

하이브리드 자동차 구동 특성 분석을 위한 HIL 방식의 구현

Implementation of HIL Method to Analyze Driving Characteristic of Hybrid Electric Vehicle

오성철*

Sung Chul Oh*

요 약

HIL(Hardware-in-the-Loop) 개념을 적용하면 하이브리드 자동차용 부품의 자동차 환경에서의 특성을 부품을 차량에 장착하지 않고도 평가 할 수 있게 된다. 본 논문에서는 특정 전동기를 하이브리드 자동차용 전동기로 사용하였을 경우 자동차의 구동 특성을 분석할 수 있는 HIL 방식을 구현하기 위한 부품 특성 시험, 구동특성 시뮬레이션, 장치 구성 방법을 설명한다. 시험장치는 자동차 시뮬레이터, 부하장치로 구성되며 시뮬레이션에서 사용된 차량제어기를 직접 차량제어기로 사용하게 된다. 부하장치는 차량의 동적 특성을 모의하게 된다. 특히 기존의 차량의 관성을 모의하기 위한 기계적 관성부하를 사용하지 않고 부하장치를 능동적으로 제어 하여 차량에 적용되었을 경우의 전동기 특성을 구할 수 있다. 시험 전동기가 병렬방식 하이브리드 자동차에 적용되었을 경우의 전동기의 실제 특성을 구할 수 있다. 제안된 방식은 하이브리드 자동차의 구동 특성을 교육하기 위한 교육매체로 사용 될 수 있다.

Key Words : HIL, Vehicle Simulator, Motor dynamometer

ABSTRACT

By adopting HIL(Hardware-in-the-Loop), component characteristics in vehicle environment can be obtained without implementing component in the vehicle. In this paper, when specific motor is adopted as traction motor in hybrid electric vehicle HIL implementation procedures are explained. In order to implement HIL method motor testing, vehicle performance simulator and load characteristic are explained. Vehicle controller used in simulator is directly uploaded in real controller. Especially as a load dynamometer actively controlled motor system is used without connecting conventional mechanical inertia. Motor characteristics are obtained using HIL implementation when test motor is used as a traction motor for parallel hybrid electric vehicle. Proposed method can be used as experimental equipment to educate driving characteristics of hybrid electric vehicle.

* 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부(scoh@kut.ac.kr)

제1저자 (First Author) : 오성철

교신저자 : 오성철

접수일자 : 2011년 11월 15일

수정일자 : 2011년 12월 02일

확정일자 : 2011년 12월 30일

I. 서론

지구 온난화와 화석연료감소에 대한 대응으로 최근 많은 기술자들은 효율 향상과 오염감소에 대한 기술요구를 받고 있다. 이에 대한 방안으로 Model based design을 사용하고 컴퓨터에서 이를 1차적으로 검증하고 2차적으로 실제 물리계로 검증하는 HILS(hardware in the loop simulation)에 대한 수요가 증가하고 있다. HILS를 이용하면 차량용 반도체의 핵심인 ECU(Electronic Control Unit) 개발 비용과 시간을 대폭 줄일 수 있기 때문이다. 특히 하이브리드 자동차 같이 보다 복잡한 전기 시스템[1]을 요구하는 미래형 자동차에 대한 연구가 활발해짐에 따라 HILS의 활용은 더욱 확대될 전망이다.

특히 공학교육 부분에서 HIL을 적용하게 되면 실제로 전동기를 차량에 장착하지 않고도 다양한 형태의 구동 시스템에 적용하였을 때 혹은 다양한 제어 방식을 적용하였을 때의 부품의 특성을 H/W 변동 없이 간단한 실험장치를 사용하여 분석할 수 있다.

이에, 본 논문에서는 기존의 개발된 견인용 전동기를 하이브리드 자동차에 적용하였을 경우 하이브리드 자동차의 구동 특성을 분석할 수 있는 HIL 시스템을 구현하기 위한 H/W, S/W의 구성과 적용 프로세스를 설명하고 실제 적용 하였을 경우의 사례 분석을 통하여 타당성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 하이브리드 성능 시뮬레이터의 구성에 대해서, 제 3장에서는 전동기 에너지맵을 구하기 위한 전동기 특성 시험 방법에 대하여 기술한다. 제 4장에서는 성능 분석을 위한 HIL 시험 장치의 구성에 대하여 설명한다. 제 5장에서는 시험 장치를 사용하여 시험 전동기를 장착한 차량의 구동 특성을 모의하였다.

II. 하이브리드 차량 성능 시뮬레이터의 구성

차량 개발에 있어서 시뮬레이션의 역할은 점점 중요해지고 있다. 특히 다양한 하이브리드 구동 방식이 제안되고 있으므로 새로운 구동방식의 개발을 위해서는 정확하고 유연한 시뮬레이션 툴의 개발이 필요하며 특정한 목적에 가장 적합한 방식 및 부품 개발에 사용될 수 있다.[2],[3]

차량 성능 시뮬레이션 방법 중 FWF(Forward Facing) 기법을 사용하는 차량 시뮬레이터는 운전자 모델을 포함한다. 운전자 모델은 속도 명령과 현재

속도를 고려하여 적절한 가속 페달과 브레이크 명령을 출력한다. 가속페달 명령은 엔진에서 공급되는 토크와 에너지 사용율로 변환된다. 엔진에서 공급되는 토크는 트랜스미션 모델의 입력이 되며 효율 및 기어비에 따라 환산된 토크로 변환한다. 계산된 토크는 구동 장치를 따라서 차량의 실제적인 전력의 흐름 방향으로 타이어/도로 인터페이스에서의 추진력이 될 때까지 전달된다. 차량의 가속은 $a=f/m_{eff}$ 식에 의해서 계산된다. 여기서 m_{eff} 는 구동 장치의 회전 관성 모멘트이다.

그림 1은 병렬 하이브리드 방식에 대한 블록도이다. 운전자의 출력은 바퀴에 대한 토크 명령이며 이는 가속 페달이나 브레이크 명령에 비례한다. 이 요구가 차량의 컨트롤러에 전달되면 여기서 구동 장치의 부품이 어떻게 동작해야 하는 지 결정한다. 즉 다른 에너지원 사이의 조합 비율과 언제, 어떻게 엔진을 시동하거나 기어를 바꾸어야 할 지를 결정한다. 차량 컨트롤러는 각 부품에 특정한 명령을 보낸다. 즉, 전동기에는 토크 명령, 엔진에는 가속 페달 명령, 클러치의 탈착, 바퀴에 대한 기계적 제동 등이다.

그 다음 엔진으로부터의 기계적 출력과 전동기로부터 배터리를 통한 전기적 출력이 합해진다. 즉 전기적 출력과 기계적 출력 모두가 차량을 추진하는 데 사용된다.

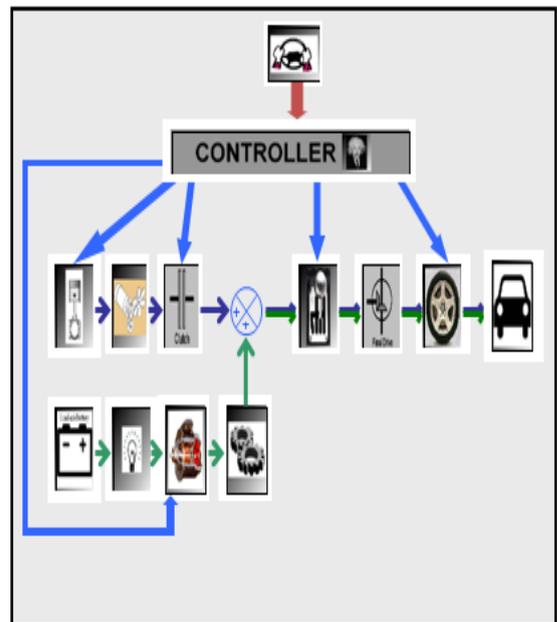


그림 1. 병렬 방식의 드라이브 트레인
Fig. 1. Parallel drive train

각 부품의 제어를 담당하는 차량컨트롤러는 모든

방식에 공통인 구조를 가지고 있다. 가속 페달과 부품 모델로부터의 정보(센서)를 사용하여 시스템의 제약조건(예: 엔진의 사용 가능한 최대 토크)을 평가한다. 이를 참조하여 최적화된 제어 방식 즉, 연비 및 배출 가스를 최소화 할 수 있는 제어방식을 정의한다.

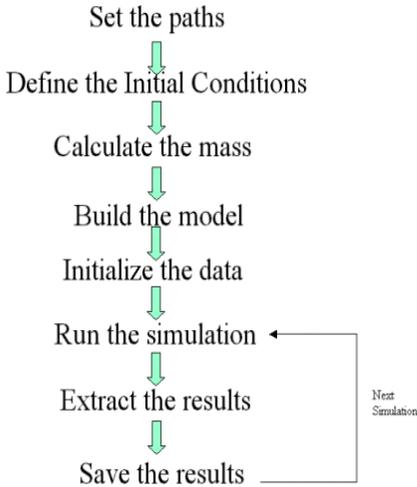


그림 2. 자동차 성능 시뮬레이션 흐름도
Fig. 2. Flow chart for vehicle performance simulation

주어진 운전 패턴에 따른 차량에 필요한 추력 명령 값이 결정되면 모든 회전 부품의 관성을 고려하여 전동기의 회전자에 전달되는 등가적인 관성을 고려한 질량을 구하며 이에 따른 전동기의 토크 명령값을 Forward Facing 방식에 의하여 구한다. 또한 각 부품은 주어진 속도, 토크에 따른 에너지 맵에 의해서 손실 성분을 구하며 손실 성분을 고려한 각 부품의 동작점이 결정된다. 흐름도는 그림2와 같다.

II. 전동기 특성 시험

1. 전동기 정격

제조사가 제시한 대상 전동기의 정격은 표 1과 같다. 또한, 효율을 비롯한 각종 특성들은 시험을 통하여 구해지게 된다.

표 1, 시험 전동기 정격
Table 1. Name plate specification of test motor

연속정격(KW)	3.2
정격속도(RPM)	300
정격토크(Nm)	102
냉각방식	공냉식
최소/최대 공극(mm)	1.8/6
전동기 지름(mm)	31.5
전동기 폭(mm)	70
무게(kg)	20
형식	Brushless DC motor

2. 시험 장치의 구성

전동기의 4상한 운전 특성을 시험하기 위한 시험 장치는 다음 사항을 고려하여 구성되었다.[4]

- 1) 양방향 직류 전원 장치 : 역행시 전류는 전원에서 전동기로 회생 시는 전동기에 전원으로 흐를 수 있어야 한다..
- 2) 부하장치(다이내모미터) : 전동기의 부하 장치는 전동기의 속도 및 토크 방향에 따라 능동적인 변동이 가능하여야 한다. 즉, 속도와 방향이 원하는 운전 상한에 따라 제어 되어야 한다.
- 3) 시험 데이터는 자동으로 수집되어야 한다.

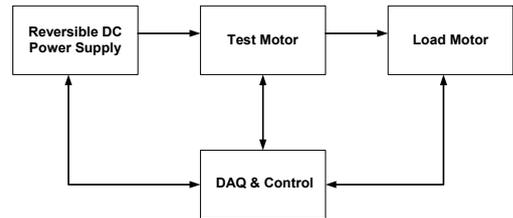


그림 3. 전동기 시험 장치의 구성
Figure 3. Block diagram of motor test bed

전동기의 속도 및 토크에 따른 각 운전 상한(1, 4 상한)은 표2 와 같이 정의된다. 특성 시험을 위해서 시험 전동기와 부하 전동기는 표2에 따라 운전되어야 한다. 실제 시험에서 시험 전동기는 토크 모드로 부하전동기는 속도 모드로 동작하였다.

3. 전동기 모델을 위한 에너지 맵

그림 4는 제작사 사양에 의한 연속, 단시간 최대 토크를 나타내고 있다. 이때 공극은 운전 조건에 따라 변하는 것으로 가정하였다. 실험에서 구한 각 운전점(속도, 토크)에 대한 효율은 그림 5와 같다.

표 2. 1-4상한 운전 모드
Table 2. 1st-4th quadrant operating mode

1st quadrant Torque: Positive Rotation : Forward Motor mode : THR Motor direction : FWD Load direction : FWD	4th quadrant Torque : Negative Rotation : Forward Motor mode: REG Motor direction: FWD Load direction: FWD
---	---

전동기의 효율은 매 13Nm, 100 rpm 마다 측정하였다. 중간점은 보간법을 사용하여 구하였다. 실험에서 최대 토오크 값을 확인 할 수 있다.

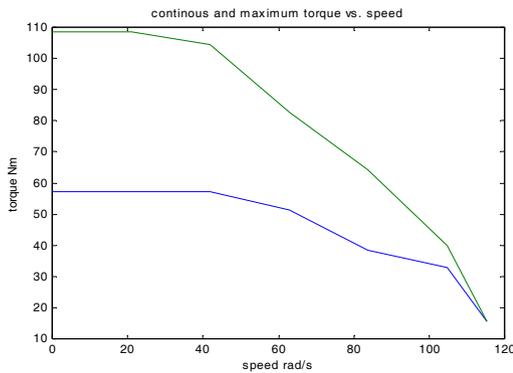


그림 4. 전동기 단시간, 연속 최대 토오크
Figure 4. Block diagram of motor test bed

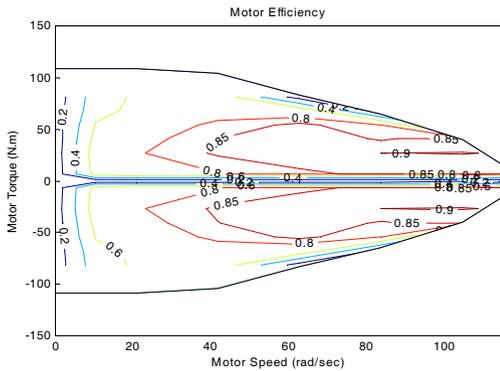


그림 5. 측정된 전동기 에너지 맵
Figure 5. Measured motor energy map

실험에서 구한 에너지 맵은 차량 성능 시뮬레이션에서 주어진 전동기의 동작점(토오크, 속도)에 따른 손실을 계산하는데 사용된다.

III. HIL 구동 장치의 구성

주행 모드 시험은 모두 차량단위로 이루어지게 되어 있다. 실제로 부품단위(전동기 제어기)로 주행 모드 시험을 하기 위해서는 차량의 성능은 s/w로 시뮬레이션하며 시뮬레이터에서의 명령을 실제 견인 전동기와 부하 전동기에 입력하여 실제 차량을 시뮬레이션하는 방법을 사용할 수 있다.[5]

차량 시뮬레이터에는 실제 차량에 관련된 정보(차량 무게, 주행저항, 타이어 반경)가 저장되어 있다. 또한 차량 시뮬레이터는 차량 속도 제어를 위한 PI 제어기로 구성되어 있다. 주행 모드 운전 때 따른 기준 속도와 부하 전동기의 속도를 비교하여 PI제어기를 거친 후 토오크 명령을 만든다. 이 경우 직접 구동 방식의 전동기는 4 바퀴 시스템의 한 바퀴를 의미한다. 주어진 토오크 명령에 따라 차량의 정보를 바탕으로 차량 가속도를 구하며 이로부터 차량 속도를 구한다. 구한 차량 속도에 해당하는 명령이 부하 전동기에 입력된다. 부하 전동기는 속도 제어 모드로 구동하여 속도 명령에 따라 구동하게 된다. 이로써 실제 차량의 운전 조건을 모의 할 수 있게 되며 주어진 주행 모드로 운전했을 때 전동기 및 제어기의 운전상태를 직접 측정할 수 있게 된다. 그림 9는 제안된 시험 장치의 신호 흐름도이다.

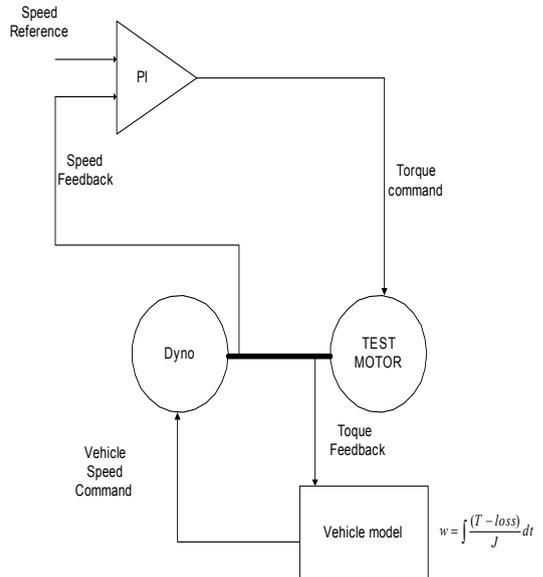


그림 6. 주행 모드 시험을 위한 신호 흐름도
Fig. 6 Signal flow diagram for driving cycle test

그림 7은 HIL 적용을 위한 장치 구성을 보여 준다. 시스템 모델링 부분은 그림 6의 속도 제어기와 차량 모델을 포함한다. 즉 시험 전동기

의 토크 측정값으로부터 차량의 정보를 반영하고 또한 미리 입력된 전동기 모델(에너지 맵)으로부터 손실을 계산하며 이에 필요한 전동기의 속도, 토크를 연산한다.

HIL Control 시스템 모델링에서 사용한 속도 제어기와 차량 모델이 업로드 되어 있어서 실시간으로 전동기 및 부하장치에 필요한 토크, 속도를 연산한다. 커맨드인터페이스를 통하여 제어기와 전동기, 부하장치와 연결된다. 실제 구성에서 Real Time Processor로는 DSpace Board가 사용되었다.

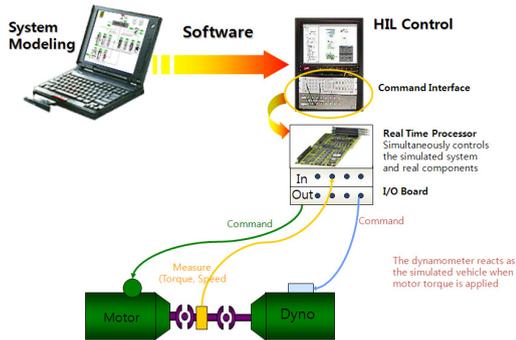


그림 7. HIL 장치의 구성
Fig 7. Implementation of HIL

기존의 HIL 구현을 위해서는 차량의 관성 모멘트를 모의하기 위한 관성부하를 사용해야 하지만 다이내미미터를 속도 모드 구동 전동기를 토크 모드 운전하게 되면 설치할 필요가 없어서 장치를 간단히 구성할 수 있다. 실제 구성에서 부하장치는 그림 8과 같은 속도, 토크 직접 제어가 가능한 벡터 제어형 인버터로 제어되는 유도 전동기로 구성되었다. 전동기와 부하장치의 커플링에 속도와 토크를 측정하기 위한 센서가 설치되어 있다.



그림 8. 부하 장치의 구성
Fig 8. Implementation of dynamometer

IV. 차량성능 시뮬레이션

그림 15와 같은 병렬 방식의 구동 시스템에 대한 HIL 시뮬레이션을 수행하였다. 사용된 시험 전동기는 전력용량이 작고 고속에서의 토크가 상대적으로 작기 때문에 차량에 충분한 전력을 공급하지 못한다. 그러므로 구동시스템이 형태는 시험전동기 2대가 앞바퀴를 각각 구동하고 대용량의 일반 전동기 1대가 뒷바퀴를 구동하는 형태로 되어 있다. 이 방식으로 감속시 회생 제동이 가능하고 차량의 에너지 원으로도 2차 전지와 연료전지를 사용하였다.

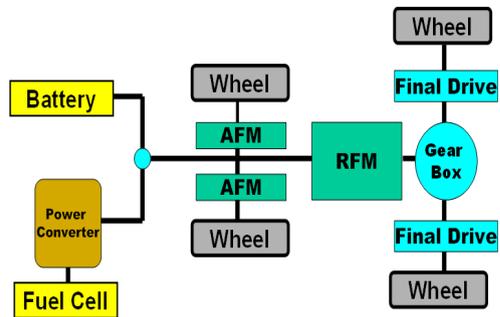


그림 9. 병렬 하이브리드 구동 시스템
Figure 9. Parallel hybrid drivetrain

차량의 제원은 표 3과 같다.

표 3. 차량 및 부품 제원
Table 3. Vehicle and component specification

Front wheel drive	2 x AFM(3.7KW)
Rear wheel drive	Radial flux motor (40KW)
Torque converter ratio	2

그림 9의 차량이 Japan 10 모드로 운전하였을 때 모의된 시험 전동기에서 측정된 특성은 그림 10과 같다. 실제 HIL 적용에서는 그림 8의 부하장치를 이용하여 두 대의 전동기 대신 1대의 전동기가 사용되었으며 차량모델의 입력에는 이를 두 배로 하여 사용하였다. 제어 변수가 최적화 되어 있지 않아서 토크에 진동을 발생함을 관찰할 수 있었다.

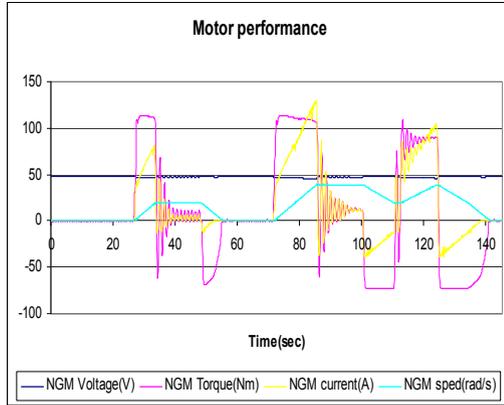


그림 10. 전동기 실험 특성(토크, 속도)
Fig. 10. Motor characteristics(torque, speed)

V. 결론

본 논문에서는 시험 전동기가 하이브리드 자동차의 구동 전동기로 사용되었을 때의 특성을 차량에 직접 장착하지 않고 시험 할 수 있는 HIL 방식을 구현하기 위한 절차를 설명하였다. 즉, 전동기 모델을 구하기 위한 부품 시험, HIL 장치의 H/W, S/W 구성 방식 등을 설명하였고 실제 시뮬레이션을 수행하여 결과를 도출하였다.

기존의 하이브리드 자동차 부품 특성 시험에서 HIL 적용하기 위해서는 부하장치로서 차량의 관성 부하를 모의하기 위한 기계적 관성 부하를 실제 연결하여 사용하였다. 그러나 제안된 방식을 사용하게 되면 기계적 관성 부하를 사용하지 않고 부하장치와 전동기의 운동 모드를 조정하여 같은 효과를 얻을 수 있어서 실험 장치를 간단하게 구성할 수 있다.

특히 제안된 방식을 사용하면 실제로 전동기를 차량에 장착하지 않고도 다양한 형태의 구동 시스템에 적용하였을 때 혹은 다양한 제어방식을 적용하였을 때의 부품의 특성을 분석할 수 있다. 특히 다양한 구동방식 및 제어 방식을 H/W를 바꾸지 않고 S/W 만으로 바꿀 수 있어서 다양한 특성을 실험할 수 있는 교육매체로서의 사용이 기대된다.

감사의 글

이 논문은 한국기술교육대학교 교육연구진흥비지원 프로그램의 지원에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] Caricchi, F. Crescimbin, F. Capponi and L. Solero, "Permanent-magnet, direct-drive, starter/alternator machine with weakened flux linkage for constant-power operation over extremely wide speed range", *Proc. IEEE 6th Industry Applications Society Annual Meeting, Vol.3, pp.1626-1633*, Oct. 2001
- [2] K. Wipke, M. Cuddy and S. Burch, "ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach", *IEEE Trans. Veh. Tech., Vol. 48, No. 6, pp.1751 - 1761*, Nov. 1999
- [3] A. Rousseau, S. Pagerit, G. Monnet and A. Feng, "The New PNGV System Analysis Toolkit PSAT V. 4.1- Evolution and Improvement", *Future Transportation Technology Conference*, 2001
- [4] S. Oh and A. Emadi, "Test and Simulation of Axial Flux Motor Characteristics for Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Trans. Veh. Tech., Vol. 53, No. 3, pp. 912-919*, May 2004,
- [5] S. Oh, "Evaluation of Motor Characteristics for Hybrid Electric Vehicles Using the Hardware-in-the-Loop Concept", *IEEE Trans. on Veh. Tech., Vol. 54, No.3, pp. 817-824*, May, 2005,

오 성 철 (Sung Chul Oh)

정희원



1980년 2월 : 서울대학교 전기공학
과(공학사)

1982년 2월 : 서울대학교 대학원
전기공학과(공학석사)

1989년 5월 : Univ. of Florida 전
기공학과(공학박사)

1982년 - 1994년 : 한국전기연구원

선임연구원

1994년 9월 - 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통
신 공학부 교수

<관심분야> 하이브리드/전기자동차 구동장치 설계,
차량용 전력변환장치,