

〈論 文〉

# 정밀 축진동 측정에 사용되는 비접촉식 진동센서의 측정오차

Measurement Errors of Non-contact Type Vibration Sensors  
Used for Precision Measurement of Shaft Vibration

전 오 성\* · 김 동 혁\* · 최 병 천\*

Oh Sung Jun, Dong Hyuk Kim and Byoung Chun Choe

(1991년 6월 13일 접수, 1991년 8월 16일 심사완료)

## ABSTRACT

When non-contact type vibration probes are used for the precision measurement of shaft vibration, they can induce the measurement errors due to the shaft curvature since they have been calibrated for the flat plate. In this study the errors due to the shaft radius and the misalignment between the shaft and probe centerlines are analyzed, and an in-situ calibration tool, which can be conveniently used for calibration independent of the shaft curvature and material, is introduced.

## 1. 서 론

고도로 산업화가 진행됨에 따라 회전기계는 더욱 중요시되고 있으며 이의 성능 향상에 부단한 노력이 경주되고 있다. 특히 우주 시대의 개막과 더불어 우주선 및 인공위성에 사용하기 위해 초소형이며 초고속의 고성능회전모터를 개발하기에 이르렀다. 한 예로서 미국립항공우주국(NASA)의 스페이스셔트에 사용되는 주엔진 터보펌프를 들 수 있는데 이 터보펌프는 접시만한 크기로서 71000마력을 생성해 낸다. 이러한 가공할만한 에너지 밀도와 유량을 감당해 내려면 종래의 회전기계보다는 훨씬 더 높은 회전속도를 가져야한다. 이러한 회전체는 큰 관성부와 와 진동 및 동안정성의 문제등을 내포하고 있다. 고성능 회전기계의 또다른 예로서 초정밀가공용 동작기계를 들 수 있다. 선반 혹은 밀링머신으로 초정밀가공을 행하기 위해서는 회전축의 진동이 극히 작아야 한다. 이와같이 갈수록 회전기계의 초고성능 초

정밀도를 추구함에 있어서 회전축의 진동을 현장에서 모니터링하고 이 진동데이터를 분석하여 회전축을 제어하는 것이 강력히 요구되어진다. 따라서 현장(in-situ) 측정이 중요성을 띠게 되었는데 이는 제어기술의 바탕이 되는 자료를 현장에서 제공할 수 있기 때문이다[1, 2].

회전축 진동측정의 대상이 되는 것들은 모터, 발전기, 엔진 및 터빈등을 대표적으로 들 수가 있다. 여기서 소형회전기계의 축표면과 같이 비교적 곡면을 이루고 있는 부분의 진동변위 측정에는 신중한 고려가 요구되어진다. 이는 축의 곡면도에 따라 감도가 변화하기 때문이다. 따라서 평판에 대한 교정차트를 회전기계축진동 변위환산에 이용하면 곡률에 따라서 오차가 생기게 된다. 본 연구에서는 비접촉 축진동 측정시 발생하는 오차에 대하여 검토하고자 한다.

## 2. 비접촉 축진동 측정센서

### 2.1 와전류(Eddy-Current)형 비접촉 센서

거의 모든 진동관련 기계설비의 진동측정에 사용

\* 한국표준과학연구원 음향진동연구실

되는 가장 보편화된 센서이다. 흔히 마그네틱 센서라고도 불리우는 이 센서는 보통 두개의 코일로 이루어져 있다. 이중 하나는 능동 코일(active coil)이라 불리우며 전기도체로 이루어진 측정대상물체에 의해 영향을 받는데 반해, 다른 하나의 코일은 브릿지(bridge) 회로를 구성하며 온도에 따른 보정을 하는 역할을 한다. 능동 코일로부터 나오는 자장은 도체 도면에 침투하여 측정물의 표면에서 가장 강하게 나타나는 와전류를 만들어 준다. 측정대상물이 센서에 근접할수록 점점 강한 와전류를 만들어 주는데 이 와전류가 능동 코일의 임피던스를 변화시켜 브릿지의 불평형 전압을 형성시켜준다. 바로 이 불평형 전압을 직류값으로 변환시켜 측정대상물의 진동에 의한 변위를 측정하는 것이다. 현재 상업용으로 시판중인 와전류 센서는 측정범위가 0.25~30mm까지 가능하며, 최대 분해능은 0.1 $\mu$ m까지 가능하나 보통 1 $\mu$ m 정도로 보고 있다.

일반적으로 측정대상물의 형상, 재질등이 센서의 출력에 영향을 주므로 실제 측정하고자 하는 대상체를 정적으로(statically) 교정해 주어야 한다. 따라서 별도의 교정기(calibrator)가 필요하게 된다. 측정대상물 표면이 평면일 경우에는 센서 직경보다 크기만 하면 측정오차가 거의 없지만 만일 원형단면을 가진 회전축에 적용하려면 축의 직경이 센서 직경보다 4배 이상이 되어야 한다.

## 2.2 용량(Capacitive)형 비접촉 센서[3, 4]

이 센서는 측정대상체의 진동면이 전기도체일 경우, 이를 축전판(capacitor)의 한쪽 면으로 이용하여 진동에 따르는 정전용량의(capacitance) 변화량을 전압으로 변환시켜주는 역할을 한다. 비교적 복잡한 전기회로를 가지나 기계적으로 간단한 구조로 되어있기 때문에 널리 이용되고 있다. 전기이론에 따르는 정전용량의 변화는 다음과 같다.

$$C = \frac{5.715A}{x} \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 정전용량,  $A$ 는 진동면의 면적(mm<sup>2</sup>) 그리고  $x$ 는 판 사이의 간격(mm)을 나타낸다. 윗 식은 비선형이므로 아주 좁은 범위의  $x$ 내에서만 이용가능한 선형도를 취할 수가 있다. 윗 식을  $x$ 에 대해 미분하면

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{5.715A}{x^2} \quad (2)$$

이 되는데 식 (1)을 이용하면

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{C}{x} \quad (3)$$

또는

$$\frac{dC}{C} = -\frac{dx}{x} \quad (4)$$

가 되어  $C$ 와  $x$ 간의 퍼센트 변화는 같게 된다. 전치 증폭기(op-amp)를 회로중에 채택하면 이를 이용하여 초미세 진동변위를 측정할 수 있다. 이 센서의 출력전압은 판사이의 간격  $x$ 에 직접적으로 비례하도록 설계되어 있다. 이 형태의 용량형 센서는 직경 1.1354~25.4mm의 축전판 면을 갖고 있으며 측정가능 변위범위는 0.0254~12.7mm정도이다. 측정가능 영역의 0.1퍼센트 정도되는 분해능을 가지며, 약 25nm정도의 변위측정이 가능하다. 이 측정센서는 초정밀측정을 요구하는 컴퓨터 하드디스크 진동, 초정밀 동작기계의 축진동측정 등에 사용된다.

## 3. 축의 곡면도에 따르는 센서의 감도변화

용량형 센서를 대상으로 하여 측정시 발생하는 오차에 대하여 분석해 보고자 한다. 시편의 표면이 곡면을 이루고 있으면 축전판 면과 서로 평행하지 않는 상태가 되고 각 부분별로 서로 다른 포텐셜을 지니게 된다. 물론 축전판에서 형성시켜주는 전압은

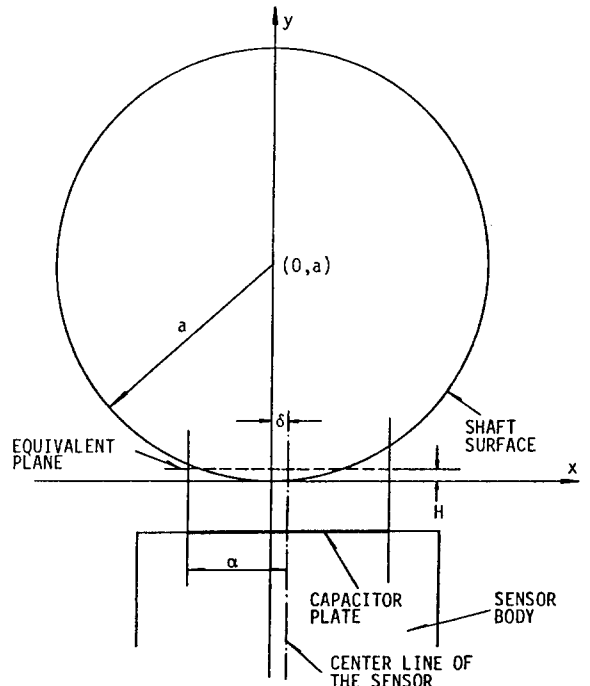


Fig. 1 Relative position of the capacitive sensor and the shaft

면 전체의 평균값이 되는데, 면 전체의 평균값은 어떤 등가평면에 대한 가상적인 값과 같다고 할 수 있을 것이다. 용량형 센서를 이용한 변위측정에 있어 이러한 곡면의 등가평면화는 실제 곡면으로 되어 있는 시편에 대한 교정에서 활용할 수 있다. 여기서 축전판 면과 등가평면 사이의 축전강도(flux)는 균일하다고 가정하고 Fig. 1과 같이 나타내었다. Fig 1은 전체적으로 시편의 단면과 센서면의 상대위치를 보여주고 있다. 시편의 반경을  $a$ 라 하면 시편 표면 을  $x, y$ 의 함수로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$y = a - \sqrt{a^2 - x^2} \quad (5)$$

축전판 면과 시편 표면간에 균일한 축전강도를 가정 하면 시편 표면중에서 축전판 면으로서 작용하는 부분은 센서의 축전판 면을 시편 표면에 투영시킨 부분과 같다. 그런데 축전판 면은 원형으로 되어 있으므로 시편 표면에 투영되는 부분도 원의 형상을 가지게 된다. 따라서 축전판 원형 단면 위의 원기둥 체적을 적분하여 구한 후 이를 축전판의 면적으로 나누어, 등가평면식을 다음과 같이 나타내었다.

$$H = \frac{\int_{-a+\delta}^{a+\delta} (a - \sqrt{a^2 - x^2}) 2a \sqrt{1 - \left(\frac{x-\delta}{a}\right)^2} dx}{\pi a^2} \quad (6)$$

여기서  $a$ 는 축전판 면의 반경,  $\delta$ 는 센서중심선과 축 중심 사이의 어긋남(misalignment)을 나타낸다.  $H$ 는 곡면 시편의 등가평면이 시편에 접하는 평면에

비교해서 얼마나 센서 표면에서 더 멀리 떨어진 효과를 나타내는가를 말해준다.

Fig. 2는 Fig. 1에서  $\delta=0$ 일 때 등가평면의 위치  $H$ 를 보여준다. Fig. 2에서 실선은 식 (6)을 이용하여  $a=1.6\text{mm}$ 에 대하여 계산한 결과인데, 축 반경이 작아지면서 평판에 대한 교정값과 비교하여 등가평면으로 인한 오차가 급상승함을 보여준다. 이 그림에는 또한 축전판 면의 반경이 1.6mm인 용량형 센서(Pioneer사 제품 SC3204)를 사용하여, 몇가지 반경을 갖는 S45C 재질의 축에 대하여  $H$ 를 측정할 결과를 보여주고 있다. 이론값과 실험값 사이에는 얼마간의 차이가 존재하고 있으나 비교적 비슷한 경향을 보이고 있다.

#### 4. 센서의 축어긋남에 따른 감도변화

회전축 진동을 측정하기 위해서는 센서의 중심선과 축중심선이 일치하도록 설치해야 한다. 그러나 실제의 경우 정밀한 센서 설치대를 사용하지 않는 한 얼마간의 축어긋남이 존재하게 되며, 축 회전시 질량 불평형등에 의해 축굽힘이 발생할 때 축의 중심선은 순간적으로 센서 중심에서 어긋나게 되는데, 설치 어긋남이나 축굽힘에 의한 어긋남 등은 정밀한 진동변위 측정에 상당한 영향을 줄 수 있다. Fig.1에서  $\delta$ 는 이러한 어긋남을 모두 포함하게 된다.

Fig. 3은 식 (6)에 의거하여  $H$ 값을 계산한 것이

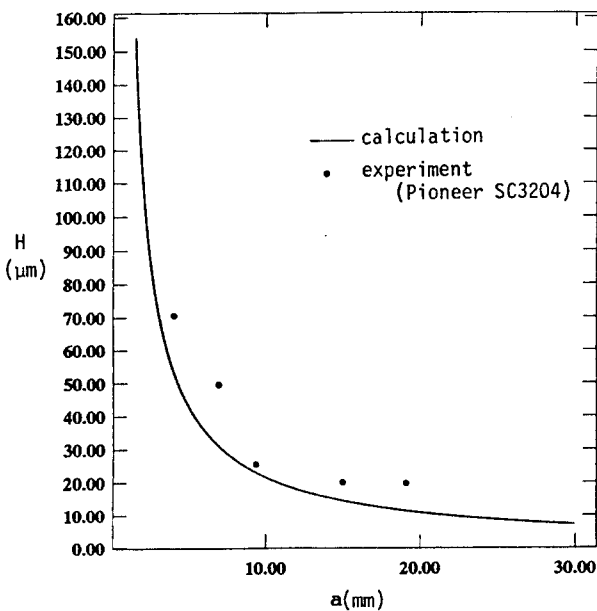


Fig. 2 Error caused by shaft radius with  $\delta=0$

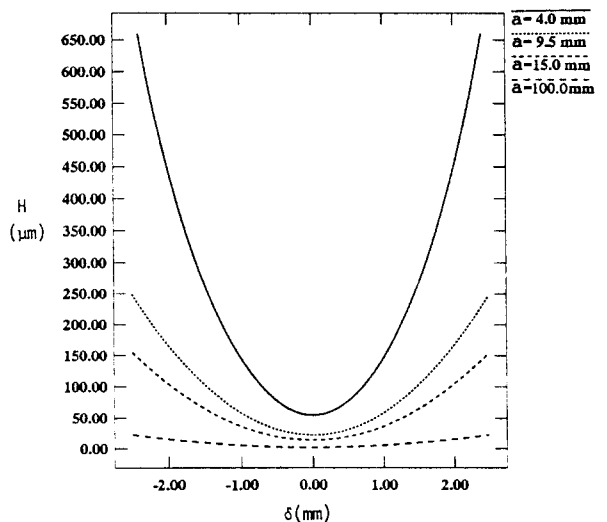


Fig. 3 Error caused by shaft radius and misalignment

다. 수평축은  $\delta$ , 수직축은  $H$ 값을 표시한다. 시편의 반경이 4mm일 경우에는 센서의 어긋남이 없어도 55 $\mu\text{m}$  정도의 감도에 의한 오차가 발생하며 1mm의  $\delta$ 에 대해서는 146 $\mu\text{m}$ 로 급격히 증가한다. 이러한 경향은 시편의 반경이 커질수록 점차 둔화되는데 시편 반경이 9mm가 되면  $\delta=0$ 일 때 24 $\mu\text{m}$ 이며  $\delta=1\text{mm}$  되면  $H$ 값은 61 $\mu\text{m}$ 가 된다. 시편 반경 100mm에서는  $\delta=0$ 일 때 약 3 $\mu\text{m}$ 의 오차가 발생하고  $\delta=1\text{mm}$

일 때 5 $\mu\text{m}$ ,  $\delta=2$ 일 때 15 $\mu\text{m}$  정도의 오차를 가지게 된다.

Fig. 4는 평판에 대한 센서의 교정표이다. 이를 보면 스탠 오프(stand off) 거리가 약 0.4mm이고 측정범위는 센서표면으로부터 150~640 $\mu\text{m}$  떨어진 위치라는 것을 알 수 있다. 스탠 오프 거리란 측정 대상체를 센서의 앞쪽에 위치시킬 때 센서로부터의 전압출력이 0이 되는 위치이다.

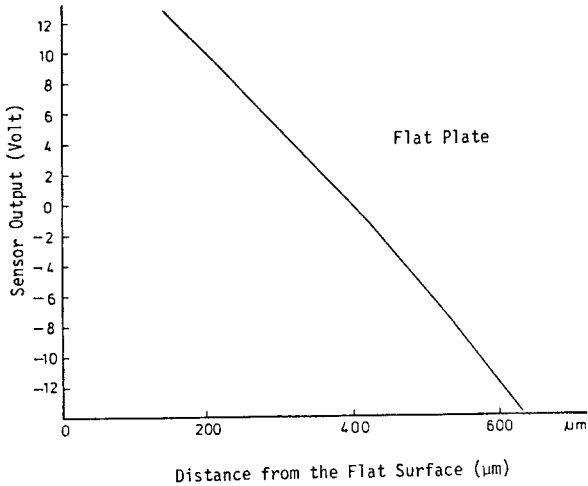


Fig. 4 Calibration chart of a capacitive sensor for flat plate

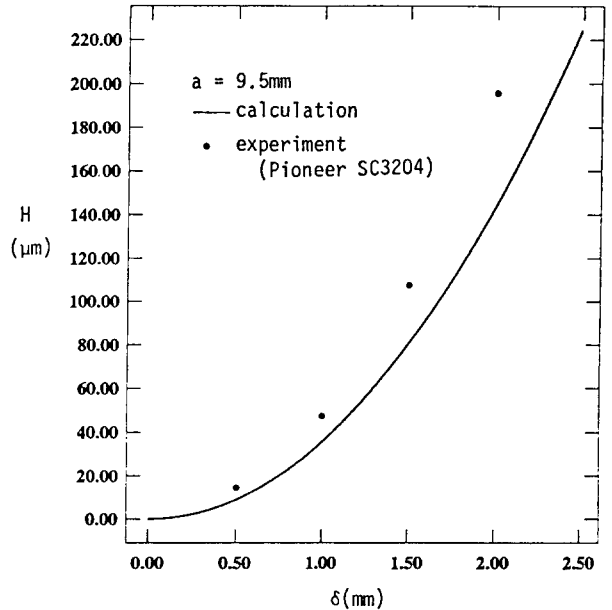


Fig. 6 comparison of calculation with experimental results of the misalignment error with  $a = 9.5\text{mm}$

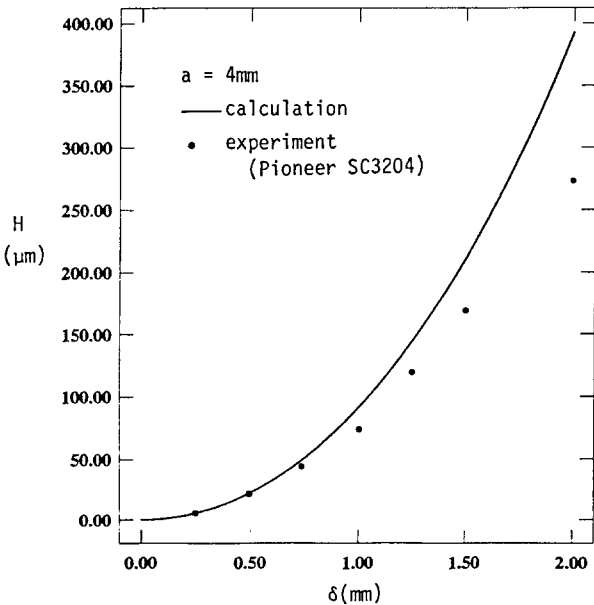


Fig. 5 Comparison of calculation with experimental results of the misalignment error with  $a = 4\text{mm}$

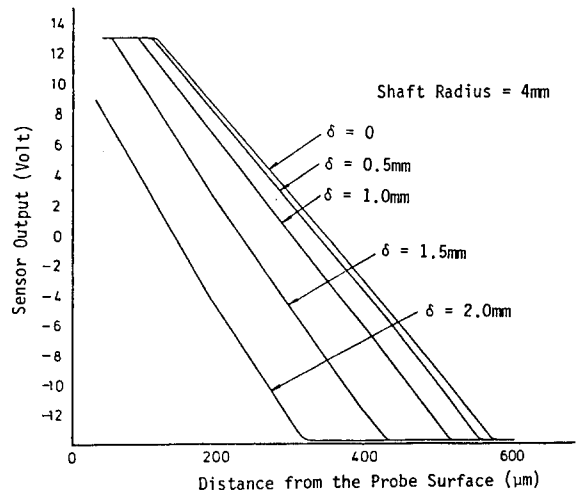


Fig. 7 Calibration chart of capacitive sensor with shaft radius  $a = 4\text{mm}$

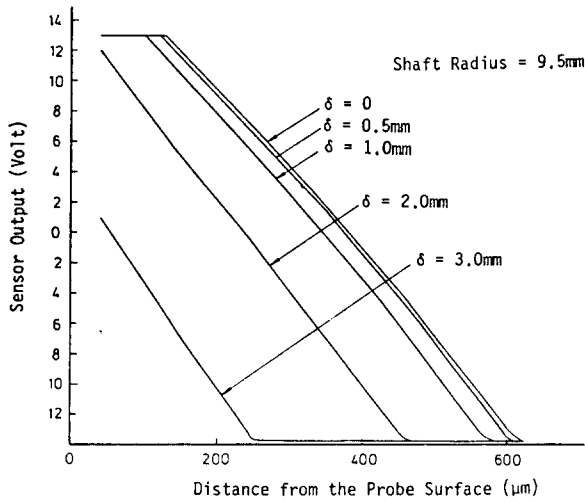


Fig. 8 Calibration chart of capacitive sensor with shaft radius  $a=9.5\text{mm}$

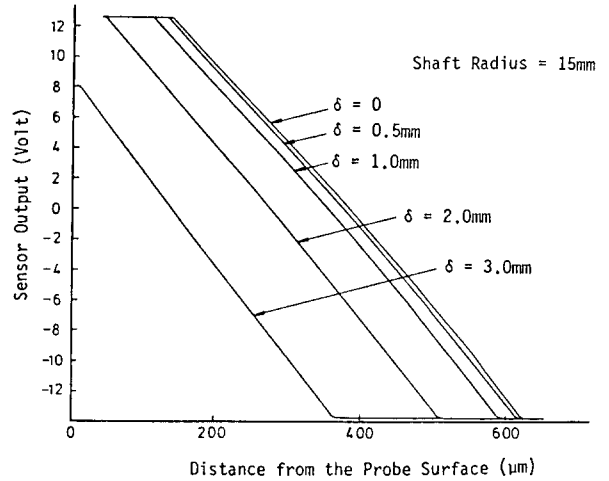


Fig. 9 Calibration chart of capacitive sensor with shaft radius  $a=15\text{mm}$

Fig. 5와 Fig. 6은  $a=4\text{mm}$ 와  $9.5\text{mm}$ 인 각각의 경우에 축어긋남에 따른  $H$ 값을 스텝 오프 위치에서 보정된 값으로 환산해 놓은 것이다. Fig. 4에서 나타난 바와같이 이 센서의 감도는  $1\text{Volt}/20\mu\text{m}$ 인 점을 고려하여 측정결과를 거리로 환산하여 검은 점으로 표시하였다. 식 (6)을 이용한 결과(선분)와 차이가 발생하지만, 원형단면에 의한 오차발생은 예측한 바

와 같은 경향을 보이고 있다.

Fig. 7에서 Fig. 9는 직경이 다른 시편들에 대하여 축어긋남  $\delta$ 를 변화시켜 가면서 측정한 교정 결과이다. 이 그림들을 통하여 예상되는 측정오차를 추정하고 이에 따른 설치정밀도를 부과할 수 있다. 또한 진동변위 측정시 일정한 곡면도에 대한 교정을 행할 수 있게 된다. Fig. 10은 센서의 설치오차  $\delta$ 에 해당

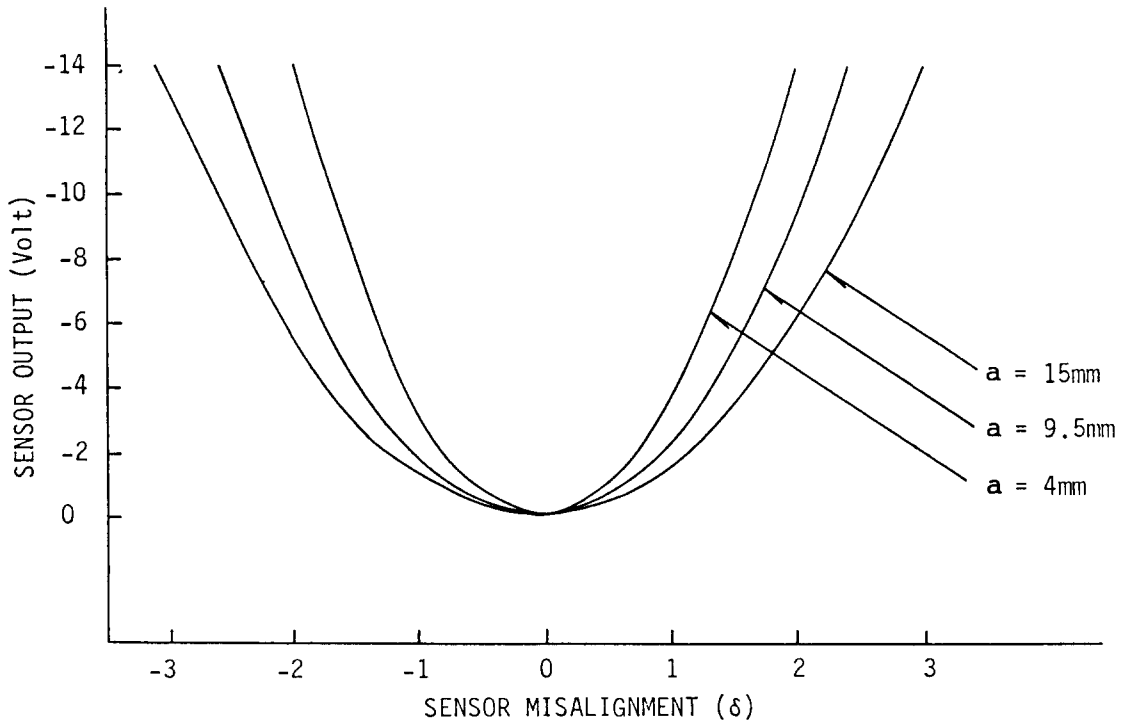


Fig. 10 Change of the sensor gain with different shaft radii and certain amount of misalignment

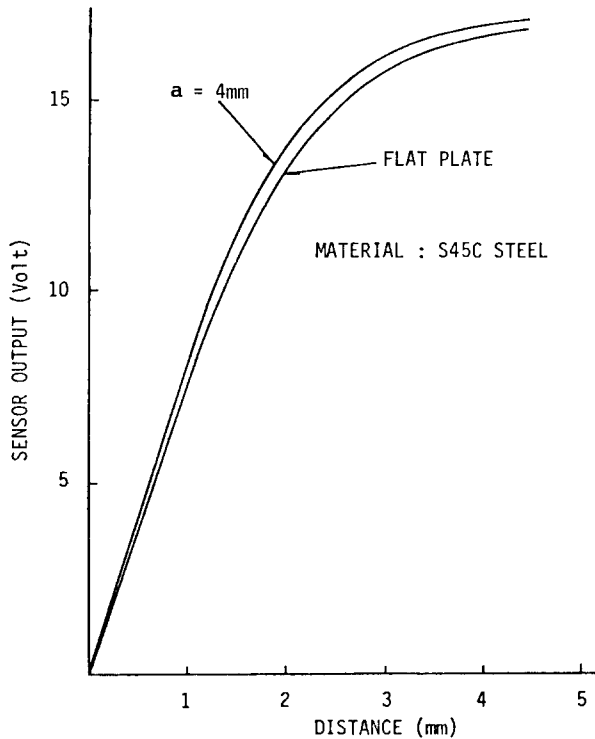


Fig. 11 Calibration chart of eddy-current probe for flat plate and shaft radius of 4mm (S45C steel was used)

하는 출력의 변화를 실험을 통하여 측정된 것이다. 이 실험에 사용된 회전축의 반경은 각각 4mm, 9.5mm, 15mm이다. 이 결과는 축의 반경이 클수록 동일한 축어긋남에 대해 오차를 적게 발생시키는 것을 보여준다.

다음은 직경이 5mm인 와전류형 비접촉센서 (Dymac M61; 감도 200mV/25 $\mu$ m)에 대한 설치오차에 대하여 검토해 보고자 한다. Fig. 11은 S45C강으로 이루어진 반경 4mm의 회전축에 대하여 교정한 것이다. 이와함께 같은 재료의 평판에 대해서도 교정곡선을 얻어서 비교하였다. 센서와 측정물 표면까지의 거리가 작을 때는 약 40~50 $\mu$ m의 오차가 발생하지만 거리가 커질수록 100 $\mu$ m이상의 오차가 발생함을 보여준다. 이는 측정물 표면의 곡률반경이 4mm이므로 평면과의 감도차이가 발생하기 때문이다. Fig.12는 스테인레스강으로 된 반경 9.5mm의 측정물에 대해 센서가 설치될 때 설치오차의 양에 따른 감도의 변화를 그래프화한 것이다. 여기서  $\delta=1$ mm 일 때는 약 40 $\mu$ m 정도의 오차를 수반한다는 것을 알 수 있다.

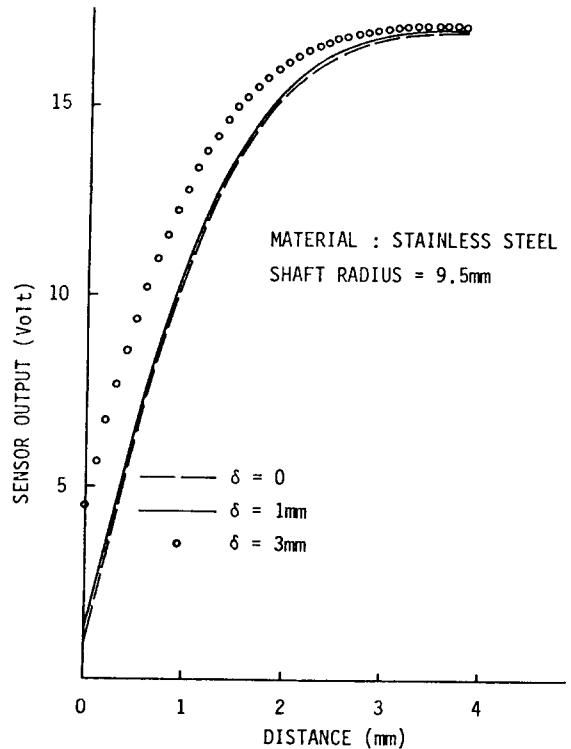


Fig. 12 Calibration chart of eddy-current probe for the shaft radius of 9.5mm and various values of  $\delta$  (Stainless steel was used)

## 5. 현장 교정 (In-Situ Calibration)

앞에서는 회전축 단면의 곡률에 따른 센서의 감도 변화 및 센서의 축어긋남에 수반되는 측정오차등을 다루었다. 이 문제들은 센서의 타입이 와전류형이든 용량형이든 동일하게 중요시되어야 할 것이다. 그런데 용량형 센서는 측정물이 도체 (conductive material) 이기만 하면 별 영향을 받지 않으나 와전류형 센서의 경우는 이와는 다르다. 일정한 도체에 대한 와전류는 오직 측정센서와 측정물 표면 사이의 거리에만 관계가 있으나 같은 거리에서 생기는 와전류는 측정물 표면의 재질에 따라 그 강도가 달라진다. 정밀측정을 행하려면 이러한 점들을 고려해야 한다. 그러나 실제의 상황에 있어서 측정하고자 하는 재질과 동일한 시편을 따로 제작한다는 것은 비능률적이기도 하거니와 경우에 따라서는 아주 불가능할 때도 있다. 이러한 경우에는 측정물 즉 회전축에서 직접 교정을 시행하는 것이 바람직하다. 이러한 교정 방식을 현장 교정이라고 한다. 현장교정을 행하려면

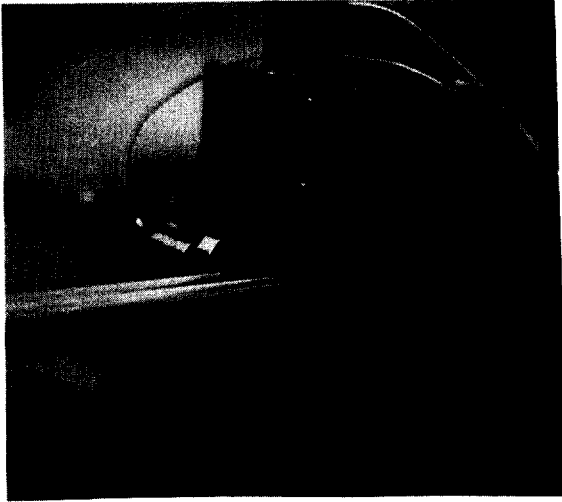


Fig. 13 Sensor fixture set-up

측정하고자 하는 축상에 센서를 설치해야 하는데, 이때 센서는 축의 반경방향으로 움직일 수 있어야 한다. Fig. 13은 이러한 현장 교정을 행하기 위하여 마이크로미터를 이용한 센서 설치대를 제작하여[5], 실제 회전축 실험에 사용하기 위해 설치한 모습이다.

## 6. 결 론

소형 정밀회전기계의 미소 축진동 변위측정에서 해결해야 할 문제점들은 첫째 축단면의 곡률에 의한 센서의 감도변화가 각기 다르다는 것과 둘째 축단면의 곡률 때문에 센서의 설치오차가 존재하고 셋째 와전류형 센서를 사용할 때에는 재질에 따른 감도변화가 있다는 것 등이다.

본 연구에서는 몇가지 다른 직경의 회전축 시편( $a=4\text{mm}$ ,  $9.5\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$ )에 대하여 교정표를 실

험을 통해 작성하였으며, 센서의 설치오차에 대하여는 일정한 설치오차를 준 뒤 거리를 변화시켜가며 감도 변화를 분석하였다. 센서의 설치오차는 회전축의 직경이 작으면 작을수록 더욱 더 감도에 많은 영향을 주며 더 큰 측정오차를 수반하였다. 반경  $1.6\text{mm}$  용량형 센서의 경우,  $1\text{mm}$ 의 축어긋남에 대하여 반경  $15\text{mm}$ 의 축시편일 때는  $32\mu\text{m}$ 의 측정오차가 발생함에 비하여 반경  $4\text{mm}$ 의 축시편일 때는  $80\mu\text{m}$ 의 측정오차를 수반하게 된다.

용량형 센서에서는 재질에 따른 감도변화가 무시할 정도이지만 와전류형 센서는 똑같은 거리에 대해서도 측정물의 재질에 따라 다른 측정값을 주게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 피측정회전축상에 직접 와전류형 센서를 설치하여 정적으로 교정하는 현장 교정 방식을 고안하였다.

## 참고문헌

1. Gilstrap, M., 1983, "Transducer Selection for Vibration Monitoring of Rotating Machinery", ORBIT, Bentry Nevada Corp.
2. Doebelin, E.O., 1983, "Measurement Systems Application and Design", 3rd ed., MaGraw-Hill.
3. Peters, R.D., 1989, "Linear Rotary Differential Capacitance Transducer", Rev. Sci. Instrum, Vol.60, pp. 2789~2793.
4. Kim, K.Y. et al., 1989, "Miniaturized Capacitive Transducer for Detection of Broadband Ultrasonic Displacement Signals", Rev. Sci. Instrum, Vol.60, pp. 2785~2788.
5. 김동혁 외, "회전기계 진동의 비접촉 측정기술 및 축진동 해석기술 개발", 1989, 한국표준연구소, KSRI-89-94-IR.