

# 비틀림 시험에 대한 표준시험시편 형상 및 축 정렬 이상 영향 분석

김주희\* · 김윤재† · 허용학\*\* · 제진호\*

## The analysis on the shape of a Standard Test Specimen for the Torsion Test and The Effects of Misalignments

Ju-Hee Kim, Yun-Jae Kim, Chi-Yong Park, Yong-Hak Heo and Jin-Ho Je

**Key Words :** FE analysis(유한요소 해석), Circular specimen (환봉형 시험편), Tubular specimen(튜브형 시험편), Concentric mis-alignment(편심 편차), Angular mis-alignment(각도 편차), geometry parameter(형상변수)

### Abstract

Using a three-dimensional (3-D) FE analyses, this paper provides the shape optimization of the standard test specimen for the torsion test, as well as a method for analyzing effects of misalignment under the angular and concentric misalignment. For verification, FE analysis is performed, which is designed for the perfectly full-model. To optimize the design shape of the torsion-controlled fatigue test specimen, we performed sensitivity analysis using shape parameters. Additionally, two kinds of misalignment (angular misalignment and concentric misalignment) are applied to the circular and tubular specimens to show effects of misalignments in the FE analysis. The present results will provide valuable information for designing shafts for every kind of mechanical system under torsional force.

### 기호설명

$r$	필렛부의 곡률 반경
$L_c$	시편 직선부의 길이
$d_i$	튜브형 시험편의 내경 크기
$\tau_{FEM}$	유한요소 해석 전단응력
$\tau_{TH}$	이론 해석 전단응력
$\varepsilon_o$	평균 변형률
$\varepsilon_{bi}$	국부 굽힘 변형률
$\varepsilon_{bi.sp}$	시편고유 굽힘 변형률
$\varepsilon_{bi.mc}$	기계장치에 의한 굽힘 변형률
$B$	최대 굽힘 변형률
$\beta_{mc}$	굽힘비율(Percent bending)

### 1. 서론

자동차 및 선박과 같은 운송기기 및 산업기계에서 토오크 변환장치, 동력 전달 샤프트 그리고 엔진 동력 전달 장치와 같은 부품의 회전 토오크에 의한 피로하중은 제품의 수명과 안전성에 밀접한 관련이 있다. 따라서 이러한 부품의 수명, 안전 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 구성 재료의 토오크에 대한 저항 특성 분석이 필수적으로 요구된다. 그럼에도 불구하고 각종 부품소재의 편심 편차 및 각도 편차에 대한 영향요소가 고려되어 설계에 반영되는 사례는 찾아보기 어렵다.

어떤 금속재료의 특성분석은 제시된 표시시험법 통해 구할 수 있으나, 실험의 제한성을 극복하기 위해서는 유한 요소 해석적 접근에 입각한 다양한 영향 평가가 필요하다. 특히, 토오크를 받는 금속 재료 구성품은 축 정렬 이상 영향에 따라 제품의 수명, 안전 및 신뢰성에 상당한 영향을 받을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 3 차원 유한 요소 해석을 통해 토오크 제어 피로 시험편의 설계 형상을 제조명해

† 고려대학교 기계공학과  
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr  
TEL: (02)3290-3372 FAX : (02)962-9290

\* 고려대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한국표준과학연구원

보고자 한다. 이를 위해 시험 시편 형상 파라미터를 이용한 민감도 분석을 실시하여 적절한 시험 시편 형상을 결정하고, 편심 및 각도 미 정렬 영향을 분석, 시편 내부변화를 확인하고, 재료의 축정렬 이상유무를 판단한다.

해석을 위해 다양한 변수의 적절한 범위를 설정하여 편심과 각도 미 정렬 시 발생하는 재료 내부의 변형을 변화 알아보고, 측정점에서 굽힘 변형률의 크기를 통해 축 정렬 이상유무를 판단할 수 있을 것이다.

기본적으로 미국 재료 시험협회가 제시하고 있는 비틀림 표준 시편을 사용하여 형상 최적화를 실시하였으며, 완전-탄성재료를 사용하여 3 차원 유한요소 해석을 수행하였다.

유한요소 해석은 실험적 방법을 통한 토오크 제어 피로 시험의 미세 오차에 대한 제한사항을 극복하고, 다양한 시편 형상, 구속조건 및 하중조건에 대한 해석을 통해 실험적 방법의 물리적 한계 및 시간적 제한사항을 극복할 수 있을 것으로 판단한다. 또한, 해석을 통한 결과는 재료 피로 수명평가를 결정하는데 필요한 기초적인 데이터로 제공될 수 있을 것이다.

## 2. 시편형상 및 해석조건

### 2.1 시편형상

본 연구에 사용된 비틀림 시험 시편 형상은 Fig. 1 에 나타내었다. 미국재료시험협회(ASTM)에서 시편 규격을 지정해 놓고 약간의 공차만을 허용한다.

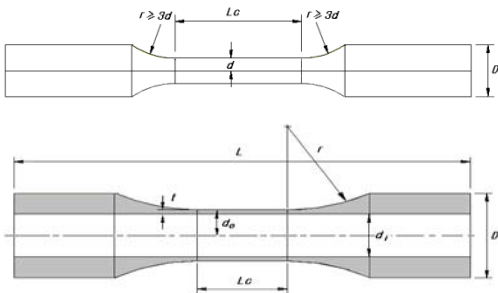


Fig. 1 Schematic of circular & tubular specimen

Table 1 ISO standard for torsion specimen and analysis conditions

구분	항목	ISO 기준	해석 조건
환봉형 Circular	- diameter of cylindrical gauge length	$5 \leq d \leq 12 \text{ mm}$	6
	- length of test section	$L_c \leq 5d$	30
	- transition radius	$r \geq 3d$	18
	- external diameter (grip end)	$D \geq 2d$	12.5
튜브형 Tubular	- wall thickness in the test section	$0.05 \text{ to } 0.1 \text{ do}$	1.5
	- outer diameter in the test section, do	do	18
	- transition radius, r	$\geq 3do$	54
	- length of test section, Lc	$1 \text{ to } 3do$	26.94
	- external diameter (grip end)	$D \geq 1.5do$	30

유한요소 해석은 Table 1 의 시험편 제원에 대해 모델링하여 ABAQUS 해석을 수행하였다. Fig.2 와 같이 환봉형 시험편은 총 절점(Node) 수가 7,642 개, 요소(Element) 수는 1,584 개 이며, 튜브형 시험편은 총 절점 수 17,153 개, 요소 수는 3,360 개로 요소형태(Element Type)는 C3D20R 로 해석을 실시하였다.

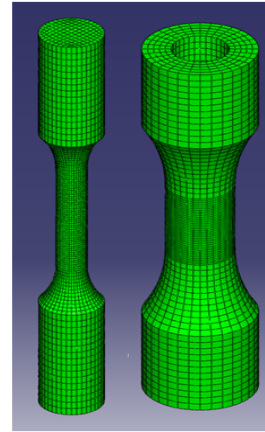


Fig. 2 FE Modeling

### 2.2 해석조건

Fig.3 과 같이 측정값은 시편의 직선부 길이의 75%지점에서 측정하며, 원주방향으로 각각 90 도 위치인 4 개의 절점에서 측정하였다. 이는 ASTM 에서 제시하는 기준으로 환봉형과 튜브형 시편 평형부의 75% 길이에 위치하도록 하여 시험편 경계 효과를 최소화하였다. 측정점의 위치는 각각 다음과 같다.

- Circular 시편 :  $L_g = 0.75L_c = 0.75 \times 30 = 26.94 \text{ cm}$

- Tubular 시편 :  $L_g = 0.75L_c = 0.75 \times 26.94 = 20.205 \text{ cm}$

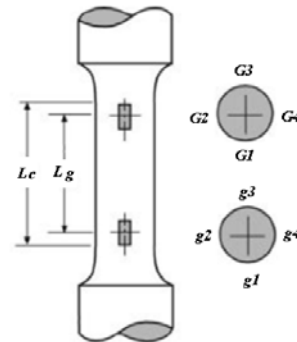
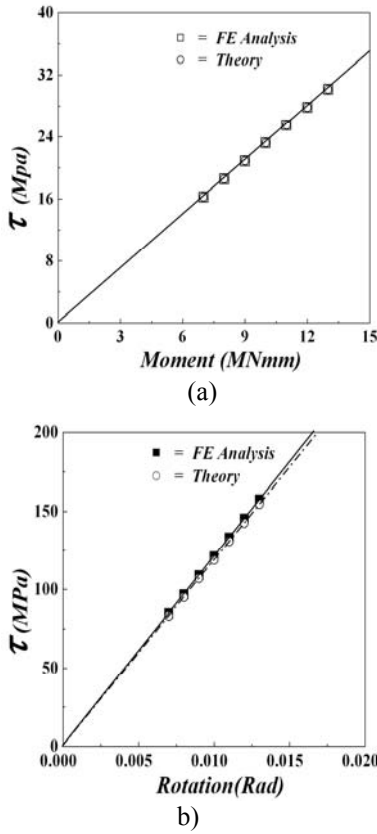


Fig. 3 The position of gage points

## 3. 시편형상 최적화

Fig.2 와 같이 3 차원 모델링에 대해 해석을 수행하면서 결과의 신뢰성과 정확성을 기하기 위해 이론적 결과값과 유한요소 해석 결과값을 비교하였다. Fig. 4 은 각각 Moment control, Displacement

control 된 상태의 유한요소 해석과 이론값을 비교했으며, 수치 해석적 오차를 고려했을 때, 유한요소 해석과 이론적 결과값이 거의 동일하게 나옴을 알 수 있다.



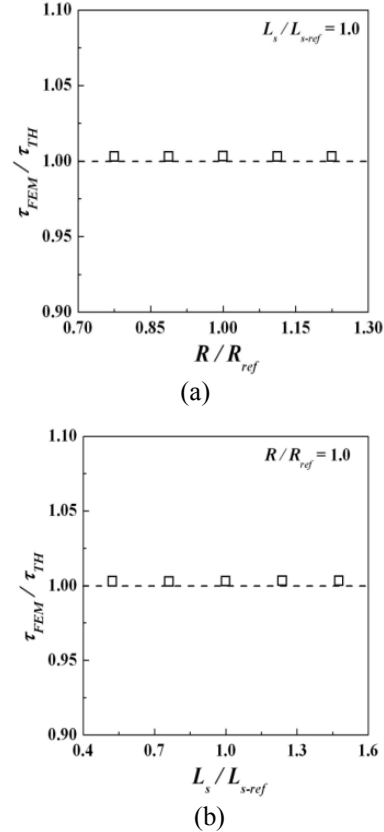
**Fig. 4** Comparison of theory results from FE results ; (a) Moment control, and (b) Displacement control

해석을 위해 사용되는 시험편 형상은 표준 시험편을 기본으로 이상적인 형상을 재조명해 볼 필요가 있다. 유한요소 해석을 위해 본 연구에서 사용된 시험편의 규격에 대하여 중요한 몇가지 형상변수(shape parameter)를 이용하여 시험편형상 최적화를 검토하였다. 시험편형상과 관련된 중요한 무차원 변수로 곡면부 반경 ( $r/r_{ref}$ ), 직선부 길이 ( $L_c/L_{c-ref}$ ), 내경의 크기 ( $d_i/d_{i-ref}$ )로 3 개의 시험군을 설정하였다. 이때 튜브형 시험편은 외경을 일정하게 유지했으며,  $r$  과  $L_s$ 는  $d_i$ 의 영향을 배제하기 위해 튜브형이 아닌 환봉형 부재로 가정하였다. 각 시험군은 5 개의 형상변수를 사용하였으며, 형상변수는 다음과 같이 주어지는 무차원의 수이다.

$$shape\ parameter = \frac{\text{변형된 치수}}{ASTM\ 규격치수}$$

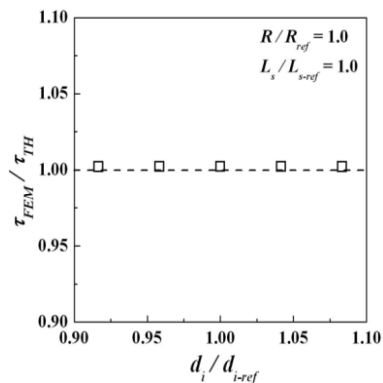
해석을 위해  $r/r_{ref} = 0.7 \sim 1.3$ ,  $L_c/L_{c-ref} = 0.4 \sim 1.6$ ,  $d_i/d_{i-ref} = 0.9 \sim 1.1$ 의 범위를 고려하였고, 완전 탄성 재료로 가정하였으며, 하중은 축방향 모멘트를 부여하였다. Fig. 5 는 각각 필렛부의 곡률반경과 직선부의 길이 변화가 비틀림 실험에 미치는 영향을

나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 오차율은 0.3%를 넘지 않는 것을 알 수 있었고, 결과적으로 전단응력은 각각의 형상변수에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.



**Fig. 5** Effects of (a)  $R$  & (b)  $L_c$

Fig. 6 는 튜브형 시험편에 대하여 곡률반경과 직선부의 길이를 고정한 상태에서 내경의 변화에 따른 전단응력의 변화를 나타낸 그래프이다. 마찬가지로 오차율은 0.2%이내에서 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다.



**Fig. 6** Effects of  $b_i$

이상의 결과를 통해 비틀림 시험을 위한 시험편형상은 ASTM 에서 제시하는 표준형상을 사용함에 있어 해석결과에 큰 영향이 없는 것으로 판단할 수 있다.

## 4. 축 정렬 이상 영향 분석

### 4.1 축 정렬 이상

Misalignment 발생은 크게 두가지로 분류된다. 실험기에서 발생하는 Misalignment 와 시험시편이 가진 고유의 Misalignment 로 구분되는데 본 연구에서는 시험시편이 가진 고유의 편차는 고려하지 않았다. Fig. 7 은 FE 해석에서 적용된 Misalignment 를 보여준다.

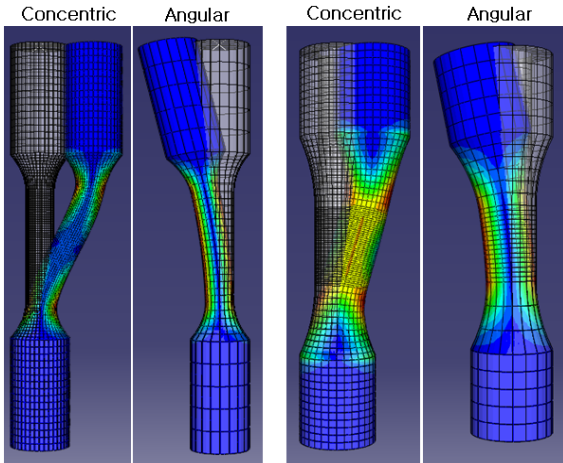


Fig. 7 Applied for test machine misalignment with FE analysis

비틀림 피로 시험기에서 정성적으로 축 정렬 이상에 따른 굽힘을 측정하는 센서는 공식적으로 제안된 것은 아직 없으며, 정량적으로 측정 센스(변형률 게이지)를 부착하여 굽힘량을 정량화 할 수 있을 것이다. 따라서 실험기의 제한성을 극복하고자 본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 정량적 분석하였다. 분석을 위해 시편에 가해지는 misalignment 를 결정하기 위해 측정점에 부여된 평균 변형률은 다음과 같다. 이는 인장 비틀림 표준시험에서 제안하고 있는 기준과도 일치한다.

$$\varepsilon_y = \frac{\varepsilon_{y1} - \varepsilon_{y2}}{2} = 20, 50, 100 \mu\varepsilon$$

FE 해석을 통해 찾아낸 misalignment 는 Table 2 와 같다.

Table 2 Determination of Misalignment

구분	strain 1(20 $\mu\varepsilon$ )		strain 2(50 $\mu\varepsilon$ )		strain 3(100 $\mu\varepsilon$ )	
	circular	tubular	circular	tubular	circular	tubular
Angular ( $\mu$ rad)	272	110	680	280	1360	560
Concentric (mm)	0.003449	0.004700	0.008621	0.011750	0.017240	0.023500

### 4.2 하중 결정

해석을 위해 부여되는 하중은 측정점에서 최대 주변형률(Maximum principle strain)의 평균값이

400, 800, 1200, 1600, 2000 $\mu\varepsilon$  값이 되는 축방향 비틀림(Torsion) 하중을 결정하였다. Table 3 은 유한요소 해석을 통해 해당 변형률에 대한 하중을 결정한 값들이다.

Table 3 Determination of Load

구분	Misalignment 400 $\mu\varepsilon$		Misalignment 800 $\mu\varepsilon$		Misalignment 1200 $\mu\varepsilon$		Misalignment 1600 $\mu\varepsilon$		Misalignment 2000 $\mu\varepsilon$	
	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

### 4.3 Bending Strain and Percent Bending

Misalignment 가 부여됨에 따라 시편 직선부 측정점에서 변형률의 변화가 가장 특이할 만하다. 왜냐하면 축 방향 정렬상태 유무를 확인하기 위한 가장 간단한 방법이기 때문이다. 즉, 축 방향 정렬이 이상적으로 일치하지 않을 경우 시편에서는 하중이 가해지지 않은 상태에서 비틀림 전단응력과 함께 축 방향의 굽힘(Bending)이 발생한다. 따라서 편심 및 각도 오차에 의한 변형률 분포에 따라 축 정렬 상태를 확인 할 수 있다. 축 정렬 기법을 결정할 수 있는 중요한 Factor 인 Bending strain 은 인장시험에 적용된 정의를 변형시켜 다음과 같이 나타낼 수 있다.

먼저 작용응력 단면에서의 평균 변형률과 국부 굽힘 변형률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

- 축방향 평균 변형률(Axial strain) :  $\varepsilon_0$

$$\varepsilon_0 = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4)}{4}$$

- 국부 굽힘 변형률(Local Bending strain) :  $\varepsilon_{bi}$

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_i - \varepsilon_0, \quad i=1 \sim 4$$

각 측정점에서의 기계장치의 축 정렬 이상에 의한 최대 굽힘 변형률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

- 최대 굽힘 변형률(Maximum bending strain) :  $B$

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{b1.mc} - \varepsilon_{b3.mc})^2 + (\varepsilon_{b2.mc} - \varepsilon_{b4.mc})^2}$$

이상으로부터 굽힘비율은 최대 굽힘 변형률과 평균 변형률의 비로 다음과 같다.

- 굽힘비율(Petcent Bending) :  $\beta_{mc}$

$$\beta_{mc} = \left| \frac{B}{\varepsilon_0} \right| \times 100$$

위 식에서 최대 굽힘 변형률은 기계장치에서 유발되는 양만 고려하므로 시편의 misalignment 에 의해 발생하는 굽힘( $\varepsilon_{bi.sp}$ )은 고려하지 않았다. 이와 같은 변형 측정 알고리즘을 이용하여 축 정렬 상태를 측정할 수 있으며, 정확한 데이터를 위해

총 224 개 case 에 대한 해석을 수행하여 결과를 분석하였다. Table 4 는 환봉형 시편의 최대 굽힘을 보여준다.

**table 4** Bending strain and Percent bending-in the circular specimen

구분	strain 1		strain 2		strain 3	
	MisAngular	MisConcentric	MisAngular	MisConcentric	MisAngular	MisConcentric
B	20.49	19.59	51.23	48.98	102.46	97.95

최대 굽힘 변형률은 부여된 misalignment 변화에 따라 선형적으로 증가하며, 국부 굽힘 변형률을 기초로 측정될 이상 방향과 그 크기를 알 수 있다.

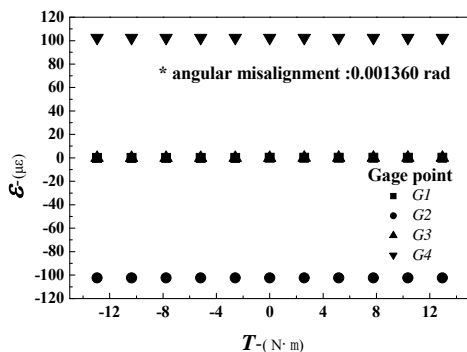
Table 5 는 튜브형 시편의 최대 굽힘 변형률을 보여준다.

**table 5** Bending strain and Percent bending-in the tubular specimen

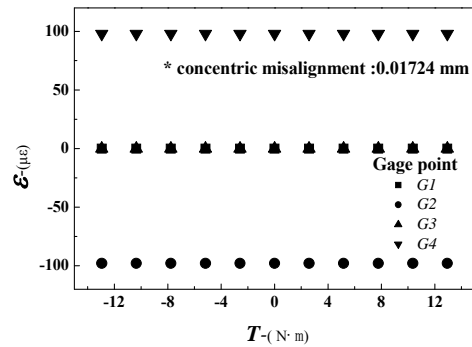
구분	strain 1		strain 2		strain 3	
	MisAngular	MisConcentric	MisAngular	MisConcentric	MisAngular	MisConcentric
B	19.54	20.79	49.73	51.98	99.46	103.96

최대 굽힘 변형률은 환봉형 시편과 마찬가지로 misalignment 가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.

토오크가 작용하는 시편에서는 초기 기계적인 측정될 이상을 판별하여 시험 이전에 적용할 수 있으며, 토오크가 증가하더라도 측정 방향 변형률에는 영향이 없음을 알 수 있었다. Fig. 8~9 는 Misalignment 증가에 따른 측정 방향 국부 굽힘 변형률을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 Misalignment 증가에 따라 측정 방향의 변형률 값은 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이는 환봉형 시편과 튜브형 시편에서 동일하다. 각도편차와 편심편차에 의한 변형률은 편차가 진행된 방향(G2, G4)에 대하여 대칭적으로 인장과 압축이 작용함을 알 수 있고 G2, G4 에 수직한 방향의 측정점(G1, G2)에서는 변형률의 변화가 없음을 알 수 있다.

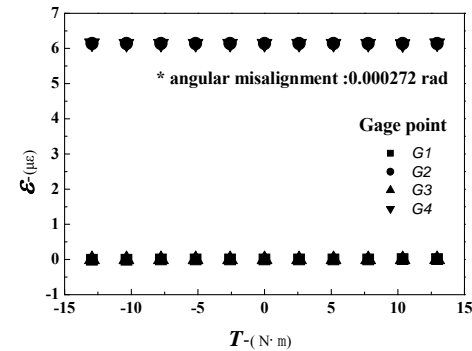


**Fig. 8** Bending strain at the gage point in circular specimen

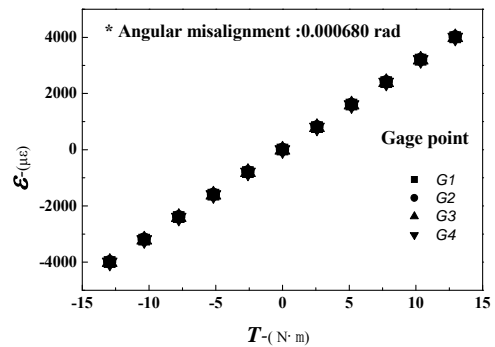


**Fig. 9** Bending strain at the gage point in tubular specimen

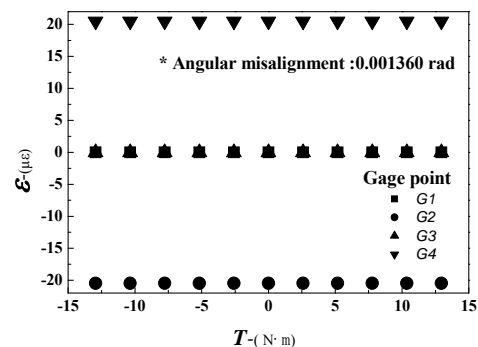
Fig. 10~12 은 각도편차가 주어졌을 때, circular 시편의 0 도, 45 도, 90 도 방향의 변형률 변화를 보여주고 있다. 이는 tubular 시편에서도 유사한 규칙성을 갖는다.



**Fig. 10** Strains for direction of 0 degree



**Fig. 11** Strains for direction of 45 degree



**Fig. 12** Strains for direction of 90 degree

Fig. 13~15 는 편심편차가 주어졌을 때 circular 시편의 0 도, 45 도, 90 도 방향의 변형률 변화를 보여주고 있다. 이는 tubular 시편에서도 동일한 규칙성을 갖는다.

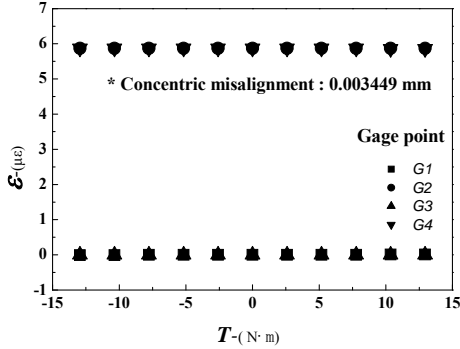


Fig. 13 Strains for direction of 0 degree

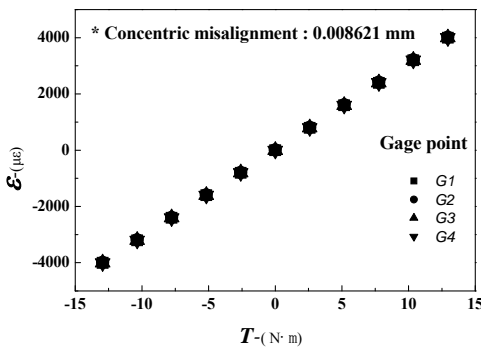


Fig. 14 Strains for direction of 45 degree

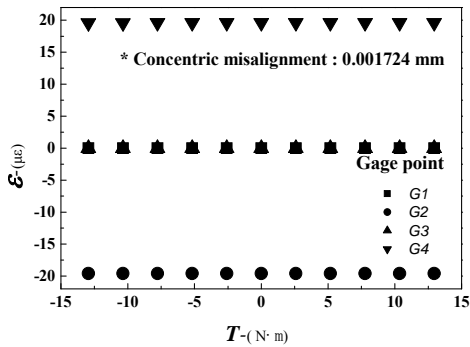


Fig. 15 Strains for direction of 90 degree

## 5. 결론

본 연구에서는 비틀림 시험 시편의 형상 최적화와 축 정렬 이상 상태를 통해 정렬을 위한 기본 알고리즘을 소개하고, 시편에 미치는 영향에 대해 정량적으로 분석하였다. 해석을 위해 사용된 형상은 미국재료시험협회에서 제안하는 표준 시편 형상을 사용하였으며, 형상변수를 이용하여 시험시편의 적절성을 3 차원 유한요소 해석을 통해 결정하였다. 또한, 축 정렬 이상 상태를 강제적으로 부여하여 재료의 측정점에서 변형률의 변화를 통해 축 정렬 상태를 확인하였다. 이는 앞에서도 언급

한 바와 같이 산업기계의 동력전달 장치 및 각종 기계장치 샤프트의 수명과 신뢰성 확보를 위해 고려되어야 할 설계요소로 반영될 수 있을 것으로 판단한다. 차후 복합 축 정렬 이상 영향을 분석함으로써 실제 토오크를 받는 부재 설계에 유용한 기초자료로 적용될 수 있기를 바란다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) “Standard Practice for Verification of Test Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application,” ASTM International, Designation : E1012-05, pp. 1~11.
- (2) “Standard Practice for Strain-Controlled Axial-Torsional Fatigue Testing with Thin-Walled Tubular Specimen,” ASTM International, Designation : E2207-08, pp. 1~8.
- (3) Wu, H.C., and Rummler, D. R., “Analysis of Misalignment in the Tension Test,” Transaction: Series H, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol 101, No. 1, ASME January 1979, pp. 68-74..
- (4) Hlomes, A. M. C., “Continuous Servo-Controlled Alignment of Specimens in Materials Testing,” Experimental Mechanics, Vol 15, No. 9, September 1975, pp. 358-364.
- (5) Jones, M. H., Bubsey, R. T., Succop, G., and Brown, W. F. Jr., “Axial Alignment Fixture For Tension Test of Threaded Specimens”, Journal of Testing and Evaluation, Vol 2, No. 1, September 1974, pp. 378.
- (6) Robison, D., “Misalignment Detector for Axial Loading Fatigue Machines,” Technical Note 480, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1972.