

# 유압펌프용 가변속 SRM 구동시스템 설계

李東熙\*, 金奉徽\*\*, 安永珠\*\*\*, 安珍雨†

## Design of Variable Speed SRM Drive for Hydraulic Pump Application

Dong-Hee Lee, Bong-Chul Kim, Young-Joo An, and Jin-Woo Ahn

### 요 약

본 논문에서는 유압펌프 시스템의 효율적 구동을 위한 SRM 구동시스템이 제안된다. 유압 펌프 시스템이 요구하는 최대 사용 유압 및 사용유량으로부터 적절한 용량의 SRM을 설계 및 제작하고, 시험을 위해 SRM과 제어기를 포함한 전체 유압시스템을 구성한다. 제시한 SRM 구동시스템은 효율적 구동을 위해 속도제어 뿐만 아니라 유압계통의 압력검출로부터 압력제어도 같이 행하며, 이로부터 SRM이 적절한 운전영역에서 구동되도록 한다. 2.2[KW] 12/8극 SRM과 DSP를 사용한 제어기가 설계되고, 이 시스템을 실제 유압시스템에 적용하여 운전 특성을 확인하였다. 그 결과 제안한 시스템이 고효율과 빠른 응답특성을 가짐을 알 수 있다.

### ABSTRACT

This paper proposes an SRM drive system to improve the drive efficiency of the hydraulic system. From the maximum hydraulic pressure and flow rate required by the hydraulic system, a proper SRM is designed and tested. The proposed SRM drive system controls oil pressure of the hydraulic system as well as motor speed.

A 2.2[kW], 12/8-pole SR motor and digital controller based DSP are designed and tested for hydraulic pump system. The test results show that the system has some good features such as high efficiency and rapid response characteristics.

**Key Words** : Hydraulic pump, SRM, variable speed control, high efficiency, high response

### 1. 서 론

유압장치는 건설기계, 제조공장, 운송기계 등의 산업 각 분야에 널리 응용되고 있으며 또한 유압기기 생산량은 다른 공업제품에 비하여 상당히 높은 신장율을 보이고 있다. 또한 광범위한 무단변속이 쉽다는 것, 제어성·완충성이 좋다는 등의 장점이 있다. 유압펌프 시스템에서 구동전동기는 가격 및 구동의 단순성으로 인

하여 유도전동기를 적용한 시스템이 많이 사용되고 있으나, 상용전원에서 사용되는 유도전동기 구동시스템은 부하에 따른 정속운전 특성이 좋지 않고, 가변속 제어를 위해서는 별도의 인버터가 요구된다.<sup>[1]</sup> 한편 SRM은 전동기 구조가 매우 견고하고, 회전자에 권선이 없어 유도전동기에 비해 충분한 가격경쟁력을 가진다. SRM은 직류전동기 특성으로 기동 토크가 충분하여 초기압력이 확보되, 유압시스템에서 속응성을 높일 수 있는 장점이 있다. 인버터는 현재는 전용 전력 소자개발이 미진하여 교류전동기용 인버터에 비해 불리하나, 향후 소자개발 시 충분히 경쟁력을 확보할 수 있다. 또한, 유도기에 비해 우수한 효율과 기동력으로 SRM을 가변속 전동기로 채택하면 전동기 속도 및 토크제어에 의해 유량과 유압을 동시에 제어할 수 있으

†교신저자 : 정희원, 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수  
E-mail : jwahn@ks.ac.kr

\*정희원, 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 전임강사

\*\*정희원, 학술진흥재단 신진연구자 연구지원사업 연수중

\*\*\*정희원, 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수

접수일자 : 2005. 9. 16 1차 심사 : 2005. 10. 11

2차 심사 : 2005. 11. 14 심사완료 : 2005. 11. 18

므로 일반 유압 시스템에 비해서 소비전력이 낮고, 특히 대기 상태에서는 전동기 회전이 정지 상태이므로 기존의 방식에 비하여 약 90[%] 이상 소비전력을 줄일 수 있는 장점이 있다<sup>[2]</sup>. 또한 유압작동유의 불필요한 순환을 줄일 수 있으므로 유압작동유의 온도 상승을 억제하여 시스템의 효율을 증가시키는 것이 가능하다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 고정 용량형 유압 펌프 시스템에서 가변속 SRM 구동 시스템을 적용하기 위하여 적합한 SRM을 설계하고, 이를 효율적으로 구동하기 위한 구동 시스템 및 제어 방식을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 가변속 SRM을 적용한 유압 시스템을 기존 유압 시스템에 적용하여 실험을 행하고, 그 특성을 검토한다.

## 2. 유압 펌프 운전용 SRM 시스템

SRM 설계에서 전동기 외형은 기존의 유압시스템에 적용이 쉽게 될 수 있도록 전체적인 체적을 고려하여 순시 최대출력이 높게 되도록 설계에 적용하였다. SRM의 기본설계는 SRM 전용 설계보조 프로그램을 사용하였다. SRM의 정격전압은 3 $\phi$  220[V]이며, 출력 및 코깅 토크 등을 고려하여 12/8극 SRM을 선정하였으며, 정격속도는 5000[rpm] 이다<sup>[3]</sup>.

### 2.1 설계된 전동기

기본 설계 자료를 바탕으로 전동기의 가공성과 제작을 고려하여 최종치수를 결정하였다. 전동기의 축방향 길이는 102[mm]로 하였고, 전동기의 극당 권선수는 52[turn], 전동기의 공극은 가공성을 고려하여 0.25[mm]로 설계하였다. 표 1은 설계된 전동기의 사양과 시뮬레이션에 의한 성능을 요약한 것이다<sup>[4]</sup>.

표 1 전동기의 재원

Table 1 Specification of the prototype SRM

PARAMETER	VALUE	PERFORMANCE	VALUE
Stack Length	102 [mm]	Number of turn	52 [Turns]
Dia. of stator	135 [mm]	Max Power	3.128 [KW]
Dia of Rotor	70 [mm]	Max Torque	9.957 [Nm]
Stator pole arc	16 [deg]	RPM	5000 [rpm]
Rotor pole arc	15 [deg]	Voltage	AC 220 [V]
Air-gap length	0.25[mm]	Eff.	87.168 [%]

그림 1은 설계된 전동기를 정격속도로 운전할 경우 전류에 대한 발생 토크를 시뮬레이션한 결과이다. 그

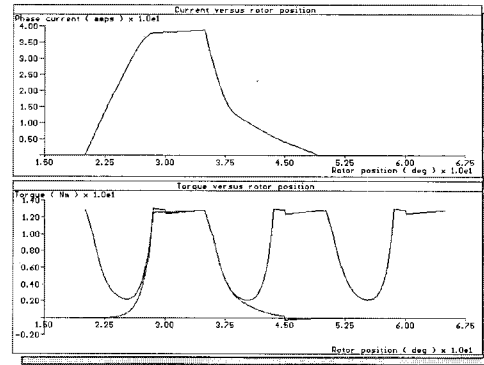


그림 1 5000[rpm] 운전 시 전류와 토크파형  
Fig. 1 Current and torque waveform at 5000[rpm]

림은 제어를 고려하지 않은 운전일 때 전류 및 토크파형이며, 실제 구동시스템의 경우 적절한 제어를 통해 토크리플이 최소화 되도록 운전이 요구된다.

### 2.2 구동용 컨버터와 제어부

본 연구에서는 독립적으로 각 상별 전류제어가 가능하고, 고토크 영역에서 제어를 쉽게 할 수 있도록 IPM(Intelligent Power Modules)을 사용한 비대칭 브리지 컨버터를 적용하였다. 제어부는 유압시스템의 효율적 구동 및 운전에 적합한 성능을 보장하는 주요 부분이다. 유압시스템 운전에 필요한 유압 및 유량을 공급하기 위하여 제어부는 유압제어와 유량제어가 각각 독립적으로 행하여져야 한다. 유압시스템이 요구하는 최대 설정 유량과 최대 설정 압력은 구동용 전동기의 최대 회전 속도와 유압 펌프의 구조에 의해 결정된다. 또한, 유압유니트로 동작하기 위해서는 설정압력까지 0.1초 이내로 도달하여야 한다<sup>[5]</sup>.

그림 2는 가변속 제어용 전동기를 적용한 유압 시스템에서 유량과 유압의 관계를 나타낸 곡선이다.

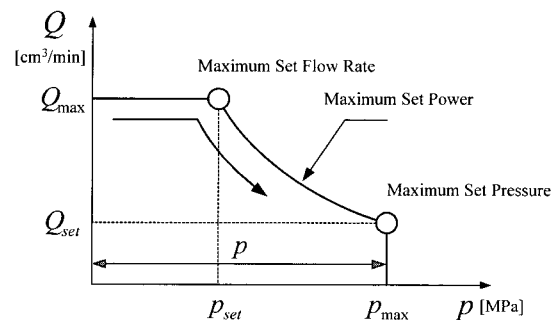


그림 2 유압 시스템에서 유량과 유압의 관계 곡선  
Fig. 2 The relationship of the flow rate and oil pressure

유압시스템의 각종 손실을 무시하고, 유압 펌프의 토출량이 일정하다고 가정하면, 유압펌프의 토출 압력과 구동용 전동기 발생토크의 관계는 다음과 같다.

$$p = \frac{T_m}{V_{pump}} \quad (1)$$

단,  $p$  : 유압 펌프 토출 압력 [MPa]

$T_m$  : 유압 펌프 구동용 전동기 토크 [Nm]

$V_{pump}$  : 펌프의 배제 용적 [cm<sup>3</sup>/rev]

즉, 유압 펌프의 토출 압력은 전동기의 토크에 직접 비례하게 된다. 따라서 유압 펌프의 토출 압력은 유압 펌프 구동용 전동기의 토크에 의해 제어될 수 있다.

펌프의 토출량과 구동용 전동기속도와의 관계는 다음과 같다.

$$Q = n_m \cdot V_{pump} \quad (2)$$

단,  $Q$  : 유압 펌프 토출량 [cm<sup>3</sup>/min]

$n_m$  : 유압 펌프 구동용 전동기 회전 속도 [rpm]

따라서 유압 펌프의 토출량은 제 손실을 무시하면 구동용 전동기 속도에 비례하므로, 속도 제어에 의해 유량 제어가 가능하다.

그림 3은 본 논문에서 적용한 SRM 구동형 유압 제어 시스템의 압력 및 속도제어 블록도를 나타내고 있다. SRM의 유압 지령으로부터 SRM의 지령 속도를 계산하고, 계산된 지령 속도  $\omega_{com}$  은 그림 2의 유량-유압 곡선으로부터 최대 허용 속도  $\omega_{ref}$  를 계산한다. 이때, 유압 제어기의 지령 속도는 다음과 같다.

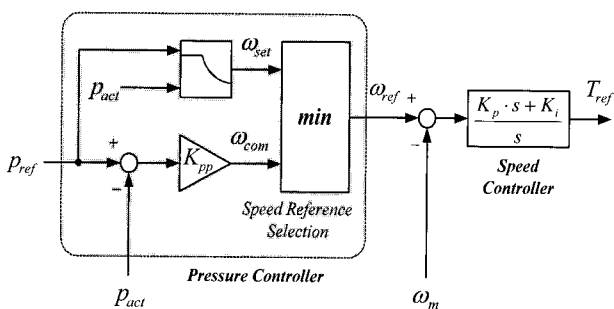


그림 3 SRM을 적용한 유압 시스템의 압력 및 속도 제어 블록도

Fig. 3 The block diagram of pressure and speed control with SRM

$$\omega_{com} = K_{pp} \cdot (p_{ref} - p_{act}) \quad (3)$$

단,  $K_{pp}$  : 비례 제어 이득

$p_{ref}$  : 지령 유압 [MPa]

$p_{act}$  : 유압 센서로부터 측정된 유압 [MPa]

이때, 실제 유압 펌프 구동용 SRM의 지령 속도  $\omega_{ref}$  는 유압 제어기에서의 지령속도  $\omega_{com}$  과 설정된 곡선에서의  $\omega_{set}$  과 비교하여 작은 값을 선택하게 된다. 이는 유압 제어기의 지령속도  $\omega_{com}$  이 설정 제한 속도  $\omega_{set}$  보다 낮은 경우, 실제 유압 펌프의 유량은 설정 제한 유량  $Q_{max}$  보다 낮은 값에서 결정되기 때문이다.

$$\omega_{ref} = \min(\omega_{com}, \omega_{set}) \quad (4)$$

단,  $\omega_{com}$  : 유압 비례 제어기 출력

$\omega_{set}$  : 유량-유압 곡선에서 결정된 출력

또한, 실제 SRM 속도 제어기는 PI 제어기로 속도 제어기의 출력은 다음과 같다.

$$T_{ref} = \left( \frac{K_p s + K_i}{s} \right) \cdot (\omega_{ref} - \omega_m) \quad (5)$$

그림 4는 본 논문에서 제안하는 유압 펌프 시스템의 전체 제어 블록도를 나타내고 있다.

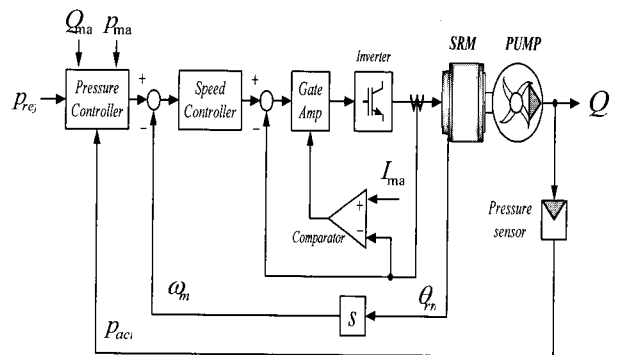


그림 4 유압 펌프시스템 블록도

Fig. 4 The block diagram of hydraulic pump system

### 3. 시스템 구성

본 연구에서는 설계된 SRM, 구동 인버터 및 제어기의 성능 검토를 위하여 다음과 같이 시스템을 구성하였다. 그림 5는 실험에 사용된 전체 유압 시스템이다. 이 시스템은 기존의 유압펌프 시스템을 수정하여 사용

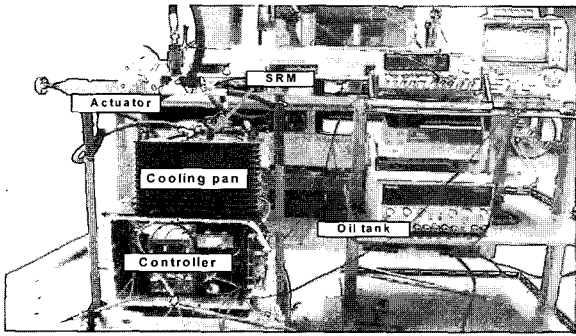


그림 5 유압 유니트 시스템 실험장치  
Fig. 5 Hydraulic unit system setup

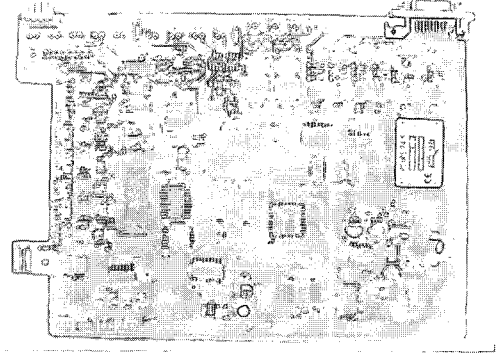


그림 7 제작된 제어부  
Fig. 7 Complete controller

하였고, 전동기, 제어기 및 유량과 압력을 조절할 수 있는 밸브액츄에이터의 3가지 부분으로 되어있다.

### 3.1 전동기

그림 6은 제작된 유압용 SRM 전동기 사진이다. 전동기는 고정자 12극 회전자 8극의 3상 12/8 SRM이며, 실제 유압시스템의 적용을 위해 기존 전동기에 외형 치수를 사용하였다.

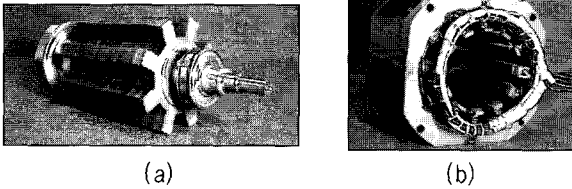


그림 6 제작된 유압 유니트 시스템용 SRM  
(a) 회전자 (b) 고정자  
Fig. 6 Manufactured SRM for Hydraulic unit system  
(a) rotor (b) stator

### 3.2 제어부

제어부는 SRM의 고성능 제어를 위하여 전동기 제어용으로 설계된 TI사의 TMS320LF2407A를 사용하여 구성하였다. 설계된 제어시스템은 SRM의 제어를 위해서 상전류의 검출 및 엔코더 신호의 검출을 프로세서 내에서 처리하도록 설계되어 있어 하드웨어 구성이 간단하다. 그림 7은 제작된 제어부의 사진이다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

유압 시스템용으로 설계된 SRM의 출력 특성과 시스템의 성능을 검토하기 위하여 실제 유압펌프에 설치하고 실험을 행하였다.

그림 8은 유량, 유압의 제어 설정값을 나타내고 있다. 최대유량은 20[cm<sup>3</sup>/min], 최대유압은 5[MPa] 으로 제한되어 있다. 또한, 최저유량은 5[cm<sup>3</sup>/min], 최저유압은 1.5[MPa] 로 설정되어 있는데, 이는 최저유량, 최저유압 이하에서는 유압 유니트의 정상적인 작동이 어려움으로 프로그램으로서 최저값을 설정해 두었다.

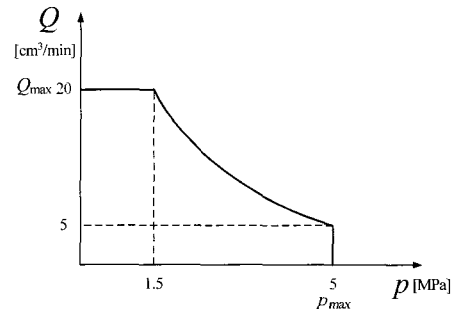


그림 8 유량, 유압 제어 설정값  
Fig. 8 Control value of the flow rate and oil pressure

### 4.1 속도-토크 및 효율 특성

그림 9는 제작된 전동기 시스템의 속도-토크 특성과 효율 특성을 나타낸다. 그림으로부터 저속운전 시에는 설정압력을 유지하는데 필요한 토크를 발생하도록 설계 정격토크를 훨씬 초과한 약 17[Nm]까지 출력하고, 최대 유량을 공급하는 고속운전 시에는 유압회로의 설정 운전압력이 낮으며, 이때의 출력 토크는 약 2.5[Nm]임을 알 수 있다. 유압펌프를 포함한 구동시스템의 효율은 정격 부하토크가 인가된 상태에서 측정된 것이며, 전속도 범위에 걸쳐 최저 약 58[%] 최대 84[%]의 효율을 나타내고 있다. 설계 시 산정된 효율은 87[%] 이나 실측효율은 최대 84[%] 정도로 나타나는데, 이러한 차이는 전동기 제작 과정에서 기계적인

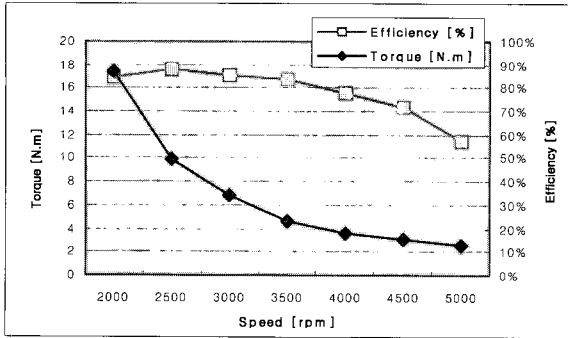


그림 9 속도 대 토크-효율 곡선  
Fig. 9 Speed versus torque-efficiency curve

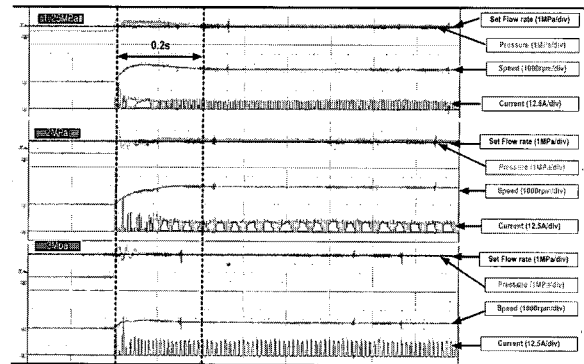


그림 11 압력 지령치에 따른 응답속도  
Fig. 11 The speed response speed by pressure command

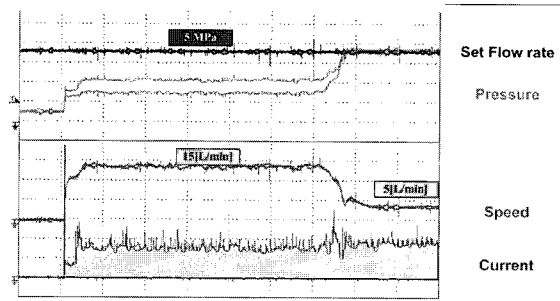


그림 10 유량 지령 변화에 대한 응답  
Fig. 10 Response by change of flow rate command

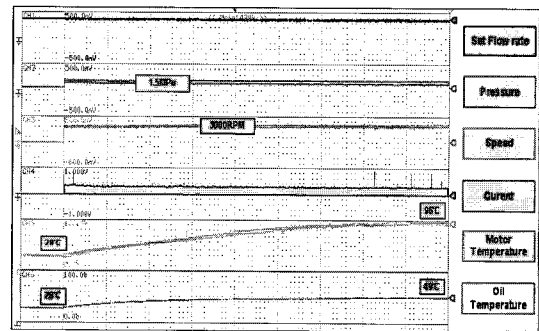


그림 12 연속구동 시 전동기와 작동유의 온도변화  
Fig. 12 Temperature change of system(motor, oil) with continuous operation

정밀성과 인버터 및 구동시스템의 결합 문제 등에 기인하는 것으로 판단된다.

#### 4.2 제어특성

그림 10은 유량 지령 변화 시의 응답을 나타내고 있다. 각각의 파형은 위로부터 설정압력, 유량, 전동기 속도 및 전류 파형이다. 전동기의 속도 감소, 즉 설정 유량의 변화에 대해서 압력도 설정치까지 빠르게 응답하는 것을 볼 수 있다.

그림 11은 압력지령이 영에서부터 각각 1.25, 2.0 및 3.0[MPa]로 변화될 경우 각각의 응답을 측정 한 것이다. 3가지 경우 정정시간은 0.2[초] 이내이며, 설정압력까지 도달하는 상승시간은 모두 다 약 0.1[초]보다 훨씬 작게 나타난다. 이는 시스템이 요구하는 0.1[초] 이내 설정압력에 도달하여야 하는 조건을 충분히 만족함을 알 수 있다.

그림 12는 정격부하를 인가한 상태에서 전동기의 온도 및 유압시스템의 유압작동유 온도 변화를 측정 한 것이다. 전동기의 회전속도는 3000[rpm], 압력은 1.5[MPa]로 설정하였다. 전동기 온도는 고정자측 외부 표면의 온도를 측정하였고, 작동유의 온도는 오일 탱

크 속 기름의 온도를 측정하였다. 전동기 온도는 28℃에서부터 상승하기 시작하여 약 50분경과 후부터는 약 96℃에 이르러 포화상태를 나타내고 있다. 유압작동유의 온도는 28℃에서 49℃까지 상승하였고 이후 포화상태를 유지하는 것을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 가변속 제어용 전동기를 적용한 고정용량형 유압 펌프 시스템에서 SRM 구동 시스템을 적용하기 위하여 적합한 SRM을 설계하고, 이를 효율적으로 구동하기 위한 구동 시스템을 제안하였다.

제안된 시스템은 최대 설정 유량과 최대 설정 압력 내에서 전체 유압 시스템의 소비 전력이 최소가 되는 운전 모드로 동작하는 방식이다. 즉, 유압을 유지하기 위한 SRM의 속도 제어뿐만 아니라, 유압 펌프의 압력을 검출하여, 적정운전영역에서 운전되도록 제어하는 방식이다.

본 논문에서 제안하는 가변속 제어용 SRM을 적용한 유압 시스템은 SRM의 설계와 유압 시스템에서의 실험을 통하여 그 특성을 검증하였고, 실제 구동특성의 실험을 통해 유압시스템에서의 SRM의 효율성 및 활용도를 입증하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호: R-2005-B-109) 주관으로 수행된 과제임

### 참 고 문 헌

- [1] Jame L. Johnson et al, *Introduction To Fluid Power, Science & Technology*, 2004.
- [2] 이주현, 김봉철, 이진국, 안진우, "유압펌프용 가변속 SRM 구동시스템" 전력전자학술대회논문집, pp.555-557, 2005.7
- [3] J. W. Ahn, S. J. Park, D. H. Lee, "Hybrid Excitation for Reduction of Vibration and Acoustic Noise" IEEE Tr. IE Vol.51, No.2, pp374-380, 2004. 4
- [4] 김태형, 안진우; "고성능 SRM구동을 위한 설계변수 선정기법" 전력전자학회 추계학술대회논문집, pp. 14-17, 2004. 11
- [5] 김봉철, 김태형, 이동희, 안진우, "유압펌프용 SRM 및 제어기 설계" 전기학회 추계학술대회 논문집, pp.113-115, 2004.11

### 저 자 소 개



#### 이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 8월 OTIS LG 서보 R&D팀 선임연구원. 2005년 9월~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 전임강사.



#### 김봉철(金奉徹)

1978년생. 2003년 경성대 전기전자공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2004년~현재 학술진흥재단 신진연구자 연구지원사업 연수중.



#### 안영주(安永珠)

1957년 1월 22일생. 1986년 부산공업대학 전기공학과 졸업. 1995년 부산대 전기공학과(공학박). 1998년~현재 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수.



#### 안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수.