순한 형상으로 치환할 필요가 있으며 ASME Code Sec. XI⁽⁴⁾에서는 표면결함(surface flaw)일 경우는 반원이나 반타원으로, 내부결함(subsurface flaw)일 경우는 원이나 타원으로 치환하거나 최대 주응력면에 수직으로 투영한 크기를 균열의 크기로 간주하여 파괴역학적인 해석을 하고 있다.

또한 구조물 및 기기에서 발견되는 표면균열은 대부분 단독균열이 아닌 복수균열로 존재하는 경우가 대부분이며 이러한 복수균열은 반복하중, 환경 및 온도의 영향을 받으면서 3차원적으로 형상을 변화해가며 성장, 합체, 파단에 이르므로 이러한 균열의 성장해석은 상당히 어렵다.

이상과 같은 표면균열에 대한 연구는 北川 등,⁽⁷⁾ 徐 등,^(5,7,8) Miller 등,^(24,25) 紫田⁽²⁹⁾에 의해서 다양한 실험을 통하여 표면균열의 발생, 성장 및 합체 거동에 관한 표면상의 실험 및 시뮬레이션에 관한 연구가 수행되었다. 특히 北川 등⁽⁷⁾은 부식공에서 발생, 성장된 미소분포균열의 성장, 합체거동을 난수발생에 의한 시뮬레이션을 실시하여 수명예측을 수행하였다. 徐 등^(5,7,8)은 고온의 피로파괴에 이를 응용 확대시켜 시험편 표면상의 미소한 복수 표면균열의 성장, 합체에 대한 기초 시뮬레이션 프로그램을 제안하였다.

본 연구에서는 복수 표면균열에 대한 균열의 성장, 합체거동을 해석하기 위해 반원형의 표면노치를 방전가공한 평판 시험편을 사용하여 상온하에서 축하중 피로시험을 실시하고 그 결과를 선형 파괴역학적으로 해석하였다. 또 이러한 연구결과를 기초로 복수 표면균열의 성장거동에 대한 시뮬레이션을 실시하고 실험과 비교하여 구조물 및 기기의 신뢰성과 건전성을 높이고 기기의 잔존수명예측과 손상평가 및 건전성평가 기술개발에 대한 기초를 마련하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편의 재료는 고속증식형 원자로 및 고온기기에 널리 사용되는 304 스테인리스강으로 그 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다. 시험편은 304 스테인리스강板에서 균열성장방향이 압연방향과 직각이 되도록 절단 채취하였으며 방전가공기(electric discharging machine, EDM)를 사용하여 인공 노치크기가 동일

한 시험편과 노치크기가 다른 두 종류의 시험편을 제작하였다. 즉, 전자의 경우는 표면길이 6 mm, 깊이 3 mm인 반원형의 표면노치를 시험편에 균열 중심간 거리를 설정하여 (Fig. 1은 동일한 크기의

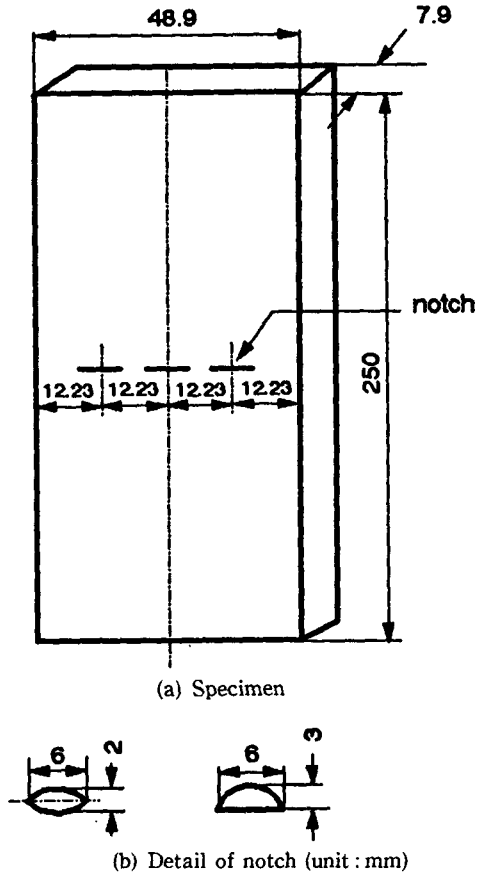


Fig. 1 Configuration of the specimen with three surface notches

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

Yield point 0.2% offset MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Reduction of area %	Hardness H _B
313.8	647.2	57.0	72.0	179

노치가 3개 있는 경우) 시험편의 동일 선상에 이러한 표면노치를 각각 2개, 3개 및 4개를 가공하였다.

또, 후자의 경우는 표면 길이 3 mm, 깊이 1.5 mm인 큰 노치와 표면길이 1.5 mm, 깊이 0.7 mm인 작은 표면노치를 각각 한개씩 가공한 시험편 (Fig. 2(a) 참조)과 큰 노치를 시험편 중앙에 가공하고 작은 표면노치 2개를 좌우에 각각 가공한 시험편 (Fig. 2(b) 참조)을 준비하였다. 또 피로시험 중 인공 표면노치에서 발생, 성장하는 피로균열의 관측을 용이하게 하기 위하여 시험편 인공노치부의 표면은 에머리 페이퍼 1200번까지 가볍게 연마한후 산화크롬으로 비핑하였다.

2.2 실험방법

본 실험에는 전기유압식 피로시험기 (Instron 1342) 를 사용하여 상온하에서 응력비 0.1인 일정 진폭의 축하중제어 피로시험을 실시하였으며 이때 하중 주파수는 10 Hz의 정현파를 사용하였다.

복수 표면노치에서 발생, 성장하는 표면균열길이 $2a$ 는 일정반복수 (N_f 의 5~7%)마다 시험기를 일시 정지시켜 疲勞균열의 성장특성을 레프리카로 채취 보관하고 광학현미경으로 레프리카를 확대시켜 고정밀도로 측정하였다. 또 표면균열의 표면길이는 실험중에 레프리카를 이용해 측정할 수 있으나 균열깊이는 직접 측정이 곤란하므로 깊이 및 균열면 형상은 응력레벨을 조정하여 파단면에 명암의 무늬

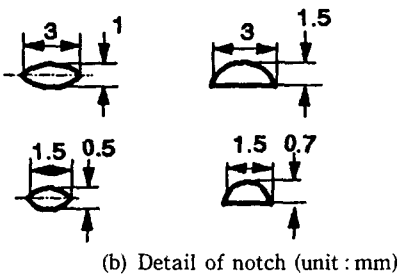
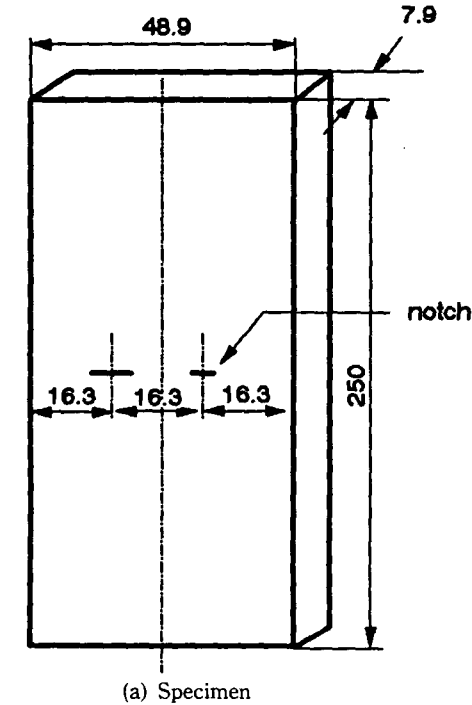


Fig. 2 (a) Configuration of the specimen with two different surface notches

Fig. 2 (b) Configuration of the specimen with three different surface notches

를 형성시키는 비치마크(beach mark)법을 사용하여 표면균열길이 $2a$ 를 개입시켜 깊이 b 를 결정하는 방법을 이용하였다.

3. 시뮬레이션 프로그래밍

3.1 시뮬레이션 구성

본 연구에서의 피로균열의 성장, 합체에 관한 시뮬레이션 프로그램은 동일 평면상에 존재하는 복수 표면균열이 균열의 표면길이에 균열깊이쪽인 판두께 방향으로 반복되는 축하중에 의해서 발생 성장하면서 간섭, 합체를 반복하여 파괴에 이르는 과정을 선형 파괴역학의 데이터를 기초로 하여 실시되었다. 또 이때 시뮬레이션하는 시편의 크기는 피로 시험시의 시험편 단면상의 크기와 같은 크기(48.9 mm×7.9 mm)이다.

해석 프로그램의 구성은 크게 데이터의 입력부와 해석부 및 출력부의 세가지로 나눌 수 있으며 여기에 사용된 프로그래밍어는 그래픽이 용이하고 처리속도가 빠른 터보 C언어를 사용하였다. Fig. 3에서

는 본 시뮬레이션의 흐름도를 개괄적으로 나타내고 있다.

3.1.1 데이터의 입력부

입력부에서는 시험편의 재료상수, 재료의 파괴인성치, 하중조건, 응력비(R) 및 초기 균열의 개수와 크기 및 균열간 간격을 입력하게 된다.

3.1.2 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 간섭영역내에 있을 경우에는 간섭효과를 고려하여 성장하게 되고 간섭영역 밖에 있을 경우에는 간섭영향을 받지않고 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.

3.1.3 출력부

시뮬레이션 프로그램의 실행과 동시에 해석부에서 얻은 데이터를 이용하여 복수 표면균열의 성장 및 합체도, 균열 형상비변화 등을 도형 처리하도록 되어 있다.

3.2 응력확대계수의 계산

반타원 표면균열은 시험편 표면점에서 평면응력(plane stress), 시험편 내부에서 평면변형률(plane strain) 그리고 그 중간에서는 혼합된 응력상태가 되는, 즉, 균열선단곡선의 위치에 따라 응력상태가 변화하는 3차원 특성을 나타내므로 응력확대계수에 관한 엄밀해는 존재하지 않으며 따라서 근사해, 실험치 또는 이들 결과를 이용하여 얻은 경험식이 다수 제안되고 있다.⁽¹⁰⁻¹³⁾

표면균열에 대한 응력확대계수의 평가법으로는 간편하다는 이유로 널리 이용되는 Irwin의 근사해⁽¹⁰⁾와 균일 인장응력을 받는 표면균열에 대한 경험식 중 Paris-Sih식,⁽¹¹⁾ Anderson-Holms-Orange식⁽¹²⁾ 등이 있으나 본 연구에서는 균일 인장응력을 받는

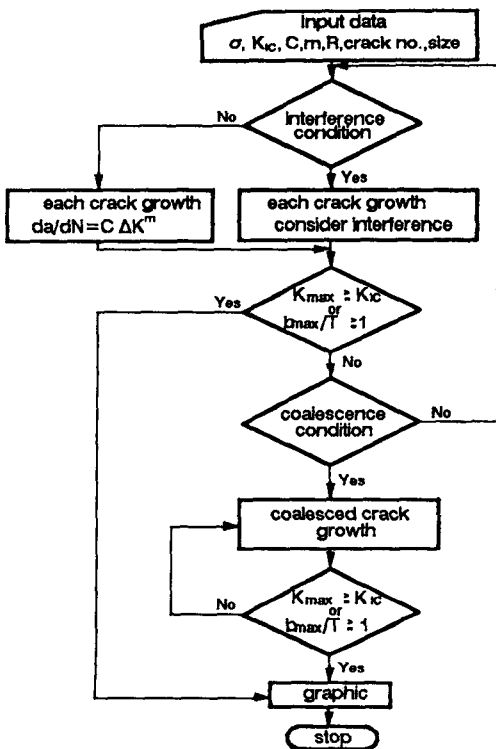


Fig. 3 A flow chart of the simulation

표면균열의 깊이 및 표면방향의 응력확대계수를 동시에 고려할 수 있도록 3차원 유한요소법을 이용하여 수식화하고 그 신뢰성이 인정되고 있는 식(1)과 같은 Newman-Raju 식⁽¹³⁾을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \Delta K &= \Delta \sigma \sqrt{\pi b} f(a) \\ f(a) &= \sqrt{b/(a \cdot Q)} \cdot F \\ Q &= 1 + 1.464(b/a)^{1.65} \\ F &= [M1 + M2(b/t)^2 + M3(b/t)^4] f\phi \cdot g \cdot fw \\ M1 &= 1.13 - 0.09(b/a) \\ M2 &= -0.54 + 0.89/[0.2 + (b/a)] \\ M3 &= 0.5 - 1.0/[0.65 + (b/a)] + 14(1.0 - b/a)^{24} \\ g &= 1 + [0.1 + 0.35(b/t)^2](1 - \sin\phi)^2 \\ f\phi &= [(b/a)^2 \cos^2\phi + \sin^2\phi]^{1/4} \\ fw &= \{\sec[\pi a / (2W) \times \sqrt{b/t}]\}^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

- 여기서, $\Delta\sigma$: 공칭응력
- Q : 형상계수
- F : 수정계수
- b : 균열의 깊이
- a : 균열길이의 절반
- w : 시험편 폭
- t : 시험편의 두께
- ϕ : 타원의 방위각

3.3 복수 표면균열의 간섭과 합체

3.3.1 복수 표면균열의 간섭

동일 평면상에 존재하는 복수균열은 각각 독립적으로 성장하여 합체되기까지는 인접한 균열이 상호 간섭하여 성장하므로 복수 표면균열의 수명예측에는 균열간의 간섭영향이 명확히 규명되어야 한다. 2차원 관통균열에 대한 인접균열의 간섭효과는 이미 해석적⁽¹⁵⁾으로 구해져 있으나 3차원 균열에 대해서는 체적력법,^(16,17) 두꺼운 셸(shell)을 이용한 라인스프링(line spring)법⁽¹⁸⁾등으로 구한 것이 있지만 그 결과가 서로 상이하며 일관성 있는 연구 결과를 찾을 수가 없다.

Fig. 4는 3차원 표면균열에 대한 간섭영향을 고려한 간섭모델을 나타낸 것이다. 여기서 a_1, a_2 는 간섭영향을 받는 두 표면균열의 반길이를 나타내며 e 는 간섭영향을 받는 두 균열간거리를 큰쪽 표면균열의 반길이인 a_1 에 대한 비로 나타낸 값이다. 그리고 r_{A1} 와 r_{A2} 는 표면균열선단 A_1 과 A_2 에서의 간섭계수를 나타내고 r_{B1} 와 r_{B2} 는 인접균열의 선단

인 B_1 과 B_2 에서 표면방향에서의 간섭계수를 각각 나타낸다. 또한 r_{C1} 와 r_{C2} 는 1번 균열과 2번 균열에서 깊이방향의 간섭계수를 나타낸다.

이들 간섭계수는 단독 표면균열의 응력확대계수에 대한 두개의 표면균열의 응력확대계수의 비로 정의되고 있으며 복수균열의 근접점에서의 응력확대계수는 단독균열일 때의 응력확대계수와 간섭계수의 곱으로 구해지게 된다. 두 균열사이의 거리가 작아짐에 따라 간섭의 영향이 크게 나타나며 균열사이의 거리가 같을 때에는 두 균열의 크기비가 커짐에 따라 큰 균열은 간섭의 영향을 작게받고 작은 균열은 상대적으로 간섭의 영향이 커짐을 알 수 있다. 작은 균열에 대한 간섭영향이 커지나 작은 균열쪽의 응력확대계수가 큰 균열보다 훨씬 작기 때문에 실제 균열성장률은 상대적으로 작은 균열이 작아지게 된다.

본 연구에서는 3차원 표면균열에 대한 간섭조건 중 Murakami & Nemat-Nasser가 인접한 2개의 균열에 대해 체적력법을 사용해 제안한 간섭조건⁽¹⁶⁾을 주간섭조건으로 적용하고 아울러 Laurent 전개법⁽¹⁵⁾의 2차원 관통균열에 대한 간섭을 3차원 표면균열의 간섭으로 보정한 조건을 사용하였다.

즉, Laurent 전개법에서는 인접균열의 표면점에 대한 응력확대계수는 식(2)의 보정계수를 이용해서 구했다.

$$M_m = \{1 + r_m(F - 1)\} (M_m)_{n-r} \quad (2)$$

여기서, $(M_m)_{n-r}$ 은 Newman-Raju의 응력확대계수식⁽¹³⁾이며 F 는 2차원 관통균열에 대한 보정계수로서 각 합체조건에 따라 변하는 값이고, r_m 은 3차원 효과에 대한 보정계수를 나타내는데 이것은 Laurent 전개법에서 구한 것으로서 그 값은 0.8로 하였다. 그리고 본 연구에서는 각 균열의 최심점에

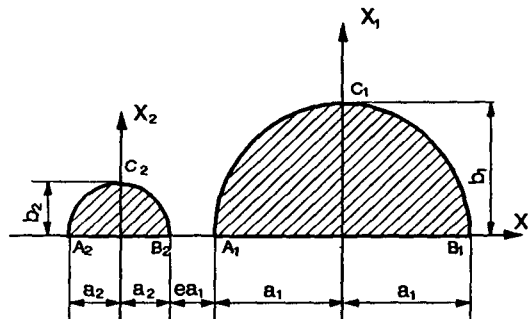


Fig. 4 Interaction between two surface cracks

대한 간섭효과는 무시하였다.

3.3.2 복수 표면균열의 합체

본 연구에서는 동일 평면상에서 복수균열이 서로 간섭을 받으며 성장하다가 Fig. 5에서와 같이 인접 균열간격 δ 가 합체가 이루어지는 기준점 δ_0 로 될 때 균열은 합체하여 새로운 균열로 성장하는 것으로 하여 시뮬레이션을 실시하였다.

실제로 두 균열이 합체후에는 근사 반타원 표면 균열이 될 때까지 균열은 천이성장을 거치게 된다. 그러나 이 천이거동은 순식간에 일어나므로 천이성장 수명은 전체수명에 비해 무시할 정도로 작기 때문에 두 균열이 합체한 순간부터는 하나의 반타원 균열로 근사하여 생각해도 관계가 없었다.

그리고 기준점 δ_0 를 결정하는 합체조건은 다음과 같은 세가지 경우를 고려하여 각각의 특성을 비교하였다.

(i) 표면점의 연결(surface point connection, SPC)⁽²⁰⁾

$$\delta_0 = 0$$

(ii) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI⁽⁴⁾

$$\delta_0 = \min(b_1, b_2) \times 2$$

(iii) BSI PD 6493⁽²¹⁾

$$\delta_0 = a_1 + a_2$$

여기서 a_1 과 a_2 는 표면균열의 반길이이며 b_1 과 b_2 는 인접균열의 깊이이다. 또 두 표면균열이 합체 후에는 식(3)과 같은 조건으로 새로운 반타원 균열로 형성되어 성장하는 것으로 하였다.

$$\begin{aligned} \text{균열깊이} & : b = \max(b_1, b_2) \\ \text{표면균열 반길이} & : a = a_1 + a_2 + \delta_0/2 \end{aligned} \quad (3)$$

본 연구에서는 주로 표면점연결(SPC)조건을 사용하여 시뮬레이션을 실시하고 또 그래픽 처리하였다. 왜냐하면 이 SPC조건으로 실시된 시뮬레이션

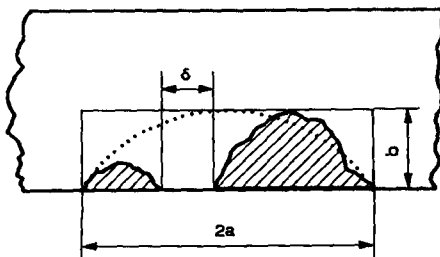


Fig. 5 Coalescence condition of adjacent surface cracks

그래픽이 비치마크법으로 실시된 본 연구의 피로시험 결과와 유사한 균열성장, 합체형태의 좋은 결과를 얻었기 때문이다. 그리고 ASME와 BSI(British Standards Institution)에서 추천하고 있는 방식도 SPC조건과의 차이를 비교하기 위하여 시뮬레이션 그래픽을 실시하여 그 특징을 서로 비교하였다.

3.4 복수 표면균열의 성장량 계산

일반적으로 평면변형률상태와 평면응력상태의 균열성장거동이 다르다는 것은 잘 알려진 사실이며 표면피로균열에서는 표면부근의 평면응력상태와 내부의 평면변형률상태가 동시에 존재하여 각각 다른 성장저항을 가지고 성장하면서 균열형상이 형성되기 때문에 각각의 상태에 대한 성장 특성을 파악하는 것이 일차적으로 중요하다. 표면균열의 성장거동을 엄밀하게 해석하기 위해서는 균열선단을 따라 각 점에서의 균열성장특성을 알아야 하나 이는 매우 어려운 일이므로 최대 균열깊이점에서의 성장거동과 표면에서의 길이방향 성장특성에 의해서 표면균열의 성장거동이 지배된다고 단순화하여 해석하는 것이 간편하고 현재로서는 일반적인 방법으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 표면균열의 성장에 간섭영향을 고려하기 위해서 각 균열의 중심점을 기준으로 최대 길이방향과 균열의 좌우방향으로 각각 독립적으로 균열을 성장시켰다. 또 표면균열에서는 응력장의 차이에 의해 깊이 및 길이방향의 성장이 다르게 나타나고 있으며 표면 길이방향의 균열단립 거동이 깊이방향보다도 심하게 일어나므로 이에 대한 고려도 필요하다.

따라서 Paris의 균열성장식⁽²²⁾에 표면균열의 선단을 따라서 생기는 구속의 변화를 나타내는 Elber 등이 제창한 균열단립(crack closure)현상⁽²³⁾을 고려하여 Jolles 등⁽⁶⁾이 주장한 표면상의 유효응력 범위비의 값 U_a 와 균열깊이 방향의 유효응력 범위비의 값 U_b 의 관계식 $U_a/U_b = 0.91$ 로부터 구한 식(4)를 사용하였다. 즉, 표면방향에서의 균열성장식에서 0.91의 의미는 균열의 깊이방향의 성장률에 대한 상대적 물리량이다.

$$\begin{aligned} da/dN &= C(0.91\Delta K_a)^m \\ db/dN &= C(\Delta K_b)^m \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, ΔK_a 는 균열의 표면점방향으로의 응력확대계수범위이고 ΔK_b 는 균열깊이 방향의 응력확대

계수범위이며, da/dN 는 표면방향의 균열성장률, db/dN 는 깊이방향의 성장률이며, C , m 은 재료상수이다.

4. 실험 및 해석결과의 비교, 검토

4.1 S-N 특성

Fig. 6은 304 스테인리스강재의 초기 인공 노치 크기가 동일한 시험편과 인공 노치크기가 다른 두 종류의 시험편을 사용하여 상온하의 축하중 피로시험에서 얻은 실험결과와 시뮬레이션에 의하여 구한 결과를 최대 인장응력과 피로수명과의 관계인 S-N 선도로 나타낸 것이다.

인공노치의 크기(균열길이 6 mm, 깊이 3 mm)가 동일한 시험편 경우의 실험 데이터는 ○, □, △ 표시로 나타내었으며 실험에 사용된 응력레벨은 147.2 MPa, 196.2 MPa, 245.3 MPa인 세가지로 이 선도상에는 노치수가 2개, 3개 및 4개일 때의 S-N 관계를 각각 나타내고 있다. 이 그림에서 노치수 및 응력레벨에 따라 증가하고 고응력 레벨일 수록 파단수명이 일정한 비율로 저하됨을 알 수 있다. 또한 ●, ■, ▲ 표시는 인공노치의 크기가 동일한 위 경우의 본 시뮬레이션 프로그램에 의한 결과를 나타내고 있다. 이러한 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 보면 그림과 같이 거의 잘 일치하여 중복되고 있으며 실험결과와 시뮬레이션 결과의 오차는 13.7% 이내로 나타났다.

또, 인공노치의 크기와 수가 다른 시험편 경우의 실험데이터는 ☆ 및 ☆ 표시로 나타내었으며 사용된 응력레벨은 196.2 MPa, 245.3 MPa 및 293.2 MPa이다. 여기서 작은 표면노치개수가 3개인 경우에도

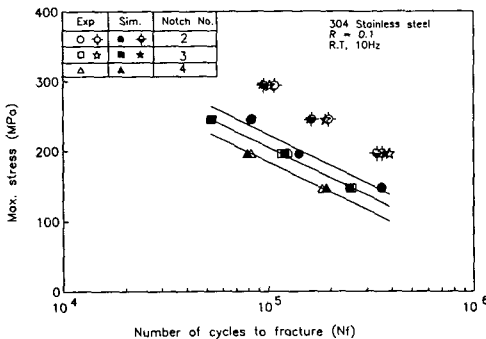


Fig. 6 Comparison of fatigue lives obtained by experiment and those calculated by a simulation

2개인 경우와 비슷한 피로수명을 나타내었으며 이와같이 작은 표면노치의 개수가 더 증가해도 균열이 합체전에 파단될때는 파단수명에는 그 영향이 적음을 알 수 있다. 즉, 크기가 다른 표면균열 중 큰 노치에서 발생한 균열이 주균열(major crack)로 작용하여 피로수명을 지배하였고 작은 노치에서 발생한 균열은 보조균열(sub-crack)로서 그 영향이 적었다. 이러한 특성은 다른 연구논문에서도 보고되고 있다. (26~28) 그림에서 ☆, ★ 표시는 인공노치의 크기와 개수가 다른 경우의 시뮬레이션 결과로서 실험결과와 비교해서 17.3%이내의 오차를 나타내었다.

4.2 피로균열의 길이와 반복수와의 관계

Fig. 7은 동일크기의 표면노치가 3개인 시험편을 사용하여 세가지 응력레벨하에서 축하중 피로시험하여 얻은 균열길기와 반복수의 관계를 나타내는 a-N 선도의 예이다. 이 선도에서 각 응력레벨에 따라 각 노치에서 발생한 균열이 성장하고 합체하는 과정을 알 수 있고 합체가 되면 곧 파단됨을 알 수 있다. 그림상에는 본 연구에서 실시한 시뮬레이션의 결과를 점선으로 나타내었으며 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4.3 표면균열의 그래픽

Fig. 8은 같은 크기의 표면노치가 2개, 3개 및 4개인 경우의 비치마크(beach mark)법으로 표면노치에서 발생, 성장하여 합체된 표면피로균열의 성장, 합체거동 및 균열면 형상을 나타낸 파단면 사

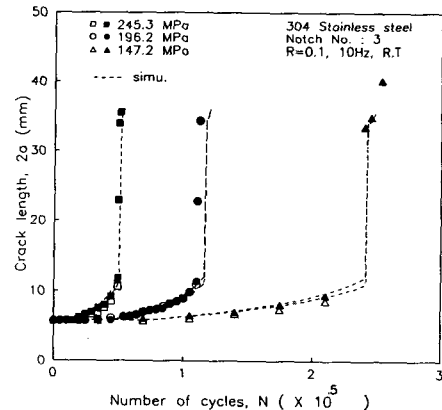


Fig. 7 Growth and coalescence behavior of surface fatigue

진이다. 이 비치마크 사진은 응력레벨을 조정하여 파단면에 생긴 균열면 형상으로 이것을 정밀하게 측정하므로 균열간의 간섭영향을 관찰할 수 있으며 표면균열의 성장거동에 따른 깊이방향의 성장거동을 계산할 수 있다. 이 사진에서 반원인 표면노치에서 발생하여 성장하는 각 피로균열은 점차 타원으로 성장하면서 합체(coalescence)되었다. 표면균열이 합체한 후에는 합체된 부분에 응력이 집중되어 급속 성장하는 천이성장 과정을 거친 후 전체적으로 반타원의 형상을 이루어 파단됨을 알 수 있다.

Fig. 8의 표면노치가 3개인 (b)와 표면노치가 4

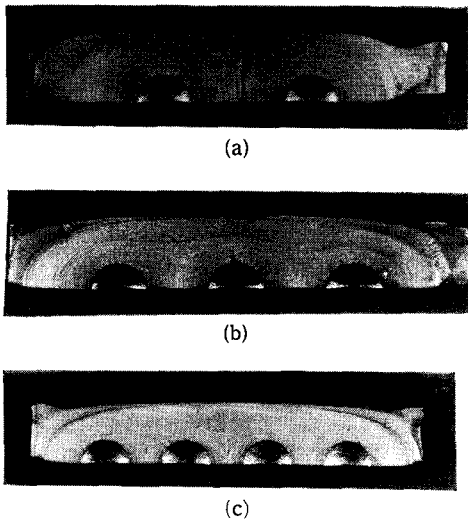


Fig. 8 Photos of the beach marks on the fracture surface at the different notch number

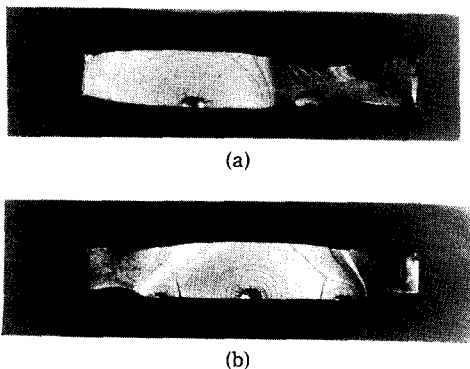


Fig. 9 Photos of the beach marks on the fracture surface at the different notch size and number

개인 (c)에서는 가운데 위치한 표면노치에서 성장한 피로균열이 좌우의 가장자리의 표면노치에서 성장한 피로균열보다 표면길이 방향으로 성장이 다소 큼을 알 수 있다.

Fig. 9에는 크기가 서로 다른 표면노치가 2개인 경우(a)와 큰 표면노치 1개와 작은 표면노치가 2개인 경우(b)의 비치마크가 형성된 파단면 사진을 나타내고 있다. 표면노치의 크기 및 형상이 동일한 경우의 Fig. 8과 달리 Fig. 9의 비치마크를 보면 작은 노치에서 발생한 피로균열은 보조균열(sub-crack)로서 그 성장은 미소하고 큰 노치에서 발생한 주피로균열(major fatigue crack)의 성장이 피로수명을 지배하며 표면노치가 한개인 단독균열로 존재할 때와 같이 주균열이 성장하여 관통 후 파단하는 현상을 나타내고 있다. 이러한 현상은 평활재 시험편상에서 발생, 성장한 표면피로균열에 관한 연구 결과에서도 보고되고 있다.^(27,28)

Fig. 10은 본 연구에서 수행한 시뮬레이션 프로그램으로 그래픽 처리한 복수표면균열의 성장합체 과정을 나타낸 것이다. 이 그림은 동일 크기의 노치에서 발생, 성장하는 경우로 각 노치에서 발생, 성장하는 표면균열은 두 균열이 서로 성장하면서 간섭할 때는 Murakami & Nemat-Nasser⁽¹⁶⁾의 간섭조건을 사용하고 균열의 합체시에는 합체조건중 표면점연결조건⁽²⁰⁾을 사용한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 균열이 합체한 후에는 천이과정을 거치면서 성장하며 실험결과의 파단면 사진과 비교해

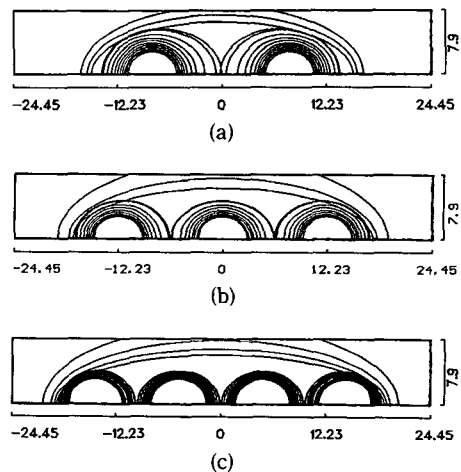


Fig. 10 Crack growth and coalescence behaviors by the simulation at the different crack number (unit : mm)

볼때 균열의 깊이방향으로 합체했을 때 약간 과대 성장하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10을 그래픽 처리할 때와 같은 시뮬레이션 조건을 사용하여 노치크기가 다른 Fig. 11과 같은 시험편상의 복수 표면균열의 성장과정을 그래픽으로 도시한 것이다. 그림의 (a)와 (b)는 모두 주균열성장시 인접된 다른 보조 균열간 거리가 Fig. 10의 경우와는 달리 간섭구간내 있지 않으므로 주균열이 단독으로 성장하여 시험편의 두께를 관통하여 파단되면서 피로수명에 달하는 경우를 나타낸 것이다. 이 시뮬레이션에 구한 결과에서도 실험과 마찬가지로 작은 보조균열의 성장은 적어서 시험편의 파단수명에 미치는 영향은 적고 또 그 성장된 균열길이가 적음을 알 수 있다.

4.4 파단면과 균열의 형상비 변화

Fig. 12(a)는 동일 크기의 노치가 2개인 시험편의 경우에 피로시험중 실시된 비치마크법과 시뮬레이션 프로그램에서 구한 균열길이 a 와 균열깊이 b 의 데이터를 이용한 표면균열의 형상비 b/a 의 변화를 나타내고 있다. 표면균열이 성장하면서 형상비는 시험편 두께 t 의 영향을 고려한 b/t 와의 관계에서 점차 감소하면서 0.8 근처에 접근함을 알 수 있다. 이러한 경향은 다른 연구결과(8,9,27,28)와도 잘 일치하고 있으며, 그림상의 점선은 표면노치가 1개인 경우의 단독균열로 성장할 때의 형상변화를 나타내고 있다.(27,28)

단독균열의 형상변화는 균열이 성장하면서 b/a 가 0.8 근처로 수렴하여 반원에서 반타원으로 변한다. 그러나 노치크기가 같고 개수가 2개인 시험편의 경우에는 그 형상비가 단독균열의 경우보다 아

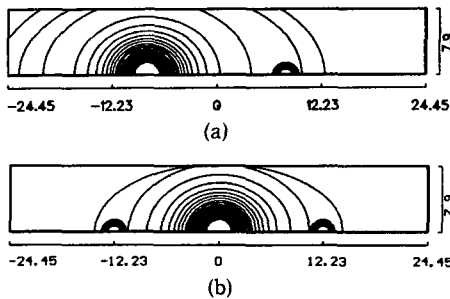


Fig. 11 Crack growth and coalescence behaviors by a simulation at the different crack number (unit : mm)

래쪽에서 0.8 근처로 수렴하여 반원의 노치에서 발생한 표면균열이 초기에는 반원의 형상에서 점차 반타원에 가까운 형태로 성장, 합체됨을 알 수 있다. 이것은 단독 표면균열에 있어 균열단립현상이 표면방향으로 크게 나타나므로 표면쪽의 유효응력 확대계수가 내부쪽의 유효응력확대계수보다 적게 되기 때문인 것으로 보고되고 있다.(6)

즉, 복수의 표면균열이 존재할때는 균열간 간섭으로 인하여 길이방향으로의 성장이 더 빠르게 나타나고 있다. 다시 말해서 균열의 깊이방향으로의 간섭효과는 표면길이 방향보다 적게 나타나고 있기 때문이다. 결국 단독균열일 경우는 균열의 간섭효과가 존재하지 않는데 비해 표면노치가 인접한 경우에는 두 균열간의 간섭의 영향으로 인하여 표면 길이방향의 성장이 균열깊이보다 더 빠르기 때문인 것으로 판단된다.

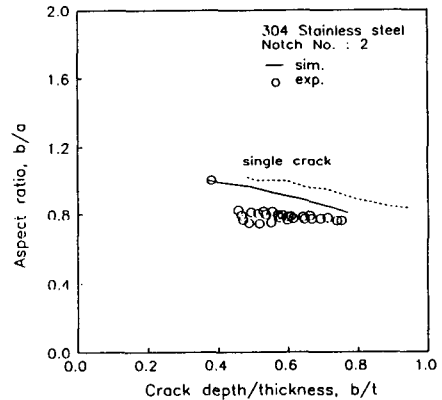


Fig. 12 (a) Variation of aspect ratio against crack depth and specimen thickness(b/t)

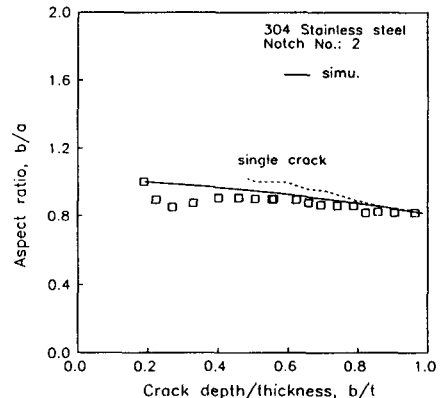


Fig. 12 (b) Variation of aspect ratio against crack depth and specimen thickness(b/t)

또 이러한 특성은 2개의 대칭균열재의 균열형상비에 대한 해석적인 연구결과⁽⁹⁾와도 거의 일치하고 있다. 이 그림상에는 시뮬레이션 프로그램에서 구한 균열형상비의 결과를 실선으로 나타내고 있으며 실험결과와 형상비 0.8보다 크며 단독균열보다 적은 수치를 나타내고 있어 균열 형상비가 깊이방향으로 과대평가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12(b)에는 표면노치의 크기가 서로 다른 Fig. 2(a), Fig. 2(b)의 시험편 경우의 파단면의 비치마크 형상에서 구한 균열 형상비와 시뮬레이션에서 구한 데이터를 이용하여 얻은 형상비를 서로 비

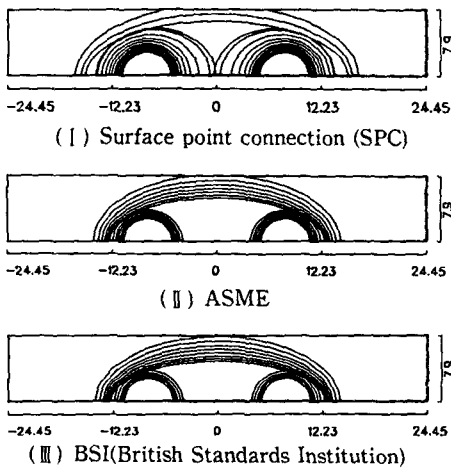


Fig. 13 (a) Crack growth and coalescence behavior under the different coalescence conditions (unit : mm)

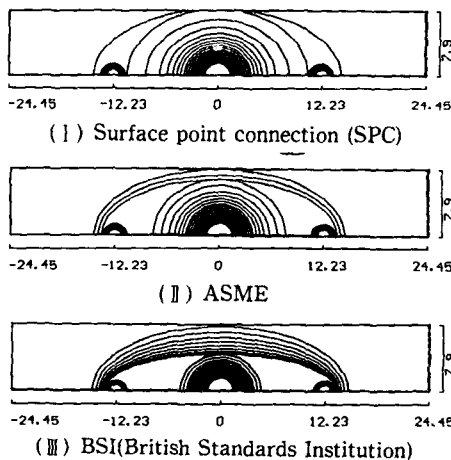


Fig. 13 (b) Crack growth and coalescence behavior under the different coalescence conditions (unit : mm)

교하고 있다. 그림상의 점선은 단독균열로 성장할 때의 균열 형상비의 변화를 나타내며 노치가 2개인 Fig. 12(b)의 데이터를 서로 비교할 때 균열형상비의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이 경우의 실험 및 시뮬레이션 결과는 단독균열의 성장거동과 거의 같으므로 작은 노치에서 발생, 성장한 피로균열의 영향이 거의 없음을 의미하는 것이다.

4.5 균열의 합체조건에 따른 파단수명의 영향

Fig. 13(a)는 크기가 동일한 표면노치가 2개인 경우에 대해서 본 연구에서 사용한 3가지 복수표면 균열의 합체조건에 따라 표면균열의 성장, 합체과정을 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 그 결과로도 시한 균열 성장도를 나타내고 있다. 각각의 경우에 있어 간섭조건은 본 연구에서 주간섭조건으로 사용한 Murakami & Nemat-Nasser조건을 사용하였다. 그림상에는 표면점연결(SPC)조건으로 도시한 경우가 Fig. 13(a)의 (I)와 같으며, 미국기계학회(ASME)에서 추천하고 있는 합체조건으로 도시한 경우가 Fig. 13(a)의 (II)와 같고, 영국표준협회(BSI)에서 추천한 조건인 경우에는 Fig. 13(a)의 (III)와 같다. 세가지 조건중 BSI, ASME, 표면점 연결순서로 균열의 합체가 빨라지고 있으며 실험의 경우와는 (I)의 경우와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 합체가 피로수명의 초기에 형성될 수록 합체한 후 균열깊이방향으로 성장이 길어짐을 알 수 있다.

Fig. 13(b)는 노치크기가 다른 경우에 Fig. 13(a)에서와 동일한 조건을 사용하여 3가지 합체조건에 따른 복수 표면균열의 성장도를 나타내고 있다. 이 그림에서도 BSI, ASME, 표면점연결조건 순서로

Table 3 Fatigue life according to each coalescence conditions

Notch number	Cond.	Surface point connection	ASME condition	BSI condition
		($\times 10^4$)	($\times 10^4$)	($\times 10^4$)
Same size	2	13.90	11.00	10.00
	3	11.90	6.80	6.30
	4	0.78	0.39	0.34
Different size	2	33.60	32.60	31.40
	3	36.40	35.80	32.80

균열의 합체가 빨라짐을 알 수 있다.

Table 3에는 본 연구에서 실시한 각각의 표면노치 개수와 표면균열의 합체조건에 따른 파단수명을 나타내고 있다. 즉, 세가지 합체조건에서 합체가

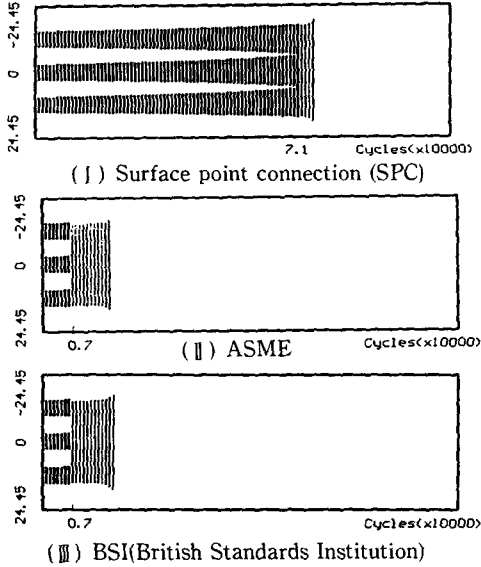


Fig. 14 (a) Comparison of the surface crack coalescence under the different coalescence conditions (unit : mm)

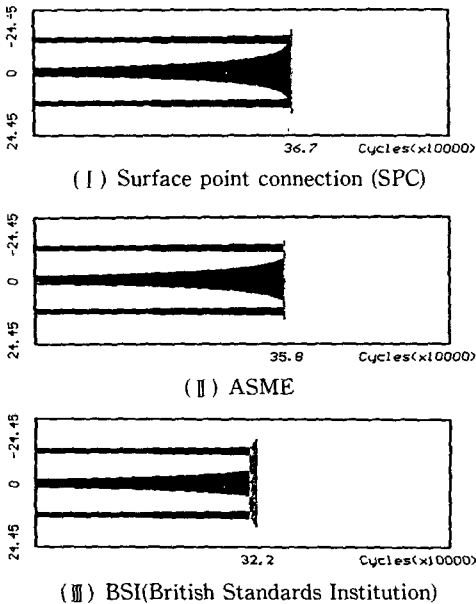


Fig. 14 (b) Comparison of the surface crack coalescence under the different coalescence conditions (unit : mm)

빨리 형성될수록 시험편의 파단수명이 짧아지도록 수명예측이 평가됨을 알 수 있다.

Fig. 14(a) 및 Fig. 14(b)는 각각의 균열이 성장, 합체되는 과정을 균열표면길이와 파단 반복수와의 관계를 본 시뮬레이션 프로그램에서 그래픽 처리한 균열의 합체도를 나타내는 한 예시이다. Fig. 14(a)는 동일 크기의 균열이 3개인 경우에 3가지 합체조건에 따라 합체되는 반복수를 나타내고 있다. 그림에서 (I)의 표면점연결조건이 (II)의 ASME와 (III)의 BSI조건 보다 늦게 합체가 형성되어 파단됨을 알 수 있고 (II)와 (III)경우는 합체시기가 유사하게 나타났으며 각 균열간 거리와 균열길이를 알 수 있다. Fig. 14(b)는 Fig. 14(a)와 같은 시뮬레이션 조건으로 큰 균열 한개와 작은 균열이 각각 좌우에 있는 경우의 균열 합체도를 나타내고 있다. 여기서, (II)의 ASME조건은 (I)의 표면점연결조건 보다 약 2.5% 빨리 합체되었고 (III)의 BSI조건은 (I)의 경우보다 12.3% 빨리 합체가 형성되어 파단되었다.

4.6 균열의 간섭조건에 따른 파단수명의 영향

Fig. 15는 복수 표면균열의 간섭조건에 따른 피로균열성장의 영향을 알아보기 위하여 균열의 합체조건으로는 표면점연결조건(SPC)을 사용하여 동일 크기의 노치가 2개인 경우에 대해서 시뮬레이션을 실시한 경우의 피로균열의 성장, 합체과정을 나타내고 있다. 그림에서 (a)의 MNN조건⁽¹⁵⁾이 (b)의 Laurent series조건⁽¹⁵⁾보다 간섭영향이 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 4는 복수 표면균열의 간섭조건에 따른 각각의 노치개수에 대한 시험편의 파단수명을 나타내

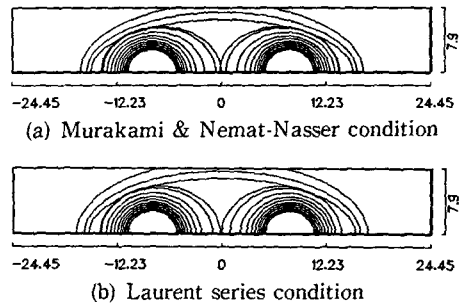


Fig. 15 Comparison of the crack growth and coalescence behavior depend on the interaction conditions (unit : mm)

Table 4 Fatigue life with different coalescence conditions

Notch number	Cond.	Murakami & Nemat-Nasser	Laurent series
		condition ($\times 10^4$)	condition ($\times 10^4$)
Same size	2	13.90	14.04
	3	11.90	12.10
	4	0.78	0.79
Different size	2	33.60	33.60
	3	36.40	36.40

고 있다. 여기서, MNN조건이 Laurent series조건을 사용한 경우의 파단수명 보다 약 1.5% 작게 나타나고 있으며 노치크기가 다른 경우에 있어서는 간섭의 영향을 거의 받지 않고 성장함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 구조물이나 기기에 발생하기 쉬운 복수 표면피로균열의 성장, 합체 거동을 파악하기 위하여 304 스테인리스강을 사용하여 동일 평면상에서 반원 형태의 표면노치의 개수, 간격 및 위치에 따른 영향을 실험하고 이 실험 데이터를 이용하여 시물레이션 프로그램을 작성하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복수표면노치에서 발생, 성장하는 복수표면피로균열의 피로 파단수명의 예측결과는 실험결과와 최대 17.3%의 오차를 나타내었다.

(2) 피로시험 및 시물레이션 결과에서 복수표면노치의 피로수명은 피로균열의 발생, 성장에 대부분 소요되며 표면점연결조건, ASME조건, BSI조건 순서로 합체가 빨라지며, 합체가 빠를수록 실제 파괴수명에 비해 안전측으로 평가되었고 표면점연결조건이 실험결과와 유사하게 평가되었다.

(3) 본 시물레이션에서 사용한 두가지 간섭조건 중 Murakami & Nemat-Nasser 조건쪽이 Laurent series 조건보다 간섭영향이 다소 크며 파단수명도 작게 나타났다.

(4) 피로시험 및 시물레이션 결과 복수균열의 피로수명은 피로수명을 좌우하는 주균열의 영향이 크며 작은 노치에서 발생한 보조균열은 성장이 느려

서 파단수명에 미치는 영향이 적었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제(931-1001-017-2)의 결과의 일부로서 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Ohta, S., 1984, "Fatigue of Worked Metallic Member and Structure" *J. of JSME*. Vol. 87 p. 1024.
- (2) Uchino, 1971, "Fatigue Fracture and Prevention of Welding Structure" *Text of Japan Industrial Manager Seminar*.
- (3) Thomas, D. Copper and Clifford, A. Kelto, 1978, "Fatigue in Machines and Structure-Aircraft" *ASM Material Science Seminar*, pp. 29 ~56.
- (4) ASME ; Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, 1980, *Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components*, Appendix A.
- (5) Suh, C. M., J. J. Lee, Y. G. Kang and H. J. Ahn, 1990, "Fatigue Crack Initiation and Growth Life Prediction with Statistical Consideration," *KSME & JSME Joint Conference*, pp. 684~689.
- (6) Jolles, M. and Tortoriello, V., 1983, "Geometry Variations during Fatigue Growth of Surface Flaws," *ASTM STP 791*, Vol. 1, pp. I297~I307.
- (7) Kitagawa, H., Kawahara, M. Yuuki, R. and Suh, C. M., 1983, "Consideration of Short Crack in High Stress Fatigue Design," *ASME PVP Congress-June 19~24*.
- (8) Suh, C. M., R. O. Ritchie and Kang, Y. G., 1989, "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.
- (9) 崔鎔湜, 梁源鎬, 金永鎮, 金在元, 1990, "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, '90년도 秋季學術大會論文集*, pp. 86~91.
- (10) Irwin, G. R., 1962, "Crack Extension Force for a Part Through Crack in a Plate" *J. of Appl.*

- Mech., Trans of ASTM, E. Vol. 81, pp. 651~654.
- (11) Paris, P. C. and G. C. Sih, "Stress Analysis of Cracks," *ASTM STP* 381, pp. 30~83.
- (12) Newman, J. C. Jr., 1979, "A Review & Assessment of the Stress Intensity Factors for Surface Cracks," *ASTM STP* 687, pp. 16~42.
- (13) Newman, J. C. Jr. and I. S. Raju, 1983, "Stress Intensity Factors Equation for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies," *ASME STP* 791 pp. 238~265.
- (14) Marrs, G. R. & Smith, C. W., 1972, "A Study of Local Stresses near Surface Flaws in Bending Fields," *ASTM STP* 513, pp. 23~35.
- (15) 石田誠, 1971, "破壊力學と材料強度講座, 龜裂の彈性解析と應力擴大係數," 培風館, pp. 92~103, pp. 181~191.
- (16) Murakami, Y. and S. Nemat-Nasser, 1982, "Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws under Tension and Bending," *Engng. Frac. Mech.*, Vol. 16, pp 373~386.
- (17) Murakami, Y. and H. Nisitani, 1981, "Stress Intensity Factors for Interacting Two Equal Semi-Elliptical Surface Cracks in Tension," *JSME, Ser. A*, Vol. 50, pp. 295~303.
- (18) Miyoshi, T., M. Shiratori, Y. Yoshida and O. Tanabe, 1984, "Study on Stress Intensity Factors of Closely Located or Partly Overlapped Twin Surface Cracks," *JSME, Ser. A*, Vol. 50, No.451, pp. 477~482.
- (19) Isida, M., 1976, "Elastic Analysis of Cracks and Stress Intensity Factors," *Fracture Mechanics and Strength of Materials 2*, Baifuukan, pp. 181~184.
- (20) Yuuki, R. and T. Yoshida, 1986, "Fatigue Life Prediction System for Structures," *JHPI*, Vol. 24, No.3, pp. 115~123.
- (21) BSI, 1980, ; PD 6493 *Guidance on Some Methods for the Deviation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints*.
- (22) Paris, P. C., and F., Erdogan, 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Vol. 85, pp. 528~534.
- (23) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," *ASTM STP* 486, pp. 230~242.
- (24) De Los Rios E. R., Z. Tang and K. J. Miller, 1984, "Short Crack Fatigue Behavior in a Medium Carbon Steel," *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 7, pp. 97~108.
- (25) De Los Rios E. R., Hussain J. Mohamed and Miller, K. J., 1985, "A Micro-Mechanics Analysis for Short Fatigue Crack Growth" *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 8, pp. 49~63.
- (26) 北川英夫, 中曾根祐司, 1984, "微小分布き裂の發生, 成長, 合體を伴う腐蝕疲労破壊過程のモンテカルロ解析モデル," 日本材料學會, 材料, 第33號, pp. 14~20.
- (27) 徐昌敏, 金奎南, 1984, "SUS 304鋼의 常溫下 表面疲勞균열의 發生 成長舉動에 관한 研究," 大韓機械學會誌論文集 第8卷 第3號, pp. 195~200.
- (28) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, 1982, "高溫におけるステンレス鋼の表面き裂の疲勞き裂成長特性," 材料, 第34號, pp. 500~504.
- (29) 柴田勝之, 横山憲夫, 大場 敏弘, 川村隆一, 宮園昭八郎, 1985, 複數表面缺陷からの疲勞龜裂轉播舉動評價法, (I~II)-表面缺陷付 SUS 304L 鋼製平板試験片の龜裂轉播試験結果と轉播評價法, Vol. 27, No. 3, pp. 250~262.