

## 페리네트를 이용한 필드버스 시스템의 성능 해석

Performance analysis of fieldbus systems using Petri net

저자	박홍성 ; 이재수 ; 홍성수
저널명	제어&middot;자동화&middot;시스템공학 논문지 = Journal of control, automation and systems engineering
발행기관	제어로봇시스템학회
NDSL URL	<a href="http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/article/articleSearchResultDetail.do?cn=JAKO199611919668470">http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/article/articleSearchResultDetail.do?cn=JAKO199611919668470</a>
IP/ID	175.197.245.6
이용시간	2017/09/20 10:45:31

### 저작권 안내

- ① NDSL에서 제공하는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, KISTI는 복제/배포/전송권을 확보하고 있습니다.
- ② NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 상업적 및 기타 영리목적으로 복제/배포/전송할 경우 사전에 KISTI의 허락을 받아야 합니다.
- ③ NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 보도, 비평, 교육, 연구 등을 위하여 정당한 범위 안에서 공정한 관행에 합치되게 인용할 수 있습니다.
- ④ NDSL에서 제공하는 콘텐츠를 무단 복제, 전송, 배포 기타 저작권법에 위반되는 방법으로 이용할 경우 저작권법 제136조에 따라 5년 이하의 징역 또는 5천만 원 이하의 벌금에 처해질 수 있습니다.

# 페트리네트를 이용한 필드버스 시스템의 성능 해석

## Performance Analysis of Fieldbus Systems Using Petri Net

박 흥 성, 이 재 수, 홍 성 수  
(Hong Seong Park, Jae-Soo Lee and Seongssoo Hong)

**Abstract** : This paper presents a extended stochastic Petri net(ESPN) model for CTN(Circulated Token with No duration) service in the data link layer of IEC/ISA fieldbus. It is assumed that a station on the fieldbus has a specified minimum token holding time, a finite capacity buffer, and one transmitter queue with the highest priority. The mean transmission(or service) time at a station and the mean token rotation time for the symmetric fieldbus system are derived using the presented SPN model and the moment generating function. These performance measures are represented in terms of the minimum token holding time, the number of stations, the arrival rate of messages, and the mean length of messages. The presented performance measure are validated by computer simulations.

**Keywords** : IEC/ISA, fieldbus, mean token rotation time, mean transmission time, stochastic Petri net, moment generating function

### I. 서론

필드버스(Fieldbus)는 공정제어시스템과 자동화 시스템 내에서 가장 낮은 수준의 실시간 통신 네트워크이며 센서 및 구동기와 제어기들 사이의 정보를 교환하며, 기존의 복잡한 배선 시스템을 대체하기 위해 설계된 산업용 네트워크이다. 필드버스는 생산 공장, 발전소, 항공기 및 선박, CNC 제어기와 자동차 등에 적용되고 있으며 그 응용 범위도 점점 넓혀 가고 있다[1-5]. 자동화용 네트워크로 많이 알려진 MAP[6]은 실시간 성의 한계와 가격 때문에 센서/구동기 계층보다 높은 계층에 사용된다.

필드버스, 토큰 버스, 토큰 링과 같은 토큰 패싱 시스템에 대한 성능지표들의 연구는 많이 진행되어 왔지만[7-22], 일반적인 조건하에서 성능지표를 수식으로 유도한 연구는 거의 없다. 성능지표를 수식으로 유도한 연구도 있지만 이러한 연구는 제한된 조건하에서만 가능하였다[7-13]. 일반적인 조건하에서는 성능지표의 하한값과 상한값을 유도하거나[14-19] 모의실험과 근사적 알고리즘을 사용하여 성능지표를 유도하였다[20-22]. 더욱이 성능에 관련된 대부분의 연구는 무한 버퍼를 가정하고 있다[8-21].

평균 대기시간, 평균 토큰회전시간 등의 성능지표를 수식으로 표현한 대부분의 연구는 무한 크기의 버퍼를 가지고 전송 큐에 있는 모든 데이터들을 전송하는 exhaustive 방법[8,9], 토큰이 도착한 순간까지 큐에 남아 있는 데이터들을 전송하는 gated 방법[9], 제한된 수의 데이터들만을 전송하는 limited 방법[10-13]을 사용하였다. 타이머 제어 방법을 사용한 IEEE 802.4 토큰 버스 시스템의 연구는 무한 버퍼를 가지며 2개 이상의 우선순위를 가진 시스템으로 모델링하여 성능지표의 상한 값과 하한 값을 구한 연구가 대부분[14-18]이며 heavy load와 같은 특수한 경우에 대해서 평균 토큰회전시간을 유도한 연구[19]도 있다. 필드버스 시스템의 성능지표에 관한 연구는 모의실험을 사용한 연구[20,21]가 있으며, 이들은 필드버스 시스템을 페트리네트로 모델링하여 모의실험을 통하여 전송률과 접근시간의 성능지표 등을 비교하였다. 유한 버퍼를 가진 경우의 연구는 다음과 같다.

두개 이상의 우선순위를 가지며 유한 버퍼를 가진 토큰 패싱 시스템에 대하여 각 전송 큐에 대한 전송(서비스) 시간을 확률분포함수로 가정하여 평균 토큰회전시간과 평균 대기시간을 유도한 연구[7]와 IEEE 802.4 토큰 버스 시스템을 하나의 우선순위를 가지며 타이머 제어 방식을 사용하고 유한 버퍼를 가진 토큰 패싱 시스템으로 모델링하여 토큰회전시간과 평균 대기시간 등을 해석적 알고리즘을 사용하여 구한 연구[22]가 있다.

본 논문에서는 일반적인 조건하에서 IEC/ISA 필드버스 시스템 상의 한 스테이션을 확장형 확률 페트리네트(ESPN, Extended Stochastic Petri Net)[23,24]로 모델링하여 한 스테이션의 평균 전송(서비스) 시간을 수식으로 유도하고 이를 이용하여 symmetric 필드버스 시스템에서의 평균 토큰회전시간을 구한다. symmetric 필드버스 시스템은 필드버스 상의 모든 스테이션의 확률특성과 매개변수의 값이 같은 시스템을 말한다. 평균 토큰회전시간과 평균 전송시간은 데이터링크 계층과 관련되어 있기 때문에 본 논문의 IEC/ISA 필드버스 시스템은 데이터링크 계층까지 구현된 시스템만을 고려한다. 그러나, IEC/ISA 필드버스에서 사용될 수 있는 모든 토큰 서비스 방식(2장에서 설명됨)을 고려한 시스템의 해석에는 많은 어려움이 있으므로, 본 논문에서는 필드버스 상의 스테이션은 유한 버퍼를 가지며 IEC/ISA에서 제안하는 토큰 서비스 방식중 주기적 데이터 교환시 사용되는 CTN(Circulated Token with No duration)방식을 사용하여 데이터를 전송한다. CTN 방식은 타이머 제어 방식의 한 형태이다. 제시한 모델과 Guo[23]가 제안한 방법을 이용하여, 토큰보유시간, 스테이션의 수, 데이터 발생률과 평균 메시지 길이 등의 변수에 대한 함수로 한 스테이션에서의 평균 전송시간과 평균 토큰회전시간을 유도한다.

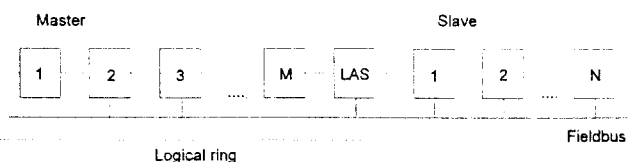


그림 1. IEC/ISA 필드버스 시스템의 토폴로지.  
Fig. 1. Topology of IEC/ISA fieldbus system..

접수일자 : 1995. 12. 20., 수정완료 : 1996. 8. 15.  
박흥성 : 강원대학교 제어계측공학과, 현 독일 Aachen 공대  
이재수 : 기인시스템  
홍성수 : 서울대학교 전기공학부

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 연구 대상으로 삼은 IEC/ISA 필드버스의 데이터링크 계층 동작이 설명되고 필드버스 모델링에 필요한 가정을 서술하며, 확률 페트리네트를 이용하여 한 스테이션에서의 필드버스 데이터링크 계층을 모델링한다. 또, 본 논문의 성능해석시 사용한 페트리네트 상에서의 모멘트 발생함수에 대해 간략히 설명한다. 3장에서는 평균 전송시간과 평균 토큰회전시간을 유도하는 방법을 제시하고 버퍼의 수가 1과 2인 경우에 대하여 이러한 성능지표의 값을 구하고 모의실험을 통하여 제시된 평균 전송시간과 평균 토큰회전시간이 타당함을 보여준다. 최종적으로 4장에서 결론을 맺겠다.

**II. IEC/ISA 필드버스 데이터링크 계층의 확률 페트리네트 모델과 모멘트 발생 함수 방법**

IEC/ISA 필드버스 데이터링크 계층(DLL)[1](이 후부터는 필드버스라 칭함)은 여러 개의 부계층으로 구성되어 있으며 상위 계층으로부터 전달된 데이터에 제어 비트들과 FCS(Frame Check Sequence)등을 붙여 프레임으로 만든 후 물리층으로 보내며 물리층으로 들어온 프레임을 제어 비트들과 FCS를 검사한 후 필요한 데이터만 상위 계층으로 보내주는 기능과 미디어에 대한 사용 권리, 즉 토큰을 관리하는 기능 등을 제공한다. 각 스테이션은 DLL에서 제공하는 기능에 따라 LM(Link Master) 혹은 브릿지, LAS(Link Active Scheduler), 슬레이브 역할을 한다. LM은 버스를 공유하여 데이터를 주고받으며 토큰을 받을 수 있는 스테이션을 말하며, 브릿지는 필드버스간의 데이터를 전달하기 위한 스테이션이며 LAS는 토큰을 관리하는 스테이션이다. 필드버스[1]는 MAP과는 달리 LAS가 존재하여 토큰을 관리하는 방식을 채택하고 있다. LAS는 LM(Link Master)라는 스테이션 중에서 선택된다. 슬레이브는 토큰을 받지 못하고 데이터만을 수신할 수 있는 스테이션을 말하며, 이의 전형적인 예가 모터와 같은 구동기이다. IEC/ISA 필드버스 시스템의 토폴로지가 그림 1에 있다.

필드버스의 토큰은 2종류의 토큰, 즉 위임토큰(Delegated Token, DeT)과 순환토큰(Circulated Token, CiT)이 있다. 위임토큰은 LAS에 의해 관리되며 그 사용을 요구한 LM에 토큰 사용 시간을 붙여 전달된다. 지정된 시간이 만료되면 DeR(delegated return) 프레임을 LAS로 보내어 위임토큰을 돌려준다. 이런 방법으로 LAS는 위임토큰을 다른 스테이션으로 전달하며, 이러한 구조는 정확한 시간에 LM이 데이터를 전송하게끔 해준다.

순환토큰은 LAS에 의해 순환이 시작되지만 LM에서 LM으로 토큰이 전달된다. 순환토큰에도 사용 방법에 따라 2종류의 토큰, 즉 순환 시간이 지정된 토큰(CTD)과 순환 시간이 지정 안된 토큰(CTN)이 있다. CTD는 토큰의 방문 일정이 존재하는 경우에 사용되며 CTN은 그렇지 않은 경우에 사용된다. CTN 방식이 IEEE 802.4 토큰 버스 방식과 비슷하다. 데이터 전송에 관계되는 시간은 CTD 방식에서는 토큰 프레임 내에 설정된 값으로 지정되며 CTN 방식에서는 최소 토큰보유시간과 TTRT(Target Token Rotation Time)의 값에 의해 결정된다. 토큰을 가진 LM은 토큰이 도착하면 CTD에서 정한 기간 혹은 최소 토큰유지시간과 TTRT중의 최대 시간을 토큰유지 타이머(Token Holding Timer)에 입력하여 그 타이머가 만료되거나 보낼 데이터가 없을 때까지 데이터들을 보낸다. 각 LM에 할당된 시간이 만료되거나 더 이상 보낼 데이터가 없는 경우에 다음의 LM으로 토큰이 전달된다. 특히, 다음 데이터를 보낼 경우 토큰유지 타이머에 남아 있는 시간이 그 데이터를 보낼 수

있다고 예측되는 시간보다 작을 경우는 LM은 현재 보내는 데이터만 보내고 토큰을 LAS에 보내고 DeT를 요구하여 DeT를 받으면 다음 데이터를 보낼 수 있다. 필드버스[1]는 3개의 우선순위 전송 큐를 가지고 있는 데 이들 모두를 토큰유지 타이머가 관리하고 있으나, IEEE 802.4에서는 각 전송 큐마다 타이머가 개별적으로 존재하고 있다.

본 연구에서는 CTN만을 고려한 symmetric 필드버스 시스템에 대하여 해석하겠다. symmetric 필드버스 시스템은 필드버스 상의 모든 스테이션의 확률특성이 모두 같은 시스템을 말한다. 본 논문의 데이터링크 계층의 가정은 다음과 같다. 전송 큐는 가장 높은 우선순위 전송 큐 하나만을 고려한다. LM이 전송 큐에서 다음 데이터를 보낼 경우 토큰유지 타이머에 남아 있는 시간이 그 데이터를 보낼 수 있다고 예측되는 시간보다 작을 경우에는 그 LM은 그 데이터를 보내지 않고 토큰을 다음 LM에 보낸다. 최소 유지 타이머 값이 TTRT 값보다 크게 하여 데이터가 존재하면 일정 시간 동안은 데이터를 항상 보낼 수 있도록 한다. 이러한 동작을 함에 있어 각 시간들에 대해 다음과 같이 가정한다. 데이터의 전송 속도는 S bps이며 데이터(혹은 메시지) 길이는 평균이  $1/\alpha$  바이트인 지수분포를 갖는다고 하면 데이터 전송시간은 평균이  $8/(\alpha S)$  비트인 지수분포를 갖는다. 따라서 기호를 단순화 하기 위해  $8/(\alpha S)$ 를  $1/\mu$ 로 하여 해석한다. 그리고, 데이터 발생율은 발생률  $\lambda$ 의 포아송분포를 가지며, 스테이션은 k개의 데이터를 저장할 수 있는 전송 큐를 가지며 선입선출 방식으로 전송 큐를 관리한다.

표 1. 데이터링크 계층 페트리네트 모델에서의 places와 트랜지션.

Table 1. Places and transitions in Petri Net model for data link layer.

P <sub>1</sub>	현재의 스테이션이 토큰을 가짐
P <sub>2</sub>	서비스 수행중
P <sub>3</sub>	서비스 종료 조건 검사
P <sub>4</sub>	서비스 종료
P <sub>5</sub>	서비스 요구를 저장(k개의 저장량을 가짐)
P <sub>6</sub>	서비스 요구 발생 가능 상태
P <sub>7</sub>	토큰을 다음 스테이션으로 넘김
T <sub>1</sub>	현 스테이션에 토큰이 도달 서비스 수행 시작
T <sub>2</sub>	서비스 요구 발생 (발생률의 $\lambda$ 의 포아송 분포)
T <sub>3</sub>	서비스 수행 (평균 수행 시간은 $1/\mu$ 의 지수분포)
T <sub>4</sub>	서비스 요구가 없을 경우 서비스 종료
T <sub>5</sub>	토큰 사용 가능 시간 동안 지연
T <sub>6</sub>	서비스 종료
T <sub>7</sub>	토큰이 다시 들어올 때까지 지연

필드버스에 있어서 CTN 토큰의 동작에 관하여 정리하면 다음과 같다. 토큰이 스테이션에 도착할 경우, 도착한 토큰의 사용 가능 여부를 판별한다. 먼저 버퍼에 저장된 데이터가 있고, 토큰사용가능시간이 유효한 경우 전송을 수행한다. 그렇지 않은 경우는 토큰을 다음 스테이션으로 넘긴다. 토큰사용가능시간의 유효 여부에 대한 판별은 저장된 데이터의 전송시간과 할당된 토큰사용가능시간의 비교에 의한다. 데이터를 하나 처리한 후에는 앞서와 같이 다시 토큰사용가능시간과 비교한다. 저장되어 있는 데이터가 모두 처리되기

나, 토큰사용가능시간이 만료되었을 경우에는 토큰을 다음 스테이션으로 전달한다. 이에 대한 확장형 확률 페트리넷 모델이 그림 2에 있으며 표 1에 각 플레이스와 트랜지션에 대한 설명이 있다. 그림 2에서 화살표 대신에 작은 원이 있는 Arc는 Inhibitor Arc로 플레이스에 토큰의 존재 유무를 판단하며, 숫자가 있는 arc는 countable arc이다[23,24]. 플레이스 P<sub>5</sub>는 전송 큐를 나타내며 P<sub>5</sub>의 마킹 수가 k개 존재하면, 즉 전송 큐에 데이터가 k개 존재하여 더 이상 데이터를 받을 수 없다면 트랜지션 T<sub>2</sub>를 점화불능(disable)이 되게 한다. 이를 위하여 countable inhibitor arc를 사용한다. 트랜지션 T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>5</sub>는 데이터의 도착, 데이터의 전송시간과 토큰유지시간을 표시한다.

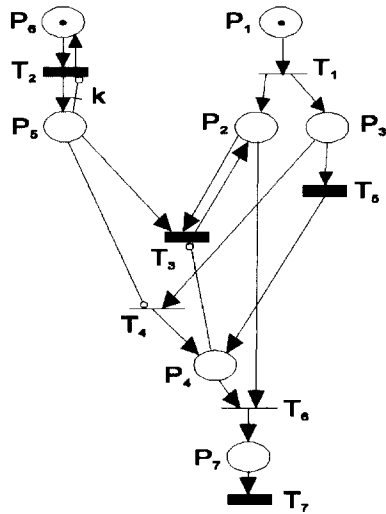


그림 2. 데이터링크 계층의 페트리넷 모델.  
Fig. 2. Petri-net model of data link layer.

페트리넷 모델 상의 성능지표를 유도하기 위하여 Guo 등[23]이 제안한 모멘트 발생함수 이용 방법을 사용한다. 확률변수 X의 모멘트 발생함수는 다음과 같다.

$$M_X(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{st} f_X(x) dx = E(e^{sx}) \quad (1)$$

여기서, f<sub>X</sub>(x)는 확률변수 X의 확률밀도함수이다. 또, M<sub>X</sub>(0) = 1이 성립한다. n번째 모멘트는 모멘트 발생함수의 n번째 편미분에 의해

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

로써 구할 수 있다. 확률 P(t<sub>k</sub>)를 트랜지션 t<sub>k</sub>가 점화할 확률로, 확률변수 τ<sub>k</sub>를 트랜지션 t<sub>k</sub>의 점화가능 시간부터 점화할 때까지의 시간으로, M<sub>τ<sub>k</sub></sub>(s)는 확률변수 τ<sub>k</sub>의 모멘트 발생함수라 하면, 모멘트 발생함수 이용 방법에서는 전달함수 W<sub>k</sub>(s)는 P(t<sub>k</sub>)와 M<sub>τ<sub>k</sub></sub>(s)의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$W_k(s) = P(t_k) M_{\tau_k}(s) \quad (3)$$

이 방법에서 성능지표는 다음과 같은 순서에 의하여 구할 수 있다.

- 1) 대상 시스템을 확장형 확률페트리넷으로 모델링하여 ESPN의 도달가능 그래프를 만든다.
- 2) 얻어진 도달가능그래프를 상태기(state machine)로 변환하고 이 상태기로부터 트랜지션의 전달함수를 유도한다. 어떤 한 상태에 마킹이 있어 여러 개의 트랜지션들, {t<sub>m1</sub>, t<sub>m2</sub>, ..., t<sub>nm</sub>, m > 1}을 점화가능(enable)하게 만들면 트랜지션 t<sub>nk</sub>(k=1,...,k)의 전달함수 W<sub>nk</sub>는

$$W_{nk}(s) = P(t_{nk}) M_{\tau_{nk}}(s) \quad (4)$$

가 된다. 여기서 P(t<sub>nk</sub>) = P(X<sub>nk</sub> ≤ X<sub>nj</sub>, j ≠ k)이며 M<sub>τ<sub>nk</sub></sub>(s)는 확률변수 Min(X<sub>ni</sub>, i=1,...,k)의 모멘트 발생함수이다.

3) 성능지표에 대한 전달함수 W<sub>E</sub>(s)를 단계 2에서 구한 트랜지션의 전달함수를 통하여 유도한다.

4) 성능지표의 평균값을 단계 3)에서 구한 전달함수를 통하여 얻는다. 평균은 (2)에 있어서 n=1인 경우에 해당한다. 예로써, 플레이스 S<sub>i</sub>에서 플레이스 S<sub>j</sub>로 가는 전달함수를 W<sub>E</sub>(s)라 하면 W<sub>E</sub>(s) = P<sub>E</sub> M<sub>E</sub>(s) 로 표시되며, 플레이스 S<sub>i</sub>에서 플레이스 S<sub>j</sub>까지 가는 평균 경과 시간(mean passage time) PT는

$$PT = \frac{d}{ds} M_E(s)|_{s=0} = \frac{d}{ds} \frac{W_E(s)}{P_E} |_{s=0} \quad (5)$$

로 표시된다. 여기서 P<sub>E</sub> = W<sub>E</sub>(s)|<sub>s=0</sub> 이다.

사용하는 확률 변수들의 분포가 지수 분포와 deterministic 분포가 결합되어 있는 ESPN은 semi-Markov chain 방법으로 평균 전송시간 혹은 mean first passage time을 해석할 수 있다. 반면에 모멘트 발생함수 방법은 그 외의 확률 분포에도 적용 가능하다. 특히, concurrent 트랜지션들이 지수분포를 가지는 경우에는 모멘트 발생함수 방법을 이용하여 정확한 결과를 쉽게 얻고[23], 성능지표를 수식으로 표현할 수 있다. concurrent 트랜지션이 지수분포가 아닌 경우에는 정확한 결과를 보장할 수는 없지만 성능지표를 구할 수 있다. 그러나, semi-Markov chain 방법을 사용하여 mean first passage time을 구하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라[23,25], 사용할 수 있는 분포에서도 제한된다.

다음 장에서는 구해진 확률페트리넷 모델과 모멘트 발생함수 방법을 사용하여 평균 전송시간과 평균 토큰회전시간을 유도하고 이를 모의실험을 통하여 검증할 것이다.

### III. 평균 토큰회전시간과 평균 전송시간

그림 2의 확장형 확률페트리넷으로부터 그림 3의 도달가능그래프를 만들 수 있으며, 그림 3으로부터 그림 4의 상태기가 유도된다.

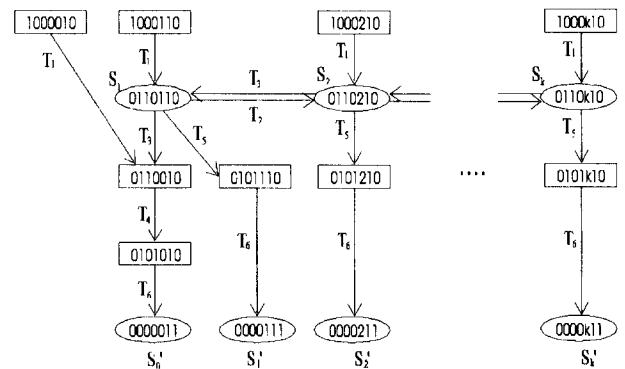
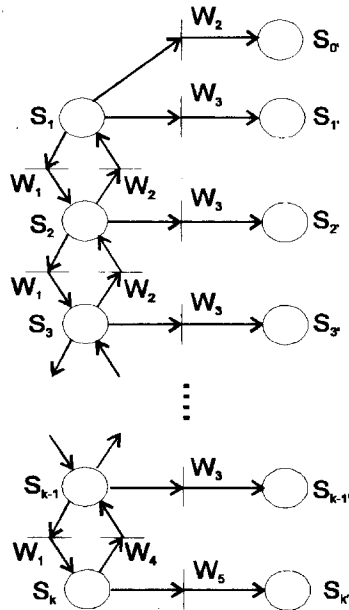


그림 3. 데이터링크 계층의 도달가능그래프.  
Fig. 3. Reachability graph of data link layer.

그림 2에서 플레이스 P<sub>5</sub>는 버퍼 상태를 나타내며 P<sub>5</sub>의 마킹의 수가 k 개이면 더 이상 마킹을 받을 수가 없는 상태이므로 트랜지션 T<sub>2</sub>를 점화불능(disable)이 되게 한다. 이로써 버퍼에 k개의 데이터가 이미 존재하는 경우 데이터가 스테이션에 새로 도착하면 그 데이터는 기다리는 상태가 된다. 트랜지션 T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>5</sub>는 데이터의 도착, 데이터의 처리(혹은 전송) 시간과 토큰보유시간을 표시한다. 그림 3에서 사각형의 상태들은 시간지연이 없는(vanishing) 상태이고,

타원형의 상태들은 시간지연을 가지는(tangible) 상태이다. 그림 3의 도달가능그래프에서 시간지연이 없는 상태를 제거하고, 시간지연이 있는 부분만 취하여 상태기를 얻으면 그림 4와 같다.



- \$S\_i\$ : 토큰이 도착시 남아 있는 메시지가 \$i\$개 있는 상태.
- \$S\_j\$ : 토큰이 출발시 남아 있는 메시지가 \$j\$개 있는 상태.
- \$W\_1\$ : 상태 \$S\_i\$에서 트랜지션 \$T\_2\$에 대한 전달함수.
- \$W\_2\$ : 상태 \$S\_i\$에서 트랜지션 \$T\_3\$에 대한 전달함수.
- \$W\_3\$ : 상태 \$S\_i\$에서 트랜지션 \$T\_5\$에 대한 전달함수.
- \$W\_4\$ : 상태 \$S\_k\$에서 트랜지션 \$T\_3\$에 대한 전달함수.
- \$W\_5\$ : 상태 \$S\_k\$에서 트랜지션 \$T\_5\$에 대한 전달함수.

그림 4. 데이터링크 계층의 상태기.  
Fig. 4. State machine of data link layer.

그림 4를 사용하여 한 스테이션에서의 평균 전송시간과 평균 토큰회전시간을 구하는 알고리즘은 다음과 같다.

1. 토큰이 들어왔을 때의 도착 확률벡터 \$P\_A\$를 구한다.
2. 상태 \$S\_i\$에서 발생 가능한 각각의 트랜지션에 대한 전달함수 \$W\_{ij}(s)\$를 구한다. 여기서 \$W\_{ij}(s)\$는 토큰 도착시 전송 큐에 \$i\$개의 데이터가 있고 토큰 출발시 \$j\$개 데이터가 있을 경우의 전달함수이다.
3. 단계 2에서 구한 전달함수들을 이용하여, 상태 \$S\_i\$에서의 전달함수 \$W\_{Ei}(s)\$를 구한다. 여기서

$$W_{Ei}(s) = \sum_{\text{all } j} W_{ij}(s)$$

이다.

4. 전달함수 \$W\_{Ei}(s)\$에서 모멘트 발생함수 \$M\_{Ei}(s)\$를 구한다.

$$M_{Ei}(s) = \frac{W_{Ei}(s)}{W_{Ei}(0)}, \text{ 단, } M_{E0}(0) = 1$$

5. 모멘트 발생함수 \$M\_{Ei}(s)\$와 토큰 도착시 확률 \$P\_A\$를 곱하여, 한 스테이션의 전달함수 \$W\_{LM}(s)\$를 구한다.
6. 한 스테이션의 전달함수 \$W\_{LM}(s)\$를 이용하여, 한 스테이션에서의 모멘트 발생함수 \$M\_{LM}(s)\$를 구한다.
7. 모멘트 발생함수 \$M\_{LM}(s)\$를 이용하여, 평균 전송시간 \$T\_S\$와 평균 토큰회전시간 \$T\_R\$을 구한다.

먼저 도착 확률벡터 \$P\_A\$를 구하는 방법을 살펴보자. 토큰의 도착시 전송 큐에 데이터가 \$n\$개 있을 확률을 \$p\_{n0}\$로 토큰의 출발시 전송 큐에 데이터가 \$m\$개 있을 확률을 \$p\_{m1}\$라

하자. 토큰 도착시 전송 큐에 \$i\$개의 데이터가 있고 토큰 출발시 \$j\$개 데이터가 있을 경우의 확률을 \$p\_{ij}\$라 하고, 시간 \$t\$ 동안 도착한 데이터의 수를 \$x(t)\$라 하자. 도착 확률벡터 \$P\_A\$와 출발 확률벡터 \$P\_D\$는 다음과 같이 정의한다.

$$P_A = [p_{a0} \ p_{a1} \ \dots \ p_{ak}]^T \quad (6)$$

$$P_D = [p_{d0} \ p_{d1} \ \dots \ p_{dk}]^T \quad (7)$$

토큰 출발시 전송 큐에 \$n\$의 데이터가 있고 토큰 도착시 \$m\$개의 데이터가 남아 있을 경우의 확률을 \$P\_{DM}^{DA}\$라 한다. 확률벡터 \$P\_A\$와 \$P\_D\$의 관계는 (8)과 (9)식과 같다.

$$P_A = P_{DA} P_D \quad (8)$$

$$P_D = P_{AD} P_A \quad (9)$$

여기서 \$P\_{DA}\$와 \$P\_{AD}\$는 다음과 같으며, \$T\$는 토큰이 출발하여 다시 도착할 때까지 소요된 평균 시간을 말한다.

$$P_{DA} = \begin{bmatrix} px_0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ px_1 & px_0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ px_{K-1} & px_{K-2} & \dots & px_0 & 0 \\ pt_K & pt_{K-1} & \dots & pt_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$= [p_{im}^{DA}] \quad (1, m = 1, 2, \dots, K+1)$$

$$P_{AD} = \begin{bmatrix} 1 & p_{10} & \dots & p_{K-1,0} & p_{K0} \\ 0 & p_{11} & \dots & p_{K-1,1} & p_{K1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & p_{1,K-1} & \dots & p_{K-1,K-1} & p_{K,K-1} \\ 0 & p_{1,K} & \dots & p_{K-1,K} & p_{K,K} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$= [p_{im}^{AD}] \quad (1, m = 1, 2, \dots, K+1)$$

여기서

$$px_k = p(x(T) = k),$$

$$pt_k = p(x(T) \geq k)$$

이다. 특히, 토큰이 출발하여 다시 도착할 때까지 소요된 평균 시간 \$t\$가 비율 \$\lambda\$를 가진 지수분포인 경우, 확률 \$p(x(t)=n)\$은

$$p(x(t) = n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (12)$$

로써 구할 수 있다. 토큰 도착시 전송 큐에 \$i\$개의 데이터가 있고 토큰 출발시 \$j\$개 데이터가 있을 경우의 전달함수 \$W\_{ij}(s)\$는 (3)을 이용하여 (13)과 같이 표시할 수 있다.

$$W_{ij}(s) = p_{ij} M_{r_i}(s) \quad (13)$$

따라서, 확률 \$p\_{ij}\$는 (13)을 이용하여

$$p_{ij} = W_{ij}(0) \quad (\text{단, } W_{00}(0) = 1, W_{0i}(0) = 0) \quad (14)$$

로써 나타낼 수 있다. \$P\_A\$를 구하기 위하여 (8)-(11)을 사용한다. 특히, \$(P\_{DA} \cdot P\_{AD} - I)\$의 마지막 열은 종속 열이므로, nonsingular matrix를 만들기 위해 \$(P\_{DA} \cdot P\_{AD} - I)\$의 마지막 열을

$$p_{a0} + p_{a1} + \dots + p_{ak} = 1 \quad (15)$$

을 이용하여 대체한다. 행렬 \$B\$를 \$K \times 1\$ 행렬인 \$[0 \ 0 \ \dots \ 1]^T\$이라 하면

$$P_A = P^{-1} \cdot B \quad (16)$$

이다. 여기서 \$P\$는

$$P = \begin{bmatrix} \sum_{r=0}^K p_{0r}^{DA} p_{r0}^{AD} & \sum_{r=0}^K p_{0r}^{DA} p_{r1}^{AD} & \dots & \sum_{r=0}^K p_{0r}^{DA} p_{rK}^{AD} \\ \sum_{r=0}^K p_{1r}^{DA} p_{r0}^{AD} & \sum_{r=0}^K p_{1r}^{DA} p_{r1}^{AD} & \dots & \sum_{r=0}^K p_{1r}^{DA} p_{rK}^{AD} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{r=0}^K p_{K-1,r}^{DA} p_{r0}^{AD} & \sum_{r=0}^K p_{K-1,r}^{DA} p_{r1}^{AD} & \dots & \sum_{r=0}^K p_{K-1,r}^{DA} p_{rK}^{AD} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

상태  $S_i$ 에서 상태  $S_j$ 로의 전달함수  $W_{ij}(s)$ 를 구하자. 그림 4에서 시간지연을 가지는 트랜지션들에는  $T_2, T_3, T_5$ 가 있다. 각 트랜지션들의 확률밀도함수들은 다음과 같다.

- 트랜지션  $T_2$  점화 시의 확률밀도함수 :  $\lambda \cdot e^{-\lambda t}$
- 트랜지션  $T_3$  점화 시의 확률밀도함수 :  $\mu \cdot e^{-\mu t}$
- 트랜지션  $T_5$  점화 시의 확률밀도함수 :  $\delta(t - T_H)$

그림 5에서 각 상태별로 변환이 가능한 상태들에 대한 확률밀도함수들에 의해 그 최소치를 구하고, 모멘트 발생함수  $M_i(s)$ 를 구한다. 구한 모멘트 발생함수에 상태  $S_i$ 에서 상태  $S_j$ 로의 트랜지션 점화 확률  $p_{ij}$ 를 곱하면, 그것이 상태  $S_i$ 에서 상태  $S_j$ 로의 전달함수  $W_{ij}(s)$ 가 된다.

이렇게 구한  $W_{ij}(s)$ 들로부터 상태  $S_i$ 에서의 전달함수  $W_{Ei}(s)$ 와  $M_{Ei}(s)$ 를 다음과 같이 구한다.

$$M_{Ei}(s) = \frac{W_{Ei}(s)}{W_{Ei}(0)} = \frac{\sum_{\text{all } j} W_{ij}(s)}{\sum_{\text{all } j} W_{ij}(0)} \quad (18)$$

또,  $M_{E0}(s) = 1$ 이다.

토큰의 도착시 전송 큐에  $i$ 개의 데이터가 남아 있을 경우의 평균 전송시간을  $T_i$ 라 하면 이 시간은 (18)과 1차 모멘트 함수를 사용하여

$$T_i = \frac{d}{ds} M_{Ei}(s) \Big|_{s=0} \quad (19)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 평균 전송시간 벡터  $T_{TX}$ 를

$$T_{TX} = [T_0 \ T_1 \ \dots \ T_K]^T \quad (20)$$

로써 정의하자. 따라서, 토큰이 출발하여 다시 도착할 때까지 소요된 평균 시간  $T$ 에 대한 스테이션의 평균 전송시간  $T_s$ 는

$$T_s = \sum_{i=1}^K p_{ai} T_i = P_A^T T_{TX} = (P^{-1} B)^T T_{TX} \quad (21)$$

로 표시된다. 이와 같이한 스테이션에서의 평균 전송시간을 구하였으면 평균 토큰회전시간  $T_R$ 를 구하는 것이 남아 있다. 토큰의 전송 오버헤드(overhead)의 평균 시간을  $T_0$ 라 하고 필드버스 시스템에 연결된 스테이션의 수가  $N$ 이라 하자. 모든 스테이션의 특성이 같은 symmetric 필드버스 시스템인 경우의 평균 토큰회전시간  $T_R$ 은

$$T_R = N(T_s + T_0) \quad (22)$$

라 나타낼 수 있다. 버퍼 용량이 1과 2, 즉  $k=1$ 인 경우와  $k=2$ 인 경우에 대하여 본 논문에서 제시된 방법을 사용하여 평균 전송시간과 평균 토큰회전시간을 구하고 이를 모의실험을 통하여 검증한다. 최소 토큰보유시간(THT)을  $T_H$ 로, 토큰을 넘긴 후 토큰을 다시 받을 때까지의 평균 시간을  $T$ 라 하면 본 논문에서는  $T = T_R - T_s$ 가 된다.

1. 버퍼 용량이 1인 경우

$k=1$ 인 경우를 생각하면, 그의 도달가능그래프와 그의 상태기가 그림 5와 그림 6에 나타나 있다.

그림 5에서 얻은 도달가능그래프에서 시간지연이 없는 상태들을 제거한 상태기는 다음 그림 6과 같다.

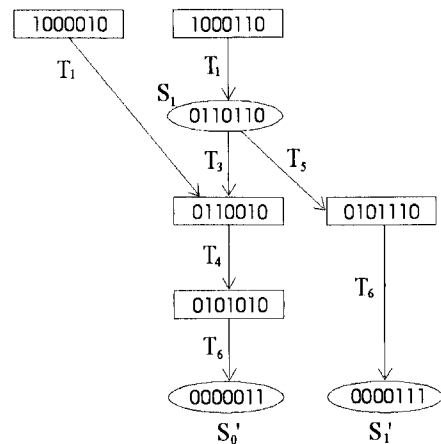


그림 5.  $k=1$ 인 경우의 도달가능그래프.  
Fig. 5. Reachability graph of data link layer for  $k=1$ .

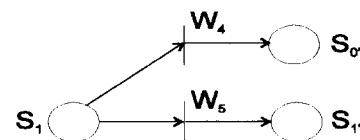


그림 6.  $k=1$ 인 경우의 상태도.  
Fig. 6. State machine of data link layer for  $k=1$ .

그림 6의 각 기호는 그림 4의 기호의 의미와 같다. 그림 6의 상태기에서 보면  $S_1$ 에서 점화가능한 트랜지션은  $T_3$ 와  $T_5$ 가 있다. 트랜지션  $T_3$ 가 점화할 경우와 트랜지션  $T_5$ 가 점화할 경우의 확률밀도함수는 각각 그림 4에서 구한 트랜지션  $T_3$ 와  $T_5$ 에 대한 확률밀도함수와 같으며, 각 확률변수를  $X_{T3}$ 와  $X_{T5}$ 라 하면, 이러한 확률변수들의 최소값으로 이루어진 확률변수  $W$ , 즉  $W = \min(X_{T3}, X_{T5})$ 의 확률밀도함수는

$$f_w(t) = \mu e^{-\mu t} \{1 - U(t - T_H)\} + \delta(t - T_H) e^{-\mu t} \quad (23)$$

가 된다. (23)을 모멘트 발생함수  $M_1(s)$ 로 변환시키면

$$M_1(s) = \int_0^{T_H} e^{st} \cdot f_w(t) dt = \frac{\mu}{\mu - s} - \frac{s}{\mu - s} \cdot e^{(s - \mu)T_H} \quad (24)$$

가 된다.  $W_{10}(s)$ 와  $W_{11}(s)$ 를 구하기 위해 (24)를 그림 6의 상태기에 적용시키면, 다음과 같이 각 트랜지션별 전달함수들을 구할 수 있다.

$$W_{10}(s) = (1 - e^{-\mu T_H}) \left\{ \frac{\mu}{\mu - s} - \frac{s}{\mu - s} e^{(s - \mu)T_H} \right\} \quad (25)$$

$$W_{11}(s) = e^{-\mu T_H} \left\{ \frac{\mu}{\mu - s} - \frac{s}{\mu - s} e^{(s - \mu)T_H} \right\} \quad (26)$$

그림 6으로부터 확률벡터  $P_{DA}$ 와  $P_{AD}$ 는

$$P_{DA} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda T} & 0 \\ 1 - e^{-\lambda T} & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$P_{AD} = \begin{bmatrix} 1 & 1 - e^{-\mu T} \\ 0 & e^{-\mu T} \end{bmatrix} \quad (28)$$

와 같으며, 이 식과 (16)으로부터  $P_A = [p_{a0} \ p_{a1}]$ 는

$$p_{a0} = \frac{(1 - e^{-\mu T_H}) \cdot e^{-\lambda(T_R - T_s)}}{1 - e^{-\mu T_H} \cdot e^{-\lambda(T_R - T_s)}} \quad (29)$$

$$P_{al} = \frac{1 - e^{-\lambda(T_R - T_S)}}{1 - e^{-\mu T_H} \cdot e^{-\lambda(T_R - T_S)}} \quad (30)$$

이다. 상태  $S_i$ 에서의 전체 전달함수와 모멘트 발생함수를 각각  $W_{Ei}(s)$ ,  $M_{Ei}(s)$ 라 하면,  $W_{Ei}(s)$ 와  $M_{Ei}(s)$ 는

$$W_{Ei}(s) = W_{I0}(s) + W_{II}(s) \quad (31)$$

$$M_{Ei}(s) = \frac{W_{Ei}(s)}{W_{Ei}(0)} = \frac{\mu}{\mu - s} - \frac{s}{\mu - s} e^{(s-\mu)T_H} \quad (32)$$

가 된다. (21)과 (29)-(32)를 사용하여 평균 전송시간  $T_S$ 와 평균 토크회전시간  $T_R$ 을 구하면,

$$T_S = \frac{1 - e^{-\lambda(T_R - T_S)}}{1 - e^{-\mu T_H} e^{-\lambda(T_R - T_S)}} \frac{1}{\mu} (1 - e^{-\mu T_H}) \quad (33)$$

$$T_R = N \cdot (T_S + T_0) \quad (34)$$

가 된다.

그림 7 - 그림 10에  $k=1$ 인 경우에 대하여 (33)과 (34)에 의해 유도된 값과 모의실험 결과를 표시하였다. 각 그림에서 TR,S는 모의실험으로 얻은 평균 토크회전시간이며, TR,A는 해석결과로 얻은 평균 토크회전시간을 의미한다. 모의실험과 해석시 사용한 매개변수들은 다음과 같다. 스테이션의 개수는 4개로, 오버헤드 시간  $T_0$ 는  $10 \mu\text{sec}$ 로, 전송 속도는  $1 \text{ Mbps}$ 로 하였다. 전송(서비스) 발생률은 초당 데이터 발생 개수이며, 평균 메시지 혹은 데이터 처리 시간과 최소 토크보유시간 (THT)은 모두  $\mu\text{sec}$ 단위이다. 모의실험은 [1]에서 기술된 IEC/ISA 필드버스 데이터링크 동작중 CTN 방식을 C 언어로 구현하여 수행하였다. 모의실험에서는 스테이션 수를 4로하고 각 스테이션당  $100,000$ 개의 메시지를 생성하였고, 이러한 모의실험을 10회 이상 수행하여 그 결과를 산술평균하였다. 이 때 각 스테이션의 초기 상태는 네트워크에서의 초기상태와 같이 어떠한 메시지도 전송 큐에 존재하지 않는 상태이다. 이 방법은 버퍼 용량이 2인 경우에도 같이 적용된다. 그림 7과 그림 8은 최소 토크보유시간들을 변화시켰을 경우를 나타낸 것이며, 그림 8 - 그림 10은 평균 데이터(메시지) 처리 시간을 변화한 경우를 표시하였다. 그림 7 - 그림 10은 본 논문의 해석적 결과가 타당함을 보여주고 있다. 가장 많은 오차가 발생했을 경우 그 차는 약 6.3% 정도이다. 모의실험 결과 초당 발생하는 메시지의 개수가 200개인 경우, 즉  $5\text{ms}$ 당 1개의 메시지가 입력되는 경우에 최대 오차가 생겼다.

Station(4), THT=1000.  $1/\mu=500 \text{ usec}$

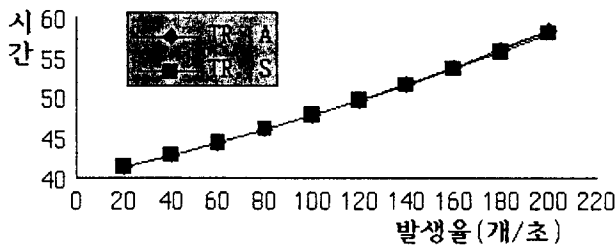


그림 7. 평균 토크회전시간 (평균 데이터 전송시간 =  $500 \mu\text{sec}$ , 토크 사용가능시간 =  $1000 \mu\text{sec}$ ).

Fig. 7. Mean token rotation time (mean data transmission time =  $500 \mu\text{sec}$ , minimum token holding time =  $1000 \mu\text{sec}$ ).

2. 버퍼 용량이 2인 경우

$k=2$ 인 경우를 생각하면, 그의 도달가능그래프와 그의 상태가 그림 11과 그림 12에 나타나 있다.

Station(4), THT=2000.  $1/\mu=500 \text{ usec}$

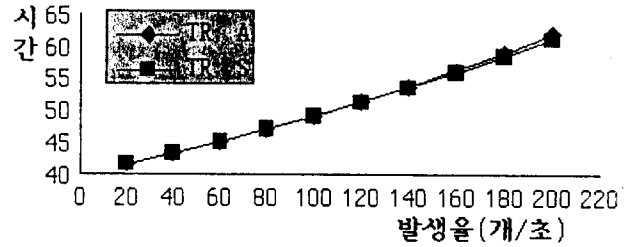


그림 8. 평균 토크회전시간 (평균 데이터 전송시간 =  $500 \mu\text{sec}$ , 토크 사용가능시간 =  $2000 \mu\text{sec}$ ).

Fig. 8. Mean token rotation time (mean data transmission time =  $500 \mu\text{sec}$ , minimum token holding time =  $2000 \mu\text{sec}$ ).

Station(4), THT=2000.  $1/\mu=700 \text{ usec}$

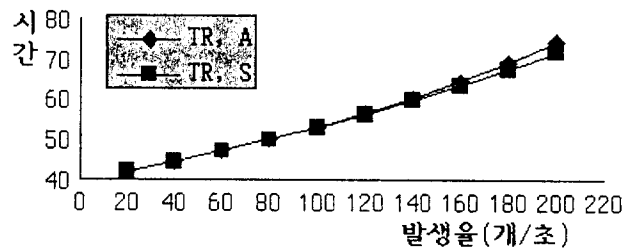


그림 9. 평균 토크회전시간 (평균 데이터 전송시간 =  $700 \mu\text{sec}$ , 토크 사용가능시간 =  $2000 \mu\text{sec}$ ).

Fig. 9. Mean token rotation time (mean data transmission time =  $700 \mu\text{sec}$ , minimum token holding time =  $2000 \mu\text{sec}$ ).

Station(4), THT=2000.  $1/\mu=900 \text{ usec}$

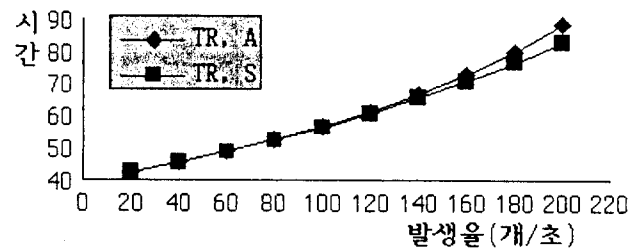


그림 10. 평균 토크회전시간 (평균 데이터 전송시간 =  $900 \mu\text{sec}$ , 토크 사용가능시간 =  $2000 \mu\text{sec}$ ).

Fig. 10. Mean token rotation time (mean data transmission time =  $900 \mu\text{sec}$ , minimum token holding time =  $2000 \mu\text{sec}$ ).

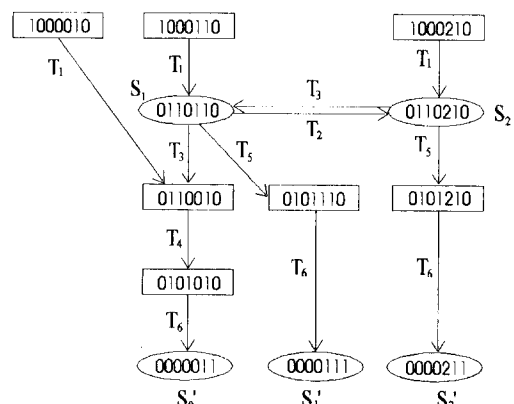


그림 11.  $k=2$ 인 경우의 도달가능그래프.

Fig. 11. Reachability graph of data link layer for  $k=2$ .

그림 11에서 얻은 도달가능그래프에서 시간지연이 없는 상태들을 제거한 상태기는 다음 그림 12와 같다.

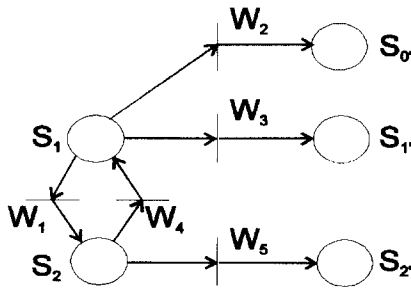


그림 12. k=2인 경우의 상태기.  
Fig. 12. State machine of data link layer for k=2.

그림 12의 각 기호는 그림 4의 기호 의미와 같다. 그림 12의 상태기에서 보면 S<sub>2</sub>에서 점화가능한 트랜지션은 T<sub>3</sub>와 T<sub>5</sub>가 있다. 트랜지션 T<sub>3</sub>가 점화할 경우와 트랜지션 T<sub>5</sub>가 점화할 경우의 확률밀도함수는 각각 그림 4의 트랜지션 T<sub>3</sub>와 T<sub>5</sub>의 확률밀도함수와 같으며, 각 확률변수를 X<sub>T3</sub>와 X<sub>T5</sub>라 하면, 이러한 확률변수들의 최소값으로 이루어진 확률변수 W, 즉  $W = \min(X_{T3}, X_{T5})$ 의 확률밀도함수와 모멘트 발생함수 M<sub>2</sub>(s)는 (23)과 (24)의 값과 같다. 또, 상태 S<sub>1</sub>에서 점 가능한 트랜지션은 T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>와 T<sub>5</sub>가 있다. 트랜지션 T<sub>2</sub>가 점화할 경우와 트랜지션 T<sub>3</sub>가 점화할 경우와 트랜지션 T<sub>5</sub>가 점화할 경우의 확률밀도함수는 각각 그림 4의 트랜지션 T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>와 T<sub>5</sub>의 확률밀도함수와 같으며, 각 확률변수를 X<sub>T2</sub>, X<sub>T3</sub>와 X<sub>T5</sub>라 하면, 이러한 확률변수들의 최소값으로 이루어진 확률변수 V, 즉  $V = \min(X_{T2}, X_{T3}, X_{T5})$ 의 확률밀도함수는

$$f_v(t) = (\mu + \lambda)e^{-(\mu + \lambda)t} \{1 - U(t - T_H)\} + \delta(t - T_H)e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (35)$$

이며, 이를 이용하여 모멘트 발생함수 M<sub>1</sub>(s)로 변환시키면

$$M_1(s) = \frac{\mu + \lambda}{\mu + \lambda - s} - \frac{s}{\mu + \lambda - s} e^{-(\mu + \lambda)T_H} e^{-sT_H} \quad (36)$$

가 된다. W<sub>ij</sub>(s) (i=1,2; j=0,1,2)를 구하기 위해 M<sub>1</sub>(s)와 M<sub>2</sub>(s)를 그림 12의 상태기에 적용시키면, 다음과 같이 각 트랜지션별 전달함수들을 구할 수 있다.

$$W_{10}(s) = \frac{\mu(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H})M_1(s)}{\mu + \lambda - \lambda(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H})(1 - e^{-\mu T_H})} \quad (37)$$

$$W_{11}(s) = \frac{(\mu + \lambda)e^{-(\mu + \lambda)T_H}M_1(s)}{\mu + \lambda - \lambda(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H})(1 - e^{-\mu T_H})} \quad (38)$$

$$W_{12}(s) = \frac{\lambda(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H})e^{-\mu T_H}M_1(s)}{\mu + \lambda - \lambda(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H})(1 - e^{-\mu T_H})} \quad (39)$$

$$W_{20}(s) = \frac{\mu(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H}) \cdot (1 - e^{-\mu T_H})M_2(s)}{\mu + \lambda - \lambda(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H})(1 - e^{-\mu T_H})} \quad (40)$$

$$W_{21}(s) = \frac{(\mu + \lambda) \cdot e^{-(\mu + \lambda)T_H}(1 - e^{-\mu T_H})M_2(s)}{\mu + \lambda - \lambda(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H})(1 - e^{-\mu T_H})} \quad (41)$$

$$W_{22}(s) = \frac{(\mu + \lambda)e^{-\mu T_H}M_2(s)}{\mu + \lambda - \lambda(1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H})(1 - e^{-\mu T_H})} \quad (42)$$

그림 12로부터 확률벡터 P<sub>DA</sub>와 P<sub>AD</sub>는

$$P_{DA} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda T} & 0 & 0 \\ \lambda \cdot T \cdot e^{-\lambda T} & e^{-\lambda T} & 0 \\ 1 - (e^{-\lambda T} + \lambda T e^{-\lambda T}) & 1 - e^{-\lambda T} & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$P_{AD} = \frac{1}{D_{K2}} \begin{bmatrix} 1 & \mu \cdot c & \mu \cdot c \cdot d \\ 0 & (\mu + \lambda) \cdot a & (\mu + \lambda) \cdot a \cdot d \\ 0 & \lambda \cdot c \cdot b & (\mu + \lambda) \cdot b \end{bmatrix} \quad (44)$$

여기서

$$\begin{aligned} D_{K2} &= \mu + \lambda - \lambda \cdot c \cdot d, \\ a &= e^{-(\mu + \lambda)T_H}, \\ b &= e^{-\mu T_H}, \\ c &= (1 - e^{-(\mu + \lambda)T_H}), \\ d &= (1 - e^{-\mu T_H}) \end{aligned}$$

와 같으며, 이 식과 (16)으로부터 P<sub>A</sub> = [ p<sub>a0</sub> p<sub>a1</sub> p<sub>a2</sub> ]를 구할 수 있다. 상태 S<sub>1</sub>과 상태 S<sub>2</sub>에서의 전체 전달함수를 각각 W<sub>E1</sub>(s), W<sub>E2</sub>(s)라 하면,

$$W_{E1}(s) = W_{10}(s) + W_{11}(s) + W_{12}(s) \quad (45)$$

$$W_{E2}(s) = W_{20}(s) + W_{21}(s) + W_{22}(s) \quad (46)$$

가 된다. 이들로부터 모멘트 발생함수를 구하고, 이 함수와 (21), (22), (43)과 (44)를 사용하여 평균 전송시간 T<sub>s</sub>와 평균 토큰회전시간 T<sub>R</sub>을 구할 수 있다.

그림 13에 k=2인 경우에 대하여 해석적으로 유도된 값과 모의실험 결과를 표시하였다. 그림 13에서 T<sub>R</sub>, S는 모의실험으로 얻은 평균 토큰회전시간이며, T<sub>R</sub>, A는 해석결과로 얻은 평균 토큰회전시간을 의미한다. 모의실험과 해석시 사용한 매개변수들은 다음과 같다. 스테이션의 개수는 4개로, 오버헤드 시간 T<sub>0</sub>는 10 μsec로, 비트 전송률은 1 Mbps로 하였다. 그림 10은 최소 토큰보유시간이 2000 μsec이며 평균 데이터 처리 시간은 500 μsec 일 때 평균 토큰회전시간을 비교한 것이다. 그림 13은 본 논문의 해석적 결과가 유효함을 보여주고 있다. 가장 많은 오차가 발생했을 경우 그 차는 약 5% 이내이다.

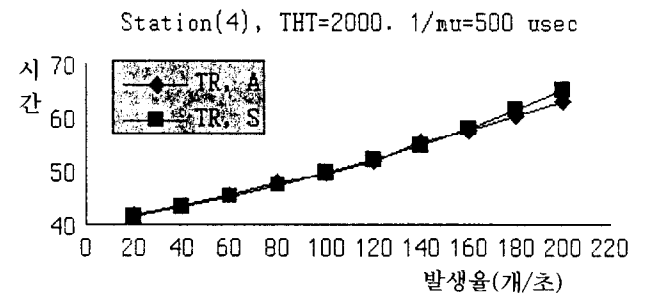


그림 13. 평균 토큰회전시간 (평균 데이터 전송시간 = 500 μsec, 토큰 사용가능시간=2000 μsec).

Fig. 13. Mean token rotation time (mean data transmission time = 500 μsec, minimum token holding time = 2000 μsec).

#### IV. 결론

본 논문에서는 스테이션의 토큰보유시간이 지정되며 유한 버퍼를 가지며 최고 높은 우선순위의 전송 큐만 사용한다는 가정 하에서 IEC/ISA 필드버스의 데이터링크 계층 서비스들 중 CTN(Circulated Token with No duration)방식을 확률페트리네트로 모델링하였다. 이 확률페트리네트 모델과 모멘트 발생함수를 이용하여 symmetric 필드버스 시스템에서의 스테이션에서의 평균 전송시간과 평균 토큰회전시간을 해석적으로 구하는 방법을 제시하였다. 이러한 성능지표는 최소 토큰보유시간, 스테이션의 수, 데이터 발생률과 평균 메시지 길이 등의 매개변수들의 향으로 표시되어진다. 이리



한 성능지표들을 버퍼 용량이 1과 2인 경우에 대하여 해석적으로 구하였고, 이들 결과들이 모의실험을 통하여 유효함을 보여 주었다. 모의실험 결과 초당 발생하는 메시지의 개수가 200개인 경우 최대 오차가 생겼다. 그러나 이는 실제 환경에서는 거의 일어나지 않는 상황임을 고려하면 본 논문의 결과는 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 결과는 실제 필드버스 등의 응용에 있어서 성능지표를 분석하는 데 유용한 도구로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서 사용되는 필드버스 방식은 IEEE 802.4와 PROFIBUS 방식과 비슷하지만 메시지의 전송시간과 남아있는 토큰보유시간을 비교하여 메시지의 전송시간이 작아야 보낼 수 있다는 점에서 차이가 있다. 본 논문에서는 필드버스 시스템에서 사용되는 토큰들 중 한가지에 대해 연구하였지만, 앞으로 모든 종류의 토큰을 고려한 연구가 있어야 한다고 본다. 특히, 긴급 데이터의 처리가 통신망의 안정성에 많은 영향을 끼치므로 DeT(Delegated Token)의 비주기적 서비스에 대한 연구가 필요하다고 본다. 데이터 발생과 메시지 전송시간의 분포를 gaussian 분포로의 확장했을 때 본 논문의 방법을 사용하면 성능지표를 쉽게 구할 수 있다. 그러나 수식으로의 표시에는 많은 어려움이 있을 것으로 생각되며 이에 대한 연구와 asymmetric 필드버스 시스템에서의 연구가 필요하다. 본 논문의 결과와 sensitivity analysis 기법 등을 사용하여 최적의 데이터 발생률과 메시지 전송시간 등을 구하는 연구도 의미가 있을 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] ISA SP50 Editor, *Data Link Protocol Specification part 3 and 4*, ISA, 1991.
- [2] Profibus Committee, *Profibus-Technical Documents*, Aug., 1992.
- [3] FIP Committee, *FIP technical Description*.
- [4] SERCOS interface Inc., *SERCOS interface*, 1991.
- [5] ISO/TC 184/SC 5/WG 2, *Road Vehicles-Interchange of digital information- Controller Area Network(CAN) for high-speed communication*, ISO, 1993.
- [6] World Fed. of MAP/TOP Users Groups, *MAP 3.0 Specification 1993 Release*, 1993.
- [7] P. Tran-Gia and T. Raith, "Multiqueue systems with finite capacity and nonexhaustive cyclic service," *Computer Networks and Performance Evaluation*, pp. 213-225, 1986.
- [8] M. J. Ferguson, "Computation of the variance of the waiting time for token rings," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. SAC-4, no. 6, pp. 775-782, Sep., 1986.
- [9] M. J. Ferguson and Y. J. Aminetzah, "Exact results for nonsymmetric token ring systems," *IEEE Tr. on Communications*, vol. COM-33, no. 3, pp. 223-231, Mar., 1985.
- [10] V. Rego and L. M. Ni, "Analytic models of cyclic service systems and their application to token-passing local networks," *IEEE Tr. on Computers*, vol. 37, no. 10, pp. 1224-1234, Oct., 1988.
- [11] O. C. IBE and X. Cheng, "Approximate analysis of asymmetric Single-Service token-passing systems," *IEEE Tr. on Comm.*, vol. 37, no. 6, pp. 572-577, June, 1989.
- [12] B. Grela-M'Poko, M. M. Ali, and J. F. Hayes, "Approximate analysis of asymmetric single-service prioritized token passing systems," *IEEE Tr. on Communications*, vol. 39, no. 7, pp. 1037-1040, July, 1991.
- [13] G. Kimura and Y. Takahashi, "Diffusion approximation for a token ring system with nonexhaustive service," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. SAC-4, no. 6, pp. 794-801, Sep., 1986.
- [14] H. S. Park, S. C. Ahn, and W. H. Kwon, "Performance and parameter region for real time use in IEEE 802.4 token bus network," *IEEE Tr. on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 4, pp. 412-420, Aug., 1993.
- [15] P. Montuschi, A. Valenzano, and L. Ciminiera, "Selection of token holding times in timed-token protocols," *IEEE Tr. on Indus. Elect.*, vol. 37, no. 6, pp. 442-451, Dec., 1990.
- [16] R. M. Gorur and A. C. Weaver, "Setting target rotation times in an IEEE token bus network," *IEEE Tr. on Industrial Electronics*, vol. 35, no. 3, pp. 366-371, Aug., 1988.
- [17] A. P. Jayasumana, "Throughput analysis of the IEEE 802.4 priority scheme," *IEEE Tr. on Communications*, vol. 37, no. 6, pp. 565-571, June, 1990.
- [18] A. P. Jayasumana and G. G. Jayasumana, "On the use of the IEEE 802.4 token bus in distributed real-time control systems," *IEEE Tr. on Industrial Electronics*, vol. 36, no. 3, pp. 391-397, Aug., 1989.
- [19] J. W. M. Pang and F. A. Tobagi, "Throughput analysis of a timer controlled token passing Protocol under heavy load," *IEEE Tr. on Comm.*, vol. 37, pp. 694-702, July, 1989.
- [20] A. Di Stefano and O. Mirabella, "Evaluating the fieldbus data link layer by a petri net-based simulation," *IEEE Tr. on Indus. Elect.*, vol. 38, no. 4, pp. 288-297, Aug., 1991.
- [21] S. Cavalieri, A. Di Stefano, and O. Mirabella, "Optimization of acyclic bandwidth allocation exploiting the priority mechanism in the fieldbus data link layer," *IEEE Tr. on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 3, pp. 297-306, June, 1993.
- [22] D. W. Kim, H. S. Park, and W. H. Kwon, "The performance of a timer-controlled token passing mechanism with finite buffers in an industrial communication network," *IEEE Tr. on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 4, pp. 421-427, Aug., 1993.
- [23] 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

[24] N. Visawanadham, and Y. Narahari, *Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems*,

Prentice Hall, 1992.

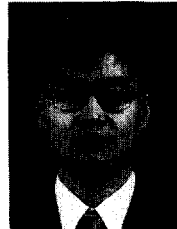
[25] M. K. Molloy, *Fundamentals of Performance Modeling*, Macmillan, 1988.



박 홍 성

1961년 3월 16일생, 1983년 서울대학교 제어계측공학과 졸업, 1986년 동대학원 석사, 1992년 동대학원 박사, 1992년 ~ 현재 강원대학교 제어계측공학과 조교수. 관심분야는 네트워크 시스템 성능해석, 이산 현상 시스템, 공장 자동화를 위한 컴퓨터 시스템 응용 등.

동화를 위한 컴퓨터 시스템 응용 등.



홍 성 수

1963년 10월 11일생, 1986년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업, 1988년 동대학원 석사, 1994년 University of Maryland at College Park, Dept. of Computer Science 박사, 1988년 2월 ~ 1989년 7월 한국전자통신연구소 연구원, 1994년 12월 ~ 1995년 3월 Faculty Research Associate (Univ. of Maryland), 1995년 4월 ~ 1995년 8월 Member of Technical Staff Silicon Graphics Inc. 1995년 9월 ~ 현재 서울대학교 공과대학 전기공학부 전임강사, 관심분야는 실시간 시스템, 분산제어 시스템, 소프트웨어 엔지니어링, 오퍼레이팅 시스템 등.

이 재 수

1971년 1월 7일생, 1993년 강원대학교 제어계측공학과 졸업, 1995년 동대학원 석사, 1995년 ~ 현재 기인시스템. 관심분야는 데이터 처리, 네트워크 시스템 등.