

Common Industrial Protocol 기반의 유무선 하이브리드 네트워크에 관한 성능 분석

Performance Analysis of Wired/Wireless Hybrid Network based on Common Industrial Protocol

정 지원, 이승기, 김동성*
(Ji-Won Jung, SeungKi Lee, and Dong-Sung Kim)

Abstract : This paper is concerned with a performance analysis using a wired/wireless hybrid network based on Common Industrial Protocol(CIP). For the performance analysis, the data transmission time, average end-to-end delay and throughput between DeviceNet and the wireless devices are investigated. The experimental results show the performance in terms of the polling/COS service time of CIP based hybrid network.

Keywords : wired/wireless hybrid network, common industrial protocol, polling/COS service time, average end-to-end delay

I. 서론

공장 자동화 시스템의 필드 레벨에서 사용되는 필드버스는 제어기와 센서/구동기(sensor/actuator)를 연결시키는데 광범위하게 사용되고 있다. 최근에는 무선 통신 기술의 성능과 신뢰성이 향상되고 무선기기들의 가격이 저렴해지면서 무선 통신 기술을 이용한 확장형 필드버스 구조에 대한 연구들이 진행되고 있다[1].

무선 통신 기술을 이용한 확장형 필드버스 구조는 기존 필드버스에 데이터 링크 계층의 인터페이스를 수정하여 무선 기반의 제어 망과 연결한다. 이러한 유무선 하이브리드 게이트웨이를 이용한 확장형 필드버스망 구현에 대한 연구 사례들이 발표되어졌다. 최근 이러한 유무선 하이브리드 네트워크에 대한 연구 사례들을 살펴보면 다음과 같다. [2]에서는 이동성을 가진 산업용 I/O 노드들을 지원하기 위해 무선 기술을 이용한 필드버스의 확장 기술을 제안하였다. 이 유무선 하이브리드 네트워크는 무선 통신 네트워크를 통합하기 위해 프로피버스(PROFIBUS) 기반의 필드버스를 유선망으로 사용하였다.

[1]에서는 공장 자동화 시스템의 필드 레벨에서 유무선 하이브리드 네트워크를 적용하기 위해 IEEE 802.11과 블루투스를 이용한 두 가지 모델을 제안하였다. 특히, 두 무선 통신 기술들의 평균 패킷 에러율(PER)에 대한 평균 업데이트 시간과 평균 알람 지연시간 등을 연구하였다.

[3]에서는 무선 기술에 결합된 프로피버스를 위한 해법으로 IEEE 802.11 기반의 무선 기술을 제안하였다. 그러나 [3]에서 IEEE 802.11은 재전송 등으로 인해 발생하는 데이터 전송 시간의 지연 가능성 때문에 프로피버스 기반의 유

무선 하이브리드 필드버스 네트워크에 적합하지 않은 프로토크올이라고 설명하고 있다.

[4]에서는 프로피버스를 이용한 블루투스 기반의 유무선 하이브리드 네트워크의 구현을 설명하면서, 사이클 시간과 알람 지연에 대한 두 가지 성능 평가 요소들을 이용한 분석 결과를 발표하였다. 블루투스의 경우 무선 필드버스로 적용하기 서비스 영역 및 노드 수의 한계를 해결해야 한다.

현재까지 저자 등이 조사한 바에 의하면 CIP 기반의 디바이스넷 마스터와 무선 디바이스들로 구성된 유무선 하이브리드 네트워크의 성능 분석에 관련된 기술 논문은 보고된 적이 없었다. 이에 본 논문은 CIP 기반의 연결 디바이스인 블루투스용 게이트웨이[5]와 Elpro 무선 게이트웨이[6]를 이용하여 디바이스넷 기반의 유무선 통합 테스트-베드를 구성하고 이를 통해 CIP 기반의 하이브리드 네트워크의 성능 분석을 수행하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 유무선 하이브리드 네트워크의 문제점 분석을 설명하고, 3장에서는 디바이스넷, 무선, 하이브리드 모듈, 그리고 폴링/COS 서비스의 전송 시간에 대한 수학적 분석 방법을 설명한다. 4장에서는 무선 게이트웨이를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크의 테스트-베드를 구성하여 성능 분석을 수행하고 OPNET Modeler[7]의 모의실험 결과를 비교한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 내린다.

II. 유무선 하이브리드 네트워크의 문제점 분석

산업용 유무선 하이브리드 네트워크에서는 유무선 각각의 프로토크올이 산업용 환경의 특정 요구 조건을 만족시켜야 한다. 상용 필드버스에 정의된 유선 프로토크올은 그 적용 가능성이 검증되었으나 무선 프로토크올을 필드버스에 적용하기 위해서는 다양한 각도에서 요구 조건에 부합되는지를 검토해야 한다.

1. CIP와 디바이스넷

CIP는 그림 1과 같이 디바이스넷의 상위 계층으로 사용

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 3. 30., 채택확정 : 2007. 10. 15.

정지원, 김동성 : 금오공과대학교 전자공학부

(kisstice@kumoh.ac.kr/dskim@kumoh.ac.kr)

이승기 : 포스콘 기술 연구소, 플랜트 사업팀(skissue@nate.com)

※ 본 논문은 금오공대 교내 학술연구비에서 지원하여 연구하였음.

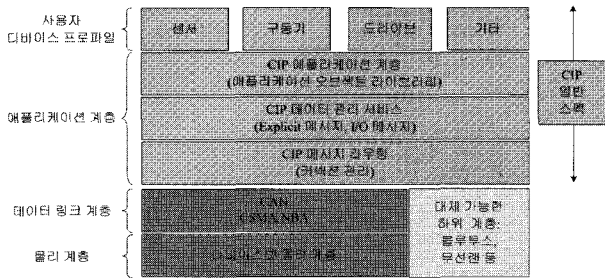


그림 1. CIP 오브젝트 모델.
Fig. 1. CIP object model.

되는 응용 메시지 방식이다[8].

디바이스넷은 연결 기반 통신 모델을 사용하고 마스터/슬레이브 관계를 기반으로 한 간소화된 통신 구조를 제공한다. 이러한 통신 방법은 선정의 마스터/슬레이브 연결 (predefined master/slave connection) 서비스이며, 이 방법을 통해 제어 애플리케이션에서 I/O 메시지들의 교환을 단순화한다. 이를 이용하여 센서/구동기는 전력 공급 시 미리 정의된 데이터 유형과 전송량을 생산/소비 하게 된다[8].

디바이스넷의 선정의 마스터/슬레이브 연결 서비스 중 폴링/COS 서비스 들은 다음과 같이 정의한다.

- 폴링/COS 서비스: 폴링 서비스는 마스터와 슬레이브 간 송수신되는 메시지 서비스이고 COS(Change of State) 서비스는 슬레이브의 상태가 변화되었을 때 마스터가 보고 받기 위해서 사용되는 서비스이다.

디바이넷 마스터와 슬레이브는 애플리케이션의 요구조건과 구성 요건에 따라, 주어진 메시지 서비스를 이용하여 데이터를 교환할 수 있다.

2. 근거리 무선 통신 기술 적용 시 문제점

유무선 인터페이스를 가진 연결 장치를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크는 확장형 필드버스 구조를 위한 적절한 방법이다. 하지만 연결 장치를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크는 무선 연결 시 유선 연결보다 더 많은 재전송을 일으킬 수 있으므로 시스템 전체에서의 실시간 전송은 보장하기가 어렵다. 또한 유무선 각각의 프로토콜 선택 시 데이터 처리율 및 주기성, 무선 I/O 노드 수 등으로 인해 추가적으로 고려해야 되는 많은 사항들이 있다.

본 논문에서는 일반적인 주기 시간 내에 디바이스넷 마스터에서 무선 I/O 슬레이브까지의 폴링/COS 서비스 시간의 실시간적 관점의 성능 분석을 수행하였다.

III. 유무선 하이브리드 네트워크의 타이밍 분석

유무선 하이브리드 네트워크의 성능 분석을 하기 위해 다음과 같은 가정들을 사용한다.

1. 데이터 전송 시 각각의 유무선 프로토콜은 고정된 길이의 프레임 전송한다.(디바이스넷: 14 바이트, 블루투스: 342 비트, Elpro: 96 비트)
2. 네트워크 길이가 100m인 디바이스넷에서 네트워크 상 전달 지연 시간, (T_P^{dn})은 $1\mu s$ 이다[14].
3. 무선 게이트웨이 내부에서의 변환 시간, (T_C^{wl})은 디바이

스넷의 프레임 전송 시간, (T_F^{dn})과 동일한 값을 갖는다.

각 모듈의 타이밍 분석에 의해 계산된 값과 CAN 분석기를 이용하여 측정된 실험값은 디바이스들의 통신 구성 (configuration) 시간 이후의 디바이스들 간 데이터 전송 시간만으로 제한한다. 그리고 이 때 디바이스들 간 전송되는 데이터는 주기성 데이터로서, 디바이스넷 마스터의 선정의 마스터/슬레이브 연결 서비스 중 폴링/COS 서비스를 이용하여 측정된 값을 디바이스들 간 데이터 전송 시간으로 고려한다.

1. 디바이스넷 모듈의 타이밍 분석

디바이스넷 모듈은 디바이스넷 마스터와 유선 I/O 슬레이브로 구성되어 있다. 디바이스넷 모듈에서 전체 데이터 전송 시간은 디바이스넷 마스터, 네트워크 채널, 그리고 유선 I/O 슬레이브 등 세 부분으로 나눌 수 있다. 디바이스넷 모듈의 타이밍 분석을 위해, 다음과 같은 용어들을 정의한다.

T_M^{dn} 는 디바이스넷 마스터에서 데이터가 전송된 시간을 나타내고, T_S^{dn} 는 슬레이브로 데이터가 수신된 시간을 나타낸다. T_D^{dn} 는 T_M^{dn} 과 T_S^{dn} 간 데이터 전송 시간을 나타내고, T_W^{dn} 는 메시지 대기 시간이며 데이터 전송 시 고려되지 않는다. T_{TX}^{dn} 는 네트워크상에서 디바이스넷 프레임 전송 시간과 전달 지연 시간을 포함한 전체 데이터 전송 시간을 나타낸다. T_F^{dn} 는 디바이스넷 마스터와 슬레이브 간 14 바이트의 고정된 길이의 디바이스넷 프로토콜을 전송하기 위한 프레임 전송 시간을 나타낸다. 따라서 T_D^{dn} 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[9].

$$\begin{aligned}
 T_D^{dn} &= T_S^{dn} - T_M^{dn}, \\
 &= T_W^{dn} + T_{TX}^{dn}, \\
 &= T_W^{dn} + T_F^{dn} + T_P^{dn}, \\
 &\approx T_F^{dn}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

그림 2는 실험값 측정 시 가정한 14 바이트의 고정된 길이로 구성된 디바이스넷의 프레임 포맷을 나타낸다. 첫 번째 가정에 의해, 오버헤드의 길이는 47 비트[9]를 갖고 예비 비트와 데이터 필드 길이는 각각 1 비트와 8 바이트를 갖는다.

따라서 첫 번째와 두 번째 가정에 의해, T_F^{dn} 는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다;

$$\begin{aligned}
 T_F^{dn} &= \{N_O^{dn} + N_{Data}^{dn} + N_R^{dn}\} \times T_{FP}^{dn}, \\
 &= \{47 (bit) + 64 (bit) + 1 (bit)\} \times 2 (\mu s/bit), \\
 &= 0.224 ms.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

- N_O^{dn} : 오버헤드 길이.
- N_{Data}^{dn} : 데이터 길이.
- N_R^{dn} : 예비 비트.
- T_{FP}^{dn} : 프레임 처리 시간.

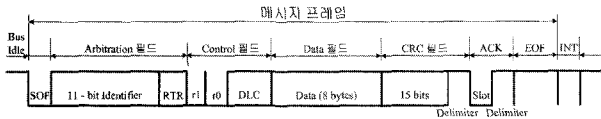


그림 2. 디바이스넷의 프레임 포맷.

Fig. 2. Frame format of DeviceNet.

2. 무선 모듈의 타이밍 분석

무선 모듈은 무선 게이트웨이와 무선 I/O 슬레이브로 구성된다. 무선 모듈의 타이밍 분석을 위해, 다음과 같은 용어들이 사용된다.

T_D^{wl} 는 무선 게이트웨이와 무선 I/O 슬레이브 간 변환 시간을 포함한 데이터 전송 시간을 나타낸다. 따라서 T_D^{wl} 는 (3), (4)를 통해 계산될 수 있다.

- $T_{D_B}^{wl}$: 블루투스 게이트웨이와 I/O 슬레이브 간 전송 시간.
- $T_{D_E}^{wl}$: Elpro 무선 게이트웨이와 I/O 슬레이브들 간 전송 시간.
- $N_{O_B}^{wl}$: 블루투스의 오버헤드 길이.
- $N_{O_E}^{wl}$: Elpro 무선 프로토콜의 오버헤드 길이.
- $N_{Data_B}^{wl}$: 블루투스의 데이터 길이.
- $N_{Data_E}^{wl}$: Elpro 무선 프로토콜의 데이터 길이.
- $T_{FP_B}^{wl}$: 블루투스의 프레임 처리 시간.
- $T_{FP_E}^{wl}$: Elpro 무선 프로토콜의 프레임 처리 시간.
- T_C^{wl} : 무선 게이트웨이 내부에서의 디바이스넷 네트워크와 무선 네트워크 간 전송된 데이터를 변환하는 시간.

$$T_{D_B}^{wl} = \{ N_{O_B}^{wl} + N_{Data_B}^{wl} \} \times T_{FP_B}^{wl} + T_C^{wl},$$

$$= \{ 126 (bit) + 216 (bit) \} \times 5.8 (\mu s/bit) + 0.224 ms,$$

$$= 2.208 ms.$$

$$T_{D_E}^{wl} = \{ N_{O_E}^{wl} + N_{Data_E}^{wl} \} \times T_{FP_E}^{wl} + T_C^{wl},$$

$$= \{ 88 (bit) + 8 (bit) \} \times 208 (\mu s/bit) + 0.224 ms,$$

$$= 20.192 ms.$$

(3), (4)에서 $T_{FP_B}^{wl}$ 과 $T_{FP_E}^{wl}$ 는 각각 172.8 Kbps와 4.8 Kbps인 데이터 처리율을 이용하여 계산할 수 있다.

그림 3은 342 비트를 가진 블루투스의 패킷 프레임 포맷을 나타낸다. 블루투스는 액세스 코드와 헤더에서 126 비트의 오버헤드와 DHI인 216 비트의 페이로드를 갖는다[10].

그림 4는 96 비트를 가진 Elpro 무선 프로토콜의 패킷 프레임 포맷을 나타낸다. Elpro 무선 프로토콜은 88 비트의 오버헤드와 8 비트의 폴링메시지를 가진다[11].

특히, 블루투스는 1, 3, 또는 5-슬롯 패킷 길이를 사용하는데, 그림 5와 같이 멀티 슬롯 패킷들에서의 슬롯 타이밍을 고려할 수 있다[10].

블루투스 패킷들은 동일한 오버헤드를 가지는 것으로 가정하고, 데이터 전송을 위해 최대 데이터 전송 시간 값을

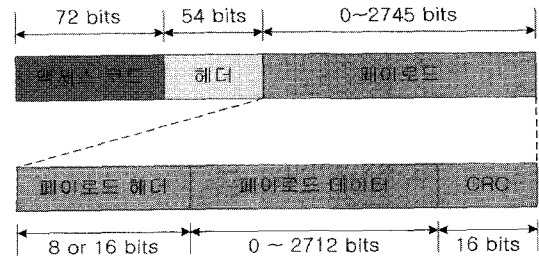


그림 3. 블루투스의 패킷 프레임 포맷.

Fig. 3. Frame format of Bluetooth.

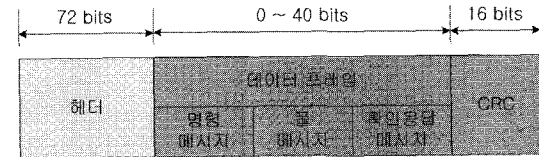


그림 4. Elpro 무선 프로토콜의 패킷 프레임 포맷.

Fig. 4. Frame format of Elpro wireless protocol.

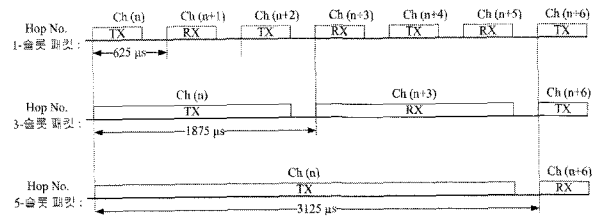


그림 5. 블루투스의 멀티슬롯 패킷들에서의 슬롯 타이밍.

Fig. 5. Slot timing for multi-slot packets on Bluetooth.

사용한다. 이는 각 패킷의 헤더로 인해 단일 패킷보다 여러 슬롯의 패킷을 전송하는 것이 효율적이기 때문이다[10]. 따라서 $T_{D_B}^{wl}$ 의 최대 데이터 전송 시간은 3.349ms(변환 시간 포함)로 설정할 수 있다.

3. 하이브리드 모듈의 타이밍 분석

하이브리드 모듈은 그림 6에서 나타낸 것처럼 유선 I/O 슬레이브와 무선 게이트웨이 및 무선 슬레이브 등이 포함된 디바이스넷 모듈과 무선 모듈로 구성된다.

하이브리드 모듈의 타이밍 분석을 위해, 다음과 같은 용어들을 하이브리드 모듈의 수학적 분석에 사용한다.

T_D^h 는 디바이스넷 마스터와 무선 게이트웨이 간 데이터

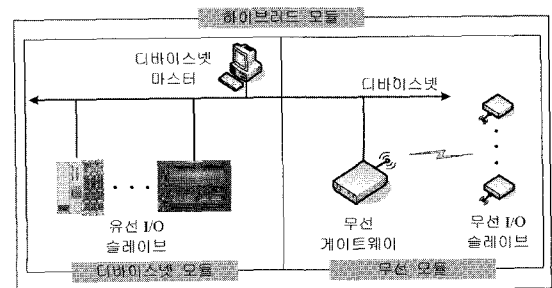


그림 6. 하이브리드 네트워크 모듈의 구성.

Fig. 6. Structure of the hybrid module.

전송 시간 그리고 각 무선 모듈의 데이터 전송 시간을 포함한 하이브리드 모듈의 전송 시간을 나타낸다. 따라서 T_D^h 는 다음과 같은 식들로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{D_B}^h &= T_{D_B}^{dn} + T_{D_B}^{wl}, \\ &= 0.224ms + 3.349ms, \\ &= 3.573ms. \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} T_{D_E}^h &= T_{D_E}^{dn} + T_{D_E}^{wl}, \\ &= 0.224ms + 20.192ms, \\ &= 20.416ms. \end{aligned} \tag{6}$$

- $T_{D_B}^h$: 블루투스 게이트웨이를 이용한 하이브리드 모듈의 전송 시간.
- $T_{D_E}^h$: Elpro 무선 게이트웨이를 이용한 하이브리드 모듈의 전송 시간.
- $T_{D_B}^{dn}$: 디바이스넷 마스터와 블루투스 게이트웨이 간 전송 시간.
- $T_{D_E}^{dn}$: 디바이스넷 마스터와 Elpro 무선 게이트웨이 간 전송 시간.

(5), (6)에서 나타낸 $T_{D_B}^{dn}$ 과 $T_{D_E}^{dn}$ 는 디바이스넷 마스터와 슬레이브 간 14 바이트의 고정된 길이의 디바이스넷 프로토콜을 전송하기 위한 프레임 전송 시간, (T_F^{dn})로 가정한다.

4. 폴링/COS 서비스 시간의 타이밍 분석

유무선 하이브리드 네트워크의 성능 분석을 위해, 기정의 마스터/슬레이브 서비스 중 폴링/COS 서비스의 경우와 무선 I/O 슬레이브의 상태 변화로 인한 메시지 발생에서 메시지 응답 ACK까지의 전송 시간을 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 폴링/COS 서비스 시간은 다음과 같은 식들로 계산할 수 있다.

$$T_S^{dn} = T_D^{dn} \times 2 = 0.448ms. \tag{7}$$

$$T_{S_B}^h = T_{D_B}^h \times 2 = 7.146ms. \tag{8}$$

$$T_{S_E}^h = T_{D_E}^h \times 2 = 40.832ms. \tag{9}$$

- T_S^{dn} : 디바이스넷 모듈의 폴링/COS 서비스 시간.
- $T_{S_B}^h$: 블루투스 게이트웨이를 이용한 하이브리드 모듈의 폴링/COS 서비스 시간.
- $T_{S_E}^h$: Elpro 무선 게이트웨이를 이용한 하이브리드 모듈의 폴링/COS 서비스 시간.

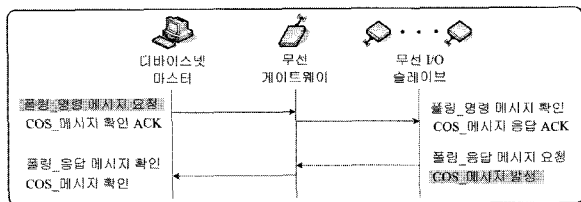


그림 7. 유무선 하이브리드 네트워크의 폴링/COS 서비스 절차.
Fig. 7. Polling/COS service procedure of the wired/wireless hybrid network.

VI. 실험 결과 및 분석

그림 8은 유무선 하이브리드 네트워크의 테스트-베드를 나타낸다. 사용된 테스트-베드는 디바이스넷과 WAGO I/O 슬레이브[12]를 포함한 유선 I/O 슬레이브와 무선 게이트웨이 및 무선 I/O 슬레이브로 구성된다.

유무선 하이브리드 네트워크의 성능 분석으로 그림 8을 이용하여 디바이스넷 마스터와 디바이스넷 상에 연결된 유선 I/O 슬레이브와 무선 게이트웨이 및 무선 I/O 슬레이브 간 데이터 전송 시간을 CAN 분석기(CANKing)[13]를 이용하여 실험값을 측정하였다.

1. 유선 I/O 슬레이브

그림 9는 디바이스넷 I/O와 WAGO I/O 슬레이브로 구성된 유선 I/O 슬레이브를 나타낸다. 디바이스넷 네트워크에 대한 실험은 이러한 유선 I/O 슬레이브를 이용하여 선정의 마스터/슬레이브 연결 서비스 중 폴링/COS 서비스를 사용하여 실험 값을 측정하였다.

그림 9(a)는 32 집점들로 구성된 디바이스넷 I/O 슬레이브로 CIP 프로토콜의 선정의 마스터/슬레이브 연결 서비스를 지원하는 장치이다. 그림 9(b)는 산업용 환경에 널리 사용되고 있는 범용 디바이스넷 I/O 슬레이브이다.

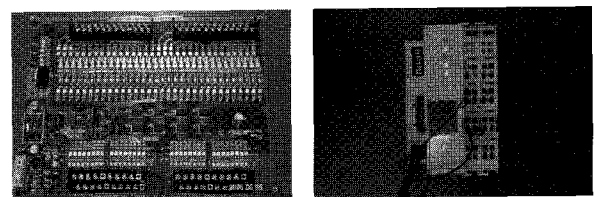
2. 무선 게이트웨이 및 무선 I/O 슬레이브

그림 10은 테스트-베드에 적용된 무선 디바이스들을 나타낸다.

특히, 무선 게이트웨이는 디바이스넷 마스터와 무선 네트워크 간 전송되는 데이터를 변환하는 역할을 수행한다. 이러한 무선 게이트웨이의 데이터는 무선 I/O 슬레이브로 전송되며 무선 I/O 슬레이브는 단거리 영역 내에서 원격 모니터링을 제공한다.



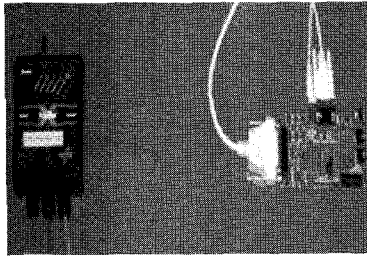
그림 8. 유무선 하이브리드 네트워크의 테스트-베드.
Fig. 8. Test-bed for the wired/wireless hybrid network.



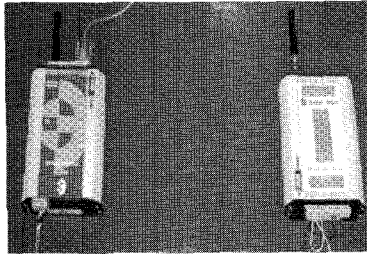
(a) DeviceNet I/O slave. (b) WAGO I/O slave.

그림 9. 실험에 사용한 유선 I/O 슬레이브.

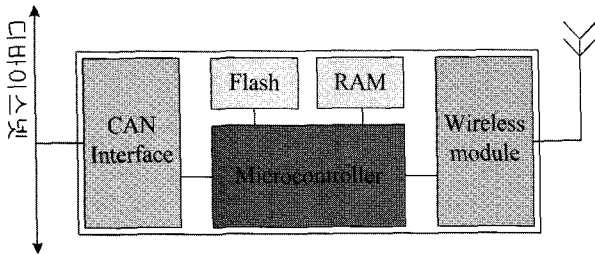
Fig. 9. I/O slave for experiment.



(a) Bluetooth gateway and I/O slave.



(b) Elpro wireless gateway and I/O slave.



(c) Internal structure of wireless gateway.

그림 10. 실험에 사용된 CIP 기반의 무선 장치들.

Fig. 10. Wireless devices for experiment.

3. 디바이스넷 네트워크의 실험 결과

그림 11에서 나타낸 것처럼, 유선 I/O 슬레이브로 구성된 네트워크의 성능 분석을 위해 디바이스넷 마스터와 유선 I/O 슬레이브 간 통신 구성(configuration) 이후의 데이터 전송 시간을 CAN 분석기로 측정하였다.

그림 11(a)에서는 CAN 분석기를 이용하여 디바이스넷 마스터와 유선 I/O 슬레이브 간 폴링/COS 서비스 시간은 0.470ms로 측정할 수 있다. 이 값은 식 3.7에서 계산한 디바이스넷 모듈의 폴링/COS 서비스 시간과 거의 동일한 값을 갖는다.

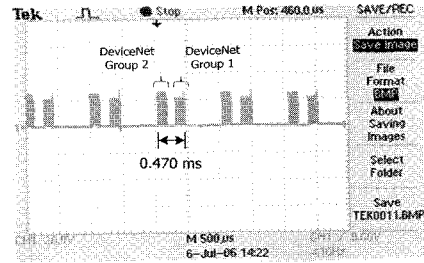
(b)는 폴링/COS 서비스에 대한 메시지 그룹 2와 1에 대한 메시지를 나타낸다. 특히, 그림 11(b)-13(b)에서, 메시지 ID값이 폴링/COS 서비스의 명령 메시지 요청과 응답 메시지 확인을 나타내는 메시지 그룹 2와 1의 ID인 0x05와 0x0F 이다.

4. 유무선 하이브리드 네트워크의 실험 결과

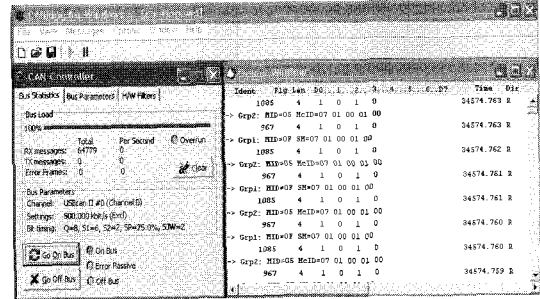
이 장에서는 무선 I/O 슬레이브가 연결된 블루투스 게이트웨이와 Elpro 무선 게이트웨이에서의 실험 결과를 구분하여 설명한다.

4.1 블루투스 게이트웨이를 포함한 네트워크

그림 12는 블루투스 게이트웨이를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크의 데이터 전송 시간을 나타낸다.



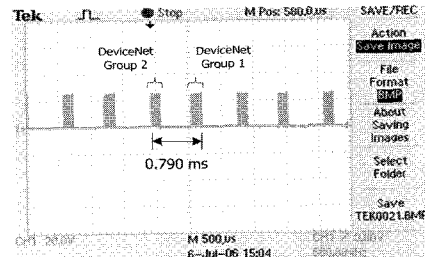
(a) Screenshot of the polling/COS service time between DeviceNet master and I/O slaves.



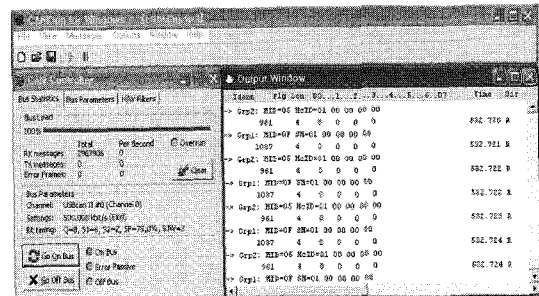
(b) Screenshot of the estimated message of DeviceNet protocol between DeviceNet master and I/O slaves.

그림 11. 디바이스넷 마스터와 무선 I/O 슬레이브 간 서비스 시간 및 메시지 교환 측정 결과.

Fig. 11. Screenshot of the estimated message between DeviceNet master and I/O slaves.



(a) Screenshot of the polling/COS service time between DeviceNet master and Bluetooth gateway.



(b) Screenshot of the estimated message of the wired/wireless hybrid network using Bluetooth gateway.

그림 12. 블루투스 게이트웨이를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크에서 측정된 메시지 측정 결과.

Fig. 12. Screenshot of the estimated message of wired/wireless hybrid network using Bluetooth gateway.

그림 12(a)에서는 CAN 분석기를 이용하여 디바이스넷 마스터와 블루투스 게이트웨이 간 폴링/COS 서비스 시간의 실험값은 0.790 ms로 측정할 수 있다. (b)에서는 그림 12의 폴링/COS 서비스의 명령 메시지 요청과 응답 메시지 확인을 나타낸다.

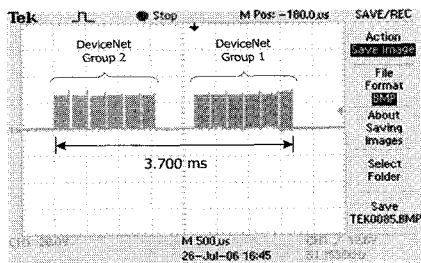
4.2 Elpro 무선 게이트웨이를 포함한 네트워크

그림 13은 Elpro 무선 게이트웨이를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크의 데이터 전송 시간을 나타낸다. 여기서 전송된 폴링/COS 서비스는 각 그룹 내에서 신호가 연속적으로 6번씩 반복하는 것을 나타낸다. 이 때 그림 12(a), 13(a)에서 각각의 폴링/COS 서비스 시간의 실험값이 (5), (6)에서 14 바이트의 고정된 길이의 디바이스넷 프로토콜을 전송하기 위한 프레임 전송 시간, (T_F^{dn})과 동일한 값으로 가정한 $T_{D_B}^{dn}$ 과 $T_{D_E}^{dn}$ 에 대한 값과 서로 다르다. 이는 각각의 무선 게이트웨이가 실제 해당되는 무선 I/O 슬레이브들을 탐색하기 위한 처리 시간이 포함되기 때문이다.

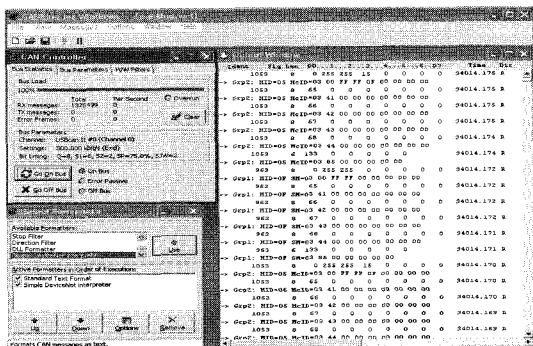
그림 13(a)에서는 CAN 분석기를 이용하여 디바이스넷 마스터와 Elpro 무선 게이트웨이 사이의 폴링/COS 서비스 시간의 실험값은 3.700ms로 측정할 수 있다.

5. 실험값을 이용한 유무선 하이브리드 네트워크의 성능 분석

유무선 하이브리드 네트워크에서 폴링/COS 서비스 시간의 경우 (그림 7 참조), 디바이스넷 마스터에서 전송된 데



(a) Screenshot of the polling/COS service time between DeviceNet master and Elpro wireless gateway.



(b) Screenshot of the estimated message of the wired/wireless hybrid network using Elpro wireless gateway.

그림 13. Elpro 무선 게이트웨이를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크에서 측정된 메시지 측정 결과.

Fig. 13. Screenshot of the estimated message of wired/wireless hybrid network using Elpro wireless gateway.

이터 (명령 메시지 요청)가 무선 게이트웨이 (변환 시간, T_C^{wt})를 거쳐 무선 I/O 슬레이브 (명령 메시지 확인)까지 전달된다. 본 절에서는 그림 14에서 나타난 것처럼 CAN 분석기를 이용하여 디바이스넷 마스터에서 즉각적인 동작이 발생하는 무선 I/O 슬레이브까지의 명령 메시지 요청에서 명령 메시지 확인까지의 중단 간 지연을 고려하여 실험하였다.

그림 15는 각 네트워크의 중단 간 평균 지연을 나타낸 것으로써 블루투스의 피코넷 내에서 지원 가능한 슬레이브를 7개로 구성하여 실험하였다.

표 1은 유무선 하이브리드 네트워크의 디바이스넷 마스터 상에 하나의 슬레이브가 연결된 경우, 폴링/COS 서비스

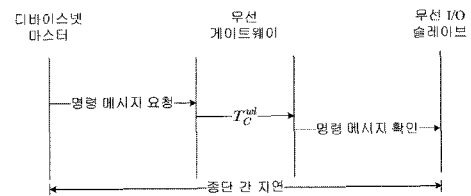


그림 14. 유무선 하이브리드 네트워크의 중단 간 지연.

Fig. 14. End-to-end delay of the wired/wireless hybrid network.

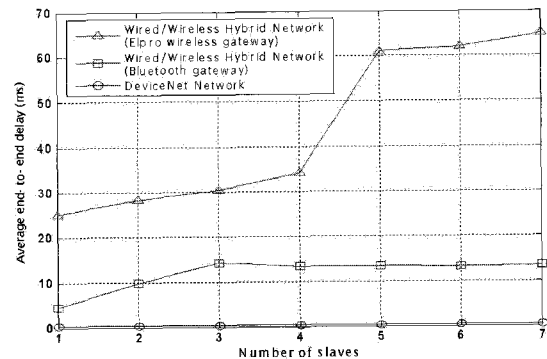


그림 15. 슬레이브 수에 따른 각 네트워크의 중단 간 평균 지연.

Fig. 15. Average end-to-end delay of each network on the number of slaves.

표 1. 유무선 하이브리드 네트워크의 데이터 전송 시간 비교 (단위: ms).

Table 1. Comparison of the data transmission time of the wired/wireless hybrid network(unit: ms).

구분	전송 시간	실험값	
		계산값 폴링/COS 서비스 시간	폴링/COS 서비스 평균 시간 중단 간 평균 지연
디바이스넷 네트워크		0.448	0.235
유무선 하이브리드 네트워크 (블루투스 게이트웨이)		7.146	4.312
유무선 하이브리드 네트워크 (Elpro 무선 게이트웨이)		40.832	25.127

의 수학적 분석값 ((7~9) 참조), 폴링/COS 서비스 평균 시간 및 종단 간 평균 지연에 대한 실험값을 나타낸다.

디바이스넷의 폴링/COS 서비스 시간은 일반적으로 10 ms[14]로 사용되는데, 표 1에서 디바이스넷의 폴링/COS 서비스 시간을 만족하는 것은 블루투스 게이트웨이를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크만 포함된다. 반면에 Elpro 무선 게이트웨이를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크의 폴링/COS 서비스 시간은 평균 데이터 전송 시간이 오래 걸리는 등 일반적인 폴링/COS 서비스 시간을 만족하지 못한다. 이와 같이 슬레이브 개수가 적은 경우에, 블루투스 게이트웨이를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크가 확장형 필드 버스로써 적용 가능하다. 또한 Elpro 무선 게이트웨이는 데이터 전송 속도에 대한 제한을 가지고 있으나 실시간 제약이 작게 요구되는 산업용 환경에 융통성 있게 적용될 수 있다.

6. OPNET Modeler를 이용한 유무선 하이브리드 네트워크의 성능 분석

본 장에서는 OPNET modeler를 통한 모의실험을 통해 CIP 기반의 무선 게이트웨이 성능을 분석해 본다. 그림 16은 슬레이브 수를 증가시켰을 경우에 유무선 네트워크(RF 무선 게이트웨이)의 분석값과 OPNET 모의실험 실험값을

비교한 것이다. 종단 간 평균 지연의 경우 실제 측정값은 슬레이브 노드의 수가 10개 정도에서 평균 지연의 증가 정도가 감소함을 보인다. 시뮬레이션의 결과는 대체로 일정한 증가를 가지는 것을 볼 수 있다. 처리량에 관해서는 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 유사함을 알 수 있다.

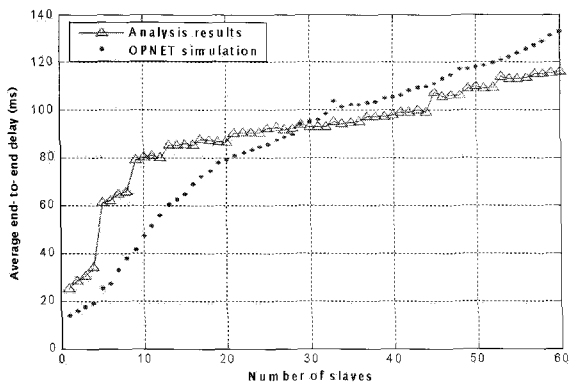
그림 17에서는 피코넷 수를 증가시킬 때 유무선 네트워크(블루투스 게이트웨이)에 대한 실험 결과와 모의실험 결과를 비교한 것이다.

종단 간 평균 지연의 경우 앞서 언급한 Elpro 무선 게이트웨이에서의 실험 결과와는 다르게 슬레이브 노드 개수의 증가에 따른 종단간 평균 지연의 측정치가 시뮬레이션 결과에 비해 다소 크게 나타남을 볼 수 있다.

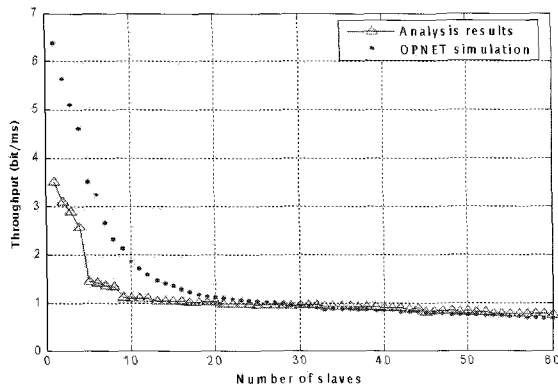
처리량은 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 유사하게 피코넷의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다.

그림 18은 슬레이브의 수를 증가시킬 경우에 유무선 네트워크(블루투스 게이트웨이)에 대한 실험 결과와 모의실험 결과를 비교한 것이다. 모의실험 결과가 실험과 모두 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

상기의 분석들을 통해 블루투스 게이트웨이가 모의실험 값에 가장 근접함을 알 수 있었으며 Elpro 게이트웨이의 경우 일정 슬레이브 수 이상에서는 종단 간의 지연이 증가하



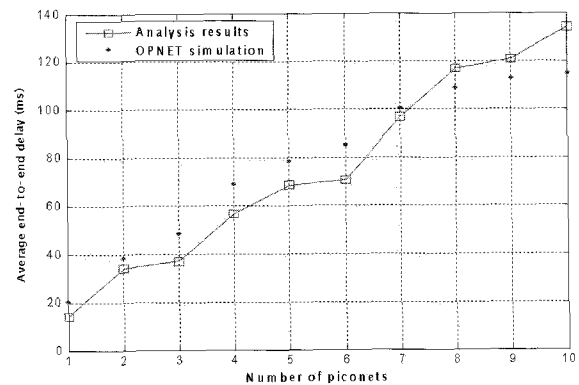
(a) Average end-to-end delay.



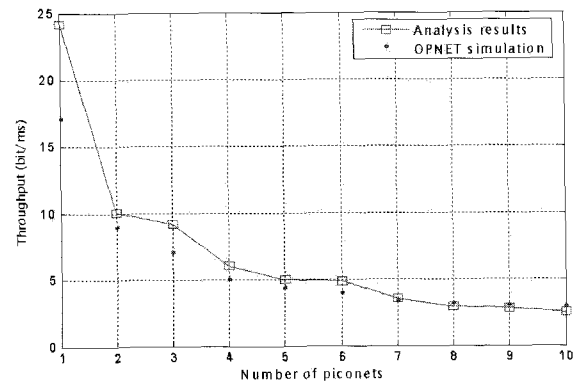
(b) Throughput.

그림 16. 슬레이브 수를 증가시켰을 경우, 유무선 하이브리드 네트워크(Elpro 무선 게이트웨이)의 모의 실험 결과.

Fig. 16. Analysis results and OPNET simulation results of the wired/wireless hybrid network (Elpro wireless gateway).



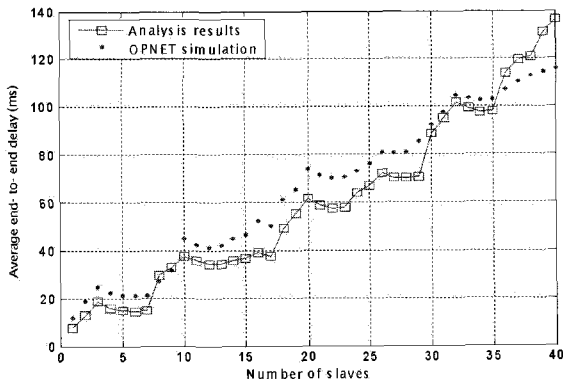
(a) Average end-to-end delay.



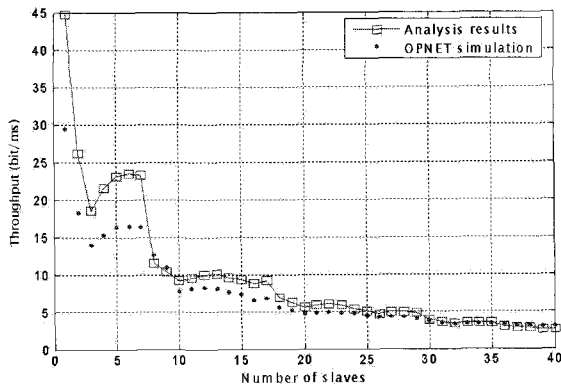
(b) Throughput.

그림 17. 피코넷 수를 증가시켰을 경우, 유무선 하이브리드 네트워크(블루투스 게이트웨이)의 모의 실험 결과.

Fig. 17. Analysis results and OPNET simulation results of the wired/wireless hybrid network (Bluetooth gateway).



(a) Average end-to-end delay.



(b) Throughput.

그림 18. 슬레이브 수를 증가시켰을 경우, 유무선 하이브리드 네트워크(블루투스 게이트웨이)의 모의 실험 결과.

Fig. 18. Analysis results and OPNET simulation results of the wired/wireless hybrid network (Bluetooth gateway).

지 않음을 알 수 있다. 블루투스의 경우는 피코넷 수의 증가로 중단간 지연이 늘어남을 모의실험을 통해 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 CIP 기반의 디바이스넷 마스터와 무선 디바이스들로 구성된 하이브리드 네트워크의 데이터 전송 시간 및 지연에 대한 성능 분석을 하였다.

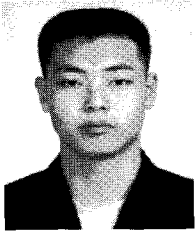
유무선 하이브리드 네트워크의 성능 분석을 하기 위해 테스트-베드를 구성하고, 무선 게이트웨이를 이용해 유무선 하이브리드 네트워크의 폴링/COS 서비스 평균 시간과 중단간 평균 지연 및 처리량을 측정 및 분석 하였다. 또한, 하

이브리드 네트워크에서 슬레이브 노드 수를 증가시켰을 경우, OPNET Modeler를 이용한 모의실험치와 테스트 베드를 통한 실험치를 비교 분석하였다.

향후 연구로는 PER (Packet Error Rate)을 포함하고 주기성 데이터와 알람 메시지와 같은 비주기성 긴급 데이터가 혼재된 실시간 트래픽을 고려한 성능 분석을 진행하고자 한다.

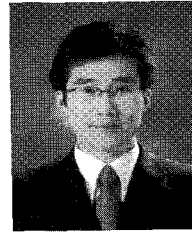
참고문헌

- [1] F. De Pellegrini, D. Miorandi, S. Vitturi, and A. Zanella, "On the use of wireless networks at low level of factory automation systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 2, no. 2, 2006.
- [2] Mario Alves, "Real-time communications over hybrid wired/wireless PROFIBUS-based networks," *Ph.D's thesis, the University of Porto*, 2002.
- [3] Willig, A, "Investigations on MAC and link layer for a wireless PROFIBUS over IEEE 802.11," *Ph.D's thesis, the Technical University Berlin*, 2002.
- [4] D. Miorandi and S. Vitturi, "Hybrid wired/wireless implementations of Profibus DP: a feasibility study based on Ethernet and Bluetooth," *Computer Communications*, vol. 27, Issue. 10, pp. 946-960, 2004.
- [5] HMS Industrial Networks, User Manual: AnyBus-X Bluetooth, Ver. 1.15, Sweden, 2003.
- [6] ELPRO technologies, User Manual: 105U-G Wireless Gateway, Ver. 1.16, Australia, 2004.
- [7] OPNET Technologies, www.opnet.com.
- [8] Open DeviceNet Vendor Association (ODVA), Technical Overview, 2004.
- [9] F.-L. Lian, J. R. Moyne, and D. M. Tilbury "Performance evaluation of control networks for manufacturing systems," *Proceeding of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, 1999.
- [10] Jennifer Bray, Charles F Sturman, *Bluetooth: Connect Without Cables*, 2nd Edition, Prentice-Hall Press, 2002.
- [11] ELPRO technologies, ELPRO E105 Protocol Document, Ver. 1.4, Australia, 2001.
- [12] WAGO Kontakttechnik, <http://www.wago.com>.
- [13] CANKing analyzer, <http://www.kvaser.com>.
- [14] Fieldbus Comparison Chart, <http://www.synergetic.com>.



정 지원

2001년 금오공과대학 전자공학부 졸업.
2007년 동 대학원 재학중. 관심분야는
산업용 통신망 및 무선 제어 시스템.



이 승 기

2001년 금오공과대학 전자공학부 졸업.
2005년 동 대학원 졸업. 현재 포스콘(POSCON)
기술 연구소. 2005년 2월~현재 플랜트사업 전임
연구원. 관심분야는 산업용 통신망 및 무선제어.



김 동 성

1992년 한양대학교 전자공학과 졸업.
2003년 서울 대학교 전기 및 컴퓨터
공학박사. 2003년~2004년 미국 Cornell
Univ. 전기 및 컴퓨터 PostDoc. 2004
년~현재 금오공과대학교 전자공학부
조교수. 관심분야는 실시간 산업용 통

신망 및 임베디드 시스템.