

3개의 회전자 극을 갖는 SRM의 비교 연구

(A Study on the Comparison of SRMs with 3 Rotor Poles)

배준경* · 오석규**

(Jun-Kyung Bae · Seok-Gyu Oh)

Abstract

The SRM is a doubly salient, singly excited machine. The torque is developed by the tendency for the magnetic circuit to adopt a configuration of minimum reluctance, i.e. for the rotor to move into in line with the stator poles and to maximize the inductance of the coils excited. It is common practice to combine them into groups of poles which are excited simultaneously; for example, 8/6 SRM (8 stator poles and 6 rotor poles) for 4 phases, 6/4, 12/8 SRM for 3 phases, 4/2, 6/3 SRM for 2 phases. Small number of phases in two-phase SRMs allows more cost savings with regards to the switching devices in the converter.

The stator back irons of two phase 6/3 SRM and C-core 4/3 SRM does not experience any flux reversal as the flux is in the same direction whether phase A or B is excited. In this study, the similarities, the differences, and structural characteristics between the two SRMs was studied, The magnetic analysis also has been carried out by the finite element method analysis (FEM).

Key Words : 6/3 SRM, C-core 4/3 SRM, Flux Reversal, Structural Characteristics, FEM

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 자기저항이 최소로 하는 방향으로 작용하는 릴럭턴스 토오크를 이용하여 구동하는 전동기이다[1]. 단속적인 구동 펄스로 구동하며, 다양한 고정자극수/회전자극수의 조합이 존재한다. 고정자극수/회전자극수의 조합은 3상 6/4, 12/8, 4상 8/6인 것이 가장 일반적이다. 최근에는 더욱 다양한 고정자극수/회전자극수의 조합의 SRM과 고정자를 분리하여 자로길이를 줄이기 위한 구조도 연구되고 있다.

중소형 전동기에 SRM의 적용을 위해서는 성능과

* 주저자 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수
** 교신저자 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수
* Main author : Professor, Department of
Mechatronics Engineering, GNTECH
** Corresponding author : Professor, Department of
Mechatronics Engineering, GNTECH
Tel : 055-751-3385, Fax : 055-751-3389
E-mail : sgoh@gntech.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 11일
1차심사 : 2014년 3월 13일
심사완료 : 2014년 4월 24일

가격 경쟁력이 전제 되어야 한다. 이를 위해서는 구동 회로가 보다 간단한 형태인 단상 혹은 2상 SRM이 적당하다[2-3]. 그러나 단상SRM은 기동의 문제가 여전히 남아 있어 자기동 문제점을 해결한 2상 SRM이 많이 연구되고 있다. 지금까지의 대표적인 2상 SRM은 4/2, 6/3, 6/9, 6/10 등이 있고 최근에는 고정자를 분리하는 구조 등도 연구되고 있다[5-6].

본 연구에서는 고정자 자로에서 자속이 반전되지 않는 특성을 갖는 6/3 SRM과 이와 유사한 자기적 구조를 갖는 C-core 4/3 SRM과 비교 해석하였다. 두 전동기의 자기적 유사점, 차이점, 구조적 특성, 자기 해석 등을 행하였고, 자기 해석을 위해 유한요소법 프로그램인 FLUX2D를 이용하였다.

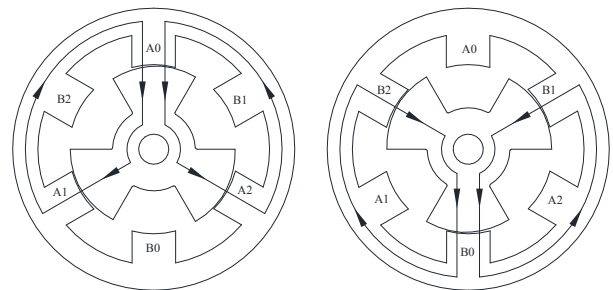
2. 3개의 회전자 극을 갖는 SRM

2.1 C-core 4/3 SRM의 구조

중소형 전동기에 적용을 위해서는 자기적 구조와 구동회로가 간단하여야 한다. 이를 만족하는 것으로 대표적인 2상SRM은 4/2 SRM과 6/3 SRM이 있다. 특히 6/3 SRM은 고정자에서 자속이 반전하지 않아 자기적 특성이 우수하고 효율이 높은 특성을 가지고 있다 [3-4].

그림 1은 2상 6/3 SRM의 자기적 구조와 자속 모양을 보여주고 있다. 일반적인 SRM은 한 상의 권선은 마주보는 고정자 극에 설치하여 자로가 고정자 전체를 이용하는 반면에 6/3 SRM은 2/3의 자로를 갖고 고정자에서 자속이 반전이 안 되는 자기적 특성을 가지고 있어 철손이 작다.

6/3 SRM은 한 상이 구동할 때 고정자 3개의 극이 동작을 하며 자속은 고정자 주극(A0)을 통해 보조극(A1, A2)에 병렬로 흐르게 된다. 그림 2는 한 상이 여자할 때 동작하는 6/3 SRM의 고정자의 두 개의 보조극을 하나의 극으로 통합한 형태를 보이고 있다. 자로는 두 개이며 점선으로 표시된 자로는 실선으로 표시된 자로보다 길고 고정자 요크의 일부구간(A1-B2, A2-B1)에 자속의 반전이 나타난다.

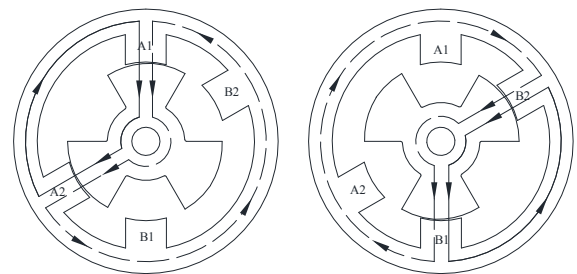


(a) A 상을 여자했을 때 (b) B 상을 여자했을 때

그림 1. 6/3 SRM의 구조와 자속 모양

Fig. 1. Structure and flux pattern of 6/3 SRM

(a) phase A excited (b) phase B excited

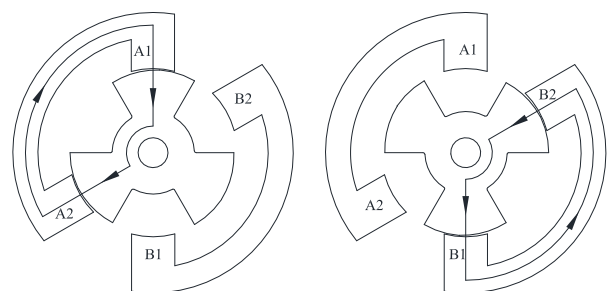


(a) A 상을 여자했을 때 (b) B 상을 여자했을 때

그림 2. 4/3 SRM의 구조와 자속 모양

Fig. 2. Structure and flux pattern of 4/3 SRM

(a) phase A excited (b) phase B excited



(a) A 상을 여자했을 때 (b) B 상을 여자했을 때

그림 3. C-core 4/3 SRM의 구조와 자속 모양

Fig. 3. Structure and flux pattern of C-core 4/3 SRM

(a) phase A excited

(b) phase B excited

그림 3은 최근에 발표된 C-core 4/3 SRM이다[6]. 그림 2에서 자로로 사용하지 않아도 되는 부분(A1과 B2 사이, A2와 B1 사이)를 제거한 형태를 하고 있다.

이 SRM은 고정자에서 짧은 자로를 갖고 한 상당 한 자로만 이용하고 있으며 회전자에서도 자로가 6/3 SRM에서는 3개의 회전자 극을 다 이용하는 반면에 C-core 4/3 SRM은 2개의 회전자 극을 이용하여 철손 부분에서 우수한 특성을 갖는다. 본 연구에서는 2상 SRM의 대표적인 전동기인 6/3 SRM과 자로를 줄인 고정자 분리 형태의 C-core 4/3 SRM에 대한 비교 해석을 하였다.

2.2 3개의 회전자극을 갖는 SRM의 유사성

기본적으로 모든 전동기는 원활한 자기동이 되어야 하는데 단상 SRM의 경우 자기동을 위해 다른 보조장치를 붙이거나 자속을 왜곡시키는 방법으로 기동을 한다. 이러한 방법은 부가적인 비용이 들고 효율이 저하되고 구동특성이 떨어지는 단점이 있다[2].

자기동이 가능한 2상 SRM은 비대칭 회전자 구조를 가짐으로써 운전성능의 손실없이 자기동이 가능하지만 단방향운전만 가능한 단점이 있다.

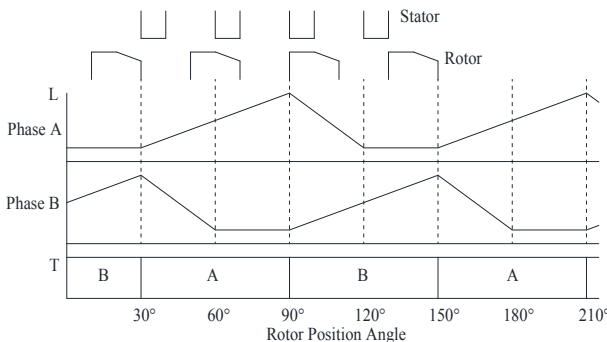


그림 4. 3개의 회전자극을 갖는 SRM의 이상적인 인덕턴스
Fig. 4. Ideal inductance of SRM with 3 rotor poles

2상 C-core 4/3과 6/3 SRM은 회전자의 구조는 동일하며 기본적인 구동원리도 유사하다. 구동원리를 설명하기 위한 이상적인 인덕턴스를 그림 4에서 보여 주고 있다[3].

SRM에서 한 상의 스위칭 주파수는 식 1과 같다[3].

$$f_{ph} = P_r \omega / 60 \quad (1)$$

여기서 P_r 은 회전자 극수이고 ω 는 회전자속도[rpm]이다. 그리고 전체 스위칭 주파수 f_s 는 다음과 같다.

$$f_s = q P_r \omega / 60 \quad (2)$$

여기서 q 는 상수이다.

또한 한 스위칭에 의해 회전자가 회전하는 각 θ_{stroke} 은

$$\theta_{stroke} = \frac{360}{q P_r} \quad (3)$$

이다. 식 (1,2,3)에서 보듯이 상수와 회전자극수에 따라 스위칭 주파수가 변함으로 고정자극수와는 상관이 없다. 따라서 2상 C-core 4/3과 6/3 SRM은 1회전에 필요한 스위칭 수는 한 상당 3회, 총 스위칭 수는 6회이며 한 스위칭당 회전자의 회전각은 60°로 같은 스위칭 특성을 보이고 있다. 이와 같이 동일한 3개의 회전자극을 갖는 회전자를 가짐으로 기본적인 구동방식은 유사함을 알 수 있다.

2.3 3개의 회전자극을 갖는 SRM의 차이점

C-core 4/3과 6/3 SRM은 동일한 회전자를 가짐으로 나타나는 기본적인 구동방식의 유사성과 고정자 모양의 차이에서 오는 차이점을 각각 가지고 있다.

6/3 SRM은 한 상이 여자할 때, 고정자에서의 자로는 전체 고정자의 자로의 2/3정도를 이용하고 있고, 자속이 반전하지 않는다. 그림 1의 고정자 요크 A1-B2와 B1-A2 사이 구간은 두 상이 각각 여자할 때 공동으로 흐르는 자로이다. C-core 4/3 SRM은 한 상이 여자할 때는 고정자에서의 자로는 6/3 SRM의 1/2정도를 이용하고, 다른 상과 상관없이 단독으로 흐른다. 그리고 6/3 SRM은 한 상이 여자할 때 인접 고정자극으로 흐르는 누설자료가 그림 5와 같이 있는 반면에 C-core 4/3 SRM은 고정자가 두 상으로 완전히 분리되었기 때문에 고정자극으로 흐르는 누설자료가 전혀 없는 구조를 갖고 있다.

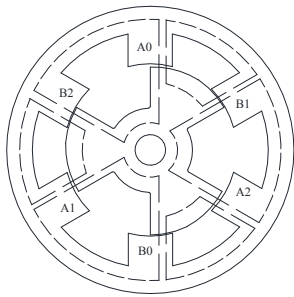


그림 5. 6/3 SRM의 누설자로
Fig. 5. Leakage flux path of 6/3 SRM

6/3 SRM은 한 상이 여자할 때 자속은 그림 1 (a)에서 보듯이 고정자의 하나의 주극(A0)을 통해 두 개의 보조극(A1, A2)을 병렬로 흐르기 때문에 보조극 넓이는 주극 넓이의 절반이면 되고, 같은 이유로 회전자 요크와 고정자의 요크 부분도 병렬자라이기 때문에 고정자 주극의 넓이의 절반이면 된다. 반면에 C-core 4/3 SRM은 고정자에서는 직렬자라이기 때문에 그림 6과 같이 고정자 요크 부분이 고정자 극과 같은 넓이를 가져야하기 때문에 칠한 부분만큼 넓혀야 한다. 그러나 회전자 요크부분은 축을 중심으로 병렬자라로 구성되기 때문에 회전자 부분은 동일하게 설계할 수 있다.

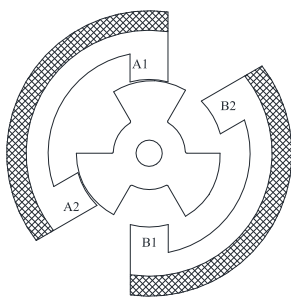


그림 6. C-core 4/3 SRM의 고정자 요크 설계
Fig. 6. Design of Stator yoke in C-core 4/3 SRM

일반적인 SRM은 한 상의 권선은 마주보는 고정자극에 감겨 있어 한 상이 여자를 할 때 회전자에 가해지는 방사방향의 힘은 상쇄된다. 그리고 SRM은 릴럭턴스 토오크를 이용하여 구동하는 전동기이므로 회전자에 작용하는 힘의 방향은 자속 방향과 무관하다.

C-core 4/3과 6/3 SRM은 한 상의 권선이 마주보는 고정자극에 감겨있지 않기 때문에 그림 7에서 보는바와 같이 한상이 여자했을 때, 회전자에 가해지는 힘은 상쇄되지 않고 남아 있어, 잘 설계되지 않은 전동기는 문제가 생길 여지가 있다. 특히 C-core 4/3 SRM은 회전자에 가해지는 방사 방향의 힘이 크을 알 수 있다. 그리고 이 전동기는 고정자가 두 부분으로 분리되어 있어 조립할 때 주의해야 한다.

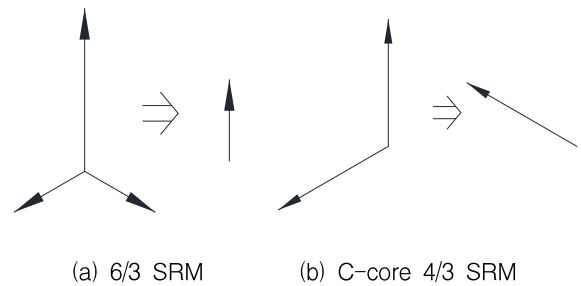


그림 7. 회전자에 가해지는 방사방향의 힘
Fig. 7. Radial force at rotor
(a) 6/3 SRM (b) C-core 4/3 SRM

3. 시뮬레이션 해석

C-core 4/3과 6/3 SRM은 자기적 구조의 유사성과 차이점을 가지고 있어 이를 비교 해석하기 위해 유한요소법인 FLUX2D로 해석하였다. 해석을 위해 회전자는 동일한 것으로 하고 고정자는 각각의 특성에 맞게 수정하여 고유의 특성을 비교할 수 있도록 하였다. 즉 6/3 SRM과 비교하여 C-core 4/3 SRM은 고정자극은 모두 6/3 SRM의 주극과 같이 하였고, 고정자 요크 부분은 그림 6과 같이 포화를 고려하여 고정자 주극과 같은 넓이를 갖도록 하였다. 그리고 동일한 기자력을 인가하도록 권선을 조정하였다.

그림 8은 한 상을 여자하였을 때 자속분포를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 두 전동기의 자속 흐름의 차이를 명확히 알 수 있다.

그림 9는 C-core 4/3과 6/3 SRM에서 각각 1A, 8A의 직류전류에 따른 한 상의 인덕턴스를 보여주고 있다. 이 그림에서 보듯이 인덕턴스 하강구간에서 C-core 4/3 SRM은 고정자극이 둘 다 같은 넓이로 되

3개의 회전자 극을 갖는 SRM의 비교 연구

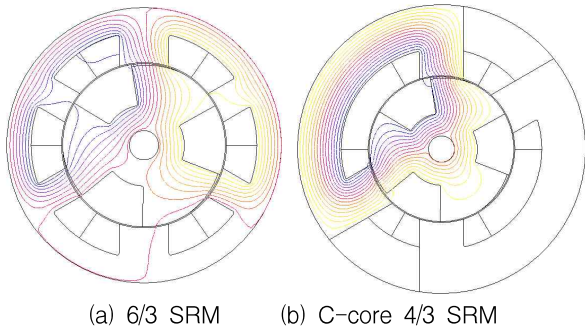
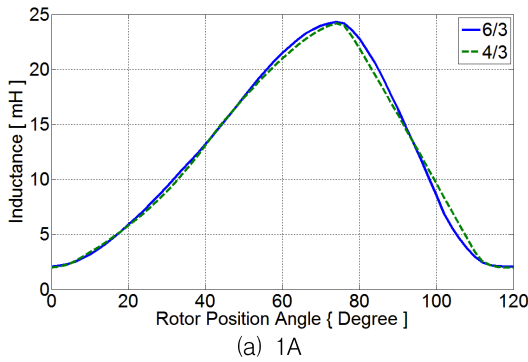


그림 8. FEM 해석에 의한 자속
Fig. 8. Fluxes by FEM analysis
(a) 6/3 SRM (b) C-core 4/3 SRM

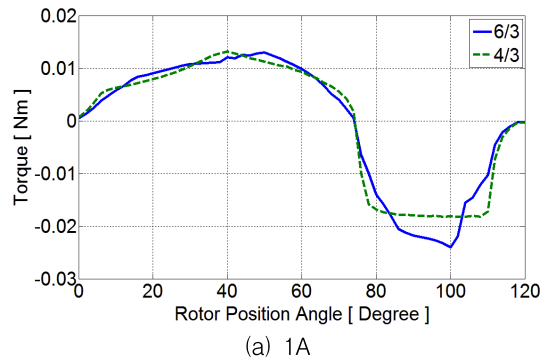
어 있어 6/3 SRM보다 완만한 경향을 보여주고 있지만 전체적으로는 유사한 모양을 보여주고 있다. 8A 경우에 자속이 포화가 되어도 거의 유사한 모양을 보여

주고 있다. 따라서 6/3 SRM의 고정자극에서 누설 자속은 크기가 작아 별 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

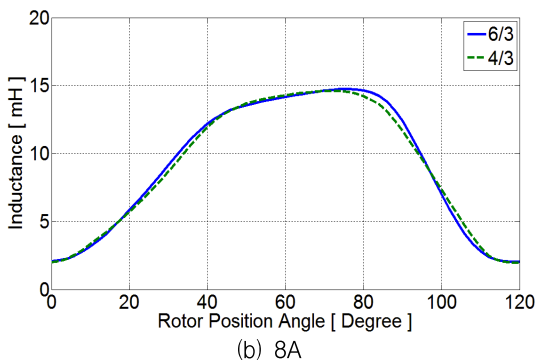
그림 10은 C-core 4/3과 6/3 SRM에서 각각 1A, 8A의 직류전류에 따른 한 상의 토크를 보여주고 있다. 그림에서 부토폰크가 발생하는 구간에서 그림 9의 인덕턴스에서 보듯이 6/3 SRM은 급격한 경사를 이루어 좁은 최대 부토폰크 구간을 만들고 C-core 4/3 SRM은 비교적 넓고 일정한 부토폰크 구간을 갖는다. 정토폰크 발생구간에서는 전류와 상관없이 거의 유사한 모양을 보여주고 있다. 특히 8A 경우에서 보듯이 고정자극과 회전자극이 거의 정렬하고 있는 부분은 거의 일치함을 볼 수 있다. 전 구간에서 차이가 나는 부분은 고정자 극부분, 특히 6/3 SRM에서 고정자의 두 보조극 넓이가 작은 것이 영향을 미쳤음을 알 수 있다.



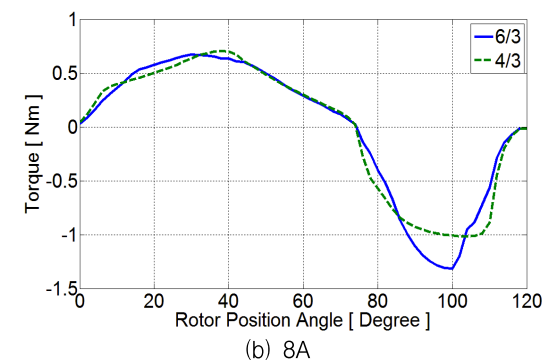
(a) 1A



(a) 1A



(b) 8A



(b) 8A

그림 9. 전류에 따른 인덕턴스 비교
Fig. 9. Comparison of inductance according to currents (a) 1A (b) 5A

그림 10. 전류에 따른 토크 비교
Fig. 10. Comparison of torque according to currents (a) 1A (b) 8A

4. 결 론

중소형 전동기로의 적용은 성능과 가격 경쟁력이 좌우한다. 2상 SRM이 이러한 중소형 전동기로 적당하며 이러한 2상 SRM에 대한 연구는 다양한 고정자극수/회전자극수의 조합으로 나타나고 있으며, 또한 고정자를 분리하는 E-core, C-core 같은 연구도 진행되고 있다.

본 연구는 2상 SRM 중 자기적 구조가 유사한 C-core 4/3과 6/3 SRM을 비교 해석하였다. 전반적인 특징을 거의 유사하나 몇 가지에서 차이를 보인다. 이와 같은 차이는 자료가 병렬(6/3 SRM)과 직렬(C-core 4/3 SRM)로 다름으로서 나타는 현상이다. 자료가 다름으로 자료의 포화를 감안한 자료의 단면적을 조정하여야 한다. 인덕턴스와 토오크 형상은 보조극의 차이로 인하여 발생하는 부분을 제외하고는 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 C-core 4/3 SRM 경우, 고정자를 분리할 하는 것은 기구적으로 복잡하고 조립에 주의해야 할 문제이다. 또한 한번 여자할 때마다 회전자에 가해지는 방사방향의 힘이 커 회전자에 진동의 원인이 됨으로 설계시 주의할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 2012년 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J.Corda and N.N.Fulton ; "Variable-speed switched reluctance motors," Proc. IEE, Vol.127, Pt-B, No.4, pp.253-265, 1980.

[2] Jun-Ho Kim, L-Jung Kim, "The Torque Characteristics Analysis of the Single-Phase Switched Reluctance Motor According to the Starting Method" JIEE, Vol.26, No.9, pp.40-46, 2012.

[3] Seok-Gyu Oh, Chee-Woo Lee, "A Study on Comparison of Two phase SRMs", JIEE, Vol.25, No.1, pp.59-63, 2011.

[4] Seok-Gyu Oh, Krishnan, R., "Two-Phase SRM with Flux-Reversal-Free Stator : Concept, Analysis, Design, and Experimental Verification", IEEE Trans. on IA, Vol.43, No.5, pp.1247 - 1257, Sep./Oct. 2007.

[5] Cheewoo Lee, Krishnan Ramu, Lobo N.S., "Novel Two-Phase Switched Reluctance Machine Using Common-Pole E-core Structure : Concept, Analysis, and Experimental Verification", IEEE Trans. on IA, Vol.45, No.2, pp.703-711, March/April 2009.

[6] Jin-Woo Ahn, "Characteristics Analysis of Short Flux-path 4/3 SRM", JICEMS, Vol. 2, No. 1, pp.40-44, 2013.

◇ 저자소개 ◇



배준경(裴焮炯)

1958년 12월 7일생. 1982년 국민대학교 전자공학과 졸업. 1984년 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1990년 동대학 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1990년~현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수.



오석규(吳錫奎)

1967년 6월 2일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994년 현대중공업 사원. 2004년 8월~2006년 2월 미국 Virginia Tech. 전기공학과 방문교수. 1998년~현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수.