




2017 JANUARY 10

# 와 전류 위치 센서의 설계와 제작

정규원  
SHICO CO. LTD.



## 목차

물리와 동작 .....	2
대상 목표물의 선택.....	5
센서 설계 .....	7
회로 설계 .....	12
모델 센서 시스템 설계.....	14
결론 .....	17

에디 전류 센서는 비 접촉 위치, 변위 및 근접 측정에 널리 사용됩니다. 자기 유도 원리로 작동하는 이 검출기는 플라스틱, 불투명 한 유체 및 먼지와 같은 비금속 물질을 중간에 끼어도 금속 타겟의 위치를 정확하게 측정 할 수 있습니다. 센서는 본질적으로 견고하며, 광학, 음향, 저장성 장치가 무력화 된 오염된 환경에서도 넓은 온도 범위에서 운용할 수 있습니다. 와 전류 센서의 이색적인 어플리케이션 중 하나는 자기 베어링의 위치 피드백을 공급한다는 것입니다. 자기 베어링 어셈블리에서 회전 샤프트는 마모가 없고 마찰이 없는 회전을 달성하기 위해 자기장에 떠 있습니다. 베어링의 안정성을 위해 와 전류 센서는 마그네틱 컨트롤러에 의해 피드백 되는 위치를 제공하기 위해 자주 사용됩니다. 실용적인 와 전류 센서는 직경이 수 밀리미터에서 수 미터로 다양하며 최대 감지 범위는 코일의 반경과 거의 같습니다. 선형성은 일반적으로 감지 범위의 1%이며 잡음 레벨은  $1\text{ppm}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$ 입니다. 온도 편차의 범위는  $100\text{ppm}/^{\circ}\text{C} \sim 1000\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$  입니다. 소형 센서는 나노 미터 크기로도 가능하며, 1mm를 10um 정확도로 측정할 수 있습니다. 50kHz의 대역폭을 쉽게 달성 할 수 있습니다.

## 물리와 동작

와 전류 변위 센서는 4개의 컴포넌트(그림1 참조)로 구성됩니다(센서 코일, 대상물, 센서 구동 전자 장치, 신호 처리 블록).

센서 코일이 AC 전류에 의해 구동 되면, 목표로 지정된 인근 금속 물체에 와 전류를 유도하는 진동 자기장을 생성합니다. 와 전류는 코일의 방향과 반대 방향으로 순환하여 코일의 자속을 감소시켜 인덕턴스를 줄입니다. 와 전류는 또한 에너지를 소실 시켜 코일의 저항을 증가시킵니다. 그림2에서 보이는 것과 같이 코일과 대상물은 공기 코

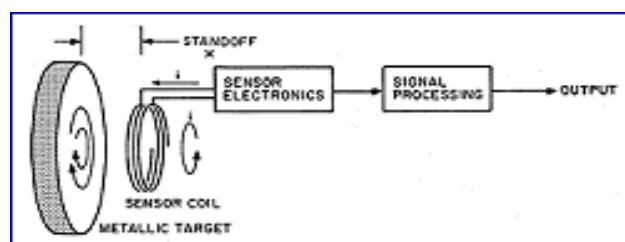
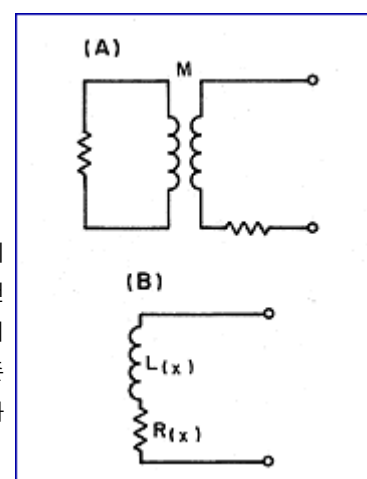


그림 1 센서 코일 내의 AC 전류는 진동 자기장을 발생 시키며, 이는 목표물의 표면에 와 전류를 유도합니다. 코일 임피던스는 이격 거리에 따라 변하고 센서와 신호 처리 전자장치에 의해서 선형 출력으로 변환됩니다.

어로 약하게 결합된 트랜스포머의 1차, 2차 코일로 구성됩니다. 타겟의 움직임은 커플 링을 변화시키고, 이 운동은 코일의 터미널에서 임피던스 변화로 반영됩니다. 공기 코어 트랜스포머는 물리적으로는 정확하지만 회로 설계를 목적으로는 손실 인덕터 모델이 더 간단하고 유용합니다. 그림 2(B)에서 보듯이 센서의 복잡한 임피던스는 직렬 LR회로로 표현됩니다. 임피던스 L과 저항 R 모두 대상물과의 위치나 이격 거리에 따라 변합니다. 대상 물체에 코일이 접근하면 일반적으로 인덕턴스는

그림 2 와 전류 센서는 이격 거리에 의존하는 커플링 계수를 갖는 트랜스포머로 모델링(A) 될 수 있습니다. 그 모델은 이격 거리(x)에 의존하는 인덕터와 저항(B)으로 단순화 될 수 있습니다.



낮아지고 저항은 증가합니다. 인덕턴스는 5 배만큼 변화하여 목표 위치를 감지하기 위한 물리적 기반을 제공합니다.

인덕턴스와 저항은 물리적 메커니즘에 직접적으로 해당되며 회로 설계 및 시뮬레이션에 직접 사용될 수 있기 때문에 센서의 중요한 특성입니다. 하지만 품질 요소인 Q는 센서의 궁극적인 성능에 직접적으로 연관되어 있습니다. Q는 다음과 같이 정의 됩니다.

$$Q = Q(x) = \frac{\omega L(x)}{R(x)}$$

여기서  $\omega$ 는 센서 작동 주파수(radian/per)

Q는 이격 거리 x에 의존합니다. 왜냐하면 L과 R은 모두 변위의 함수이기 때문입니다. Q값이 높을수록 센서는 더 온전히 반응합니다. 높은 Q는 높은 정확성과 안정성을 제공합니다. L의 특정 값은 제조 가능한 코일에 대한 필요성과 합리적인 주파수에서 합리적인 에너지를 소모하는 실용적인 회로 설계에 의해서만 제한되기 때문에 2 차적으로 중요합니다. R의 특정 값은 R이 바람직하지 않은 기생 효과이기 때문에 관심을 덜 받습니다.

그림 3은 어떻게 L, R, 그리고 Q가 목표 이격 거리에 어떻게 의존하는지를 보여줍니다. 이 데이터는 38mm 직경의 에어 코어 PC 센서와 알루미늄 타겟의 실제 측정 결과입니다. 측정은 Hewlett-Packard의 HP4285A LCR 미터에서 1 MHz로 측정되었습니다. 그래프가 모든 크기의 센서의 동작을 정성적으로 묘사하도록 변위가 센서 반경 (19mm)으로 표준화 되었습니다. 이격 거리가 증가함에 따라 인덕턴스는 4 배 증가하고 저항은 약간 감소하며 결과적으로 Q가 증가합니다. 모든 세 개의 매개 변수의 변화는 매우 비선형이고, 각각의 곡선은 이격 거리가 증가함에 따라 대략 지수 함수 적으로 감소되는 경향이 있습니다. 거리에 따른 민감도의 급격한 감소는 와 전류 센서의 범위를 코일 지름의  $\sim 1/2$ 로 엄격하게 제한하며 이러한 유형의 감지의 가장 중요한 한계를 구성합니다.

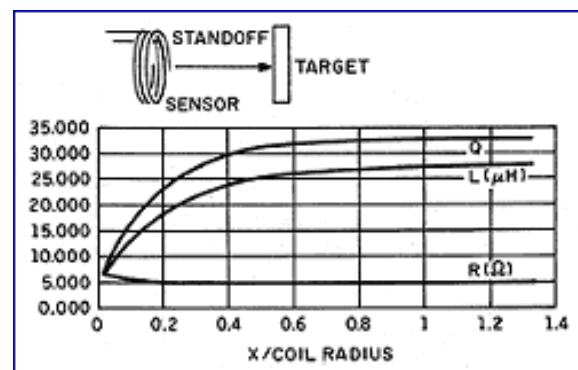


그림 3 직경 38mm에서의 측정. PC 센서는 인덕턴스, 저항 및 Q가 목표물의 변위에 의해 어떻게 영향을 받는지 보여줍니다. 인덕턴스는 목표물에 가까울수록 빠르게 변화하지만 응답은 코일 반경에서 크게 감소합니다.

코일의 임피던스는 다음과 같은 영향을 받습니다.

- 대상 목표물의 사이즈, 평탄도, 그리고 두께
- 대상 목표물의 재질 특성, 특히 전도성 및 자기 투자율
- 대상 목표물과 코일의 온도

- 코일 형상 및 DC 저항
- 운용 주파수

그림 4는 알루미늄과 스테인리스 금속 목표물에 대한 목표물 재료의 영향을 보여줍니다. 금속 목표물은 알루미늄의 1/28의 전도성을 가지므로 특히 인접한 간격에서 와 전류 손실과 더 높은 저항을 나타냅니다. 목표물의 도전율은 인덕턴스에 거의 영향을 미치지 않습니다. 코일이 목표물과 약하게만 상호 작용하는 큰 감지 거리에서는 저항이나 인덕턴스가 대상에 크게 의존하지 않습니다.

그림 5는 주파수에 대한 센서 응답을 보여줍니다. 먼저 케이블 및 권선 간 정전 용량 때문에 발생하는 7MHz에서의 공진 동작에 주목하십시오. 인덕턴스가 가장 높은 주파수를 자기 공진 주파수 (SRF) 라 부르며 센서는 인덕터처럼 보이도록 자기 공진 주파수 아래에서 동작해야 합니다. 우리는 Q를 최대화하기 위해 높은 주파수에서 센서를 운용하기를 원하지만, 주파수는 SRF의 1/3으로 유지되어야 합니다. 이것은 요구사항과 상반되기 때문에 운용 주파수를 선정하는 것은

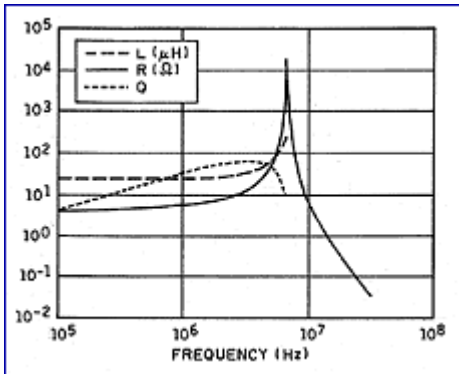


그림 5 38mm PC센서의 주파수 의존성은 코일이 자체 공진이 될 때까지 Q가 주파수와 함께 증가함을 보여줍니다. 이 그래프로 우리는 자체 공진 내에서 Q를 최대화하는 동작 주파수를 찾을 수 있습니다.

명백한 최적화의 기회입니다. 공심 코일을 위한 실용적인 주파수는 일반적으로 100kHz에서 10MHz사이의 값을 가집니다.

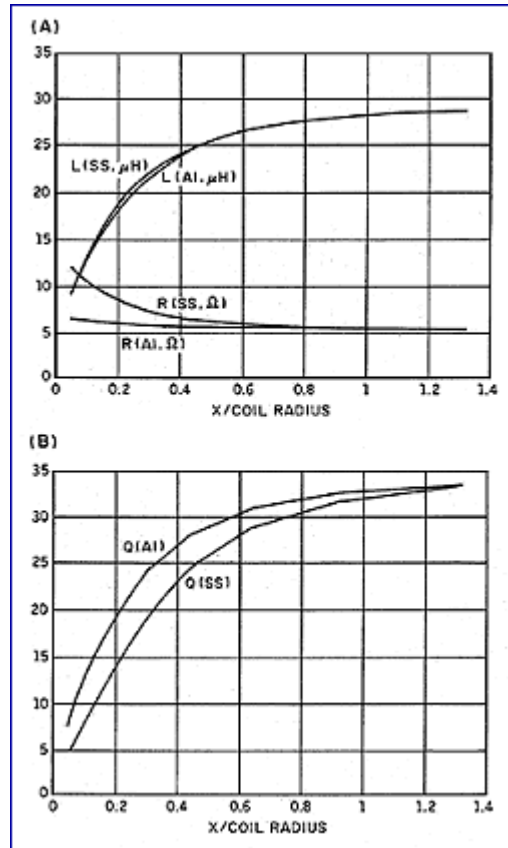


그림 4 목표물의 전도도는 38mm PC 센서(A)의 응답에 영향을 줍니다. 스테인리스 금속 목표물은 이격 거리 x가 작으면 훨씬 높은 와 전류 손실과 높은 저항을 생성합니다. 인덕턴스는 전도도에 대해서는 훨씬 덜 민감합니다. (B)에서는 알루미늄과 스테인리스 금속의 Q값을 이격 거리x에 따라 표시하였습니다.

온도 편차는 에디 전류 센서의 중요한 오류 원인으로 밝혀지며 복잡한 요인들로 인해 발생합니다. 인덕턴스와 저항 모두 주파수에 의존하는 양의 온도 계수를 가집니다. 예를 들어 1Mhz에서 작동하는 38mm PC 코일의 경우 인덕턴스가 88ppm /°C 로 증가하고 저항이 2400ppm /°C 증가합니다 (온도 편차는 다음 기사에서 검토 될 것입니다.)

## 대상 목표물의 선택

와 전류 센서의 응답은 대상 목표물의 전도성과 자기 투자율에 의존합니다. 일부 어플리케이션에서는 설계자가 대상 목표물을 자유롭게 선택할 수 있습니다. 반면 다른 경우에는 설계자가 제어할 수 없는 기계 또는 어셈블리의 일부입니다. 알루미늄 또는 구리와 같은 전도성이 높은 비 자성 금속이 최고의 목표물입니다. 와 전류와 자기 저항의 혼합으로 응답하는 센서이라 하더라도 자성 금속 또한 좋은 선택입니다. 자기 저항은 자성 금속이 자기 회로에서 유효 투자율을 변경하는 방식으로 설명됩니다. 자성 목표물이 코일에 접근함에 따라 와 전류는 인덕턴스를 감소시키지만 리액턴스는 인덕턴스를 증가시킵니다. 이런 효과는 서로 반대 방향이므로 그것들은 서로 상쇄될 수 있습니다. 최종 결과는 작은 이격 거리에 있는 센서의 응답에서는 Null Point가 될 수 있습니다.

표면 효과 또는 컨덕터의 표면에 흐르는 AC 전류의 경향은 코일과 대상 목표물 양쪽에 모두 적용해야 합니다. 표면 효과로 인하여 목표물에서 전류 밀도는 표면으로부터의 거리에 따라 기하급수적으로 떨어집니다. 표면 효과는 표면 깊이의  $1/e$ 로 전류 밀도가 떨어지는 거리 인 표면 깊이로 특징 지워집니다. 컨덕터에서 표면 깊이를 위한 표현식은 다음과 같습니다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} (\text{in meters})$$

여기서  $\delta$ 는 표면 깊이(meters)

여기서  $\omega$ 는 라디언 주파수(radians/second)

여기서  $\mu$ 는 투자율(henries/meter)

여기서  $\sigma$ 는 전도도(siemans/meter)

비 자성 재료의 경우,  $\mu = \mu_0 = 1.26 * 10^{-6} H/M$  입니다. 표1은 센서 설계에서 관심이 있는 주파수에 대한 여러 재료의 표면 깊이를 보여줍니다.

금속	전도도	전도도	표면 깊이(um)			
	(* $10^6$ S/m)	Cu와 비례하여	10kHz	100kHz	1MHz	10MHz
Copper	58	1.000	660	210	66	21
Aluminum	38	0.655	820	260	82	26
304SS	1.3	0.022	4400	1400	440	140
Titanium Alloy	0.59	0.010	6600	2100	660	210

전도도와 주파수가 낮을수록 와 전류가 더 깊이 침투합니다. 만약 목표물이 적어도 두 표면 깊이인 경우에는, 두께는 기본적으로 측정에서 요인으로 제거됩니다. 하지만 이 rule-of-thumb는 매우 보수적입니다. 두께, 전도도 및 투자율 이외의 몇 가지 목표 특성은 분석적으로 예측하기 어려운 방식으로 센서 동작에 영향을 미칩니다. 목표물의 측면 치수가 센서의 직경의 두 배보다 작거나, 목표물이 휘어져 있거나, 표면의 거칠기가 표면의 깊이와 비슷하면 차이가 납니다. 이러한 상황을 모델링하기는 어렵지만 프로토타입 센서를 구축하고 LCR 미터를 사용하여 반응을 측정함으로써 측정을 통해 모든 것을 수용 할 수 있습니다. HP4285A와 같은 다용도 다기능 계측기는 온도 편차와 같은 미세한 영향까지도 측정 할 수 있는 충분한 감도로 L, R 및 Q를 직접 표시하므로 센서 설계에 매우 유용합니다.

## 센서 설계

거의 최적의 와 전류 센서의 설계는 놀랍도록 쉽습니다. 우리는 먼저 직관적인 지침과 단순화 된 설계 방정식을 수립해야 합니다. LCR 미터로 프로토타입 센서를 측정하면 전자 설계에 대한 매우 정확하고 상세한 데이터를 얻을 수 있습니다. 만약 1차적인 목표가 센서의 크기가 작은 것이라면 와이어 권선 코일을 기반으로 한 센서가 최상의 선택입니다. 권선 코일에 사용되는 미세한 자석 와이어는 권선 횟수를 최대화하고 저항을 최소화하여 센서 Q를 증가시킵니다. 자기 전선은 현미경으로 완벽한 층(보통 손으로)으로 포장해야 합니다. 코일은 가공 된 보호 홀더에 삽입되고 에폭시로 포팅되어 권선을 기계적으로 안정화합니다. 권선 센서는 노동 집약적 인 제품이며 일반적으로 100 달러 이상입니다. 비용이 첫 번째 고려사항일 경우 PCB에 인쇄 된 코일은 권선 센서의 비용의 일부로 우수한 성능을 제공합니다. 센서 코일 인쇄의 장점은 다음과 같습니다.

- 프로토타이핑. 제작 비용이 단지 몇 백 달러에 불과합니다. 단일 프로토타입을 실행하면 많은 설계 변경이 발생할 수 있습니다.
- 제조. PCB 공정은 고도로 자동화 되어있고 표준화 되어 있으며 널리 이용이 가능합니다. PC 보드 공정은 수십에서 수백만 개의 센서까지 확장 할 수 있습니다.
- 비용. 코일의 가격은 1.00달러 미만이지만 케이블 및 커넥터는 전체의 가격을 쉽게 올릴 수 있습니다.
- 성능. 성능은 더 큰 직경을 가진 권선 센서와 경쟁합니다.
- 특수 구성. 유연한 회로 소재의 센서 및 센서 배열은 고유한 어플리케이션들을 창출 할 수 있습니다.

인쇄 된 센서의 주요 단점은 크기입니다. PCB에 10mm 미만의 코일을 인쇄하는 것은 어렵고 권선 센서의 성능과 여전히 일치합니다. 표2는 와 전류 센서의 설계에서 가장 중요한 요소와 절충안을 요약한 것입니다.

요소	왜	어떻게	상충관계
고품질, 높은 Q	온도 안정성, 전력 소비, 잡음의 근본적인 결정 요인; 가능한 Q를 늘리십시오.	주파수와 인덕턴스를 높이고 저항을 줄이십시오. 소형 센서 용 권선 코일 사용	소형 센서로 높은 Q를 얻기가 어렵습니다.
높은 인덕턴스	Q의 증가, 전력 감소	더 많은 권선 수 사용, 더 큰 직경의 센서, 페라이트 코어 사용	높은 인덕턴스는 종종 낮은 자기 공진 주파수가 수반됩니다.



낮은 저항	Q의 증가, 전력 감소	전도성이 더 뛰어난 와이어 사용, 더 두꺼운 와이어나 PCB 배선, 온도를 낮게 유지	높은 인덕턴스에 대한 요구와 함께 주파수는 상쇄됩니다.
최적의 센서 크기	변위 감도의 극대화	가장 높은 정확도와 안정성을 위해 반경 = $3 \times$ 범위를 선택, 작은 센서는 작은 범위를 너무 큰 센서는 감도를 감소할 것입니다.	센서가 커지면 센서에 의해 측정된 목표물의 스폿 크기 또는 영역이 커집니다. 더 큰 센서는 목표물의 더 큰 치수를 요구합니다.
평평한 디스크 모양의 코일 구성	모든 권선을 목표에 가깝게 배치하여 감도를 극대화 합니다.	PCB 인쇄 코일의 사용	평평한 코일은 턴 수를 제한하여 인덕턴스를 줄입니다.
고주파에서의 동작	Q를 증가하고 센서의 전력을 감소 감지 폭 증가	상호 권선 및 케이블 커패시턴스 감소	자기 공명 주파수 아래에 머물러야 합니다. 높은 주파수는 보통 전기적인 전력 소모를 증가시킵니다.
케이블 길이의 최소화	케이블 노이즈 감소, 온도 편차, 케이블 비용 감소, 자기 공명 주파수가 증가, 값싼 저 품질의 케이블 사용 가능	주요 회로를 센서 가까이 있는 포트에 놓거나 인쇄 된 코일의 경우 뒷면에 부품을 실장 하십시오.	센서 가까이나 위에 전자 부품을 두면 온도 범위가 제한됩니다.

완전한 센서는 일반적으로 코일과 전자 장치를 연결하는 케이블을 가지고 있습니다. 케이블은 동축, twisted-pair, 리본 또는 PCB의 배선이 될 수 있습니다. 이 케이블은 모든 케이블이 인덕턴스, 커패시턴스 및 DC 저항을 가지므로 여러 가지 면에서 시스템 설계 및 성능에 영향을 미칩니다. 케이블의 인덕턴스가 센서의 인덕턴스에 추가 됩니다. 케이블의 인덕턴스는 정적(변위에 민감하지 않음)이기 때문에 센서의 민감도를 감소시킵니다. 케이블 커패시턴스는 공진 회로 네트워크의 일부를 형성하므로 케이블의 불안정성으로 인해 측정 정확도가 떨어집니다. 온도 나 케이블 이동으로 케이블 커패시턴스가 변경되면 측정 오류가 발생합니다. 와 전류 센서의 일반적인 문제는 케이블 진동에 대한 잡음 추적입니다. 와 전류 센서는 매우 민감하여 twisted-pair 와이어 근처에서 움직이는 손이 관측 가능한 변위 오차로 나타나고 그래서 최고 성능의 센서를 위해서는 차폐 동축 케이블이 필요합니다. 케이블의 저항은 직렬로 연결되어 있어 Q와 온도 편차의 감소에 기여합니다. 최상의 성능을 위해서는 RG-178 또는 RG-316과 같은 고품질 마이크로 웨이브 동축 케이블

을 사용해야합니다. 이 케이블은 매우 안정적인 테프론 유전체와 낮은 정전 용량을 가지고 있습니다.

가격이 중요한 고려 사항이고, 안정성이 희생될 수 있는 경우 Twisted-pair 또는 리본 케이블 링이 적합하며 매우 저렴한 커넥터와 함께 사용 할 수 있습니다. Twisted-pair은 인쇄 된 코일 센서에 직접 납땜하여 적어도 하나의 커넥터 세트를 제거 할 수 있습니다. 인쇄 회로 코일의 뒷면에 센서 인터페이스 회로를 배치하면 케이블 링으로 인한 측정 오류를 크게 줄일 수 있습니다. 회로가 코일의 자기장에서 작동하고 코일이 회로를 "인식"하더라도 성능에 심각한 영향을 미치지 않습니다. 센서가 두 번째 목표물로 볼 수 있기 때문에 회로의 접지면이나 큰 루프 영역을 피하는 것이 중요합니다. 센서 회로가 코일과 통합 된 상태에서 우리는 여전히 전력을 공급하고 케이블을 통해 출력 신호를 검색해야 하지만 이 케이블은 측정의 정확성에 아무런 영향을 미치지 않습니다. 센서 설계 지침을 수립하기 위해서는 우리는 센서 구동 회로의 미리 보기가 필요합니다. 이 기사의 "회로 디자인"섹션에서 개발 된 회로는 센서를 커패시터와 공진 되는 발진기 루프에 배치합니다. 발진 주파수 (공진 주파수)는 목표 범위에 따라 달라지며 회로의 출력입니다. LC 발진기에서 주파수는  $1/(\sqrt{LC})$ 에 비례합니다. 인쇄 회로 코일이 있는 공심 센서의 설계는 다음 단계를 따릅니다.

- 우리가 필요한 외부 코일의 반경  $r_0$ 를 설정하십시오.  $r_0 > 2*$  일반적인 설계를 위한 감지 범위  $r_0$ =적극적인 설계를 위한 감지 범위.
- 코일의 제조 기술을 선택하십시오. 제조 기술은 코일의 권선을 구성하는 너비(w), 두께(t), 간격(p)을 결정합니다.
- 단일 레이어에 적용할 수 있는 턴 수를 계산합니다. 외부 코일의 반경  $r_0$ 는 초기 단계에서 결정되었습니다. 내부 코일 반경  $r_i$ 는 적어도 외부 반경의 1/3이어야 합니다. 레이어당 턴 수는

$$n_1 \approx \frac{r_0 - r_i}{p}$$

- Burkett의 인덕턴스 방정식을 사용하여 무 부하 인덕턴스를 계산합니다. 지금은 하나의 레이어로 가정하라.

$$L = 7.88 * \frac{(r_0 - r_i)^2 * n_1^2 * layer^2}{13 * r_0 - 7 * r_i} \mu H$$

- 케이블의 길이와 제조사의 단위 길이당 커패시턴스의 사양으로부터 케이블의 커패시턴스 ( $C_{cable}$ )를 계산합니다. 단일 층 코일의 상호 권선 커패시턴스( $C_{IWC}$ )는 0이라고 가정합니다. 2층 코일의 경우  $C_{IWC}$ 이 평행 판 커패시턴스의 1/4이 되도록 계산하고, 권선을 견고한 금속인 것처럼 계산됩니다.

$$C_{IWC} = \frac{1}{4} * \frac{\epsilon_r * \epsilon_0 * A}{h} = \frac{1}{4} * \frac{\epsilon_r * \epsilon_0 * \pi * (r_0^2 - r_i^2)}{h}$$

여기서  $\epsilon_r = \text{비유전율(무차원의 수 FR-4PCB의 경우 } \epsilon_r = 4.2)$

$$\text{여기서 } \epsilon_0 = \text{여유 공간의 유전율} = 8.86 * 10^{-12} \frac{F}{m}$$

여기서  $h = \text{코일의 두께(meters)}$

- 자기 공명 주파수를 계산합니다.

$$SRF = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{cable} + C_{IWC})}}$$

- 작동 주파수를 선택합니다. LC 발진기 회로의 경우, 최소 주파수는 최대 인덕턴스와 일치하며 최대 이격 거리에서 발생합니다. 최대 인덕턴스는 Burkett 방정식으로 근사적으로 구해집니다. 우리는 원하는 최대 주파수는 케이블과 권선 커패시턴스는 작은 영향을 가지므로 일반적으로 SRF의 1/3의 이하가 되어야 합니다. 이러한 고려 사항을 가지고 우리는:

$$f_{\max} \leq 3 * SRF$$

$$f_{\max} = 2 * f_{\min}$$

$$f_{\min} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \leq SRF/6$$

여기서  $C = \text{전체 병렬 공진 커패시턴스이고, } L \text{은 Burkett 방정식에서 구해지며, 마지막 식은 원하는 주파수에서 센서를 공진 시키는데 필요한 커패시턴스를 계산하는데 사용할 수 있습니다.}$

- 코일의 DC 저항을 계산합니다.

$$R_{DC} = \frac{1}{wt} \rho = n_1 \left[ \frac{2\pi(r_0 + r_i)}{2} \right] \frac{\rho}{wt} * layers$$

여기서  $I = \text{코일의 길이}$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \text{코일의 저항계수}$$

$w = \text{코일의 배선 너비}$

$t = \text{코일의 배선 두께}$

- 표면 효과와 근접 효과에 의해 발생하는 DC 저항보다 높은 최악의 경우의 AC 저항을 예측합니다.

$$R_{AC} = 2 * R_{DC}$$

- 무 부하 Q를 계산합니다. (대상물이 없는 자유 코일의 Q)

$$Q = \frac{2\pi f_{\min} * L}{R_{AC}}$$

우리는 다음을 필요로 합니다.

일반적인 설계의 경우 무 부하  $Q > 15$  (Unloaded  $Q > 15$  for a typical design)

Unloaded  $Q > 5$  for a design with a  $Q > 15$

만약  $Q$ 가 충분히 높지 않으면 코일에 레이어를 추가하는 것을 고려하십시오. 레이어의 수가 두배가 되면 권선 수가 두배로 늘어나므로 인덕턴스는 4배가 되고, 저항은 두배로 늘어납니다. 그러므로  $Q$ 는 대략 두배입니다. 또한 표 2의 지침을 따라  $Q$ 를 증가시키십시오.

- 무 부하 인덕턴스는 수용이 가능합니까? 만약 인덕턴스가 너무 높으면(대형 코일을 제외한 드문 상황), 공진 커패시턴스가 너무 낮아 케이블 및 권선 간 용량이 센서 동작을 지배할 수 있습니다. 만약 인덕턴스가 너무 낮으면(특히 작은 코일의 경우 보편적인 문제) 회로가 과도한 전력을 소모하거나 수용 가능한  $Q$ 에 대해 비 실용적으로 높은 작동 주파수를 요구할 수 있습니다. 우리는 다음을 필요로 합니다:

일반적인 설계에서는  $1\mu H < L < 100\mu H$  (그러나  $L > 10\mu H$ 로 설계하십시오.)

공격적인 설계에서는  $L < 1\mu H$

만약 인덕턴스가 너무 낮으면 미세 피치 PC 기술을 사용하거나, 레이어를 추가하거나, 하이브리드 집적 회로 기술을 사용하여 권선 수를 늘리십시오.

- 코일의 프로토타입을 만들고 LCR 미터로 측정하여 설계를 확인하고  $L(x)$ : 이격 거리)와  $R(x)$ 에 대한 데이터베이스를 수집합니다. 이 데이터는 전자 제품을 설계하는데 사용됩니다. 이러한 측정을 수행하려면 타겟과 센서를 적절한 고정 장치가 있는 마이크로 미터에 부착하십시오.

## 회로 설계

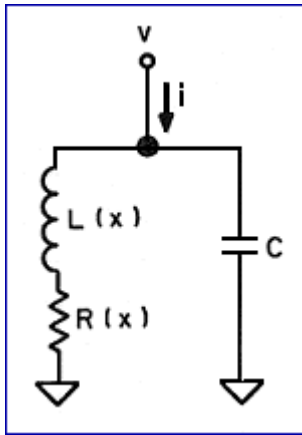


그림 6 센서에 커패시터를 추가하는 것은 목표물의 변위에 대한 임피던스의 감도를 확대하는 공진 센서 네트워크를 생성합니다.  $(j\omega) = V(j\omega)/I(j\omega) =$  회로의 복소 임피던스

와 전류 센서의 회로 설계에서의 과제는 대기 온도에 비례하고 온도와 무관하게 선형적으로 비례하는 출력을 개발하는 것입니다. 센서는 변위를 임피던스 변화로 변환하며, 회로는 임피던스의 변화를 RF 캐리어의 진폭, 위상 또는 주파수와 같은 다른 전기적 변수로 변환합니다. 이 신호는 복조 되고, 온도 보상되고, 선형화 되고, 오프셋 되고 스케일되어야 합니다. 이런 단계는 회로, 알고리즘 또는 이들의 조합에 의해 수행될 수 있습니다. 거의 모든 와 전류 센서 회로의 기본이 그림 6에 나와 있으며, 센서 코일은 커패시터와 공진합니다. 공진은 그림 7에서와 같이 회로 임피던스  $Z(j\omega)$ 의 급격한 변화를 일으키며, 중간 지점의  $x=4\text{mm}$  입니다. 그림 7 (A)에서 공진 주파수에서 피크의 크기와 피크의

높이는 Q에 따라 달라지며 Q는 목표 변위에 따라 달라집니다. 그림 7(B)에서 위상은 저 주파수에서 +90, 고 주파수에서 -90으로 이동합니다.

위상 전이의 주파수는 인덕턴스에 따라 달라지며, 인덕턴스는 목표 위치에 따라 달라집니다.

변위를 전압으로 변환하는 일반적인 방법은 단순히 고정 주파수에서 전류 소스로 공진 회로를 구동하고 센서에 나타나는 전압의 진폭 또는 위상을 복조 하는 것입니다. 진폭 및 위상 검출은 모두 복잡하며 독립적인 오실레이터, 위상 검출기, 저역 통과 필터 및 아날로그 포스트 컨디셔닝 회로가 필요합니다.

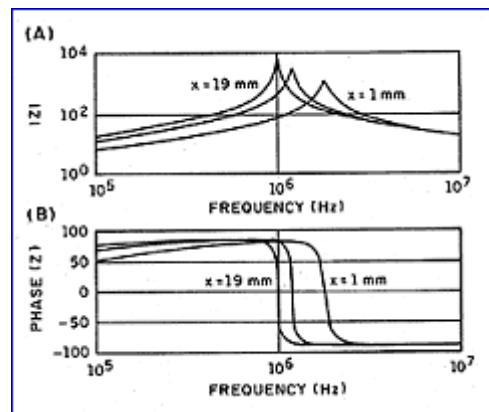


그림 7 그림 6의 공진 센서 네트워크 임피던스 (Z)는 주파수와 목표물의 변위에 의존합니다. 목표물의 이격 거리(x)는 크기의 피크 값(A)과 위상이 0에 교차(B)되는 빈도를 변경하여 위치 감지를 위한 기반을 제공합니다.

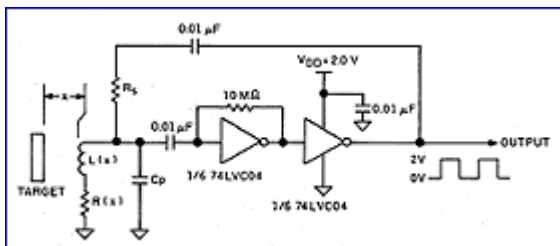


그림 8 와 전류 센서가 있는 LC 게이트 발진기는 목표물의 이격 거리에 의존하는 주파수 출력을 생성합니다. 마이크로 컨트롤러는 출력 펄스를 카운트하여 주파수를 직접 디지털화 할 수 있습니다.

가장 낮은 비용으로 위치 센서를 설계하는 것이 목표라면, 그림 8의 자체 발진 회로를 고려하십시오. 이것은 저 전압 CMOS 논리게이트를 사용하는 간단한 게이트 발진기입니다. 두 개의 인버터는 크고 양의 전압 이득을 생성하므로 회로는 공진 센서 네트워크의 위상 변화가 0 인 주파수에서 발진합니다. 출력은 주파수가 변위의 함수이고 이격 거리의 전체 실용 범위에서 ~ 2:1을 변경하는 구형 파입니다. 마이크로 컨트롤러가 이 미 호스트 시스템의 일부라고 가정하면 그림 8의

회로의 장점은 다음과 같습니다.

출력은 마이크로 컨트롤러의 카운터 타이머 포트에 직접 연결하여 펄스를 카운트함으로써 간단히 디지털화 할 수 있습니다. 마이크로 컨트롤러는 교정 중에 저장된 상수를 사용하여 디지털 선형화, 오프셋 및 스케일링을 수행합니다.

- 모든 센서 구성 요소(코일 및 모든 전자 부품)는 보정 아래에 있으므로 비싸고 고 정밀 장치가 필요하지는 않습니다.
- 회로는 수 백 uA의 단일 공급 전압으로 작동합니다.
- 회로에는 약 \$0.35의 재료 비용으로 7개의 전자 부품이 필요합니다. PCB 코일은 볼륨당 \$ 0.50에 주문할 수 있습니다. 부하 및 테스트 비용, 케이블 및 조립품의 추가로 전체 센서 서브 시스템은 고 용량 마이크로 컨트롤러 기반 제품의 가격에 \$ 2.00를 추가합니다.

그림 8의 회로는 다음과 같이 주어진 공진 주파수에서 발진합니다.

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(x) * (C_{CABLE} + C_{IWC} + C_P)}}$$

그림 8의 구성 요소 값을 찾으려면 먼저 앞에서 설명한 절차에서 원하는 작동 주파수를 결정합니다. 그런 다음  $C_P$ 에 대해 위의 수식을 풀고 가장 가까운 표준 값을 선택합니다.  $R_S$ 는 전력소비뿐만 아니라 첫 번째 인버터의 입력에서 신호의 진폭을 결정합니다. 노이즈를 최소화하기 위해서는 인버터 입력에서 가능한 가장 큰 신호를 가지는 것이 바람직합니다.  $R_S$ 값이 작을수록 신호는 커지지만 소비 전력은 커집니다. 공진 시 LC TANK의 임피던스는 순전히 저항이며 다음과 같습니다

$$R_{res} = \omega L \sqrt{Q^2 + 1}$$

$R_S$ 와  $R_{res}$ 는 전압 분배기를 형성하므로 진폭은 다음과 같습니다.

$$V_{PP} = \frac{4}{\pi} V_{DD} * \frac{R_{res}}{R_{res} + R_S} (peak \ to \ peak)$$

여기서  $4/\pi * V_{DD}$ 는 구형 파 출력 신호의 기본 진폭입니다. 우리는  $R_S$ 와 LC TANK가 발진 주파수를 중심으로 대역 통과 필터를 형성하기 때문에 기본적인 컴포넌트 만을 고려할 필요가 있습니다. 이 필터는 기본적인 컴포넌트를 제외하고 모두 무시할 수준으로 감쇠 시킵니다. A good rule of thumb는  $V_{PP}$ 에 관한 공식에 peak-to-peak 진폭이 코일이 Unload(즉, 목표물이 존재하지 않을 경우)될 때 적어도 공급 전압( $V_{DD}$ )의 절반이 되어야 합니다. 이 가이드라인에 따라 우리는  $R_S=R_{res}$ 로 설정하고, Unload된 경우에 대해  $R_{res}$ 를 찾습니다.

공진에서 저항이 높을수록 ( $R_{res}$ 공식 참조) 센서를 구동하기 위한 전력이 적습니다. 더 높은 주파수, 더 높은 인덕턴스, 더 높은 Q값에서 저항이 상승하고 전력이 감소하는 것을 참조하십시오. 그림 8과 같은 CMOS 게이트 발진기는 흥미로운 전력 소비 특성을 나타냅니다. 첫 번째 인덕터는 로직 임계 치에서 입력으로 시간의 일부로 동작합니다. 이것은 그것을 소위 선형 영역에 위치 시

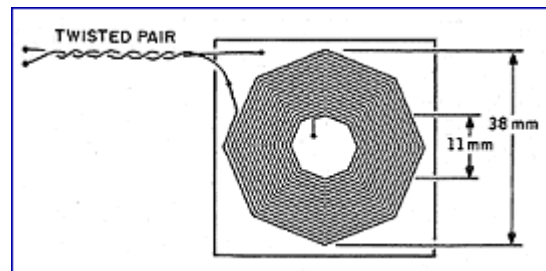
키며, 여기서 그것은 클래스B 선형 증폭기처럼 동작하고, 전원 공급 장치에서 접지로 직접 전류를 전달합니다. 공급 전압이 높을수록 클래스B 전류가 높아지므로 그림 8의 회로에서 전원은 공급 전압에 따라 급격히 증가합니다. 예를 들어  $V_{DD}$ 를 2.0V에서 2.5V로 전환하면 전류가 4배 증가합니다.  $V_{DD}$ 와 인버터 전원 핀 사이에 저항을 놓음으로써 저 전력 소모를 유지하면서 높은 전원 전압에서 회로를 동작할 수 있습니다. 저항은 인버터의 전압을 떨어트리고 클래스B 전류를 제한하는 음의 피드백을 제공합니다. 물론, 디커플링 커패시터는 여전히 칩의 전원 공급 핀에 부착되어야 합니다.

## 모델 센서 시스템 설계

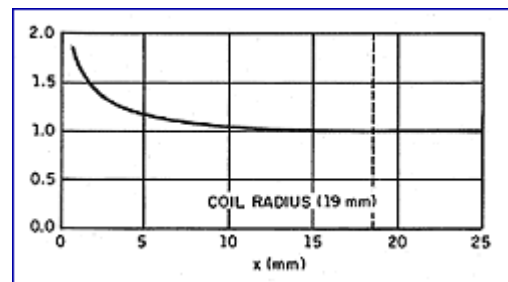
그림 9의 센서는 저 비용 센서 시스템의 완벽한 설계를 설명하기 위해 제작되었습니다. 이것은 인쇄 회로의 빠른 프로토타입을 위해 특별히 설계된 수치 제어 밀링 장비에서 밀링된 팔각형 나선입니다. 이 기계로 1시간 이내 센서 코일을 설계하고 제작할 수 있습니다. 알루미늄 목표물이 있는 이 센서의 LCR 측정값은 그림 3과 같습니다. 사용된 회로는  $R_S=10K\Omega$ ,  $C_P=910pF$ ,  $V_{DD}=2.0V$ 이며 그림 8에 나와 있습니다.  $R_S$ 는 1%, 100ppm/°C의 금속 필름 저항이지만 5%, 200ppm/°C의 저항도 전반적인 성능에 무시할 수 있는 영향을 미칩니다.

$C_P$ 는  $\pm 30ppm/°C$ 의 온도 계수를 갖는 5% NPO 커패시터입니다.  $C_P$ 의 초기 정확도는 초기 주파수에만 영향을 미치며 일반적으로 보정됩니다.  $C_P$ 의 드리프트는 매우 중요하므로 NPO 커패시터 또는 유사하게 안정적인 커패시터를 사용해야 합니다. 그림 10은 모델 센서 시스템에 대한 주파수 출력을 보여줍니다. 데이터는 HP53132A 주파수 카운터의 도움으로 수집되었습니다. 그림 3에서 전체 인덕턴스 시프트가 4:1이기 때문에 주파수의 시프트는 그것의 제곱근 또는 2:1입니다. 1MHz에서 2MHz 사이에서 작동할 때에는 거의 1MHz의 전체 주파수 시프트가 있습니다. 주파수는 변위의 함수이므로 선형화가 필수적입니다. 경험적으로 도출된 함수는:

$$x = m * \frac{1}{\sqrt{f - f_0}} + b$$



**그림 10** 이 38mm 직경의 PC 센서는 PC 밀링 장비를 이용하여 ~2시간 내에 설계되고 프로토타이핑되었습니다. 0.76mm(0.030inch) 회로 기판 위에 제작된 배선은 0.76mm 피치의 0.5mm 너비로 2개의 레이어에 총 34개의 턴을 생성했습니다.



**그림 9** 게이트 발진기의 주파수 출력은 19mm 감지 범위에서 거의 2:1 또는 1MHz로 변경됩니다. 이 예는 38mm PC센서와 알루미늄 목표물을 사용했습니다.

$f_0 = 981\text{kHz}$ 에서 그림 11의 선형화 된 출력을 생성합니다.

선형 오류는 20mm F.S. 범위의 <1% 또는 200 $\mu\text{m}$ 입니다. 더 나은 선형성은 다수의 지점에서 교정과 구분 보정을 이용함으로써 달성 될 수 있습니다. 구분 선형 보정보다 위의 식으로 선형화 하는 것이 좋은 이점은 단지 3개의 보정 점, 즉 끝점과 범위, 중간점만으로 상수 m, b, 및  $f_0$ 을 얻을 수 있다는 것입니다. 보정 절차가 끝점 사이의 직선에 이 점을 배치해야하기 때문에 중간 지점을 정확하게 알 필요가 없습니다.

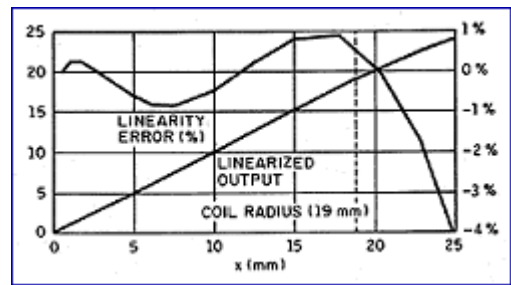


그림 11 19mm 범위에서 게이트 발진기는 1%의 우수한 선형성을 제공합니다.

그림 12는 센서 진폭과 전원 공급 전류를 보여줍니다. Q가 급격히 떨어지기 때문에 작은 이격 거리의 값에 대해서도 진폭이 감소하는 것을 유의하십시오. Q가 감소하는 것은 또한 전원 공급기에서 더 많은 구동 전류를 필요로 합니다. 2.0V의 공급 전압에서 최악의 전력 손실은 <600 $\mu\text{W}$ 입니다. 전력이 너무 낮아 출력에서 15pF 스코프 프로브의 커패시턴스가 차지 펌프로 인해 전력을 20 % 증가 시킵니다. 센서의 주파수 출력은 매우 비선형 적이며 전체 기울기가 125:1로 변경됩니다. 회로 잡음 및 양자화 오차가 주파수면에 서 대략 일정하다면, 변위의 관점에서는 일정하지 않을 것입니다. 변위의 측면에서 노이즈와 해상도는 주파수 곡선의 기울기에 반비례하므로 그것들은 125:1로 달라집니다.  $T_g$ 의 게이트 시간에 N개의 펄스를 카운트하여 주파수를 측정하면 추정되는 주파수  $f_{\text{est}} = N/T_g$ 가 됩니다. 분명히, 게이트 시간은 길어지고(샘플링 속도는 느려지고) 해상도는 높아집니다. 더 높은 해상도는 더 오랜 기간 동안 세는 것으로 도달 할 수 있습니다. 카운터 과정이 디지털 저역 통과 필터의 역할을 하므로 노이즈가 동시에 감소됩니다. 변위에 대한 해상도는 주파수 곡선의 기울기에 의존합니다.

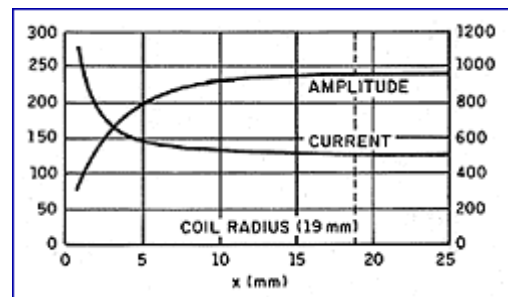


그림 12 280mA와 2V에서 게이트 발진기는 600 $\mu\text{W}$ 보다 적게 소모합니다. 와 전류는 센서가 목표물에 가까울 때 센서 Q를 저하시키고, 전력은 증가시키고 진폭은 감소시킵니다.

$$\Delta x = \Delta f * \frac{dx}{df}$$

노이즈는 위의 식과 같은 형태를 따르며, 이격 거리의 더 큰 값에 대해 증가합니다. 그림 13은 100ms의 게이트 시간 또는 10sps의 디지털화 비율 동안 모델 센서의 해상도와 노이즈를 보여줍니다. 노이즈는 HP53132A 카운터로 100ms 게이트 시간으로 측정했을 때 ~ 20Hz p-p입니다. 노이즈의 대부분은 매우 낮은 주파수(<1Hz)에서 발생하고 기류에 의한 진동이나 온도 변화에 의해 발생할 수 있습니다. 더 높은 해상도와 낮은 노이즈는 간단히 최대 이격 거리를 제한하는 것으로 얻을 수 있습니다. 노이즈를 관찰하는 가장 좋은 방법은 출력 구형 파를 디지털 오실로스코프에



표시하고 스코프를 1ms 지연시키는 것입니다. 센서가 1MHz (1 $\mu$ s주기)에서 작동하면 스코프에는 1000 사이클 이상 누적 된 위상 잡음이 표시합니다. 디지털 스코프가 무한 persistence로 설정되면 그 궤적은 나노 초 폭의 밴드로 "paint"할 것입니다. 이 대역의 너비를 1ms의 지연 시간으로 나눈 값은 상대적인 노이즈를 제공합니다.

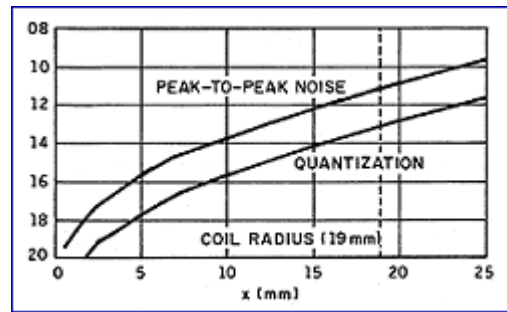


그림 13 인덕턴스 변화가 거리에 따라 감소하기 때문에 타겟이 센서에서 멀어짐에 따라 변위 잡음 및 양자화 오차가 증가합니다. 노이즈 및 양자화는 하나의 코일 반경의 전체 이격 거리에 상대적이며 주파수 카운터 게이트 시간은 100ms입니다.

예를 들어 20ns<sub>p-p</sub>/1ms는 20ppm 또는 1MHz에서 20Hz입니다. 그림 14는 센서와 전자 기기의 온도 안정성을 보여줍니다. 안정성은 이격 거리가 큰 값에서 온도 안정성은 해상도와 노이즈에서 같은 단점을 가지고 있기 때문에 큰 변위에서 더 나쁩니다. 감지 범위의 제한은 온도 안정성을 크게 개선할 수 있습니다.

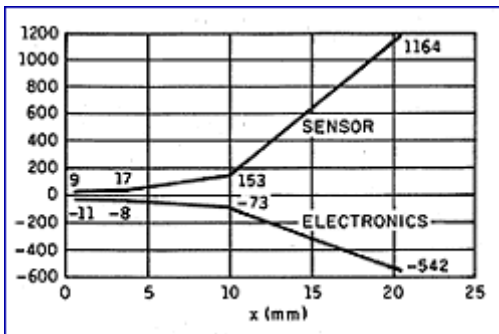


표3은 풀 스케일의 범위에서 두 값에 대한 모델 센서의 측정된 성능을 요약한 것입니다.

그림 14 게이트 발진기의 온도 안정성은 일부 최상의 상업용 센서와 비교해도 손색이 없습니다. 온도 계수는 하나의 코일의 반지름에 비례합니다.

성능 변수	10mm 범위	20mm 범위	단위
주파수 범위			
MAX	1.88	1.88	MHz
MIN	1.05	1.00	MHz
선형성	1%	1%	of range
양자화 오류(Quantization error)			
1 sps	17	15	bits
10 sps	14	12	
100 sps	11	9	
노이즈, peak-to-peak			
1 sps	14	12	bits
10 sps	13	11	
100 sps	12	10	
온도 편차			
전자 기기	-150	-540	ppm of range/°C
센서	+300	+1200	

공급 전원			
$V_{DD}$	2.0	2.0	V
$I_{DD}$	280	280	$\mu A$
POWER	560	560	$\mu W$
Power supply rejection	7	18	%/V

## 결론

와 전류 센서는 범위가 상대적으로 작은 정밀한 비 접촉 변위 감지에 유리합니다. 환경 오염이 심하거나 중간 물질을 통한 감지가 필요한 곳에서는 특히 유용합니다. 마이크로 컨트롤러가 있는 어플리케이션에서는 모든 전자 기기에 공통으로 인쇄 회로 센서 와 제조 방법을 사용하여 고 성능의 와 전류 센서는 몇 달러만으로도 추가 할 수 있습니다.

와 전류 센서의 성공적인 설계에는 경험이 필수적이지만 인쇄 회로 센서가 쉽고 싸게 프로토타입 화되고 테스트를 위해 기본 전자 기기 만 필요하기 때문에 신속하게 얻을 수 있습니다. 필수 설계 계산은 컴퓨터와 스프레드시트 프로그램을 이용하여 수행할 수 있습니다. 향후 기사에서는 향상된 온도 안정성을 위해 센서 및 고급 회로 설계를 최적화하기위한 고급 컴퓨터 지원 설계 방법을 조사 할 예정입니다.