

이축성과 위상차의 영향을 고려한 이축 하중하에서 구멍 주위에서의 피로 균열 발생 방향 예측

허용학[†], 박휘립^{*}, 김동진^{*}

Prediction of Fatigue Crack Initiation Direction around a Hole under Biaxial Loads Considering Phase Difference and Biaxiality

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

To predict the direction of the fatigue crack initiated from a hole under various types of biaxial fatigue loads with different phase difference and biaxiality, fatigue parameters were investigated. Axial and torsional biaxial fatigue loads were selected with the respective combination of five different phase differences of 0, 45, 90, 145 and 180 degrees and five biaxialities of 0, $1/\sqrt{3}$, 1, $\sqrt{3}$, ∞ . 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° went away from the circumferential direction and those were symmetric to the directions for tests with phase difference less than 90°. With increase of biaxialities, the fatigue crack initiated more apart from the circumferential direction of the specimen. These crack initiation direction were predicted using maximum tangential stress range and maximum shear stress range obtained at far-field and around the hole. Comparing these two stress parameters, 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.

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 (= $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)

1. 서론

다축 반복 하중에 의하여 많은 공학 구조물 혹은 부분품등은 사용 수명과 건전성에 제한을 받게 된다. 이러한 다축 피로 하중은 다축 하중의 크기와 축 간의 부하 위상차에 따라 피로 영향이 다르게 나타나고 있어 그 국부적인 응력 상태의 복잡성을 더욱 크게 한다. 이러한 복잡한 응력 상태의 조합은 국부적인 피로 손상의 정도를 정량화하는데 어려움을 주고 있다. 일반적으로 단축 하중(uniaxial loading)이나 비례 이축 하중(proportional biaxial loading)하에서 피로 손상은 일정한 방향에서 최대가 되고, 이러한 피로 손

[†] 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원
 E-mail:yhhuh@kriss.re.kr,

Tel:042-868-5386, Fax: 042-868-5635

^{*} 한국표준과학연구원 환경안전연구센터

상은 최대 전단 응력에 의하여 지배되고 그 작용면을 따라 발생하는 것으로 알려지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나, 축간 부하의 위상차가 존재하는 비비례 하중(non-proportional loading) 상태에서는 반복 하중이 작용하는 동안 작용 응력의 수준에 따라 주 응력의 방향이 계속 변하고, 또한 피로 손상을 지배하는 응력의 상태와 방향도 일정하지 않다. 또한 이러한 응력의 조합은 단축 하중하에서 나타나는 피로 손상과도 다른 경향을 보여준다. 이러한 비비례 하중에서의 위상차는 균열 발생의 방향에 대해서도 영향을 미치고 있다. Zhang과 Aki⁽⁵⁾은 반복적인 비틀림 응력에 이축의 정적 인장 응력이 부가됨에 따라 위상차에 따른 균열 발생 방향의 변화를 보여주었다. 이러한 피로균열의 발생은 최대 전단 변형률면에서 일어나는 것으로 일반적으로 보고되었으나,^(3,6) Ogata 등⁽³⁾과 Berad 등⁽⁴⁾은 90°의 이상(out-of-phase) 부하에서 균열 발생 방향이 수직 응력(normal stress) 혹은 수직 변형률과 관계있음을 보고하였다. 또한 원형 노치가 있는 시험편에서의 피로 균열은 최대 인장 변형률이 작용하는 면을 따라 발생하는 경향을 보이고 있으며,⁽³⁾ 허용학 등⁽⁷⁾은 이축 정적 하중이 부가된 이축하중에서 원형 노치에서 발생하는 균열의 방향은 최대 접선 응력 폭과 밀접한 관계가 있음을 보고하였다.

이와 같이 다축 하중의 위상차는 피로 손상의 예측을 복잡하게 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 다양한 다축 하중의 하중 형태에 따른 피로 손상을 조사하기 위하여, 이축성과 위상차의 영향이 고려된 이축 하중하에서 피로 균열 발생 방향에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서는 비틀림 하중과 축 하중의 다양한 조합 하중하에서 얻어진 실험 결과를 기반으로 수치해석과 이론적인 응력 상태를 결정하였고 이를 이용하여 피로 균열 발생을 지배하는 역학 인자를 제시하였다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 실험 방법

2.1.1 시험 재료 및 시험편

본 연구에서는 열간 압연된 스테인레스 304⁽⁷⁾를 사용하여 인장과 비틀림의 이축 응력을 동시에 가할 수 있는 얇은 두께를 가진 튜브형 시험편(thin-walled tubular specimen)⁽⁷⁾을 제작하였다.

시험편의 내경과 외경은 각각 10mm과 12.5mm이고, 시험 평행부는 50mm이다. 시험편의 중앙부에 직경 1mm의 관통 구멍을 가공하였다.

2.1.2 시험 장치 및 시험 방법

피로 시험은 이축 유압 피로 시험기(MTS810 system)을 이용하여 축 방향의 인장 하중과 비틀림 하중을 가하였고, 상온에서 하중 제어로 실시하였다. 이축 하중(biaxial loading)은 인장과 비틀림 방향의 하중에서 위상차와 이축성을 고려하여 하중 조합을 선택하였으며, 각각의 이축성에서는 5 종류의 위상차(phase difference)를 고려한 정현파의 이상 하중(out-of-phase loading) 조합으로 구성하였다. 이때의 각 이상 하중의 인장 하중과 비틀림 하중의 위상차(phase difference), ϕ 는 0°, 45°, 90°, 135° 그리고 180°이다. 되풀이 비틀림 응력의 최대치와 되풀이 인장 응력의 최대치와의 비인 이축비(biaxiality) λ ($\lambda = \tau_{\max} / \sigma_{\max}$)는 0, $1/\sqrt{3}$, 1, $\sqrt{3}$, ∞ 이며, 축 방향의 최대 응력은 205MPa이다.

되풀이 축 하중과 비틀림 하중의 하중비는 R=0.1로 하였고, 7Hz의 되풀이 속도로 부하하였다.

2.1.3 수치해석 방법

이축성과 위상차가 고려된 이축 혼합 하중하에서 얇은 두께의 튜브형 시험편의 구멍주위에서 발생하는 응력 분포는 유한 요소 해석(finite element analysis)으로 얻었다. 유한 요소 해석은 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 원형 구멍이 있는 시험편에서 유한 요소는 8점 셀 요소를 사용하였으며, Fig. 1과 같다. 경계 조건으로 시험편의 한쪽 끝에서 원주 방향과 축 방향의 변위를 구속하고, 반대쪽 한끝은 시험 하중 조건에 따라 선택된 축 방향과 비틀림 방향의 하중을 가하였다. 하중은 하중을 가하는

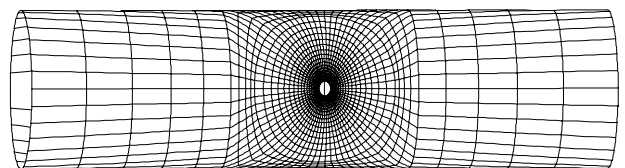


Fig. 1 Mesh used in stress analysis of thin-walled tubular specimen

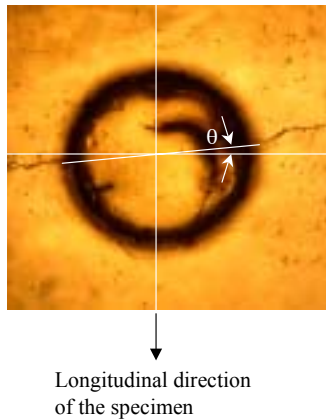


Fig. 2 Typical fatigue crack initiated around the hole of the thin-walled tubular specimen under cyclic axial-torsional loading.

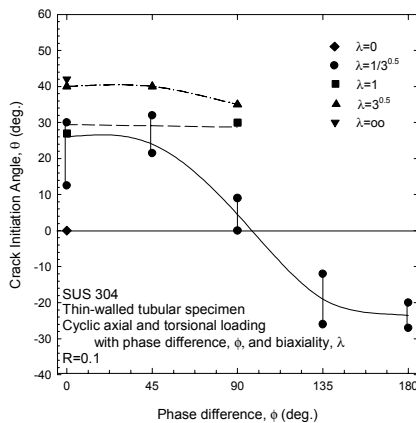


Fig. 3 Variation of fatigue crack initiation direction under cyclic axial-torsional loading with various biaxialities and phase differences

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 야기시킬 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 가

지는 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.

3. 결과 및 토의

3.1 피로 균열 발생 방향

위상차(phase difference)와 이축성(biaxiality)을 고려한 이축 하중하에서 피로 균열은 그 크기에 따라 각각 다른 특성을 가질 수 있다. 허용학 등은 위상차가 고려된 이축 하중하에서 피로 균열의 발생 방향이 위상차에 의존하고 있음을 보여준 바 있다. 본 연구에서는 이러한 두 영향인에 따른 피로 균열의 발생 방향의 의존성을 확인하기 위하여 각각 5수준의 위상차와 이축성에 대한 피로 균열의 발생 방향에 대한 고찰을 하였다. Fig. 2는 본 연구에서 얻어진 다축 피로 하중에 의하여 원형 노치 부근에서 발생한 균열의 전형적인 예를 나타낸다. 원형 노치 주위의 피로 균열은 시험편의 하중축에 대하여 원형 노치의 양쪽 방향에서 균열이 발생하였다. 이때 균열의 하중 조건에 따라 원형 노치 중심에 대하여 대부분 대칭적으로 발생하고 있다.

Fig. 2와 같이 발생한 균열의 방향을 위상차와 다축성에 대하여 정리하면 Fig. 3과 같다. 여기서 위상차(phase difference), ϕ 는 되풀이 축 방향하중과 비틀림 하중의 위상차를 의미하며, λ 는 되풀이 비틀림 응력의 최대와 인장 응력의 최대의 비, $\lambda = \tau_{max}/\sigma_{max}$ 를 나타낸다. 본 시험에서는 시험 위상차가 0°, 45°, 90°, 135°그리고 180°인 5개의 위상차와 이축성 λ 가 0, $1/\sqrt{3}$, 1, $\sqrt{3}$, 그리고 ∞ 의 다섯 응력 조건에 대하여 조사하였다. λ 가 $1/\sqrt{3}$ 인 다축성에서는 5개의 위상차에 대하여 시험 결과를 얻었으며, 그외의 다른 다축성

응력 조건에서는 위상차 0와 90에 대하여 결과를 정리하였다. 위상차 0°와 180°인 응력 조건에서는 시험편에 가해지는 응력, 즉 축 방향 응력과 비틀림 응력은 비례적(proportional)이나, 나머지 하중 조합 시험에서는 이들 두 응력은 비비례적(non-proportional)이다. 균열 발생 방향은 원형 노치의 중심에 중심을 둔 튜브형 시험편의 원주 방향에 대한 각을 나타낸다. 시험에서 얻어진 균열은 원형 노치둘레에서 두 방향으로 발생을 하였으며, 이들 두 균열은 각각 시험편의 양의 원주 방향과 음의 원주 방향에 대한 방향으로 측정하였다. λ 가 $1/\sqrt{3}$ 인 다축성시험에서 위상차 0°인 하중 조합에서는 균열 발생은 12.5°와 30°의 방향을 향하고 있었으며, 위상차 45°에서는 32°, 21.5° 그리고 위상차 90°에서는 0°와 9°인 방향으로 균열이 발생하고 있었다. 그리고 위상차가 90°보다 큰 하중 조합의 경우에는 위상차가 90°보다 작은 하중 조합의 경우와 시험편의 원주 방향과 대칭이 되는 결과를 보여주고 있다. 따라서 위상차가 증가할수록 균열 발생 방향은 시험편의 원주 방향으로 접근하고 90도를 넘어서는 다시 원주 방향에서 멀어지고 있는 대칭적인 특성을 나타내고 있다.

λ 가 0인 다축성 응력 조건, 즉 되풀이 축 하중만이 가해진 하중하에서는 균열 발생이 0도 부근에서 일어났으며, λ 가 ∞ 인 다축성 응력 조건, 즉 되풀이 비틀림 하중만이 가해진 하중하에서는

피로 균열은 42도 방향에서 발생하고 있다. 또한 다축성 λ 가 증가함에 따라 균열 발생 방향은 원주방향에 대하여 커지고 있음을 볼수 있다. 따라서 다축성에 대하여 피로 균열은 다축성의 증가에 따라 커지는 원주 방향에 대해 커지는 방향으로 발생하고 있으며, 다축성 λ 가 0과 ∞ 에서의 균열 발생 방향이 다축성에 따라 균열 발생 방향의 변화 범위의 양 경계를 나타내고 있다.

3.2 피로 균열 발생 예측

Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 원형 노치부근에서의 피로 균열의 발생 방향은 이축 피로 하중의 이축성과 이축의 위상차에 영향을 받는다. 이러한 두 영향 인자에 의한 피로 균열 발생 방향의 변화는 매우 의미가 있으며, 이에 대한 예측이 이루어질 필요가 있다.

일반적으로 다축 하중에 의한 피로 균열 발생에 대한 기구학적 고찰에서는 작용응력과 관련한 것으로 보고되었다. 따라서 본 연구에서도 피로 균열의 방향에 대한 작용 응력과의 관계성을 고찰하기 위하여 시험편에 작용하는 응력의 분포를 조사하였다. 이러한 작용 응력의 상태는 이론적인 방법에 의하여 노치에서 떨어진 위치(far-field)에서 그리고 유한 요소 해석을 통하여 노치 부근에서 각각 조사하였다. 본 연구에서는 이러한 응력 상태를 기반으로 피로 균열 발생의 방향을 예측할 수 있는 파라미터를 제안한다.

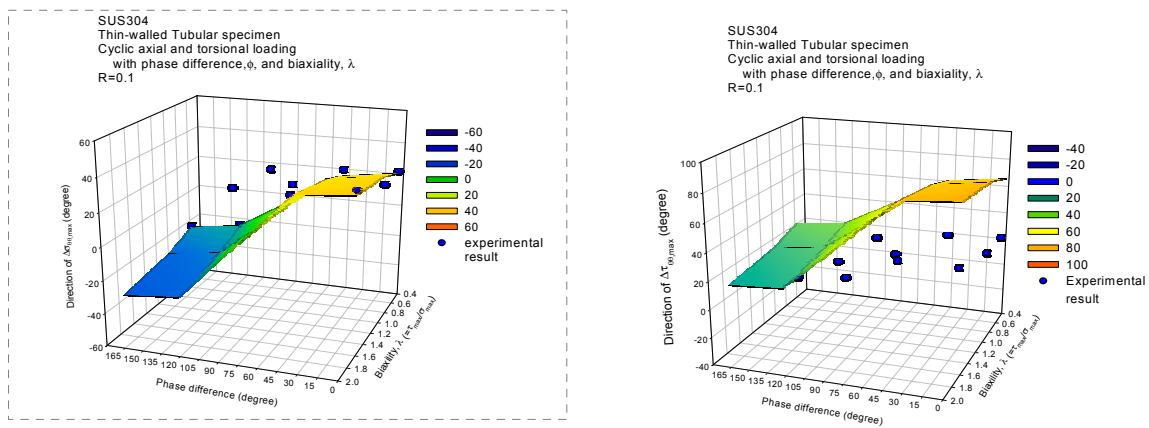


Fig. 4 Direction of (a) maximum tangential stress range and (b) maximum shear stress range obtained at far-field

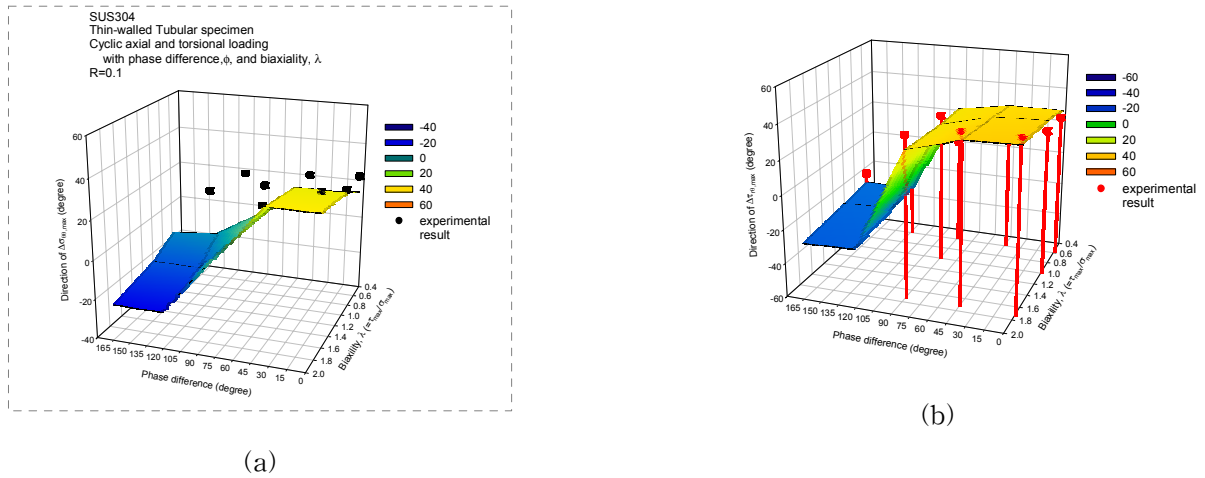


Fig. 5 Direction of (a) maximum tangential stress range and (b) maximum shear stress range obtained from FE analysis.

3.2.1 원거리에서 응력에 의한 균열 발생 예측
 얇은 두께의 튜브형 시험편에 이위상 축과 비틀림 방향의 하중(out-of-phase axial and torsional loading)이 하중비, R로 작용할 때 시험편에 작용하는 접선 응력과 전단응력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

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

여기서 σ_{max} 와 τ_{max} 는 각각 축 방향과 비틀림 방향의 최대 응력을 나타내고 ϕ 는 두 응력간의 위상차를 나타낸다. λ 는 시험편의 원주 방향에 대한 각을 나타내며, λ 는 이축성(biaxiality)로 σ_{max}/τ_{max} 이다. 이러한 두 응력이 최대가 되는 방향은 시험편에 가해지는 이 위상을 가지는 축 응력과 비틀림 응력의 수준과 이축성, λ 의 함수임을 알 수 있다.

허용항 등⁽⁹⁾은 위상차가 있는 이축 하중하에서 피로 균열의 발생은 최대 전단 응력 폭과 최대 접선 응력 폭에 지배되는 것으로 보고하고 있다. 따라서 위상차와 이축성이 고려된 다양한 하중하

에서의 피로 균열 발생의 예측이 이들 인자들과 관련한 가를 검토할 필요가 있다.

Fig. 4은 원형 노치에서 멀리 떨어진 영역(far-field)에서 식(1)과 (2)에 의하여 얻어진 최대 접선 응력 폭과 최대 전단 응력 폭의 방향을 나타낸다. Fig. 4(a)에 보여준 바와 같이 다양한 이축성과 위상차에 대해서 최대 접선 응력 폭의 방향은 실험으로부터 얻어진 균열 발생 방향과 비교적 잘 일치하고 있다. 반면에 Fig. 4(b)에서 보여준 바와 같이 최대 전단 응력 폭의 방향은 실험에 의하여 얻어진 피로 균열의 방향을 다소 크게 평가하고 있다. 이러한 Fig. 4에서 보여준 노치에서 멀리 떨어진 영역에서의 최대 접선 응력 폭은 노치 부근에서 발생하는 균열 발생 방향을 비교적 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다. 이는 다축 하중에 의하여 원형 노치 부근에서 피로 균열 발생을 지배하는 인자가 최대 접선 응력 폭임을 암시하고 있다.

3.2.2 노치 부근 응력에 의한 균열 발생 예측

원형 노치 부근에서의 피로 발생은 원형 노치 부근의 응력 상태에 지배를 받는다. 비록 앞에서 언급한 원거리에서의 응력 상태와 원형 노치 부근에서의 응력 상태는 유사할 것으로 기대되었지만, 실제적인 피로 균열 발생을 지배하는 원형 노치 부근에서의 응력 상태를 조사할 필요가 있다. 본 연구에서는 유한 요소 해석에 의하여 원형 노치 부근에서의 응력 상태를 조사하였으며,

앞에서와 같이 피로 균열 발생을 지배하는 유력한 두 인자인 최대 전단 응력과 최대 접선 응력의 폭의 유용성을 검토하였다.

Fig. 5은 다양한 위상차와 이축성의 이축 하중하에서 노치 부근에서 얻어진 최대 접선 응력과 최대 전단 응력의 폭의 방향을 유한 요소로 얻은 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)에서 보여준 바와 같이 최대 접선 응력 폭의 방향은 전체적으로 원형 노치부근에서 발생한 균열의 방향을 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다. 이는 노치로부터 원거리에서 얻어진 최대 접선 응력 폭과 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 원형 노치 부근에서 발생하는 균열은 접선 응력의 폭으로 잘 예측할 수 있으며, 노치 부근에서 균열의 발생 기구는 접선 응력 폭에 의하여 지배될 수 있음을 암시하고 있다. Fig. 5(b)는 원형 노치부근에서 얻어진 최대 전단 응력 폭의 방향을 나타낸다. 최대 접선 응력 폭과 같이 최대 전단응력 폭의 방향도 실험에서 얻어진 피로 균열 방향과 잘 일치하고 있다. 그러나 위상차 90도에서의 최대 전단 응력 폭은 실험 결과와 다소 다른 결과를 보이고 있다. Fig. 5에서 보여준 피로 균열 발생 방향은 최대 접선 응력 폭으로 비교적 잘 설명되고 있음을 알 수 있다. 이는 노치가 없는 평활재 시험편에서 알려진 전단 응력이 지배하는 기구와는 다른 경향을 보이고 있다. 따라서 응력이 집중되는 영역에서 균열 발생에 대한 기구학적 연구가 더 진행되어 질 필요가 있다.

4. 결 론

위상차와 이축성을 가지는 다양한 이축 하중하에서 원형 노치 부근에서 발생하는 피로 균열의 방향에 대한 고찰을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원형 노치 부근에서 피로 균열의 발생은 위상차가 증가함에 따라 시험편의 원주 방향으로 접근하였고 90도 이상의 위상차에서는 우너주 방향에서 멀어지고 있었다.

(2) 피로 균열은 이축성의 증가에 따라 원주 방향에서 더 멀어지고 있었다.

(3) 피로 균열의 발생 방향은 원형 노치 부근

과 먼거리에서의 최대 접선 응력 폭으로 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) 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.
- (8) Kalluri, S. and Bonacuse, P.J., 1993, "In-Phase and out-of-Phase Axial-Torsional Fatigue Behaviour of Haynes 188 Superalloy at 760oC," *ASTM STP 1191*, pp. 133~150.
- (9) Huh, Y.-H., Park, and Kim, J.Y., 2003, "Fatigue Crack Initiation around a Hole under Out-of-Phase Biaxial Loading," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 27, pp. 1695~1702.