

<논 문>

준우산형 수차발전기의 수직도 자동 측정방법과 그 적용

A Method of Automatic Plumbness Measuring for the Semi-umbrella Type Hydraulic Turbine Generator

김 문 영* · 김 낙 점**

Moon Young Kim and Nag Jeam Kim

(2000년 3월 2일 접수 : 2000년 6월 10일 심사완료)

Key Words : Automatic Plumbness Measuring System(자동 수직도 측정시스템), Plumbness(수직도), Hydraulic Turbine Generator(수차발전기), Single Stage Shaft(기준축), Adjacent Shaft(인접축), Shim(빼기)

ABSTRACT

This paper presents the automatic plumbness measuring system for improving the accuracy and working time for plumbness measuring of semi-umbrella type hydraulic turbine generator. It is general practice that rotating shaft should run within acceptable vibration limit. In order to obtain more accurate measuring data for single stage shaft on the semi-umbrella type, plumbness approach must be established carefully and accurately. Generally, present plumbness procedure is required several calculation algorithm, laser sensor and data acquisition devices. As a result of application to actual new system it is confirmed that working time could be saved over 80% and accurate measurement data could be acquired.

1. 서 론

물은 운동(運動), 압력(壓力) 및 위치(位置) 에너지를 가질 수 있으며 자연계에서는 위치에너지 형태로 보존되는 경우가 많다. 이 위치에너지를 운동에너지 및 압력에너지 또는 운동에너지로 변환시켜 수차에 작용시킴으로서 기계적 에너지로 변환시킬 수 있다. 낙차를 이용하는 수차발전기는 특수하게 수평형도 있으나 일반적으로 수직형으로 설치되어 있다. 여러 개의 축으로 연결되어 이루어진 수력발전소의 수차, 화력 및 원자력 발전소의 스팀터빈, 복합화력의 가스터빈 등의 대형 축으로 연결되어 회전력이 전달된다. 이러한 축은 가공상의 문제로 여러 개의 단으로 제작하여, 커플링으로 연결되어 있는 다단 축으로 되어있다. 다단축의 축 정렬 방법은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 그 하나는 수력발전용 발전기의 수직 축 정렬이 있고, 다

른 하나는 화력, 원자력발전소의 수평 축 정렬이 있다.

다단 축은 연결상태에 따라 운전 중 진동, 베어링 부위의 온도 상승 등으로 인하여 설비 수명이 짧아질 수 있으며, 과도한 축 진동의 경우에는 설비 손상의 원인이 되기도 한다. 이러한 축 진동을 방지하기 위하여 축 정렬 시에는 기준 축 정렬 후 인접 축을 조정하여 축 중심선을 일직선으로 맞추는 작업을 반복한다⁽¹⁾.

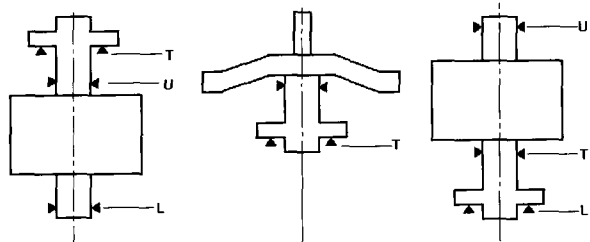
계획예방정비기간에 필수적으로 수행되는 발전설비의 축 정렬작업은 축의 런-아웃 측정결과에 따라 조정작업을 수행하여 축 진동이 허용기준치 이내에 들도록 하여야 한다. 이러한 수력축의 축 진동의 허용치는 제작사별로 다소 차이가 있으나, VDI 7919/5(수력기계)의 규정에 의하여 회전속도 N 에 대해 $1/\sqrt{N}$ 에 비례하나⁽²⁾ 수직도로 관리하는 기준 축에서는 다소 차이가 있다. 다단으로 조립된 각 단의 축은 일직선에 대하여 360° 의 어느 방향으로도 벗어날 수 있다. 따라서, 수차 축 중에서도 연결 부위가 많은 양수발전기의 경우 종합적인 측정 및 조정작업이 복잡해진다. 양수발전설비의 축 정렬 방법은 대부분 비스

* 정회원, 한전기공(주)

** 한전기공(주)

Table 1 Classification for bearing position of each maker

Type	Maker	
	Storage-hydraulic generator	Hydraulic generator
Conventional	Fuji	Hitachi, Fuji
Semi-umbrella	Hitachi, Neyrpic	-
Umbrella	-	Toshiba, Fuji



(a)Conventional (b)Umbrella (c)Semi-umbrella (L:Lower bearing, U:Upper bearing, T:Thrust bearing)

Fig. 1 Hydraulic turbine types classification of bearing position

하나 스러스트 베어링(thrust bearing) 설치위치 및 수직도 조정위치에 따라 기준 축정열 방법이 다르다. 또한, 국내에 설치된 발전기의 수직축은 Bearing 배열방식에 의하여 Table 1과 Fig. 1에서와 같이 보통형(conventional type), 우산형(umbrella type), 준 우산형(semi-umbrella type)의 세 종류로 구분할 수 있다.⁽³⁾

수차 축정열 절차에는 고정체 정열과 회전체 정열로 나눌 수 있으며, 수차의 회전체 정열에는 수직도를 조정하는 위치에 따라 구분할 수 있다. 상부 스러스트 칼라에서 수직도를 조정하는 보통형인 상부 조정형과 수차 축 스러스트 베어링 하부의 썸을 조정하는 준 우산형인 하부 조정형이 있다. 하부 조정형에서 축 조정작업에는 기준축(single stage shaft)을 지면에 대하여 수직이 되도록 조정작업을 수행한 후 인접 축을 조립해 나간다. 인접 축 조립에서는 런-아웃 측정 결과에 의한 미세 어긋남에 대해서는 커플링볼트 조임 량으로 커플링 면을 조정할 수 있다. 두 축 이상의 중심선이 일치하기 위해서는 커플링면(face)이 평행하고 커플링 원주(rim)가 일치하여야 한다.⁽⁴⁾ 이와 같이 축정열 상태를 위해서는 기준축 정열이 확실하게 수행되었을 때만이 완벽한 전체 축정열 작업이 수행된다.

Fig. 2는 수직축에서 축정열 불량상태를 나타낸 것으로 (a)는 기준축의 수직도 불량으로 전체 축 정열이 불량한 상태이며, (b)는 연결 커플링이 불량한 상태이고, (c)는 상부 가이드와 연결 커플링 모두가 불량 정열 된 형태를 보여

주고 있다.⁽¹⁾ 이러한 원인의 영향으로 발생하는 공진현상, 채순환 축추력, 반경방향의 추력 등은 매우 천천히 나타나므로 쉽게 감지할 수 없으나⁽⁵⁾ 축정열이 제대로 되어있지 않아 발생하는 것은 직접 나타남으로 매우 중요시하는 부분이다.

수직축 수차발전기의 경우, 우선적으로 기준 축의 수직도를 조정해 놓고 인접 축을 단계적으로 조립, 측정 및 조정의 반복 작업과정을 거친 후 전체 축정열을 수행한다. 축정열 작업에서 기계적 특성에 따라 다소 차이가 있으나, 기본이 되는 수직도 측정, 조정 및 계산에 대한 기본 원리는 비슷하다. 기준 축의 수직도 조정방법에는 링-키(ring-key)를 조정하는 방법과 스러스트 베어링(thrust bearing)의 하부 썸(shim)의 높이를 조정하여 기준 축정열을 하는 2가지 방식이 있다.

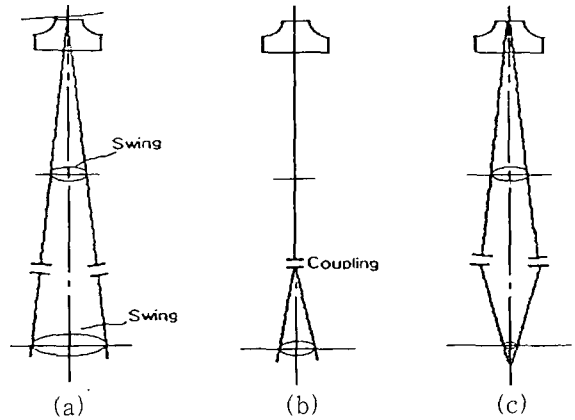


Fig. 2 Misalignment types of vertical shaft

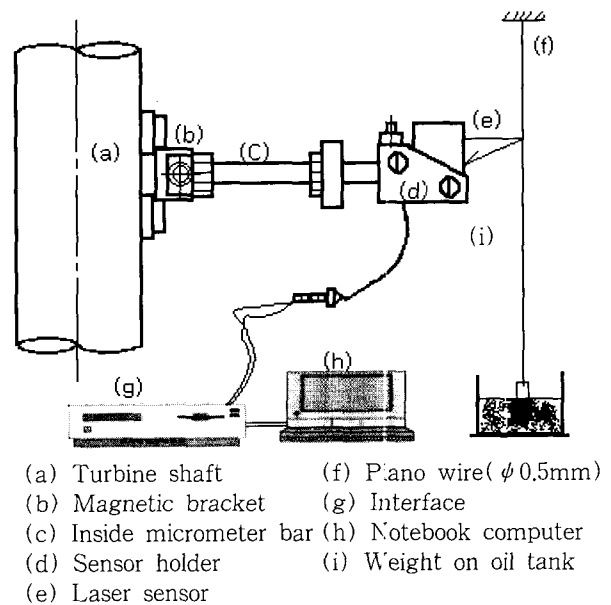


Fig. 3 General diagram of plumbness measuring system

본 연구에서는 준 우산 하부조정형의 수직도 측정방법 개선에 대하여 연구하였다. 측정에서 기존 방법으로는 내경 마이크로미터를 이용하여 기준 축으로부터 일정한 거리에 설치된 피아노선까지의 상 하부의 상대거리를 측정 비교하여 기울기를 판정하는 방법이다. Fig. 3은 개략적인 전체 시스템 구성을 나타내고 있다. 이것은 축에 대하여 고정장치(b, c, d), 측정장치(e, g), 컴퓨터(h)와 피아노선 프롬브(plumb)로 이루어져있다. 기존의 방식으로는 경험과 숙련이 요구되며 반복측정시 추의 안정을 위한 시간 지연과 많은 인적오차를 유발할 수 있으며 계산상의 오차로 작업시간이 지연될 수 있다. 문제해결을 위하여, 수직도 측정은 비접촉 레이저 센서를 이용하여 데이터를 취득하도록 하였으며 취득 데이터에 대한 이론적 해석과 자동연산과정을 거쳐 최종 수직도를 그래픽 상에서 볼 수 있도록 하였다.

2. 수직도 측정 및 측정열 방법

2.1 기준 축 정열 (하부조정형 : 준우산형)

Fig. 4는 준우산형 기준축 조정을 위한 수직도 측정(plumbness measuring)을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 대형 수직 축에 대해 피 측정 회전체 표면에 개발한 측정장치를 부착하여 하부에 추를 달아서 중력에 의해 안정화된 축으로부터 일정거리를 유지하고 있는 8개소(90°마다 설치된 피아노 선까지의 상, 하부 측정 위치)의 피아노선까지의 거리를 레이저 센서로 측정한 다음, 다시 축을 90°씩 회전한 후 동일한 방법으로 총 32회 측정하면 Table 2와 같은 데이터가 취득된다.

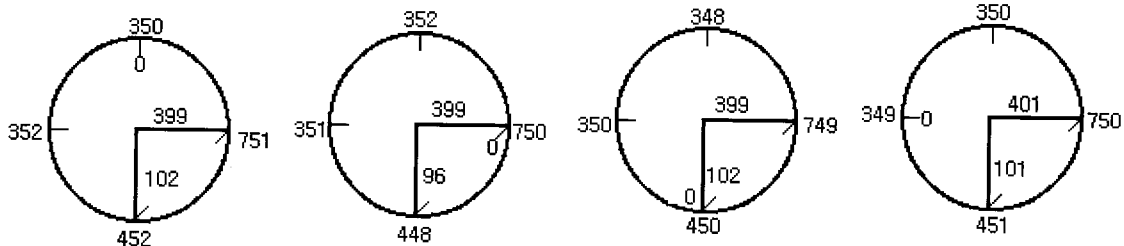


Fig. 5 The vector result of acquired upper position on 0°, 90°, 180°, 270°

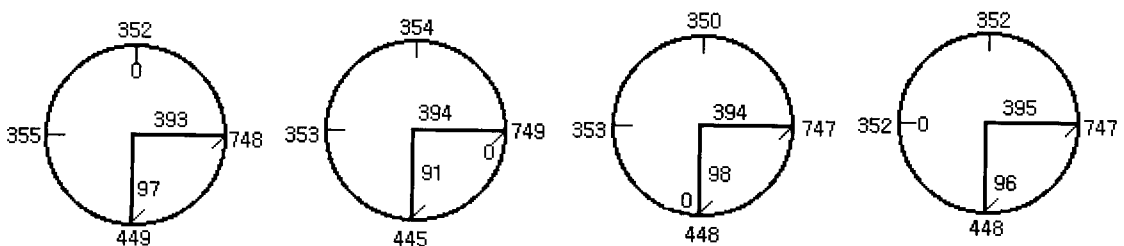
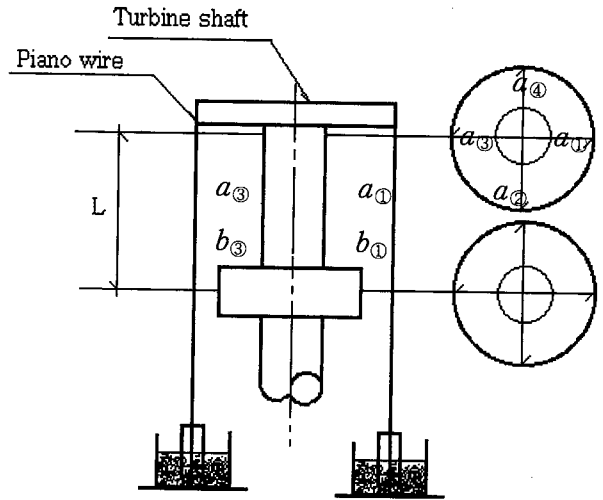


Fig. 6 The vector result of acquired lower position on 0°, 90°, 180°, 270°



{L : Distance between upper position and lower position(2.5 M)}

Fig. 4 Single shaft plumbness measuring

Table 2의 데이터를 기본으로 0° -180°, 90° -270°의 대각선 방향 기울기 정도를 계산할 수 있으며, 0° -180° 방향에서의 합성벡터 \vec{V}_1 는 \vec{a}_1 을 ①번 방향벡터, \vec{a}_3 을 ③번 방향벡터 라고 하면 식 (1)와 같이 된다.

$$\vec{V}_1 = \vec{a}_1 - \vec{a}_3 \quad (1)$$

여기서 $\vec{V}_1 > 0$ 면 0° 방향으로, $\vec{V}_1 < 0$ 면 180° 쪽으로 기울어져있다. 마찬가지로 방법으로 상부, 하부 각 각도에서 벡터계산을 수행하여 원주 좌표계로 표시하면 Fig. 5와 Fig. 6과 같다.

Table 2 Shaft plumbness measuring of Sam rangjin hydraulic storage power plant





Shaft position		0°	90°	180°	270°	
						
1/100 mm	Upper position	a ₁	751	750	749	750
		a ₂	452	448	450	451
		a ₃	352	351	350	349
		a ₄	350	352	348	350
	Lower position	b ₁	748	749	747	747
		b ₂	449	445	448	448
		b ₃	355	353	353	352
		b ₄	352	354	350	352

Table 3 The result of plumbness with calculated (1/100mm)

Angle	0°	90°	180°	270°	Average
Direction					
K1-K3 (x)	1.2	1.0	1.0	1.2	1.1
K2-K4 (y)	1.0	1.0	0.8	1.0	0.95
K (sum)	1.56	1.41	1.28	1.56	1.453

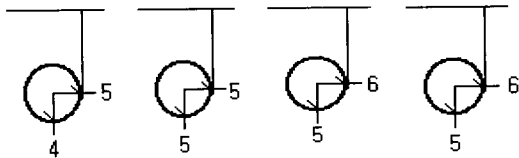


Fig. 7 The result of vector size and direction calculated from 0° to 270°

Fig. 5와 Fig. 6의 원주 좌표계를 기본으로 상부와 하부의 각 회전 각도에서 식 (1)의 결과를 이용하여 상부벡터에서 하부벡터를 빼면 기준축 벡터의 크기와 방향을 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

Table 3에서 x방향과 y방향의 축 기울기 값 K1-K3와 K2-K4은 식 (2)과 식 (3)에 의해 계산되며 합성에 의해서 축 수직도 K(기준축의 수직도를 조절하는 기준값으로 수차축이 중력방향에 대하여 단위 길이에 대한 기울기로 평가하는 방법은 (4)에 의해서 계산된다.

$$K1 - K3 = \frac{(a_1 - a_3) - (b_1 - b_3)}{2L} \quad (2)$$

$$K2 - K4 = \frac{(a_2 - a_4) - (b_2 - b_4)}{2L} \quad (3)$$

$$K = \sqrt{(K1 - K3)^2 + (K2 - K4)^2} \quad (4)$$

위의 Fig. 5와 Fig. 6 그리고 Fig. 7의 결과를 보면 벡터의 방향은 기준 축이기 때문에 모든 각도에서 동일하고 그 크기는 동일한 축을 기준으로 90° 씩 회전시켜 측정하였으므로 축 수직도 K는 원칙적으로 일치하여야 하나 약간씩 차이가 나는 것은 현장의 조건 즉, 기준축의 측정부위의 미소한 변형이나 측정계기의 오차 등으로 생각해 볼 수 있다.

Table 3에서는 축 수직도의 정확성을 확인하기 위하여 각각의 각도에서 측정하여 계산한 K의 결과의 평균으로 계산한다. 그 값은 제작사의 런-아웃 허용값 대신에 기준축의 최종 수직도 결과 값으로 0.02 mm/M이내에서 관리 되어져야 한다⁽⁶⁾. 수직도 K의 평균치가 이 허용치 이내의 들어 올 때는 다음 단계의 작업을 진행할 수 있으나 허용치를 초과하였을 경우에는 기준축 트러스트 베어링의 썸(shim)을 조정하여 허용치 이내에 들도록 조정하여야 한다.

2.2 인접 축 정열 및 종합 축 정열

앞 절에서 서술된 작업이 완료되면 인접축을 조립하여 축을 전체적으로 조립해 나간다. 전체 조립작업이 완료된 후, 수직축의 런-아웃 측정치가 제작 사에 따라 다소 차이가 있으나⁽⁷⁾ 수직형 수차는 일반적으로 4/100~5/100 mm 허용범위 내에서 회전되어야 한다.^(6, 8)

3. 수직도 자동 측정시스템 구성

Fig. 3 에서와 같이 시스템 구성도는 크게 (b)Magnetic bracket, (e) Laser sensor, (f) Piano wire(φ0.5mm), (g) Interface, (h) Notebook computer 등으로 구성되어 있다. 기존 수직도 측정에는 피아노선과 축사이의 간격을 내경 마이크로 미터를 이용하여 측정하였으나, 개발된 시스템은 표면이 축의 반경과 같이 정밀하게 가공된 마그넷 브라켓(magnetic bracket)를 수직축의 피측정 회전체 임의 표면에 부착하여 측정하도록 되어있다. 브라켓은 수직축 회전체의 원주 둘레에 해당하는 구면 반경으로 정밀하게 가공되어져 측정동안 축 표면에 안정되게 부착할 수 있으며 이 위에 일정거리를 조절할 수 있는 뎀스 마이크로미터(depth micrometer : 센서의 미세조정)와 바(bar) 끝 부분에 고정된 센서의 광선을 브라켓 윗 부분에 있는 미세조정 장치로 조정하도록 되어있다. 따라서 레이저 센서로 피아노선까지 비접촉으로 정밀하게 거리를 측정할 수 있다.⁽⁹⁾ 90° 마다 설치된 피아노선과 축사이의 상 하부의 간격을 구분하여 측정한다. 측정값은 인터페이스(interface)장치를

통하여 모니터(monitor)에 측정값이 나타난다. 모니터상의 결과 값은 측정수치가 (+)이면 최소의 값을 읽고 (-)수치로 나타날 경우 최대수치를 읽어들이도록 되어있다. 이렇게 취득되어진 측정값은 자동적으로 개발된 프로그램에 의하여 컴퓨터에 입력되어 식 (1), (2), (3), (4)과정으로 연산 처리된 후 출력된다. 따라서, 기술자는 기준축의 측정열과정에서 마그넷 브라켓만을 각 측정부위에 부착하게 되므로 현장경험이 부족하여도 충분히 작업을 수행할 수 있으며 정확한 데이터를 얻을 수 있다.

4. 현장적용 결과 및 고찰

전체 시스템을 구현한 장치를 이용하여 수직도 측정이 가장 복잡한 삼랑진 양수발전소(1999, 11)의 계획예방정비공사시에 적용하여 인력감소, 정확한 데이터 취득 및 작업 시간을 단축하였다. 특히 현재의 시스템은 비접촉 측정 시스템으로서 기존에는 측정자와 데이터를 기록하는 2명이 측정 하여 수 작업으로 그 결과를 계산하였으나, 새로 개발된 시스템은 측정과 동시에 데이터가 컴퓨터에 입력 연산됨으로서 인적실수 없이 정확한 측정데이터와 수직도에 대한 결과를 얻을 수 있다.

Table 4는 계획예방정비공사 기간 중에 수행된 단계별 작업을 통하여 발생하는 측정개소, 소요인력 및 측정시간을 나타낸 것으로써 수직도 측정시 기존의 방법으로는 7.75(man-hour)소요되었으나 새로운 시스템을 적용하여 측정하였을 경우 1.24(man-hour)로 현저하게 줄어들었다. 자동 측정시스템을 이용하여 인력적인 측면에서는 평균적으로 80%이상 줄어들었으며, 데이터 취득 후 기울기 결과에 대한 연산과정을 포함하면 더 많은 인력감소와 작업횟수를 줄여 작업시간이 단축되어진다.

Table 4 Service manpower and time to measure run-out according to step on the site <Samrangjinhydraulic storage power plant>

Measuring counter	Point	Existing method			Developed method		
		mp	mm	mh	mp	mm	mh
1	Upper(4) Lower(4)	2	160	2.67	1	22	0.37
2	"	2	150	2.50	1	25	0.42
3	"	2	155	2.58	1	27	0.45
Total		6	465	7.75	3	74	1.24

{mp : The number of measuring Person, mm : Measuring time(man-minute), mh : Measuring time(man-hour)}

결과적으로 측정열 작업기간이 길면 길수록 정확한 수직도를 얻을 수 있으나, 한정된 시간과 한정된 인력으로 수직도를 허용 범위 안에 있도록 측을 조정하여 측정열을 하여야 한다. 이러한 하부 조정형 측정열 작업과정중에 비중에 큰 기준축 정열을 개선하는 것이 중요하다고 판단되어 수직도 시스템을 개발, 현장 적용하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

측정열이 불량할 경우에는 측진동이 과도하게 나타나 기기를 손상시키는 사례가 종종 있다. 이러한 측진동은 벨런싱으로 전체가 조정되는 것이 아니므로 문제가 심할 경우 전체 측정열 작업을 다시 수행하여야 하는 번거로움을 가지고 있다. 특히 측정열에서 가장 중요한 기준축 정열에 새로 개발된 시스템을 적용하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 1/10000 mm고 정밀도를 지닌 인터페이스(interface)와 레이저 장치를 이용하여 데이터를 취득하므로 데이터가 정밀하다.

(2) 시스템에 의한 자동 데이터 취득 및 자동연산의 두 과정이 단일과정으로 동시에 수행된다.

(3) 새로운 시스템을 적용하여 평균 80%이상 인력절감 효과를 얻었으나 기울기 판정을 위한 연산과정을 포함하였을 경우 보다 더 큰 절감효과를 얻을 수 있다.

(4) 회전체 측정열 중 가장 중요한 부분중의 하나로 많은 경험을 요구하였으나 개발된 자동화 시스템 적용으로 초심자도 쉽게 기준 측정열을 수행할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

(1) 박호철, 김문영, 이현, 1998, "수직형 다단축의 오프셋 자동 측정시스템 개발", 한국소음진동공학회지, 제8권 제5호, pp. 922~928.

(2) 양보석, 1994, "회전기계 진동평가에 관한연구", 한국소음진동공학회지, 제 4 권 제 3 호, pp. 278~282.

(3) 동명사, 1977, "수력발전공학" 제 7 장 pp.187~205.

(4) 황철호, 김정태, 이현, 이병준, 1994, "터빈 계통의 측정열(I)(II): 원리 및 방법", 한국소음진동공학회지, 제 4 권, 제 1 호 pp. 22~ 31, pp. 33~42.

(5) 오광석, 신필권, 박종호, 심우건, 주두연, 1999, "펌프의 저유량 운전특성에 관한 실험적 연구", 한국소음진동공학회지, 제 9 권, 제 1 호, pp. 85~96.

(6) KECOP, 1986, "Samrangjin StorageHydraulic Power Plant Constructing Manual", pp.1901~1903.

(7) John Piotrowski, 1998, "ShaftAlignment Hand-book", Second Edition pp. 152~156.

(8) KECOP, 1986, "Mooju StorageHydraulic Power PlantConstructingManual", pp. 1020~1022.

(9) Japan Keyence, 1996, "Ultra HighAccuracy Laser DisplacementLC-2400 Series", pp. 39~40.