

다계층 구조를 가진 산업용 스위치드 이더넷에서의 실시간 전송 특성

Real-time transmission properties of industrial switched Ethernet with cascade structure

이 경 창, 이 석*
(Kyugn Chang Lee and Suk Lee)

Abstract : The real-time industrial network, often referred to as fieldbus, is an important element for intelligent 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 with cascade structure for industrial communications. More specifically, this paper presents an analytical performance evaluation of switched Ethernet with cascade structure, and a case study about networked control system.

Keywords : switched Ethernet, cascade structure, industrial network, fieldbus, real-time requirement, network delay

I. 서론

최근 들어, 산업용 네트워크는 생산 시스템의 지능화에 있어서 필수적인 요소가 되고 있다. 4~20mA의 아날로그 전송 방식을 사용하는 전통적인 중앙집중식 연결 방식에 비하여, 디지털 전송 방식을 사용하는 산업용 네트워크는 시스템의 신뢰성 향상과 안정성 증대, 유지보수의 용이, 확장성의 증대 등과 같은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여, 산업용 네트워크는 전통적인 공정 제어 분야 뿐만 아니라, 조립 생산 시스템이나 몰류 자동화 시스템 등과 같은 다양한 분야로 적용되고 있다[1][2].

산업용 네트워크가 안정적으로 운영되기 위해서는, 실시간 데이터가 정해진 시간 한계치 내에 전송되어야 한다는 실시간 요구 조건(real-time requirement)이 만족되도록 설계되어야 한다. 만약, 실시간 요구 조건이 만족되지 못하면, 시스템의 성능이 저하될 뿐만 아니라 시스템에 치명적인 오류가 발생될 수 있다.

이러한 실시간 요구 조건을 만족시키기 위하여, 1980년대 말부터 산업용 네트워크, 즉, 필드버스가 여러 지역 표준기관들에 의하여 개발되었으며, 1999년 말 Profibus, Fieldbus Foundation, WorldFIP 등과 같은 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 소프트웨어의 설치가 전통적인 중앙집중식 방식에 비하여 어려우며, 여러 제조업체들간에 호환성이 부족

하다는 단점을 가지고 있다[4].

최근에는, 이러한 필드버스의 문제점을 해결하기 위한 방법으로서, 사무용 통신에서 널리 사용되고 있는 이더넷(Ethernet)을 산업용 네트워크로 이용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[5]. 이더넷은 매체 접속 제어(Medium Access Control, MAC) 방식으로 경쟁(contention)에 기반한 CSMA/CD(Carrier Sensing Multiple Access/Collision Detection)를 사용하기 때문에, 트래픽이 증가하게 되면 전송 지연이 증가한다는 비결정적 특징을 가지고 있다. 그러나, 스위칭 기술을 사용하는 스위치드 이더넷은 송신자와 수신자간에 전이중 방식(full duplex)[6]을 사용함으로써, 전송 지연에 대한 불확실성을 해결할 수 있다고 알려져 있다[7].

최근 들어, 스위치드 이더넷은 그림 1에서 보는 바와 같이 산업용 네트워크의 백본 네트워크로서 주로 사용되고 있다. 즉, 센서나 액추에이터 간의 데이터 교환이 주를 이루는 디바이스 계층(device level)에서는 Profibus-DP나 Foundation Fieldbus H1과 같은 필드버스가 주로 사용된다. 반면, PLC나 로봇 간의 데이터 교환이 주를 이루는 셀 계층(cell level)과

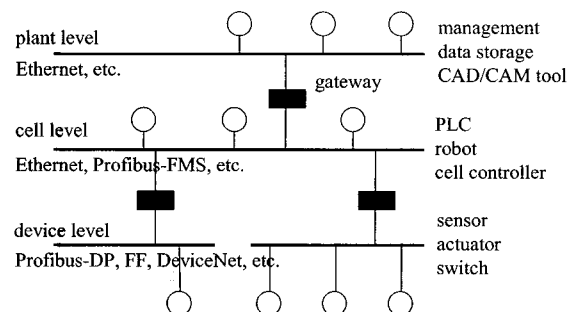


그림 1. 산업용 네트워크의 계층 구조.
Fig. 1. Layer architecture of industrial network.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 1. 9., 채택확정 : 2004. 5. 25.

이경창, 이석 : 부산대학교 기계공학부(gclee@pnu.edu/slee@pnu.edu)

※ 본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 네트워크 기반 자동화 연구센터의 지원에 의한 것임.

산업용 컴퓨터, 데이터베이스 시스템 간의 데이터 교환이 주를 이루는 플랜트 계층(plant level)에서는 스위치드 이더넷이 주로 사용되고 있다. 여기에서, 필드버스와 이더넷은 게이트웨이를 통하여 데이터 교환이 이루어진다. 최근에는, ProfiNet 이나 Foundation Fieldbus HSE(High Speed Ethernet), Ethernet/IP 등과 같은 게이트웨이를 위한 프로토콜들이 개발되고 있다.

그러나, 생산 시스템에서 상하위 계층에 이기종의 산업용 네트워크가 사용되는 경우, 상하위 계층의 데이터 교환을 위하여 사용되는 게이트웨이로 인하여 상하위 계층 간에 실시간 요구 조건의 만족이 어려울 수 있다. 즉, 게이트웨이를 사용하는 경우, 이기종 프로토콜의 응용 계층 간에 데이터 교환이 이루어져야 하기 때문에, 산업용 네트워크에서 요구되는 실시간 요구 조건의 만족이 어려워지게 된다. 뿐만 아니라, 이더넷을 백본으로 하여 연결된 두 개의 서브 네트워크(sub-network) 간에 실시간 데이터의 교환이 어렵게 된다.

반면, 스위치드 이더넷은 필드버스에 비하여 상대적으로 전송 속도가 높으며, 안정성있는 저가의 마이크로프로세스로 인하여 노드의 개발이 쉬울 뿐만 아니라, 성숙되어 있는 기술로서 신뢰성을 가지고 있다. 뿐만 아니라, 스위칭 기술 적용으로 인하여 이더넷을 산업용 네트워크로 사용하는 데 있어서 가장 큰 장애인 비결정적 특성을 제거할 수 있다. 따라서, 스위치드 이더넷을 디바이스 계층에까지 적용하게 되면, 게이트웨이가 없이도 상하 계층간에 네트워크의 통합이 원활하게 이루어질 뿐만 아니라, 스위치드 이더넷이 가지는 다양한 장점을 디바이스 레벨에도 적용할 수 있게 된다.

본 논문에서는 여러 계층의 서브 네트워크를 스위칭 허브로 연결한 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷이 디바이스 레벨에서 요구하는 실시간 요구 조건을 만족시킬 수 있는가를 검증하기 위하여, 스위치드 이더넷에 대한 이론적 분석과 실험적 성능 평가를 수행한다. 먼저, 본 논문에서는 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷에 대한 타이밍 분석(timing analysis)을 수행하여, 스위치드 이더넷을 이용하여 통합된 생산 시스템에서 이론적으로 발생할 수 있는 최대 전송 지연을 계산한다. 그리고, 본 논문에서는 스위치드 이더넷을 이용한 네트워크 기반 제어 시스템(Networked Control System, NCS) [8][9]을 구축하고 그 제어 성능을 평가함으로써, 스위치드 이더넷의 산업 적용 가능성을 검증한다.

본 논문은 서론을 포함하여 6장으로 구성되어 있다. II장에서는 스위치드 이더넷에 대하여 간략히 서술하고, III장에서는 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷에서의 이론적인 최대 전송 지연에 대하여 분석한다. IV장에서는 스위치드 이더넷의 성능을 확인하기 위하여 서보 모터를 이용한 네트워크 기반 제어 시스템을 구축하고, 플랜트의 제어 성능을 평가하여, 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷에서 실시간 요구조건이 만족될 수 있음을 실험적으로 검증한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 제시한다.

II. 스위치드 이더넷의 개요

사무용 네트워크로 널리 사용되고 있는 이더넷[10]은 그림 2.a 에서 보는 바와 같이 네트워크에 접속된 모든 스테이션들이 하나의 허브를 공유하고, 하나의 회선만을 이용하여 송수

신이 이루어지는 반이중(half duplex) 방식[6]을 사용하기 때문에, 근원지 스테이션(source station)이 프레임을 송신하면, 그 프레임이 허브에 연결되어 있는 모든 스테이션으로 방송된다. 이 때, 해당 프레임이 수신되기 전에 다른 스테이션들이 송신을 하게 되면, 두 프레임간의 충돌이 발생한다.

그러나, 스위치드 이더넷은 그림 2.b 에서 보는 바와 같이 송신 회선과 수신 회선이 별개로 이루어진 전이중 방식을 사용하기 때문에, 근원지 스테이션에서 송신된 프레임이 목적지 스테이션(destination station)에 수신되기 전에 다른 스테이션들이 송신을 하더라도 충돌이 발생하지 않는다. 뿐만 아니라, 스위치드 이더넷에서는 스위칭 기술을 사용함으로써, 두 개 이상의 스테이션이 하나의 목적지 스테이션으로 프레임을 전송하려고 하는 경우에 발생할 수 있는 스위칭 허브에서의 충돌이 방지된다. 즉, 스위칭 기술의 대표적인 방식인 축적 및 전송(store and forward) 방식[11]의 경우, 스위칭 허브는 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 해당 스테이션에 연결된 버퍼에 저장한 후 수신 회선의 사용이 끝날 때까지 기다린다. 또한, 스위칭 허브에 동일한 목적지 스테이션을 가진 다수의 프레임이 수신되면, 스위칭 허브의 송수신 버퍼에 저장된 후 수신된 순서대로 목적지 스테이션으로 전송된다. 이러한 방법으로 인하여, 스위칭 허브에서의 충돌을 제거하게 된다.

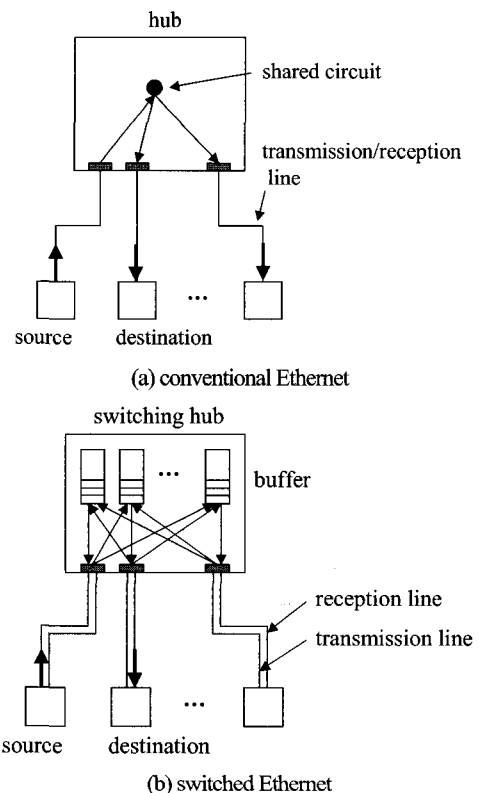


그림 2. 이더넷과 스위치드 이더넷의 전송 방식 비교.
Fig. 2. Comparison of transmission methods of Ethernet and switched Ethernet.

III. 스위치드 이더넷의 최대 전송 지연

본 논문에서는 생산 시스템에서 상하 계층간의 통합이 가능하고, 실시간 요구 조건이 만족될 수 있는 그림 3과 같은 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷을 제안한다. 그림에서, 생산 시스템의 각 계층에는 센서나 액츄에이터, PLC, 로봇, 산업용 PC 등과 같은 필드기기를 연결하기 위하여 스위치드 이더넷이 서브 네트워크로 사용되었으며, 상하위 계층의 서브 네트워크 간의 데이터 교환을 위하여 스위칭 허브가 사용되었다.

다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷에서 실시간 요구 조건이 만족된다면, 두 가지의 최대 전송 지연이 실시간 요구 조건을 만족하는가 검증되어야 한다. 첫째, 하나의 서브 네트워크에 접속되어 있는 두 개의 스테이션이 하나의 스위칭 허브를 통하여 데이터를 교환할 때(예로, 그림에서 스테이션 A와 B), 두 스테이션 간에서 발생할 수 있는 최대 전송 지연이 실시간 요구 조건을 만족하는가 검증되어야 한다[7]. 둘째, 서로 다른 서브 네트워크에 접속되어 있는 두 스테이션이 여러 계층으로 이루어진 스위칭 허브를 통하여 데이터를 교환할 때(예로, 그림에서 디바이스 계층의 스테이션 A와 플랜트 계층의 C, 또는 두 개의 별도로 구성된 서브 네트워크에 존재하는 디바이스 계층의 스테이션 A와 D), 두 스테이션 간에서 발생할 수 있는 최대 전송 지연이 실시간 요구 조건을 만족하는가 검증되어야 한다.

1. 단일 스위칭 허브를 가지는 스위치드 이더넷에서의 최대 전송 지연

먼저, 단일 스위칭 허브를 가지는 하나의 서브 네트워크에서 스위치드 이더넷에서의 이론적인 최대 전송 지연은 그림 4와 같은 타이밍 선도를 이용하여 계산할 수 있다[7].

그림에서, 하나의 프레임이 스위칭 허브에 저장되지 않고 근원지에서 목적지로 바로 전송되는 경우에 걸리는 최소 전송 지연(minimum communication delay, D_{Cmin})은 (1)과 같이 계산된다.

$$D_{Cmin} = D_S + D_F + 2D_P + D_D \quad (1)$$

식에서, D_S 는 근원지의 응용 계층(Application layer, APP)에서 메시지가 생성되어 물리 계층(Physical layer, PHY)에 저장되기까지 소요된 처리 지연(processing delay)이며, D_D 는 목적지의 물리 계층에서 응용 계층까지 전달되는 데 소요된 처리지연이다. D_F 는 프레임의 전송에 소요되는 전송 지연(transmission delay)으로서, 송신 프레임 길이에 비트 타임을

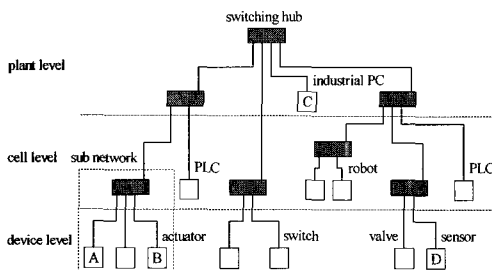


그림 3. 산업용 스위치드 이더넷의 계층 구조.
Fig. 3. Layer architecture of industrial switched Ethernet.

좁은 값으로 정의된다. D_P 는 근원지의 물리 계층에서부터 허브까지, 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 20m라면 전파 지연은 1 비트 타임으로 계산된다[6].

일반적으로, D_{Cmin} 는 송수신 스테이션의 CPU 성능과 응용 소프트웨어의 구현 방법에 의하여 결정된다. 예로, 두 대의 스테이션(Pentium 500MHz, Windows 2000)이 접속된 10Base-T 이더넷에서 144 비트 (이더넷에서의 최소 전송 길이)의 데이터를 교환시키는 경우, D_{Cmin} 는 약 0.2msec로 측정되었다. 본 논문에서는 이론적인 최대 전송 지연을 계산하기 위하여 이 값을 이용하였다. 여기에서, 데이터 길이를 144 비트로 설정한 이유는 산업용 네트워크에서 교환되는 실시간 데이터들의 길이로 적당하다고 알려져 있기 때문이다[12]. 그러나, 프로그램 다운로드나 상태 정보의 업로드 등과 같은 데이터 통신이 이루어질 때 길이가 긴 데이터를 사용한다면, 해당 길이를 이용하여 측정된 값을 사용하여 해석을 수행하여야 한다.

스위치드 이더넷에서의 전송 지연(D_C)은 실험적으로 측정된 D_{Cmin} 에 스위칭 허브의 버퍼에서 발생하는 저장 지연(queuing delay, D_Q)을 포함하여 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_C = D_{Cmin} + D_Q \quad (2)$$

여기에서, 스위칭 허브에 N_Q 개의 프레임이 저장되어 있다면, D_Q 는 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$D_Q = \sum_{k=1}^{N_Q} (D_1 + D_{Fk}) \quad (3)$$

$$= \sum_{k=1}^{N_Q} (96 + \max(L_k + L_h, 576))t_b$$

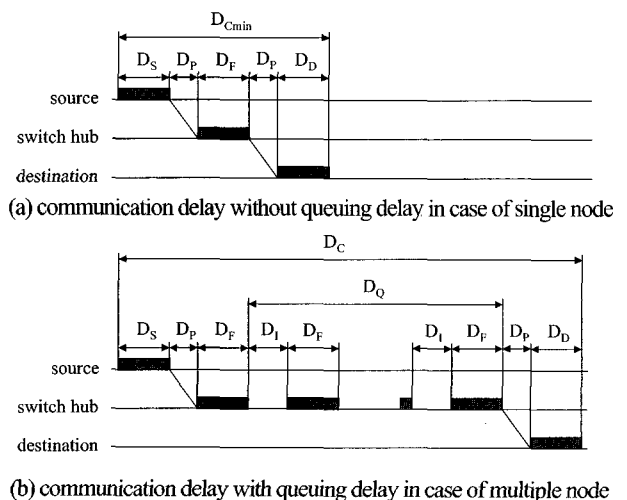


그림 4. 단일 스위칭 허브를 가지는 스위치드 이더넷에서의 전송 지연.
Fig. 4. Communication delay of Switched Ethernet with single switching hub.

위에서, D_k 는 하나의 프레임 전송하고 나서 다음 프레임 올보내기까지 기다려야 하는 인터프레임 시간(interframe delay)으로, 10Base-T 이더넷 표준에서 96 비트 타임으로 정의되어 있다[10]. 또한, L_k 는 k 번째 생성된 데이터의 길이로서 최소 144 비트이며, L_h 는 전송 프레임의 오버헤드로서 10Base-T 이더넷 표준에서 UDP 통신일 경우 432 비트로 정의되어 있다[10]. 여기에서, D_{Pk} 는 k 번째 메시지의 길이로서 $L_k + L_h$ 와 576 비트 중 최대값으로 선정된다.

단일 스위칭 허브를 가진 스위치드 이더넷에서의 이론적인 최대 전송 지연(D_{Cmax})은 스위칭 허브에 저장되는 프레임의 수인 N_Q 가 최대일 때 발생한다. 여기에서, N_Q 는 스위칭 허브에 접속되어 있는 모든 스테이션에서 발생한 메시지가 스위칭 허브에 동시에 저장될 때 최대가 되며, N_Q 는 스테이션 수보다 1 적다. 즉, 모든 스테이션에서 메시지가 발생되어 스위칭 허브로 전송되면, 하나의 메시지는 즉시 전송되고 나머지 메시지는 스위칭 허브에 저장되기 때문에, N_Q 는(스테이션 수 - 1)이 된다. 예로, 하나의 스위칭 허브에 24 개의 스테이션이 접속되어 있고, 모든 스테이션에서 발생하는 메시지의 평균 생성 주기가 D_{Cmax} 보다 큰 경우, 특정한 시점에 스위칭 허브에 저장될 수 있는 최대 프레임 수는 23 개가 된다. 그러나, 메시지의 평균 생성 주기가 D_{Cmax} 보다 작은 경우에는, 스위칭 허브에서 처리할 수 있는 용량보다 많은 메시지가 생성될 수 있기 때문에, 실시간 요구 조건을 만족시키기 어려울 수도 있다. 따라서, 메시지의 평균 생성 주기는 D_{Cmax} 보다는 크도록 설정되어야 한다. 이상과 같은 조건에서, 메시지의 길이가 이더넷에서의 최소 전송 길이인 144 비트 이하인 경우, 최대 전송 지연은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$D_{Cmax} = D_{Cmin} + D_Q = D_{Cmin} + N_Q(96 + \max(L_k + 432, 576))t_b \quad (4)$$

$$\approx 200 + 23 \times 672 \times 0.1 = 1745.6 \mu\text{sec}$$

이상과 같은 분석 결과로부터, D_{Cmax} 는 약 1.745msec로써 매우 작음을 알 수 있다. 일반적으로, 생산 시스템에서 생성되는 실시간 메시지들의 생성 주기는 0.1-100msec의 주기로 생성되며, 매우 긴급한 메시지인 경우에도 수 msec에서 수십 msec 이내에 전송되면 실시간 요구 조건이 만족된다고 알려져 있다[12][13]. 따라서, (4)에 의하여 계산된 전송 지연은 생산 시스템에서 생성되는 실시간 메시지들의 실시간 요구조건을 충분히 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

이러한 결과로부터, 단일 스위칭 허브를 가지는 스위치드 이더넷을 디바이스 계층에서 사용하더라도, 디바이스 계층에서 요구하는 실시간 요구 조건이 충분히 만족될 수 있다는 것을 알 수 있다.

2. 다 계층의 스위칭 허브를 가지는 스위치드 이더넷에서의 최대 전송 지연

다음으로, 두 계층 이상을 가지는 스위치드 이더넷에서의 이론적인 최대 전송 지연은 단일 스위칭 허브를 가지는 경우와 유사한 방법으로 다음과 같이 구할 수 있다. 본 논문에서는 그림 5.a와 같은 2단의 스위칭 허브를 가지는 구조를 이용하여 최대 전송 지연을 계산하는 방법에 대하여 설명한다.

그림에서, 스위칭 허브 s11에는 n1과 n2 스테이션이 접속되어 있으며, 스위칭 허브 s12에는 n3와 n4 스테이션이 접속되어 있다. 또한, s11과 s12는 스위칭 허브 s21으로 연결되어 있다. 이 때, n1과 n2, n3 스테이션이 n4 스테이션으로 메시지를 전송한다고 가정하면(네트워크에 접속된 모든 스테이션이 하나의 스테이션으로만 전송할 때, 최대 전송 지연이 발생한다), 그림 5.a는 그림 5.b와 같은 펼친 구조(unfold structure)로 변경할 수 있다. 이러한 경우, 그림 5.b와 같은 펼친 구조에서의 최대 전송 지연은 그림 5.d와 같은 타이밍 다이어그램을 이용하여 계산될 수 있다.

먼저, n1과 n2, n3에서 메시지가 동시에 생성된다고 하자. 그러면, n1과 n2에서 생성된 메시지 f1과 f2는 s11에 전달되고, n3에서 생성된 메시지 f3는 s12에 전달된다. 그리고 나서, f1는 s11에서 s21로 전달되고, f2는 스위칭 허브 s12에서 기다리고, f3는 n4로 전달된다. 다음으로, f1는 s21에서 n4로 전달되고, f2는 인터프레임 시간을 기다린 후 s12로 전달된다. 이러한 방법으로 그림 5.b와 같은 구조에서의 전송 지연을 계산하면, (5)와 같다.

$$D_C = D_{Cmin} + (N_{Smax} - 1)(D_P + D_F) + (N_{Qmax} - 1)(D_I + D_F) \quad (5)$$

식에서, D_{Cmin} 항은 송신자와 수신자간에 1개의 스위칭 허브가 존재하는 경우에 발생하는 최소한의 전송 지연이다. 다음으로, $(N_{Smax} - 1)(D_P + D_F)$ 는 송신자와 수신자 간에 존재하는 스위칭 허브의 개수에 따라 결정되는 전송 지연이다. 여기에서, N_{Smax} 는 네트워크에서 송신자와 수신자 간에 거칠 수 있는 스위칭 허브의 최대 개수이다. 마지막으로, $(N_{Qmax} - 1)(D_I + D_F)$ 는 스위칭 허브에 저장되는 메시지의 개수에 의하여 발생하는 전송 지연이다. 여기에서, N_{Qmax} 는 네트워크에 존재하는 스위칭 허브 중에서 동시에 저장될 수 있는 메시지의 최대 개수로서, (송신자의 총 개수 - 1)이 된다. 예로, 그림 5.b와 같은 구조에서, n1과 n4 간에 3개의 스위칭 허브가 존재하므로, N_{Smax} 는 3이 된다. 그리고, 스위칭 허브 s12에 2개의 메시지가 동시에 저장되므로, N_{Qmax} 는 2가 된다. 따라서, 그림 5.b와 같은 구조에서 발생할 수 있는 전송 지연은 다음과 같이 계산된다.

$$D_C = D_{Cmin} + 2(D_P + D_F) + (D_I + D_F) = 382.6 \mu\text{s} \quad (6)$$

다계층 구조에서의 이론적인 최대 전송 지연을 구하기 위하여, 본 논문에서는 그림 5.b를 그림 5.c와 같은 수정된 구조(modified structure)로 수정하였다. 그림에서, 송신자(n1과 n2, n3)와 수신자(n4) 간에 최대로 거쳐야 되는 스위칭 허브의 수는 n1과 n4간의 경로로 3개(s11, s21, s12)이다. 이를 모든 송신자와 수신자 간에 최대 개수의 스위칭 허브가 있다고 가정하면, 그림 5.b는 그림 5.c와 같은 구조로 수정할 수 있다.

이러한 수정된 구조에서의 최대 전송 지연은 그림 5.e와 같은 타이밍 다이어그램을 이용하여 구할 수 있다. 그림에서,

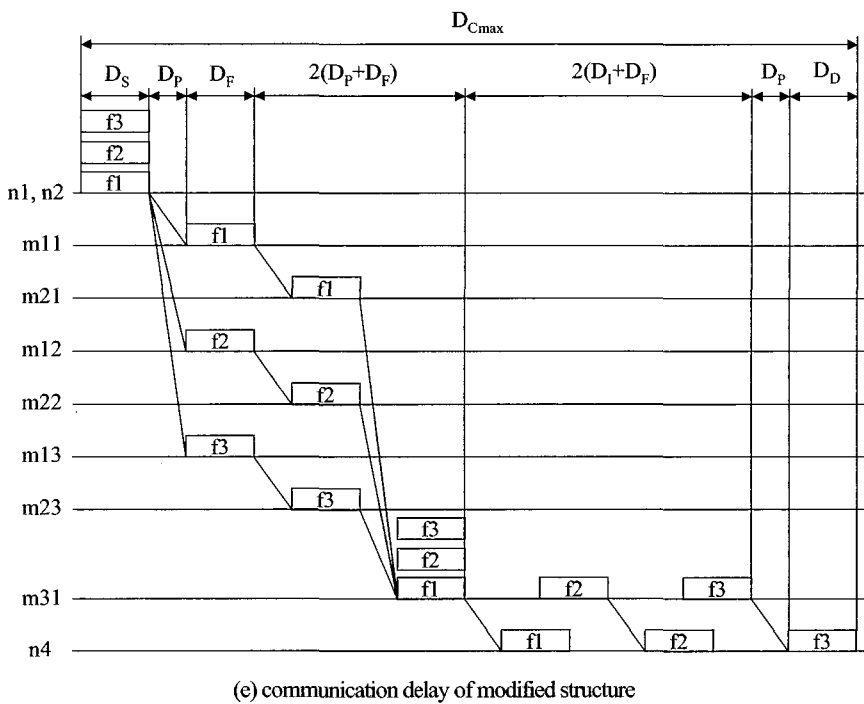
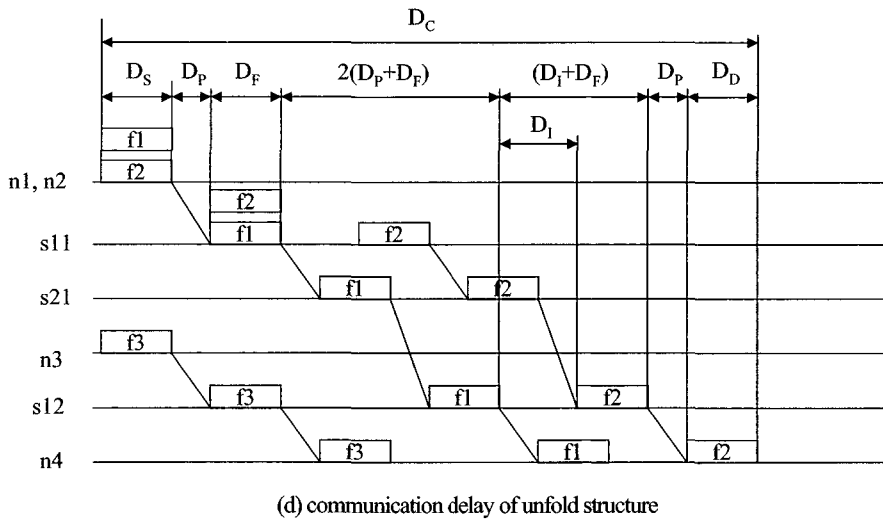
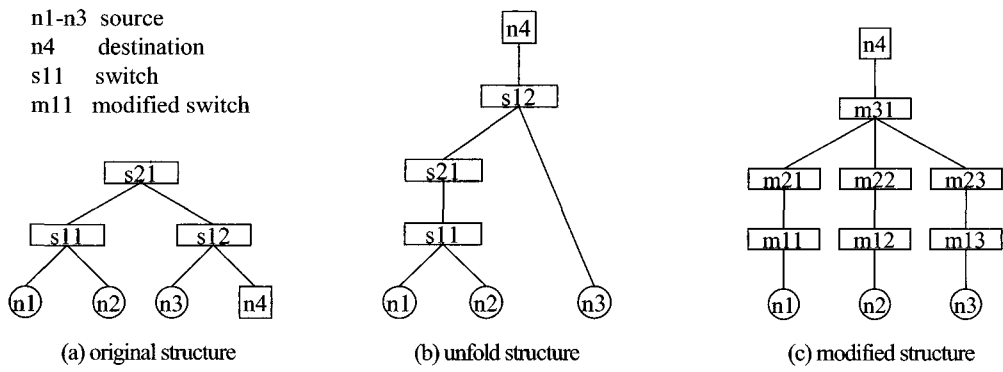


그림 5. 다계층 스위칭 허브를 가지는 스위치드 이더넷에서의 전송 지연의 계산 예.
Fig. 5. Example of calculation of communication delay of switched Ethernet with multiple switching hubs.

$n1, n2, n3$ 에서 생성된 메시지 $f1, f2, f3$ 는 스위칭 허브 $m11, m12, m13$ 에 동시간대에 전달된다. 그리고 나서, $f1, f2, f3$ 는 $m21, m22, m23$ 을 거쳐 $m31$ 에 동시간대에 전달된다. 그리고 나서, $f1, f2, f3$ 순으로 차례대로 수신자인 $n4$ 로 전송된다. 따라서, 최대 전송 지연은 (7)과 같이 계산된다.

$$D_{Cmax} = D_{Cmin} + 2(D_P + D_F) + 2(D_I + D_F) \quad (7)$$

$$= 449.8\mu s$$

(7)에서, 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷에서, 이론적인 최대 전송 지연은 수신자가 접속되어 있는 스위칭 허브에 모든 송신자에서 발생된 메시지가 동시에 저장되는 경우, 즉, N_{Qmax} 가 최대일 때 발생한다고 볼 수 있다. 예로, 그림 5.b에서 $f3$ 가 $f1$ 나 $f2$ 가 $s12$ 에 전달되기 직전에 $s12$ 에 전달된다면, $s12$ 에는 3개의 메시지가 동시에 저장되기 때문에, (7)과 동일한 최대 전송 지연이 발생함을 알 수 있다.

이상과 같은 분석으로부터, 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷에서 발생할 수 있는 최대 전송 지연은, (5)와 같이 계층의 크기와 네트워크에 접속되어 있는 스테이션의 수에 따라 결정된다고 볼 수 있다.

따라서, 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷을 구성하는 경우, 생산 시스템에서 요구되는 실시간 요구 조건이 만족되도록 계층의 크기와 스테이션의 수가 결정되어야 한다. 예로, 실시간 요구 조건이 10msec 이고, 네트워크에서 교환되는 메시지의 길이가 이더넷에서의 최소 전송 길이인 144비트이고, 스위칭 허브의 계층 구조가 3단계로 되어 있다고 하자. 단, 스위칭 허브의 계층 구조가 3단계 이하라면, 어떠한 형태의 네트워크 구성도 허용될 수 있다고 하자. 즉, 최상위 계층에 있는 스위칭 허브에 스위칭 허브와 스테이션이 일부 접속되어 있고, 두번째 계층에 스위칭 허브에도 스위칭 허브와 스테이션이 일부 접속되어 있으며, 마지막 계층에는 스테이션이 일부 접속되어 있는 경우도 허용될 수 있다고 하자.

이 때, 가장 최하위 계층에 접속되어 있는 두 개의 스테이션이 거칠 수 있는 스위칭 허브의 개수는 5개가 된다. 따라서, 주어진 실시간 요구 조건을 만족할 수 있는 이론적인 스테이션 수는 (8)과 같이 143개로 계산된다. 일반적으로, Profibus 의 경우 하나의 서브 네트워크에 접속될 수 있는 스테이션의 수가 127개라는 사실과 비교할 때, 143개는 그렇게 작은 스테이션의 개수는 아님을 알 수 있다[14].

$$D_{Cmax} = D_{Cmin} + (N_{Smax} - 1)(D_P + D_F) +$$

$$(N_{Qmax} - 1)(D_I + D_F) \quad (8)$$

$$10,000 = 200 + [(5 - 1)(1 + 576) +$$

$$(N_{Qmax} - 1)(96 + 576)] \times 0.1$$

$$N_{Qmax} \approx 143.4$$

이상과 같은 분석 결과로부터, 실시간 요구 조건이 만족되도록 적절한 크기의 스테이션 수가 결정된다면, 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷에서도 생산 시스템에서 요구되는 실시간 요구 조건이 충분히 만족될 수 있음을 알 수 있다.

IV. 네트워크 기반 제어 시스템을 통한 성능 평가

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

그림 6은 NCS의 기본 구조를 나타낸다[8]. 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, 생산 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 지연(network delay)에 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 구동기로의 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 7은 본 논문에서 구현한 2계층 구조를 가진 스위치드 이더넷을 이용한 NCS 실험 모델을 나타내고 있다. 그림에서, 실험 모델에는 1대의 제어기와 1대의 서보 모터가 스위치드 이더넷에 접속되어 있으며, 네트워크에 트래픽을 추가하기 위하여 1msec 주기마다 2바이트의 데이터를 생성하는 8대의 트래픽 생성기가 접속되어 있다. 스위칭 허브로는 3Com사의 3C16470이 사용되었으며, 서보 모터로는 Tamagawa 사의 TS3728 모터가 사용되었다. 그리고, 플랜트의 샘플링 시간은 10ms, 기준 입력은 1,000rpm으로 설정하여 속도 제어를 수행하였다.

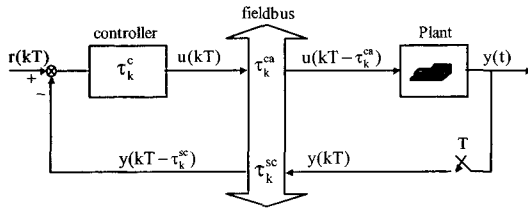
이상과 같은 실험 조건에서, 본 논문에서는 플랜트와 직접 연결된 상태에서 설계된 PID 제어기의 제어 응답 성능과 동일한 PID 제어기를 NCS에 적용하였을 경우의 제어 응답 성능을 비교하였다.

먼저, 제어 시스템의 설계사양을 최대오버슈트는 20% 이하, 2% 정착시간은 1sec 이하, 감쇠비는 0.5 이하로 설정하고, 근계곡법(root locus)을 이용하여 PID 제어기를 구하면 (9)와 같다[15].

$$G_{PID}(s) = K_d s + K_p + \frac{K_i}{s} \tag{9}$$

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

이를 이용하여, NCS에서 플랜트의 응답 성능을 구하면 그림 8 과 같다. 그림에서, 플랜트와 설계된 PID 제어기를



- 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}

그림 6. 네트워크 제어 시스템의 구조.
Fig. 6. Structure of Networked Control System.

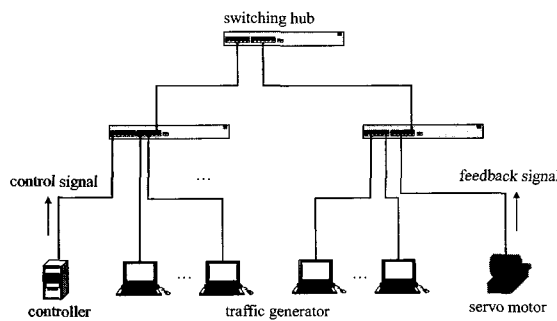


그림 7. 스위치드 이더넷을 이용한 NCS의 실험 모델.
Fig. 7. Experimental model of NCS via switched Ethernet.

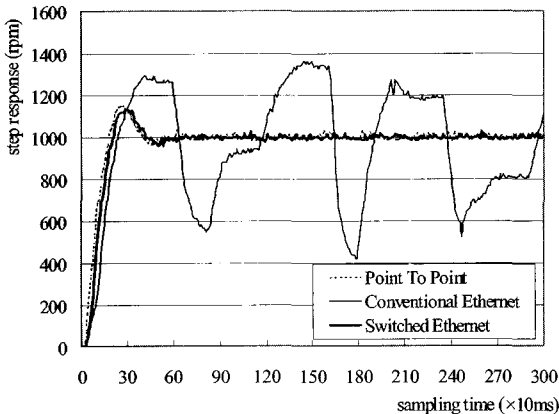


그림 8. NCS에서의 스텝 응답 비교.
Fig. 8. Comparison on step response of NCS.

직접연결한 경우, 최대오버슈트는 15%(피크값 1,150rpm), 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 1,130rpm), 2% 정착시간은 0.54sec로서, 직접 연결된 경우와 거의 유사한 제어 응답 성능을 보여주고 있다.

이러한 결과는 3장에서 살펴본 바와 같이 최대 전송 지연이 (10)과 같이 1msec 이하로 매우 작고, 제어 입력이나 플랜트 출력이 샘플링 시간 내에 충분히 전송될 수 있기 때문에, 네트워크 지연의 영향을 거의 받지 않기 때문이다.

$$D_{Cmax} = 200 + [(3 - 1)(1 + 576) + (9 - 1)(96 + 576)] \times 0.1 \tag{10}$$

$$= 852.8 \mu sec$$

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

VI. 결론

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

첫째, 스위치드 이더넷의 타이밍 선도를 이용한 이론적인 분석 결과로부터, 단일 스위칭 허브를 가진 스위치드 이더넷에서는 전송 지연이 1msec 정도로 매우 작기 때문에, 생산 시스템에서 요구되는 실시간 요구 전송 지연을 충분히 만족시킬 수 있음을 알 수 있었다.

둘째, 실시간 요구 조건이 만족되도록 적절한 크기의 스테이션 수를 사용한다면, 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷에서도 생산 시스템에서 요구되는 실시간 요구 조건이 충분히 만족될 수 있음을 알 수 있었다.

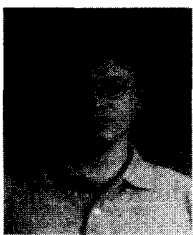
셋째, 다계층 구조를 가진 스위치드 이더넷을 이용한 NCS에서, 제어 시스템의 성능은 네트워크 지연에 의한 영향을 거의 받지 않기 때문에, 플랜트와 직접 연결된 상태에서 설계된 PID 제어기를 NCS에서의 원격 제어기로 사용하는 경우에도 주어진 설계 사양을 충분히 만족할 수 있음을 확인하였다.

마지막으로, 매우 작은 전송 지연을 가지는 스위치드 이더넷을 산업용 네트워크로 사용하게 되는 경우, 널리 확산되어 있는 이더넷 기술로 인하여 네트워크 비용의 절감이나 필드 장치들간의 호환성의 증대, 응용 계층의 개발이 용이해지는 것과 효과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 다계층 스위치드 이더넷을 디바이스 계층에 사용하는 경우 발생할 수 있는 최대 전송 지연에 대하여만 초점을 맞추었다. 그러나, 스위치드 이더넷이 실용화되기 위해서는 향후 접속 커넥터의 특성 문제나, 전송 매체와 커넥터에서의 전자기적 잡음 문제, TCP/IP 프로토콜의 원집화 등과 같은 실용화에 대한 연구가 추가되어야 할 것으로 생각됩니다. 또한, NC 프로그램 다운로드 등과 같이 네트워크 부하가 최대로 걸리는 가혹한 환경에서, 실험적으로 최대 전송 지연이 이론적인 최대 전송 지연과 유사한가를 검증하여야 할 것이다.

참고문헌

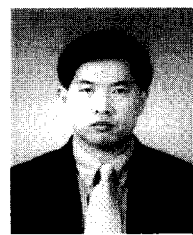
- [1] 홍승호, 손병관, "Foundatin Fieldbus 에서의 긴급 데이터의 시간지연 성능해석 및 실험적 검증," 제어자동화시스템공학 논문지, 제9권, 제7호, pp. 569-576, 2003.
- [2] 이재수, 박홍성, 홍성수, "페트리네트를 이용한 필드버스 시스템의 성능 해석," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제2권, 제3호, pp. 220-228, 1996.
- [3] IEC 61158-4, Digital data communications for measurement and control - Fieldbus for 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] W. Stalling, *Local and Metropolitan Area Networks*, 6th Ed. Macmillan Publishing Company, 2000.
- [7] 이경창, 김태준, 이석, 실시간 산업용 통신을 위한 Switched Ethernet 의 성능 평가, 제어 자동화 시스템공학논문지, 제9권, 제1호, pp. 90-98, 2003.
- [8] 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.
- [9] 이경창, 이석, Profibus-DP 를 이용한 네트워크 기반 제어 시스템의 원격 퍼지 제어, 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제8권, 제4호, pp. 281-287, 2002.
- [10] IEEE Standard 802.3, Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications, 2000.
- [11] 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.
- [12] K. Bender, *Profibus - The Fieldbus for Industrial Automation*, Prentice-Hall, pp. 4-7, 1993.
- [13] 이경창, 김인준, 이석, "공장자동화를 위한 필드버스 프로토콜의 평가," 한국정밀공학회지, 제16권 제3호, pp. 116-127, 1999.
- [14] EN 50170, Profibus Specification - Normative Parts of PROFIBUS-FMS, -DP, -PA according to the European Standard, vol 2, Profibus International, 1998.
- [15] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, pp.257-270, 1990.



이 경 창

1971년 5월 1일생. 1996년 부산대학교 생산기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1998년). 동대학원 박사(2003년). 1998년~2003년 기계공학연구정보센터 전임연구원. 2003년~현재네트워크 기반 자동화 연구센터전임 연구원.

관심분야는 필드버스, 산업용 이더넷, 차량용 네트워크, 홈 네트워크.



이 석

1961년 12월 11일생. 1984년 서울대학교 기계공학과 졸업. 펜실바니아 주립대학교 석사(1985년). 동대학원 박사(1990년). 1990년~1993년 신시내티 대학교기계공학과 조교수. 1993년~현재부산대학교 기계공학부부 교수.

관심분야는 필드버스, 차량용 네트워크, 홈네트워크, DES.