

工學碩士 學位請求論文

전류오차보상에 의한 직류전동기의  
센서리스 속도제어에 관한 연구

A Study on the Sensorless Speed Control of Direct Current Motor  
using Current Error Compensation

指導教授 金 成 煥

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機關시스템工學科

咸 亨 喆

## 목 차

목 차 .....	i
그림목차 .....	iii
표목차 .....	iv
Abstract .....	v
기호 및 약어 .....	vii
1. 서 론 .....	1
1.1 연구배경 및 동향 .....	1
1.2 연구 목적 .....	2
1.3 논문의 구성 .....	3
2. 직류전동기의 개요 .....	4
2.1 직류전동기의 구동원리 .....	4
2.2 직류전동기의 수학적 모델링 .....	6
2.3 직류전동기 제어방식 .....	8
2.3.1 전기자전압 제어방식 .....	9
2.3.2 계자 제어방식 .....	10
3. 직류전동기 센서리스 속도제어 .....	12
3.1 기존의 센서리스 속도제어 .....	12
3.2 전류오차보상에 의한 센서리스 제어 .....	14
4. 시뮬레이션 및 검토 .....	18
4.1 전류오차보상에 의한 제어시스템의 시뮬레이션 .....	18
4.2 시뮬레이션 결과 검토 .....	19

5. 실험 및 검토 .....	25
5.1 실험장치의 구성 .....	25
5.1.1 하드웨어 구성 .....	25
5.1.2 제어프로그램 구성 .....	26
5.2 실험결과 검토 .....	27
6. 결 론 .....	34
참고문헌 .....	35

## 그림 목차

Fig. 2.1	Rotation principle of DC motor. ....	5
Fig. 2.2	Equivalent circuit of DC motor. ....	6
Fig. 2.3	Dynamic model of DC motor. ....	8
Fig. 2.4	Armature voltage control method of separate excitation field DC Motor. ..	9
Fig. 2.5	Armature voltage control method of permanent magnet DC motor. ....	10
Fig. 2.6	Field current control method of separate excitation field DC Motor. ....	11
Fig. 3.1	The control system by speed estimation. ....	13
Fig. 3.2	Input and output variables of DC motor. ....	15
Fig. 3.3	Input and output variables of numerical model. ....	15
Fig. 3.4	The block diagram of the current error compensation control system. ·	17
Fig. 4.1	Simulation responses for step change of speed setting.(0→50[rpm]) ...	20
Fig. 4.2	Simulation responses for step change of speed setting.(-100→100[rpm]) ..	21
Fig. 4.3	Simulation responses for step change of load torque.(0→1[N·m]) .....	22
Fig. 4.4	Simulation responses for step change of speed setting.(0→1000[rpm]) ....	23
Fig. 4.5	Simulation responses for step change of speed setting. ....	24
Fig. 5.1	Overall DC motor drive system. ....	26
Fig. 5.2	Flow chart of control program. ....	27
Fig. 5.3	Experimental responses for steady state in the low speed range.(50[rpm]) ·	29
Fig. 5.4	Experimental responses for step change of speed setting.(-100→100[rpm]) ·	30
Fig. 5.5	Experimental responses for step change of load torque.(0→0.5[N·m]) ·	31
Fig. 5.6	Experimental responses for step change of speed setting.(0→1000[rpm]) ·	32
Fig. 5.7	Experimental responses for step change of speed setting. ....	33

## 표목차

Table 5.1 Parameters of DC motor used for computer simulation and experiment. · 18

# **A Study on the Sensorless Speed Control of Direct Current Motor using Current Error Compensation**

Hyung-Chul Ham

Department of Marine Engineering, Graduate School,  
Korea Maritime University

## **Abstract**

The DC motor has broadened its role in many industrial parts. To control the speed for DC motor, the system usually requires the motor speed. However, there are many problems in case of using speed sensors. A sensor requires a mounting space on the motor, reduces the reliability, and increases cost of the drive system.

This paper proposes a new speed control method for DC motor, which requires neither shaft encoder nor speed estimator. The proposed scheme is based on decreasing armature current gap between a numerical model and an actual motor. By supplying the identical instantaneous voltage to both model and motor in the direction of reducing the armature current difference, the rotor approaches to the model speed, that is, reference value.

DC motor can be considered as a system whose inputs are field & armature voltage and outputs are field & armature current and armature velocity. As the

numerical model whose electric parameters are the same as those of the actual motor is adopted, the armature rotating speed can be converged to the setting value by controlling voltages and currents on both sides to be equalized.

The simulation and experiment results indicate good speed and load responses and also show accurate speed changing performance.

## 기호 및 약어

$B$	: 공극 자속밀도 [ $Wb/m^2$ ]
$B_m$	: 마찰계수 [ $N \cdot m / rad / s$ ]
$E$	: 유기전압 [ $V$ ]
$e_f$	: 역기전력 [ $V$ ]
$F$	: 전자력 [ $N$ ]
$i_a, i_{am}$	: 전동기 및 모델의 전기자전류 [ $A$ ]
$i_f, i_{fm}$	: 전동기 및 수식모델의 계자전류 [ $A$ ]
$J$	: 관성모멘트 [ $Kg \cdot m^2$ ]
$K_T$	: 계자전류가 일정할 때의 토크 상수
$K_T'$	: 전기자전류가 일정할 때의 토크 상수
$K_{pv}, K_{tv}$	: PI 제어기의 비례 및 적분 상수
$L_{AA}$	: 전기자 자기인덕턴스 [ $H$ ]
$L_{FF}$	: 계자 자기인덕턴스 [ $H$ ]
$L_{AF}$	: 상호인덕턴스 [ $H$ ]
$p$	: 미분연산자
$r_a$	: 전기자저항 [ $\Omega$ ]
$r_f$	: 계자저항 [ $\Omega$ ]
$T$	: 토크 [ $Nm$ ]
$T_e$	: 출력토크 [ $Nm$ ]
$T_L$	: 부하토크 [ $Nm$ ]



$v_a^*$	: 전기자전압 인가 지령 값 [ V ]
$v_a, v_{am}$	: 전동기 및 모델의 전기자전압 [ V ]
$v_f, v_{fm}$	: 전동기 및 모델의 계자전압 [ V ]
$V_{dc}$	: 직류링크전압 [ V ]
$\omega_r, \omega_{rm}$	: 전동기 및 모델의 각속도 [ rad/s ]
$\widehat{\omega}_r$	: 추정 전동기 각속도 [ rad/s ]
$C$	: 상수
$M$	: DC motor
$IC$	: Integrated circuit
$IGBT$	: Insulated gate bipolar transistor
$PC$	: Personal computer

# 1. 서 론

## 1.1 연구배경 및 동향

직류전동기는 전동기 중에서 속도제어가 가장 용이하며 광범위하고 정밀한 속도제어가 가능하기 때문에 수천[kW]의 대용량 전동기에서 수[mW]의 서보용 미니 전동기에 이르기까지 각종 용도에 사용되고 있으며, 자동제어의 발전과 더불어 그 역할이 증대되고 있다.

일반적으로 직류전동기의 속도제어법에는 계자제어법, 저항제어법 그리고 전기자전압제어법이 사용되는데 계자제어법은 고속영역에서 정류가 나빠지는 단점이 발생하고, 저항제어법은 전력효율이 나빠져 비경제적인 제어 방법이다. 따라서 직류전동기의 속도제어에는 연속적인 제어가 가능하고 효율이 좋으며 전압의 가감이 쉬운 전기자전압제어법이 주로 사용된다.

기존의 직류전동기 속도제어에는 아날로그제어 방식이 적용되었으나, 최근에는 마이크로프로세서를 이용한 디지털제어 방식으로 전환되고 있다. 직류전동기 속도제어에는 정도가 높은 속도 검출기가 요구되는데 그 가격이 고가이기 때문에 전체시스템의 가격을 크게 상승시킨다. 그리고 시스템에 이러한 검출기를 사용하게 되면 검출기로부터 신호를 받아 처리를 해야 하기 때문에 부가적인 회로가 추가되어 시스템도 복잡해진다. 또한, 검출기의 구조는 기본적으로 광 센서와 빛을 투과하는 유리판, 광 신호를 외부로 보내는 전송회로 등으로 구성되는데 이러한 구조로 인하여 주위온도가 고온, 저온으로 될 경우나 작동환경에 진동, 분진, 습기 등이 심하게 될 경우에는 검출기가 오동작할 확률이 충분히 있어 신뢰성에 문제가 발생된다. 그리고 대부분의 검출기는 전동기 축의 한쪽 끝에 커플러를 이용하여 부착되도록 제작이 되어 전동기 설계 가공이 복잡해지고 전동기 축 방향 크기가 길어지는 단점이 생긴다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 속도검출기를 사용하지 않는 제어

즉, 센서리스 속도제어에 대한 연구가 진행되어 왔다. 기존의 센서리스 속도 제어 방법에는 전기자전압, 전류 및 계자전류로부터 전동기의 회전수를 추정하는 방법이 사용된다.

## 1.2 연구 목적

본 논문에서는 양호한 제어특성을 얻을 수 있으며 간단하면서도 강인한 특성을 갖는 새로운 직류전동기 센서리스 속도제어 방법을 제안하며 실험을 통하여 제안된 방식의 우수성을 입증하고자 한다.

본 논문에서는 실제 직류전동기와 수식모델의 전기자전류 차이를 억제하도록 전압을 인가함으로써 전동기의 속도가 설정치인 모델의 속도를 추종하도록 하는 방식을 사용하였는데, 이 방법은 기존의 방식에서 사용된 속도추정을 필요로 하지 않고 다만 실제 직류전동기와 수식모델의 전기자전류 차이를 영으로 수렴시킴으로써 간접적으로 속도제어를 실현하는 방식이다. 즉, 직류전동기는 전기자전압과 계자전압을 입력으로 받아 전기자전류, 계자전류 및 속도를 출력으로 내보내는 시스템으로 간주될 수 있으므로 제어대상인 전동기와 전기적 파라미터가 동일한 수식모델을 취하여 양자의 전압 및 전류가 같아지도록 제어함으로써 직류전동기의 출력인 회전자속도를 모델의 입력인 속도지령치에 접근시킨다.

본 논문에서는 전류오차보상에 의한 제어방식의 이론적인 배경 및 타당성을 기술하고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 센서리스 속도제어 방식의 우수성을 검증한다.

### 1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다.

1장 서론에서는 연구배경 및 동향과 연구 목적을 기술하고, 2장에서는 직류전동기의 구동원리, 수학적 모델링 및 기본적인 속도제어 방법에 관하여 서술한다.

3장에서는 기존의 센서리스 속도제어방식에 대해 간략히 기술하며, 본 논문에서 제안하는 전류오차보상에 의한 센서리스 제어방법의 이론적인 배경 및 제어알고리즘에 대해서 기술한다.

4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안한 속도제어방식의 응답특성을 알아보고, 5장에서는 제안된 센서리스 제어방식의 실현을 위한 실험장치의 구성과 실험을 통한 결과를 검토하여 제안한 제어알고리즘의 우수성을 서술하며, 6장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## 2. 직류전동기의 개요

### 2.1 직류전동기의 구동원리

직류전동기의 회전 원리를 설명하면 다음과 같다. 그림 2.1(a)에서 보는 것과 같이 자계에서 유효자속방향과 직각으로 놓인 길이  $l$ [m]의 도체에  $i$ [A]를 흘리면 플레밍의 왼손법칙에 의해 도체에는  $F$ [N]가 작용한다. 이 때 전자력  $F$ 는 다음과 같다.

$$F = ilB[N] \quad (2.1)$$

여기서,  $B$ 는 공극자속밀도 이다.

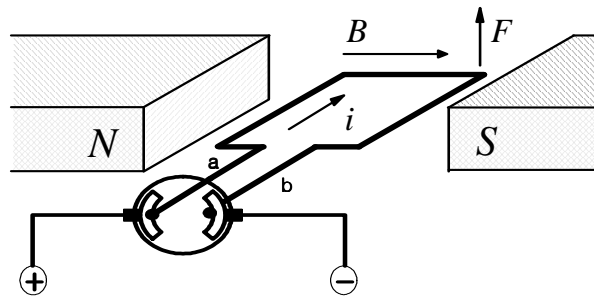
토크는 회전 중심에서 도체까지의 거리를  $C$ [m]로 하면 식(2.2)와 같이 표현된다.

$$T = CF[Nm] \quad (2.2)$$

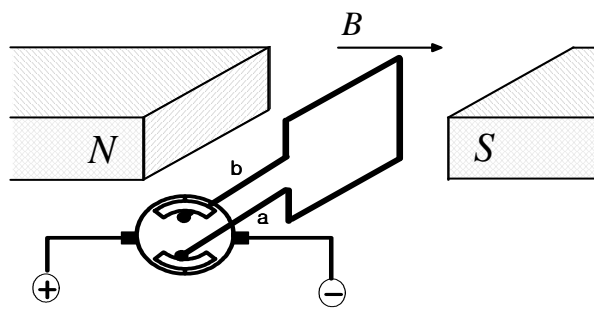
도체가 회전해서 직각위치에 오면 그림 2.1(b)와 (c)에서와 같이 정류자와 브러시의 위치가 바뀔에 따라 도체로 흐르는 전류의 방향이 바뀐다. 이상의 원리로 코일은 회전을 계속하게 된다. 동시에 도체가 회전하므로 플레밍의 오른손 법칙에 의하여 유기전압이 발생한다. 이를 표시하면 다음과 같다.

$$E = vBl[V] \quad (2.3)$$

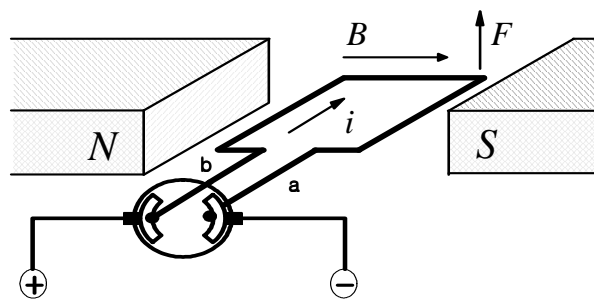
여기서,  $v$ 는 도체의 회전 속도이다.



(a)



(b)



(c)

그림 2.1 직류전동기의 회전원리

Fig. 2.1 Rotation principle of DC motor.

## 2.2 직류전동기의 수학적 모델링

그림 2.2는 직류전동기의 등가모델을 나타낸다. 직류전동기의 구조를 살펴보면 전기자, 계자, 브러쉬, 정류자로 구분할 수 있다. 전기자(armature)는 회전력을 발생하기 위해 필요한 전류가 흐르는 장치로서 코일이 감겨있다. 계자(field)는 회전력을 발생하기 위해 필요한 자속을 발생시키는 장치를 말하며 전류를 흘려서 자속을 만들기도 하고 영구자석을 사용하기도 한다. 브러쉬(brush)는 전원에서부터 공급되는 전류를 전기자에 주입하는 회로의 일부로 흑연이나 귀금속으로 되어있으며 정류자와 접촉하고 있다. 그리고 정류자(commutator)는 전기자의 일부로 + 극(正極)브러쉬로부터 - 극(負極)브러쉬로 전류를 보내는 장치이다.

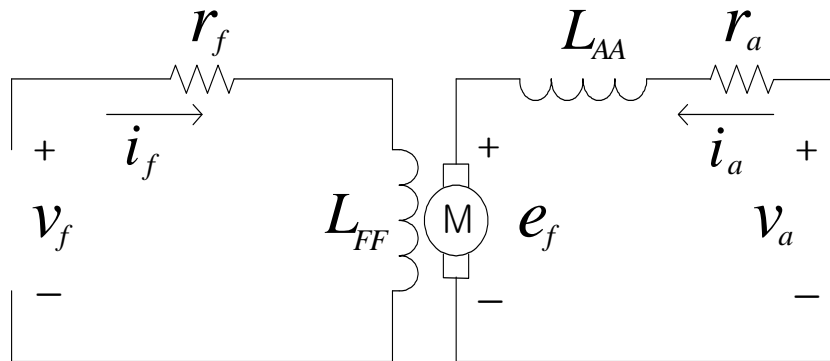


그림 2.2 직류전동기의 등가모델

Fig. 2.2 Equivalent circuit of DC motor.

일반적으로 전기자가 회전할 때 자속과 각속도의 곱에 비례하는 전압이 전기자에 유도된다. 이 유도된 전압은 전기자에 인가되는 전압과 반대방향이 되므로 이를 역기전력이라 한다. 그림 2.2의 등가회로에서 전기자의 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_a - e_f = r_a i_a + L_{AA} \frac{di_a}{dt} \quad (2.4)$$

단,  $e_f = \omega_r L_{AF} i_f$

그림 2.2 회로에서 계자의 전압방정식은 다음과 같다.

$$v_f = r_f i_f + L_{FF} \frac{di_f}{dt} \quad (2.5)$$

식(2.4)와 식(2.5)를 이용하여 계자권선과 전기자권선의 전압방정식을 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f + pL_{FF} & 0 \\ \omega_r L_{AF} & r_a + pL_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

단,  $p$ 는 미분연산자( $= \frac{d}{dt}$ )

직류전동기에서 발생하는 토크는 상호인덕턴스, 계자전류 및 전기자전류의 곱으로 표현되고 이를 식으로 표시하면 식(2.7)과 같다.

$$T_e = L_{AF} i_f i_a \quad (2.7)$$

식(2.7)에서 계자전압을 일정하게 유지한다면 상호인덕턴스와 계자전류는 일정한 상수 값이 되며 발생토크는 오직 전기자전류에 비례하여 발생할 것이다.

그림 2.3은 직류전동기의 동역학적 모델을 나타낸다. 회전자와 부하의 관성 모멘트의 합이  $J$ 이고, 베어링 손실을 포함한 전동기의 마찰계수가  $B_m$ 일 때



동역학적 수식은 다음과 같이 된다.

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r + T_L \quad (2.8)$$

단,  $T_L$ 은 부하토크

그림 2.3에서 마찰계수를 무시하면 전동기의 회전속도는 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_L) \quad (2.9)$$

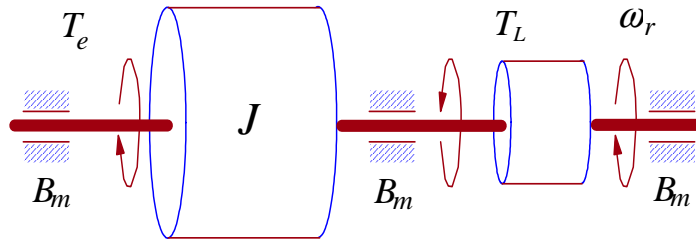


그림 2.3 직류전동기의 동역학적 모델

Fig. 2.3 Dynamic model of DC motor.

### 2.3 직류전동기 제어방식

정상상태에서 직류 타여자 전동기의 회전속도는 식(2.10)과 같이 표현된다.

$$\omega_r = \frac{v_a - r_a i_a}{L_{AF} i_f} \quad (2.10)$$

타여자 직류전동기의 제어 방식에는 전기자전압 제어방식, 계자 제어방식 및 전기자저항 제어방식이 있다. 여기서는 전기자전압 제어방식과 계자 제어 방식에 대해 서술한다.

### 2.3.1 전기자전압 제어방식

타여자 직류전동기나 영구자석 직류전동기에 가장 흔히 사용되는 제어방식이다. 이는 그림 2.4와 같이 타여자 직류전동기에서 계자전류를 일정하게 유지하고, 전기자에 가해지는 전압을 변화시키면서 제어하는 방식이다. 일정한 계자전류 하에서의 전동기 속도와 토크는 식(2.11), (2.12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\omega_r = \frac{v_a - r_a i_a}{C} \quad (2.11)$$

$$T_e = K_T i_a \quad (2.12)$$

식(2.11)과 식(2.12)에서 전동기속도와 토크는 전기자전압과 전류에 비례함을 알 수 있다.

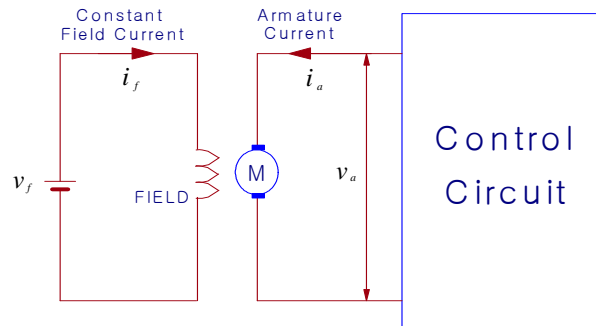


그림 2.4 타여자 직류전동기의 전기자전압 제어방식

Fig. 2.4 Armature voltage control method of separately excited field DC motor

그림 2.5는 영구자석 계자형 직류전동기를 표시하는 것으로 자속량이 일정한 타여자 직류전동기로 간주할 수 있어 앞에서와 동일한 특성을 얻는다.

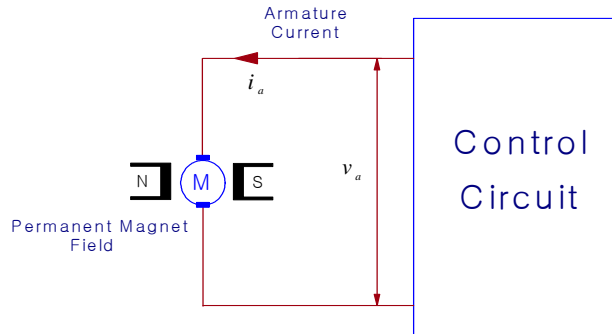


그림 2.5 영구자석 직류전동기의 전기자전압 제어방식

Fig. 2.5 Armature voltage control method of permanent magnet DC motor

### 2.3.2 계자 제어방식

타여자 직류전동기의 속도를 제어하는 또 다른 방식은 계자제어 방식이다. 이 방식은 전기자전류를 일정한 크기로 유지하고 계자전류를 변화시켜 속도를 제어하는 방법이다. 일정한 크기의 전기자전류가 흐를 때 전동기 속도와 토크는 식(2.13), 식(2.14)와 같이 표현된다.

$$\omega_r = \frac{C}{L_{AF} i_f} \quad (2.13)$$

$$T_e = K_T' i_f \quad (2.14)$$

식(2.13)에서 알 수 있듯이 전동기속도는 계자전류에 반비례한다. 고속으로 전동기를 운전하기 위해서는 계자전류를 줄여야 하는데 이러한 운전을 약계

자영역 운전이라고 한다. 약계자영역 운전에서는 식(2.14)에서 보듯이 토크는 작아진다. 계자제어 방법은 그림 2.6과 같이 계자회로에 계자저항기를 접속하여 저항  $r_f$ 를 변화시키는 방법을 주로 이용한다.

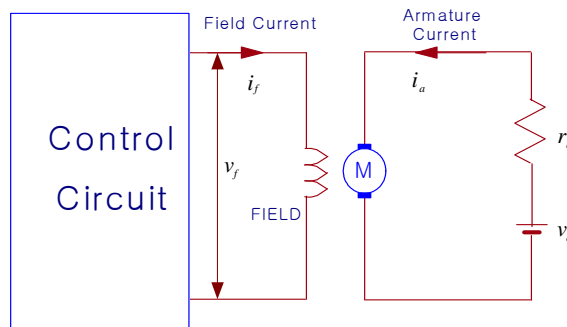


그림 2.6 타여자 직류전동기의 계자 제어방식

Fig. 2.6 Field current control method of separate excitation field DC motor

이 속도제어 방법은 계자전류가 전기자전류에 비해서 상당히 작고 제어가 용이하므로 적은 전류를 제어하여 큰 동력을 제어할 수 있는 특징이 있으나 포화특성을 가지는 계자로 인하여 속도특성의 직선성은 좋지 못하다. 또한, 계자권선의 인덕턴스가 크기 때문에 응답이 느리다.

이외에 전기자저항 제어법이 있는데 이는 전기자와 직렬로 가변저항을 접속하여 전기자에 걸리는 전압을 변화시켜 속도를 제어하는 방법으로서 속도를 정격속도보다 낮은 범위에서 제어하는 경우에 사용된다.

### 3. 직류전동기 센서리스 속도제어

#### 3.1 기존의 센서리스 속도제어

직류 전동기의 전기자권선의 전압 방정식은 식(3.1)과 같다.

$$v_a = r_a i_a + L_{AA} \frac{di_a}{dt} + L_{AF} \omega_r i_f \quad (3.1)$$

식(3.1) 중 전기자 자기인덕턴스  $L_{AA}$ 는 매우 작은 값이며 정상상태에 도달할 경우 전기자전류의 변화율은 무시될 수 있으므로 식(3.2)로 간략화 할 수 있다.

$$v_a = r_a i_a + L_{AF} \omega_r i_f \quad (3.2)$$

식(3.2)에 의하면 전기자저항, 상호인덕턴스, 전기자전압, 전기자전류 및 계자전류값들로 부터 회전자 속도정보를 얻을 수 있다.

즉, 추정속도는 식(3.3)으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega}_r = \frac{v_a - r_a i_a}{L_{AF} i_f} \quad (3.3)$$

속도추정을 위해서는 정확한 전동기 파라미터값이 필수적인데 이를 위해 여러 번의 반복적인 실험이 요구된다. 또한, 저속영역에서의 속도추정시 전기자 전압이 낮으므로 파라미터의 변동에 의한 영향이 증가되며 정확한 속도추정이 어려워진다.

그림 3.1은 속도추정기에 의한 센서리스 속도제어시스템을 도시하고 있다.

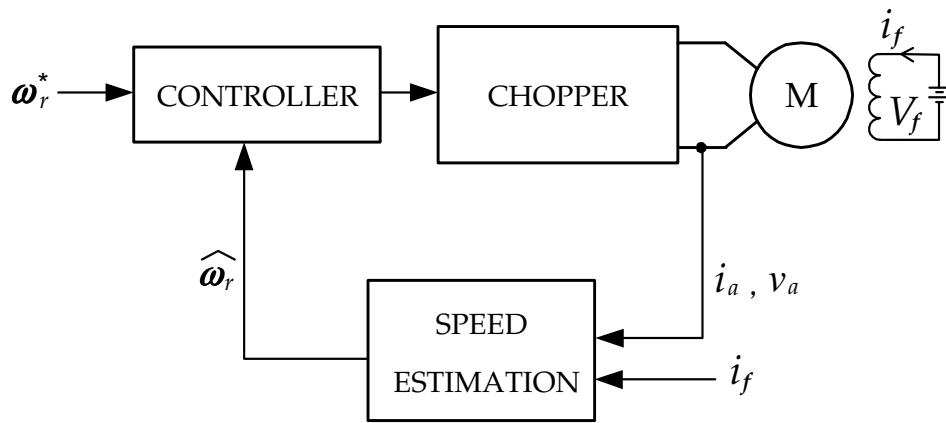


그림 3.1 속도추정기에 의한 제어시스템

Fig. 3.1 The control system by the speed estimator

### 3.2 전류오차보상에 의한 센서리스 제어

본 논문에서는 속도센서뿐만 아니라 속도추정도 요구되지 않는 새로운 센서리스 제어 방식을 제안한다.

직류전동기 전압방정식은 식(3.4)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f + pL_{FF} & 0 \\ \omega_r L_{AF} & r_a + pL_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

위 식을 전류방정식으로 고치면 식(3.5)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} p \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -r_f/L_{FF} & 0 \\ -\omega_r L_{AF}/L_{AA} - r_a/L_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1/L_{FF} & 0 \\ 0 & 1/L_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ v_a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.5)$$

그리고 발생토크 및 속도는 다음과 같다.

$$T_e = L_{AF} i_f i_a \quad (3.6)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L) \quad (3.7)$$

식(3.5)~(3.7)에 의해 직류전동기는 전기자전압, 계자전압을 입력으로 받아 전기자전류, 계자전류 및 회전자 속도를 출력으로 내보내는 시스템으로 간주할 수 있다. 이것을 그림으로 나타내면 그림 3.2와 같다.

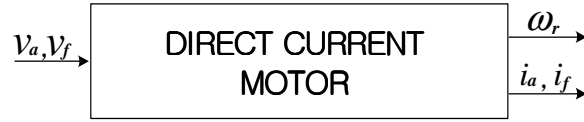


그림 3.2 직류전동기의 입·출력변수

Fig. 3.2 Input and output variables of DC motor.

여기서 그림 3.3과 같이 전압과 회전자 속도의 지령치를 입력으로 하고 전류를 출력으로 하는 수식모델을 가정한다.



그림 3.3 수식모델의 입·출력변수

Fig. 3.3 Input and output variables of numerical model.

수식모델이 실제전동기를 정확하게 표현한다면, 실제 직류전동기의 전압과 전류가 수식모델과 일치할 경우 회전자의 속도도 설정치인 수식모델의 회전자 속도와 같게 될 수 있으리라는 예측을 할 수 있다. 수식모델과 전동기의 전기자 전압방정식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$v_a = \omega_r L_{AF} i_f + (r_a + pL_{AA}) i_a \quad (3.8)$$

$$v_{am} = \omega_{rm} L_{AF} i_{fm} + (r_a + pL_{AA}) i_{am} \quad (3.9)$$

실제 전동기와 수식모델에 동일한 전기자전압을 공급하면 식(3.10)와 같은 관계가 성립한다.



$$L_{AF}(\omega_{rm}i_{fm} - \omega_r i_f) = (r_a + pL_{AA})(i_a - i_{am}) \quad (3.10)$$

전동기와 모델의 계자권선에 동일한 전압을 인가함으로써  $i_f = i_{fm}$  이 된다. 따라서 만약 수식모델과 실제 전동기의 전기자전류가 일치하도록 제어된다면 식(3.10)에 의해 전동기의 회전자 각속도인  $\omega_r$ 이 설정치인 수식모델의 회전자 각속도  $\omega_{rm}$ 과 같게 된다.

실제 전동기와 수식모델에 같은 전기자전압을 공급하면서 실제 전동기의 전기자전류  $i_a$ 를 수식모델의 전기자전류인  $i_{am}$ 과 같게 해줄 수 있는 방법을 고찰해 본다.

수식모델의 속도가 실제 전동기의 속도보다 높다고 가정하면 실제 전동기의 토크, 전기자전류는 식(3.6)과 식(3.10)에 의하여 수식모델의 값보다 크게 된다. 이 경우 전동기와 모델의 전기자전압을  $\Delta v_a (= \Delta v_{am})$ 만큼 증가시키면 수식모델의 전기자전류의 증분은 식(3.11)으로 표현된다.

$$\Delta i_{am} = \frac{1}{r_a + pL_{AA}} \Delta v_{am} \quad (3.11)$$

반면에, 실제 전동기의 경우는 다음 식과 같이 된다.

$$\Delta v_a = (r_a + pL_{AA})\Delta i_a + L_{AF}i_f\Delta\omega_r \quad (3.12)$$

식(3.12)를 순차적으로 관찰하면, 전압이 증가한 직후 회전자의 속도는 거의 변화되지 않는다. 그러나 전기자전류는 순간적으로 증가하고 따라서 토크를 증가시키므로 회전자의 속도는 점차적으로 상승하게 된다.

결국, 전동기의 전기자전류의 상승분은 식(3.13)으로 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta i_a = \frac{1}{r_a + pL_{AA}} (\Delta v_a - L_{AF} i_f \Delta \omega_r) \quad (3.13)$$

즉, 식(3.11)과 식(3.13)에 의해  $\Delta i_{am} > \Delta i_a$ 이 되어 실제전동기와 모델의 전기자전류가 접근하게 되며 식(3.10)에 의해 속도차이도 감소하게 된다.

반대로 전동기의 회전자 속도가 설정치보다 높게되면  $v_a (= v_{am})$ 를 낮춤으로써 위에서 기술한 내용과 정반대 과정이 일어나게 된다.

결론적으로 전동기 및 수식모델에 인가되는 전기자전압의 지령치  $v_a^*$ 는 식(3.14)와 같이되어 수식모델과 실제 전동기를 위한 간단한 제어알고리즘을 구성하는 것이 가능해진다.

$$v_a^* = K_{pv}(i_a - i_{am}) + K_{tv} \int (i_a - i_{am}) dt \quad (3.14)$$

그림 3.4는 전류오차보상에 의한 제어의 블록 다이어그램을 나타낸다. 이 시스템은 디지털제어기, 전류제어 초퍼 및 직류전동기로 구성된다.

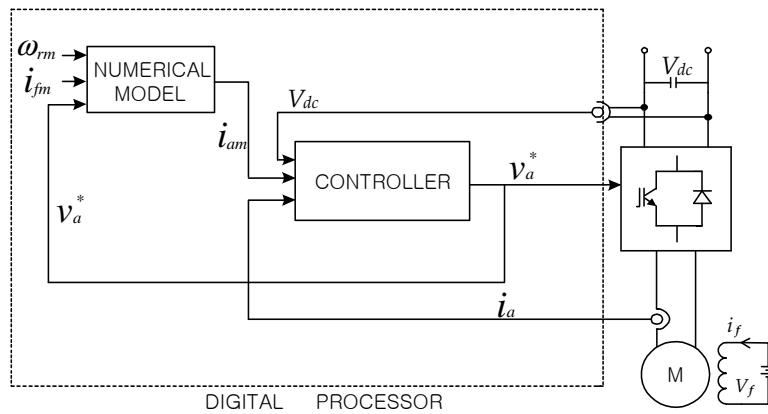


그림 3.4 전류오차보상 제어시스템의 블록 다이어그램

Fig. 3.4 The block diagram of the current error compensation control system

## 4. 시뮬레이션 및 검토

### 4.1 전류오차보상에 의한 제어시스템의 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 전류오차보상에 의한 센서리스 속도제어방식의 타당성을 고찰하기 위해 실험에 앞서 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션의 순서는 먼저 저속의 지령속도에 대한 안정된 속도 추종능력을 알아보고 정, 역전 운전 성능을 시험하였다. 그리고 운전중 부하가 변동하였을 경우의 부하특성을 알아보았다. 다음으로 고속의 지령속도에 대한 응답을 확인하였으며 운전중 지령속도가 변하는 경우의 속도 추종성능을 알아보았다. 시뮬레이션 및 실험에 사용한 직류전동기의 파라미터는 표 5.1과 같다.

표 5.1 시뮬레이션과 실험에 사용한 직류전동기의 파라미터

Table 5.1 Parameters of DC motor used for computer simulation and experiment

정격출력	0.5[Kw]	전기자저항	4.8[Ω]
정격전압	110[V]	계자저항	360[Ω]
정격전류	6.5[A]	전기자 자기인덕턴스	0.012[H]
정격속도	2000[rpm]	계자 자기인덕턴스	0.12[mH]
극 수	2	상호인덕턴스	1.2[H]

그림 4.1은 50[rpm]의 계단상 속도지령에 대한 전동기 속도 및 이때의 실제 전동기와 수식모델의 전기자전류 응답을 도시한다. 그림에서 보는 것과 같이

실제전동기 및 수식모델의 전기자전류가 일치하며 양호한 속도특성이 얻어짐을 알 수 있다.

그림 4.2는 -100[rpm]으로 운전중 100[rpm]으로 계단상 속도지령을 변경하였을 경우의 응답을 나타낸다. 속도 응답특성이 양호하며 전류 응답특성도 양호함을 알 수 있다.

그림 4.3은 300[rpm]으로 구동 중 정격부하의 40[%]인 1[N·m]을 인가하였을 경우의 부하특성 및 전류특성을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 전류오차보상에 의한 방법으로 양호한 부하특성이 얻어짐을 알 수 있다.

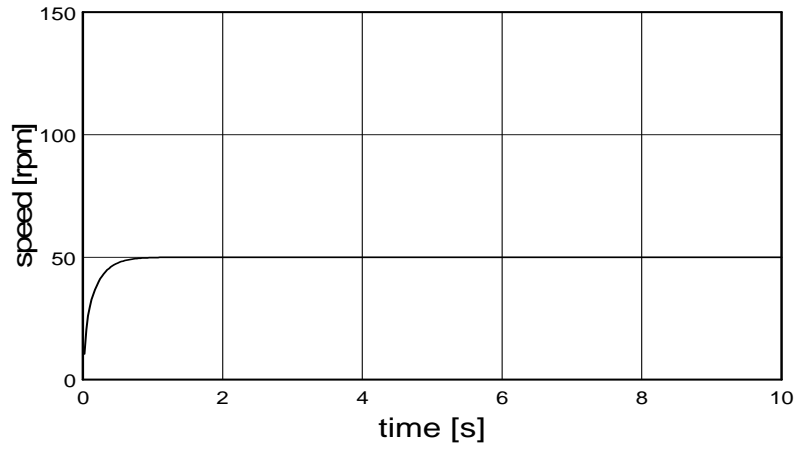
그림 4.4는 1000[rpm]의 계단상 속도지령에 응답하는 전동기속도와 전기자전류를 나타낸다. 고속영역에서도 우수한 속도특성이 얻어진다.

그림 4.5는 100[rpm]으로 운전 중 계단상 지령속도를 300[rpm], 500[rpm], 다시 300[rpm], 100[rpm]으로 변화시켰을 때의 속도응답 및 이때의 전류응답을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 지령속도 추종성능이 양호하며 전류응답도 우수함을 알 수 있다.

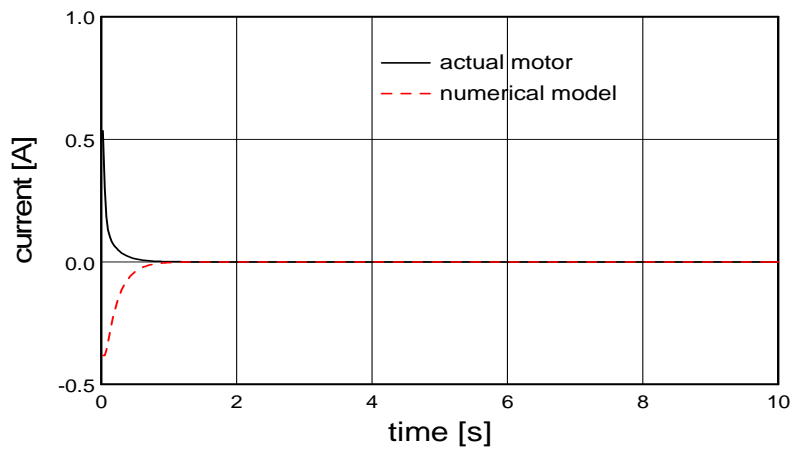
## 4.2 시뮬레이션 결과 검토

본 논문에서 제시한 전류오차보상에 의한 제어방법의 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 본 논문에서 제시한 속도제어 방법을 이용하여 지령속도에 추종하는 성능, 변화하는 부하에 반응하는 부하특성이 우수한 고성능의 직류전동기 제어특성을 얻을 수 있다.
- 2) 운전중 지령속도의 변화에도 무리가 없는 양호한 속도제어 성능을 얻을 수 있다.



(a)



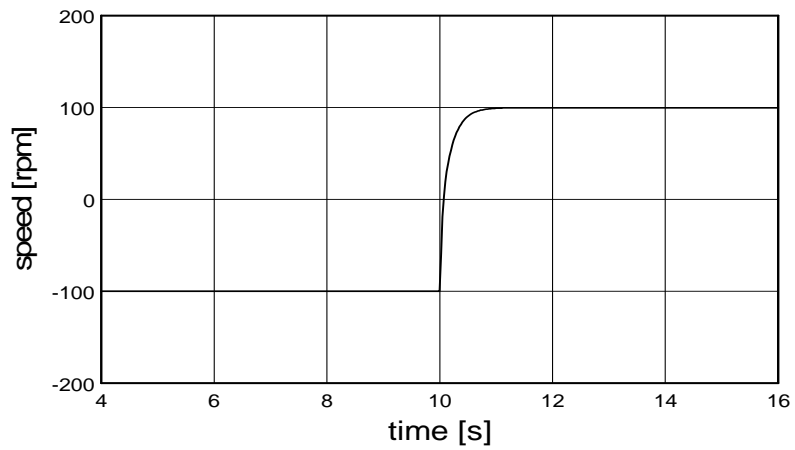
(b)

그림 4.1 계단상 속도지령 변화에 대한 응답(0→50[rpm])

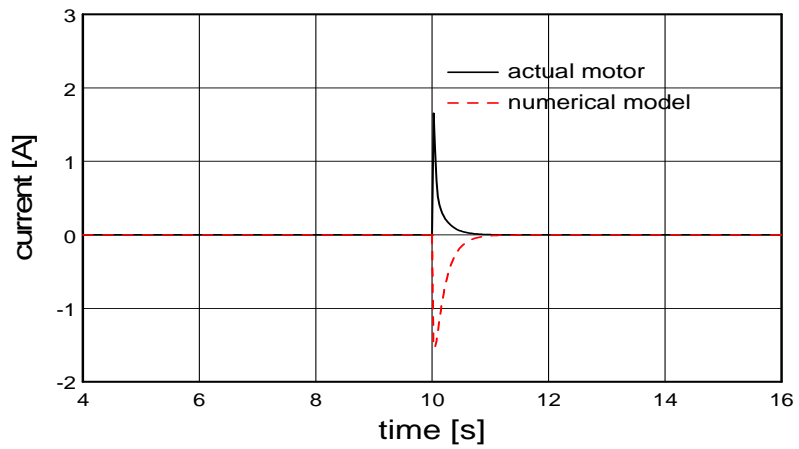
(a) 전동기속도 (b) 모델과 전동기의 전기자전류

Fig. 4.1 Simulation responses for step change of speed setting.(0→50[rpm])

(a) motor speed. (b) armature currents of model and motor.



(a)



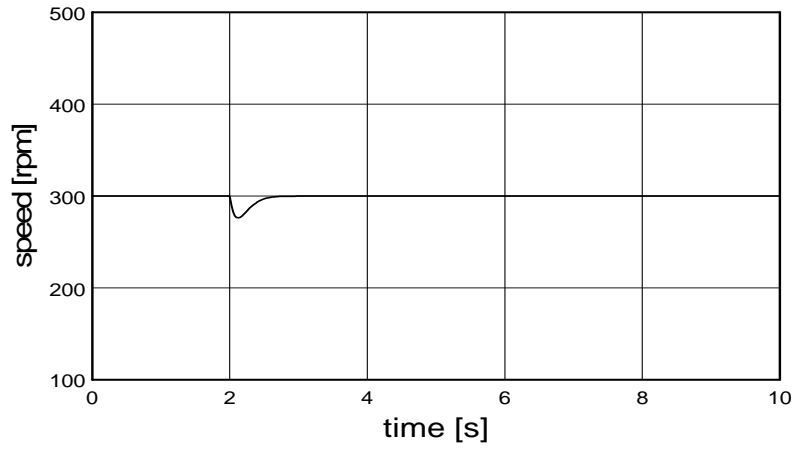
(b)

그림 4.2 계단상 속도지령 변화에 대한 응답(-100→100[rpm])

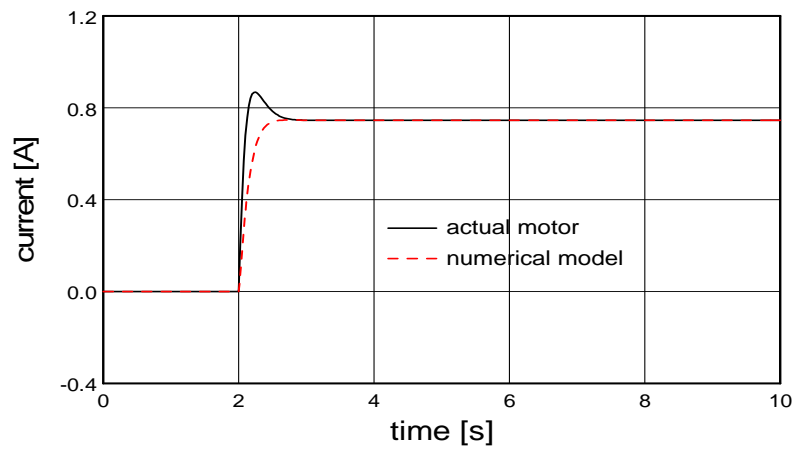
(a) 전동기속도 (b) 모델과 전동기의 전기자전류

Fig. 4.2 Simulation responses for step change of speed setting.(-100→100[rpm])

(a) motor speed. (b) armature currents of model and motor.



(a)



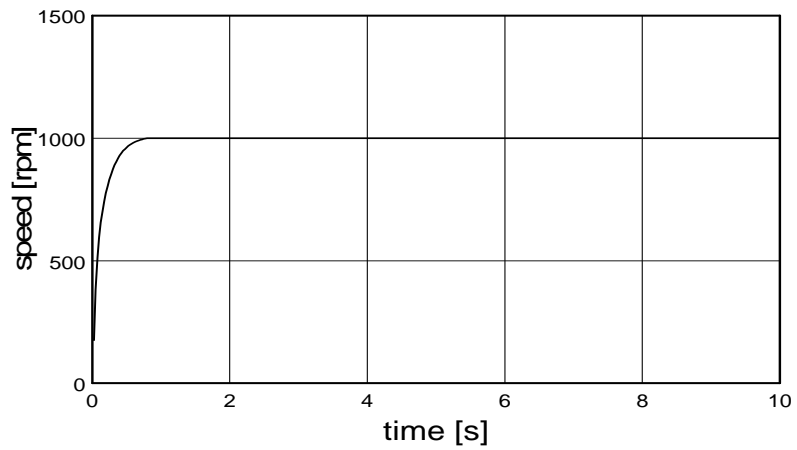
(b)

그림 4.3 계단상 부하토크 변화에 대한 응답( $0 \rightarrow 1[\text{N}\cdot\text{m}]$ )

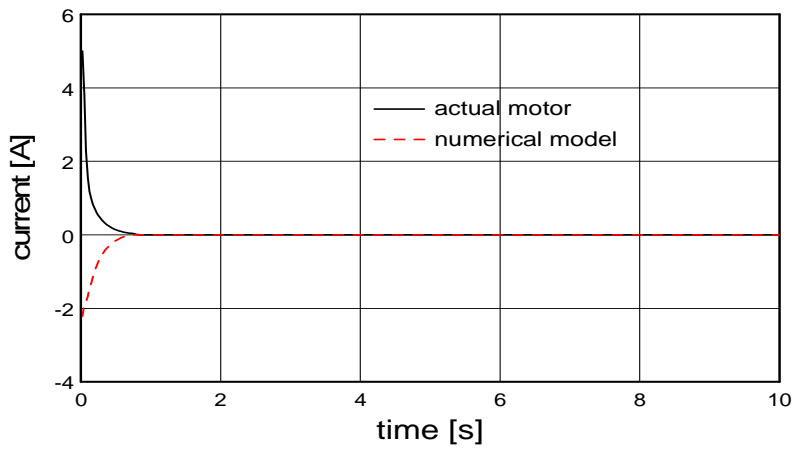
(a) 전동기속도 (b) 모델과 전동기의 전기자전류

Fig. 4.3 Simulation responses for step change of load torque.( $0 \rightarrow 1[\text{N}\cdot\text{m}]$ )

(a) motor speed. (b) armature currents of model and motor.



(a)



(b)

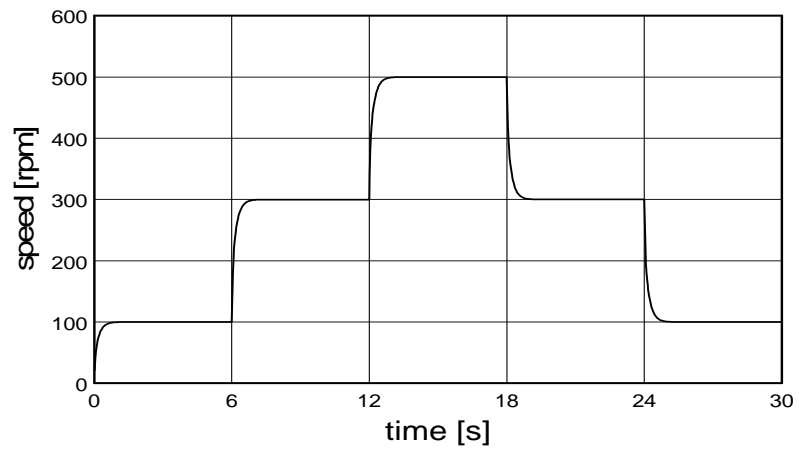
그림 4.4 계단상 속도지령 변화에 대한 응답(0→1000[rpm])

(a) 전동기속도 (b) 모델과 전동기의 전기자전류

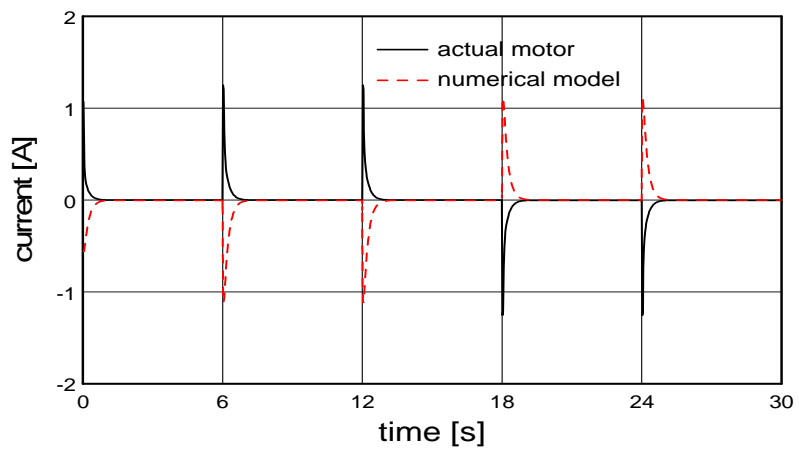
Fig. 4.4 Simulation responses for step change of speed setting.(0→1000[rpm])

(a) motor speed. (b) armature currents of model and motor.





(a)



(b)

그림 4.5 계단상 속도지령 변화에 대한 응답

(a) 전동기속도 (b) 모델과 전동기의 전기자전류

Fig. 4.5 Simulation responses for step change of speed setting.

(a) motor speed. (b) armature currents of model and motor.

## 5. 실험 및 검토

### 5.1 실험장치의 구성

#### 5.1.1 하드웨어 구성

본 센서리스 속도제어시스템의 전체구성도를 그림 5.1에 도시한다. 시스템을 구현하기 위한 하드웨어의 구성은 세부적으로 마이크로프로세서 시스템, 전기자전류 및 직류링크전압 검출회로, 게이트 구동회로, 전력회로로 나누어진다. 또한, 제어성능의 확인을 위해 제어회로와는 별도로 속도검출회로가 사용되어진다.

마이크로프로세서 시스템은 80586 마이크로프로세서가 장착된 IBM PC를 사용하였고 PCL 818 카드를 이용하여 데이터를 처리하였다.

직류링크전압의 샘플링은 전압검출기 LEM LV25-P 및 저항을 사용하여 0[V]~5[V] 범위의 전압으로 변환시켜 A/D 컨버터를 통해 검출하였다.

초퍼 스위칭을 위한 최종적인 신호발생회로인 게이트 구동회로는 초퍼를 구성하는 스위칭 소자인 IGBT를 구동시키기 위하여 마이크로프로세서에서 발생된 TTL레벨의 신호를 게이트 신호의 레벨로 증폭시켜주는 회로이다. 이러한 게이트 구동회로는 개별소자로 직접 제작하여 사용할 수도 있지만, 본 실험장치를 위해서는 상용으로 만들어진 게이트 구동용 전용 IC인 TF1205를 사용하였다.

전력회로의 구성은 정류부와 초퍼부, 그리고 제어장치의 전원공급부로 나누어진다. 정류부는 브리지 정류기와 평활용 콘덴서로 이루어지며 전원 오프시에 콘덴서에 남아있는 고압충전전압은 전자접촉기에 의해 저항을 통하여 방전되도록 하였다. 초퍼부는 IGBT모듈을 사용하여 구성하였는데 다른 소자

에 비해 고속의 스위칭 동작이 가능하므로 제어신호에 대한 응답속도가 빠르다.

속도제어 실험의 검증을 위하여 속도검출회로를 구성하였다. 본 실험에서는 출력펄스간의 시간간격을 측정함으로써 속도를 계산하는 T방식을 적용하였고 360[pulses/rev]의 엔코더를 사용하였다. 엔코더 펄스간의 시간간격은 펄스 한 주기동안 발생하는 1[MHz] 발진기의 클럭을 계수하여 환산하였다.

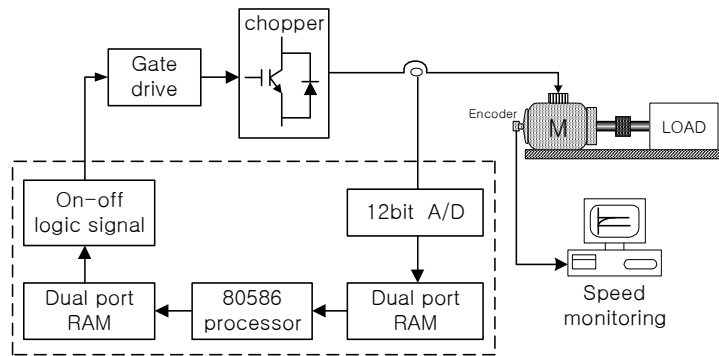


그림 5.1 직류전동기 전체 구동시스템  
Fig. 5.1 Overall DC motor drive system.

### 5.1.2 제어프로그램 구성

본 센서리스 속도제어 시스템의 구현을 위해 구성한 제어프로그램의 흐름도를 그림 5.2에 나타내었다.

제어루틴은 제어프로그램 타이머 인터럽터에 의해 실행되는데 타이머에 가입된 임의의 데이터에 의해 일정한 주기로 수행된다. 먼저, A/D 변환기를 이용하여 전동기 전기자전류  $i_a$  및 DC 링크전압  $V_{dc}$ 를 샘플링한다. 그 후 수식모델을 이용하여 전동기 각속도의 설정치에 해당하는 모델의 전기자전류  $i_{am}$ 을 계산하고 이를 전동기의 전기자전류  $i_a$ 와 비교한 후 전동기에 인가

되는 전압  $v_a^*$ 를 발생한다.

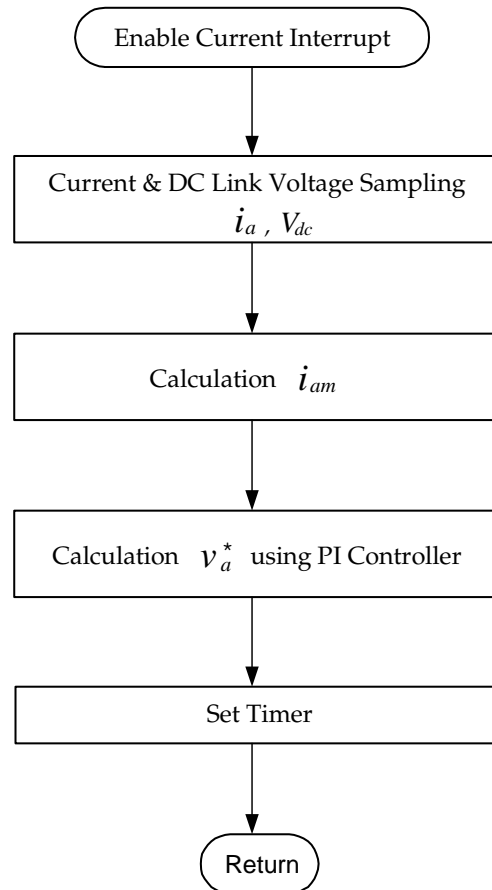


그림 5.2 제어 프로그램 흐름도

Fig. 5.2 Flow chart of control program.

## 5.2 실험결과 검토

그림 5.3은 50[rpm] 정상상태시의 속도 및 이때의 실제 전동기와 수식모델의 전기자전류를 나타낸다. 실제 전동기 전기자전류 및 수식모델의 전기자전

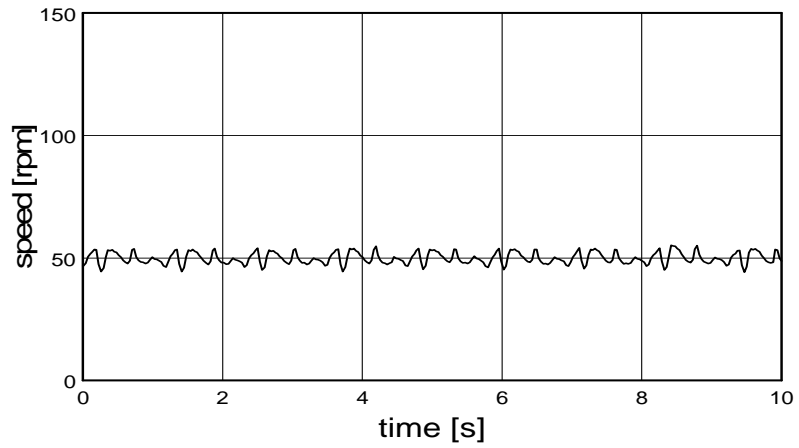
류가 일치하며 양호한 속도특성이 얻어짐을 알 수 있다.

그림 5.4는 -100[rpm]으로 운전중 100[rpm]으로 지령속도를 변경하였을 경우의 응답을 나타낸다. 속도 응답특성이 양호하며 전류 응답특성도 양호함을 알 수 있다.

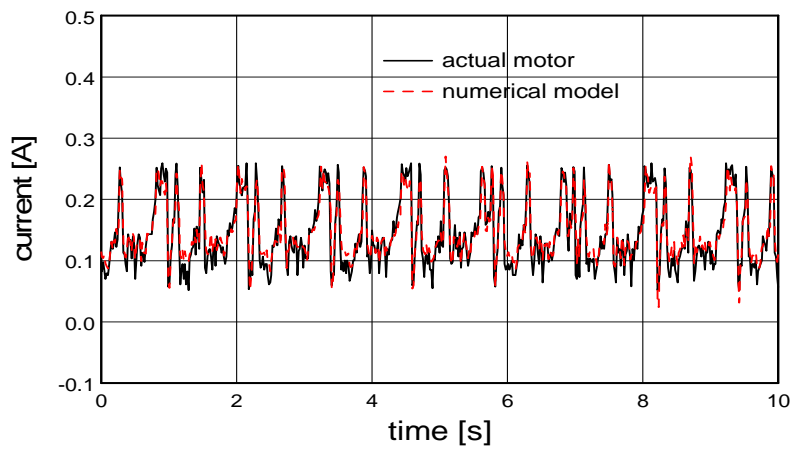
그림 5.5는 300[rpm]으로 구동 중 정격부하의 40[%]인 1[N·m]을 인가하였을 경우의 부하특성 및 전류특성을 나타낸다. 전류오차보상에 의한 방법으로 양호한 부하특성이 얻어짐을 알 수 있다.

그림 5.6은 1000[rpm]의 속도지령에 응답하는 전동기속도와 전기자전류를 나타낸다. 고속영역에서도 우수한 속도특성이 얻어진다.

그림 5.7은 운전 중 지령속도의 변화 및 이때의 전류 응답을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 지령속도 추종성능이 양호하며 전류응답도 우수함을 알 수 있다.



(a)



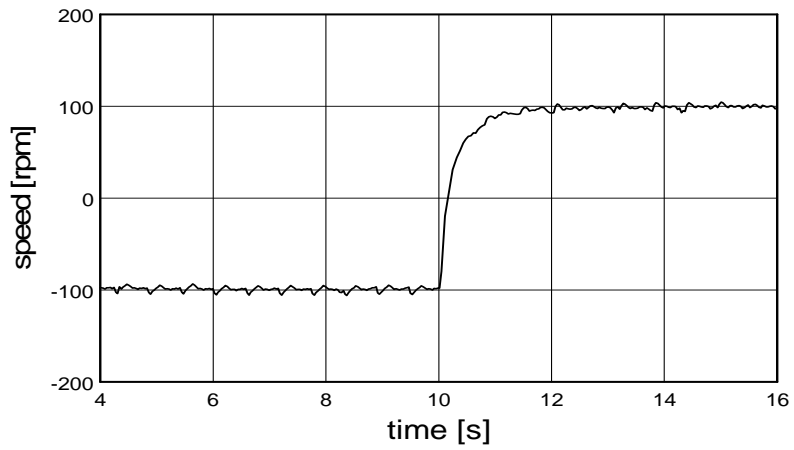
(b)

그림 5.3 저속 정상상태에서의 속도응답특성 (50[rpm])

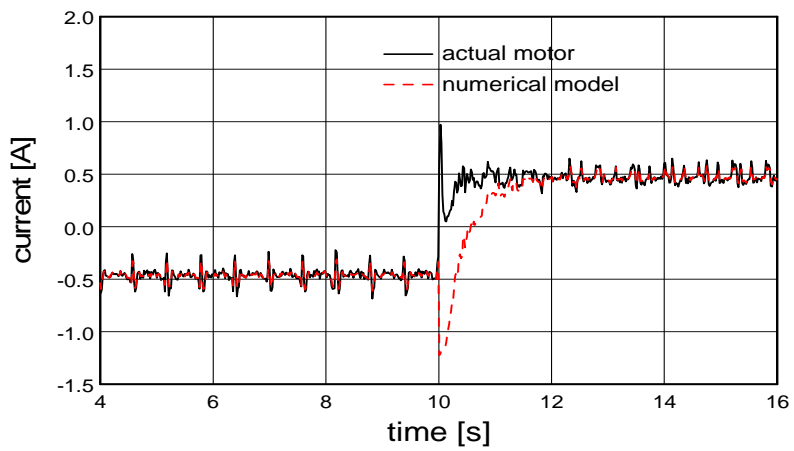
(a) 전동기속도 (b) 전기자전류

Fig. 4.1 Experimental responses for steady state in the low speed range(50[rpm])

(a) motor speed. (b) armature current



(a)



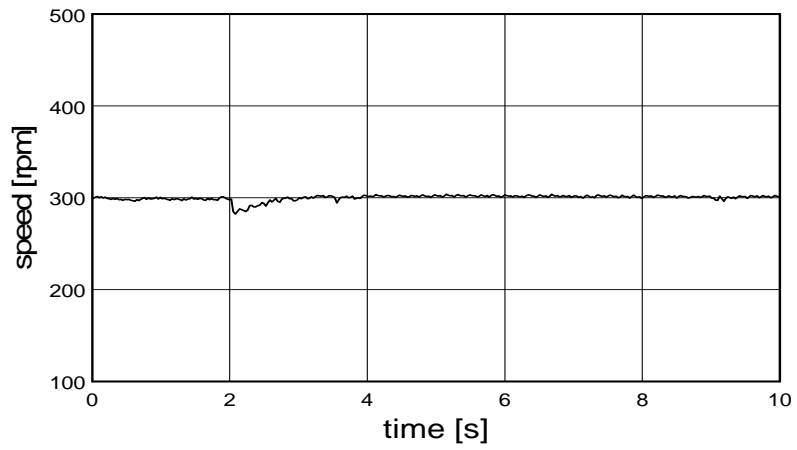
(b)

그림 5.4 속도지령에 대한 응답(-100→100[rpm])

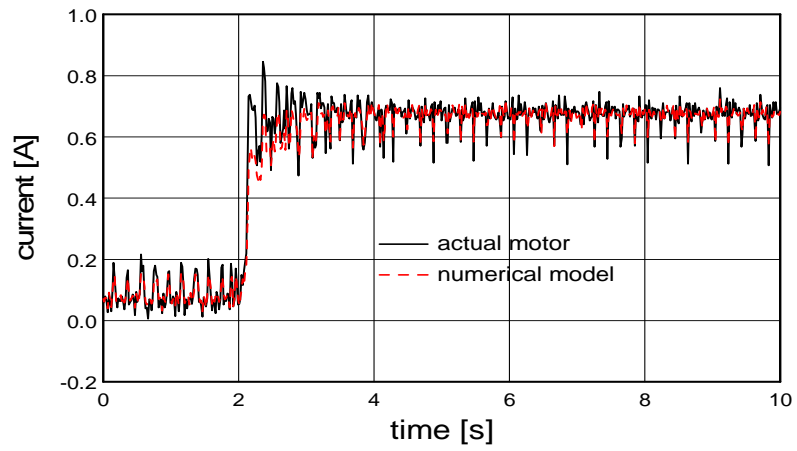
(a) 전동기속도 (b) 전기자전류

Fig. 5.4 Experimental responses for step change of speed setting(-100→100[rpm])

(a) motor speed (b) armature current



(a)



(b)

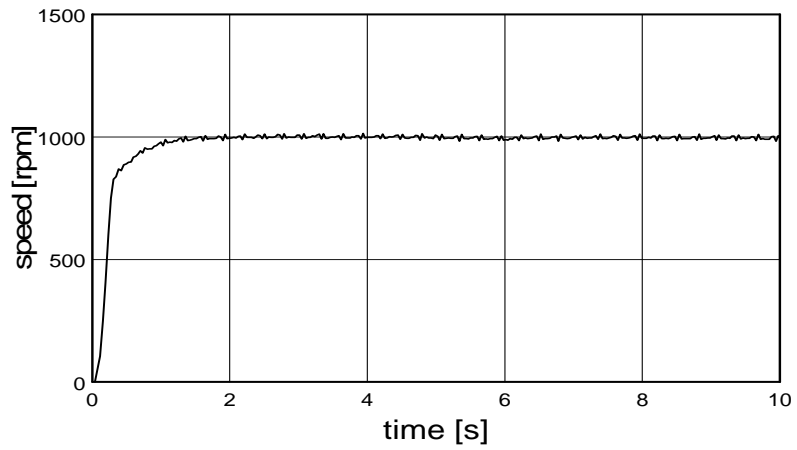
그림 5.5 부하토크에 대한 응답(0→0.5[N m])

(a) 전동기속도 (b) 전기자전류

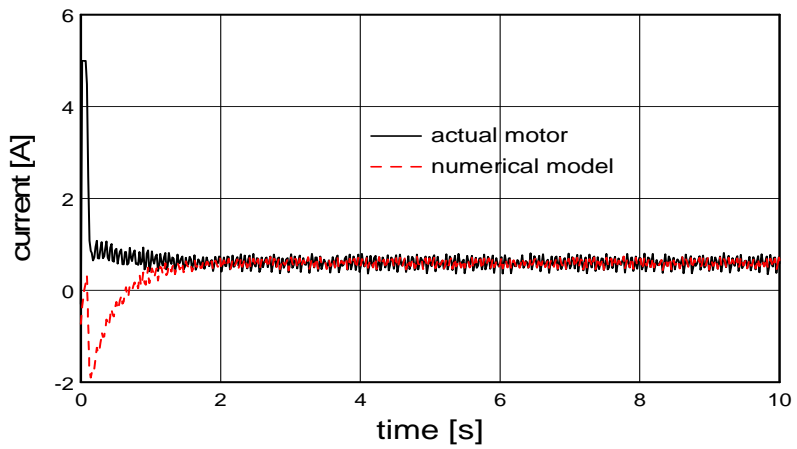
Fig. 5.5 Experimental responses for step change of load torque(0→0.5[N·m])

(a) motor speed (b) armature current





(a)



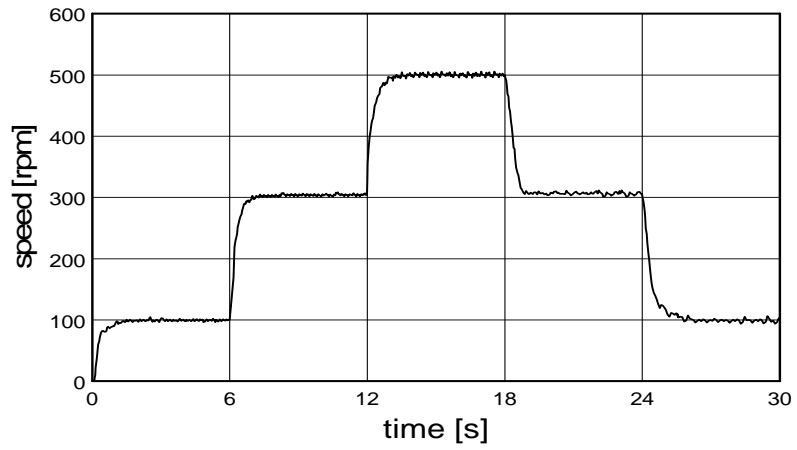
(b)

그림 5.6 속도지령에 대한 응답(0→1000[rpm])

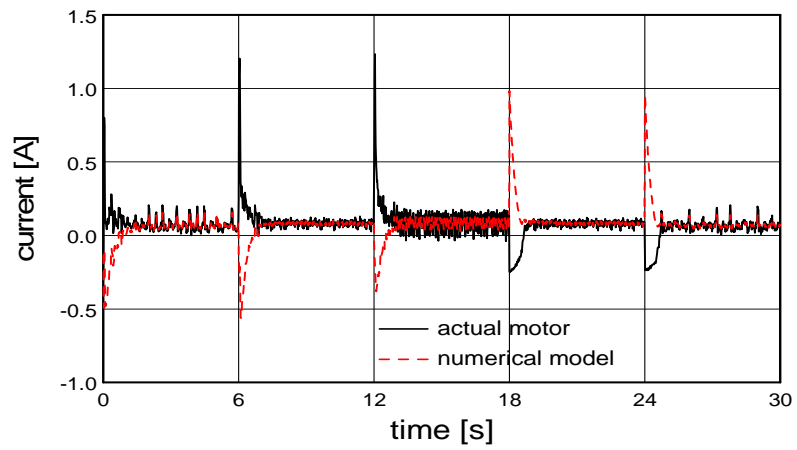
(a) 전동기속도 (b) 전기자전류

Fig. 5.6 Experimental responses for step change of speed setting(0→1000[rpm])

(a) motor speed (b) armature current



(a)



(b)

그림 5.7 속도지령에 대한 응답

(a) 전동기속도 (b) 전기자전류

Fig. 5.7 Experimental responses for step change of speed setting

(a) motor speed (b) armature current

## 6. 결 론

제어시스템에 속도센서를 사용하면 제어시스템의 가격을 상승시키고 센서의 부착으로 직류전동기의 구조가 복잡해지며 센서의 오동작 등으로 강인한 제어특성을 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 속도센서를 사용하지 않는 직류전동기의 센서리스 속도제어에 관한 연구를 진행하였다.

본 논문에서는 전류오차보상에 의한 방법을 사용하였는데, 이 방법은 전기자전압과 전류를 이용하여 회전자속도를 추정하는 기존의 방식과는 달리, 실제 직류전동기와 직류전동기 수식모델의 전기자전류 차이를 억제하도록 전압을 인가함으로써 전동기의 속도가 설정치인 모델의 속도를 추종하도록 하는 제어방법이다.

본 논문에서 제안한 제어방식의 제어특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였으며, 실제 실험을 통해 본 논문에서 제시한 방법의 우수한 제어특성을 입증하였다.

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 직류전동기의 새로운 센서리스 속도제어 방법인 전류오차보상에 의한 방법을 제안하고 이론적 근거를 제시하였다.
- 2) 기존의 직류전동기 센서리스 제어법보다 부하특성 및 속응성이 우수한 제어결과를 얻을 수 있었다.
- 3) 운전중 변화하는 속도지령에도 안정된 제어가 이루어짐을 확인하였다.

차후, 보다 정밀한 전류제어방식을 적용하고 전동기정수의 온라인 추정이 동반된다면, 본 논문에서 제시한 전류오차보상에 의한 센서리스 속도제어방식은 운전조건 및 외란에 강인한 제어특성을 보일 것으로 사료되며 이를 향후 과제로 삼고자 한다.

## 참고문헌

- [1] R. Joetten and G. Maeder, "Control Methods for Good Dynamic Performance Induction Motor Drives Based on Current and Voltages as measured Quantities", *IEEE*, IA-19, No. 3, pp.356-363, 1983.
- [2] S. Tamai, H. Sugimoto and M. Yano, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor with Model Reference Adaptive System", *IEEE/IAS*, pp.185-195, 1997.
- [3] A. Gastli, M. Tomita, T. Takeshita and N. Matsui, "Improvement of a Stator Flux Oriented Speed Sensorless Control of an Induction Motor", *IEEE PCC*, pp. 415-420, 1993.
- [4] F. Briz, J. A. Cancelas, and A. Diez, "Speed Measurement Using Rotary Encoders for high Performance AC Drives", *Proc. of the 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON' 94*, Vol. 1, pp. 538-542, 1994.
- [5] K. Lizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo and K. Mohri, "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor", *IEEE Trans. Indus. Appli.*, Vol. IA-21, No. 4, pp. 595-601, 1985.
- [6] Nobuyuki Matsui and Masakane Shigyo, "Brushless dc motor control without position and speed sensors", *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 1, Jan/Feb. 1992.
- [7] N. Ertugrul and P.P Acarnley, " A New Algorithm for Speed Operation of Permanent Magnet Motors", *IEEE IAS Conf. Rec.*, pp. 414-421, 1992.
- [8] U. Baader, M. Depenbrock and G. Gierse, "Direct Self-Control of Inverter Fed Induction Machine: A Basis for Speed Control without Speed Measurement", *IEEE Trans. Indus. Appli.*, Vol. 28, No. 3, pp. 581-588, 1992.

- [9] M. G. Simoes and B. K. Bose, "Neural Network Based Estimation of Feedback Signals for a Vector-Controlled Induction Motor Drive", *IEEE Trans. Indus. Appli.*, Vol. 31, No. 3, pp. 620-629, 1993.
- [10] B. K. Bose, *Power Electronics and AC Drives*, Prentice-Hall, 1987.
- [11] Sae-Gin Oh, Jong-Su Kim and Sung-Hwan Kim, "Sensorless Speed Control of Induction Motor using Current Compensation", *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*. Vol. 27. No. 4, 2003.
- [12] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", 문운당, 1993.
- [13] Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice Hall, 1991.