

페트리 넷를 이용한 필드버스 시스템의 성능 해석

이 재 수 박 홍 성
강원대학교 공과대학 제어계측공학과

Performance Analysis of FieldBus system using Petri-Net

°Jae Soo Lee Hong Seong Park
Dept. of Control & Instrumentation Engineering
Kangwon National University

Abstract

This paper derives to the mean token rotation time and the mean service time of a station using an analytic methods in the fieldbus. These performance measures are represented in terms of the number of stations, the token holding time(THT), the token rotation time(TRT), and the mean arrival rate and mean service time of messages. This paper presents the Petri-Net(PN) model for a Datalink layer of the fieldbus. The mathematical forms of the mean token rotation time and the mean service time of the station are presented this PN model and the moment generating function.

1. 서론

현재 생산 현장에서는 인간을 대신하여 수많은 자동화 기기들이 대량생산을 위해 사용되고 있다. 그러나 이들 기기들은 각 회사별로 독특한 하드웨어나 소프트웨어들로 구현되어 있기 때문에, 기기 상호간의 접속이 원활하진 못하다. 이를 보완하기 위해 MAP(Manufacturing Automation Protocol) [1]이 제안되어, 많은 생산 라인에서 사용되고 있다. 그러나, 최근 스마트 센서가 생산 라인에서 많은 비중을 차지하게 되어감에 따라, 스마트 센서를 이용할 수 있는 통신 시스템이 필요하게 되었다. 즉, MAP보다 더 낮은 레벨의 통신 규약이 필요하게 되었다. 그리고, 그러한 요구를 충족시키기 위해 FieldBus가 제안되었다[2] [3]. 본 논문에서는 ISA(Instrument Society of America)의 자체 표준안 [2] [3]을 토대로 FieldBus 시스템을 해석한다.

FieldBus Data Link 층을 페트리넷을 이용하여 모델링하거나, 전송 효율(throughput)과 접근 시간(access delay)을 성능 지표로써 평가한 연구들이 있다 [4] [5]. Stefano[4]는 시뮬레이션을 사용하여 시스템의 성능을 분석하였고, Cavalieri[5]는 한 개의 LM만을 모델로 구성하여 성능을 평가하였다.

시스템의 성능을 연구한 논문들 [6-9]을 살펴보면, Elnakhai[6]는 MAP에서의 성능을 연구한 것으로, 한 스테이션에서 토큰 이동 시 지연되는 시간을 구하였다.

이 논문은 MAC(Medium Access Control)에서의 immediate response option 이용 시 그 장점을 나타내기 위한 것으로써, 서비스 요구 발생율과 통신망에서 제공되는 traffic의 총합과 token walk time을 이용하여 평균 토큰 회전 시간과 대기시간을 구하였다. Valenzano[7]는 Mini-MAP을 모델로 시스템에서의 서비스 시간을 각 스테이션에서의 서비스 요구 발생시간과 그 서비스 요구에 대한 확인이 되돌려지는 시간이 모두 알려져 있다는 가정하에서 시뮬레이션을 이용하여 해석하였다. Montushi[8]는 HPTHT(High-priority token holding time)와 TTRT(Target Token Rotation Time)의 관계를 이용하여, 각 우선순위하에서 스테이션이 토큰을 갖는 시간을 제시하였다. 그리고, Guo [9]는 구성된 페트리넷 모델에서 각 상태의 전달함수를 구하여 시스템을 해석하고, 그 시스템을 다시 하나의 전달함수로 바꾸어서 전체 시스템을 해석하였다.

본 논문에서는 FieldBus에서 주기적 데이터 교환 시 사용되는 CiT(Circulated Token)에대한 모델만을 고려한다. 그리고, TRT (Token Rotation Time)와 THT(Token Holding Time)와 Guo [9]가 제안한 모멘트 발생함수를 이용하여 평균 토큰 회전시간과 한 스테이션에서의 평균 서비스 시간을 수학적으로 구한다.

2장에서는 필드버스 데이터링크층을 살펴보고 그 PN 모델을 제시한다. 3장에서는 모델을 해석하는 데 사용되는 기본 이론을 보이고, 4장에서는 평균 토큰 회전시간과 평균 서비스 시간을 구하는 방법을 보인다. 마지막으로 결론을 맺겠다.

2. 필드버스 데이터링크층의 PN 모델

데이터링크층에서 제공되는 기능은 기본적으로 4가지로 구분될 수 있다. 먼저 Responder로의 기능은 다른 스테이션으로부터 전달된 것에 대한 응답을 담당이고, Initiator로의 기능은 다른 스테이션으로 통신을 시작하는 데 이용하는 것이다. Bridge로의 기능은 현재 자신이 속한 Fieldbus 시스템이 아닌 다른 Fieldbus 시스템으로의 연결 시 이용되며, Link Master로의 기능은 Data Link Layer에서의 작업 수행이다. 여기서 Link Master는 LAS(link active scheduler)와 LM(Link

Master)로 구성된다. LAS는 자신이 가진 토큰을 이동시켜 연결된 LM들을 관리하며, LM은 LAS로부터 받은 토큰을 이용하여 할당된 작업을 수행한다.

작업 수행 시 사용되는 토큰에는 CiT(Circulated Token)와 DeT(Delegated Token)이 있다. CiT는 일정한 스케줄로 LAS에 연결된 스테이션들을 차례로 돌면서 서비스를 수행하는 토큰이고, DeT는 CiT의 보조로써 긴급을 요구하는 메시지에 대한 서비스를 위주로 서비스를 동작하는 토큰이다.

CiT는 한번에 최대 8개의 스테이션들만이 이용 가능하고, 그 외의 스테이션들은 이 스테이션이 CiT를 이용하는 동안 DeT를 이용한다. CiT의 이용은 LAS로 CiT 요구가 발생했을 때 순차적으로 전달된다.

본 논문에서는 토큰 사용 가능 시간에 대한 매개변수를 갖지 않는 CiT의 동작을 모델링 하였고, 전송될 메시지는 K개의 한계를 갖는 버퍼에 저장되며 선입선출(First Come First Service) 방식으로 메시지를 처리한다고 가정한다.

CiT가 이동하며 서비스 수행하는 것에 대해 다음의 그림 1과 같이 모델링 하였다. 먼저 토큰이 현 스테이션에 도착하면, 서비스를 수행함과 동시에 현재 이 토큰을 사용하여 서비스를 수행할 것인지 판단한다. 만일 현재 작업을 수행해야 할 서비스 수행 시간이 토큰 사용 가능 시간(THT:Token Holding Time)보다 클 경우는 서비스를 수행하지 않고 전달된 토큰을 다음 스테이션으로 넘겨야 한다. 그러나, 본 논문에서는 그 시간 동안 안 서비스를 수행하지는 않지만 그만큼의 시간이 경과했다고 가정한다. 토큰 사용 가능 시간이 서비스 수행 시간보다 클 경우는 서비스를 수행하며 계속 토큰 사용 가능 시간과 비교한다. 현재 저장되어 있는 서비스 요구가 없을 경우 토큰을 다음 스테이션으로 넘긴다. 평균 서비스 시간이 $1/\mu$ 인 지수 분포를 가지며, 메시지 발생율은 발생율 λ 를 갖는 포아송분포를 갖는다.

이와 같은 동작을 다음과 같이 적용시켜 PN모델을 구성하였다. 플레이스 P6는 서비스 요구가 항상 발생 가능하도록한다(토큰부여). 플레이스 P5는 FCFS(First Come First Service)의 형태를 갖고, 저장량이 K개로 제한된다. 토큰 사용 여부를 판단하는 부분은 트랜지션 T4와 T5이다. 트랜지션 T4는 저장된 메시지가 있는 지를 판단하고, 트랜지션 T5는 토큰 사용 가능 시간이 다 되었는 지를 판단한다. 트랜지션 T5는 앞에서 언급한 바와 같이 서비스 수행 시간과 현재의 토큰 사용가능시간을 비교하여 점화되는 것이 아니라 남아 있는 토큰 사용 가능 시간 동안만 대기한 후 점화된다. 수학적으로 비교부분을 해석하는 것이 어렵기 때문에 모델 오차로써 처리한다. 플레이스 P5에서 대기중이던 메시지는 처리되지 않는다. 트랜지션 T4와 T5가 점화될 경우, 토큰을 다음 스테이션으로 넘김과 동시에 서비스 수행 가능 상태를 금지시켜야 한다(T3의 점화를 금지시킴). 그리고 각 스테이션들은 모두 이와 같은 형태를 갖는다.

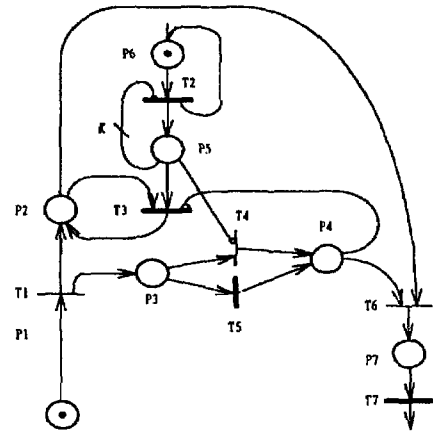


그림 1. 필드버스 데이터링크용 페트리네트 모델

표1. 그림1에서의 상태와 천이의 설명

상태

- P1 : 현재의 스테이션이 토큰을 가짐
- P2 : 서비스 수행 중
- P3 : 서비스 종료 조건 검사
- P4 : 서비스 종료
- P5 : 서비스 요구를 저장(K개의 저장량을 가짐)
- P6 : 서비스 요구 발생 가능 상태
- P7 : 토큰을 다음 스테이션으로 넘김

천이

- T1 : 현 스테이션에 토큰이 도달, 서비스 수행 시작 (immediate)
- T2 : 서비스 요구 발생 (발생율이 λ 인 포아송분포 형태)
- T3 : 서비스 수행 (수행 시간이 $1/\mu$ 인 지수분포 형태)
- T4 : 서비스 요구가 없을 경우 서비스 종료 (immediate)
- T5 : 토큰 사용 가능 시간(THT)동안 지연
- T6 : 서비스 종료 (immediate)
- T7 : 토큰이 다시 들어올 때까지 지연

주) immediate : 점화 조건이 맞으면 시간 지연없이 점화되는 것을 말한다.

3. 모멘트 발생 함수

Guo[9]가 제안한 성능 평가 방법을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 모멘트 발생 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$M(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt = E(e^{-st}) \quad (1)$$

s : 확장된 매개변수
f(t) : 랜덤 변수 t의 확률 밀도 함수

그리고, n번째 모멘트는 모멘트 발생 함수의 n번째 편 미분에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^n}{\partial s^n} M(s)|_{s=0} = E(t^n) \quad (2)$$

트랜지션 t_k 의 전달 함수 $W_k(s)$ 는 다음과 같다.

$$W_k(s) = P(i, k) \cdot M(s) \quad (3)$$

$P(i, k)$: 상태 i 에서 트랜지션 t_k 가 점화될 확률

$M(s)$: 상태 i 에서의 모멘트 발생 함수

이 전달 함수는 도달 가능 그래프에서 각 상태 전환 시 그때의 전달 함수를 얻으면 된다. 이러한 전달 함수를 구하기 위해서는 메이슨의 공식을 이용하여 도달 가능 그래프에서 얻을 수 있다. 또한, 이렇게 얻어진 전달 함수를 이용하여, 다음과 같은 전체 모멘트 발생 함수를 얻을 수 있다.

$$M_E(s) = \frac{W_E(s)}{W_E(0)} \quad (4)$$

다음 장에서는 평균 토큰 회전 시간과 평균 서비스를 구한다.

4. 평균 토큰 회전 시간과 평균 서비스 시간

4.1 메시지 저장량이 임의의 k 개인 경우

플레이스 $P5$ 를 임의의 K 개로 제한을 둔 경우, 다음과 같은 도달 가능 그래프를 얻을 수 있다.

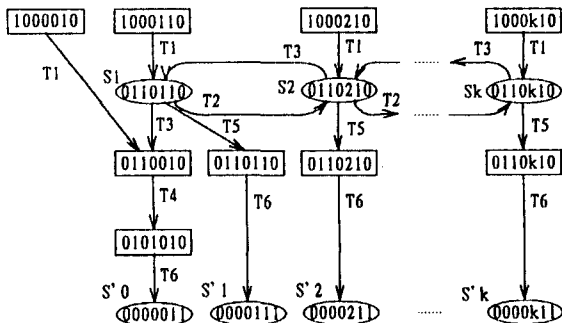


그림 2. 메시지 저장량이 k 개 일 경우의 도달 가능 그래프

그림 2의 도달 가능 그래프에서 immediate 상태를 제거하고 대기시간이 있는 부분만 취하여 상태도를 얻으면 그림 3과 같다.

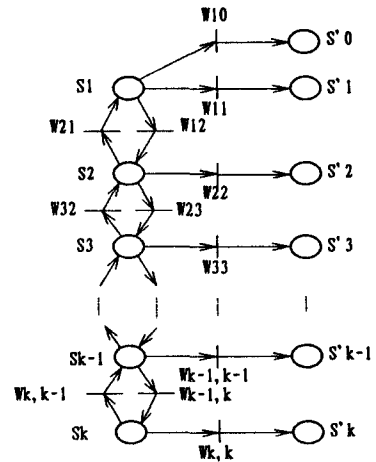
같은 시간에 발생 가능한 트랜지션들을 $\{t_1, t_2, \dots, t_d\}$, $d \geq 1$ 로 놓고, X_i 를 t_i ($i = 1, 2, \dots, d$)에서의 랜덤시간지연이라 놓는다. 그러면, t_i 의 전달 함수 $W_i(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_i(s) = P(t_i) \cdot M(t_i, s) \quad (5)$$

$$P(t_i) = P\{X_i \leq X_j, j \neq i\}$$

여기서 $M(t_i, s)$ 는 다음과 같이 사건 발생 확률 중 최소치에 대한 모멘트 발생 함수이다.

$$M(t_i, s) = \text{Min} \{X_j, j=1, 2, \dots, d\} \quad (6)$$



S_k : 토큰이 있으며, 저장된 메시지가 k 개 있는 경우
 $S'k$: 토큰을 다음 스테이션으로 전달해야 하고, 저장된 메시지가 k 개 있는 경우

$W_{i,j}$: 상태 S_i 에서 S_j 로 변환될 경우의 전달 함수 단, W_{10} 은 S_1 에서 $S'0$ 로 변환될 경우의 전달 함수이다.

$W_{i,i}$: 상태 S_i 에서 $S'i$ 로 변환될 경우의 전달 함수

그림 3. 메시지 저장량이 임의의 K 개 일 경우의 상태도

그림 3의 상태도에서 각 트랜지션별 확률들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_A(i) = P(X_i = i)$$

$$P_D(i) = P(X_r = i)$$

$$a_{ij} = P(X_i = i | X_r = j)$$

$$P_y = P(X_r = i | X_i = j)$$

라 놓으면,

$$\begin{bmatrix} P_A(0) \\ P_A(1) \\ \vdots \\ P_A(k-1) \\ P_A(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_{01} & a_{11} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{k-1,0} & a_{k-1,1} & \cdots & a_{k-1,k-1} & 0 \\ a_{k,0} & a_{k,1} & \cdots & a_{k,k-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_D(0) \\ P_D(1) \\ \vdots \\ P_D(k-1) \\ P_D(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{(\lambda t)^{(i-j)}}{(i-j)!} \cdot e^{-\lambda t} & (i \neq k) \\ 1 - \sum_{k=0}^{k=i-1} \frac{(\lambda t)^{(k-j)}}{(k-j)!} \cdot e^{-\lambda t} & (i = k) \end{cases}$$

$$* t = T_R - T_S$$

$$\begin{bmatrix} P_D(0) \\ P_D(1) \\ \vdots \\ P_D(k-1) \\ P_D(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & P_{01} & \cdots & P_{0,k} \\ 0 & P_{11} & \cdots & P_{1,k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & P_{k-1,1} & \cdots & P_{k-1,k} \\ 0 & P_{k,1} & \cdots & P_{k,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_A(0) \\ P_A(1) \\ \vdots \\ P_A(k-1) \\ P_A(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P_0 = W_0(0)$$

$W_{ij}(s)$: 상태 i 에서 상태 j 로 변할 때의 전달 함수

가 된다.

위의 식 (7)과 (8)을 이용하면, 토큰이 전달되는 순간의 플레이트 P_5 에 저장되어 있는 메시지의 갯수에 대한 확률 $P_A(i)$ 이 구해진다. 이 확률 $P_A(i)$ 들과 각 모멘트 발생 함수를 이용하여 한 스테이션의 전체 전달 함수 $W_{LM}(s)$ 를 구할 수 있다.

평균 서비스 시간 T_s 를 구하는 알고리즘

1. 식 (7)과 (8)을 이용하여, 토큰이 들어왔을 때의 확률 $P_A(i)$ 를 구한다.
2. 확률 $P_A(i)$ 에서 발생 가능한 각각의 트랜지션에 대한 전달 함수 $W_{ij}(s)$ 를 구한다.
3. 과정 2에서 구한 전달 함수들의 전체 전달 함수 $W_i(s)$ 를 구한다.
4. 전달 함수 $W_i(s)$ 에서 모멘트 발생 함수 $M_i(s)$ 를 구한다.
5. 모멘트 발생 함수 $M_i(s)$ 와 $P_A(i)$ 곱하여, 한 개 스테이션의 전달 함수 $W_{LM}(s)$ 를 구한다.
6. 한 스테이션에서의 모멘트 발생 함수 $M_{LM}(s)$ 를 구한다.
7. 모멘트 발생 함수 $M_{LM}(s)$ 를 이용하여, 평균 서비스 시간 T_s 를 구한다.

위의 알고리즘을 이용하여 $k=1$ 인 경우의 평균 서비스 시간을 구해 보겠다.

4.2. $K = 1$ 인 경우

K 를 1로 놓았을 경우 모델에서 얻을 수 있는 도달 가능 그래프는 다음과 같다.

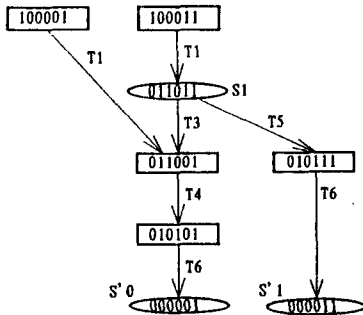
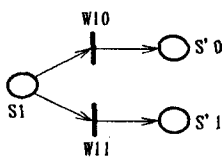


그림 4. $K = 1$ 일 경우의 도달 가능 그래프

그림 4에서 얻은 도달 가능 그래프에서 immediate 상태들을 제외하고 대기시간이 있는 부분만을 취하여 상태를 얻으면 그림 5와 같다.



- $S1$: 토큰을 가지며, 서비스 요구가 존재하는 상태
 $S'0$: 서비스를 수행하여 남아 있는 서비스가 없고, 토큰을 다음 스테이션으로 넘겨야 하는 상태
 $S'1$: 토큰 사용가능시간이 만료되어, 서비스를 하지 않고 토큰을 다음 스테이션으로 넘겨야 하는 상태

그림 5. $K = 1$ 인 경우의 서비스 상태도

위의 그림에서 각 트랜지션마다의 전달 함수는 다음과 같다.

- λ : 서비스 요구 발생률
 μ : 서비스 수행률 ($1/\mu$ 는 서비스 수행 시간)
 T_H : 토큰 사용 가능 시간(THT)
 T_R : 평균 토큰 회전 시간
 T_S : 평균 서비스 시간(한 스테이션에서)

상태 $S1$ 에서의 모멘트 발생 함수 $M(s)$ 는 식 (6)에서와 같이 트랜지션 $T3$ 가 점화할 경우와 트랜지션 $T5$ 가 점화할 경우 중 최소치를 구하여, 그 경우들에 대한 모멘트 발생 함수로 사용한다.

그림 5의 상태도에서 보면 $S1$ 에서 발생 가능한 트랜지션은 $T3$ 와 $T5$ 가 있다. 트랜지션 $T3$ 점화할 경우와 트랜지션 $T5$ 가 점화할 경우의 확률은 다음과 같다.

$$\text{트랜지션 } T3 \text{가 점화할 확률} : \mu \cdot e^{-\mu} \quad (9)$$

$$\text{트랜지션 } T5 \text{가 점화할 확률} : \lambda(1 - T_H) \quad (10)$$

그러므로 이 두 식 (9)와 (10)의 최소치를 구해, 모멘트 발생 함수 $M_i(s)$ 로 바꾸면 다음과 같다.

$$M_i(s) = \frac{\mu}{\mu - s} - \frac{s}{\mu - s} e^{(s-\mu)T_H} \quad (11)$$

이 식 (11)을 그림 5의 상태도에 대해 적용시키면, 다음과 같이 각 트랜지션별 전달 함수를 구할 수 있다.

$W10(s)$: 서비스 수행 시의 전달 함수($T3$ 가 점화)

$$W10(s) = (1 - e^{-\mu T_H}) \left\{ \frac{\mu}{\mu - s} - \frac{s}{\mu - s} e^{(s-\mu)T_H} \right\}$$

$W11(s)$: 토큰 사용가능시간 만료 시의 전달 함수($T5$ 가 점화)

$$W11(s) = e^{-\mu T_H} \left\{ \frac{\mu}{\mu - s} - \frac{s}{\mu - s} e^{(s-\mu)T_H} \right\}$$

그림 5. 상태도에서 전체 전달 함수 $W_i(s)$ 는

$$W_i(s) = W10(s) + W11(s)$$

가 되므로 서비스 시간이 존재하는 경우의 모멘트 발생 함수 $M_i(s)$ 는 다음과 같다.

$$M_i(s) = \frac{W_i(s)}{W_i(0)} = \frac{\mu}{\mu - s} - \frac{s}{\mu - s} e^{(s-\mu)T_H} \quad (12)$$

그림 5. 상태도에서 초기상태인 $S1$ 이 될 확률은 안정 상태에서의 조건과 각 상태에서의 확률들을 이용하여, 다음과 같이 구할 수 있다.

X_t : 시간 t (토큰이 도착했을 때)에서의 메시지 수
 X_r : 시간 t' (토큰이 다음 스테이션으로 넘어갈 때)에서의 메시지 수

$$P(X_{t+1}=0)=P(X_r=0)P(X_{t+1}=0|X_r=0)$$

$$P(X_{t+1}=1)=P(X_r=0)P(X_{t+1}=1|X_r=0) \\ + P(X_r=1)P(X_{t+1}=1|X_r=1)$$

$$P(X_{r+1}=0)=P(X_{t+1}=0)P(X_{r+1}=0|X_{t+1}=0) \\ + P(X_{t+1}=1)P(X_{r+1}=0|X_{t+1}=1)$$

$$P(X_{r+1}=1)=P(X_{t+1}=1)P(X_{r+1}=1|X_{t+1}=1)$$

등의 각 상태별 확률을 구할 수 있다. 여기에 안정 상태 조건 $P(X_t)=P(X_{t+1})$, $P(X_t')=P(X_{t'+1})$ 을 대입하여 $P(X_t=0)$, $P(X_t=1)$ 의 확률을 구하면, 다음과 같다.

$$P(X_t=0)=\frac{(1-e^{-\mu T_H})e^{-\lambda(T_R-T_S)}}{1-e^{-\mu T_H}e^{-\lambda(T_R-T_S)}} \\ P(X_t=1)=\frac{1-e^{-\lambda(T_R-T_S)}}{1-e^{-\mu T_H}e^{-\lambda(T_R-T_S)}}$$

이 확률 중 $P(X_t=1)$ 을 식 (12)에 곱하면, 서비스가 수행되는 시간에 대한 전체 전달 함수 $W_{LM}(s)$ 를 구할 수 있다.

$$W_{LM}(s)=P(X_t=0)+P(X_t=1) \cdot M_E(s)$$

그러므로, 한 스테이션에서의 모멘트 발생 함수 $M_{LM}(s)$ 는 다음과 같다.

$$M_{LM}(s)=\frac{W_{LM}(s)}{W_{LM}(0)}$$

이 모멘트 발생 함수 $M_{LM}(s)$ 를 사용하여 한 스테이션에서의 평균 서비스 시간 T_s 를 구할 수 있다.

$$T_s=\frac{d}{ds}M_E(s)|_{s=0} \\ =\frac{1-e^{-\lambda(T_R-T_S)}}{1-e^{-\mu T_H}e^{-\lambda(T_R-T_S)}} \cdot \frac{1}{\mu}(1-e^{-\mu T_H}) \quad (13)$$

여기서 평균 토큰 회전 시간 T_R 은 한 스테이션에서의 평균 서비스 시간 T_s 와 토큰 오버헤드 시간 T_0 등으로 나뉠 수 있다.

$$T_R=N \cdot T_s+N \cdot T_0 \quad (14)$$

N : 시스템에서 스테이션의 갯수
 T_0 : 오버 헤드 시간

식 (13)과 (14)에 의해 T_R 과 T_s 를 구할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서 필드버스 데이터링크층을 살펴보았다. 각 메시지가 임의로 발생 및 수행된다는 가정하에서

성능 해석을 해보았다. 먼저 Stochastic 페트리네트를 이용하여 모델링 하였고, PN 모델과 모멘트 발생 함수를 이용하여 평균 토큰 회전 시간과 한 스테이션에서의 평균 서비스 시간을 유도하였다.

본 논문에서는 필드버스에서도 한가지 토큰에 대해 연구하였지만, 앞으로 모든 종류의 토큰을 고려한 연구가 있어야 한다고 본다. 특히 긴급 메시지의 처리가 통신망의 안정성에 많은 영향을 끼치므로 DeT(Delegated Token)의 비주기적 서비스에 대한 연구가 필요하다고 본다.

참고문헌

- [1] General Motors, Manufacturing Protocol Specification Version 3.0, 1988
- [2] Industrial Automation Systems - Systems Integration and Communications - FieldBus Part 4: Data Link Protocol Specification Editor's Draft - Version 5 ISA/SP50-1991-360B
- [3] Industrial Automation Systems - Systems Integration and Communications - FieldBus Part 3: Data Link Service Definition Editor's Draft - Version 8 ISA/SP50-1991-359H
- [4] Antonella Di Stefano and Orazio Mirabella, "Evaluating the FieldBus Data Link Layer by a Petri Net-Based Simulation", IEEE Tr. on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 4, pp. 288-297, August 1991.
- [5] Salvatore Cavalieri, Antonella Di Stefano, and Orazio Mirabella, "Optimization of Acyclic Bandwidth Allocation Exploiting the Priority Mechanism in the FieldBus DataLink Layer", IEEE Tr. on Industrial Electronics, Vol 40, No 3, pp. 297-306, June 1993
- [6] Abd E. Elnakhai and Helmut Rzehak, "Design and Performance Evaluation of Real Time Communication Architectures", IEEE Tr. on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 4, pp. 404-411, AUGUST 1993.
- [7] Adriano Valenzano and Luigi Ciminiera, "Performance Ebaluation of MiniMAP Networks", IEEE Tr. on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 3, pp. 253-258, JUNE 1990.
- [8] Paolo Montushi, Adriano Valenzano, Luigi Cimiera, "Selection of Token Holding Times in Timed-Token Protocol", IEEE Tr. on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 6, pp. 442-451, DECEMBER 1990.
- [9] D. L. Guo, F. DiCesare, and M. C. Zhou, "A Moment Generating Function Based Approach for Evaluating Extended Stochastic Petri Nets," IEEE Tr. on AC, Vol. 38, No. 2, pp. 321-327, 1993.