

디지털 아날로그 혼합형 고정도 엔코더 개발

洪正杓*, 朴晟濬*, 權純在***

A novel encoder of digital and analog hybrid type for servo control with high-precision resolution

J.P Hong, S.J. Park, and S.J. Kwon

요 약

반도체 장비나 산업용 정밀 머신 툴 등에서 고정밀 위치제어는 매우 중요하다. 고정밀 위치제어장치와 같은 미소 단위로 이동하는 물체의 이동 거리나 위치를 측정하는 다양한 기기나 반도체 제조장치 등에서 고정밀도로 위치제어를 행하는 기기들의 위치 변위 검출에 대한 정확도는 제어기의 성능을 좌우하는 중요한 요소 중의 하나가 된다. 본 논문에서는 기존의 저가형 광학식 엔코더의 전기적 회로 부분의 변형으로 디지털 신호 및 회절격자의 회절량에 대한 아날로그 신호를 기초로 하여 마이크로프로세스의 협력으로 고정도의 위치를 얻을 수 있는 새로운 방식의 위치 검출기법을 제안하였다. 또한 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

Position controls are very important in semiconductor manufacturing devices, machine tools precision measuring instruments, etc. To measure the distance of movement of moving objects in minute units and the accuracy of measurement for the moving distance in these devices affect the performance of the whole devices. Therefore, in those precision instruments, a sensing device that can measure the distance of movement with high-precision resolution is required. In this paper, a novel encoder of digital and analog hybrid type is proposed. It is shown that from this experiment a high-resolution angle measurement device can be designed by a low cost incremental encoder.

Key Words : High-precision resolution, Novel encoder, Digital and analog hybrid type

1. 서 론

메카트로닉스 및 정밀공작기계의 발전으로 인하여 고정밀 위치제어에 대한 요구가 급증하고 있다. 특히 산업용 정밀 머신 툴, 산업 로봇, 고정밀 위치제어장치와 같은 미소 단위로 이동하는 물체의 이동 거리나 위

치를 측정하는 다양한 기기나 반도체 제조장치 등에서 고정밀도로 위치제어를 행하는 기기들의 위치 변위 검출에 대한 정확도는 제어기의 성능을 좌우하는 중요한 요소 중의 하나가 된다^{[1] [6]}. 그러므로 이러한 기기에서 위치를 고정밀도로 측정할 수 있는 센싱 디바이스의 사용은 필수적이며, 여기서 높은 정확도를 요구하는 변위량 검출을 위해서는 자기식 엔코더(magnetic encoder)보다는 광학식 엔코더(optical encoder)의 사용이 일반적이다. 일반적으로, 범용 자기식 엔코더는 주위환경에 영향을 덜 받고 수명이 긴 장점이 있으나 높은 분해능을 얻는데는 한계가 있으며 매우 고가이므

*정회원, 전남대 전기공학과 조교수
 **정회원, 부경대 기계설계학과 박사과정
 ***정회원, 부경대 기계공학부 교수
 E-mail : sjpark1@chonnam.ac.kr
 접수일자 : 2003. 6. 12
 1차심사 : 2003. 8. 9
 심사완료일 : 2003. 9. 23

로, 점점 고 정밀화 되고있는 센서에 적용하는 데에는 제약이 있다. 이에 반하여 광학식 엔코더는 먼지나 외부 환경에 영향을 받지않고, 고분해능을 달성함에 있어 많은 장점이 있는 동시에 경제적인 면에서 자기식 엔코더에 비해 저렴한 장점으로 인하여 디지털화된 산업용 기계에 폭넓게 사용되고 있다. 일반적으로 로터리(rotary) 광학식 엔코더는 동일 원주 상에 수많은 슬릿을 두고, 외부에 발광부에서 발생하는 빛을 90°의 전기적 위상차가를 갖는 2개의 수광부를 두고 있다. 수광부 신호는 비교기를 통하여 디지털화된 신호로 바뀌며, 카운터를 사용하여 위치를 측정한다. 이러한 기존의 광학식 엔코더는 최대한 회절격자 수의 4배수에 해당하는 위치정보를 취할 수 있다. 따라서 위치정보의 분해능을 높이기 위해서는 슬릿의 수를 크게 하여야 하나 기계공학기술의 제약에 의해 그 한계가 있다.

본 논문에서는 기존의 저가형 광학식 엔코더의 전기적 회로 부분의 변형으로 디지털 신호 및 회절격자의 회절량에 대한 아날로그 신호를 기초로 하여 마이크로 프로세스의 협력으로 고정도의 위치를 얻을 수 있는 새로운 방식의 위치 검출기법을 제안하였다. 또한 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 아날로그 디지털 혼합형 엔코더

2.1 기존의 광학식 엔코더

광학식 엔코더의 슬릿인 회절격자는 홈(groove)이나 구멍(aperture) 등이 주기적으로 배열되어 파의 위상이나 진폭에 주기적인 변화를 일으키게 하는 광학장치이다. 이 같은 회절격자는 투과형(transmitting type)과 반사형(reflecting type)으로 분류할 수 있고, 투과형 격자는 일반적으로 홀로 그래픽 기법(holographic method)을 이용하여 제작되며, 반사형은 회절격자를 광학적으로 편평한 유리 위에 코팅된 알루미늄 박막에 금을 그어 만든다. 광학식 엔코더는 투광용 광원, 수광소자, 슬릿이 있는 회전 디스크의 3가지로 구성되어 있으며, 회전 디스크를 투광용 광원과 수광소자의 중간에 놓아서 회전시키면 회전각에 비례한 펄스 출력을 얻을 수 있다.

그림 1은 광학식 엔코더의 구조를 나타내고 있다. 발광체로부터 투사된 광선은 회전 디스크의 슬릿과 고정 슬릿판의 슬릿을 통과하여 수광소자에서 검출된다. 이때 발광소자에서 발생하는 빛이 슬릿에 통과하면서 회절현상의 영향을 최소화하기 위해 그림 1에서와 같이 두 개의 슬릿을 사용하여 하나는 고정된 외함에 다

른 하나는 회전판에 부착하여 사용한다.

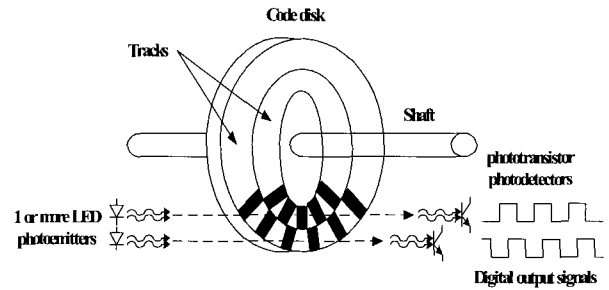


그림 1 광학 엔코더의 구조
Fig. 1 The structure of optical encoder

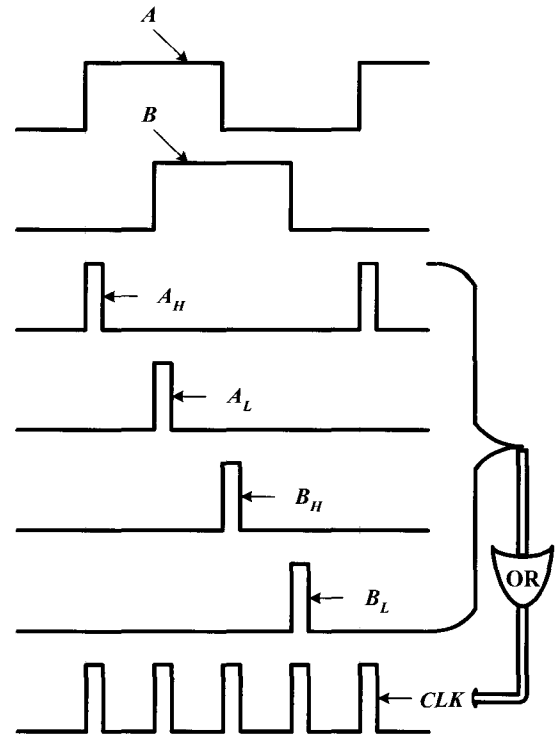


그림 2 엔코더의 상 신호와 4체배
Fig. 2 Phase signal of encoder and 4 divisions

두 개의 수광소자에 의해 검출된 신호를 일반적으로 A, B 상으로 정의되며, A, B 상 신호로부터 엔코더의 분해능을 최대한 높이기 위해 4체배 회로를 사용하여 위치검출용 카운터에 입력하게된다. 엔코더의 A, B 상 신호와 4체배회로의 원리는 그림 2에 나타나 있다.

그림 2에서 A_H, A_L, B_H, B_L 는 A, B 상 신호의 상승 및 하강 에지신호를 나타내고, CLK 는 각 에지신호를 논리합의 신호를 나타내고 있다. CLK 는 위치를 나타내기 위한 카운터의 클럭으로 사용되며, A 상의 전기

각 90°간격으로 *CLK*의 한 주기가 나타나므로 4체배 회로가 된다. 따라서 엔코더의 회전판이 1회전 당 슬릿수의 4배의 카운터 값을 취할 수 있다.

일반적으로 엔코더로부터 속도정보를 얻기 위해서는 *MT*-기법을 사용한다. *MT*-기법은 엔코더의 위치신호로부터 속도를 검출하기 위한 기법으로 그 정도 및 시정수는 엔코더의 분해능과 Window창의 폭에 의해 결정된다. 즉, 속도의 정도 및 시정수는 엔코더의 분해능에 비례하며, Window창의 폭을 크게 하면 속도의 정도는 좋아지나 시정수가 커지게 되는 단점을 안고 있다.

2.2 회절격자의 위치에 따른 수광 특성

그림 3은 2층 형태의 슬릿 구조와 슬릿의 전기적 위치에 따라 발광소자의 빛이 수광소자로 통과하는 단면적을 나타내고 있으며, 그림 4는 그 때의 수광소자의 출력전압을 나타내고 있다.

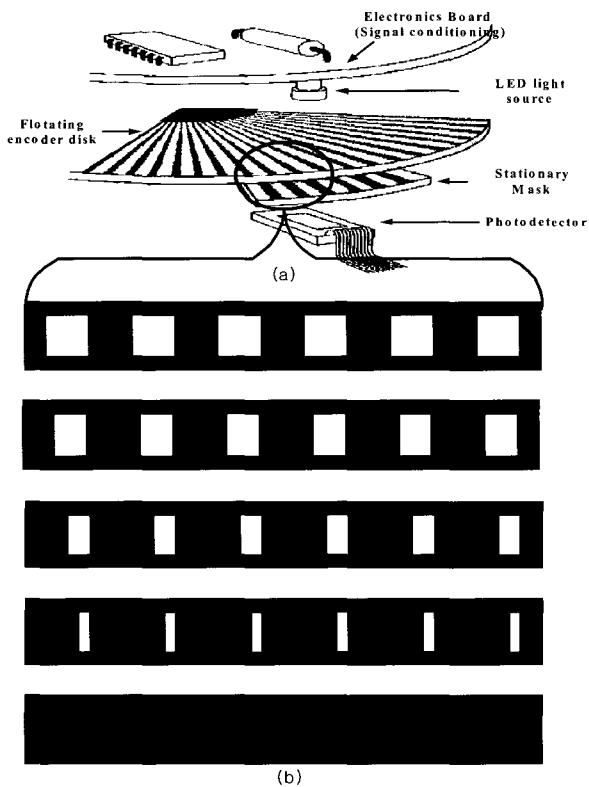


그림 3 슬릿의 위치에 따른 형상

- (a) 엔코더 슬릿의 구조
- (b) 상차각에 따른 슬릿의 형상

Fig. 3 Shape according to the position of slit

- (a) Structure of the encoder slit
- (b) Shape according to the phase angle of slit

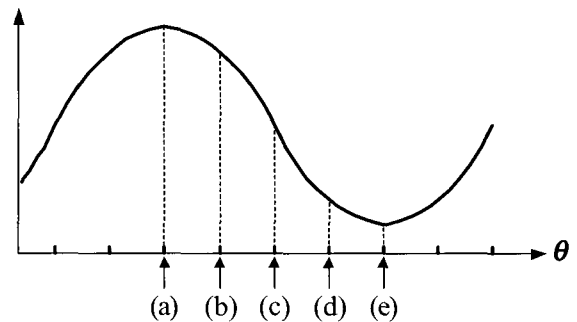


그림 4 슬릿의 전기적 위치에 따른 수광부 파형

Fig. 4 Receiver waveform according to the electrical position of slit

그림 3(b)의 제일 상단 그림은 상하 슬릿의 상차각이 0°일 때이며 이때 투과하는 빛의 양이 제일 많으며 그림 4의 출력전압이 가장 큰 *a*점이 된다. 슬릿의 위상차가 180. 내에서 커짐에 따라 투과하는 빛의 양은 감소하게 되고, 그림 3(b)의 제일 하단 그림은 슬릿의 위상차가 180. 에서는 투과하는 빛의 양은 영이 되며, 그림 4의 출력전압이 가장 적은 *e*점이 된다. 수광소자의 출력주기는 슬릿의 한 주기와 동일하게 되고, 이 수광소자의 출력전압은 슬릿의 한 피치 안에서 회전체의 위치정보를 갖고 있다. 그러나 슬릿의 한 주기 내에 동일한 출력전압이 발생하는 위치가 두 개 존재하므로 하나의 출력전압으로 그 위치를 찾기는 어렵다. 따라서 슬릿 내의 위치를 찾기 위해서는 또 다른 출력전압이 필요하다.

2.3 제안된 아날로그 디지털 혼합형 엔코더

기존의 디지털 타입 엔코더는 두 수광소자의 출력을 비교한 디지털화 된 값을 사용한다. 그림 5는 회전체의 위치에 따른 엔코더의 *A*, *B*상과 4체배한 신호 및 수광소자의 출력 파형을 나타내고 있다. 일반적인 엔코더에서는 그림 5와 같이 회전체의 회전 방향 검출 및 분해능을 높이기 위해 전기각 90°의 위치 차를 갖는 두 개의 수광부를 갖고 있어 두 개의 수광부의 아날로그 신호를 이용하면 슬릿내의 위치를 구할 수 있다.

그림 5의 *A*, *B*상 신호는 기존 엔코더의 디지털 출력신호이다. 엔코더의 한 회전당 펄스 수를 *N*이라 하면 체배를 행하지 않은 엔코더의 분해능은 아래와 같이 슬릿 수에 반비례한다.

$$n = \frac{2\pi}{N} \quad [rad] \tag{1}$$

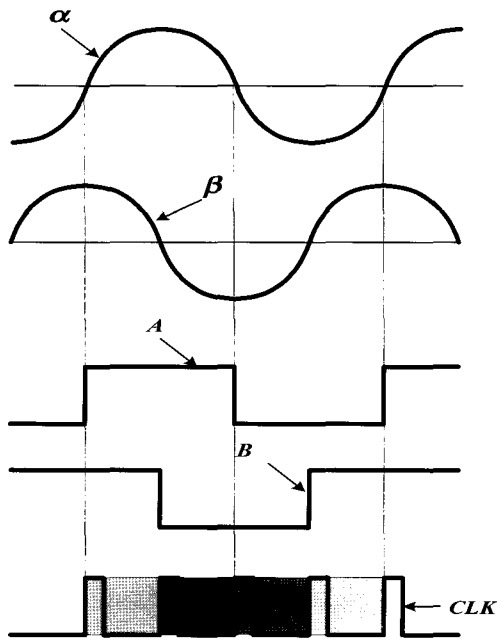


그림 5 위치에 따른 엔코더의 A상, B상, 4체배 한 신호 및 수광소자의 출력

Fig. 5 A phase, B phase, 4 division and receiver waveforms according to electrical position of slit

엔코더의 A상 신호를 카운팅 한 값을 P라하면 현재의 회전자 각도는 아래와 같다.

$$\theta_i = \frac{2\pi}{N} P \text{ [rad]} \quad (2)$$

기존의 디지털 출력신호인 A, B상을 만들기 전의 신호인 수광소자의 출력을 각각 α , β 라 하면 두 신호는 위상차 90. 를 갖는 2상 전압이 된다. 실제 수광소자의 출력은 직류 오프셋을 가지므로 외부회로를 사용하거나 프로세서를 사용하여 이를 제거하여야 된다. 이 2상 전압에서 슬릿 한 피치에 대한 위상각은 전동기의 정지 2상 좌표계에 사용한 기법을 이용하면 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\Delta\theta_E = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \quad (3)$$

식 (3)에 의해 슬릿내의 위상차 ($\Delta\theta_E$)를 취할 경우 atan의 값이 -90. 에서 수광소자의 출력을 각각 α , β 라 하면 두 신호는 위상차 90. 를 갖는 2상 전압이 된다. 이 2상 전압에서 슬릿의 한 피치내

의 위상차를 계산할 수 있다. 위치각을 식 (3)에 의해 계산할 경우 α 가 영(zero) 부근에서는 노이즈에 의한 위치각 오차가 크게 나타나게된다. 이를 보강하기 위해서 식 (4)와 같은 식을 사용한다.

$$\Delta\theta_E = \cos^{-1}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}\right) \quad (4)$$

식 (4)의 계산은 일반적으로 프로세서에 의해 계산되며, 그 분해능은 프로세서에 장착된 A/D 컨버터의 비트 수에 의해 결정된다. A/D 컨버터의 비트 수를 Q라 하면 기계적 위치 분해능은 약 식 (5)과 같이 결정된다.

$$r = \frac{2\pi}{N \cdot 2^Q} \quad (5)$$

식 (4)에서 구한 슬릿내의 위상차는 한 슬릿 간격에 대한 위상이므로 기계적 위치 변위는 다음 식으로 구한다.

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N} \Delta\theta_E \quad (6)$$

슬릿의 한 피치내의 위치각을 식 (6)로 구하면 엔코더의 A상 펄스신호를 카운팅한 값과 조합하면 기계적 위치각을 구할 수 있다. 실제 회전자의 정확한 위치각은 디지털 엔코더 신호에 의한 위치각 θ_i 와 슬릿 내의 위치각인 $\Delta\theta$ 의 조합에 의해 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_i + \Delta\theta \quad [CW] \\ \theta &= \theta_i + \theta_k - \Delta\theta \quad [CCW] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 θ_k 는 슬릿 한 피치의 기계각 이다.

따라서 디지털 신호와 아날로그 신호의 조합에 의한 엔코더의 분해능은 아날로그 신호에 의해 얻어진 슬릿내의 위치 변위에 의해 결정된다.

그림 6은 제안된 아날로그, 디지털 혼합형 엔코더의 검출 블럭도를 나타내고 있다. DSP(TMS320F241)의 QEP 단자를 통해 기존의 디지털 엔코더 신호를 받고, A/D단자를 통해 슬릿내의 위치 변위를 검출하기 위해 아날로그 신호를 받는다. 90°위상차를 갖는 두 아날로그 신호(a, b)는 온도나 먼지 등의 주위 환경변

화에 의해 윗셋 및 크기에 영향을 받는다. 그러나 주 위 환경변화의 시정수는 일반적으로 매우 크다. 따라서 윗셋의 영향은 로페스 필터(LFP)로 쉽게 제거할 수 있다. 또한 크기의 변화를 보상하기 위해서는 아래와 같은 정규화 과정을 갖는다.

$$\begin{aligned} a &= a - V_{set} \\ \beta &= K(b - V_{set}) \end{aligned} \quad (8)$$

단, $K = \frac{a_{max}}{b_{max}}$, V_{set} = DC 윗셋

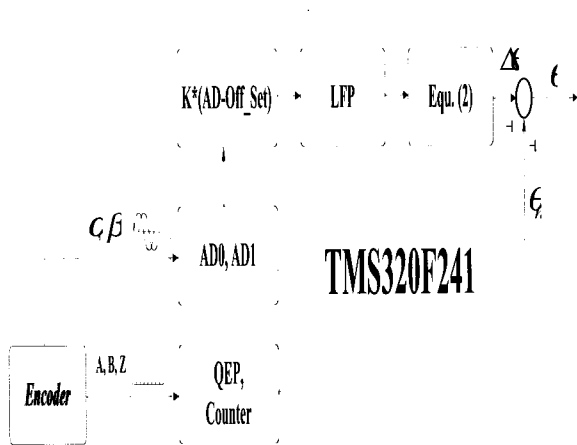


그림 6 검출 블록도
Fig. 6 Detection block

여기서 a_{max} 는 a 신호의 진폭을 나타내고, b_{max} 는 b 신호의 진폭을 나타낸다. 엔코더의 두 아날로그신호인 a, b 신호로부터 2상 아날로그 신호를 만들기 위해 DC 윗셋을 제거하고, 스케일 팩트 K 를 곱하여 대칭 2상 신호인 a, β 를 만든다. 또한 노이즈 성분을 제거하기 위해 로페스 필터(LFP)를 통과시키고, 식 (4)에 의해 슬릿사이의 전기적 위상각을 검출하고, 식 (6)에 의해 슬릿 사이의 위상변위를 계산한다. 슬릿사이의 위치각 변위($\Delta\theta$)과 디지털 엔코더의 회전자 위치각 θ 을 합하여 고정도의 회전자 위치각(θ)를 계산한다.

3. 실험결과

본 논문에서 제안한 아날로그 디지털 혼합형 엔코더의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 저가형 엔코더인 텍트로닉스사의 1024펄스형 엔코더 안에 아날로그 증폭기를 장착하였으며, DSP(TMS320F241)내의 10 Bit A/D를 사용하였으며, 노이즈의 영향을 제거하기

위해 상위 2 Bit를 버림으로써 기존의 엔코더에 비하여 256배인 524,288 펄스형 위치 검출기를 실현하였다.

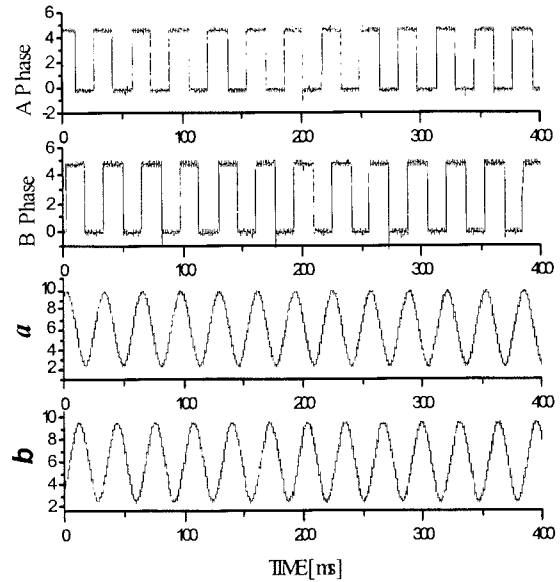


그림 7 엔코더의 A상, B상 및 수광소자 출력의 출력 파형
Fig. 7 A phase, B phase and receiver waveforms of the encoder

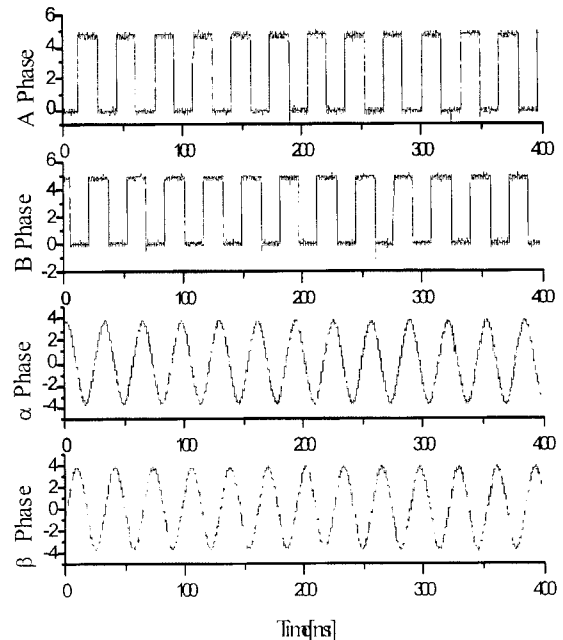


그림 8 엔코더의 A상, B상 및 α, β 파형
Fig. 8 A, B phase and α, β phase waveforms of the encoder

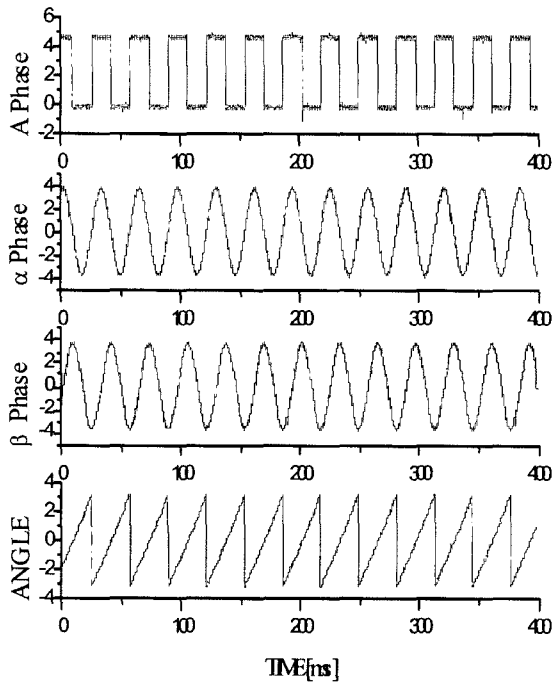


그림 9 엔코더의 A상, α , β 파형 및 피치내의 위상각
 Fig. 9 A phase, α , β and angle waveform of the encoder

그림 7은 엔코더의 특성을 보기 위한 파형이다. 엔코더의 A상, B상 및 수광소자의 출력 파형으로 수광소자의 출력파형(a, b)은 엔코더의 A상, B상과 동일한 주파수를 갖는 정현적 파형을 얻을 수 있었다. 수광소자의 출력파형 a, b는 90°의 위상차를 갖고 있으나 직류 성분을 포함하고 있으며 그 크기에도 다소 차이가 발생하고 있다.

그림 8은 그림 7의 직류성분과 크기의 차이가 있는 수광소자의 출력 파형으로부터 크기가 동일하고 90° 위상차를 갖는 2상 전압인 α , β 을 나타내고 있다. α 와 β 는 그림 7의 a와 b에서 직류전압을 제거하고 스케일 팩트 K를 곱한 결과 신호이다. 실험에서 알 수 있듯이 양호한 2상 전압파형을 얻을 수 있었다.

그림 9은 그림 8의 α 와 β 신호로부터 식 (4)을 이용한 위상각 신호를 나타내고 있다. 위상각 신호는 엔코더의 A상 신호주파수의 2배를 갖고 있으며 그 크기는 $-\pi$ 에서 $+\pi$ 로 α 와 β 신호의 부호를 고려하거나 엔코더의 A상, B상 신호를 참고하면 -2π 에서 $+2\pi$ 의 값을 얻을 수 있다.

그림 10은 정·역회전시 A상 및 α 와 β 상 그리고 기계적 각도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 속도 및 방향에 관계없이 양호한 위치 값을 얻을 수 있었다.

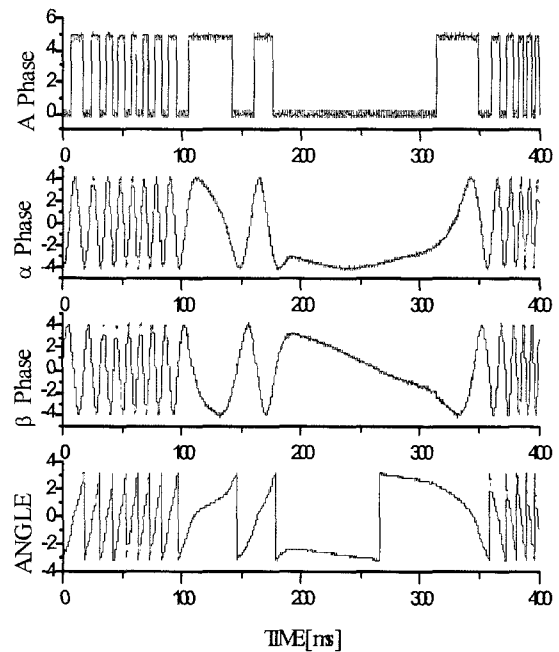


그림 10 엔코더의 A상, α , β 파형 및 피치내의 위상각
 Fig. 10 A phase, α , β and angle waveform of the encoder

4. 결 론

본 연구는 반도체 제조장치 등에 사용되는 고정밀도로 위치제어기기에서 높은 정확도를 요구하는 변위량 검출을 위해서 기존의 저가형 광학식 엔코더의 전기적 회로 부분의 변형으로 디지털 신호 및 회절격자의 회절량에 대한 아날로그 신호를 기초로 하여 고정도의 위치를 얻을 수 있는 새로운 방식의 위치 검출기법을 제안하였다. 제안된 방법에 의해 실험을 행한 결과 엔코더의 한 슬릿 내의 위치 변위를 얻을 수 있었다. 슬릿 내의 위치 변위 분해능은 노이즈를 무시한다면 A/D컨버터의 Bit수에 의해 결정된다. 본 실험에서는 DSP내의 10 Bit A/D를 사용하였으며 노이즈의 영향을 제거하기 위해 상위 2 Bit를 버림으로써 기존의 저가형 엔코더(1024)에 비하여 256배의 고정도를 갖는 위치 검출기를 실현하였다.

참 고 문 헌

- [1] 최철, 원태현, 박성준, 박한웅, 김철우 “좌표 변환과 미분 기법을 이용한 PMSM의 센서리스 제어” 전력 전자학회 논문지, Vol 8, No. 2, pp. 107~115, 2003.
- [2] 김경화, “엔코더와 레졸버” 전력전자학회지, Vol 8,

- No. 2, pp. 50~53, 2003.
- [3] 강유정, 안진우, 박성준, 김철우 "SRM의 고정도 여자 제어를 위한 엔코더의 운전특성" 2001년 전력전자학술대회 논문집, pp. 1~4, 2001.
 - [4] 박성준, 추영배, 박한용, 안진우, 권순재, 김철우 "저가형 엔코더를 이용한 SRM의 안정운전에 관한 연구" 1999년 전력전자학술대회 논문집, pp. 175~178, 1999.
 - [5] Katagiri, T., Monose, T., Mizumoto, H. "An integrated single-output signal encoder for both multi-turn absolute encoder use and incremental encoder use" Industry Applications Society Annual Meeting, 1994. Vol. 1, pp. 347~351, 1994.
 - [6] Bonvin, F., Perriard, Y., "BLDC motor control in multiple dq axes" Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000., pp. 500~505, 18-19 Sept. 2000.

이 논문은 2003년도 두뇌한국21사업에 의하여 일부 지원되었음.

저 자 소 개

홍정표(洪正杓)



1972년 9월 7일생. 1998년 부경대 공대 전기공학과 졸업(학사). 2001년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 ~현재 부경 대학교 기계설계학과 박사과정.

박성준(朴晟濬)



1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(박사) 1996.3~2000.2년 거제대학 전기과 조교수. 2000.

3~2002.8년 동명대학 전기과 조교수. 2003.9~현재 전남대 전기공학과 조교수.

권순재(權純在)



1951년생. 1982년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 부경대학교 기계공학부 (메카트로닉스 자동화정보전공)