

유도전동기 병렬 제어형 고속전철 추진시스템의 혼합형 재점착 제어기법

論 文
51B-1-6

Hybrid Re-Adhesion Control Method for Traction System of High-Speed Railways with Parallel Induction Motor Control

黃敦夏* · 金文燮** · 柳泓齊* · 朴都永* · 金鍾洙*** · 金容柱§ · 金東熙§§

(Don-Ha Hwang · Moon-Sub Kim · Hong-Je Ryoo · Doh-Young Park · Jong-Soo Kim · Yong-Joo Kim · Dong-Hee Kim)

Abstract - This paper describes a re-adhesion control method for the Korean High-Speed Train (KHST) with parallel induction motor drive. To keep a traction efficiency and to improve vehicle maintenance, the adhesion characteristics between wheel and rail are analyzed. Also the re-adhesion controller is designed as the subsystem of induction motor vector control. In order to verify performance of the proposed control techniques, the simulation is executed by train model and a downscaled re-adhesion control simulator is utilized. Both simulation and running test results show that good re-adhesion characteristics are obtained.

Key Words : Anti-slip, re-adhesion control, traction system, high-speed railway, induction motor, vector control

1. 서 론

최근 마이크로 프로세서의 비약적인 발전과 현대 제어이론의 도입으로 제어시스템의 고성능화가 이루어짐에 따라 철도차량을 비롯한 수송시스템 전 분야에 걸쳐 성능개선을 위한 다각적인 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 차량과 노면 사이의 동특성에 의한 미끄러짐 현상을 효과적으로 억제하여 차량의 추진 및 제동특성을 향상시키는 재점착 제어에 대한 관심이 증대되고 있다[1-4].

고속전철의 경우에도 약천후 및 유출된 오일에 의해 노면의 점착특성이 저하되면서 빈번하게 차량의 미끄러짐이 발생하고 있으며, 과도한 미끄러짐은 차량에 심각한 손상을 가져와 관련 부품의 수명을 감소시킬 뿐만 아니라 구동력과 제동력 전달을 방해함으로써 추진 및 제동성능을 악화시키게 된다. 이미 선진국에서는 1970년대부터 항공기, 철도차량 및 자동차를 대상으로 한 미끄러짐 방지 제어에 관한 상당한 연구성과와 실용화가 이루어져 왔으며, 특히 고속전철 분야에서 일본의 신간선을 대상으로 한 토크 패턴에 따른 재점착 제어기법의 개선과 독일 ICE(InterCity Express)에서 채택된 가속도 및 속도차 이중화 기법과 같은 미끄러짐 방지 제어의 최적화 연구들이 활발히 수행되고 있다[2-4]. 국내에서도 최근 고속전철을 비롯한 전기차량의 개발이 활발

하게 이루어짐에 따라 추진 및 제동시스템의 재점착 제어에 대한 연구가 크게 요구되고 있다[5-8].

본 논문에서는 현재 최고속도 350 [km/h]를 목표로 개발 중인 한국형 고속전철의 추진시스템을 대상으로 하여 차량과 레일사이의 점착특성에 의한 불안정한 미끄러짐을 억제함으로써 진동에 의한 승차감 저해, 착상에 의한 차량마모, 동력손실 등을 방지하여 열차의 추진성능, 안정성 및 유지보수성을 향상시키는 새로운 혼합형 재점착 제어기법을 제안한다. 고속전철의 실제 시스템을 고려한 견인전동기, 구동부, 열차부하 및 점착특성 등의 열차모델에 의한 시뮬레이션과 축소형 고속전철 재점착 시뮬레이터에 의한 수행시험을 통하여 제안한 혼합형 재점착 제어기법의 성능시험 결과, 기존 재점착 제어기법에서의 불안정성, 토크 손실 및 진동 발생 등이 저감되어 추진성능이 향상됨을 확인하였다.

2. 재점착 제어

2.1 재점착 제어의 개요

고속전철의 견인전동기에서 발생하는 회전력과 열차를 가속시키는 구동력 사이에는 그림 1과 같이 차량과 레일 사이의 점착이라는 힘의 전달과정이 존재한다. 재질이 서로 다른 물체의 접촉면에서 필연적으로 존재하는 미소 수축과 팽창현상은 결국 차량속도와 열차속도의 차이를 가져와 미소한 미끄러짐의 원인이 되고, 점착특성은 미끄러짐의 정도에 따라 그림 2와 같이 안정영역과 불안정 영역으로 구분된다. 미끄러짐이 증가할수록 점착력이 감소되어 나타나는 불안정 영역에서의 미끄러짐 발산현상을 억제하는 것이 제어의 목표가 된다.

열차 전체의 운동은 식 (1)과 같이 발생된 동력 T 와 점착

* 正會員 : 韓國電氣研究院 産業電氣研究團 前任研究員

** 正會員 : 國防品質管理所 研究員

*** 正會員 : 韓國電氣研究院 電氣物理그룹 責任研究員 · 工博

§ 正會員 : 韓國電氣研究院 産業電氣研究團 專門委員 · 工博

§§ 正會員 : 嶺南大 工大 電子情報工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 9月 19日

最終完了 : 2001年 11月 8日

특성(점착력) F에 의해 좌우되고, 점착특성은 다시 외부환경에 의해 변화하는 고유특성값인 점착계수 μ 와 축중(질량) W에 비례하는 형태로 나타난다. 여기서 J는 관성(inertia), r은 차륜의 반경, ω 는 차륜속도, 그리고 ν 는 열차속도이다. 점착계수는 마찰면의 상태에 따라 전체적인 특성이 변화하는 동시에 열차속도에 반비례하며, 미끄러짐이 증가할수록 급격하게 감소하는 비선형 특성을 갖는다. 점착력은 전기차량의 전동기 측면에서 볼 때 부하토크로 작용하게 되며, 추진측면에서는 실제적인 가속력이 되므로 점착력의 향상은 열차의 성능개선과 직결되는 요소임을 알 수 있다.

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + rF \quad (1)$$

$$F = \mu W$$

$$\mu = f(\omega, \nu, \dots)$$

차륜속도가 상대적으로 크게 증가하거나 느려지는 현상, 또는 정지하는 현상은 추진 및 제동성능의 악화를 초래하여 동력손실, 제동거리의 미확보에 따른 안전문제, 승차감 저해, 차륜마모에 의한 유지보수 문제 등 여러 측면에서 좋지 못한 결과를 초래하게 된다. 본 연구에서의 목표는 결국 과도한 미끄러짐 발생의 억제를 통한 바람직한 견인성능의 확보를 위해서 점착특성이 우수한 영역으로 미끄러짐의 정도를 제어하는 것이다.

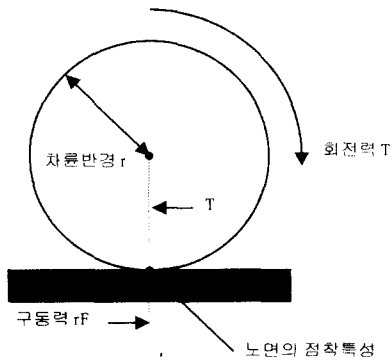


그림 1 차륜의 미끄러짐 현상
Fig. 1 Wheel slip phenomenon

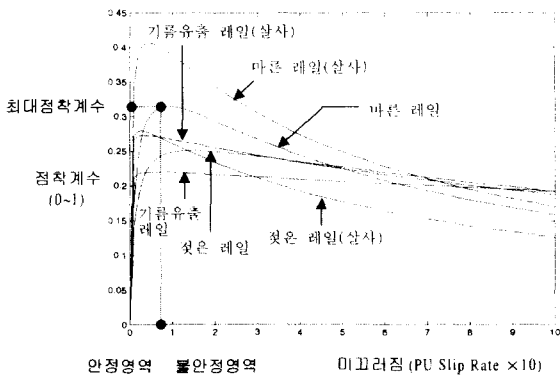


그림 2 미끄러짐-점착 특성곡선
Fig. 2 Slip-adhesion characteristic curve

2.2 재점착 제어기법의 종류

재점착 제어는 크게 패턴 제어 및 속도차 제어기법과 같이 미끄러짐을 직접 제어에 이용하는 속도 기준방식과 가속도를 제한하는 가속도 기준방식으로 구분된다. 그림 3은 동일한 미끄러짐에 대해 각각의 제어기법을 적용한 결과의 예를 보여준다[2-4]. 패턴 제어란 그림 3 (a)와 3 (b)에서 나타난 것과 같이 임계값(threshold) 이상의 차륜 미끄러짐이 발생할 때 특정한 패턴을 따라 견인전동기의 토크를 변화시키는 방식이다. 그림 3 (a)에서 사용된 고정패턴 제어기법은 임계값 1에 의해 설정된 시간 동안 토크의 감소 및 유지가 이루어진 후 임계값 2를 기준으로 다시 감소와 회복 여부를 판단하여 수행하는 방법이다. 그림 3 (b)의 가변패턴 제어기법은 미끄러짐이 임계값 1부터 임계값 2의 영역에 머무르는 동안 연속적으로 토크의 저감이 수행되고, 일정한 유지구간 후에 다시 임계값 1에 이를 때까지 토크 회복이 수행되는 방법이다. 그림 3 (c)에 나타난 속도차 제어는 차륜의 미끄러짐을 직접 제어입력으로 하여 저감합수 및 시간지연회로를 거쳐 토크를 가감하는 제어방식이다.

패턴 제어는 강제적인 토크저감으로 쉽게 강한 재점착 효과를 얻을 수 있는 장점을 갖는 반면에 상대적으로 불필요한 구동력 손실에서 오는 전체 구동성능의 감소와 일정한 패턴수행에 의한 시스템 진동발생의 단점을 갖고 있다. 이와 달리 속도차 제어기법은 피드백 제어이므로 미끄러짐의 발생을 미리 억제하는 기능의 측면에서 우수한 성능을 발휘하지만, 심각한 노면상태에서 미끄러짐이 발생하는 경우 더 이상 충분한 재점착 효과를 기대하기 어렵다.

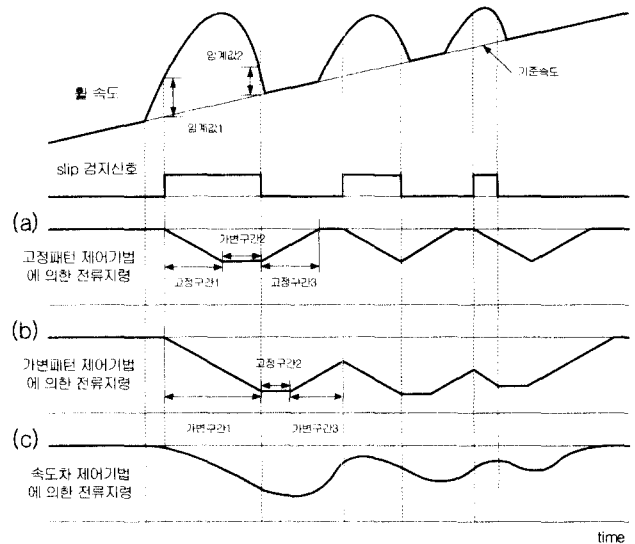


그림 3 재점착 제어의 종류에 따른 전류지령 형태
(a) 고정패턴 제어기법
(b) 가변패턴 제어기법
(c) 속도차 제어기법

Fig. 3 Various re-adhesion control methods
(a) fixed pattern control
(b) variable pattern control
(c) speed difference control

3. 혼합형 재점착 제어

본 논문에서는 패턴 제어의 강제적인 재점착 효과와 속도 차 제어의 조기억제 능력 및 안정성을 동시에 만족시키는 제어기법을 연구하였고, 각각의 기법을 서로 다른 크기의 미끄러짐에 적용함으로써 단점을 보완하는 실용적인 혼합형 제어방식을 제안하게 되었다. 제안하는 재점착 제어기법은 특히 기준속도의 추정방법과 토크 저감특성을 개선하여 제어성능이 향상되도록 하였다[5-7].

3.1 기준속도 생성(Pseudo Train Speed) 방법

현재까지 기준속도(차량속도)의 추정은 차륜 및 축에 장착되는 속도센서 측정값을 이용하는 방법이 널리 사용되고 있으며, 별도의 센서를 사용하는 방법은 성능 및 비용의 측면에서 비능률적이므로 현재 사용되지 않거나 보조적인 기능으로 사용되고 있는 추세이다. 일반적으로 차량 추진시의 기준속도는 취득된 차륜의 속도정보 중 최소값으로 설정되며, 따라서 기준속도의 정확성은 다수의 차량속도를 취득할수록 향상된다. 제어대상인 고속전철의 경우 취득 가능한 속도정보는 다수이나, 속도센서간에 존재하는 거리로 인해 취득한 속도정보들을 지연없이 정확하게 전송해야 하는 문제점이 존재한다. 본 연구에서는 이와 같은 단점을 최근 전전기차량 분야에 도입되고 있는 네트워크 시스템으로 해결하였다[8].

그림 4는 개발 중인 한국형 고속전철을 대상으로 한 혼합형 재점착 제어의 흐름도를 나타낸 것이다. 동력차의 한 축에서 발생하는 미끄러짐을 제어하기 위하여, 제어대상 축이

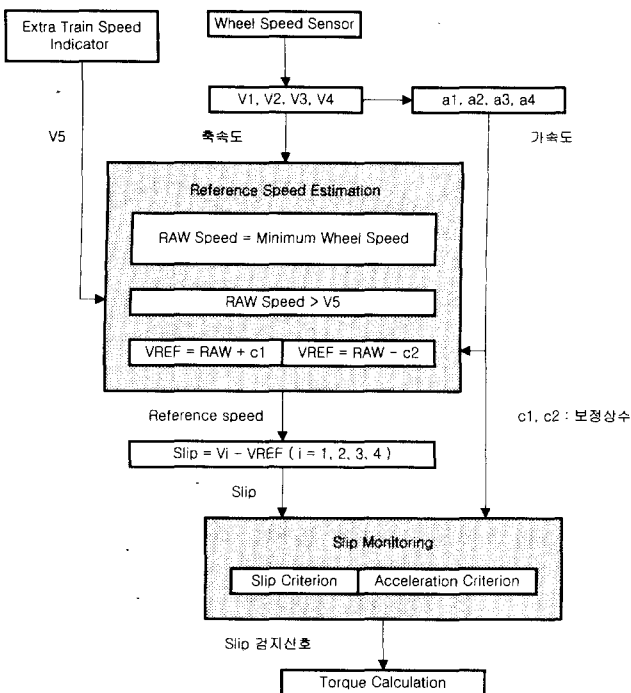


그림 4 기준속도 생성 흐름도
Fig. 4 Reference speed estimation flow

포함된 대차의 두 축과 인접한 대차의 두 축을 포함하는 총 네 축의 속도정보 V1~V4를 이용함과 동시에, 상대적으로 미끄러짐 발생의 확률이 적은 객차 축 평균속도 V5를 네트워크를 통해 전송받아 보정함으로써 최종 기준속도 VREF를 산출한다.

즉, 식 (2)와 같이 취득된 속도정보 중 최소값은 원시 기준속도 Raw Speed로 설정되며, 객차 축 속도 V5와 비교하여 Raw Speed가 더 큰 경우 최종 기준속도 VREF는 속도차(V5 - Raw Speed)와 차륜 가속도에 따라 설정값 c1만큼 감소된다. 반대로 V5보다 적은 경우에는 설정값 c2를 Raw Speed에 더하여 최종 기준속도로 사용한다.

$$VREF = |Raw Speed - V5| + c1 - c2 \quad (2)$$

$$Raw Speed = \min(V1, V2, V3, V4) : \text{추진시}$$

$$c1, c2 = f(\alpha, |Raw Speed - V5|)$$

최소값 혹은 최대값을 선택하여 그대로 사용하는 기존의 방법은 차량속도에 따른 기준속도의 잦은 흔들림으로 인해, 실제 차량속도와 상당한 차이가 발생할 뿐만 아니라, 제어대상 동력차의 네 축에서 모두 미끄러짐이 발생하는 경우 미끄러지는 차륜의 속도값이 그대로 기준속도로 간주되는 문제점을 갖고 있다. 제안하는 기준속도 추정방법은 기준속도의 섭동을 완화시키고, 전체 미끄러짐의 발생시 기준속도 VREF가 급격하게 증가하거나 감소하는 것을 억제하여 보다 실제 차량속도에 가까운 기준속도를 산출한다. VREF는 다시 제어대상 차륜속도 Vi와의 차이 Slip을 산출하기 위해 사용되고, Slip은 속도기준방식 제어기에 의해 감시되어 재점착을 위한 토크 변형치를 얻기 위해 이용되므로 정확한 기준속도 생성기법은 재점착 제어기의 신뢰성을 크게 향상시키게 된다.

3.2 혼합형 제어기법

그림 5는 전체 견인전동기 제어 및 제안하는 재점착 제어 기법의 구성도를 나타내고 있다. 유도전동기 제어는 운전자 혹은 자동 운행 시스템으로부터 발생된 속도지령을 입력으로 하는 속도제어기에 의해 수행되고, 이때 재점착 제어기는 속도제어기로부터 출력되는 전동기 토크지령을 다시 증감하여 점착특성이 고려된 최적의 구동력을 생성해야 하므로 인버터 제어방식에는 전동기의 순수한 토크제어가 가능하고, 고속 응답성 및 고정밀성의 특성을 갖는 벡터제어가 적용되었다.

그림 5에 나타난 혼합형 재점착 제어기법의 세부적인 내용은 다음과 같다. 먼저 Slip Calculation Block에서 미끄러짐이 산출되면, 첫 단계로 미끄러짐을 조기에 억제하기 위해 Torque Calculation Block의 속도차 제어기능이 일정한 비활성 영역(dead zone)을 거쳐 수행된다. 이 영역은 그림 2의 안정영역과 차륜마모 및 속도센서에 의한 측정오차 범위를 고려하여 결정된다. 속도차 방식에 의한 제어가 실패하여 미끄러짐이 threshold 1에 도달하면, 다음 단계로 패턴제어 기능이 시작된다. 특히 본 논문에서 제안되는 패턴은 그림 3 (b)와 같이 토크 저감 및 회복의 기술기는 동일하나 적용시간이 가변적인 개선된 형태로서, 큰 미끄러짐을 빠르게 감

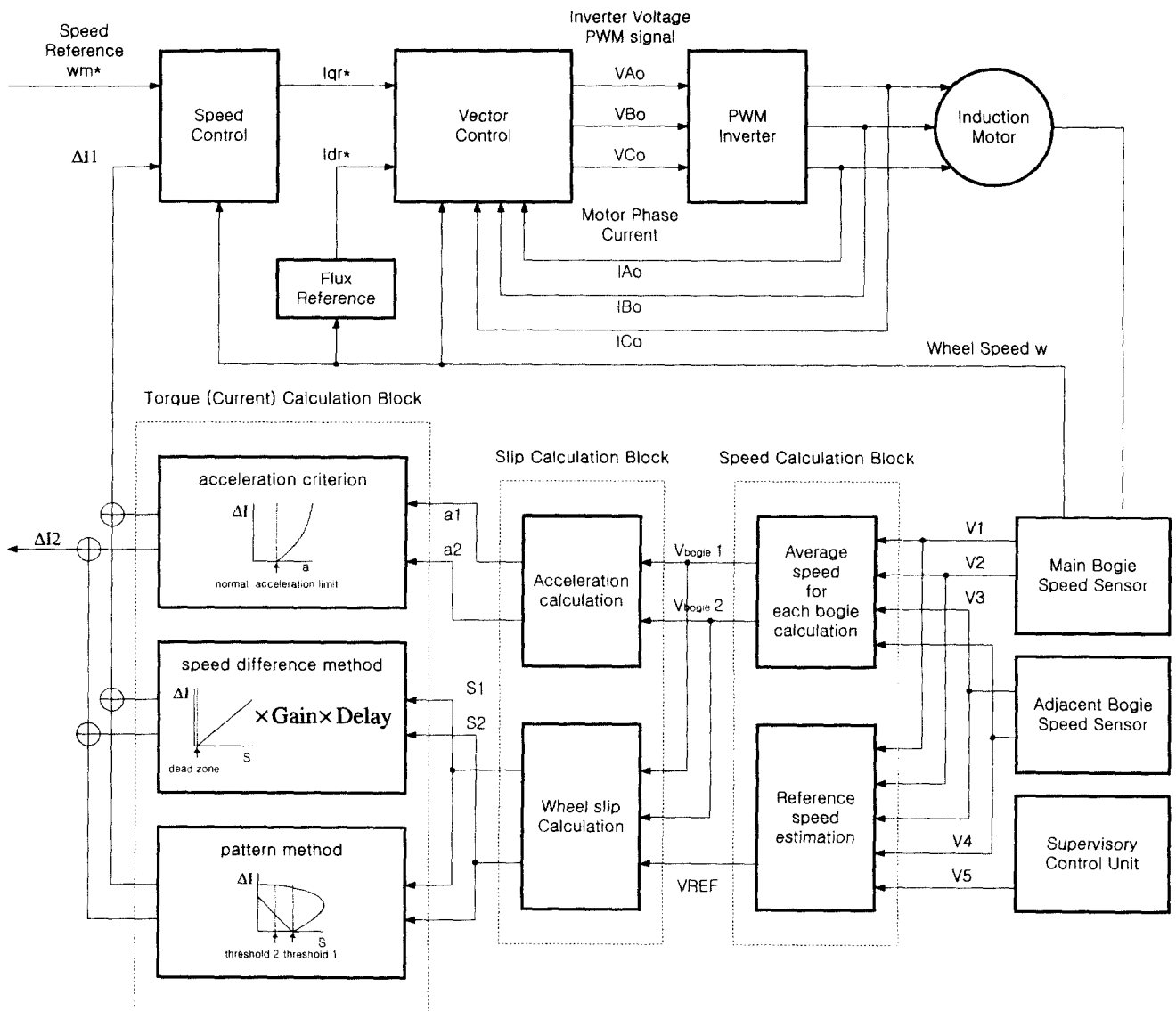


그림 5 혼합형 재점착 제어 블록다이어그램

Fig. 5 Block diagram of hybrid re-adhesion control

소시키는 역할을 수행함과 동시에 패턴으로 인해 발생하는 진동과 구동력 손실을 최소화한다. 두 단계에 걸친 속도기준 방식의 재점착 제어가 모두 실패하는 경우, 최종 단계로 가속도기준 제어기능이 활성화된다. 일반적으로 속도기준 방식의 제어실패는 모든 축에서 미끄러짐이 발생하는 경우에 나타나며, 이와 같은 현상은 생성되는 기준속도가 실제 차량속도에 비해 높게 추정되면서 미끄러짐은 반대로 더 낮게 산출됨으로써 발생한다. 즉, 속도기준 재점착 제어에 의해 더 이상 정확한 제어기능을 기대하기 어렵게 된다. 따라서 기준속도와 무관한 가속도기준 재점착 제어를 최종 단계에서 적용함으로써 속도기준 방식의 문제점을 보완하도록 하였다. 앞선 두 단계에서의 제어기능 수행여부에 상관없이, 센서로부터 취득된 속도에 의해 산출된 가속도가 설정된 정상가속도 한계값을 초과하게 되면 제어기는 지수 함수적으로 토크를 저감시킨다. 본 연구에서 제안하는 혼합형 재점착 제어기는 발생된 차륜 미끄러짐의 특성에 따라 제어방식

을 다르게 적용하여 단독제어시 발생하는 단점을 해결함으로써 차량의 점착특성을 지속적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다[6-8].

4. 주행시험 및 시뮬레이션

4.1 한국형 고속전철의 사양

본 연구에서의 재점착 제어대상인 한국형 고속전철 시스템의 편성도를 그림 6에 나타내었고, 기본사양은 표 1에 요약하였다. 총 16개의 동력축을 갖고 편성의 앞뒤와 중심에 동력대차가 설치되는 변형된 동력 집중식 편성으로서 최고 운행속도 350 [km/h]에 도달하기 위해서는 상대적으로 미끄러짐의 발생과 미끄러짐에 의한 동력손실이 적은 동력 분산식 편성에 비하여 재점착 제어의 필요성이 더 크다고 할 수 있다[7].

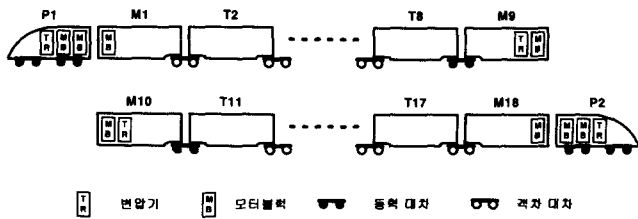


그림 6 한국형 고속전철의 편성
Fig. 6 Korean high-speed railway structure

표 1 한국형 고속전철의 기본 사양
Table. 1 Korean high-speed railway basic specifications

파라미터	사양
열차편성	20 량 : 2P4M14T* (P+M+7T+2M+7T+M+P)
추진력	1,100 [kW] × 16
열차중량	약 780 [ton]
최대 축하중	동력차 축 : 17 [ton] 객차 축 : 15.56 [ton]
동력축 수	16 [개]
운행속도	0 ~ 350 [km/h]
운행 가속도	평균 : 0.99 [km/h/s] 기동시 : 2.322 [km/h/s]
주행저항	131.4 [kN] (350 [km/h] 일때)
점착계수	0.07 ~ 0.24
제동시스템	회생, 와전류, 저항 및 디스크 제동
제어 네트워크	Train Communication Network
차륜 반경	0.885 [m]

*주) P : Power Car (동력차). M : Motorized Car (동력객차). T : Trailer Car (비동력 객차)

4.2 재점착 시뮬레이터

재점착 제어기의 성능을 검증하기 위해 구축된 재점착 시뮬레이터는 개발중인 한국형 고속전철과 비교하여 출력대비 147:1의 축소모형으로서, 크게 추진장치, 제동장치, 플라이휠, 점착력 모의장치로 구분된다. 추진장치는 다시 변압기, 컨버터, PWM 인버터, 그리고 유도전동기로 구성되고, DC 전원을 위해 4대의 4상한 컨버터가 2대씩 병렬로 연결되며, 2대의 PWM 인버터가 4대의 3상 농형 유도전동기를 병렬 운전하는 구조이다. 제동장치는 열차의 속도에 따라 원하는 제동력을 얻기 위해 와전류 제동, 저항 제동, 그리고 디스크 제동을 모두 활용할 수 있도록 설계되었으며, DC 발전기는 차량 운행 중 발생하는 공기저항 및 구름저항과 같은 주행 저항력을 모의하도록 하였다[6-8,10].

플라이휠들은 열차의 관성을 모의하기 위한 주 플라이휠, 2대의 레일 모의용 플라이휠, 그리고 차륜의 역할을 대신하는 4대의 보조 플라이휠로 이루어진다. 점착력 모의장치로는 축 하중을 임의의 값으로 제어하기 위한 유압밸브와 레일과 차륜에 해당되는 플라이휠의 접촉면으로 다양한 윤활액을 분사함으로써 급격한 미끄러짐을 발생시키는 분사장치로 구성된다.

4.3 시뮬레이션 모델

고속전철의 실제 시스템을 통한 재점착 제어기의 구현에 앞서, 환경에 따른 점착계수의 변화를 고려하여 재점착 특성을 고찰하고, 제안하는 제어기법의 타당성 검증과 건인전동기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 재점착 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 소프트웨어는 MATLAB/SIMULINK와 Fuzzy Logic Toolbox를 사용하였다. 재점착 제어를 위한 주행 시뮬레이션 모델은 크게 추진 시스템, 열차부하, 점착특성 모델 및 미끄러짐 연산부로 구성하였다. 건인전동기의 속도 및 토크 제어는 간접 벡터제어 방식을 적용하였고, 유도전동기는 고정좌표계 d-q 모델로 구현하였다. 열차부하 모델은 레일방향의 자유도를 갖는 운동모델로 표현되며, 생성된 견인력 및 제동력과 지면 경사에 의해 발생하는 구배저항, 그리고 실제 주행 중에 발생하는 주행저항을 고려하였다. 점착특성 모델은 기존의 Look-up table 방식이나 근사함수를 이용한 방식과 다르게, 그림 7과 같이 퍼지에 의한 자체 점착모델을 구현하여 사용하였다[9].

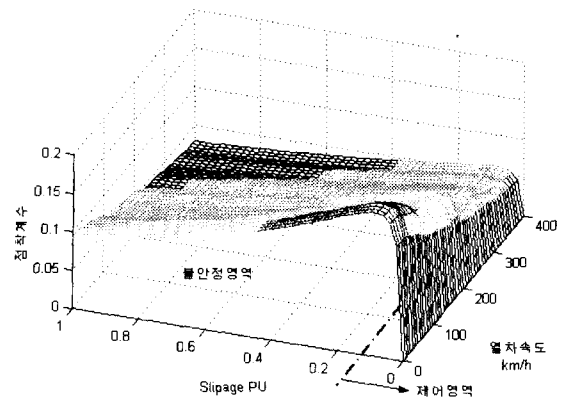


그림 7 퍼지이론에 의해 생성된 점착특성 모델
Fig. 7 Adhesion model by fuzzy theory

4.4 주행시험 및 시뮬레이션 결과분석

주행시험 및 시뮬레이션은 다음과 같은 조건에서 수행되었다. 1대의 PWM 인버터가 2대의 추진전동기를 구동하는 병렬운전방식(IC2M)으로서 보기 1대에 포함된 두 축의 속도를 평균하여 전동기 속도제어의 입력으로 사용한다. 채택되어진 병렬운전 방식은 개별운전 방식과 달리 재점착 제어에 의해 수정된 토크지령이 병렬로 연결된 축의 속도차가 임계값을 초과하지 않은 정상적인 상태에서도 적용되어 불필요한 동력손실을 유발할 가능성이 있으나, 추진시스템의 구조 및 중량을 크게 감소시킴으로써 전체적인 동력 효율을 상승시킨다.

차륜의 미끄러짐을 모의하기 위해서 주행시간이 50초를 경과할 때 차륜과 레일 접촉면 중 한 곳에만 윤활액이 분사되도록 하였다. 시뮬레이션의 경우 시간단축을 위해 25초 경과시 점착계수를 감소시켜 유사한 상황을 재현하였다. 제어기의 성능개선을 확인하기 위해 다양한 제어기법들이 동일한 조건으로 적용되며, 미끄러짐 검출을 위해 사용된 패턴

제어의 임계값은 재점착 시뮬레이터의 최소값에 해당되는 10 [rpm] (1.67 [km/h])으로 설정하였다. 주행시험 결과는 각각의 제어기법에 대하여 열차의 속도, 미끄러짐, 제어대상 차륜의 Q축 기준전류값 및 측정전류값을 포함한다. 측정단위는 시간이 눈금 당 10초, 전류가 눈금 당 15 [A], 미끄러짐이 눈금 당 15 [rpm], 속도가 눈금 당 125 [rpm]이다. 시뮬레이션 결과들은 제어효과를 명확히 보여주기 위하여 확대되었다.

주행시험 및 시뮬레이션 결과, 제안한 제어기법이 기존의 제어기법에 비하여 향상된 재점착 특성을 제공함을 보여주었다. 그림 8은 재점착 제어기능이 수행되지 않은 경우 점착력의 급격한 감소에 의해 발생한 과도한 미끄러짐을 보여주고 있다. 최대 미끄러짐은 약 30 [rpm] (5 [km/h])이다.

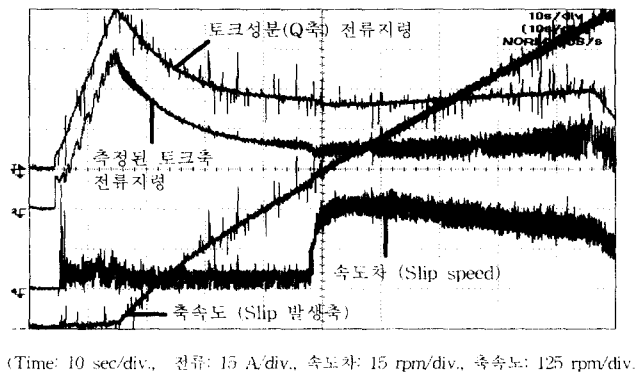


그림 8 재점착 제어가 수행되지 않은 경우의 결과
Fig. 8 Test result without re-adhesion control

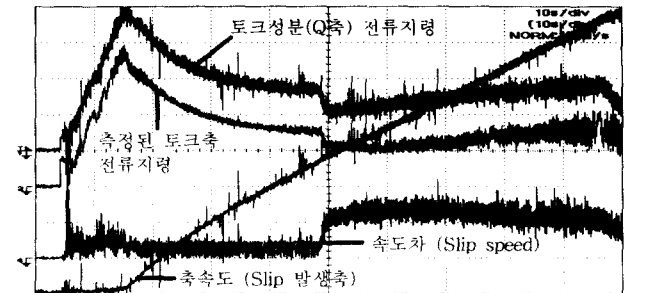
그림 9 (a)는 속도차 제어기법을 단독으로 사용하여 재점착 제어를 수행한 주행시험 결과로서 그림 8에 비하여 미끄러짐이 감소되었으나, 약 3.2 [km/h]의 일정한 미끄러짐이 여전히 존재하여 더 이상의 재점착 효과를 기대하기 어려울 수 있다.

그림 9 (b)는 주행시험과 동일한 조건에서 수행된 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 9 (c)는 목표 임계값인 1.67 [km/h]를 만족하고 있으나, 실제 주행시험에서 가능한 비례상수의 두 배를 적용한 결과로서 전체 추진시스템 제어기의 성능개선 없이는 불가능하다.

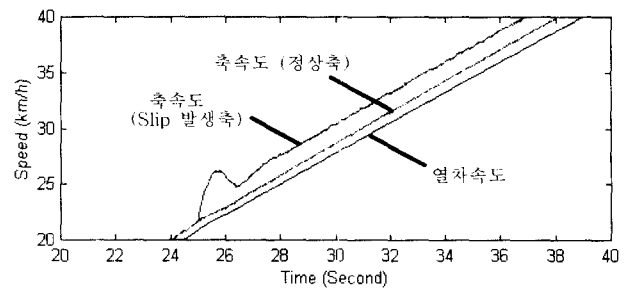
그림 10 (a)와 10 (b)는 패턴에 의한 단독제어의 결과를 나타내고 있다. 전자는 전류의 감소 및 회복시간을 고정시킨 그림 3 (a)의 패턴제어를 그림 3 (b)와 같이 개선하여 적용한 것으로서, 치명적인 결함인 반복적인 미끄러짐이 현격하게 감소하였고, 전체적으로 미끄러짐이 설정된 임계값 1.67 [km/h]에 근사함을 알 수 있다. 그러나 그림 10 (a)와 10 (b)에서 나타나는 초기의 과도한 미끄러짐은 차륜의 찰상 및 보기 진동의 관점에서 반드시 억제되어야 할 결함이다.

그림 11 (a)는 주행시험의 최종결과로서 개선된 패턴을 이용하여 제안하는 혼합형 제어기법을 적용한 결과를 나타낸다. 그림 9와 비교하여 최대 미끄러짐이 60 [%] 이상 감소되었을 뿐만 아니라 전체적인 미끄러짐이 설정된 임계값 내에서 제한되고 있다. 더욱이 초기에 발생하는 과도한 미끄러짐 및 미끄러짐의 반복도 모두 억제되고 있음을 알 수 있다.

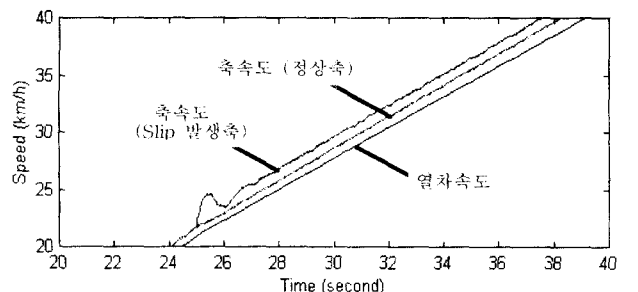
그림 11 (c)는 추진시스템의 성능이 개선된다는 가정에 더 낮게 설정된 임계값 1 [km/h]와 더 큰 비례상수를 이용하여 수행된 시뮬레이션 결과이며, 본 연구에서 제안된 제어기법의 효과가 지속되고 있음을 알 수 있다. 그림 11 (b)와 그림 11 (c)에서 32초에서의 미끄러짐은 각각 1.67 [km/h], 0.88 [km/h]이다.



(Time: 10 sec/div., 전류: 15 A/div., 속도차: 15 rpm/div., 축속도: 125 rpm/div.)
(a)



(b)



(c)

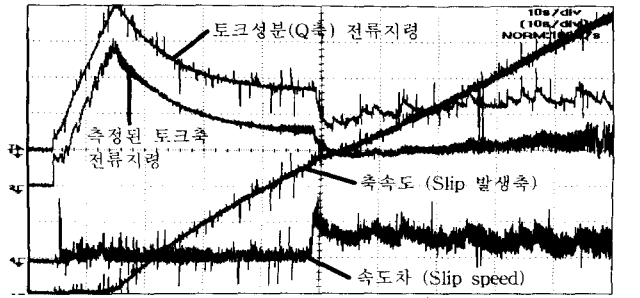
그림 9 속도차 제어기법 적용결과

- (a) 주행시험
- (b) 시뮬레이션 (비례상수 0.85)
- (c) 시뮬레이션 (비례상수 1.7)

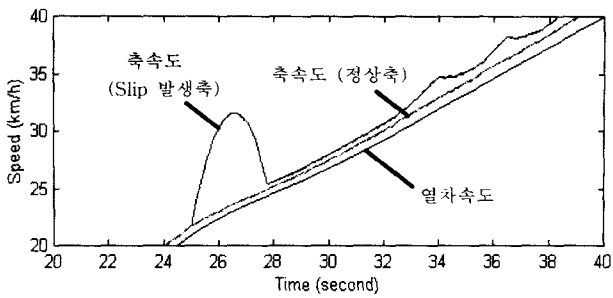
Fig. 9 Test results with slip speed control method

- (a) running test
- (b) simulation (proportional gain 0.85)
- (c) simulation (proportional gain 1.7)

표 2에서는 각각의 제어결과를 최대 속도차, 최소 속도차, 및 속도차의 진동여부로 구분하여 비교 정리하였다. 결과적으로 제안된 혼합형 재점착 제어기법이 기존 제어기법의 단독적용에 비하여 우수한 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.



(Time: 10 sec/div., 전류: 15 A/div., 속도차: 15 rpm/div., 축속도: 125 rpm/div.)
(a)



(b)

그림 10 패턴 제어기법 적용결과
(a) 주행시험 (b) 시뮬레이션

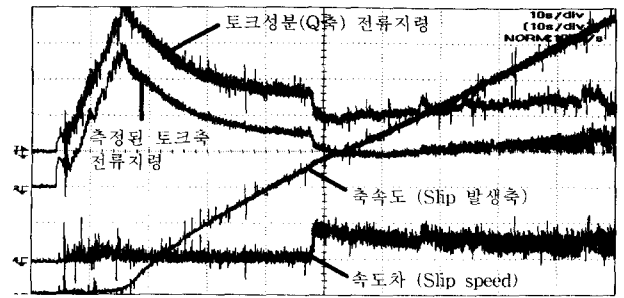
Fig. 10 Test results with pattern control method
(a) running test (b) simulation

표 2 재점착 제어 결과비교 (slip 임계값 1.67 km/h)
Table 2 Re-adhesion control results (slip threshold 1.67 km/h)

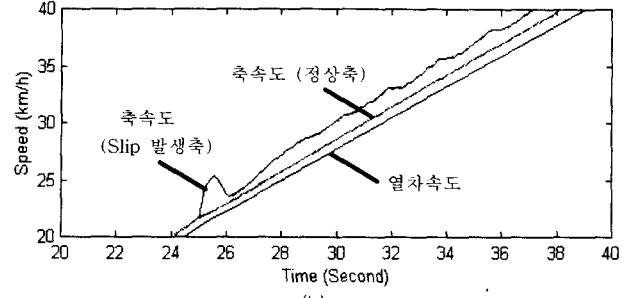
항 목	제어기법	제어 미수행	속도차 제어	패턴 제어	혼합형 제어
최대 속도차		5 km/h	3.7 km/h	3.2 km/h	2 km/h
최소 속도차		4.2 km/h	3.2 km/h	1.3 km/h	1.5 km/h
속도차 진동정도		-	小	中	小

5. 결 론

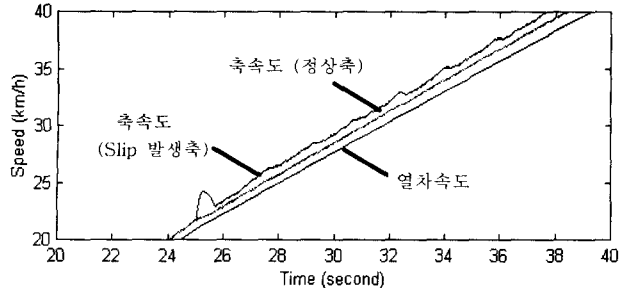
본 논문에서는 유도전동기 병렬 제어형 고속전철을 대상으로 차륜과 레일간의 미끄러짐 방지제어를 통하여 추진시스템의 성능을 향상시키기 위한 혼합형 재점착 제어기법을 제안하였다. 제안한 재점착 제어기법은 기존 제어기법의 불안정성, 진동 및 재점착 성능을 개선하여 노면의 저점착 상태가 지속되는 상황에서도 미끄러짐의 발생정도에 상관없이 향상된 점착특성을 제공한다. 한국형 고속전철 추진 시스템의 축소모델로서 제작한 재점착 시뮬레이터를 이용한 운행시험과 개선된 점착특성 모델을 이용한 주행 시뮬레이션을 통하여 기존의 방식에 비해 차륜의 미끄러짐 및 진동 억제 기능과 가속성능이 향상되는 우수한 제어효과를 확인하였다. 이와 같은 성능향상은 차륜의 찰상 억제와 견인력 확보에 크게 기여할 것으로 예상되고, 제안한 재점착 제어기법이 고속전철과 같은 고성능 전기차량 분야에서 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



(Time: 10 sec/div., 전류: 15 A/div., 속도차: 15 rpm/div., 축속도: 125 rpm/div.)
(a)



(b)



(c)

그림 11 제안하는 혼합형 재점착 제어기법 적용결과
(a) 주행시험
(b) 시뮬레이션 (임계값 1.67 km/h, 비례상수 0.85)
(c) 시뮬레이션 (임계값 1 km/h, 비례상수 1.7)

Fig. 11 Test results with hybrid re-adhesion control method
(a) running test
(b) simulation (threshold 1.67 km/h, gain 0.85)
(c) simulation (threshold 1 km/h, proportional gain 1.7)

감사의 글

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되는 고속전철기술개발사업의 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] R. J. Hill and J. F. de la Vassière, "A Fuzzy Wheel-Rail Adhesion Model for Rail Traction", Proceedings of the 7th EPE, Vol. 3, pp. 3-416~3-421, 1997.
[2] A. Yamanaka, et al., "Anti-slip Re-adhesion Control with Presumed Adhesion Force", Trans. of the IEEJ, Vol. 119-D, No. 2, pp. 243~253, 1999.

- [3] T. Hariyama, et al., "Wheel Slip Recovering applying Vector Control for Shinkansen Train with Individual Motor Control System", Trans. of the IEEJ, Vol. 118-D, No. 9, pp. 1081~1088, 1998.
- [4] H. J. Schwartz and R. Kreße, "Implementation of an Advanced Wheel Creep Control with Searching Strategy on a Light Rail Vehicle", Proceedings of the 7th EPE, Vol. 3, pp. 3-434~3-438, 1997.
- [5] 김문섭, 황돈하, 박도영, 김용주, 류홍제, 김종수, "고속전철 추진시스템의 성능개선을 위한 미끄럼 방지 제어 기법", 대한전기학회 전력전자연구회 춘계학술대회 논문집, pp. I-10~I-14, 2000. 4.
- [6] D. H. Hwang, et al., "Anti slip Control System of Korean High-Speed Train", Seventh International Conference on Computers in Railways (Comrail 2000), Bologna, Italy, pp. 613~622, 2000. 9.
- [7] D. H. Hwang, et al., "Re-adhesion Control for High-Speed Electric Railway with Parallel Motor Control System", IEEE ISIE-2001 Proceedings, Vol. 2, pp. 1124~1129, Pusan, Korea, 2001. 6.
- [8] 한국전기연구원, "고속전철 전기시스템 엔지니어링 기술개발", 고속전철기술개발사업 3차년도 연차보고서, 1999. 10.
- [9] V. K. Garg and R. V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984.
- [10] 류홍제, 김종수, 임근희, 원충연, K. Dragos, "건인 유도 전동기의 새로운 센서리스 벡터제어", 전기학회 논문지, 제49권, 9호, pp. 626~635, 2000. 9.

저 자 소 개



황 돈 하 (黃 敦 夏)

1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업.
 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 2000년 동 대학원 전기공학과 박사수료.
 1993년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 Mechatronics연구그룹 선임연구원
 Tel : 055-280-1544, Fax : 055-280-1547
 E-mail : dhhwang@keri.re.kr



김 종 수 (金 鍾 洙)

1982년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
 1991년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
 1982년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리연구그룹 책임연구원
 Tel : 055-280-1453, Fax : 055-280-1490
 E-mail : jskim@keri.re.kr



김 문 섭 (金 文 燮)

1997년 인하대 공대 전기공학과 졸업.
 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1999년 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 위촉연구원.
 2002년~현재 국방품질관리소 연구원
 Tel : 055-280-1541, Fax : 055-280-1547
 E-mail : saver97@shinbiro.com



김 용 주 (金 容 柱)

1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
 1984년 미국 R.P.I. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년~현재 한국전기연구원 책임연구원. 1999년~2000년 한국전기연구원 산업전기연구단 단장. 2001년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전문위원. 2001년~현재 대한전기학회 국제이사. 전기기기 및 에너지변환시스템학회 학술이사
 Tel : 055-280-1540, Fax : 055-280-1547
 E-mail : yjkim@keri.re.kr



류 홍 제 (柳 泓 齊)

1991년 성균관대 공대 전기공학과 졸업.
 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
 1996년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전기물리연구그룹 선임연구원
 Tel : 055-280-1455, Fax : 055-280-1490
 E-mail : hjryoo@keri.re.kr



김 동 희 (金 東 熙)

1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업.
 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1987년 국립Kobe대 대학원 졸업(공학박).
 1987년~1989년 한국전기연구원 전력전자연구부장. 1990년~현재 영남대 공대 전자정보공학부 교수. 1999년~2000년 대한전기학회 전력전자연구회 간사장. 2000년 9월~2001년 2월 일본 국립Kyushu대 교환교수
 Tel : 053-810-2488, Fax : 053-813-8230
 E-mail : dohkim@ynuucc.yeungnam.ac.kr



박 도 영 (朴 都 永)

1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1997년 캐나다 Queen's Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~현재 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 선임연구원
 Tel : 055-280-1545, Fax : 055-280-1547
 E-mail : dypark@keri.re.kr