

## 스트레인게이지를 이용한 회전체의 측정렬 연구 (A Study on Shaft Alignment of the Rotating Machinery by using Strain Gages)

나상수\*, 김인철(한전기공(주)), 김경석, 김태열(조선대학교)  
S.S. Na, I.C. Kim(KPS), K.S. Kim, T.Y. Kim(Chosun University)

Key Words : Shaft Alignment, Misalignment, Strain Gage, Telemetry System, Bearing Movement, Dial Gage

**ABSTRACT** : Because misaligned shafts have caused noise, vibration, bearing failures, and stress concentration of coupling part, which decrease the efficiency and life of a shaft system, the proper alignment of shaft system should be monitored continuously in dynamic condition. To solve these problems under dynamic condition, a telemetry system in this study is used to find the condition of the least bending moment, which is known by analyzing the structure and stress induced by misalignment. After the shaft is aligned by dial gage, a telemetry system with strain gages is installed on shaft. The relationship between bearing displacement and moment of coupling part influenced by misalignment is investigated. The moment derived from two shaft strain at the nearby coupling is measured. The bending strain is measured 5 times for average in static state as well as in dynamic state with 100~700 rpm.

### 1. 서론

발전설비에서 가장 중요한 설비중 하나인 터빈발전기는 최근 대용량화, 다축화되고 있다. 터빈발전기에서 발생하는 진동의 가장 일반적인 원인중 하나는 축의 오정렬 문제이다. 측정렬은 터빈의 운전 신뢰성에 직접 영향을 미치기 때문에 대단히 중요하게 다루지 않으면 안 된다. 현재 발전소 현장에서 많이 사용하고 있는 다이얼게이지에 의한 측정렬 방법은 정량적인 굽힘모멘트를 측정할 수 없기 때문에 최적상태의 측정렬이 불가능하고, 운전중 회전체의 운전상태는 진동 이외에는 계측이 곤란하다.

본 연구에서 사용한 스트레인게이지법은 회전기계의 측정렬 상태를 측정하는데 있어서 축표면에 스트레인게이지를 부착하여 신호를 평가하는 것으로, 커플링의 분해, 조립공정을 생략할 수 있으며, 측정렬된 상태인 초기의 기준 스트레인 값과 운전후 변화된 상태의 스트레인 값을 비교하여 기준 스트레인 값으로 보정해 주는 과정만을 행함으로 정비과정이 매우 단순하게 된다. 회전체 설치시 적절한 측정렬을 위한 가장 기본적인 단계는 측정렬의 목표치 설정, 축설치,

측정렬 상태를 계측하는 것이다. 측정렬에 있어 스트레인게이지법은 위의 과정 중 마지막 단계에만 적용되고, 또 다른 용도로는 베어링 반력을 측정하는데 사용될 수 있다.

정적상태에서의 측정이 정지중 회전기계의 정렬상태를 파악하는데 귀중한 정보를 주는 반면, 회전체가 운전되면 측정렬 상태변화를 파악할 수 없게 된다. 이러한 이유로 운전중인 회전체로부터 나오는 스트레인 신호를 받기 위해 텔레메트리 시스템(telemetry system)을 이용하여 측정렬 상태를 측정하는 것이 필요하다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이 정지중, 회전중인 회전체에서 스트레인게이지와 텔레메트리 시스템을 이용하여 측정렬을 연구하기로 하였다.

### 2. 시험방법

#### 2.1 실험장치와 실험방법

실험은 현재 국내 발전소에 설치되어 있는 증기터빈을 축소한 시뮬레이터를 이용하였다. 이 시뮬레이터는 4단 고압부 한 개와 각 7단의 저압부 두 개, 모터부 한 개 등, 모두 4부분으로 되

어 있으며, 각 축은 고정커플링으로 연결되어 있다. 또한 회전축은 각기 두 개의 저널 베어링으로 지지되어 있으며, 총 6개의 베어링으로 구성되어 있다. Fig. 1은 회전체 시뮬레이터의 실물사진이며, Table 1은 그 사양을 나타낸다.

## 2.2 축의 굽힘모멘트 측정

측정렬에 있어서, 초기 스트레인은 축의 자중으로 인해 축에서의 굽힘모멘트를 포함하고 있다.

굽힘모멘트 측정을 위해서 축을 360° 회전시키는데 이때 스트레인은 각도의 함수로서 표시되고 사인과 곡선을 형성한다. 이 스트레인 값은 굽힘모멘트와 관련이 있고, 중립 축과 스트레인이 측정된 위치 사이의 거리에 관계가 있다. 이 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_a \cos(\theta + \lambda) + \bar{\epsilon} \quad (1)$$



Fig. 1 터빈 시뮬레이터

Table 1 터빈 시뮬레이터 사양

Power	95-125 VAC, 50-60 Hz
Length	3,200 mm
Width	800 mm
Height	850 mm
Weight	1.5 ton
Shaft, Blade, Coupling	STS 304
Bearing Support, Bed	SS 400
Bearing Body & Cover	SC 49

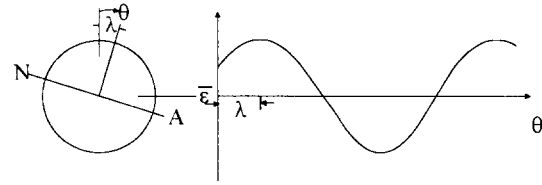


Fig. 2 축 시스템의 스트레인 곡선

$\epsilon_a$  : 스트레인 진폭(strain amplitude)

$\theta$  : 수직 방향과 게이지 사이의 각도

$\lambda$  : 중립축과 수직상태 사이의 각도

$\bar{\epsilon}$  : 평균 스트레인(average strain)

축의 굽힘모멘트는 축 표면에서 단축응력 조건과 관계되는 기본적인 보의 관계식을 적용하면 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \epsilon_a E \quad (2)$$

이 식에서  $\sigma$  : 응력,  $c$  : 축의 반지름,  $M$  : 축의 굽힘모멘트,  $I$  : 축의 관성모멘트,  $E$  : 세로탄성계수이다.

이들 관계식으로부터 수직과 수평 모멘트를 각각 나타내면 다음과 같다.

$$M_v = \frac{\epsilon_a EI}{c} \cos \lambda \quad (3)$$

$$M_h = \frac{\epsilon_a EI}{c} \sin \lambda \quad (4)$$

$M_v$  와  $M_h$ 는 각각 수직, 수평방향의 굽힘모멘트이다

본 실험에서는 Fig. 3과 같이 4 게이지법을 사용했으므로, 모멘트 식은 다음과 같다.

$$M_v = \frac{(\epsilon_b - \epsilon_l)EI}{8c} \quad (5)$$

이 식에서  $\epsilon_l$  와  $\epsilon_b$ 는 축의 상, 하부에 게이지가 위치할 때의 스트레인 값이다.

Fig. 4는 스트레인게이지가 부착된 위치와 모멘트와의 관계를 나타내고 있고, 커플링의 중심

부에 발생하는 모멘트에 관해 정리하면 다음 식과 같다.

$$M = \frac{M_1 L_2}{L_2 - L_1} - \frac{M_2 L_1}{L_2 - L_1} \quad (6)$$

여기서,

$M$  : 커플링 중심에서의 모멘트

$M_1, M_2$  : 게이지 #1, #2에서 구해진 모멘트

$L_1, L_2$  : 커플링중심에서 게이지 #1, #2까지의 거리

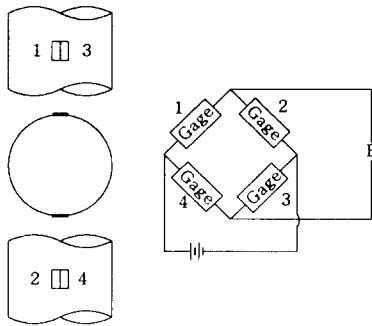


Fig. 3 Four Gage법의 스트레인게이지 부착위치와 회로도

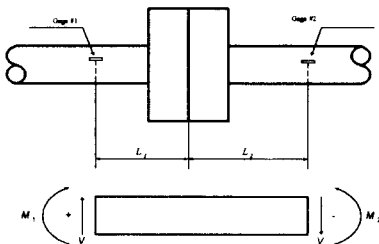


Fig. 4 스트레인게이지 부착 위치와 모멘트 관계

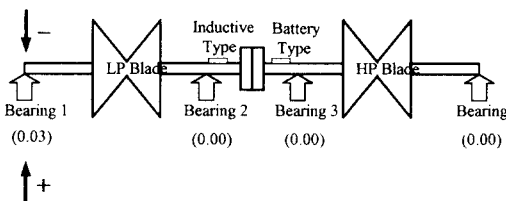


Fig. 5 각 베어링부의 상하 이동

## 2.3 실험

터빈 시뮬레이터에 대한 임의의 오정렬 환경은, 베어링 하우징 하부와 베어링 베이스 사이에 삽입되어 있는 베어링 조절부를 베어링 베이스에 있는 볼트를 이용하여 미세 이동시키면 베어링에 강제변위가 발생되어 오정렬 상태가 되도록 하였다. 베어링부의 이동량에 따른 회전체에서의 스트레인 분포를 알아보기 위해 커플링 양쪽의 축 표면에 각각 스트레인게이지를 붙이고, 텔레메트리 시스템을 장착시켰다. 시뮬레이터를 매 90° 간격으로 수동(정적 상태)방식으로 5회전 시켰다. 또한, 동적 상태에서 데이터를 습득하기 위해, 동시에 유도식과 배터리식 텔레메트리 시스템을 작동시키면서 700rpm 상태에서 데이터를 받아들였다.

초기의 실험 데이터는 다이얼게이지 방법을 이용하여 시뮬레이터에 측정렬을 행한 후, 이 값을 기준 스트레인 값으로 채택하였다. Fig. 5와 같이 모터 쪽에서 먼 베어링을 1번, 가까운 베어링을 4번으로 설정하고, 1번 베어링부터 4번 베어링까지 순차적으로 상하 방향으로  $\pm 0.01$  mm씩 0.03 mm 까지 이동시키면서 스트레인 값을 파일로 저장하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 정적·동적상태의 실험결과

Fig. 6은 측정렬된 상태에서 축을 1회전시켰을 때, Fig. 7은 오정렬된 상태에서 축을 5회전시켰을 때 각각 위상별 스트레인 분포도이다.

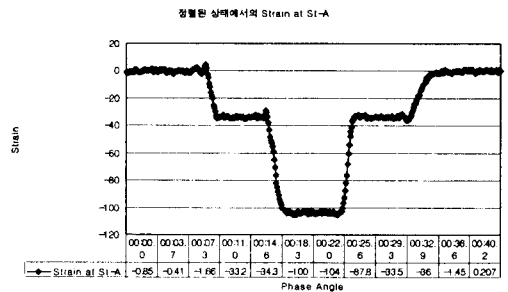


Fig. 6 측정렬된 상태의 스트레인 분포도

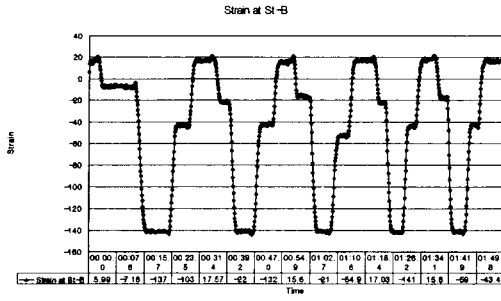


Fig. 7 오정렬 상태의 스트레인 분포도

Fig. 8에서 Fig. 12까지는 베어링의 이동량에 따른 정적상태에서의 스트레인 값의 분포와 커플링 중심부에서 발생하는 모멘트의 변화량이다.

Fig. 13과 Fig. 14는 오정렬된 상태에서 700 rpm으로 회전중인 시뮬레이터로부터 얻은 변형률과 모멘트, Fig. 15는 측정렬된 상태에서 700 rpm으로 회전중인 시뮬레이터로부터 얻은 스트레인을 각각 나타내고 있는 그림이다.

### 3.2 오정렬과 굽힘모멘트와의 관계 분석

커플링이 연결된 상태에서 측정렬 상태를 파악하기 위해 차분변형률( $\Delta\epsilon$ , differential strain)개념을 도입하여, 오정렬 상태를 분석하였다. 커플링에서 오정렬 상태를 파악하기 위해서는 커플링을 중심으로 2개의 스트레인 측정점(measuring point)이 필요하다.

상하 방향의 정렬상태를 보기 위해서는  $0^\circ$  위치에서의 스트레인 값과  $180^\circ$  위치에서의 스트레인 값의 차이를 비교 분석하면 되고, 좌우 방향의 정렬상태를 보기 위해서는  $90^\circ$  위치에서의 스트레인 값과  $270^\circ$  위치에서의 스트레인 값의 차이를 비교하면 된다.

모멘트 값의 크기와 방향은 ( $\Delta\epsilon_A - \Delta\epsilon_B$ )의 크기에 따라 달라진다. 즉, 정렬된 상태에서 #1, 2 베어링을 동일량 만큼 낮추면 모멘트는 양(+)의 방향으로, 반대로 #1, 2 베어링을 동일량 만큼 높이면 모멘트는 음(-)의 방향으로 변화된다.

Fig. 16은 상하방향 오정렬 모드를 갖는 커플링을 조립시 각 지점에서 굽힘변형률의 형태와 차분변형률의 부호를 나타낸 것이다.

Fig. 17은 참고로 터빈 시뮬레이터의 토크를 측정할 것으로 토크를 측정하기 위하여 스트레인게이지를 영점에 대하여  $45^\circ$  각도로 2축 게이

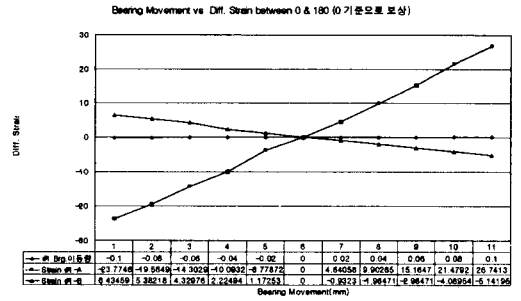


Fig. 8 정적상태에서의 #1 베어링 이동량 vs 차분변형률

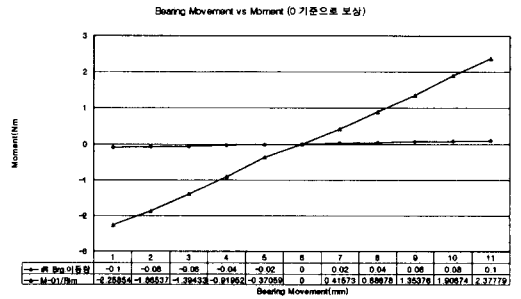


Fig. 9 정적상태에서의 #1 베어링 이동량 vs 모멘트

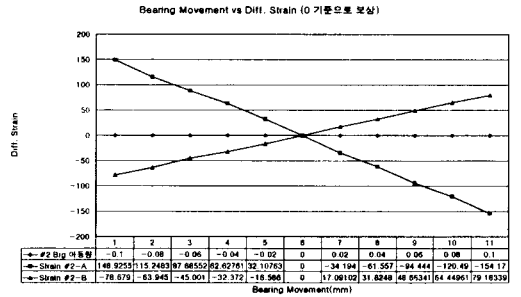


Fig. 10 정적상태에서의 #2 베어링 이동량 vs 차분변형률

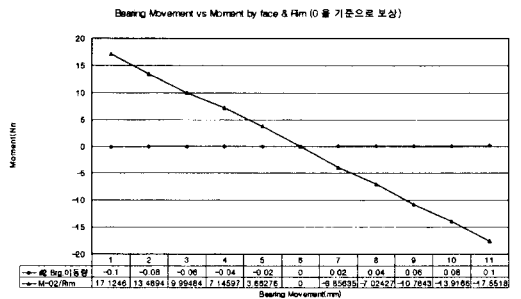


Fig. 11 정적상태에서의 #2 베어링 이동량 vs 모멘트

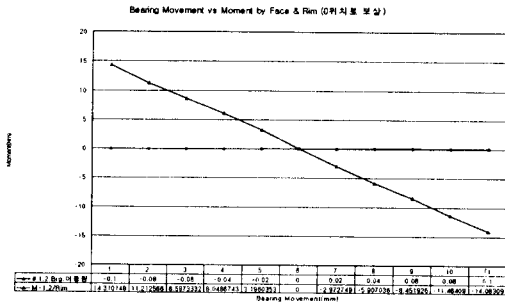


Fig. 12 정적상태에서의 #1, 2 베어링 이동량 vs 모멘트

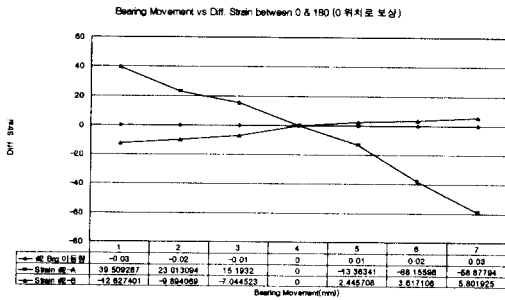


Fig. 13 동적상태(700rpm)에서의 #2 베어링 이동량 vs 차분변형률

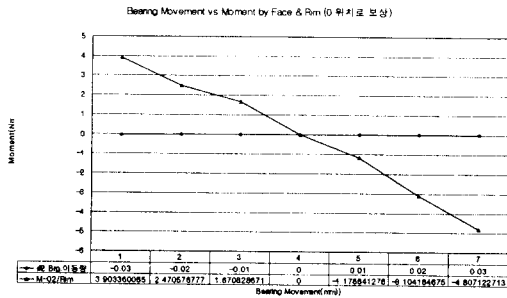


Fig. 14 동적 상태(700rpm)에서의 #2 베어링 이동량 vs 모멘트

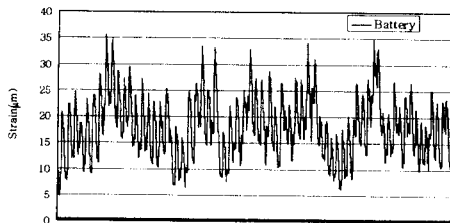


Fig. 15 운전중인 회전체의 변형률 신호

Misalign Mode	Unaccepted Condition	Compled Condition	Bending strain at 0°		Diff. Strain	
			Station A	Station B	$\delta \epsilon_a$	$\delta \epsilon_b$
Parallel Misalign					(-)	(+)
					(+)	(-)
Angular Misalign					(-)	(-)
					(+)	(+)

Fig. 16 오정렬 분석

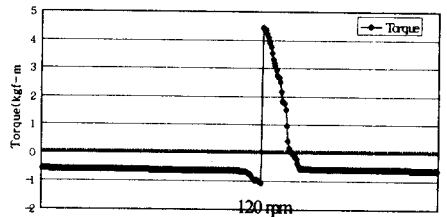


Fig. 17 회전체의 토크 측정

지를 구성하여 측정하였다. 본 시뮬레이터에서는 60 rpm 이하에서는 회전수 조절이 불가능하여 120 rpm에서 측정된 토크 값이다.

#### 4. 결론

터빈 시뮬레이터를 대상으로 측정렬이 된 상태와 베어링을 이동하여 오정렬이 된 상태에서, 각각 텔레메트리 시스템을 이용하여 스트레인 값을 실시간으로 측정하는 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스트레인 게이지를 이용하여 정적상태에서의 측정렬 상태진단은 물론, 동적 상태에서 추가로 텔레메트리 시스템을 적용하면 운전중인 회전체의 상태변화도 측정이 가능하다.
- (2) 텔레메트리 시스템을 이용한 회전체의 모멘트에 의한 측정렬을 터빈설비에 적용시켜 측정함으로써 다이얼게이지 및 정적 상태에서는 측정할 수 없었던 측정의 연속화를 기할 수 있었다.

(3) 커플링을 중심으로 양쪽 계측 장치의 굽힘변형률의 방향을 보고 오정렬의 형태를 알 수 있고, 굽힘변형률의 크기를 보고 오정렬의 정도를 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 이시연, 윤주호, 김경석, 정현철, 김태열, "대형 회전체의 응력해석을 통한 정비방법개선에 관한 보고서," 한전기공(주) 원자력훈련원, 1996.
2. John Piotrowski, "Shaft Alignment Handbook," Marcel Dekker, Inc., 1986.
3. Albert W. Forrest, Jr., and Richard F. Lavasky, "Shaft Alignment using Strain Gages," Marine Technology, pp. 276~284, 1981.
4. L. Vassilopoulos, "Computer-Aided Telemetry Systems for Shipboard Rotating Machinery Investigations," Management and Economics International Symposium, pp. 25-1~25-41, 1987.
5. Technical Changes or Updates concerning the Operation, Service, and/or Safety," Microdas B1 - Manual, Volland Telemetry Inc., 1997.
6. James W. Dally, "Experimental Stress Analysis," 1991.
7. John S. Mitchel, "An Introduction to Machinery Monitoring and Analysis,"
8. GE Power system, Couplings & Shaft, Steam Turbine-Generator Maintenance Training, Vol.VIA, 1995.