

실시간 산업용 통신을 위한 Switched Ethernet 의 성능 평가

Performance Evaluation of Switched Ethernet for Real-time Industrial Communication

이 경 창, 김 태 준, 이 석
(Kyung Chang Lee, Tae Jun Kim and Suk Lee)

Abstract : The real-time industrial network, often referred to as fieldbus, is an important element for building automated manufacturing systems. Thus, in order to satisfy the real-time requirements of field devices, numerous fieldbus protocols have been announced. But, the application of fieldbus has been limited due to the high cost of hardware and the difficulty in interfacing with multi-vendor products. Therefore, as an alternative to fieldbus, the computer network technology, especially Ethernet (IEEE 802.3), is being adapted to the industrial environment. However, the crucial technical obstacle for Ethernet is its non-deterministic behavior that makes it inadequate for industrial applications where real-time data have to be delivered within a certain time limit. Recently, the development of switched Ethernet shows a very promising prospect for industrial application due to the elimination of uncertainties in the network operation resulting in much improved performance. This paper focuses on the application of the switched Ethernet for industrial communications. More specifically, this paper presents an analytical and experimental performance evaluation of the switched Ethernet, and a case study about networked control system.

Keywords : switched Ethernet, real-time industrial network, TCP/IP, fieldbus, networked control system, real-time requirement, communication delay

I. 서론

최근 들어, 산업용 네트워크는 자동화 시스템을 구성하는 데 있어 필수적인 요소가 되고 있다. 특히, 시스템이 대형화 되고 지능화됨에 따라, 자동화 시스템에서 요구되는 센서나 구동기, 제어기와 같은 필드장치들의 수는 급속히 증가되었다. 그러나, 필드장치의 수가 증가되면 될수록, 필드장치를 일대일로 연결하는 전통적인 점대점(point-to-point) 방식은 시스템의 성능 향상이나, 확장, 유지 보수 등에서 한계를 가지게 되었다. 이러한 문제들은 점대점 연결방식을 공유된 전송 매체를 사용하는 산업용 네트워크로 대체됨으로써 해결될 수 있다. 특히, 산업용 네트워크는 점대점 연결 방식에 비하여 배선의 감소나 유지 보수의 용이, 확장성의 증대 등과 같은 장점을 가지고 있기 때문에, 전통적인 공정 제어 분야 뿐만 아니라, 조립 생산 시스템이나 물류 자동화 시스템 등과 같은 다양한 분야로 확산되어 가는 추세이다[1][2].

일반적으로, 산업용 네트워크에서 교환되는 데이터는 실시간 데이터와 비실시간 데이터로 구분되며, 공유된 전송 매체를 통하여 동시에 전송될 수 있어야 한다. 만약, 이러한 데이터들이 제대로 관리되지 못하면, 즉, 실시간 데이터가 정해진 시간 한계치 내에 전송되어야 한다는 실시간 요구 조건(real-time requirement)이 만족되지 못하면, 시스템의 성능이 저하될 뿐만 아니라, 시스템에 치명적인 오류가 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 1980년대 말부터 자동화 시스템에서 실시간 요구 조건을 만족시킬 수 있는 산업용 네

트워크, 즉, 필드버스가 여러 지역 표준기관들에 의하여 개발되었으며, 1999년 말 Profibus, Fieldbus Foundation, WorldFIP 등과 같은 6개의 프로토콜을 포함하는 IEC 61158 필드버스가 국제 표준으로 제정되었다[3].

그러나, 필드버스는 필드 장치에서 발생하는 데이터들의 실시간 요구 조건을 만족시킬 수 있다는 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 하드웨어 및 소프트웨어가 전통적인 점대점 연결 방식에 비하여 설치가 어려우며, 여러 제조업체들간에 호환성이 부족하다는 문제점을 가지고 있다. 이로 인하여, 필드버스는 아직까지 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 적용되기에는 한계를 가지고 있다[4].

이러한 문제에 대한 대안으로서, 정보 통신 분야에서 널리 사용되고 있는 이더넷(Ethernet)을 산업용 네트워크로 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다[5]. 일반적으로, 이더넷은 매체 접속 제어(Medium Access Control, MAC) 방식으로 경쟁(contention)에 기반한 CSMA/CD(Carrier Sensing Multiple Access/Collision Detection)를 사용하며, 네트워크에 참여하는 스테이션이 전송을 하기 위해서는 다른 스테이션과의 경쟁에서 승리하여야 한다. 만약 네트워크에서 트래픽이 증가하게 되면, 스테이션들간에 경쟁이 빈번하게 발생하고, 전송되는 데이터들간에 충돌이 발생한다. 이러한 충돌로 인하여, 이더넷에서는 전송되는 데이터들이 일정한 전송 지연을 가지지 못하고 랜덤(random)한 전송 지연을 가지는 문제, 즉, 전송 지연에 대한 불확실성 문제가 생긴다. 이에 따라, 이더넷을 아무런 수정없이 바로 산업용 네트워크로 응용하기에는 문제가 있다고 알려져 있다[5]. 이러한 이유로, 지난 십여년 동안 이더넷에서의 충돌을 줄이기 위하여, Park[5], Christensen[6], Vitturi[7] 등에 의하여 다수의 방법들이 연구되어 왔다. 그러나, 이러한 연구의 대다수는 데이터링크계층이나 TCP/IP

논문접수 : 2002. 4. 18., 채택확정 : 2002. 11. 29.

이경창 : 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소(gclee@pnu.edu)

김태준 : 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소(tae_jun@orgio.net)

이 석 : 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소(slee@pnu.edu)

계층을 직접적으로 수정해야 한다는 문제점을 가지고 있기 때문에, 실제 응용에서는 많은 한계를 가지고 있다.

최근에는 이더넷에서의 전송 지연에 대한 불확실성을 해결하기 위한 방법의 하나로써, ATM(asynchronous Transfer Mode)에서 사용되고 있는 스위칭 기술을 이더넷에 도입한 스위치드 이더넷에 대한 관심이 제기되고 있다. 스위칭 기술은 주로 사무실 네트워크(office network)를 위하여 개발 및 적용되어 왔으나, 스위칭 기술이 보편화되고 스위치의 가격이 하락해 감에 따라, 스위치를 산업용 네트워크에 적용하려는 시도가 증가되고 있는 추세이다. 대표적인 연구로서, Ye[8]은 스위치드 이더넷을 이용한 DAS(Data Acquisition System) 구축 사례에 관하여 연구를 수행하였으며, Choi[9]는 스위치드 이더넷에서 주기적 실시간 데이터의 처리를 가능하게 하는 probability-based admission control algorithm에 대하여 연구를 수행하였다. 또한, Vonnahme[10]은 토폴로지 구조에 따른 스위치의 성능에 대하여 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 스위치드 이더넷이 산업용 네트워크에서 요구하는 실시간 요구 조건을 만족시킬 수 있는 가를 검증하기 위하여, 스위치드 이더넷에 대한 이론적 분석과 실험적 성능 평가를 수행한다. 이를 위하여, 본 논문에서는 스위치드 이더넷에 대한 타이밍 분석(timing analysis)을 수행하여, 스위치드 이더넷이 이론적으로 가질 수 있는 최대 전송 지연을 계산한다. 또한, 스위치드 이더넷의 실험 모델을 구축하고 그 성능을 측정함으로써, 실험 모델의 성능이 타이밍 분석을 통하여 계산된 이론적 분석 결과와 유사한 특성을 보임을 검증한다. 마지막으로, 본 논문에서는 스위치드 이더넷을 이용한 네트워크 기반 제어 시스템(Networked Control System, NCS)[11][12]을 구축하고 그 제어 성능을 평가함으로써, 스

치드 이더넷의 산업 적용 가능성을 검증한다.

본 논문은 서론을 포함하여 6장으로 구성되어 있다. II 장에서는 스위치드 이더넷에 대하여 간략하게 설명한다. III 장에서는 스위치드 이더넷의 이론적인 최대 전송 지연에 대하여 제시하고, IV 장에서는 스위치드 이더넷의 실험 모델에서의 전송 지연을 평가한다. V 장에서는 서보 모터를 이용한 네트워크 기반 제어 시스템을 구축하고, 플랜트의 제어 성능을 평가한다. 마지막으로 VI 장에는 결론을 제시한다.

II. 이더넷과 스위치드 이더넷

이더넷으로 알려진 IEEE 802.3[13]은 1970년대 컴퓨터들간의 데이터 통신을 위하여 개발되었으며, 현재 정보 통신 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 인터넷의 물리 계층과 데이터링크 계층을 이루고 있다. IEEE 802.3 표준에는 10Base-T, 100Base-T 등이 있으며, 최근에는 1Gbps급 이더넷에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있는 중이다. 여기에서, 10Base-T의 경우 전송속도가 10Mbps, 전송 매체로는 UTP(Unshield Twisted Pair)가 사용되며, 100Base-T의 경우 전송속도가 100Mbps, 전송 매체로는 UTP나 STP(Shield Twisted Pair)가 사용된다.

그림 1은 IEEE 802.3에서 MAC 방식으로 사용되고 있는 CSMA/CD의 통신 절차를 나타내고 있다. 먼저, 전송할 데이터를 가지고 있는 근원지 스테이션(source station)은 전송 매체가 사용 중인지 검사한다. 만약 전송 매체가 사용 중인 경우, 근원지는 송신을 보류하고 전송 매체의 사용이 끝날 때까지 기다린다. 전송 매체가 사용 중이지 않는 경우, 근원지 스테이션은 목적지 스테이션(destination station)으로 오버헤드(overhead)를 포함한 프레임 전송한다. 만약 송신 도중에 충돌이 감지되는 경우, 근원지는 전송을 중단하고, 충돌 존재 신호(jam signal)를 전송하여 다른 스테이션들에게 충돌이 발생하였음을 알린다. 그리고 나서, 근원지 스테이션은 재전송 대기시간 결정 알고리즘(truncated binary exponential backoff algorithm, BEB 알고리즘)에 의하여 계산된 백오프 시간(backoff time)동안 기다린 후, 재전송 시도를 한다. 이러한 재전송 시도는 16 회동안 이루어지며, 재전송 시도 횟수(trial number)가 16 회를 초과하는 경우 해당 프레임의 전송을 포기한다. 이더넷에서는 이러한 CSMA/CD의 통신 절차로 인하여, 트래픽이 높아지게 되면 충돌이 자주 발생하게 되며, 충돌 횟수만큼의 백오프 시간동안 기다림으로써 전송 지연이 증가하게 된다. 또한, 충돌이 16회 이상 발생하게 되는 경우, 전송이 취소되어 버리기도 한다.

스위치드 이더넷에서는 이러한 충돌 문제를 해결하기 위한 방법으로서 스위칭 기술을 이용한다. 일반적으로, 이더넷은 네트워크에 접속된 모든 스테이션들이 전송 매체를 공유하고, 하나의 회선만을 이용하여 송수신이 이루어지는 반이중(half duplex)방식을 사용하기 때문에, 그림 2a에서 보는 바와 같이 근원지 스테이션(source station)이 프레임을 전송하면, 그 프레임이 모든 스테이션으로 전송된다. 이 때, 목적지 스테이션은 프레임을 수신하지만, 다른 스테이션들은 수신된 프레임을 무시한다. 여기에서, 프레임이 수신되기 전에 다른 스테이션이 송신을 하게 되면 두 프레임간에 충돌이 발생한

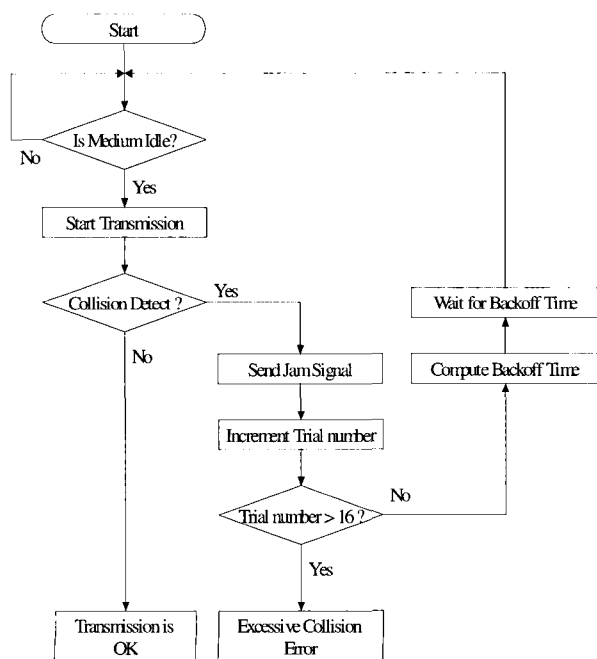


그림 1. CSMA/CD의 전송 절차.
Fig. 1. Transmission procedure of CSMA/CD.

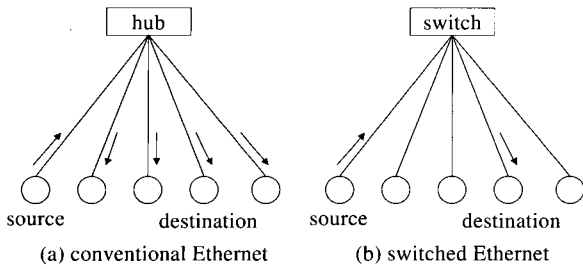


그림 2. 이더넷과 스위치드 이더넷의 전송 방식 비교.
 Fig. 2. Comparison of transmission methods of Ethernet and switched Ethernet.

다. 그러나, 스위치드 이더넷에서는 스위치에 의하여 통신하려는 두 스테이션간에 전용의 가상 회선(dedicated virtual circuit)이 설정됨으로써, 다른 스테이션들간의 충돌이 방지된다. 즉, 그림 2.b 에서 보는 바와 같이 근원지 스테이션이 프레임 전송하면, 스위치가 해당되는 목적지 스테이션(destination station)으로만 프레임을 전송하기 때문에, 여러 개의 스테이션이 동시에 전송을 하는 경우에도 충돌이 발생하지 않는다. 또한, 스위치드 이더넷에서는 송신과 수신을 각각의 회선으로 수행하는 전이중(full duplex)방식을 사용하기 때문에, 목적지에서 근원지로부터 송신된 프레임이 수신되기 전에 목적지가 송신을 하더라도 충돌이 발생하지 않는다.

스위칭 기술의 대표적인 방식으로는 그림 3 과 같은 축적 및 전송(store & forward) 방식[9]이 주로 사용된다. 그림에서, 스위치는 근원지 스테이션의 송신 회선으로부터 프레임을 수신하면, 해당 목적지 스테이션의 수신 회선이 사용 중인지를 검사한다. 만약, 수신 회선이 사용 중이지 않으면 바로 전송을 하지만, 수신 회선이 사용 중이면 스위치의 버퍼에 저장한 후 수신 회선의 사용이 끝날 때까지 기다린다. 만약 스위치에 동일한 목적지 스테이션을 가진 다수의 프레임이 수신되면, 스위치의 송수신 버퍼에 저장된 후 수신된 순서대로 목적지 스테이션으로 전송된다.

III. 스위치드 이더넷에서의 최대 전송 지연

1. 이더넷에서의 최대 전송 지연

이더넷에 대한 성능 분석은 1970 년대부터 다수의 연구자들에 의하여 이루어져 오고 있다. 그러나, CSMA/CD 에서 사용되는 BEB 알고리즘의 확률적 특성으로 인하여, 아직까지 전송 지연에 대한 정확한 해석은 이루어지지 못하고 있는 실정이다[14]-[16].

본 논문에서는 이러한 분석 방법의 하나로서, 데이터링크 계층에 대한 타이밍 분석을 수행하여 CSMA/CD 에 대한 이론적인 최대 전송 지연을 분석하였다.

그림 4 는 이더넷에서 근원지 및 목적지 스테이션간의 통신 절차를 도시한 타이밍 선도(timing diagram)이다. 그림에서, 하나의 프레임이 근원지에서 목적지로 충돌없이 전송되는 경우의 전송 지연(end-to-end communication delay without collision, D_{EDE})은 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{EDE} = D_{PS} + D_T + 2D_{PROP} + D_{PR} \quad (1)$$

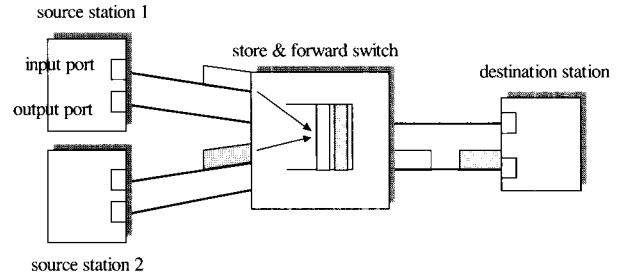


그림 3. 축적 및 전송 방식의 개략도.
 Fig. 3. Schematic diagram of store & forward switching methods.

식에서, D_{PS} 는 근원지의 응용 계층(Application layer, APP)에서 메시지가 생성되어 물리 계층(Physical layer, PHY)에 저장되기까지 소요된 처리 지연(processing delay)이며, D_{PR} 는 목적지의 물리 계층에서 응용 계층까지 전달되는 데 소요된 처리 지연이다. D_T 는 프레임의 전송에 소요되는 프레임 전송 지연(frame transmission delay)으로서, 송신 프레임 길이에 비트 타임을 곱한 값으로 정의된다[14]. D_{PROP} 는 근원지의 물리 계층에서부터 허브(Hub, H)까지, 허브에서 목적지의 물리 계층까지 전파되는 데 소요되는 전파 지연(propagation delay)으로서, 전송 속도와 전송 매체의 길이에 의하여 계산된다. 예로, 전송 속도가 10Mbps 인 경우, 전송 매체의 길이가 20m 라면 전파 지연은 1 비트 타임으로 계산된다[14].

일반적으로, D_{EDE} 는 송수신 스테이션의 성능에 의하여 결정된다. 예로, 두 대의 스테이션(Pentium 500MHz, Windows 2000)만이 접속된 10Base-T 이더넷 네트워크에서 144 비트(이더넷에서의 최소 전송 길이)의 데이터를 교환시킨 경우, D_{EDE} 는 약 0.2msec 로 측정되었으며, 본 논문에서는 이론적인 최대 전송 지연의 계산에 이 값을 이용하였다.

충돌이 발생하는 경우, 근원지로부터 목적지까지의 전송 지연(end-to-end communication delay, D_E)은 D_{EDE} 에 충돌에 의하여 발생하는 충돌 지연(collision delay, D_C)이 포함되어 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_E = D_{EDE} + D_C \quad (2)$$

여기에서, 충돌이 발생하면, 근원지는 충돌을 감지하고 충돌 존재 신호를 전송한다. 그리고 나서, BEB 알고리즘에 의하여 계산된 백오프 시간동안 기다린 후 재전송을 하게 된다. 이러한 절차에 따라, D_C 는 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$D_C = \sum_{k=1}^{N_c} (D_{DET} + D_{JAM} + D_{BOR}) \quad (3)$$

where $N_c \leq 16$

식에서, N_c 는 충돌 횟수(number of collision)이며, 10Base-T 이더넷 표준에서 16 회의 재전송 시도 이후에도 전송되지 못하면 프레임이 폐기되기 때문에, 최대 충돌 횟수는 16 회로 정의되어 있다. D_{DET} 는 충돌을 감지하는데 필요한 충돌 감지 시간(collision detection time)으로서, 최대 충돌 감지 시간은 가장 멀리 떨어진 근원지와 목적지간 전파 지연의 두 배로 정의된다[14]. D_{JAM} 은 충돌 존재 신호를 전송하는 데 소요되는

램 전송 시간(jam transmission time)으로서, 10Base-T 이더넷 표준에서 32 비트 타임으로 정의되어 있다. 마지막으로, D_{BOK} 는 BEB 알고리즘에 의하여 계산된 백오프 시간으로서 (4)와 같이 계산될 수 있다.

$$D_{BOK} = (\text{uniform}[1, 2^{\min(\text{trial number}, 10)}] - 1) t_s \quad (4)$$

식에서, $\text{uniform}[a, b]$ 는 a와 b사이에서 정수 값을 선택하는 균일 분포(uniform distribution) 함수이며, $\min(c, d)$ 는 c와 d 중에서 작은 값을 선택하는 함수이다. 또한, t_s 는 슬롯 타임(slot time)으로서, 10Base-T 이더넷 표준에서 512 비트 타임으로 정의되어 있다.

이더넷에서의 최대 전송 지연은 다음과 같은 3 가지 상황에서 발생한다. 즉, 최대 전송 지연은 1) 전송 프레임이 16 회의 충돌이 발생한 후에 전송되고($N_c=16$), 2) 백오프 시간이 최대값인 $2^{\min(\text{trial number}, 10)}$ 을 가지고, 3) D_{DEF} 가 최대 값인 근원지와 목적지간 전파지연의 2 배인 경우에 발생한다. 이러한 경우, 이론적인 최대 충돌 지연은 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} D_c &= \sum_{k=1}^{16} (D_{DEF} + D_{JAM} + D_{BOKmax}) \\ &= 16(4D_{PROP} + D_{JAM}) + \sum_{k=1}^{16} 2^{\min(k, 10)} t_s \quad (5) \\ &= (16(20+32) + (\sum_{k=1}^9 (2^k - 1) \\ &\quad + \sum_{k=10}^{16} (2^{10} - 1))) \times 512 t_b \\ &= 4,185,920 t_b \approx 418.6 \text{msec} \end{aligned}$$

식에서, t_b 는 비트 타임으로서, 이론적인 비트 타임은 전송 속도의 역수로서 계산되며, 전송 속도가 10Mbps 인 경우 $0.1 \mu\text{sec}$ 이다. 그리고, 허브로부터 스테이션간의 길이를 10Base-T 이더넷 표준에서 최대값으로 정의되어 있는 100m 로 선정한다면, D_{PROP} 는 5 비트 타임이다.

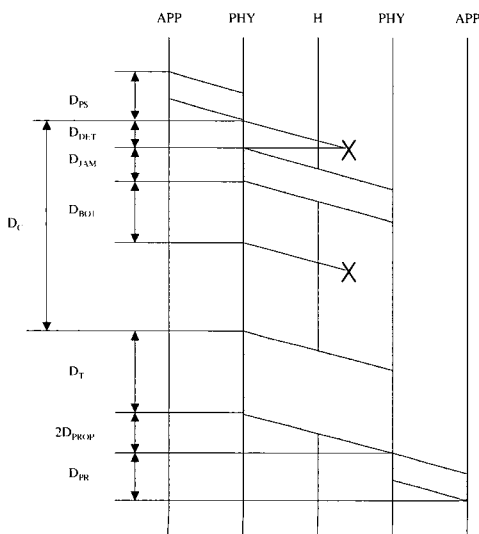


그림 4. 이더넷의 타이밍 선도.
Fig. 4. Timing diagram of Ethernet.

이상의 분석으로부터 이더넷에서 발생하는 이론적인 최대 전송 지연은 약 418.6msec 임을 알 수 있다. 이러한 결과는 이더넷의 경우 트래픽이 높아지게 되면 충돌이 빈번하게 발생하고 전송 지연이 급격하게 증가하기 때문에, 이더넷은 산업용 네트워크로 적합하지 않다는 것을 보여준다.

2. 스위치드 이더넷에서의 최대 전송 지연

스위치드 이더넷이 산업용 네트워크에서 요구하는 실시간 요구조건을 만족하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 필요 조건이 충족되어야 한다.

첫째, 네트워크에서 트래픽이 변하지 않는다면, (6)에 나타난 바와 같이 스위치의 단위 시간당 처리 가능한 프레임의 수가 전체 스테이션의 단위 시간당 프레임 발생 개수보다 커야 한다.

$$Capa_s \geq \sum_{i=0}^n Msg_i \quad (6)$$

식에서, $Capa_s$ 는 스위치의 단위 시간당 처리 가능한 프레임의 수이며, Msg_i 는 i 번째 스테이션에서 발생하는 단위 시간당 프레임 발생 개수이다. 또한, n은 네트워크에 접속된 스테이션의 숫자이다.

만약 스위치의 프레임 처리 개수보다 많은 프레임이 생성되는 경우, 스위치로 수신된 프레임은 모두 목적지 스테이션으로 전송되지 못하고, 버퍼에 저장될 것이다. 이러한 프레임의 저장은 네트워크 시스템을 불안정하게 만들고, 전송 지연을 급속히 증가시킨다. 따라서, 스위치의 처리 가능한 프레임의 수는 네트워크에서 생성되는 모든 프레임을 처리할 수 있을 정도로 처리 능력이 충분히 커야 하며, 버퍼도 충분히 커야 한다. 또한, 이러한 조건을 확장하면, 네트워크에서 주기적 데이터만 생성된다면, 하나의 발생 주기에서 생성된 프레임은 다음 발생 주기가 되기 전까지 모두 전송되어야 한다는 점을 알 수 있다.

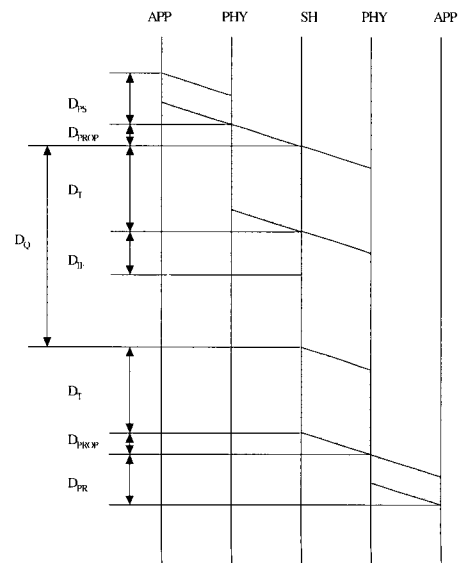


그림 5. 스위치드 이더넷의 타이밍 선도.
Fig. 5. Timing diagram of switched Ethernet.

둘째, (7)에 나타난 바와 같이 전체 네트워크에서 하나의 목적지로 전송되는 단위 시간당 프레임 발생량은 목적지 수신 회선의 전송 용량보다 작아야 한다.

$$Capa_R(j) \geq \sum_{i=0}^n Msg_i(j) \quad \text{for all } j \quad (7)$$

식에서, $Capa_R(j)$ 는 j 번째 스테이션의 수신 회선의 전송 용량으로서 네트워크의 전송 속도와 같다. 또한, $Msg_i(j)$ 는 i 번째 스테이션에서 j 번째 스테이션으로 전송되는 단위 시간당 프레임 발생량이다.

만약 목적지 수신 회선의 전송 용량보다 많은 프레임이 생성되는 경우, 수신 회선의 전송 용량을 초과하는 프레임들은 목적지로 전송되지 못하고 스위치의 버퍼에 저장됨으로써, 전송 지연이 증가하게 될 것이다. 따라서, 네트워크에서 동일한 목적지를 가지는 트래픽이 네트워크의 전송 속도를 초과하지 않도록 스테이션의 수나 발생 주기, 프레임 길이 등이 조절되어야 한다.

스위치드 이더넷에서 이러한 필요 조건이 만족된다면, 스위치드 이더넷의 이론적인 최대 전송 지연은 그림 5의 타이밍 선도를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다. 그림에서, 하나의 프레임이 스위치(Switch Hub, SH)에 저장되지 않고 근원지에서 목적지로 바로 전송되는 경우의 전송 지연(end-to-end communication delay without queuing, D_{EDS})은 이더넷에서의 D_{EDE} 와 동일하다. 여기에서, 스위치에서 저장이 발생하는 경우, 전송 지연(D_E)은 D_{EDS} 에 버퍼에서의 대기한 저장 지연(queuing delay, D_Q)을 포함하여 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_E = D_{EDS} + D_Q \quad (8)$$

여기에서, 특정한 시점에 N_q 개의 프레임이 스위치에 저장되어 있다면, D_Q 는 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D_Q &= \sum_{k=1}^{N_q} (D_{IF} + D_{TK}) \\ &= \sum_{k=1}^{N_q} (96 + \max(L_k + L_n, 576))t_b \end{aligned} \quad (9)$$

식에서, D_{IF} 는 하나의 프레임을 전송하고 나서 다음 프레임을 보내기까지 기다려야 하는 인터프레임 시간(interframe delay)으로, 10Base-T 이더넷 표준에서 96 비트 타임으로 정의되어 있다. 또한, L_k 는 k 번째 생성된 데이터의 크기이며, L_n 는 전송 프레임의 오버헤드로서 10Base-T 이더넷 표준에서 UDP 통신일 경우 432 비트로 정의되어 있다. 여기에서, D_{TK} 는 k 번째 메시지의 길이로서 $L_k + L_n$ 와 576 비트 중 최대값으로 선정된다.

스위치드 이더넷에서의 이론적인 최대 전송 지연은 네트워크에서의 트래픽과 스위치의 버퍼 용량에 따라 결정되는 N_q 최대일 때 발생한다. 만약 네트워크에서 트래픽이 변하지 않고, 주기적 프레임만 생성된다고 가정하는 경우, N_q 의 최대값은 다음과 같이 추정될 수 있다.

먼저, 첫번째 필요 조건이 만족되기 위해서는, 스위치의 단위 시간당 처리 가능한 프레임 수가 충분히 커야 한다. 일반적으로 산업용 네트워크에서 생성되는 실시간 데이터는 수 바이트에서 수십 바이트의 크기와 수백 μsec 에서 수 msec 의 발생 주기를 가진다[17]. 이러한 사실로부터, 모든 스테이션에서 18 바이트 길이의 메시지가 1msec 주기로 생성된다고 가정한다면, 각 스테이션은 초당 1,000 프레임을 다른 스테이션들로 전송할 것이다. 여기에서, (6)에 의하면 스위치의 처리 능력은 초당 1,000 프레임에 네트워크에 참여한 스테이션의 수를 곱한 값보다 크다면 첫번째 필요 조건을 만족한다. 예로, 본 논문에서 사용된 3COM 사의 Super-Stack II Switch 1100 모델은 초당 1,330,000 프레임을 처리할 수 있으므로[18], 네트워크에 1,330 개 이하의 스테이션이 접속된다 하더라도 충분히 처리가 가능함을 알 수 있다. 따라서, 스위치의 단위 시간당 처리 능력이 충분히 크기 때문에, 하나의 목적지를 가지는 프레임들이 동시에 생성되어 스위치에 저장될 때 N_q 는 최대가 된다.

그리고 나서, 두 번째 필요 조건이 만족되기 위해서는, (7)에 의하여 하나의 목적지로만 전송하는 스테이션의 프레임 발생량이 목적지 수신 회선의 전송 속도보다 작아야 한다. 예로, 18 바이트 길이의 메시지가 1msec 주기로 생성된다고 가정하는 경우, 15 대의 스테이션이 하나의 스테이션으로 전송을 하게 되면 프레임 발생량이 초당 10.08Mbit 가 되어 목적지 수신 회선의 전송 속도인 10Mbps 를 초과한다. 따라서, 하나의 목적지로 동시에 전송할 수 있는 스테이션의 최대 숫자는 14 대이다. 여기에서, 스위치에 수신된 14 개의 프레임 중 1 개의 프레임은 바로 전송되고 나머지 13 개의 프레임만이 스위치의 버퍼에 저장되기 때문에, N_q 의 최대값은 13이다.

이상과 같은 조건을 고려하여 D_Q 를 계산하면 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} D_Q &= N_q(96 + \max(L_k + 432, 576))t_b \\ &= 13 \times 672 \times t_b = 873.6 \mu \text{ sec} \end{aligned} \quad (10)$$

이상과 같은 분석으로부터, D_{EDS} 를 고려한 전송 지연은 약 1.07msec 로 매우 작은 전송 지연을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 이론적으로 스위치드 이더넷에서 충돌이 발생하지 않기 때문이며, 스위치드 이더넷이 산업용 네트워크에서 요구하는 실시간 요구 조건을 충분히 만족시킬 수 있다는 것을 보여준다.

IV. 스위치드 이더넷의 실험적 성능 평가

본 절에서는 스위치드 이더넷의 성능을 실험적으로 평가하기 위하여, 그림 6 과 같이 실험 모델을 구성하고, 그 성능 평가를 수행하였다. 실험 모델에는 1 대의 마스터 스테이션과 10 대의 슬레이브 스테이션이 스위치에 연결되어 있다. 여기에서, 이더넷의 경우 통신을 위한 마스터와 슬레이브의 구분은 없으며, 제어 기능이나 자동화 기능을 수행하는 점에서만 구분될 뿐이다. 즉, 마스터는 슬레이브로부터 프레임을 수신

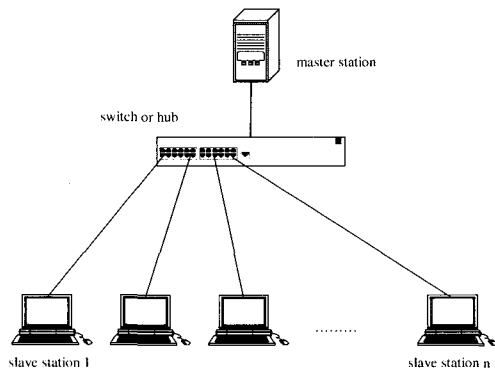


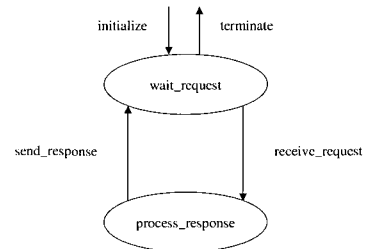
그림 6. 이더넷과 스위치드 이더넷의 실험 모델.
Fig. 6. Experimental model of Ethernet and switched Ethernet.

하면, 이에 대한 응답 프레임을 슬레이브로 송신하는 기능을 수행한다. 이러한 설정은 자동화 시스템에서 제어기가 구동기와 같은 필드장치로부터 출력 신호를 수신하고, 이의 제어를 위하여 제어 신호를 구동기로 전송하는 전형적인 네트워크 기반 제어 시스템의 구조와 동일하다고 볼 수 있다. 또한, 네트워크의 전송 속도는 자동화 시스템에서 잡음 등을 고려하여 전송 속도로 적합하다고 알려진 10Mbps로 선정하였으며[4], 데이터의 크기는 자동화 시스템에서 주로 교환되는 디지털 입출력이나 아날로그 입출력과 같은 데이터를 표현하는데 충분한 18 바이트로 선정하였다. 허브로는 삼성의 SmartEther SH2024S 모델을 사용하였으며, 스위치는 3COM의 SuperStack II Switch 1100 모델을 사용하였다.

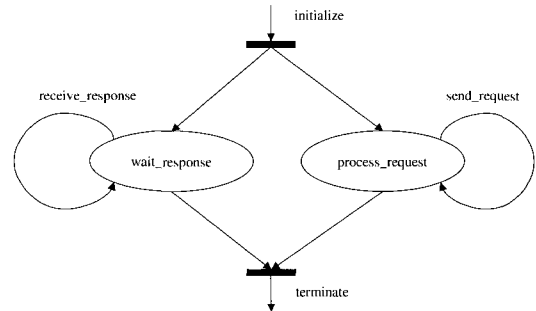
그림 7은 마스터와 슬레이브 스테이션에서의 통신을 위한 상태도를 나타내고 있다. 마스터 스테이션은 그림 7.a에서 보는 바와 같이 초기화('initialize' 사건) 후에, 슬레이브 스테이션으로부터 요청 프레임(request frame)을 수신하기 위하여, 'wait_request' 상태로 들어간다. 여기에서, 슬레이브로부터 요청 프레임을 수신하게 되면('receive_request' 사건), 'process_response' 상태로 진입하고, 해당되는 처리 과정을 거친 후 응답 프레임(response frame)을 해당 슬레이브로 전송('send_response' 사건)하고, 'wait_request' 상태로 재진입하게 된다. 마지막으로, 'wait_request' 상태에서 미리 정의되어 있는 종료 조건이 만족되면, 통신을 종료한다('terminate' 사건).

슬레이브 스테이션은 그림 7.b에서 보는 바와 같이 초기화('initialize' 사건) 후에, 마스터로 요청 프레임을 전송하기 위하여 'process_request' 상태에 들어갈 뿐만 아니라, 동시에 마스터로부터 응답 프레임을 수신하기 위하여 'wait_response' 상태로 들어간다. 'process_request' 상태에서는 미리 정의되어 있는 데이터의 스케줄링 방식에 따라 데이터가 생성되면 마스터로 전송('send_request' 사건)하고 나서, 데이터의 생성을 다시 기다린다. 'wait_response' 상태에서는 마스터로부터 응답 프레임을 수신하면('receive_response' 사건), 해당되는 처리 과정을 수행하고 나서 응답 프레임의 수신을 다시 기다린다. 마지막으로, 두 상태에서 미리 정의되어 있는 종료 조건이 만족되면, 통신을 종료한다('terminate' 사건).

본 실험에서는 그림 7과 같은 마스터와 슬레이브의 통신



(a) state diagram of master station

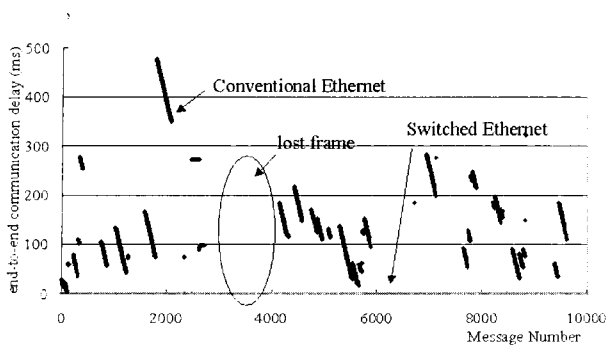


(b) state diagram of slave station

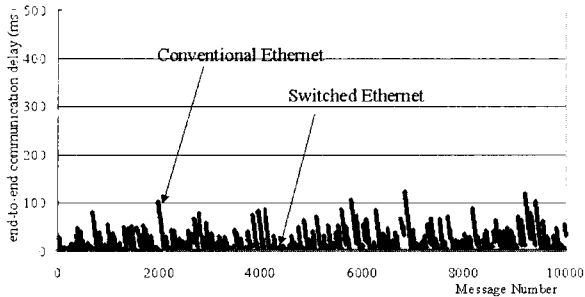
그림 7. 마스터 및 슬레이브 스테이션의 상태도.
Fig. 7. State diagram of master and slave station.

상태도를 Windows 2000 환경에서 윈 소켓 함수를 이용하여 응용 프로그램으로 구현하였다[19]. 또한, 슬레이브 스테이션의 수는 10대, 데이터의 발생 주기는 1msec(57.6% 트래픽), 2msec(28.8% 트래픽), 3msec(19.2% 트래픽)로 변화시켜 가면서, 슬레이브에서 마스터로 전송되는 10,000개의 데이터에 대하여 전송 지연(end-to-end communication delay)을 측정하였다. 여기에서, 트래픽은 '(프레임 길이×스테이션 수)/(네트워크 전송 속도×데이터 발생 주기)×100'으로 계산되었다. 예로, 데이터 발생 주기가 1msec인 경우, 오버헤드를 포함한 프레임 계산된다. 또한, 전송 지연은 슬레이브의 응용계층에서 데이터가 생성되고 나서부터, 마스터의 응용계층에서 수신된 시간까지로 정의하였다. 즉, 주기적으로 슬레이브는 마스터의 전역 시임 길이는 메시지 크기는 576비트, 스테이션 수는 10대, 네트워크 전송 속도는 10Mbps이므로, 트래픽은 57.6%로 간(global time)에 의하여 전역 동기화가 이루어진 상태에서, 슬레이브는 데이터가 발생되면 발생된 전역 시간을 데이터에 기록하여 마스터로 전송하면, 마스터는 해당 시간과 데이터가 수신된 시간간의 차이를 계산함으로써 전송 지연을 측정하게 된다.

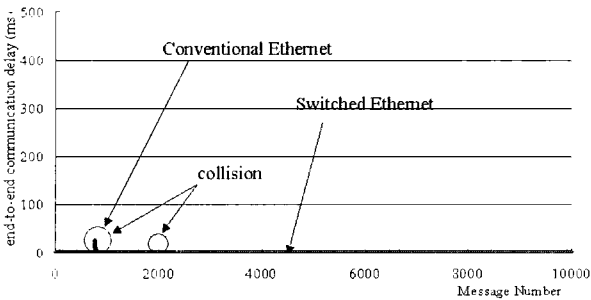
그림 8은 하나의 슬레이브에서 트래픽에 따른 10,000개 데이터의 전송 지연을 나타내고 있다. 그림 8.a의 높은 트래픽(57.6%) 조건에서, 전통적인 이더넷의 최대 전송 지연은 거의 500msec에 도달함을 확인할 수 있었다. 또한, 상당히 많은 프레임들이 전송되지 못하고 전송이 취소되어 버리는 경우(lost frame)가 발생함을 확인하였다. 이러한 이유는 이론적 해석에서 분석된 바와 같이, 이더넷에서 트래픽이 높아지면, 스테이션들간의 충돌이 증가하여 전송 지연이 급격하게 증가되고, 충돌 횟수가 16회를 넘게 되어 프레임들의 전송이



(a) in case of 57.6% traffic
(10 stations with 1msec period of generation)



(b) in case of 28.8% traffic
(10 stations with 2msec period of generation)

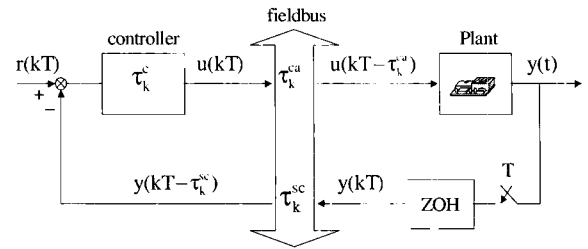


(c) in case of 19.2% traffic
(10 stations with 3msec period of generation)

그림 8. 전통적인 이더넷과 스위치드 이더넷의 전송지연 비교.
Fig. 8. Comparison on communication delay of Conventional Ethernet and Switched Ethernet.

취소되어 버리기 때문이다. 특히, 이더넷에서의 전송 지연이 이론적인 최대 전송 지연인 418msec 보다 큰 이유는 전송 지연을 측정하는 데 있어서의 측정 오차와, 이론적 분석에서는 무시되었으나 충돌 검출이나 재전송 절차 등에 필요한 하드웨어 작동 시간이 원인인 것으로 평가된다.

또한, 그림 8.b의 중간 정도의 트래픽(28.8%) 조건에서, 전통적인 이더넷의 최대 전송 지연은 100msec 이하로 비교적 낮게 나타났지만, 메시지의 충돌 때문에 전송 지연이 일정하지 못하고 랜덤하게 나타났다. 뿐만 아니라, 그림 8.c의 낮은 트래픽(19.2%) 조건에서, 전송 지연은 매우 낮은 편이지만, 충돌의 영향에 의하여 순간적으로 전송 지연이 증가하는 현상이 나타났다. 이러한 특성들은 제어 시스템의 제어 성능과 안정성을 악화시키는 주요한 요인이기 때문에, 낮은 트래픽 조건에서도 이더넷을 산업용 네트워크로 사용하기에는 문제가 있음을 보여준다. 이와는 대조적으로, 스위치드 이더넷에



- τ_k^c : computational delay
- τ_k^{ca} : controller-to-actuator delay
- τ_k^{sc} : sensor-to-controller delay
- $r(k)$: reference input
- $u(kT)$: control input samples
- $y(t)$: plant output
- $y(kT)$: plant output samples
- $u(kT - \tau_k^{ca})$: control input samples with τ_k^{ca}
- $y(kT - \tau_k^{sc})$: plant output samples with τ_k^{sc}
- ZOH : Zero Order Hold

그림 9. 네트워크 제어 시스템의 구조.
Fig. 9. Structure of networked control system.

서는 트래픽이 50% 이상으로 높더라도, 전송 지연이 거의 1msec 이하로 매우 낮게 나타났으며, 처리율은 100%를 유지하고 있음을 확인하였다.

이러한 결과로부터, 이론적 성능 평가에서 분석된 바와 같이 스위치드 이더넷의 전송 지연은 매우 낮고, 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 따라서, 이론적인 분석과 실험적인 분석 결과로부터, 스위치드 이더넷은 산업용 네트워크로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

V. 네트워크 기반 제어 시스템에서의 적용 예

본 절에서는 산업용 네트워크로서의 스위치드 이더넷의 우수성을 확인하기 위하여, 스위치드 이더넷을 이용한 NCS 테스트베드를 구성하고, 제어 시스템의 제어 성능을 평가하였다.

그림 9는 NCS의 기본 구조를 나타낸다[11]. 그림에서 보듯이, NCS는 제어기와 센서, 구동기의 3가지 요소로 구성되어 있다. 이러한 요소들은 공유된 전송 매체에 의하여 연결되어 있으며, 플랜트 출력(plant output, $y(t)$)이나 제어 입력(control input, $u(kT)$)과 같은 제어 정보들은 필드버스를 통하여 교환된다. 이러한 구성으로 인하여, 자동화 시스템 내에 분산되어 있는 구동기를 제어실에서 일괄적으로 통제할 수 있기 때문에 운영자의 편의성이 향상될 수 있으며, 위험한 공장 환경으로부터 운영자와 제어기를 분리시킬 수 있기 때문에 운영자를 위험으로부터 보호할 수 있다. 그러나, NCS에서는 제어 정보들이 네트워크를 통하여 교환되기 때문에, 제어 정보는 네트워크에 의한 전송 지연, 즉, 네트워크 지연에 의하여 영향을 받는다. 여기에서, 네트워크 지연은 센서에서 제어기로의 전송 지연(sensor-to-controller delay, τ_k^{sc})과 제어기에서의 계산 지연(computational delay, τ_k^c), 제어기에서 구동기로

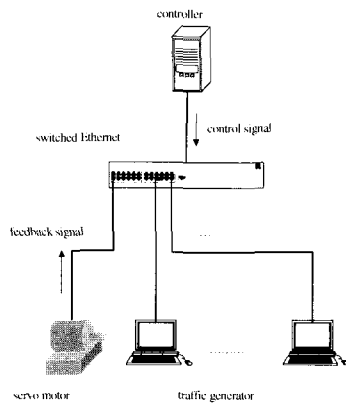


그림 10. 스위치드 이더넷을 이용한 NCS의 실험 모델.
Fig. 10. Testbed of NCS via switched Ethernet.

의 전송 지연(controller-to-actuator delay, τ_k^{ca})으로 나눌 수 있다. 일반적으로, 계산 지연은 제어기의 성능에 따라 결정되지만, 전송 지연은 프로토콜의 특성이나 네트워크에서의 트래픽 등에 의하여 결정된다. 특히, 이러한 전송 지연은 제어 입력이나 플랜트 출력을 샘플링 시간 내에 구동기나 제어기에 도착하지 못하게 함으로써, 제어 시스템의 성능과 안정성을 악화시킨다. 따라서, 산업용 네트워크를 이용하여 NCS를 구성하는 경우, 네트워크 지연이 특정한 최대값을 넘지 않도록 네트워크 설계가 이루어져야 한다.

그림 10은 본 논문에서 구현한 스위치드 이더넷을 이용한 NCS 테스트베드를 나타내고 있다. 그림에서, 테스트베드에는 1대의 제어기와 1대의 서보 모터가 스위치드 이더넷에 접속되어 있으며, 네트워크에 트래픽을 추가하기 위하여 1msec 주기마다 144비트의 데이터를 생성하는 8대의 트래픽 생성기가 접속되어 있다. 서보 모터로는 Tamagawa사의 TS3728 모터가 사용되었으며, 플랜트의 제어 입력 및 엔코더 출력을 위하여 NI(National Instrument)사의 NI 6025E가 사용되었다. 또한, 플랜트의 샘플링 시간은 10ms, 기준 입력은 1,000rpm으로 설정하여 속도 제어를 수행하였다.

이상과 같은 실험 조건에서, 본 논문에서는 플랜트와 직접 연결된 상태에서 설계된 PID 제어기의 제어 응답 성능과 동일한 PID 제어기를 NCS에 적용하였을 경우의 제어 응답 성능을 비교하였다.

먼저, 제어 시스템의 설계사양을 최대오버슈트는 20% 이하, 2% 정착시간은 1sec 이하, 감쇠비는 0.5 이하로 설정하고, 근궤적법(root locus)을 이용하여 PID 제어기를 구하면 (11)과 같다[20].

$$G_{PID}(s) = K_d s + K_p + \frac{K_i}{s} \quad (11)$$

$$= \frac{0.02s^2 + 0.015s + 0.1}{s}$$

이를 이용하여, NCS에서 플랜트의 응답 성능을 구하면 그림 11과 같다[20]. 그림에서, 플랜트와 설계된 PID 제어기를 직접 연결한 경우, 최대오버슈트는 15%(피크값 1,150rpm),

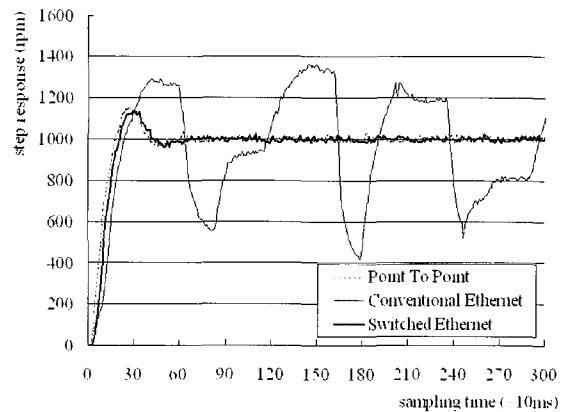


그림 11. NCS에서의 스텝 응답 비교.
Fig. 11. Comparison on step response of NCS.

2% 정착시간은 0.5sec로서, 플랜트의 설계사양을 만족하고 있다. 반면, 동일한 PID 제어기를 이더넷을 이용한 NCS에 적용한 경우, 플랜트의 제어 응답은 수렴하지 못하고 발산하였다. 이는 이더넷에서의 충돌로 인하여, 제어 입력이나 플랜트 출력이 지연되거나 손실되기 때문이다. 그러나, 동일한 PID 제어기를 스위치드 이더넷을 이용한 NCS에 적용한 경우, 최대오버슈트는 13%(피크값 1,300rpm), 2% 정착시간은 0.54sec로서, 직접 연결된 경우와 거의 유사한 제어 응답 성능을 보여주고 있다. 이러한 결과는 4장에서 살펴본 바와 같이 τ_k^c 와 τ_k^{ca} 의 값이 1msec 정도로 매우 작고, 제어 입력이나 플랜트 출력이 샘플링 시간 내에 충분히 전송됨으로써, 네트워크 지연의 영향을 거의 받지 않기 때문이다.

이러한 결과로부터, 플랜트와 직접 연결된 상태에서 설계된 PID 제어기를 스위치드 이더넷을 이용한 NCS에서 아무런 수정없이 사용하는 경우에도, 주어진 설계 사양을 충분히 만족시킬 수 있을 정도로 스위치드 이더넷의 성능이 우수함을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 사무용 네트워크로 사용되고 있는 이더넷에 스위칭 기술을 도입한 스위치드 이더넷의 성능에 대하여 평가하였으며, 스위치드 이더넷의 타이밍 선도를 이용하여 이론적인 최대 전송 지연을 계산하였다. 또한, 스위치드 이더넷에 대한 실험적인 성능 평가와, 네트워크 기반 제어 시스템에서의 적용을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 스위치드 이더넷의 타이밍 선도를 이용한 이론적인 분석 결과와 성능 평가 결과로부터, 스위치드 이더넷에서는 전송 지연이 1msec 정도로 매우 작고 거의 일정한 값을 유지하기 때문에, 산업용 네트워크로 사용될 수 있음을 확인하였다.

둘째, 스위치드 이더넷을 이용한 NCS에서, 제어 시스템의 제어 성능은 네트워크 지연에 의한 영향을 거의 받지 않기 때문에, 플랜트와 직접 연결된 상태에서 설계된 PID 제어기를 NCS에서의 원격 제어기로 사용하는 경우에도 주어진 설계 사양을 충분히 만족할 수 있음을 확인하였다.

셋째, 따라서, 스위치드 이더넷을 산업용 네트워크로 사용

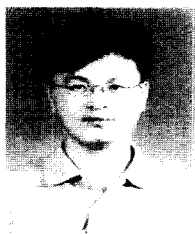
함에 따라, 널리 확산되어 있는 이더넷 기술의 사용으로 인하여 네트워크 비용의 절감이나 필드 장치들간의 호환성의 증대, 응용 계층의 개발 용이성 등과 효과를 얻을 수 있다.

그러나, 아직 사무 환경에 적합하도록 개발된 전송 매체와 연결 커넥터를 전자기적 잡음이 심한 공장 환경에 사용하기에는 문제가 있다. 따라서, 스위치드 이더넷이 산업용 네트워크에 광범위하게 응용되기 위해서는, 전송 매체와 연결 커넥터에서의 문제점을 보완하기 위한 추가적인 연구와 표준화가 이루어져야 한다.

참고문헌

[1] 홍성수, "분산 실시간 제어 시스템의 개발," 제어·자동화·시스템공학회지, 제 4 권, 제 1 호, pp. 33-38, 1998.
 [2] 권옥현, 김영신, "분산 실시간 시스템에서의 네트워크 프로토콜," 제어·자동화·시스템공학회지, 제 4 권, 제 6 호, pp. 27-34, 1998.
 [3] IEC 61158-4, *Digital data communications for measurement and control - Fieldbus for use in industrial control systems - Part 4: Data link protocol specification*, 1999.
 [4] G. Kaplan, "Ethernet's winning ways," *IEEE Spectrum*, Vol. 38, No. 1, pp. 113-115, 2001.
 [5] J. H. Park and Y. C. Yoon, "An extended TCP/IP protocol for real-time local area network," *Control Engineering Practice*, Vol. 6, pp. 111-118, 1998.
 [6] K. J. Christensen, "A simulation study of enhanced arbitration methods for improving Ethernet performance," *Computer Communications*, Vol. 21, pp. 24-36, 1998.
 [7] S. Vitturi, "On the use of Ethernet at low level of factory communication systems," *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 23, pp. 267-277, 2001.
 [8] G. Ye, H. Deng, L. Chen, L. Liu and X. Wang, "A prototype switched Ethernet data acquisition system," *Fusion Engineering and Design*, Vol. 43, pp. 413-416, 1999.

[9] B. Y. Choi, S. Song, N. Birch and J. Huang, "Probabilistic approach to switched Ethernet for real-time control applications," *Proceedings of Seventh International Conference on Real-Time Computing Systems and Applications*, pp. 384-388, 2000.
 [10] E. Vonnahme, S. Ruping and U. Ruckert, "Measurements in switched Ethernet networks used for automation systems," *Proceedings of 2000 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, pp. 231-238, 2000.
 [11] M. Y. Chow and Y. Tipsuwan, "Network-based control systems: a tutorial," *The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1593-1602, 2001.
 [12] 이경창, 이석, "유전자 알고리즘을 이용한 네트워크 기반 제어 시스템의 원격 제어기 설계," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 8 권, 제 1 호, 2002.
 [13] IEEE Standard 802.3, Part 3: *Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications*, 2000.
 [14] W. Stalling, *Local and Metropolitan Area Networks*, 6th Ed. Macmillan Publishing Company, 2000.
 [15] D. K. Choi and B. G. Kim, "The expected (not worst-case) throughput of the Ethernet protocol," *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 40, No. 3, 1991.
 [16] F. L. Lian, J. R. Moyne, and D. M. Tilbury, "Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 21, No. 1, pp. 66-83, 2001.
 [17] K. Bender, *Profibus-The fieldbus for industrial automation*, Prentice Hall, 1993.
 [18] 3Com SuperStack Switches, datasheet, <http://www.3com.com>, 2000.
 [19] D. Roberts, *Developing for the Internet with Winsock*, F-One Publishing Company, 1996.
 [20] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, pp. 257-270, 1990.



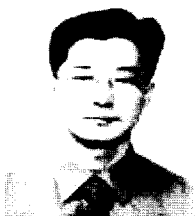
이 경 창

1971년 5월 1일 생. 1996년 부산대 생산기계공학과 졸업. 1998년 동대학원 (석사). 2001년 동대학원 (박사수료). 1998년 ~ 현재 기계공학연구정보센터 전임연구원. 관심분야는 필드버스(Profibus, Fieldbus Foundation, DeviceNet, Lonworks), 산업용 이더넷, 홈 네트워크, 지능 제어, 인터넷 기반 생산 시스템.



이 석

1961년 12월 11일 생. 1984년 서울대 기계공학과 졸업. 1985년 펜실바니아 주립대 (석사). 1990년 동대학원 (박사). 1990년 ~ 1993년 신시내티 대학교 기계공학과 조교수. 1993년 ~ 현재 부산대학교 기계공학부 부교수. 관심분야는 필드버스(Prifobus, Fieldbus Foundation, DeviceNet, Lonworks), 차량용 네트워크(CAN, LIN), 홈 네트워크, DES.



김 태 준

1973년 11월 18일 생. 1999년 동아대 기계공학과 졸업. 2002년 부산대 지능기계공학과 (석사). 2002년 ~ 현재 팬택 근무. 관심분야는 산업용 이더넷.