

**Straingage법에 의한 정적상태에서의 회전체 측정렬 방법 개선**  
김경석, 이대현/조선대, 정현철, 김태열/조선대원, 나상수, 김인철/한전기공

**Improvement of Rotor Axes Arrangement under the Static State  
by using Straingage Method**

K. S. Kim, D. H. Lee, H. C. Jung, T. Y. Kim, S. S. Na, I. C. Kim

**ABSTRACT**

The misalignment state causes some problems in operating. These problems such as vibration, noise, make the reduce wear, as well as, a stress concentration on the coupling which is the very weakness point at the mortar. In order to align the shaft, the dialgagge method has used as a means of solution until now. The method using a dialgagge require a great deal of labour and money due to making by hand, the accurate alignment is not up to the expectation. For aligning the shaft, all the rotor must come to accord. Also, the dialgagge method cannot be compared with straingage measurement method, from the viewpoint, which can gage in short time.

**1. 서 론**

회전체는 자체 하중에 의해 축이 고온, 고압 상태에서 회전함으로서 일정기간이 경과하면 오정렬(Misalignment)이 발생하게 된다. 이와 같은 오정렬 현상은 회전체의 소음과 진동원으로 작용할 뿐만 아니라, 회전체의 가장 취약부라 할 수 있는 커플링부에 응력집중을 초래하여 기기의 수명을 단축시키고 최악의 경우 회전 중 파손을 초래할 수 있다. 현재 국내에서 행하는 측정렬(Alaignment)방법은 다이얼 게이지(Dialgagge)<sup>1)</sup>법이다. 이 다이얼게이지법에 의한 정비 방법은 회전중의 회전체를 정지시키고 나서, 주(Rim) 및 면(Face)을 측정하여 정비를 행하고 있는 실정이다. 기계적인 방법에 의한 측정이기 때문에 측정

함에 있어, 정확한 데이터의 습득이 어렵다는 단점이 있다. 또한 측정이 완료되더라도 다시 조립을 하여 완전한 측정렬 상태를 재차 확인하여야만 하였다. 이런 복잡한 과정을 행함으로써 소요되는 시간이 2~8일<sup>2)</sup> 정도가 소요되고, 인력의 낭비에 의한 발전설비 운영의 비효율성과 더불어 전력수급에 있어서, 막대한 손실을 가져오고 있는 실정이다. 또한, 회전중인 회전체의 상태를 계측할 수 없으며, 운전 중에 급속의 피로현상이 유발될 수 있고 설비의 노후화를 초래하게 된다.

그러나 외국에서는 일부 기존의 수작업을 벗어나 스트레인 게이지(Straingage)<sup>3)</sup>에 의한 측정렬을 실시하여 회전체의 정비를 수행하고 있다.

외국에서 사용하고 있는 스트레인 게이지법의 특징은 회전체의 분해, 조립 과정을 생략할 수 있으며, 초기의 스트레인(Strain)값과 변위된 상태에서의 스트레인값을 비교하여 초기의 스트레인 값으로 보정해주는 과정만을 행함으로써 정비에 있어 매우 단순하다는 것이다. 그러나 국내에서는 아직까지 스트레인 게이지를 이용하여 회전체의 정비를 행하고 있지 않는 실정이다.

본 연구에서는 스트레인 게이지를 이용하여 정적인 상태에서의 모멘트와 스트레인의 원리를 이용하여 회전체의 정비방법을 행하고자 한다.

따라서 이를 이용하여 대형 회전체의 구조 및 응력해석<sup>5)</sup>에 대한 연구를 자체적으로 수행함으로써 얻어지는 자료 및 경험과 기술을 토대로 하면 확실성이 없는 국내 발전설비에 적용이 가능하여 외국의 기술력에 의존하는 경우의 시간·비용의 낭비요인을 배제할 수 있으며, 연구수행의 과정에서 얻어지는 경험에 의한 다른 설비의 정비분야에 응용하여 보다 더 과학적이고 정확한 정비업무의 확대시행 효과를 기대할 수 있다.

## 2. 이론 해석

### 1) 모멘트와 스트레인과의 관계

회전체에 있어서는 커플링과 커플링의 보울트 체결부가 가장 취약<sup>(6-7)</sup>하므로 굽힘모멘트가 가장 크다. 따라서 본 연구에서는 스트레인게이지를 취약부인 커플링부에 부착하였을 때, 굽힘모멘트가 가장 크게 작용하므로, 스트레인과 굽힘모멘트와의 관계를 이용하였다. 굽힘모멘트와 스트레인의 관계식을 식(1)에 정의하였다.

$$\sigma = E\epsilon = \frac{M}{W} f = \frac{4M}{\pi R^3} f$$

$$M = \frac{E\pi R^3}{4f} \epsilon \quad (1)$$

$M$ : 축의 굽힘모멘트,  $E$ : Young's Modulus

$R$ : 축의 반경,  $f$ : 응력집중계수,  $\epsilon$ : 스트레인

### 2) 축의 역학적 관계

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 커플링의 양쪽에 스트레인게이지를 부착시키고, 축정렬 상태와 오정렬 상태에서 회전체가 느린 속도로 회전하는 동안 굽힘모멘트에 의해 발생하는 스트레인 변화를 매 30° 마다 기록하여 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같다.

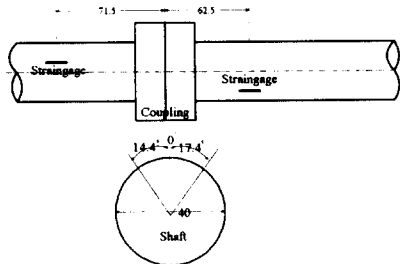


Fig. 1 Bonding position of straingage

이와 같이 측정하여 먼저, 축정렬 상태에서 얻어진 최대, 최소 스트레인값과 이들 값의 평균을 구하면 다음 (2)식과 같다.

$$\epsilon = \frac{|\epsilon_{\max}| + |\epsilon_{\min}|}{2} \quad (2)$$

$\epsilon$ : 평균 스트레인( $\mu$ ),  $\epsilon_{\max}$ : 최대 스트레인( $\mu$ )

$\epsilon_{\min}$ : 최소 스트레인( $\mu$ )

또한, 오정렬 상태에서 스트레인값을 구하면 다음 (3)식과 같다.

$$\epsilon' = \frac{|\epsilon'_{\max}| + |\epsilon'_{\min}|}{2} \quad (3)$$

$\epsilon'$ : 오정렬 상태의 평균 스트레인( $\mu$ )

위와 같이 얻어진 스트레인값을 굽힘모멘트의 관계식을 이용하여 굽힘모멘트를 구하면 다음 (4)식과 같다.

$$M_x = \frac{E \times \pi}{4 \times (L_2 - L_1)} \times (r_1^3 \times \epsilon_1 \times L_1 \times \cos \theta_1 - r_2^3 \times \epsilon_2 \times L_2 \times \cos \theta_2)$$

$$M_y = \frac{E \times \pi}{4 \times (L_2 - L_1)} \times (r_1^3 \times \epsilon_1 \times L_1 \times \sin \theta_1 - r_2^3 \times \epsilon_2 \times L_2 \times \sin \theta_2) \quad (4)$$

$M_x, M_y$ :  $x, y$ 방향에 대한 굽힘모멘트 (N-m)

$r_1, r_2$ : 축의 반지름(m),  $\theta_1, \theta_2$ : 위상각

$L_1, L_2$ : 커플링과 스트레인게이지간의 거리

여기서,  $\epsilon_1, \epsilon_2$ 는 축정렬 상태와 오정렬 상태의 차를 나타내고 있다.

위의 식을 이용하여 분포하중에 대한 처짐량을 구하면 다음 (5)식과 같다.

$$\delta x = \frac{1}{24 \times EI} \times (w_x \times l_1^3 + w_x \times l_2^3) - \frac{(16 \times l_1 \times l_2 - l_2^3)}{120 \times EI \times (w_x \times l_1^3 + w_x \times l_2^3)}$$

$$\delta y = \frac{1}{24 \times EI} \times (w_y \times l_1^3 + w_y \times l_2^3) - \frac{(16 \times l_1 \times l_2 - l_2^3)}{120 \times EI \times (w_y \times l_1^3 + w_y \times l_2^3)} \quad (5)$$

이상의 과정을 통해서 구해진  $U_x, U_y$ 를 이용하여 각 베어링부의 처짐량을 구할 수 있다. 위 식에 ( $D = -\delta$ )를 적용하여 최종적으로 구하고자 하는 베어링의 이송량을 구할 수 있다.

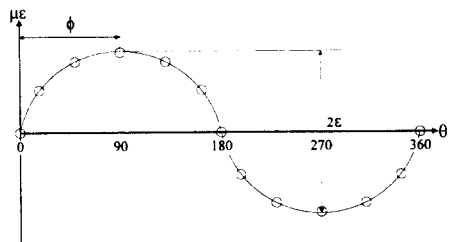


Fig. 2 Strain distribution according to phase angles

## 3. 실험장치

## 1) 회전체 시뮬레이터



Photo. 1 Rotor simulator

본 실험에서는 진동교정 시뮬레이터(Simulator)를 이용하여 회전체에 대한 스트레인 게이지의 적용 가능성을 확인하고자 하였다. 본 실험에서 사용한 회전체 시뮬레이터는 현재 국내 발전소에서 사용하고 있는 터빈의 축소모델이다. Photo. 1에 회전체 시뮬레이터를 나타냈으며, Table 1에 회전체 시뮬레이터의 제원을 나타냈다.

Table 1 Specifications of rotor simulator

Power	95-125VAC, 50-60 Hz	
Length	3,200mm	
Width	800mm	
Height	850mm	
Weight	1.5ton	
Materials	Shaft, Blade Coupling	STS304
	Bearing, Support Bed	SS400
	Bearing Body Bearing Cover	SC49

회전체 시뮬레이터에 대한 임의의 오정렬 환경은, 베어링 베이스에 있는 보울트를 이용하여 미세 이동시켜 베어링에 강제변위가 발생되어 오정렬 상태를 유지하도록 하였다.

또한, 스트레인 측정을 위해 사용된 스트레인 게이지는 일본 KYOWA社의 제품을 이용하였으며, 각 사양을 Table 2에 나타냈다.

스트레인 게이지의 부착은 일본 KYOWA사의 CC-33A 스트레인 게이지 접착제를 사용하였다.

Table 2 Specification of strain gage

Type	KFG-1-120-C1-11
Gage Length	1mm
Gage Resistance	$119.8 \pm 0.2 \Omega$
Gage Factor	$2.15 \pm 1.0\%$
Gage Cement	CC-33A, PC-6

## 2) 정적 변형율계(Static Strainmeter)

스트레인의 측정을 위해 이용된 변형율계는 미국 Measurement Group, Inc.의 System 5000이며, 본 장비는 Model 5100 Scanner와 Model 5110 Strain-Gage Card로 구성되어 있다. Photo. 2에 System 5000<sup>SM</sup> 정적 변형율계를 나타냈다.

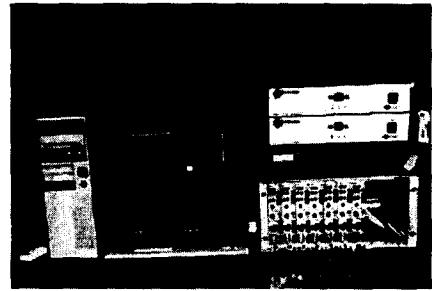
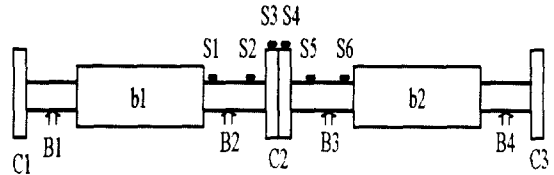


Photo. 2 System 5000 static strainmeter

## 4. 실험방법



(B: Bearing, C: Coupling, S: Strain gage, b: blade)

Fig. 3 Schematic of the rotor simulator and bonded position of strain gages

Fig. 3에서 보는 바와 같이 시뮬레이터는 1개의 커플링과 4개의 베어링에 의해 지지되어 있다. 베어링의 형태는 저어널 베어링이며, 실제 터빈과는 달리 스패의 길이는 작은 반면에 베어링 부가 넓게 설계되어 있어 예상값보다 훨씬 낮은 스트레인값이 얻어졌다. 베어링부의 이동량에 따른 회전체에서의 스트레인 분포를 알아보기 위해 베어링의 양측에 6개의 스트레인게이지를 부착시켰다. 본 실험에서는 두 개의 스패를 선택했던 관계로 굽힘모멘트에 의한 변화가 확연히 들어나는 커플링의 양단에 부착된 2번과 5번 스트레인 게이지의 스트레인값이 실제 실험에서 택한 데이터이며, 나머지 4개의 스트레인값은 참조 및 비

교 데이터로 이용하고자 하였다. 커플링 양편의 2번과 5번 스트레인게이지는 2번, 3번 베어링을  $x, y$  방향( $\pm 0.5$  mm씩)으로 일정량만큼씩 이동시키면서 스트레인값을 얻었다.

또한, 각 베어링부의 이동시 정확한 값을 적용시키기 위하여 Photo. 3에서와 같이 다이얼게이지 및 필러게이지, 테이퍼게이지를 이용하였다.

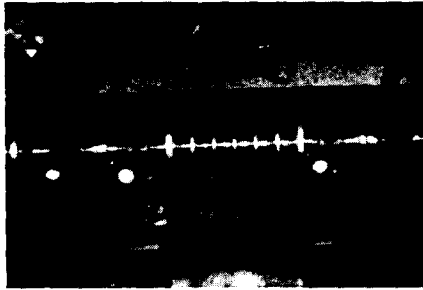


Photo. 3 Installed position of dialgage and fillergage, tapergage

또한 Table 3은 다이얼게이지 및 간극 게이지를 이용하여 2번,3번 베어링을 각각에 대해  $x, y$  방향으로 이동시킨 량을 나타내고 있다.

Table 3 The displacement amount by dialgage at Bearing 2 and Bearing 3

	Bearing 2		Bearing 3	
	Dx <sub>2</sub>	Dy <sub>2</sub>	Dx <sub>3</sub>	Dy <sub>3</sub>
C0	0	0	0	0
C1	0.5	0.5	0.5	0.5
C2	0.5	0.5	-0.5	0.5
C3	0.5	-0.5	0.5	-0.5
C4	-0.5	0.5	-0.5	0.5
C5	-0.5	0.5	-0.5	-0.5
C6	-0.5	-0.5	0.5	-0.5

#### 4. 실험결과

Table 4와 Fig. 4는 다이얼게이지와 필러게이지를 이용하여 축 정렬을 수행한 직후의 위상각에 따른 스트레인값을 나타내고 있으며, 변위를 준 후의 각 스트레인 게이지로부터 얻어진 스트레인값에 대한 도표 및 분포도의 예를 Table 5~Table 7과 Fig. 5~Fig. 7에 각각 나타내었다.

Table 8은 베어링 이송량에 따른 최대, 최소 스트레인을 나타내고 있다.

Table 9는 이론식에 대한 결과값을 나타내고

있다.

Table 4 Strain values according to phase angles (Initial condition)

Angle (Degree)	Strain( $\mu$ strain)					
	Gage1	Gage2	Gage3	Gage4	Gage5	Gage6
0	40.43	-30.02	-31.06	-27.68	23.86	-12.57
30	-10.99	-21.53	-32.05	-29.61	-7.37	-64.06
60	24.06	-25.28	-33.56	-29.74	-16.58	-105.06
90	42.97	-49.85	-34.71	-29.40	-36.69	-129.84
120	23.70	-93.04	-36.23	-29.28	-62.62	-136.22
150	-4.01	-124.54	-37.10	-28.06	-88.02	-131.24
180	-19.98	-129.56	-36.39	-28.35	-102.51	-130.62
210	-27.74	-111.88	-35.40	-27.47	-110.21	-118.39
240	-31.19	-82.45	-33.62	-26.66	-104.88	-94.25
270	-35.20	-62.97	-32.92	-28.06	-88.02	-51.49
300	-32.26	-42.55	-30.46	-29.28	-62.22	-26.33
330	-36.95	-33.57	-29.96	-29.98	-35.66	-11.17
360	-34.50	-28.88	-29.26	-31.37	-13.68	-23.62

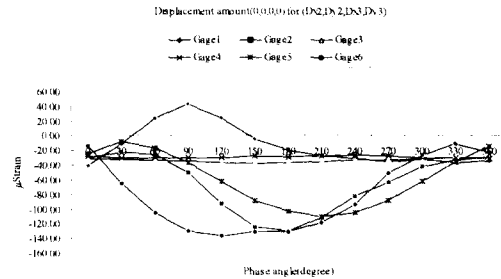


Fig. 4 Strain distribution chart according to phase angles(Initial condition)

Table 5 Strain values according to the displacement of bearing as amounts are (0.5, 0.5, 0.5, 0.5)

Angle (Degree)	Strain( $\mu$ strain)					
	Gage1	Gage2	Gage3	Gage4	Gage5	Gage6
0	-22.31	-85.06	-16.72	-18.30	52.89	-99.65
30	-46.77	-123.46	-20.27	-16.86	1.90	-202.81
60	-53.86	-143.32	-21.92	-15.08	-63.51	-276.40
90	-46.51	-137.25	-22.30	-14.20	-122.45	-289.34
120	-10.22	-117.93	-22.30	-13.59	-163.96	-242.09
150	34.86	-77.31	-20.75	-14.41	-174.85	-151.09
180	73.90	-22.77	-17.48	-15.84	-149.39	-50.27
210	113.82	33.91	-14.32	-19.01	-97.79	40.12
240	138.17	70.22	-12.42	-22.56	-32.77	102.58
270	141.65	70.87	-12.31	-25.33	25.40	118.59
300	100.39	32.29	-14.08	-26.49	65.69	79.88
330	42.76	-21.65	-17.03	-26.64	70.67	-0.93
360	-18.00	-78.44	-21.28	-25.48	47.19	-100.90

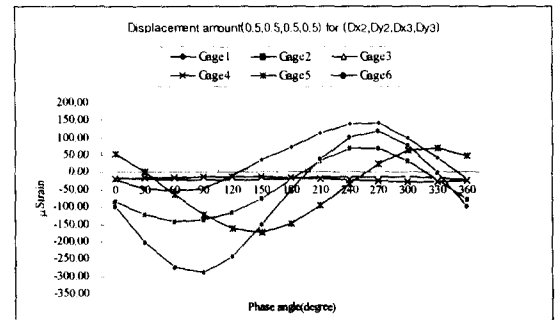


Fig. 5 Strain distribution chart according to the displacement of bearing

Table 6 Strain values according to the displacement of bearing as amounts are (0.5, 0.5, -0.5, 0.5)

Angle (Degree)	Strain( $\mu$ strain)					
	Gage1	Gage2	Gage3	Gage4	Gage5	Gage6
0	48.80	-84.71	-14.28	-17.08	-81.58	284.77
30	-137.79	-213.48	-17.72	-22.11	15.51	378.17
60	-284.50	-293.56	-20.90	-26.23	92.03	344.85
90	-353.99	-308.69	-23.08	-28.76	132.48	197.28
120	-333.38	-262.96	-24.62	-28.72	122.94	-4.10
150	-225.34	-175.78	-26.48	-27.51	69.50	-217.41
180	-62.85	-56.10	-27.17	-24.63	-15.54	-390.94
210	138.39	67.62	-26.83	-20.45	-119.32	-485.57
240	278.92	141.02	-25.00	-18.39	-192.10	-460.23
270	350.72	157.29	-23.80	-18.02	-228.61	-328.46
300	322.96	111.05	-22.70	-19.32	-218.64	-111.29
330	203.94	16.47	-22.53	-22.31	-165.35	111.72
360	33.21	-95.89	-21.66	-27.00	-82.73	284.31

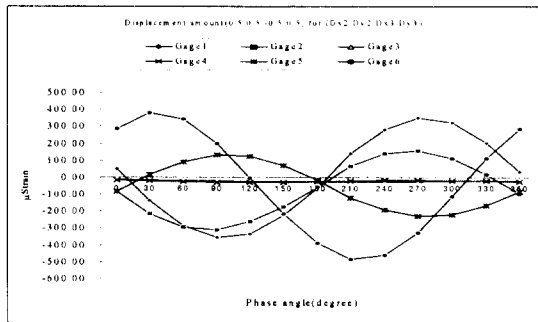


Fig. 6 Strain distribution chart according to the displacement of bearing

Table 7 Strain values according to the displacement of bearing as amounts are (-0.5, -0.5, 0.5, -0.5)

Angle (Degree)	Strain( $\mu$ strain)					
	Gage1	Gage2	Gage3	Gage4	Gage5	Gage6
0	238.23	368.95	161.33	120.06	234.52	-547.10
30	480.61	416.52	159.20	127.31	87.87	-754.90
60	601.42	402.82	155.32	126.46	-25.44	-777.44
90	592.73	329.49	156.26	128.73	-85.98	-626.85
120	442.99	212.96	157.49	127.20	-72.76	-349.64
150	219.58	77.23	157.59	119.11	4.83	-32.86
180	-28.94	-40.32	157.10	110.07	136.11	272.44
210	-253.52	-90.41	161.68	117.74	281.15	461.35
240	-360.87	-65.18	162.66	120.52	385.62	470.02
270	-344.30	23.07	161.21	121.94	435.87	323.76
300	-223.01	148.25	159.38	120.60	423.15	44.61
330	2.42	273.97	153.09	107.47	342.37	-287.51
360	260.50	363.78	152.48	114.09	217.78	-578.81

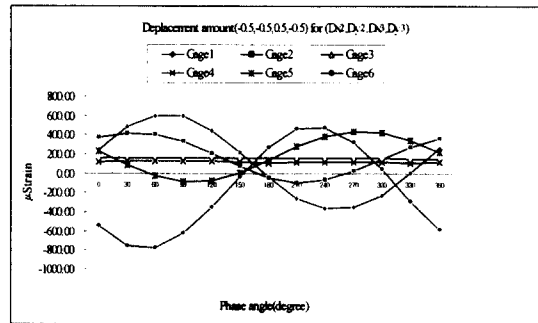


Fig. 7 Strain distribution chart according to the displacement of bearing

Table 8 Phase differences between Max. and Min. of strain (at Gage 2 and 5)

Displacement	Gage 2		Gage 5	
	Strain( $\mu$ strain)			
C1	max	70.87	max	70.67
	min	-143.32	min	-174.85
C2	max	157.29	max	132.48
	min	-308.69	min	-228.61
C3	max	12.74	max	-9.74
	min	-171.65	min	-168.56
C4	max	217.23	max	182.05
	min	16.62	min	-38.90
C5	max	215.00	max	171.75
	min	-1.67	min	-30.43
C6	max	416.52	max	435.87
	min	-90.41	min	-85.98

Table 9 Result strain values according to the phase differences at bearing 2 and 3

	$Dx_2$	$Dy_2$	$Dx_3$	$Dy_3$
C1	-1.35e-4	3.97e-4	-1.35e-4	3.97e-4
C2	-1.35e-5	-1.17e-4	-1.35e-5	-1.17e-5
C3	5.22e-5	2.79e-4	5.22e-5	2.78e-4
C4	1.49e-4	-3.57e-4	1.49e-4	-3.57e-4
C5	-7.54e-4	7.86e-4	-7.54e-4	7.86e-4
C6	4.32e-4	2.01e-4	4.32e-4	2.01e-4

## 5. 고 찰

스트레인 게이지를 이용하여 응력해석을 통한 측정률 실험을 행하는 동안 결과 데이터에 영향을 미치는 요인들에 대해 조사, 분석한 결과, 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

첫째, 시뮬레이터의 사양이 실제 설비와 동일한 형태인 경우와 응력이 집중되는 부위를 파악하여 실험을 행하여 유사한 형태의 과정을 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

둘째, 스트레인값의 정확성을 위해 보다 고정도의 스트레인게이지를 사용하고, 외부 노이즈가 최대한 방지될 수 있는 조건을 설정한 후 실험을 행해야 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

셋째, 커플링에 따른 보정값은 1번, 2번 베어링부와 3번, 4번 베어링부, 2번 커플링의 상호 연관성에 의해서 구해지게 됨을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

스트레인 게이지에 의한 베어링의 이송량의 변화에 따른 스트레인 변화값을 실시간적으로 확인하기 위해 System 5000을 적용하여 회전체의 측정렬을 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

첫째, 측정렬 방법에 있어서 새로운 기술로서 스트레인게이지를 이용한 방법을 제시하여 본 방법을 이용한 회전체의 측정렬에서의 적용 가능성을 확인하였다.

둘째, 계측 분야에 있어서 산업계의 표준으로 자리잡고 있는 스트레인게이지를 이용한 회전체의 측정렬은 국내에서는 처음으로 시도된 연구과제이며, 다이얼게이지로는 할 수 없었던 계측의 연속화를 기할 수 있었고, 모니터링을 통한 상황분석이 가능함을 확인할 수 있었다.

셋째, 기존의 다이얼게이지에 의한 측정렬에 소요되는 분해, 조립에 걸리는 시간 및 정비를 하기 위해 투입되는 인력 낭비를 줄임과 동시에 경비절약이 기대된다.

스트레인게이지에 의한 측정렬 방법이 체계적으로 정립되는 시점에서는 국내 회전체를 사용하는 대부분의 사업장에서 회전체 측정렬에 본 방법을 도입하게 될 것이며, 따라서 측정렬에 대한 해외 의존도가 크게 줄어들 것이다. 또한, 추후 텔레메트리 시스템(Telemetry System)에 의한 동적 상태에서의 회전체 거동 파악 및 측정렬이 수행될 경우, 회전체에 대한 정비, 측정렬에 관한 문제는 거의 해결이 될 것이라 생각된다.

## 7. 참 고 문 헌

1. Jhon Piotrowski : 「Shaft Alignment Handbook」 : Marcel Dekker, Inc., 1986.
2. 「Steam turbine maintenance」 : 전문원실,

1989.

3. 한응교 : 「Straingage -이론과 응용-」 : 보성문화사, 1993.
4. 김상철·양창현·이완익 : 「재료역학」 : 청문각, 1985.
5. 정태권·오정국·이규태·심재기·양인영·이상호 : 「신판 기계설계」 : 삼성실업, 1995.
6. Y. Hori and R. Uematsu, "Influence of misalignment of support journal bearings on stability of a multi-rotor system", TRIBOLOGY international, (1980), pp. 249~252.
7. 富澤正雄, "多軸受軸系のアライメントと軸受荷重分布の検討", 「日本機械學會論文集(C編)」第57卷, 第533號 : pp. 171~176, 1991.12.
8. System 5000 Stress Analysis Data System; Software Manual - WIN5000 Version 1.0, Measurements Group. Inc., 1995.