

# 전기자동차 경량화를 위한 구동 모터 독립제어에 관한 연구

유현욱\*, 박진영\*\*

## A study on independent control of drive motors for weight reduction of electric vehicles

Hyeon-Wook Yoo\*, Jin-Young Park\*\*

**요약** 본 논문에서는 두 개의 모터를 후륜 구동 휠에 직접 연결하여 제어하는 구동 모터에 대한 독립 제어 시스템을 제안하였다. 일반적인 전기 자동차는 차동 기어를 사용하여 한 구동 모터의 출력을 각 후륜으로 분배하여 전달하였다. 그러나 차동 기어는 전기 자동차에서 매우 무거운 부품 중 하나이며, 동력을 전달하는 과정에서 많은 전력 손실을 초래한다. 따라서 두 개의 모터를 설치하여 각 휠을 직접 제어하고 차동 기어를 제거하고자 한다. 각 후륜은 차량의 주행 상황에 맞게 두 개의 모터로 독립적으로 제어된다. 차량이 직진할 때는 컨트롤러가 두 바퀴의 회전 속도를 동기화하여 차량을 직진시키고, 차량이 회전할 때는 차량의 조향 각도와 주행 속도에 따라 각 후륜의 회전 속도를 변화시켜 차량을 회전시킬 수 있다. 그리고 각 후륜은 독립적으로 제어되므로 한 구동 휠의 그립력이 감소하는 상황에서 프로그램을 통해 리미티드 슬립 차동 장치의 기능을 수행하도록 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** In this paper, I proposed an independent control system for a driving motor that directly connects and controls two motors to the rear driving wheel. Typical electric vehicles have used differential gears to distribute and transmit the output from one driving motor to each rear wheel. However, the differential gear is one of the very heavy parts in the electric vehicle, and causes a lot of power loss in the process of transmitting power. Therefore, I want to install two motors to control each wheel directly and remove the differential gears. Each rear wheel is independently controlled by two motors to suit the driving situation of the vehicle. When the vehicle is going straight, the controller synchronizes the rotational speed of the two wheels to make the vehicle go straight, and when the vehicle is turning, the vehicle can rotate by varying the rotational speed of each rear wheel according to the steering angle and driving speed of the vehicle. And since each rear wheel is controlled independently, it is expected that it can be controlled to perform the function of the limited slip differential through a program in a situation where the gripping force of one driving wheel decreases.

**Key Words** : BLDC Motor, Electric Vehicle, Independent drive, Light weight, Motor control

### 1. 서론

세계적으로 자동차 배출가스 규제가 강화되고 있어 완성차 업체는 배출가스 규제에 대응하기 위해 내연기관 자동차의 생산량을 줄이고 친환경 자동차의 생산량

을 늘리고 있다 [1]. 이와 같은 현상으로 전기자동차의 비중은 높아지고 있지만, 전기자동차의 새시 구조는 기존의 자동차와 유사하기에 경량화에 어려움이 있다. 이에 따라 경량화를 위해서 무거운 부품 중 하나인 차동

This research was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(MOE)(2021RIS-004).

\*Laboratory, Dooch Co., Ltd.

\*\*Corresponding Author: Laboratory, EPSTech Co., Ltd. (pjy0079@epstech.co.kr)

Received September 23, 2024

Revised October 02, 2024

Accepted October 10, 2024

기어를 제거하는 것이 가장 효과적이다[2].

일반적으로 차량이 직진만 할 때는 양쪽 바퀴의 회전속도가 같아 차량이 주행하는데 문제가 없지만, 비포장도로를 주행할 때나 차량의 진행 방향을 바꾸는 경우 양쪽 바퀴의 회전 반경이 다르기 때문에 안정적인 주행이 불가능하고, 차량 고장의 원인이 될 수 있다. 하지만 이러한 문제점은 차동기어로 해결할 수 있으며, 주행 안정성 또한 향상시킬 수 있다. 하지만 차동기어의 특징으로 인해 한쪽 바퀴가 접지력을 완전히 잃어 버리는 극단적인 상황에서는 해당 바퀴로 모든 동력이 집중되어 차량이 앞으로 진행하지 못하는 단점이 있어 이를 해결하기 위해 차동제한 장치를 추가하여 사용하고 있다. 차동제한 장치는 앞서 설명한 극단적인 상황에서 동력이 집중되는 바퀴의 동력을 일부 차단하고 반대쪽 바퀴로 동력이 전달되도록 하여 주행 가능한 상태로 만들어주지만, 차동기어나 차동제한 장치는 무게가 무겁고 구동력을 전달하는 과정에서 동력손실이 발생한다.

차동기어는 가장 무거운 부품 중 하나이기 때문에 지금까지 경량화하기 위한 연구가 지속적으로 진행되어왔다. 이전의 차동기어는 주철로만 제조되었지만 최근 알루미늄으로 제조할 수 있는 방법을 연구하여 가벼우면서도 충분한 내구성을 가진 차동기어를 만들 수 있게 되었다. 또한 차동기어의 기어와 케이스 등 부품을 제조하는 방식을 열간단조 방식에서 냉간단조 방식으로 변경하여 차동기어를 기존의 강도를 유지하면서 소형화할 수 있는 연구가 진행되어왔다[3,4].

모터로 구동바퀴를 직접 구동하게 되면 무거운 차동기어가 없어도 차량이 주행하는데 문제가 없도록 차동기어를 구현할 수 있게 되었다.

하지만 각 구동 바퀴를 독립적으로 제어할 수 있는 모터를 장착하려면 크기가 작고 출력이 큰 모터의 기술이 개발되어야 하기 때문에 모터의 출력밀도를 키우기 위해 모터의 효율을 극대화하는 많은 연구들이 진행되어왔다[5]. 모터에 탑재되는 영구자석과 코일의 효율을 키우는 연구를 진행하여 출력밀도가 충분히 커지게 되면서 두 개의 모터를 이용하여 양쪽 바퀴를 독립적으로 구동할 수 있게 되었다. 구동 바퀴를 모터 두 개로 구동하려면 차량의 주행 상황에 따라 다른 회전

속도로 제어해야하고, 이러한 구동 바퀴를 독립적으로 제어하는 전기자동차 연구가 활발히 진행되기 시작하였다.

전기자동차의 구동 모터 독립제어에 관한 연구로는 자동차의 바퀴 내부에 장착할 수 있는 소형 인휠 모터를 사용하여 구동 바퀴를 독립적으로 제어할 수 있는 전기자동차 시스템 연구와 독립적으로 제어가 가능한 전기자동차의 조향 시스템에 관한 연구가 진행되었다[12-14]. 또한 모터를 독립적으로 사용하게 되면서 달라진 차량의 서스펜션 구조에 대한 연구가 진행되었다[15-17].

차동기어는 차량이 주행하는 데 있어서 필요한 부품 중 하나이다. 하지만 전기자동차에서는 주행거리를 증가시키기 위해 경량화를 해야 하며 이를 위해 차동기어의 무게를 줄이기 위한 노력을 해왔다. 하지만 경량화를 하는 데 한계가 있어 차동기어를 제거하기 위한 연구가 진행되어왔다. 이러한 연구는 시뮬레이션에 대한 연구와 인휠 모터를 사용한 연구가 주를 이루고 있으며, 본 연구는 차동기어 및 차동제한 장치와 같은 기능을 수행하도록 두 개의 BLDC 모터를 독립적으로 제어하고자 한다. 이렇게 구동 바퀴를 독립적으로 제어하게 되면 자동차의 매우 무거운 부품 중 하나인 차동기어가 없어도 원하는 대로 동력을 분배할 수 있어 무게를 크게 줄일 수 있다. 또한 소프트웨어를 통해 구동 바퀴를 독립적으로 제어하기 때문에 추가적인 장치 없이 각 바퀴의 동력을 제한할 수 있는 기능 구현을 수행하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 차량 모델링

전기자동차의 구동용 모터 독립제어 실험을 진행하기 위해 두 개의 구동용 모터를 탑재한 후륜구동형 자동차를 선정하여 차량의 조향각에 따른 양 바퀴의 속도를 차량동역학 모델링을 통해 계산하고자 하며 그림 1과 같이 나타낼 수 있다[17,18].

본 연구에서 사용된 차량 모델은 선회 시 완전한 원을 그리고, 회전 반경은 휠베이스보다 크다고 가정하였다[8].

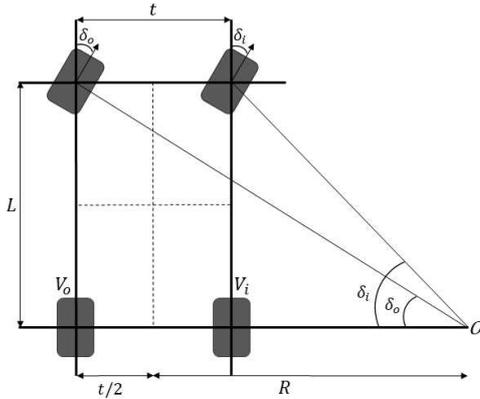


그림 1. 차량 회전 반경에 대한 모델링  
Fig. 1. Modeling of vehicle turning radius

차량이 회전할 때 회전반경 중심 O로부터 바깥쪽과 안쪽 구동 바퀴까지의 거리는 조향각  $\delta$ 와 휠베이스  $L$ 에 의해 결정된다. 차량 중심에서의 조향각  $\delta$ 는 전륜의 바깥쪽( $\delta_o$ )과 안쪽( $\delta_i$ ) 바퀴 조향각의 평균으로 가정하면 식 1과 같다.

$$\delta = \frac{\delta_i + \delta_o}{2} \quad (1)$$

차량 회전반경  $R$ 은 차량 회전 반경의 중심  $O$ 부터 차량의 뒤 차축의 중심까지의 거리이다. 이때 차량 회전 반경  $R$ 은 식 2와 같으며,

$$R = L \cdot \cot\delta \quad (2)$$

차량의 윤거가  $t$ 일 때 바깥쪽( $R_o$ )과 안쪽( $R_i$ ) 구동용 바퀴의 회전 반경은 식 3, 식 4와 같다.

$$R_o = R + \frac{t}{2} \quad (3)$$

$$R_i = R - \frac{t}{2} \quad (4)$$

구동 바퀴의 선속도  $V$ 는 회전 반경( $R$ )과 각속도( $\omega$ )의 곱으로 식 5로 표현된다.

$$V = R \cdot \omega \quad (5)$$

차량이  $\delta$ 의 각도로 회전 시 구동용 바퀴 바깥쪽( $V_o$ )과 안쪽( $V_i$ )의 선속도는 회전 반경에 대한 식 3과 식 4를 통해 다음과 같이 정리할 수 있다[7].

$$V_o = V \times \left(1 + \frac{t}{2 \times L \cdot \cot\delta}\right) \quad (6)$$

$$V_i = V \times \left(1 - \frac{t}{2 \times L \cdot \cot\delta}\right) \quad (7)$$

### 2.2 PID 제어기

PID 제어기는 모터제어 시스템에서 널리 사용되는 제어 시스템으로서 본 연구에서는 구동용 모터의 속도를 제어하기 위한 속도 PID 제어기와 구동용 모터의 토크를 제어하기 위한 전류 PI 제어기를 사용하였다[19].

PID 제어기의 각 항은 비례 항, 적분 항, 미분 항으로 각 항의 제어 특성이 있다. PID 제어기는 각 항의 특징을 모두 합하여 빠르고 정확하게 기준값을 추종할 수 있도록 한다. PID 제어기의 블록선도는 그림 2와 같다.

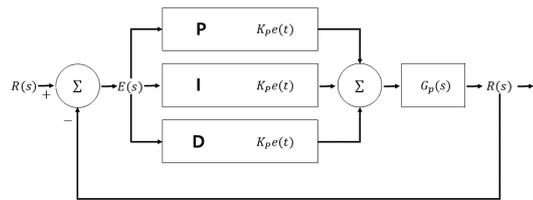


그림 2 .PID 제어기의 블록선도  
Fig. 2. Block diagram of PID controller

PID 제어기의 비례, 적분, 미분 제어기를 수식으로 표현하였다.

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

$K_p$ 는 비례제어 이득,  $K_i$ 는 적분제어 이득,  $K_d$ 는 미분제어 이득이다.

기준신호  $\omega_r^*(t)$ , 실제 신호  $\omega_r(t)$ 일 때 오차  $e(t)$ 는 식 9로 나타낼 수 있다.

$$e(t) = \omega_r^*(t) - \omega_r(t) \quad (9)$$

샘플링시간을  $T_s$ 라고 하면 그림 3의 오차 함수와 제어입력 함수는 식 10과 식 11로 각각 표현된다.

$$e_n = e(nT_s) \dots\dots \text{단, } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

$$u_n = u(nT_s) \dots\dots \text{단, } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

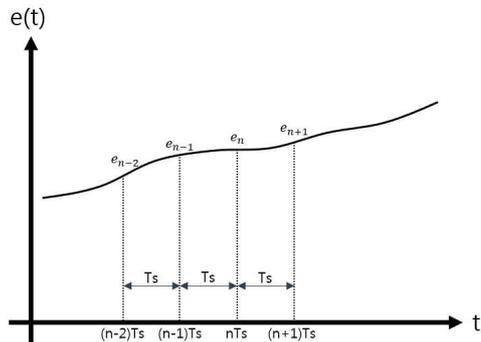


그림 3. 오차함수의 유한차분 그래프  
Fig. 3. Finite difference of error function

실제 디지털 제어기에서 PID 제어기의 출력 식이 적분 항으로 구성되어있기에 식 12와 같이 식의 양변을 미분하여 적분 항을 제거해야 한다.

$$\dot{u}(t) = K_p \times \dot{e}(t) + K_i \times e(t) + K_d \times \ddot{e}(t) \quad (12)$$

디지털 제어기에서 미분 항을 사용하기 위해 finite-difference approximation 방법으로 1차 미분 항과 2차 미분 항을 근사한다.

$$\dot{e}(t) = \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \quad (13)$$

$$\ddot{e}(t) = \frac{e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}}{T_s^2} \quad (14)$$

미분한 PID 출력 식 12에 위 미분 항 근사식을 대입한다.

$$\begin{aligned} \frac{u_n - u_{n-1}}{T_s} &= K_p \times \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} + K_i \times e_n \quad (15) \\ &+ K_d \times \frac{e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}}{T_s^2} \end{aligned}$$

위 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_n &= u_{n-1} + (K_p + K_i T_s + \frac{K_d}{T_s})e_n \quad (16) \\ &- (K_p + 2\frac{K_d}{T_s})e_{n-1} + \frac{K_d}{T_s}e_{n-2} \end{aligned}$$

속도 제어기로는 PID 제어기를 사용하였고, 전류 제어기로는 PI 제어기를 사용하였다. PI 제어기의 출력 식은 PID 제어기에서 미분 항을 제거하여 다음과 같다.

$$u_n = u_{n-1} + (K_p + K_i T_s)e_n - K_p e_{n-1} \quad (17)$$

속도 제어기와 전류 제어기를 사용하기 위하여 각 제어기의 실제 신호를 측정해야 한다. 속도 제어기는 구동용 모터인 BLDC 모터의 내부에 설치되어있는 홀 센서 신호를 채배한 펄스 신호를 입력받아 오차 값을 계산하고, 전류 제어기는 BLDC 모터를 구동하기 위한 3상 인버터 회로의 스위칭 소자 하단부와 컨트롤 보드의 접지 사이에 전류 센서를 설치하여 실제 모터에 흐르는 전류 크기 측정값을 오차 값을 계산한다[19].

### 2.3 BLDC 모터 제어

BLDC 모터는 DC 모터의 브러시와 정류자를 제거하고 회전자를 영구자석형으로 만들어 별도의 전원 공급이 필요하지 않고, 고정자인 전기자에 직류전원을 공급하여 동작시킨다. 회전자인 영구자석과 고정자의 3상 권선의 상태에 적합한 방향으로 전원을 공급해야 하기때문에 모터 내부에 120[°] 간격으로 배치된 홀센서로 자극의 위치를 파악하여 6개의 구간으로 구분한다. 그림 4와 같이 BLDC 모터의 구동을 위한 고정자

권선에 공급되는 직류 전원 스위칭 동작을 하기 위해 기계적인 스위치 대신 비접촉 반도체 스위치인 MOSFET를 사용하여 스위칭 동작을 수행하게 된다.

BLDC 모터는 회전자의 계자로 영구자석을 사용하기 때문에 고정자인 전기자의 전압을 제어하여 토크와 회전속도를 가변할 수 있다. BLDC 모터의 전기자 전압을 PWM 제어하기 위해 6개의 MOSFET으로 3상 인버터 회로를 만들어 사용한다.

일반적인 BLDC 모터는 120[°] 간격으로 자극을 검출하기 위한 홀센서가 배치되어있어 총 6개의 구역으로 검출할 수 있다. 각 구역을 검출하면 3상 권선 중에서 해당 구역에 맞는 2상 권선에 전류를 흘려주기 위하여 MOSFET를 스위칭하게 된다. 이러한 방식으로 그림 5와 같이 총 6개의 구역을 나누어 상을 도통하기 때문에 6-step 구동 방식이라고 부른다[19, 20].

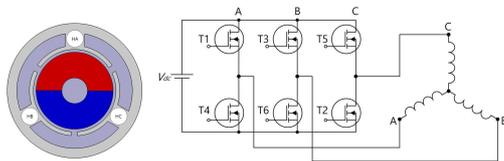


그림 4. 회전자의 위치 검출을 위한 홀센서 배열 및 3상 인버터 회로도  
 Fig. 4. Hall sensor array and three-phase inverter circuit diagram for rotor position detection

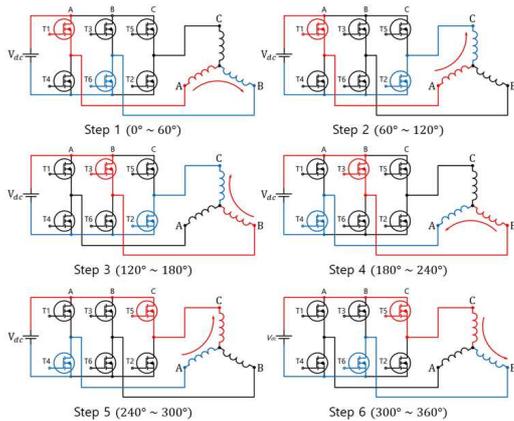


그림 5. BLDC 모터의 6스텝 구동  
 Fig. 5. 6-step drive of BLDC motor

### 3. 연구 방법

#### 3.1 제어 시스템

구동용 모터를 독립적으로 제어하기 위해서는 두 개의 3상 인버터를 독립적으로 제어할 수 있어야 한다. 실험 장치에 사용된 제어기인 STMicroelectronics사의 ARM Cortex-M7 계열의 32비트 마이크로컨트롤러인 STM32F767VGT6는 내부에 반전, 비반전 출력을 가진 PWM 출력 단자를 가지고 있고 내부에 고성능 타이머 카운터가 두 개 내장되어있어 두 개의 3상 인버터를 동시에 제어하는데 용이하다. MCU를 중심으로 좌측, 우측의 모터를 제어할 수 있는 3상 인버터를 구성하였다. 두 개의 3상 인버터는 IXYS 사의 IXFK360N10T MOSFET을 사용하여 구성하였고, 각 3상 인버터의 하단부와 컨트롤 보드의 접지 사이에 Allegro 사의 전류센서 ACS758LCB-050U를 사용하여 전류 측정 회로를 구성하였다.

두 개의 BLDC 모터를 제어할 수 있는 제어 시스템의 회로 구성은 전력변환회로인 3상 인버터, 인버터에 흐르는 전류를 측정하기 위한 전류 측정 회로, BLDC 모터의 회전속도 분해능을 높이기 위한 신호 체배회로, MCU에 제어 지령 입력을 위한 가속, 제동, 조향 값 조절 회로, 추가적인 지령 전달을 위한 키 입력회로, 제어 프로그램 동작 확인을 위한 TFT-LCD 회로, 4채널 D/A 컨버터 DAC7554와 rail to rail opamp TLV2374ID를 사용하여 오실로스코프로 출력을 확인할 수 있도록 D/A 컨버터 출력 회로를 구성하였다.

제어 보드에 전원을 공급하기 위해 가정용 단상 220[V] 전원을 ABB 사의 CP-S 24/20.0 SMPS를 사용하여 24[V]로 변환한다. 제어 보드에 입력된 24[V] 전원은 3상 인버터 회로를 거쳐 BLDC 모터로 공급되고, 제어보드 내부에 12[V], 5[V], 3.3[V] 전압 레귤레이터를 사용하여 각 회로에 전원을 공급한다. 본 연구에서 사용된 실험 장치의 블록 다이어그램은 그림 6과 같다.

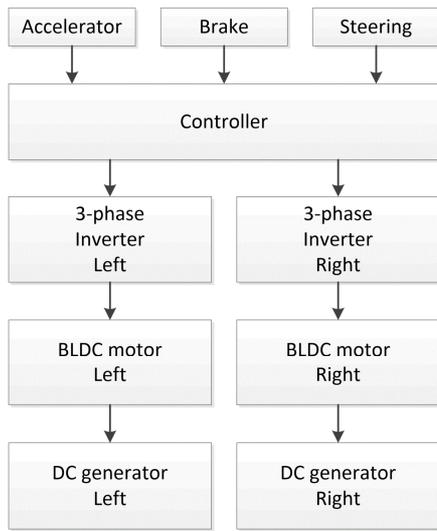


그림 6. 실험 장치 블록선도  
Fig. 6. Block diagram of the experimental setup

### 3.2 실험 장치

실험 장치는 두 개의 바퀴 구동용 BLDC 모터와 부하를 입력하기 위한 DC 발전기, 컨트롤 보드, 전원을 공급하기 위한 24[V] SMPS 로 구성되어있다. 바퀴 구동용 BLDC 모터는 BMG MOTOR사의 BMG90B200B이고 사양은 표 1과 같다. DC 발전기를 바퀴 구동용 BLDC 모터에 커플링 하여 부하로 사용하였다. 실험 장치를 제어할 수 있는 컨트롤 보드는 제어기 회로, 전력변환 회로, TFT-LCD 회로, 지령 입력 회로, DAC 출력 회로를 모두 설계하여 PCB 기판으로 제작하였다. 실험장치의 모습은 그림 7과 같다.

표 1. BLDC 모터의 사양

Table 1. Specification and parameters of sample BLDC motor

Rated value and parameter	Unit	Value
Rated voltage	V	24
Rated current	A	14
Rated power	W	200
Rated torque	kgf · cm	6.5
Rated speed	rpm	3000
Speed control range	rpm	300 ~ 3000

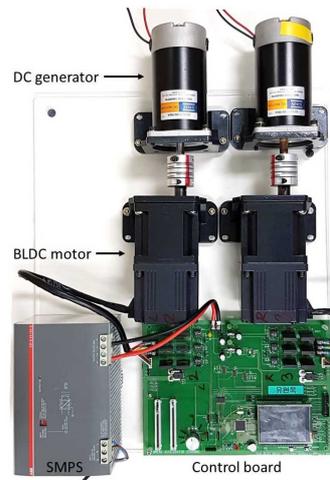


그림 7. 실험 장치의 사진  
Fig. 7. Photograph of experimental setup

### 3.3 제어 프로그램

차량의 구동용 모터 독립제어 시스템의 프로그램은 C언어로 작성하였으며, 하드웨어 개발 Tool은 ST-LINK/V2-ISOL을 사용하였다.

제어 보드의 전원을 공급하면 프로그램에 사용되는 주요 변수와 사용자 함수들을 선언하고 초기화한다. 이후 50[ $\mu$ s] 마다 모터를 제어하기 위한 인터럽트 루틴에 진입하게 된다. 인터럽트 루틴에서는 차량의 속도, 조향각에 따른 좌측, 우측 모터의 회전속도 기준값을 계산하여 모터를 제어하게 된다.

프로그램은 제어를 위한 주요 변수들을 선언하고, 시스템을 초기화한 후 메인 프로그램 루프에 진입하게 되어 주요 데이터 값을 TFT-LCD에 표시하여 확인할 수 있도록 하였다.

모터 제어 인터럽트 루틴은 시스템 초기화 후 50 [ $\mu$ s] 마다 두 개의 모터를 제어하게 된다. 인터럽트 제어 루틴 내부의 전류 제어기는 50[ $\mu$ s] 주기로 동작하며, 속도 제어기는 50[ms]의 주기로 동작한다. 제어 인터럽트에서 두 모터에 흐르는 전류의 크기를 매번 비교하여 두 바퀴가 모두 지면과 접지력을 유지하고 있는지 확인하며, 부하가 없는 모터는 지면과의 접지력을 잃었다고 간주하여 다시 부하가 생길 때까지 저속으로 구동하게 된다. 제어 프로그램 블록도는 그림 8과

같으며, 주 프로그램 및 인터럽트 루틴의 프로그램 순서도는 그림 9와 같다.

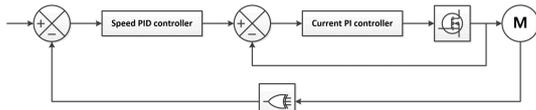


그림 8. 모터 제어 블록선도  
Fig. 8. Block diagram of motor control

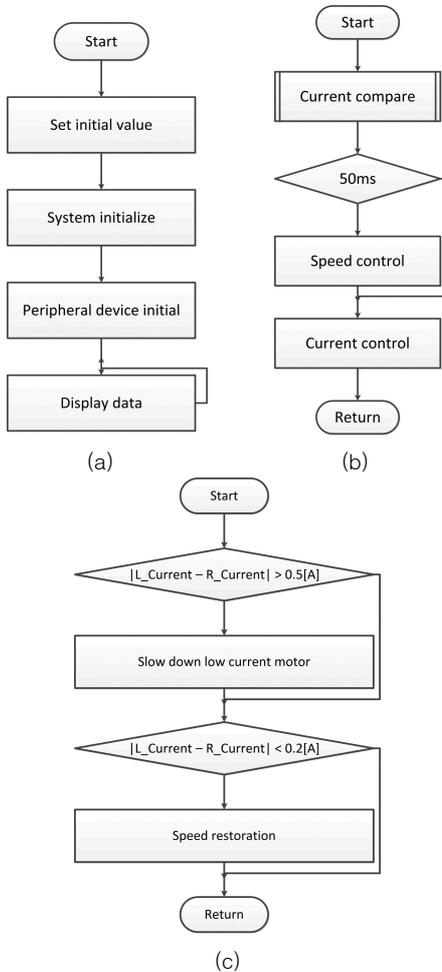


그림 9. 제어 프로그램의 순서도 (a) 메인 프로그램 (b) 인터럽트 루틴 (c) 현재 비교 루틴  
Fig. 9. Flow chart of control program (a) Main program (b) Interrupt routine (c) Current compare routine

### 3.4 실험 방법

직진, 방향전환 및 하나의 바퀴가 수렁에 빠져 노면과의 접지력을 잃어버리는 상황을 실험 장치로 구현하여 실험을 진행하였다.

차량이 직진 중 가속 및 감속을 하거나 경사로에 진입 또는 탈출하는 경우 모터에 가해지는 부하의 크기가 변동하여 일정한 속도제어를 위해서 모터의 전류를 조절해야 한다.

차량이 방향전환을 할 때 식 6, 식 7과 같이 좌측 및 우측 구동 바퀴의 속도는 핸들의 조향각과 자동차의 속도에 따라 달라진다. 자동차의 조향각에 따른 구동 모터의 속도를 비교하기 위해 프로그램으로  $\pm 30^\circ$ 의 범위 안에서  $10^\circ$  간격으로 조향각을 스텝 변경하는 실험과 조향각을 가변저항 레버를 이용하여 선형적으로 조향하는 실험을 진행하였다.

주행 중인 차량의 한쪽 구동용 바퀴가 수렁에 빠져 노면과의 접지력을 잃어버리는 경우 모터에 가해지는 부하의 급격하게 크기가 작아지는 상황을 구현하여 실험을 진행하였다. 주행 중인 한쪽 모터에 가한 부하를 순간적으로 제거하여 좌측과 우측 모터에 흐르는 전류의 크기를 5회 측정한 평균값의 차이가 50% 이상 감소하게 되면 해당 바퀴가 수렁에 빠졌다고 가정하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 직진 주행

차량이 직진하는 상황을 실험 장치로 가정하여 실험을 진행하였다. 모든 파형의 X축은 시간, Y축은 전압이며, 전압은  $1[V/div]$ 이다. 속도 파형은  $1000[rpm/div]$ 이고, 전류 파형은  $1[A/div]$ 이다.

그림 10은 차량이 가속하거나 감속하는 상황에서 좌측과 우측의 구동용 모터의 속도 및 전류 제어 응답 특성을 실험한 결과이다. 각 모터의 속도를 4초간  $1000[rpm]$ 으로 유지하다가  $3000[rpm]$ 으로 스텝 증가시켰다. 그 후 다시 기준속도를  $1000[rpm]$ 으로 감소시켰다. 채널 1은 전류 ref, 채널 2는 속도 ref, 채널 3은 실제 속도, 채널 4는 U, V, W상의 합산 전류이다. 기준속도가  $3000[rpm]$ 으로 상승할 때 기준속도를 추종하기 위해 전류의 크기가 급격하게 증가하지만 기준

속도에 도달하면 일정한 크기의 전류 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 기준속도를 급격하게 증가시키거나 감소시켰을 때 모터의 오버슛이나 언더슛이 발생하지 않으며, 구동용 모터 모두 약 1초 이내에 기준속도를 추종하는 문제가 없는 것으로 확인된다.

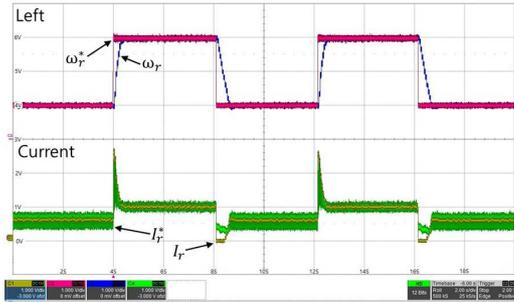


그림 10. 차량이 직진하는 경우 속도 및 전류제어 응답 특성 실험 결과  
(기준속도 : +1,000 ↔ +3,000[rpm])  
Fig. 10. Experimental results of speed and current control response characteristics when the vehicle is going straight  
(Speed reference : +1,000 ↔ +3,000[rpm])

그림 11은 차량이 주행 중에 경사로에 진입하거나 경사로에서 탈출하여 부하가 변동하는 경우에 속도 응답특성을 확인하기 위한 실험 결과이다. BLDC 모터를 3000[rpm]으로 일정하게 구동하다가 2초 후에 급격하게 부하를 투입하였고, 다시 약 4초 후에 급격하게 부하를 제거하였다. 채널 1은 전류 ref, 채널 2는 모터 회전속도, 채널 3은 U, V, W상의 합산 전류, 채널 4는 속도 ref이다. 부하를 급격하게 투입한 순간 3000[rpm]의 기준속도로 회전하던 모터의 실제 속도가 약 300[rpm] 감소하였고 약 2초 이내에 다시 기준속도를 추종하는 것을 확인할 수 있다.

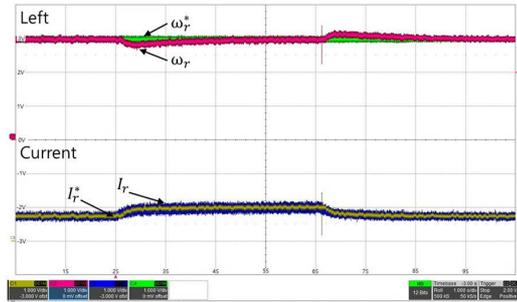


그림 11. 급격한 부하 변동에 따른 속도 및 전류제어 응답 특성 실험 결과 (기준속도 : +3,000[rpm])  
Fig. 11. Experimental results of the speed and current control response characteristics due to sudden load fluctuations (Speed reference : +3,000[rpm])

그림 12는 차량의 한쪽 바퀴가 수렁(Pothole)에 빠진 특수한 상황에 대한 실험 결과이다. 좌측 및 우측 모터의 회전속도를 모두 3000[rpm]으로 일정하게 구동하고 약 2초 뒤 우측 바퀴의 부하를 급격하게 제거하였다. 그 후 다시 부하를 급격하게 투입하여 바퀴의 접지력이 회복된 상황을 구현하여 실험하였다. 채널 1은 전류 ref, 채널 2는 속도 ref, 채널 3은 실제 속도, 채널 4는 U, V, W상의 합산 전류이다.

좌측 및 우측 모터에 부하가 인가된 상태로 주행 중 약 2초 후에 급격히 부하를 제거하였다. 이후 모터에 흐르는 전류의 크기를 계산하여 바퀴와 노면 사이의 접지력이 없어졌다고 판단하게 되어 약 2초 후에 기준속도를 1000[rpm]으로 감소시켜 주행하는 것을 확인하였다. 약 7초 후에 다시 우측 모터에 부하를 인가하여 모터에 흐르는 전류의 크기가 약 100[mA] 상승한 것을 확인할 수 있다. 약 1초 후 우측 모터의 접지력이 회복되었다고 판단하여 기준속도를 3000[rpm]으로 복귀시키는 것을 확인할 수 있다.

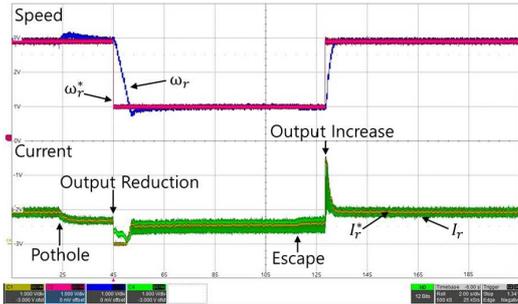


그림 12. 차량의 한쪽 바퀴가 수렁에 빠진 상황에 대한 실험 결과 (기준속도 : +3,000[rpm] → +1,000[rpm])  
 Fig. 12. Experimental results of the situation where one wheel of a vehicle is in a pothole (Speed reference : +3,000[rpm] → +1,000[rpm])

#### 4.2 회전 주행

차량이 회전하는 경우 좌측과 우측의 구동 모터와 좌측 모터의 회전속도 차이를 직접 제어하는 실험을 진행하였다. 차량의 조향각은  $\pm 30^\circ$ 의 범위로 가정하였고, 모터의 회전속도는 1500[rpm]으로 고정 후 실험하였다. 채널 1은 좌측 모터 속도 ref, 채널 2는 우측 모터 속도 ref, 채널 3은 우측 모터 실제 속도, 채널 4는 좌측 모터 실제 속도이다.

그림 13은 약 5초마다 조향각을  $10^\circ$  간격으로 스텝으로 변화하여 두 모터의 속도를 제어하는 실험 결과이다. 조향각을  $10^\circ$ 의 간격으로 좌회전 및 우회전한 결과 좌측 및 우측 모터의 속도제어가 원활히 수행되는 것을 확인할 수 있다.

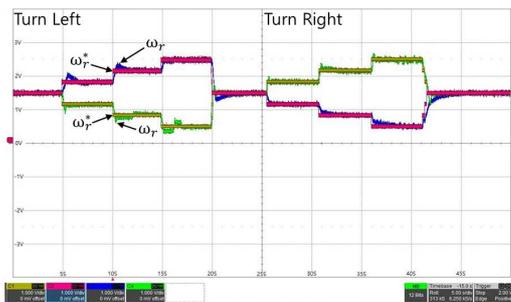


그림 13. 차량이 회전하는 경우 좌측, 우측 모터의 속도 제어 실험 결과 (조향각 범위 :  $\pm 30^\circ$ ,  $10^\circ$  간격)  
 Fig. 13. Experimental results for speed control of left and right motors when the vehicle is turning (Steering angle range :  $\pm 30^\circ$ ,  $10^\circ$  interval)

그림 14와 15는 운전자가 핸들을 조향하는 것과 같이 선형적으로 핸들을 조작하는 경우의 제어 특성을 확인하였다. 차량의 조향각을  $\pm 30^\circ$ 의 범위 안에서 가변저항을 사용하여 선형적으로 조향각을 변화하였다. 두 모터 모두 1500[rpm]으로 일정하게 구동 중 가변저항을 사용하여 4초 후 좌회전 및 우회전을 시작하며 약  $25^\circ$  조향 후 약 3초 유지하고 조향각을  $0^\circ$ 로 복구하였다.

실험 결과 조향각을 선형적으로 조향했을 때 식 6과 7로 계산된 좌측 및 우측의 기준속도 값을 정확하게 추종하는 것을 확인할 수 있다.

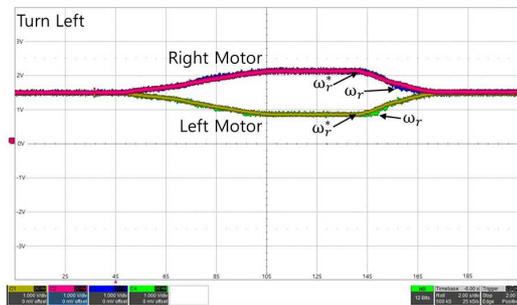


그림 14. 차량이 좌회전하는 경우 좌측, 우측 모터의 속도 제어 실험 결과 (조향각 범위 :  $\pm 30^\circ$ , 선형)  
 Fig. 14. Experimental results for speed control of left and right motors when the vehicle is turning left (Steering angle range :  $\pm 30^\circ$ ,  $10^\circ$  linear)

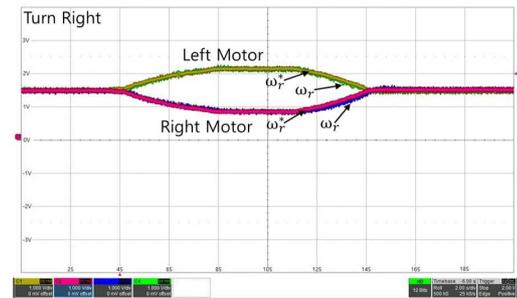


그림 15. 차량이 우회전하는 경우 좌측, 우측 모터의 속도 제어 실험 결과 (조향각 범위 :  $\pm 30^\circ$ , 선형)  
 Fig. 15. Experimental results for speed control of left and right motors when the vehicle is turning right (Steering angle range :  $\pm 30^\circ$ ,  $10^\circ$  linear)

## 5. 결론

전기자동차에서 두 개의 구동용 바퀴를 각각 독립적으로 제어하기 위하여 두 개의 BLDC 모터를 제어할 수 있는 제어 보드를 설계 제작하고, 각 모터에 부하를 연결하고 실시간으로 부하전류를 측정하여 구동용 바퀴가 노면에 접지된 상태를 감지할 수 있도록 하였다. 이에 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 기본적인 주행 성능을 확인하기 위하여 스텝으로 기준속도를 변동하는 경우에도 양쪽의 모터가 회전속도를 동일하게 유지하여 차량이 급출발이나 급정지를 하더라도 원활한 주행을 가능할 것으로 판단된다.

둘째, 차량의 조향각에 따른 각 구동용 모터의 기준속도를 계산하여 두 개의 바퀴를 독립적으로 제어한 결과 차량의 회전 반경에 따라 좌측 및 우측의 바퀴가 원활하게 제어되는 것을 확인하였다. 차량의 조향각을 10[°] 간격으로 스텝 변경하는 경우와 실제 탑승자가 조향하듯이 선형적으로 변경하였을 경우에 대하여 모두 원활한 회전이 수행되었다.

셋째, 차량의 구동용 바퀴 중에서 하나가 수렁에 빠져서 지면과의 접지력을 잃고 동력 손실이 발생하는 경우 수렁에 빠진 바퀴의 모터에 흐르는 전류가 작아지는 것을 확인하여 접지력을 잃은 바퀴를 파악할 수 있으며, 해당 바퀴의 동력을 차단하고 반대편 모터의 동력을 유지함으로써 불필요한 에너지 손실을 줄일 수 있는 것을 확인하였다.

향후 모형차량을 제작하여 실차 실험을 진행한다면 더욱 직관적인 제어가 가능한 실험 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] Choe, J., "Special Issues-Current Status and Prospects of Domestic Electric Vehicle Development.", JOURNAL OF ELECTRICAL WORLD, 29-33, 2010.
- [2] Gwon, Y. G., "Case Study of Short-Range Electric Vehicle Development.", KIPE Magazine, 16(2), 38-43, 2011.
- [3] Lee, J., Han, J., & Sharma, S. K., "Structural analysis on the separated and integrated differential gear case for the weight reduction.", In Advances in Engineering Design: Select Proceedings of FLAME 2020, pp. 175-181, Springer Singapore 2021.
- [4] Kwon, Y. W., Kwon, S. Y., & Park, S. W., "Fatigue Properties of Aluminum Joints for Application of Autobody.", Proceedings of the Spring and Fall Conference of the Society of Automotive Engineers of Korea, 983-990, 1997.
- [5] Kim, K. C., "Current Status and Issues of Technology for Electric Vehicle Drive Motors.", Auto Journal, 39(2), 40-44, 2017.
- [6] Kim, D. H., Shin, K. H., Lee, S. M., & Yeo, T. J., "Development of a Rear In-Wheel Drive System for a Compact Car.", Proceedings of the Korea Society of Automotive Engineers Fall Conference and Exhibition, 1350-1354, 2010.
- [7] Lee, J. Y., Seo, S. H., Son, W. H., Kim, C. J., & Han, C. S., "System Modeling and Simulation for an In-Wheel Drive Type 6×6 Vehicle Platform.", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, 19(2), 1-11, 2011.
- [8] Yoon, S. Y., Lee, J. J., "Implementation of an Electric Vehicle Drive System Using an In-Wheel Motor." Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, 62(6), 750-755, 2013.
- [9] Kim, S. K., Park, J. I., Jeong, S. H., Hwang, S. W., Lee, S. H., & Kim, W. K., "Development of a Control System for Improving Handling Performance Based on xEV Front/Rear Drive Motors.", Korean Society of Automotive Engineers Fall Conference and Exhibition, 270-275, 2023.
- [10] Song, H. W., "A study on the improvement of energy efficiency and cornering stability performance for 4WD in-wheel electric vehicle", (Doctoral dissertation, Master Thesis, Sungkyunkwan University), 2013.
- [11] Lee, Y. H., Yoon, K. J., Kim, D. W., Lee, S. M., Kim, D. H., & Jeon, J. W., "Development of I-TCS algorithm for in-wheel hybrid vehicle.", Korean Society of Automotive Engineers Spring Conference,

1159-1166, 2019.

[12] Kim, H. S., Jeong, C. S., Yang, H. R., & Yang, S. Y., "A study on the relationship between steering and driving wheel speed of in-wheel type electric vehicle.", Korean Society of Automotive Engineers Branch Conference, 6-11, 2011.

[13] Yang, H. R., Yang, S. Y., "A Study on the Implementation of Body Attitude Control System for Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicle.", Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers, 78-82, 2012.

[14] Kim, S. H., Kim, C. J., Kim, D. H., Choi, J. Y., Choi, M. S., & Han, C. S., "A Study on the Driving Force and Turning Control of In-Wheel Independent Drive Rear-Wheel Electric Vehicle.", The Korean Society of Automotive Engineers Spring Conference, 1015-1019, 2011.

[15] Lee, J. M., Kim, D. H., & Kim, H. S., "Development of Control Algorithm for In-Wheel Motor Independent Drive Electric Vehicle.", Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers Spring and Fall Conference, 1772-1777, 2006.

[16] Kim, H. D., Choi, K. J., "Integrated Drive and Suspension Control System for Rear-Wheel Drive In-Wheel Electric Vehicle.", The Korean Society of Automotive Engineers, 24(4), 439-446, 2016)

[17] Jazar, R. N., "Vehicle dynamics (Vol. 1).", Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2008.

[18] Gillespie, T., "Fundamentals of vehicle dynamics.", SAE international. 2021.

[19] Yoon, D. Y., "BLDC Motor Control Technology", Ohm, 2015.

[20] Kim, S. H., "Motor Control-DC, AC, BLDC", Bokdu Publishing, 2017.

[21] Yoon, D. Y., "ARM Cortex-M7 STM32F767 Conquest", Ohm, 2017.

[22] Zhao, Y., Zhang, C., "Electronic Stability Control for Improving Stability for an Eight In-Wheel Motor-Independent Drive Electric Vehicle.", Shock and Vibration, 2019(1), 8585670, 2019.

[23] Cao, K., Hu, M., Wang, D., Qiao, S., Guo,

C., Fu, C., & Zhou, A., "All-wheel-drive torque distribution strategy for electric vehicle optimal efficiency considering tire slip.", IEEE Access, 9, 25245-25257, 2021.

---

### 저자약력

---

**유 현 옥 (Hyeon-Wook Yoo)**

[정회원]



- 2020년 8월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과(기계공학석사)
- 2020년 12월 ~ 현재 : (주)두크대리

〈관심분야〉 전력전자, 제어계측

**박 진 영 (Jin-Young Park)**

[정회원]



- 2019년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2023년 8월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 2021년 9월 ~ 2023년 9월 : RIS 지역혁신 플랫폼 모빌리티소부장사업본부 책임연구원
- 2023년 9월 ~ 현재 : ㈜이피에스텍 연구소장

〈관심분야〉 전력전자, 제어계측, 아날로그