

절대 변위 측정용 RVDT의 위상 오차 보상

RVDT Phase Error Compensation for Absolute Displacement Measurement

신 동 윤, 양 윤 기, 이 창 수*
(Dong-Yun Shin, Yoon-Gi Yang, and Chang-Su Lee)

Abstract : RVDT is a transducer that presents rotary phase angle according to the displacement of eccentric rotor such as press machine. However a study on the phase error of RVDT that affects precision is not enough. This paper analyzes RVDT phase error and obtains compensation curves with serial or parallel resistance through simulation. First, error compensation procedure that analyzes errors due to the unbalance of reference inductances of each pole and uses parallel resistance as a compensation is proposed. Second, error compensation procedure due to the amplitude unbalance of the sensor driving currents is examined by serial compensation resistance. Experimentally, we got stable RVDT with phase error under 1° by the proposed method.

Keywords : RVDT, LVDT, absolute encoder

I. 서론

제철, 제강을 비롯한 산업용 설비는 점점 복잡하고 다양화 되어 가고 있으며 고정밀도, 무고장의 내구성 설비를 요구하게 되었다. 이러한 산업 분야에서 신뢰성 있는 트랜스듀서는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 특히 자기적 변환을 이용한 트랜스듀서는 외부 전자기파의 영향을 줄이기 위하여 차폐시켜 사용할 경우 외부 환경변화에 강한 고정밀도의 트랜스듀서로서 사용이 가능하다[1].

이러한 자기적 변환 트랜스듀서는 직선으로 움직이는 기계적 변화에 대응하는 직선형 가변 차동 변압기 (LVDT, Linear Variable Differential Transformer)와 회전하는 기계적 변화에 대응하는 회전형 가변 차동 변압기 (RVDT, Rotary Variable Differential Transformer)로 나누어진다[2]. 이와 관련된 연구로 Yassa 등은 LVDT/RVDT의 위치 검출을 위한 복조기를 VLSI로 설계하였고[3], Crescini 등은 FFT를 응용한 신호 조정(conditioning)에 관련하여 입력 신호와 출력신호에 대한 신호처리 방법의 개선에 관한 연구를 하였다[4].

보통 이러한 연구는 신호 조정(conditioning)에 관련하여 입력 신호와 출력신호의 잡음을 제거하기 위한 신호 처리 방법[4,5], 트랜스듀서의 입력 신호 조정 방법 및 변위에 따른 출력신호의 검출 방법, 또는 트랜스듀서의 활용 방안 [3,6,7]등이 주를 이루고 있는데 트랜스듀서의 기계적 오차를 고려하고 있지는 않다. 그러나 실질적으로 RVDT를 예로 들어보면 90° 씩 떨어져 있는 각각의 2차 코일의 인덕턴스가 코일의 회전수, 코일간의 간극이나 코일의 지름 등의 차이로 동일하지 않음으로써 1차 코일에 인가되는 정현파들이 일정하지 않게 되는 문제로 인해 회전에 따른 오차가

발생한다. 이러한 이유로 인해 RVDT의 위상 오차가 발생하게 되어 있으며 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

RVDT는 회전각도 측정이 가능하도록 고안된 것으로 자성체로 이루어진 회전 코어와 4개의 극으로 이루어진 stator로 구성되어 있다. 4개의 극에는 1차 코일과 2차 코일이 감겨져 있는데 1차 코일에는 정현파와 역현파가 인가된다. 한 쪽 극에 치우치도록 고안되어 있는 회전 코어가 돌아감에 따라 2차 코일에 유도되는 상호 인덕턴스의 변화로 변위 측정이 가능해진다[8,9].

본 논문에서는 이러한 전기적, 기계적 문제로 인해 생기는 오차를 분석하고 모의실험을 통해 확인하여 오차 보상 방법에 대해 제시한다. 우선 2장에서는 RVDT의 기본적 동작원리를 파악하여 위상 오차에 영향을 줄 수 있는 요인들을 알아보고 3장과 4장에서는 오차 원인들에 대해 분석하여 발생할 수 있는 오차를 가정 한 후에 모의실험을 통해 위상 오차를 보여주고 오차 보상에 대한 방법을 제안한다. 5장에서는 실제 RVDT의 위상 오차를 확인하고 제안한 방법에 따라 오차 보상을 하여 모의실험 결과가 잘 적용됨을 보이고 6장에서는 논문의 결론을 다뤘다.

II. RVDT의 동작원리

RVDT는 상호인덕턴스 변화를 이용하는 트랜스듀서이며 전기적으로 분리되어 회전이 가능한 편심 코어의 변위에 비례하여 전기적 출력이 발생된다.

그림 1은 RVDT의 구조를 보여주는데 4개의 고정자 극은 각각에 배치되는 극들에 음 위상으로 순차적으로 연결된 코일을 갖추게 된다. $I \sin \omega t$ 와 $I \cos \omega t$ 의 AC 여기가 1차 코일의 쌍 각각에 대해 입력 될 때, 자기 경로는 신호를 갖는 회전자와 일치하는 각각의 극 모두에 생성된다. 즉, 그림 1에서 $I \sin \omega t$ 와 $I \cos \omega t$ 의 교류가 1차 코일의 각각에 대해 입력될 때 자기저항은 편심 회전자와의 격차 또는 회전자의 톱니가 겹쳐지는 영역의 연속적인 변화에

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 3. 31., 채택확정 : 2006. 5. 14.

신동윤, 이창수 : 수원대학교 전자공학과

(blackdoy@suwon.ac.kr/cslee@suwon.ac.kr)

양윤기 : 수원대학교 정보통신공학과(ygyang@suwon.ac.kr)

따라 변화하게 된다. 각각의 극에 흐르는 자속밀도의 변화에 의해 2차 코일은 전압 $K \sin(\omega t - \theta)$ 이 유기되어 $I \sin \omega t$ 와의 위상차 θ 에 의해 0° 에서 360° 까지 회전각을 발생시키게 된다. 2차코일 유기전압 E 는 (1)과 같이 유도된다[5,6].

$$\begin{aligned} E &= (e_1 - e_2) - (e_3 - e_4) \\ &= \omega L_0(1 + a \cos \theta)I \sin \omega t - \omega L_0(1 - a \cos \theta)I \sin \omega t \\ &\quad - \omega L_0(1 + a \sin \theta)I \cos \omega t + \omega L_0(1 - a \sin \theta)I \cos \omega t \quad (1) \\ &= 2a\omega L_0 I (\sin \omega t \cos \theta - \cos \omega t \sin \theta) \\ &= K \sin(\omega t - \theta) \end{aligned}$$

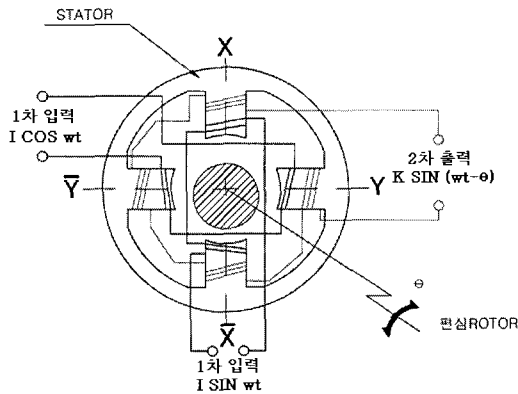


그림 1. RVDT의 구조
Fig. 1. The structure of RVDT.

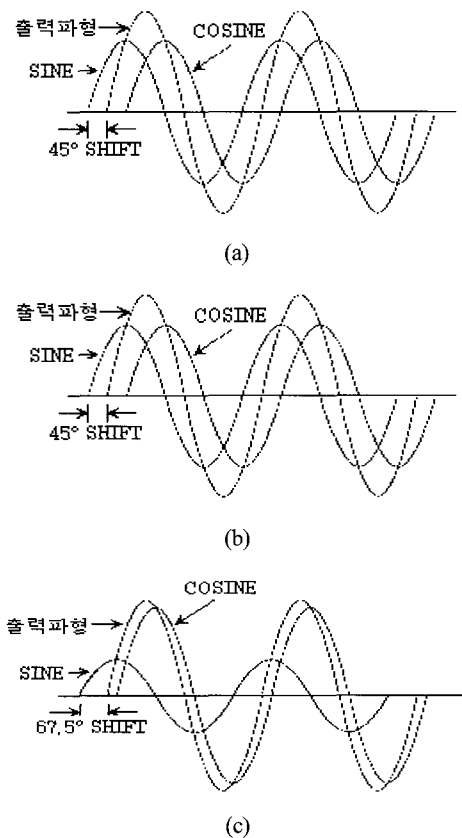


그림 2. 편심회전에 따른 출력파형.
Fig. 2. Output waveform according to eccentric rotation.

여기서 e_i : i-극의 2차코일 유기전압, L_0 : 기준 인덕턴스, a : 각 극의 인덕턴스 변화계수, θ : 회전자의 기계적인 회전각, I : 1차코일의 여기 전류 크기, ω : 1차코일의 여기 전기 각속도이며 K 는 $a\omega L_0 I$ 이다.

그림 1에서 코어가 X극에 가장 치우친 편심을 0° 라 가정한 것이 그림 2(a)이다. X극에 인가된 사인파가 X에 인가된 negative 사인파보다 상호인덕턴스가 크므로 사인파 형태가 나오게 되고 Y축의 극들은 인덕턴스 값이 같으므로 상쇄되어 출력파형은 입력 사인파와 같은 위상의 사인파가 나오게 된다.

편심이 45° 시계방향으로 움직였을 경우가 그림 2(b)이다. X극과 Y극의 상호인덕턴스 값이 같으므로 그 입력 사인파와 비교 하였을 때 45° 지연된 사인파가 발생한다. 이처럼 편심이 시계방향으로 돌아가면 이상적으로는 출력 파형과 입력 사인파의 위상차는 편심이 움직인 거리만큼 생긴다 [4]. 그러나 실질적으로 코일의 자성체와 기계적인 문제로 인하여 기준 인덕턴스의 값에 차이가 발생한다. 또한 입력 파형들의 진폭이 같아야 함에도 DAC (Digital to Analog Converter)간의 출력 오차 등의 이유로 인해 여기 전류의 크기에 차이가 발생할 수 있다.

또 다른 오차의 발생이유로 편심의 축이 틀어지거나 흔들리게 되는 경우가 있는데 그 경우는 각 극의 인덕턴스 변화계수가 불규칙적으로 변하여 오차가 규칙적이지 않고 범위가 너무 커서 외부적으로 보상이 불가능하여 가정하지 않는다. 그러므로 앞의 기준 인덕턴스와 여기 전류의 진폭 차이에 대해 파생되는 위상 오차를 파악해 보도록 한다.

III. 기준 인덕턴스 차이에 따른 오차 분석 및 보상 방법

출력 사인파는 이상적으로 코어의 편심위치만큼의 위상차가 발생해야 함에도 불구하고 실질적으로 여러 요인들로 인해 오차가 발생하게 된다. 우선 X극의 인덕턴스 L_1 이 다른 극의 인덕턴스 L_0 보다 큰 경우 공식 (1)은 (2)와 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} E &= (e_1 - e_2) - (e_3 - e_4) \\ &= \omega L_1(1 + a \cos \theta)I \sin \omega t - \omega L_0(1 - a \cos \theta)I \sin \omega t \\ &\quad - \omega L_0(1 + a \sin \theta)I \cos \omega t + \omega L_0(1 - a \sin \theta)I \cos \omega t \quad (2) \\ &= K \sin(\omega t - \theta) + K_1(1 + a \cos \theta) \sin \omega t \end{aligned}$$

여기서 K_1 은 $\omega(L_1 - L_0)I$ 이다. (2)의 마지막식의 두 번째 항은 오차항 E_{e_1} 으로서 정리하면 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} E_{e_1} &= K_1(1 + a \cos \theta) \sin \omega t \\ &= \frac{K_1 a}{2} (\sin(\omega t + \theta) + \sin(\omega t - \theta)) + K_1 \sin \omega t \quad (3) \end{aligned}$$

K_1 을 보면 각 극의 인덕턴스 차이가 클수록 오차항의 진폭이 커지게 되고 오차항의 진폭의 크기는 위상 오차에도 영향을 주게 된다. $\theta = 0^\circ$ 에서는 위상 오차가 없음을 알 수 있다. 또한 $\theta = 180^\circ$ 에서는 $K_1(1 + a)$ 가 K 보다 작으므로 오차 변수는 상쇄되어 위상 오차가 발생하지 않는다. 두 경우를 제외하고 다른 영역에서는 (3)의 3개의 사인파로 인

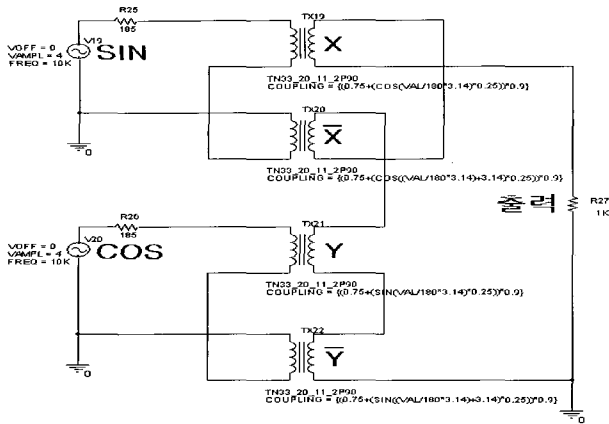
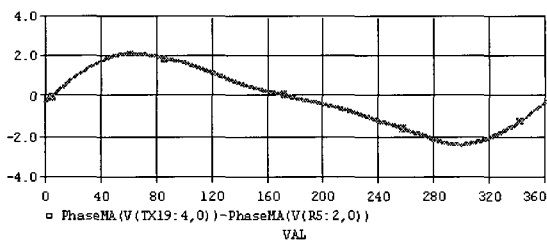
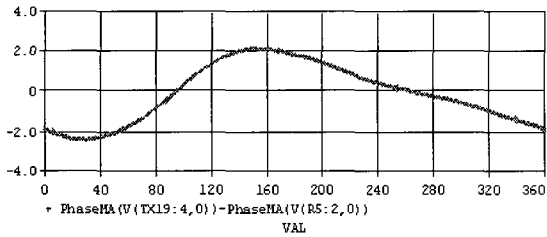


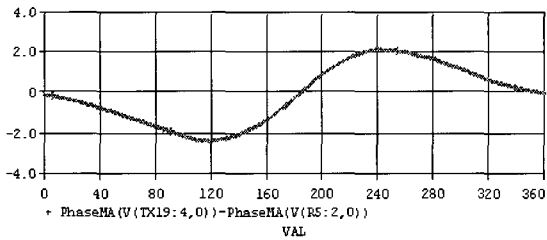
그림 3. RVDT 회로도.
Fig. 3. Circuit diagram of RVDT.



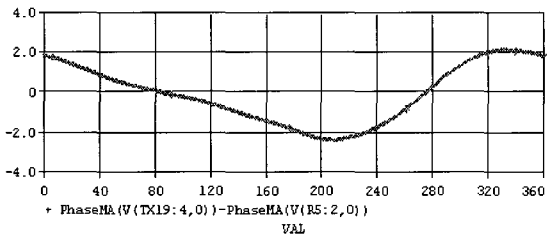
(a) When reference inductance of X pole is larger than others.



(b) When reference inductance of Y pole is larger than others.



(c) When reference inductance of X pole is larger than others.



(d) When reference inductance of Y pole is larger than others.

그림 4. 기준 인덕턴스 차이에 따른 오차.
Fig. 4. Phase error according to the reference inductance differences.

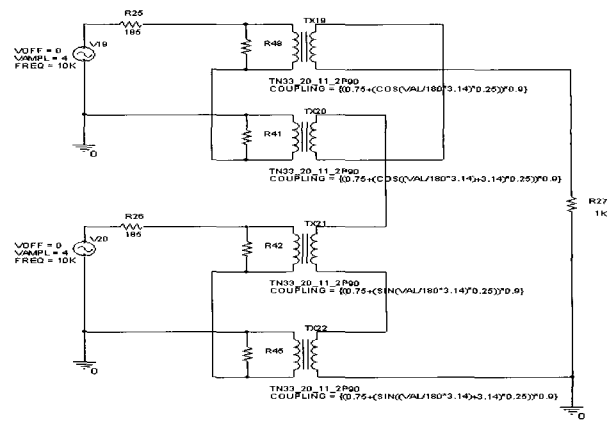
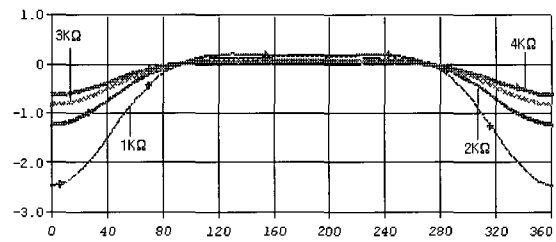
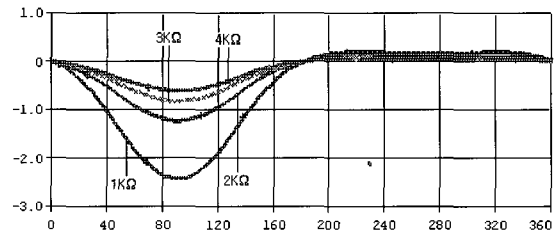


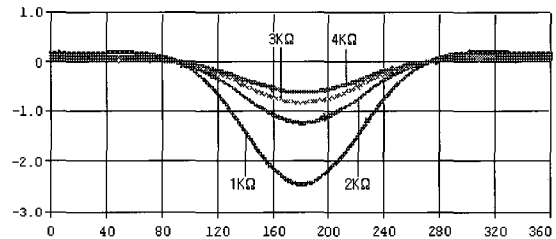
그림 5. 병렬 보상 저항이 연결된 회로도.
Fig. 5. Circuit diagram with parallel compensation resistance.



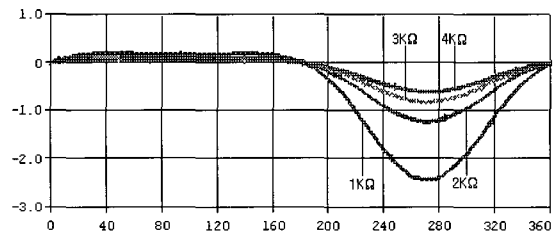
(a) Parallel resistance connected with X pole.



(b) Parallel resistance connected with Y pole.



(c) Parallel resistance connected with X pole.



(d) Parallel resistance connected with Y pole.

그림 6. 각극에 병렬저항 연결 시 오차보상 곡선.
Fig. 6. Compensation curves according to parallel resistance (1KΩ, 2KΩ, 3KΩ, 4KΩ).

해 위상 오차가 생기게 된다. 그림 2(b)를 예로 들어 보면 $\theta=45^\circ$ 각도에서 X극과 Y극의 상호 인덕턴스가 같아야 하지만 X극의 인덕턴스가 Y극의 인덕턴스보다 크므로 사인파가 코사인파보다 크기가 크게 되고 출력파형은 45° 일 때 보다 적은 위상차를 보이게 된다.

그럼 이상적인 경우를 비교 예제로 만들어 놓고 (2)의 공식과 같이 한 극의 인덕턴스 값을 인위적으로 다른 극 보다 크게 하고 둘의 데이터를 비교해볼 때 나타난 오차 발생을 모의실험을 통해 보여주도록 하겠다.

이상적인 경우의 RVDT 회로는 그림 3과 같다. 두 개의 전원부에서는 각각 사인파와 코사인파가 인가되고 각각의 변압기의 커플링 값을 변수로 지정하여 그림 1의 코어가 한 바퀴 회전하는 데이터를 만들어 놓았다. 오차 분석을 위한 비교 데이터로는 각 극의 인덕턴스 변화를 나타내기 위하여 변압기의 커플링 값의 피크치에 차이를 주었다. 이 두 개의 데이터를 비교하여 위상 오차를 파악한 데이터가 그림 4이다.

그림 4는 기준 인덕턴스의 차이에 따라 코어가 0° 에서 360° 까지 회전 하면서 5° 단위로 발생하는 오차를 PSPICE를 이용해 모의실험을 한 결과이다. 각각의 오차의 모양을 보면 각 극에 대응하는 곳에서 $\pm 70^\circ$ 정도 에서 위상 오차가 가장 크다는 것을 알 수 있다.

이러한 오차에 대한 보상으로는 기준 인덕턴스 값을 같게 만들어 주어야 하지만 자기적 트랜스듀서의 특성상 센서의 내부가 외부와 단절되어 있는 상황에서 내부적으로는 조정하기 힘들다. 그러므로 외부에서 보상이 가능한 변수로 각 극의 외부에서 인가하는 전류의 크기에 차등을 주는 방법이 있다. 그러나 그림 3의 직렬로 연결된 저항을 바꾸는 것은 상호 연결되어 있는 다른 쪽 극에 까지 영향을 미치게 되어 기준 인덕턴스의 오차 보상에는 적당하지 않다. 그러므로 그림 5와 같이 각각의 극에 병렬로 저항을 연결하여 각각의 극에 여가 되는 전류를 차등적으로 만들어 주어야만 한다.

그림 5와 같이 병렬저항을 연결하였을 경우의 오차 보상 효과를 파악하기 위해서는 각각의 병렬 저항이 개별적으로 연결되었을 경우에 회로에 끼치는 영향을 파악해야만 한다. 그러므로 이상적인 데이터와 각 극에 병렬 저항이 연결된 데이터를 비교하여 각각의 병렬 저항이 회로에 끼치는 영향을 파악하도록 한 것이 그림 6이다.

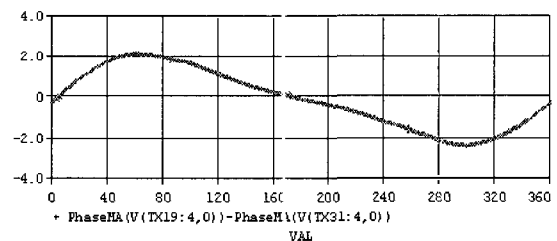
그림 6은 각 극에 병렬로 저항을 연결하였을 경우의 모의실험 값으로 그림 6(a)의 데이터를 보면 X극에만 병렬로 $1K\Omega$, $2K\Omega$, $3K\Omega$, $4K\Omega$ 를 차례로 연결한 출력 값을 이상적인 출력 값과 비교한 데이터이다. X극에 병렬로 연결된 저항은 X극의 코일에 여가 되는 전류를 적게 하고 다른 3개의 극에 여가 되는 전류는 약간 커지게 된다.

그림 6에서 저항 값의 차이에 따른 보상 값을 비교하면 병렬 저항 값이 작을수록 저항이 연결된 극의 코일에 흐르는 전류는 적게 흐르게 되고 보상 값은 커지게 된다. 즉 저항 값이 가장 작을 경우 오차 보상 값이 가장 커지게 되고 저항 값이 커질수록 보상 값은 줄어들게 된다. 또한 극에 병렬로 연결된 저항은 극의 코일에 여가 되는 전류를 약화

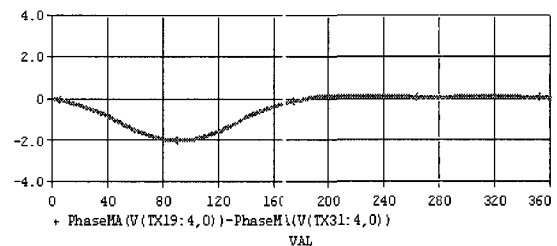
시킬 수만 있으므로 negative 쪽으로만 오차 보상이 가능하다. 이를 앞의 그림 4의 기준 인덕턴스의 차이에 따른 오차에 적용하여 오차에 대한 보상을 해보겠다.

그림 4(b)의 그림을 보면 오차의 피크 값이 $+2^\circ$ 와 -2.2° 로 전체적인 오차 peak to peak는 4.2° 정도 발생한다. 이 경우 $+2^\circ$ 가 발생하는 부분은 2° 만큼 줄이고 -2.2° 가 발생하는 부분은 2.2° 만큼 키워야만 한다. 그러나 앞에서 병렬 저항 보상으로는 negative로만 보상이 가능하므로 $+2^\circ$ 가 되는 부분의 오차를 보상하기 위해서는 그림 6(b)와 같이 Y극에 병렬저항을 연결하여 오차보상을 해야 한다. 여기서 보상저항의 오차 보상 값은 2° 정도로 충분해 보이지만 보상저항의 오차 피크각도와 기준 인덕턴스의 차이에 따른 보상의 피크 값의 위상이 20° 정도 차이가 있으므로 실제로 줄어드는 오차는 그리 크지 않다.

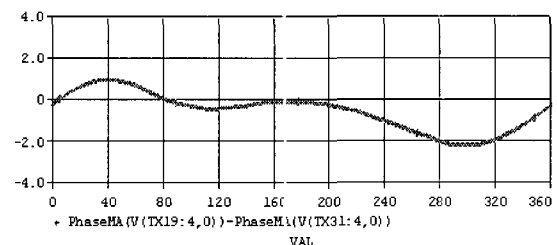
그림 7은 그림 4(b)의 오차 파형을 Y극에 2° 보상되는 보상저항을 연결 하여 보상 하였을 경우의 오차 보상 파형이다. 그림 7(a)를 보면 오차 peak to peak가 4.2° 임에 비해 그림 7(c)의 오차 보상 파형의 오차 peak to peak는 3.2° 로 1° 보상이 된다. 이 그림에서 Y극에 연결하는 병렬저항의 한계치는 보상 피크 값이 4° 정도이고 오차 피크각도와 기준 인덕턴스의 차이에 따른 보상의 피크 값의 위상이 20° 정도의 위상차이가 있으므로 Y극에 연결하는 병렬저항만으로는



(a) The error waveform of fig. 4(a)



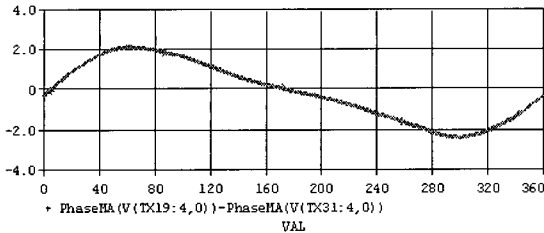
(b) Only 2° peak compensation curve of fig. 6(b)



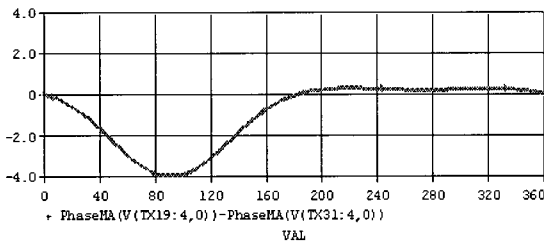
(c) Compensation result of fig. 7(a) using curve fig. 7(b)

그림 7. 피크치가 2° 인 병렬저항을 이용한 오차 보상 과정.
Fig. 7. Error compensation procedure which uses the parallel resistance where peak is 2 degrees.

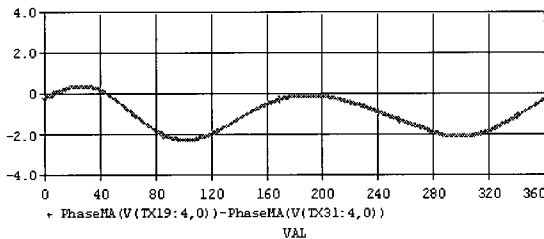
positive 오차를 줄이는데 한계가 있다. 그러므로 오차를 더 줄이기 위해서는 기준 인덕턴스 오차 파형의 positive 오차 파형에 약간의 영향을 주는 X극에 병렬저항을 연결하여 오차를 줄여야만 한다. 이상적으로 오차 보상이 되었을 경우의 파형의 모양은 오차 파형의 positive 극과 negative 극이 두 개씩 존재하고 각 극의 피크 값이 같아야만 한다.



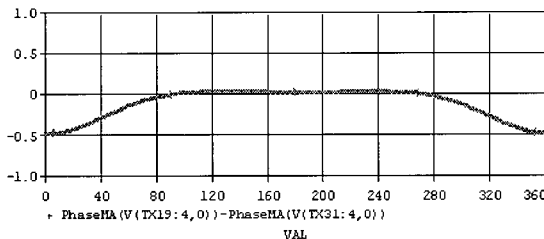
(a) The error waveform of fig. 4(a)



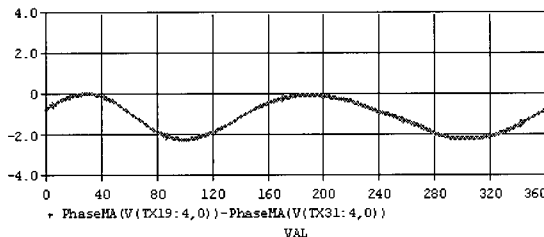
(b) 4° peak compensation curve of fig. 6(b)



(c) Compensation result of fig. 8(a) using curve fig. 8(b)



(d) 0.5° peak compensation curve of fig. 6(a)



(e) Final compensation result of fig. 8(c) using curve fig. 8(d)

그림 8. 기준 인덕턴스 차이에 따른 오차 보상 과정.
Fig. 8. Error compensation procedure for reference inductance difference.

그림 앞의 오차 파형에 대한 보상으로 Y극에 4°보상이 되는 병렬 저항을 연결하고 X극에도 병렬 저항을 연결하여 오차를 최대한 줄여 보면 그림 8과 같다.

그림 8(a)와 같은 기준 인덕턴스 오차파형에 대해 그림 8(b)와 같이 피크치가 4°인 1차 보상 병렬저항을 연결하였을 경우 그림 8(c)와 같은 오차 보상 파형이 된다. 이 보상 파형의 경우 오차 peak to peak가 약 2.5°정도로 약 1.7° 보상이 된다. 이 보상 파형에서 더욱 정밀한 보상 결과를 얻기 위해 그림 8(d)와 같은 X극에 2차 보상 병렬저항을 연결한 결과 그림 8(e)처럼 오차 파형의 positive 극과 negative 극이 두 개씩 존재하였으며 각 극의 피크 값이 같은 상태가 되었고 오차 peak to peak가 2.2°로 2°보상되었음을 확인하였다.

이 실험에서 오차 peak to peak가 중요한 이유는 0°에서 360°까지 전체적으로 동일한 오차는 트랜스듀서의 정밀도에 영향을 미치지 않기 때문이다. 그러므로 이상적 파형과 비교하여 오차가 크게 보이더라도 오차 peak to peak를 제외한 다른 오차 값은 정밀도에 영향을 주지 않는다.

IV. 여기 전류 진폭 차이에 따른 오차 분석 및 보상 방법

여기 전류 I 의 진폭 차이에 따른 오차의 경우 두 가지 원인이 있다. 첫 번째는 사인파와 코사인파의 진폭차이가 생기는 경우와 사인파와 코사인파의 전원부에 연결된 직렬 저항의 오차 범위로 인해 생기는 오차이다.

우선 입력파형들의 크기 차이가 발생할 경우의 오차에 대해 알아보면 1차 코일의 여기전류 $I \sin \omega t$ 와 $I \cos \omega t$ 가 $I_1 \sin \omega t$ 와 $I_2 \cos \omega t$ 로 차이가 ($I_2 > I_1$)날 때 (1)은 (4)와 같이 수렴된다.

$$\begin{aligned}
 E &= (e_1 - e_2) - (e_3 - e_4) \\
 &= \omega L_0 (1 + a \cos \theta) I_1 \sin \omega t - \omega L_0 (1 - a \cos \theta) I_1 \sin \omega t \\
 &\quad - \omega L_0 (1 + a \sin \theta) I_2 \cos \omega t + \omega L_0 (1 - a \sin \theta) I_2 \cos \omega t \\
 &= K \sin(\omega t - \theta) - K_2 \cos \omega t \sin \theta
 \end{aligned} \tag{4}$$

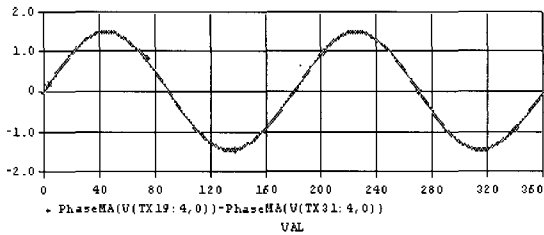
여기서 K_2 는 $2\omega L_0 (I_2 - I_1)a$ 이다. (4)의 두 번째 항 E_{e_2} 는 오차항으로 이를 정리하면 (5)와 같다.

$$E_{e_2} = K_2 \cos \omega t \sin \theta = \frac{K_2}{2} (\sin(\omega t + \theta) - \sin(\omega t - \theta)) \tag{5}$$

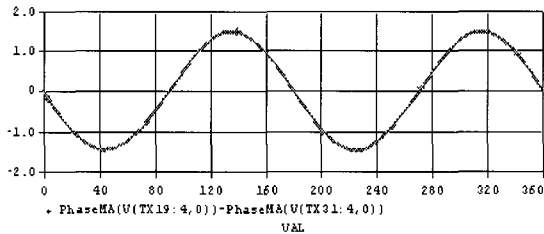
(5)에서 0°와 180°에서는 오차 파형이 상쇄 되어 없어지고 90°와 270°에서는 오차 파형이 피크에 이르지만 $K \sin(\omega t - \theta)$ 와 위상이 같으므로 위상 오차는 발생하지 않는다. 그러므로 위상 오차가 피크에 이르는 부분은 45°, 135°, 225°, 315°로서 코어가 0°에서 360°까지 도는 동안 위상 오차는 두 개의 주기가 생기게 된다.

그림 3의 코사인파의 진폭을 사인파의 진폭보다 작게 하여 앞의 오차 검출과 같은 방법으로 모의실험을 한 결과가 그림 9로서 이 그림에서 오차의 피크들은 약 45°정도에서 생기는 것을 볼 수 있다. 이러한 오차에 대해서는 병렬저항으로 오차 보상을 할 수 없다. 그 이유는 병렬저항은 각 극을 기준으로 하여 약 ±90° 까지 보상이 되는데 +45°에서

는 오차가 보상되더라도 -45° 에서는 오차가 커지게 되기 때문이다. 이러한 오차 보상을 하기 위해서는 그림 3의 직렬 저항을 변화시켜 보상해야만 한다. 여기서 직렬 저항을 변화시키는 것은 앞의 여기 전류 차이의 원인 중 직렬 저항의 오차 범위가 생기는 것과 같은 원리로 오차의 양상이 앞의 진폭 차이에 의한 오차와 비슷함을 알 수 있다. 즉 여기 전류의 차이에 따른 오차의 경우 직렬 저항을 보상하여 여기 전류 오차를 같게 보상 해주어야 하는 것이다.



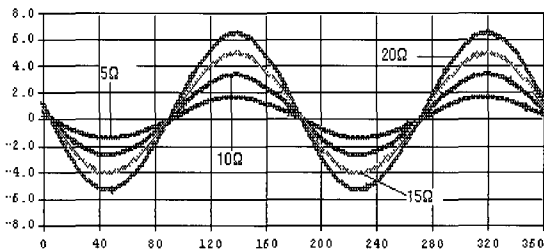
(a) Phase error plot when $I_1 > I_2$



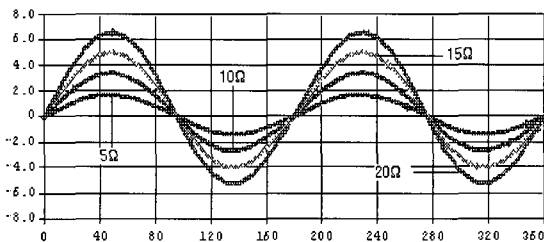
(b) Phase error plot when $I_1 < I_2$

그림 9. I_1 과 I_2 차이에 의한 위상 오차.

Fig. 9. Phase error according to the difference between I_1 and I_2 .



(a) Compensation curves when series resistance is connected to X axis



(b) Compensation curves when series resistance is connected to Y axis

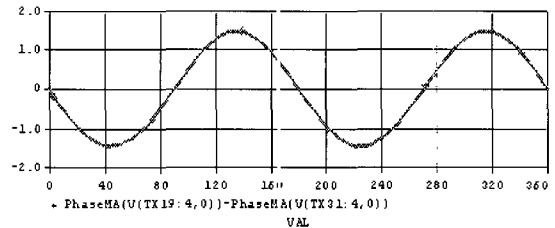
그림 10. 직렬저항 (5Ω , 10Ω , 15Ω , 20Ω)에 따른 보상 곡선.

Fig. 10. Compensation curves according to series resistance (5Ω , 10Ω , 15Ω , 20Ω).

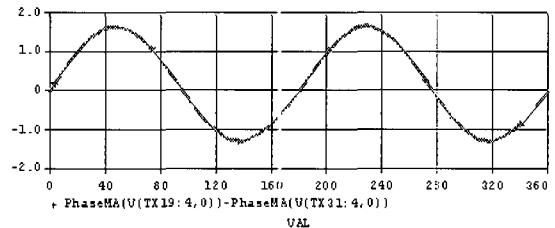
직렬 저항을 변화시켰을 경우의 작용에 대해 PSPICE로 모의실험을 해보면 그림 10과 같다. 보상저항의 크기가 커질수록 보상 값이 커진다. 그림 9(b)를 보면 오차의 극이 약 $\pm 1.5^\circ$ 가 된다. 이를 보상하기 위하여 $\pm 1.5^\circ$ 보상이 가능한 직렬 보상저항을 달 경우 이상적으로는 대부분의 오차보상이 가능하다. 이 보상곡선을 이용한 오차 보상 과정이 그림 11로서 이 그림의 결과 파형을 보면 오차 peak to peak가 3° 일 경우 0.4° 로 2.6° 가 보상되었음을 볼 수 있다.

앞의 데이터에서 직렬 보상 저항을 연결하였을 경우에 전체적으로 위상의 오차가 생겨 완벽한 보상이 되지 않는다. 그 이유는 상호 인덕턴스 값이 모두 같다고 볼 때 사인파와 코사인파에 각각 연결된 직렬 저항 값의 차이는 각 극의 인덕턴스에 여가 되는 전류의 위상에 차이를 주기 때문이다. 결국 사인파와 코사인파간의 위상차가 정확히 90° 가 되지 않고 약간 틀어지기에 완벽한 보상이 되지 않는 것이다.

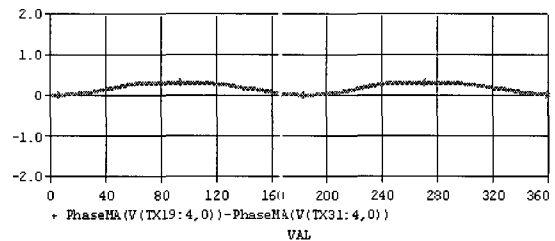
실제로 여기전류의 진폭 차이에 의한 오차 중 입력 전원부의 출력 차이로 오차가 심기는 경우는 거의 없다. 앞단 출력부의 증폭기 부분에서 둘의 출력을 같게 보상하기 때문이다. 오히려 출력부에 연결된 실제 직렬 저항에서 오차가 발생하게 된다. 보통 제원으로 나오는 직렬저항의 경우 저항 오차범위가 $\pm 10\%$ 가 되는데 그 정도의 오차로도 여기



(a) Phase error plot of fig. 9(b)



(b) Only $\pm 1.5^\circ$ peak compensation curve of fig. 10(b)



(c) Final compensation result of fig. 11(a) using curve fig. 11(b)

그림 11. 여기전류 진폭 차이에 의한 오차 보상 과정.

Fig. 11. Compensation procedure for difference between excitation current amplitude.

전류의 오차가 발생하게 되고 사인파와 코사인파의 위상차가 90°를 벗어나게 되는 것이다. 이에 대한 해결책으로는 직렬로 연결되는 저항은 가변저항이나 저항의 오차가 작은 저항을 사용하여야만 한다.

V. 실제 변위 오차의 측정 및 보상 실험

앞의 모의실험 데이터는 오차가 기준 인덱스 차이나 여기전류에 의한 차이 중에 개별 오차에 관해서만 상정하였다. 그러나 실제로는 여러 오차들이 복합되어 출력에서 오차가 발생하게 된다. 그러나 대부분의 오차가 기준 인덱스 차이에 따른 오차로서 여기 전류에 의한 오차의 경우 기준 인덱스 차이에 따른 오차와 비교해서 범위가 작고 직렬저항의 저항 오차 범위를 ±1%로 바꾼 이후 그에 따른 오차를 감지하기 힘들다. 그러므로 실제 오차의 데이터 보상은 기준 인덱스 차이에 따른 오차의 보상이 추가되어 어느 축에 병렬 저항을 연결하느냐가 중요한 관건이 되는 것이다.

그림 12는 실제 실험에 쓰인 실험장치 이다. RVDT와 ENCODER가 같은 축에 연결되어 있고 축은 모터와 기어로 연결되어 컴퓨터를 이용하면 360°회전 할 수 있도록 하였다. 또한 RVDT의 회로에서 병렬 저항을 연결할 수 있도록 각 극의 1차 코일부분의 양쪽에 선을 연결하여 외부에서 병렬 저항을 연결할 수 있도록 하였고 RVDT의 위상 데이터는 DAQ보드를 통해 컴퓨터에 연결되어 ENCODER의 데이터와 비교할 수 있도록 하였다.

실험은 센서와 ENCODER가 동시에 360°를 돌면서 현재 각도의 데이터를 DAQ 보드를 통해 컴퓨터로 전송이 되며 전송된 데이터는 visual basic 프로그램을 이용해서 센서 값과 ENCODER 값을 비교하여 회전 오차를 측정한다. 이와 같이 하면 앞의 모의실험과 비슷한 오차 데이터를 얻을 수 있는데 차이점은 앞의 모의실험은 편심이 X극에 가장 치우친 경우를 0°로 가정하고 모의실험을 하였지만 실제 데이터는 시작점이 어느 부분인지 파악 할수 없다. 그러므로 병렬 저항을 이용 오차 보상을 하기 위해서는 각 극의 위치를 우선적으로 파악해야 한다. 각 극의 위치를 파악하는 방법으로는 초기의 오차파형의 X극에 병렬저항을 연결하여 데이터를 얻고 초기의 오차 파형과 비교하여 위상이 negative로 변화가 생긴 부분을 기준으로 하여 각 극의 범위를 파악해야만 한다.

그림 13은 실제 오차에 대한 보상 과정을 보여준다. 그림 13(a)는 실제 센서의 오차 파형이다. 이는 여러 오차들이 복합된 파형으로 오차 peak to peak는 2.5°이다. 이 센서의 오차 파형은 ENCODER와 센서가 동시에 360°돌면서 각각의 범위에서 생기는 오차로 센서의 각 극이 어느 위치인지를 파악할 수 없다. 그러므로 센서의 극을 파악하기 위해 X극에 병렬로 저항을 연결한 결과 그림 13(b)를 구할 수 있고 그림 13(a)와 비교하여 negative로 위상 변화가 발생한 부분이 초기 오차 파형의 negative peak 부분인 것으로 보아 negative peak 부분이 X극임을 알 수 있다. 앞의 모의실험 과정을 기초로 해서 그림 13(a)의 보상을 해보면 X극에 2.5° 보상되는 병렬저항을 연결해야 한다. 실제로 X극에 병렬저

항을 연결한 결과가 그림 13(c)이며 오차 peak to peak는 0.6°로 오차가 1°내에 들어가는 안정적인 데이터임을 확인하였다.

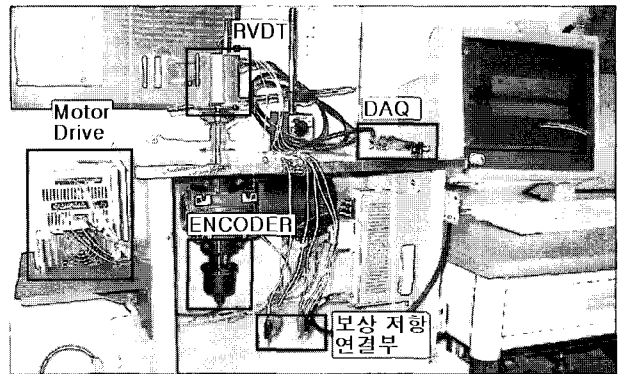
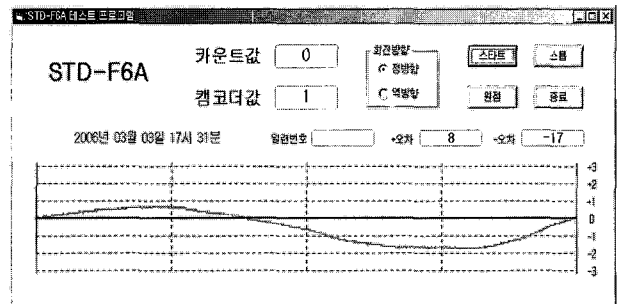
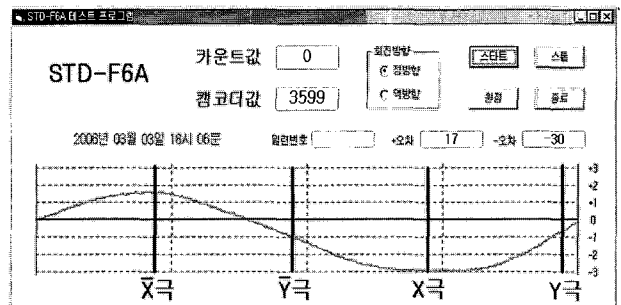


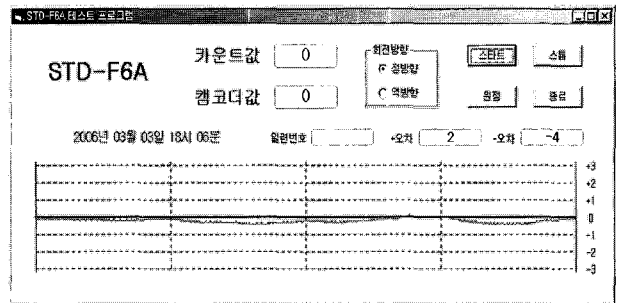
그림 12. 위상 오차 보상을 위한 실험장치.
Fig. 12. Experimental setup for phase error compensation.



(a) Measured phase error plot.



(b) Error plot when parallel resistance is connected to pole X.



(c) Final compensation result when parallel resistance is connected to pole X.

그림 13. 위상 오차에 대한 보상 실험.

Fig. 13. Experimental compensation results of phase error.

앞의 실험에서 2.5°보상되는 병렬 저항의 경우 직관적으로는 알기 힘들다. 병렬 저항을 직관적으로 알기 위해서는 우선적으로 실험에 쓰이는 RVDT의 기준 인덕턴스와 각 극의 인덕턴스 변화 계수 그리고 여기 전류를 파악한 상태에서 공식으로 접근하거나 앞의 그림 6의 모의실험처럼 여러 번의 실험을 통해 병렬 저항의 값에 따른 오차 보상 값을 파악하고 선택 하는 두 가지 방법이 있는데 실제 RVDT 제품에 쓸 수 있는 저항이 정해져 있고 초기 오차 peak to peak가 6°보다 커질 경우 보상하더라도 제품으로서 쓰기 힘들기에 각 제품 모델마다 실제 오차 보상에 쓰일 수 있는 저항은 정해져 있는 상태이다. 그러므로 오차 보상에 쓰일 수 있는 저항의 오차 보상 값을 실험을 통해 알아내었다.

VI. 결론

오늘날 RVDT는 프레스 등 여러 산업용 설비에서 실제로 쓰이고 있는 트랜스듀서로서 고정밀도와 높은 안정성을 필요로 한다. 신뢰성 있는 트랜스듀서를 만들기 위해서는 오차보상이 중요하다. 본 논문에서는 RVDT의 오차 원인과 그 원인으로 인해 생길 수 있는 오차를 모의실험을 통해 파악하고 그 오차 원인에 대한 보상 방법에 중점을 두었다.

오차 보상을 위해 2장에서 RVDT의 기본적인 동작원리를 알아보고 위상 오차에 영향을 줄 수 있는 요인으로 각 극의 기준 인덕턴스의 차이와 여기 전류의 진폭 차이가 위상 오차에 영향을 준다는 것을 파악하였다.

3장에서는 기준 인덕턴스의 차이에 따른 위상 오차를 분석하고 오차 분포를 모의실험을 통해 확인하였으며 기준 인덕턴스 차이에 의한 위상 오차의 보상 방법을 제안하여 오차 보상과정과 보상결과를 모의실험을 통해 확인한 결과 오차 peak to peak 가 4.2°에서 2.2°로 2°의 오차를 보상하였다. 4장에서는 여기 전류의 진폭 차이에 의한 위상 오차에 관해 분석하고 모의실험을 통해 보상 방법을 알아보고 오차 보상을 시도한 결과 오차 peak to peak는 약 3°에서 0.4°로 2.6° 보상되었음을 확인하였다.

5장에서는 실제 실험을 통하여 위상 오차를 확인하고 모의실험 결과를 토대로 보상을 시도한 결과 초기 오차 peak

to peak가 2.5°에서 0.6°로 1.9°도 보상이 되어 위상 오차가 1° 내에 들어오는 안정된 데이터를 얻었다.

결론적으로 RVDT에 대하여 제시된 위상 오차 보상 방법을 적용한 결과 높은 보상 효과를 얻었고 본 연구가 자기적 절대 변위 트랜스듀서인 RVDT에 국한되어 작성되었으나 향후 LVDT의 위상 오차의 분석에도 사용될 수 있다고 생각된다.

참고문헌

- [1] 박영태, 권성원, 강전홍, "변위측정용 LVDT에 대한 연구" 센서학회지 제5권 제3호, 1996.
- [2] S. B. Niku 지, 김정하, 염영일 역, 로봇공학, 사이텍 미디어, pp. 247-278, 2002.
- [3] F. Yassa and S. Garvericks, "Multichannel digital demodulator for LVDT/RVDT position sensors," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 25, pp. 441-445, Apr. 1990.
- [4] D. Crescini, A. Flammini, D. Marioli, and A. Taroni "Application of an FFT-based algorithm to signal processing of LVDT position sensors" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, pp. 1119-1123, 1998.
- [5] R. Pallas-Areny and J. G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning*. Wiley, New York, 1991.
- [6] *A Discussion of Encoder Technology's Converter and Impedance Detector Technology*, Encoder Technology Corp, 2000.
- [7] *TMS320F240 DSP Solution for Obtaining Resolver Angular Position and Speed*, Texas Instruments Corp, 2000.
- [8] Control Sciences Inc. Application Data, *Resolvers as Velocity and Position Encoding Devices*, <http://www.controlsociences.com/>
- [9] *Encoder vs. Resolver-Based Servo Systems application note*, ORMEC Corp.



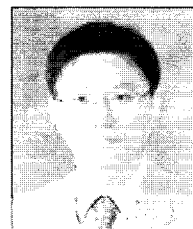
신 동 운

2005년 수원대학교 전자공학과 학사. 2005년~현재 동 대학원 석사과정. 관심분야는 영상처리, OCT, 제어 계측, 임베디드 시스템.



이 창 수

1985년 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1987년 동 대학원 석사. 1997년 박사. 현재 수원대학교 전자공학과 부교수. 주요 연구분야는 영상처리, OCT, 통신시스템, 웨이블릿 응용, 검사 자동화.



양 윤 기

1989년 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1991년 동 대학원 석사. 1996년 박사. 현재 수원대학교 정보통신공학과 부교수. 주요 연구분야는 통신시스템, 컴퓨터 응용기술.