

## PROFIBUS 토큰 패싱 프로토콜의 성능모델에서의 전송지연 특성

김현희\*, 이경창(부산대 대학원 지능기계공학과), 이 석(부산대 기계공학부)

### Communication Delay Properties in Performance Model of PROFIBUS Token Passing Protocol

H. H. Kim(Mecha. Eng. Dept. PNU), K. C. Lee(Mecha. Eng. Dept. PNU), S. Lee(Mechanical Eng. Dept., PNU)

#### ABSTRACT

In many automated systems such as manufacturing systems and process plants, an industrial network or fieldbus is a very important component for the exchange of various and sometimes crucial information. Some of the information has a tendency to rapidly lose its value as time elapses after its creation. Such information or data is called real-time data that includes sensor values and control commands. In order to deliver these data in time, the fieldbus network should be tailored to have short delay with respect to the individual time limit of various data. Fine-tuning the network for a given traffic requires the knowledge on the relationship between the protocol parameters such as timer values and the performance measure such as network delay. This paper presents a mathematical performance model to calculate communication delays of the Profibus FMS network when the timer value TTR and the traffic characteristics are given. The results of this model is compared to those from experiments to assess the model's validity.

**Key Words** : Token passing protocol(토큰 패싱 프로토콜), Profibus-FMS(프로피버스 FMS), Fieldbus(필드버스), Communication delay(통신 지연), Real-time requirements(실시간 요구), Target rotation time(목표 순환 시간), desired communication delay(요구 전송 지연)

#### 1. 서론

최근 들어 산업용 네트워크는 자동화 시스템을 구성하는데 있어 필수적인 요소가 되고 있다. 특히, 산업용 네트워크는 자동화 시스템에서 사용되는 센서나 구동기, 제어기와 같은 필드 장치들간의 신뢰성 있는 데이터 교환을 보장함으로써, 시스템이 대형화되고 지능화되는데 있어 핵심적인 역할을 하고 있다[1,2]. 산업용 네트워크는 일대일로 연결하는 전통적인 점대점(point-to-point)방식에 비하여, 케이블의 절약이나, 유지보수의 용이, 확장성의 증대, 설치비용의 감소 등과 같은 장점을 가지고 있다. 이러한 특징으로 인하여, 산업용 네트워크는 전통적 공정제어 시스템 뿐만 아니라 조립 생산 시스템이나 물류자동화 시스템과 같은 다양한 분야로 확산되어가는 추세이다.

일반적으로 산업용 네트워크에서 교환되는 데이터는 실시간 데이터와 비실시간 데이터로 구분되며 공유된 전송 매체를 통하여 동시에 전송될 수 있어야 한다. 만약, 이러한 데이터들이 제대로 관리되지 못하면 즉, 실시간 데이터가 정해진 시간 한계치 내에 전송되어야 한다는 실시간 요구 조건(real-

time requirement)을 만족시키지 못하면, 시스템의 성능이 저하될 뿐만 아니라, 시스템에 치명적인 오류가 발생할 수도 있다.

더구나 실시간 요구 조건을 가지는 자동화 시스템에 필드버스를 적용하기 위해서는 세심한 네트워크 설계가 필요하다. 즉, 각 스테이션들에서 사용되는 통신 서비스(communication service)에 따라, 최적의 네트워크 성능을 보장할 수 있도록 네트워크 성능변수에 대한 효과적인 결정이 이루어져야 한다.

이러한 연구에도 불구하고, 아직까지 토큰 패싱 프로토콜에서 성능변수 선정은 매우 어려운 문제 영역에 속하며, 대다수의 네트워크 관리자는 이론적인 방법보다는 숙련된 경험을 바탕으로한 시행착오적 방법을 택하고 있다.

따라서 본 논문에서는 Profibus-FMS 토큰 패싱 프로토콜의 성능을 확인하기 위한 하나의 방법으로, 성능 변수에 따라 전송 지연을 수학적으로 계산할 수 있는 성능모델을 제시하고, 실험 모델의 결과와 비교하여 성능 모델의 유효성을 검토한다.

본 논문은 6 장으로 구성되어 있다. 2 장에서는 Profibus-FMS 에 대하여 간략히 서술하고, 3 장에서는 Profibus-FMS 의 성능모델을 제시한다. 4 장에서

는 성능모델의 시뮬레이션 결과에 대하여 서술하고 5 장에서는 시뮬레이션 결과와 실험모델의 결과를 비교한다. 마지막으로 6 장에서는 요약과 향후 과제에 대해서 서술한다.

## 2. Profibus-FMS 에서의 토큰패싱 프로토콜

Profibus-FMS[3]는 필드 장비들의 실시간 통신 특성을 보장하기 위하여 OSI(Open System Interface) 7 계층 모델 중 물리계층, 데이터링크 계층, 응용계층만을 가지고 있다. 또한, 사용자와의 인터페이스를 위하여 8 계층과 네트워크 관리를 위하여 관리계층을 가지고 있다. Profibus-FMS 의 물리계층으로는 RS-485 가 사용되며, 버스 토폴로지를 사용한다. Profibus 의 경우 전송속도는 9.6K 에서 12Mbps 까지 지원한다.

마스터는 전송 권한의 설정을 위하여  $T_{TR}$ (Target Rotation Time),  $T_{RR}$ (Real Rotation Time),  $T_{TH}$ (Token Holding Time)와 같은 3 가지 종류의 타이머를 가진다. 여기에서,  $T_{TR}$  은 토큰이 버스를 1 회전하는데 예상되는 시간으로 정의되며  $T_{RR}$  은 실제 토큰이 버스를 1 회전하는데 걸린 시간으로 정의된다. 또한,  $T_{TR}$  는 토큰을 가진 스테이션이 통신이 가능한 시간으로써,  $T_{TR}$  과  $T_{RR}$  의 차이( $T_{TR}-T_{RR}$ )로 정의된다.

Profibus-FMS 의 응용계층에는 FMS(Fieldbus Message Specification), LLI (Lower Layer Interface) 및 FMA7(Fieldbus Management Application 7)이 포함되어 있다. FMS 는 통신객체와 응용서비스를 정의하며, LLI 는 응용 서비스와 FDL(Fieldbus Data link Layer)간의 접속을 위한 기능을 정의하고 있다. 그리고, FMA7 은 네트워크 관리를 정의하고 있다.

Profibus-FMS 에서 통신 서비스가 수행되기 위해서는 서비스를 요구하는 클라이언트와 요구에 응답하는 서버와의 관계가 설정되어야 한다. 여기에서 클라이언트와 서버 관계는 통신 객체(communication objects), 통신 관계(communication relationships) 및 통신 서비스들로 구성된다. 통신 객체는 각 노드 사이에서 교환되는 데이터를 의미하며, 센서에서

측정되는 데이터나 통신 관련 파라미터들이 여기에 속한다. 한 노드는 여러 개의 통신객체를 가질 수 있으며, 이러한 통신 객체의 목록을 OD(Object Dictionary)라 한다. 통신 관계는 각 노드간 서비스의 논리적 연결 기능을 의미하며, 통신 관계의 목록은 CRL(Communication Relationship List)에서 관리된다. 이 목록은 CR(Communication Reference) 순으로 기입되며, 각 CR 에는 해당 노드에서 응용 프로세스들 간의 데이터 교환을 위한 관계 설정이 정의되어 있다. 통신 서비스는 이들 통신 객체들에 대한 해당 노드의 응용 서비스를 의미한다.

## 3. 통신지연 성능모델

본 장에서 제안된 Profibus-FMS 토큰 패싱 프로토콜의 성능모델은 다음과 같은 가정을 바탕으로 하고 있다.

먼저, 네트워크 인터페이스 카드(NIC, network interface card)의 송신 큐를 충분히 크게 설계함으로써, 각 스테이션에서 생성되는 메시지는 취소(overflow)되지 않고 모두 송신 큐에 저장된다고 가정한다. 둘째, 전송 중 에러는 발생하지 않는다고 가정한다. 셋째, GAP 갱신 시간을 충분히 크게 줌으로써, GAP 갱신을 위한 통신은 발생하지 않는다고 가정한다.

$$Nh_{Q_i}^j = Nh_{G_i}^j(0, T_{E_i}^j) - \sum_{l=1}^{i-1} Nh_{T_l}^j \quad (1)$$

$$Nl_{Q_i}^j = Nl_{G_i}^j(0, T_{E_i}^j) - \sum_{l=1}^{i-1} Nl_{T_l}^j$$

이러한 가정을 바탕으로 하여, j 번째 스테이션의 i 번째 순회(iteration)에서 토큰을 수신한 시점에 송신 큐에 저장되어 있는 높은 우선 순위 메시지의 수( $Nh_{Q_i}^j$ )와 낮은 우선 순위 메시지의 수( $Nl_{Q_i}^j$ )는 식 (1)에 나타낸 바와 같이 i 순회에서  $T_{E_i}^j$  시간까지 생성된 메시지의 총 수에서 i-1 순회까지 전송된 메시지의 총 수를 뺀 값과 같다.

$$N_{A_i}^j = \begin{cases} G\left(\frac{T_{TH_i}^j}{Th_c^j}\right) & \text{if } G\left(\frac{T_{TH_i}^j}{Th_c^j}\right) \leq Nh_{Q_i}^j \\ Nh_{Q_i}^j + G\left(\frac{T_{TH_i}^j - Nh_{Q_i}^j \times Th_c^j}{Th_c^j}\right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{where } T_{TH_i}^j = T_{TR}^j - (T_{S_i}^j - T_{S_{i-1}}^j) \quad (2)$$

식(2)에서,  $G(x)$ 는 이산 단극 램프함수(discrete unipolar ramp function)로서  $x$ 가 0 보다 작은 경우에는 1 이고,  $x$ 가 1 보다 클 때에는 소수 첫째자리에서 올림한 정수값으로 정의한다. 메시지 송신 시간은 스테이션의 성능과 메시지 전송에 사용되는 통신 서비스에 따라 결정된다.

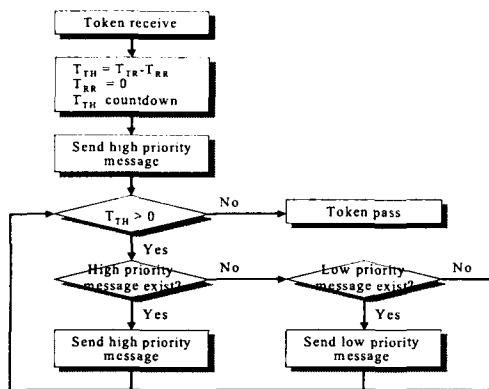


Fig. 1. Flowchart of the priority mechanism.

$$(Nh_{Ti}^j, Nl_{Ti}^j) = \begin{cases} (N_{Ai}^j, 0) & \text{if } N_{Ai}^j \leq Nh_{Qi}^j \\ (Nh_{Qi}^j, \min(Nl_{Qi}^j, N_{Ai}^j - Nh_{Qi}^j)) & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

결과적으로 식(1)과 식(2)로부터 j 번째 스테이션의 i 번째 순회에서 전송되는 높은 우선순위 메시지의 수( $Nh_{Ti}^j$ )와 낮은 우선순위 메시지의 수( $Nl_{Ti}^j$ )는 식(3)과 같다.

일반적으로, 높은 우선순위 메시지는 주어진 시간 한계 내에 전송되지 못하면 시스템의 성능에 악영향을 주기 때문에, 반드시 요구 전송 지연 이내에 전송 될 수 있어야 한다. 반면, 낮은 우선순위 메시지는 전체 네트워크에 여유가 있을 때에 전송이 이루어지면 된다. 여기에서 만약 특정 스테이션에서  $T_{TR}$ 의 값이 너무 크다면, 다수의 낮은 우선순위 메시지가 보내지게 됨으로써, 다른 스테이션들이 사용할 수 있는  $T_{TH}$ 가 작아지게 될 것이다. 이러한 현상은 다른 스테이션들이 높은 우선순위 메시지를 전송하는데 충분한  $T_{TH}$ 를 가지지 못하게 함으로써, 높은 우선순위 메시지의 전송 지연을 증가시키는 원인이 된다. 반대로, 특정 스테이션에서  $T_{TR}$ 의 값이 너무 작다면, 높은 우선순위 메시지를 충분히 보내지 못한 상태에서 다음 스테이션으로 토큰을 전송할 것이다. 이로 인하여, 다른 스테이션들은 다수의 낮은 우선순위 메시지를 전송할 수 있게 됨으로써, 그 스테이션에서 높은 우선순위 메시지의 전송 지연이 증가하게 된다. 따라서, 네트워크를 설계할 때, 높은 우선순위 메시지가 우선적으로 전송될 수 있도록  $T_{TR}$ 을 적절하게 설정함으로써, 높은 우선순위 메시지의 전송 지연을 최소화시켜야 한다. 특히, 각각의 스테이션에서 발생하는 높은 우선순위 메시지의 양과 요구 전송 지연이 다르다면, 각 스테이션 각 스테이션별로 적절한  $T_{TR}$ 의 선정이 필요하다.

높은 우선순위 메시지와 낮은 우선순위 메시지의 전송 지연은 아래 식(3)과 같이 표현 된다.

$$\begin{aligned} Dh_k^j &= Th_{Fk}^j - Th_{Gk}^j + Th_D^j \\ Dl_k^j &= Tl_{Fk}^j - Tl_{Gk}^j + Tl_D^j \end{aligned} \quad (3)$$

그리고, Profibus-FMS에서는 높은 우선순위 메시지의 전송에는 Information Report와 같은 미확인 서비스(unconfirmed service)가 주로 사용된다. 먼저, Information Report 서비스는 FDL로 SDA(Send Data with Acknowledgement)를 사용하기 때문에, 송신 스테이션이 요청 프레임(request frame)을 송신하고 나면, 수신 스테이션이 프레임을 성공적으로 수신하였다는 SC 프레임을 전송한다. 또한, 수신 스테이션은 지시(indication) 메시지를 응용 계층으로 전달한다. 그리고 나서, 수신 스테이션은 토큰을 받으면 응답 프레임(ACK frame)을 송신 스테이션에게 전송하고, 송신 스테이션은 이에 대한 SC 프레임을 전송한다.

#### 4. 통신지연 성능모델의 시뮬레이션

본 절에서는 제안된 성능 모델을 이용하여 저송 지연을 계산할 수 있는 시뮬레이션 방법을 제시하였다. 특히, 본 절에서 제시된 시뮬레이션 방법에서는 전송지연의 계산 방법과 알고리즘의 수정에 의하여 성능 모델에서 제시된 몇가지 가정을 완화할 수 있다. 먼저 실질적인 NIC의 송신 큐는 메모리 제한으로 인하여 충분히 크지 못하기 때문에, 각 스테이션에서 송신 큐의 크기를 초과하여 생성된 메시지는 저장되지 못하고 취소될 수 있다. 시뮬레이션 모델에서는 이를 고려하여, 송신 큐에 일정 수 이상의 메시지가 쌓여 있을 경우, 추가로 생성된 메시지는 처리되지 못하고 취소되도록 하였다. 또한, 낮은 우선순위 메시지의 전송도중에 높은 우선순위 메시지가 생성될 경우, 이를 먼저 전송할 수 있도록 성능 모델을 수정하였다.

그림 2는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 j 번째 스테이션에서 i 번째 순회에서 전송 지연을 계산하기 위한 흐름도(flowchart)를 나타내고 있다.

예로 시뮬레이션 방법을 이용하여 네트워크 시스템에서의 전송 지연을 구하면 다음과 같다. 먼저 본 논문에서는 Visual C++을 이용하여 그림 2의 흐름도를 시뮬레이션 모델로 개발하였다. 그리고, 네트워크 시스템의 조건을 다섯번째 장의 실험조건과 동일하게 설정하였다. Profibus-FMS의 전송속도는

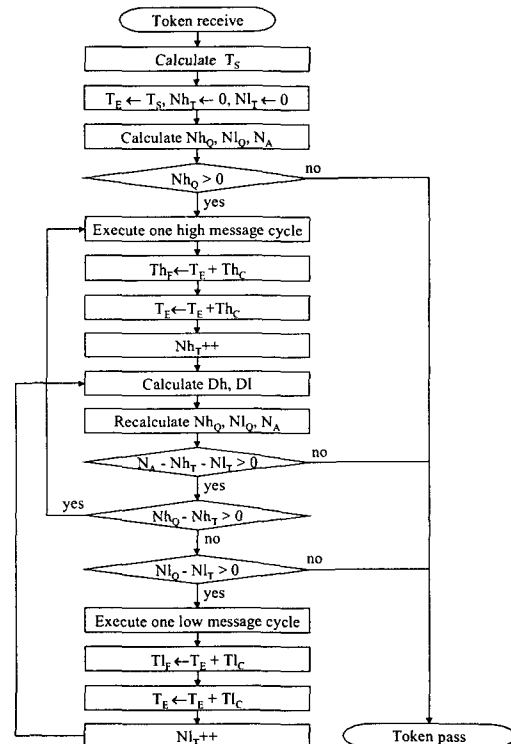


Fig. 2. Flowchart of simulation model for calculating the communication delay.

500Kbps 이고, 스테이션의 수는 4 대, 높은 우선순위 메시지의 생성주기는 10,000 비트 타임, 낮은 우선순위 메시지의 생성주기는 25,000 비트 타임, 그리고  $T_{TR}$  은 30,000 비트 타임이다. 이러한 결과로부터 스테이션 1 번에서의 1,000 개의 메시지에 대한 전송 지연을 구하면 그림 3 과 같다. 그림에서 높은 우선순위 메시지의 최대 전송지연은 24,250 비트 타임(48.5msec), 평균전송지연은 15,134 비트 타임(30.6 msec)이고, 표준 편차는 5,933 비트 타임(11.9msec)임을 알 수 있다.

### 5. 시뮬레이션과 실험결과 비교

본 절에서는 Profibus 토큰 패싱 프로토콜의 성능 모델의 유효성을 검증하기 위하여, 실험모델을 구성하고, 실험 모델의 결과와 성능모델의 결과를 비교하였다. 실험 모델에는 4 대의 트래픽 생성기와 1 대의 성능 관리기로 구성되어 있다. 여기에서, 트래픽 생성기는 정해진 메시지 발생 확률에 따라 메시지를 생성시켜 성능 관리기로 전송하고, 성능 관리기는 수신된 메시지를 분석하여 메시지의 전송 지연을 계산한다. 또한, 본 논문에서는 실험 모델 구현을 위하여, Profibus 인터페이스 카드로 Siemens 사의 ASPC2 및 SPC3 ASIC 과 SAB-C165 마이크로 프로세서가 탑재된 Softing 사의 Profiboard 를 사용하였으며, 전송속도는 500 Kbps 로 설정하였다.

이상과 같은 실험 모델에서, 모든 스테이션에서 높은 우선순위 메시지가 10,000 비트 타임 주기로,

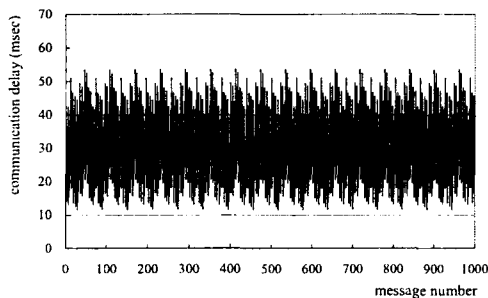


Fig. 3. Communication delay calculated by simulation method.

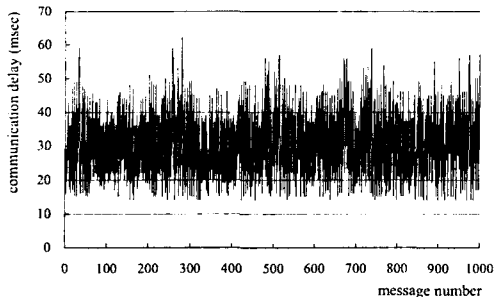


Fig. 4. Communication delay calculated by experimental model.

낮은 우선순위 메시지가 25,000 비트 타임 주기로 생성되고, 모든 스테이션의  $T_{TR}$  을 30,000 비트 타임으로 설정하고 나서, 스테이션 1 번에서 1,000 개의 메시지에 대한 전송지연을 측정하면 그림 4 와 같다.

그림에서 높은 우선순위 메시지의 최대 전송 지연은 31,000 비트 타임(62msec), 평균 전송지연은 15,400 비트 타임(30.8msec) 이고, 표준편차는 5,490 비트타임이다.

이러한 결과로부터, 본 논문에서 제안된 성능 모델을 이용하여 계산된 전송 지연은 실험 모델에서 측정된 전송 지연과 유사하다고 평가된다. 또한, 성능 모델이 Profibus 토큰 패싱 프로토콜에서 전송 지연을 계산 할 수 있는 유효하고 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

### 6. 결과

본 논문에서는 Profibus-FMS 토큰 패싱 프로토콜에서 전송 지연을 수학적으로 계산 할 수 있는 성능 모델을 제안하였으며, 전송 지연을 계산하기 위한 방법으로서 도식적인 방법과 시뮬레이션 방법을 제시하였다. 또한, 제안된 성능 모델의 유효성을 확인하였다.

이러한 결과로부터, 본 논문에서 제안된 성능 모델은 네트워크 관리자가 경험적 방법에 의하여 성능변수를 선정하는데 있어서 유효한 도구가 될 수 있을 것으로 평가된다. 즉, 네트워크 관리자는 초기 설계 단계에서 선정한 성능 변수를 실제 네트워크 시스템에 직접 적용하기에 앞서, 성능 모델을 이용하여 충분한 성능 평가를 거친 후 적용할 수 있게 됨으로써, 보다 안정되고 최적화된 네트워크의 설계가 가능하게 될 것이다.

향후 과제로서, 각 스테이션에서 전송 지연을 최소화시킬 수 있는 최적의 성능 변수를 선정할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 또한, 시간에 따라 변하는 네트워크 시스템에서 전체 네트워크의 성능을 최적화할 수 있도록 시간에 따라 성능 변수를 조절하는 온라인 성능관리 방법에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다.

### 참고문헌

1. D. Lee, J. Allan, H. A. Thompson and S. Bennett, "PID control for distributed system with a smart actuator," Control Engineering Practice, Vol. 9, No. 11, pp. 1235-1244, 2001.
2. A. Willig and A. Wolisz, "Ring stability of the PROFIBUS token-passing protocol over error-prone links," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 5, pp. 1025-1033, Oct. 2001.
3. EN 50170, Profibus Specification - Normative Parts of Profibus-FMS, -DP, -PA according to the European Standard, vol 2, Profibus International, 1998.