

## A Study on Development of Steering Sensor for Electronic Power Steering

김 병 우<sup>†</sup>  
(Byeong-Woo Kim)

**Abstract** - In this paper, for the first time a new type of narrow-range angle sensor based on inductive effect is introduced and studied. A prototype steering angle sensor is also designed and fabricated to compare the characteristics of the four methods from the viewpoints of sensitivity, linearity and resolution, angle range of the sensor output. This sensor is designed to be sensitive to very small resolution in angle with detected range is scaled down to about 12bit. An intensive investigation has been carried out to study the behaviors of the sensor and optimize its performance by signal compensation. These behaviors are discussed and explained using an analytical and experimental testings. Moreover, Application possibility of the sensor are proposed and a demo device based on the sensor is presented.

**Key Words** : Inductive Effect, Steering Angle Sensor, Sensor Output, Signal Compensation

### 1. 서 론

자동차 사고로 인한 인적, 물적 피해가 증대되면서 이를 해결하기 위한 다양한 기술적 시도가 진행되었다. 이의 대표적인 응용 사례가 전자식 조향장치(Electronic Power Steering)라 할 수 있다.[1],[2] 자동차 조향장치 구성은 크게 검지부로서 조향각 센서, 판단부로서 EPS ECU, 구동부로서 전동식 모터를 들 수 있다. 이 중에서 EPS ECU와 전동식 모터는 국산화가 되어 양산에 이용하고 있으나 검지부인 조향각 센서는 국외 수입 또는 기술제휴에 의한 생산에 의존하고 있는 실정이다. 전자식 조향장치에 적용되는 조향각 센서는 홀 센서를 이용한 자기방식과 광을 이용한 광방식, 인덕티브 방식으로 나눌 수 있는데, 현재까지 가장 보편적으로 사용되고 있는 것은 홀 방식이나 최근 기업을 중심으로 인덕티브 방식에 대한 연구 필요성이 대두되고 있다.

홀 방식은 센서의 원천 특허를 MMT 사가 보유하고 있고 이를 이용하여 보쉬, 지멘스 등이 라이선스 형태로 생산하고 있으며 이를 국내 자동차 업체에서는 수입하여 적용하고 있다. 홀 방식은 기본 원리 및 구조에 대한 원천 특허 때문에 설계 자유도가 떨어지고 온도변화에 따른 자장특성 변화로 홀 IC의 결함 모드의 발생 가능성이 존재한다.

인덕티브 방식은 홀 방식에 비하여 자체 및 외부 자장변화로 인한 특성변화가 작고 직선성을 비롯한 센서 교유의 특성이 우수하다. 인덕티브 방식은 Hella, Bei, KSR 사가 특허의 대부분을 보유하고 있는데, 특히, 독일 Hella는 인덕티브

센서에 대한 특허를 활용하여 다양한 자동차 전장부품에 활용하고 있다.[3],[4] 이 때문에, 조향각 센서와 관련된 연구는 센서 검지부 자체에 대한 연구보다는 조향각 센서 모듈을 조향장치에 적용하여 발생하는 모듈 및 시스템 성능에 집중되어 있다.[5] 따라서, 국내에서도 자동차 조향장치에 적용 가능한 인덕티브 방식의 조향각 센서의 독자적 설계 및 제작에 대한 연구 필요성이 증대되고 있다.

본 연구에서는 기존에 상용화되어 있는 방식과 차별화된 인덕티브 방식의 센서 검지 기구부와 이로부터 발생하는 전기적 신호 특성 향상을 위한 신호처리 방안을 제안하여 실제 자동차에 적용 가능한 수준의 센서 설계 및 제작 가능성을 제시하였다.

### 2. 기본 구조 및 검지 이론

일반적으로 인덕티브 센서는 크게 발진코일, 수신코일, 커플러로 구성된다. 발진코일에서 발생하는 전자기장을 수신코일에서 검지하고 정보로서의 기전력 변화를 측정한다. 인덕티브 방식 각도센서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 차동모드(Differential mode)로 구성이 되어 있고 등글게 원형으로 권선된 발진코일과 그 위에 반원형 커플러를 사이에 두고 두 개의 수신코일을 배치하여 구성하였다.

Fig. 1에서 제 1수신코일은 커플러가 회전함에 따라 출력 신호가 변화되는데, 이를 이용하여 회전각에 대한 정보를 얻게 된다. 제 2수신코일은 커플러와의 거리변화에 따라 비례적으로 출력되는데, 이를 통하여 커플러와 센서기관 사이의 거리정보를 얻을 수 있다. 수신코일을 통하여 얻어진 신호는 다음과 같은 신호 처리기를 이용하는데, 이 신호 처리 과정을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부  
부교수

E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 12일

최종완료 : 2009년 7월 9일

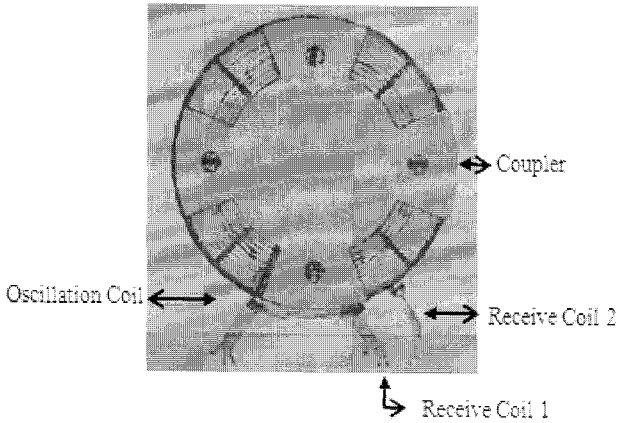


그림 1 인덕티브 센서 구조도  
Fig. 1 Structure of inductive sensor

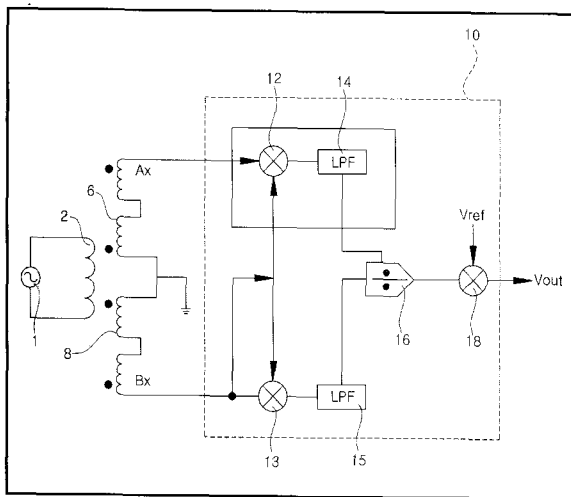


그림 2 인덕티브 센서의 신호 처리도  
Fig. 2 Signal processing of inductive sensor

여자코일 2에 연결된 발진기 1에 발진전압  $V_{osc}$ 을 인가하면 제 1수신코일과 제 2 수신코일의 수신전압은 식 (1), (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{osc} = V_m \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$A_x = A \sin(\omega t) + n(t) \tag{2}$$

$$B_x = B \sin(\omega t) + n(t) \tag{3}$$

식 (1), (2), (3)에 있어서,  $V_m$ ,  $A$ ,  $B$ 는 각각 상수이고  $n(t)$ 는 Common mode noise이다. Fig. 2의 신호처리기 제 1승산기 12에서는 제 1수신코일의 전압( $A_x$ )과 제 2수신코일의 전압( $B_x$ )을 곱한 신호  $A_x \cdot B_x$ 는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$A_x \cdot B_x = AB \sin^2(\omega t) + (A+B)\sin(\omega t) \cdot n(t) + n^2(t) \tag{4}$$

$$A_x \cdot B_x = \frac{AB(1-\cos(2\omega t))}{2} + (A+B)\sin(\omega t) \cdot n(t) + n^2(t) \tag{5}$$

식 (5)와 같은 신호가 제 1 저역통과필터 14를 통과하게 되면,  $\cos(2\omega t)$  및  $\sin(\omega t)$  성분은 제거되어 식 (6)로 표시할 수 있다.

$$A_x \cdot B_x = \frac{AB}{2} + N \tag{6}$$

이와 동일하게 제 2승산기 13에서의  $B_x \cdot B_x$ 는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$B_x \cdot B_x = \frac{B^2}{2} + N \tag{7}$$

그리고, 상기 신호처리기의 Divider 16에서는 다음 식 (8)로 나타낸다.

$$\frac{A_x \cdot B_x}{B_x \cdot B_x} = \frac{AB+2N}{B^2+2N} \tag{8}$$

식 (8)에서 얻어진 신호는 제 3승산기 18의 기준전압 ( $V_{ref}$ )을 곱하여 최종 출력 값 ( $V_{out}$ )을 얻게 된다. 그런데, 이와 같은 기존 인덕티브방식 각도센서는 신호처리기의 비례적(Ratio metric)을 사용해도 공통형 잡음이 제거되지 않기 때문에 전자파 적합성(EMC) 특성이 나빠지게 된다.

위와 같은 문제를 해결하기 위해서 반원형의 한 쌍의 수신코일을 양쪽에 대칭으로 배치하여 공통형 잡음 제거 가능성을 수학적으로 검증하였다. Fig. 3에서 알 수 있듯이, 여자코일 22와 한 쌍의 수신코일 26, 28, 그리고 신호처리기 30으로 구성하였다.

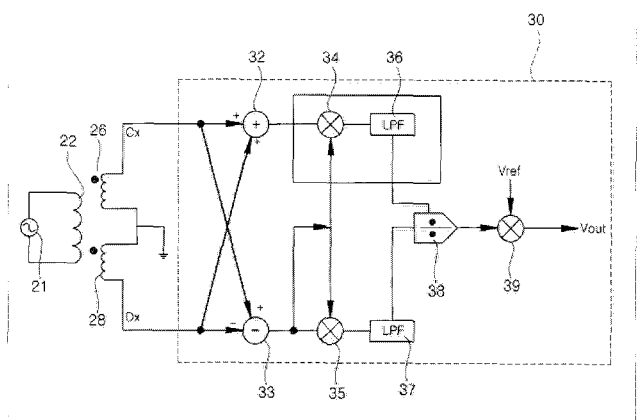


그림 3 노이즈 개선을 위한 인덕티브 센서의 신호 처리도  
Fig. 3 Signal processing of inductive sensor for noise cancellation

여자코일의 발진기를 통하여 발진전압( $V_{soc}$ )을 인가하면, 다음과 같은 제 1 수신전압( $C_x$ ) 및 제 2 수신전압( $D_x$ )이 얻어진다.

$$C_x = C \sin(\omega t) + n(t) \tag{9}$$

$$D_x = D \sin(\omega t - \pi) + n(t) = -D \sin(\omega t) + n(t) \tag{10}$$

가산기에서는 제 1 수신전압( $C_x$ )과 제 2 수신전압( $D_x$ )을 더하여 출력된다.

$$C_x + D_x = (C-D) \sin(\omega t) + 2n(t) \quad (11)$$

감산기에서는 제 1수신전압( $C_x$ )로 부터 제 2수신전압( $D_x$ )을 감산하여 출력된다.

$$C_x - D_x = (C+D) \sin(\omega t) \quad (12)$$

제 1승산기에서는 가산한 값 식 (11)과 감산한 값 식 (12)을 곱하여 출력된다.

$$\begin{aligned} (C_x+D_x)(C_x-D_x) &= \{(C+D) \sin(\omega t)+2n(t)\} \times \{(C-D) \sin(\omega t)\} \\ &= (C^2-D^2) \sin^2(\omega t)+(C-D) \sin(\omega t) \cdot 2n(t) \end{aligned} \quad (13)$$

$$(C_x+D_x)(C_x-D_x) = \frac{(C^2-D^2)(1-\cos(2\omega t))}{2} + (C-D) \sin(\omega t) \cdot 2n(t) \quad (14)$$

제 1승산기의 저역필터를 통과하게 되면 식 (14)의  $\cos(2\omega t)$  및  $\sin(\omega t)$  성분이 제거되어 식 (15)와 같이 된다.

$$(C_x+D_x)(C_x-D_x) = \frac{C^2-D^2}{2} \quad (15)$$

이와 동일하게 제 2승산기에서 저역필터를 통과하게 되면 식 (16)과 같이 된다.

$$(C_x-D_x)(C_x-D_x) = \frac{(C+D)^2}{2} \quad (16)$$

식 (15)와 (16)과 같이, 동기화되지 않은 공통형 잡음은 정류회로에서 모두 제거되기 때문에 비례적(Ratio metric) 출력에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

제산기에서는 제 1승산기 쪽에서 얻어진 값을 제 2승산기 쪽에서 얻어진 값으로 나누어 출력되며 그 값은 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{C^2-D^2}{(C+D)^2} = \frac{(C+D)(C-D)}{(C+D)(C+D)} = \frac{C-D}{C+D} \quad (17)$$

식 (17)에서 C, D는 제 1수신코일과 제 2수신코일의 극성에 의하여 서로 동일한 크기를 갖고 반대로 증감되기 때문에 (C-D)항은 각도정보를 나타내고 (C+D)항은 일정(C+D=Constant)하게 된다. 따라서 (C-D)/(C+D)는 비례(Ratio etric) 출력 값이 된다.

위와 같은 과정으로 신호처리를 하게 되면 인덕턴스방식 각도센서의 문제점인 코일 자체의 안테나 역할에 기인

하는 전자파 적합성(EMC) 특성 악화와 센서 자체에서 발생하는 공통형 잡음을 상쇄시켜 센서 특성을 향상시킬 수 있다.

### 3. 조향각 센서 설계 및 제작

일반적으로, 기존 자동차에 적용되는 조향각 검출 장치는 조향장치 축과 일체가 되어 회전하는 조향기어, 조향기어와 합치되어 회전하는 두 개의 종동기어, 종동기어의 회전을 전기적으로 검출하는 검출부로 구성된다. 상기 구조는 일정 정도의 검출 정밀도를 보장하고는 있으나 하나의 조향기어에 별도의 종동기어 두 개를 적용함에 따라서, 장치 전반의 부피 및 불량 증가라는 치명적인 문제점을 지니고 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 본 연구에서는 각도 및 각속도의 검출을 위한 양극성의 커플러를 배치하여 두 회전체 중 하나가 다른 하나의 회전체 내측에 합입되는 형태로 구성하여 소형화 및 불량감소를 도모하였다. 또한, 두 개 유성기어의 회전 비율을 상이하게 작동시켜 기어 간의 마찰 및 마모를 줄이는 동시에 검출 정밀도 향상을 도모하였다.

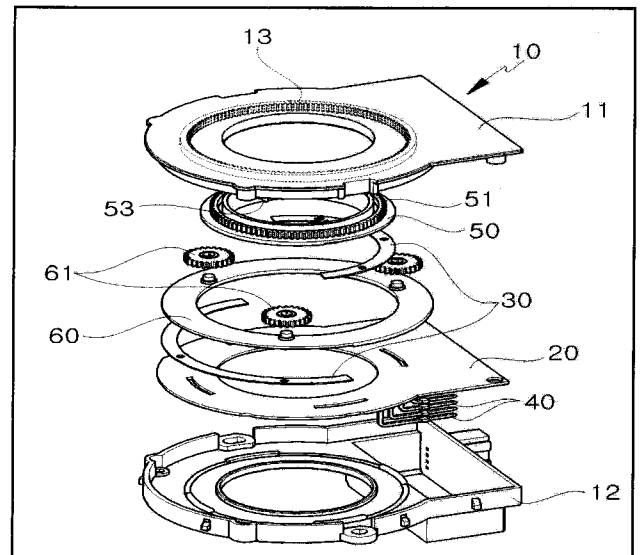


그림 4 인덕티브 센서의 검출 모듈  
Fig. 4 Detecting module of inductive sensor

위에서 언급한 자동차 조향장치의 기구적 제안을 기반으로 발생하는 물리적인 조향각을 검지하고 이를 신호처리하여 일정 정도 이상의 검지능력을 갖는 방법을 기술하고자 한다. 일반적으로 자동차 업체에서 요구하고 있는 조향각 센서는 단위 각도 90°를 기본으로 확장성을 요구하고 있기 때문에 Fig. 5와 같은 신호처리를 실시하였다.

조향장치 킴의 조향각 변화에 따른 커플러 각도의 변화에 의하여 발생하는 1차 신호 변화 특성은 Fig. 6과 같이 정현파 값을 갖게 된다. 이 같은 신호특성은 90° 이하의 제한된 각도에서만 의미를 지니고 있기 때문에 이를 광각화시켜 조향장치에서 요구되고 있는 일정 정도 이상에서 800° 내외의 측정 범위를 갖는 신호처리 방안이 요구된다.

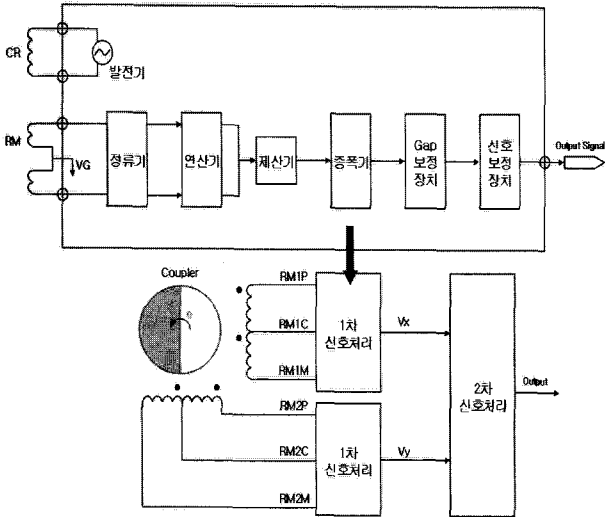


그림 5 자동차 조향각 감지를 위한 신호 처리도  
Fig. 5 Signal processing for detecting of steering angle

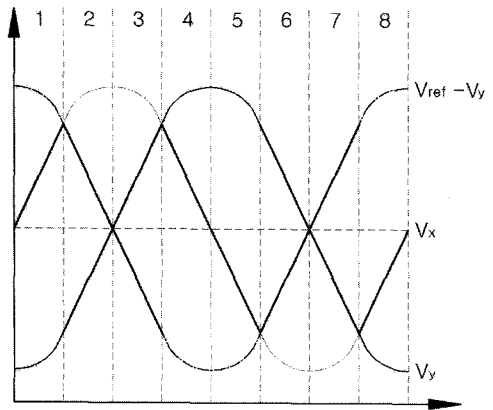


그림 6 조향각 신호의 1차 신호처리  
Fig. 6 1'st Signal processing of angle signal

Fig. 6에서 알 수 있듯이, 계측된 신호파형이 정현파로서 0-90 구간에서만 선형성을 갖고 있기 때문에 조향각 센서에서 요구하고 있는 선형성 기준( $V_{ref}$ ) 신호를 기준으로 Fig. 7과 같은 단위 각도 추출을 위하여 Table 1과 같은 판단 기준을 설정하였다.

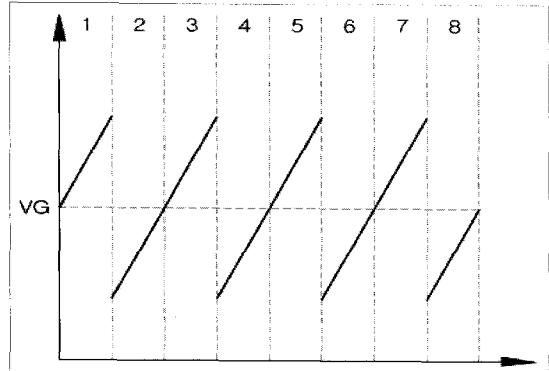


그림 7 선형성을 갖는 신호처리 결과  
Fig. 7 Results of signal processing with lineality

표 1 단위 각도 판단 기준

Table 1 Decision criterion of unit angle

Region	$V_x : V_G$	$V_y : V_G$	$V_x : V_y$	$V_x : V_{ref}-V_y$	USE
1	$V_x = V_G$	$V_y < V_G$	$V_x = V_y$	$V_x < V_{ref}-V_y$	$V_x$
2	$V_x = V_G$	$V_y < V_G$	$V_x = V_y$	$V_x = V_{ref}-V_y$	$V_y$
3	$V_x = V_G$	$V_y = V_G$	$V_x = V_y$	$V_x = V_{ref}-V_y$	$V_y$
4	$V_x = V_G$	$V_y = V_G$	$V_x < V_y$	$V_x = V_{ref}-V_y$	$V_{ref}-V_x$
5	$V_x < V_G$	$V_y = V_G$	$V_x < V_y$	$V_x = V_{ref}-V_y$	$V_{ref}-V_x$
6	$V_x < V_G$	$V_y = V_G$	$V_x < V_y$	$V_x < V_{ref}-V_y$	$V_{ref}-V_y$
7	$V_x < V_G$	$V_y < V_G$	$V_x < V_y$	$V_x < V_{ref}-V_y$	$V_{ref}-V_y$
8	$V_x < V_G$	$V_y < V_G$	$V_x = V_y$	$V_x < V_{ref}-V_y$	$V_x$

4. 결과 및 고찰

본 절에서는 제 3절에서 기술한 인덕티브 방식의 센서 이론 및 설계에 기초하여 제작된 감지부 성능을 평가하였다. 본 연구에서 제시된 성능평가 결과의 상대적이고 객관적인 검증은 위하여 조향각 센서의 분해능, 직선성, 정밀도, 감지 영역, 위치 공차 등에 대한 특성을 평가하고 분석하였다.

4-1 Sensor resolution

인덕티브 방식의 2차 센서 신호는 아날로그 값을 갖고 있기 때문에 분해능은 무한대라 할 수 있지만 최종적으로 EPS ECU에서 PWM 이나 CAN 통신을 위한 디지털 신호로 변환시켜야 하기 때문에 디지털 변환 후의 신호 값을 Table 2에 나타냈다. Table 2에서 알 수 있듯이, A/D 변환 이후의 PPS 신호는 1mV 레벨에서 변화하는 것을 확인할 수 있기 때문에 전체 기준 전압 5V를 12bits로 계산하면 4096단계로 세분되어 하나의 신호 단계는 1.22mV가 된다.

표 2 각도 변화에 의한 A/D 값

Table 2 A/D value due to angle variation

Item	Degree	PPS Signal (Original)	PPS Signal (A/D Conversion)
1	294.5	18.83475	18.835
2	295	19.17267	19.173
3	295.5	19.51058	19.511
4	296	19.84850	19.848
5	296.5	20.18641	20.186
6	297	20.52433	20.524
7	297.5	20.85425	20.854
8	298	21.16616	21.166
9	299	21.79099	21.791
10	300	22.41532	22.415

4-2 Sensor accuracy

조향장치의 각도 변화에 대하여 인덕티브 센서가 반응한 측정 정밀도를 Fig. 8에 나타냈다. 이 같은 정밀도는 기존 상용화 되어 있는 정밀도  $\pm 1.5\%$ 를 상회하는 값으로서  $\pm 1.488\%$ 를 나타냈다. 이 결과는 제 2장에서 기술한 전기적 노이즈를 제거시킬

수 있다는 이론식 (16), (17)의 타당성을 확인시키는 근거 자료이다.

이로부터 일반적으로 알려져 있는 인덕티브 센서의 정밀도를 활용한 조향 센서 활용 가능성을 검증할 수 있었다.

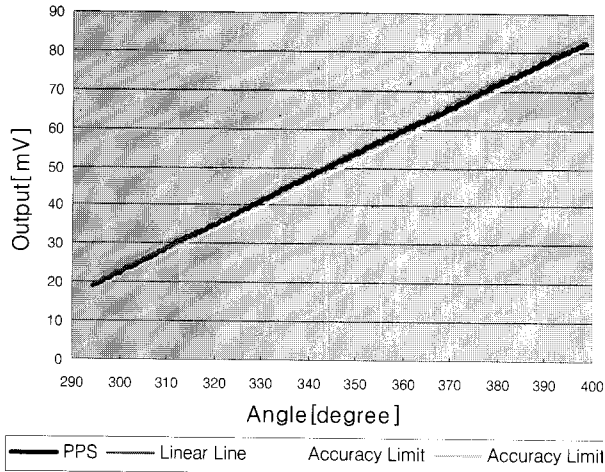


그림 8 조향각 센서의 정밀도 특성  
Fig. 8 Accuracy characteristics of angle sensor

4-3 Sensor angle range

자동차 조향장치는 차종에 따라서 요구되는 조향각 범위가 가변성이 있으나 일반적으로  $\pm 800^\circ$ 를 요구하고 있다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이,  $90^\circ$  단위로 전체  $1,600^\circ$  영역을 검지할 수 있음을 확인하였다. 이 같은 결과는 제 2절에서 기술한 연속 검지 가능한 기어부 설계에 기인하는 것으로서 기존 제품의 검지 영역인  $720^\circ$ 에 비하여 우수한 검지 능력을 나타냈다.

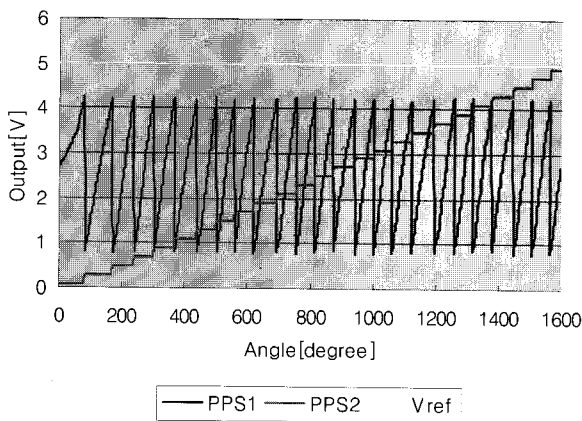


그림 9 조향각 센서의 검지 영역  
Fig. 9 Detection area of angle sensor

4-4 Sensor linearity

센서 선형성은 조향장치의 조향각 변화에 대응하여 어느 정도 선형적으로 변화하고 있는지를 나타내는 항목이다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이, 본 인덕티브 센서의 선형성은  $\pm 0.744\%$ 를 나타냈다. 본 개발 센서의 선형성을 나타내 주는

1차 함수는  $y=0.614x-160.59$  이면서  $R^2$  값이 0.9996(1인 경우, 완전한 선형성 확보)로서 거의 직선에 근접되는 특성을 얻을 수 있었다.

이 같은 선형성 특성은 기존 상용화되어 있는 센서  $\pm 1.5\%$ 에 비하여 우수한 것으로서 앞서 언급한 안정적인 기구부 설계와 불가피한 노이즈 제거를 위한 신호처리 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

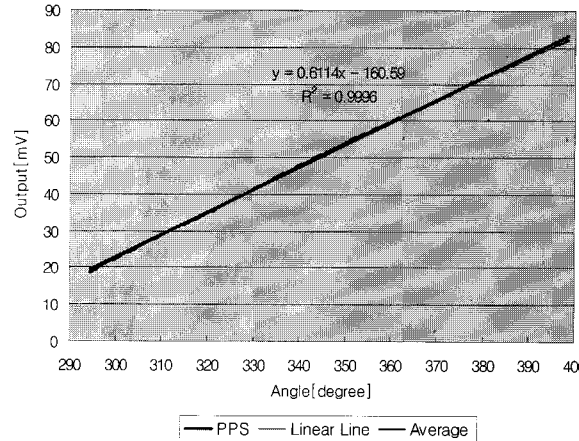


그림 10 조향각 센서의 선형성  
Fig. 10 Linear characteristics of angle sensor

4-5 기구적 공차 특성

인덕티브 기반의 조향각 센서의 커플러가 X, Y, Z 방향으로 왜곡(Shift)이 발생되면 이에 비례하여 센서 특성이 악화되기 때문에 이에 대한 보정방안 제시가 중요하다. 기존에 상용화되어 있는 차동 형태의 코일구조는 본 연구에서 제시한 노이즈 제거 방식에 비하여 초기 신호 손실이 클 것이라 판단되기 때문에 기계적 공차의 대부분을 차지하는 커플러 중심의 Z 방향 왜곡에 따른 센서 특성 및 개선 방법을 조사하였다. 이전 시스템에서는 Z 방향 노이즈 제거를 위하여 별도의 코일을 사용하여 제한적인 효과만을 얻었지만 본 연구에서는 신호처리 방법을 통하여 근본적인 해결을 시도하였다.

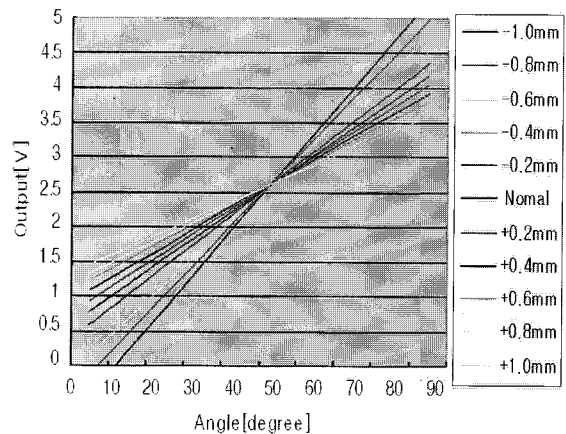


그림 11 Z 방향 왜곡에 의한 센서 특성  
Fig. 11 Sensor characteristics due to Z-axis distortion

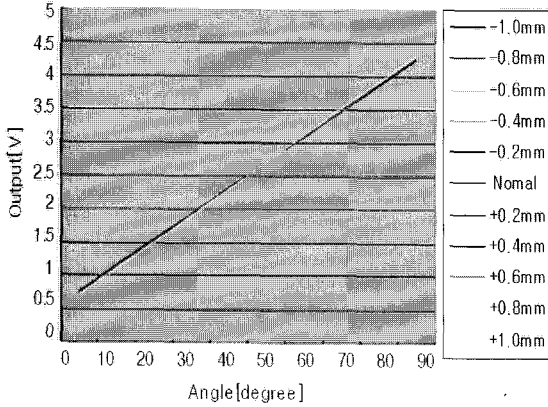


그림 12 신호처리 보정에 의한 센서 특성  
 Fig. 12 Sensor characteristics due to signal compensation

Fig. 11, 12에서 알 수 있듯이, 이를 통하여, Z축 커플러를 ±1.0mm 움직였을 때에 보정 전에는 약 ±30%의 오차가 발생되었지만 보정 후에는 ±0.7%로 감소하여 신호 보정 시스템의 유효성을 확인할 수 있었다.

이 같은 개선효과는 이론 식에서 언급한 Z축 방향의 커플러와 코일의 거리 변화에 따른 상관관계 수식을 활용한 신호처리 방법에 기인한다. 다시 말하면, 두 개의 수신코일에서 추출한 두 개의 입력신호를 받고 Ratio metric 방법을 사용하여 최종 출력신호를 추출하게 되는데, 이 출력신호 연산 과정에서 Z축 정보를 얻고 이 변화 값을 출력신호 보정 시에 활용할 수 있었다.

5. 결 론

인덕티브 방식을 적용한 자동차용 조향각 센서 설계 및 제작에 관한 연구를 국내 최초로 실시하여 기존 홀 방식 대비 동등 또는 이상의 성능을 확인하였는바, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 인덕티브 기반의 자동차 조향각 센서의 성능을 향상시키기 위해서는 기구적인 보상과 함께 신호적인 보상을 병행함으로써 기존 홀센서 이상의 성능확보가 가능하였다.

둘째, 연속 구동이 가능하고 소형화된 회전각 검지 기어부와 저역필터 회로를 적용한 신호처리부 설계를 통하여 검지 영역 ±800°, 선형성 ±0.744%, 정밀도 ±1.488%를 확인하였다.

셋째, 인덕티브 방식의 센서 제작 단계에서 발생하는 수신코일과 커플러 사이의 왜곡(±0.6mm)에 의하여 발생하는 ±10% 에러를 외부 에러 상쇄가 가능한 신호처리 방법을 도입하여 ±1.0mm 왜곡 시에 ±0.7% 까지 저감이 가능하였다.

향후 연구에서는 본 연구에서 제시한 조향각 센서의 일반 성능 결과를 기반으로 내환경 특성 및 실차 적용을 통하여 상용화 방안에 대한 대안제시가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 지원하고 있는 지역혁신 인력양성사업 및 전략기술개발사업 일환으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] T. Kohata, M. Abe, N. Ukai., "Electronic Control Four-Wheel Steering System", AVEC' 92, No. 923048, 1992.
- [2] S. Torii, E. Yaguchi, K. Ozaki, T. Jindoh., "Electronically Cintrolled Torque Split System for 4WD Vehicles", SAE, No. 861349, 1983.
- [3] D. J. Adelerhof, W. J. A. Geven., "New position detectors based ob AMR sensors", Sensor & Actuator, A 85, 2000.
- [4] G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach, W. Zinn., "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchagge", Phys. Rev. B 39, p. 4828-4830, 2000.
- [5] J. Van Driel, R. Cooeorn, K. M. H. Lenssen, F. R. Doeer., "Thermal Stability of Ir-Mn as exchange biasing material", J. Appl. Phys. No 85, pp 5522-5524, 2008.

저 자 소 개



김 병 우 (金柄禹)

1965년 4월 15일생. 1987년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1990년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(석사). 2002년 한양대학교 정밀기계공학과(박사). 1989년 일본 KO-SAKA연구소 초빙연구원. 1994~2006년 자동차부품연구원 전장기술연구센터장. 2006년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수.

Tel : 052-259-1287

Fax : 052-259-1686

E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr