

# 정밀 축진동 측정을 위한 센서측정오차 분석

Analysis of sensor measurement errors  
for precision measurement of shaft vibration

오 전 오 성\* 김 동 혁\*\* 최 병 천\*\*\*  
Oh Sung Jun Dong Hyuk Kim Byoung Chun Choi

## 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 스페이스셔블에 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 관성부하와 진동 및 동안정성의 문제들을 내포하고 있다. 고성능 회전기계의 또다른 예로서 초정밀가공용 공작기계를 들 수 있다. 선반 혹은 밀링머신으로 초정밀가공을 행하기 위해서는 회전축의 진동이 극히 작아야 한다. 이와같이 오늘날 갈수록 초고성능 초정밀도를 추구함에 있어서 회전축의 진동을 현장에서 모니터링하고 이 진동데이터를 분석하여 회전축을 제어하는 것이 강력히 요구되어진다. 따라서 in-situ 측정이 중요성을 띠게 되었는데 이는 제어기술의 바탕이 되는 자료를 현장에서 제공할 수 있기 때문이다.

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

## 2. 비접촉 축진동 측정센서

### 2.1 Eddy-current형 비접촉 센서

거의 모든 진동관련 기계설비의 진동측정에 사용되는 가장 보편화된 센서이다. 흔히 마그네틱 probe라고도 불리우는 이 센서는 보통 두개의 코일로 이루어져 있다. 이중 하나는 active coil이라 불리우며 전기도체로 이루어진 측정대상물체에 의해 영향을 받는데 반해, 다른 하나의 코일은 bridge 회로를 구성하며 온도에 따른 보정을 하는 역할을 한다. Active coil로부터 나오는 자장은 도체 도면에 침투하여 target의 표면에서 가장 강하게 나타나는 eddy-current를 만들어 준다. 측정대상물이 probe에 근접할수록 점점 강한 eddy-current를 만들어 주는데 이 eddy-current가 active coil의 임피던스를 변화시켜 bridge의 unbalance를 형성시켜준다. 바로 이 unbalance 전압을 dc값으로 변환시켜 측정대상물의 진동에 의한 변위를 측정하는 것이다. 현재 상업용으로 시판 중인 eddy-current probe는 측정범위가 0.25-30mm까지 가능하며, 최대 분해능은 0.1μm까지 가능하나 보통 1μm 정도로 보고 있다.

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

### 2.2 Capacitive형 비접촉 센서

이 센서는 측정대상체의 진동면이 전기도체일 경우, 이를 capacitor의 한쪽면으로 이용하여 진동에 따르는 capacitance 변화량을 전압으로 변환시켜주는 역할을 한다. 비교적 복잡한 전기회로를 가지나 기계적으로 간단한 구조로 되어있기 때문에 널리 이용되고 있다. 전기이론에 따르는 capacitance의 변화는 다음과 같다.

$$C = \frac{0.225A}{x} \quad (1)$$

여기서 C는 capacitance, A는 진동면의 면적(in<sup>2</sup>) 그리고 x는 판 사이의 간격(in)을 나타낸다. 첫 식은 비선형이므로 아주 좁은 범위의 x 내에서만 이용가능한 선형도를 취할 수가 있다. 첫 식은 x에 대해 미분하면

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{0.225A}{x^2} \quad (2)$$

이 되는데 식(1)을 이용하면

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

또는

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

가 되어 C와 x간의 퍼센트 변화는 같게 된다. Op-amp를 회로중에 채택하면 식(1)을 이용하여 초미세 진동변위를 측정할 수 있다. 이 센서의 출력전압은 판사이의 간격 x에 직접적으로 비례하도록 설계되어 있다. 이 형태의 capacitance probe는 직경 0.0447-1인치의 capacitance 면을 갖고 있으며 변위범위는 0.001-0.5인치 정도이다. Full scale의 0.1 퍼센트 정도되는 분해능을 가지며, 따라서 1μm 정도의 변위측정이 가능하다. 이 측정센서는 초정밀측정을 요구하는 컴퓨터 하드디스크 진동, 초정밀 공작기계의 축진동측정 등에 사용된다.

### 3. 축의 곡면도에 따르는 센서의 감도변화

Capacitive형 센서를 대상으로 하여 측정시 발생하는 오차에 대하여 분석해 보고자 한다. 시편의 표면이 곡면을 이루고 있으면 capacitor면과 서로 평행하지 않는 상태가 되고 각 부분별로 서로 다른 포텐셜을 지니게 된다. 물론 capacitor에서 생성시켜주는 전압은 면 전체의 평균값이 되는데, 면 전체의 평균값은 어떤 등가평면에 대한 가상적인 값과 같다고 할 수 있을 것이다. Capacitive형 센서를 이용한 변위측정에 있어 이러한 파

면의 동가평면화는 실제 곡면으로 되어 있는 시편에 대한 calibration에서 활용할 수 있다. 여기서 capacitor 면과 동가평면 사이의 포텐셜은 평행하다고 가정하고 그림1과 같이 나타내었다. 그림1은 전체적으로 시편의 단면과 센서면의 상대위치를 보여주고 있다. 시편의 반경을  $a$ 라 하면 시편 표면을  $x, y$ 의 함수로 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

Capacitor면과 시편 표면간에 평행한 flux를 가정하면 시편 표면중에서 capacitor면으로서 작용하는 부분은 센서의 capacitor면을 시편 표면에 투영시킨 부분과 같다. 그런데 capacitor면은 원형으로 되어 있으므로 시편 표면에 투영되는 부분도 원의 형상을 가지게 된다. 따라서 capacitor 원형단면 위의 원기둥 체적을 적분하여 구한 후 이를 capacitor 면적으로 나누어, 동가평면식을 다음과 같이 나타내었다.

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

여기서  $a$ 는 capacitor면의 반경,  $\delta$ 는 센서중심선과 측정심 사이의 어긋남(misalignment)을 나타낸다.  $H$ 는 곡면 시편의 동가평면이 시편에 접하는 평면에 비교해서 얼마나 센서 표면에서 더 멀리 떨어진 효과를 나타내는가를 말해준다.

그림2는 그림1에서  $\delta=0$ 일 때 동가평면의 위치  $H$ 를 보여준다. 그림2에서 실선은 식(6)을 이용하여  $a=1.6\text{mm}$ 에 대하여 계산한 결과인데, 축 반경이 작아지면서 평판에 대한 calibration값과 비교하여 동가평면으로 인한 오차가 급상승함을 보여준다. 이 그림에는 또한 capacitor면의 반경이  $1.6\text{mm}$ 인 capacitive probe(Pioneer사 제품 SC3204)를 사용하여, 몇가지 반경을 갖는 S45C 재질의 축에 대하여  $H$ 를 측정된 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 축 중심선이 일치하도록 설치해야 한다. 그러나 실제의 경우 정밀한 fixture를 사용하지 않는 한 얼마간의 축어긋남이 존재하게 되며, 축 회전시 unbalance등에 의해 축 굽힘이 발생할 때 축의 중심선은 순간적으로 센서 중심에서 어긋나게 되는데, 설치 어긋남이나 축굽힘에 의한 어긋남 등은 정밀한 진동변위 측정에 상당한 영향을 줄 수 있다. 그림1에서  $\delta$ 는 이러한 어긋남을 모두 포함하게 된다.

그림3은 식(6)에 의거하여  $H$ 값을 계산한 것이다. 수평축은  $\delta$ , 수직축은  $H$ 값을 표시한다. 시편의 반경이  $4\text{mm}$ 일 경우에는 센서의 어긋남이 없어도  $55\mu\text{m}$  정도의 감도에 의한 오차가 발생하며  $1\text{mm}$ 의  $\delta$ 에 대해서는  $146\mu\text{m}$ 로 급격히 증가한다. 이러한 경향은 시편의 반경이 커질수록 점차 둔화되는데 시편 반경이  $9\text{mm}$ 가 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  $100\text{mm}$ 에서는  $\delta=0$ 일 때 약  $3\mu\text{m}$ 의 오차가 발생하고  $\delta=1\text{mm}$ 일 때  $5\mu\text{m}$ ,  $\delta=2\text{mm}$ 일 때  $15\mu\text{m}$  정도의 오차를 가지게 된다.

그림4는 평판에 대한 센서의 calibration 표이다. 이를 보면 stand off 거리가 약  $0.4\text{mm}$ 이고 측정범위는 센서표면으로부터  $150\text{--}640\mu\text{m}$  떨어진 위치라는 것을 알 수

있다. Stand off 거리란 측정 대상체를 센서의 앞쪽에 위치시킬 때 센서로부터의 전압출력이 0이 되는 위치이다.

그림5에서 그림6은 축어긋남에 따른  $H$ 값을 stand off 위치에서 보정된 값으로 환산해 놓은 것이다. 그림4에서 나타낸 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 바와 같은 경향을 보이고 있다.

그림7에서 그림9는 직경이 다른 시편들에 대하여 축어긋남  $\delta$ 를 변화시켜 가면서 측정한 calibration 표이다. 이 그림들을 통하여 예상되는 측정오차를 추정하고 이에 따른 설치정밀도를 부과할 수 있다. 또한 진동변위 측정시 일정한 곡면도에 대한 calibration을 행할 수 있게 된다. 그림10은 센서의 설치오차  $\delta$ 에 해당하는 gain의 변화를 실험을 통하여 측정한 것이다. 이 실험에 사용된 회전축의 반경은 각각  $4\text{mm}$ ,  $9.5\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$ 이다.

다음은 직경이  $5\text{mm}$ 인 eddy-current형 비접촉센서(Dymac M61; 감도  $200\text{mV}/25\mu\text{m}$ )에 대한 설치오차에 대하여 검토해 보고자 한다. 그림11은 S45C강으로 이루어진 반경  $4\text{mm}$ 의 회전축에 대하여 calibration한 것이다. 이와함께 같은 재질의 평판에 대해서도 calibration곡선을 얻어서 비교하였다. 센서와 측정물 표면까지의 거리가 작을 때는 약  $40\text{--}50\mu\text{m}$ 의 오차가 발생하지만 거리가 커질수록  $100\mu\text{m}$  이상의 오차가 발생함을 보여준다. 이는 측정물 표면의 곡률반경이  $4\text{mm}$ 이므로 평판과의 감도차이가 발생하기 때문이다. 그림12는 스테인레스강으로 된 반경  $9.5\text{mm}$ 의 측정물에 대해 센서가 설치될 때 설치오차의 양에 따른 감도의 변화를 그래프화한 것이다. 여기서  $\delta=1\text{mm}$ 일 때는 약  $40\mu\text{m}$  정도의 오차를 수반한다는 것을 알 수 있다.

#### 5. In-situ calibration

앞에서는 회전축 단면의 곡률에 따른 센서의 감도변화 및 센서의 축어긋남에 수반되는 측정오차등을 다루었다. 이 문제들은 센서의 타입이 eddy-current형이든 capacitive형이든 동일하게 중요시되어야 할 것이다. 그런데 capacitive형 센서는 측정물이 도체(conductive material)이기만 하면 별 영향을 받지 않으나 eddy-current형 센서의 경우는 이와는 다르다. 일정한 도체에 대한 eddy-current는 오직 측정센서와 측정물 표면 사이의 거리에만 관계가 있으나 같은 거리에서 생기는 eddy-current는 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 비용불적이기도 하거니와 경우에 따라서는 아주 불가능할 때도 있다. 이러한 경우에는 측정물 즉 회전축에서 직접 calibration을 시행하는 것이 바람직하다. 이러한 calibration 방식을 in-situ calibration이라고 한다. In-situ calibration을 행하려면 측정하고자 하는 축상에 센서를 설치해야 하는데, 이때 센서는 축의 반경방향으로 움직일 수 있어야 한다. 그림13은 이러한 in-situ calibration을 행하기 위하여 마이크로미터를 이용한 fixture를 제작하여, 실제 회전축 실험에 사용하기 위해 설치한 모습이다.

6. 결론

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 eddy-current형 센서를 사용할 때에는 재질에 따른 감도 변화가 있다는 것 등이다.

본 연구에서는 몇가지 다른 직경의 회전축 시편에 대하여 calibration 표를 실험을 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.

Capacitive형 센서에서는 재질에 따른 감도변화가 무시할 정도이지만 eddy-current형 센서는 똑같은 거리에 대해서도 측정물의 재질에 따라 다른 측정값을 주게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로서 피측정회전축상에 직접 eddy-current 센서를 설치하여 정적으로 calibration하는 in-situ 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., McGraw-Hill.
3. Peters, R.D., 1989, "Linear rotary differential capacitance transducer", Rev. Sci. Instrum., Vol.60, p.2789-2793.
4. Kim, K.Y. et al., 1989, "Miniaturized capacitive transducer for detection of broadband ultrasonic displacement signals", Rev. Sci. Instrum., Vol.60, p.2785-2788.
5. 김동혁 외, 회전기계 진동의 비접촉 측정기술 및 축진동 해석기술 개발, 1989, 한국표준연구소, KSRI-89-94-IR.

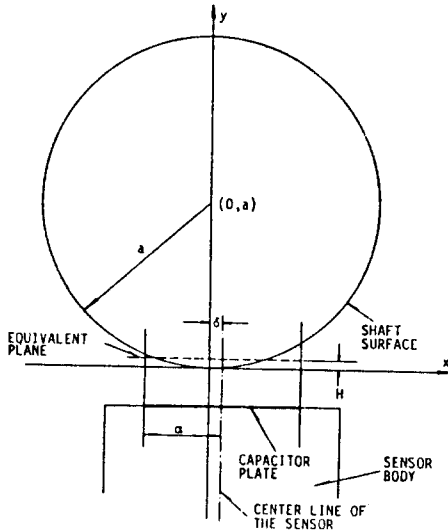


그림1. 센서와 축단면의 상대위치

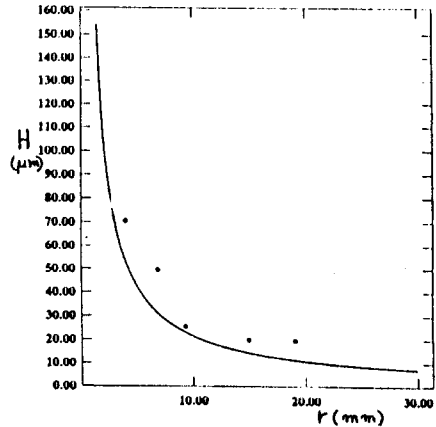


그림2. 축곡률도에 따른 동기평면 위치(— 계산, ● 실험)

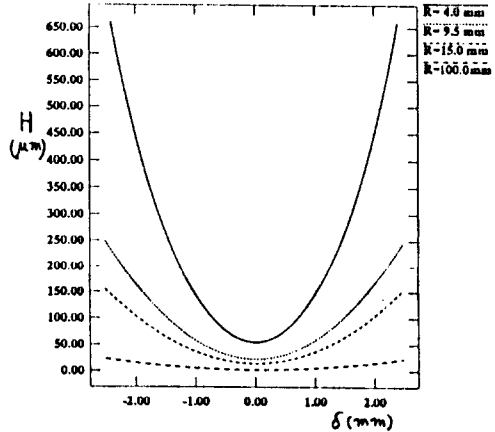


그림3. 축곡률도와 축어긋남에 따른 동기평면의 계산결과

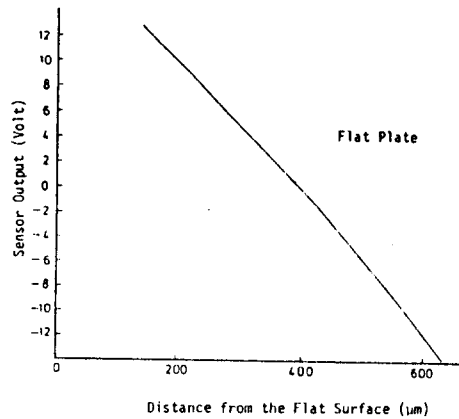


그림4. 평판에 대한 capacitive 센서의 calibration 차트

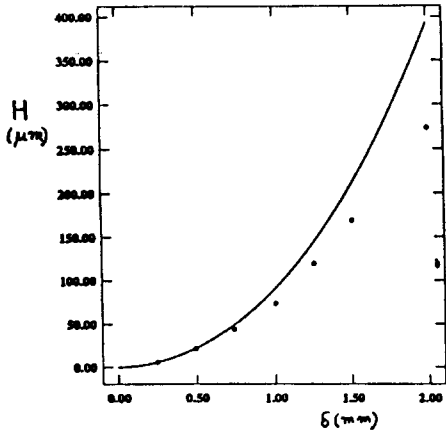


그림5.  $r=4\text{mm}$ 축에 대한 축어긋남 오차(—H계산, •실험)

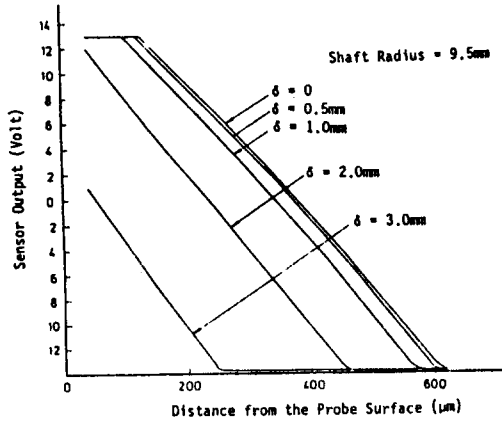


그림8.  $r=9.5\text{mm}$ 축에 대한 calibration 차트

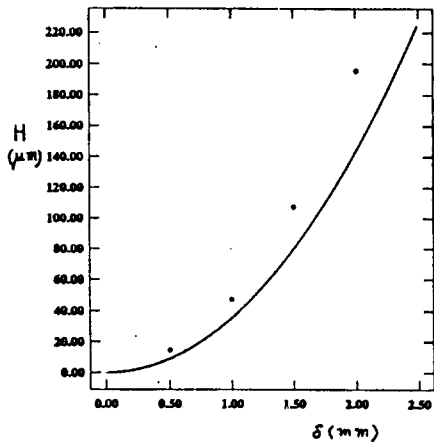


그림6.  $r=9.5\text{mm}$ 축에 대한 축어긋남 오차(—H계산, •실험)

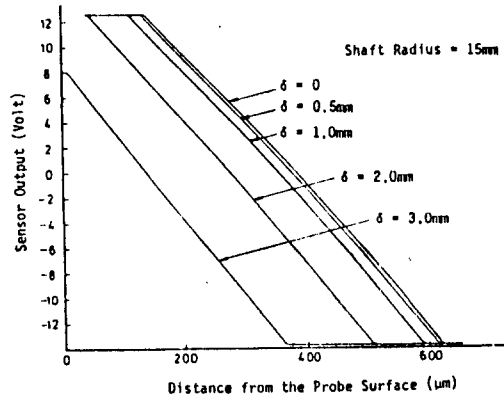


그림9.  $r=15\text{mm}$ 축에 대한 calibration 차트

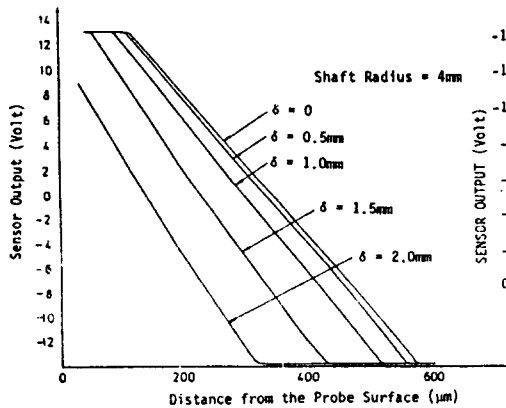


그림7.  $r=4\text{mm}$ 축에 대한 calibration 차트

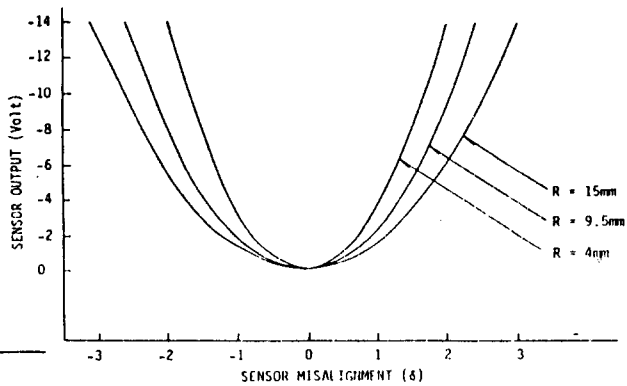


그림10. 축곡면도와 축어긋남에 따른 센서 gain의 변화

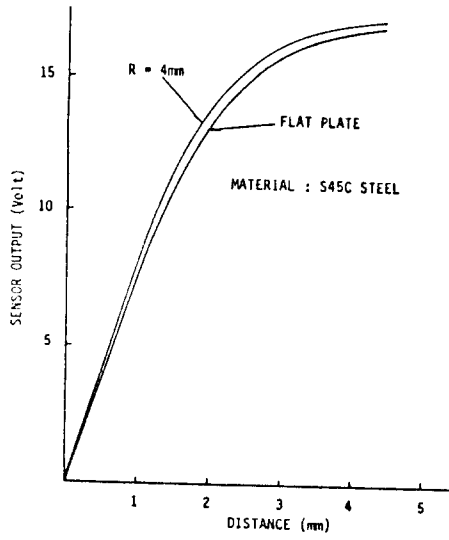


그림11. 평판과 r=4mm축에 대한 eddy-current형 센서의 calibration 차트(재질: S45C)

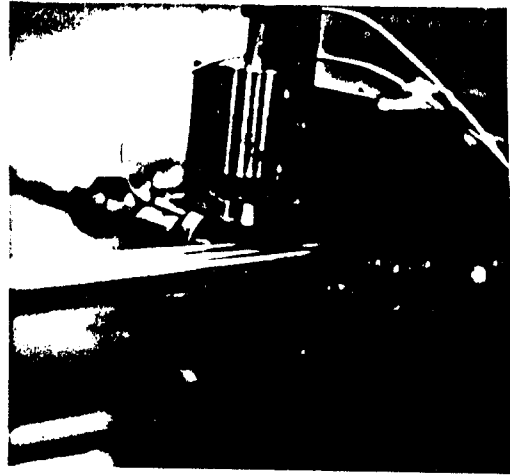


그림13. 센서의 fixture 설치 모습

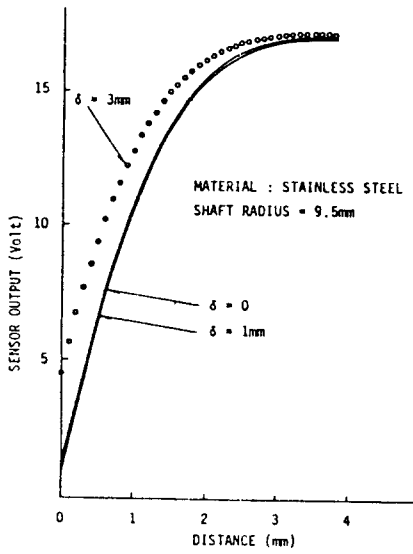


그림12. r=9.5mm축의 축어긋남에 따른 eddy-current형 센서의 calibration 차트(재질: 스테인레스강)