논문 2018-13-02

무선 네트워크 제어시스템에서의 블루투스와 지그비의 적용 가능성

(Applicability of Bluetooth and ZigBee in Wireless Networked Control System)

박 정 일*
(Jung-Il Park)

Abstract : This paper describes the applicability of Bluetooth and ZigBee networks for real-time control in wireless networked control system and suggests an effective usage of them. The Bluetooth SCO link, SPP and HID profiles and the ZigBee non-beacon enabled network are analyzed and the latency of them are measured. A number of wireless networked control system experiments are performed via DC motor control system and the various profiles of Bluetooth and ZigBee in real-time wireless networked control system are compared.

Keywords : NCS, WNCS, Bluetooth, ZigBee, SCO, SPP, HID

Ⅰ. 서 론

네트워크 제어 시스템 (Networked control systems : NCS)은 그림 1에 나타낸 것처럼 네트워크를 통하여 센서와 제어기 사이의 정보를 교환하는 피드백 제어 시스템을 말한다 [1]. 특히 네트워크로 무선 네트워크가 사용되면 무선 네트워크 제어 시스템 (Wireless networked control systems : WNCS)이라고 한다. 실시간 제어루프는 전형적으로 빠른 데이터 전송과 짧은 지연시간을 요한다. 본 논문은 이러한 관점에서 WNCS에 사용 가능한 블루투스 (Bluetooth)와 지그비 (ZigBee)의 여러 프로파일들을 고찰해 보고자 한다.

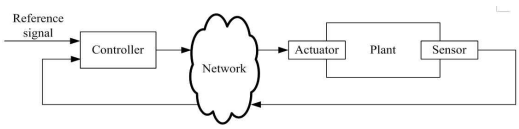

그림 1. 네트워크 제어시스템 블록도
Fig. 1 A block diagram of an NC

*Corresponding Author (jipark@yu.ac.kr)
Received: Jan. 5 2018, Revised: Jan. 30 2018, Accepted: Feb. 5 2018.
J.I. Park: Yeungnam University

ⓒ IEMEK J. Embed. Sys. Appl. 2018 Feb. 13(1) 9-15
ISSN : 1975-5066
http://dx.doi.org/10.14372/IEMEK.2018.13.1.9

많은 무선 네트워크 중에서 주로 블루투스와 지그비가 산업 현장에 널리 사용되고 있으며, 지그비는 호환성이 부족하여 많은 업체들이 상호 호환성을 위하여 노력하고 있다 [2]. 블루투스 Serial Port Profile (SPP)은 직렬 케이블을 대체하는 용도로 사용되고 있다 [3, 4]. 또한 SPP대신에 Synchronous Connection Oriented (SCO) 링크의 음성 채널을 사용하는 아이디어를 제안하기도 하였으며 [5], 실제로 그 개념을 WCNS로 구현하기도 하였다 [6].

NCS는 센서 데이터량이 많지 않으며, 제어패킷을 자주 보내야 하는 특징이 있어서 패킷 전송률을 높이고 지연시간을 줄이는 것이 중요하다. 블루투스는 짧은 지연을 갖는 SCO링크를 사용할 수 있는 옵션을 가지고 있으며, Host Controller Interface (HCI) 명령을 통해서 재전송을 하지 않도록 하는 Asynchronous Connectionless Link (ACL)을 가지고 있다. 또, SPP나 Human Interface Device (HID)과 같은 프로파일을 미리 간단하게 정의해서 사용할 수도 있다. 지그비는 비컨 (beacon) 혹은 비컨 비사용 (non-beacon) 네트워크로 설정하여 간단하게 사용할 수 있어서 이러한 목적을 이룰 수 있다.

본 논문의 구성은 블루투스와 지그비의 계층에 대해서 먼저 살펴본다. WNCS에 사용 가능한 블루

투스 SCO, ACL 링크, SPP, HID 프로파일에 대해서, 지그비 네트워크 토폴로지와 채널 액세스 방법에 대해서 구체적으로 살펴본 다음, 실제 실시간으로 모터를 제어하는 WNCS의 실험을 통해 각 방식을 검증해 본다.

II. WNCS에서의 블루투스와 지그비

블루투스와 지그비 프로토콜은 Wireless Personal Area Networks (WPAN)의 클래스에 속하며, 블루투스는 Medium Rate WPAN (MR-WPAN) 클래스, 지그비는 Low Rate WPAN (LR-WPAN) 클래스에 속한다.

1. 블루투스

블루투스 (IEEE 802.15.1)는 Bluetooth Special Interest Group (SIG)이 개발하였으며, 중간 속도의 단거리 무선네트워크를 위한 통신 프로토콜을 정의한 표준으로, 2.4GHz 주파수 대역에서 동작한다 [7]. 블루투스 계층은 그림 2에 나타낸 것처럼 여러 코어를 포함한다.

Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)은 프로토콜 멀티플렉싱, 분할, 재조합과 그룹 주소지정을 제공한다. 음성 패킷은 L2CAP를 바이패스할 수 있다. Link Manager는 Baseband링크를 셋업하고 유지한다. Baseband층은 타이밍, 프래이밍, 패킷전송, 흐름제어 (flow control), 오류검출, 오류정정을 수행한다. Radio층은 물리층 신호를 변조하고 복조한다. Radio, Baseband, Link Manager는 보통 블루투스 모듈에 통합되어 있으며 Host Controller (HC)라고 부른다. L2CAP층 보다 상위층의 블루투스 모듈은 Host processor에서 동작한다. 따라서 Host와 HC사이에 표준 인터페이스가 정의되며 이를 HCI라고 한다. Baseband층은 SCO와 ACL의 두 개의 링크 형태를 제공한다.

SCO링크는 음성과 같은 실시간 트래픽을 전송하는데 적합하며, 데이터의 주기적인 전송을 허용하는 슬롯 예약 메커니즘을 사용한다. SCO링크의 대역폭은 SCO패킷 주기에 의해서 조절되며 대역폭은 최대 64kbps이다. 이 SCO링크의 음성채널을 통해서 제어데이터 패킷을 전송하는 아이디어를 제시하였다 [5]. SCO링크는 우선순위에 따라 패킷을 전송하고, 재전송은 않기 때문에 WNCS에 적합한 통신유형이라 할 수 있다.

WNCS에 유용한 다른 방법으로 단일 슬롯 패킷만

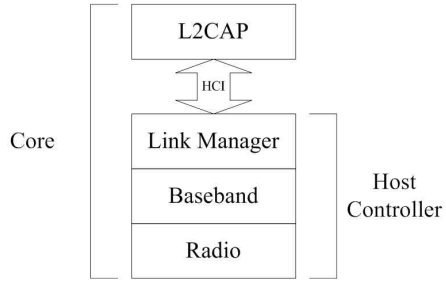

그림 2. 블루투스 프로토콜 계층 구조
Fig. 2 Bluetooth protocol layers

허용하고 재전송 없이 한번만 전송하는 원시적인 ACL링크를 사용할 수도 있다. 일반적으로 ACL링크는 CRC (Cyclic Redundancy Check) 코드로 보호되며, CRC검사가 실패하면 재전송이 허용되는 기간이 만료되지 않는 한 계속 재전송을 하므로 이 사용법은 NCS에 적합하지가 않다. SCO와 ACL링크를 WNCS에 사용할 수 있다 하더라도, 블루투스 모듈 제조업체들이 일반적으로 음성 데이터에 대해서만 SCO링크를 지원하고 있고, HCI를 통해서 HC계층의 명령을 사용해야 하는 어려움 때문에 WNCS에 적용하기가 쉽지 않다.

SPP는 Radio Frequency Communication (RFCOMM)을 사용하여 블루투스 장치 간에 직렬 케이블 연결을 위한 필요한 절차를 정의한다. 양측의 애플리케이션 프로그램은 일반적으로 직렬 케이블을 통해 통신할 수 있어야 하지만, 직렬 케이블 설정을 위한 블루투스의 절차를 알 수 없기 때문에 블루투스 인식도우미 애플리케이션이 필요하다. 현재까지 발표된 대부분의 WNCS는 ACL링크의 상위층에서 동작하는 SPP를 사용해서 구현되었다 [3, 4]. 이는 SPP가 유선연결을 통해 패킷을 보내는 것처럼 사용되므로 구현하는 방법이 쉽기 때문이다. 그러나 SPP는 ACL링크를 사용하며, 로직의 추가적인 계층을 도입하여 대기시간을 증가시켜 링크의 안정성을 향상시킨다. 또, 엔드시스템은 패킷전송을 제어할 수 없기 때문에 엔드시스템에서 전송된 각 제어데이터 패킷은 블루투스 Baseband 패킷 간에 분할될 수 있고, 이후 재조합으로 대기시간이 추가로 늘어나게 된다. 이처럼 SPP는 데이터의 안정적인 전송에 초점을 맞추다보니 지연시간이 늘어나고 가변적이게 되어 WNCS에 사용하기에는 애로사항이 있다.

이를 극복하기 위한 방법으로는 짧은 대기시간을 요하는 장치용으로 설계된 HID 프로파일을 사용

하는 것이다. HID 프로파일은 키보드 및 마우스와 같은 장치들을 지원하는 절차를 정의한다. HID는 유선 디바이스와 동일한 응답을 제공하는 것이 필수 요구사항인 만큼 지연이 짧은 입출력작업을 하는 모든 애플리케이션 프로그램에 매우 유용하다. HID 프로파일은 운영체제 제조업체에서 널리 지원하고 있어서, 표준 HID 드라이버의 잘 정의된 명령을 사용한 소프트웨어로 장치를 폴링하고 제어할 수 있다.

2. 지그비

지그비는 WPAN용 IEEE 802.15.4 표준을 기반으로 하는 소형, 저전력 고급 통신 프로토콜로 저속 애플리케이션용으로 설계되었다. 지그비 기반의 무선 장치는 868MHz, 915MHz 및 2.4GHz 주파수 대역에서 동작한다. 2.4GHz 무선 대역의 채널 대역폭은 250kbps이다 [8]. 지그비 표준은 그림 3과 같이 Physical Layer (PHY)와 Medium Access Protocols (MAC)로 구성되어 있으며, IEEE 802.15.4를 채택하고 있다.

특정 애플리케이션 용도로 IEEE 802.15.4 표준을 기반으로 하는 단거리 무선 네트워크가 많이 있지만 공급업체 간 상호호환성이 부족하다. 네트워크의 형성은 지그비 네트워킹 계층에 의해 관리된다. 네트워크는 스타 (star) 또는 피어-투-피어 (peer-to-peer), 두 가지 토폴로지중 하나여야 한다. 스타 토폴로지에서는 네트워크의 모든 장치는 PAN 코디네이터와만 통신할 수 있으며, 피어-투-피어 토폴로지에서는 각 장치는 서로 가깝게 배치된 다른 장치와 직접 통신할 수 있다. 본 논문에서의 WNCS는 스타 토폴로지를 사용한다.

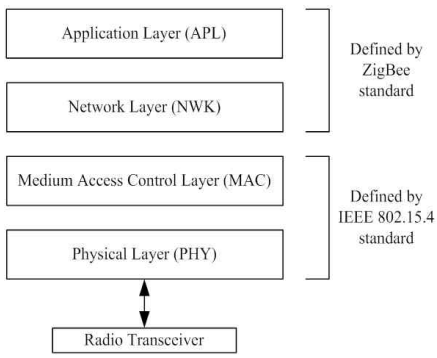

그림 3. 지그비 무선 네트워크 프로토콜 계층
Fig. 3 ZigBee wireless networking protocol layers

IEEE 802.15.4는 여러 장치가 동일한 주파수 채널을 사용하기 위해서 두 가지 채널 액세스 메커니즘을 사용한다. 하나는 경합기반이고 다른 하나는 경합이 없는 방식이다. 경합기반 채널 액세스에서의 디바이스는 CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)방식을 사용한다. CSMA-CA 방식에서는 장치가 전송하기를 원할 때마다 먼저 다른 장치에서 채널을 사용하지 못하도록 CCA (Clear Channel Assessment)를 수행한 후 자체신호 전송을 시작한다. 경합이 없는 방식에서의 코디네이터는 특정 슬롯을 특정장치에 할당한다. 이를 Guaranteed Time Slot (GTS)이라고 한다. 할당된 GTS를 갖는 장치는 CSMA-CA 메커니즘을 사용하지 않고 GTS동안 전송을 한다. GTS를 제공하기 위해서는 코디네이터는 비컨 메시지를 전송하여 네트워크의 모든 장치를 동기화한다. 이러한 네트워크를 비컨 사용 PAN이라고 한다. 비컨 메시지를 보내지 않는 코디네이터가 있는 네트워크를 비컨 비사용 네트워크라 하며, 여기에서는 GTS를 갖지 않으며 항상 경합을 한다.

NCS에서 패킷은 양방향으로 연속적으로 전송되어야 하므로 두 가지 옵션을 설정할 수 있다. 비컨 비사용 네트워크로 설정해서, 디바이스가 제어패킷을 받기 위해 지속적으로 코디네이터를 폴링하거나, 비컨 사용 네트워크로 설정해서 코디네이터가 디바이스로 데이터 요청을 트리거하기 위해 지속적으로 비컨을 보내는 방식을 사용할 수 있다.

본 논문의 실험에 사용한 지그비 XBee 모듈의 GTS 정보가 부족하여 승인이 없는 비컨 비사용 모드로 실험을 수행한다. 그러나 데이터 요청에 대한 승인은 계속 전송되어야 한다. 그림4 (a)는 코디네이터와 디바이스 간의 패킷교환을 나타낸다. 모든

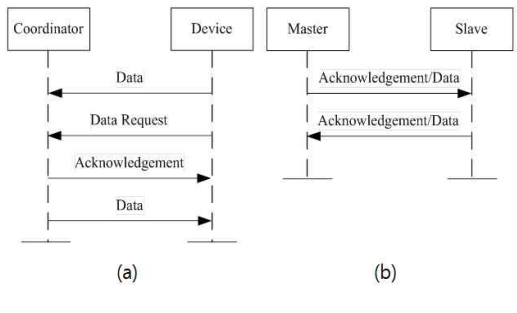

그림 4. 패킷교환 (a) 비컨 비사용 지그비, (b) 블루투스
Fig. 4 Packet exchange (a) Non-beacon enabled ZigBee, (b) Bluetooth

패킷을 보내기 전에 CSMA-CA 절차가 수행된다. 이는 그림 4 (b)에 나타낸 블루투스 네트워크에서 마스터와 슬레이브 간의 패킷 교환과 비교해 볼 수 있다. 데이터가 순차적으로 타임 슬롯으로 보내지므로 클리어 채널을 기다릴 필요가 없다. 블루투스는 데이터 패킷과 함께 전송된 고속 확인응답을 이용한다.

지그비는 스타, 클러스터 트리 및 메시 네트워크를 지원한다. 클러스터 트리 및 메시 네트워크의 각 홉 (hop) 재전송이 패킷지연을 증가시켜서 제어성능을 저하시키므로 1개의 스타 네트워크만으로 여러 슬레이브를 제어하는 방식이 바람직하다. 프로세스에서 패킷은 계속해서 전송되므로 패킷손실이 생기더라도 무방하다. 또 재전송은 추가지연을 발생시키므로 ACK 메커니즘을 사용하지 못하게 한다. 이처럼 ACK를 비활성화시키면 지연을 최소화할 뿐만 아니라 채널 처리량을 절약할 수 있다. 그러나 일부 공급업체의 지그비 모듈은 유니캐스트 패킷에 대해서는 ACK 비활성화가 불가능하므로, 의도적으로 ACK를 발생시키지 않는 브로드 캐스트 패킷을 사용할 수도 있다. 지그비는 저전력 프로토콜이지만, WNCS의 지연 최소화를 위해서는 모든 노드에서 절전모드를 해제하는 것이 바람직하다.

Ⅲ. WNCS 설계 및 실험

WNCS는 제어기가 들어있는 마스터와, 센서와 액추에이터를 포함하는 원격 I/O장치인 슬레이브로 구성된다. 센서노드는 정해진 시각 마다 플랜트 정보를 측정하는 time-driven 방식으로 동작하고, 제어기와 액추에이터는 측정된 데이터가 도착하면 바로 동작하는 event-driven 방식으로 동작한다. 센서는 플랜트의 정보를 주기적으로 샘플링해서 제어기로 전송한다. 측정된 데이터를 수신한 제어기는 새로운 제어신호를 계산하여 액츄에이터 노드로 보낸다. 구현된 WNCS의 구조를 그림 5에 나타낸다. 블루투스의 경우는 iWRAP 4 펌웨어를 사용하는 Bluegiga WT11 Bluetooth, 지그비의 경우는 MaxStream XBee/XBee2 모듈이 RS-232 링크를 통해 PC와 원격 I/O에 연결된다. iWRAP 4는 HID 호스트 프로파일을 지원하지 않기 때문에 PC는 Mini PCI-E 인터페이스를 통해 연결된 내부 블루투스 모듈을 사용한다. 지그비 MaxStream XBee/XBee2는 115kbps로 RS-232 링크를 통해 PC와 원격 I/O에 연결된다. API (Application Programming Interface) 프래임이 모듈의 구성과 통신을 제어하는데 사용된다. 원격 I/O는 PWM 제어 모터 드라이버와 AVR ATmega128 MCU로 구성되어 있다.

먼저 각 프로파일들의 달성 가능한 왕복 지연시간 (Round-trip latency : RTL)을 측정했다. 슬레이브에서 마스터로 전송하는 패킷 속의 시계열 인덱스에 실시간을 저장해서 보낸다. 마스터는 측정신호가 도착하면 바로 제어신호를 계산해서 슬레이브로 보낸다. 그러면 슬레이브는 마스터에서 신호가 도착한 시점에서의 시간과 패킷에 실려 있는 시계열 인덱스의 시간차를 계산함으로써 RTL을 구할 수 있다. 한 방향으로의 전송시간은 RS-232 전송시간, 타임 슬롯 대기시간, 패킷 전송시간으로 구성되며, 이들을 합한 값의 2배 (왕복)에 마스터에서의 제어신호 계산시간이 더해진 값이 RTL로 나타난다.

SPP를 이용했을 때 네트워크의 패킷의 분리와 재결합 등의 문제로 측정된 RTL은 65~95ms 범위로 많이 길었으며, 30ms 정도의 변동성이 있었다. SCO링크의 음성 채널을 통한 실험에서는 RTL은 가장 짧은 약 20ms 정도로 측정되었다. 타임 슬롯 대기시간에 따라 2.5ms 정도의 변동성이 존재했다. HID 프로파일의 경우, RTL은 33~41ms로 8ms 정도의 변동성이 있었으며, 짧은 대기시간을 갖는 것으로 확인되었다.

2.4GHz 지그비의 채널 대역폭은 250kbps이며, 실험에서 요구한 처리량은 120kbs였다. 하지만 ACK를 비활성화 시킨 채 최대 허용 페이로드로 패킷을 한 방향으로 보내는 방식일 때, 최대 처리량은

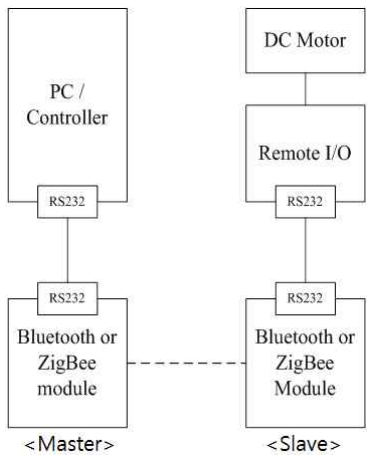

그림 5. 구현된 WNCS 구조
Fig. 5 Implemented WNCS structure

표 1. 블루투스와 지그비의 패킷전송률 및 왕복 지연시간
Table 1. Packet rates and round-trip latencies of Bluetooth and ZigBee

	Bluetooth			ZigBee
	SCO	HID	SPP	Non-beacon
Max. packet rate (packets per second)	800	>100	>100	≤40
RTL[ms]	~20	33~41	65~95	30~50

80kbps였다. 4~5 바이트 길이의 패킷을 서로 전송하는 두 노드의 실험은 패킷간격이 25ms (제어 주파수 40Hz) 정도였다. 즉, 달성 가능한 처리량은 3.2kbps에 불과했다. 1개의 스타 네트워크만으로 1개의 슬레이브를 제어했을 때 측정된 평균 홉-홉 시간지연은 20ms였으며 평균 RTL은 40ms였다. 혼잡하지 않은 네트워크에서 RTL은 30~50ms사이에 분포했다. 각 프로파일에 대한 패킷 전송률과 측정한 왕복지연시간을 표 1에 나타내었다.

1개의 DC 모터를 사용한 WNCS에 대해 많은 실험을 수행하였다. DC 모터의 모델은 실험으로 구했으며 (1)식과 같은 1차 전달함수의 형태를 취한다. 여기서 입력은 토크 [N·m]이고 출력은 각속도 [rad/s]이다.

$$G_m(s) = \frac{1450}{s+150} \tag{1}$$

엔코더는 각도를 측정하는 역할로 사용되므로 그림 6과 같이 모터 이후에 적분기가 추가된다.

원격 I/O에서 제어기로 보내지는 패킷은 3 바이트이며 그 구조는 그림 7에 나타낸다. 여기서 ID는 패킷의 순차번호이며 엔코더값 (16 비트)은 상위바이트와 하위바이트로 분할된다. 반면 제어기에서 원격 I/O로 보낸 패킷은 16비트의 상위와 하위바이트로

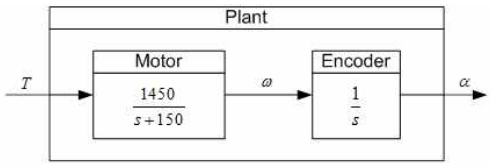

그림 6. 플랜트 모델 (T:토크, ω:각속도, α:출력 각도)
Fig. 6 Plant model (T:torque, ω:angular velocity, α:output angle)

ID	Encoder (H)	Encoder (L)

그림 7. 원격 I/O에서 제어기로 보내는 패킷 구조
Fig. 7 Packet structure sent from Remote I/O to Controller

PWM duty (H)	PWM duty (L)

그림 8. 제어기에서 원격 I/O로 보내는 패킷 구조
Fig. 8 Packet structure sent from Controller to Remote I/O

분할된 PWM값이 들어있다. 제어기에서 원격 I/O로 보낼 때는 ID가 없으며, 그 패킷의 구조를 그림 8에 나타낸다.

(2)식으로 표시되는 PID 제어기를 사용하였다.

$$G_c(z) = P + I \cdot T_s \frac{1}{z-1} + D\frac{N}{1+N \cdot T_s \frac{1}{z-1}} \tag{2}$$

블루투스 PID 제어기는 1 초 이내의 세틀링 시간을 목표로 Ziegler-Nichols 방법 [9]을 사용하여 튜닝 시켰다. 샘플링 시간 Ts는 10ms이며, PID 제어기 파라미터 P, I, D의 값은 각각 0.24, 0.004, -0.05였으며, 필터계수 N은 4.4였다.

비교를 위해서 유선시스템에서 PID 제어를 먼저 수행하였다. 유선시스템은 RS-232 전송 대기시간 및 처리시간으로 인해 지연시간이 있지만 평균 3ms이내여서 무시할 수 있다. 실험 결과를 그림 9에 나타낸다. 그림 10은 블루투스 HID와 SPP 프로파일을 사용하여 수행된 실험결과이다. 증가된 RTL과 그 변동성으로 인해 오버슈트와 세틀링 시간이 증가함을 알 수 있다. 그림 11은 HID 프로파일과 SCO링크를 이용한 경우의 응답을 비교한 것이다. SCO 링크의 경우 가장 우수한 성능을 나타내었다.

지그비 네트워크 처리량은 초당 100 패킷을 달성할 수 없기 때문에 PID 제어기를 40Hz 이하의 제어 주파수에 맞게 다시 튜닝시켰다. 튜닝된 PID 제어기의 파라미터 P, I, D의 값은 각각 0.56, 0.02, -0.06였으며, 필터계수 N은 5.9였다. 그 결과를 그림 12에 나타내었으며, 블루투스 HID 프로파일 기반의 제어결과와 유사하였다.

각 실험에서 얻은 오차의 실효값 (Root Mean Square : RMS)을 표 2에 나타내었다. 모든 실험은

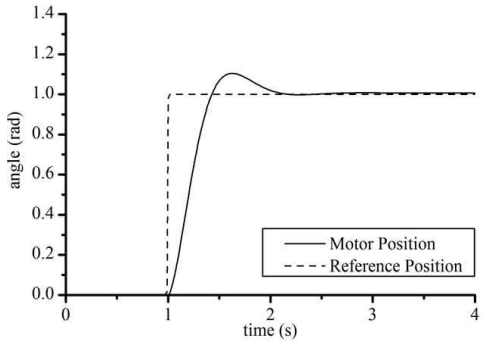

그림 9. 유선 연결을 통한 DC모터의 PID 제어
Fig. 9 PID control of DC motor via wired connection

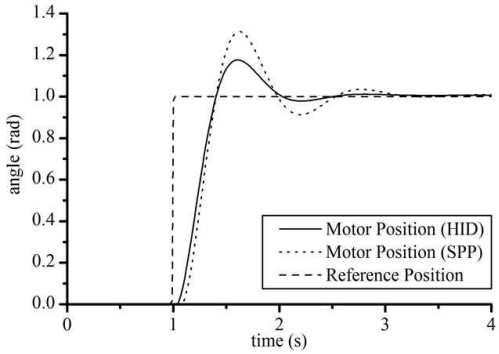

그림 10. HID와 SPP에 의한 DC 모터의 PID 제어
Fig. 10 PID control of DC motor via HID and SPP

5회의 실험을 반복하여 평균적으로 얻은 값을 나타낸 것이다. 제어 성능은 유선방식을 제외하고 SCO 방식이 가장 우수하였으며, SPP를 사용한 방식이 가장 좋지 않았다. RTL이 짧을수록 더 좋은 성능을 보임을 확인 할 수 있었다.

본 논문에서는 블루투스와 지그비의 여러파일들이 네트워크 제어시스템에서 성능차이가 어떻게 나는 가를 살펴보는 비교연구이다 보니, 같은 조건하에서 성능만을 비교해보는 기본적인 실험만을 수행하였다. 본 저자가 수행한 참고문헌 [10]을 참고하면, Smith predictor를 사용한 성능개선, 1개의 제어기가 여러 개의 원격 제어기를 제어할 때의 성능 등 다양한 실험 내용을 살펴 볼 수 있다.

Ⅳ. 결 론

WNCS에 적용가능한 블루투스와 지그비의 다양한

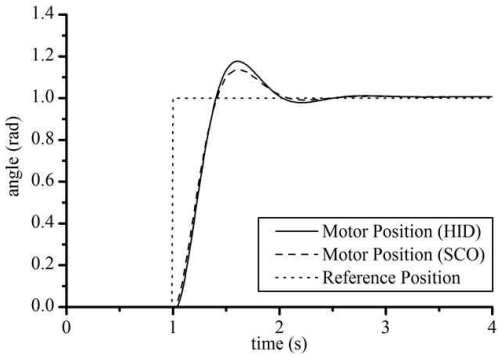

그림 11. HID와 SCO에 의한 DC 모터의 PID 제어
Fig. 11 PID control of DC motor via HID and SCO

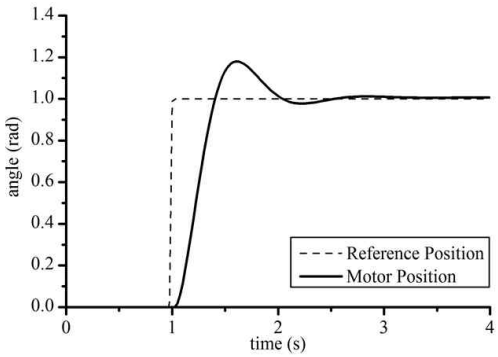

그림 12. 지그비에 의한 DC 모터의 PID 제어
Fig. 12 PID control of DC motor via ZigBee

표 2. DC 모터 제어시의 실효 오차
Table 2. Root mean squared error for DC motor control

	Wired	Bluetooth			ZigBee
		SCO	HID	SPP	Non-beacon
RMS [rad]	0.23	0.24	0.25	0.29	0.25

통신 프로파일을 검토하고, PID 제어기를 사용하여 DC 모터 위치제어 실험을 수행하여 각각의 성능을 비교하였다. 블루투스의 경우, HCI를 통해서 SCO와 ACL 링크를 직접 제어하는 경우는 구현 방법이 복잡하지만 지연시간이 가장 짧았으며, 유선 대역폭에 가까운 가장 좋은 성능을 보였다. HID 프로파일의 경우는 지연시간의 변동은 미미하고 짧은 대기시간을 가지며, 모든 최신 운영체제에서 기본적으로 지원하고 있어서 PC나 HID 호스트 프로파일을 통해 WNCS 용도로 사용 가능함을 확인했다. SPP의

경우는 인터페이스 방법이 간단해 구현하는 방법은 쉽지만 지연시간이 가장 길어 성능이 가장 떨어졌다. 지그비의 경우 패킷 전송률이 가장 낮았으나, 사용하기가 쉬우며 블루투스의 HID와 비슷한 성능을 나타내었다.

References

[1] D. Hristu-Varsakelis, W. S. Levine, Handbook of Networked and Embedded Control Systems. Springer, 2005.

[2] P. Ling, “Mixed Signals - ZigBee Aims to be a Standard for Industrial Low-power Radio, but we Might Never see Full Compatibility Between Modules That Support it,” Electronics Systems and Software, Vol. 5, No. 1, pp. 34-37, 2007.

[3] K. Seol, Y. Lim, “Implementation of Novel Application Using Bluetooth,” Proceeding of IEEE SICE Annual Conference, Vol. 2, pp. 1617-1620, 2004.

[4] F. Mitome, K. Ohnishi, “Bilateral Control With Bluetooth and its Evaluation,” Proceedings of IEEE International Conference on Human System Interactions, pp. 346-351, 2011.

[5] U. Bilstrup, P.A. Wiberg, “Bluetooth in Industrial Environment,” Proceedings of IEEE International Workshop on Communication Systems, pp. 239-246, 2000.

[6] U. Umirov, J. Park, “Bluetooth Synchronous Connection Oriented Link Usage in Networked Control Systems,” Journal of ICROS, Vol. 18, No. 8, pp. 731-737, 2012 (in Korean).

[7] Bluetooth SIG, Specification of the Bluetooth System v1.1, 2001.

[8] ZigBee Alliance, ZigBee 2007 Specification, 2007.

[9] C.C. Hang, K.J. Åström, W.K. Ho, “Refinements of the Ziegler-Nichols Tuning Formula,” Proceedings of Control Theory and Applications, Vol. 138, No. 2, pp. 111-118, 1991.

[10] U. R. Umirov, S. Jeong, J. Park, “Applicability of ZigBee for Real-Time Networked Motor Control Systems,“ Proceedings of IEEE International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 2937-2940, 2008.

Jung-Il Park (박 정 일)

He received the Ph.D. degree in Department of Electronic Engineering from Seoul National University in 1989. He is currently professor in Department of Electronic Engineering at Yeungnam university. His primary research interests include high precision motion control, intelligent control, and networked control system.

Email: jipark@yu.ac.kr