

회절격자를 이용한 엔코더 설계

*홍정표, *권순재, **김종달
*부경대학교 기계설계학과, **동명대학 전기공학과

A Study on encoder design using diffraction grating

*Jeng-Pyo Hong, **Soon-Jae Kwond, **Jong-Dal Kim
*Pukyong national university, **Tongmyong college

Abstract - 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.

1. 서 론

메카트로닉스 및 정밀공작기계의 발전으로 특히 산업용 정밀 머신 툴, 산업 로봇, 고정밀 위치제어장치와 같은 미소 단위로 이동하는 물체의 이동 거리나 위치를 측정하며 고정밀도로 위치제어를 행하는 기기들의 위치 변위 검출에 대한 정확도는 제어기의 성능을 좌우하는 중요한 요소 중의 하나가 된다.

일반적으로 광학식 엔코더는 먼지나 외부환경에 영향을 받지만 고 분해능을 달성함에 있어 많은 장점이 있는 동시에 경제적인 면에서 자기식 엔코더에 비해 저렴한 장점으로 인하여 디지털화된 산업용기에 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. 이러한 기존의 광학식 엔코더는 최대한 회절격자 수의 4배수에 해당하는 위치정보를 취할 수 있어서 위치정보의 분해능을 높이기 위해서는 슬릿의 수를 많게 하여야 하나 기계공작기술의 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 PC BASE로 고정도의 위치를 얻을 수 있는 새로운 방식의 위치 검출기법을 제안하였다. 또한 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.^[1]

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. 광학식 엔코더는 투광용 광원, 수광소자, 슬릿이 있는 회전 디스크의 3가지로 구성되어 있으며 회전 디스크를 투광용 광원과 수광소자의 중간에 넣어서 회전시키면 회전각에 비례한 펄스 출력을 얻을 수 있다. 그림 2.1은 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 다른 하나는 회전판에 부착하여 사용한다.

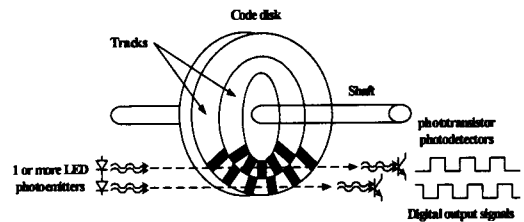


그림 1 광학 엔코더의 구조

두 개의 수광소자에 의해 검출된 신호를 일반적으로 A, B 상으로 정의되며, A, B 상 신호로부터 엔코더의 분해능을 최대한 높이기 위해 4배 배 회로를 사용하여 위치검출용 카운터에 입력하게 된다.

그러나 실제로는 A, B 두 펄스의 위상차가 정확히 90°가 되지 않고 어느 정도의 오차를 포함하고 있다. 그러나 4배 배(Multiplication)를 하는 경우에는 이 위상차의 오차가 바로 속도의 오차로 나타나게 된다. 특히 저속에서는 단지 몇 개의 펄스만으로 속도를 측정하게 되는데 4배 배를 하는 경우 펄스의 위상 오차에 비례하여 측정오차가 커지게 된다.

2.2 회절격자의 위치에 따른 수광 특성

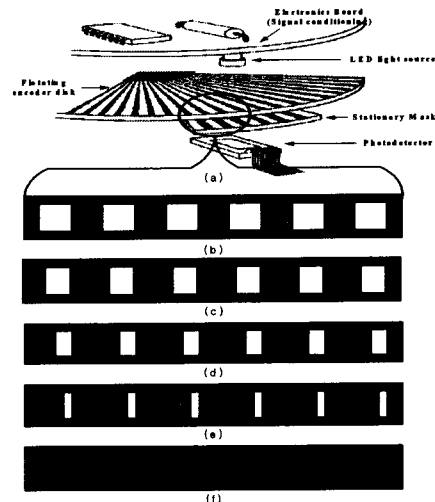


그림 2 슬릿의 전기적 위치에 따른 수광부 파형

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

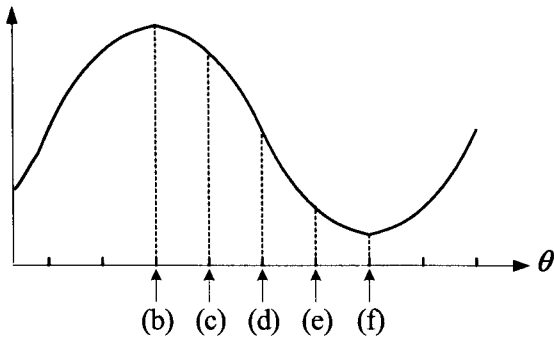


그림 3 슬릿의 전기적 위치에 따른 수광부 파형

그림 2의 (b)그림은 상하 슬릿의 상차각이 0° 일 때이며 이때 투과하는 빛의 양이 제일 많으며 그림 3의 출력전압이 가장 큰 b점이 된다. 슬릿의 위상차가 180° 내에서 커짐에 따라 투과하는 빛의 양은 감소하게 되고 그림 3의 제일 하단 (f)그림은 슬릿의 위상차가 180° 에서는 투과하는 빛의 양은 영이 되며 그림 3의 출력전압이 가장 적은 f점이 된다.

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, B상과 4체배한 신호 및 수광소자의 출력 파형을 나타내고 있다.

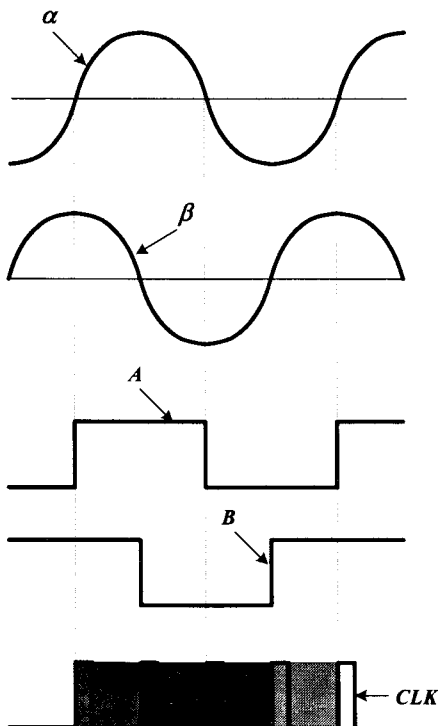


그림 4 위치에 따른 엔코더의 A상, B상, 4체배한 신호 및 수광소자의 출력

일반적인 엔코더에서는 그림 4와 같이 회전체의 회전방향 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 4의 A, B상 신호는 기존 엔코더의 디지털 출력신호이다. 엔코더의 한 회전당 펄스 수를 N 이라 하면 체배를 행하지 않은 엔코더의 분해능은 아래와 같이 슬릿 수에 반비례한다.

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

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

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

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 성분을 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 피치내의 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 Q 라 하면 기계적 위치 분해능은 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.

$$\theta = \theta_i + \Delta\theta \quad [CW] \quad (7)$$

$$\theta = \theta_i + \theta_k - \Delta\theta \quad [CCW]$$

여기서 θ_k 는 슬릿 한 피치의 기계각 이다.

따라서 디지털 신호와 아날로그 신호의 조합에 의한 엔코더의 분해능은 아날로그 신호에 의해 얻어진 슬릿내의 위치 변

위에 의해 결정된다.

주위 환경변화의 시정수는 일반적으로 매우 크다. 따라서 직류성분의 영향을 제거하고 로페스 필터(LPF)를 통과시켜 노이즈를 제거 하였다. 로페스 필터는 다음과 같이 설계할 수 있다.

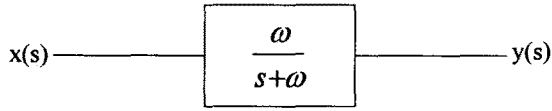


그림 5 LPF(Low-Pass-Filter)

그림 5의 전달함수는 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$y(s) = \left(\frac{\omega}{s + \omega} \right) \cdot x(s) \quad (8)$$

식(8)을 식(9)의 Bilinear Transform을 이용하여 Z변환하면 식(8)과 같이 변환할 수 있다.

$$S = \left(\frac{2}{T_s} \right) \left(\frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}} \right) \quad (9)$$

$$\left(\frac{2}{T_s} \right) \left(\frac{1 - Z^{-1}}{1 + Z^{-1}} \right) \cdot y(z) + \omega \cdot y(z) = \omega \cdot x(z) \quad (10)$$

식(10)을 디지털로 표현하면 식(11)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} 2(y(n) - y(n-1)) + T_s \omega (y(n) + y(n-1)) &= T_s \omega (x(n) + x(n-1)) \\ y(n) &= \left(\frac{2 - T_s \omega}{2 + T_s \omega} \right) \cdot y(n-1) + \left(\frac{\omega T_s}{2 + T_s \omega} \right) \cdot (x(n) + x(n-1)) \\ &= L_a y(n-1) + L_b (x(n) + x(n-1)) \end{aligned} \quad (11)$$

또한 크기의 변화를 보상하기 위해서는 아래와 같은 정규화 과정을 갖는다.

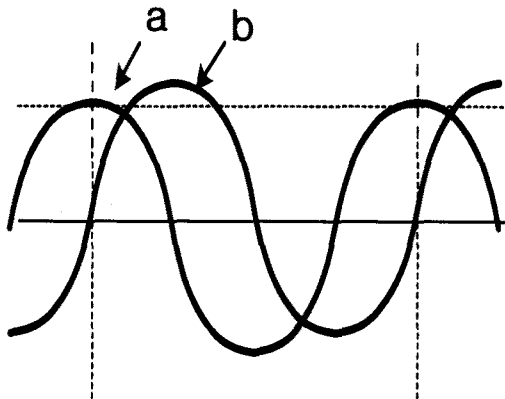


그림 6 크기가 다른 수광부 출력

$$\begin{aligned} \alpha &= a - V_{set} \\ \beta &= K(b - V_{set}) \end{aligned} \quad (12)$$

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

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 옴

셋을 제거하고, 스케일 팩트 K 를 곱하여 대칭 2상 신호인 α , β 를 만든다.

또한 노이즈 성분을 제거하기 위해 로페스 필터(LPF)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_i 을 합하여 고정도의 회전자 위치각(θ)를 계산한다.

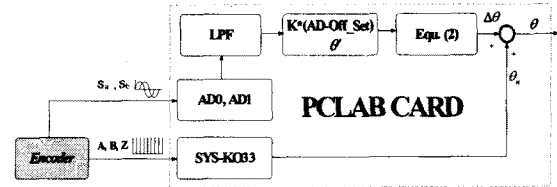


그림 7 검출 블록도

그림 7은 제안된 아날로그 디지털 혼합형 엔코더의 검출 블록도를 나타내고 있다. SYS-KO33 CARD을 통해 기존의 디지털 엔코더 신호를 받고, A/D단자를 통해 슬릿내의 위치 변위를 검출하기 위해 아날로그 신호를 받는다. 90° 위상차를 갖는 두 아날로그 신호(α , β)는 온도나 먼지 등의 주위 환경변화에 의해 직류 성분 및 크기에 영향을 받는다.

3. 실험결과

본 논문에서 제안한 아날로그 디지털 혼합형 엔코더의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 저가형 엔코더인 오토닉사의 1024펄스형 엔코더 안에 아날로그 증폭기를 장착하였으며 PCLAB CARD내의 A/D를 사용하였으며 노이즈의 영향을 제거하기 위해 상위 8 Bit를 사용함으로써 기존의 엔코더에 비하여 256배의 고정도를 가지는 위치 검출기를 실현하였다. 제어부와 전원부(Power module)의 드라이브단에 전원을 공급하기 위한 스위치 모드 전원 공급기(Switched Mode Power Supply : SMPS), BLDC 모터를 구동하기 위한 전원부, 각 상의 전류신호 검출을 위한 전류 센서, 과전류 보호를 위한 전류 제어기, 제어신호를 증폭하기 위한 게이트 드라이버(Gate driver)로 구성하였다.

실제 실험에서는 엔코더에서 나오는 수광부 출력의 크기와 위상차의 변화에 따른 출력 파형을 보여준다. 각 출력 파형에서 나타내는 변수의 의미는 S_a , S_b 는 엔코더 수광부의 출력센서 신호이고 a, b 는 센서신호의 필터링 신호이고 σ , δ 는 필터링 신호에서 엔코더의 직류 성분을 제거한 신호가 된다. 그리고 α , β 는 σ , δ 신호에서 위상과 크기를 보정한 신호가 된다. 그림 8은 로페스 필터를 통과한 엔코더 아날로그 출력 파형이다. 차단주파수를 100[Hz]에서 1.6[kHz]까지 변화 시키면서 필터의 특성을 살펴 본 것으로 주파수가 1.6[kHz]에서 가장 적당한 필터로 사용됨을 볼수 있다. 따라서 본 논문에서는 1.6[kHz]의 차단주파수를 사용했다. 그림 9은 엔코더의 특성을 살펴기 위한 실험 파형으로 어느정도 일정한 크기와 위상을 가진 엔코더 수광부 출력 파형이다. 수광소자의 출력파형 S_a , S_b 는 크기가 일정하고 90°의 위상차를 갖고 있으나 직류 성분을 포함하고 있으며 그 크기에도 다소 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 위상이 동일하고 크기가 다른 수광소자의 출력 파형이다.

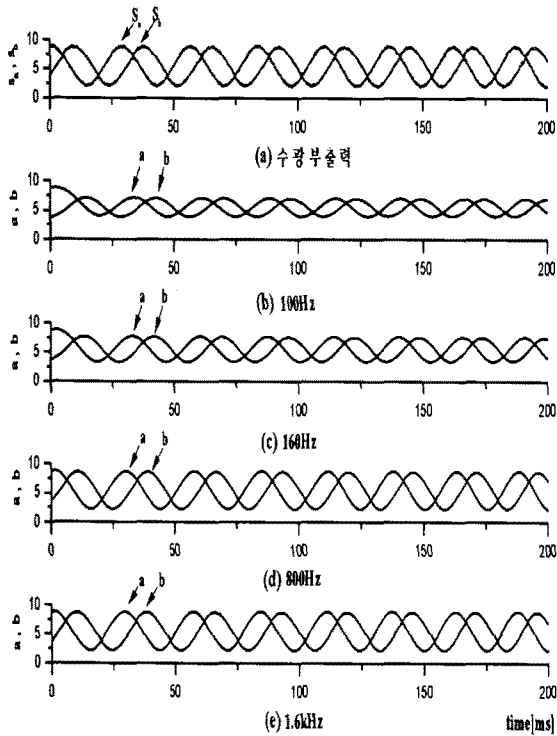


그림 8 로패스 필터를 통과한 수광부 출력 신호

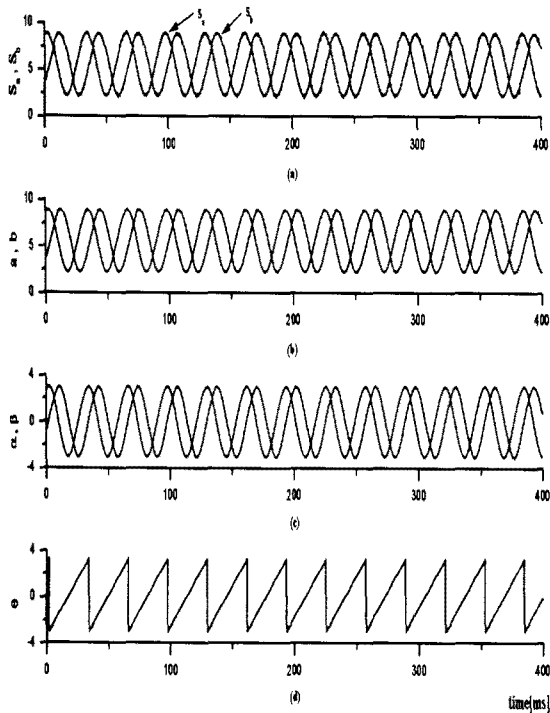


그림 9 위상과 크기가 같은 엔코더 수광소자 각부 출력 파형

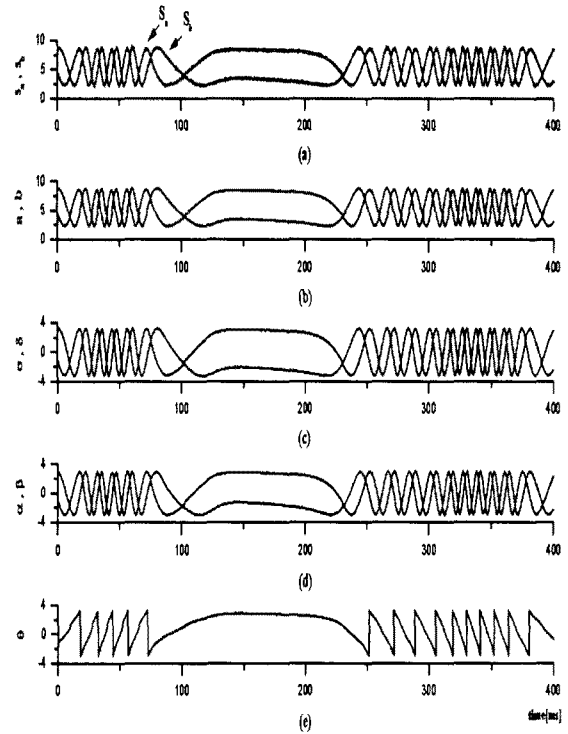


그림 10 크기가 동일하고 위상이 다른 수광소자 각부 출력 파형

4. 결 론

본 연구는 반도체 제조장치등에 사용되는 고정밀도로 위치 제어기기에서 높은 정확도를 요구하는 변위량 검출을 위해서 기존의 저가형 광학식 엔코더의 전기적회로 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 PCLAB CARD내의 A/D를 사용하였으며 노이즈의 영향을 제거하기 위해 상위 8 Bit를 사용함으로써 기존의 저가형 엔코더(1024)에 비하여 256배의 고정도를 갖는 위치 검출기를 실현하였다.

【참 고 문 헌】

- [1] J. R. Rene Mayer, Optical Encoder Displacement Sensors, "Measurement Instrument and Sensors Handbook", CRC press LLC, 1999.
- [2] W. Zhou and L. Cai, "A positioning method for hard disk servowriter using an auto focus laser encoder", Proceedings of the IEEE/ASME, International Conference pp. 922-925 sept. 1999.
- [3] 박성준, 추영배, 박한용, 안진우, 권순재, 김철우, "저가형 엔코더를 이용한 SRM의 안정운전에 관한 연구", 전력전자 학술대회 논문집, pp. 17. 5~178, 1999
- [4] M. Dobosz, "High-resolution laser linear encoder with numerical error copensation", Opt. Eng. vol. 38, no. 6, pp. 968-973, June 1999.
- [5] E. Hecht, Optics(광학), 3rd Edition, Addison-Wesley, 1998.
- [6] 설승기, "전기기기제어론", 브레인 코리아, 2002.