

전기자동차 구동시스템에서의 유도전동기의 최대효율제어 효과(II)

(An Effect of Maximizing Efficiency Control of Induction Motor
for Electric Vehicle Drive Systems(II))

최옥돈* · 김동희** · 노채균**

(Uk Don Choi · Dong Hee Kim · Chae Gyun Ro)

요 약

본 논문에서는 유도전동기의 손실을 고려한 최대 효율제어기법을 전기자동차 구동시스템에 적용하고, 그 효과를 검증하기 위해 최대 효율제어를 적용하였을 때와 기존의 일정자속 제어방식을 적용하였을 경우에 대해 각각 미국의 FTP-72와 E.P.A의 HWFET(Highway Fuel Efficiency Test)에서 정한 시내 주행모드(LA-4 Mode)와 고속 주행 모드에서의 주행시험을 통해 그 결과를 비교 제시하였다. 또한 시험을 통해 전기자동차의 주행거리 증대를 위해 최대 효율제어 적용시 효과를 검토하였다.

Abstract

This paper presents the test result of electric vehicle to evaluate a point of difference between maximizing efficiency control and conventional constant flux control(CFC) strategy of induction motor driver. A proposed maximizing efficiency control(MEC) strategy is compared with the constant flux control strategy. The comparison test is carried out with two types of FTP-72 and E.P.A driving schedule. This research shown the effectiveness of an enlargement of driving distance of the electric vehicle when a maximizing efficiency control strategy adopted.

1. 서 론

전기자동차는 최근 문제가 되고 있는 대기오염으로 인한 환경문제를 해결할 수 있는 차세대 자동차로 하이브리드 전기자동차와 함께 실용화를 위해 많은 연구가 추진되고 있다. 에너지 효율 면에서 검토해보면, 원유에서부터 차량구동에 필요한 전기에너지를 얻기까지의 계통효율이 내연기관이 14% 인데 비

해 전기자동차는 21%로 높고, 충전시 심야 잉여전력을 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 내연기관에 비해 대기오염, 소음공해, 진동이 없고 구조가 간단하고, 조작성이 용이하며 수명이 긴 장점을 가지고 있다.[1] 전기자동차 구동시스템은 전동기, 감속기, 차동기어 등으로 구성되며, 견인전동기의 요구조건은 일반 산업용 전동기와는 달리 높은 순시 최대 토크, 견고성, 고속 운전, 저소음, 소형, 경량화, 제이의 편의성, 저 가격 등의 조건을 만족해야 한다. 구동시스템은 직류전동기, 영구자석전동기나 유도전동기 구동방식, 스위치드 리액턴스 모터방식이 있으나, 직류전동기는 고속

*정회원 : 현대중공업 기전연구소 책임연구원
**정회원 : 영남대 공대 전자정보공학부 교수
접수일자 : 2000년 8월 31일

운전이 불가능하고, 유지 보수의 어려움이 있으며, 영구자석전동기는 고효율인 반면 제자제어가 어렵고, 피크 부하에 약하며 고가로 인해 전기자동차 브다는 발전과 구동에서 효율이 뛰어나 하이브리드 자동차에 주로 적용되고 있다 이에 비해 유도전동기는 견고하며 신뢰성이 높고 고속운전과 최대 토크 특성이 우수하며 넓은 범위의 정출력 제어가 용이하며, 가격이 저렴하여 전기자동차에 많이 사용되고 있다.[4],[5],[7],[8] 전기자동차 구동시스템의 요구사항은 가속성능, 최고속도, 등판능력 등 여러 가지가 있으나, 그 중 가장 중요한 제어요소로 차량이 탑재한 제한된 전지의 용량에 의해 구동되므로 무엇보다도 일회 충전으로 주행 가능한 거리를 증대시키기 위한 제어방법이다. 특히 전기자동차 구동시스템의 전동기 부하는 가속시와 경사로 주행을 제외한 평탄로 주행시에는 경부하상태로, 이 영역에서의 효율 향상이 주행거리 증대를 가져온다. 참고문헌[1]에서는 전기자동차 구동시스템 구성과 최대 효율 운전 제어 원리, 최대 효율 제어 조건을 제시하고, 기존의 일정 자속 제어 방식과 제안된 최대 효율 제어 방식을 적용할 경우에 대해 모의시험을 통해 경부하시와 정격부하시의 전압특성과 전동기 입력전력을 비교 제시하였다. 본 연구에서는 제안된 최대효율제어 방법을 적용해 전기자동차와 샤시디안으로 미국의 U.S.FTP (Federal Test Procedure)-72 cycle (LA-4 cycle) 즉, UDDS(Urban Dynamometer Driving Schedule) 과 EPA(Environmental Protection Agency)의 HWFET (Highway Fuel Efficiency Test)에 의한 시험을 통해 주행거리 증대효과를 시험을 통해 기존방식과 비교하고 그 결과를 제시하고자 한다.[4][12]

2. 시스템 구성

2.1 전기자동차용 제어기

전기자동차용 제어기의 구성은 그림 1과 같이 전동기 구동장치인 인버터, 추진용 전지를 4시간이내 충전 가능한 6.6kW 내장형 충전기, 100A급 DC/DC 컨버터, 전지의 모듈별 전압과 전류측정에 의한 잔존량 연산, 충 방전시 전지 온도관리와 충전기 제어기능을 가진 전지관리장치, 이밖에 차량의 인터페이스 부분과 보조장치로는 전자식 조향장치와 공조 시스템 등이다.

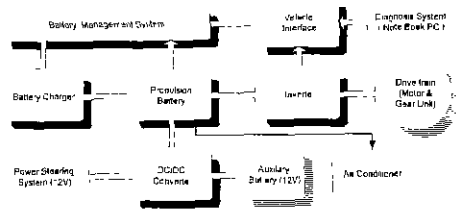


그림 1. 전기자동차용 제어기 구성
Fig. 1. Configuration of Controller for EV

2.2 구동장치의 구성

전기자동차용 전동기 제어시스템은 40MHz속도의 DSP TMS320C32와 AD, DA컨버터, NVRAM, 16비트 RAM, iSPLSi1048, CAN통신을 위한 AN8257, MAX232등으로 구성되어 있으며, 인버터는 IGBT (600V/450A)소자와 직접벡터제어 방식을 채택하였다. 제어기는 차량의 가속, 제동, 변속지령(PNRDL)에 따라 동작되며 동작상태는 RS232S통신을 통해 PC로 모니터링할 수 있고 기록이 가능하도록 구성되어 있다. 그림 2는 구동장치의 구성을 나타내며, 샤시 다이아모는 차량에 부하를 인가하여 주행성능을 시험하기 위한 것이다. 그림 3은 개발된 제어기의 사진이다.

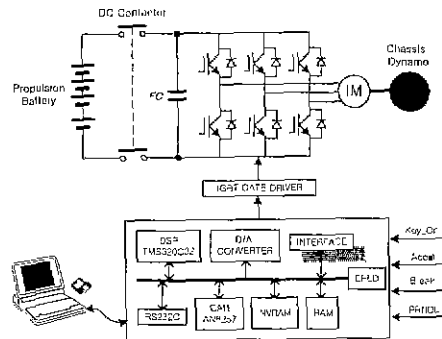


그림 2. 전기자동차용 구동장치의 구성
Fig. 2. Diagram of Driving System for EV

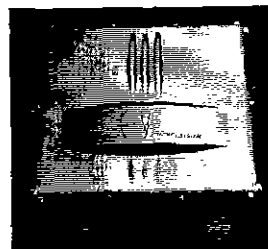


그림 3. 제어기 사진
Fig. 3. A View of Controller

2.3 전기자동차의 구성

본 연구에서 제작한 전기자동차의 구성은 그림 4와 같다. 전동기와 감속기, 추진용 전지팩과 전지관리장치(BMS)는 Battery Tray와 함께 차량의 내부에 장착되어 있다. 또한 BMS와 인버터의 차량운행 관련 정보는 PC에 저장할 수 있도록 구성되어 있다.

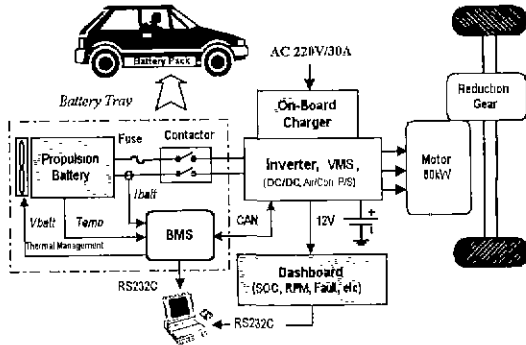


그림 4. 전기자동차 시스템 다이어그램
Fig. 4. System Diagram of Electric Vehicle

3. 모의시험

모의시험에서 적용한 전기자동차용 주행패턴으로는 미국의 FPT-72(UDDS) 즉, 시내 주행모드(LA-4 mode)와 EPA(HWFET)인 고속 주행모드의 패턴을 사용하였으며 각각 그림 5와 그림 6과 같다. 구동시스템은 전동기의 광범위한 가변속 특성을 이용하여 1단 감속기와 차동기어로 조합된 GDU(Gear Differential Unit)에 전동기의 축이 직결한 형태로 구성되어 있다. 표1은 전기자동차 및 전지 사양이며, 모의시험을 위한 관련 수식을 정리하면 식(1)~식(6)과 같다. 전기자동차의 주행저항은 (1)식으로 구해진다.

$$Fd = Frol + Fair + Facc \quad (1)$$

이때, 굴림저항 $Frol$ 는

$$Frol = \mu \times mt \times g \quad (2)$$

mt : 자동차무게 [kg], μ : 굴림마찰저항
공기저항(Aerodynamic drag) 은

$$Fair = \rho \times Cd \times S \times \frac{V^2}{2} \quad (3)$$

ρ : 공기밀도, Cd : 공기저항계수, S : 총 투영

면적 [m^2], V : 속도 [m/sec] 가속저항은

$$Facc = (mt + mr)\alpha \quad (4)$$

mr : 회전관성중량[kg], α : 가속도 [m/sec^2].

식 (5)는 자동차가 경사면을 주행할 때의 등판저항을 나타낸다

$$Fg = mt \times g \times \sin \theta \quad (5)$$

g : 중력가속도 [m/sec^2], θ : 경사각[rad]

주행중 전동기에 필요한 출력은 (6)식으로 계산된다.

$$Pm = Fd \times \frac{V}{\eta t} \quad (6)$$

ηt : 감속기 효율

4. 시험결과

본 연구에서 적용한 전기자동차의 시험에서 그림 7은 그림 5의 시내 주행모드 패턴에 따른 일정자속제어와 최대 효율제어시의 전압특성이고 그림 8은 그림 6의 고속 주행모드 패턴에서 일정 자속제어와 최대 효율제어 시 전동기 입력전압 측정 결과를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 효율제어가 백터제어에 비해 전동기의 입력전압이 현저히 적고, 그림 9와 그림 10에서 비교한 결과 최대 효율제어가 백터제어에 비해 전력소모율이 적게 되어 동일조건에서의 주행거리의 증대가 됨을 볼 수 있다.

표 1. 전기자동차 및 전지의 사양

전기자동차 사양		
전지포함 차량무게(mt)	[kg]	1,622
전면투영면적(S)	[m^2]	1.645
굴림저항 계수(μ)		0.011
공기저항계수(Cd)		9.0e-6
타이어 반경(rt)	[m]	0.29
감속기 효율(ηt)	[%]	95
감속기어 비(Kg)	[rpm]	8.3:1
전지 사양		
공칭전압	[V]	288
정격용량	[kWh]	28
무게	[kg]	528
전지내부저항	[$m\Omega$]	0.9

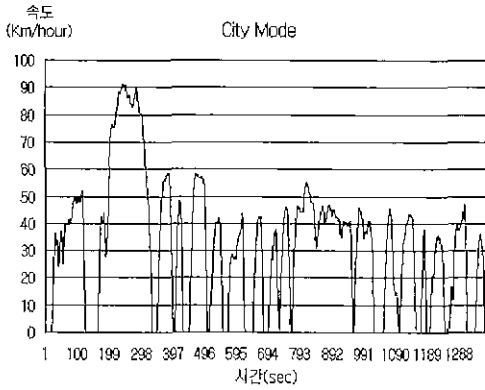


그림 5. 시내 주행모드
Fig. 5. City Driving Mode (UDDS)

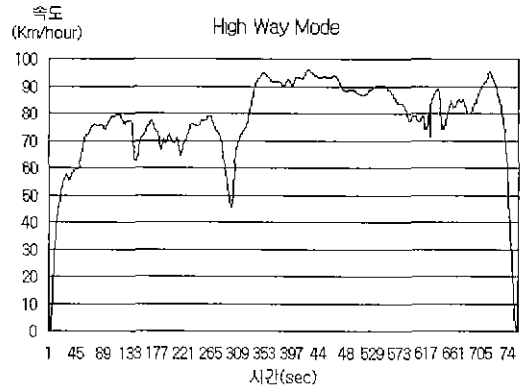
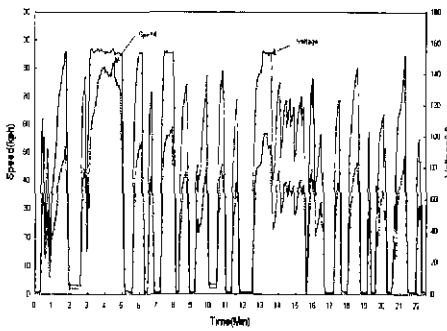
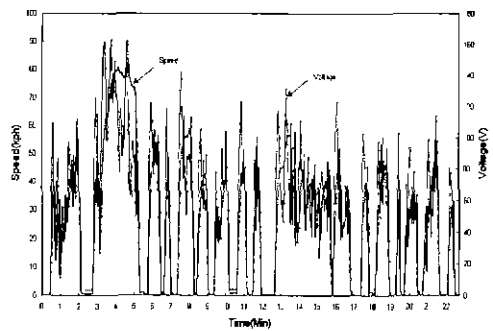


그림 6. 고속 주행모드
Fig. 6. Highway Driving Mode (HWFET)

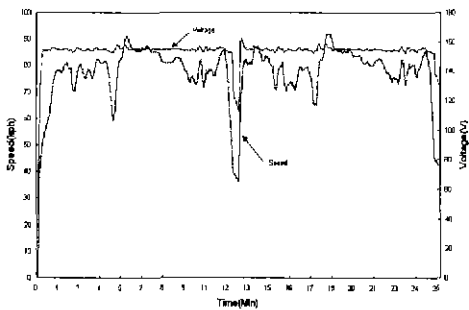


(a) 일정 속도제어 시
(a) At CFC with UDDS

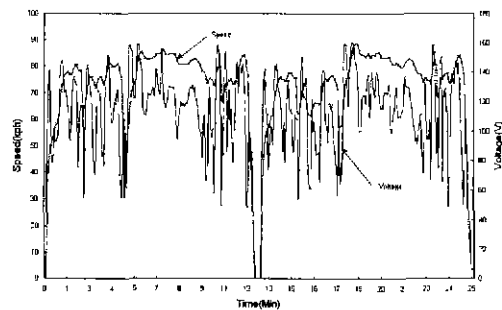


(b) 최대 효율제어 시
(b) At MEC with UDDS

그림 7. 시내주행모드 시 전압 특성
Fig. 7. Voltage Characteristic of UDDS

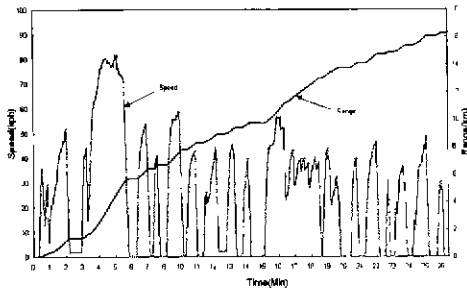


(a) 일정 속도제어 시
(a) At CFC with HWFET

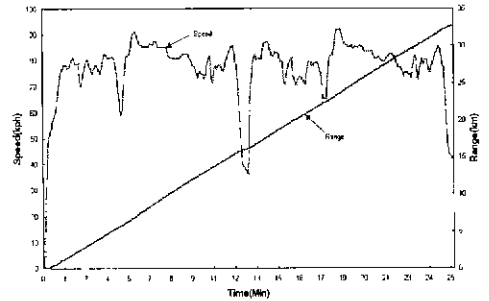


(b) 최대 효율제어 시
(b) At MEC with HWFET

그림 8. 고속 주행모드 시 전압 특성
Fig. 8. Voltage Characteristic of HWFET

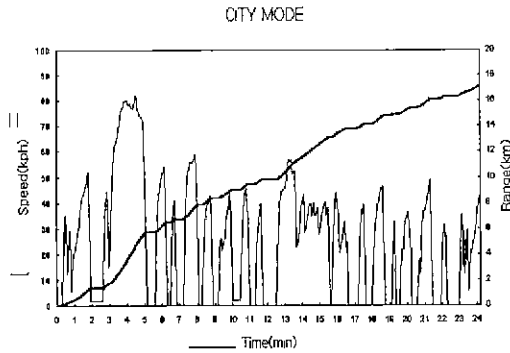


(a) 시내 주행 모드 시
(a) At CFC with UDDS

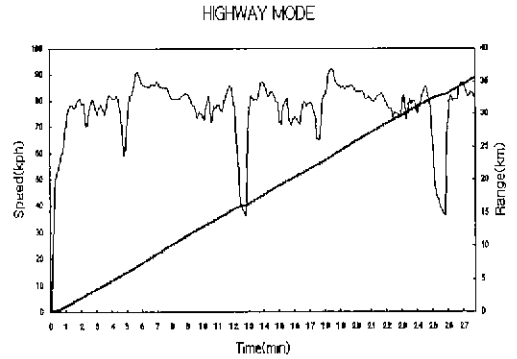


(b) 고속 주행 모드
(b) At CFC with HWFET

그림 9. 일정 자속제어 시 주행 시험결과
Fig. 9. Driving Test Result of CFC



(a) 시내 주행모드
(a) At MEC with UDDS



(b) 고속 주행모드
(b) At MEC with HWFET

그림 10. 최대 효율제어의 주행 시험결과
Fig. 10. Driving Test Result of Maximum Efficiency Control

본 연구의 시험차량은 유도전동기를 탑재한 A.S.F (Aluminum Space Frame) 경량차체구조의 새로운 개념의 전기자동차(Concept Car)와 차시 다이내모에서 그림 5와 그림 6의 주행패턴에 따라 각 모드에서 일정 자속제어 기법과 최대 효율제어 기법을 적용하여 주행 모드별 전동기 입력전압, 전력소모량 및 모드별 주행거리를 측정, 비교하였다. 그림7은 UDDS(LA-4)모드에서 일정 자속제어와 최대 효율제어시의 전동기 입력전압과 속도를 나타낸 것이며, 그림 8은 고속주행 모드에서의 결과이다. 그림 9는 일정 자속제어 시 UDDS(LA-4)모드와 고속주행 모드에서(HWFET)의 주행거리를 측정결과이고, 그림 10은 각각 최대 효율제어 시 UDDS와 HWFET 모드로 운전할 때의 주행거리를 측정한 결과이다. 그림 11

은 전기자동차와 차시다이내모를 이용한 시험광경을 나타낸 것이다.



그림 11. 전기자동차의 Chassis Dynamo 시험광경
Fig. 11. A View of Chassis Dynamo Test of EV

4. 결 론

본 연구에서는 전동기의 속도에 따라 전압모델과 전류모델에 의한 지속 추정기를 이용한 직접 벡터 제어방식을 적용하였다. 최대효율제어를 위해 온라인 방식에 의한 실시간 최적 전류비 연산방식의 최대효율제어를 실현하였다. 일반적인 벡터제어 방식인 일정 지속 제어방식과 손실을 최소화하기 위한 제안된 최적 지속 설정에 의한 최대 효율제어 방식을 비교하였다. 제안된 방식을 전기자동차에 적용할 경우 그 효과를 검증하기 위해 미국의 FTP-72와 EPA의 HWFET 규정에 따라 시내 주행모드(LA-4)와 고속 주행모드에서의 시험과 모의시험 실시하였다. 시험을 통해 제안된 방식이 전기자동차 구동시스템에서 전력소모율과 주행거리에 미치는 영향을 분석하였고, 또한 실증시험을 통해 전기자동차용 구동시스템에서의 유도전동기의 최대 효율제어 기법의 효과를 제시하였다. 시험에서 구동시스템은 회생기능을 고려하였으며, 시험조건은 전지의 S.O.C(충전상태)가 100%에서 일정 값에 달하도록 각각의 모드에서 같은 조건으로 실시하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 시내주행 모드(LA-4 mode)에서 최대효율제어 시 주행거리는 17.17km로 일정 지속제어 때의 16.3km보다 약 5% 가량 주행거리가 증가하였으며, 고속 주행모드에서는 최대효율제어 때가 36km로 일정 지속제어 시 32.5km보다 약 10%정도의 주행거리가 증가하였다.

2) 시험결과 시내주행 모드에서는 빈번한 가 감속으로 인한 회생에너지는 고속 주행때 보다 많지만 저속 즉, 정격속도 이하에서는 유도전동기의 효율이 낮아 주행거리 측면에서는 고속 주행에서 보다 주행거리의 증가량이 적음을 알 수 있었다.

3) 회생제동에 의한 주행거리 증가효과는 전지의 충전상태와 전지의 종류, 제어기의 튜닝 및 차량의 승차감을 고려한 제동력 제어 등에 따라 달라질 수 있으며, 제안된 최대 효율제어 방식을 전기자동차에 적용하고, 실차 주행모드에서의 시험을 통해 유도전동기의 최대효율제어가 전기자동차 시스템의 주행거리 증대에 미치는 효과를 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] 최옥돈, 김동희, 노채균 "전기자동차 구동시스템에서의 유도전동기의 최대효율제어 효과(1)" 조명·전기설비학회논문지 제14권 제4호, pp83-88, 2000 7.
- [2] 최옥돈 "전기자동차 추진시스템 개발" 전력전자학회지 제5권 제2호, pp27-33, 2000 4.
- [3] U.D. Choi, J.M. Lee, D.H. Kim, D.H. Lee "An Efficiency Optimized Operation of Induction Motor Drive System for Electric Vehicles" Proceedings ICPE, pp938-943, 1998
- [4] Standard of Emission Test Cycles " U.S.F.T.P-42(Federal Test Procedure or Urban Dynamometer Driving Schedule)cycle "
- [5] T. Ashigawa, et al., "An efficiency Maximizing Control Method for Induction Motor Used Electric Vehicle Drive". Transactions of IEE Japan, Vol. 116-D, No.3 March 1996.
- [6] U.D. Choi, J.R. Kwon, J.K. Kim, D.H. Kim, D.H. Lee "A High Efficiency Drive System for Electric Vehicles ", Proceeding of EVS13 Vol II pp537-443, 1996.
- [7] 電氣學會技術報告第637號 "電氣自動車に適した電動機", T. IEE Japan, Vol. 117-D, No.9, 1997.
- [8] A. Consoli, W. Cardaci, G. Scarcella, A. Testa "Efficiency Optimization Techniques in Induction Motor Drives for Electric Vehicles Application", Proceeding of EVS15, 1998.
- [9] 内藤様太郎, 武藤信義, 高木武夫, 河内芳信, "電氣自動車の性能向上を實現した交流駆動システム"日立評論, Vol.77, No.2, pp 33-38, 1995.
- [10] 高橋勲, "電氣自動車用電動機と駆動システムの現状", 電氣學會論文誌 D116巻 11號, pp1091-1092, 平成 8年.
- [11] Hironshi Shimizu " The new possibility of electric vehicles", IATSS Research Vol.17, No.2, pp24-33, 1993.
- [12] E.P.A Dynamometer Driving Schedule, "The Highway Fuel Economy Driving Schedule (U.S.E.P.A+HWFET)"

◇ 저자소개 ◇

최 옥 돈 (崔旭燾)

1955년 1월 26일생. 1983년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1995년 영남대 대학원 수료(박사). 1985년~현재 현대중공업 기전연구소 책임연구원. EV전장팀장. 1996년~현재 전력전자학회 평의원.

김 동 희 (金東熙)

1950년 11월 20일생 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 일본 Kobe대학 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장. 현재 영남대 공대 전기·전자정보공학과 교수.

노 채 균 (盧采均)

1938년 10월 7일생 1961년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1978년 영남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1982년~1983년 미국 켄터키 주립대학 교환교수. 현재 영남대 공대 전기·전자정보공학과 교수