

실시간 산업용 통신을 위한 Switched Ethernet 의 성능 평가

김도형*, 이경창(부산대 지능기계공학과), 이석(부산대 기계공학부)

Performance Evaluation of Switched Ethernet for Real-time Industrial Communication

D. H. Kim, K. C. Lee(Mech. Eng. Dept., PNU), S. Lee(Mech. Eng. School, PNU)

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 such as sensors, actuators, and controllers, numerous standard organizations and vendors have developed various fieldbus protocols such as Profibus, WorldFIP, and Foundation Fieldbus. However, the application of fieldbus has been limited due to the high cost of hardware and the difficulty in interfacing with multi-vendor products. In order to solve these problems, the computer network technology, especially Ethernet (IEEE 802.3), is being adopted to the industrial environment. The crucial technical obstacle for Ethernet is that its non-deterministic behavior makes it inadequate for industrial applications where real-time data such as control command and alarm signal 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.

Key Words : switched Ethernet, real-time industrial network, TCP/IP, fieldbus, networked control system, real-time requirement, data latency

1. 서론

최근 들어, 산업용 네트워크는 자동화 시스템을 구성하는 데 있어 필수적인 요소가 되고 있다. 특히, 시스템이 대형화되고 지능화됨에 따라, 자동화 시스템에서 요구되는 센서나 구동기와 같은 필드장치들의 수가 급격하게 증가되었다. 그러나, 필드장치의 수가 증가되면 필수룩, 제어기와 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 대체함으로써 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, 로봇 자동화 시스템 등과 같은 다양한 분야로 확산되어 가는 추세이다.

일반적으로, 산업용 네트워크에서 교환되는 데이터는 실시간 데이터와 비실시간 데이터로 구분되며, 공유된 전

송 매체를 통하여 동시에 전송될 수 있어야 한다. 만약, 이러한 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 시스템에서의 실시간 요구 조건을 만족시킬 수 있는 산업용 네트워크, 즉, 필드버스가 개발되었으며, 1999년 말 Profibus, Fieldbus Foundation, WorldFIP 등과 같은 6개의 프로토콜을 포함하는 IEC 61158 필드버스가 국제 표준으로 제정되었다[1]. 그러나, 필드버스는 필드 장치에서 발생하는 데이터들의 실시간 요구 조건을 만족시킬 수 있는 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 하드웨어 및 소프트웨어가 전통적인 연결 방식에 비하여 상대적으로 고가이며, 여러 제조업체들간에 호환성이 부족하다는 문제점을 가지고 있다. 이로 인하여, 필드버스는 아직까지 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 적용되기에는 한계를 가지고 있다. 이러한 문제에 대한 대안으로서, 정보 통신 분야에서 널리 사용되고 있는 이더넷(Ethernet)을 산업용 네트워크로

되어 있으며, L_k 의 크기가 144 비트 이하인 경우, 최소 L_k 는 144 비트로 정의되어 있다. 여기에서, 스위치드 이더넷에서의 이론적인 최대 전송 지연은 네트워크에서의 트래픽과 스위치의 버퍼 용량에 따라 결정되는 N_q 가 최대일 때 발생한다. 만약 네트워크에서의 트래픽이 변하지 않고, 주기적 프레임만 생성된다고 가정하는 경우, N_q 의 최대값은 다음과 같이 추정될 수 있다.

먼저, 첫번째 필요 조건으로부터, 스위치에 최대의 프레임이 저장되는 경우는 네트워크에 접속된 모든 스테이션에서 프레임이 동시에 생성되어 스위치에 저장되는 경우이다. 이 경우 N_q 의 최대값은 네트워크에 접속되어 있는 스테이션의 수보다 1 작다. 예로, 본 논문에서 사용된 3COM사의 SuperStack II Switch 1100 모델의 경우, 초당 1,330,000 프레임의 처리 능력을 가지기 때문에, 첫 번째 필요 조건을 충분히 만족함을 알 수 있다[5].

둘째, 산업용 네트워크에서 생성되는 실시간 데이터는 수 바이트에서 수십 바이트의 크기와 수백 sec에서 수 msec의 발생 주기를 가진다[6]. 따라서, 두 번째 필요 조건을 만족하기 위해서는, L_k 가 프레임의 최소 길이인 144 비트이고 발생 주기가 1msec라고 한다면, N_s 가 17개를 초과하면 안된다. (이 경우 트래픽이 97.92%가 된다). 이상과 같은 가정하에서, D_Q 를 계산하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} D_Q &= N_q \min(L + 528, 672)t_b \\ &= (N_s - 1) \times 672 \times t_b \\ &= 16 \times 672 \times 0.1 \mu\text{sec} = 1075.2 \mu\text{sec} \end{aligned} \quad (3)$$

식에서, D_Q 의 값은 약 1msec로 매우 낮으며, D_{ENS} 를 고려한다 하더라도 1.2msec 정도의 매우 낮은 전송 지연을 가짐을 알 수 있다.

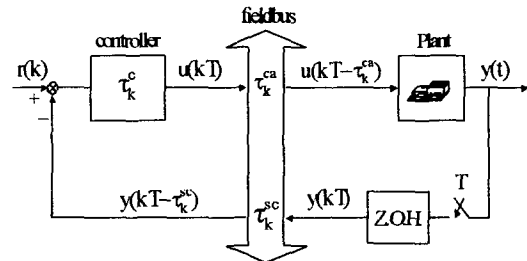
이상과 같은 분석으로부터 스위치드 이더넷에서는 충돌이 발생하지 않으며, 스위치에서의 저장 지연은 매우 작음을 알 수 있다. 이러한 결과는 스위치드 이더넷이 산업용 네트워크에서 요구하는 실시간 요구 조건을 충분히 만족시킬 수 있다는 것을 보여준다.

3. 네트워크 기반 제어 시스템에서의 적용 예

본 절에서는 산업용 네트워크로서, 스위치드 이더넷을 이용한 NCS 테스트베드를 구성하고, 제어 시스템의 제어 성능을 평가하였다. 그림 2는 NCS의 기본 구조를 나타낸다[4]. 그림에서 보듯이, NCS는 제어기와 센서, 구동기의 3가지 요소로 구성되어 있다. 이러한 요소들은 공유된 전송 매체에 의하여 연결되어 있으며, 플랜트 출력(plant output)이나 제어 입력(control input)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, 운영자와 제어기를 분리시킬 수 있기 때문에 운영자를 위협한 공장 환경으로부터 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)과 제어기에서의 계산 지연(computational delay), 제어기에서 구동기로의 전송 지연(controller-to-actuator delay)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 최소가 되도록 네트워크 설계가 이루어져야 한다.

그림 3은 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 144 비트의 데이터를 생성하는 8대의 트래픽 생성기가 접속되어 있다. 서보 모터로는 Tamagawa사의 TS3728 모터가 사용되었으며, 플랜트의 제어 입력 및 엔코더 출력을 위하여 NI사의 NI 6025E가 사용되었다. 또한, 플랜트의 샘플링 시간은 10ms, 기준 입력은 1000rpm으로 설정하여 속도 제어를 수행하였다.



τ_k^c : computational delay, τ_k^{sc} : sensor-to-controller delay, τ_k^{ca} : controller-to-actuator delay

Fig. 2. Structure of Networked Control System

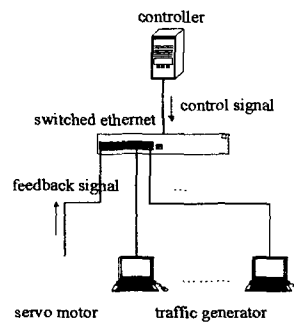


Fig. 3. Testbed of NCS via switched Ethernet

응용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 일반적으로, 이더넷은 매체 접속 제어(Medium Access Control, MAC) 방식으로 경쟁(contention)에 기반한 CSMA/CD(Carrier Sensing Multiple Access/Collision Detection)를 사용한다. 만약 네트워크에서 트래픽이 증가하게 되면, 스테이션들간의 경쟁이 빈번하게 발생하고, 전송되는 데이터들간의 충돌이 발생한다. 이러한 충돌로 인하여, 이더넷에서는 전송되는 데이터들이 일정한 전송 지연을 가지지 못하고 랜덤(random)한 전송 지연을 가지는 현상, 즉, 전송 지연에 대한 불확실성 문제가 생긴다. 이에 따라, 이더넷을 아무런 수정없이 바로 산업용 네트워크로 응용하기에는 문제가 있다고 알려져 있다. 그러나, 이더넷에서의 충돌을 줄이기 위한 기존 연구의 대다수는 데이터링크계층이나 TCP/IP 계층을 직접적으로 수정해야 한다는 문제점을 가지고 있기 때문에, 실제 응용에서는 많은 한계를 가지고 있다.

최근에는 이더넷에서의 전송 지연에 대한 불확실성을 해결하기 위한 방법의 하나로써, 스위칭 기술을 이더넷에 도입한 스위치드 이더넷에 대한 관심이 제기되고 있다. 스위칭 기술은 주로 사무실 네트워크(office network)를 위하여 사용되어 왔으나, 스위칭 기술이 보편화되고 스위치의 가격이 하락해 감에 따라, 스위치를 산업용 네트워크에 적용하려는 시도가 증가되고 있는 추세이다[2]-[3].

본 논문에서는 스위치드 이더넷이 산업용 네트워크에서 요구하는 실시간 요구 조건을 만족하는가를 평가하기 위하여, 스위치드 이더넷의 수학적 모델로부터 이론적인 최대 전송 지연을 계산하고 네트워크 기반 제어 시스템(Networked Control System, NCS)[4]에 적용하여, 그 제어 성능을 평가할 것이다.

본 논문은 서론을 포함하여 4 장으로 구성되어 있다. 2 장에서는 스위치 이더넷의 수학적 모델을 제안하고, 이론적인 최대 전송지연을 계산한다. 3 장에서는 서버 모터를 이용한 네트워크 기반 제어 시스템을 구성하고, 플랜트의 제어 성능을 평가한다. 마지막으로 4 장에는 결론을 제안한다.

2. 스위치드 이더넷에서의 최대 전송 지연

스위치드 이더넷이 실시간 요구 조건을 가지는 산업용 네트워크로 응용될 수 있기 위해서는 다음과 같은 두 가지 필요 조건이 만족되어야 한다.

첫째, 네트워크에서의 트래픽이 변하지 않는다면, 스위치의 단위 시간당 처리 능력이 전체 스테이션의 단위 시간당 프레임 발생량보다 커야 한다. 만약, 네트워크에서 스위치의 처리 능력보다 많은 프레임이 생성되는 경우, 프레임이 버퍼에 저장되지 못하고 오버플로우(overflow)가 일어나게 된다. 오버플로우된 프레임은 버퍼에 여유가 생길 때까지 근원지에서 재전송이 이루어지게 될 것이다. 그러나, 네트워크에서 스위치의 처리 용량보다 많은 프

레이미 지속적으로 생성되기 때문에, 버퍼에서 오버플로우가 발생된 후에 생성된 프레임들은 버퍼에 저장되지 못하고, 근원지의 송신 버퍼에 계속 누적될 것이다. 따라서 스위치의 단위 시간당 처리 능력이 전체 스테이션의 단위 시간당 프레임 발생량보다 커야 한다. 이러한 결과로부터 만약 네트워크에서 주기적 데이터만 생성되는 경우에는 하나의 발생 주기에서 생성된 프레임은 다음 발생 주기가 되기 전까지 모두 전송되어야 한다는 점을 알 수 있다.

둘째, 전체 네트워크에서 하나의 목적지로 전송되는 단위 시간당 프레임의 용량은 목적지 수신 회선의 전송 용량보다 작아야 한다. 만약, 목적지 수신 회선의 전송 용량보다 많은 프레임이 생성되는 경우, 전송 용량 이상의 프레임들은 스위치의 버퍼에 저장되며, 이후에 발생하는 프레임들이 계속 누적됨으로서 전송 지연이 증가하게 될 것이다. 따라서, 만약 네트워크에서 생성되는 모든 프레임이 하나의 목적지로 전송되는 경우, 전체 네트워크에서 생성되는 트래픽량이 네트워크의 전송 용량을 초과하지 않도록 스테이션의 수나 발생 주기, 프레임 길이 등이 조절되어야 한다.

스위치드 이더넷에서 이러한 조건이 만족된다면, 스위치드 이더넷의 이론적인 최대 전송 지연은 그림 1의 타임밍 선도를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

스위치에의 지장이 발생하는 경우, 전송 지연(D_E)은 D_{EBS} 에 버퍼에서의 대기한 저장 지연(queueing delay, D_Q)을 포함하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_E = D_{EBS} + D_Q \quad (1)$$

여기에서, 특정한 시점에 N_q 개의 프레임이 스위치에 저장되어 있다면, D_Q 는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_Q = \sum_{k=1}^{N_q} D_{Fk} + D_{PK} \quad (2)$$

$$= \sum_{k=1}^{N_q} [96 + \min(L_k + L_b, 576)] t_b$$

위 식에서, D_{Fk} 는 하나의 프레임을 전송하고 나서 다음 프레임을 보내기까지 기다려야 하는 인터프레임 시간(interframe delay)으로, 10Mbps 이더넷 표준에서 96 비트타임으로 정의되어 있다. 또한, L_k 는 k 번째 생성된 데이터의 크기이며, L_b 는 전송 프레임의 오버헤드이다. 10Mbps 이더넷 표준에서 UDP 통신일 경우 L_b 는 432 비트로 정의

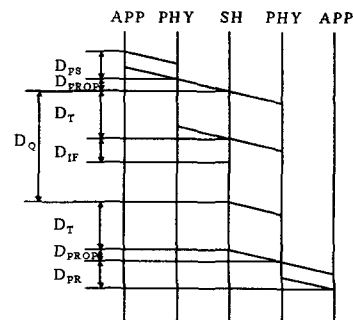


Fig. 1. Timing diagram of Switched Ethernet

이상과 같은 실험 조건에서, 본 논문에서는 플랜트와 직접 연결된 상태에서 설계된 PID 제어기의 제어 응답 성능과 동일한 PID 제어기를 NCS 에 적용하였을 경우의 제어 응답 성능을 비교하였다. 먼저, 제어 시스템의 설계 사양을 최대오버슈트는 20% 이하, 2% 정착시간은 1sec 이하, 감쇠비는 0.5 이하로 설정하고, 근궤적법(root locus)을 이용하여 PID 제어기를 구하면 식 (4)와 같다[7].

$$G_{pid}(s) = K_d s + K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

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

이를 이용하여, NCS 에서 플랜트의 응답 성능을 구하면 그림 4 와 같다. 그림에서, 플랜트와 PID 제어기를 직접 연결한 경우, 최대오버슈트는 15%, 2% 정착시간은 0.5sec 로서, 플랜트의 설계사양을 만족하고 있다. 반면, 이더넷을 이용한 NCS 의 경우, 플랜트의 제어 응답은 수렴하지 못하고 발산하였다. 이는 이더넷에서의 충돌로 인하여, 제어 입력이나 플랜트 출력이 지연되거나 손실되기 때문이다. 그러나, 스위치드 이더넷을 이용한 NCS 의 경우, 최대오버슈트는 13%, 2% 정착시간은 0.54sec 로서, 직접 연결된 경우와 거의 유사한 제어 응답 성능을 보여주고 있다. 이러한 결과는 τ_k^{sc} 와 τ_k^{ca} 의 값이 1msec 정도로 매우 작고, 제어 입력이나 플랜트 출력이 샘플링 시간 내에 전송됨으로써, 네트워크 지연의 영향을 거의 받지 않기 때문이다. 이러한 결과로부터, 플랜트와 직접 연결된 상태에서 설계된 PID 제어기를 스위치드 이더넷을 이용한 NCS 에서 사용하는 경우에도, 주어진 설계 사양을 충분히 만족시킬 수 있을 정도로 스위치드 이더넷의 성능이 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 사무용 네트워크로 사용되고 있는 이더넷에 스위칭 기술을 도입한 스위치드 이더넷이 산업용 네트워크로 사용되기 위하여 만족되어야 하는 조건에 대하여 제시하고, 스위치드 이더넷의 타이밍 선도를 이용하여 이론적인 최대 전송 지연을 계산하였다. 또한, 네트워크 기반 제어 시스템에서의 적용을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

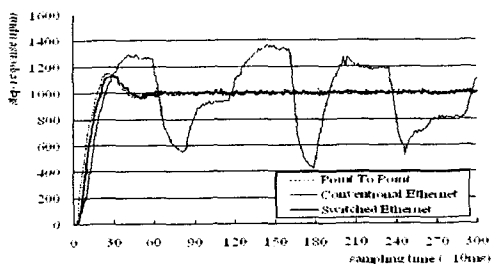


Fig. 4. Comparison on step response of NCS

첫째, 스위치드 이더넷의 타이밍 선도를 이용한 이론적인 분석 결과로부터, 스위치드 이더넷에서는 전송 지연이 1msec 정도로 매우 작고 일정한 값을 유지하기 때문에, 산업용 네트워크로 적합함을 확인하였다.

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

셋째, 스위치드 이더넷을 산업용 네트워크로 사용함에 따라, 널리 확산되어 있는 이더넷 기술의 사용으로 인하여 네트워크 비용의 절감이나 필드 장치들간의 호환성의 증대, 응용 계층의 개발 용이성 등의 효과를 얻을 수 있다. 그러나, 아직 사무 환경에서 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. IEC 61158-4, "Digital data communications for measurement and control - Fieldbus for use in industrial control systems - Part 4: Data link protocol specification," 1999.
2. 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.
3. 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.
4. M.Y. Chow and Y. Tipsuwan, "Network-based control systems: a tutorial," The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Denver, Colorado, pp. 1593-1602, 2001.
5. 3Com SuperStack Switches, datasheet, <http://www.3com.com> 2000.
6. K. Bender, "Profibus-The fieldbus for industrial automation," Prentice Hall, 1993.
7. K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, pp. 257-2