

유한요소해석기법을 이용한 토크 시편의 축 오열 영향 분석

김주희* · 김윤재** · 허용학**

* 고려대학교 기계공학과, ** 한국표준과학연구원

Effects of Axial Misalignments on the Torque Specimens Using Finite Element Analysis

Ju-Hee Kim*, Yun-Jae Kim** and Yong-Hak Huh**

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ., ** Korea Research Ins. Of Standard and Science

(Received June 14, 2011 ; Revised August 17, 2011 ; Accepted August 18, 2011)

Key Words : FE Analysis(유한요소해석), Circular Specimen(환봉형 시편), Tubular Specimen(튜브형 시편), Concentric Misalignment(동심 오열, 편심), Angular Misalignment(각 오열), Combined Misalignment (복합 오열), Initial Yielding Condition(초기 항복조건)

초록: 본 논문은 3 차원 유한요소해석 기법을 이용하여 토크 시험을 위한 표준시험시편의 각도 및 동심 오열이 시편의 응력과 변형률 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 결과의 정량적 비교를 위해 각, 동심 및 복합 축 오열에 대한 평균 굽힘 변형률을 적용하였으며, 시편 형상에 따른 축 오열 영향을 확인하기 위해 환봉형 시편과 튜브형 시편에 대해 각각 유한요소해석을 실시하였다. 해석결과로부터 얻어진 변형률과 응력의 변화로 축 오열의 종류와 방향을 예측하는 일반적인 기준을 제시하였으며, 초기 항복조건을 적용하여 축 오열이 토크 시편의 초기 항복 모멘트에 미치는 영향을 분석하였다.

Abstract: Using three-dimensional (3-D) FE analyses, this paper provides a method for analyzing the effects on stresses and strains produced by angular and concentric misalignment of a test specimen for a torsion test. To quantitatively compare of the FE results, the average bending strain for the angular, concentric, and combined misalignment was proposed. To verify the effects of axial misalignment of the test specimens, we used both circular and tubular specimens. From the FE results, we proposed general predictions for the effects caused by the various types of axial misalignment and its direction. In addition, we confirmed the effect of initial yielding moment based on the initial yielding condition for axial misalignment of specimens in torsion tests.

- 기호설명 -

- r : 필렛부의 곡률 반경
- L_c : 시편 직선부의 길이
- d_i : 튜브형 시편의 내경 크기
- τ : 전단응력
- τ_{MAX} : 최대 전단응력
- $\theta_{mis-ang}$: 각 오열 크기
- $d_{mis-con}$: 동심 오열 크기
- θ : 비틀림 각

1. 서론

자동차 및 선박과 같은 운송기기와 산업기계에서 주로 사용되는 동력 전달 샤프트는 회전력을 전달하는 부재로, 토크에 의한 피로하중은 제품의 수명과

안전성에 밀접한 관련이 있다. 동력 전달 샤프트의 운전 중 진동 발생원인은 축의 오정렬에 의해 발생된다. 축 정렬은 회전력을 전달하는 부재의 운전 신뢰성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 중요하게 취급되어야 한다. 따라서 부품의 수명, 안전 및 신뢰성을 확보하기 위해서 구성 재료의 토크 저항 특성 분석이 필수적이며, 축 정렬오차를 최소화해야 한다. 현재 주로 사용되고 있는 다이얼게이지에 의한 축 정렬 방법은 정량적인 굽힘 모멘트를 계측할 수 없기 때문에 최상의 축정렬은 불가능하다고 볼 수 있다.⁽¹⁻⁴⁾

축 오열은 동력전달 샤프트에 예상치 못한 굽힘 응력을 발생시킴으로써 운전 중 진동을 유발하여 수명 및 내구성에 영향을 미친다.⁽⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 유한요소해석 기법을 이용하여 축 오열에 대한 영향을 분석하였다. 해석 결과의 정량적 비교를 위해 축 오열 미세오차를 평균 굽힘변형률을 기준으로 부여하였으며,⁽⁶⁻⁸⁾ 환봉형과 튜브형 시편에 대해 각각 해석을 수행하였

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

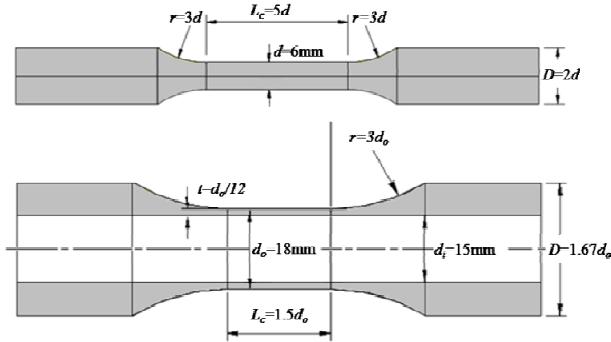


Fig. 1 Schematic of circular and tubular specimen⁽²⁾

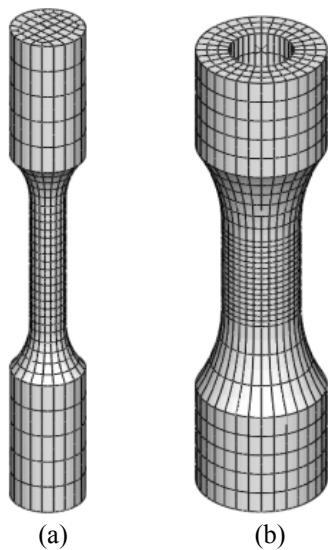


Fig. 2 FE modeling: (a) circular and (b) tubular specimen

다. 해석결과는 각, 동심 및 복합 오열에 대한 변형률과 응력 변화를 확인하였으며, 초기 항복조건 (initial yielding condition)을 기반으로 축 오열이 토크 시편의 한계모멘트에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서 제시하는 유한요소해석 결과는 토크 피로 시험 시편에 국한된 것으로 실험을 통해 발생하는 토크 제어 피로 시험기의 기계적 축 오열을 적용하였다. 비틀림 피로 시험기에서는 측정 센서(변형률 게이지)를 부착하여 굽힘량을 정량화하는 방법이 소개되어 있다.⁽⁶⁾ 하지만 기술 적으로 쉽지 않으며, 실제 실험을 통해서 다양한 축 오열에 대한 응력 및 변형률 변화를 확인하는 것은 시간 및 경제적으로 쉽지 않은 부분이다. 유한요소해석은 이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로 다양한 축 오열에 대한 정량적 분석을 가능하게 해준다.

Fig. 1은 본 연구의 해석 대상인 표준 토크 피로 시험 시편인 환봉형 및 튜브형 시편의 형상과 규격을 보여준다. 각 시편이 규격은 문헌^(6,9)을 참고하였다.

2. 유한요소해석

2.1 시편형상

Fig. 2는 표준 토크 피로 시험 시편에 대한 유

Table 1 Determination of axial misalignment

Classifi-cation	strain 1 (20 $\mu\epsilon$)		strain 2 (50 $\mu\epsilon$)		strain 3 (100 $\mu\epsilon$)	
	circular	tubular	circular	tubular	circular	tubular
Angular (μrad)	272	110	680	280	1360	560
Concentric (μm)	3.449	4.700	8.621	11.750	17.240	23.500

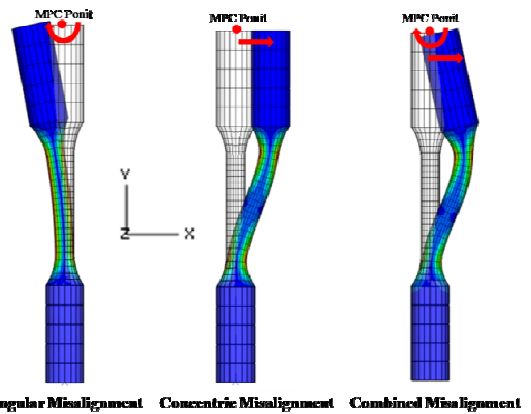


Fig. 3 Applied for test machine misalignment

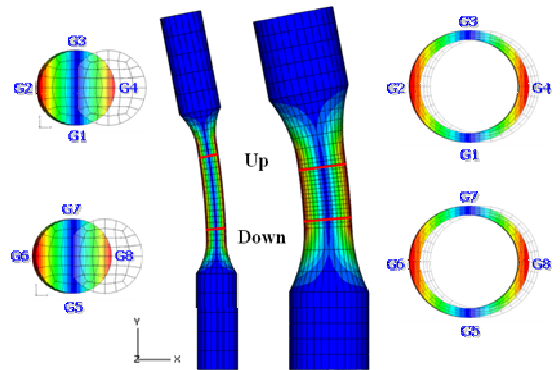


Fig. 4 Position of gage points and path

한요소해석을 위한 메쉬형상을 보여준다. 3 차원 유한요소해석을 위해 상용 프로그램인 ABAQUS V6.7⁽¹⁰⁾을 사용하였다. Fig. 2와 같이 환봉형 시험편은 총 절점(Node) 수가 7,641 개, 요소(element) 수는 1,584 개이며, 튜브형 시험편은 총 절점 수 17,153 개, 요소 수는 3,360 개로 요소형태(element type)는 C3D20R 이다.

2.2 축 오열 개념 및 조건 부여

축 오열은 실험기에서 발생하는 오열과 시험 시편에서 발생하는 오열로 구분된다. 본 연구에서는 시편에 대한 축 오열은 고려하지 않고 실험기에서 발생하는 오열만을 고려하였다. Fig. 3은 환봉형 시험편에서 발생할 수 있는 각 오열(angular misalignment), 동심 오열(concentric misalignment) 및 복합 오열(combined

Table 2 Determination of load

Classification	Misalignment 400 με		Misalignment 800 με		Misalignment 1200 με		Misalignment 1600 με		Misalignment 2000 με	
	circular	tubular	circular	tubular	circular	tubular	circular	tubular	circular	tubular
Torsion (N·m)	2.590	36.400	5.179	72.800	7.769	109	10.359	146	12.949	182

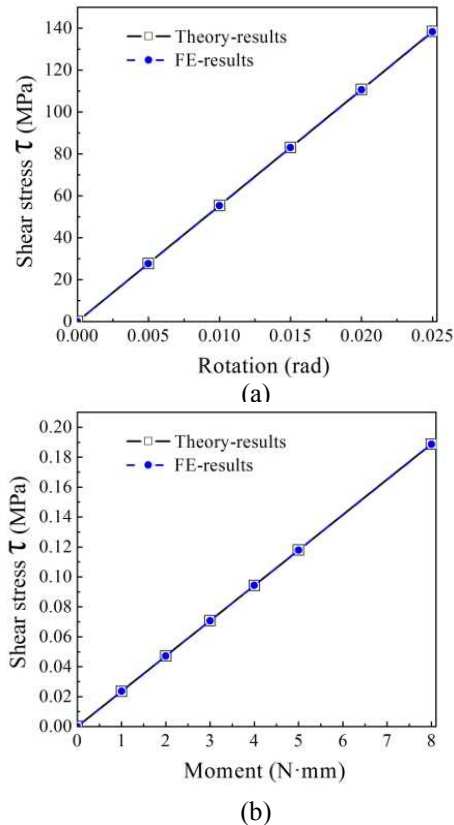


Fig. 5 Comparison of theory results from FE results; (a) moment control and (b) displacement control

misalignment)에 대한 해석 결과를 보여준다. 이는 튜브형 시편에서도 동일하게 적용되었다.^(2, 11-13)

축 오열은 상부 그림부 전체를 MPC 옵션을 사용하여 구속한 후, 각 오열은 z 축 방향의 회전 (Rotation)을 부여하였으며, 동심 오열은 x 방향의 변위(Displacement)를 부여하였다. 복합 오열은 각 및 동심 오열을 동시에 부여한 여러 가지 조합형태를 결정하였다.

축 오열 정도는 기계적 오차에서 기인하는 것으로 그 크기는 매우 작다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 정량적인 축 오열을 결정하였으며,

Fig. 4 와 같이 측정점에서의 평균 변형률을 기준으로 결정하였다. 평균 변형률은 다음과 같이 정의하여 결정하였다.⁽¹⁻⁴⁾

$$\epsilon_y = \frac{\epsilon_{y1} + \epsilon_{y2}}{2} = 20, 50, 100 \mu\epsilon \quad (1)$$

ϵ_{y1} 과 ϵ_{y2} 는 측정점에서의 축방향(y 방향) 변형률

의 최대값과 최소값이다. 유한요소(FE)해석을 통해 결정된 각도 및 동심 오열은 Table 1 과 같다.

2.3 토크(하중) 결정

해석을 위해 부여되는 토크는 측정점에서 최대 주변형률(maximum principal strain)의 평균값이 400, 800, 1200, 1600, 2000 με 이 되는 축방향 토크 (Torque)를 부여하였다. Table 2 는 유한요소해석을 통해 얻어진 최대 주변형률에 대한 토크 값이다.

2.4 유한요소해석

본 연구는 재료거동에 대한 기계적 물성을 다음 두가지 측면을 기준으로 유한요소해석을 수행하였다. 첫번째는 토크 시편의 축 오열에 대한 응력과 변형률 변화를 관측하기 위한 재료거동이다. 이 과정에서는 재료의 소성변형이 고려대상이 아니기 때문에 탄성해석을 수행하였다. 하지만 충분한 경향성을 확인하기 위해 재료의 소성역까지 탄성거동으로 가정하였으며, 두번째는 축 오열이 재료의 초기 항복(initial yielding)에 미치는 영향을 확인하기 위한 가정으로 재료거동을 탄성 완전 소성재료로 가정하였다. 이를 기준으로 재료에 발생하는 초기 항복시점을 결정하여, 축 오열이 한계 모멘트에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 결과분석

3.1 FE 해석의 타당성 검증

해석의 신뢰성과 정확성을 검증하기 위해 이론값과 유한요소해석 결과값을 비교하였다. 원형 단면 축에 대해 일정한 크기의 토크(T)가 작용할 때 재료 내부와 표면에서의 전단응력은 다음과 같다.^(3, 14-17)

$$\tau = \frac{Tc}{J}, \quad \tau_{MAX} = \frac{Ty}{J} \quad (2)$$

여기서, T는 부재의 횡단면에 작용하는 내부의 토크 합을 나타내고, J는 시편 시편의 극관성모멘트, c는 중심축으로부터 반경방향의 거리, y는 원형축의 외부 반경이다.

축 방향에 대해 일정한 각도의 변위를 부여하여 발생하는 전단응력값을 계산하기 위해서 비틀림각에 대한 정의를 이용하였다. 비틀림 각과 토크의 관계는 다음과 같다.^(14, 15)

$$\theta = \frac{Tl}{GJ} \quad (3)$$

여기서, l은 시편 직선부의 길이이며, G는 전단탄성계수(shear modulus of elasticity)로 탄성계수(elastic modulus)와 푸아송 비(Poisson's ratio)로부터 구할 수 있다. 이러한 관계로부터 모멘트 및 변위를 부여하여 식 (2)와 (3)으로부터 계산된 이론값과 유한요소

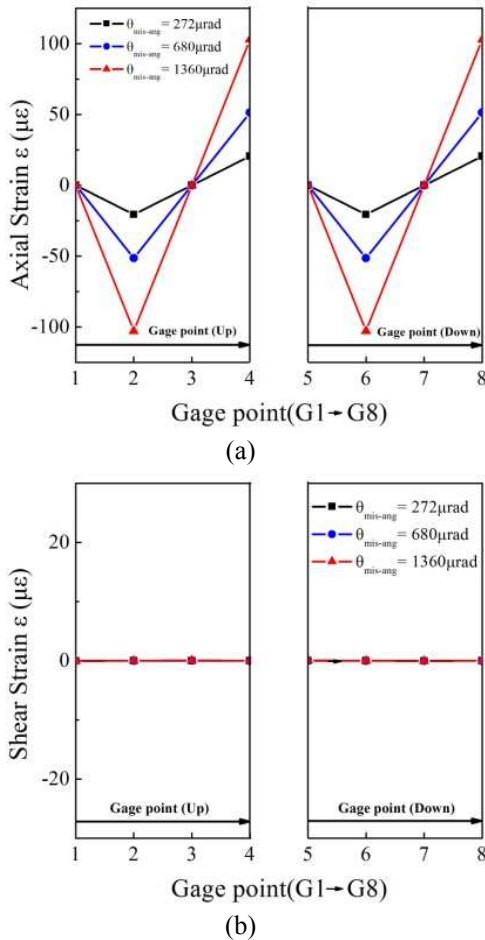


Fig. 6 (a) Axial strain and (b) shear stain under different angular misalignment

해석 결과값을 비교하였다. Fig. 5는 환봉형 시편에 대한 이론값과 유한요소해석 결과를 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 2%이내의 오차로 두 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 진행하는 유한요소해석 결과값은 재료가 가지고 있는 기계적 성질을 반영한다고 볼 수 있다.

3.2 축 오열과 변형률 변화

축 오열이 시편의 변형률 변화에 미치는 영향을 확인하기 위해 일정한 각($\theta_{mis-ang}$) 및 동심($d_{mis-con}$) 오열을 부여하여 측정점에서의 축 및 전단변형률을 확인하였다.

3.2.1 각 오열에 따른 변형률 변화

Fig. 6은 환봉형 시편에서 각 오열에 대한 축 및 전단방향 변형률을 보여준다. 순수한 축 오열에 대한 변형률 변화를 확인하기 위해 토크를 부여하지 않은 상태에서 해석을 수행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 축방향 응력(Fig. 6(a))은 상부 및 하부 동일한 측정점에서 동일한 크기와 방향의 변형률 분포를 보이고 있지만, 전단방향 변형률(Fig. 6(b))은 발생하지 않는다. 즉, 각 오열은 시편의 전단응

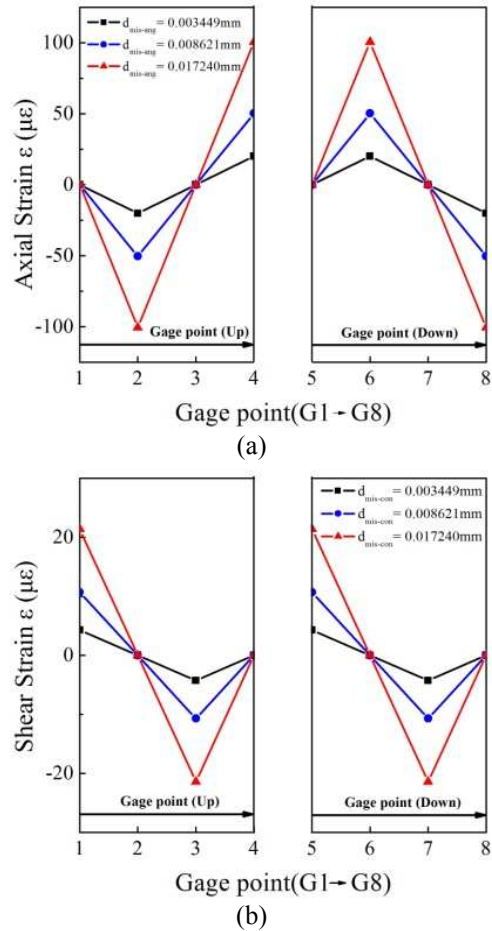


Fig. 7 (a) Axial strain and (b) shear stain under different concentric misalignment

력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.2.2 동심 오열에 따른 변형률 변화

Fig. 7은 동일한 시편에 동심 오열이 주어졌을 때, 축방향 및 전단방향 변형률 변화를 보여주고 있다. 각 오열과는 달리, 축방향 응력(Fig. 7(a))은 상부와 하부 측정점에서 축방향 응력이 크기는 같지만 방향이 반대이다. 반면, 전단변형률은 축방향 변형률이 0인 지점에서 최대값을 가지며, 상부와 하부 측정점이 동일한 크기와 방향을 가짐을 알 수 있다. 이는 오열이 발생한 선상을 기준으로 수직 방향의 측정점인 G1, G3에서 전단변형이 발생함을 알 수 있다. Fig. 6과 7의 결과는 토크가 작용하는 경우에도 동일한 경향을 가진다. 단, 토크는 시편의 전단변형을 지배하므로 전단변형률은 토크에 비례하여 증가한다.

복합오열에 의한 변형률 변화는 오열의 조합에 따라 다양한 결과가 나타난다. 본 연구에서는 변형률 변화에 대한 결과는 논하지 않고, 응력변화에 대한 결과를 비교하도록 하겠다(3.2 절 참고).

3.2.3 변형률 변화로부터 오열 구분

각 및 동심 오열로 인한 축 및 전단변형률 분

Table 3 Axial Strain distribution under misalignment

Misalignment	Upper path				Down path				Note
	0(G1)	0.25(G2)	0.5(G3)	0.75(G4)	0(G5)	0.25(G6)	0.5(G7)	0.75(G8)	
Angular	0	-	0	+	0	-	0	+	
Concentric	0	-	0	+	0	+	0	-	

Table 4 Shear Strain distribution under misalignment

Misalignment	Upper path				Down path				Note
	0(G1)	0.25(G2)	0.5(G3)	0.75(G4)	0(G5)	0.25(G6)	0.5(G7)	0.75(G8)	
Angular	0								
Concentric	+	0	-	0	+	0	-	0	

Table 5 Stress distribution under angular misalignment

Classification	Position of the measurement				Note
	0°~90°	90°~180°	180°~270°	270°~360°	
Shear	0	0	0	0	Same at all path
Axial	0	(Compression)	0	(Tension)	

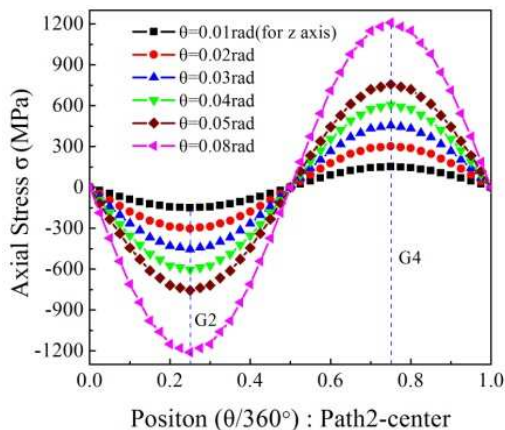


Fig. 8 Axial Stress under angular misalignment

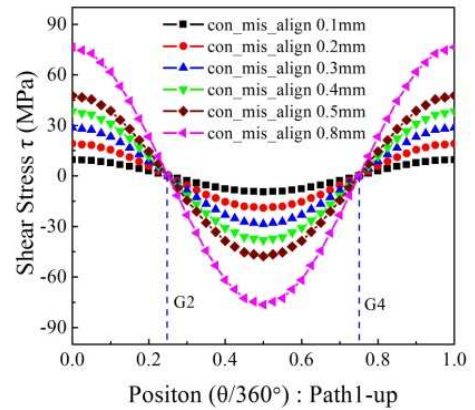
분포가 측정 위치별로 확인한 차이를 보이기 때문에 변형률 분포로부터 축 오열의 종류와 방향을 판별할 수 있다. 본 연구에서 수행된 오열의 특성은 Table 3, 4에서 확인할 수 있으며, 각 및 동심 오열이 변형률 변화에 미치는 영향은 구분이 명확하다.

3.3 축 오열과 응력 변화

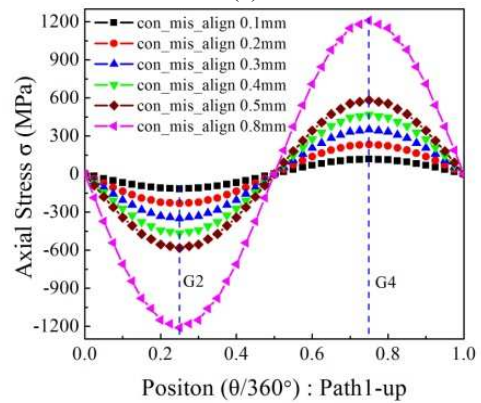
편차가 부여됨에 따라 시편 직선부(L_c)의 상·하부(Fig. 4) 및 중앙에서 축 및 전단 응력분포를 분석하였다. 오열에 대한 응력변화를 비교하기 위해 각 오열은 0.01 rad ~ 0.08 rad 까지, 동심 오열은 0.1mm ~ 0.8mm 까지 변화시켰다.

3.3.1 각 오열에 따른 응력변화

앞에서 각 오열은 축 방향 변형에만 영향을 미침을 확인하였다. Fig. 8은 중앙부 경로에서 각 오열의 증가에 따른 환봉형 시편의 축 방향 응력변



(a)



(b)

Fig. 9 Stress distribution under concentric misalignment

화를 나타낸 그래프이다. 튜브형 시편의 축 방향 응력분포도 Fig. 8과 동일한 형태의 응력분포를 보인다. 이러한 응력 분포는 상부 및 하부 경로에서도 동일한 크기와 방향을 갖는다. 따라서, 시편 표면에서의 축 방향 응력이 측정경로에 무관하게 원주방향으로 인장과 압축이 걸리는 경우에는 각 오열이 발생한 것을 의미한다. Table 5는 각 오열이 발생한 경우, 시편표면의 전단 및 축 방향 응력분포를 나타낸다.

3.3.2 동심 오열에 따른 응력변화

x 방향으로 변위로 부여된 동심 오열은 각 오열과는 달리 전단응력과 축 방향 응력에 영향을 미치며, 각각의 경로(Path)별로 축 방향 응력분포가 다르게 분포함을 알 수 있다. Fig. 9는 동심 오열의 크기에 따른 상부경로에서의 전단 및 축 방향 응력 분포를 보여준다.

동심 오열이 주어진 경우 전단응력은 경로별로 일정한 응력 경향을 갖지만, 축 방향 응력은 Fig. 10과 같이 중앙부 및 하부 경로에서의 다르게 분포한다. 즉, 축방향 응력은 경로 2에서는 변화가 없고, 경로 3에서는 경로 1과 대칭적인 응력분포를 나타낸다. 이러한 응력 분포는 튜브형 시편에서도 동일하다. 동심 오열에 대한 경로별 응력분포는 Table 6과 같이 정리할 수 있다.

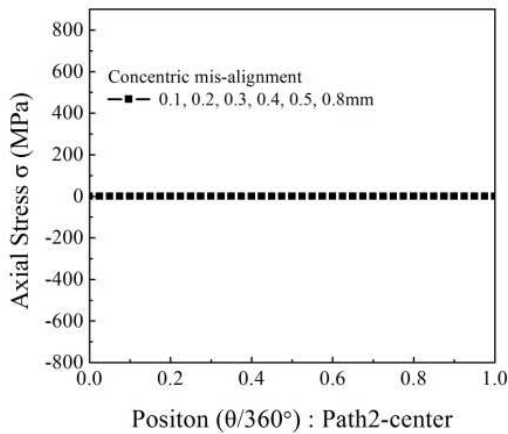
Table 6 Stress distribution under concentric misalignment

Classification	Position of the measurement				Note
	0°~90°	90°~180°	180°~270°	270°~360°	
Shear	+	-	+	-	Path 1, 2, 3
Axial	-	-	+	+	Path1
	0				Path2
	+	+	-	-	Path3

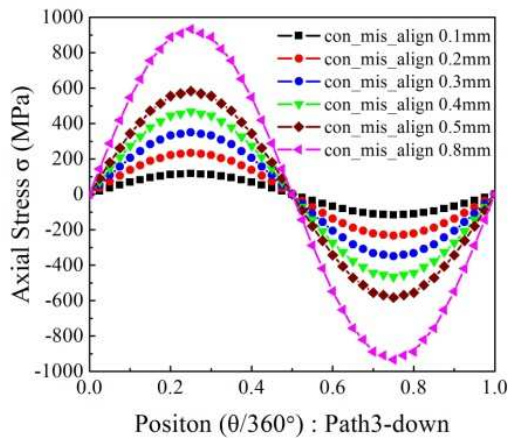
Table 7 Stress distribution under combined misalignment

Classification	Angular & concentric misalignment (90°)				Angular & concentric misalignment (0°)			
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8
Con.	+0.1	-0.1	+0.1	-0.1	+0.1	-0.1	+0.1	-0.1
Ang.	+0.01	+0.01	-0.01	-0.01	+0.01	+0.01	-0.01	-0.01

Note
 mis-con : displacement in x-axis direction
 mis-ang : rotation on z-axis



(a)



(b)

Fig. 10 Axial Stress under concentric misalignment

3.3.3 복합 오열에 따른 응력변화

복합 오열은 각 오열과 동심 오열의 다양한 조합에 의해 발생된다. 따라서 본 연구에서는 특별한 경우에 해당하는 몇가지 조합형태의 복합 오열에 대해 소개하고자 한다. Fig. 11 은 튜브형 시편에 복합 오열이 부여된 4 가지 경우에 대한 유한요소해석 모델을 보여준다.

복합 오열의 조합은 Table 7 과 같이 8 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 각 오열과 동심 오열이 동일한 방향으로 발생한 모델과 90 도 어긋난 모델을 고려하였으며, 부여된 편차의 크기는 표에 나타내었다. 마찬가지로 응력변화는 튜브형 시편과 환봉형 시편 모두 동일한 경향을 갖는다.

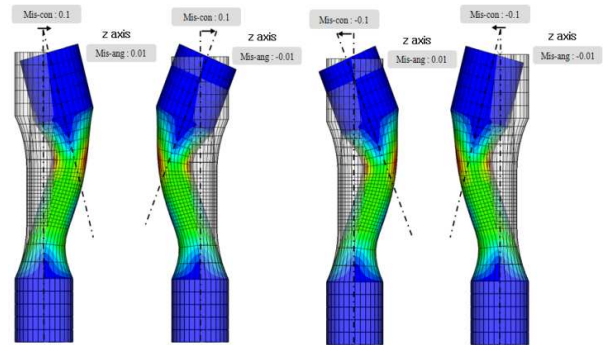
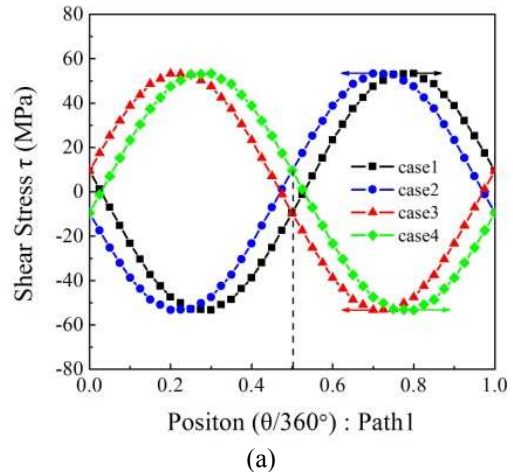
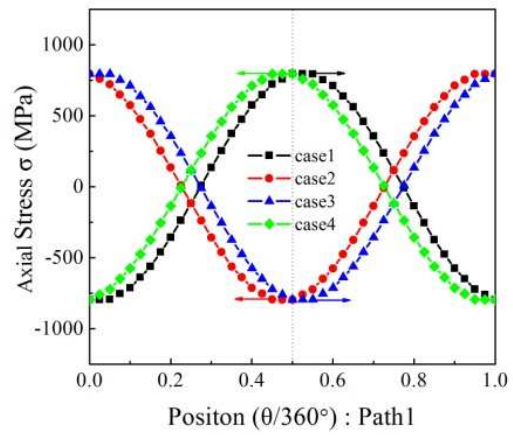


Fig. 11 Combination of the angular and concentric misalignment (Tubular specimen)



(a)



(b)

Fig. 12 Stress distribution under combined misalignment (case 1~4)

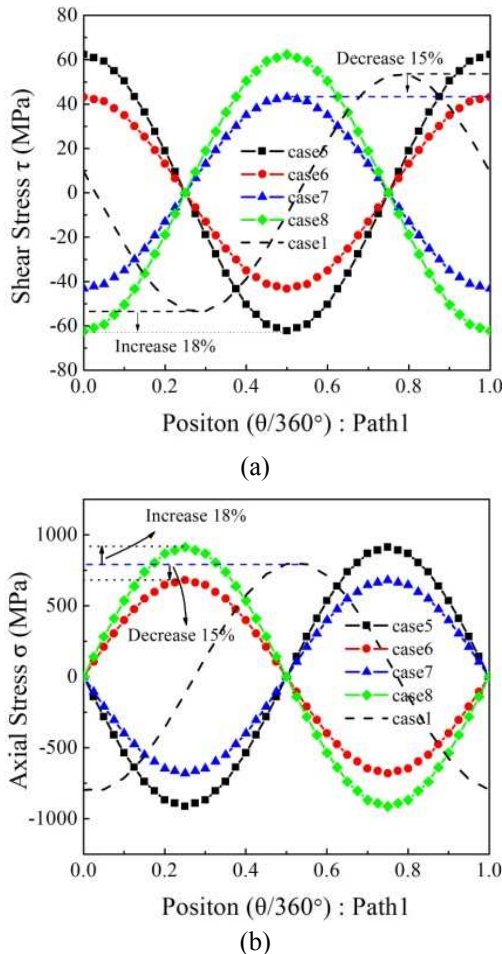


Fig. 13 Stress distribution under combined misalignment (case 5~8)

복합오열의 경우 응력변화는 Case 별, 경로별로 다르지만 일정한 경향성을 갖는다. Fig. 12는 Case1~4에 대한 전단 및 축 방향 응력 해석결과를 보여준다. 그림에서 보면 전단응력과 축 방향 응력의 최대값과 경향성은 일정하지만 응력밴드가 좌우로 이동하였음을 알 수 있다. 앞서서도 언급된 바와 같이, 전단응력은 동심 오열로 발생하며, 축 방향 응력은 동심과 각 오열에 의해 발생한다. 따라서 Fig. 12(a)에서 전단응력은 동심 오열로 발생한 결과이며, 각 오열로 인해 응력 밴드가 이동했다는 것을 알 수 있다. 축 방향 응력도 동일한 맥락에서 이해하면 될 것이다.

Fig. 13은 Case 5~8에 대해 전단응력과 축 방향 응력을 비교한 그래프이다. 그림에서 점선은 Case 1에 대한 응력 결과값으로 전체적인 응력 밴드가 90°이동하였음을 알 수 있다. 특이할 만한 점은 Case 1~4와 달리 응력 최대값에 차이가 있다는 것이다. Case 5와 8의 전단응력과 축 방향 응력은 약 18% 상승하였으며, Case 6과 7은 전단응력과 축 방향 응력이 15% 감소하는 것으로 확인 되었다. 이는 경로 2와 3에서도 마찬가지이다. 따라서 복합 오열의 크기도 중요하지만 작용하는 방향에 따라 시편에 미치는

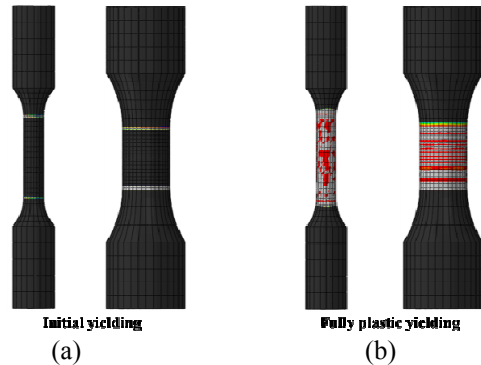


Fig. 14 Comparison of initial yielding and fully plastic yielding

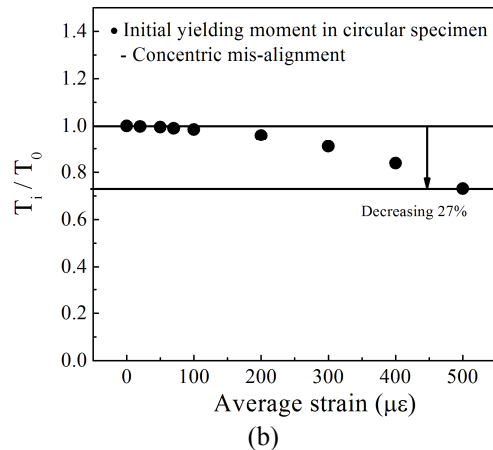
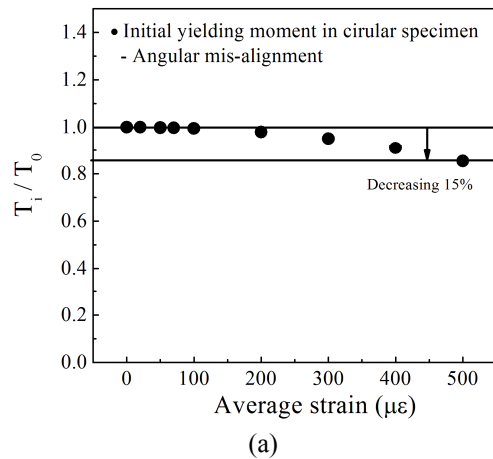


Fig. 15 Initial yielding moment for circular specimen

영향은 다양하며, 경우에 따라 응력 상승효과가 발생함을 알 수 있다.

3.4 축 오열이 초기 항복에 미치는 영향

회전력을 전달하는 토크 부재는 표면에서 전단 응력이 최대가 되며, 재료의 항복은 표면에서부터 발생한다. 금속재료의 항복과 관련하여 초기 항복 조건(initial yielding condition)은 재료내에서 국부적인 항복발생을 한계토크(모멘트)으로 정하는 방법이다.⁽¹⁵⁾ 본 연구에서는 이러한 초기 항복조건

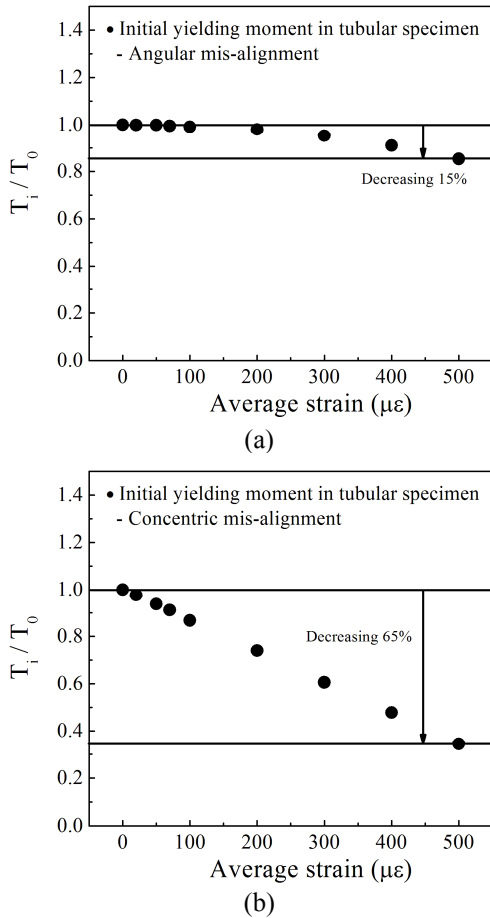


Fig. 16 Initial yielding moment for for tubular specimen

을 기준으로 축 오열이 토크 시편의 초기 항복 모멘트에 미치는 영향을 확인하였다. Fig. 14는 초기 항복과 완전소성항복 시점에서의 유한요소해석 결과를 보여주고 있다. 그림에서 시편의 직선부 (L_c) 끝단에서 초기 항복이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 초기 항복 발생시점에서의 모멘트를 초기 항복 모멘트로 정의하였다. 축 오열의 영향을 정량화하기 위해 시편별로 평균 변형률이 일정한 각 및 동심 오열을 부여하여 비교하였다.

Fig. 15는 환봉형 시편의 각 및 동심 오열에 대한 초기 항복 모멘트(T_i)의 정량화 결과를 보여주고 있다. T_0 는 축 오열이 없는 상태에서의 초기 항복 모멘트이다. 평균 변형률 200 $\mu\epsilon$ 이상에서 초기 항복 모멘트가 감소하는 것이 뚜렷하며, 각 및 동심 오열이 500 $\mu\epsilon$ 일 때 각각 15%, 27% 감소하였다.

Fig. 16은 튜브형 시편의 각 및 동심 오열에 대한 초기 항복 모멘트의 정량화 결과를 보여준다. 환봉형 시편과 마찬가지로 평균 변형률 200 $\mu\epsilon$ 이상에서 초기 항복 모멘트의 감소가 뚜렷하며, 평균 변형률 500 $\mu\epsilon$ 일 때, 각 오열에 대한 영향은 15%로 동일하지만, 동심에 대한 영향은 65% 감소하여 환봉형 시편에 비해 취약함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석 기법을 이용하여 토크 시험 시편의 축 오열이 변형률과 응력에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며, 초기 항복 조건을 적용하여 축 오열이 시편의 초기 항복모멘트에 미치는 영향을 확인하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 각 및 동심 오열은 응력과 변형률 분포에 영향을 미침을 확인하였고, 분포의 경향을 통해 각 및 동심 오열의 특성을 예측할 수 있다.
- 복합적으로 발생하는 오열은 경우에 따라 응력을 증가시키는 원인이 되기도 한다(case5, 8의 경우 18% 상승)
- 초기 항복모멘트는 축 오열 증가에 따라 감소한다. 각 오열이 발생한 경우 환봉형과 튜브형 시편은 15% 감소하며, 동심 오열이 발생한 경우 환봉형 시편은 27%, 튜브형 시편은 65% 감소하였다.

토크 시편의 피로 수명 예측은 실험적으로 매우 어려운 과정으로 수치 해석적으로 검토한 본 연구의 결과는 실험에서 얻기 힘든 다양한 오열에 대해 변형률과 응력의 변화를 기술하고 있어, 실험의 제한성을 극복하는 대안으로 축 오열에 대한 기준을 설정하는데 도움을 줄 것으로 판단한다.

후기

이 논문은 한국표준과학연구원 지원으로 수행하는 “금속재료의 토크 제어 피로 시험 국제 표준안 개발” 사업의 지원을 받아 수행된 것입니다.

참고문헌

- (1) Kim, K. S., Jung, H. C., Kim, T. Y., Lee, S. H. and Yoon, J. H., 1997, “A Study on the Improvement of Rotor Axes Arrangement Method Through the Stress Analysis,” *KSPE Fall Annual Conference*, pp. 355~360.
- (2) Na, S. S., Kim, I. C., Kim, K. S. and Kim T. Y., 1999, “A Study on Shaft Alignment of the Rotating Machinery by Using Strain Gages,” *KSMTE Fall Annual Conference*, pp. 63~68.
- (3) Kim, K. S., Jang, W. S., Na, S. S. and Jung, H. C., 2002, “A Study on Shaft Alignment of the Rotating Machinery by Using Strain Gages,” *J. of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, pp. 126~132.
- (4) Kim, K. S., Lee, D. H., Jung, H. C., Kim, T. Y., Na, S. S. and Kim, I. C., 1998, “Improvement of Rotor Axes Arrangement Under the Static State by Using Strain Gages Method,” *KSMTE Spring Annual Conference*, pp. 117~122.

- (5) Hyuck, B. M., Kim, J. H., Baek, U. B., Lee, H. M. and Nahm, S. H., 2010, "A Study on Effect of Axial Alignment to a Fatigue Life," *KSME Spring Annual Conference*, pp. 234~235.
- (6) ASTM International, Designation : E1012-05, 1999, *Standard Practice for Verification of Test Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application*, pp. 1~11.
- (7) ASTM International, Designation : E2207-08, 2002, *Standard Practice for Strain-Controlled Axial-Torsional Fatigue Testing with Thin-Walled Tubular Specimen*, pp. 1~8.
- (8) ASTM International, Designation : E466-96, 2002, *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*, pp. 1~5.
- (9) Kim, J. H., Kim, Y. J. and Huh, Y. H., 2008, "The Analysis on the Shape of a Standard Test Specimen for the Torsion Test and The Effects of Misalignments," *KSME Th10F004*, pp. 155~160.
- (10) 2008, ABAQUS Version 6.7, User's Manual, Dassault Systemes.
- (11) Wu, C. and Rummeler, R., 1979, "Analysis of Misalignment in the Tension Test," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol 101, pp. 68~74.
- (12) Hlomes, A., 1975, "Continuous Servo-Controlled Alignment of Specimens in Materials Testing," *Experimental Mechanics*, Vol 15, pp. 358~364.
- (13) Robison, D., 1969, "Misalignment Detector for Axial Loading Fatigue Machines", *Technical Note 480, National Bureau of Standards, Washington, DC.*
- (14) Hibbeler, R., 2005, *Mechanics of Materials 5th edition*, Prentice Hall, pp. 117~254.
- (15) Dowling, N., 2007, *Mechanical Behavior of Materials 3th edition*, Pearson Education, pp. 849~868.
- (16) Brown, M., 1978, "Torsional stresses in tubular specimens," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 13, pp. 23~28.
- (17) Miller, K. and Chandler, D., 1969, "High Strain Torsion Fatigue of Solid and Tubular Specimens," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 184, pp. 433~448.