

# 파운데이션 필드버스에서 두 개의 우선순위 데이터를 갖는 노드의 데이터 전송지연시간에 관한 연구

論 文

58-2-29

## Study on the Transmission Delay of Two Priority Classes in One Node in the Foundation Fieldbus

李 鏞 熙\* · 洪 承 鎬†

(Yong-Hee Lee · Seung-Ho Hong)

**Abstract** - The foundation fieldbus(FF) is one of the fieldbuses most widely used for process control and automation. In order for system designer to optimize medium management, it is imperative to predict transmission delay time of data. In a former research, mathematical modeling to analyze transmission delay of FF token-passing system has been developed based on the assumption that a device node has only one priority data(1Q model). From 1Q model, all of the device nodes, which are connected on the FF system, are defined priority level in advance, and as system operates, data are generated based on given priority level. However, in practice, some non-periodic data can have different priority levels from one device. Therefore, new mathematical model is necessary for the case where different priority levels of data are created under one device node(2Q model). In this research, the mathematical model for 2Q model is developed using the equivalent queue model. Furthermore, the characteristics of transmission delay of 2Q model which is presented in this paper were compared with 1Q model. The validity of the analytical model was verified by using a simulation experiment.

**Key Words** : Communications systems, Foundation fieldbus, Token-passing protocol, Delay analysis, Mathematical model

### 1. 서 론

컴퓨터 통신 기술의 발전으로 인해 그간 아날로그 통신이 주를 이루었던 공정자동화 분야도 점차 디지털 통신망으로 교체되어 가고 있다. Foundation fieldbus(이하 FF)는 석유 화학, 수처리, 발전소등과 같은 공정자동화에 가장 많이 사용되고 있는 양방향 디지털 통신프로토콜로서 사용자계층에서 요구하는 주기적 및 비주기적 데이터의 전송서비스를 모두 지원하도록 고안되어 있다[1-3].

주기적인 데이터의 경우, 시스템 디자이너가 적절하게 데이터의 전송주기를 설계한다면 데이터의 전송실패 없이 지정된 시간 안에 데이터의 전송을 보장 받을 수 있다. Hong and Choi[4]는 FF의 주기적인 데이터가 미디어를 효과적으로 활용할 수 있는 bandwidth allocation scheme(BAS)을 발표하였다. 이 기술은 데이터의 발생주기를 적절하게 기획하여 주기적인 데이터가 제한된 수 이상으로 동시에 발생하는 현상을 방지하는데 목적이 있다.

비주기적 데이터는 데이터의 발생이 산발적으로 이루어지기 때문에 미디어에 부하되는 트래픽과 데이터의 전송이 지정된 시간 안에 성공적으로 이루어질지를 추정하는 것은 매우 어렵다. FF는 중요도에 따라 비주기적 데이터를 urgent,

normal, time-available과 같이 3개의 우선순위로 구분하며 우선순위가 높은 데이터의 실시간 전송속도를 보장하기 위해 우선순위가 높을수록 전송의 기회가 많아지도록 관리하고 있는데[3] 이러한 메커니즘은 토큰패싱시스템에서 데이터 전송지연시간을 예측하는 것을 더더욱 어렵게 만들고 있다. 지금까지 우선순위 메커니즘을 갖고 있는 토큰패싱시스템의 전송지연시간에 관련한 몇몇 연구들이 있어왔으나[5-9] FF의 비주기적 데이터 전송지연시간에 관련한 직접적인 연구는 Hong[10]에 의해 처음으로 제안되었다.

Hong[10]은 수학적 모델을 단순화하기 위해 2개의 우선순위(time-critical 과 time-available) 데이터만 FF시스템에 존재한다고 가정하였고 그 중 time-critical데이터의 전송지연시간에 관련한 수학적 모델을 발표하였다. 후에 Lee and Hong[11]은 각 큐가 자신의 데이터를 전송할 수 있는 유효한 토큰의 순환주기, 즉 virtual token rotation time (VTRT)개념을 확립하여 time-critical데이터뿐 아니라 time-available데이터의 전송지연시간까지 포함한 수학적 모델을 제시하였으며 또한 스케줄링 서비스 구간이 제외된 가상의 particular token rotation time(PTRT)의 개념을 정의하여 스케줄링 서비스 구간이 포함된 FF시스템의 비주기적 데이터의 전송지연시간에 관한 수학적 모델을 완성하였다. 그러나 지금까지의 연구는 하나의 노드가 단 하나의 우선순위 데이터만 발생한다는 가정 하에 진행되었다. 즉 우선순위 0으로 지정된 노드는 우선순위 0인 데이터를, 우선순위 1로 지정된 노드는 우선순위 1인 데이터만 발생할 수 있었다. 이러한Lee and Hong[11]의 모델을 1Q모델이라고 부르게 한다(그림 1 참조).

† 교신저자, 正會員 : 漢陽大學 電子情報시스템工學 教授 · 工博  
E-mail : shhong@hanyang.ac.kr

\* 正會員 : 漢陽大學 電子電氣制御計測學科 博士課程  
接受日字 : 2008年 12月 15日  
最終完了 : 2009年 1月 14日

그러나 비주기적인 데이터 중 어떤 데이터들은 하나의 디바이스에서 서로 다른 우선순위를 갖고 발생할 수 있다. alarms, trend reports, configuration changes 등은 대표적인 비주기적 데이터들이며 하나의 노드에서 함께 발생 가능한 데이터들이다. 이 데이터들은 각각 urgent, normal, time-available의 우선순위를 부여할 수 있으므로 어떤 디바이스가 alarms, trend reports, configuration changes의 데이터를 모두 발생하는 디바이스라면 그 디바이스는 urgent, normal, time-available 데이터를 모두 발생하는 노드가 된다. 그러므로 위와 같이 서로 다른 우선순위의 데이터들이 하나의 노드에서 모두 발생 가능한 경우의 전송지연시간의 특성을 분석하려면 1Q모델과는 다른 새로운 수학적 모델이 필요하다. 이것을 2Q모델이라고 명명하기로 한다(그림 2 참조).

본 연구의 목적은 2Q모델에서 비주기적 데이터의 전송지연시간에 관한 수학적 모델을 제시하고 우선순위별로 데이터의 전송지연시간에 관한 특성을 조사하는데 있다. 1Q모델의 데이터가 전송되기 위해서는 노드에 도착한 토큰의 우선순위가 전송할 데이터의 우선순위보다 같거나 낮지만 하더라도 2Q모델의 경우는 이 조건 외에도 하나의 조건이 더 부가 된다. 토큰이 도착했을 때 서비스를 받는 데이터의 개수는 1개로 한정되므로 2Q모델에서는 같은 노드에 공존하는 우선순위가 높은 데이터가 먼저 전송되어야 하며, 따라서 우선순위가 낮은 데이터는 우선순위가 높은 데이터가 모두 전송될 때까지 기다려야 하기 때문이다. 그러므로 2Q의 수학적 모델은 데이터가 전송되기 위한 조건으로 같은 노드에 존재하는 다른 데이터 중 자신의 우선순위보다 높은 우선순위의 데이터가 존재하지 않아야 한다는 점을 추가하여 전개하여야 한다.

본 논문의 3.1과 3.2장에서는 2Q모델과 1Q모델과의 차이점을 설명하고 2Q모델에 알맞은 actual token rotation time(ATRT), 데이터의 존재확률, 그리고 VTRT의 수학적 전개방식을 소개하고 있다. 3.3장에서는 Lee and Hong[11]이 1Q모델에 관련한 데이터의 전송지연시간을 구하는 과정을 요약하였다. 이것은 2Q모델에도 적용가능하기 때문에 본 논문에서는 이를 그대로 사용하였다. 마지막으로 4장에서는 동일한 네트워크 파라미터에서 1Q와 2Q의 전송지연시간 특성에 관한 차이점을 비교 분석하였다.

수학적 모델의 단순화를 위해 주기적인 데이터의 전송은 없고 두 개의 우선순위 즉 time-critical과 time-available 데이터만 존재한다고 가정하였으며 수학적 모델의 검증은 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하였다.

## 2. FF의 data link layer(DLL)

FF에서 링크라고 부르는 각각의 버스는 하나의 link active scheduler(LAS)와 다수의 basic device로 구성되어 있다. LAS는 링크에 접속되어 있는 basic device가 데이터를 전송하기 위해 미디어에 접근하는 것을 관리한다. 공정 제어에 사용되는 데이터처럼 주기적으로 전송될 필요가 있는 데이터는 스케줄링 방식에 의해 서비스를 받게 된다. 스케줄링 방식이란 주기적인 데이터를 전송하는 노드들의 주소, 각 데이터들의 전송시작시간 그리고 전송주기에 관련한 정보들을 바탕으로 LAS가 지정된 시간마다 해당하는 노드

에 데이터의 요청 신호인 compel data(CD)를 발행하여 데이터의 전송을 관리하는 방식을 말한다. CD를 수신한 노드는 해당하는 데이터를 LAS에 전송하고 return token(RT)을 이용해서 데이터의 전송이 완료되었음을 알린다.

반면에 alarm, trend report등과 같이 산발적으로 요구되는 비주기적 데이터는 LAS가 발행하는 pass token(PT)을 이용하게 되는데 PT는 urgent, normal 그리고 time-available 3가지 우선순위중 하나의 우선순위를 갖게 된다. PT를 수신한 노드는 먼저 자신이 전송해야 할 데이터가 존재하는지를 살펴본 후 만일 존재한다면 토큰의 우선순위와 전송해야 할 데이터의 우선순위를 비교하게 된다. 이때 토큰의 우선순위가 데이터의 우선순위보다 같거나 낮다면 데이터는 전송되고 그렇지 않다면 즉시 토큰을 LAS에 반납하게 된다. 노드는 하나의 토큰을 받을 때마다 단 하나의 데이터만 전송가능 하다[3].

LAS는 자신이 갖고 있는 token circulation list(TCL)의 순서대로 토큰을 전송한다. 토큰이 링크에 접속되어 있는 모든 노드를 방문하면 LAS는 다음 토큰을 발행하게 되는데 이때 LAS는 우선순위가 높은 데이터의 전송시간을 보장하기 위해 토큰이 링크를 한 바퀴 회전하는데 걸리는 평균시간이 사용자에게 의해 지정된 시간인 target token rotation time(TTRT)과 유사하도록 토큰의 회전속도를 조절한다. 데이터는 자신의 우선순위보다 같거나 낮은 우선순위의 토큰에 의해서만 서비스를 받을 수 있으므로 우선순위가 높은 토큰일수록 시스템을 회전하는 속도는 빠르다. 그러므로 LAS가 토큰의 평균 회전속도를 조절하는 것은 토큰의 우선순위를 적절하게 결정하는 것으로 가능하다. 만일 ATRT가 TTRT보다 작거나 같으면 LAS는 토큰의 회전속도를 높이기 위해 토큰의 우선순위를 한 단계 증가시키고 반대로 ATRT가 TTRT보다 크다면 토큰의 우선순위를 한 단계 낮추어 다음에 발행되는 토큰의 회전속도를 줄이게 된다[3].

## 3. 수학적 모델

FF DLL에서 토큰패싱 서비스에 의해 전송되는 데이터의 우선순위는 urgent, normal, time-available로 구분된다. 해석을 간단하게 하기 위해 본 논문에서는 우선순위가 두 가지, 즉 time-critical과 time-available만이 존재하는 경우로 국한하였다. Time-critical과 time-available데이터는 각각 0과 1로 표현하기로 하며 모두 독립적으로 프와송 프로세스에 따라 발생한다고 가정 하였다. 또한 데이터의 전송시간은 각 우선순위별로 일정한 값을 갖고 각 노드의 트래픽은 동일하게 분포한다고 가정하였다. 본 논문에서 우선순위  $i$ 인 데이터와 우선순위  $i$ 인 토큰 그리고 우선순위  $i$ 인 데이터가 대기하는 큐를 각각  $i$ -데이터,  $i$ -토큰,  $i$ -큐이라고 간단하게 명명하기로 한다. 다음은 본 논문에서 사용되는 기호들에 관한 설명이다.

- $N$ : 베이직 노드의 개수
- $L_i$ : 우선순위  $i$ 인 데이터의 전송시간
- $\lambda_i$ : 우선순위  $i$ 인 데이터의 평균 발생빈도
- $R$ : 데이터의 전송 없이 토큰이 링크 내의 모든 노드를 한 번 순환하는데 걸리는 시간

- $d_i$ : 우선순위  $i$ 인 토큰이 노드에 도착한 경우 우선순위  $j$ 인 데이터가 큐에 존재할 확률
- $S_i(t)$ : 우선순위  $i$ 인 큐의 VTRT 확률밀도함수
- $\bar{S}_i$ : 우선순위  $i$ 인 큐의 VTRT 평균값
- $P_i$ : 우선순위  $i$ 인 토큰의 발행확률
- $T_i(t)$ : 우선순위  $i$ 인 토큰의 ATRT 확률밀도함수
- $\bar{T}_i$ : 우선순위  $i$ 인 토큰의 ATRT 평균값
- $\mu_{ij}$ : 토큰의 우선순위가  $i$ 에서  $j$ 로 천이될 확률
- $r_i(t)$ : 우선순위  $i$ 인 전송큐에서 큐 끝단에 도착한 데이터가 서비스를 받을 수 있을 때까지 소요되는 시간의 확률밀도함수
- $p_n^i$ : 우선순위  $i$ 인 큐의 길이가  $n$ 이 될 확률
- $q_n^i(t)$ : 우선순위  $i$ 인 큐에서  $n$ 번째 데이터가 전송되는데 걸리는 시간의 확률밀도함수
- $d_i$ : 우선순위  $i$ 인 데이터의 평균전송지연 시간

그림 1은 0-데이터를 발생하는 노드와 1-데이터를 발생하는 노드의 개수가 각각  $N_0$ 와  $N_1$  일때 1Q모델의 시스템 구성도를 보여주고 있다. 각각의 디바이스는 지정된 우선순위의 데이터만 발생하므로 각 큐 안에는 0-데이터 혹은 1-데이터만 존재하고 있다. 그림 2는  $N$ 개의 디바이스가 시스템에 연결되어있는 2Q모델을 나타낸 도식이다. 2Q모델에서 각 디바이스가 갖고 있는 큐는 0-데이터와 1-데이터가 서로 혼합되어 존재한다.

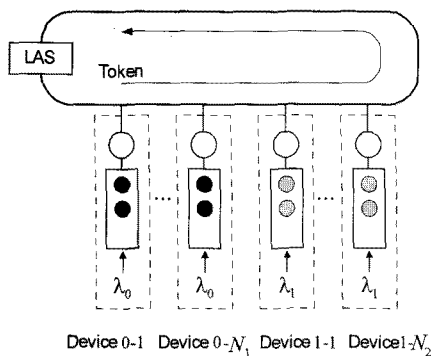


그림 1 토큰 패싱에 의해 데이터가 서비스를 받을 경우 1Q 모델의 도식  
 Fig. 1 Schematic diagram of the 1Q model for the token-passing

여기서 흑색과 회색 원은 각각 0-데이터와 1-데이터를 나타낸다. 2Q모델에서 토큰이 도착했을 때 만일 0-데이터가 큐에 존재한다면 가장 우선적으로 그 데이터가 서비스를 받게 되고 1-데이터는 큐에 남아있는 0-데이터의 개수가 0이 될 때까지 기다려야 한다. 그러므로 실제로 큐의 상태는 그림 3-b와 같이 우선순위로 정렬되어 있다고 생각할 수 있다. 그림 3-b는 다시 3-c와 같이 하나의 노드에 우선순위로 큐가 존재한다고 간주하는 것과 완전히 동일하다. 여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 디바이스에 토큰이 도착했을 때 어떤 우선순위의 데이터를 전송 해야 할지를 결정하는 이벤트를 말한다.  $\alpha$ 이벤트는 0-데이터가 큐에 존재하기만 하면 어떤 우선

순위의 토큰이 도착하든지 발생한다.  $\beta$ 이벤트가 발생하려면 반드시 1-토큰이 도착하여야 하며 0-큐는 비어 있고 1-큐는 전송할 데이터가 존재하여야 한다. 만일 0-큐, 1-큐 모두 비어 있다면 데이터의 전송은 없게 된다( $\gamma$ 이벤트).

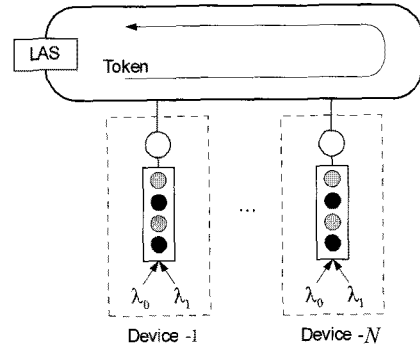


그림 2 토큰 패싱에 의해 데이터가 서비스를 받을 경우 2Q 모델의 도식  
 Fig. 2 Schematic diagram of the 2Q model for the token-passing

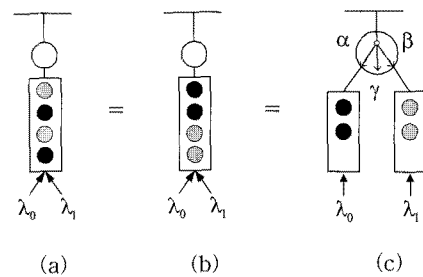


그림 3 하나의 노드가 우선순위 0과 1인 데이터를 모두 발생시킬 때 큐의 등가 도식  
 Fig. 3 Equivalent schematic diagram when one queue generates the both data of priority 0 and 1 data

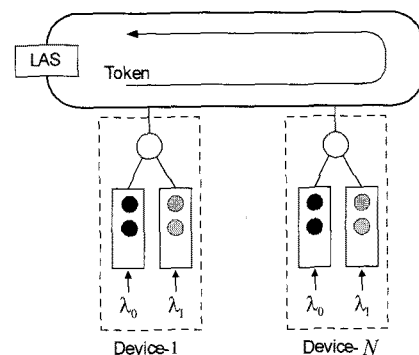


그림 4 수학적 모델링을 위한 2Q모델의 도식  
 Fig. 4 Schematic diagram of the 2Q model for the mathematical modeling

그림 4는  $N$ 개의 basic device가 링크에 접속되어 있는 경우 2Q모델의 수학적 해석을 위한 도식을 나타내고 있다. 하나의 디바이스는 0-큐와 1-큐를 각각 1개씩 갖고 있으므로 시스템 전체에 존재하는 0-큐와 1-큐의 개수 또한 각각

$N$ 개가 된다. 토큰은 LAS에서 발생되어 각 노드를 0번부터  $N$ 번까지 차례대로 방문하게 된다.

### 3.1 Actual token rotation time(ATRT)

토큰패싱 시스템에서 토큰이 링크를 한번 순환하는데 소요되는 시간 ATRT는 링크에 접속되어 있는 노드의 총 개수와 전송해야 할 데이터를 보유하고 있는 노드의 개수에 따라 변한다. 각 노드가 전송할 데이터를 보유하고 있는지 여부는 확률로서 표현되며 따라서 ATRT는 확률밀도함수  $T_0(t)$ 로 표현이 가능하다.  $T_0(t)$ 는 우선순위  $i$ 인 토큰의 ATRT가  $t$ 가 될 확률을 나타낸다. Kuehn[6]과 Hong[10]은 토큰패싱시스템에서 각 우선순위에 토큰의 ATRT는 서로 independent and identically distributed(i.i.d)하다는 가정하에  $T_0(t)$ 를 다음과 같은 probability density function(pdf)로 표현하였다.

$$T_0(t) = \sum_{i=0}^N \binom{N}{i} \rho_{00}^i (1-\rho_{00})^{N-i} \delta(t - (R + iL_0)) \quad (1)$$

여기서  $\rho_{0j}$ 는  $i$ -토큰이 도착했을 때  $j$ -데이터가 존재할 확률을 나타낸다. 식(1)은 1Q모델과 2Q모델에 모두 적용이 가능하다.

1Q모델에서 1-토큰이 시스템을 한 바퀴 회전하는 동안 서비스를 받아야 할 1-데이터의 개수는 그 토큰이 시스템을 회전하면서 서비스해야 할 0-데이터 개수와는 무관하다. 그러나 2Q모델에서는 1-토큰이 시스템을 회전할 당시  $i$ 개의 0-데이터가 서비스를 받는다고 가정하면 하나의 토큰이 도착할 때 하나의 데이터만 전송 가능하므로 같은 노드에 존재하는 1-데이터는 전송의 기회를 잃어버린 결과가 되고 결국 1-데이터를 보유할 수 있는  $N$ 개의 노드 중  $N-i$ 개의 노드만이 1-데이터의 전송기회를 갖게 된다. 그러므로 1-토큰이 1회전할 때 서비스를 받을 1-데이터가  $j$ 개가 될 확률은  $\binom{N-i}{j} \rho_{01}^j (1-\rho_{01})^{N-i-j}$  이 된다. 0-데이터는 2Q모델에서도 1-데이터가 존재할 확률과는 무관하게 우선적으로 서비스를 받으므로  $N$ 개의 노드 모두 0-데이터를 서비스 받을 수 있고, 따라서 1-토큰이 1회전 하면서  $i$ 개의 데이터가 서비스를 받을 확률은  $\binom{N}{i} \rho_{01}^i (1-\rho_{01})^{N-i}$  이 된다. 그러므로 2Q모델에서  $\bar{T}_1$ 은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$T_1(t) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} \binom{N}{i} \rho_{01}^i (1-\rho_{01})^{N-i} \binom{N-i}{j} \rho_{01}^j (1-\rho_{01})^{N-i-j} \delta(t - (R + iL_0 + jL_1)) \quad (2)$$

데이터의 발생빈도가 프로세스 과정을 만족한다고 가정하였으므로 토큰이 도착했을 때 서비스를 받아야 할 데이터가 큐에 존재할 확률은 데이터의 발생빈도와 평균서비스시간을 곱한 것이 된다. 0-데이터는 0-토큰과 1-토큰 모두에 의해 서비스를 받을 수 있으므로 평균서비스시간은  $P_0\bar{T}_0 + P_1\bar{T}_1$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서  $P_0$ 와  $P_1$ 은 각각 토큰

의 우선순위가 0과 1이 될 확률을 나타내며  $\bar{T}_0$ 와  $\bar{T}_1$ 은 0-토큰과 1-토큰의 평균 순환 시간을 말한다. 따라서 0-토큰 혹은 1-토큰이 노드에 도착했을 때 0-데이터가 큐에 존재할 확률  $\rho_{00}$ 와  $\rho_{01}$ 는 1Q모델과 2Q모델 모두

$$\rho_{00} = \rho_{01} = \lambda_0(P_0\bar{T}_0 + P_1\bar{T}_1) \quad (3)$$

이 된다.

1Q모델의 경우 1-데이터가 서비스를 받기 위한 조건은 단지 1-토큰이 도착하는 것이었다. 그러나 2Q모델의 경우 1-데이터가 전송되기 위해서는 우선순위 1인 토큰이 도착하여야 할 뿐 아니라 우선순위 0인 데이터가 같은 노드에 존재하지 않아야 한다는 조건이 추가 된다. 2Q모델에서 1-데이터가 서비스를 받을 위의 두 가지 조건을 만족하는 사건을 event-A라고 하면 event-A가 일어날 확률은  $P_1(1-\rho_{01})$ 가 된다. 반대로 0-토큰이 도착하거나 혹은 1-토큰이 도착했음에도 0-큐가 비어있지 않아 서비스를 받을 수 없는 두 가지 경우가 존재할 수 있다. 이러한 사건을 event-B, event-C라고 한다면 이 사건이 발생할 확률은 각각  $P_0$ ,  $P_1\rho_{01}$ 이 된다. 2Q모델에서 1-데이터는 event-B 혹은 event-C가 일어나면 서비스를 받지 못하고 다음 토큰이 오기를 기다려야 하므로 이러한 사건이 일어날 때 마다 전송 지연은 각각  $\bar{T}_0$ ,  $\bar{T}_1$ 씩 증가하게 된다. Event-A가 발생하여 데이터가 전송되기 전까지 event-B와 event-C는 각각 독립적으로 0에서  $\infty$ 까지 발생 가능하다. 따라서 2Q모델에서 1-토큰이 도착하였을 때 1-데이터가 존재할 확률  $\rho_{11}$ 는 식(4)과 같다.

$$\rho_{11} = \lambda_1 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \binom{m+n}{m} P_0^m (P_1\rho_{01})^n P_1(1-\rho_{01}) (n\bar{T}_0 + (m+1)\bar{T}_1) = \frac{P_0\bar{T}_0 + P_1\bar{T}_1}{P_1(1-\rho_{01})} \quad (4)$$

Lee and Hong[11]이 정리한 바에 따르면  $P_0$ 와  $P_1$ 은 식(5)로 구할 수 있으며 이것은 2Q모델에도 그대로 적용 가능하다.

$$P_0 = \frac{1-\mu_{11}}{1+\mu_{01}-\mu_{11}}, \quad P_1 = \frac{\mu_{01}}{1+\mu_{01}-\mu_{11}} \quad (5)$$

여기서  $\mu_i$ 는 LAS에서 발행하는 토큰의 우선순위가  $i$ 에서  $j$ 로 전이될 확률을 나타내며  $\mu_{01}$ 와  $\mu_{11}$ 는 각각  $\mu_{01} = \int_0^{ATRT} T_0(t)dt$ 와  $\mu_{11} = \int_0^{ATRT} T_1(t)dt$ 이다.

### 3.2 Virtual token rotation time(VTRT)

데이터의 전송지연시간은 그 데이터의 발생빈도와 서비스를 받을 수 있는 시간의 분포에 의해 결정된다. LAS는 비주기적인 데이터 전송을 위해 토큰을 발행하지만 중요한 데이터의 전송확률을 높이기 위한 우선순위 메커니즘을 갖고 있다. 그러므로 각 큐의 입장에서는 단순히 토큰을 수신한다고 하여 자신의 데이터를 전송할 권한을 갖게 되는 것이

아니다. 예를 들어 2Q모델에서 1-큐의 경우는 자신의 데이터를 전송하기 위해서 반드시 1-토큰이 도착하여야 하고 같은 노드에 있는 0-큐가 비어 있어야 한다. 만일 0-토큰이 도착하거나 혹은 1-토큰이 도착하였음에도 0-큐가 비어있지 않다면 1-큐는 그 토큰을 사용할 수 없게 된다. 이러한 경우 1-큐의 입장에서는 토큰이 도착하지 않았다고 간주할 수 있다. Virtual token(VT)이란 큐의 입장에서 자신이 사용할 수 있는 토큰을 말한다.

1Q모델과 2Q모델 모두에서 0-데이터는 1-큐가 비어있는지 여부와는 상관없이 모든 종류의 토큰에 의해 전송이 가능하다. 그러므로 우선순위 0혹은 1인 토큰은 노드에 도착하기만 하면 0-큐의 VT가 된다. VTRT는 큐에 VT가 도착한 직후 다음번 VT가 도착하기까지의 시간을 말하므로 VTRT의 pdf는 1Q모델과 2Q모델 모두 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_0 = P_0 T_0 + P_1 T_1 \quad (6)$$

1-데이터의 경우 1Q모델에서는 1-토큰이 도착하기만 하면 그것은 1-데이터의 VT가 된다. 반면에 2Q모델의 경우 0-큐가 비어있을 때 1-토큰이 도착한 경우에만 그 토큰을 VT로 간주할 수 있다. 그 외의 경우 즉 0-토큰이 도착하거나 혹은 1-토큰이 도착하였는데도 불구하고 0-큐가 비어있지 않다면 1-데이터는 다음 번 토큰을 기다려야 한다. 0-토큰이 도착할 확률은  $P_0$ 이고 1-토큰이 도착하였는데도 불구하고 0-큐가 비어있지 않을 확률은  $P_1 \rho_{01}$ 이다. 각각 독립적으로 0에서  $\infty$ 까지 발생 가능하므로 2Q모델에서 1-데이터의 VTRT pdf는 다음과 같이 표현된다.

$$S_1 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \binom{m+n}{m} P_0^n (P_1 \rho_{01})^m P_1 (1 - \rho_{01}) v_{nm} \quad (7)$$

where 
$$v_{nm} = \underbrace{T_0 \otimes \dots \otimes T_0}_{(n)} \otimes \underbrace{T_1 \otimes \dots \otimes T_1}_{(m+1)} \quad (8)$$

### 3.3 데이터의 전송지연시간

Lee and Hong[11]은 2가지 우선순위를 가는 FF 시스템에서 토큰패싱 방식으로 서비스를 받는  $i$ -데이터의 전송지연시간(패킷 전송시간 포함)  $d_i$ 는 다음과 같다고 밝혔다.

$$d_i = \sum_{n=0}^{\infty} p_n^i \int_0^{\infty} t q_n^i(t) dt + L_i \quad (9)$$

식(9)의  $p_n^i$ 은 새로운 데이터가  $i$ -큐에 생성되었을 때 앞서 존재하는 데이터의 개수가  $n$ 개가 될 확률을 나타내며,  $q_n^i(t)$ 은 앞서 존재하는 데이터가 모두 서비스를 받을 때 까지 걸리는 시간을 나타내는 것으로 식(10), (11)과 같이 표현 된다.

$$p_n^i = \sum_{j=1}^{n+1} \frac{\pi_j^i}{1 - \pi_0^i} a_{n+1-j}^i \quad (10)$$

$$q_n^i(t) = \underbrace{S_i(t) \otimes \dots \otimes S_i(t)}_{(n)} \otimes r_i(t) \quad (11)$$

$p_n^i$ 은 큐의 길이는 데이터가 큐를 떠나는 시점의 길이와

같다는 Khintchine's argument[7]에 따른 것이다. 여기서  $p_j^i$ 와  $a_m^i$ 은 다음과 같다.

$$\pi_j^i = \pi_0^i \cdot \pi_{0,j}^i + \sum_{k=1}^{j+1} \pi_k^i \cdot \pi_{kj}^i, \quad \pi_0^i = 1 - \lambda_i \bar{S}_i \quad (12)$$

where

$$\pi_{kj}^i = \begin{cases} \int_{t=0}^{\infty} e^{-\lambda_i t} \frac{(\lambda_i t)^{j-k+1} \cdot S_i(t)}{(j-k+1)!} dt, & k > 0 \\ \int_{t=0}^{\infty} e^{-\lambda_i t} \frac{(\lambda_i t)^j \cdot S_i(t)}{j!} dt, & k = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

$$a_m^i = \left[ (\lambda_i L_i)^m / m! \right] e^{-\lambda_i L_i}$$

식 (11)의  $r_i(t)$ 은 큐의 끝단에 존재하는 데이터가 처음으로 서비스를 받게 되기까지의 시간을 말한다. 이것은 잔여 시간(residual time)이라고 불리며 다음과 같이 표현된다.

$$r_i(t) = \frac{1 - TR_i(t)}{S_i}, \quad \text{where } TR_i(t) = \int_0^t S_i(t) dt \quad (14)$$

식(9)는 1Q와 2Q모델에 모두 적용할 수 있으므로 본 연구에서는 이를 그대로 사용하였다.

### 4. 수치해석과 시뮬레이션 모델

3장에 있는  $P_i$ 는  $\mu_j$ 의 함수이다.  $\mu_j$ 는  $T_i(t)$ 에 의해 결정되며  $T_i(t)$ 는  $\rho_{ij}$ 의 함수이므로 결국  $P_i$ 의 함수가 된다. 이와 마찬가지로 3장에 있는 모든 식은 이와 같이 서로 연결되어 있다. 이렇게 연결된 함수들은 비선형 이산함수이기 때문에 대수적인 방법으로 연립방정식의 해를 구하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 수치해석법을 사용하여 데이터의 전송지연시간을 해석하였다[12]. 초기에  $P_0$ 와  $P_1$ ,  $\bar{T}_0$ ,  $\bar{T}_1$ 를 임의의 값으로 지정한다. 이 값들이 지정되면  $\rho_{ij}$ ,  $T_i(t)$ ,  $\mu_j$ 는 차례대로 해를 구할 수 있는데 이렇게 도출된 값을 바탕으로 다시  $P_0$ 와  $P_1$ ,  $\bar{T}_0$ ,  $\bar{T}_1$ 의 값을 얻을 수 있다. 초기에 지정된 값과 나중에 계산된 값을 비교하고 두 값의 차이가 미리 지정된 허용오차 안에 들어올 때까지 위 과정을 반복하면 추정된 값은 방정식의 해와 근사하게 된다.

Lee and Hong[11]은 하나의 노드가 하나의 큐만 보유할 수 있는 FF시스템에서 데이터의 전송지연시간을 분석할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. 본 연구에서는 하나의 노드가 2개의 큐를 동시에 가질 수 있도록 Lee and Hong[11]의 시뮬레이터를 개선하여 사용하였다. 시뮬레이터에 관련한 자세한 사항은 Lee and Hong[11]을 참고할 수 있다.

### 5. 실험 및 결과

본 장에서는 3장에서 기술한 수학적 모델을 검증하기 위해 시뮬레이션 결과와 비교하고자 한다. 또한 하나의 노드는 오직 하나의 우선순위의 데이터만 발생 가능하다는 가정 하에 수립된 Lee and Hong[11]의 1Q모델과 차이점을 함께 분석하였다. 본 장에서는 우선순위 0인 데이터(time-critical

data)의 전송지연시간과 우선순위 1인 데이터(time-available data)의 전송지연시간을 각각 (d0), (d1)이라고 간략하게 표기하기로 한다. 2Q모델의 노드 개수를  $N$ 이라고 한다면 하나의 노드는 0-큐와 1-큐를 모두 갖고 있으므로 각각의 큐 또한  $N$ 개씩 존재한다. 그러므로 본 연구에서는 2Q모델과 비교할 1Q모델은 0-큐 노드와 1-큐 노드의 개수를 모두  $N$ 으로 설정하였다.  $L_0$  와  $L_1$  은 데이터의 최대 길이와 전송 속도에 의해 계산된 값을 사용하였으며,  $R$ 값은 Hong and Ko[13]가 ARENA[14]를 사용하여 개발한 시뮬레이션을 통해 도출된 값을 이용하였다. 아래 표는 본 연구에서 사용된 네트워크 파라미터들의 값이다.

표 1 네트워크 파라미터

Table 1 Network parameters for the delay analysis

$L_0$	$L_1$	$\lambda_0$	$\lambda_1$	$R$
19.2ms	68.352ms	0.00057ms <sup>-1</sup>	0.00016ms <sup>-1</sup>	410.1 ms

그림 5와 6은 네트워크에 접속되어 있는 노드의 개수( $N$ )가 16개일 때 TTRT에 따른 각 데이터의 전송지연시간을 나타낸 것이다. TTRT가 높아지면 1-토큰의 발행확률이 높아지게 되고 이에 따라 1-토큰에 의한 0-데이터의 전송기회는 점차 높아지게 된다. 1-토큰은 0-데이터 외에 1-데이터까지 모두 서비스를 해야 하므로 0-토큰보다 상대적으로 시스템을 순환하는 속도가 느리다. 따라서 0-데이터는 1-토큰에 의해 서비스를 받을 확률이 높아짐에 따라 그 전송지연시간 또한 함께 늘어나게 된다. 이것이 0-데이터의 전송지연시간이 TTRT가 400~500ms 구간에서 급격하게 늘어나는 이유이다(그림 5). 그러나 TTRT가 계속 높아져 1-데이터의 전송기회가 더욱 많아지게 되면 1-큐가 비어있을 확률이 높아지게 되고 이것은 1-토큰의 순환속도를 높여주는 원인이 된다. 그러므로 1-토큰에 의해 서비스를 받는 0-데이터의 전송속도는 그림 3의 TTRT > 500인 구간에서 보여주는 바와 같이 점차 감소하게 된다. 이러한 특성은 1Q 및 2Q모델 모두에서 동일하게 나타나는 현상이다.

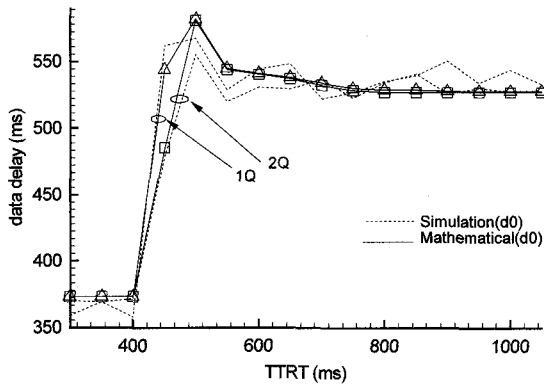


그림 5 time-critical 데이터의 전송지연시간  $N = 16$

Fig. 5 Delay of time-critical data for  $N = 16$

전체적으로 0-데이터의 전송지연시간은 1Q와 2Q모델 모두 비슷한 양상을 보이고 있으나 2Q모델의 경우 1Q모델보다 전송지연시간이 약간 더 빠른 것을 알 수 있다. 특히

TTRT가 400에서 500사이 구간에서는 그 특징이 현저하게 나타난다.

2Q모델에서는 하나의 노드에 우선순위가 다른 두 개의 큐가 공존해 있다. 그러므로 1Q모델에서는 1-토큰이 1-큐에 도착하면 그 큐는 서비스를 받을 수 있는 조건과는 달리 2Q모델에서는 공존하는 0-큐가 비어있어야 한다는 한 가지 조건이 더 추가되기 때문에 2Q모델에서 1-데이터가 전송될 노드의 수는 1Q모델에 비해 줄어들고 이에 따라 1-토큰의 순환속도는 더 빨라진다. 이것이 2Q모델에서 0-데이터의 전송지연시간이 1Q모델보다 빠른 이유이다.

1-데이터는 TTRT가 증가함에 따라 전송기회가 높아지게 된다. 전송기회가 높아지면 큐가 비어있을 확률이 높아지고 이에 따라 1-토큰의 순환속도도 빨라진다. 따라서 1-데이터는 TTRT가 증가함에 따라 데이터의 전송지연시간이 지속적으로 짧아지게 된다.

2Q모델은 1-데이터가 서비스를 받기 위해 1Q모델보다 더 많은 시간을 기다려야 한다. 왜냐하면 1Q모델은 1-토큰이 도착하기만 하면 서비스를 받을 수 있지만 2Q모델에서는 1-토큰이 도착하였다 하더라도 0-큐가 비어있지 않다면 서비스를 받지 못하고 다음 번 토큰이 도착할 때까지 기다려야 하기 때문이다. 따라서 TTRT에 따른 데이터의 전송지연시간은 1Q보다 2Q모델이 훨씬 더 길다. 그림 6은 이러한 1-데이터의 전송지연시간의 특성을 잘 보여주고 있다.

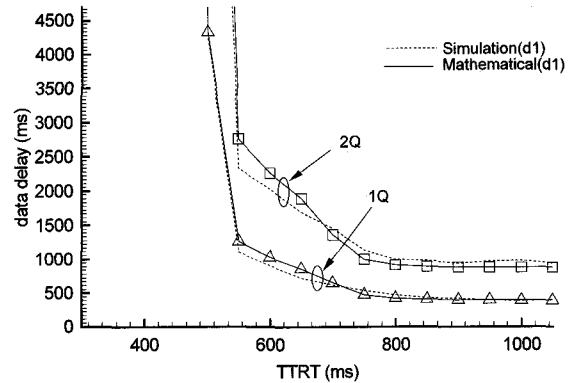


그림 6 time-available 데이터의 전송지연시간  $N = 16$

Fig. 6 Delay of time-available data for  $N = 16$

그림 7과 8은 다른 시스템 파라미터는 표 1과 동일하게 적용하고  $N$ 을 25개로 늘렸을 경우에 데이터 전송지연시간의 특성변화를 살펴본 것이다.  $N$ 이 늘어나면 토큰이 시스템을 순환하면서 서비스를 해야 할 큐의 개수가 많아지게 되고 따라서 토큰의 순환속도는 느려지게 된다. 이것은 큐가 서비스를 받는 평균시간이 길어지는 것을 의미하는데 평균 서비스시간이 늘어남에 따라 큐에 데이터가 존재할 확률도 같이 높아지게 되어 토큰의 순환시간은 더더욱 길어지게 되며 데이터의 전송지연시간도 함께 늘어나게 된다.

그림 7에서 나타난 0-데이터의 전송지연시간은 그림 3의 결과보다 전반적으로 전송지연시간이 긴 것을 보여주고 있다. 또한 TTRT가 늘어나도 더 이상 전송지연시간의 변화가 없는, 즉 정상상태에 도달하는 TTRT값이  $N=16$ 일 때 약 800ms인 것에 비해  $N=25$ 인 경우는 약 1200ms로서 약간 길어져 있다. 2Q모델이 1Q모델에 비해 전송지연시간이 약간

낮아져 있는 점은  $N=16$ 인 경우와 동일한 특성을 보이고 있다.

그림 8에 나타난 1-데이터의 전송지연시간 또한 0-데이터와 마찬가지로  $N=16$ 인 경우보다  $N=25$ 인 경우에 현저하게 늘어나고 있으며 정상상태에 도달하는 TTRT도 800ms에서 1200ms로 늘어나 있음을 알 수 있다.

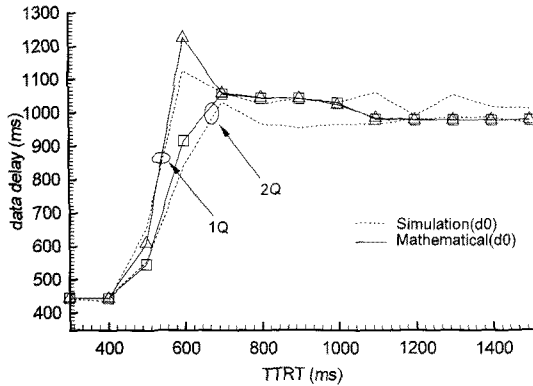


그림 7 time-critical 데이터의 전송지연시간  $N = 25$   
 Fig. 7 Delay of time-critical data for  $N = 25$

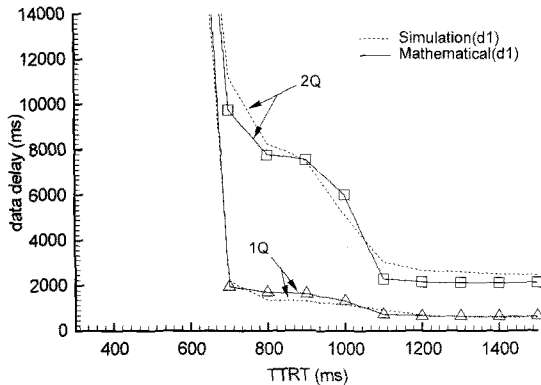


그림 8 time-available 데이터의 전송지연시간  $N = 25$   
 Fig. 8 Delay of time-available data for  $N = 25$

### 6. 결론

FF에서 우선순위를 갖는 토큰패싱방식으로 전송되는 데이터의 지연시간에 관한 지금까지의 연구는 하나의 노드가 하나의 우선순위 데이터만 발생한다는 가정 하에 진행되어 왔다(1Q모델). 본 연구는 하나의 노드에서 발생하는 데이터가 2개의 우선순위를 가질 수 있는 시스템(2Q모델)의 전송지연시간 관하여 수학적 모델을 제시하고 기존에 연구되어 온 1Q모델과의 특성차이를 분석하였으며 시뮬레이션을 통한 수학적 모델의 검증작업을 완료하였다. 2Q모델에서는 1Q모델보다 1-데이터의 전송의 기회가 낮기 때문에 1-데이터의 전송지연은 1Q모델보다 2Q모델에서 길어졌으며 0-데이터는 1-토큰의 ATRT가 1Q모델보다 빠른 관계로 전송지연시간은 오히려 줄어드는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과는 1Q모델과 2Q모델의 데이터의 전송지연시간의 특성에 관련한 폭넓은 이해를 제공해 줌으로서

TTRT를 결정하는 시스템 디자이너가 각 모델에 따른 보다 정확한 TTRT값을 결정하는데 도움을 준다.

향후 연구과제로는 우선순위 2개만 고려된 본 연구를 발전시켜 실제 FF시스템에 적용이 가능한 3개의 우선순위를 가진 수학적 모델의 개발이 필요하다. 또한 주기적인 전송방식이 포함된 경우의 2Q모델에 관한 전송지연시간 연구도 함께 진행되어야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 GRRC(Gyeonggi Regional Research Center)의 후원을 받는 USNRC(Ubiquitous Sensor Network Research Center)의 지원으로 진행 되었으므로 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] J. Berge, Fieldbuses for Process Control: Engineering, Operation, and Maintenance, ISA, Research Triangle Park, NC, 2004.
- [2] P. Pinceti, "Fieldbus: More than a Communication Link", IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 7, No. 1, pp. 17 - 23, 2004.
- [3] Fieldbus Foundation, FOUNDATION™ Specifications: Data Link Protocol Specifications, Austin, TX, 1997.
- [4] S.H. Hong and I.H. Choi, "Experimental evaluation of a bandwidth allocation scheme for foundation fieldbus", IEEE Trans. on Instrument and Measurement, pp. 1787 - 1791, 2003.
- [5] R. Dittmann and F. Hübner, "Discrete-time analysis of a cyclic service system with gated limited service", Report No. 67, University of Würzburg, Germany, 1993.
- [6] P.J. Kuehn, "Multiqueue systems with nonexhaustive cyclic service", Bell Syst. Tech. J., pp. 671 - 698, 1979.
- [7] P. King, Computer and Communication Systems Performance Modeling, Prentice - Hall, Upper Saddle River, NJ, 1990.
- [8] H. Levy and M. Sidi, "Polling systems: applications, modeling and optimization", IEEE Trans. on Communication, vol. 38, No. 10, pp. 1750 - 1760, 1990.
- [9] E. Tovar, F. Vasques and A. Burns, "Supporting real-time distributed computer-controlled systems with multi-hop P-NET networks", Control Engineering Practice, vol. 7, Issue 8, pp. 1015-1025, 1999.
- [10] S.H. Hong, "Approximate analysis of timer-controlled priority scheme in the single-service token-passing systems", IEEE/ACM Trans. on Networking, pp. 206 - 215, 1994.
- [11] Y.H. Lee and S.H. Hong, "Dependency on prioritized data in the delay analysis of foundation fieldbus",

Control Engineering Practice, DOI:10.1016/j.coneng-prac.2008.11.003, In print.

- [12] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1986.
- [13] S.H. Hong and S.J. Ko, "A simulation study on the performance analysis of the data link layer of IEC/ISA fieldbus", Simulation, pp. 109 - 118, 2001.
- [14] W.D. Kelton, R.P. Sadowski, and D.A. Sadowski, Simulation with ARENA, McGraw-Hill College Division, New York, NY, 2001.

## 저 자 소 개



### 이 용 희 (李 鏞 熙)

1970년 7월 27일생. 1997년 홍익대학교 기계설계학과 졸업. 2005년 한양대학원 기계공학과 졸업(석사). 2005~현재 동 대학원 전자컴퓨터공학과 박사과정, (주)영택 기술연구소 연구소장

Tel : 031-986-8545

Fax : 031-986-2683

E-mail : yhlee@ytc.co.kr



### 홍 승 호 (洪 承 鎭)

1956년 5월 31일생. 1982년 연세대 졸업. 1985년 Texas Tech 졸업(석사) 1989년 Pennsylvania State 졸업(박사). 1992년~현재 한양대 전자컴퓨터공학부 교수

Tel : 031-400-5213

Fax : 031-406-4132

E-mail : shhong@hanyang.ac.kr