

공장자동화를 위한 토폴로지에 따른 스위칭 이더넷의 성능분석

김 명 균[†] · 박 진 원^{**}

요 약

본 논문에서는 공장자동화를 위한 제어네트워크로서의 스위칭 이더넷 네트워크의 성능을 분석한다. 스위칭 이더넷은 네트워크상에서의 충돌을 없앴으로써 실시간 데이터의 전송을 가능하게 하여 준다. 공장자동화 제어네트워크는 일반 컴퓨터 네트워크와는 달리 전송되는 데이터의 양은 적은 반면 실시간 전송을 요한다. 본 논문에서는 이더넷 스위치를 이용한 선형 및 트리 토폴로지의 네트워크에서 제어시스템이 요구하는 전송지연시간 요구를 만족하는지에 대해 분석한다.

Performance Analysis of Switched Ethernets with Different Topologies for Industrial Communications

Myung-Kyun Kim[†] · Zin-Won Park^{**}

ABSTRACT

In this paper, the performance of switched ethernet networks with different topologies as an industrial control networks is analyzed. The switched ethernet eliminated data collisions on the network and can be used to transmit real-time data. While the amount of data on the network is small compared to the computer networks, the industrial control networks require the real-time data delivery. In this paper, we analyze and compare the network performance of switched ethernet networks with linear and tree topologies whether they satisfy the real-time data delivery requirement needed to be used as the industrial control networks.

키워드 : 스위칭 이더넷(Switched Ethernet), 공장자동화(Industrial Communication), 제어 네트워크(Control Networks), 실시간 전송(Real-time Data Delivery)

1. 서 론

이더넷은 가격이 싸고 안정되고 좋은 성능을 보이기 때문에 현재 컴퓨터 네트워크에서 가장 많이 사용되고 있는 기술이다. 그러나 네트워크상에서의 메시지 충돌로 인한 예측할 수 없는 전송지연시간 특성 때문에 실시간 전송을 요하는 공장자동화용 제어네트워크에서는 사용하기 어려운 것으로 생각되어 왔다. 이더넷 스위치는 메시지들 사이의 충돌 영역을 각 네트워크 인터페이스로 제한해 줌으로써 메시지 충돌 없이 여러 개의 메시지를 동시에 전송할 수 있게 하여준다. 최근 분산제어시스템의 발전에 따라 공장환경에서 멀티미디어 데이터들에 대한 요구가 많아지고 있다 [1, 2, 5]. 이러한 멀티미디어 데이터들은 기존의 제어데이터

들에 비해 크기가 커서 많은 대역폭을 필요로 하는데 기존의 제어네트워크들은 제공하는 대역폭이 수십 Kbps에서 수 Mbps 정도로 작다. 스위칭 이더넷은 기존의 제어네트워크들에 비해 큰 대역폭을 제공하고 실시간으로 데이터를 전송할 수 있는 능력 때문에 스위칭 이더넷을 제어네트워크로 사용하려는 연구들이 많이 연구되어 왔다 [3, 4, 6]. [3]에서는 이더넷 스위치를 이용한 제어 네트워크의 가능성에 대해 분석하였고, [4]에서는 스위칭 이더넷에서 제어사이클 시간분석을 통한 제어 네트워크의 성능에 대해 분석하였고, [6]에서는 이더넷 스위치를 이용한 네트워크에서 여러종류의 제어 메시지들의 분포에 대해 시뮬레이션을 통한 스위칭 이더넷의 제어 네트워크로서의 성능에 대해 분석하였다.

본 논문에서는 공장자동화를 위한 제어네트워크로서의 스위칭 이더넷 네트워크의 성능에 대해 분석한다. 하나의 제어기와 다수의 제어장비들이 이더넷 스위치들로 연결된 제어네트워크에서 전형적인 제어시스템인 마스터/슬레이브

※ 본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 네트워크 기반 자동화연구센터 및 울산대학교 교내연구비의 지원에 의한 것입니다.
† 정 회 원 : 울산대학교 컴퓨터·정보통신공학부 교수
** 준 회 원 : 울산대학교 대학학원 컴퓨터·정보통신공학부
논문접수 : 2003년 11월 13일, 심사완료 : 2004년 1월 10일

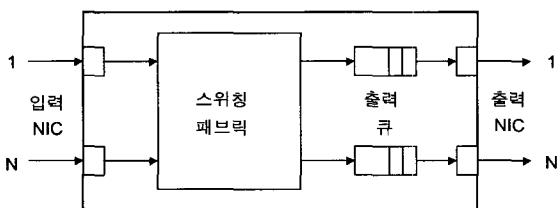
방식의 제어시스템에서 필요한 제어사이클 시간을 구하고 이 제어사이클 시간이 제어시스템에서 요구하는 시간을 만족하는지에 대해 알아본다. 제어 사이클 시간은 제어 네트워크 성능 분석에 있어 가장 중요한 요소이지만 좀더 의미 있는 분석을 위해서는 이러한 제어사이클 시간 만족을 위한 스위치에 대한 버퍼 요구량 등의 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이더넷 스위치를 이용한 네트워크 토폴로지들 중에서 많이 사용되는 선형 토폴로지 네트워크와 트리 토폴로지 네트워크에 대해 필요한 스위치의 수, 제어 사이클 시간, 필요한 스위치의 프레임버퍼 크기 등의 측면에서 성능을 비교분석한다.

본 논문의 순서로는 2장에서 이더넷 스위치 모델과 전형적인 제어시스템 구조에 대해 기술하고, 3장에서는 이더넷 스위치를 이용한 선형 토폴로지와 트리 토폴로지의 제어네트워크에서의 실시간 데이터전송 특성에 대해 분석한다. 4장에서는 3장에서 각 토폴로지별로 분석한 결과를 비교분석하고, 5장에서는 결론에 대해서 기술한다.

2. 배경 연구

2.1 이더넷 스위치 모델

이더넷 스위치는 서로 다른 여러개의 입력과 출력 사이를 동시에 연결해 주는 능력을 가지고 있어 네트워크상에서 충돌 없이 실시간으로 데이터를 전송해 줄 수 있다. 이더넷 스위치 구조는 네트워크 인터페이스들과 이들 사이를 연결경로를 제공하는 스위칭 패브릭(Switching fabric) 그리고 프레임들을 저장하기 위한 큐로 구성되어 있다. 이더넷 스위치의 스위칭 방식에는 전체 프레임을 다 받은 뒤에 경로를 결정해 전송하는 store-and-forward 스위칭 방식과 프레임 헤더를 받으면 바로 경로를 결정해 전송하는 cut-through 스위칭 방식이 있는데, 본 논문에서는 일반적인 store-and-forward 스위칭을 사용하는 스위치를 가정한다. 또한 이더넷 스위치는 도착한 프레임을 처리하는 도중 새로 도착하는 프레임에 대한 손실을 막기 위해 프레임을 저장하기 위한 큐(메모리 버퍼)를 두게 되는데, 큐를 두는 위치에 따라 입력 큐잉, 출력 큐잉, 그리고 스위치 내부 큐잉 스위치 등이 있는데, 본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되는 출력 큐잉 스위치를 가정한다.

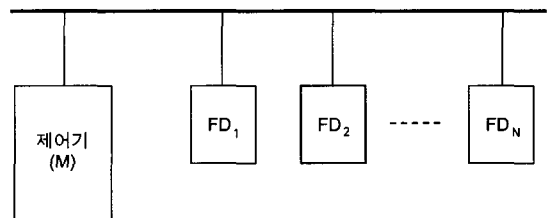


(그림 1) 이더넷 스위치 모델

(그림 1)은 일반적인 출력 큐잉 스위치의 모델이다. 스위치 내에서의 전송지연시간은 입력 NIC에 도착한 프레임이 스위칭 패브릭을 통해 스위칭되어 해당 출력큐에 저장되는데 걸리는 스위칭 지연시간과 프레임이 해당 출력큐내에서 머무르는 버퍼링 지연시간으로 구성된다. 버퍼링 지연시간은 버퍼내에서 대기하고 있는 프레임의 수와 대기하고 있는 프레임 처리하는 큐 서비스 알고리즘에 따라 가변적인데, 본 논문에서는 큐에 저장된 프레임을 도착순서에 따라 처리하는 FIFO 서비스 알고리즘을 가정한다. 따라서 한 프레임의 버퍼링 지연시간 큐에서 먼저 대기하고 있는 프레임 수에 따라 달라지게 된다. 스위칭 패브릭의 성능을 나타내는 스위칭 지연시간은 일반적으로 네트워크 인터페이스의 속도와 입력 인터페이스의 수에 따라 달라지는데, 100Mbps 인터페이스를 갖는 스위치의 경우에는 10 μ s 내외, 그리고 10Mbps 인터페이스를 갖는 스위치의 경우에는 70 μ s 내외의 고정된 지연시간을 갖는다.

2.2 공장자동화 제어시스템

공장자동화 제어시스템은 센서나 액츄에이터와 같은 제어장비들과 이들로부터 수집된 데이터들을 받아 필요한 제어를 수행하는 제어기 그리고 이들 사이의 통신을 위한 제어네트워크로 구성되어 있다[3, 4]. 공장자동화를 위한 제어네트워크는 일반적인 데이터 네트워크와는 다른 요구사항을 갖는다. 일반적으로 제어네트워크상에서 전송되는 데이터들은 데이터 네트워크에서와는 달리 보통 몇 개의 비트 또는 바이트로 전송량이 적은 반면, 주어진 시간내에 전송되어야 하는 실시간성을 갖는다. 따라서 제어네트워크는 네트워크상에서의 최대전송지연시간이 고정된 값을 갖는 특성이 매우 중요하다. 본 논문에서는 이더넷 스위치를 이용한 제어네트워크의 전송지연시간 특성을 분석하기 위하여 (그림 2)와 같은 자동화 제어시스템 환경을 가정한다.



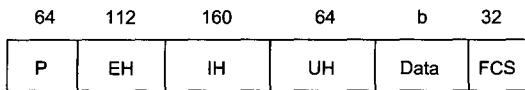
(그림 2) 자동화 제어시스템 환경

제어시스템에는 하나의 제어기(master : M)와 N개의 제어장비(Field Device : FD)들이 제어네트워크를 통해 연결되어 있다. 하나의 제어사이클은 크게 두 부분으로 구성된다. 먼저 각 제어장비(FD)들은 b비트의 입출력을 가지며 이들은 수집된 데이터들을 제어네트워크를 통해 제어기로 보낸다. 제어기는 제어장비들로부터 데이터를 받으면 제어

프로그램을 수행하여 제어를 위한 제어데이터를 생성하여 해당 제어장비에게 보내게 된다. 각 제어장비들은 일정한 주기로 데이터를 수집하여 제어기로 전송하므로 원활한 제어를 위해서는 제어사이클 시간이 제어장비들의 데이터 수집 주기보다 작아야 하고, 이를 위해서 제어네트워크는 전송되는 데이터들의 최대전송지연시간이 고정된 시간을 갖도록 보장해야 한다. 따라서 본 논문에서는 이더넷 스위칭을 이용한 네트워크들의 제어네트워크로서의 성능을 분석하기 위해 (그림 2)와 같은 환경에서 제어사이클 시간을 이용하여 분석하고자 한다.

3. 스위칭 이더넷의 성능분석

본 장에서는 이더넷 스위칭을 이용한 네트워크들의 제어네트워크로서의 성능분석에 대해 기술한다. 먼저 단일 이더넷 스위치에서의 성능을 분석한 후, 여러 개의 이더넷 스위치로 구성된 선형 토폴로지 및 트리 토폴로지의 스위칭 이더넷 네트워크들의 성능에 대해 분석한다. 성능분석을 위해 각 스위치들은 d개의 포트를 가지고 있고, 제어네트워크를 통해 전송되는 데이터는 UDP/IP 프로토콜을 통해 전송되며 (그림 3)과 같은 이더넷 프레임 형식을 갖는다.



P : Preamble EH : Ethernet 헤더
 IH : IP 헤더 UH : UDP 헤더
 FCS : Frame Check Sequence

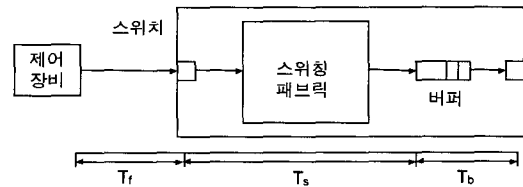
(그림 3) 이더넷 프레임 형식

전송되는 프레임은 b비트의 데이터 외에 헤더들과 프리앰블, 그리고 FCS를 포함하여 432비트의 오버헤드를 갖는다. 제어장비들로부터 제어기로의 데이터 전송은 각 제어장비들로부터 b비트의 데이터가 일대일 전송을 통해 이루어지며, 제어기로부터 제어장비로의 전송은 각 제어장비들로 b비트의 데이터가 일대일 전송을 통해 이루어지거나 또는 데이터 전송 오버헤드를 줄이기 위해 전체 제어장비로 전송되는 제어데이터들을 하나의 멀티캐스트 패킷을 통해 전송할 수도 있다. 이더넷 상에서 전송되는 프레임은 최소 크기가 576비트 이상이 되어야 한다. 따라서 전송되는 프레임의 크기는 전송하는 방식에 따라 다음과 같이 구해진다.

일대일전송 프레임 : $F_u = \max(432 + b, 576)$
 멀티캐스트전송 프레임 : $F_m = \max(432 + Nb, 576)$

하나의 프레임을 인접 노드 사이에 전송하는데 걸리는 한 홉(hop) 전송시간은 (그림 4)에서와 같이 노드에서 스위치 입력 NIC까지 전송하는데 걸리는 프레임전송시간 (T_f)

과 스위치 입력 NIC에 도착한 프레임이 스위칭패브릭을 통해 나갈 출력 포트의 출력버퍼에 저장되는데 걸리는 스위칭 지연시간(T_s) 그리고 프레임이 출력버퍼에서 머무르는 버퍼링 지연시간(T_b)으로 구성된다. 여기서 프레임전송시간은 프레임 길이에 비례하여 증가하며 다음과 같이 구해진다.



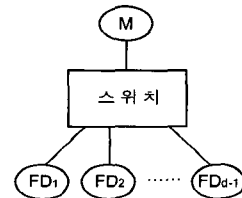
(그림 4) 스위치에서 한 홉 전송 시간

일대일전송 프레임전송시간 : $T_{uf} = F_u \cdot t_b + IFG$
 멀티캐스트전송 프레임전송시간 : $T_{mf} = F_m \cdot t_b + IFG$

여기서 t_b 는 한 비트 전송시간이고, IFG(Inter-Frame Gap)는 이더넷 프레임 사이의 최소간격을 나타내는데, IFG는 $(96 \cdot t_b)$ 이다.

3.1 단일 이더넷 스위치의 성능분석

제어장비의 수가 (d - 1) 이하일 경우에는 제어기와 전체 제어장비들이 (그림 5)와 같이 하나의 스위치를 통해 연결될 수 있다.



(그림 5) 하나의 스위치를 이용한 제어네트워크 시스템

(그림 5)와 같이 하나의 스위치를 통해 제어기와 모든 제어장비들이 연결되는 제어시스템에서의 제어사이클은 제어장비들이 수집한 데이터를 제어기에 전송하는데 걸리는 시간과 제어기에서 수신된 데이터를 처리하여 새로운 제어데이터를 각 제어장비에 전송하는데 걸리는 시간으로 구성된다.

3.1.1 제어장비에서 제어기로 전송하는데 걸리는 시간 : $T_{FD \rightarrow M}$

먼저 각 제어장비들의 데이터를 수집하여 동시에 프레임을 전송하여 이 프레임들이 스위치의 제어기 포트의 출력버퍼에 저장되는데 걸리는 시간은 $(T_{uf} + T_s)$ 이다. 제어기 포트의 출력버퍼에 저장된 프레임들이 순서대로 하나씩 제어기에 전송되므로 전체 프레임이 다 전송되는데 걸리는 시간은 $(N \cdot T_{uf})$ 이 된다. 따라서 제어장비에서 제어기로 프레임

을 모두 전송하는데 걸리는 시간은

$$T_{FD \rightarrow M} = (N + 1) \cdot T_{uf} + T_s \quad (1)$$

이다.

3.1.2 제어기에서 제어장비로 전송하는데 걸리는 시간 :

$$T_{M \rightarrow FD}$$

제어기는 제어장비들로부터 데이터가 전송되면 처리를 하고 새 제어데이터를 바로 해당 제어장비에 전송하게 된다. 또한 스위치는 전이중방식으로 제어장비로부터 데이터를 수신하는 것과 동시에 해당 제어장비로 새 제어데이터를 송신할 수 있으므로 마지막으로 받은 제어장비의 데이터를 처리하여 이를 해당 제어장비에 전송하는데 걸리는 시간은

$$T_{M \rightarrow FD} = 2 \cdot T_{uf} + T_s \quad (2)$$

이다. 따라서 단일 스위치를 통해 연결된 제어시스템에서의 제어기에서 제어장비로 제어데이터 전송을 일대일전송을 통해 할 경우, 제어사이클 시간은 식 (1)과 식 (2)를 합하면

$$\begin{aligned} T_{UC} &= T_{FD \rightarrow M} + T_{M \rightarrow FD} \\ &= (N + 3) \cdot T_{uf} + 2 \cdot T_s \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다.

제어기는 헤더 오버헤드를 줄이기 위해 각 제어장비들에게 보내는 제어데이터를 하나의 멀티캐스트 프레임에 캡슐화해서 보낼 수 있다. 멀티캐스트전송의 경우에는 제어기는 제어장비들로부터 데이터를 다 받은 후에 각 제어장비들에게 보내는 데이터를 멀티캐스트 프레임을 통해 전송한다. 이 경우 제어기에서 제어장비들에게 보내는데 걸리는 시간은

$$T_{M \rightarrow FD} = 2 \cdot T_{mf} + T_s \quad (4)$$

가 된다. 따라서 단일 스위치를 통해 연결된 제어시스템에서 제어기에서 제어장비로 제어데이터 전송을 멀티캐스트 전송을 통해 할 경우, 제어사이클 시간은 식 (1)과 식 (4)를 합하면

$$T_{MC} = (N + 1) \cdot T_{uf} + 2 \cdot T_{mf} + 2 \cdot T_s \quad (5)$$

가 된다.

3.1.3 필요한 출력버퍼 크기

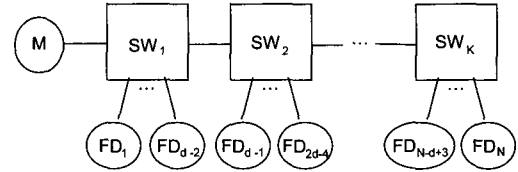
제어데이터들이 손실없이 전송되기 위해서는 같은 출력포트로 전송되는 모든 프레임을 해당 출력버퍼에 저장할 수 있어야 한다. (그림 4)와 같이 제어기와 N개의 제어장비들이 하나의 스위치를 통해 연결된 제어시스템에서는 제어장비로부터 제어기로 전송되는 데이터가 모두 제어기로 동시에 전송되어야 하므로 제어기의 출력포트의 출력버퍼는

최대 N개의 프레임을 저장할 수 있는 공간이 필요하다. 따라서 요구되는 출력버퍼의 크기는

$$L_B = N \cdot F_u \leq (d - 1) \cdot F_u \quad (6)$$

가 된다.

3.2 선형 토폴로지를 갖는 스위칭 이더넷의 성능분석



(그림 6) 선형 토폴로지를 갖는 스위칭 이더넷.

제어장비가 (d-1)개를 초과할 경우 제어기와 전체 제어장비를 연결하기 위해서는 1개 이상의 스위치가 필요하다. 전체 제어장비를 연결하기 위해서 여러 가지의 토폴로지를 가질 수 있는데, 본 논문에서는 선형 토폴로지와 트리 토폴로지에 대해 성능분석을 하고자 한다. 선형 토폴로지는 (그림 6)과 같이 여러 개의 스위치를 선형적으로 연결하고 각 스위치에 제어기와 제어장비를 연결하는 구조를 갖는다. 각 스위치들은 (d-2)개의 제어장비를 연결할 수 있고 마지막 스위치만 (d-1)개의 제어장비를 연결할 수 있으므로, 전체 N 개의 제어장비를 연결하기 위해 필요한 스위치의 수는

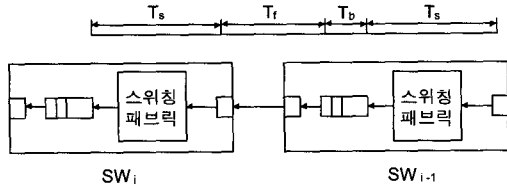
$$K = \lceil (N - 1) / (d - 2) \rceil \quad (7)$$

가 된다.

3.2.1 제어장비에서 제어기로 전송하는데 걸리는 시간 :

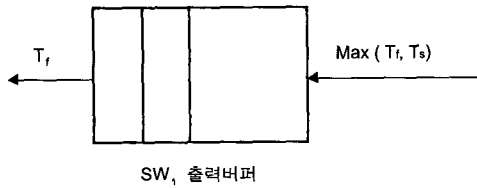
$$T_{FD \rightarrow M}$$

먼저 각 제어장비들은 수집한 제어데이터를 연결된 스위치에 전송하고 이 데이터들은 스위칭패브릭을 통해 제어기 방향의 출력포트의 출력버퍼에 저장된다. 제어장비의 제어데이터들이 스위치의 스위칭패브릭을 통해 출력포트에 저장되는데 걸리는 시간은 $(T_{uf} + T_s)$ 이다. 따라서 $(T_{uf} + T_s)$ 시간 뒤에 각 스위치의 출력버퍼는 (d-2)개의 프레임이 갖게 된다. 각 스위치의 출력버퍼에 저장된 프레임들은 스위치 SWk에서 스위치 SW1 그리고 제어기 M까지 인접한 스위치들을 통해 파이프라인 형태로 동시에 전송된다. 또한 하나의 스위치내에서는 입력포트에 도착한 프레임이 스위칭패브릭을 통해 스위칭되어 출력버퍼에 저장되는 것과 출력버퍼의 헤드에 있는 프레임이 다음 스위치로 전송되는 것이 동시에 이루어진다. (그림 7)은 스위치 SWk에서 스위치 SW1까지에서 인접한 두 스위치 SWi-1과 스위치 SWi 사이의 전송을 나타낸다.



(그림 7) 인접한 두 스위치 사이의 전송

SW_i의 입력포트에 도착한 프레임이 스위칭패브릭을 통해 스위칭되어 출력버퍼에 저장되는 동안, 스위치 SW_{i-1}의 출력버퍼의 헤드에 있는 프레임이 스위치 SW_i의 입력포트에 전송되게 된다. 각 스위치는 출력버퍼만을 사용하므로 프레임의 손실 없이 프레임이 출력버퍼에서 다음 스위치의 입력포트로 또는 입력포트에서 스위치의 출력버퍼로 전송되기 위한 각 프레임의 한 단계 이동시간(T_p)은 max(T_{ur}, T_s)이 된다. 또한 (그림 8)에서와 같이 스위치 SW_i의 출력버퍼에서 보면 제어기로 T_{ur} 시간마다 하나의 프레임이 나가고 동시에 T_p 시간마다 하나의 프레임이 들어온다.



(그림 8) 스위치 SW_i의 출력버퍼에서의 프레임 전송

스위치 SW_i의 출력버퍼는 (T_{ur} + T_s) 시간 뒤에 (d-2)개의 프레임을 갖게 되고, 출력버퍼가 비어있지 않는 한 T_{ur} 시간 마다 하나의 프레임을 제어기에 전송하게 되고, 출력버퍼가 비게 되면 이 때부터 T_p 시간마다 하나의 프레임을 제어기에 전송하게 된다.

T_s ≤ T_{ur}일 경우에는 전체 프레임이 다 전송될 때까지 스위치 SW_i의 출력버퍼는 비지않게 되고, N개의 프레임이 T_{ur} 시간 마다 하나씩 제어기로 전송되므로 전체 프레임이 제어기로 다 전송되는데 걸리는 시간은

$$T_{FD-M} = (T_{ur} + T_s) + N \cdot T_{ur} = (N + 1) \cdot T_{ur} + T_s \quad (8)$$

가 된다.

T_s > T_{ur}일 경우에는 전체 프레임이 다 전송되기 전에 스위치 SW_i의 출력버퍼는 비게 될 수 있는데, SW_i의 출력버퍼의 프레임은 (T_{ur} + T_s) 시간 뒤에는 (d-2)개가 되고, 이 때부터 출력버퍼는 T_{ur} 시간에 하나 나갈 동안(T_{ur}/T_p) 개씩 들어오게 된다. 따라서 출력버퍼가 비지 않고 연속해서 나갈 수 있는 프레임의 수를 X라 하면, X는

$$X \cdot (1 - T_{ur}/T_p) \geq (d - 2)$$

를 만족하는 최소의 정수가 된다. 따라서

$$X = \max(\lceil (d - 2) \cdot T_{ur} / (T_p - T_{ur}) \rceil, N) \quad (9)$$

이 된다. 따라서 X개의 프레임은 T_{ur} 시간마다 하나씩 제어기로 전송되고 (N-X)개의 프레임은 T_p 시간마다 하나씩 제어기로 전송되게 된다. 그러므로 T_s > T_{ur}일 경우, 전체 프레임이 제어기로 다 전송되는데 걸리는 시간은

$$T_{FD-M} = (T_{ur} + T_s) + X \cdot T_{ur} + (N - X) \cdot T_p \quad (10)$$

가 된다.

3.2.2 제어기에서 제어장비로 전송하는데 걸리는 시간 :

$$T_{M-FD}$$

먼저 일대일전송을 통해 각 제어장비에 대한 제어데이터를 따로따로 보내는 경우, 제어기는 제어장비들로부터 데이터가 전송되면 처리를 하고 새 제어데이터를 바로 해당 제어장비에 전송하게 되는데, 마지막 N번째 받은 제어장비에 대한 제어데이터가 가장 나중에 전송될 것이다. 따라서 마지막 전송되는 제어데이터를 받을 제어장비가 제어기에서 가장 멀리 떨어진 스위치 SW_K에 속해있을 경우, 해당 제어장비에 도착하는데 걸리는 시간은

$$T_{M-FD} = (K + 1) \cdot T_{ur} + K \cdot T_s \quad (11)$$

이다.

헤더 오버헤드를 줄이기 위해 제어데이터를 멀티캐스트 전송을 통해 보내는 경우에는, 제어기는 전체 데이터를 다 수신한 뒤, 각 제어장비에 보낼 새 제어데이터를 생성하여 멀티캐스트 프레임에 캡슐화하여 보내게 된다. 제어기가 보낸 멀티캐스트 프레임이 각 제어장비에 도착하게 되는데, 스위치 SW_K에 속하는 제어장비들에게 제일 늦게 도착하게 된다. 따라서 제어기가 보낸 제어데이터 멀티캐스트 프레임이 도착하는데 가장 많이 걸리는 시간은

$$T_{M-FD} = (K + 1) \cdot T_{mf} + K \cdot T_s \quad (12)$$

가 된다.

따라서 선형 토폴로지의 스위칭 이더넷에서 제어기에서 제어장비로 제어데이터 전송을 일대일전송과 멀티캐스트전송을 할 경우, 제어사이클 시간은 식 (10), 식 (11), 식 (12)로부터 각각 다음과 같이 구해진다.

$$T_{UC} = (K + 2) \cdot T_{ur} + (K + 1) \cdot T_s + (d - 2)(T_p / (T_p - T_{ur})) \cdot T_{ur} + [N - (d - 2)(T_p / (T_p - T_{ur}))] \cdot T_p \quad (13)$$

$$T_{MC} = T_{ur} + (K + 1) \cdot T_{mf} + (K + 1) \cdot T_s + (d - 2)(T_p / (T_p - T_{ur})) \cdot T_{ur} + [N - (d - 2)(T_p / (T_p - T_{ur}))] \cdot T_p \quad (14)$$

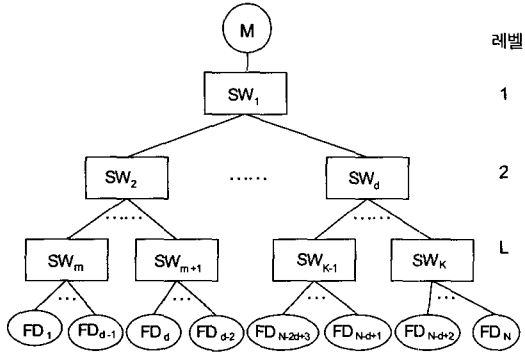
3.2.3 필요한 출력버퍼 크기

(그림 6)과 같은 선형 토폴로지의 스위칭 이더넷에서 각 스위치들의 출력포트의 버퍼는 $(T_{ur} + T_s)$ 시간 뒤에 $(d-2)$ 개씩을 갖게 되고, 이 후 SW_2 에서 SW_K 까지의 스위치들은 T_p 시간마다 하나씩 들어가면서 동시에 하나씩 나가게 되므로 버퍼내의 프레임 수는 변하지 않는다. 또한 스위치 SW_1 의 출력버퍼는 T_{ur} 시간마다 하나씩 나가게 되고 T_p 시간마다 하나씩 들어오게 되는데, $T_{ur} \leq T_p$ 이므로 버퍼내의 프레임 수는 늘어나지 않는다. 따라서 각 스위치들에서 요구되는 출력버퍼의 최대크기는

$$L_B = (d - 2) \cdot F_u \quad (15)$$

이다.

3.3 트리 토폴로지를 갖는 스위칭 이더넷의 성능분석



(그림 9) 트리 토폴로지를 갖는 스위칭 이더넷

트리 토폴로지를 갖는 스위칭 이더넷은 현재 LAN에서 가장 많이 사용되고 있는 구조로 (그림 9)와 같이 스위치들을 트리 토폴로지로 연결하고 제어기는 루트노드의 스위치에 연결하고 제어장비들은 리프노드의 스위치에 연결하는 구조를 갖는다. 각 스위치들은 $(d-1)$ 개의 자식 스위치들에 연결되고 리프노드의 스위치에 제어장비들이 순서대로 연결되므로, 트리의 깊이가 최소가 되도록 전체 N 개의 제어장비를 연결하기 위해 필요한 트리의 깊이 L 은 다음과 같이 구해진다.

$$L = \lceil \log_{d-1} N \rceil \quad (16)$$

전체 N 개의 제어장비를 연결하기 위하여 필요한 스위치의 수를 구하기 위해 먼저 $(L-1)$ 깊이를 갖는 완전 $(d-1)$ -ary 트리에서 수용할 수 있는 제어장비의 수는 $(d-1)^{L-1}$ 이다. $(L-1)$ 레벨의 스위치에 연결되지 못하는 제어장비는 $(N - (d-1)^{L-1})$ 개인데, 나머지를 연결하기 위하여 L 레벨에 스위치를 하나씩 추가할 때 추가로 연결할 수 있는 제어장비들은 $(d-2)$ 개씩이다. 따라서 전체 N 개의 제어장비를 연결하기 위해 L 레벨에 추가되는 스위치를 P 개라고 하면 P 는

$$N - (d-1)^{L-1} - P \cdot (d-2) \leq 0$$

를 만족하는 최소의 정수가 된다. 따라서

$$P = \lceil (N - (d-1)^{L-1}) / (d-2) \rceil \quad (17)$$

가 되고, N 개의 제어장비를 모두 연결하기 위하여 필요한 스위치 수는

$$K = 1 + (d-1) + \dots + (d-1)^{L-2} + (N - (d-1)^{L-1}) / (d-2) \\ = \lceil [(d-1)^L - 1] / (d-2) + (N - (d-1)^{L-1}) / (d-2) \rceil \quad (18)$$

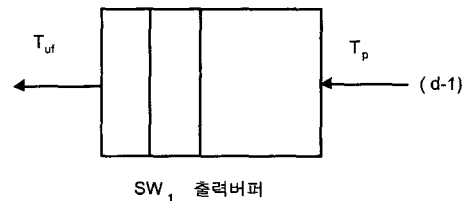
이다.

N 개의 제어장비를 연결하는 트리 토폴로지를 갖는 스위칭 이더넷에서 제어장비들은 레벨 $(L-1)$ 과 레벨 L 의 스위치들에 연결된다. 제어기와 제어장비들 사이에 하나의 프레임 전송을 하는데 걸리는 시간은 레벨 $(L-1)$ 스위치에 연결된 제어장비들 보다는 레벨 L 스위치에 연결된 제어장비들의 전송지연시간이 더 길다. 따라서 본 논문에서는 분석의 편의를 위해 (그림 9)에서와 같이 모든 제어장비가 레벨 L 스위치에 연결되어 있는 것으로 가정한다.

3.3.1 제어장비에서 제어기로 전송하는데 걸리는 시간 :

$$TFD \rightarrow M$$

먼저 각 제어장비들이 전송하는 제어데이터 프레임들은 $(T_{ur} + T_s)$ 시간 뒤에 레벨 L 스위치들의 상단포트의 출력버퍼에 저장되고, $2 \cdot (T_{ur} + T_s)$ 시간 뒤에는 레벨 L 스위치들의 출력버퍼에 저장되어 있는 프레임들은 하나씩 레벨 $(L-1)$ 스위치들의 상단포트의 출력버퍼에 저장되게 된다. 이렇게 하여 $L \cdot (T_{ur} + T_s)$ 시간 뒤에는 레벨 1 스위치의 상단포트의 출력버퍼에 $(d-1)$ 개의 프레임이 저장되게 된다. 이 때부터 레벨 1 스위치 SW_1 의 출력버퍼에서는 (그림 10)과 같이 T_{ur} 시간에 하나의 프레임이 제어기로 전송되고 T_p 시간에 $(d-1)$ 개씩 프레임이 들어오게 된다.



(그림 10) 스위치 SW_1 의 출력버퍼에서의 프레임 전송

스위치 SW_1 의 출력버퍼에 프레임이 들어오는 속도 $((d-1)/T_p)$ 가 출력버퍼로부터 나가는 속도 $(1/T_{ur})$ 보다 작을 경우에, 즉 $(T_p > (d-1) \cdot T_{ur})$ 일 경우에는 전체 N 개의 프레임이 제어기에 다 전송되기 전에 출력버퍼가 비는 경우가 발생할 수가 있다. SW_1 의 출력버퍼의 프레임은 $L \cdot (T_{ur} + T_s)$ 시간 뒤에는 $(d-1)$ 개가 되고, 이 때부터 출력버퍼는 T_{ur} 시

간에 하나 나갈 동안 $(d-1) \cdot (T_{uf}/T_p)$ 개씩 들어오게 된다. 따라서 출력버퍼가 비지 않고 연속해서 나갈 수 있는 프레임의 수를 X 라 하면, X 는

$$X \cdot (1-(d-1) \cdot T_{uf}/T_p) \geq (d-1)$$

를 만족하는 최소의 정수가 된다. 여기서 X 를 구하면

$$X = \max(\lceil (d-1) \cdot T_p / (T_p + T_{uf} - d \cdot T_{uf}) \rceil, N) \quad (19)$$

이 된다. $L \cdot (T_{uf} + T_s)$ 시간 뒤부터 스위치 SW_1 의 출력버퍼는 X 개의 프레임은 T_{uf} 시간 마다 하나씩 제어기로 전송되고 $(N-X)$ 개의 프레임은 T_p 시간 마다 하나씩 제어기로 전송되게 된다. 그러므로 $(T_p > (d-1) \cdot T_{uf})$ 일 경우, 전체 프레임이 제어기로 다 전송되는데 걸리는 시간은

$$T_{FD \rightarrow M} = L \cdot (T_{uf} + T_s) + X \cdot T_{uf} + (N - X) \cdot T_p \quad (20)$$

가 된다.

한편 $(T_p \leq (d-1) \cdot T_{uf})$ 일 경우에는, SW_1 의 출력버퍼가 비게 되는 경우가 발생하지 않으므로 전체 N 개의 프레임이 모두 각각 T_{uf} 시간 마다 하나씩 제어기로 전송되게 된다. 따라서 전체 프레임이 제어기로 다 전송되는데 걸리는 시간은

$$T_{FD \rightarrow M} = L \cdot (T_{uf} + T_s) + N \cdot T_{uf} \quad (21)$$

가 된다.

3.3.2 제어기에서 제어장비로 전송하는데 걸리는 시간 : $TM \rightarrow FD$

일대일전송을 통해 제어데이터를 보내는 경우, 제어기는 제어장비들로부터 제어데이터가 도착하면 바로 처리하여 새 제어데이터를 보내게 된다. 따라서 제어기가 제어장비들로 보낸 각 제어데이터 프레임이 해당 제어장비에 도착하는데 걸리는 시간은

$$T_{M \rightarrow FD} = L \cdot (T_{uf} + T_s) + T_{mf} \quad (22)$$

가 된다. 따라서 일대일전송의 경우 제어사이클시간은 식 (20), 식 (21), 식 (22)로부터

$$\begin{aligned} T_{UC} &= T_{FD \rightarrow M} + T_{M \rightarrow FD} \\ &= 2 \cdot L \cdot (T_{uf} + T_s) + (X + 1) \cdot T_{uf} + (N - X) \cdot T_p \end{aligned} \quad (23)$$

또는

$$\begin{aligned} T_{UC} &= T_{FD \rightarrow M} + T_{M \rightarrow FD} \\ &= 2 \cdot L \cdot (T_{uf} + T_s) + (N + 1) \cdot T_{uf} \end{aligned} \quad (24)$$

이다.

그러나 멀티캐스트전송을 통해 제어데이터를 보내는 경우, 제어기는 제어장비들로부터 마지막 제어데이터가 도착

하면 각 제어장비들을 위한 새 제어데이터를 하나의 멀티캐스트 프레임에 캡슐화하여 보내게 된다. 따라서 이 멀티캐스트 제어데이터 프레임이 해당 제어장비에 도착하는데 걸리는 가장 긴 시간은

$$T_{M \rightarrow FD} = L \cdot (T_{mf} + T_s) + T_{mf} \quad (25)$$

가 된다. 따라서 멀티캐스트전송의 경우 제어사이클시간은 식 (20), 식 (21), 식 (25)로부터

$$\begin{aligned} T_{MC} &= T_{FD \rightarrow M} + T_{M \rightarrow FD} \\ &= (L+X) \cdot T_{uf} + (L+1) \cdot T_{mf} + 2L \cdot T_s + (N - X) \cdot T_p \end{aligned} \quad (26)$$

또는

$$\begin{aligned} T_{MC} &= T_{FD \rightarrow M} + T_{M \rightarrow FD} \\ &= (L + N) \cdot T_{uf} + (L + 1) \cdot T_{mf} + 2 \cdot L \cdot T_s \end{aligned} \quad (27)$$

이다.

3.3.3 필요한 출력버퍼 크기

(그림 9)와 같은 트리 토폴로지를 갖는 스위칭 이더넷에서 레벨 1 스위치 SW_1 의 출력버퍼는 $L \cdot (T_{uf} + T_s)$ 시간 뒤에 $(d-1)$ 개의 프레임을 갖게 되고, 이 후 T_{uf} 시간마다 하나씩 나가게 되고 T_p 시간마다 $(d-1)$ 개씩 들어오게 된다. $(N-d+1)$ 개의 프레임이 한번에 $(d-1)$ 개씩 들어오게 되면 $\lceil (N-d+1)/(d-1) \rceil$ 번에 걸쳐 들어오게 되고 따라서 전체 N 개의 프레임이 다 들어오게 되는데 걸리는 시간은

$$\lceil (N-d+1)/(d-1) \rceil \cdot T_p$$

이 된다. 이 동안 스위치 SW_1 의 출력버퍼에서는 T_{uf} 시간마다 하나의 프레임이 제어기로 전송되므로 이 출력버퍼에 저장되는 최대 프레임 수는

$$N - \lceil \lceil (N-d+1)/(d-1) \rceil \cdot T_p / T_{uf} \rceil$$

이 된다. 따라서 스위치 SW_1 에서 요구되는 최대 출력버퍼의 크기는

$$L_{BI} = (N - \lceil \lceil (N-d+1)/(d-1) \rceil \cdot T_p / T_{uf} \rceil) \cdot F_u \quad (28)$$

이 된다.

한편 SW_2 에서 SW_K 까지의 스위치들의 경우에는 레벨 2의 스위치들에서 가장 많은 프레임들이 버퍼에 쌓이게 되는데, 각각 초기 $(d-1)$ 개의 프레임을 갖게 되고, 이후 T_p 시간마다 1개씩 상위의 스위치로 전송되고, 동시에 $(d-1)$ 개씩 하위의 스위치들로부터 들어오게 된다. 트리가 균형잡힌 (balanced) 트리이므로 레벨 2의 각 스위치들은 각각 $\lceil N/(d-1) \rceil$ 개씩 프레임을 받게 되는데, 한번에 $(d-1)$ 개씩 들어오므로, 전체 $\lceil N/(d-1) \rceil$ 개의 프레임을 다 받게 되는데 걸

리는 횟수는 $\lceil N/(d-1)^2 \rceil$ 이다. 그런데 레벨 2의 스위치들은 처음에 (d-1)개가 들어오고 이후에는 한번에 (d-1)개씩 들어오고 동시에 1개씩 나가게 되므로 전체 $\lceil N/(d-1)^2 \rceil$ 번에 걸쳐 출력버퍼에 쌓이는 프레임 수는

$$(d-1) + \lceil N/(d-1)^2 \rceil \cdot (d-2)$$

이 된다. 따라서 스위치 SW₂에서 요구되는 최대 출력버퍼의 크기는

$$LB_2 = [(d-1) + \lceil N/(d-1)^2 \rceil \cdot (d-2)] \cdot F_u \quad (29)$$

이다. 그러므로 트리 토폴로지를 갖는 스위칭 이더넷에서 스위치들에 요구되는 최대 출력버퍼 크기는 식 (28)와 식 (29)로부터

$$L_B = \max(L_{B1}, L_{B2}) \quad (30)$$

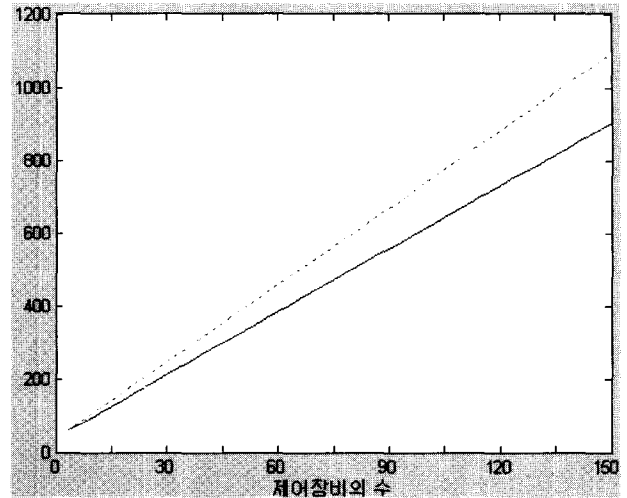
이 된다.

4. 선형 토폴로지와 트리 토폴로지의 스위칭 이더넷의 성능 비교분석

본 장에서는 3장에서 구한 선형 토폴로지와 트리 토폴로지의 스위칭 이더넷 사이의 성능을 비교 분석한다. 제어 데이터의 크기는 8비트, 32비트, 그리고 64비트를 가정하였다. 따라서 일대일전송의 경우 프레임 길이는 576비트이고, 멀티캐스트전송의 경우 프레임의 길이는 $(432 + b \times N)$ 비트의 크기를 갖게 된다. 네트워크 대역폭은 100Mbps이며 스위치 내의 스위칭 딜레이(T_s)는 11μs[4]로 가정하였다.

(그림 11)은 단일 스위치의 경우 일대일전송과 멀티캐스트전송의 경우에 대한 제어사이클 시간을 나타낸다. 제어장비의 수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하고 멀티캐스트전송의 경우 약간 더 많은 제어사이클 시간이 필요함을 알

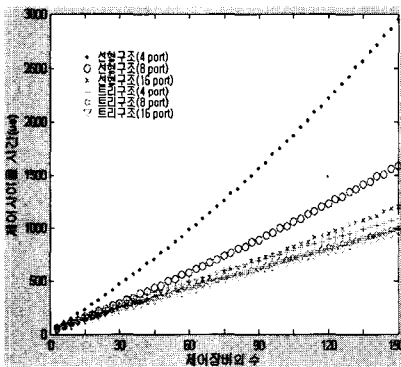
수 있다.



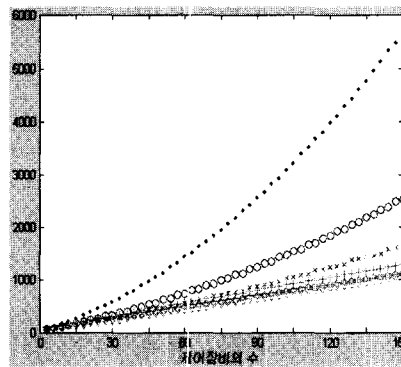
(그림 11) 단일스위치의 경우 제어사이클 시간 비교 (제어데이터 : 64비트)

(그림 12)는 일대일전송시의 선형 토폴로지와 트리 토폴로지의 네트워크에 대한 제어사이클시간을 비교한 그래프이다. 스위치들은 각각 4포트, 8포트, 16포트들을 가정하였고, 제어장비의 수는 최대 150개까지를 가정하였다. 일대일전송의 경우 이더넷 최소길이 프레임에 전송할 수 있는 데이터 길이는 368비트이고, 본 논문에서는 제어데이터들의 길이가 64비트이하의 작은 길이의 데이터를 가정하였으므로 전송되는 각 프레임의 길이는 최소 프레임 길이인 576비트가 된다. 각각의 경우에 대해 제어장비의 수가 증가함에 따라 제어사이클 시간이 선형적으로 증가하고, 트리 토폴로지 네트워크가 선형 토폴로지 네트워크보다 작은 사이클 시간을 나타내었다.

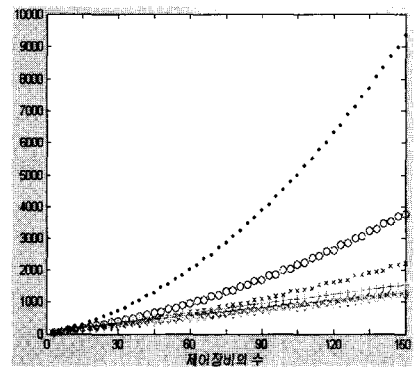
(그림 13)은 멀티캐스트전송시의 선형 토폴로지와 트리 토폴로지의 네트워크에 대한 제어사이클시간을 비교한 그



(a) 제어데이터 : 8 비트



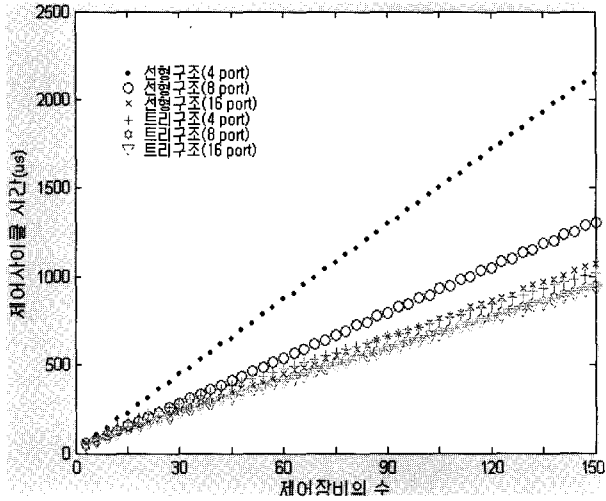
(b) 제어데이터 : 16 비트



(c) 제어데이터 : 64 비트

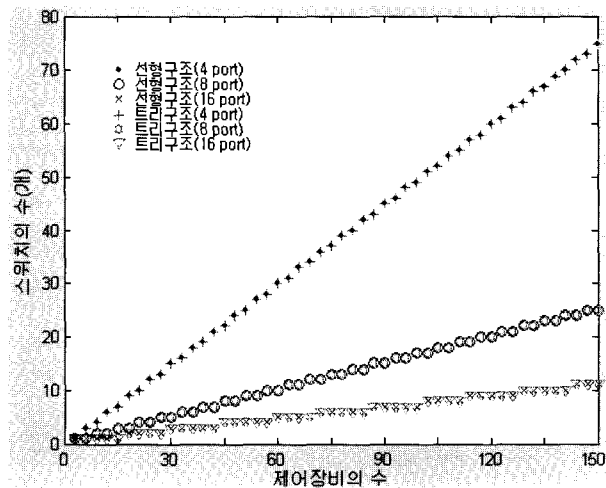
(그림 12) 멀티캐스트 전송시 제어사이클 시간 비교

래프이다. 일대일전송과 마찬가지로 제어장비의 수가 증가함에 따라 제어사이클 시간이 증가하고, 트리 토폴로지 네트워크가 선형 토폴로지 네트워크에 비해 작은 제어사이클 시간을 가진다.

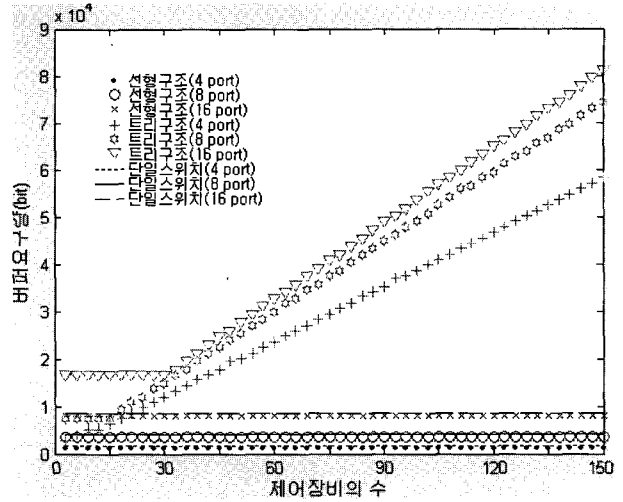


(그림 13) 일대일전송시 제어사이클 시간 비교

(그림 14)와 (그림 15)는 선형 토폴로지와 트리 토폴로지의 네트워크에 대해 필요한 스위치의 수와 각 스위치에서 필요로 하는 버퍼의 크기를 비교한 그래프이다. 트리 토폴로지 네트워크는 선형 토폴로지에 비해 전체적으로 제어사이클 시간은 작지만 요구되는 버퍼 크기가 훨씬 많음을 알 수 있다. 버퍼크기에 있어 선형 토폴로지는 연속되어 있는 스위치들 사이에 파이프라인 방식으로 전송되므로 요구되는 버퍼의 크기는 단일 스위치 구조와 마찬가지로 요구되는 양이 고정되는 반면에, 트리 토폴로지의 경우에는 루트 스위치에서 병목현상을 가지게 되어 제어장비의 수가 증가함에 따라 요구되는 버퍼의 양이 크게 증가함을 알 수 있다.



(그림 14) 스위치 요구량 비교



(그림 15) 버퍼 요구량 비교

5. 결론

본 논문에서는 이더넷 스위치를 이용한 네트워크들 중에서 선형 토폴로지와 트리 토폴로지의 제어네트워크들의 성능에 대해 제어사이클 시간, 각 스위치에서 요구되는 버퍼의 크기 측면에서 분석하였다. 선형 토폴로지는 기존의 제어네트워크들의 토폴로지와 유사하고 또한 요구되는 스위치내의 버퍼 크기가 작다는 장점을 가지지만 제어사이클 시간이 트리 토폴로지에 비해 크다. 반면 트리 토폴로지 네트워크는 선형 토폴로지에 비해 제어사이클 시간이 작지만 중앙집중형의 케이블링으로 요구되는 케이블 양이 더 많고, 또한 요구되는 스위치 버퍼의 크기가 크다. 일대일전송에 대해 선형 토폴로지의 경우에는 제어장비의 수가 150개 일 경우 1ms 정도의 제어사이클 시간을 가졌고 트리 토폴로지의 경우에는 스위치의 포트 수에 따라 1~2.5ms 정도의 제어사이클 시간을 나타내었다. 또한 멀티캐스트 전송에 대해 선형 토폴로지의 경우에는 제어장비의 수가 150개 일 경우 스위치의 포트 수에 따라 1~1.5ms 정도의 제어사이클 시간을 나타낸 반면, 트리 토폴로지의 경우에는 스위치의 포트 수에 따라 제어데이터의 크기가 8비트일 경우에는 1~3ms 정도에서 제어데이터의 크기가 64비트일 경우에는 1~3ms 정도, 2~10ms 정도의 제어사이클 시간을 나타내었다. 각각의 경우 대부분 제어시스템에서 요구하는 10ms 이하의 제어사이클 시간을 나타내어 트리 토폴로지와 선형 토폴로지의 스위칭 이더넷들이 제어네트워크로서 사용될 수 있음을 보여준다. 선형 토폴로지 네트워크는 제어장비의 수가 적은 단위 셀에서 적합하고 여러개의 셀을 포함하는 경우에는 셀들을 트리 토폴로지로 연결하는 것이 적합할 것이나 실제 공장의 자동화 네트워크는 선형 토폴로지와 트리 토폴로지를 다 포함하는 구조가 일반적으로 사용될 것이다.

참 고 문 헌

[1] J. Jasperneite and P. Neumann, "Switched Ethernet for Factory Automation," 8th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, Antibes-Juan les Pins, France, pp.205-212, Oct., 2001.

[2] Y. Song, A. Koubaa, and F. Simonot, "Switched Ethernet for Real-Time Industrial Communication : Modeling and Message Buffering Delay Evaluation," 4th IEEE Int. Workshop on Factory Communication Systems, Vasteras, Sweden, pp.27-35, Aug., 2002.

[3] K. C. Lee and S. Lee, "Performance Evaluation of Switched Ethernet for Real-Time Industrial Communications," Computer Standards & Interfaces, 24, pp.411-423, 2002.

[4] E. Vonnahme, S. Ruping, and U. Ruckert, "Measurements in Switched Ethernet Networks Used for Automation Systems," 4th IEEE Int. Workshop on Factory Communication Systems, pp.231-238, Aug., 2000.

[5] S. Varadarajan and T. Chiueh, "EtherReal : A Host Transparent Real-Time Fast Ethernet Switch," 6th IEEE Int. Conf. on Network Protocols, pp.12-21, Oct., 1998.

[6] L. L. Bello and O. Mirabella, "Analysis and Comparison of Different Interconnection Solutions for Switched Ethernet Networks," 6th IEEE Int. Workshop on Factory Communication Systems, Vasteras, Sweden, pp.27-35, Aug., 2002.



김 명 군

e-mail : mkkim@mail.ulsan.ac.kr

1984년 서울대학교 공학사

1986년 한국과학기술원 공학석사

1996년 한국 과학기술원 공학박사

1989년~1997년 우석대학교 교수

1997년~현재 울산대학교 부교수

관심분야 : 정보통신, 정보처리, 망관리



박 진 원

e-mail : zwsonic@crlab.ulsan.ac.kr

2002년 울산대학교 공학사

2004년 울산대학교 공학석사

현재 울산대학교 박사과정

관심분야 : 정보통신, 정보처리, 정보보호