동기식 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지에 대한 마감시간우선 기반 메시지 스케쥴링을 위한 조건

A Feasible Condition for EDF-based Scheduling of Periodic Messages on a Synchronized Switched Ethernet

김 명 균*
(Myung-Kyun Kim)

Abstract: The switched Ethernet has many features for real-time communications such as providing traffic isolation, large bandwidth, and full-duplex links, and so on. The switched Ethernet, however, cannot guarantee the timely delivery of a real-time message because message delay increases when collisions occurs at the output ports and message loss can even occur due to the overflow at the output buffer. Recently, many research efforts have been done to use the switched Ethernet as an industrial control network. In the industrial control network, sensors periodically sense the physical environment and transmit the sensed data to an actuator, and the periodic messages from sensors to actuators have typically real-time requirements such that those messages must be transmitted within their deadlines. This paper first suggests a feasible condition for EDF (Earliest Deadline First)-based scheduling of periodic messages on a synchronized switched Ethernet and a message scheduling algorithm which satisfies the proposed feasible condition. Pedreiras, et al. [10] suggested a feasible condition for message scheduling on the Ethernet (shared media Ethernet), but there has been no research result on the scheduling condition on the switched Ethernet until now. We compared the real-time message scheduling capacity between the Ethernet and the switched Ethernet by simulation. The simulation result shows that the message scheduling capacity of the Ethernet has almost remained constant as the number of nodes on the network increases, but, in the case of the switched Ethernet, the message scheduling capacity has increased linearly according to the number of nodes on the network.

Keywords: real-time communications, switched Ethernet, scheduling feasibility, EDF-based message scheduling

I. 서론

이더넷은 저렴하고, 설치하기가 쉽고 노드 수가 적을 경우에는 메시지 전송지연시간이 작아 사무실 환경의 네트워크에서 현재까지 가장 많이 사용되어 왔다. 그러나 전송매체를 노드들이 공유하며 전송하기 때문에 네트워크상의 노드 수가 증가함에 따라 성능이 급격히 떨어지는 문제가 있었다. 반면에 스위칭 이더넷은 네트워크 상에서의 메시지 충돌을 없앰으로써 노드 수에 상관없이 네트워크의 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 최근 이러한 스위칭 이더넷의 장점을 이용하여 스위칭 이더넷을 공장자동화와 같은 분야에서 산업용 제어네트워크로 사용하고자 하는 연구들이 있었다[2]. 그러나 산업용 제어응용에서는 많은 메시지들이 주기적 메시지들이고 이러한 각각의 주기적 메시지들이 마감시간이 주어져 있고, 이 메시지들이 마감시간내에 목적지에 전달되어야 하는 실시간 요구사항들을 가지고 있다.

스위칭 이더넷은 큰 대역폭을 가지고 네트워크 상의 충돌을 없애고 동시에 양방향 전송을 할 수 있는 등 빠른 전송을 위한 좋은 기능들을 가지고 있지만 산업용 제어시스템에서 요구하는 실시간 요구사항을 만족하지는 못하는 문제가 있다. 이중에서 가장 큰 문제는 네트워크상에서의 충돌은 없지만, 스위치의 출력포트에서의 충돌이 발생할 경우 메시지들은 버퍼링이 되어 메시지 지연시간이 증가하게 되고 심할 경우에는 버퍼 오버플로우로 인한 메시지 손실이 발생하여 메시지 지연시간을 예측하기가 어려운 문제점이 있다.

스위칭 이더넷 상의 실시간 통신 능력을 분석하기 위해 Lee 등[7]은 스위치의 메시지 전송 구조를 분석하여 스위칭 이더넷이 산업용 제어시스템의 실시간 통신 네트워크로 사용할 수 있음을 보였고, Georges 등[3]은 네트워크 대수 이론을 이용하여 스위칭 이더넷 상에서의 메시지 지연시간을 제한하는 방법을 제안하였다. 또한 Peng과 Hu[11]는 우선순위 기반 전송을 위한 IEEE 802.1P 프로토콜에 대한 실시간 메시지 전송 능력을 분석하고 실험을 통해 스위칭 이더넷이 산업용 제어네트워크로 사용할 수 있음을 보였다. 그러나 이들의 연구는 메시지 각각에 대해 제한시간내에 전송되는 것을 보장하지는 못하는 문제가 있다. 다른 방법들로 스위치내에 실시간통신을 위한 프로토콜을 추가하여 경성 실시간 통신(hard real-time communication)을 만족하도록 하는 방법들에 대한 연구들이 있었다[4,5,12]. 그러나 이 기법들의 경우에는 스위치내에 실시간 통신을 위한 프로토콜을 추가해야 하므로 쉽게 적용하기가 어려운 문제가 있다. 또한 Pedreiras 등[10]은 동기식 이더넷에서 주기적 메시지에 대한 마감시간우선 스케쥴링을 위한 조건을 제시하였지만 스위칭 이더넷 상에서 주기적 메시지에 대한 스케쥴링 조건에 대해서는 현재까지 알려진 연구결과가 없는 실정이다.

본 논문에서는 마스터-슬레이브 기반의 동기식 이더넷에서 주기적 메시지들에 대한 마감주기우선 메시지 스케쥴링 조건에 대해 제시하고 또한 제시된 스케쥴링 조건을 만족하는 스케쥴링 알고리즘을 제안한다. 제안된 스케쥴링 알고리즘은 마스터-슬레이브 기반의 알고리즘이고 마스터 노드는 슬레이브 노드들로부터 메시지 전송요구를 받아 스케쥴링 조건을

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2009. 11. 6., 수정: 2009. 12. 9., 채택확정: 2010. 2. 1.
김명균: 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부(mkkim@ulsan.ac.kr)
※ 본 연구는 2007년 울산대학교 교내연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

먼저 검사하고 스캐쥴링 가능한 메시지들에 대해 메시지 전송 스캐쥴을 만들어 슬레이브 노드들에게 전송하고, 슬레이브 노드들은 이 전송 스캐쥴에 따라 메시지 전송을 하게 된다. 제시한 스캐쥴링 알고리즘의 메시지 스캐쥴링 능력(message scheduling capacity)을 보기 위해 기존에 알려진 이더넷 상에서의 메시지 스캐쥴링 능력[10]과 비교하여 측정하였다. 성능측정 결과 이더넷의 메시지 스캐쥴링 능력은 네트워크의 노드 수에 상관없이 거의 일정하였지만, 스위칭 이더넷의 경우에는 메시지 스캐쥴링 능력이 노드 수가 증가함에 따라 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 네트워크 상의 노드들에 의해 수행되고 스위치는 기능변경이 필요 없어 기존의 스위치를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 스위칭 이더넷에서 실시간 통신을 위한 기존의 관련 연구들에 대해 기술하고, III 장에서는 마스터-슬레이브 기반 동기식 스위칭 이더넷에서의 메시지 전송 모델에 대해 기술한다. III 장에서는 마스터-슬레이브 기반 동기식 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지들에 대한 스캐쥴링 가능 조건 및 메시지 스캐쥴링 알고리즘에 대해 기술한다. IV 장에서는 제시한 스위칭 이더넷에서 스캐쥴링 조건에 따른 메시지 스캐쥴링 능력을 기존의 이더넷 상에서의 메시지 스캐쥴링 능력과 성능을 비교하고, V 장에서는 결론에 대해 기술한다.

II. 관련 연구

최근 스위칭 이더넷을 산업용 제어네트워크로 활용하기 위한 많은 연구들이 이루어져 왔다[2]. Georges 등[3]은 스위칭 이더넷의 구조를 분석하고 네트워크대수(network calculus) 이론을 이용하여 종단간 메시지 지연시간을 최소화하는 방법에 대해 제시하였다. 그들의 방법은 스위칭 이더넷에서 메시지 지연시간을 분석하여 정적인 실시간 시스템을 설계하는 방법을 제시하였지만, 수행도중 동적으로 새로운 메시지를 추가하는 것은 어렵다. Lee 등[7]은 스위치 내부의 메시지 전송구조를 분석하여 스위칭 이더넷의 실시간 메시지 전송 능력을 분석하고, 스위칭 이더넷이 산업용 제어네트워크로 사용할 수 있음을 보였다. Peng과 Hu[11]는 우선순위 기반 전송을 위한 IEEE 802.1P 프로토콜에 대한 실시간 메시지 전송 능력을 분석하고 실험을 통해 스위칭 이더넷이 산업용 제어네트워크로 사용할 수 있음을 보였다. Varadarajan과 Chiueh [12]는 스위칭 이더넷 기반 확장성이 용이한 실시간통신 기법을 제공하기 위해 EtheReal이라는 프로토콜을 제시하였다. EtheReal은 스위칭 이더넷상에서 실시간 메시지 전송을 위해 송신자에서 목적지까지의 경로상의 스위치에서 메시지 전송에 필요한 자원을 확보하여 실시간 통신 채널을 설정하는 방법에 대해 제시하였다. 그러나 EtheReal 프로토콜은 산업용 제어시스템에서 필요한 주기적 메시지에 대한 고려가 없고 스위치들이 EtheReal 프로토콜을 지원해야 하는 문제가 있다. 스위칭 이더넷상에서 경성 실시간 통신을 지원하기 위해서는 네트워크 상의 트래픽을 제한하는 방법이 필요하다. Loser와 Hartig[9]는 실시간 메시지 전송을 위해 스위칭 이더넷으로 진입하는 트래픽을 제한하기 위한 트래픽조절기(traffic shaper)를 제안하고, 네트워크대수 이론을 이용하여 네트워크 상에서의 종단간 메시지 지연시간을 분석하였다. 트래픽조절기를 이용한 방법은 메시지들이 종단간 최대 지연시간내에 전송되는 것을 보장하지만, 각 메시지 별로 주어진 메시지 지연시간을 만족하도록 하지는 못한다. 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지들에 대한 실시간 통신을 지원하기 위한 다른 방법으로 새로운 주기적 메시지 전송에 대한 진입제어(admission control)와 진입이 허용된 메시지들에 대한 메시지 스캐쥴링 기법을 제시한 연구들이 있었다. Hoang 등[4]은 네트워크상의 노드들과 스위치에 실시간 통신을 위한 프로토콜을 추가하고, 전송 버퍼내의 메시지들을 마감주기우선 스캐쥴링을 통해 각 메시지들을 주어진 마감시간내에 전송이 되도록 하는 방법을 제안하였다. 또한 그들은 각 메시지들이 주어진 마감시간을 만족하면서 스위치의 수신링크와 송신링크에서 전송이 이루어지도록 메시지 전송시간을 분할하는 방법에 대해 제시하였다[5]. 그러나 Hoang 등[4,5]의 방법은 실시간 통신을 위해 각 스위치들이 마감주기우선 스캐쥴링을 지원해야 하므로 스위치에 새로운 기능을 추가해야 하는 부담이 있다. Almeida 등[1]은 CAN (Controller Area Network)[6] 기반 실시간 통신 시스템에 유연성을 추가하기 위해 FTT-CAN (Flexible Time Triggered CAN) 프로토콜을 제안하고, 이러한 FTT기법을 이더넷에 적용하여 실시간 통신을 위한 FTT-Ethernet 프로토콜을 제안하였다[10]. 이들은 또한 FTT 전송 방식을 사용하는 동기식 이더넷에서 주기적 메시지들에 대해 마감주기우선 기반 실시간 통신을 위한 스캐쥴링 가능 조건을 제시하였다.

본 논문은 FTT 방식과 같은 동기식 전송을 하는 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지들에 대해 마감주기우선 기반 실시간 통신을 위한 스캐쥴링 가능 조건을 제시하고, 이러한 스캐쥴링 가능 조건을 만족하는 메시지 스캐쥴링 알고리즘을 제안하였다. 동기식 이더넷에 대한 메시지 스캐쥴링 가능 조건에 대해서는 Pedreiras 등[10]에 의해 제시되었지만, 스위칭 이더넷에 대해서는 아직까지 알려진 연구결과가 없는 실정이다.

III. 동기식 스위칭 이더넷에서의 메시지 전송 모델

본 절에서는 실시간 메시지 전송을 위한 마스터-슬레이브 기반 동기식 스위칭 이더넷의 메시지 전송 모델에 대해서 기술한다. 스위칭 이더넷은 그림 1과 같이 하나의 마스터와 다수의 슬레이브 노드들로 구성되어 있으며, 마스터 노드는 주

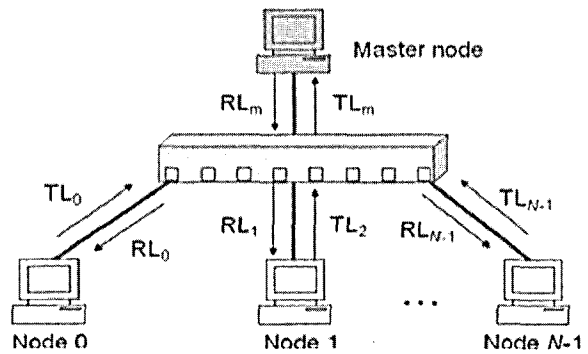
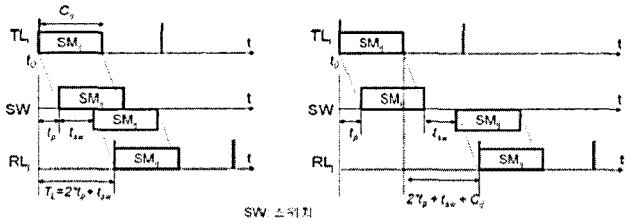


그림 1. 마스터-슬레이브 기반 스위칭 이더넷.

Fig. 1. Master-slave-based switching Ethernet.



(a) Store-and-forward switching (b) Cut-through switching

그림 2. 스위치의 프레임 스위칭 방식.

Fig. 2. Frame switching methods in a switch.

기적 메시지의 실시간 전송을 위해 스위칭 이더넷의 트래픽을 제어하는 역할을 수행한다. 슬레이브 노드는 새로운 주기적 메시지 전송이 필요하면 그 메시지에 대한 실시간 요구사항을 마스터 노드에게 전송하고 마스터 노드는 해당 메시지에 대해 스케쥴링 조건을 검사하고 스케쥴링이 가능할 경우 그 메시지에 대한 전송 스케쥴을 만들어 슬레이브 노드에게 전송한다.

실시간 메시지 전송을 위한 마스터-슬레이브 기반 동기식 스위칭 이더넷의 각 노드는 그림 1과 같이 스위치로 전송하는 송신링크와 스위치로부터 메시지를 수신하는 수신링크로 구성되어 있고, 각 노드는 두 링크를 통해 양방향으로 동시에 전송이 가능하다. 이더넷 스위치는 입력포트로부터 수신되는 프레임을 출력포트로 포워딩하기 위해 저장후포워딩(store-and forward) 스위칭 또는 저장전 포워딩(cut-through) 스위칭 방법을 사용한다(그림 2). 저장전 포워딩 스위칭에서 노드 i가 t_0시간에 메시지를 전송하면, 스위치 포트 j가 비어있을 경우 해당 메시지의 첫번째 비트가 $T_L = 2*t_p + t_{sw}$ 시간후에 노드 j에 도착한다(그림 2(a)). 여기에서 t_p 는 링크상에서의 전파지연시간이고 t_{sw}는 스위치가 스위칭하는데 걸리는 시간(목적지 포트 결정 및 스위치 패브릭 셋업시간)이다. t_{sw}는 스위치 종류에 따라 다르지만 일반적으로 100Mbps 스위치의 경우 10μs 정도가 걸린다. 저장후 포워딩 스위칭의 경우에는 스위치는 프레임 전체를 다 받은 뒤에 스위칭을 수행하므로 노드 i가 t_0 시간에 메시지를 전송하면, 해당 메시지의 첫번째 비트가 $(2*t_p + t_{sw} + C_{ij})$ 시간후에 노드 j에 도착한다(그림 2(b)). 여기서 C_{ij} 는 노드 i에서 노드 j로의 메시지 SM_{ij}의 전송시간을 나타낸다. 본 논문에서는 저장전 포워딩 스위칭에 대해서 기술하며 저장후 포워딩 스위칭의 경우에도 동일하게 적용되는데, 단지 저장후 포워딩 스위칭의 경우 T_L은 $T_L = 2*t_p + t_{sw} + \max\{C_{ij}\}$ 이 된다.

동기식 스위칭 이더넷에서 메시지 전송 모델은 FTT-CAN [1]에서 제안한 모델과 유사하며 그림 3과 같다. 송신링크와 수신링크는 일련의 매크로사이클(MC: Macro Cycle)로 구성되어 있고, 하나의 매크로사이클은 Sync 메시지와 일련의 기본사이클(EC: Elementary Cycle)로 이루어져 있다. 하나의 매크로사이클은 L = LCM(P_{ij}) 개의 EC로 구성되어 있으며 여기서 LCM(P_{ij})은 전송되는 전체 주기적 메시지의 주기들의 최소공배수를 나타낸다. Sync 메시지는 L, EC의 길이, EC의 구성 등과 같은 매크로사이클에 관한 정보를 가지고 있고, 네트워크상의 노드들을 동기화 하는데 사용된다. 하나의 EC는 해당 EC에서 전송될 주기적 메시지들의 리스트를 갖는 TM (Trigger

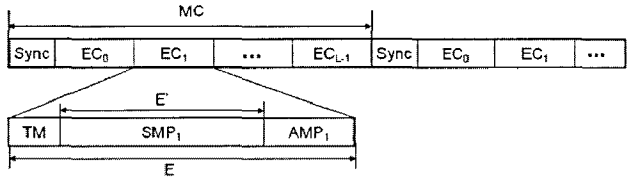


그림 3. 동기식 스위칭 이더넷에서 메시지 전송 모델.

Fig. 3. Message transmission model on a synchronized switched Ethernet.

Message) 메시지와 주기적 메시지들을 전송하기 위한 SMP (Synchronous Message Period) 구간, 그리고 비주기적 메시지들을 전송하기 위한 AMP (Asynchronous Message Period) 구간으로 구성된다. 본 논문에서는 주기적 메시지에 대해서만 고려하며 전송되는 모든 비주기적 메시지들은 해당 AMP내에서 전송이 완료된다고 가정한다. 그림 3에서 L_{TM}은 TM 메시지의 길이를 나타내며, E 는 EC의 길이를, E' 는 SMP 구간의 길이를 나타낸다.

모든 주기적 메시지들은 실시간 전송 요구사항을 가지며, 노드 i에서 노드 j로 전송되는 주기적 메시지 SM_{ij}의 실시간 전송 요구사항은 (D_{ij}, P_{ij}, C_{ij})로 표시된다. 여기서 D_{ij}, P_{ij}, C_{ij}는 각각 SM_{ij}의 마감시간, SM_{ij}의 주기, SM_{ij}의 길이를 나타내며, D_{ij}는 P_{ij}와 같고 E의 정수배를 갖는다고 가정한다.

IV. 동기식 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지들에 대한 스케쥴링 가능 조건

본 절에서는 마스터-슬레이브 기반 동기식 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지의 실시간 전송을 위한 스케쥴링 조건과 스케쥴링 알고리즘에 대해서 기술한다. 슬레이브 노드는 새로운 주기적 메시지의 전송이 필요하면 그 메시지에 대한 실시간 전송 요구사항을 매스터 노드에게 전송하고, 매스터 노드는 해당 메시지의 실시간 전송 가능여부를 검사하고, 가능할 경우 그 메시지에 대한 전송 스케쥴을 만든다. 매스터 노드는 전송 스케쥴에 따라 각 EC에서 전송할 수 있는 주기적 메시지의 리스트를 TM 메시지에 전송하고, 각 슬레이브 노드들은 TM 메시지를 해독하여 자신이 전송할 메시지들을 전송하게 된다.

1. 동기식 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지의 실시간 전송을 위한 스케쥴링 조건

송신자에 의해 하나의 메시지가 전송되면 그 메시지는 그림 2에서와 같이 T_L 시간후에 수신자의 수신링크에 도착한다. 스케쥴링 조건에 대한 분석을 용이하게 하기 위해 $T_L = 0$ 이라고 가정하고, 스케쥴링 조건 및 스케쥴링 알고리즘의 기술을 위해 필요한 다음과 같은 표기법들을 먼저 정의한다.

- 송신링크 TL_i 와 수신링크 RL_j 의 이용률은 UT_i 과 UR_j 로 나타내고 다음과 같이 정의된다.

$$UT_i = \sum_{j \in ST_i} \frac{C_{ij}}{P_{ij}}$$
$$UR_j = \sum_{j \in SR_j} \frac{C_{ij}}{P_{ij}} \quad (1)$$

여기에서 ST_i 는 노드i 가 메시지를 전송하는 수신노드들의 집합을 나타내고, SR_j 는 노드 j 가 메시지를 수신하는 송

신노드들의 집합을 나타낸다.

- 노드 j 로 메시지를 송신하는 송신링크들의 이용률의 최대값은 $UT_{max,j}$로 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$UT\max, j = \max_{i \in SR_j}\{UTi\} \tag{2}$$

- $T_{i,n}$ 은 n번째 EC에서 송신링크 TL_i 상에서 전송되는 메시지의 전송량을 나타낸다.

Pedreira 등[10]은 Liu 와 Layland[8]가 제시한 선점가능한 태스크들에 대한 EDF 스케쥴링 조건을 이용하여 이더넷 상에서 주기적 메시지들에 대한 실시간 전송을 위한 스케쥴링 조건이 다음과 같음을 보였다.

$$U = \sum \frac{C_i}{P_i} \le \frac{E' - \max\{C_i\}}{E} \tag{3}$$

여기서 E' 는 하나의 EC에서 주기적 메시지를 전송하기 위한 구간의 길이를, C_i 와 P_i 는 각각 주기적 메시지의 길이와 주기를 나타내며, U는 공유되는 이더넷 링크의 이용률을 나타낸다.

N개의 슬레이브 노드를 갖는 스위칭 이더넷은 각각 N개의 송신링크와 N개의 수신링크를 가지며, 이들은 독립적으로 동작하며 동시에 전송이 가능하다. 따라서 스위칭 이더넷의 실시간 메시지의 수용능력은 이더넷 보다 크다는 것을 알 수 있지만, 메시지의 실시간 전송을 위해서는 송신링크뿐 아니라 수신링크에서의 실시간성에 대해서도 고려해야 한다. 본 논문에서는 하나의 EC에서 각 송신링크들에서 전송된 메시지들이 모든 수신링크에서 해당 EC내에 전송이 완료되도록 함으로써 실시간 전송 요구를 만족하도록 하고자 한다. 본 절에서는 이를 위한 스케쥴링 조건과 이 스케쥴링 조건을 만족하는 스케쥴링 알고리즘을 기술한다.

정리 1. C를 실시간 전송 요구$RT_{ij} = (D_{ij}, P_{ij}, C_{ij})$를 갖는 주기적 메시지 SMij 들의 집합이라고 가정할 때, C가 동기식 스위칭 이더넷상에서 스케쥴링이 가능할 조건은 다음과 같다.

$$UTi + URj \le \frac{E' - 2 * \max\{C_{ij}\} + \min\{C_{ij}\}}{E} \tag{4}$$

증명: 앞에서 기술하였듯이 Pedreira 등[10]에 의해 제시된 하나의 링크를 공유하는 이더넷 상에서의 메시지 집합 C = $\{SM_i : RT_i = (P_i, C_i)\}$에 대한 EDF 스케쥴링 조건은 다음과 같다.

$$U = \sum \frac{C_i}{P_i} \le \frac{E' - \max\{C_i\}}{E} \tag{5}$$

위의 수식을 정리하면 다음과 같다.

$$U * E + \max\{C_i\} \le E' \tag{6}$$

따라서 T_n 을 n번째 EC에서 전송되는 메시지의 총량이라고 할 때, T_n 을 다음과 같이 제한하면 메시지 집합 C는 스케쥴링 가능함을 알 수 있다.

$$Tn \le U * E + \max\{Ci\} \le E' \tag{7}$$

N개의 노드를 갖는 스위칭 이더넷은 각각 N개의 송신링크와 N개의 수신링크를 가지며, 이들은 독립적으로 동작하며 동시에 전송이 가능하다. 따라서 송신링크에 대해서는 모든 송신링크들이 다음을 만족하면 송신링크에서 전송되는 모든 메시지들이 해당 EC내에서 전송이 완료될 수 있다.

$$Ti,n \le UTi * E + \max\{Cij\} \le E', \forall i,n \tag{8}$$

그러나 실시간 전송이 이루어지기 위해서는 송신링크뿐 아니라 수신링크에서도 실시간 전송 요구조건을 만족해야 한다. 따라서 동기식 스위칭 이더넷 상에서 주기적 메시지들의 실시간 전송을 위해서는 다음의 두 가지 조건을 만족해야 한다.

(i) 매크로사이클의 모든 EC에서 각 송신링크는 수식 (8)의 조건을 만족해야 한다.

(ii) n번째 EC에서 각 송신링크에서 전송된 모든 메시지들이 각 수신링크에서 해당 EC내에 전송이 완료될 수 있어야 한다.

따라서 각 송신링크가 수식 (8)을 만족하는 조건하에서 각 EC에서 송신링크를 통해 전송된 메시지들이 모든 수신링크들에서 해당 EC내에 전송이 완료되기 위한 조건을 구하면 된다. 송신링크 TL_i 에서 전송할 수 있는 최대 전송량을 $T_{max,i}$로 나타내면 수식 (8)은 다음과 같이 나타내 진다.

$$Ti,n \le UTi * E + \max\{Cij\} = T_{\max,i} \le E' \tag{9}$$

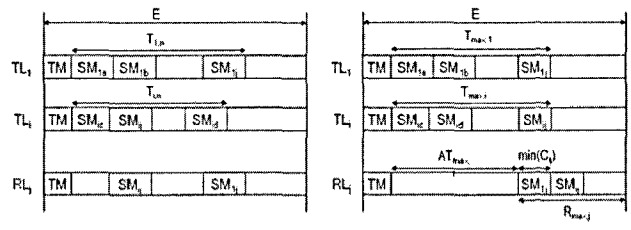
따라서 각 송신링크 TL_i 의 전송량 $T_{i,n}$ 이 $T_{max,i}$ 보다 크지 않도록. 조절하면 송신링크에서 전송되는 모든 메시지들은 해당 EC내에 전송이 완료된다. 경성실시간 전송을 위해서는 송신링크에서 전송된 모든 메시지들이 최악의 경우에도 모든 수신링크에서 해당 EC내에 전송이 완료되어야 한다. n번째 EC에서 수신링크 RL_j 에서 발생하는 최악의 경우는 다음의 두 가지 조건을 만족할 경우이다.

(iii) n번째 EC에서 수신링크 RL_j 로 전송되는 모든 메시지들이 동시에 도착할 경우

(iv) n번째 EC에서 수신링크 RL_j 로 전송되는 메시지들이 가장 늦게 도착할 경우

조건 (iii)이 발생할 경우, 도착한 메시지들은 출력포트의 메시지 버퍼에 저장되어 순서대로 수신링크를 통해 전송되게 된다. 조건 (iv)가 발생할 경우에는 현재 EC에서 도착한 메시지들을 전송하기 위한 시간이 최소로 남아 있게 되어 최악의 경우가 된다. 따라서 조건 (iii)과 (iv)가 만족했을 경우에도 수신링크에 도착한 모든 메시지들이 현EC내에서 전송이 완료도기 위한 조건을 구하면 된다.

그림 4는 수신링크 RL_j 에서 메시지 전송의 일반적인 경우



(a) 일반적인 경우 (b) 최악의 경우

그림 4. 수신링크 RL_j에서의 메시지 전송.

Fig. 4. Message transmission on reception link RL_j.

와 최악의 경우를 나타낸다. 하나의 EC에서 각 송신링크에서 같은 목적지로 전송된 메시지들은 수신링크상에서 병합되어 도착순서대로 차례로 전송이 되며, 최악의 경우에는 각 송신링크에서 마지막 메시지들이 같은 목적지로 전송되어, 이 메시지들의 길이의 합이 해당 EC내의 남은 시간(그림 4(b)의 $R_{max,j}$) 보다 크지 않으면 RL_j에 도착한 모든 메시지들이 해당 EC내에서 전송이 완료할 수 있다. 그림 4(b)의 최악의 경우를 다시 표현하면 다음과 같다.

(a) n번째 EC에서 RL_j로 메시지를 전송하는 송신링크들의 링크이용률이 같으며 최대이다.

(b) n번째 EC에서 RL_j로 전송되는 메시지들의 도착시간이 최대이다.

조건 (a)로부터 최악의 경우의 송신링크 TL_i 의 링크이용률 UT_i 는 다음과 같다.

$$UT_i = UT_{\max,j}, \quad \forall i, i \in SR_j \tag{10}$$

식 (10)으로부터

$$T_{\max,j} = UT_{\max,j} * E + \max\{C_{ij}\} \tag{11}$$

그림 4(b)에서 보듯이 송신링크 TL_i 에서 마지막 메시지가 전송이 완료되는 시간이 $T_{max,i}$ 이므로, 송신링크에서 전송된 마지막 메시지가 수신링크에 도착하는 시간 $AT_{max,j}$ 은 마지막 전송되는 메시지의 길이가 최소일 경우 이며, 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} AT_{\max,j} &= T_{\max,i} - \min\{C_{ij}\} \\ &= UT_{\max,j} * E + \max\{C_{ij}\} - \min\{C_{ij}\} \end{aligned} \tag{12}$$

따라서 최악의 경우에 수신링크 RL_j에 도착한 메시지를 전송할 수 있는 남은 시간 $R_{max,j}$ 은

$$\begin{aligned} R_{\max,j} = E' - AT_{\max,j} &= E' - UT_{\max,j} * E \\ &\quad - \max\{C_{ij}\} + \min\{C_{ij}\} \end{aligned} \tag{13}$$

가 된다. 최악의 경우에 수신링크에 도착하는 메시지들에 대해 수식 (5)의 스케쥴링 조건을 적용하면 다음과 같다.

$$UR_j \le \frac{R_{\max,j} - \max\{C_{ij}\}}{E} \tag{14}$$

수식 (13)과 (14)를 결합하면

$$UR_j \le \frac{E' - UT_{\max,j} * E - \max\{C_{ij}\} + \min\{C_{ij}\} - \max\{C_{ij}\}}{E} \tag{15}$$

이 되고, 수식 (15)를 정리하면

$$UR_j + UT_{\max,j} \le \frac{E' - 2 * \max\{C_{ij}\} + \min\{C_{ij}\}}{E} \tag{16}$$

이 되고, 수식 (10)과 (16)에 의해 동기식 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지들의 실시간 전송을 위한 스케쥴링 조건은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$UT_i + UR_j \le \frac{E' - 2 * \max\{C_{ij}\} + \min\{C_{ij}\}}{E} \tag{17}$$

□

다음 checkSchedCond 알고리즘은 마스터 노드가 주어진 메시지 집합에 대해 정리 1의 스케쥴링 조건을 만족하는지 여부를 검사하는 알고리즘이다.

```
Algorithm checkSchedCond(msgBuf)
// N: 네트워크상의 슬레이브 노드의 수
1.  msgBuf 내의 메시지들을 마감시간 길이가 짧은 순서로 정렬;
2.  for (i = 1; i < N; i++) UT_i = UR_j = 0;
3.  C_max = max{C_ij}; C_min = min{C_ij} ;
4.  maxUtil = (E' - 2 * C_max + C_min) / E;
5.  while (msgBuf에 메시지가 있는 동안) {
6.      SM_ij ← msgBuf의 다음 메시지;
7.      if ((UT_i + UT_j + 2 * C_ij / P_ij) ≤ max Util ) {
8.          SM_ij 를 schedBuf에 추가;
9.          UT_i = UT_i + C_ij / P_ij ;  UR_j = UR_j + C_ij / P_ij ;
11.     } else
12.         SM_ij 를 droppedBuf에 추가;
13. }
14. for (i = 0; i < N; i++) {
15. T_max(i) = UT_i * E + C_max ;
16. max TL = max{UT_j} , RL_i에 메시지를 전송하는 모든 TL_j에 대해;
17. R_max(i) = E' - max TL * E - C_max + C_min ;
18. }
19. M ← schedBuf에 들어있는 메시지의 수;
20. L = LCM(P_ij); // P_ij: schedBuf에 들어있는 모든 메시지
```

CheckSchedCond 알고리즘은 스케쥴링 검사를 수행할 메시지 집합을 입력으로 받아 메시지들을 마감시간이 짧은 순서로 정렬한 뒤, 메시지들을 순서대로 정리 1의 조건을 검사하고 스케쥴링이 가능한 메시지들을 schedBuf에 저장한다. 스케쥴링 조건 검사 후, 마스터 노드는 메시지 전송 스케쥴을 생성하기 위해 필요한 변수 M, L, $T_{max}(i)$, $R_{max}(i)$들을 생성한다. $T_{max}(i)$는 송신링크 TL_i에서 전송되는 메시지의 최악의 경우의 전송완료 시간을 나타내고, $R_{max}(i)$는 최악의 경우에 수신링크 RL_i에서 메시지를 전송 가능한 시간을 나타낸다.

2. 동기식 스위칭 이더넷에서 주기적 메시지에 대한 마감시간우선 기반 스케쥴링 알고리즘

마스터 노드는 메시지들의 스케쥴링 가능 조건을 검사한 뒤, 스케쥴링 가능한 메시지들을 schedBuf에 저장하고, 이 메시지들에 대한 메시지 전송 스케쥴을 생성하여, 슬레이브 노드들에게 전송한다. 다음 edfScheduling 알고리즘은 스케쥴링 가능한 메시지 집합 schedBuf를 받아 하나의 매크로사이클의 각 EC에서 전송할 수 있는 메시지 리스트 MS를 생성하는 알고리즘이다. 마스터 노드는 n번째 EC에서 전송할 수 있는 메시지 리스트 MS(n)을 EC_n 의 TM메시지를 통해 슬레이브 노드들에게 브로드캐스트하고, 각 슬레이브 노드들은 TM 메시지를 해독하여 EC_n에서 전송할 메시지들을 전송하게 된다.

다음 정리 2는 정리 1을 만족하는 메시지 집합에 대해 edfScheduling 알고리즘을 통해 생성된 메시지 전송 스케쥴에 따라 전송하면, 하나의 EC에서 송신링크 및 수신링크에서 전송되는 모든 메시지들이 해당 EC내에서 전송이 완료됨을 보여준다.

정리 2: 정리 1을 만족하는 메시지 집합에 대해 마감시간 우선 기반 알고리즘 edfScheduling에 의해 생성된 메시지 전

```
Algorithm edfScheduling(schedBuf, MS)
// MS(n): ECn 에서 전송할 수 있는 메시지 리스트
// r(k): k번째 주기적메시지의 인스턴스 준비 여부 표시;
//r(k)=1 이면 k번째 인스턴스가 준비되어 있음을 표시
1.  for (k = 0; k < M; k++)  r(k) = 1;
2.  for (n = 0; n < L; n++)  {
3.      MS(n) = NULL;
4.      for (i = 0; i < N; i++)  { TLi = RLi = 0; }
5.      for (k = 0; k < M; k++)  {
6.          if (r(k) == 1)  {
7.              SMij ← schedBuf내의 k번째 메시지;
8.              if ( (((TLi + Cij) ≤ T max(i)) && ((RLj + Cij)
                ≤ R max(j)) ) {
9.                  SMij 를 MS(n)에 추가;
10.                 TLi = TLj + Cij;
11.                 RLj = RLj + Cij;
12.                 r(k) = 0;
13.             }
14.         }
15.         if ((n+1) mod (Pij) == 0) r(k) = 1;
16.     }
17. }
```

송 스케쥴은 모든 메시지들이 해당 EC내에서 전송이 완료됨을 보장한다.

증명: SM_{ij} 를 스케쥴링 가능한 메시지 집합 C에 속한 임의의 메시지라 할 때, edfScheduling 알고리즘에 따라 스케쥴링 되면 (라인 8)에 따라 전송이 완료되는 시간은 최대전송완료시간인 $T_{max,i}$를 초과할 수 없다.

$$T_{\max,i} = UT_i * E + \max\{C_{ij}\} \tag{18}$$

따라서 SM_{ij}가 RL_j에 도착할 가장늦은시간 $L_{max,j}$은

$$L_{\max,j} = UT_i * E + \max\{C_{ij}\} - \min\{C_{ij}\} \tag{19}$$

이 된다. SM_{ij}의 RL_j상에서 최악의 경우의 전송지연시간은 RL_j에 도착하는 다른 모든 메시지들이 전송되고 마지막에 전송되는 경우이다. 그러나 이 최악의 경우의 전송지연시간은 (라인 8)에 의해 다음과 같은 $R_{max,j}$값을 초과하지 않는다.

$$R_{\max,j} = E' - UT_{\max,j} * E - \max\{C_{ij}\} + \min\{C_{ij}\} \tag{20}$$

따라서 SM_{ij}가 RL_j에서 전송이 완료되는 시간 $F_{ij,n}$은

$$F_{ij,n} \le L_{\max,j} + R_{\max,j} \tag{21}$$

가 되고, 식 (19), (20), (21)에 의해

$$F_{ij,n} \le E' - (UT_{\max,j} - UT_i) * E \tag{22}$$

가 된다. 그런데 $UT_i \le UT_{\max,j}$ 이므로 $F_{ij,n} \le E'$ 임을 알 수 있다. 따라서 SM_{ij}는 RL_j에서 해당 EC의 SMP내에서 전송이 완료된다. □

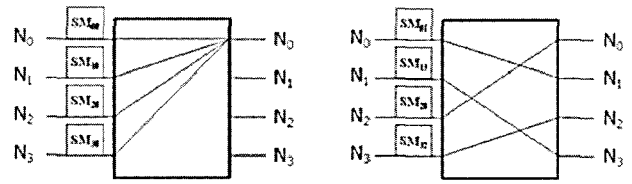
V. 성능분석

본 논문에서는 제안된 스케쥴링 알고리즘의 성능측정을 위해 실시간 메시지 수용능력에 대해 성능분석을 하였다. 시뮬레이션을 위한 이더넷 스위치는 출력단(output port)에 메시지 버퍼를 가진 스위치를 가정하였고, 스위치내의 프레임 스

표 1. 성능분석 파라미터.

Table 1. Performace parameters.

네트워크 대역폭	10Mbps
메시지 최소 길이 (Cmin)	80μs (100Bytes)
메시지 최대 길이 (Cmax)	160μs (200Bytes)
EC 길이 (E)	1,000μs
SMP 길이 (E')	900μs
MC 크기 (L)	12 ECs



(a) Worst case (b) Best case

그림 5. 스위칭 이더넷의 트래픽 형태에 따른 메시지 전송 능력.

Fig. 5. Message transmission capability according to traffic patterns in a switch.

위칭시간(switching time)은 고정된 시간을 사용하였다. 일반적으로 저장전 스위칭을 사용할 경우 10Mbps 이더넷 스위치의 스위칭시간은 30μs내외 정도를 갖는다. 송신 및 수신 이더넷 링크상에서의 전송지연시간(propagation delay)은 무시하였다. 스위칭 이더넷은 하나의 링크를 공유하며 전송하는 이더넷에 비해 전송능력이 뛰어나지만, 현재까지 주기적 메시지들의 실시간 전송을 위한 스케쥴링 가능 조건에 대해 연구된 결과가 없었다. 따라서 본 논문에서는 Pedreira 등[10]에 의해 제시된 동기식 이더넷 상에서의 스케쥴링 가능 조건과 비교하여 스위칭 이더넷의 실시간 메시지 수용 능력(real-time message capacity)을 분석하였다. 실시간 메시지 수용 능력은 해당 네트워크에서 메시지들의 실시간성 요구사항을 만족하면서 전송 가능한 메시지의 최대 갯수를 의미한다.

성능분석을 위한 파라미터는 표 1과 같다. 네트워크 대역폭은 10Mbps이고, 네트워크상에는 1개의 마스터 노드와 10개의 슬레이브 노드가 존재한다. 일반적으로 산업용 제어시스템에서의 메시지들은 크기가 작다. 따라서 본 시뮬레이션에서 주기적 메시지들의 크기는 최소 100바이트, 최대 200바이트 크기로 가정하였다. 각 메시지들의 주기는 {1, 2, 3, 4, 6, 12} 내의 값을 가지며, 이에 따라 MC의 크기는 12개의 EC이고, 각 EC의 길이는 1,000μs, 그리고 SMP 구간의 길이는 900μs로 가정하였다.

그림 5(a)에서처럼 송신링크의 모든 메시지들의 목적지가 같을 경우, 그 메시지들은 하나의 수신링크를 공유하며 순서대로 전송이 되어야 하므로, 스위칭 이더넷의 전송능력은 하나의 링크를 공유하며 전송하는 이더넷과 같아질 것이다. 그러나 그림 5(b)에서처럼 송신링크의 모든 메시지들의 목적지가 다를 경우, 각각의 메시지들은 서로 다른 경로를 통해 동시에 전송이 되므로 스위칭 이더넷의 전송능력은 이더넷에 비해 N배가 된다.

N개의 노드를 갖는 스위칭 이더넷은 동시에 전송이 가능한 N개의 송신링크와 N개의 수신링크로 구성되어 있다. 노

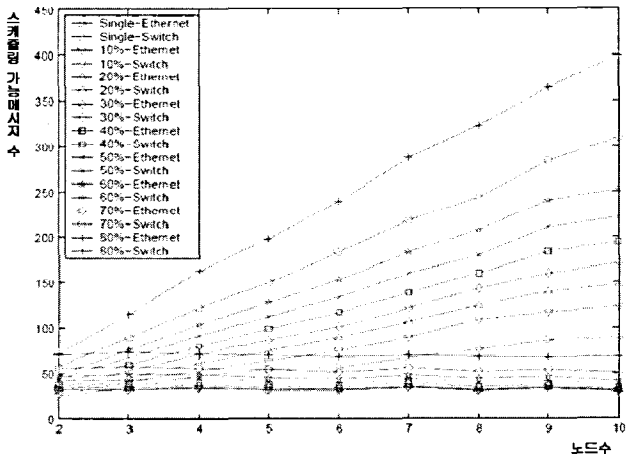


그림 6. 이더넷과 스위칭 이더넷의 실시간 메시지 전송능력 비교.

Fig. 6. Comparison of real-time message capacity between Ethernet and switched Ethernet.

드 i에서 노드 j로 전송되는 모든 메시지들은 송신링크 TL_i와 RL_j를 공유하며 순서대로 전송된다. N개의 노드를 갖는 스위칭 이더넷은 송신자와 수신자 사이의 이러한 겹치지 않는 링크가 최대 N개 존재하며, 따라서 N개의 노드를 갖는 스위칭 이더넷은 이더넷에 비해 최대 N배의 전송능력을 갖는다. 그러나 실제 실시간 메시지 수용능력은 전송되는 메시지들의 트래픽 형태에 따라 달라지게 되는데, 그림 5는 최악의 경우와 최상의 경우 두 가지를 보여준다.

스위칭 이더넷의 전송능력을 측정하기 위해, 본 실험에서는 임의의 메시지들을 500개 생성하여, 순서대로 정리 1의 스케줄링 가능 조건을 검사하였다. 스케줄링 가능 조건 검사는 전체 메시지의 일정 비율만큼의 메시지 기각(message drop)이 발생할 때까지 수행하여, 그 때까지 수용된 메시지의 수를 실시간 메시지 수용능력으로 계산하였다. 비교를 위해 이더넷의 경우에도 동일한 메시지 집합에 대해 동일한 방법으로 스케줄링 가능 조건[10]을 검사하여 측정하였다. 이와 같은 실험을 10번 반복하여 수용된 메시지수의 평균을 계산하였고, 그림 6은 실험결과 이더넷과 스위칭 이더넷에서의 실시간 메시지 수용능력을 보여준다. 그림에서 Single-Ethernet과 Single-Switch는 첫번째 메시지 기각이 발생할 때까지의 이더넷과 스위칭 이더넷에서의 실시간 메시지 수용능력을 각각 나타내고, 20%-Ethernet과 20%-Switch 는 전체 메시지의 20%의 메시지 기각이 발생할 때까지의 실시간 메시지 수용능력을 각각 나타낸다.

실험결과 이더넷의 경우에는 메시지 기각비율을 증가 시켰을 경우 수용된 메시지의 수가 약간 증가 하였지만, 네트워크상의 노드 수가 증가함에 따라 큰 변화는 보이지 않았다. 반면에 스위칭 이더넷의 경우에는 메시지 기각비율을 증가시켰을 경우에도 수용된 메시지의 수가 증가 하였지만, 네트워크상의 노드 수가 증가함에 따라 수용되는 메시지의 수가 노드 수에 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 네트워크상의 노드 수가 증가하면 스위칭 이더넷의 동시 전송이 가능한 서로 다른 경로가 증가하여 전송능력이 향상됨을 알 수 있다.

VI. 결론

스위칭 이더넷은 설치가 쉽고, 큰 대역폭을 가지고, 이더넷과는 달리 네트워크 상에서 메시지의 충돌을 없앰으로써 빠른 전송이 가능하여 현재 가장 많이 사용되고 있다. 최근 이러한 스위칭 이더넷을 산업용 제어시스템에 사용하기 위한 연구가 많이 이루어졌다. 산업용 제어시스템의 네트워크는 사무실 환경의 네트워크와는 달리 주기적 메시지들의 전송요구가 많고, 이러한 메시지들이 주어진 시간내에 전송이 이루어져야 하는 경성 실시간 전송요구를 가지고 있다. 스위칭 이더넷은 실시간 전송에 필요한 좋은 기능들을 가지고 있지만 전송되는 메시지들이 마감시간내에 전송이 이루어지는 것을 보장하지는 못해 산업용 제어시스템에 사용하는데 문제가 있다.

본 논문에서는 산업용 제어시스템에 사용하기 위한 동기식 스위칭 이더넷에서의 주기적 메시지에 대해 실시간 전송을 위한 메시지 스케줄링 알고리즘을 제시하였다. 이를 위해 먼저 동기식 스위칭 이더넷에서의 주기적 메시지에 대해 실시간 전송을 위한 스케줄링 가능 조건을 제시하고, 이러한 스케줄링 가능 조건을 만족하는 알고리즘을 제시하였다. 제안된 스위칭 이더넷에서의 스케줄링 알고리즘의 실시간 전송능력을 분석하기 위해 실시간 메시지 수용능력을 측정하여 기존의 이더넷의 성능과 비교하였다. 실험결과 기존의 이더넷과는 달리 스위칭 이더넷은 네트워크상의 노드 수가 증가함에 따라 실시간 메시지 수용능력이 비례하여 증가함을 보여주었다.

참고문헌

[1] L. Almeida, P. Pedreiras, and J. A. Fonseca, "The FTT-CAN protocol: Why and how," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 49, pp. 1189-1201, 2002.

[2] J. D. Decotignie, "The many faces of industrial Ethernet," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 8-19, 2009.

[3] J. P. Georges, N. Krommenacker, T. Divoux, and E. Rondeau, "A design process of switched Ethernet architectures according to real-time application constraints," *Eng. Appl. of Artificial Intelligence*, vol. 19, 335-344, Elsevier, Amsterdam, 2006.

[4] H. Hoang, M. Jonsson, U. Hagstrom, and A. Kallerdahl, "Real-time switched Ethernet with earliest deadline first scheduling protocols and traffic handling," *IEEE Proc. of 10th Int. Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems*, FL, USA, 2002.

[5] H. Hoang and M. Jonsson, "Switched real-time Ethernet in industrial applications-deadline partitioning," *IEEE APCC 2003*, vol. 1, pp. 21-24, 2003.

[6] ISO, Road Vehicles: Interchange of Digital Information: Controller Area Network (CAN) for High Speed Communication. ISO 11898, 1993.

[7] K. C. Lee, S. Lee, and M. H. Lee, "Worst case communication delay of real-time industrial switched Ethernet with multiple levels," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 53, pp. 1669-1676, 2006.

[8] C. L. Liu and J. W. Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment," *Journal of ACM*, vol. 20, no. 1, 1973.

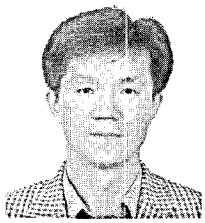
[9] J. Loser and H. Hartig, "Low-latency hard real-time

communication over switched Ethernet," *Proc. of 16th Euromicro Conf. Real-Time Systems*, pp. 13-22, 2004.

[10] P. Pedreiras, L. Almeida, P. Gai, and G. Buttazzo, "FTT-Ethernet: a platform to implement the elastic task model over message streams," *IEEE Int. Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, Vasteras, Sweden, 2002.

[11] J. Peng and L. Hu, "Experimental research about the Impact of IEEE 802.1P on Real-time Behavior of Switched Industrial Ethernet," *IEEE ETCS 2009*, vol. 2, pp. 748-751, 2009.

[12] S. Varadarajan and T. Chiueh, "EtheReal: A host-transparent real-time fast Ethernet switch," *Proc. of Int. Conf. on Network Protocols (ICNP)*, Austin, TX, 1998.



김 명 균

1984년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업. 1986년, 1996년 한국과학기술원 전산학과 졸업(석사, 박사). 1998년~현재 울산대학교 컴퓨터정보통신 공학부 교수. 관심분야는 산업용 네트워크, 실시간통신.