Foundation Fieldbus에서 효율적인 실시간 데이터 전송

論 文
52D-11-4

Effective Real-Time Data Transmission in the Foundation Fieldbus

洪 承 鎬*
(Seung-Ho Hong)

Abstract - This study develops an analytical model for the delay analysis of real-time data in the token-passing service of Foundation Fieldbus(FF). Using the analytical model, this study proposes a network design scheme of FF. Two design criteria are introduced in this study; one is the average delay of real-time data, and the other is the maximum allowable delay of real-time data. The network design scheme determines the network parameters that satisfies the performance requirements given by these design criteria.

Key Words : Foundation Fieldbus, 실시간 데이터, 지연시간, 성능해석, 수학적 모델, 네트워크 설계 기법

1. 서 론

필드버스는 자동화 및 분산제어 시스템의 필드에 설치된 각종 센서, 제어기, 구동기 등의 필드 장비에서 생성되는 데이터를 실시간으로 처리하는 양방향 디지털 직렬 통신망이다[1]. 필드버스에 접속되는 자동화 및 제어 장비에서 생성되는 데이터는 크게 산발적으로 발생되는 실시간 및 비실시간 데이터와 주기적 데이터의 세 종류로 구분할 수 있다. 산발적 실시간 데이터는 자동화 시스템에서 발생되는 각종 사건이나 경고 신호를 전달하기 위해서 사용되며, 일반적으로 데이터의 길이가 짧고 가장 높은 우선순위로 전송된다. 주기적 데이터는 주로 피드백 제어시스템에서 센서 및 제어기 신호를 전달하기 위해서 사용되며, 반드시 데이터 생성 주기의 제한 시간이내에 데이터 전송이 완료 되어야한다. 비실시간 데이터에는 프로그램 및 데이터 파일 등이 포함되며, 전송지연 시간에는 크게 제약을 받지 않는다. 필드버스에서는 이런 다양한 특성을 갖는 데이터들이 하나의 미디엄을 공유하게 된다. 따라서 필드버스의 트래픽을 적절하게 관리하지 않으면, 데이터의 전송지연시간이 한계값을 초과하게 되어 필드버스에 접속된 응용 시스템의 성능요구사항을 만족시키지 못하는 요인으로 작용한다.

Foundation Fieldbus(FF)는 토큰-패싱과 스케듈링의 두 가지 데이터 전송 방식을 지원한다[2]. 토큰-패싱 방식은 산발적으로 생성되는 실시간 및 비실시간 데이터 전송에 사용되는 반면에 스케듈링 방식은 주기적 데이터의 전송에 사용된다. 본 논문에서는 FF에서 토큰-패싱 방식을 통하여 전송되는 산발적 실시간 데이터의 전송 지연시간을 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시하고, 이를 이용하여 실시간 데이터의 지연시간 요구사항을 만족시키는 통신망 설계 기법을 제시한다.

본 논문은 모두 다섯 장으로 구성된다. II장에서는 FF의 데이터링크 계층에 대하여 기술한다. III장에서는 산발적 실시간 데이터의 전송지연시간에 대한 수학적 모델을 제시하고 이를 이용한 통신망 설계 기법에 대하여 기술한다. IV장에서는 III장에서 제시한 수학적 모델 및 설계 기법을 통신망 설계에 적용하는 방법에 대한 예를 제시한다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결론과 추후 연구 과제에 대해서 기술하도록 한다.

2. Foundation Fieldbus 데이터링크 계층

FF는 물리계층, 데이터링크 계층, 응용계층 및 사용자계층으로 구성되며, 응용계층은 FAS(Fieldbus Access Sublayer)와 FMS(Fieldbus Message Specification) 프로토콜을 포함한다. FF는 31.25 Kbps, 1.0 Mbps, 2.5 Mbps의 세 가지 전송속도를 지원한다. 31.25 Kbps는 레벨이나 온도제어 같은 비교적 정적인 시스템에 사용되며 방폭등에 대한 내부 보호기능을 지원한다. 1.0 Mbps와 2.5 Mbps는 고성능 프로세서 제어, 원격 입·출력 그리고 빠른 속도를 필요로 하는 자동화 시스템에 사용된다. 데이터링크 계층은 필드버스상에서 메시지의 전송을 제어하는 계층으로 LAS(Link Active Scheduler)라고 불리는 버스 스케듈러에 의해서 관리된다. 데이터링크 계층의 모든 메시지는 DLPDU(Data Link Protocol Data Unit)의 형태로 전송된다. 데이터의 우선순위에는 urgent, normal, time-available의 세 가지가 있으며, 우선순위에 따라 데이터의 크기가 제한된다. 메시지 전송 방법은 PT(Pass Token) DLPDU를 사용하는 토큰-패싱과 CD(Compel Data) DLPDU를 사용하는 스케듈링의 두 가지 방식을 제공한다.

토큰-패싱에서는 LAS가 정해진 순서인 V(TCL: Token Circulation List)에 따라 토큰을 일반 노드에 전송하면 일반

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電子컴퓨터工學部 敎授 · 工博
接受日字 : 2003年 1月 24日
最終完了 : 2003年 9月 6日

노드는 토큰을 소유하는 동안 데이터를 전송한 후 RT (Return Token) DLPDU를 이용해서 LAS로 토큰을 반환한다. 토큰-패싱에서 사용하는 토큰인 PT DLPDU는 우선순위를 갖고 있어서 토큰을 수신한 노드는 토큰의 우선순위보다 높거나 같은 우선순위의 데이터만 전송할 수 있다. 토큰의 우선순위는 토큰이 모든 노드를 방문하는데 걸리는 시간을 제한하기 위하여 데이터링크 계층에서 제공하는 통신망 파라미터인 *TTRT*(Target Token Rotation Time)와 토큰이 모든 노드를 방문하는데 걸린 실제 시간인 *ATRT*(Actual Token Rotation Time)를 비교해서 결정한다. 즉, LAS는 토큰이 매번 순환할 때마다 *ATRT* 값을 측정하여 $ATRT<TTRT$ 이면, 토큰의 우선순위를 한 단계 낮추어 낮은 우선순위의 데이터도 전송될 수 있도록 한다. 그러나 $ATRT \geq TTRT$이면 토큰의 우선순위를 한단계 올려 높은 우선순위의 데이터만 전송할 수 있도록 한다. 토큰을 수신한 노드는 토큰에 포함된 전송 데이터 양을 제한하는 매개변수인 *PT-duration*에서 지정하는 만큼의 바이트를 전송한다.

스케듈링에 의한 데이터의 전송의 경우 관리자는 어느 노드에 언제 토큰을 부여할 것인가를 미리 지정하며, LAS는 미리 스케듈된 시간이 되면 토큰-패싱에 의한 데이터 전송을 일시 중지하고 스케듈된 해당 노드에 CD DLPDU를 전송해서 스케듈 데이터를 전송할 수 있는 권한을 부여한다. CD DLPDU를 수신한 노드는 하나의 스케듈 데이터를 전송하고 RT DLPDU를 이용해서 LAS에 토큰을 반납한다. RT DLPDU를 수신한 LAS는 토큰-패싱에 의한 데이터 전송을 재개한다.

3. 성능 해석 및 설계를 위한 수학적 모델

본 장에서는 FF에서 토큰-패싱 방식만을 사용하여 산발적으로 발생되는 실시간 데이터와 비실시간 데이터를 전송하는 경우에 실시간 데이터의 전송지연시간의 성능을 분석하기 위한 수학적 모델을 제시하고, 이를 이용하여 지연시간 성능 요구사항을 만족시키도록 하는 통신망 설계 기법에 대하여 기술한다.

산발적으로 발생되는 실시간 데이터의 경우 트래픽이 불규칙하게 변하기 때문에 데이터가 생성된 순간에 네트워크 트래픽의 부하와 토큰의 위치를 예측할 수 없다. 모든 실시간 데이터를 최대 지연시간을 기준으로 하여 제한 시간 이내에 전송되도록 하기 위하여서는 네트워크의 트래픽 부하를 크게 낮출 수밖에 없다. 그러나 이 경우 네트워크 자원의 이용도는 크게 저하된다. 본 논문에서는 FF의 통신망 설계 기법으로 실시간 데이터의 평균 전송지연 시간을 주어진 한계값 이하로 제한하는 방법과 최대 전송 지연 시간을 만족하지 못하는 산발적 실시간 데이터의 발생 빈도를 한계치 이하로 제한하는 방법을 제시한다. 본 논문에서 제시하는 필드버스 설계 기법은 이러한 요구사항을 만족하도록 통신망 노드의 개수와 데이터의 도착 빈도 및 *TTRT*(Target Token Rotation Time) 등의 통신망 파라미터 값들을 적절히 설정하는 것이다.

본 논문에서 전송지연시간은 데이터가 전송큐에 도착한 시간부터 전송이 완료된 시간까지로 정의된다. 본 논문에서 실시간 데이터의 전송지연시간은 토큰이 네트워크 내의 모든 노드들 한번 순환하는데 소요되는 시간인 *ATRT*(Actual Token Rotation Time)의 분포를 기반으로 하여 도출된다. 토큰-패싱의 순환서비스에서 *ATRT*를 정확히 수학적으로 모델링하는 것은 매우 복잡한 문제로 인식되고 있다[3]. 이는 토큰-패싱과 같은 순환(cyclic) 서비스 방식으로 동작되는 네트워크 시스템에서 *ATRT*는 이전의 *ATRT*들에 의하여 직접적으로 영향을 받기 때문이다. 따라서 대부분의 토큰-패싱 프로토콜의 해석은 *ATRT*의 확률분포가 *i.i.d.*(independent and identically distributed)하다고 가정한 모델을 채택하며 [4, 5], 본 논문에서도 *ATRT*의 확률분포는 *i.i.d.*하다고 가정한다.

FF의 토큰-패싱 방식에서는 데이터의 우선순위를 urgent, normal 및 time-available로 구분한다. 본 논문에서는 통신망 시스템을 단순화시키기 위하여 실시간 데이터와 비실시간 데이터의 두 개의 우선순위가 존재하는 경우로 국한하며, 이들의 우선순위는 각각 0(실시간 데이터)과 1(비실시간 데이터)로 지정한다. 각 노드는 우선순위 0 또는 1의 전송큐를 하나씩 가지며, 실시간 데이터와 비실시간 데이터의 도착은 포아송 분포를 갖는 것으로 가정한다. 데이터의 길이는 우선순위별로 일정한 값을 가지며, 동일 우선순위에 대한 각 노드에서의 트래픽 분포는 동일하다. 각 전송큐에서 데이터 전송은 한번에 하나의 데이터만이 전송되는 단일전송방식으로 동작되며, 따라서 토큰의 *PT-duration*은 우선순위별로 하나의 데이터만 전송할 수 있도록 설정된다. 다음은 본 논문에서 사용되는 기호들이다.

N_i : 필드버스 내에서 우선순위 i 데이터를 생성하는 노드의 개수

L_i : 우선순위 i 데이터의 패킷 전송 시간

λ_i : 우선순위 i 데이터 전송큐의 평균 데이터 도착 빈도

R : 데이터의 전송 없이 토큰이 링크 내의 모든 노드를 한번 순환하는데 걸리는 시간

ρ_{ij} : 토큰의 우선순위가 i인 경우에 우선순위 j 전송큐에 데이터가 존재할 확률

$T(t)$: *ATRT*의 분포

$\overline{T}$: $T(t)$의 평균값

$r(t)$: 전송큐 끝단에 도착한 실시간 데이터가 토큰을 수신하는데 소요되는 시간의 분포

P_i : 토큰의 우선순위가 i가 될 확률

$T^i(t)$: 토큰의 우선순위가 i인 경우에 *ATRT*의 분포

$\overline{T^i}$: $T^i(t)$의 평균값

μ_i : 토큰의 우선순위가 i인 경우에 *ATRT*가 *TTRT*보다 작을 확률

p_n : 실시간 데이터 전송큐에 n개의 데이터가 존재할 확률

$d_i(t)$: 실시간 데이터 전송큐 내에 i-번째 데이터의 전송지연시간 분포

d : 실시간 데이터의 평균 전송지연 시간

D : 실시간 데이터의 평균 전송지연 시간의 제한값

D_m : 실시간 데이터의 최대 전송지연 시간의 제한값

p_f : 실시간 데이터가 전송지연 제한시간이내에 전송에 실패할 확률

p_a : 실시간 데이터가 전송지연 제한시간이내에 전송에 실패할 확률의 제한값

3.1 ATRT(Actual Token Rotation Time) 해석

*ATRT*의 확률분포를 구하기 위하여서는 먼저 토큰의 우선순위가 0이 되어서 실시간 데이터만 전송하는 경우에 *ATRT*의 분포인 $T^0(t)$와 토큰의 우선순위가 1이 되어서 실시간 데이터와 비실시간 데이터 모두를 전송할 수 있는 경우의 *ATRT*의 분포인 $T^1(t)$을 도출한다. 다음에 토큰의 우선순위가 0이 될 확률 P_0과 우선순위가 1이 될 확률 P_1을 구한다. *ATRT*의 확률분포 $T(t)$는 다음과 같이 구해진다.

$$T(t)=\sum_{i=0}^{1}P_i\times T^i(t) \tag{1}$$

먼저 $T^i(t)$는 ATRT의 분포가 *i.i.d.* 하다는 가정 하에 다음과 같이 구할 수 있다[4, 5].

$$T^0(t)=\sum_{i=0}^{N_0}\binom{N_0}{i}\rho_{00}^i(1-\rho_{00})^{N_0-i}\delta(t-(R+iL_0)) \tag{2}$$

$$T^1(t)=\sum_{i=0}^{N_0}\sum_{j=0}^{N_1}\binom{N_0}{i}\rho_{10}^i(1-\rho_{10})^{N_0-i}\binom{N_1}{j}\rho_{11}^j(1-\rho_{11})^{N_1-j}\delta(t-(R+iL_0+jL_1)) \tag{3}$$

식(2), (3)에서 $\delta(t)$는 다음과 같이 정의되는 Impulse 함수이다.

$$\delta(t-a)=\begin{cases}1 & \text{for } t=a\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \tag{4}$$

데이터 도착 빈도가 프아송 분포를 가지는 경우에 식 (2)에서 우선순위가 0인 토큰이 도착했을 때 우선순위가 0인 실시간 데이터 전송큐에 데이터가 존재할 확률 ρ_{00}은 다음과 같다.

$$\rho_{00}=\lambda_0\overline{T^0} \tag{5}$$

(5)의 ρ_{00}를 (2)에 대입하여 $T^0(t)$의 평균값인 $\overline{T^0}$를 구하면 다음과 같다.

$$\overline{T^0}=\int_0^\infty t\cdot T^0(t)\,dt=R+L_0N_0\lambda_0\overline{T^0}$$

따라서 $\overline{T^0}$는 다음과 같이 간략히 표현된다.

$$\overline{T^0}=\frac{R}{1-N_0\lambda_0L_0} \tag{6}$$

식(5), (6)으로부터 ρ_{00}는 다음과 같다.

$$\rho_{00}=\frac{R\lambda_0}{1-N_0\lambda_0L_0} \tag{7}$$

식(3)에서 우선순위가 1인 토큰이 도착했을 때 실시간 데이터 전송큐에 우선순위가 0인 실시간 데이터가 존재할 확률 ρ_{10} 역시 프아송 분포의 가정을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_{10}=\lambda_0\overline{T^1} \tag{8}$$

여기서 $T^1(t)$의 평균값인 $\overline{T^1}$는 $\overline{T^0}$와 동일한 방법으로 다음과 같이 구하여진다.

$$\overline{T^1}=\frac{R}{1-N_0\lambda_0L_0-N_1\lambda_1L_1} \tag{9}$$

식(8), (9)로부터 ρ_{10}는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_{10}=\frac{R\lambda_0}{1-N_0\lambda_0L_0-N_1\lambda_1L_1} \tag{10}$$

식(3)에서 우선순위가 1인 토큰이 도착했을 때 우선순위 1 데이터 전송큐에 비실시간 데이터가 존재할 확률 ρ_{11} 역시 (9)의 $\overline{T^1}$를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_{11}=\lambda_1\overline{T^1}=\frac{R\lambda_1}{1-N_0\lambda_0L_0-N_1\lambda_1L_1} \tag{11}$$

식 (7), (10), (11)을 식 (2), (3)에 대입하여 $T^0(t)$과 $T^1(t)$의 분포를 구할 수 있다.

다음은 토큰의 우선순위가 0이 될 확률 P_0와 토큰의 우선순위가 1이 될 확률 P_1을 도출한다. 토큰의 우선순위는 LAS가 *ATRT*와 데이터 링크 계층 파라미터인 *TTRT*를 비교해서 결정한다. 토큰의 우선순위가 0인 경우, *ATRT*가 *TTRT*보다 크거나 같으면($ATRT\geq TTRT$) 토큰의 우선순위는 0으로 유지되고, *ATRT*가 *TTRT*보다 작으면($ATRT<TTRT$) 토큰의 우선순위는 1이 된다. 토큰의 우선순위가 1인 경우, *ATRT*가 *TTRT*보다 크거나 같으면($ATRT\geq TTRT$) 토큰의 우선순위는 0으로 감소하고, *ATRT*가 *TTRT*보다 작으면 ($ATRT<TTRT$) 토큰의 우선순위는 1로 유지된다. *ATRT*가 *i.i.d.*하다는 가정하에서 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_0=(1-\mu_0)P_0+(1-\mu_1)P_1 \tag{12}$$

$$P_1=\mu_0P_0+\mu_1P_1 \tag{13}$$

여기서 μ_i는 토큰의 우선순위가 i인 경우에 *ATRT*가 *TTRT*보다 작을 확률이며, 이는 $T^i(t)$로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_0=\int_0^{TTRT}T^0(t)\,dt,\quad \mu_1=\int_0^{TTRT}T^1(t)\,dt \tag{14}$$

식 (12), (13) 및 $P_0+P_1=1$의 관계를 이용하여 P_1과 P_0은 다음과 같이 도출된다.

$$P_1=\frac{\mu_0}{1+\mu_0-\mu_1},\quad P_0=\frac{1-\mu_1}{1+\mu_0-\mu_1} \tag{15}$$

식 (2), (3), (15)식을 (1)식에 대입해서 $T(t)$의 확률분포를 구하면 다음과 같다.

$$T(t)=\frac{1-\mu_1}{1+\mu_0-\mu_1}\sum_{i=0}^{N_0}\binom{N_0}{i}\rho_{00}^i(1-\rho_{00})^{N_0-i}\delta(t-iL_0-R)+\frac{\mu_0}{1+\mu_0-\mu_1}\sum_{i=0}^{N_0}\sum_{j=0}^{N_1}\binom{N_0}{i}\rho_{10}^i(1-\rho_{10})^{N_0-i}\binom{N_1}{j}\rho_{11}^j(1-\rho_{11})^{N_0-j}\delta(t-iL_0-jL_1-R) \tag{16}$$

여기서, ρ_{00}, ρ_{01}, ρ_{11}은 식 (7), (10), (11)로 주어진다.

3.2 ATRT의 잉여 시간

전송큐 끝단에 도착한 데이터가 토큰을 수신할 때까지 소요되는 시간의 분포 $r(t)$는 *ATRT*의 확률 분포의 잉여시간(residual time)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다[6].

$$r(t)=\frac{1-TR(t)}{\overline{T}} \tag{17}$$

식(17)에서 $\overline{T}$은 *ATRT*의 분포인 $T(t)$의 평균값으로 식 (18)과 같으며, $TR(t)$은 $T(t)$의 cumulative 함수로 식(19)로

구한다.

$$\overline{T}=P_0\frac{R}{1-N_0\lambda_0L_0}+P_1\frac{R}{1-N_0\lambda_0L_0-N_1\lambda_1L_1} \quad (18)$$

$$TR(t)=\int_0^t T(t)\,dt \quad (19)$$

식 (19)를 식 (17)에 대입해서 $r(t)$를 구하면 다음과 같다.

$$r(t) = \frac{1}{\overline{T}}\Big[1-P_0\sum_{i=0}^{N_0}\binom{N_0}{i}\rho_{00}^{i}(1-\rho_{00})^{N_0-i}U(t-R-iL_0) - P_1\sum_{i=0}^{N_0}\sum_{j=0}^{N_1}\binom{N_0}{i}\rho_{10}^{i}(1-\rho_{10})^{N_0-i} \binom{N_1}{j}\rho_{11}^{j}(1-\rho_{11})^{N_1-j}U(t-R-iL_0-jL_1)\Big] \quad (20)$$

여기서 $U(t)$는 Unit Step 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$U(t)=\begin{cases}1 & \text{if } t\geq 0\\ 0 & \text{else}\end{cases} \quad (21)$$

3.3 실시간 데이터의 지연시간

우선순위가 0인 실시간 데이터 지연시간의 분포는 $T(t)$과 $r(t)$로부터 도출될 수 있다. 전송큐의 끝단에 있는 우선순위 0 데이터가 토큰이 도착할 때까지 기다리는 시간의 분포는 $r(t)$이다. 따라서 $d_1(t)$는 $r(t)$와 동일하다. 우선순위 0 전송큐의 끝단에서 두 번째에 위치한 데이터는 첫 번째 데이터의 전송이 완료된 이후 다음 번에 토큰이 도착한 순간에 전송된다. 따라서 $d_2(t)=T(t)\otimes r(t)=\int_0^t T(\tau)r(t-\tau)d\tau$ 이다. 여기서 $\otimes$는 convolution integral 연산자이다. 동일한 방법으로 $d_i(t)$는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_i(t)=\underbrace{T(t)\otimes\cdots\otimes T(t)}_{(i-1)}\otimes r(t) \quad (22)$$

실시간 데이터 전송큐에 n개의 데이터가 존재할 확률 p_n은 Kuehn[4]의 결과를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_n=p_0\cdot p_{0n}+\sum_{m=1}^{n+1}p_m\cdot p_{mn} \quad (23)$$

여기서 $p_0=1-\lambda_0\overline{T}$이며, p_{mn}은 토큰의 순환 시간동안 전송큐의 길이가 n에서 m으로 변화될 확률로 다음과 같이 표현된다.

$$p_{mn}=\begin{cases}\int_{t=0}^{\infty}e^{-\lambda_0 t}\dfrac{(\lambda_0 t)^{n-m+1}\cdot T(t)}{(n-m+1)!}dt, & m>0\\ \int_{t=0}^{\infty}e^{-\lambda_0 t}\dfrac{(\lambda_0 t)^{n}\cdot T(t)}{n!}dt, & m=0\end{cases} \quad (24)$$

패킷 전송시간을 포함하는 우선순위가 0인 실시간 데이터의 평균 지연시간은 다음과 같다.

$$d=\sum_{i=1}^{\infty}p_i\int_0^{\infty}td_i(t)\,dt+L_0 \quad (25)$$

3.4 FF 통신망 설계 기법

FF에서 실시간 데이터는 경우에 따라 평균지연시간 또는 최대지연시간을 기준으로 설계될 수 있다. 만일 실시간 데이터의 평균지연시간 d가 허용치 D를 초과하지 않도록 설계하는 경우에는 식 (25)를 사용하여 $d<D$의 조건을 만족하는 통신망 파라미터들을 선정할 수 있다. 설계에 사용되는 통신망 파라미터로는 사용자가 직접 설정할 수 있는 $TTRT$ 값을 비롯하여, N_0, N_1, L_0, L_1, λ_0, λ_1 등이 포함될 수 있다.

만일 응용프로세스가 매우 엄격한 실시간성을 요구하는 경우에는 통신망의 설계가 실시간 데이터의 최대 지연시간을 기준으로 설계되어야 할 필요가 있다. 그러나 실시간 데이터 전송큐에 존재하는 데이터의 개수는 식 (23)에서와 같이 확률적으로 구할 수밖에 없으므로, 최대 지연시간을 기준으로 하는 통신망의 설계 역시 확률적으로 도출한다. 주어진 응용 프로세스에서 실시간 데이터의 최대 전송지연 시간의 제한값이 D_m으로 주어진 경우에 실시간 데이터가 D_m의 제한시간이내에 전송되지 못할 확률은 다음과 같다.

$$p_f=\sum_{i=1}^{\infty}p_i\cdot\int_{D_m-L_0}^{\infty}d_i(t)\,dt \quad (26)$$

이러한 경우에 통신망 설계 기준은 실시간 데이터가 전송지연 제한시간 이내에 전송할 확률 p_a로 주어지며, 식(26)을 통하여 $p_f<p_a$를 만족하는 $TTRT$를 포함하는 각종 통신망 파라미터의 설계값을 구할 수 있다. 만일 모든 실시간 데이터가 D_m의 제한시간 이내로 전송되도록 하기 위하여서는 p_f가 매우 작은 값(예, 10^{-10})이 되도록 설계한다. 그러나 FF 통신망이 최대지연시간 D_m을 기준으로 설계되는 경우 p_a를 작게 설정하면 할수록 통신망 자원의 이용도는 감소될 것이며, 통신망 설계자는 실시간 통신 요구사항과 자원의 이용도에 대한 타협점을 찾아야 한다.

4. FF 통신망 설계의 예

본 장에서는 3장에서 제시한 수학적 모델을 이용한 FF 통신망 설계의 예를 제시한다. 예시 모델은 32개의 노드로 구성된다. 우선순위 0과 1의 전송큐는 각각 16개이다 ($N_0=N_1=16$). FF의 데이터 전송 속도는 1 Mbps로 가정하였다. 실시간 데이터와 비실시간 데이터의 패킷 길이는 11 바이트의 프레임 오버헤드를 포함하여 각각 75 바이트와 267 바이트로 가정한다 ($L_0=0.6$ ms, $L_1=2.136$ ms). 각 노드에서 토큰 처리시간은 1 ms으로 가정한다 ($R=32$ ms). 통신망의 트래픽 부하는 $U=N_0\lambda_0L_0+N_1\lambda_1L_1$로 정의되며, 트래픽 부하량은 λ_0와 λ_1으로 조정한다. 본 논문에서 통신망의 성능은 $U=0.2$(낮은 트래픽), $U=0.35$(중간 트래픽), $U=0.5$(높은 트래픽)의 세 가지 경우에서 측정되었다.

그림 1부터 그림 3에는 각각 $U=0.2$, 0.35, 0.5에서 $ATRT$의 확률밀도함수인 $T(t)$가 나타나 있다. 여기서 $TTRT$는 48.68 ms로 설정되었다. 이는 한번의 토큰 회전시간 동안 10개의 실시간 데이터와 5개의 비실시간 데이터가 전송될 수 있는 시간이다. 그림의 결과는 예상한 바와 같이 트래픽 부하가 증가함에 따라 $ATRT$가 증가할 확률이 커지는 것으로 나타났다. 그림에서 보면 또한 트래픽 부하가 증가할수록 $ATRT$의 분포가 증가하는 것으로 나타났다. 그림 3에서 보면 트래픽 부하가 높은 $U=0.5$의 경우 $ATRT$의 분포가 두개의 구간으로 나뉘어진다. 앞의 구간은 토큰의 우선순위가 0으로 설정되어 주로 실시간 데이터들이 전송되는 구간인 반면, 뒤의

구간은 토큰의 우선순위가 1로 설정되어 실시간 데이터와 비실시간 데이터가 모두 전송되는 경우이다. 이러한 구간의 구분은 그림 2의 $U=0.35$인 경우에도 미약하나마 나타나고 있다. 이러한 $ATRT$ 분포의 증가는 데이터 전송지연시간의 증가를 초래한다.

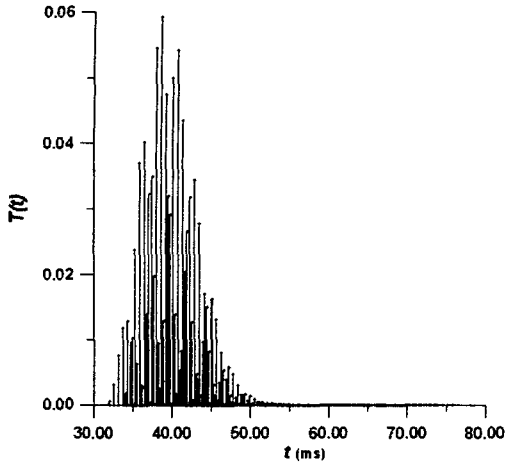

그림 1 $U=0.2$에서 ATRT의 확률밀도함수
Fig. 1 Probability density function of ATRT at U=0.2

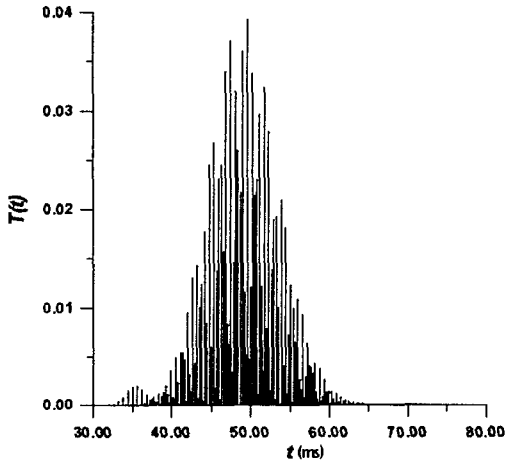

그림 2 $U=0.35$에서 ATRT의 확률밀도함수
Fig. 2 Probability density function of ATRT at U=0.35

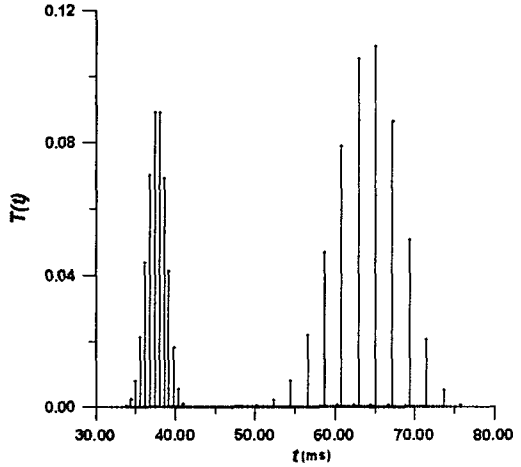

그림 3 $U=0.5$에서 ATRT의 확률밀도함수
Fig. 3 Probability density function of ATRT at U=0.5

그림 4에는 $U=0.2$, 0.35, 0.5에서 $TTRT$의 변화에 대한 실시간 데이터의 평균지연시간의 변화가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실시간 데이터의 지연시간은 $TTRT$의 변화에 대하여 민감하게 반응하며, 이러한 현상은 트래픽 부하 U가 증가할수록 두드러진다. 그림 4에서 $U=0.5$인 경우 데이터의 평균 지연시간이 $TTRT$의 변화에 대하여 일정한 구간이 존재하는데, 이는 그림 3에서 보는 바와 같이 $ATRT$가 그 구간의 값을 가지는 확률이 매우 낮기 때문이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 실시간 데이터의 지연시간은 $TTRT$가 증가할수록 커진다. 이는 $TTRT$가 증가함에 따라 $ATRT$가 $TTRT$를 초과할 확률이 작아지고, 따라서 토큰의 우선순위는 하향 조정되어 비실시간 데이터(우선순위 1)가 전송될 확률이 증가되기 때문이다. 통신망의 미디엄은 비실시간 데이터와 실시간 데이터가 공유하므로 이러한 비실시간 데이터 전송의 증가는 실시간 데이터의 지연시간 증가를 초래한다.

통신망 설계 요구사항이 트래픽 부하 $U=0.35$에서 실시간 데이터의 평균 전송지연 시간의 제한값 D가 20 ms로 주어진 경우라면, 이러한 성능요구사항을 만족하는 $TTRT$는 그림 4에서 보는 바와 같이 50 ms로 구할 수 있다. 만일에 FF 통신망이 최대 지연시간을 기준으로 설계되는 경우라면 실시간 데이터가 전송지연 제한시간이내에 전송에 실패할 확률 p_f를 기준으로 하여 통신망을 설계한다. 그림 5에는 $U=0.2$, 0.35, 0.5에서 $TTRT$의 변화에 대한 p_f의 변화가 나타나 있다. 만일에 $U=0.35$에서 실시간 데이터의 최대 전송지연 시간의 제한값 $D_m=140$ ms로 주어지고, 실시간 데이터가 전송지연 제한시간이내에 전송에 실패할 확률의 제한값 $p_a=0.01$로 주어진 경우 이러한 성능 요구사항을 만족시키기 위하여서는 $TTRT$가 그림 5에서 보는 바와 같이 50 ms로 결정된다.

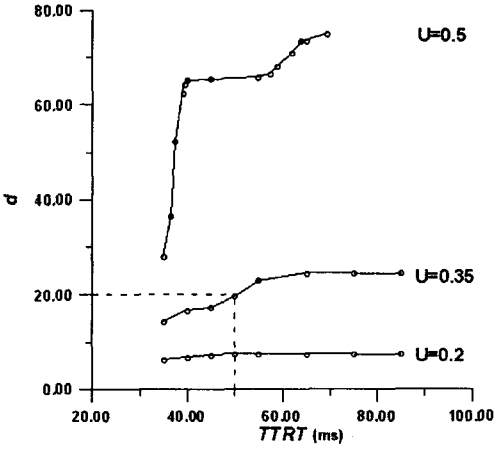

그림 4 실시간 데이터의 평균 지연시간
Fig. 4 Average delay of real-time data

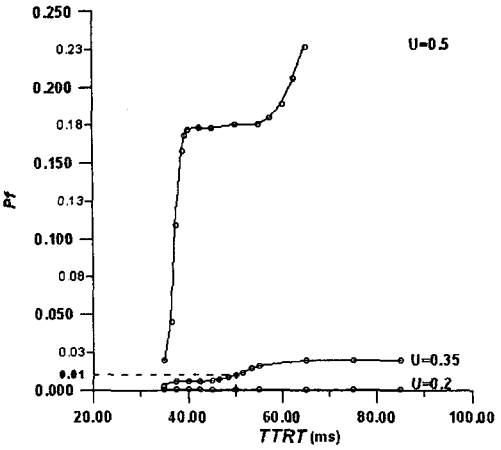

그림 5 실시간 데이터가 전송지연 제한시간이내에 전송에 실패할 확률

Fig. 5 robability of the failure of real-time data transmission

5. 결 론

본 논문에서는 프로세스 제어시스템에서 널리 사용되고 있는 FF에서 실시간 데이터의 지연시간을 해석할 수 있는 수학적인 모델을 제시하고, 이를 바탕으로 하여 실시간 데이터의 성능요구사항을 만족시키는 FF 통신망 설계기법을 제시하였다. 본 논문에서 제시하는 FF 통신망 설계 기법은 실시간 데이터의 평균지연시간과 최대지연시간을 기준으로 설계되며, 이러한 성능 요구사항을 만족하도록 하는 통신망 파라미터들을 설정하는 방법을 제시한다. 본 연구의 후속 연구로는 토큰-패싱 방식과 스케듈링 방식이 공존하는 경우와 토큰-패싱 방식에서 urgent, normal, time-available 우선순위를 모두 고려하는 경우에 대한 수학적인 모델과 이를 근거로한 FF 통신망 설계 기법이 연구되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00046-0)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] J. R. Jordan, *Serial networked field instrumentation*, John Wiley & Sons, 1995.

[2] *FOUNDATION™ Specifications: data link protocol specifications*, Fieldbus Foundation, Austin, TX, 1996.

[3] H. Levy and M. Sidi, Polling systems: applications, modeling and optimization, *IEEE Trans. on Communication*, Vol. 38, No. 10, pp. 1750~1760, 1990.

[4] P. J. Kuehn, Multiqueue Systems with nonexhaustive cyclic service, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 58, No. 31, pp. 671~698, 1979

[5] S. H. Hong, Approximate analysis of timer-controlled priority scheme in the single-service token-passing systems, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Nol. 2, No. 2, pp. 206~215, 1994.

[6] P. King, *Computer and communication systems performance modeling*, Prentice Hall, 1990.

저 자 소 개

홍 승 호 (洪 承 鎬)

1956년 5월 31일생. 1982년 연세대 기계공학과 졸업. 1989년 Pennsylvania. State Univ. 졸업(공박). 1992년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수.

Tel : 031-400-5213, Fax : 031-406-4132

E-mail : shhong@hanyang.ac.kr