

반송장치에서의 방향제어를 위한 DC모터와 STEP모터 제어기의 성능비교에 관한 연구

(A Study on Performance Consideration for Direction Controllers of a Material Transport System by DC motor and Step motor)

한기수* · 원성홍

(Ki-Soo Han · Sung-Hong Won)

요 약

영구자석의 반발력을 이용한 반송장치에서 캐리어를 받아 다음 스테이션으로 방향을 전환해주기 위한 회전판의 제어를 수행하기 위한 제어기로서 적당한 모터의 선정을 위하여 두 가지 형태의 제어기를 만들고 이를 비교하여 최적의 제어기를 선정하고자 하였다. 즉 스텝모터를 사용한 마이크로스텝방식의 오픈루프 제어와 DC모터를 사용한 폐루프 제어방식의 DC서보 방향제어기를 설계하고 제작하였다. 이 두 방식의 방향제어기의 성능과 제어특성을 비교하였다.

Abstract

This paper presents the design and implementation of direction controllers by microstep control and dc servo control for material transport system. The performances of direction control systems are compared in position responses and motor power consumptions between microstep control of a step motor and dc servo control.

Key Words : Microstep Control, Step Motor, Direction Controller

1. 서 론

스텝핑 모터는 위치제어를 기본으로 설계된 모터이므로 위치정보의 피드백이 없어도 각도제어를 쉽게

할 수 있는 모터이다. 이에 반하여 DC모터는 각도제어를 위해 일반적으로 엔코더와 같은 위치센서가 필요하게 된다.

스텝핑 모터로 풀스텝으로 제어하게 될 경우에는 토오크 리플이 크기 때문에 제어성능이 떨어지므로 최근에는 마이크로스텝 구동방식을 많이 사용하고 있다.

본 연구에서는 반송장치에서 방향제어를 위하여 사용하는 모터를 선정할 때 DC모터에 엔코더를 부착하여 피드백을 적용시킨 경우와 스텝핑 모터를 오픈 루

* 주저자 : 동양공업전문대학 전기시스템과 부교수
Tel : 02-2610-1782, Fax : 02-2610-1854
E-mail : kshan@dongyang.ac.kr
접수일자 : 2009년 10월 23일
1차심사 : 2009년 10월 26일
심사완료 : 2009년 12월 16일

반송장치에서의 방향제어를 위한 DC모터와 STEP모터 제어기의 성능비교에 관한 연구

프의 마이크로스테핑 구동을 한 경우의 성능의 차이를 실험적으로 분석하여 비교하였다.

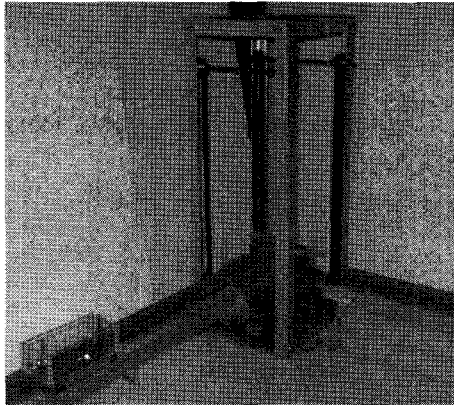


그림 1. 실험을 위하여 제작한 반송 장치
Fig. 1. Material transport system for the experiment

2. 시스템의 구성

그림 1은 실험에 사용된 반송장치를 나타내고 있다. 영구자석의 반발력을 이용해 바퀴나 베어링이 없이 캐리어를 운반할 수 있도록 제작된 장치로서, 공장자동화 등에 사용될 수 있도록 최초 스테이션에서 캐리어를 받아 중앙 분기점에서 방향전환을 한 후 다음 스테이션으로 보내기 위한 방향전환장치를 가지고 있으며, 이 방향전환을 위하여 중심부에 모터와 모터의 상단에 캐리어를 구속하여 방향을 전환시켜 주기 위한 회전판이 장착되어 있다. 이 회전판의 방향을 전환시켜주기 위한 방향제어장치를 구동하기 위한 모터를 스텝핑 모터와 DC서보모터 중에서 선정하려고 한다.

그림 2는 반송장치의 방향제어장치로서 회전판을 장치한 상태의 모터와 회전판을 제거한 후의 모터의 모습을 보여주고 있다. 이 반송장치의 방향제어장치는 최초의 스테이션에서 캐리어를 받아 다음 스테이션으로 정확하게 전달하기 위해 레일과 회전판을 정확한 각도로 위치시켜야 하며, 방향전환에 걸리는 시간을 최소화하기 위해서 구동모터의 정밀도와 빠른 응답속도가 요구된다. 또한 컨베이어벨트나 기어 등

을 이용한 반송장치와는 다르게 스테이션에서 처음 구동될 때와 방향전환을 제외하고는 전력을 소모하지 않는 관성구동으로 움직이는 시스템이므로 모터의 소모전력 또한 작아야 한다.

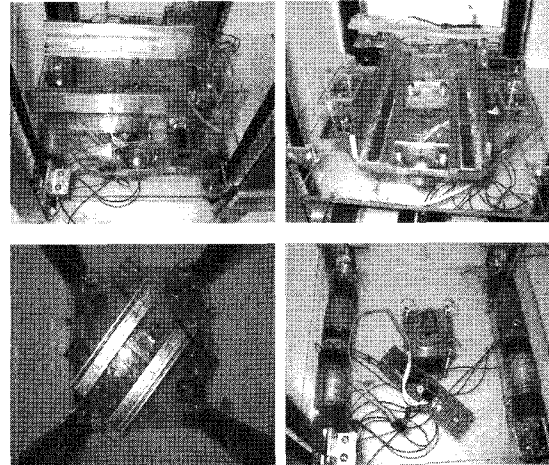


그림 2. 반송장치의 방향제어장치
Fig. 2. Direction control part of the material transport system

3. 스텝모터 실험회로의 구성

스테핑 모터로 구동을 하기 위하여 그림 3과 같이 회로를 구성하였다. 이 회로는 1.8도의 4상 스텝핑 모터를 1/8 마이크로스테핑으로 분주하여 구동하는 회로이다.

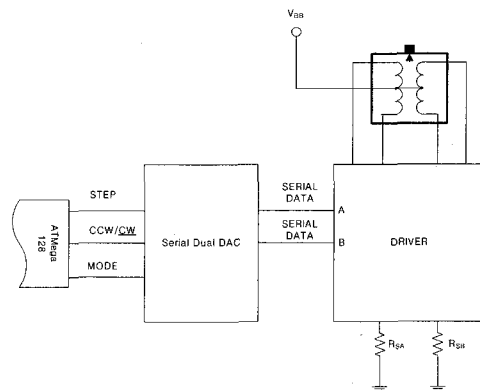


그림 3. 스텝핑모터의 마이크로스테핑구동회로
Fig. 3. Block Diagram of microstep drive for a step motor

마이크로스텝 구동 회로는 1/8 마이크로스텝 발생 회로를 내장하고 있는 ALLEGRO사의 PG001M과 마이크로 스텝 DRIVER를 내장한 SLA7044M을 사용하여 비교적 간단히 제작이 가능하다. 마이크로스텝 위치명령을 발송하고 마이크로 스텝간의 시간지연 테이블을 위하여 필요한 제어기로는 ATMega128을 사용하였다.

4. 스텝모터의 마이크로스텝 제어

스텝모터는 저속으로 운전할 때 진동 및 공진현상으로 인하여 속도 및 위치 응답에 맥동이 나타나는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 마이크로스텝 제어가 많이 사용되고 있다. 하이브리드 2상 스텝모터의 각 상의 전류에 의해 발생하는 토크는 다음 식(1), (2)와 같이 회전자의 위치(θ)와 스텝 모터의 상 전류 함수로 나타낼 수 있다[5].

$$T_A = K_T i_A \sin(p\theta) \tag{1}$$

$$T_B = K_T i_B \sin(p\theta - \pi/2) \tag{2}$$

- p : 회전자의 치수
- K_T : 모터의 토크 상수
- i_A, i_B : 모터의 상전류
- θ : 회전자의 위치각도

i_A 와 i_B 를 정격전류 I 에 대하여 다음 식 (3),(4)와 같은 함수관계를 가지도록 제어하면 회전자는 마이크로스텝 위치에서 평형점을 가지게 된다.

$$i_A = I \cos \alpha \tag{3}$$

$$i_B = I \cos(\alpha - \pi/2) \tag{4}$$

- I : 정격전류
- α : 제어각의 위치

(3)과 (4)의 식을 (1)과 (2)에 대입하면 모터에 발생하는 합성토크 T 를 다음 식 (5)와 같이 얻을

수 있다.

$$\begin{aligned} T &= T_A + T_B = K_T I [\sin(p\theta) \cos \alpha + \\ &\quad \sin(p\theta - \pi/2) \cos(\alpha - \pi/2)] \\ &= K_T I \sin(p\theta - \alpha) \end{aligned} \tag{5}$$

부하 토크가 0인 경우에는 $\theta = \alpha/p$ 인 각도에서 평형점이 발생하므로 α 각을 제어하면 회전자의 평형점의 위치 θ 를 제어할 수 있게 된다. 평형점 θ 의 위치에 대한 i_A 와 i_B 의 값을 표로 작성한 것이 마이크로스텝 테이블이 된다. 본 실험에서는 1/8 마이크로스텝 단위의 구동을 하였는데 이를 위하여 i_A 와 i_B 의 9개의 기준값을 사용하였다. 본 연구에서는 Allegro사의 Parallel to Serial Data Converter인 PG001M을 사용하여 다음 표 1과 같은 마이크로스텝 위치의 기준값을 적용하였다[4].

PG001M은 마이크로프로세서에서 출력된 논리신호를 받아 이로부터 위의 표에 있는 마이크로스텝 위치에 해당되는 A상전류와 B상전류의 기준값을 시리얼 데이터로 출력해준다. 이 시리얼 데이터는 마이크로스텝 구동회로를 내장한 SLA7044M에 전류기준신호로 사용되어 PWM 방식으로 구동된다. 표 2에는 실험에 사용된 모터의 사양을 표시하였다.

표 1. 8분주된 마이크로스텝의 전류 테이블
Table 1. Current table for 1/8 microstep positions

마이크로 스텝위치	A상전류 ([%])	B상전류 ([%])
1	100	0
2	100	20
3	91	40
4	83	55.5
5	71.4	71.4
6	55.5	83
7	40	91
8	20	100
9	0	100

표 2. 실험에 사용된 모터의 사양
Table 2. Motor specifications for the experiment

모터	DC모터	스텝모터
모터명	GM35-3657	FL42STH33
정격전류	0.54[A]	0.4[A/상]
정격전압	12[V]	12[V]
기어비	30:1	없음

5. DC모터의 제어회로 구성

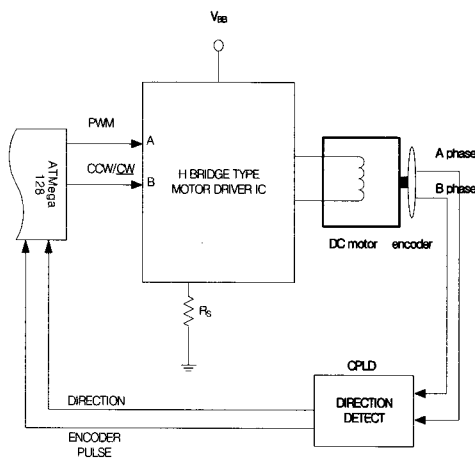


그림 4. DC모터의 제어회로 구성도
Fig. 4. Block diagram of control circuits for DC motor

DC모터는 모터뱅크사의 DC 기어드 모터인 GM35-3657을 사용하였다. 이 모터는 0.54[A]의 정격 전류와 25.0[Nm]의 토크를 가지고 있다. 모터의 기어비는 30 : 1이다. DC모터에는 AUTONICS사의 E40 Incremental rotary encoder를 부착하였고, 이 엔코더의 분해능은 1000 P/R이며 2개의 상을 가진 펄스를 출력한다. 그림 4는 DC모터로 구동한 시스템 구성을 보여 주고 있다.

A상과 B상의 2개의 신호로부터 방향신호를 얻어내기 위한 논리회로는 본 연구에서는 Xilinx사의 CPLD인 XC9572로 구현하여 사용하였다. ATmega128에서 PWM레지스터인 OCR0의 출력을 H브리지로 된 구동드라이버 IC의 Enable단자에 연결하여 DC모터에 흐르는 전류의 크기를 조정하게 하였

다. 엔코더 펄스가 입력될 때 마다 ATmega128의 TIMER3의 오버플로우 인터럽트가 발생하고 이 때 마다 다음 식과 같이 위치신호인 $pos(k)$ 값을 갱신하게 된다.

$$pos(k) = pos(k-1) + dir \cdot 1 \tag{6}$$

$pos(k)$: 갱신할 위치정보값
 $pos(k-1)$: 이전의 위치정보값
 dir : 현재 회전자의 회전방향

여기서 dir 값은 출발할 때의 회전방향과 동일할 경우는 1이 되고 서로 다를 경우에는 -1이 된다.

6. DC모터의 피드백 제어 알고리즘

DC모터의 각도제어를 위하여 디지털 PI(비례적분) 제어기를 ATmega128로 구현하였다. 일반적인 디지털 PI 제어기는 다음 식 (7)과 같이 표시된다.

$$u(n) = k_p e(n) + k_i \sum_{N=0}^n e(n) \tag{7}$$

$u(n)$: n번째 위치정보 때의 제어입력
 $e(n)$: n번째 위치 에러
 k_p : 제어를 위한 비례이득정수
 k_i : 제어를 위한 적분이득정수

여기서 $u(n)$ 은 마이크로프로세서의 제어프로그램에서 제어 루프가 반복될 때 마다 갱신되는 값으로서 모터로의 제어 입력(control input)에 해당된다.

(7)식의 제어입력 $u(n)$ 은 DC모터의 전류 명령값이 된다. DC모터의 전류는 H 브리지형의 구동드라이버 IC를 사용하여 PWM에 의하여 제어하였다. 따라서 이 제어입력 $u(n)$ 은 PWM의 DUTY값에 비례하고 다음 식으로 표현된다.

$$u(n) = k D \tag{8}$$

D : PWM의 duty값
 k : 비례상수

duty값(D)의 범위는 0에서 1.0이고 이 값은 8비트 PWM 레지스터인 OCR0 레지스터에 입력된 값에 비례한다. 따라서 제어기의 출력은 ATMEgal28의 8비트 PWM레지스터인 OCR0의 시정수값으로 나타내게 되는데 다음의 식(9)와 같이 환산된다.

$$OCR0 = duty \times 255 \tag{9}$$

7. 실험결과 및 분석

이 반송장치를 위한 방향제어용 모터로 DC모터와 STEP모터를 사용하였을 때 각각의 전류와 위치응답에 대한 실험결과 파형을 그림 5와 그림 6에 디지털 오실로스코프 화면으로 나타내고 있다. 이 실험파형의 위치신호는 모터의 축에 부착된 엔코더 신호 출력을 전압신호로 변환하여 표시한 것이다. 이 신호는 엔코더와 DAC회로를 사용하여 간단히 제작하였다.

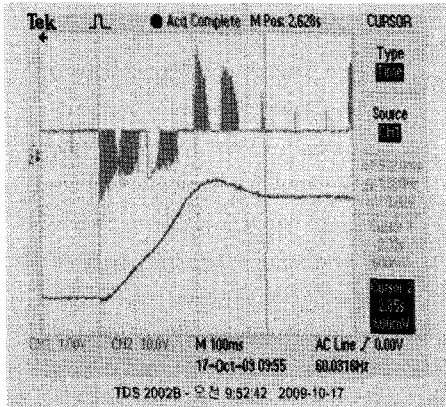


그림 5. DC모터의 전류와 위치신호
Fig. 5. Current and position signals of the DC motor

그림 5는 DC모터로 제어할 경우의 전류와 위치신호를 나타내고 있으며, 그림 6은 STEP모터로 마이크로 스텝핑 제어를 할 경우의 한 상의 전류와 위치신호를 나타내고 있다.

그림 5에서 위 부분의 파형은 A622 전류 프로브(current probe)로 출력된 파형을 도시한 것인데 위치신호가 오버슈트(overshoot)되는 시점에서 반대 방향의 제어 입력이 인가되고 있는 것을 보여주고 있다.

그림 5와 그림 6의 위치신호는 엔코더 출력에 비례하는 아날로그 전압으로 별도로 측정을 위하여 제작한 DAC회로의 출력신호이다.

두 종류의 모터가 모두 520[ms]에서 530[ms]사이에서 목표 위치에 도달하고 있다.

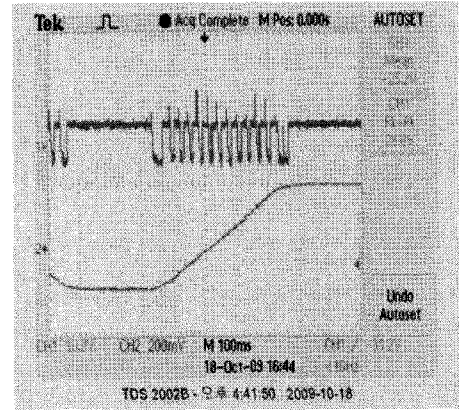


그림 6. STEP모터의 전류와 위치신호
Fig. 6. Current and position signals of the step motor

그림 7은 시계방향 및 반시계방향으로 SEEK할 경우의 두 모터의 위치신호에 대한 측정파형을 MATLAB을 이용하여 비교 및 분석한 결과를 보여주고 있다.

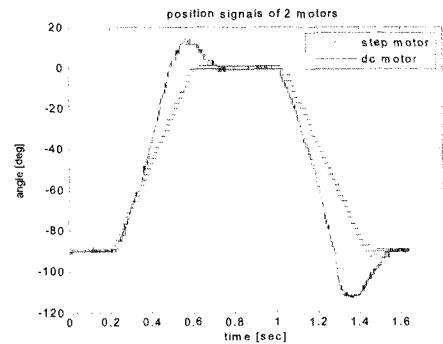


그림 7. DC모터와 스텝모터의 위치응답특성
Fig. 7. Position responses of the DC and step motor

그림 7에서 보면 DC모터의 경우 스텝모터보다 속응성이 더 우수한 것을 볼 수 있다. 스텝모터는 1/8마

크로스탭으로 구성하여 오버슈트가 거의 없이 크리티컬 댐핑(critical damping)을 하는 모습을 보여 주고 있다.

DC모터로 구동하는 경우에는 속응성을 위하여 약간의 오버슈트를 허용하였다. DC모터에 부착된 엔코더 펄스신호와 방향신호를 피드백 받아서 마이크로프로세서 ATMegal28에서 페루프 제어를 수행하였다. 페루프 제어는 간단한 PI제어 알고리즘을 사용하여 구현하였는데, 실험에 적용된 이득정수는 $k_p = 0.012$, $k_i = 0.0005$ 이다.

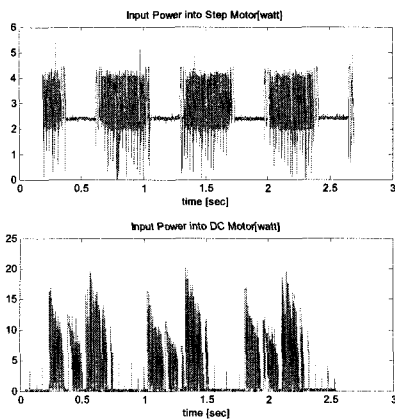


그림 8. 양방향으로 구동할 경우 각각의 모터에서 소모되는 전력

Fig. 8. Power consumptions of two motors in alternate seek

그림 8은 90도의 각도를 시계방향과 반시계방향으로 움직일 때 구동 모터로 입력되는 전력을 나타낸 것이다. 스텝모터의 경우(그림 8 상단)는 일정한 크기의 전력소모를 나타내고 있는데 비하여 DC모터의 경우(그림 8 하단)에는 제어입력의 크기에 따라 변화가 심한 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 5에서도 확인할 수 있다. 그림 9는 그림 8에서 SEEK구간만을 표시한 것인데 앞에서 언급한 스텝모터와 DC모터의 특성의 차이를 잘 나타내주고 있다. 이 두 종류의 모터에 있어서 목표 위치인 90도 위치에 1[%] 이내로 수렴하는 데 걸리는 시간(ACCESS TIME)은 0.52초 내외로 근소한 차이만을 보이고 있다.

ACCESS 구간 동안의 스텝모터의 평균 소모전력

은 2.80[W]이고 DC모터는 2.55[W]로 스텝 모터의 전력소모가 10[%] 정도 더 많은 것을 보여 주고 있다. 스텝 모터의 경우 최종 위치 각도에 도달한 직후에도 일정한 크기[약2.5[W]]의 전력을 계속 소모하고 있는 것을 보여주고 있다. 이와는 대조적으로 DC모터의 경우에는 목표 위치에 도달하기까지는 전력소모가 더 많지만 최종 위치각도에 근접한 후에는 [그래프에서 0.35초 부근] 전력소모가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

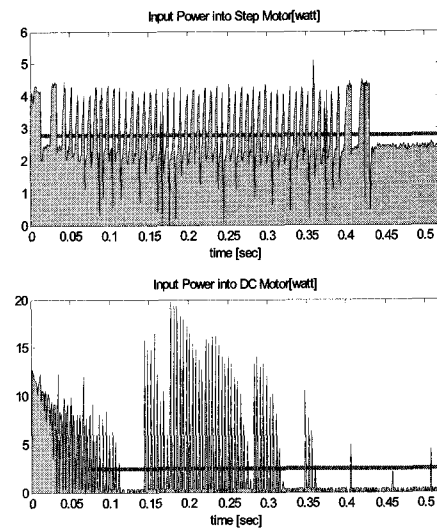


그림 9. SEEK구간의 소모전력의 비교

Fig. 9. Power consumptions during the SEEK motions

DC 모터는 SEEK 전반부에서는 전력소모가 크지만 이로 인해 응답속도가 빠르며 목표 위치에 도달한 이후의 구간에서는 제어에 필요한 입력이 매우 작다는 것을 알 수 있다.

DC모터에 감속기어와 엔코더를 부착하여 본 실험의 반송장치에 적용하였을 때 간단한 PI알고리즘을 사용하여 마이크로프로세서로 쉽게 구현될 수 있기 때문에 실제 제어도 비교적 용이하였다. 또한 DC모터의 경우 엔코더가 가격상승의 요인이 되지만 DC모터의 가격이 스텝모터보다 상대적으로 저렴하기 때문에 비용차이는 비교적 크지 않았다. 이런 비교결과로 볼 때, 두 모터 모두 제어를 위한 구현의 용이성에 있어서는 크게 차이가 나지 않지만, 반송장치의 방향제어를

위한 모터의 요구조건에는 DC모터를 사용함이 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

본 논문의 비교 연구결과는 큰 전력을 사용하지 않고 소규모의 자동제어시스템을 구성하기 위한 모터의 선정에 고민하는 여러 연구자와 개발자들에게 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 동양공업전문대학의 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

References

- [1] HAO-YUNG LO and JAU-LING CHEN, "Microstep of digital control for step motors and its test using a laser interferometer measurement system", INT.J.ELECTORNICS, Vol. 62, No. 5, pp. 761-780, 1987.
- [2] Takashi Kenjo, "Stepping Motors and their microprocessor controls", Clarendon press oxford, 1984.
- [3] D.P. Atherton and G.W. Irwin, "Stepping Motors-a guide to theory and practice", The IEE CONTROL ENGINEERING SERIES 63, 4th edition, 2002.
- [4] Allegro Microsystems.Inc. Data Sheet, No. 26112, 1998.
- [5] D.P. Atherton and G.W. Irwin, "Stepping Motors-a guide to theory and practice", The IEE CONTROL ENGINEERING SERIES 63, 4th edition, 2002.

- [6] 윤신용외 4인, "디지털 P제어에 의한 브러시리스 직류모터의 안정도 향상", 조명·전기설비학회 논문지, 제14권, 제1호, pp. 38-48, 2000. 1.
- [7] 박왈서, 오훈, "직류서보전동기의 속도제어를 위한 규칙기반 자동동조 P제어기에 관한 연구", 조명·전기설비학회 논문지, 제11권, 제2호, pp. 89-98, 1997. 4.

◆ 저자소개 ◆

한기수 (韓己洙)

1960년 3월 23일생. 1982년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1984년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1984~1991년 LG전자연구소 재직. 1991~1998년 대신정보통신연구소 재직. 1999년~현재 동양공업전문대학 전기시스템과 부교수.

원성홍 (元聖弘)

1971년 1월 14일생. 1993년 한양대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995~2004년 (주)삼성전기 중앙연구소 CAE그룹 책임연구원. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2007~2008년 한양대학교 BK21연구교수. 2009년~현재 동양공업전문대학 전기시스템과 전임강사.