

# 전기 유압식 동력 조향시스템의 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구

김지혜<sup>1</sup>, 김성관<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계공학과, <sup>2</sup>공주대학교 기계자동차공학부

## A Study on the Modeling and Simulation of an Electro-Hydraulic Power Steering system

Ji-Hye Kim<sup>1</sup> and Sung-Gaun Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

**요 약** EHPS는 탈엔진형 조향기술로 BLDC 모터를 통해 유압펌프를 작동시켜 조향력을 보조하는 동력 조향장치이다. EHPS는 BLDC 모터, 기어펌프 및 유압회로, 파워 스티어링 등으로 이루어진 전기전자, 유압 및 기계시스템의 복합적 시스템으로 모델링이 어렵다. 본 논문에서는 EHPS 시스템의 구성 부품을 수학적 모델링 하였고, AMESim을 이용하여 multi-domain 시스템의 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 이를 활용한 다양한 시뮬레이션을 통해 개발 초기단계에서의 시행착오를 줄이고 완성도 높은 EHPS 개발 업무를 수행하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

**Abstract** Electro-hydraulic power steering (EHPS) system is the power-assisted steering which operates the hydraulic pump by BLDC motors for assisting the steering force. EHPS consists of BLDC motor, gear pump, oil-hydraulic circuit and steering system. Since EHPS is a convergence system consisting of electricity and electronic, hydraulic and mechanical system, it is difficult to establish the simulation model. In this paper, the mathematical model of EHPS system components were presented, and the simulations of the multi-domain system were performed by using AMESim. The trial and error of development would be reduced by using this simulation results, and it would be helpful for developing high-quality EHPS.

**Key Words** : Electro-Hydraulic power steering system, Simulation of EHPS system, Steering system modeling

### 1. 서론

동력 조향 시스템은 자동차의 조향계 중에 유압 또는 전동기를 장착하여 운전자가 적은 힘으로 조향 조작을 할 수 있도록 하는 시스템이다. 기존의 동력 조향 시스템은 엔진과 직결된 오일펌프를 구동하여 발생한 유압을 이용하는 유압식 동력 조향(Hydraulic Power Steering) 시스템이 설치되었다. HPS 시스템은 오일펌프가 엔진과 직결되어 있으므로, 차량의 저속주행 또는 정차 시에는 엔진의 회전수가 낮기 때문에 응답성이 다소 지연되며, 차량의 고속주행 시에는 저속 정차시보다 빠르고 큰 조향 보완력이 발생되기 때문에 차량의 안정성에 악영향을 끼

치는 성능상의 문제점이 있다. 또한, 차량의 조향 조작이 없는 상태에서도 오일펌프가 구동되므로 동력손실이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 전기모터가 오일펌프에 직결되고 전기모터를 통한 조향 조작력을 발생시킬 수 있는 전기 유압식 동력 조향 (Electro-Hydraulic Power Steering) 시스템이 개발되었다. 이러한 EHPS 시스템은 차량의 정차, 저속 및 고속주행 조건에 따라 오일펌프의 회전수를 변경함으로써, 기존 유압 동력 조향시스템의 성능 및 효율을 크게 개선시킬 수 있다[1]. 또한 EHPS 시스템 개발은 하이브리드 차량과 전기자동차에서의 적용이 가능하며, 특히 고출력의 조향력이 필요한 상용차 기반의 기술 구축에 큰 도움이 될 것

본 논문은 지식경제부 “지능형 자동차 상용화 반 구축 사업”의 연구비 지원으로 수행되었음.

\*교신저자 : Sung-Gaun Kim

Tel: +82-10-9977-7015 e-mail: kimsg@kongju.ac.kr

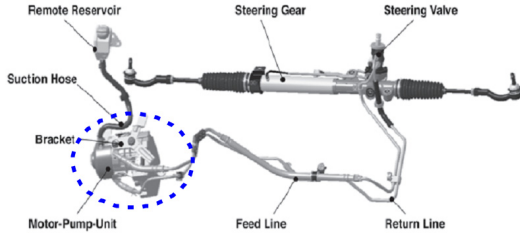
접수일 12년 02월 06일

수정일 12년 03월 07일

게재확정일 12년 03월 08일

으로 사료된다.

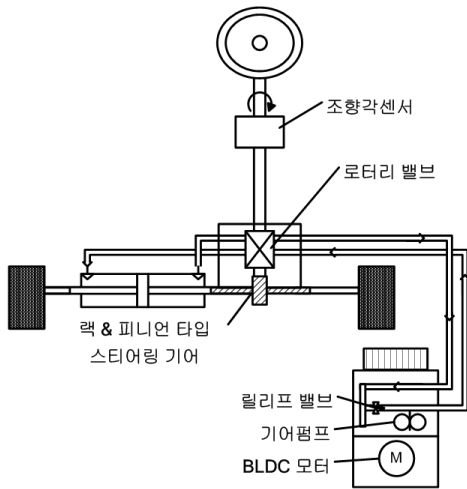
본 논문에서는 EHPS 시스템에서 사용되는 각 부품의 수학적 모델링과 AMESim을 이용한 시뮬레이션 모델을 제시하였다. 시뮬레이션을 통하여 차량속도에 따른, BLDC 모터 각 상에서의 전류와 기어펌프의 회전속도 및 토출유량의 관계를 검토하였다.



[그림 1] EHPS 시스템의 구조  
[Fig. 1] Structure of EHPS system

## 2. EHPS 시스템 모델링

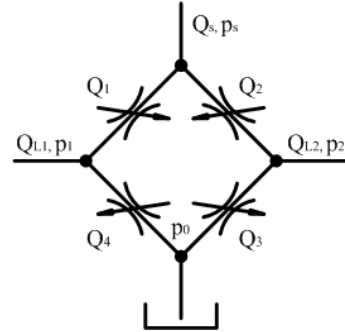
EHPS의 주요구성 모듈은 펌프부, 모터부, 제어부로 분류되며 Fig.2는 EHPS Schematic diagram으로 동력원인 BLDC 모터, 고압펌프 일체형 모듈, 상용 HPS 시스템의 기본 유압회로, 조향계 시스템 및 BLDC 모터를 제어하고 최적 조향력을 생성하기 위한 로직이 포함된 ECU를 나타낸다.



[그림 2] EHPS 시스템의 구성도  
[Fig. 2] Schematic diagram of EHPS system

## 2.1 유압부의 수학적 모델링

### 2.1.1 Rotary valve



[그림 3] 로터리 밸브의 구성도  
[Fig. 3] Schematic diagram of rotary valve

로터리 밸브가 열리고 닫힘에 따른 유량의 변화가 랙 바를 밀어주는 실린더의 압력으로 유도되는 식은 아래와 같다.

$$Q_i = C_d A_i \sqrt{\frac{2}{\rho} |\Delta p_i|} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

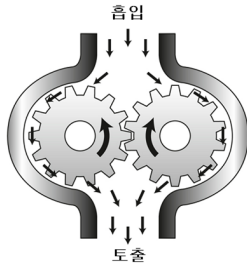
여기서  $Q_i$ 는 오리피스 유량,  $C_d$ 와  $A_i$ 는 유량 계수와 오리피스의 오픈면적,  $\rho$ 는 오일의 밀도,  $\Delta p_i$ 는 오리피스 양쪽에서의 압력차이다.

$$\begin{cases} Q_s = Q_1 + Q_2 \\ Q_{L1} = Q_1 - Q_4 \\ Q_{L2} = Q_2 - Q_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q_1 = C_d A_1 \sqrt{2(p_s - p_1)/\rho} \\ Q_2 = C_d A_2 \sqrt{2(p_s - p_2)/\rho} \\ Q_3 = C_d A_3 \sqrt{2(p_2 - p_0)/\rho} \\ Q_4 = C_d A_4 \sqrt{2(p_1 - p_0)/\rho} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $p_s$ ,  $Q_s$ 는 펌프의 토출압력과 유량,  $p_1$ ,  $Q_{L1}$ 은 실린더 좌측 챔버의 압력과 유량,  $p_2$ ,  $Q_{L2}$ 는 실린더 우측 챔버의 압력과 유량,  $p_0$ 는 탱크의 압력이다[1].

### 2.1.2 Gear pump



[그림 4] 기어펌프의 구조  
[Fig. 4] Structure of gear pump

토출되는 유량  $\dot{A}_E$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{A}_E = \frac{1}{2} \omega_1 \cdot \left( r_1^2 + \frac{z_1}{z_2} r_2^2 \right) \quad (4)$$

여기서  $r_i$ 는 기어 이가 만나는 점 P에서의 반경 거리이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i = \left( r_{op,i}^2 + l^2 - 2r_{op,i} \cdot l \cdot \cos \beta_i \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$l$ 은 다음과 같이 얻어진다.

$$l = l_0 - r_{bi} \omega_i t \quad (6)$$

여기서,  $l_0$ 는 접근하는 작용선의 길이이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_0 = r_{a2} \cos [\alpha_{op} + \sin^{-1} \left( \frac{r_{op,2} \cos \alpha_{op}}{r_{a,2}} \right) / \cos \alpha_{op} \quad (7)$$

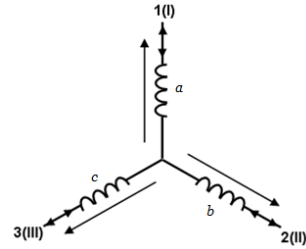
여기서  $r_{op,2}$ 는 기어 2의 작동반경,  $\alpha_{op}$ 는 작동 압력각을 나타낸다.

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} \omega_1 \cdot \left( r_1^2 + \frac{z_1}{z_2} r_2^2 \right) t \quad (8)$$

여기서  $\dot{Q}$ 는 단위시간당 체적유량,  $t$ 는 기어 두께이다 [2].

## 2.2 전기부의 수학적 모델링

### 2.2.1 BLDC motor



[그림 5] Brushless dc motor의 구성도  
[Fig. 5] Schematic diagram of brushless dc motor

3상 BLDC 모터는 다음과 같은 4개의 방정식에 의해 표현될 수 있다.

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt} (i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (9)$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt} (i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (10)$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt} (i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (11)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (12)$$

여기서  $v, i, e$ 는 상간의 전압, 전류, 역기전력,  $R$ 과  $L$ 은 각 상에서의 저항과 인덕턴스,  $T_e$ 와  $T_L$ 은 전기적 토크와 로드 토크,  $J$ 는 회전자 관성 모멘트,  $k_f$ 는 마찰계수,  $\omega_m$ 은 회전자 속도를 나타낸다. 역기전력과 전기각은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e) \quad (13)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (14)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (15)$$

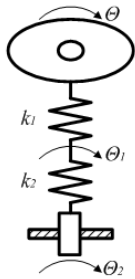
$$T_e = \frac{k_t}{2} \left[ F(\theta_e) i_a + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (16)$$

여기서  $k_e$ 와  $k_t$ 는 역기전력 상수와 토크계수를 나타낸다. 전기각  $\theta_e$ 는 회전각과 극 쌍의 수의 곱과 같다 ( $\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$ ). 함수  $F$ 는 역기전력의 사다리꼴 파형을 제공하며, 주기는 다음과 같이 쓸 수 있다[3].

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1 & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{5\pi}{3}) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (17)$$

2.3 기계부의 수학적 모델링

2.3.1 Steering wheel and pinion



[그림 6] 핸들과 피니언 간의 구성도  
[Fig. 6] Schematic diagram of steering wheel and pinion

핸들, 입력축과 피니언 간의 관계식은 식(18)로 나타낼 수 있다.

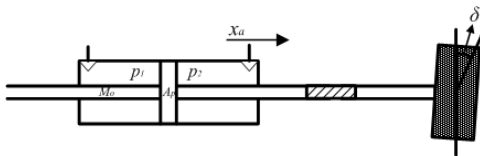
$$k_1(\theta - \theta_1) = k_2(\theta_1 - \theta_2) \quad (18)$$

여기서  $\theta$  는 핸들 회전각도,  $k_1$ 은 조향축 강도 계수,  $k_2$ 는 토션 바 강도 계수,  $\theta_1$ 은 토션바 상단 회전각도,  $\theta_2$ 는 피니언 회전각도이며,  $\theta_2$ 는 피니언 회전각도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\theta_2 = x_a \cos \alpha / r \quad (19)$$

여기서  $x_a$ 는 피스톤 로드 변위,  $\alpha$ 는 스파이럴 랙 형상각도,  $r$ 은 피니언 반경이다[1].

2.3.2 Rack and wheel



[그림 7] 랙과 바퀴의 구성도  
[Fig. 7] Schematic diagram of rack and wheel

앞바퀴 회전 각도와 킹핀 및 너클암과의 관계식은 식(20)으로 나타낼 수 있다.

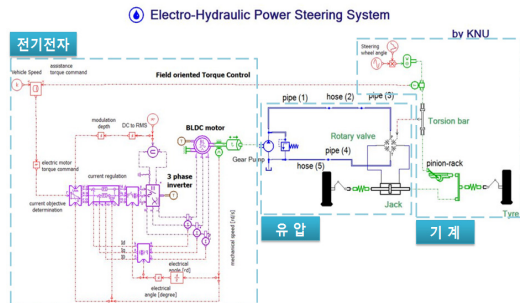
$$I_w \ddot{\delta} = F_r d - K_w \dot{\delta} - C_w \delta - K_1 e \delta \quad (20)$$

여기서  $I_w$ 는 앞바퀴 로터리 모멘트,  $\delta$ 는 앞바퀴 회전 각도,  $d$ 는 모멘트 암,  $K_w$ 는 조향 시스템 저항 계수,  $C_w$ 는 조향 시스템 강도 계수,  $K_1$ 은 cornering 강도 계수,  $e$ 는 지면이 앞바퀴에 대한 모멘트 암이다[1].

3. EHPS 시스템 시뮬레이션

EHPS 시스템의 시뮬레이션 모델은 AMESim을 이용하여 설계되었다. AMESim은 다른 시뮬레이션 플랫폼과 비교하여 기계, 전기 및 제어 신호 라이브러리를 갖고 있으며, 단순한 추상 수학적 모델을 만들 필요 없이 직접 시스템을 만들 수 있다. 또한 시뮬레이션 결과는 실제 시스템에 직접 사용할 수 있다. 이 소프트웨어 플랫폼은 친숙한 사용자 인터페이스를 제공하며, 제어 매개변수를 쉽게 수정할 수 있다. 플랫폼 구성요소를 사용하여 EHPS 시스템을 만들 수 있으며, EHPS 부품의 작동특성을 관측할 수 있는 장점이 있다[4].

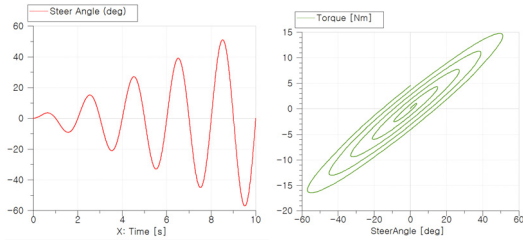
3.1 EHPS AMESim 모델 및 제어알고리즘



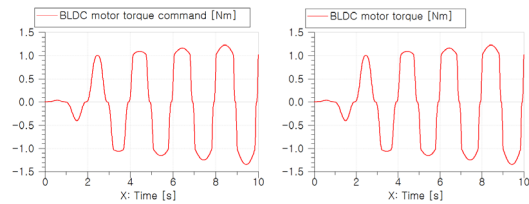
[그림 8] EHPS 시스템의 AMESim 모델  
[Fig. 8] Electro-Hydraulic power steering(EHPS) system Modeling by AMESim

Fig.8은 EHPS 시스템의 모델을 나타내고 있으며, BLDC 모터부 (전기전자), 파워 스티어링부 (기계) 및 제어로직 (컴퓨터)으로 구성된 multi-domain 시스템으로써, 본 연구에서는 AMESim을 이용하여 모델기반 시스템 해석 및 제어로직을 설계하였다.

### 3.2 시뮬레이션 결과

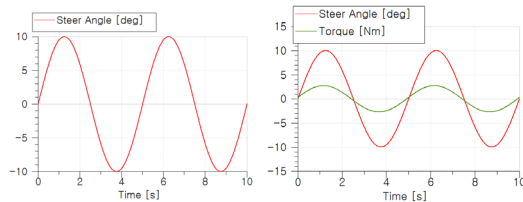


[그림 9] (a) 조향각 (b) 조향각 v.s. 조향토크  
[Fig. 9] (a) Steer Angle (b) Steer Angle v.s. Steering Torque

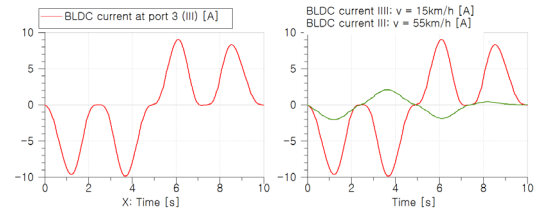
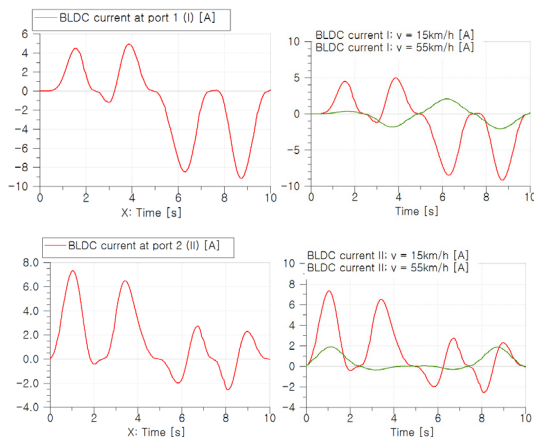


[그림 10] BLDC 모터 명령 토크 v.s. BLDC 모터 토크  
[Fig. 10] BLDC motor torque command v.s. BLDC motor torque

Fig.9은 조향각도 입력과 조향토크를 나타내며, 안정된 조타감을 제공함을 알 수 있으며, Fig.10은 BLDC 모터의 입력 토크와 시뮬레이션의 출력 토크가 일치함을 나타낸다.

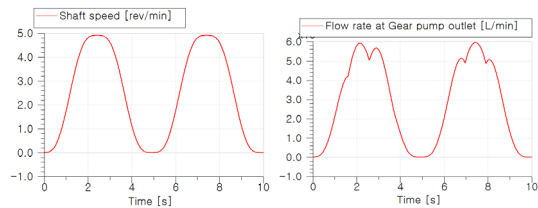


[그림 11] 조향각과 조향토크  
[Fig. 11] Steer angle and steering torque

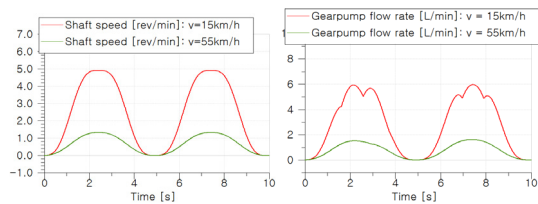


[그림 12] Port I, II, III에서의 BLDC 전류 v.s. 차량속도에 따른 Port I, II, III에서의 BLDC 전류  
[Fig. 12] BLDC Current at port I, II, III v.s. BLDC Current at port I, II, III with varying vehicle speed

Fig. 12은 BLDC 모터의 각 상에서의 전류값과 저속과 고속에서의 전류값을 나타낸다. 이때, BLDC 모터는 벡터제어를 통해 고정자 current vector와 field flux가 항상 수직을 유지하도록 하며, 이는 토크 리플이 최소가 되어 정밀제어가 가능한 장점이 있다. 벡터제어는 모터의 전기적 변수의 크기와 방향을 동시에 제어하는 방법으로, 모터 제어에 있어서 벡터제어는 field flux에 기준하여 전류의 크기와 방향을 제어하는 개념으로 field oriented control이라고도 부른다.



[그림 13] (a) 기어펌프 샤프트 회전속도  
(b) 기어펌프 토출 유량  
[Fig. 13] (a) Gear pump shaft speed,  
(b) Flow rate at gear pump outlet



[그림 14] 차량속도에 따른 기어펌프의 변수  
(a) 기어펌프 샤프트 회전속도 (b) 기어펌프 토출 유량  
[Fig. 14] Gear pump variables with varying vehicle speed  
(a) Gear pump shaft speed, (b) Flow rate at gear pump outlet

상기 그림은 EHPS의 시스템에서 기어펌프의 토출 유

량은 차량속도의 변화에 따라 달라짐을 알 수 있으며, 이를 구동시키기 위한 BLDC 모터의 구동인가 전류도 차량 속도에 따라 달라짐을 알 수 있다.

EHPS 시스템은 고속 및 저속 주행 시 적정 토출량을 공급함으로써, 결과적으로 핸들을 작동하기 위해 소요되는 힘을 경감시켜 가볍게 작동될 수 있도록 하여 운전자의 피로감을 덜어주는 동시에 주행 시 토출 유량의 공급을 적절히 제어하여 차량의 주행안정성을 달성하는 역할을 한다. 만일 토출유량이 적정유량보다 클 경우, 연비 악화 및 부품의 원가 상승 등의 악영향을 끼치게 되며 반대로 작을 경우, 조타력 무거움 등의 성능 악화를 가져오게 된다.

Fig. 14는 차량속도의 변화에 따라 샤프트 회전속도와 기어펌프의 토출 유량이 달라짐을 알 수 있다. 차량이 저속주행 시 타이어나 노면 사이의 마찰력이 커져 큰 조타력이 필요하게 되고 그에 따라 토출유량을 많게 하여 실린더 내의 랙바를 이동시킴으로써 조타력을 보조해준다. 또한 고속주행 시 타이어나 노면의 마찰력이 작아지게 되어 안정된 조타감을 주기 위해 토출유량을 적게 하여 입력됨으로써 조타감이 무겁게 된다. 이는 최종적으로 주행안정성을 달성하는 결과임을 나타낸다.

이러한 결과는 향후 차량속도 및 조향각속도의 함수인 기어펌프의 토출 유량을 최적의 안정된 조타력 제공을 위한 기어펌프의 유량 제어로직에 활용될 수 있다.

#### 4. 결론

EHPS 조향계 구성부품 모델링을 완성하였고, 본 연구에서 제안하는 Multi-domain 모델링 기반 시스템 해석 및 제어로직 설계방법은 안정된 EHPS 구동과 스티어링을 위한 기어펌프 공급유량과 BLDC 모터의 제어인자 값의 관계를 제공함으로써 스티어링 개발 초기단계에서 시행착오를 줄이고 완성도 높은 EHPS 개발 업무를 수행하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

향후 EHPS 탑재 차량모델과 제어 알고리즘을 연계하여 성능평가를 수행하고, 주행시나리오별 제어 알고리즘을 검증하고 개선하고자한다.

#### References

[1] Zhi Ming Li, J. M. Lee, S. H. Park, J. S. Kim, "Study on a New Power Steering Based on Electro Hydrostaic Actuators", The Korean Society of Automotive

Engineers, pp. 110-115, 2011

[2] Kuo Jao Huang, Chih Chieh Chen, "Kinematic Displacement Optimization of External Helical Gear Pumps", Chung Hua Journal of Science and Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 23-28, 2008

[3] Stefán Baldursson, "BLDC Motor Modelling and Control - A Matlab/Simulink Implementation", Master thesis work by Stefan Baldursson, May 2005.

[4] WANG Hao, DING Run-tao, LI Zhi-jie, ZHOU Yan, JIAO Yang, "Simulation of Electro-Hydraulic Power Steering System", Journal of Tianjin University, Vol 41, No 5, 2008

[5] LMS Imagine. AMESim ver10 Help File.

#### 김 지 혜(Ji-Hye Kim)

[준회원]



- 2011년 2월 : 공주대학교 천안 공과대학 기계공학 (공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 공주대 대학원 기계공학 (석사 재학 중)

<관심분야>

지능형제어시스템, 메카트로닉스

#### 김 성 관(Sung-Gaun Kim)

[정회원]



- 1992년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학사)
- 1995년 8월 : KAIST 자동차 및 설계공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : GIST 기전공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>

지능형제어시스템, 메카트로닉스, 로봇틱스, 분자동역학