

시뮬레이션 모델을 이용한 IEC/ISA 필드버스 시스템의 데이터 링크 계층 성능 분석

Performance Analysis of the Data Link Layer of IEC/ISA Fieldbus System by Simulation Model

이성근, 홍승호

(Seong Geun Lee and Seung Ho Hong)

Abstract : Fieldbus provides a real-time data communication among field devices in the process control and manufacturing automation systems. In this paper, a Petri Net model of the 1993 draft of IEC/ISA fieldbus which is proposed as an international standard of fieldbus network is developed. Based on the Petri Net model, discrete-event simulation model of IEC/ISA fieldbus network is developed. This paper evaluates the network-induced delay in the data link layer of IEC/ISA fieldbus using the simulation model. In addition, an integrated discrete-event/continuous-time simulation model of fieldbus system and distributed control system is developed. This paper investigates the real-time data processing capability of IEC/ISA fieldbus and the effect of network-induced delay to the performance of control system.

Keywords : IEC/ISA, fieldbus, Petri net, simulation, real-time, control, performance, analysis

1. 서론

최근 수년에 걸친 컴퓨터 및 통신기술의 발전과 더불어 생산자동화기술은 급속하게 변화하여 왔다. 첨단 자동화 시스템에서는 각종 자동화 장비들을 수평적, 수직적으로 통합하여 전체 공정을 일관되게 관리함으로써 생산공정의 설계, 구축 및 유지 관리에 유연성을 제공하고 있다. 이러한 생산 자동화 시스템을 구축하기 위하여서는 각각의 공정에서 생성되는 정보들을 수집, 분석, 가공 및 저장하고, 또한 각 공정에서 필요한 정보를 적시에 제공할 수 있는 정보의 통합화를 구현하는 것이 중요한 문제로 대두된다. 네트워크는 자동화 요소들 간에 정보 교환을 가능케 함으로써 첨단 생산자동화 시스템에서 중추 및 신경 기능을 담당하고 있다. 따라서, 궁극적으로 모든 공정의 통합화를 추구하는 미래의 생산자동화 시스템에 있어서 네트워킹 기술은 가장 핵심이 되는 기술 가운데 하나라고 볼 수 있다[1], [2].

1980년대 초반부터 생산자동화 환경에서 이 기종의 자동화장비들 간의 통신을 위한 표준화된 네트워킹 시스템으로 MAP(Manufacturing Automation Protocol)[3,4]이 개발되었다. 그러나 MAP은 구조상 OSI(Open Systems Interconnection) reference model[5]에서 제시하고 있는 7계층을 모두 가지고 있어 생산 현장의 필드에 설치된 각종 필드 장비들 간의 실시간 통신을 지원하기에는 적합하지 않은 시스템으로 인식되고 있다. 1980년대 후반부터는 생산 현장의 필드에 설치된 각종 제어 및 자동화 관련 장비들에서 생성되는 데이터들의 실시간 통신을 지원하며 가격이 저렴한 네트워크 시스템의 필요성이 제기되었으며, 이러한 목적을 위하여 개발된 네트워크 시스템이 필드버스이다. 필드버스는 필드에 설치된 각종 센서, 단일루프제어기, 소형 PLC, 모터, 밸브, 로봇, CNC 등의 동작기계를 비롯하여 이러한 장비들을 제어하는 다중루프제어기, 중대형 PLC 등의 자동화기기에서 생성되는 데이터를 실시간으로 처리하며, 따라서 첨단 생산시스템의 네트워크 구조상 가장 기본이 되는 네트워크이다[6], [7].

필드버스는 ISO(International Standards Organization)에서 제시하는 OSI reference model의 7 계층 가운데 산업현장의 자동화 시스템에 적합한 구조인 물리 계층, 데이터 링크 계층 및 응용 계층의 3 계층으로 구성된 모델이다. 필드버스에서 사용하는 미디어 접속 제어 방식에는 각 노드들이 미리 지정된 순서에 의하여 토큰을 전달하는 토큰-패싱 방식과 네트워크를 관할하는 특정 노드로부터 데이터 전송 권한을 할당받는 폴링 방식의 네트워크가 있다. 토큰-패싱 방식의 대표적인 필드버스로는 Profibus[8]가 있으며, 폴링 방식의 네트워크로는 FIP[9]와 본 논문에서 다루려는 IEC/ISA 필드버스[10]가 있다. 필드버스의 필요성이 제기되기 시작한 1980년대 중반에는 필드버스의 국제 표준안이 제시되지 않은 상태에서 많은 프로토콜이 출현하게 되었고, 이에 따라 필드버스간의 호환성 문제가 발생했으며, 실제 공장에서 필드버스에 연결되는 장비들의 선택은 필드버스의 제조 회사에 따라 호환성이 보장되는 특정 회사의 제품으로 한정되는 문제점이 생겨나게 되었다. 이러한 문제점을 타개하기 위하여 IEC/ISA에서는 필드버스의 국제 표준안을 준비중에 있으며, 이러한 표준 모델이 완성되면 사용자는 특정 회사의 필드 장비에 제한되지 않고 원하는 제품을 필드버스에 접속시켜 운영할 수 있게 된다.

필드버스에서 각종 데이터들은 메시지의 형태로 네트워크를 통하여 전달된다. 그러나 실시간 처리를 요구하는 자동화 시스템에서 네트워킹으로 인한 데이터 지연시간이 허용한계치를 초과하는 경우에는 응용 시스템의 기능과 성능에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 생산 자동화 시스템에 필드버스를 도입하는 경우에 데이터 지연시간과 단위 시간 당 데이터 처리량 등의 네트워크 성능을 미리 분석하여야 할 필요가 있다. 생산 자동화용 네트워크 시스템인 MAP에서 데이터링크 계층으로 사용하는 IEEE 802.4 토큰버스[11]의 성능 해석에 관하여서는 지난 10여년간 많은 논문들이 발표되어 왔으나[12-18], 필드버스의 성능 해석과 관련된 논문들은 최근에 와서 발표되기 시작하고 있다. 기존의 IEC/ISA 필드버스의 성능 해석에 관한 연구로는 91년도 제안서를 기준으로 한 연구 결과가 발표되었으나[19], [20]. IEC/ISA 필드버스의 91년도 제안서는 본 논문에서 다루는 93년도 제안

서에 비하여 많은 부분의 차이를 보이고 있다.

본 논문에서는 프로토콜이 거의 완성 단계에 있는 93년도 제안서를 토대로 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층에 대한 성능을 시뮬레이션 기법을 통하여 해석하고자 한다. 본 논문의 구성은 5장으로 이루어진다. II장에서는 페트리 넷 모델을 이용하여 IEC/ISA 필드버스의 단순화된 모델의 논리적 타당성을 입증하며, III장에서는 페트리 넷 모델을 근간으로 하여 개발된 이산 사건 시뮬레이션 모델에 대하여 기술한다. IV장에서는 시뮬레이션 모델을 이용하여 IEC/ISA 필드버스가 구축될 수 있는 실제 여러 네트워크 시스템 환경에 대하여 네트워크 파라미터의 변화에 따른 IEC/ISA 필드버스의 성능을 평가한다. 또한, 센서, 컨트롤러, 액츄에이터로 구성된 제어 시스템이 IEC/ISA 필드버스를 통하여 접속되는 경우에 IEC/ISA 필드버스에서 제어 관련 데이터들의 실시간 처리와 관련된 성능 분석도 IV장에 기술되어 있다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결과와 추후 연구 사항에 대하여 기술하기로 한다.

II. 페트리 넷 모델

페트리 넷은 이산 사건 시스템에서 사건 발생에 대한 시스템의 상태 변화를 논리적으로 나타내 주어 네트워크와 같은 이산 사건 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하는데 매우 중요한 도구로 사용된다[21]. 페트리 넷은 시스템의 상태를 나타내는 원(○)과 사건 발생과 더불어 시스템의 상태가 천이됨을 나타내는 막대(|) 및 원과 막대가 연결되어 이루어진 도식적인 도구이다. 또한 상태의 천이가 즉시 이루어지지 않고 시간이 걸리는 경우에는 타임 페트리 넷 모델이 사용되며, 이 경우의 상태 천이는 상자(□)로 표시된다. 페트리 넷에서는 상태를 나타내는 원에 토큰을 마킹함으로써 시스템의 현재 상태를 나타내며, 막대의 입력부에 연결된 모든 원에 토큰이 마킹되는 경우에 상태 천이 조건이 만족되어 막대의 출력부와 연결된 새로운 상태로 시스템의 상태가 천이된다. 페트리 넷으로 모델링된 이산사건 시스템의 기능과 성능을 해석하기 위하여서는 페트리 넷 모델의 해석적인 해를 구하거나 페트리 넷 모델을 바탕으로 한 시뮬레이션 모델을 개발하여야 한다. 해석적으로 접근하는 경우에는 상태 천이 시간이 지수 분포를 가져야 하는 등의 여러 가지 제약 조건하에서만 수학적인 해의 도출이 가능하며, 이를 위하여서는 시스템의 동작에 대한 여러 가지 가정을 필요로 하게 된다. IEC/ISA 필드버스의 모델에서 상태가 천이되는 시간을 고려하여야 할 사항으로는 각 노드에서의 데이터 생성 주기, 데이터 길이에 따른 데이터 전송 경과 시간, 각종 타이머들의 만료시간 등이 있다. 이러한 상태 천이 시간의 분포는 일정할 수도 있고, 불규칙적으로 변할 수도 있으며, 불규칙한 경우에도 상태 천이 시간이 지수 분포를 따르지 않을 수 있다. 이산 사건 시뮬레이션 기법을 사용하는 경우에는 상태 천이 시간이 일정한 경우는 물론 거의 모든 경우의 불규칙한 분포를 가지는 상태 천이 시간에 대하여도 모델링이 가능하며, 따라서 본 논문에서는 상태 천이 시간에 대한 가정을 필요로 하지 않는 시뮬레이션 기법을 사용하여 IEC/ISA 필드버스의 성능을 해석한다.

IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 프로토콜은 매우 복잡한 구조를 가지고 있으며, 따라서 이를 그대로 모델링하면 시뮬레이션 시간이 엄청나게 증가하여 현실적으로 시스템의 성능 해석이 불가능해진다. 따라서 IEC/ISA 필드버스 규격서[10]에서 제시된 FSM (Finite State Machine) 가운데 필드버스에서 오류 발생 시 이의 복구, 시간 정보의 분배, 브

리지를 통한 링크간의 데이터 전송 등과 같이 시스템의 성능에 직접적인 영향을 미치지 않는 부분들은 모델링에서 배제하고, 시스템이 정상적으로 동작되는 경우에 네트워크 시스템의 성능을 해석할 수 있는 단순화된 시뮬레이션 모델을 개발하여야 할 필요가 있다. 본 장에서는 IEC/ISA 필드버스의 복잡한 프로토콜 구조 가운데 시스템의 성능에 직접적으로 영향을 미치는 요소들만을 추출하여 이에 대한 페트리 넷 모델을 개발한다. 단순화된 페트리 넷 모델에서 제시하는 프로토콜의 동작 원리는 제 III 장에서 시뮬레이션 모델로 구현된다. IEC/ISA 필드버스의 단순화된 페트리 넷 모델은 Receiver/Responder, Token Holder, Local Scheduler, Link Master의 네 개의 부모델로 나뉘어지며, 이들에 대한 설명이 다음의 각 절에 나타나 있다. 본 논문에서는 제한된 지면으로 인하여 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 구조를 상세히 기술할 수 없다. 따라서 본 장의 제 1 절에서는 본 논문에서 모델링되는 단순화된 IEC/ISA 필드버스의 구조에 대하여 기술하며, 본 논문에서 모델링되지 않은 세부적인 사항들은 규격서[10]에 제시된 FSM (Finite State Machine) 모델을 참조하기 바란다. 본 논문에서 사용되는 약어들을 정리하면 다음과 같다.

- DLPDU(Data Link Protocol Data Unit): 전송되는 프레임의 기본 단위로 프레임의 구별을 가능케하는 헤더와 데이터 부분으로 구성
- DLE(Data Link Entity): DLPDU의 전송과 수신 역할을 수행하는 개체
- LAS(Link Active Scheduler): 로컬 링크 내의 모든 DLE의 데이터 전송을 관리하는 DLE
- LM(Link Master): 링크의 초기화와 스케줄링 등의 LAS 기능을 담당할 수 있는 DLE
- DeT(Delegated Token): LAS가 링크 내의 DLE에게 프레임 전송을 허가하기 위하여 사용되는 토큰
- RT(Reply Token): CD DLPDU를 수신한 DLE가 CD DLPDU에 대한 응답을 할 수 있도록 하기 위하여 사용되는 토큰
- ST(Scheduling Token): 링크 내의 LM DLE에게 LAS 기능을 이전하기 위하여 사용되는 토큰
- DT(Data) DLPDU: 메시지 전송에 사용되는 DLPDU
- DU(Unitdata) DLPDU: 메시지 전송에 사용되는 Unit Data의 DLPDU
- CD(Compel Data) DLPDU: 토큰을 소유한 DLE가 다른 DLE로부터 메시지 전송을 요구하기 위한 DLPDU
- ES(Execute Sequence) DLPDU: LAS가 링크 내의 DLE에게 스케줄링된 만큼의 일정 시간 동안 프레임 전송을 허가하기 위하여 DeT를 전달하는데 사용되는 DLPDU
- ET(Execute Transaction) DLPDU: LAS가 링크 내의 DLE에게 한 번의 프레임 전송을 허가하기 위하여 DeT를 전달하는데 사용되는 DLPDU
- EE(End Execution) DLPDU: DeT의 사용이 종료된 DLE가 DeT를 LAS에게 반납하는데 사용되는 DLPDU
- TL(Transfer LAS) DLPDU: LAS가 링크 내의 다른 LM에게 ST를 전달하기 위한 DLPDU
- VC(RR): CD DLPDU를 전송한 DLE가 CD DLPDU에 대한 응답을 기다리는데 소요되는 시간을 제한하기 위한 타이머
- VC(FD): CD DLPDU를 수신한 DLE가 응답을 구성하는데 소요되는 시간을 제한하기 위한 타이머
- VC(UC): ES DLPDU를 전송한 LAS가 ES DLPDU를

수신한 DLE의 토큰 사용 허용 시간을 제한하기 위한 타이머

- VC(RD): ES DLPDU를 수신한 DLE가 자신의 토큰 사용 허용 시간을 제한하기 위한 타이머

1. IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층 구조

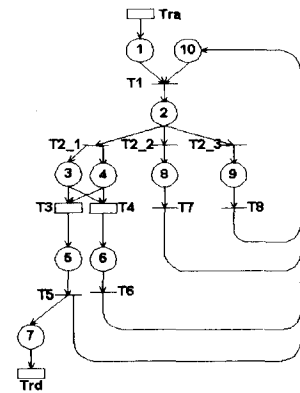
IEC/ISA 필드버스에서 네트워크에 접속된 DLE들의 DU, DT DLPDU 프레임 전송은 링크 내에 LAS로 지정된 DLE에 의하여 관리된다. 즉, LAS는 링크 내의 DLE들에게 미리 스케줄링된 순서에 따라 DeT를 전달함으로써 데이터 전송 권한을 부여하고, 링크 내의 DLE들은 LAS로부터 DeT가 할당되면 전송큐에 대기하고 있던 데이터를 전송한다. DeT는 ET 또는 ES DLPDU를 통하여 전달된다. ET DLPDU를 통하여 DeT가 전달되는 경우에 DeT를 수신한 DLE에게는 한 번의 프레임 전송만이 허용되며, ES DLPDU를 통하여 DeT가 전달되는 경우에 DeT를 수신한 DLE는 미리 스케줄링된 만큼의 지정된 토큰 사용 허용 시간 동안 대기하고 있던 프레임을 전송한다. 이때 DLE의 토큰 사용 허용 시간의 제한은 LAS와 각각의 DLE에 설치된 VC(UC)와 VC(RD) 타이머들에 의하여 관리된다. 토큰 사용 권한이 종료된 DLE는 EE DLPDU를 통하여 DeT를 LAS에게 반납한다. 각각의 DLE에서는 Urgent, Normal, Time-Available의 3 종류의 우선 순위가 다른 메시지들을 생성할 수 있으며, 이러한 메시지들은 DeT에 지정된 우선 순위를 참조하여 전송된다. 즉, DLE가 DeT를 수신하면 DeT에 지정된 우선순위와 같거나 이보다 높은 우선순위의 데이터만을 전송할 수 있으며, 우선 순위가 높은 데이터들을 먼저 전송한다.

DeT를 할당받은 DLE는 토큰 사용 권한을 가지고 있는 동안 CD DLPDU를 통하여 RT를 전달함으로써 CD DLPDU를 수신한 노드로부터 데이터 수신에 대한 응답을 요구할 수 있다. CD DLPDU를 수신한 노드는 프레임에 대한 응답과 함께 DeT를 소유한 DLE에게 RT를 반납한다. CD DLPDU에 대한 응답은 제한된 시간 내에 완료되어야 하며, 이는 송신단과 수신단에 설치된 VC(FD)와 VC(RR) 타이머들에 의하여 관리된다. 링크 내에는 LAS 기능을 수행할 수 있는 DLE들이 여러 개가 있을 수 있으며 이러한 DLE들을 LM DLE라 한다. 링크 내에서는 한 번에 하나의 LM DLE만이 LAS 기능을 수행하여야 하며, 현재 LAS 기능을 수행하는 DLE는 TL DLPDU를 통하여 ST를 전달함으로써 링크내의 다른 LM DLE에게 LAS 기능을 이전할 수 있다.

2. Receiver/Responder 모델

데이터 프레임을 받아들이는 수신단의 구조는 단순한 수신만을 담당하는 Receiver 부분과 수신된 데이터에 대한 응답을 준비하는 Responder 부분으로 나누어 질 수 있는데, 본 절에서는 이 두 부분을 수신단이라는 측면에서 하나의 모델로 제시한다. 수신단의 모델링에서 송신단과 수신단의 접속 설정을 위한 프레임의 수신, 동기화를 위한 프레임의 수신과 이에 대한 응답 등 데이터 전송을 위한 원래의 목적 이외의 서비스에 해당되는 프레임의 수신에 대해서는 전체 네트워크의 성능 평가에 큰 영향을 주지 못하는 반면 모델링이 매우 복잡해지는 문제를 야기한다. 따라서 본 절에서는 이러한 프레임들에 대한 수신 단의 페트리 넷 모델은 생략하기로 하며 시뮬레이터의 구성에서도 제외하기로 한다. 위에서 제시된 조건에 의해 단순화된 수신단의 구조는 그림 1과 같이 나타내어질 수 있다. 그림 1의 모델은 타임 페트리 넷 모델이며, Tra는 프레임의 수신에 소요되는 경과 시간을 나타낸다. 데이터 프레임을 수신하는데 소요되는

시간은 우선 순위에 따른 데이터의 길이에 따라 달라지며, 메시지의 오버헤드를 제외한 순수 데이터만의 길이는 규격서에 나타난 바와 같이 각각의 우선순위에 대하여 Urgent는 64, Normal은 128, Time-Available은 256 octet의 한계 값을 가진다. Tra의 천이는 Token Holder 모델이나 Link Master 모델에서 메시지를 전송하는 천이와 이어지게 된다. 다시 말해서 위의 모델은 다른 모델에 의하여 불려지게 된다. 그림 1의 Receiver/Responder 모델에서 수신될 수 있는 프레임으로는 CD, DU, DT 또는 TL DLPDU 등이 있으며, 수신된 프레임의 종류에 따라 수신단이 어떻게 반응하는가가 천이 T2_1, T2_2, T2_3으로 모델링 되었다. CD DLPDU를 수신한 경우에는 제한된 시간 내에 응답 프레임이 구성되어야 하며, 응답 프레임 구성 제한 시간은 타이머 VC(FD)에 의하여 모니터링된다.



상태	설	명
1	DLPDU가 수신된 상태.	
2	수신된 프레임의 종류를 검사.	
3	CD DLPDU에 대한 응답 프레임 구성 시작.	
4	타이머 VC(FD) 동작	
5	CD DLPDU에 대한 응답 프레임이 작성된 상태.	
6	타이머 VC(FD)가 종료된 상태.	
7	CD DLPDU에 대한 응답 프레임을 전송.	
8	수신된 DU, DT DLPDU를 처리.	
9	스케줄링 토큰의 수신을 상위 계층에 보고.	
10	수신단의 메시지 수신 가능 상태.	

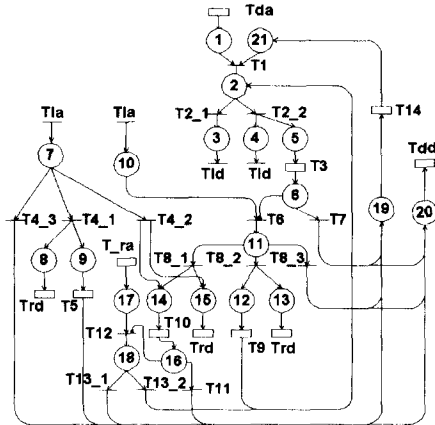
천이	설	명
ra	DLPDU 수신 경과 시간.	
rd	CD DLPDU에 대한 응답 프레임의 전송 경과 시간.	
1	수신단에서 프레임 수신 완료.	
2_1	CD DLPDU가 수신된 경우.	
2_2	DU, DT DLPDU가 수신된 경우.	
2_3	TL DLPDU가 수신된 경우.	
3	CD DLPDU에 대한 응답 프레임 구성 경과 시간.	
4	타이머 VC(FD) 경과 시간(응답프레임 구성 제한 시간).	
5	CD DLPDU의 응답이 제한된 시간 이내에 구성된 경우.	
6	CD DLPDU에 대한 응답이 실패된 경우.	
7	DU, DT DLPDU에 대한 처리가 종료된 경우.	
8	TL DLPDU에 대한 응답이 종료된 경우.	

그림 1. Receiver/Responder 페트리 넷 모델.
Fig. 1. Petri net model of receiver/responder.

구성된 응답 프레임의 전송 시간은 Trd로 모델링되며, 이는 다시 Token Holder 모델이나 Link Master 모델에서 응답 프레임을 수신하는 친이와 이어지게 된다.

3. Token Holder 모델

그림 2의 페트리 넷 모델은 LAS로부터 DeT를 할당받은 DLE가 데이터 전송과 관련된 일련의 작업을 수행하는 알고리즘을 보여주는 모델이다. 그림 2에서 Tda는 DLE가 LAS로부터 DeT를 받아들이는 부분이다. DeT는 ET 또는 ES DLPDU에 의해 전송되어질 수 있다. ET DLPDU를 수신한 DLE에서는 한 번의 데이터 프레임 전송만이 허용되며, ES DLPDU를 수신한 노드에서는 VC(RD)로 지정된 시간만큼 토큰의 사용이 허용된다. DeT를 포함하는 프레임의 종류에 따라 DLE가 어떻게 동작하는가가 친이 T2_1과 T2_2로 모델링 되었다. DeT를 수신한 DLE는 전송할 프레임의 구성하게 되며, 이러한 프레임의 구성은 다음의 Local Scheduler 모델에서 수행된다. 친이 Tld는 Local Scheduler 모델의 Tla와 연결되어 전송할 데이터 프레임이 구성되도록 하며, 구성된 데이터 프레임은 Local Scheduler 모델의 Tld를 통하여 본 모델의 Tla와 연결된다. 구성된 프레임의



친이	설	명
da	DeT를 포함한 프레임 수신 경과 시간.	
dd	EE DLPDU에 의한 DeT를 반납 경과 시간.	
ra	CD DLPDU에 대한 응답 프레임 도착 경과 시간.	
rd	데이터 프레임을 전송 경과 시간.	
la	전송할 프레임의 구성이 완료된 경우.	
ld	전송할 데이터 프레임의 구성을 요구하는 경우.	
1	DLE가 DeT를 포함한 프레임을 수신한 경우.	
2_1	수신된 프레임이 ET DLPDU인 경우.	
2_2	수신된 프레임이 ES DLPDU인 경우.	
3	타이머 VC(RD)의 경과시간(토큰 사용 허가 시간).	
4_1	전송될 프레임이 DU, DT DLPDU인 경우	
4_2	전송될 프레임이 CD DLPDU인 경우	
4_3	전송될 프레임이 EE DLPDU인 경우	
5	프레임 전송 동안 DLE의 비활동 시간.	
6	타이머 VC(RD)가 남아 프레임의 전송이 가능한 경우.	
7	타이머 VC(RD)의 만료에 의하여 LAS에게 토큰을 반납하는 경우.	
8_1	전송될 프레임이 CD DLPDU인 경우.	
8_2	전송될 프레임이 DU,DT DLPDU이고 마지막의 전송이 아닌 경우.	
8_3	전송될 프레임이 EE DLPDU인 경우.	
9	프레임 전송 동안 DLE의 비활동 시간.	
10	타이머 VC(RR) 경과 시간(CD DLPDU 전송 후 응답을 기다리는 시간).	
11	VC(RR)의 종료에 의하여 LAS에게 토큰을 반납 하는 경우.	
12	타이머 VC(RR) 종료 이전에 응답이 도착된 경우.	
13_1	ET 서비스 또는 ES 서비스에 의한 마지막 전송의 응답인 경우.	
13_2	ES 서비스에 의한 마지막 전송의 응답이 아닌 경우.	
14	DeT 반납 동안 DLE의 비활동 시간.	

상태	설	명
1	DeT를 포함한 프레임이 수신된 상태.	
2	프레임 전송을 준비.	
3	ET서비스에서 전송할 프레임의 구성을 요구하는 상태.	
4	ES서비스에서 다음으로 전송할 프레임의 구성을 요구하는 상태.	
5	타이머 VC(RD) 동작.	
6	타이머 VC(RD)가 종료된 상태.	
7	ET 서비스에 의하여 전송될 프레임의 종류를 검사.	
8	DU,DT DLPDU의 전송이 시작된 상태.	
9	DLE가 프레임 전송을 시작.	
10	ES 서비스에 의한 프레임 전송 준비가 완료된 경우.	
11	ES 서비스에 의하여 전송될 프레임의 종류를 검사.	
12	DLE가 선택된 프레임의 전송을 시작.	
13	선택된 프레임의 전송이 시작된 상태.	
14	타이머 VC(RR) 동작.	
15	CD DLPDU의 전송을 시작.	
16	타이머 VC(RR)이 종료된 상태.	
17	요구된 응답 프레임이 수신된 상태.	
18	마지막 전송에 의한 응답인 가를 확인.	
19	DLE가 LAS에게 DeT를 반납.	
20	EE DLPDU 의 전송이 시작된 상태.	
21	DeT의 수신을 기다리는 DLE의 비활동 상태.	

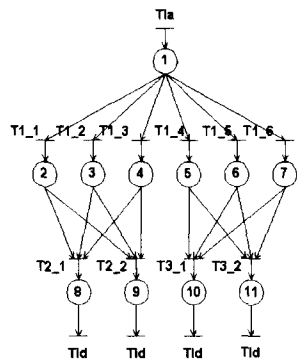
그림 2. Token holder의 페트리 넷 모델.
Fig. 2. Petri net model of token holder.

종류가 CD DLPDU인가, DU, DT DLPDU인가 또는 EE DLPDU인가에 따라 DLE가 어떻게 반응하는가가 친이 T4_1, T4_2, T4_3 (ET DLPDU의 경우)과 T8_1, T8_2, T8_3 (ES DLPDU의 경우)에 모델링 되었다. 그림 2에서 친이 Trd는 메시지의 전송에 관한 부분으로 Receiver/Responder 부분의 Tra로 연결이 되며, 앞에서 언급된 대로 일정한 시간 이후에 전송이 완료된다. 또한 Tra의 경우는 CD DLPDU를 보내고 RT를 가진 DLE가 응답을 기다리는 상태에서 Receiver/Responder 모델에서 응답이 구성되어 Trd로 응답을 보낼 때 연결되는 부분이다. 친이 Tdd는 DeT의 사용이 종료되어 토큰을 LAS에게 반납하는 부분으로, 토큰을 가졌던 DLE의 활동은 중지되고, LAS가 다음의 계획된 작업을 행하게 해준다. 친이 Tdd는 Link Master 모델의 Tda와 연결된다.

4. Local Scheduler 모델

그림 3의 Local Scheduler 모델은 LAS가 DLE에게 DeT를 할당한 후 DeT를 가진 DLE가 전송큐에 대기하고 있는 메시지를 참조하여 다음으로 전송할 데이터 프레임을 구성하는 방법을 나타내는 알고리즘을 제시한다. IEC/ISA 필드 버스에서 로컬 링크 내의 DLE에는 DLE 사용자(즉, 상위 계층)의 데이터 전송 요구를 관리하는 큐 Q_A(UR)과 이미 스케줄링되어 자신이 전송하여야 할 데이터가 준비된 큐

Q_A(SS) 및 LAS에게 자신이 전송하여야 할 데이터의 스케줄링을 요구하기 위한 큐 Q(LR) 등이 있으며, 이러한 큐들을 참조하여 전송할 데이터 프레임의 구성하게 된다. 본 논문에서는 그러나 모델의 단순화를 위하여 각각의 DLE에서 전송할 데이터들은 이미 스케줄링되었다고 가정하고, 따라서 우선 순위 별로 스케줄링된 데이터의 전송큐만을 모델링한다. 그림 3의 모델은 LAS에 의해 DeT를 받아들인 DLE가 계획된 데이터 프레임을 만드는 과정으로, DeT에 지정된 우선순위 보다 높은 우선순위의 데이터만이 전송될 수 있으며, 이러한 과정이 천이 T1_1부터 T1_6에 모델링되었다. 전송할 데이터가 없는 경우에는 DeT의 반납을 위하여 EE DLPDU를 준비하여야 하며, 이러한 과정은 천이 T2_2와 T3_2에 모델링 되었다. 그림 3의 모델에서 T1a는 Token Holder 모델에서 DeT를 가진 DLE가 자신의 전송 큐에 있는 메시지를 전송을 위한 프레임의 형태로 바꾸기 위해 T1d로 호출하게 된다. 다음으로 T1d의 경우는 구성된 프레임을 Token Holder 모델의 T1a로 연결시켜 준다.



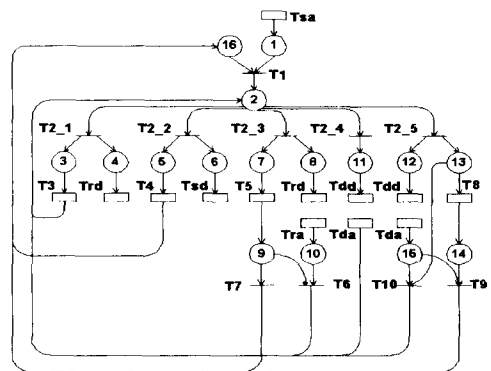
상태	설	명
1	DeT를 포함한 프레임과 우선순위를 검사.	
2	전송할 우선순위 0의 데이터를 선택.	
3	전송할 우선순위 0,1의 데이터를 선택.	
4	전송할 우선순위 0,1,2의 데이터를 선택.	
5	전송할 우선순위 0의 데이터의 선택.	
6	전송할 우선순위 0,1의 데이터의 선택.	
7	전송할 우선순위 0,1,2의 데이터의 선택.	
8	전송할 데이터에 헤더를 추가한다.	
9	EE DLPDU를 준비하고, 토큰의 마지막 사용을 표시.	
10	전송할 데이터의 헤더를 추가.	
11	EE DLPDU를 준비하고, 토큰의 마지막 사용을 표시.	

천이	설	명
1a	DeT를 수신하여 프레임의 구성이 요구된 경우.	
1d	프레임의 구성이 완료된 경우.	
1_1	ES DLPDU를 이용하여 DeT를 수신하고 DeT의 우선순위가 0인 경우.	
1_2	ES DLPDU를 이용하여 DeT를 수신하고 DeT의 우선순위가 1인 경우.	
1_3	ES DLPDU를 이용하여 DeT를 수신하고 DeT의 우선순위가 2인 경우.	
1_4	ET DLPDU를 이용하여 DeT를 수신하고 DeT의 우선순위가 0인 경우.	
1_5	ET DLPDU를 이용하여 DeT를 수신하고 DeT의 우선순위가 1인 경우.	
1_6	ET DLPDU를 이용하여 DeT를 수신하고 DeT의 우선순위가 2인 경우.	
2.1	해당 데이터가 있는 경우.	
2.2	해당 데이터가 없거나, 토큰 허용 시간이 데이터 전송에 부족한 경우	
3.1	해당 데이터가 있는 경우.	
3.2	해당 데이터가 없는 경우.	

그림 3. Local scheduler의 페트리 넷 모델.
Fig. 3. Petri net model of local scheduler.

5. Link Master 모델

그림 4에서는 LM DLE가 ST를 수신함으로써 LAS 기능을 수행하는 Link Master 페트리 넷 모델을 제시한다. 그림 4에서 천이 Tsa는 TL DLPDU를 수신하는 동안의 경과 시간을 나타내며, TL DLPDU를 통하여 ST를 수신한 LM DLE는 LAS의 역할을 수행한다. LAS노드는 링크 내의 다른 DLE들에게 ET, ES DLPDU를 통하여 링크 내의 DLE들에게 DeT를 할당한다. ES DLPDU를 통하여 DeT를 전송하는 경우에 ES DLPDU를 수신한 DLE에서의 토큰 허용 시간의 제한은 타이머 VC(UC)를 통하여 모니터링 된다. LAS는 또한 자신의 DU, DT DLPDU 및 CD DLPDU를 전송할 수 있으며, 다른 LM DLE에게 LAS 기능을 이전하는 경우에는 TL DLPDU를 통하여 ST를 전달한다. LAS가 전송하는 DLPDU의 종류에 따라 필드버스가 어떻게 동작하는가가 천이 T2_1부터 T2_5에 나타나 있다. 그림 4에서 천이 조건 Tsd는 현재의 LAS가 ST를 전송함으로써 링크 내의 다른 LM DLE에게 LAS 기능을 이전하는 것을 나타내고, Tsa는 링크 내의 LM DLE가 ST를 수신함으로써 현재의 LAS로부터 LAS의 기능을 넘겨받는 것을 나타낸다. ST를 전송한 LAS는 더 이상 LAS의 기능을 수행하지 않고 LAS의 기능을 감시하는 LM의 역할을 하게된다. Tdd는 Token Holder 모델의 Tda와 연결되며, Token Holder 모델에서 DeT가 Tdd로 반납되어질 때 본 모델의 Tda와 연결된다. Trd은 LAS가 자신의 메시지를 전송하는 부분으로 수신단의 역할을 하는 Receiver/Responder 모델의 Tra와 연결되며, Tra는 CD DLPDU를 보낸 후 수신 단에서 보내어진 응답을 받아들이는 부분이다. 그림 4에서 구현된 페트리 넷 모델에서는 LAS의 고장이나 토큰의 손실에 대한 복구, 버스의 고장으로 인한 비활동 등과 같이 네트워크 시스템의 성능에 직접적인 영향을 주지 않는 시스템 오류들은 제외하여 모델링하였다.



상태	설	명
1	DLE에 스케줄링 토큰이 도착된 상태.	
2	LAS의 역할을 수행.	
3	LAS가 DU, DT DLPDU의 전송을 시작.	
4	DU, DT DLPDU의 전송이 시작된 상태.	
5	LAS가 TL DLPDU의 전송을 시작.	
6	TL DLPDU의 전송이 시작된 상태.	
7	타이머 VC(RR) 동작.	
8	LAS가 CD DLPDU의 전송을 시작.	
9	타이머 VC(RR)이 종료된 상태.	
10	CD DLPDU에 대한 응답 프레임이 수신된 상태.	
11	LAS가 ET DLPDU로 링크내 DLE에게 DeT를 할당.	
12	LAS가 ES DLPDU로 링크내 DLE에게 DeT를 할당.	
13	타이머 VC(UC) 동작.	
14	타이머 VC(UC)의 종료에 의하여 토큰이 분실된 경우.	
15	DLE로부터 DeT가 반납된 상태.	
16	LM으로서 현재의 LAS를 감시하는 상태.	

천이	설	명
sa	스케줄링 토큰을 포함한 프레임 수신 경과 시간.	
rd	프레임 전송 경과 시간.	
ra	CD DLPDU에 의한 응답 프레임 수신 경과 시간.	
dd	DeT를 포함한 프레임 전송 경과 시간.	
da	DLE로부터 LAS에게 DeT 반납 경과 시간.	
sd	TL DLPDU 프레임 전송 경과 시간.	
1	스케줄링 토큰 포함한 프레임이 수신된 상태.	
2.1	LAS가 전송할 프레임이 DU, DT DLPDU인 경우.	
2.2	LAS가 전송할 프레임이 TL DLPDU인 경우.	
2.3	LAS가 전송할 프레임이 CD DLPDU인 경우.	
2.4	LAS가 전송할 프레임이 ET DLPDU인 경우.	
2.5	LAS가 전송할 프레임이 ES DLPDU인 경우.	
3	DU, DT DLPDU 전송 동안 LAS의 비활동 시간.	
4	TL DLPDU의 전송 동안의 LAS의 비활동 시간.	
5	타이머 VC(RR)의 경과 시간.	
6	CD DLPDU에 의한 응답이 타이머 종료 이전에 수신된 경우.	
7	VC(RR)의 만료로 인하여 토큰이 분실되어 새로운 토큰을 요구하는 경우.	
8	타이머 VC(UC) 경과 시간(DLE의 토큰 사용 허용 시간을 모니터링).	
9	토큰의 분실로 인하여 새로운 토큰을 요구하는 경우.	
10	제한된 시간 내에 DeT가 반납된 경우.	

그림 4. Link master의 페트리 넷 모델.
Fig. 4. Petri net model of link master.

6. 전체 모델의 구성

위에서 다루어진 4개의 모델들은 시뮬레이션 모델을 구성하기 위한 기능별 모델로 이러한 모델들은 시뮬레이션 모델에서 서로 연결되어 있다. 이러한 모델의 연결이 그림 5에 나타나 있으며, 세부적인 사항들은 다음과 같다.

① 링크 내의 모든 DLE들의 데이터 전송을 관리하는 Link Master 모델은 DeT를 전달함으로써 Token Holder 모델과 연결되거나, RT를 전달함으로써 Receiver/ Responder 모델과 연결이 되어질 수 있다. 또한 ST를 다른 LM DLE에게 전달함으로써 다른 LM이 LAS의 기능을 수행하도록 하는 경우에는 Link Master 모델은 다시 Link Master을 호출한다.

② DeT를 가진 Token Holder 모델은 전송될 데이터 프레임의 구성하기 위하여 Local Schedule 모델을 호출하며, 다른 DLE에게 메시지를 전송하거나 RT를 전달함으로써 Receiver/Responder 모델과 연결되어질 수 있다. 또한, 토큰의 사용이 끝난 경우에 DeT를 반납하기 위하여 Link Master 모델과 연결된다.

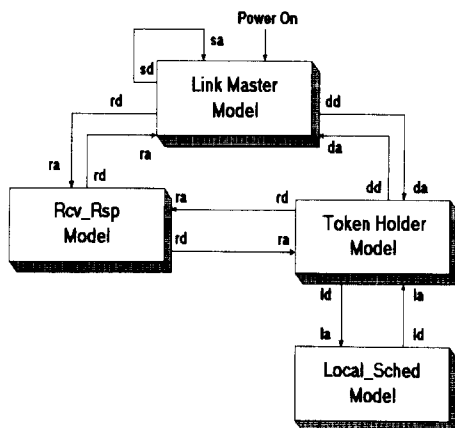


그림 5. 페트리 넷 모델의 연결.
Fig. 5. Connection of Petri Net Models.

③ 데이터 프레임의 수신을 나타내고 응답을 준비하는 Receiver/Responder 모델의 경우에는 자신에게 응답을 요구하는 DLE가 LAS인지 또는 DeT를 가진 DLE인지에 따라 Link Master 모델 또는 Token Holder 모델에 연결된다.

④ 토큰을 가진 DLE가 전송될 데이터 프레임의 구성하기 위한 Local Schedule 모델의 경우에는 데이터 프레임의 생성이 완료되면 Token Holder 모델을 호출하여 토큰을 가진 DLE가 구성된 프레임 전송하도록 한다.

III. 시뮬레이션 모델

IEC/ISA 필드버스의 시뮬레이션 모델은 크게 메시지 발생 부분과 메시지 전송에 관련된 프로토콜 부분으로 구성된다. 메시지 발생 부분은 다시 일반 메시지의 발생 부분과 스케줄링 메시지의 발생 부분으로 나누어지며, 메시지의 전송을 위한 프로토콜의 부분은 앞장에서 구성된 페트리 넷 모델을 근간으로 하여 구성되었다. 메시지의 발생 부분의 스케줄링 메시지의 발생 부분에서는 LAS가 링크 내의 모든 노드들에게 동등하게 DeT를 할당하도록 계획한다. 즉 LAS는 미리 정해진 일련의 순서대로 각각의 노드에게 DeT를 할당하여, 모든 노드들이 차례로 대기하고 있는 데이터 프레임을 전송을 할 수 있도록 한다.

메시지의 발생 부분에서는 3개의 우선 순위 메시지가 생성된다. 우선 순위가 가장 높은 우선 순위 0의 메시지는 Urgent 메시지로서 경고 신호와 같은 신속히 전송되어야 하는 길이가 짧은 메시지이고, 우선 순위 1의 메시지는 Normal 메시지로서 주기적으로 발생되며 실시간 처리가 요구되는 컨트롤러나 센서의 메시지 등이 될 수 있다. 또한, 우선 순위 2의 메시지 Time-Available 메시지로서 과일의 전송과 같이 실시간 처리를 요구하지 않는 길이가 긴 메시지 등이 될 수 있다. 위의 메시지 중 우선 순위 0과 2의 경우에는 반드시 전송되어야 하는 메시지이며 따라서 시뮬레이션 모델에서 이러한 메시지들에 대한 전송 큐의 용량은 데이터 손실이 일어나지 않는 만큼 충분히 크다고 가정한다. 그러나 우선 순위 1의 경우에서 센서 및 컨트롤러 데이터와 같이 주기적으로 발생하는 메시지는 가장 최근에 발생한 메시지가 컨트롤러 및 액츄에이터에 전달되어야 하므로 시뮬레이션 모델에서 전송큐의 용량을 1로 놓는다[22,23]. 이러한 메시지는 규격서에서 주어진 메시지의 데이터 크기의 한계 값인 64, 128, 256 octet의 크기를 가지며, 전체 네트워크의 트래픽 부하 조정은 메시지 생성 주기를 조정하는 방식을 택한다. 우선 순위 0과 2의 메시지 생성 주기는 Poisson 분포를 가지는 것으로 가정하며, 우선 순위 1의 메시지는 주기적으로 발생하는 것으로 가정한다. 본 논문에서는 DeT의 우선 순위를 2로 설정하여 각각의 DLE가 DeT를 수신하는 경우에 우선 순위 전송큐에 대기하고 있는 데이터들 가운데 우선 순위가 높은 데이터부터 차례로 전송되도록 한다.

본 논문에서 제시하는 IEC/ISA 필드버스의 시뮬레이터는 이산 사건 시뮬레이션 전용 언어인 SIMAN V[24]과 Watcom C 컴파일러를 혼용하여 구성하였다. 구성된 시뮬레이터의 내용은 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층의 MAC(Medium Access Control) 계층만을 구성하였고, LLC(Logical Link Control) 계층에서 제공하는 전송 링크의 설정, 해제 등의 기능은 모델의 단순화를 위하여 생략하였다. 또한 제어 시스템의 실시간 데이터 처리 성능을 분석하기 위하여 필드버스의 응용 시스템으로 센서, 컨트롤러, 액츄에이터 노드로 구성된 실시간 제어 시스템의 연속시간 시뮬레이션 모델을 포함하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 장에서는 시뮬레이션 모델을 이용하여 IEC/ISA 필드버스의 성능을 평가해 보고자 한다. 즉 각 노드에서 발생하는 메시지의 우선 순위에 따른 평균 전송 지연 시간을 네트워크의 트래픽 부하에 따라 측정하고, 또한 ES DLPDU에 의한 토큰 할당 방식에서 토큰 허용 시간 VC(RD)의 변화가 메시지의 평균 전송 지연 시간에 미치는 영향 등을 알아 보고자 한다. 또한 실제 시스템을 가정하여 네트워크 내의 노드들에 센서와 컨트롤러와 액츄에이터 기능을 부가하여 주기적으로 발생하는 메시지의 실시간 처리에 대한 성능을 평가한다. 시뮬레이션 모델에서 필드버스는 10개의 노드로 이루어지며, 이 중 3개의 노드가 ST를 전달함으로써 LAS의 기능을 수행할 수 있는 LM DLE들이다. 나머지 7개의 노드는 메시지를 발생하며 LAS에게 토큰을 할당받아 자신의 메시지를 전송하고, 전송을 마친 DLE는 LAS에게 할당받은 토큰을 다시 반납하여 다음의 전송을 가능하게 한다. LAS 역시 다른 DLE에게 토큰의 할당은 물론 스스로 메시지를 발생하여 전송하기도 한다. 각각의 DLE는 우선순위 0, 1, 2의 메시지들을 생성하며, 이들에 대한 전송큐는 따로 설치된다. 따라서 네트워크 내에 전송큐의 개수는 모두 30개이다. 네트워크 시스템에서 네트워크 전체의 트래픽 부하 G 와 우선 순위 i 의 트래픽 부하 G_i 의 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$G = \sum_{i=0}^2 G_i = \sum_{i=0}^2 \frac{N_i L_i}{BT_i} \quad (1)$$

(1)에서 N_i 는 우선 순위 i 의 노드 수이고, L_i 는 우선 순위 i 의 메시지의 길이이며, B 는 네트워크의 데이터 전송 속도이고, T_i 는 우선 순위 i 의 데이터 발생 주기의 평균값이다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 위의 식에 따라 T_i 를 조정함으로써 전체 네트워크에 주어지는 부하를 조정하게 된다. 이 때, 각 노드에서 발생하는 메시지의 길이 L_i 는 우선 순위 0, 1, 2의 메시지가 가지는 트래픽 부하의 비율을 $G_0 : G_1 : G_2 = 1:1:1$ 이 되도록 하여 우선 순위가 다른 메시지의 전송 조건을 동등하게 한다.

본 장에서는 세 가지의 상황에 대한 시뮬레이션을 한다. 1절에서는 LAS에 의해 주어지는 토큰의 형태가 한 번의 전송만을 가능하게 하는 ET DLPDU로 제한한 경우이고, 2절에서는 토큰을 받은 DLE가 제한된 시간 동안에 전송을 허가 받는 ES DLPDU의 경우이며, 3절에서는 필드버스를 제어 시스템에 적용하는 경우에 주기적으로 발생하는 센서 및 컨트롤러 데이터에 대한 실시간 처리를 평가하기 위한 실험을 행하기로 한다.

1. ET DLPDU 만을 이용한 경우

본 절에서 다루고자 하는 IEC/ISA 필드버스의 특성은 ET DLPDU만을 이용하여 토큰을 전송하는 경우에 시스템 내에서 생성되는 우선 순위가 다른 메시지들의 평균 전송 지연 시간을 비교해 보고자 한다. 앞서서도 언급하였듯이 ET DLPDU에 의한 토큰 할당에서는 한 번의 데이터 프레임의 전송만이 가능하며, 우선 순위가 다른 여러 메시지들이 대기하는 경우에는 우선 순위가 가장 높은 메시지가 전송된다. 그림 6에서 보는 바와 같이 우선 순위가 가장 높은 우선 순위 0의 메시지의 평균 전송 지연 시간이 가장 낮고 우선 순위 2의 평균 전송 지연 시간이 가장 높음을 알 수 있다. 또

한 네트워크 내의 트래픽이 증가될수록 각각의 우선 순위 데이터들에 대한 평균 지연 시간의 차이가 증가함을 알 수 있다

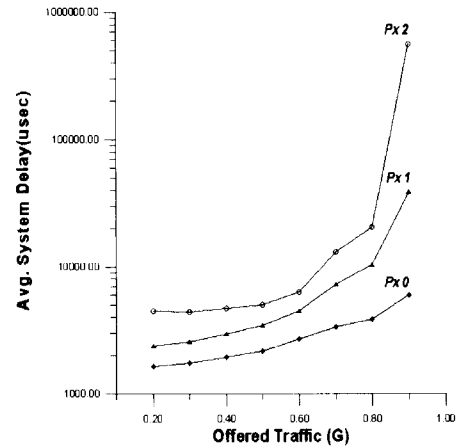


그림 6. ET DLPDU를 사용한 경우 평균 전송 지연 시간.

Fig. 6. Average transmission delay using ET DLPDU.

2. ES DLPDU 만을 이용한 경우

본 절의 실험은 LAS가 ES DLPDU를 이용하여 토큰을 할당하는 경우에 토큰 허용 시간의 변화에 대하여 우선 순위가 다른 메시지의 평균 전송 지연 시간을 검토해 보고자 한다. ES DLPDU에 의하여 토큰을 할당하는 방식에서는 DLE에 토큰 허용 시간을 제한하여 스케줄링된 기간 동안만 계획된 작업을 수행할 수 있도록 한다. 만약 토큰 허용 시간이 남아 있다 하더라도 그 시간이 다음의 프레임 전송하기에 부족하다면 DLE는 다음의 작업을 수행하지 않고 즉시 토큰을 LAS에게 반납을 하게 된다. 즉, 다음의 전송을 수행하기에 부족한 시간이라면 남은 토큰 허용 시간 얼마 안 남은 사이에 그 길과는 같다고 할 수 있다. 따라서 토큰의 허용 시간에 따른 각 메시지의 평균 전송 지연 시간은 얼마 동안에는 일정한 값을 유지하다가 특정한 임계값에 도달하면 변화하는 결과를 예측할 수 있다.

그림 7에는 네트워크의 트래픽 부하 G 가 0.3인 경우(트래픽 부하가 낮은 경우)에 토큰 허용 시간의 변화에 대한 각각의 우선 순위 메시지들의 데이터 평균 지연 시간이 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 토큰 허용 시간이 증가함에 따라 우선 순위 0과 1의 메시지 전송 지연 시간은 전체적으로 증가하는 반면에, 우선 순위 2의 지연 시간은 감소한다. 그림에서 토큰 허용 시간이 3280 μ sec인 경우에 우선 순위 0의 메시지의 평균 전송 지연 시간이 약간 증가한 반면 우선 순위 1, 2는 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이는 토큰의 사용 시간의 증가로 인하여 패킷 길이가 다른 낮은 우선 순위 메시지들에 대한 전송 기회가 순간적으로 증가되기 때문이다. 또한, 토큰 허용 시간 3390 μ sec에서 우선 순위 0의 메시지의 평균 전송 지연 시간이 줄어드는 반면 우선 순위 2는 증가함을 볼 수 있는데, 이는 토큰 허용 시간이 우선 순위 0의 메시지 하나를 더 전송할 수 있을 만큼 증가되어 네트워크 대역폭이 우선 순위 0에 할당되었기 때문이라고 볼 수 있다. 즉, 우선 순위 0의 메시지가 하나 더 전송되어지기 때문에 상대적으로 우선 순위가 낮은 메시지의 전송 지연 시간은 늘어나게 된다. 토큰 허용 시간 4310 μ sec부터는 한 동안 우선 순위 0, 1의 메시지의 평균 전송 지연 시간은 변화가 없는 데 반하여 우선 순위 2의 평균 전송 지연 시간이

줄어드는 현상을 보게 되는데, 이러한 결과는 네트워크 내의 트래픽이 $G=0.3$ 으로 낮기 때문에 우선 순위가 높은 메시지의 경우 전송할 메시지가 없고 토큰의 남은 허용 시간이 우선 순위 2의 메시지 전송에 사용되었다고 볼 수 있다. 토큰 허용 시간 $5030 \mu\text{sec}$ 을 넘어서면서 각 메시지의 전송 지연 시간은 토큰 허용 시간 변화에 영향을 받지 않음을 볼 수 있는데, 이는 토큰 허용 시간이 충분히 커서 토큰을 받은 각 노드는 자신이 가지고 있는 모든 우선순위의 메시지를 전부 전송할 수 있다는 것이다. 위의 결과와 같이 우선 순위가 다른 메시지의 평균 전송 지연 시간은 토큰 허용 시간이 변함에 따라서 상호간에 영향을 주며 변한다는 것을 볼 수 있게 된다.

그림 8에는 네트워크의 트래픽 부하 G 가 0.6인 경우에 토큰 허용 시간의 변화에 대한 각각의 우선순위 메시지들의 데이터 평균 지연 시간이 나타나 있다.

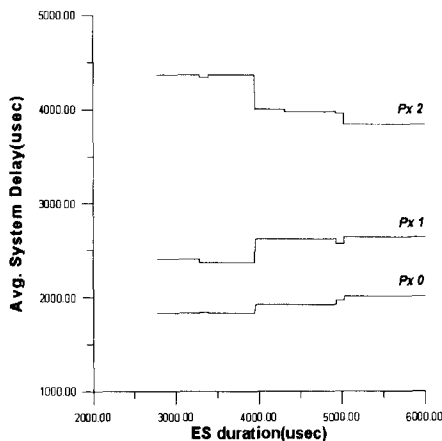


그림 7. ES DLPDU를 사용한 경우 평균 전송 지연 시간 ($G=0.3$).

Fig. 7. Average transmission delay using ET DLPDU ($G=0.3$).

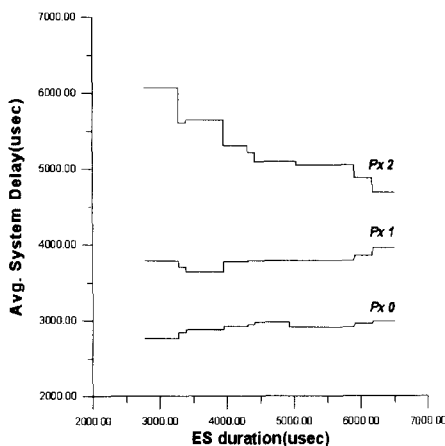


그림 8. ES DLPDU를 사용한 경우 평균 전송 지연 시간 ($G=0.6$).

Fig. 8. Average transmission delay using ET DLPDU ($G=0.6$).

트래픽이 0.6으로 증가하는 경우에는 트래픽이 0.3 인 경우에 비해 전송 지연 시간이 증가되고, 토큰 허용 시간의 변화에 대한 우선순위가 다른 메시지의 전송 지연 시간의 변화도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 8에서 토큰 허용 시간이 $3390 \mu\text{sec}$ 에서는 우선 순위 0, 2의 메시지의 평균 전송지연 시간이 증가하는데 반해 우선순위 1은 감소함을

볼 수 있는데, 이는 토큰 허용 시간이 우선 순위 1의 메시지를 하나 더 전송할 수 있을 만큼 증가되었음을 의미하며 결과적으로 우선 순위 0, 2의 전송 지연 시간이 늘어났다고 볼 수 있다. 토큰 허용 시간이 $4930 \mu\text{sec}$ 에서도 위와 비슷하게 해석되어질 수 있다. 즉 토큰의 허용 시간의 증가가 우선 순위 0의 메시지를 하나 더 전송할 수 있도록 한 경우이다. 토큰 허용 시간이 임계값 $6200 \mu\text{sec}$ 를 넘어서면서 G 가 0.3의 경우에서와 같이 모든 우선순위에 대하여 데이터 지연시간이 토큰 허용 시간의 변화에 영향을 받지 않게 되는 것을 볼 수 있다.

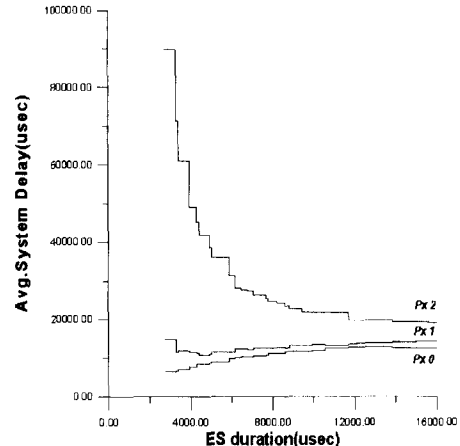


그림 9. ES DLPDU를 사용한 경우 평균 전송 지연 시간 ($G=0.9$).

Fig. 9. Average transmission delay using ET DLPDU ($G=0.9$).

그림 9에는 네트워크의 트래픽 부하 G 가 0.9(트래픽 부하가 매우 높은 경우)인 경우에 토큰 허용 시간의 변화에 대한 각각의 우선순위 메시지들의 데이터 평균 지연 시간이 나타나 있다. 트래픽 부하가 증가함에 따라 우선순위 메시지의 전송 지연 시간이 토큰 허용 시간의 변화에 대하여 받는 영향이 크게 증가됨을 볼 수 있다. 또한, 각각의 우선 순위 데이터들의 전송 지연 시간이 토큰 허용 시간에 영향을 거의 받지 않는 시간도 위의 G 가 0.3과 0.6의 결과에 비해 상대적으로 크게 증가됨을 볼 수 있다. 트래픽이 0.9인 경우에는 DLE에 할당된 토큰 허용 시간이 증가함에 따라 우선 순위 0과 2의 전송 지연 시간은 각각 증가와 감소하는 경향을 보이는 반면에 우선 순위 1의 메시지의 전송 지연 시간은 다른 우선 순위 데이터의 전송 지연 시간의 변화에 따라 증가와 감소를 반복하는 경향을 보이고 있다.

3. 제어 시스템의 실시간 데이터 처리

본 절에서는 필드버스의 노드에 컨트롤러와 플랜트로 구성된 제어 시스템을 접속시키는 경우에 필드버스에 의한 데이터 지연시간이 실시간 처리를 요구하는 제어 시스템에 미치는 영향을 분석한다. 그림 10에 나타난 바와 같이 플랜트 노드의 센서에서 주기적으로 발생하는 메시지는 필드버스 네트워크를 통하여 컨트롤러 노드로 보내고, 컨트롤러에서 생성된 메시지 역시 필드버스 네트워크를 통하여 플랜트 노드의 액츄에이터로 전달된다. 센서와 컨트롤러에서 발생하는 메시지는 우선 순위 1의 메시지이며, 10 msec 마다 주기적으로 발생된다고 간주한다. 본 논문에서 사용된 제어 시스템의 플랜트와 컨트롤러의 전달 함수는 (2)와 (3)에 나타나 있다.

$$G_p(s) = \frac{1}{(0.3s+1)(0.03s+1)} \quad (2)$$

$$G_c(s) = \frac{7(s+5)}{s} \quad (3)$$

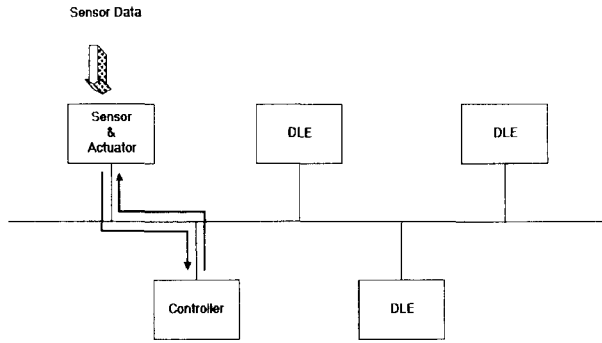


그림 10. 통신/제어 통합 시스템.
Fig. 10. Integrated communication and control system.

센서에서 주기적으로 발생하는 메시지는 전송 큐의 용량이 1이므로 이러한 데이터들이 전송큐에서 제거되지 않도록 하기 위하여는 다음의 센서 메시지가 생성되기 전에 콘트롤러에 전송이 완료되어야 한다. 콘트롤러에서는 도착된 센서 메시지를 이용하여 액츄에이터의 제어를 위한 제어 신호를 생성하며, 생성된 제어 신호는 다음의 제어 신호가 생성되기 이전에 액츄에이터로 전송이 완료되어야 한다. 이러한 각 과정은 10 msec이라는 제한된 주기 내에 이루어져야 한다. 만일에 10 msec의 주기 이내에 데이터 전송이 완료되지 못하는 경우에는 그림 11에 나타난 바와 같이 센서 데이터의 손실 또는 콘트롤러에서의 공허 샘플링 등의 바람직하지 못한 현상이 나타난다. 이러한 현상은 제어 신호에 고주파 잡음(jitter) 현상을 야기하며, 이는 제어 시스템의 성능 저하와 액츄에이터의 마모와 같은 바람직하지 못한 결과를 초래한다[22,25].

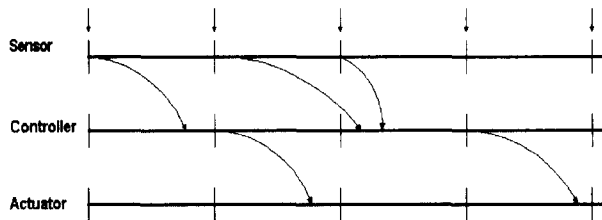


그림 11. 주기적 메시지의 전송.
Fig. 11. Transmission of periodic message.

본 절에서 제시되는 시뮬레이션 실험에서 10 msec의 주기로 데이터를 생성하는 센서 노드와 콘트롤러 노드를 제외한 다른 모든 노드들에서 우선순위 0, 1 및 2 메시지들에 데이터 생성 조건은 앞의 1, 2 절에서 주어진 시뮬레이션 실험의 경우와 동일하다. 센서 노드와 콘트롤러 노드 역시 우선 순위 0와 2의 메시지들을 다른 노드들과 동등한 조건으로 생성한다. 표 1은 ES DLPDU를 사용하여 토큰을 전달하는 경우에 네트워크 내의 센서와 콘트롤러 전송큐를 제외한 모든 데이터 전송큐에서 메시지 발생 주기를 변화시키므로서 트래픽 부하 G 를 0.3, 0.6, 0.9로 설정한 경우에 콘트롤러가 부착된 노드에서 토큰 허용 시간의 변화에 대한 콘트롤러의 제어 신호의 평균 전송 지연 시간과 전송큐 용량의 초과로 인하여 생성된 메시지 수에 대하여 전송이 이루어지지 못한 메시지의 개수를 보여준다. 트래픽 부하 G 가 0.3과 0.6인 경우에는 평균 전송 지연 시간이 상대적으로 적으며, 생성된 대부분의 데이터들이 전송된다. 그러나 트래픽

부하 G 가 0.9인 경우에는 평균 전송 지연 시간이 증가하는 동시에 많은 수의 데이터들이 전송되지 못함을 알 수 있다. 그림 12과 13에는 트래픽 부하 G 가 0.3, 0.6, 0.9인 경우에 토큰 허용 시간의 변화에 대한 제어 시스템의 제어 신호와 플랜트 출력을 나타낸다. 그림 12와 13에 나타난 바와 같이 트래픽 부하 G 가 0.3과 0.6인 경우에 제어 신호와 플랜트 출력의 결과가 거의 비슷하며, 토큰 허용 시간의 변화에 대하여 제어 시스템의 성능이 크게 영향을 받지 않는다. 이는 트래픽 부하가 높지 않은 경우에는 토큰 허용 시간의 변화에 관계없이 대부분의 센서 및 콘트롤러 데이터가 10 msec의 데이터 생성 주기 이내에 전송이 완료되기 때문이다. 트래픽 부하 G 가 0.9에서는 데이터 전송 지연 시간이 증가함에 따라 제어 성능이 크게 저하되며, 또한 전송에 실패한 데이터의 수가 증가함에 따라 그림 13에 나타난 바와 같이 제어 신호에서 고주파 잡음(jitter) 현상이 나타남을 볼 수 있다. 또한 G 가 0.9인 경우에는 토큰 허용 시간의 변화에 대한 제어 시스템의 성능 변화가 두드러지는 것을 볼 수 있다. 나타남을 볼 수 있다.

표 1. ES DLPDU를 사용한 경우 콘트롤러 메시지의 전송 결과.

Table 1. Result of controller message transmission using ES DLPDU.

VC(RD)	0.3		0.6		0.9	
	A.D.	F	A.D.	F	A.D.	F
2770	1.466	1/251	3.115	4/251	4.901	41/251
3950	1.325	1/251	2.877	5/251	4.7585	82/251
4410	1.330	1/251	3.044	7/251	4.547	81/251
4930	1.330	1/251	2.782	8/251	4.573	84/251
5900	1.325	1/251	2.959	8/251	4.512	88/251

A.D. : 평균지연시간(msec), F 전송 실패 메시지 개수.

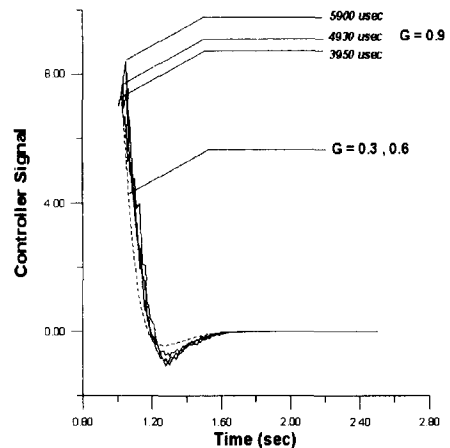


그림 12. ES DLPDU를 사용한 경우 제어 신호.
Fig. 12. Control signal using ES DLPDU.

표 2는 ET DLPDU로 토큰을 전달하는 경우에 센서와 콘트롤러를 제외한 네트워크 내의 다른 전송큐들에서 메시지 발생 주기를 증가시키므로서 시스템에 제공되는 트래픽 부하를 변화시킬 때, 콘트롤러에 의해서 생성된 제어 신호의 평균 전송 지연 시간과 전송 큐의 용량 초과로 인하여 전송에 실패한 메시지의 수를 보여준다. 또한 그림 14와 15는 트래픽 부하 G 가 0.3, 0.6, 0.9인 경우에 대하여 제어 시스템의 제어 신호와 플랜트 출력을 나타낸다. 이 경우에도 마

찬가지로 트래픽 부하 G 가 0.3에서 0.6까지의 경우에는 거의 비슷한 결과를 보이며, 트래픽 부하가 높은 $G=0.9$ 의 경우는 제어 성능이 크게 저하됨을 알 수 있다. 이는 앞서서의 분석과 같이 트래픽의 증가에 따라 전송 지연 시간과 전송에 실패한 메시지의 개수가 증가하기 때문이다.

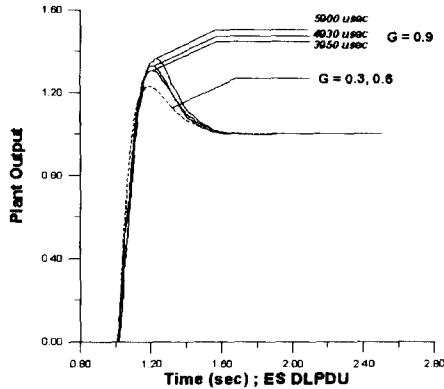


그림 13. ES DLPDU를 사용한 경우 플랜트 출력.
Fig. 13. Plant output using ES DLPDU.

표 2. ET DLPDU를 사용한 경우 콘트롤러 메시지의 전송 결과.
Table 2. Result of controller message transmission using ET DLPDU.

G	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
A.D.	1.208	1.395	1.753	2.204	3.110	3.207	3.855	5.088
F.	1	2	0	1	6	10	26	47

A.D. : 평균지연시간(msec), F 전송 실패 메시지 개수.

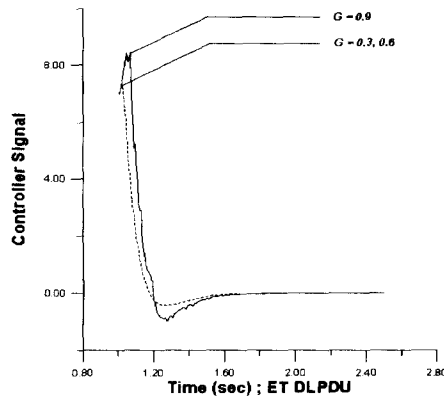


그림 14. ET DLPDU를 사용한 경우 제어 신호.
Fig. 14. Control signal using ET DLPDU.

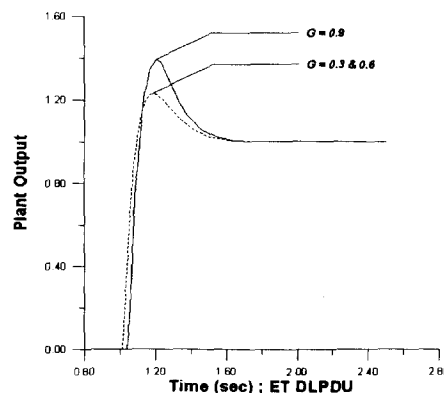


그림 15. ET DLPDU를 사용한 경우 플랜트 출력.
Fig. 15. Plant output using ET DLPDU.

V. 결론 및 추후 연구 사항

본 논문에서는 필드버스의 국제 표준안으로 제시되고 있는 IEC/ISA 필드버스에 대한 성능을 해석하였다. 먼저 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 프로토콜을 성능 해석이 가능하도록 단순화하여 이에 대한 페트리 넷 모델을 개발하였으며, 페트리 넷 모델의 논리적 동작 원리를 SIMAN 시뮬레이션 언어로 구현함으로써 필드버스의 이산 사건 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 또한 필드버스에 접속되는 제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여 제어 시스템의 연속 시간 시뮬레이션 모델과 네트워크의 이산 사건 시뮬레이션 모델을 통합하였다. 본 논문에서는 필드버스의 성능을 분석하기 위하여 네트워크 파라미터의 변화에 대한 시스템의 성능의 변화를 분석하였으며, 특히 ES DLPDU를 사용하는 경우에 각 노드에 할당되는 토큰 허용 시간이 우선순위 데이터의 전송 지연 시간에 직접적으로 영향을 미침을 알 수 있었다. 따라서 주어진 트래픽 부하에 대하여 토큰 허용 시간을 어떻게 설정하여야 할 것인가가 IEC/ISA 필드버스를 설계하는데 있어서 매우 중요한 문제로 대두된다. 본 연구를 통하여 개발된 시뮬레이션 모델은 주어진 트래픽 부하와 토큰 허용 시간에 대하여 각각의 우선 순위 데이터의 전송 지연 시간을 비롯하여 필드버스에 접속된 제어 시스템의 성능까지도 예측 가능하도록 하며, 따라서 IEC/ISA 필드버스를 설계하는데 있어서 매우 긴요한 도구로 사용될 수 있을 것이다.

본 연구를 통하여 개발된 모델은 IEC/ISA 필드버스의 93년 규격서를 기준 하여 작성되었다. IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층 규격서는 현재 완성 단계에 있으며 93년 규격서와 큰 차이는 없으나, 일부 변경된 내용에 대하여서는 추후에 규격서가 완성되는 대로 본 시뮬레이션 모델을 완성된 규격서에 따라 수정, 보완할 예정이다. 본 논문에서는 네트워크 파라미터와 네트워크 시스템의 성능과의 관계를 분석하였으며, 추후 연구 사항으로 IEC/ISA 필드버스 시스템의 성능을 최적화 하기 위한 네트워크 파라미터 값을 선정할 수 있는 필드버스 네트워크 시스템의 설계기법을 제시할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] J. R. Piemental, *Communication Networks for Manufacturing*, Prentice-Hall, 1990.
- [2] Special Issue on Communication for Manufacturing, *IEEE Network*, vol. 2, May, 1988.
- [3] MAP 3.0 Specification 1993 Release, World Federation of MAP/TOP Users Groups, 1993.
- [4] 홍승호, "MAP: 공장자동화를 위한 네트워크의 표준", 대한기계학회지, 35권, 5호, pp. 427-441, 1995년 5월.
- [5] International Organization for Standardization, Basic Reference Model for Open System Interconnection, ISO 7498, 1984.
- [6] 홍승호, "센서레벨 네트워크 필드버스 기술 개요", 전자공학회지, 21권, 4호, pp. 97-95, 1994년 4월.
- [7] 홍승호, "생산자동화를 위한 통신망: 필드버스 기술개요", 정밀공학회지, 11권, 5호, pp. 12-24, 1994년 10월.
- [8] DIN 19 245 PROFIBUS Standard, Version 4.0, August, 1987.
- [9] FIP Club Functional Specifications, Club FIP, Bp 850, 54011 Nancy, Cedex, France.
- [10] ISA-dS50.02 *Fieldbus Standard for Use in In-*

- dustrial Control Systems, Part 4: Data Link Protocol Specification*, Instrument Society of America, 1993.
- [11] ISO/IEC 8802-4 ANSI/IEEE Std 802.4 *Token-passing bus method and physical layer specifications*, 1985.
- [12] A. P. Jayasumana, "Throughput analysis of the IEEE 802.4 priority scheme," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 565-571, June, 1989.
- [13] J. W. Pang and F. A. Tobagi, "Throughput analysis of a timer controlled token passing protocol under heavy load," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 694-702, July, 1989.
- [14] O. C. Yue and C. A. Brooks, "Performance of the timed token scheme in MAP," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, pp. 1006-1012, July, 1990.
- [15] A. P. Jayasumana and G. G. Jayasumana, "Simulation and performance evaluation of 802.4 priority scheme," *Proc. IEEE/ACM Symp. Simul. Comput. Networks*, Aug., 1987.
- [16] H. Takagi, "Effects of the target token rotation time on the performance of a timed-token protocol" *Proc. PERFORMANCE 90*, Edinburgh, Scotland, pp. 363-370, Sept., 1990.
- [17] S. H. Hong, "Approximate analysis of timer controlled priority scheme in the single-service token-passing systems," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 2, pp. 206-215, April, 1994.
- [18] E. de Souza e Silva, H. R. Gail and R. R. Muntz, "Polling systems with server timeouts and their application to token passing networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 3, pp. 560-575, Oct., 1995.
- [19] A. Di Stefano and O. Mirabella "Evaluating the field bus data link layer by a petri net-based simulation" *IEEE Trans. on Industrial Electron.* vol. 38, pp 288-297, Aug., 1991.
- [20] S. Cavlieri, A. Di Stefano and O. Mirabella "Optimization of acyclic bandwidth allocation exploiting the priority mechanism in the fieldbus data link layer", *IEEE Trans. on Industrial Electron.*, vol 40, pp. 297-306, June, 1993.
- [21] J. L. Peterson, *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Prentice-Hall, 1981.
- [22] A. Ray and Y. Halevi, "Integrated communication and control systems: Part I-Analysis and Part II-Design considerations," *ASME J. Dyn. Sys. Meas. & Cont.*, vol. 110, pp. 367-381, Dec., 1988.
- [23] A. Ray, S. H. Hong, S. Lee and P. J. Egbelu, "Discrete-event/continuous-time simulation of distributed data communication and control systems," *Trans. Society Comput. Simul.*, vol. 5, pp. 71-85, Jan., 1988.
- [24] C. D. Pegden, R. E. Shannon and R. P. Sadowski, *Introduction to Simulation Using SIMAN*, McGraw-Hill, 1995.
- [25] S. H. Hong, "Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems", *IEEE Trans. Contr. Syst. Technology.*, vol. 3, pp. 225-230, June, 1995.



이성근

1971년 5월 7일생. 1994년 한양대 제어계측공학과(공학사), 1996년 동대학원 졸업(공학석사). 1996년 ~ 현재 고등기술연구원 생산기술연구실 연구원. 관심 분야는 생산자동화와 산업용 네트워크 시스템임.



홍승호

1956년 5월 31일생. 1982년 2월 연세대 기계공학과(공학사), 1985년 5월 텍사스 공대 기계공학과 (공학석사), 1989년 8월 펜실베니아주립대 기계공학과 (공학박사). 1989년 ~ 1992년 한국전자통신연구소 선임연구원, 1992년 ~ 현재 한양대 제어계측공학과 조교수. 관심분야는 분산제어 및 자동화 네트워크와 위성 관제 및 제어시스템 등임.