

이상 이축 하중 하에서 구멍 주위에서의 피로 균열 발생

허용학* · 박휘립* · 김동진*
(2003년 1월 23일 접수, 2003년 7월 14일 심사완료)

Fatigue Crack Initiation around a Hole under Out-of-phase Biaxial Loading

Yong-Hak Huh, Pilip Park and Dong-Jin Kim

Key Words: Thin-Walled Tubular Specimen(얇은 두께 튜브형 시험편), Out-of-Phase(이상), Biaxial Loading(이축 하중), Biaxiality(이축성), Maximum Tangential Stress Range(최대접선응력폭), Crack Initiation Direction(균열 발생 방향)

Abstract

Fatigue crack initiation around a hole subjected to biaxial fatigue loads with a phase difference was investigated. Axial and torsional biaxial fatigue loads with different phase differences and biaxiality of $1/\sqrt{3}$ were applied to thin-walled tubular specimens. Five phase differences of 0, 45, 90, 145 and 180 degrees were selected. Directions of the fatigue crack initiation around the hole were found to approach to the circumferential direction of the specimen with increment of the phase difference for fatigue tests with phase differences less than 90° . Whereas directions for tests with phase differences greater than 90° got away from the circumferential direction and those were symmetric to the directions for tests with phase difference less than 90° . Furthermore, it was shown that the fatigue initiation life decreased with increment of phase difference for fatigue tests with phase differences less than 90° , but it increased for tests with phase difference greater than 90° . The crack initiation direction can be successfully explained by using the direction of the maximum tangential stress range obtained around the hole and at far-field.

1. 서론

기호 설명

- $\sigma_{\theta\theta, \max}$: 최대 접선 응력
 $\Delta\sigma_{\theta\theta, \max}$: 최대 접선 응력 폭
 (= $\sigma_{\theta\theta, \max} - \sigma_{\theta\theta, \min}$)
 φ : 위상차 (phase difference)
 λ : 이축비 (= $\tau_{\max}/\sigma_{\max}$)
 R : 응력비 (= $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)

† 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원
 E-mail : yhhuh@kriss.re.kr,
 TEL : (042)868-5386 FAX : (042)868-5635
 * 한국표준과학연구원 환경안전연구센터

많은 공학 구조물 혹은 부품에는 실제 사용 동안 다축 반복 하중(multi-axial cyclic loading)이 작용한다. 이러한 다축 하중은 각 방향에 대하여 위상차가 있는 하중 조합으로 구성되고, 이는 이들 구조물의 주요부분에서의 응력 상태를 매우 복잡하게 한다. 단축 하중(uniaxial loading)이나 비례 이축 하중(proportional biaxial loading)하에서 피로 손상은 일정한 방향에서 최대가 되고, 피로 균열은 최대 전단 응력이 작용하는 면을 따라 발생한다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나, 비비례 하중(non-proportional loading) 상태에서는 반복 하중이 작용하는 동안 작용 응력의 수준에 따라 주 응력의 방향이 계속 변하고, 또한 피로 손상이 최대가 되는 방향도

일정하지 않다. 이러한 복잡한 응력 상태는 피로 균열의 발생과 함께 피로 수명에 영향을 끼치게 된다. Nishihara와 Kawamoto 등⁽⁷⁾은 이상(out-of-phase) 비틀림 굽힘 시험에서 위상차(phase difference)가 커짐에 따라 피로한도가 증가하는 경향을 보여주었다. 이에 반하여 Little⁽⁸⁾은 위상차의 증가는 실제적인 피로한도를 감소시키고 있음을 보고하였다. 또한 Kanazawa 등⁽⁹⁾은 축과 비틀림의 이상 시험에서 이상 부하(out-of-phase loading)에서의 피로 손상은 동상 부하(in-phase loading)에 비해 더 큼을 보고하였다. 이와 같은 결과로부터 비비례 피로 하중을 가하는 방법과 하중 유형에 따라 피로 손상의 정도가 다르며, 다축 하중에서의 위상차는 피로 손상 및 수명에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

이러한 비비례 하중에서의 위상차는 균열 발생의 방향에 대해서도 영향을 미치고 있다. Zhang와 Akid⁽⁵⁾은 반복적인 비틀림 응력에 이축의 정적 인장 응력이 부가된 시험에서 위상차에 따른 균열 발생 방향의 변화를 보여주었다. 일반적으로 균열의 발생은 최대 전단 변형률면에서 일어나는 것으로 알려지고 있으나,^(3,6) Ogata 등⁽³⁾과 Berad 등⁽⁴⁾은 90°의 이상(out-of-phase) 시험에서 균열 발생 방향이 수직 응력(normal stress) 혹은 수직 변형률과 관계 있음을 보고하였다.

이와 같은 평활재에서 피로 균열의 발생 방향과는 달리 원형 노치가 있는 시험편에서의 피로 균열은 최대 인장 변형률이 작용하는 면을 따라 발생하는 경향을 보이고 있다.⁽³⁾ 또한 허용학 등⁽¹⁰⁾은 이축 정적 하중이 부가된 이축하중에서 원형 노치에서 발생하는 균열의 방향은 최대 접선 응력 폭과 밀접한 관계가 있음을 보고하였다. 그러나 이와 같이 균열 발생에 대한 위상차의 영향에 대한 연구가 진행되었으나, 이를 체계적으로 설명하기 위해서는 더 많은 데이터가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 축과 비틀림의 이상 하중(out-of-phase loading)에 의한 실험과 해석을 통하여 위상차에 따른 피로 균열 발생의 거동을 고찰하였다. 또한 이러한 균열 발생의 방향을 예측하기 위한 손상 계수를 정의하고 제시하였다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 실험 방법

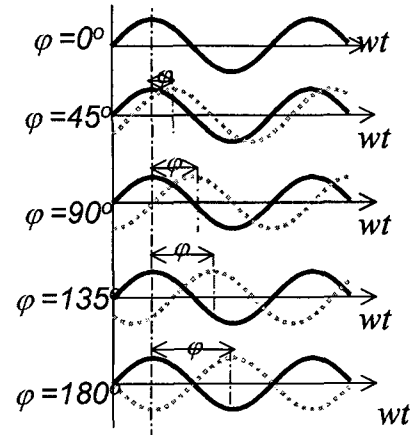


Fig. 1 Fatigue biaxial tensile and torsional load profile with different phase difference, ϕ . (—:axial tensile load, ---:torsional load)

2.1.1 시험 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 열간 압연된 스테인레스 304⁽¹⁰⁾이다. 본 시험에서는 인장과 비틀림의 이축 응력을 동시에 가할 수 있는 얇은 두께를 가진 튜브형 시험편(thin-walled tubular specimen)⁽¹⁰⁾을 사용하였으며 시험편의 내경과 외경은 각각 10mm과 12.5mm이고, 시험 평행부는 50mm이다. 시험편의 외부는 선반 가공 후 단계적인 연마를 통하여 최종 1 μ m의 다이아몬드 입자로 연마하였으며, 시험편 내부는 연삭을 하였다. 또한 시험편의 중앙부에 직경 1mm의 관통 구멍을 가공하여 이축 하중하에서 구멍 주위에서 균열이 발생하도록 하였다.

2.1.2 시험 장치 및 시험 방법

피로 시험은 축 방향의 인장 하중과 비틀림 하중을 가할 수 있는 이축 유압 피로 시험기(MTS810 system)을 이용하였다.

피로 시험은 상온에서 하중 제어로 실시하였다. 이축 하중(biaxial loading)은 인장과 비틀림 방향의 하중으로 하였으며, 위상차(phase difference)가 포함된 정현파의 이상 하중(out-of-phase loading) 조합으로 구성하였다. 5종류의 이상 하중을 선택하였고, 이때의 각 이상 하중의 인장 하중과 비틀림 하중의 위상차(phase difference), ϕ 는 0°, 45°, 90°, 135° 그리고 180°이다. Fig. 1은

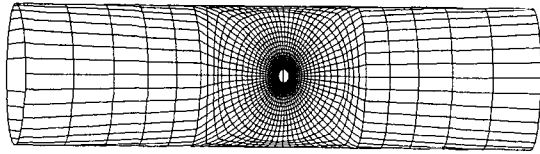


Fig. 2 Mesh used in stress analysis of thin-walled tubular specimen

이때의 각 위상차에 대한 이축 하중 형태를 도식적으로 나타낸 이상 하중이다. 본 연구에서는 되풀이 비틀림 응력의 최대치와 되풀이 인장 응력의 최대치와의 비인 이축비(biaxiality) λ ($\lambda = \tau_{max} / \sigma_{max}$)는 $1/\sqrt{3}$ 이 되도록 하였고, 축 방향의 최대 응력은 205MPa이다.

주기 시험 속도는 5Hz로 하였으며, 주기 인장과 주기 비틀림 응력은 응력비 $R=0.1$ 로 부하하였다. 되풀이 하중에 의하여 구멍 주위에 발생하는 균열을 관찰하기 위하여 이동 현미경과 표면 복제법을 사용하였다. 표면 복제는 0.034mm의 methylacetate cellulose 필름(Okensojyz 사)을 사용하였다.

2.1.3 수치해석 방법

Fig. 1에서 보여준 이축 혼합 하중하에서 얇은 두께의 튜브형 시험편의 구멍주위에서 발생하는 응력 분포는 유한 요소 해석(finite element analysis)을 통하여 조사하였다. 유한 요소 해석은 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 수행하였다. 원형 구멍이 있는 시험편에서 유한 요소는 8점 셀 요소를 사용하였으며, 요소의 수는 2044개, 절점(node)수는 6425개이다. 구멍 주위에서의 유한 요소는 반경 방향으로 18개의 원환과 72개의 등각도 등분(5도 간격)으로 나누었다. 입력된 재료 물성 데이터로는 본 연구에 사용한 스테인레스 304의 기계적 성질⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 경계 조건으로 시험편의 한쪽 끝에서 원주 방향과 축 방향의 변위를 구속하고, 반대쪽 끝은 시험 하중 조건에 따라 위상차가 포함된 인장과 비틀림을 가하도록 하였다. 하중은 하중을 가하는 쪽의 원통 둘레의 각 절점에 등분되는 분력으로 작용하게 하였고, 분력의 합은 전체 가한 하중이 되도록 하였다.

비비례 이상 이축 하중(non-proportional out-of-phase biaxial loading)하에서 최대 손상을 야기시

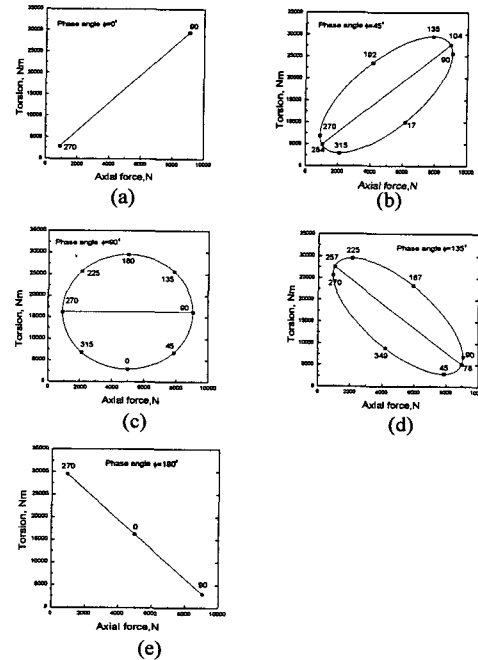


Fig. 3 Combinations of tensile and torsional stress for stress analysis under out-of-phase loading with phase difference; (a) $\phi=0$, (b) $\phi=45$, (c) $\phi=90$, (d) $\phi=135$, (e) $\phi=180$

킬 수 있는 인장 하중과 비틀림 하중의 수준을 결정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 해석에서 위상차를 가지는 이축 하중에 대하여 다양한 수준의 이축 하중에서 수치 해석을 수행하였다. 인장과 비틀림의 주기 하중 위상차가 0° 와 180° 인 비례하중(proportional loading)에서는 최대 및 최소 손상을 발생시키는 하중조합 수준은 각각 90° 와 270° 의 하중 위상이며, 이 하중 위상을 가지는 이축 하중 수준에서 본 해석을 수행하였다. 0° 와 180° 와 다른 위상차를 가지는 이상 이축 하중에서는 비비례의 이축 응력 상태를 나타내게 하여 비례 하중에서와 같이 최대 및 최소 피로 손상을 야기시키는 하중 수준을 손쉽게 결정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 비비례 이축 하중에서는 인장과 비틀림 하중의 최대와 최소의 하중 수준사이에서 8 수준의 하중 조합을 선택하였으며, 각각의 하중 조합에서 응력을 조사하였다. Fig. 3에서는 본 해석에서 응력 상태를 조사한 이상 이축 하중의 각 조합을 도식

적으로 나타내었다.

3. 이상 이축 하중에서의 응력 상태

얇은 두께의 튜브형 시험편에 이상 축방향과 비틀림 방향의 주기 하중(out-of-phase axial and torsional cyclic loading)이 R의 응력비(stress ratio)로 작용할 때 시험편에 작용하는 응력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\sigma(t)}{\sigma_{\max}} = \frac{(1+R) + (1-R)\sin wt}{2} \quad (1)$$

$$\frac{\tau(t)}{\tau_{\max}} = \frac{(1+R) + (1-R)\sin(wt - \phi)}{2} \quad (2)$$

여기서 σ_{\max} 와 τ_{\max} 는 각각 축 방향과 비틀림 방향의 최대 응력을 나타내고, ϕ 는 두 응력간의 위상차를 나타낸다. 시험편의 원주 방향에 대하여 θ 의 각을 이루는 면에 작용하는 접선 응력, $\sigma_{\theta\theta}$ 과 전단응력, $\tau_{r\theta}$ 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_{\max}} = \frac{1}{4} [\{ (1+R) + (1-R)\sin wt \} (1 + \cos 2\theta) - 2\lambda \{ (1+R) + (1-R)\sin(wt - \phi) \} \sin 2\theta] \quad (3)$$

$$\frac{\tau_{r\theta}}{\sigma_{\max}} = \frac{1}{4} [\{ (1+R) + (1-R)\sin wt \} \sin 2\theta - 2\lambda \{ (1+R) + (1-R)\sin(wt - \phi) \} \cos 2\theta] \quad (4)$$

여기서 λ 는 이축성(biaxiality)으로 $\tau_{\max} / \sigma_{\max}$ 이다. 이들 두 응력 성분이 최대가 되는 방향은 식 (3)과 (4)를 θ 에 대하여 미분함으로써 결정할 수 있다. 접선 응력이 최대가 되는 방향은 다음과 같다.

$$\tan 2\theta = \frac{2\lambda \{ (1+R) + (1-R)\sin(wt - \phi) \}}{(1+R) + (1-R)\sin wt} \quad (5)$$

식 (5)에서 나타난 바와 같이 접선응력이 최대가 되는 방향은 시험편에 가해지는 이상을 가지는 축 응력과 비틀림 응력의 크기와 이축성, λ 의 함수임을 알 수 있다.

4. 결과 및 토의

4.1 피로 균열 발생 방향

Fig. 4는 이상(out-of-phase) 이축 하중하에서 얻어진 원형 노치주위에서 발생한 피로균열의 방향을 나타낸다. 여기서 위상차(phase difference), ϕ 는 Fig. 1에 도시한 바와 같은 주기 축 방향 인장 하중과 비틀림 하중의 위상차를 나타내며, 본 시험에서는 0° , 45° , 90° , 135° 그리고 180° 인 5개의 위상차를 선택하였다. 균열 발생 방향은 원형 노치의 중심과 튜브형 시험편의 원주방향에 대한 각도로 표시하였고 시계 반대 방향을 양의 방향으로 하였다. 각 이축 하중 시험에서 얻어진 균열은 원형 노치 둘레의 두 지점, 즉 원형 노치의 오른쪽과 왼쪽면에서 발생하였으며, 대부분 원형 노치의 중심에 대하여 대칭으로 발생하여 성장하였다. Fig. 1에는 이 두 균열의 방향을 각각 도시하였으며, 각 균열의 방향은 각각 시험편의 양의 원주 방향과 음의 원주 방향에 대한 각도로 측정하였다. 위상차 0° 인 하중 조합에서는 피로 균열은 12.5° 와 30° 의 방향에서 발생하였으며, 위상차 45° 에서는 32° , 21.5° 그리고 위상차 90° 에서는 0° 와 9° 인 방향으로 균열이 발생하였다. 그리고 90° 보다 큰 위상차를 가지는 하중 조합에서의 균열 발생 방향은 90° 보다 작은 위상차를 가지는 하중 조합에서의 균열 방향과 시험편의 양의 원주 방향에 대하여 대칭이 되고 있음을 보여주고 있다. 이러한 실험 결과로부터 90° 미만의 위상차 이축 하중하에서의 피로

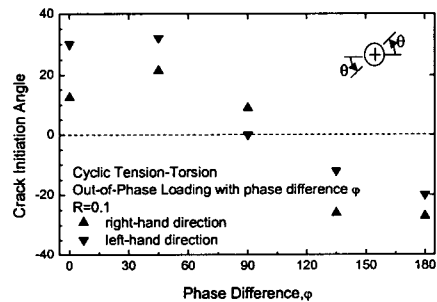


Fig. 4 Fatigue crack initiation direction under out-of-phase loading with various phase differences

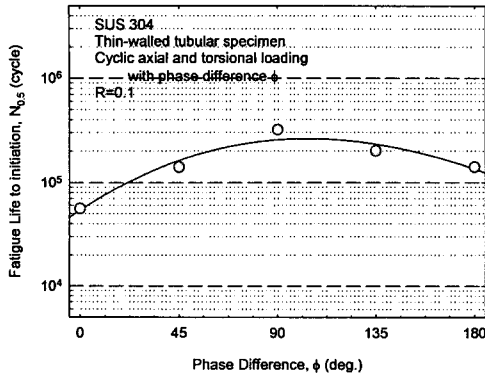


Fig. 5 Fatigue initiation life to crack length of 0.5mm for biaxial fatigue tests with various phase differences

균열 발생 방향은 위상차가 증가함에 따라 시험편의 원주 방향으로 접근하고, 90° 이상의 위상차에서는 위상차가 증가함에 따라 다시 원주 방향에서 멀어지고 있다고 말할 수 있다. 즉, 균열 발생 방향은 위상차 90°에 대하여 대칭적인 특성을 나타내고 있으며, 위상차의 증가에 따라 원주 방향으로 접근하는 피로 균열 발생 방향의 변화가 나타난다.

4.2 균열 발생 수명

Fig. 5는 이상(out-of-phase) 이축 하중하에서 얻어진 원형 노치주위의 피로 균열 발생 수명을 나타낸다. 여기서 피로 균열 발생 수명은 원형 노치에서 0.5mm의 피로 균열이 나타날 때까지의 수명으로 하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 90° 이하의 위상차를 가진 이축 하중 조합에서 피로 발생 수명은 위상차가 증가할수록 증가하고 있으나, 90° 이상의 위상차를 가진 하중 조합에서는 위상차가 증가할수록 피로 발생 수명이 감소하고 있다. 따라서 본 연구에서 얻어진 원형 노치부근에서 이축 응력에 의한 피로 손상은 90°의 위상차를 가지는 이축 하중조합에서 가장 작고, 0°의 위상차를 가지는 비례 이축 하중에서 피로 손상이 가장 큼을 보이고 있다.

이러한 이축 하중에서의 위상차에 따른 피로 수명에 대한 결과는 연구자들의 결과에 따라 다소 다르게 보고되고 있다. Nishihara와 Kawamoto⁽⁷⁾ 등의 이상 (out-of- phase) 비틀림 굽힘 시험에서는

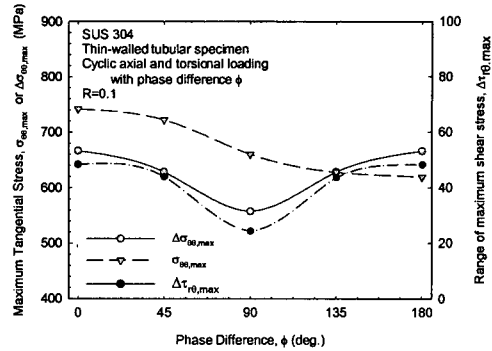


Fig. 6 Magnitude of the maximum tangential stress and the maximum tangential stress range for various loading combinations with the different phase differences

피로 한도가 위상차(phase difference)가 커짐에 따라 증가하는 경향을 보여주었으나, Little⁽⁸⁾의 해석에 의하면 실제적인 피로 한도는 위상차의 증가에 따라 감소하고 있음을 보였다. 축과 비틀림의 이상 하중이 작용하는 평활재에서는 이상 부하(out-of-phase loading)에서의 피로 손상이 동상 부하(in-phase loading)비하여 더 큼을 Kanazawa 등⁽⁹⁾은 보인 바 있으며, Kalluri 등⁽¹¹⁾은 동상 이축 하중에 의한 피로 수명보다 90° 이상 하중에 의한 피로 수명이 더 큼을 보인 바 있다. 이에 반하여 본 연구에 사용한 원형 노치가 있는, 즉 응력 집중이 되고 있는 시험편에 대해서는 이러한 위상차에 따른 피로 균열 발생 수명에 대한 결과가 상세히 보고된 경우가 없다. 따라서 본 연구의 결과를 다른 연구 결과와 비교할 수 없으나, 이러한 결과는 일반적으로 알려져 있는 평활재에서 위상차가 피로 손상을 더 크게 한다는 결과와는 상반된 결과를 보이고 있다. 따라서 이에 대한 고찰이 더 필요할 것이다.

4.3 원형 노치 부근에서의 응력

Fig. 5에서 보여준 피로 수명의 위상차 영향을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 원형 노치 부근에서 응력 분포를 위상차를 가지는 이축 하중에 대하여 조사하였다. 위상차가 있는 이축 하중이 시험편에 가해짐에 따라 각 피로 하중의 수준에서의 응력 상태는 식 (3)과 식 (4)로서 계산할 수

있다. 그러나 이러한 응력 상태로부터 응력이 집중되고 있는 원형 노치 부근에서의 응력 크기를 정확하게 알기는 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 이러한 응력의 분포를 알기 위하여 Fig. 2에서 보여준 유한 요소를 사용하여 선형 탄성 해석을 수행하였다. 위상차가 0° 와 180° 인 비례 이축 하중 조건과 위상차 45° , 90° 그리고 135° 인 비비례 하중 조건에서는 각각 해석점을 달리하였고, 이는 Fig. 3에서 보여준 바와 같다. 각 하중 수준과 위상에서 얻어지는 응력 결과로부터 원형 노치둘레에 작용하는 응력 성분을 계산하였다.

Fig. 6는 선형 유한 요소 해석으로부터 얻어진 원형 노치 둘레에 발생하는 최대 접선 응력과 최대 접선 응력 폭 그리고 최대 전단 응력 폭의 크기를 위상차에 따라 도시하였다. 최대 접선 응력은 위상차 0° 인 하중 조합에서 약 750MPa 이며, 위상차가 180° 인 이축 하중에서 약 620MPa 으로 최대접선 응력은 위상차가 증가함에 따라 감소하고 있다. 이에 반하여 최대 접선 응력 폭은 위상차 0° 와 180° 에서 약 666MPa 이고 위상차 90° 에서 최저인 약 557MPa 을 보이고 있다. 즉 위상차 90° 이하에서는 최대 접선 응력 폭은 위상차의 증가에 따라 감소하고 있으며, 위상차 90° 이상에서는 위상차의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 최대 전단 응력 폭도 최대 접선 응력 폭과 같이 위상차가 증가함에 따라 감소하고 위상차 90° 이상에서는 위상차가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다.

이러한 최대 접선 응력과 최대 접선 응력 폭 그리고 최대 전단 응력 폭의 위상차에 따른 변화를 Fig. 5에서 보여준 피로 균열 발생 수명과 비교한다면 최대 접선 응력 폭과 최대 전단 응력 폭의 변화가 피로 수명의 위상차에 따른 차이 경향을 적절히 설명할 수 있을 것이다. 즉 원형 노치 부근에서 최대 접선 응력의 폭 혹은 전단 응력의 폭이 크게 작용할수록 피로 손상은 크게 되고 이에 따라 피로 수명이 작아질 수 있게 된다. 이에 따라 동상 이축 하중하에서의 피로 수명이 이상 이축 하중하에서의 수명보다 작게 됨을 적절히 설명할 수 있다. 또한 이러한 결과는 최대 접선 응력 폭과 최대 전단 응력 폭이 위상차가 존재하는 이상 이축 하중하에서 피로 손상을 평가할 수 있는 적절한 평가 후보 인자가 될 수 있음을 나타내고 있다. 평활재 시험편에서 피

로 수명을 예측 모델에 사용된 인자로는 단축 상당 변형률 폭(uniaxial equivalent strain range), 최대 주 변형률 범위(maximum principal strain range) 그리고 최대 전단 변형률면(plane of maximum shear strain)에 작용하는 최대 전단 변형률(maximum shear strain)과 수직 변형률(normal strain)이 사용되고 있다.⁽¹¹⁾ 그러나 이러한 인자들은 본 연구에서 사용한 원형 노치 부근에서 사용하기에는 다소 부적절하다. Fig. 5와 Fig. 6의 결과로부터 본 연구에서 사용된 두 인자가 원형 노치 부근에서 피로 발생 수명 수명의 변화 경향을 적절히 설명할 수 있다하더라도 이는 한정된 조건에서 얻어진 결과이다. 따라서 이러한 인자를 이용한 수명 예측에 대한 모델의 완성 및 검증을 위해서는 더 많은 실험적 결과를 바탕으로 더 연구되어질 필요가 있다.

4.4 균열 발생 방향의 예측

이축 하중하에서 피로 균열의 발생 방향은 응력 조합과 응력 집중등과 같은 응력 상태에 따라 달리 나타난다. 응력이 집중되지 않는 평활재 시험편에서 비례 이축 하중(proportional biaxial loading)과 위상차가 있는 비비례 이축하중(non-proportional biaxial loading)하에서의 피로 균열은 최대 전단 응력 면을 따라 발생한다.^(3,6) 이에 반해 응력 집중이 되는 노치면에서는 최대 인장 변형률이 작용하는 면을 따라 발생하고 있음이 보고 되었으나,⁽³⁾ 비비례 하중에 의한 응력 집중영역에서 피로 균열의 발생 방향에 대해서는 아직 명확하지 않다. 그러나 최근 허용학 등⁽¹⁰⁾은 비비례 이축 하중의 하나인 이축 정적 응력이 부가된 이축 하중하에서 원형 노치 부근에서 피로 균열 발생 결과를 보고하였고, 이는 최대 접선 응력 폭이 작용하는 면에서 발생하고 있음을 보였다.

Fig. 4는 본 실험에서 얻어진 위상차가 있는 이축 하중하에서 원형 노치 부근에서 발생한 피로 균열의 방향을 나타낸다. Fig. 6에서 보여준 바와 같이 원형 노치 부근에서의 응력 성분들, 최대 접선 응력maximum tangential stress, $\sigma_{\theta\theta, \max}$, 최대 접선응력 폭(maximum tangential stress range, $\Delta\sigma_{\theta\theta, \max}$) 그리고 최대 전단 응력 폭(maximum shear stress range, $\Delta\tau_{r\theta, \max}$)은 위상차에 대한 의존성을 보이고 있고, 그 방향 또한 위상차에 따

른 의존성을 가지고 있으며, Fig. 7은 그 결과를 보여준다. Fig. 7에서는 Fig. 4의 본 실험에서 얻어진 균열 발생 방향과 응력 성분의 방향을 함께 도시하여, 그 방향을 비교하였다. 최대 접선 응력은 비례하중인 위상차 0° 인 이축 하중하에서 노치 원주 방향에 대하여 20° 의 방향으로 일어났으며, 위상차가 180° 인 하중 조합에서는 2.5° 인 방향에서 발생하였다. 이와 같은 최대 접선 응력의 방향은 위상차가 증가할수록 원주 방향으로 접근하고 있는 경향을 보이고 있다. 즉 Fig. 7에서 보여준 바와 같이, 접선 응력이 최대가 되는 방향의 위상차에 대한 의존성은 실험에서 얻어진 결과와는 다른 경향을 보이고 있다. 또한 최대 접선 응력은 위상차가 90° 인 이축 하중을 기준으로 균열 방향의 변화를 잘보이고 있으나, 위상차 90° 보다 크고 작은 각각의 영역에서의 피로 균열 발생 방향의 경향과는 다소 다르게 보이고 있다. 한편 최대 접선 응력 폭은 위상차가 0° 와 180° 인 하중 조합에서는 원주 방향에 대하여 각각 17.5° 와 -17.5° 에서 발생하고 있다. 또한 그 폭은 위상차가 증가할수록 그 발생 방향이 시험편의 원주 방향으로 접근하고 있고, 위상차가 90° 에서 시험편의 원주 방향과 일치함을 보인다. 그리고 90° 보다 큰 위상차에서는 위상차가 증가함에 따라 최대 접선 응력 폭 방향은 원주 방향으로부터 멀어지고 있다. 이는 Fig. 7에서 보여준 바와 같이 실험에서 얻어진 균열 발생 방향과 비교적 잘 일치하고 있다. 즉, 최대 접선 응력 폭이 얻어지는 방향은 실험에서 얻어진 피로 균열 발생 방향과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 원형 노치 부근에서 발생하는 피로 균열의 방향이 최대 접선 응력 폭으로 잘 예측될 수 있다고 할 수 있다. 또한 최대 접선 응력 폭은 Fig. 7에서 보여준 피로 균열 발생 방향뿐만 아니라 Fig. 6에서 보여준 바와 같이 피로 균열 발생 수명의 위상차에 대한 의존성도 잘 설명하고 있다. 이러한 결과로부터 최대 접선 응력 폭은 비례 이축 하중이 작용하는 응력 집중이 된 원형 노치 부근에서 발생하는 피로 균열 거동을 설명할 수 있는 주요한 인자임을 확인할 수 있다.

이와 같은 원형 노치 부근에서 발생하는 응력 성분에 대한 이해는 국부적인 균열 발생 예측에 매우 도움이 된다. 다축 하중하에서 원형 노치 부근에서의 국부적인 응력이 노치에서 벗어난 영

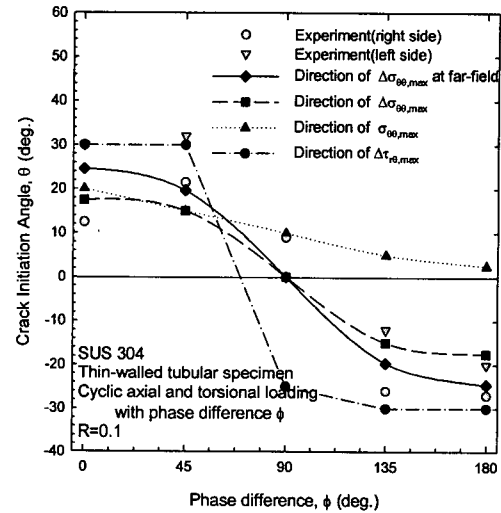


Fig. 7 Prediction of the fatigue crack initiation direction generated under out-of-phase tensile and torsional loading

역(far-field)에서의 균일한 다축 응력과 각각 응력 집중계수에 의하여 관계지어진다면, 먼거리영역(far-field)에서의 응력성분들의 특성은 원형 노치 부근에서의 응력 성분들과 같은 특성을 가질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 먼거리 영역에서 정의되는 접선 응력의 성분으로부터 최대 접선 응력과 최대 접선 응력 폭을 결정하여 이들 성분의 특성과 피로 균열 방향과의 상관 관계를 조사하였다. 먼거리 영역(far-field)에서의 접선응력과 전단 응력의 성분은 식 (1)과 (2)의 관계식으로부터 결정될 수 있으며, 이에 의한 최대 접선 응력에 대한 정보는 식 (3)과 식(5)에 의하여 결정되어진다. 이와같은 관계식을 통하여 결정되어지는 최대 접선 응력 폭의 방향을 이축 하중의 위상차에 대하여 도시하면 Fig. 7과 같으며, 이 결과는 원형 노치 부근에서 결정한 최대 접선 응력 폭과 Fig. 4에서 보여준 피로 균열의 발생 방향과 비교할 수 있다. Fig. 7에서 볼 수 있는바와 같이 먼거리 영역에서 결정된 최대 접선 응력 폭의 방향과 원형 노치 부근에서의 결정된 방향과는 최대 7° 정도 차이로 차이가 나고 있으나, 위상차의 변화에 따라 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 먼거리 영역에서의 결정된 최대 접선 응력 폭의 방향

도 피로 균열 발생 방향을 잘 설명할 수 있음을 Fig. 7으로부터 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 원형 노치와 같이 응력 특이성 (singularity)이 존재하지 않는 단순 응력 집중의 효과를 가진 노치에서는 먼거리 영역(far-field)에서의 응력 성분으로, 즉 간단한 해석적인 방법으로 얻을 수 있는 응력 성분으로부터 피로 균열의 방향을 예측할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

5. 결 론

위상차를 가지는 축방향과 비틀림 방향의 이축 피로 하중하에서 원형 노치 부근에서 발생하는 피로 균열의 발생 수명과 방향에 대한 고찰을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로 균열의 발생 방향은 90° 미만의 위상차가 있는 이축 하중하에서는 위상차가 증가함에 따라 시험편의 원주 방향으로 접근하고, 90° 이상의 위상차 이축 하중하에서는 위상차가 커짐에 따라 시험편의 원주 방향에서 멀어지고 있었으며, 피로 균열 발생 방향은 위상차 90° 에 대하여 원주 방향에 대하여 대칭적으로 발생하고 있었다.

(2) 균열 발생 수명은 위상차에 대한 의존성을 보이고 있으며, 위상차가 커짐에 따라 감소하였으나, 90° 이상의 위상차 하중에서는 위상차의 증가에 따라 피로 수명이 증가하는 경향을 보이고 있었다.

(3) 피로 균열 발생 방향은 노치 부근에서 발생하는 최대 접선 응력 쪽으로 잘 설명할 수 있었으며, 먼거리 영역에서의 최대 접선 응력 쪽으로도 잘 설명되었다.

참고문헌

- (1) Wu, H.C., and Yang, C.C., 1987, "On the Influence of Strain-Path in Multiaxial Fatigue Failure," *J. Engng Mater. Tech.*, 109, pp. 107~113.
- (2) Socie, D.F. and Shield, T.W., 1984, "Mean Stress Effects in Biaxial Fatigue of Inconel 718," *J. Engng Mater. Tech.*, 106, pp. 227~232.
- (3) Ogata, T., Nitta, A. and Blass, 1993, "Propagation Behavior of Small Cracks in 304 Stainless Steel under Biaxial Low-Cycle Fatigue at Elevated Temperature," *ASTM STP 1191*, pp. 313~325.
- (4) Berard, J.Y., McDowell, D.L., and Antolovich, S.D., 1993, "Damage Observation of a Low-Carbon Steel under Tension-Torsion Low-Cycle Fatigue," *ASTM STP 1191*, pp. 326~344.
- (5) Zhang, W. and Akid, R., 1997, "Effect of Biaxial Mean Stress on Cyclic Stress-Strain Response and Behavior of Short Fatigue Cracks in a High Strength Spring Steel," *Fatigue Fract. Mater. Struct.*, 20, pp. 167~177.
- (6) Socie, D., 1987, "Multiaxial fatigue damage models," *ASME J. of Engng. Mater. and Tech.*, Vol. 109, pp. 293~298.
- (7) Nishihara, T. and Kawamoto, 1945, "The strength of metals under combined alternating bending and torsion with phase difference," *M. memoirs, college of Engineering, Kyoto University*, Vol. 11, pp. 145~129.
- (8) Little, R.E., 1969, "A note on the shear stress criterion for fatigue failure under combined stress," *Aeronautical Quarterly*, Vol. 20, pp. 57~60.
- (9) Kanazawa, K., Miller, K.J. and Brown, M.W., 1977, "Low-cycle Fatigue Under Out-of-Phase Loading Conditions," *Transactions, ASME*, series H., Vol. 99, pp. 222~228.
- (10) Huh, Y.-H., Park, P., Kwon, I.B. and Kim, J.Y., 2000, "Behavior of Fatigue Crack Initiation and Propagation under Cyclic Tensile and Torsional Loading with Superimposed Static Biaxial Load," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 21, pp. 1446~1455.
- (11) Kalluri, S. and Bonacuse, P.J., 1993, "In-Phase and out-of-Phase Axial-Torsional Fatigue Behaviour of Haynes 188 Superalloy at 760°C ," *ASTM STP 1191*, pp. 133~150.