

MS/TP 프로토콜에서 실시간 통신을 위한 대역폭 할당 기법

論 文
54D-11-4

Bandwidth Allocation Scheme for Real-Time Communication on MS/TP Protocol

宋沅錫*·洪承鎬†
(Won-Seok Song · Seung Ho Hong)

Abstract - Digital communication networks have become a core technology in advanced building automation systems. BACnet (Building Automation and Control networks) is a standard data communication protocol designed specifically for building automation and control systems. BACnet adopts Master-Slave/Token-Passing (MS/TP) protocol as one of its field level networks. In this study, we introduce a method of implementing bandwidth allocation scheme in the MS/TP protocol. The bandwidth allocation scheme improves the capability of real-time communication of the original MS/TP protocol. The bandwidth allocation scheme introduced in this paper can be easily implemented in the existing MS/TP protocol with a slight modification. In this study, we examined the validity of bandwidth allocation scheme using simulation models. The results from the simulation experiment show that the proposed scheme satisfies the requirements of real-time communication

Key Words :BACnet, MS/TP, 빌딩자동화, 실시간 통신, 대역폭 할당

1. 서 론

첨단의 빌딩자동화시스템에서는 빌딩 내에 설치되는 각종 설비들을 실시간으로 감시 및 제어할 수 있어야 하며, 이를 위하여서는 빌딩의 제어 및 자동화 관련 정보가 통신망을 통하여 실시간으로 전달 및 처리되어야 한다 [1-3]. BACnet (Building Automation and Control network)[4-6]은 서로 다른 제조업체의 장비들 사이에 통신이 되지 않아 발생하는 많은 문제들을 해결하기 위하여 1995년에 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers)에 의해 개발된 빌딩자동화 전용 표준 통신망 프로토콜로서, ISO에서 빌딩 자동화 및 제어 시스템의 국제 표준 통신 프로토콜로 채택하였다 [7, 8]. BACnet은 이미 국내에서 빌딩자동화 통신망의 KS 표준 규격으로도 채택되었다 [9].

본 연구의 선행연구에서는 BACnet의 데이터링크계층 LAN 통신망으로 가장 널리 사용되고 있는 MS/TP 프로토콜의 성능과 동작 특성을 분석하였다[10, 11]. MS/TP 프로토콜은 단순한 구조를 가지고 효율적으로 데이터를 전송하도록 설계되었으나, 실시간 및 비실시간 통신의 다양한 요구사항을 수용하기 위한 서비스를 제공하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 한정된 네트워크 자원인 대역폭을 효율적으로 사용하여

실시간 및 비실시간 통신 서비스를 제공하는 대역폭 할당 기법을 MS/TP 프로토콜에 적용하여 실시간 통신 성능을 개선하기 위한 방법을 제시한다. 본 연구를 통하여 제시된 대역폭 할당 기법의 타당성은 시뮬레이션 실험을 통하여 검증하였다. 연구에서 제시하는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법 알고리즘은 기존의 MS/TP 프로토콜과 통신의 호환성을 유지하도록 설계되었다.

본 논문의 2장에서는 BACnet 통신망과 MS/TP 프로토콜에 대하여 간략히 기술한다. 3장에서는 이 논문에서 새로이 제안하는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에 대하여 기술한다. 4장에서는 시뮬레이션 모델을 사용하여 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법 알고리즘의 타당성을 분석한다. 마지막으로 5장에서는 이 논문의 결론을 제시한다

2. BACnet과 MS/TP

BACnet은 빌딩자동화를 위하여 특화된 통신망으로 물리계층, 데이터링크계층, 네트워크계층 및 응용계층의 4계층으로 구성된다. BACnet에서는 서로 다른 다양한 공급업체에서 제공되는 설비들간의 상호운용성(interoperability)을 보장하기 위하여 통신망을 통하여 교환되는 모든 정보들을 객체(object)로 표준화하였다. BACnet의 응용계층 프로토콜은 이러한 객체를 다루고 조작하는 통신서비스로 객체접속 서비스, 원격장비관리 서비스, 파일접속 서비스, 경보 및 이벤트 서비스, 가상터미널 서비스의 5가지 범주의 표준서비스를 제공한다.

응용계층을 통하여 생성된 메시지는 Ethernet, ARCNET, MS/TP 및 LonTalk의 4개의 LAN 또는 기존의 전화망을 사

† 교신저자, 正會員 : 漢陽大學校 電子컴퓨터工學部 教授 · 工博
E-mail : shhong@hanyang.ac.kr

* 正會員 : 아이콘트롤스 기술연구소 선임연구원 · 工博
接受日字 : 2005年 7月 8日
最終完了 : 2005年 9月 12日

용하는 PTP 프로토콜을 통하여 전송된다. Ethernet은 주로 빌딩 전체를 관장하는 기간망(backbone network)으로 사용되는 반면에 나머지 3개LAN들은 특정지역 또는 특정설비를 관장하는 국부망(local network)으로 사용된다. BACnet의 네트워크 계층은 이러한 LAN들을 서로 연결시키는 기능을 제공하며, 건물의 규모나 기능의 복잡성에 따라 다양한 형태로 구현될 수 있도록 하여, 사용자가 원하는 요구사항을 만족시킬 수 있는 통합 빌딩 자동화 시스템을 효율적으로 구성할 수 있도록 한다.

BACnet의 LAN 프로토콜들 가운데 필드 장비들 간의 통신에 가장 널리 사용되는 MS/TP(Master-Slave / Token-Passing) 프로토콜은 마스터 노드와 슬레이브 노드로 구성된다. 마스터 노드는 전송 매체에 접근하여 메시지를 전송할 권한을 부여하는 토큰이라는 특별한 프레임을 수신하고 전달할 수 있는 노드를 의미한다. 마스터 노드는 토큰을 수신하면 최대 $N_{max_info_frames}$ 개의 메시지를 전송할 수 있으며, 전송 가능한 최대 개수의 메시지를 전송할 경우 다음 마스터 노드로 토큰을 전달한다. 토큰을 50번 수신한 마스터 노드는 Poll For Master라는 프레임을 전송하여 새로 네트워크에 추가된 마스터 노드의 존재 여부를 검사한다.

네트워크상의 다른 마스터 노드로부터 서비스 요구를 수신한 마스터 노드는 응답 메시지를 되돌리게 된다. 만일 T_{reply_delay} 시간 내에 응답 메시지가 생성되면 바로 응답 메시지를 전송하게 되며, 그렇지 않은 경우에는 Reply Postponed 메시지를 전송한다. Reply Postponed 메시지는 현재 응답 메시지가 준비되지 않았으므로 실제 응답 메시지는 이후 토큰을 수신한 후에 전송된다는 것을 알리는 역할을 한다. 이와는 달리 슬레이브 노드는 토큰을 수신할 수 없는 노드를 의미한다. 따라서 슬레이브 노드는 마스터 노드로부터 서비스 요구를 받아 이에 대한 응답 메시지를 전송하는 역할만을 수행한다.

3. MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 구현

빌딩자동화 통신망에서는 실시간 및 비실시간 데이터의 전송이 하나의 통신망 미디어를 공유한다. 선행 연구에서는 다양한 종류의 필드버스에서 산발적 실시간 및 주기적 데이터의 전송지연시간 요구사항을 만족하는 동시에 필드버스의 대역폭을 충분히 활용할 수 있는 대역폭 할당 기법을 제시하였다 [12-16]. 대역폭 할당 기법의 기본 개념은 필드버스의 대역폭을 실시간으로 할당하고, 남은 대역폭을 충분히 활용하여 비실시간 데이터를 전송함으로써 필드버스 대역폭의 활용도를 극대화 시키는 것이다.

이 장에서는 [12]에서 제시한 대역폭 할당 기법의 기본 개념을 기반으로 하여 빌딩 제어 시스템이 설계 단계에서 설정한 시스템의 제어 성능을 보장하도록 하는 대역폭 할당 기법을 MS/TP 프로토콜에서 구현하는 방법을 제시한다. 본 논문에서 제안하는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에서는 BACnet 서비스 메시지를 그 특성에 따라 긴급 메시지 (Life Safety Message), 주기적 메시지 (Periodic Request Message), 주기적 응답 (Reply message to periodic request message), 일반 메시지 (Normal message)의 네 종류로 구분

한다.

긴급 메시지만 건물 내의 인명에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 정보를 전달하는 서비스 메시지를 의미하며, 화재 발생을 감지한 경우 발생하는 경보 메시지 등이 이에 해당한다. 주기적 메시지만 주기적으로 발생하는 서비스 요구 메시지를 의미하며, 피드백 제어를 수행하기 위하여 제어기에서 주기적으로 발생하는 샘플링 메시지나 주기적으로 실시간 모니터링을 위해 발생하는 메시지 등이 이에 해당한다. 주기적 응답이란 주기적으로 생성되는 서비스 요구 메시지에 대한 응답 메시지를 의미한다. 주기적 응답은 주기적으로 생성되는 서비스 요구 메시지를 수신한 장비에서 임의의 프로세싱 지연시간 후에 생성되므로, 엄밀한 의미에서 주기적으로 발생되지는 않는다. 다만 일반적인 서비스 메시지와 구분하기 위하여 주기적 응답 메시지로 정의한다. 일반 메시지만 앞서 기술된 종류에 해당하지 않는 메시지를 의미하며, 서비스 지연시간에 별다른 제한을 받지 않는 서비스 메시지를 의미한다.

MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법은 다음과 같은 세 가지요구사항을 만족하도록 설계 되었다.

- R1: 긴급 메시지는 가능한 빠른 시간 내에 전송되어야 한다.
- R2: 주기적 메시지는 주어진 프로세스 주기 이내에 전송이 완료되어야 한다.
- R3: 대역폭 할당 기법을 탑재한 MS/TP 프로토콜은 기존의 MS/TP 알고리즘을 사용하는 장비와 통신이 가능하도록 역적합성(backward compatibility)이 유지되어야 한다.

본 장의 3.1절에서는 MS/TP 프로토콜에 적용되는 대역폭 할당 기법의 개념을 기술하며, 3.2절에서는 스케줄링된 BACnet 메시지를 적절히 처리하기 위하여 기존의 MS/TP 프로토콜이 어떻게 변형되어야 하는가를 기술한다. 3.3절에서는 MS/TP 통신망에 접속되는 장비들의 시간 동기화 기법에 대하여 기술한다.

3.1 MS/TP 프로토콜에서 대역폭 할당

이 논문에서 제안하는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에서는 긴급 메시지, 주기적 메시지, 주기적 응답, 일반 메시지의 우선순위로 메시지가 처리된다. 기존의 MS/TP 프로토콜에서는 우선순위로 메시지를 처리하는 기능을 지원하지 않는다. 그러나 기존의 MS/TP 프로토콜에 대역폭 할당 기법을 적용하기 위하여서는 전송되는 메시지에 우선순위가 할당될 수 있어야 한다. 본 연구에서 제시하는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에서는 기존의 프로토콜을 사용하는 장비와 통신 호환성 유지를 위한 요구사항 R3을 만족하면서 메시지의 우선순위를 지정할 수 있도록 하기 위하여, BACnet의 네트워크계층 헤더에 정의된 Network Priority (이하 NP로 표기) 필드를 활용한다. NP 필드는 네트워크 계층 헤더의 두 번째 옥텟에 존재하는 최하위 2 비트이며, 각각 normal (B'00'), urgent(B'01'), critical equipment(B'10'), life safety(B'11')로 정의되어 있다. 하지만 BACnet 규격에서는 그 사용 방법에 대하여 특별히 정의하고 있지 않다. MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에서는 실제로 사용되지 않는 이 두 비트를 이용하여, 새로 정의한 메시지의 우선순위 정보를 표1과 같이 매핑하여 사용한다.

표 1 BACnet 메시지 우선순위 재정의

Table 1 Definition of priority in BACnet message

대역폭 할당 기법 우선순위	BACnet 규격 정의	필드 값
긴급 메시지	Life Safety	B'11'
주기적 메시지	Critical Equipment	B'10'
주기적 응답	Urgent	B'01'
일반 메시지	Normal	B'00'

MS/TP 통신망에 접속되는 노드는 마스터 노드와 슬레이브 노드로 구분된다. 마스터의 경우 능동적으로 메시지를 전송할 수 있기 때문에 슬레이브 노드에 비하여 다양한 BACnet 서비스를 지원한다. 최근에 현장에서 설치되는 MS/TP 통신망의 경우 대부분이 모든 노드가 마스터로 구성된 시스템을 구축하는 추세이며, 따라서 본 연구에서도 모든 노드가 마스터로 구성된 시스템에 대하여 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법을 적용한다.

본 연구에서 제안하는 대역폭 할당 기법에서는 그림 1과 같이 MS/TP의 전체 대역폭을 주기적 구간과 주기적 응답 구간, 그리고 일반 메시지 구간으로 나눈다. 긴급 메시지는 대역폭의 구간에 관계없이 언제나 발생 즉시 전송되도록 한다. 이는 MS/TP 대역폭 할당 기법의 요구사항 R1을 만족시키기 위함이다. 주기적 메시지는 주기적 구간에, 주기적응답 메시지는 주기적 응답 구간에, 그리고 일반 메시지는 일반 메시지 구간에 각각 전송되도록 한다. 주기적응답 구간은 주기적 구간이 종료되고 주기적 메시지에 대한 응답이 생성되는 프로세싱 지연시간의 최대값(T_{max_proc}) 이후에 시작된다.

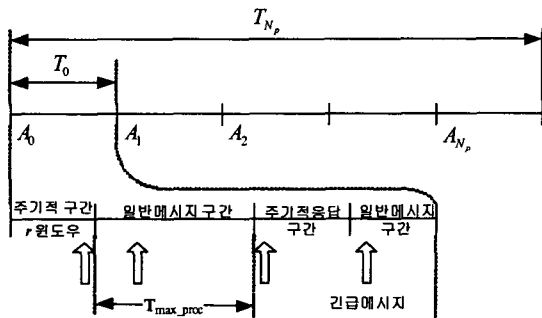


그림 1 MS/TP 프로토콜에서 대역폭 할당 기법의 개념
Fig. 1 Bandwidth allocation scheme in MS/TP protocol

주기적 구간에서의 대역폭 할당 기법은 선행연구[12]에서 제시된 방법이 바로 적용된다. 그림 1에서 주기적 구간 동안 주기적 데이터를 생성하는 노드들은 한번씩의 데이터 전송 기회를 부여받는다. 주기적 구간에서 메시지 스케줄링의 기본 개념은 주기적으로 생성되는 서비스 메시지의 발생 주기와 발생 시간을 조절하여, 하나의 주기적 구간 내에서 전송되는 주기적 메시지의 개수를 r 개 이하로 제한하는 것이다. 이를 위하여 시스템 설계자는 주기적 메시지를 발생하는 각각의 노드에서 메시지 발생 주기와 최초로 주기적 메시지가 발생하는 시점을 결정한다.

MS/TP 프로토콜에 대역폭 할당 기법을 적용하기 위하여 주기적 메시지를 생성하는 노드와 그렇지 않은 노드간에 주

소를 부여하는 방법을 달리한다. 즉, 주기적 메시지를 생성하는 노드들에 대하여 0번지부터 N_p 번지까지 주소를 부여하고, 그렇지 않은 노드들의 주소는 N_p 번지 이후의 주소를 부여한다. 이는 일반메시지 구간에서 주기적 구간 또는 주기적응답 구간으로 천이되는 오버헤드에 의한 대역폭 손실을 최소화하기 위함이다. 노드 번호 0번지부터 N_p 번지까지 각각의 노드에서 주기적 메시지의 최대 허용 지연시간이 다음의 벡터 Φ 로 주어졌다.

$$\Phi = [\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{N_p} \mid \phi_i \leq \phi_{i+1}] \quad (1)$$

시스템 설계자가 결정하여야 할 메시지 발생 주기 벡터 T 와 최초 메시지 발생 시점 벡터 t 를 다음과 같이 정의한다.

$$T = [T_0, T_1, \dots, T_{N_p} \mid T_i \leq T_{i+1}] \quad (2)$$

$$t = [t_0, t_1, \dots, t_{N_p} \mid t_i \leq t_{i+1}] \quad (3)$$

각 노드에서의 주기적 메시지의 최대허용 지연시간에 대한 요구사항 R2를 만족시키기 위하여서는 노드 i 에서 생성되는 주기적 메시지의 발생 주기 T_i 가 반드시 ϕ_i 를 넘지 않아야 한다. 선행연구의 결과로부터 각 노드에서 주기적 메시지의 생성 주기 T_i ($i=0$ 에서 N_p)는 다음과 같이 결정된다.

$$T_0 = \phi_0, T_i = k_i T_0, k_i = 2^{\lfloor \log_2 \frac{\phi_i}{T_0} \rfloor}, \forall i = 1 \text{ to } N_p \quad (4)$$

식 (4)로부터 결정된 T_i 는 최대허용지연시간 ϕ_i 를 초과하지 않으면서 서로 정수배의 관계를 갖는다. 최소 메시지 생성주기인 T_0 동안 생성되는 주기적 메시지의 개수의 평균값 r 은 다음과 같이 결정된다.

$$r = \left\lceil \sum_{i=0}^{N_p} \frac{1}{k_i} \right\rceil \quad (5)$$

대역폭 할당 기법에서는 그림 1의 주기적 구간에서 생성되는 메시지의 개수가 어느 구간에서든지 r 개를 초과하지 않아야 한다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 각 노드에서 주기적 메시지의 최초 발생 시점인 t_i ($i=0$ 에서 N_p)는 선행연구로부터 다음과 같이 결정된다.

$$t_i = \inf \{ A_l \geq A_{l-1} : u^n(A_l) \leq r \}, i = 0 \text{ to } N_p, l = 1 \text{ to } k_{N_p} \quad (6)$$

여기서 A_l 은 그림 1에서 보는 바와 같이 T_{N_p} 개의 주기적 구간 중 l -번째 T_0 구간의 시작 시점이며, $u^n(A_l)$ 은 노드주소 0부터 n 까지의 노드들 가운데 A_l 시점에서 주기적 메시지를 발생한 노드의 개수이다.

그림 1의 주기적 구간에서는 주기적 메시지뿐만이 아니라 긴급메시지도 전송된다. 따라서 주기적 구간의 최대값 T_p^{max} 는 다음과 같이 결정된다.

$$\tau_p^{max} = \frac{r(L_p + L_h + T_{turnaround}) + N_p(L_h + T_{turnaround})}{1 - \lambda_u^{max}(L_u + T_{turnaround})} \quad (7)$$

여기서, L_p , L_u , L_h 는 각각 주기적 메시지 중 요구 메시지의 길이, 긴급 메시지의 길이, 그리고 토큰 및 Reply_Postpond 메시지의 길이이다. λ_u^{max} 는 네트워크 내에서 산발적으로 발생하는 모든 긴급 메시지의 최대 발생 빈도이다. $T_{turnaround}$ 는 MS/TP 프로토콜 파라미터로서 하나의 노드가 프레임 수신 후 EIA-485 구동기를 활성화시키기 전까지의 최소시간이다. 만일 식 (5)의 r 을 통하여 결정된 식 (7)의 τ_p^{max} 가 T_0 내에서 주기적 트래픽에 할당된 대역폭을 초과한다면, 이는 제한된 대역폭에 너무 많은 주기적 트래픽이 부과된 경우이므로 시스템 설계자는 해당 MS/TP 통신망에서 주기적 메시지를 생성하는 노드의 개수 또는 긴급메시지의 트래픽 부하를 줄여야 한다. 필드 레벨의 로컬 네트워크에서 긴급 메시지를 발생시키는 노드나 감시 포인트의 개수는 이미 시스템 설계 단계에서 결정되므로 λ_u^{max} 등은 설계 단계에서 충분히 예측하고 조정하는 것이 가능하다.

그림 1에서 보는 바와 같이 T_0 의 주기동안 r 개의 주기적 메시지를 비롯하여 이에 대한 주기적 응답 메시지와 긴급 메시지 및 일반 메시지가 전송된다. 대역폭 할당을 적용하는 경우 T_0 의 시분할 대역폭에서 주기적 메시지와 긴급메시지를 제외한 일반 메시지에 할당 되는 대역폭 B_n 은 다음과 같이 결정된다.

$$B_n = T_0[1 - \lambda_u^{max}(T_{turnaround} + L_u)] - [r(L_p + L_r + L_h + 2T_{turnaround}) + 2N_p(T_{turnaround} + L_i)] \quad (8)$$

3.2. MS/TP 프로토콜의 변형

본 절에서는 기존의 MS/TP 프로토콜을 최소한으로 수정하여 요구사항 R3의 역행 적합성을 보장하는 동시에, 기술한 대역폭 할당 기법을 도입하여 요구사항 R1, R2를 만족시키는 개선된 MS/TP 프로토콜에 대하여 기술한다. 개선된 MS/TP 프로토콜에서는 현재 노드가 어떤 모드로 동작되는가를 나타내기 위한 노드 파라미터로서 N_{mode} 를 다음과 같은 네 가지 상태로 정의한다.

- ① NORMAL : 일반 메시지 전송이 가능한 초기화 상태
- ② CYCLIC_REQ : 주기적 구간이 시작된 상태
- ③ CYCLIC_REPLY : 주기적 응답 구간이 시작된 상태
- ④ ENFORCE_CYCLIC: 주기적 구간이 시작되어야 하나 아직 시작되지 못하고 있는 것으로 판단되는 상태

기존의 MS/TP 프로토콜은 전송하는 메시지에 우선순위를 부여하지 않으며 모든 BACnet 서비스 메시지는 하나의 전송 큐에서 대기한다. 하지만 MS/TP 대역폭 할당 기법에서는 전송되는 메시지에 우선순위를 부여하고, 지정된 구간에 선별적으로 전송되도록 하고 있다. 따라서 개선된MS/TP 프로토콜에서는 메시지의 우선순위에 따라 별도의 큐를 정의할 필요가 있다. 그림 2는 대역폭 할당 기법을 적용하기 위하여 개선된 MS/TP 프로토콜이 사용하는 전송 큐의 구조를 보여준다. 개선된 MS/TP 프로토콜에서는, 특정 노드가 토큰을 수

신할 경우 현재 노드의 동작 모드(N_{mode})에 따라 전송 큐 가운데 하나를 선택하여 메시지를 전송한다.

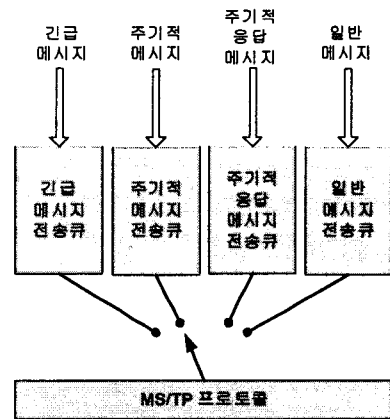


그림 2. 개선된 MS/TP 프로토콜의 전송 큐 구조
Fig. 2 Structure of transmitter queue in the modified MS/TP protocol

BACnet 규격서[4]에는 MS/TP 프로토콜의 동작이 상태 천이도 형태로 제시되어 있다. 그림 3에는 대역폭 할당 기법을 적용하기 위하여 개선된 MS/TP 프로토콜의 상태 천이도가 나타나 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 MS/TP 프로토콜은 기존의MS/TP 프로토콜의 상태 천이도에 PASS TOKEN ON CYCLIC 상태만이 새로이 추가되었다. 이와 더불어 IDLE, USE TOKEN, DONE WITH TOKEN, PASS TOKEN 상태의 동작 일부가 변형되었다.

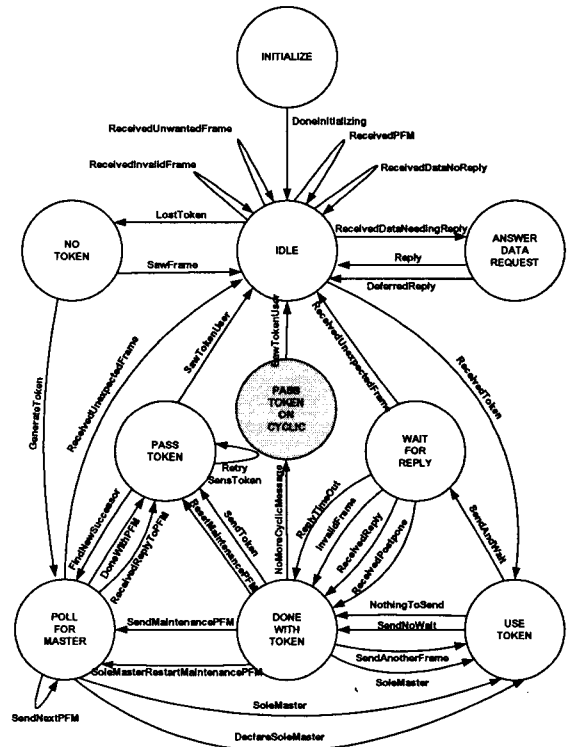


그림 3 개선된 MS/TP 프로토콜의 상태 천이도
Fig. 3 State transition diagram in the modified MS/TP protocol

개선된 MS/TP 프로토콜의 IDLE 상태에서는 현재 네트워크를 통해 전송되고 있는 메시지 프레임의 NP 영역을 모니터링하여 현재 주기적 구간의 시작 시점과 종료 시점을 파악한다. 또한, 노드가 토큰을 수신하여 USE TOKEN 상태에 도달하면 N_{mode} 에 관계없이 언제나 긴급 메시지 전송 큐를 가장 먼저 검사한다. 만일 전송하여야 하는 긴급 메시지가 존재하면 다른 메시지를 전송하지 않고 곧바로 긴급 메시지를 전송한 후, 원래 USE TOKEN 상태의 동작을 수행한다. 이는 앞에서 정의한 시스템 요구사항 R1을 만족시키기 위함이다. MS/TP 프로토콜에서 DONE WITH TOKEN 상태는 노드가 토큰을 수신하고 메시지를 전송한 후, 다시 메시지를 전송할 것인지 아니면 토큰을 다음 노드로 전달할 것인지를 결정한다. 개선된 MS/TP 프로토콜에서 노드는 동작 모드에 따라 토큰을 전달하여야 하는 노드의 번호가 달라져야 하므로 이에 따른 동작 과정을 추가하였다.

PASS TOKEN ON CYCLIC 상태는 주기적 구간이 시작된 상태에서 자신이 전송할 모든 주기적 메시지의 전송이 완료된 경우에 도달하게 된다. 개선된 MS/TP 프로토콜에 새로이 추가된 PASS TOKEN ON CYCLIC 상태는 현재 노드의 동작 모드와 노드 번호 그리고 T_{no_cycle} 타이머의 값 등에 따라 다음에 토큰을 전달할 노드를 찾는 동작을 수행한다. T_{no_cycle} 타이머는 일반 메시지의 전송에 의해 토큰 전달이 지연되어 주기적 메시지 구간이 시작되지 못하는 현상을 방지하기 위하여 사용되는 네트워크 파라미터로서 네트워크상의 모든 노드가 동일한 값을 사용한다. 만일 T_{no_cycle} 타이머가 만료되면, 노드의 동작 모드는 무조건 ENFORCE CYCLIC으로 전환된다. T_{no_cycle} 은 다음과 같은 조건을 만족하도록 설정되어야 한다.

$$T_{no_cycle} = T_0 - \tau_p^{max} \tag{9}$$

기존의 MS/TP 프로토콜 상태 천이도에서 PASS TOKEN 상태는 NS 노드로 토큰을 전달하고 그 결과를 확인하는 상태이다. 개선된 MS/TP 프로토콜에서는 N_{mode} 가 CYCLIC인 경우에서 PASS TOKEN 상태로 천이되면, N_{mode} 를 NORMAL로 변경하여 주기적 응답 구간을 종료한다. 그 외의 모든 동작은 기존의 MS/TP 프로토콜의 PASS TOKEN 상태에서 수행되는 알고리즘과 동일하다.

개선된 MS/TP 프로토콜에서 긴급 메시지의 지연시간은 메시지가 발생된 시점에서 토큰을 수신할 때까지의 소요시간으로 정의된다. 그러나 T_{no_cycle} 타이머가 만료되는 경우 토큰이 모든 노드를 순회하지 못하고 도중에 0번 노드로 강제로 전송되며 이 때 긴급 메시지의 서비스 지연시간이 일시적으로 증가할 수 있다. 이러한 경우는 긴급메시지를 생성하는 노드의 번호가 높을수록 발생할 확률이 높아진다. 따라서, 개선된 MS/TP 프로토콜에서는 노드 번호를 할당함에 있어서 주기적 메시지 생성 노드를 0번부터 가장 낮은 번호로 부여하고, 긴급메시지를 생성하는 노드는 그룹화하여 가능한 낮은 번호를 갖도록 설정하는 것이 바람직하다.

3.3 MS/TP 노드간의 시간 동기화

MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법은 주어진 네트워크

대역폭을 주기적 구간과 비주기적 구간으로 크게 나누어 메시지를 처리한다. 이를 위하여, 개선된 MS/TP 프로토콜에서는 대역폭의 각 구간을 구분하기 위하여 네트워크 파라미터인 T_{max_proc} 와 T_{no_cycle} 타이머를 사용한다. 이러한 타이머는 각 노드에 분산 설치되며, 따라서 노드들 간에 서로 동기화되지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에서는 자체적으로 인터벌 타이머를 동기화하기 위한 간단한 알고리즘을 추가하였다.

일반적인 네트워크 시스템에서는 노드간에 시간 동기화를 위하여, 네트워크에 연결된 특정 노드가 주기적으로 현재 시간 정보를 모든 노드로 전송한다. 이를 수신한 노드는 자신의 내부 시간을 수신한 시간 정보를 사용하여 보정한다. MS/TP 대역폭 할당 기법 알고리즘에서는 주기적 구간을 처음 시작하는 노드가 시간 동기화를 위한 메시지를 먼저 전송하도록 설계하였다. 또한, 다른 메시지보다 우선적으로 전송하기 위하여 시간 동기화 메시지의 우선순위를 긴급 메시지로 설정하도록 설계하였다. 다음 그림 4는 개선된 MS/TP 프로토콜에서 시간 동기화 메시지를 전송하는 시점을 보여준다.

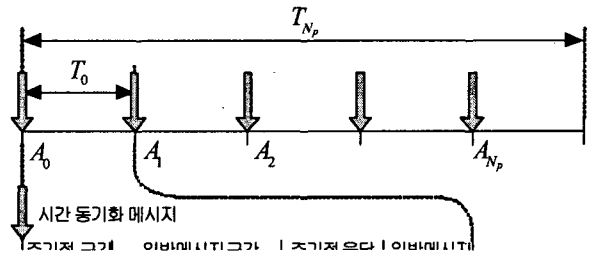


그림 4 시간 동기화 메시지의 전송 시점
Fig. 4 Transmission of time synchronization message

이와 같은 방법으로 노드간의 시간 동기화를 수행하면, 주기적 구간의 최소 발생 주기인 T_0 마다 한번씩 모든 노드간의 시간 동기화가 이루어지므로, 특정 노드가 일시적으로 시간 동기화 메시지를 수신하지 못하더라도, 곧 이어 다음 번 주기적 구간에서 동기화를 수행할 수 있게 된다. 주기적 구간의 최소 주기인 T_0 가 예를 들어 500 msec 정도로 매우 적은 경우라도, 시간 동기화를 위해 소비하는 대역폭은 전체 대역폭의 1% 미만으로 계산된다.

이러한 동기화 기능은 노드가 토큰을 소유한 시점에 시간 동기화 메시지를 전송하게 되므로, 토큰 획득을 위한 네트워크 지연시간이 시간 동기화에 영향을 미치지 않게 되어 복잡한 보정 알고리즘 없이 노드간의 시간 동기화가 가능하게 된다. 또한, BACnet에서 이미 정의하고 있는 BACnet Time Synchronization 메시지를 사용하며, 따라서 기존의 MS/TP 프로토콜을 사용하는 노드와의 통신 호환성을 확보하시 위한 요구사항 R3을 만족시킬 수 있다.

4. MS/TP 프로토콜 대역폭 할당 기법 타당성 검증

4.1 시뮬레이션 모델의 구성

이 장에서는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에 대한

타당성을 시뮬레이션 기법을 사용하여 분석한다. 시뮬레이션 모델은 선행 연구[10, 11]를 통하여 개발된 기존의 MS/TP 프로토콜 모델에 본 연구에서 제시한 대역폭 할당 기법의 기능을 추가하였다. 타당성 검증을 위하여 이 장에서는 그림 5와 같이 32개의 마스터 노드로 구성된 MS/TP 로컬 네트워크 시스템을 가정하였다. MS/TP 프로토콜은 EIA 485 전송 기술을 사용하기 때문에, 하나의 네트워크 세그먼트내에 최대 32개의 노드가 연결될 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 주기적 메시지를 발생하는 노드(빗금으로 구분)의 주소지는 0번부터 7번까지 부여되었다 (즉, $N_p=7$). 시뮬레이션에서 MS/TP의 전송 속도는 76.8 Kbps를 사용하였으며, 각 노드에서 서비스 메시지를 처리하는데 소요되는 프로세싱 지연시간은 서비스 종류에 관계없이 모두 10 ~ 50 msec 범위의 일양 분포(Uniform Distribution)를 따르는 것으로 가정하였다.

시뮬레이션 실험에서 긴급 메시지와 일반 메시지는 주기적 메시지를 생성시키는 노드들을 포함한 전체 노드에서 발생되도록 설정하였다. 다음의 표는 시뮬레이션에서 사용된 BACnet 서비스 메시지의 종류와 발생 주기 등을 비교하여 보여준다.

표 2에서 Unconfirmed Event Notification 서비스란 MS/TP 장비 내부에 발생한 경보나 상태 변화를 알리기 위하여 사용하는 서비스 메시지이며, 전송한 메시지에 대한 응답 메시지를 필요로 하지 않는다. 이 서비스는 화재나 긴급 상황 또는 오퍼레이터가 반드시 빠른 시간 내에 확인이 필요한 경우에 사용되며, 따라서 메시지의 우선순위는 긴급으로 설정하였다. 이 시뮬레이션에서는 긴급 메시지가 모든 노드에서 평균 10초마다 한 번씩 발생하는 것으로 가정하였으며, 포아송 분포를 따르는 것으로 가정하였다.

주기적 메시지는 BACnet의 가장 기본적인 서비스인 Read Property 서비스 메시지를 선정하였다. 대부분의 시스템에서는 주기적으로 특정 노드의 값을 읽어 들여 최신의 정보를 유지하는 방식으로 동작하기 때문에, Read Property 서비스 메시지가 주기적 메시지로 가장 적합하다. Read

Property 서비스 메시지는 반드시 응답을 필요로 하는 서비스 메시지이며, Read Property 서비스 메시지에 대한 응답 메시지가 주기적 응답 메시지가 된다. 이 시뮬레이션에서는 Read Property 서비스 메시지는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에 의해 결정된 $T_i(i=0$ 에서 7)의 시간 간격을 두고, 노드 i 에서 주기적으로 발생하는 것으로 가정하였다.

BACnet에서 사용되는 주요 서비스 메시지들은 대부분 응답을 필요로 하는 Confirmed 서비스이기 때문에, 일반 메시지로 Confirmed COV Notification 서비스 메시지를 선정하였다. Confirmed COV Notification 서비스는 지정된 속성의 값이 기준 값 이상으로 변경될 경우, COV(Change-Of-Value) 발생을 보고하는 서비스이며 응답을 반드시 필요로 한다. 일반 메시지는 전체 네트워크 트래픽 부하에 따라 각 노드에서 발생하는 평균 발생 주기를 조정하였으며, 역시 포아송 분포를 따라 발생하는 것으로 가정하였다.

시뮬레이션 실험에서는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법의 성능을 평가하기 위하여, 모드 0부터 7에서 생성되는 주기적 메시지의 최대 허용 지연시간을 다음과 같이 설정하였다. 여기서 주기적 메시지의 최대허용지연시간은 주기적으로 발생하는 Read Property 서비스 요구 메시지가 생성되는 시점에서 이에 대한 응답 메시지를 수신하는데까지 허용되는 시간으로 정의된다.

$$\Phi = [600, 800, 1000, 1200, 1400, 1800, 2000, 2400] \text{ msec}$$

4.1절에서 제시한 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에 의하여 노드 i 에서의 메시지 생성주기 T_i 는 다음과 같이 결정된다.

$$T = [600, 600, 600, 1200, 1200, 1200, 2000, 2400] \text{ msec}$$

또한, 윈도우 크기는 $r=6$ 으로 결정된다. 즉, 최소 생성주기 T_0 동안 최대로 전송 가능한 주기적 메시지의 개수는 6개

표 2 시뮬레이션 조건
Table 2 Simulation condition

BACnet 메시지	길이 (바이트) (요구 / 응답)	우선순위	트래픽 부하 (G)	평균 발생주기 (초)
Unconfirmed Event Notification	76	긴급	0.0317	10
Read Property	23 / 29	주기적	0.0592	T_i
Confirmed COV Notification	48 / 15	일반	0.1091 ~ 0.7091	2.4060 ~ 0.3702

주기적 메시지 발생 노드



그림 5 시뮬레이션의 대상이 되는 MS/TP 로컬 네트워크 구성
Fig. 5 Configuration of MS/TP local network in the simulation model

이하로 제한된다. 각 노드에서 최초 메시지 발생 시점 벡터 t 는 다음과 같이 결정된다.

$$t = [0, 00, 0, 0, 0, 0, 600, 600] \text{ msec}$$

주기적 메시지의 발생 시작 시간 t_i 를 결정한다. 그림 6에 는 대역폭 할당 기법을 통하여 결정된 각 노드에서의 주기적 메시지 생성 패턴이 나타나 있으며, 이러한 패턴은 T_{N_p} 의 주기로 반복된다.

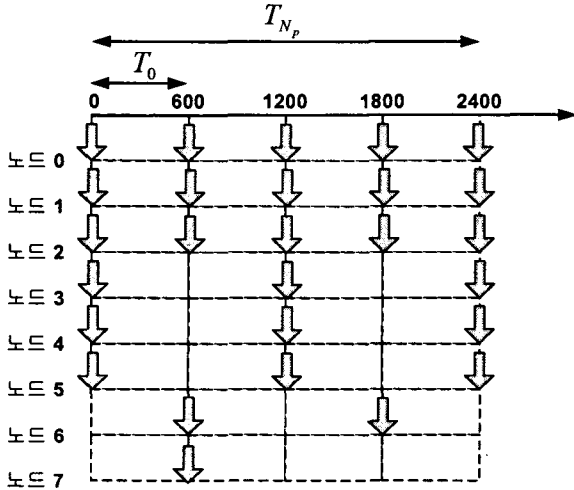


그림 6 주기적 메시지 생성 패턴
Fig. 6 Generation pattern of periodic message

개선된 MS/TP 프로토콜에서는 대역폭 할당 기법을 적용하기 위하여 추가로 파라미터들을 정의하였다. 시뮬레이션 실험에서 프로세싱 지연시간은 [10, 15] msec 구간에서 균등하게 분포되는 것으로 가정하였으며, T_{max_proc} 는 여기에 여유를 두어 60 msec로 설정하였다. 또한, 식 (9)로부터 T_{no_cycle} 타이머의 값은 520 msec으로 설정하였다.

4.2. 시뮬레이션 결과 분석

본 절에서는 시뮬레이션 결과를 통하여 개선된 MS/TP 프

로토콜의 타당성을 검증한다. 본 연구에서 네트워크의 트래픽 부하는 G 로 정량화한다. 트래픽 부하 G 의 물리적 의미는 단위시간당 프로토콜 자체의 오버헤드를 제외한 순수 메시지를 전송하는데 소요된 시간의 비율을 나타내며, 이는 다음과 같이 표현된다

$$G = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{T_i}$$

여기서 B 는 미디어의 데이터 전송속도(bits/sec), N 은 미디어 내에 접속된 노드의 개수, T_i 는 노드 i 에서 생성되는 메시지의 평균 발생 주기(sec), L_i 는 노드 i 에서 생성되는 메시지의 평균 길이(bits)를 나타낸다. G 는 0과 1사이에서 결정되며, 1에 접근할수록 트래픽 부하는 증가된다.

대역폭 할당기법이 적용되지 않는 기존의 MS/TP 프로토콜에서는 메시지를 우선순위별로 처리하는 기능이 없으며, 긴급메시지, 주기적 메시지 및 일반 메시지가 하나의 전송큐를 공유하여 전송된다. 따라서, 그림 7에서 보는 바와 같이 모든 메시지들의 지연시간은 트래픽 부하의 증가에 따라 지수함수의 곡선 패턴으로 증가할 수밖에 없다. 그림 7에서 긴급메시지, 주기적 메시지 및 일반 메시지의 서비스 지연시간 성능 곡선이 서로 다른 것은 이러한 메시지들이 하나의 전송큐를 공유하더라도 이들의 메시지 생성 패턴(즉, 메시지 길이 및 메시지 발생주기)이 서로 다르기 때문이다.

MS/TP 프로토콜에 대역폭 할당 기법을 적용한 경우에는 긴급메시지, 주기적 메시지 및 일반 메시지가 각각의 독립된 전송큐를 사용한다. 주기적 메시지의 경우 트래픽 부하가 증가함에도 불구하고 서비스 지연시간이 $T_0=600\text{msec}$ 을 초과하지 않아 요구사항 **R2**를 만족하는 것으로 나타났다. 이는 대역폭 할당 기법을 적용하는 경우 T_0 구간에서 발생하는 모든 주기적 데이터를 동일한 구간 내에서 전송이 완료되도록 하기 때문이다. 대역폭 할당 기법을 적용한 경우에는 또한 긴급메시지 역시 트래픽 부하의 증가에도 불구하고 특정 값을 초과하지 않아 요구사항 **R1**을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 그림 2에서 보는 바와 같이 긴급메시지는 별도의 전송큐에 삽입되어 가장 높은 우선순위로 처리되기 때문이다.

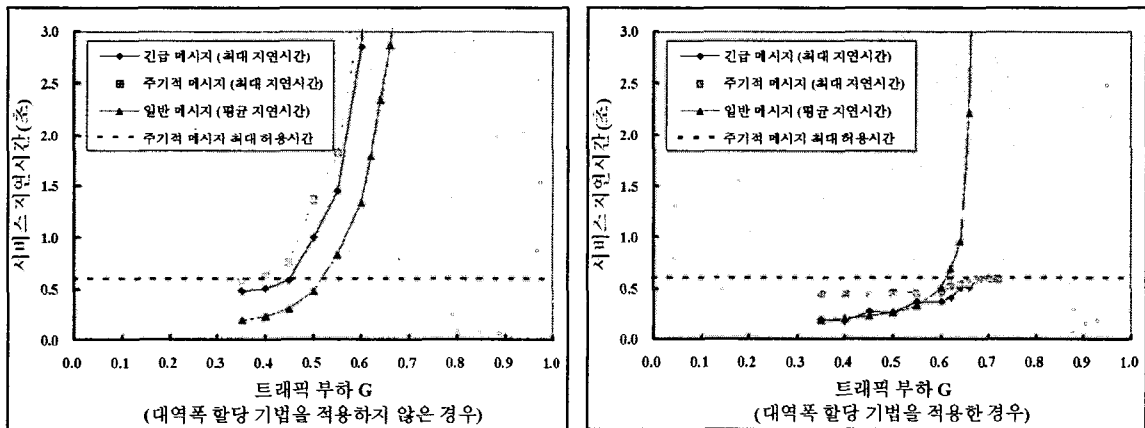


그림 7 대역폭 할당 기법의 타당성을 위한 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 7 Comparison of simulation results for validity of bandwidth allocation scheme

본 연구에서는 서비스 지연시간 이외에 각 서비스 메시지의 서비스 성공률 변화를 비교하였다. 서비스 성공률은 우선 순위별로 각 메시지가 특정 노드에서 발생된 개수 중 실제로 전송 서비스에 성공한 메시지의 비율로 정의한다. 보다 실제적인 예를 제시하기 위하여 이 논문에서는 긴급 메시지의 경우 서비스가 1초 이내에 완료되는 것을 서비스 성공으로 설정하였다. 주기적인 서비스 메시지의 서비스 성공 기준은 각각의 주기적 메시지의 최대 허용 지연시간을 기준으로 설정하였다. 일반 메시지는 지연시간에 영향을 받지 않는 메시지로 정의하였으므로 특별히 고려하지 않는다.

이 절에서 수행한 시뮬레이션 시나리오에서 노드 수는 MS/TP 프로토콜 규격에서 정의하는 최대 노드 개수인 32개로 설정하였으며, 모든 노드에서 긴급 메시지, 주기적 메시지, 그리고 일반 메시지를 발생시키는 것으로 설정하였다. 긴급 메시지의 트래픽 부하는 0.05로 설정하였으며, 모든 노드의 $N_{max_info_frames}$ 파라미터는 10으로 설정하였다. 각 노드에서 발생하는 주기적 메시지의 최대 허용 지연시간은 (1) 노드 0 ~ 노드 7 : 600 msec, (2) 노드 8 ~ 노드 15 : 800 msec, (3) 노드 16 ~ 노드 23 : 1200 msec, (4) 노드 24 ~ 노드 27 : 1500 msec, (5) 노드 28 ~ 노드 31 : 2400 msec 로 설정하였다.

그림 8의 시뮬레이션의 결과에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제안하는 대역폭 할당 기법을 적용할 경우, 긴급 메시지와 주기적 메시지는 트래픽 부하에 관계없이 언제나 성공적으로 서비스가 처리됨을 알 수 있다. 반면 대역폭 할당 기법을 적용하지 않은 기존의 MS/TP 네트워크 시스템에서는 주기적 메시지와 긴급 메시지의 서비스 성공률이 트래픽 부하의 증가에 따라 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

이 논문에서는 BACnet 을 사용하는 빌딩 제어 및 자동화 시스템에서 데이터링크계층의 프로토콜로 가장 널리 사용되는 필드 레벨 네트워크 프로토콜인 MS/TP 프로토콜에서 주기적 데이터 및 긴급데이터의 실시간 통신 성능을 개선하는 새로운 방법을 제시하였다. 이 논문에서 제시하는 대역폭 할

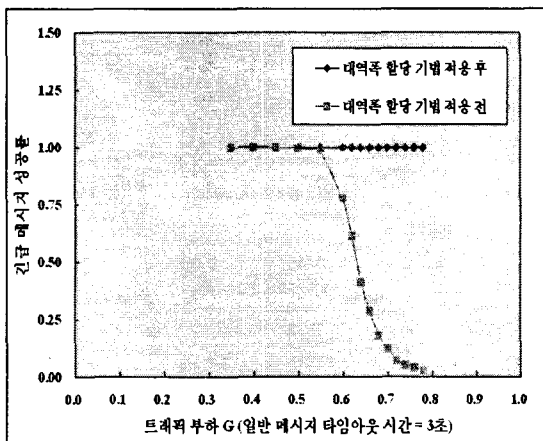
당 기법은 기존의 MS/TP 프로토콜에 대한 동작 알고리즘의 틀을 그대로 유지하고 있으며, 또한 기존에 사용되던 MS/TP 프로토콜의 메시지 형식을 그대로 사용한다. 따라서 이 논문에서 제안하는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법 알고리즘은 기존의 MS/TP 프로토콜을 사용하는 빌딩 자동화 및 제어 시스템과의 통신 호환성(backward compatibility)을 유지한다.

이 논문에서는 새롭게 제안하는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법에 대한 타당성과 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션 모델을 사용하였다. 개발된 시뮬레이션 모델을 사용한 시뮬레이션 결과, 이 논문에서 제안하는 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법 알고리즘은 제한된 시간 내에 처리가 완료되어야 하는 주기적 메시지와 가능한 빠른 시간 내에 처리되어야 하는 긴급 메시지, 그리고 일반 서비스 메시지를 효과적으로 구분하여 처리한다. 또한, 네트워크 트래픽 부하의 수준에 관계없이 언제나 주기적 메시지와 긴급 메시지의 서비스 지연시간이 제한된 시간 이하로 유지되는 것을 보장한다.

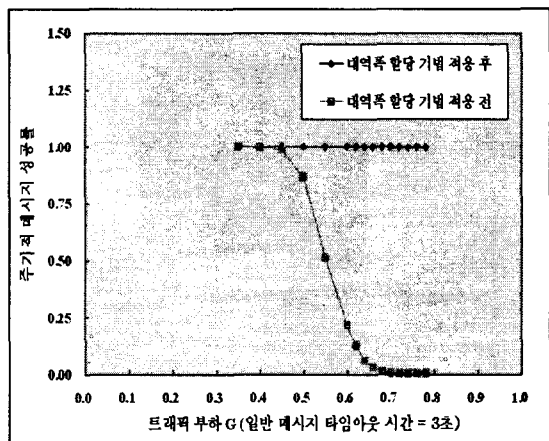
이러한 연구 결과를 바탕으로, 향후에는 대역폭 할당 기법의 유효성을 실험 모델에 실제로 구현하여 실험을 통하여 검증하는 연구를 계속 수행할 예정이다. 시뮬레이션을 통한 결과로 알고리즘의 유효성을 검증할 수 있었다 하더라도, 현장 적용 가능성은 실험 모델을 통하여 검증하는 것이 가장 적합할 것이라 판단된다. 이에 향후에는 MS/TP 프로토콜을 적용한 실험 장비를 개발하고 개발된 장비에 BACnet 프로토콜을 탑재하여, 이 논문에서 제안한 MS/TP 프로토콜의 대역폭 할당 기법의 현실화 가능성을 실험적으로 검증하고자 한다

감사의 글

본 연구는 과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00046-0) 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.



(a) 긴급 메시지의 성공률



(b) 주기적 메시지의 성공률

그림 8 긴급 메시지와 주기적 메시지의 서비스 성공률 변화
Fig. 8 Variation of throughput for urgent and periodic messages

참 고 문 헌

- [1] H. M., Newman, Direct Digital Control of Building Systems: Theory and Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
- [2] V. Boed, Networking and Integration of Facilities Automation Systems, CRC Press, Washington, D.C., 2000.
- [3] ASHRAE Guideline 13-2000, Specifying Direct Digital Control Systems, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA, 2000.
- [4] ANSI/ASHRAE Standard 135-2001, BACnet: A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers Inc. Atlanta, GA.
- [5] S. T. Bushby and H. M. Newman, "BACnet Today" "BACnet Today" Supplement to ASHRAE Journal. October 2002. pp. 10-18.
- [6] S. T. Bushby, "New Tools for Specifying BACnet" ASHRAE Journal. Vol. 44, No. 3, pp. 33-37, March 2002.
- [7] ISO 16484-5 Building automation and control systems Part 5 Data communication protocol, ISO, 2003.
- [8] ISO 16484-6 Building automation and control systems Part 6 Protocol Conformance Testing, ISO, 2004.
- [9] KS X 6909 Building Automation and Control Network (BACnet), Korean Standards Association, 1999.
- [10] W. S. Song, S. H. Hong and S. Bushby, A Simulation Analysis of the BACnet LANs, NISTIR 7038, National Institute of Standards and Technology, October, 2003.
- [11] 홍승호, 송원석, "빌딩자동화통신망의 성능해석에 관한 연구" 대한전기학회논문지, 제52D권, 제6호, pp. 359 - 364, 2003. 6.
- [12] S. H. Hong, "Bandwidth Allocation Scheme in the Cyclic-Service Fieldbus Networks," IEEE/ASME Trans. Mechatron., vol. 6, pp. 197-204, June 2001. 6.
- [13] 홍승호, 김유철, 김지용, "PROFIBUS에서 대역폭 할당 기법 구현 및 실험적 평가", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제6권, 제11호, pp. 943-954, 2000.11.
- [14] S. H. Hong, Y.C. Kim "Implementation of a Bandwidth Allocation Scheme in a Token-Passing Fieldbus Network", IEEE Trans. on Instrument and Measurement, Vol.51, No 2, pp.246-251, 2002. 4.
- [15] S. H. Hong, W. H. Kim, "Bandwidth Allocation Scheme in the CAN Protocol," IEE Proceedings - Control Theory and Applications, Vol. 147, pp. 37-44, Jan. 2000.
- [16] S. H. Hong, I. H. Choi "Experimental Evaluation of a Bandwidth Allocation Scheme for Foundation Fieldbus", IEEE Trans on Instrument and Measurement, Vol.52, No 12, pp. 1787-1791, 2003. 12.

저 자 소 개



송원석 (宋沅錫)

1975년 11월 27일생. 1998년 한양대학교 제어계측공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(공학). 현재 아이콘트롤스 기술연구소 선임연구원.



홍승호 (洪承鎬)

1956년 5월 31일생. 1982년 연세대학교 기계공학과 졸업. 1989년 Pennsylvania State University 졸업(공학). 1992년 ~ 현재 한양대학교 교수.