

# 즉시 응답 기능이 있는 타이머 제어형 통신망의 성능 해석

문 상용, 박 홍성\*, 권 옥현  
 서울대학교 전기공학부      \*강원대학교 제어계측공학과  
 whkwon@cisl.snu.ac.kr      hspark@cc.kangwon.ac.kr

## Performance Analysis of a Timer-Controlled Network Protocol with an Immediate Response Scheme

Sang Yong Moon, Hong Seong Park\*, Wook Hyun Kwon  
 School of Electrical Engineering, Seoul National University  
 \*Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Kangwon National University

### Abstract

In this paper, a special kind of timer-controlled network is analyzed. A timer-controlled network with an immediate response scheme is modeled and analyzed. It is assumed that each station on the network has single buffer and individual finite number of maximum retransmission limit. The physical meanings of derived results are briefly explained, which prove that the results completely coincide with the physical operations of that kind of network. It is also shown by computer simulations that derived analysis results are valid.

### 1. 서론

현대 사회에서 생산 공정의 자동화는 산업계의 지상 과 제이다. 생산 공정을 자동화하면 비용은 줄이는 동시에 품질은 높여 경쟁력을 갖출 수 있기 때문이다. 생산 공정의 자동화를 위해서는 원활한 정보 교환을 가능하게 하는 표준 통신망이 필수적이다. 이러한 요구로 인해 전세계적으로는 활발한 통신망 표준 제정 연구들이 이루어져 왔다 [1-4].

이러한 산업용 통신망들은 나뉘대로의 통신 매체 접속 제어 방법을 채택하여 사용하게 된다. 현재 전세계적으로 널리 사용되는 매체 접속 제어 방식으로 타이머 제어형 토큰(token) 제어 매체 접속 방식을 들 수 있다 [5-7]. 이 방식은 긴급한 데이터의 전송 기한을 만족시킬 수 있다는 장점에 산업계에서 널리 사용되고 있으며 이에 따라 모델링이나 성능 해석 등의 관련 연구도 널리 진행되어 왔다 [8-12].

여러 타이머 제어형 매체 접속 제어 방식 중에는 즉시 응답 기능을 제공하는 것이 있다. 이 방식은 토큰을 갖지 않은 스테이션이 다른 스테이션의 요구에 따라 응답을 할 수 있는 기능을 말한다. 이 기능은 데이터 전송의 신뢰성 확보를 가능하게 하므로 널리 사용되고 있다. 그러나 아직까지 이 기능과 관련된 연구는 행해지지 않은 것 같다. 그래서 본 논문에서는 타이머 제어형 통신망 규약으로서 즉시 응답 기능을 가지는 방식을 해석한다. 통신망의 한 스테이션을 확률 패트리로 모델링하고 이를 해석함으로써 통신망의 평균 토큰 회전 시간과 한 스테이션의 평균 전송 시간을 구한다. 이 성능 지표들은 주어진 통신망 매개변수들의 함수로 표현된다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 확률 패트리로 넷 모델이 제시된다. 제3장에서는 문제를 정립하고 주요

해석 결과를 제시한다. 제4장에서는 모의실험을 통하여 유도된 결과의 유효성을 검증한다. 제5장에서 이 논문의 결론이 제시된다.

### 2. 모델링

그림 1은 즉시 응답 기능을 사용하는 토큰 제어 통신망의 확률 패트리 넷 모델이다.

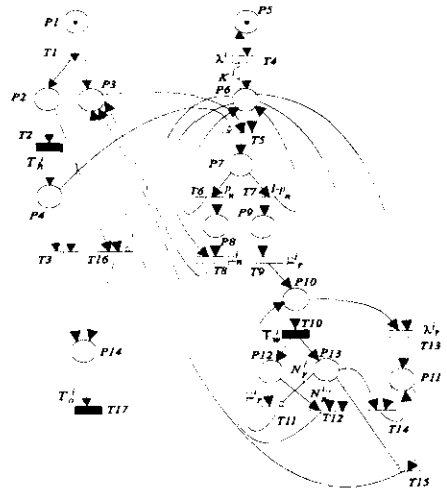


그림 1. 패트리 넷 모델

패트리 넷 모델의 각 플레이스 및 트랜지션에 대한 설명은 표 1에 나타나 있다. 프레임의 도착은 푸아송 분포를 따르고 프레임의 전송 시간은 지수 분포를 따른다. 프레임의 도착이 푸아송 분포를 따르게 되면 프레임의 도착간 시간은 프레임의 전송 시간과 마찬가지로 지수 분포를 따르게 된다. 여기에서는 스테이션  $i$ 의 프레임의 도착간 시간이 매개변수  $\lambda_i$ 의 지수 분포를 따른다고 가정된다. 그리고 프레임에는 응답 비요구 프레임과 응답 요구 프레임의 두 가지가 있는데 각각 매개변수  $\mu_i$ ,  $\nu_i$ 의 지수 분포를 가진다고 가정된다. 프레임이 응답 비요구 프레임일 확률은  $p_i$ 로 가정된다. 스테이션이 응답 요구 프레임을 전송한 후에는 응답을 기다리게 되는데 일정한 시간  $T_i$  동안 기다린 후 응답이 오지 않으면 재전송

을 하게 된다. 무한히 재전송을 하면 안되기 때문에 재전송 회수에는 제한이 있는데 최대 재전송 회수는  $N_i-1$ 이다. 스테이션의 토큰 보유 시간은  $T_i$ 로 표시된다.

표현된다.

$$T_i = \sum_{j=1}^{N_i} (T_j^i + T_o) \quad (2)$$

여기에서  $T_o$ 는 스테이션  $i$ 가 다음 스테이션으로 토큰을 전달 하는데 걸리는 평균 시간이다. 한편  $p_{a,i}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다 [13].

$$p_{a,i}^i = 1 - e^{-\lambda_i(T_i - T)} \quad (3)$$

따라서 페트리 넷 모델을 사용하여  $T_i$ 를 구하면 원하는 성능 지표를 구할 수 있다.

이제 페트리 넷 모델을 해석하자. 페트리 넷을 해석하는 방법으로서 모멘트 생성 함수를 이용하는 방법을 채택하였다 [14]. 이 논문에서는 자세한 설명은 피한다. 이 방법을 이용하려면 페트리 넷 모델의 도달가능 그래프를 그리고 이 그래프로부터 상태 머신을 유도해야 한다. 상태 머신을 구하기 전에 최대 재전송 회수를 고려하자. 이 숫자는 변수이다. 이 숫자가 변수가 되면 상태 머신이 복잡해진다. 그래서 여기에서는  $N_i$ 의 값을 2 즉 최대 재전송 회수를 1로 놓고 상태 머신을 구한다. 나중에 다시 설명하겠지만 최대 재전송 회수를 1로 놓고 구한 결과는 일반적인 경우로 쉽게 확장할 수 있다. 이러한 방식으로 유도된 상태 머신은 그림 2와 같다.

그림 2에서 상태  $S_1$ 는 버퍼에 프레임이 있을 때 토큰이 도착한 것을 나타내고  $S_2$ 는 프레임 전송이 끝난 후 토큰이 출발한 것을 나타낸다. 따라서 이 상태 머신을 이용하여  $S_i$ 에서  $S_j$ 로의 평균 최초 통과 시간을 구하면 그 값이 바로  $T_i^j$ 가 된다. 이  $T_i^j$ 를 구하는 방법은 자세히 설명하지 않는다. 유도된 결과는 다음과 같다.

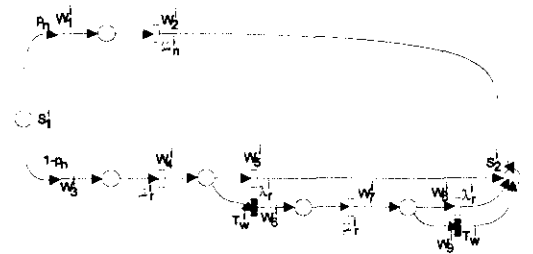


그림 2. 상태 머신

표 1. 플레이스와 트랜지션들의 의미

이름	설명
P1	토큰이 도착하였다
P2	토큰 보유 타이머 계산이 시작되었다
P3	토큰이 데이터 프레임 전송에 사용될 것이다
P4	토큰 보유 타이머의 시간이 지났다
P5	프레임이 도착하고 있다
P6	프레임이 큐에 도착하였다
P7	응답 요구 프레임인지 아닌지 검사한다
P8	프레임이 응답 요구 프레임이 아니다
P9	프레임이 응답 요구 프레임이다
P10	응답 프레임을 기다린다
P11	재전송 횟수를 검사한다
P12	응답 요구 프레임의 재전송한다
P13	최대 재전송 횟수를 초과하는지 검사한다
P14	토큰을 전달한다
T1	토큰 보유 시간 및 전송의 시작
T2	토큰 보유 시간 초과
T3	토큰 보유 시간 초과로 인한 프레임 전송 중지
T4	프레임의 큐에 도착
T5	응답 요구 프레임인지 검사
T6	프레임은 응답 비요구 프레임
T7	프레임은 응답 요구 프레임
T8	응답 비요구 프레임 전송 완료
T9	응답 요구 프레임 전송 완료
T10	응답 창 시간 초과
T11	응답 요구 프레임 재전송
T12	최대 재전송 횟수 초과, 응답 프레임 수신 포기
T13	응답 프레임 도착
T14	재전송 완료
T15	응답 요구 프레임 전송, 응답 프레임 수신 완료
T16	전송할 프레임이 없어서 프레임 전송 중지
T17	토큰의 전달

### 3. 문제 정립 및 성능 해석

여기에서는 평균 토큰 회전 시간 및 한 스테이션의 평균 전송 시간을 구하기 위한 문제를 정립한다. 한 스테이션의 버퍼의 수는 1개로 가정했으므로 평균 전송 시간  $T_s$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$T_s^i = \sum_{j=1}^{N_i} p_{a,i}^j T_j^i = p_{a,i}^1 T_1^i \quad (1)$$

여기에서  $p_{a,i}$ 는 버퍼에  $i$ 개의 프레임이 저장되어 있을 때 토큰이 도착할 확률이고  $T_j^i$ 는  $j$ 개의 프레임이 저장되어 있을 때 토큰이 도착한 경우의 스테이션의 평균 전송 시간이다. 이제 평균 토큰 회전 시간을  $T_i$ 이라고 하자. 평균 토큰 회전 시간과 한 스테이션의 평균 전송 시간의 관계는 다음과 같이

$$T_1^i = p_{a,i}^1 \frac{1}{\mu_n} + (1 - p_{a,i}^1) \left[ \frac{1}{\mu_n} + (1 - e^{-\lambda_i T_1^i}) \frac{1}{\lambda_i} + e^{-\lambda_i T_1^i} \left\{ \frac{1}{\mu_n} + (1 - e^{-\lambda_i T_1^i}) \frac{1}{\lambda_i} \right\} \right] \quad (4)$$

위의 결과를 식 (1), (2) 및 (3)과 함께 수치적으로 풀면 먼저  $T_i, T_s$ 의 값을 구할 수 있으며 이 값을 알면 평균 토큰 회전 시간  $T_i$ 과 한 스테이션의 평균 전송 시간  $T_s$ 를 구할 수 있게 된다.

유도한 결과가 정확하지 알아보기 위해 식 (4)의 물리적 의미를 살펴보자. 일단 어떤 프레임이 응답 요구 프레임이 아니면 그 프레임을 전송하고 토큰을 다음 스테이션으로 전

달할 것이다. 이 동작을 나타내는 항이  $p_r/\mu_r$ 이다. 프레임이 응답 요구 프레임이 아닐 확률에 그 프레임의 평균 전송 시간을 곱한 것이다. 다음으로 프레임이 응답 요구 프레임인 경우를 살펴보자. 어떤 프레임이 응답 요구 프레임일 확률은  $1-p_r$ 이다. 그리고 응답 요구 프레임의 평균 전송 시간은  $1/\mu_r$ 이다. 응답 요구 프레임을 전송한 후에는 응답 프레임올 기다린다. 응답 프레임의 도착률은  $\lambda_r$ 로 가정되었고 응답 프레임올 기다리는 시간은 응답 창이 길어서  $T_w$ 로 표현되므로 응답 창 이내에 응답 프레임이 도착할 확률은  $1-\exp\{-\lambda_r T_w\}$ 가 된다. 결국 응답 요구 프레임을 전송한 후 응답 프레임이 응답 창 이내에 도착하는 과정을 표현하는 항은

$$\frac{1}{\mu_r} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r}$$

이다. 그런데 응답 프레임이 응답 창 이내에 오지 않을 수도 있다. 이 확률은  $\exp\{-\lambda_r T_w\}$ 이다. 이러한 일이 발생하면 응답 요구 프레임올 보내고 응답 프레임올 기다리는 과정을 반복한다. 이를 표현하는 항이

$$e^{-\lambda_r T_w} \left\{ \frac{1}{\mu_r} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r} \right\}$$

이다. 응답 요구 프레임올 보내고 응답을 기다리는 시간에는 응답 프레임이 응답 창 이내에 오지 않을 확률을 곱한 것이다. 위의 내용을 살펴보면 유도한 결과는 통신망의 한 스테이션의 물리적 동작을 정확히 설명하고 있음을 알 수 있다.

유도한 결과가 나타내는 물리적 의미를 살펴보면 최대 재전송 횟수가 늘어나더라도 결과를 쉽게 생각할 수 있다. 예를 들어 최대 재전송 횟수가 2인 경우를 생각하자. 최대 재전송 횟수가 2인 경우라면 한 번 재전송을 했을 때 응답이 오지 않으면 한 번 더 재전송을 하게 된다. 그렇게 되면 위에서 설명한 항들 중에서 응답 프레임이 응답 창 이내에 오지 않을 확률의 제곱에다가 응답 요구 프레임올 보내고 응답 프레임올 기다리는 과정을 나타내는 시간을 곱해서 나오는 항을 추가하면 된다. 즉, 다음과 같다.

$$T_1^i = p_n^i \frac{1}{\mu_n^i} + (1 - p_n^i) \left[ \frac{1}{\mu_r^i} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r^i} + e^{-\lambda_r T_w} \left\{ \frac{1}{\mu_r^i} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r^i} \right\} + (e^{-\lambda_r T_w})^2 \left\{ \frac{1}{\mu_r^i} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r^i} \right\} \right] \quad (5)$$

이러한 식으로 생각하면 최대 재전송 횟수가  $N_i-1$ 인 경우의 결과도 쉽게 유추할 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$T_1^i = p_n^i \frac{1}{\mu_n^i} + (1 - p_n^i) \left[ \frac{1}{\mu_r^i} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r^i} + e^{-\lambda_r T_w} \left\{ \frac{1}{\mu_r^i} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r^i} \right\} + (e^{-\lambda_r T_w})^2 \left\{ \frac{1}{\mu_r^i} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r^i} \right\} \right. \\ \dots \\ \left. + (e^{-\lambda_r T_w})^{N_i-1} \left\{ \frac{1}{\mu_r^i} + (1 - e^{-\lambda_r T_w}) \frac{1}{\lambda_r^i} \right\} \right]$$

#### 4. 모의실험

이 절에서는 모의 실험 결과를 소개한다. 스테이션의 수는 다섯 개로 가정되었고 프레임의 전송률을 4000(1/sec)로 고정시킨 상태에서 프레임의 도착률을 변화시키면서 모의실험 결과를 얻었다. 그 결과는 그림 3-6에 잘 나타나 있다. 그림에서 본 논문의 결과와 모의실험 결과의 오차가 매우 작다는 것을 알 수 있다.

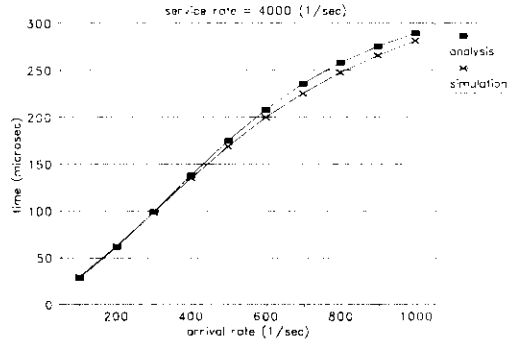


그림 3. 한 스테이션의 평균 전송 시간 1

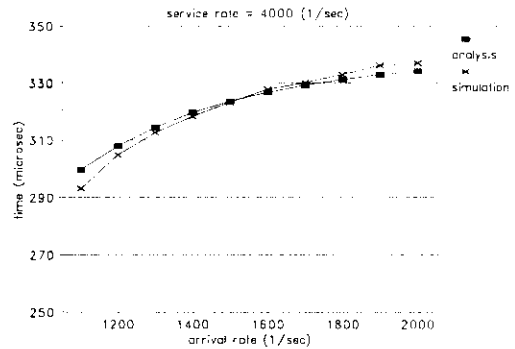


그림 4. 한 스테이션의 평균 전송 시간 2

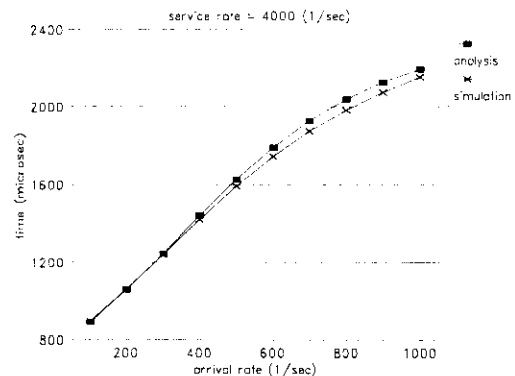


그림 5. 평균 토큰 회전 시간 1

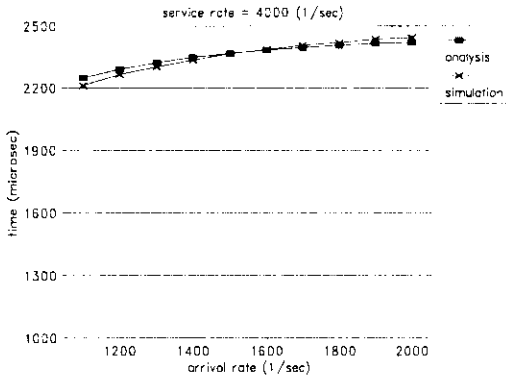


그림 6. 평균 토큰 회전 시간 2

### 5. 결론

이 논문에서는 즉시 응답 기능을 사용하는 타이머 제어형 토큰 제어 매체 접속 방식의 성능을 해석하였다. 이러한 동작을 하는 통신망의 한 스테이션에 대한 확률 페트리 넷 모델을 제시하였고 이 모델을 해석하여 통신망의 평균 토큰 회전 시간과 한 스테이션의 평균 전송 시간을 구하였다. 성능 해석 과정에서는 최대 재전송 회수를 1로 높은 상태에서 결과를 유도하였고 이 결과의 물리적 의미를 파악하여 최대 재전송 회수가 일반적인 경우로 확장하였다.

이 논문에서는 버퍼의 수가 1개인 경우의 성능을 해석하였다. 그러나 대부분의 실제적인 경우 버퍼의 수가 여러 개다. 여러 개의 유한한 개수의 버퍼를 가지는 경우의 성능을 해석하는 것이 필요하다.

### 참고문헌

[1] ISO IS7498, *Open Systems Interconnection - Basic Reference Model*, International Standardization Organization, 1984.  
 [2] A. Valenzano, C. Demartini, L. Ciminiera, *MAP and TOP Communications, Standards and Applications*, Addison-Wesley, 1992.  
 [3] P. Pleinevaux and J.-D. Decotignie, "Time Critical

Communication Networks: Field Buses," *IEEE Network*, Vol. 2, No. 3, pp.23-31, May 1988.  
 [4] J.-D. Decotignie and P. Pleinevaux, "A Survey on Industrial Communication Networks," *Ann. Telecommun.*, Vol. 48, No. 9-10, pp.435-448, 1993.  
 [5] ANSI/IEEE Standard 802.4, *Token Passing Bus Access Method and Physical Layer Specification*, 1985.  
 [6] ANSI/IEEE Standard 802.5, *Token Ring Access Method and Physical Layer Specifications*, 1983.  
 [7] ANSI Standard X3.139, *FDDI Token Ring Media Access Control*, 1987.  
 [8] Richard O. LaMaire, "An M/G/1 Vacation Model of an FDDI Station," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 9, No. 2, pp.257-264, 1991.  
 [9] Kin K. Leung and David M. Lucantoni, "Two Vacation Models for Token-Ring Networks where Service Is Controlled by Timers," *Performance Evaluation*, Vol. 20, 1994.  
 [10] P. Montuschi, L. Ciminiera, and A. Valenzano, "Time Characteristics of IEEE 802.4 Token Bus Protocol," *IEEE Proceedings*, Vol. 139, No. 1, January 1992.  
 [11] Hong Seong Park, Sang Chul Ahn, and Wook Hyun Kwon, "Performance and Parameter Region for Real-Time Use in IEEE 802.4 Token Bus Network," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 4, August 1993.  
 [12] D. W. Kim, H. S. Park, and W. H. Kwon, "The Performance of a Timer-Controlled Token Passing Bus Mechanism with Finite Buffers in an Industrial Communication Network," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 30, No. 4, pp.421-427, August 1993.  
 [13] Leonard Kleinrock, *Queueing Systems Volume I: Theory*, John Wiley & Sons, 1975.  
 [14] DianLong Guo, Frank DiCesare, and MengChu Zhou, "A Moment Generating uncton Based Approach for Evaluating Extended Stochastic Petri Nets," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 38, No. 2, February 1993.