

운동 부하 조절이 가능한 원형 맴돌이전류 부하 제동장치의 성능 분석

Analysis of Performance for Exercise Load Adjustable Circular Eddy Current Load Brake system

나기수*, 이응혁

G. S. Na, E. H. Lee

요 약

본 연구에서는 재활운동기기에 적합한 운동부하 조절이 가능한 영구자석형 비 접촉식 원형 브라켓 맴돌이 전류 부하 제동장치를 제안하고 성능을 실험적으로 평가하였다. 제안한 원형 부하 제동장치의 토크 값은 고정 부하를 갖는 『ㄷ』형 부하 제동장치에 비해 49%의 제동력으로 평가되었지만 도전을 변화와 공극의 간격 변화로 다양한 부하 조절이 가능함을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 부하 제동장치는 사용자의 상태에 따라 부하 조절이 가능하며 운동기기의 소형화 및 원가 절감 등의 장점을 갖는 운동기기 적용이 가능할 것으로 기대된다.

ABSTRACT

In this study, we propose a non-contact circular eddy current load brake using permanent magnet that can be applied to the rehabilitation exercise equipment . The circular eddy current load brake is manufactured and is evaluated for performance. This has the torque value of 49% compared to a 『ㄷ』 type eddy current load brake having a fixed load. And we confirmed that load is regulated due to the conductivity and air gap. Proposed load brake is adjustable according to the user’s condition and can be applied to the equipment having advantages such as miniaturization and cost reduction.

Keyword : Eddy Current, Permanent Magnet, Brake, Rehabilitation, Torque

1. 서론

현대인들의 바쁜 생활로 인한 신체 활동의 부족과 불규칙적인 식습관은 체중을 증가시켜 비만의 원인이 되며 또한 고혈압, 당뇨병과 심장질환 같은 성인병의 발생율을 증가시켜 삶의 질 감소와 의료 비용 증가를 가져온다. 의료비용 증가는 가정뿐만

아니라 나라 전체의 사회·경제적 비용 증가를 초래하므로 신체 활동을 증진시킬 수 있는 다양한 운동 방법들이 요구되는 실정이다.

노인이나 장애인의 근력은 시간이 증가할수록 점점 약화되어지고 근력 약화에 따른 재활운동시스템의 필요성이 증가되고 있는 실정이며, 일상생활을 가능하게 하는 근력 향상에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다[1-2].

근력 향상을 위해 설계된 재활 운동기구나 야외용 운동기기의 부하 제동 방식은 마찰을 이용한 접촉식 제동기와 맴돌이 전류(Eddy Current, 와 전류) 등을 이용한 비접촉식 제동기로 구분되며 마모에 의해 일정 기간 후 부하 제동기 교체가 필요한 접촉식 부하 제동 방식보다는 비접촉식 부하 제동기가 선호된다.

MR 유체를 이용한 MR 유체 제동기는 자기장에

접 수 일 : 2015.07.21

심사완료일 : 2015.08.05

게재확정일 : 2015.08.13

* 나기수 : (주)파파야구 기술연구소 연구소장
multihexagon@naver.com (주저자)

이응혁 : 한국산업기술대학교 전자공학과 교수
ehlee@kpu.ac.kr (교신저자)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT융합고급인력과정지원 사업의 결과로 수행되었음(ITTP-2015-H8601-15-1003)

의해 걸보기 점도가 변화하는 특성을 가진 유체의 제어 용이성을 이용하는 방식으로 운동기구에 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다[3-4].

도체가 시변 자속에 있거나 시 불변 자속에서 운동하게 되면 자기장의 변화를 방해하는 소용돌이 모양의 전류가 발생하는데 이를 맴돌이 전류라 한다. 맴돌이 전류는 유도전동기, 전기계량기, 맴돌이 전류 탐상법[5], 제동장치 등에 사용된다.

맴돌이 전류를 이용한 부하 제동장치는 전자석을 이용한 방식과 영구자석을 이용한 방식이 있다. 전자석을 이용한 방식은 상용전원을 On-Off하여 제동을 조절할 수 있고 인가 전류의 변화에 따라 부하를 조절할 수 있으며 큰 제동력이 필요한 고속전철이나 세탁기 등에 주로 사용된다.

영구자석을 이용한 제동장치는 자속밀도를 높이기 위해 Halbach 배열[6]을 주로 이용하며, 제동력을 발생시키는 주요한 변수로는 비자성체의 재료, 두께, 공극 등이 있다.

본 연구에서는 영구자석의 배열구조의 변화에 대한 토크 값을 비교하기 위하여 브라켓의 구조가 『ㄷ』형, 일자형 및 원형 구조로 각각 제작하여 성능을 비교 평가하고, 원형 브라켓을 대상으로 비자성체의 도전을 변화와 공극의 위치변화가 성능에 미치는 영향을 해석하고자 한다.

2. 맴돌이 전류 부하 제동장치

2.1 맴돌이 전류의 원리

그림 1에서와 같이 도체 속을 자력선이 통과하고 있을 때 도체와 자력선이 상대운동을 하면 전자 유도 작용에 의하여 도체 중에 기전력이 발생하며, 이 기전력으로 인하여 흐르는 유도 전류는 그 도체 중에서 저항이 가장 적은 통로를 통하여 맴돌이를 형성하면서 흐르게 되며 이를 맴돌이 전류라 한다.

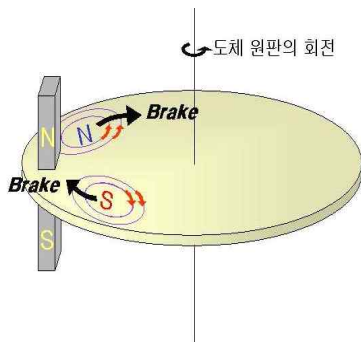


그림 1. 맴돌이 전류 제동장치의 원리

또한 그림 1과 같이 원판의 자극 바로 아래쪽에 플레밍의 오른손 법칙에 의한 맴돌이 전류가 유기 되면 맴돌이 전류와 자극 사이에서 플레밍의 왼손 법칙에 의하는 회전력이 작용하여 원판의 회전 운동을 방해하는 저항력을 생성하고 이를 제동장치로 이용할 수 있다.

2.2 맴돌이 전류 부하 제동장치

2.2.1 『ㄷ』형 브라켓 부하 제동장치

금속제 회전판과 연결된 비자성체에 2개 이상의 쌍으로 구성된 영구자석을 비자성체 사이에 마주보도록 『ㄷ』형 브라켓 안쪽에 배열하여 맴돌이 전류를 발생시키고 이를 제동장치로 구성한 형태이다. 『ㄷ』형 브라켓의 구조상 전류가 흐를 수 있는 폐회로가 구성되기 때문에 큰 제동력을 갖게 되며 주로 가정용 저가 고정형 부하를 갖는 재활 및 운동기구나 공원형 야외 운동기구에 사용된다. 사용자 편의의 제동 부하조절이 불가능하며 『ㄷ』형 브라켓의 구조상 운동기구의 소형화, 정밀제작 및 제작공정의 간소화 등이 어렵고 특히 고속 회전시 회전판의 편심에 의한 운동기기 파손 등의 문제를 야기할 수 있다.

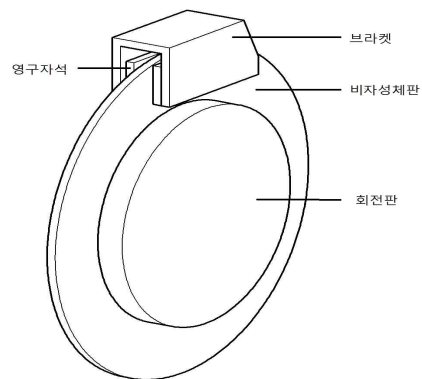


그림 2. 『ㄷ』형 브라켓을 갖는 부하 제동장치

2.2.2 제안된 원형 브라켓 부하 제동장치

본 연구에서 제안한 원형 브라켓을 갖는 부하 제동장치는 그림 3과 같이 구성된다. 비자성체판 보다 작거나 같은 크기의 원형 브라켓에 복수개의 영구자석을 배열하여 회전판에 의해 회전하는 비자성체와 근접시켜 맴돌이 전류를 발생시키는 형태이다. 또한 부하를 증가시킬 목적으로 비자성체판과 회전판 사이에 수 mm의 두께를 갖는 철판을 부착 할 수도

있다. 원형 브라켓을 갖는 부하 제동장치는 정밀 제작이 가능하고 원형 브라켓과 비자성체 사이의 공극을 조절하여 부하를 가변시킬 수 있으며 기기의 소형화 및 제작공정을 간소화 할 수 있다.

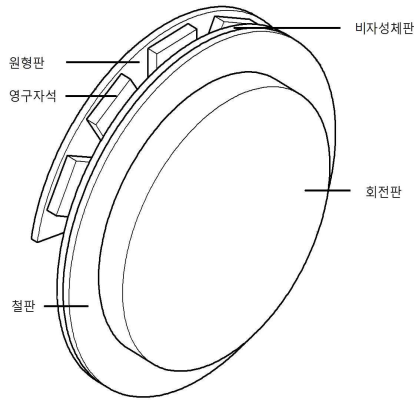


그림 3. 원형 브라켓을 갖는 부하 제동장치

3. 맴돌이 전류 부하 제동장치의 실험

3.1 맴돌이 전류 부하 제동장치의 제작

맴돌이 전류 부하 제동장치의 성능은 영구자석의 종류 및 치수, 비자성체의 종류, 브라켓과 비자성체 사이의 공극에 따라 좌우된다.

본 연구에서 사용된 영구자석의 치수 및 특성과 비자성체의 특성을 표 1에 나타내었다.

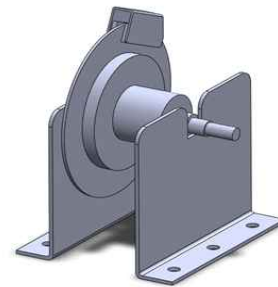
표 1. 영구자석의 치수 및 특성, 비자성체의 특성

영구 자석	재료등급	35H
	크기(L)(W)(H)[mm]	20×20×3T
	재질	NdFeB
	잔류자속밀도[mT]	1170~1220
	보자력(Hcb)[kA/m]	868이상
	보자력(Hcj)[kA/m]	1353이상
	최대 에너지적(BH)max [kJ/m3]	263~287
내열 동작온도[°C]	120°C	
비자 성체	재료	AL 5052
	도전율[1/ohm·m]	20,283,976
	크기[mm]	190 ϕ
	열처리 유무	×
	안정화처리 유무	○

영구자석은 네오디움 35H를 선정하여 사용하였다. 네오디움은 가공성이 좋고 소형화 제작이 가능하며 가격대비 우수한 자력을 갖고 있어 스피커, 모터, 센서 등 전자 산업 전반에 가장 널리 사용되고

있다. 비자성체는 내식성이 우수하고 용접성이 양호한 AL 5052를 사용하였다. AL 5052는 AL-MG계 합금으로 부식 환경에 강인하고 생산성이 우수하나 비교적 강도가 약하고 연실율이 증가하는 경년 변화를 나타내므로, 이를 방지하기위하여 안정화처리가 된 제품을 사용하였다.

브라켓은 비자성체와 동일한 AL 5052 소재이며 회전판과 구동부(모터)를 연결하는 메인 축은 S45C로 제작하였다. 그림 4에 『ㄷ』형 브라켓을 갖는 부하 제동장치 3D Modeling과 실물 제작 사진을 보았다.



(a) 3D Modeling



(b) 실물 제작 사진

그림 4. 『ㄷ』형 브라켓을 갖는 부하 제동장치

일자형과 원형 브라켓을 갖는 부하 제동장치는 『ㄷ』형 브라켓을 갖는 부하 제동장치에서 『ㄷ』형 브라켓을 제거하고 외관 가드 안쪽 고정 축에 연결하여 제작하였다. 영구자석과 비자성체 사이의 공극은 회전판의 편심을 고려하여 최소 2mm 이상이 되도록 하였으며 외관이 견고하고 1000rpm에서 정상 동작이 이루어지도록 제작하였다.

3.2 실험 방법

공급하는 회전력, 영구자석의 배열 및 공극에 따라 부하의 양이 변하는 맴돌이 전류 부하 제동장치의 성능을 평가하기위한 실험 장치는 그림 5와 같

다. Load 모터에 전원을 공급하면 모터와 연결된 메인 축이 회전하게 되며, 메인 축과 연결된 회전판이 회전하면서 영구자석이 부착된 브라켓을 지나게 되고 맴돌이 전류에 의해 부하(저항력)가 발생하게 된다. 이때 발생하는 부하를 Load 모터와 맴돌이 전류 부하 제동장치 사이에 있는 토크센서(Kistler, PEM5100)로 측정하였다. 실험에 사용한 토크센서의 측정 가능한 최대값은 5000N·m이며 아날로그/디지털 출력을 제공한다.

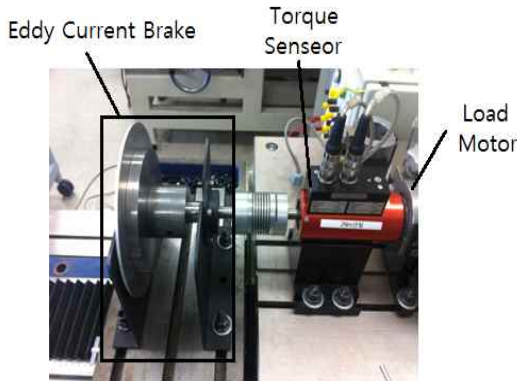


그림 5. 토크 측정을 위한 실험장치의 사진

추가적으로, 맴돌이 전류의 전류 분포 특성을 파악하기 위하여 Jmag Studio Ver 8을 이용하여 제동장치를 3D 모델링한 후 맴돌이 전류 분포를 확인하였다.

실험 순서는 다음과 같다.

1. 50rpm의 회전속도에서 『ㄷ』형과 일자형 브라켓을 갖는 부하 제동장치의 영구자석 배열과 브라켓의 위치를 변화하여 토크값을 측정하고 영구자석의 배열과 위치의 변화가 미치는 영향을 해석한다.
2. 500rpm의 회전속에서 『ㄷ』형과 원형 브라켓을 갖는 부하 제동장치의 토크값을 측정하고 원형 브라켓에서 비자성체의 도전율의 변화와 공극의 변화가 미치는 영향을 해석한다.

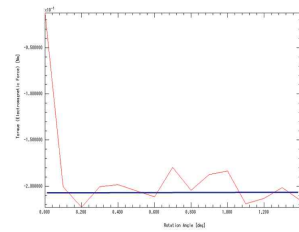
4. 실험 결과 및 고찰

4.1 『ㄷ』형 브라켓과 일자형 브라켓

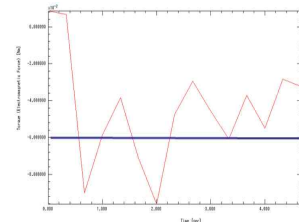
부하 제동장치에서 영구자석의 배열구조의 변화에 대한 토크 값을 비교하기 위하여 영구자석이 2열 3쌍 구조로 6개를 갖는 『ㄷ』형 브라켓과 1열 구조로 6개를 갖는 일자형 브라켓을 제작하여 실험하였다. 또한 브라켓의 위치 변화에 따른 차이를 알

아보기 위하여 일자형 브라켓을 회전축의 중심부측으로 이동하여 비교 실험을 하였으며 추가적으로 비자성체의 도전을 변화에 대한 차이를 알아보기 위하여 일자형 브라켓의 비자성체판 외측에 2mm 철판을 부착하여 토크값의 변화를 관찰하였다.

측정 방법은 Load 모터를 50rpm으로 회전하게 한 후, 50msec(14도, Deg) 동안 토크 값을 측정하여 평균값으로 산출하였다. 『ㄷ』형 브라켓과 일자형 브라켓의 평가 결과, 그림 6에 나타난 바와 같이 『ㄷ』형 브라켓의 토크 값은 0.203N·m, 일자형 브라켓의 토크값은 0.06N·m으로 평가됐다.



(a) 『ㄷ』형



(b) 일자형

그림 6. 일자형 브라켓의 토크 값

같은 조건에서 측정된 실험결과를 표 2에 정리하였다. 표 2의 결과에서 『ㄷ』형 구조가 일자형 구조보다 3.3배 이상 높은 토크 값을 보였다. 이러한 결과는 『ㄷ』형 브라켓의 구조에 기인한 것으로 비자성체를 감싸는 브라켓이 전류를 흐르는 폐회로를 구성하여 높은 전류밀도를 형성하는 것으로 해석된다.

또한, 일자형 구조에서 브라켓을 회전축 중심부로 위치 변화에 따른 토크 값은 0.062N·m로 위치 변경 전의 0.06N·m과 비교해 거의 영향을 미치지 않았으며, 일자 배열 구조의 토크를 높이기 위해 2mm의 추가적인 철판을 부착한 브라켓의 토크 값은 0.19N·m으로 기존의 일자 배열보다 3배 이상 높게 평가되었다. 따라서 일자형 브라켓의 제동력을 높이기 위해서는 브라켓의 위치 변화보다 도전율이 높은 비자성체를 사용하는 것이 효과적임을 확인할 수 있다.

표 2. 영구자석의 배열구조별 토크 변화

브라켓 구조		『ㄷ』형	일자형	응용1 일자형	응용2 일자형
영구자석 배열		2열 3쌍 6개	1열 6개	1열 6개(위치 변경)	1열 6개(철판_2mm)
공통 조건 회전속도 : 50rpm, AL 전도율 : 20,283,976[1/ohm·m], 영구자석 : 35H, 공극 : 2.8mm					
형상					
결과	Torque	0.203N·m	0.06N·m	0.062N·m	0.19N·m
	맴돌이 전류 분포				

4.2 『ㄷ』형 브라켓과 원형 브라켓

『ㄷ』형 브라켓을 갖는 부하 제동장치는 부하조절이 불가능하며 『ㄷ』형 구조상 운동기기의 소형화가 어렵고 회전축의 편심에 대한 기기 손상 등의 심각한 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 부하조절이 가능하고 소형 제작 및 제작공정이 간단한 원형 부하 제동장치를 제안하였고 제안된 브라켓의 성능을 평가하기 위하여 『ㄷ』형 브라켓과 비교 실험하였다.

브라켓의 형상 변화에 대한 토크 값을 비교하기 위하여 영구자석이 2열 3쌍 6개를 갖는 『ㄷ』형 브라켓과 원추형 6개를 갖는 원형 브라켓을 제작하여 실험하였다. 또한 원형 브라켓에서 토크값을 향상시킬 목적으로 도전을 변화에 대한 차이를 알아보기 위하여 비자성체판 외측에 2mm 철판을 부착하여 토크 값의 변화를 관찰하였으며 공극을 2.8mm에서 2mm로 조절하여 공극이 토크에 미치는 영향을 확인하였다.

측정 방법은 사용자가 최대 120rpm으로 운동하는 회전형 운동기기일 때 기어 비를 약 1(사용자)대 4.2(회전축)로 산정하여 Load 모터를 500rpm으로 회전하게 한 후, 5msec 동안 토크 값을 측정하여 평균값으로 산출하였고 이를 표 3에 정리하였다.

표 3에서 원형 브라켓의 토크 값은 『ㄷ』형 브라켓의 0.49배인 0.95N·m으로 측정되었다. 이는 표 3의 맴돌이 전류 분포에서 보듯이 『ㄷ』형 브라켓은 전류가 흐르는 폐회로를 형성하여 전류분포가 집중되어 있는 반면 원형 브라켓은 『ㄷ』형 브라켓보다 전류가 넓은 분포로 확산되어 있어 나타난 결과로 해석할 수 있다.

원형 브라켓의 토크 값을 증가시키기 위하여 2mm 철판을 부착한 형태는 원형 브라켓보다 3.1배 높은 2.95N·m의 토크 값으로 측정되었다. 또한 같은 조건에서 공극을 2mm로 근접시켰을 경우 4배 높은 3.8N·m의 값으로 측정되었다. 이는 맴돌이 전류가 생성되는 비자성체의 도전율이 높을수록, 영구자석과 비자성체의 공극이 가까울수록 부하 제동력이 상승함을 의미한다.

표 3. 영구자석의 배열구조별 토크 변화

브라켓 구조		『ㄷ』형	원형	응용1 원형	응용2 원형
영구자석 배열		2열 3쌍 6개	원추형 6개	원추형 6개(철판_2mm)	원추형 6개(철판_2mm, 공극 2mm)
공통 조건 회전속도 : 500rpm, AL 전도율 : 20,283,976[1/ohm·m], 영구자석 : 35H, 공극 : 2.8mm					
형상					
결과	Torque	1.95N·m	0.95N·m	2.95N·m	3.8N·m
	맴돌이 전류 분포				

4. 결론

본 연구에서는 기존에 재활용 운동기구나 공원형 야외 고정 부하 운동기에서 주로 사용되어진 『ㄷ』형 브라켓을 갖는 비 접촉식 영구자석을 이용한 부하 제동장치를 대치할 원형 브라켓을 갖는 비 접촉식 부하 제동장치를 제안하였고 토크 값을 측정하여 비교하였다.

또한 원형 브라켓을 갖는 부하 제동장치의 넓은 맴돌이 전류의 분포에 기인한 부드러운 운동감성을 유지하면서 부하를 증가시키기 위한 방법으로 비자성체의 도전율과 영구자석과의 공극이 토크 값에 미치는 영향을 관찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 브라켓 구조에 따른 토크 값에 미치는 영향을 해석하기 위한 실험에서 『ㄷ』형 브라켓 구조가 일자형 브라켓 구조보다 약 3.3배, 원형 브라켓 구조보다 2배 이상 높은 토크 값을 보였다. 이러한 결과는 브라켓의 구조에 따른 폐회로 형성으로 인한 맴돌이 전류의 밀집 분포에 따른 결과로 해석된다.

2. 원형 브라켓에서 재질변화에 따른 토크 값에 미치는 영향을 해석하기 위한 실험에서 비자성체에 2mm 철판을 부착하여 도전율을 향상시켰을 경우 원형 브라켓보다 3.1배 높은 2.95N·m의 토크 값으로 측정되었다. 또한, 같은 조건에서 공극이 토크 값에 미치는 영향을 해석하기 위한 실험에서 공극을 2.8mm에서 2mm로 근접시켰을 경우 4배 높은 3.8N·m의 값으로 측정되었다. 이는 맴돌이 전류가 생성되는 비자성체의 도전율이 높을수록, 영구자석과 비자성체의 공극이 가까울수록 부하 제동력이 상승함을 의미한다.

참 고 문 헌

[1] I.H. Jung, T. Kim, "Study on Value Establishment and Local Welfare Policy under the South Korea's Low-Fertility and Aging Population Structure," J. of the Korean Urban Management Association, vol. 23, no. 3, pp. 3-27, 2010.

[2] T. Kim, C.H. Yu, K.J. Hong, T.K. Kwon, C.U. Hong, N.G. Kim, "Study on the Gait Analysis of the Aged with Lower Limbs Orthotics," Engineering Research, vol. 36, pp. 67-76, 2005.

[3] E.S. Kim, S.B. Choi, "Control Performance

Evaluation of MR Fan Clutch for Automotive Experimental Investigation," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, vol. 20, no. 1, pp. 51-57, 2010.

[4] 박우철, 이현창, 김일겸, "하지 재활운동치료 기구에 적용하기 위한 소형 MR 유체 브레이크에 대한 연구," 한국산학기술학회논문지, 제13권 제7호, 한국산학기술학회, pp. 2878-2885, 2012.

[5] 김창욱, "열교환기 전광관의 결함에 대한 와전류 탐상 수치해석 방법," 대한전기학회 하계학술대회논문집, 대한전기학회, pp. 17-20, 2000.

[6] S.M. Jang, S.S. Jeong, S.D. Cha, "The Application of Linear Halbach Array to Eddy Current Rail Brake System," Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 37, pp. 2627-2629, 2001.



나 기 수

1999년 인하대학교 전자공학과 석사 졸업.
 2005년 인하대학교 전자공학과 박사 졸업.
 2010년 (주)디자인파크개발 수석연구원
 2015년 ~ 현재 (주)파파야구 연구소장

관심분야 : 가상현실 기능성 운동기기, 스포츠공학, 온라인 헬스케어 시스템



이 용 혁

1987년 인하대학교 전자공학과 석사 졸업.
 1992년 인하대학교 전자공학과 박사 졸업.
 2000년 ~ 현재 한국산업기술대학교 전자공학과 교수

관심분야 : 지능형 서비스로봇 제어, 모바일 헬스케어 시스템, 재활공학