

# 임베디드 서버를 이용한 직류모터의 속도제어

정 규홍†

## Design of DC-Motor Speed Control System with Embedded Server

Gyuhong Jung

**Key Words:** Speed Control(속도제어), Embedded Server(임베디드 서버), TCP/IP

### Abstract

As the internet communication is prevalent in recent years, it becomes quite possible to monitor and control some mechanical plants from the remote place through the TCP/IP communication. Such a concept is expected to be applied to many industrial systems for easy maintenance and trouble shooting as well as various kinds of expensive test equipments for sharing. In this research, remote data monitoring and speed control for a DC-motor is implemented and tested through TCP/IP communication with embedded micro-controllers. It showed the possibility of reliable remote control system design utilizing the internet communication.

### 1. 서 론

근래에 이르러 초고속 통신망을 이용한 인터넷의 보급이 확산되면서 인터넷 통신은 전자메일을 비롯한 기본적인 통신분야에서뿐만 전자상거래, 금융, 인터넷 방송 등 거의 모든 일상생활과 관련된 응용분야에서 기술개발이 급속도로 진전되고 있다.

이에 비하여 아직 기계분야에서는 인터넷 통신 기술을 활용하는 연구와 이를 상용화된 제품에 접목하여 기능을 확장하는 연구개발이 아직까지는 보편화되어 있지 않지만 점차적으로 많은 기계설비가 디지털 제어기에 의하여 자동화됨에 따라 인터넷 통신을 이용한 기계장치의 운용, 고장 진단, 설계변경 등에 대한 필요성과 요구가 증대되고 이에 대한 연구도 활발해질 것으로 예상된다. 예를 들면, 자동차 회사에서 자동차의 엔진 및 자동변속기의 제어기능을 갖는 프로그램에 새

로운 기능을 추가하여 갱신하는 경우에 각 소비자는 기존의 자동차에 변경된 프로그램을 인터넷을 통하여 획득한 후 교체하여 보다 향상된 성능을 기대할 수 있을 것이다. 또한 수십 개의 마이크로 컨트롤러에 의하여 제어되는 자동차의 현재 상태 및 이상유무와 관련된 정보를 무선 인터넷을 통하여 정비회사에서 관리하고 필요한 정비사항을 사용자에게 통보하여 고장을 미리 예방할 수 있다면 보다 편리하고 안전한 자동차의 운행이 가능할 것이다. 원격통신을 이용한 기계의 이상진단은 이미 일부 대형기계에 모뎀장치를 이용하여 구현되어 있으며 점차적으로 통신속도, 보안, 안정성이 우수한 인터넷 통신으로 기계장치에 대한 원격진단 시스템의 설계가 변경될 것이다. 기계분야에서 인터넷 통신이 유용하게 이용될 수 있는 또 다른 경우는 고가의 실험설비를 원격으로 공유하는 것이다. 예를 들어 대학이나 연구소에서 보유하고 있는 대규모의 풍동실험장치는 매우 고가이나 많은 경우에 있어서 풍동실험의 특성상 다른 시험장치에 비하여 연중 가동률이 높지 않은 실정이다. 따라서 인터넷 통신을 이용하여 풍동실험을 제어하고 이로부터 획득된

† 대전대학교 공과대학 기계설계공학과

E-mail : ghjung@daejin.ac.kr

TEL : (031)539-1974 FAX : (031)539-1974

실험데이터를 받을 수 있다면 마치 소프트웨어를 공유하듯이 필요한 고가의 실험장치를 공동으로 사용할 수 있게 되며 이와 같은 응용은 다양한 실험 및 기계장치를 원격으로 공유하는데 적용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 직류모터의 회전속도를 인터넷 통신을 이용하여 원격으로 제어하고 필요한 데이터를 획득할 수 있는 시스템을 구현하였으며 이를 통하여 원격제어에 인터넷 통신의 응용 및 적용가능성을 확인하였다.

## 2. 속도제어 시스템의 구성 및 설계

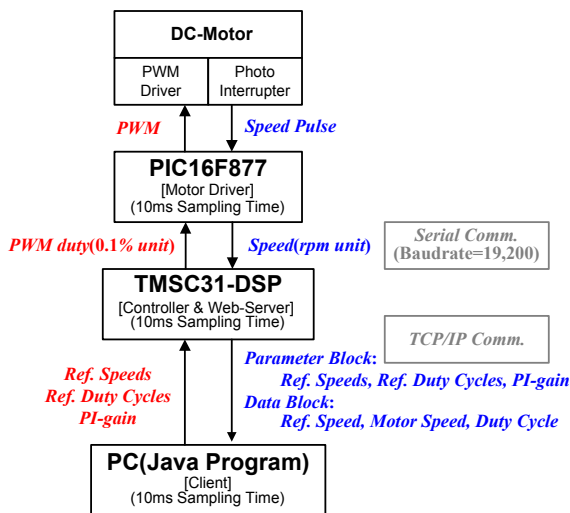


Fig. 1 DC-motor control system structure

Fig. 1은 임베디드 서버로 설계된 직류모터 속도제어시스템의 구성도를 나타낸다. 직류모터의 속도를 제어하는 디지털 제어기와 서버의 기능은 TI社의 TMS320C31 DSP를 이용하여 구현하였으며 직류모터를 구동하기 위한 펄스폭 변조신호의 발생과 회전속도에 비례하는 구형파 신호로부터 현재의 속도를 연산하는 기능은 마이크로칩社의 8비트 마이크로 컨트롤러인 PIC16F877에서 담당한다. PIC16F877과 DSP사이의 데이터 전송은 직렬통신으로 이루어지며 두 개의 디지털 프로세서에 의하여 펄스폭 제어시스템이 구성되어 모터의 회전속도가 제어된다.

자바로 설계되어 PC에서 수행되는 클라이언트 프로그램은 사용자 인터페이스 기능을 담당하여 펄스폭 제어시스템에 직류모터의 기준입력신호를 전송함과 동시에 서버로부터 현재의 제어상태와

관련된 데이터를 받아서 화면에 나타내는 모니터링 기능을 겸하도록 설계되었다.

본 연구에서 설계된 직류모터의 속도제어시스템은 DSP에 의하여 실시간으로 펄스폭 제어가 이루어지고 클라이언트 PC에서는 모터의 기준입력신호만을 변화시키면서 서버로부터 데이터를 수신하므로 실시간으로 이루어지지 않는 TCP/IP 통신에서 발생될 수 있는 문제로 인하여 제어시스템의 성능이 영향을 받지 않도록 설계되었다.

### 2.1 제어대상 직류모터의 특성분석

Fig. 2는 본 연구에서 제어대상으로 하는 직류모터와 속도조절을 위하여 설계된 PWM구동회로를 나타낸다. 모터의 회전속도는 축에 부착된 원판에 8개의 슬릿을 가공한 후 포토 인터럽터 (TLP507A)에서 발생하는 구형파신호로부터 PIC 마이크로 컨트롤러가 실시간으로 연산하게 된다.

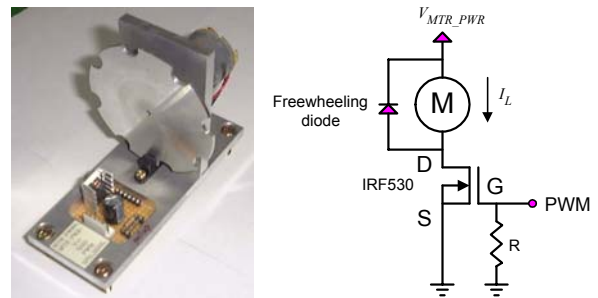


Fig. 2 DC-motor and PWM driving circuit

제어기 설계를 위한 직류모터의 선형모델은 전기자(armature)의 동특성을 무시하는 경우와 다음과 같이 1차지연의 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$P(s) = \frac{K}{1 + Ts} \quad (1)$$

Where,  $K$ : DC-motor speed gain[rpm/duty cycle]  
 $T$ : time constant[sec]

식 (1)에서 직류모터의 특성을 나타내는 속도이득과 시상수는 전기자의 저항, 인덕턴스, 역기전력 상수 등과 같은 물리적인 값으로부터 유도될 수 있으나 실제적으로는 이러한 값을 정확하게 측정하는 것이 어려우므로 본 연구에서는 직류모터에 대하여 수행된 개루프 실험결과로부터 시스템 식별방법을 이용하여 1차 전달함수의 특성을 파악하였다. 여기서 속도이득  $K$ 는 정특성 실험결과로부터 결정될 수 있으며 시상수  $T$ 는 모터의

동특성을 나타내므로 계단입력에 대한 응답으로부터 최소오차 자승법을 이용하여 추정하였다.

Fig. 3은 직류모터에 대하여 수행된 개루프 실험결과와 이를 이용하여 식별된 선형모델의 응답을 보여주며 식별된 결과는 다음과 같다.

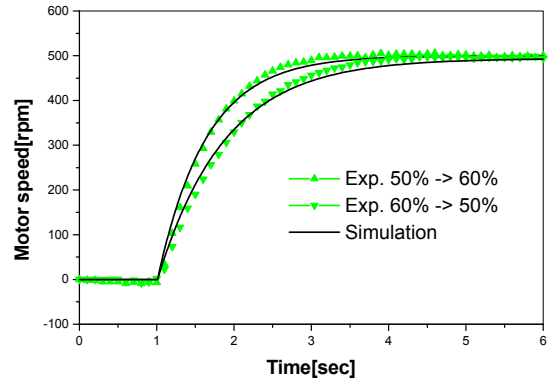
$$K = 53 \text{ rpm} / \% \text{ duty cycle}$$

$$\text{Dead zone \% duty cycle} = 23\%$$

$$\text{Time constant } T: 0.63 \text{ sec (50\%} \rightarrow \text{60\%)}$$

$$: 0.8733 \text{ sec (60\%} \rightarrow \text{50\%)}$$

Fig. 3의 실험결과를 살펴보면 일정한 듀티율이 인가되는 경우에도 회전관성모멘트가 작고 전류 제어를 하지 않기 때문에 회전속도는 시간에 따라 다소 변화하게 되며 듀티율이 계단입력으로 인가되는 경우에는 듀티율이 50%에서 60%로 증가되는 경우와 반대로 감소되는 경우의 응답이 상이한 비선형적인 특성을 나타내었다. Fig. 3(c)에서 모터의 속도는 정상상태에서의 값을 기준으로 변화되는 양으로 나타내었으며 듀티율이 낮아지는 계단입력의 경우에는 응답특성의 비교를 위하여 반전시켜 도시하였다.



(c) step duty input experiment and simulation  
**Fig. 3** System identification for DC-motor

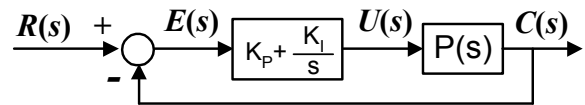
2.2 제어기 설계

본 연구에서는 식별된 직류모터의 전달함수를 대상으로 비례적분 제어와 플랜트의 불확실성을 고려하여 목표성능의 범위를 만족시키는 QFT(Quantitative Feedback Theory) 건설제어를 이용하여 2개의 제어기를 설계하였으며 디지털 제어기로 구현한 후 실험적으로 성능을 비교하였다.

(1) 비례적분 제어기

Fig. 4는 비례적분 제어기로 구성된 제어시스템의 블록선도를 나타내며 페루프 전달함수는 식 (2)와 같은 2차시스템으로 나타내어진다. 따라서 비례 및 적분이득을 조정하여 원하는 감쇠비와 고유진동수의 설계가 가능하며 여기서는 다소의 오버슈트를 허용하면서 빠른 응답을 나타낼 수 있도록 제어이득을 선정하였다.

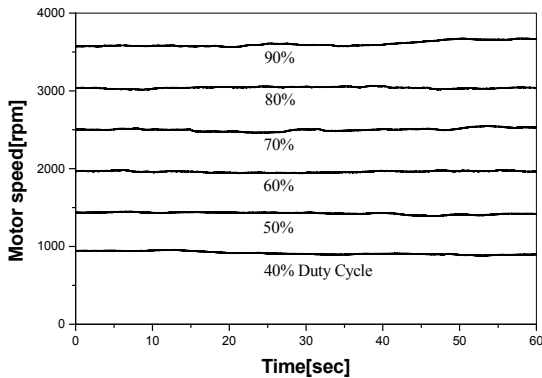
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{KK_P s + KK_I}{Ts^2 + (1 + KK_P)s + KK_I} \quad (2)$$



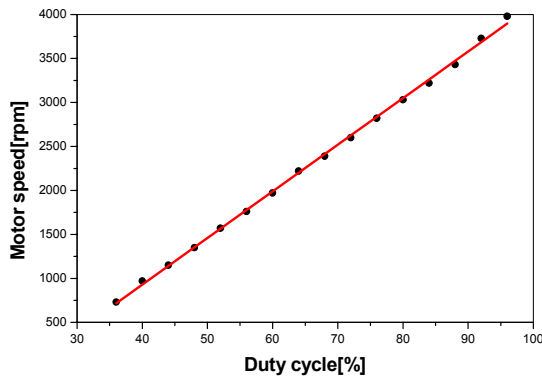
**Fig. 4** Block diagram with PI-controller

(2) QFT 제어기

Fig. 5는 QFT제어기로 구성되는 페루프 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. 제어기  $G(s)$ 는 공칭 선형모델과 불확실한 모델 파라미터의 변화범위에 대하여 루프 전달함수의 주파수응답 크기가 설계목표로 주어지는 상위 바운드(upper bound)와 하위 바운드(lower bound)의 차이 내에 존재하도록 설계되며 프리필터  $F(s)$ 는 최종적인 페루프



(a) steady-state motor speed



(b) motor speed Vs. duty cycle

전달함수가 목표로 하는 추종 전달함수의 범위 내에 존재하도록 설계된다. Fig. 5에서 페루프 전달함수 및 루프 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{F(s)G(s)P(s)}{1+G(s)P(s)} \quad (3)$$

$$L = G(s)P(s) \quad (4)$$

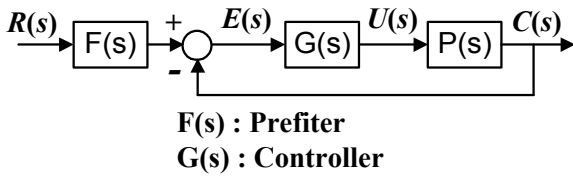


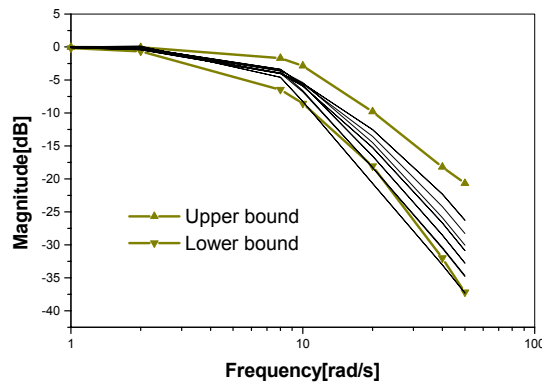
Fig. 5 Block diagram with QFT controller

QFT제어의 설계대상으로 지류모터의 전달함수는 2.1절에서 논의된 바와 같이 1차지연으로 가정하였으며 불확실한 속도이득과 시상수의 범위는 다양한 개루프 실험을 통하여 식 (5)와 같이 설정하였다. 불확실한 파라미터 범위 내에 존재하는 모든 플랜트에 대하여 주어진 목표성능을 충족시키는 QFT제어기는 앞섬-뒤짐 보상기(lead-lag compensator)의 직렬연결형태로 구해지며 식 (6)은 본 연구에서 설계된 QFT제어기의 전달함수를 나타내고 Fig. 5는 목표성능과 불확실성이 존재하는 플랜트의 페루프 응답성능을 보여준다.

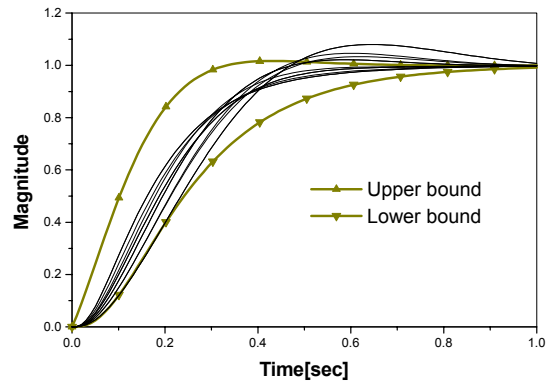
$$40 \leq K \leq 65, \quad 0.5 \leq T \leq 10 \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{0.79(\frac{s}{2.45} + 1)(\frac{s}{10.65} + 1)(\frac{s}{13.87} + 1)}{s(\frac{s}{3.806} + 1)(\frac{s}{21.69} + 1)(\frac{s}{77.32} + 1)}$$

$$F(s) = 1 / \frac{s}{5.5} + 1 \quad (6)$$



(a) Frequency response



(b) Step time response

Fig. 6 Block diagram with QFT controller

### 2.3 PIC16F877 프로그램 설계

2.2절에서 설계된 제어기의 전달함수는 고속연산이 가능한 DSP에서 구현될 수 있지만 본 연구에서 사용된 DSP보드에는 모터의 회전속도 측정에 적합한 주변장치가 없는 이유로 8비트 마이크로 컨트롤러를 사용하여 모터속도를 조절할 수 있는 PWM 신호발생기와 회전속도에 비례하는 구형파 신호로부터 회전속도를 10ms주기로 연산하는 기능을 구현하였다.(Fig. 7참조) PIC16F877은 직렬통신을 이용하여 DSP로부터 듀티율을 수신받아 모터에 PWM신호를 인가하고 포터 인터럽터 신호로부터 회전속도를 연산하여 송신하는 기능을 가지며 세부적인 설계사양은 다음과 같다.

- (1) 클럭 주파수: 11.0592MHz
- (2) 직렬통신 속도: 19,200baud
- (3) PWM 반송주파수: 11.06KHz
- (4) PWM 분해능: 0.1%
- (5) 회전속도 분해능: 1rpm 이하
- (6) 측정 가능한 최저회전속도: 750rpm

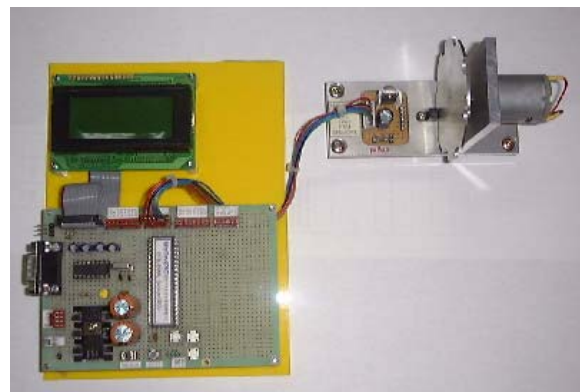


Fig. 7 PIC16F866 8-bit micro-controller board

2.4 DSP 및 NIC 인터페이스 프로그램 설계

부동소수점 연산을 고속으로 수행할 수 있는 DSP(50ns의 부동소수점 곱셈 연산)는 설계된 비례적분 및 QFT제어기의 전달함수를 10ms의 샘플링 시간으로 연산하여 직류모터의 속도를 제어하고 RTL8019AS NIC(Network interface controller)를 이용하여 설계된 TCP/IP 통신체계를 통하여 클라이언트와 모터 속도제어의 지령과 현재의 제어상태와 관련된 데이터통신을 수행한다.(Fig. 8 참조)

DSP에 구현된 TCP/IP통신은 FTP, HTTP 통신 프로토콜로 대표되는 어플리케이션 계층의 이전 단계이며 ping(packet internet network groper )을 이용하여 네트워크 상에서 설계된 DSP서버와의 접속 상태를 확인할 수 있도록 ICMP(Internet Control Message Protocol)를 구현하였다.

Table 1은 DSP를 이용하여 구축된 서버와 클라이언트사이에 송수신되는 데이터 패킷의 내용을 나타내며 DSP서버는 클라이언트의 요청을 받을 때마다 0.5초 동안 수집된 제어시스템의 데이터(0.01초마다 수집된 50조의 데이터)를 보내도록 설계하였다.

Table 1 TCP/IP data packet

Client→Server <sup>(1)</sup>	Server→Client <sup>(2)</sup>
Command block (14-byte)	Parameter block (22-byte)
System flag(2-byte)	Packet index(2-byte)
Ref. speed Cmd. 1 & 2 (4-byte)	System flag(2-byte)
Ref. dutv cvcle Cmd. 1 & 2(4-byte)	Ref. speed Cmd. 1 & 2 (4-byte)
PI gains(4-byte)	Ref. dutv cvcle Cmd. 1 & 2(4-byte)
	PI gains(4-byte)
	Ref. speed(2-byte)
	Motor speed(2-byte)
	Duty cycle(2-byte)
	<b>Data block</b> (6×50 bytes)
	Ref. speed(2-byte)
	Motor speed(2-byte)
	Duty cycle(2-byte)

- (1) every 0.25sec
- (2) everytime the packet is received from client



Fig. 8 TMS320C31 DSP and NIC interface board

2.5 클라이언트 프로그램 설계

PC에서 수행되는 클라이언트 프로그램은 Java로 설계되었으며 사용자 인터페이스 화면을 통하여 직류모터를 제어하고 현재의 작동상태를 모니터링하는 기능을 갖는다. 윈도우즈 환경에서 수행되는 프로그램으로 실시간으로 수집되는 제어 데이터를 획득하기 위하여 DSP서버에서 0.5초 동안 샘플링하여 저장한 데이터 패킷을 0.25초마다 타이머 이벤트를 발생시켜 데이터를 요청하도록 설계하였으며 중복되어 수신된 데이터는 폐기하고 새롭게 수신된 데이터를 이용해서 제어화면을 갱신하게 된다. Fig. 9는 설계된 클라이언트 프로그램의 제어화면이다. 텍스트와 그래프를 이용하여 현재 직류모터의 제어상태를 나타내며 모터속도를 변화시키기 위하여 사용자가 조작 가능한 기능은 다음과 같다.

- (1) Ref. speed/duty cycle Cmd. 1, 2 설정 값 변경 및 기준입력 선택
- (2) 개루프 및 폐루프 제어선택
- (3) 제어 시작/정지 및 제어기 선택
- (4) 비례적분제어이득 변경

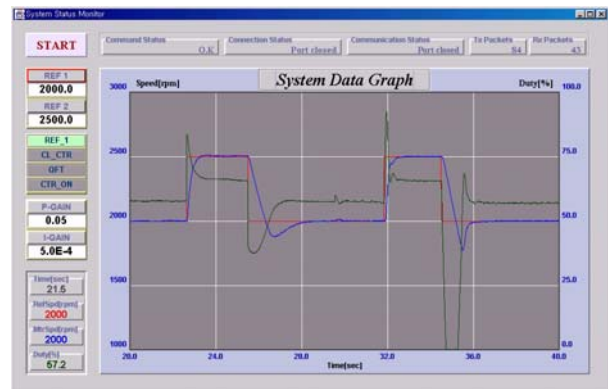
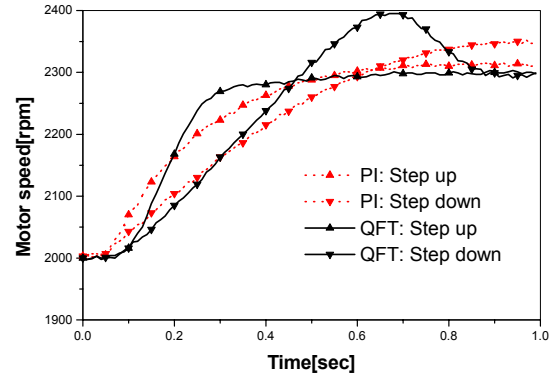


Fig. 9 DC-motor speed control console screen

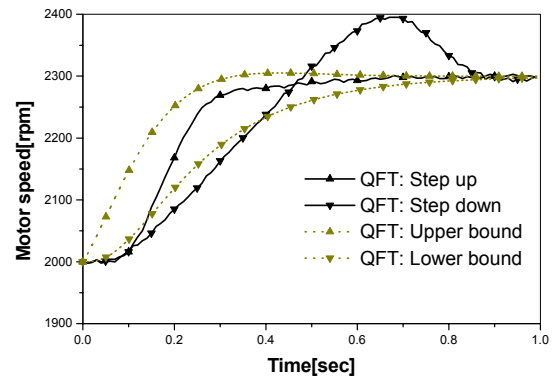
### 3. 실험 및 결과분석

설계된 비례적분 및 QFT제어기를 이산화하여 DSP로 구현하였으며 실험을 통하여 제어성과 임베디드 서버의 기능을 검증하였다. Fig. 10(a)와 (b)는 각각 비례제어기와 QFT제어기의 계단입력 응답이며 속도가 증가하는 경우와 감소하는 경우에 다르게 나타나는 과도응답은 전류를 제어하지 않는 모터구동회로에 기인한다고 판단된다. Fig. 10(c)는 설계된 각 제어기의 과도응답을 비교한 그림으로 QFT제어기가 속도가 감소하는 계단입력에 대하여 다소 큰 오버슈트를 나타내지만 비례적분제어기보다 정상상태에 도달하는 정착시간이 우수함을 알 수 있다. Fig. 10(d)는 시간영역에서 QFT제어기의 목표성과 실험결과와의 비교이며 시스템 식별을 통하여 파악된 직류모터의 선형모델에 대하여 견실제어기를 설계하였지만 속도가 감소하는 경우에는 비선형적인 동특성으로 인하여 목표성을 충족시키지 못하였다.

DSP에 구현된 임베디드 서버는 LAN을 통하여 실험한 결과 초당 1,288바이트(322바이트×4)의 데이터를 보내는 클라이언트와의 통신에 아무런 오류도 나타내지 않았으며 NIC와의 병렬 인터페이스 설계로 통신부하가 매우 작음을 확인하였다.



(c) comparison of control performance



(d) comparison of QFT control result to performance bounds

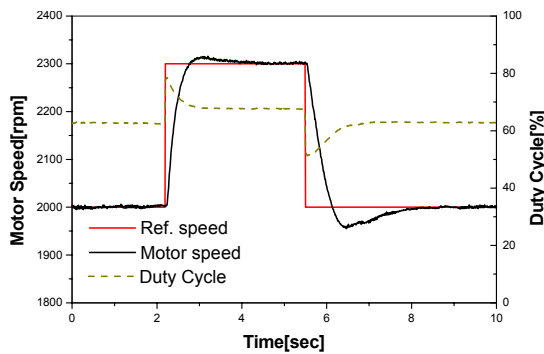
Fig. 10 Experimental results

### 4. 결론

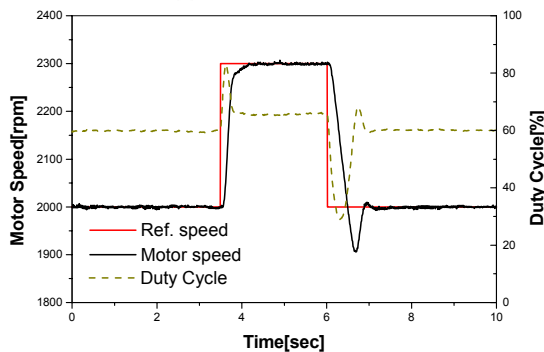
본 연구에서는 DSP로 구현된 QFT제어기와 임베디드 서버기능을 이용하여 직류모터의 속도제어시스템을 설계하고 LAN상에서 제어성과 기능을 확인하였다. 네트워크 상에서 원격으로 시스템을 제어하고 모니터링할 수 있도록 설계된 본 시스템은 NIC를 인터페이스하여 TCP/IP통신을 구현하였으므로 LAN케이블을 무선통신장비로 대체하면 고속의 무선통신도 가능하게 된다.

### 참고문헌

- (1) Isaac M. Horowitz, 1972, "Synthesis of Feedback Systems with Large Plant Ignorance for Prescribed Time-Domain Tolerances", International Journal of Control, Vol. 16, No. 2, pp. 287-309
- (2) Jeremy Bentham, 2000, *TCP/IP Lean, Web Servers for Embedded Systems*, CMP books



(a) PI-control result



(b) QFT-control result