

# IEC/ISA 필드버스의 우선 순위 성능 분석

## (Performance Analysis of Priority Scheme in the IEC/ISA Fieldbus)

洪承鎬 \* , 高晟準 \*\*

(Seung Ho Hong and Seong Jun Ko)

### 요 약

본 논문에서는 필드버스의 국제 규격인 IEC/ISA 필드버스의 1996년도 제안서를 토대로 데이터 링크 계층에 대한 성능을 시뮬레이션 기법을 통하여 해석한다. 이 연구를 위해 스케줄링 기능과 우선 순위 기능을 포함하는 데이터 링크 계층의 이산사건 시뮬레이터를 개발하였고, 이를 통하여 IEC/ISA 필드버스에서 제공하는 우선 순위 기능의 동작과 실시간 데이터의 전송 특성에 영향을 주는 네트워크 파라미터들을 파악하였다. 또한 시뮬레이션 모델을 이용하여 IEC/ISA 필드버스가 구축될 수 있는 실제의 여러 네트워크 시스템 환경에 대하여 네트워크 파라미터의 변화에 대한 IEC/ISA 필드버스의 데이터 전송 지연 시간의 특성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 개발된 시뮬레이션 모델에서는 또한 응용 프로세스로 제어 시스템의 연속시간 시뮬레이션 모델을 통합함으로써, 데이터 전송 지연 시간이 필드버스에 접속된 제어 시스템의 제어 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구를 통하여 개발된 시뮬레이션 모델은 네트워크의 성능을 미리 예측 가능하게 하며, 따라서 IEC/ISA 필드버스가 도입되는 제어 및 자동화 시스템의 설계시 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

### Abstract

This paper investigates the performance characteristics of the data link layer of the 1996 version of IEC/ISA fieldbus which is developed as international standard of fieldbus. A discrete-event simulation model of the data link layer of IEC/ISA fieldbus is developed. Using the simulation model, this paper identifies the network parameters that influence the performance of priority scheme and real-time data transmission, and analyzes the delay performance of IEC/ISA fieldbus with respect to the change of network parameters. The simulation model also integrates continuous-time simulation model of a control system as application process. Using the integrated simulation model, this study investigates the effect of network-induced delay on the performance of control system. Since the simulation model developed in this study can predict the network performance, it will be effectively utilized in the design phase of control and automation systems that adopt the IEC/ISA fieldbus.

### I. 서 론

최근의 자동화 시스템에서는 제어 및 자동화 기능

을 수행하는 컴퓨터들을 네트워크로 통합하는 컴퓨터 통신망 기술의 사용이 확산되고 있다. 자동화 시스템에서는 제한된 시간 이내에 처리가 완료되어야 하는

\* 正會員, 漢陽大學校 制御計測工學科  
(Department of Control and Instrumentation Engineering, Hanyang University)

\*\* 正會員, LG産電 電力研究所  
(Electrotechnology R&D Center, LG Industrial

Systems Co., Ltd.)

※ 이 연구는 1997학년도 한양대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음

接受日字: 1998年3月13日, 수정완료일: 1998年7月1日

많은 양의 실시간 데이터가 발생한다. 따라서 첨단 제어 및 자동화 시스템을 실시간으로 운용 및 관리하는데 있어서 선결하여야 할 가장 중요한 과제 중의 하나는 막대한 양의 자동화 관련 데이터들을 실시간으로 전송하는 통신 기술을 확보하는 것이다<sup>[1,2]</sup>. 1980년대 초반부터 생산 자동화 환경에서 서로 다른 기종의 자동화 장비들 간의 통신을 위한 표준화된 네트워킹 시스템으로 MAP(Manufacturing Automation Protocol)이 개발되었다<sup>[3]</sup>. MAP은 공장 자동화 환경에서 매우 다양한 통신 기능을 제공하는 네트워크 시스템이다. 그러나 MAP은 구조상 OSI(Open Systems Interconnection) reference model에서 제시하고 있는 7 계층을 모두 가지고 있어 산업 현장의 필드에 설치된 각종 필드 장비들 간의 실시간 통신을 지원하기에는 적합하지 않은 시스템으로 인식되고 있다. 1980년대 후반부터는 산업 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 OSI에서 제시한 7계층 통신망 구조 가운데 물리 계층, 데이터 링크 계층, 응용 계층의 3 계층만으로 구성되며, 자동화 시스템의 필드에 설치된 각종 센서, 루프제어기, PLC, 모터, 밸브, 로봇, CNC 등의 필드 기기에서 생성되는 데이터를 실시간으로 전송한다<sup>[4]</sup>.

IEC(International Electrotechnical Commission)와 ISA(Instrument Society of America)에서는 필드버스의 국제 표준으로 IEC/ISA 필드버스<sup>[5,6]</sup>의 규격을 작성하고 있다. IEC/ISA 필드버스는 데이터 링크 계층에서 토큰 순환에 의한 데이터 전송 방식과 스케줄링에 의한 데이터 전송 방식을 동시에 지원하는 프로토콜로, PROFIBUS, WorldFIP 등과 같이 이미 개발이 완료되어 현재 산업 현장에서 사용되고 있는 기존의 필드버스 프로토콜들의 장점을 선별하여 새로이 제안되고 있는 필드버스의 국제 표준이다. 현재 산업 현장에서는 필드버스의 국제 표준이 제정되지 않은 상태에서 서로 호환성이 보장되지 않는 여러 필드버스 프로토콜들이 공존하고 있다. 그러나 추후 IEC/ISA 필드버스의 국제 표준 모델이 완성되면 사용자는 제어 및 자동화 시스템 구축시 특정 회사의 필드 장비에 종속되지 않고 원하는 필드 장비를 표준화된 필드버스

에 접속시켜 시스템을 구축할 수 있게 된다.

IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층 성능 해석에 대한 연구는 90년도 제안서를 토대로 한 연구 결과<sup>[7]</sup>와 93년도 제안서를 기준으로 한 연구 결과<sup>[9]</sup>가 있다. [7]에서는 IEC/ISA 필드버스의 규격의 개발되기 시작한 초기 단계의 90년도 제안서에서 제안된 두 가지 토큰 전달 방식(circulated token 과 delegated token)의 차이점을 페트리네트를 기반으로 하는 시뮬레이션 모델을 통하여 비교 분석하였다. [9]에서는 93년도 제안서를 바탕으로 하여 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층 페트리네트 모델을 개발하였고, 이를 바탕으로 시뮬레이션 모델을 개발하여 제안된 프로토콜의 성능을 평가하였다. 그러나 현재 국제 규격으로 인증 단계에 있는 96년도 제안서는 90, 93년도 IEC/ISA 필드버스 제안서에 비하여 상당히 많은 부분이 바뀌었다. 특히 데이터 링크 계층의 가장 기본이 되는 LAS(Link Active Scheduler)에 의한 토큰순환 방식과 스케줄링 방식에 있어서는 상당히 많은 변화가 있었다. 한 예로 93년도 제안서에서는 토큰 순환 방식의 경우 ET DLPDU를 통하여 토큰을 수신한 노드가 단 한번의 데이터 전송만을 허가 받는데 반하여, 96년도 제안서에서는 토큰 순환 서비스가 PT DLPDU에 의하여 동작되며, PT DLPDU를 수신한 노드는 PT duration과 V(TRT)라는 네트워크 파라미터에 의하여 데이터 전송 시간을 결정하도록 하였다. 스케줄링 방식에 있어서도 93년도 제안서에서는 모호하게 표현되었던 부분들이 96년도 제안서에서는 명확히 기술되었다.

IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층에 관한 연구 결과는 아직 많이 발표되고 있지 않다. Cavalieri<sup>[8]</sup>는 91년도 제안서를 바탕으로 하여 주기적 및 비주기적 데이터 트래픽이 공존하는 상황에서 주기적 트래픽에 대한 전송 요구 사항을 만족시키기 위하여 주기적 트래픽이 비주기적 트래픽에 비하여 우선적으로 전송되도록 하기 위한 우선 순위 기법을 제안하였다. Mnaouer<sup>[15]</sup>는 96년도 제안서를 토대로 IEC/ISA 필드버스에서 비주기적으로 발생하는 실시간 데이터의 전송 시간 요구 사항을 만족시키기 위하여 토큰 순환 시간을 제한하는 대역폭 할당 기법을 제시하였다. IEC/ISA 필드버스에서 주기적, 산발적 실시간 및 비실시간 데이터 트래픽의 성능 요구 사항을 만족시키기 위한 대역폭 할당 기법의 도출은 매우 중요한 연구 주

세 가운데 하나이다. 그러나 Mnaouer의 연구는 산발적 실시간 데이터라는 특정 트래픽에 대한 성능 요구 사항만을 고려하였다. 이 경우 산발적 실시간 트래픽의 성능 요구사항은 만족시킬 수 있어도 주기적 및 비실시간 트래픽에 대한 성능 요구사항은 만족시키지 못하는 경우가 발생하며, 따라서 이 방법의 실제 필드버스 시스템에 대한 적용 범위는 매우 제한된다.

IEC/ISA 필드버스에서 일반적으로 사용될 수 있는 대역폭 할당 기법을 도출하기 위하여는 먼저 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층에 대한 특성에 대하여 충분히 이해하여야 한다. 즉, 데이터 링크 계층의 네트워크 파라미터들이 필드버스의 성능에 미치는 영향을 충분히 분석하여야 한다. 본 논문에서는 필드버스의 국제 표준 규격으로 완성단계에 있는 96년도 제안서를 바탕으로 하여 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층에서 제공하는 우선 순위 기능과 실시간 데이터 스케줄링 기능에 대한 성능을 분석한다. 이를 위하여 본 연구에서는 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층을 모델링한 이산 사건 시뮬레이터를 개발하였고, 이를 이용하여 IEC/ISA 필드버스의 성능에 직접적인 영향을 미치는 각종 네트워크 파라미터들의 변화에 대한 우선 순위 데이터들의 전송 지연 시간 특성을 분석하였다. 또한 주기적으로 실시간 메시지를 발생하는 제어 시스템이 IEC/ISA 필드버스에 접속된 경우에 네트워크 파라미터들의 변화가 제어시스템의 제어 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통하여 제어 및 자동화 시스템에 IEC/ISA 필드버스를 도입하는 경우에 네트워크 시스템 설계자가 고려해야 할 필드버스 파라미터들의 특성을 제시하였다. 본 연구의 결과는 추후 넓은 응용 분야에 적용될 수 있는 IEC/ISA 필드버스의 대역폭 할당 기법을 도출하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

IEC/ISA 필드버스의 우선 순위 기능은 기본적으로 TRT(Token Rotation Timer)에 의하여 동작된다. 기존의 필드버스 프로토콜 가운데 TRT를 사용하여 우선 순위 기능을 제공하는 프로토콜로는 독일의 국가 표준 필드버스로 채택되어 현재 산업현장에서 널리 사용되고 있는 PROFIBUS<sup>[10,11]</sup>가 있다. IEC/ISA 필드버스와 PROFIBUS는 모두 우선 순위 기능에서 TRT를 사용하나, 이들의 동작에는 차이가 있다. 본 연구에서는 또한 PROFIBUS의 시뮬레이션 모델을 개발하여 IEC/ISA 필드버스의 우선 순위 기능과

PROFIBUS의 우선 순위 기능의 성능 차이를 비교 분석하였다.

본 논문은 모두 5장으로 구성되어 있다. 먼저 II장에서는 IEC/ISA 필드버스의 토큰 할당 방식과 DLPDU(Data Link Protocol Data Unit)를 중심으로 데이터 링크 계층 프로토콜에 대하여 기술하며, III장에서는 이러한 기능들을 구현한 이산 사건 시뮬레이터를 이산 사건 함수별로 기술한다. IV장에서는 시뮬레이터를 이용하여 측정된 IEC/ISA 필드버스의 데이터 지연 시간을 통하여 우선 순위 데이터의 전송에 관한 특성을 분석한다. 또한, 네트워크 시스템의 이산 사건 시뮬레이션 모델에 제어 시스템의 연속 시간 시뮬레이션 모델을 통합하여 필드버스 네트워크 파라미터의 변화에 대한 실시간 제어 데이터의 전송 특성을 분석한다. IEC/ISA 필드버스와 PROFIBUS의 우선 순위 기능을 비교 분석한 결과도 IV장에서 기술된다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결과와 추후 연구 사항을 기술한다.

## II. IEC/ISA 필드버스

IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층은 기본적으로 중앙제어 방식의 프로토콜을 사용하고 있으며 로컬 링크에는 최대 32개의 노드가 접속될 수 있다. IEC/ISA 필드버스의 물리 계층은 31.25Kbit/s, 1Mbit/s, 2.5Mbit/s의 전송 속도를 지원한다<sup>[6]</sup>. IEC/ISA 필드버스에 접속되는 노드는 구현되는 기능의 관점에서 Basic Class, LM(Link Master) Class, Bridge Class의 3가지 Class로 분류된다. Basic Class는 필드버스 기능의 최소 요구 사항을 수행한다. 즉, DLE(Data Link Entity)간의 경로 설정, 해제 및 데이터 교환 기능 등이 여기에 해당한다. LM Class는 같은 레벨의 DLE끼리 LAS(Link Active Scheduler) 기능을 교환하고 감시하며, 링크내의 다른 DLE들에게 노드 시간의 동기화를 목적으로 하는 링크 타이머 값을 제공한다. Bridge Class는 두 개의 이상의 로컬 링크를 연결하여 상호간에 데이터 교환이 이루어 질 수 있도록 한다.

IEC/ISA 필드버스에서 모든 메시지는 DLPDU(Data Link Protocol Data Unit)를 통하여 전송되며, DLPDU는 헤더와 데이터 영역으로 구성된다. IEC/ISA 필드버스에서는 DLPDU에 urgent,

normal, time-available의 세 가지 우선 순위를 제공한다. 하나의 DLPDU에 실어 보낼 수 있는 사용자 데이터의 크기는 우선 순위에 따라 urgent 우선 순위는 64 octet 이하, normal은 128 octet 이하, time-available은 256 octet 이하로 제한된다. 그러나, 경로 설정 및 해제에 관한 DLPDU는 time-available 우선 순위로 전송된다 하더라도 normal 우선 순위에서 허용하는 128 octet 이상의 데이터를 전송할 수 없다. 1996년도에 제안된 표준안에는 전송되는 메시지의 사용 목적에 따라 22가지 종류의 DLPDU가 표 1과 같이 정의되어 있다.

표 1. IEC/ISA 필드버스의 DLPDU  
Table 1. DLPDU in the IEC/ISA fieldbus.

EC	<i>Establishment Connection</i> , 전송의 초기화를 위해 상대방 DLE와의 경로 설정
DC	<i>Disconnect Connection</i> , 이미 설정된 경로를 해제
RC	<i>Reset Connection</i> , 이미 설정된 경로를 재설정
CA	<i>Compel Acknowledgement</i> , 제한된 양의 데이터 또는 응답을 요구
CD	<i>Compel Data</i> , 데이터 응답을 요구
ED	<i>Exchange Data</i> , DLE간의 데이터 상호 교환을 요구
DT	<i>Data</i> , 사용자 데이터 전송
SR	<i>Status Response</i> , 전송시 에러 발생 여부를 알리거나 LAS 기능 전달 요구에 대한 응답
CT	<i>Compel Time</i> , 링크 내의 DLE가 LAS에게 타이머 동기화를 요구
TD	<i>Time Distribution</i> , LAS가 링크 내의 모든 DLE의 동기화를 위해 타이머 값을 분배
RQ	<i>Round-Trip-Delay Query</i> , 두 DLE간의 전송 지연 시간 계산 요구
RR	<i>Round-Trip-Delay Reply</i> , 두 DLE간의 전송 지연 시간 계산값 응답
PN	<i>Probe Node</i> , 이전에 비활성이었던 DLE들에 대한 활성 여부 검사
PR	<i>Probe Response</i> , 현재 자기 노드의 활성 여부를 LAS에 보고
PT	<i>Pass Token</i> , LAS가 링크 내의 DLE들에게 순차적으로 delegated token을 전송
ES	<i>Execute Sequence</i> , LAS가 미리 스케줄링된 DLE들에게 delegated token을 전송
RT	<i>Return Token</i> , 링크 내의 DLE가 PT나 ES를 통해 받은 토큰을 LAS에게 반납
RI	<i>Request Interval</i> , 링크 내의 DLE가 LAS에게 토큰 사용 기간의 연장 요구
CL	<i>Claim LAS</i> , LM DLE가 링크를 초기화하거나 현재 LAS가 비활성인 경우에 LAS 기능 이전을 요구
TL	<i>Transfer LAS</i> , 현재의 LAS가 다른 LM DLE에게 LAS 기능 전달
WK	<i>WakeUp</i> , 비활성 상태의 DLE를 활성 상태로 전환
IDLE	<i>Idle</i> , 현재 활성 상태의 DLE를 비활성 상태로 전환

표 2. IEC/ISA 필드버스의 주요 변수, 카운터 및 파라미터

Table 2. Major variables, counters and parameters in the IEC/ISA fieldbus.

V(TTRT)	로컬 링크에서 LAS가 토큰이 한 바퀴 돌아올 시간의 상한치를 설정한 값
V(MST)	V(TTRT) 중에서 LAS가 동적으로 수행하는 스케줄링 작업에 할당할 링크 용량으로, 범위는 V(TTRT)의 0~74.6%이며 기본값은 25%.
V(ATRT)	로컬 링크에서 토큰이 링크 내의 활성 노드들을 한 바퀴 순환하는데 걸리는 실제 시간
V(TCL)	PT DLPDU를 통해 전송할 delegated token의 토큰 순환 리스트
C(RD)	ES나 PT DLPDU를 수신하여 데이터 전송권을 가진 DLE의 남아 있는 delegated token의 허용 시간을 기록
PT duration	PT DLPDU를 통해 인가되는 delegated token 사용 기간
ES duration	ES DLPDU를 통해 인가되는 delegated token 사용 기간

IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층에는 여러 가지 변수, 카운터 및 파라미터들이 정의되어 있는데, 이들 가운데 데이터 링크 계층의 성능과 직접적으로 관련되는 것들을 요약하면 표 2와 같다.

IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층 프로토콜은 토큰 순환 방식과 스케줄링 방식에 의한 데이터 전송 기능을 모두 지원하며, 전자의 경우에는 PT DLPDU, 후자의 경우는 ES 또는 CD DLPDU를 이용한다. IEC/ISA 필드버스에서 데이터 전송 권한을 부여하기 위해 사용되는 토큰은 delegated token이다. 즉, 로컬 링크의 데이터 전송 기능을 관장하는 LAS 노드는 PT DLPDU나 ES DLPDU를 통하여 delegated token을 전송함으로써 링크 내의 각 DLE들에 데이터 전송 권한을 부여한다.

PT DLPDU는 링크 내의 DLE들이 미리 지정된 순서에 따라 차례로 데이터를 전송하도록 하는 토큰 순환 서비스를 지원한다. PT DLPDU는 우선 순위를 가지며, 이를 통해 토큰을 받은 DLE는 PT DLPDU에 기록된 PT duration을 토큰 사용 기간을 저장하는 카운터인 C(RD)에 복사하고 PT duration 동안 DLE의 전송큐에 대기하고 있는 데이터 중 PT DLPDU의 우선 순위보다 낮지 않은 우선 순위를 가진 데이터만을 전송한다. 이 때 1 octet을 전송할 때마다 C(RD)는 1씩 감소하게 되고 0이 되면 데이터

전송을 중단한다. 토큰을 소유한 DLE는 대기하고 있는 데이터의 전송을 완료하였거나 C(RD)가 충분하지 못하여 더 이상 데이터 전송을 수행할 수 없는 경우에 토큰을 LAS에 반납한다. 토큰을 반납 받은 LAS는 토큰 순환 리스트인 V(TCL)을 참조하여 다음 DLE로 다시 PT DLPDU를 전송한다. LAS가 V(TCL)에 있는 모든 노드에 PT DLPDU를 한 번씩 전송하여 한 번의 토큰 순환을 완료하면 LAS는 토큰의 실제 순환 시간인 V(ATRT)를 계산하여 다음번 PT DLPDU 전송 시에 PT DLPDU의 우선 순위 반영한다. 즉, delegated token이 V(TCL)에 기록된 모든 DLE를 한 바퀴 완전히 돌았으면 LAS는 링크 파라미터인 V(TTRT)와 V(ATRT)를 비교하여  $V(ATRT) \leq V(TTRT)$ 이면 PT의 우선 순위를 한 단계 낮추고 반대의 경우는 한 단계 높여 준다. LAS가 처음으로 PT DLPDU를 전송할 때의 우선 순위는 normal로 설정된다.

PT를 통해 delegated token을 수신한 DLE는 자신의 큐에 CT DLPDU가 있는지 우선적으로 검사한다. 만일 CT DLPDU가 있는 경우에는 PT DLPDU의 우선 순위와 상관없이 LAS에 CT DLPDU를 전송한다. LAS는 CT DLPDU를 받으면 즉각 TD DLPDU를 생성하여 링크 내의 모든 DLE에게 전송하고 TD DLPDU를 수신한 DLE들은 LAS의 타이머의 값으로 자신의 타이머를 갱신하여 노드 시간의 동기화를 수행한다.

ES DLPDU에 의해 전송되는 토큰은 우선 순위를 갖고 있지 않으며, LAS가 미리 정의된 스케줄링 테이블에 따라 네트워크 내의 DLE들에게 데이터 전송 권한을 부여하는데 사용된다. LAS는 미리 스케줄링된 시간에 해당 DLE에 ES DLPDU를 통하여 delegated token을 전송한다. delegated token을 수신한 DLE는 PT DLPDU의 경우와 마찬가지로 ES DLPDU에 기록된 ES duration을 C(RD)에 복사하고 ES duration동안 미리 스케줄링된 작업들을 순차적으로 수행하고, 작업을 완료한 후에는 토큰을 LAS에게 반납한다. ES DLPDU에는 우선 순위가 없으므로 ES DLPDU를 수신한 DLE는 ES duration 동안 무조건 스케줄링된 데이터 전송 작업들을 수행한다. 토큰을 반납 받은 LAS는 다음번 ES DLPDU 전송이 스케줄링된 시간까지 남은 기간동안 링크 내의 활성 DLE를 검색하는 등의 링크 유지 보수 작업을 수

행하거나, PT 서비스를 수행하기에 시간이 충분한 경우에는 PT DLPDU를 전송하여 각 DLE에게 우선 순위 데이터 전송 권한을 부여한다. 스케줄링 테이블에 따라 다음으로 ES 서비스가 수행되어야 할 시간이 되면 LAS는 다시 ES DLPDU를 구성하여 스케줄링된 DLE로 delegated token을 전송한다.

LAS는 ES DLPDU 뿐만 아니라 CD DLPDU를 통하여서도 스케줄링에 의한 데이터 전송을 수행할 수 있다. CD DLPDU를 이용하는 경우에도 LAS는 미리 정의된 스케줄링 테이블에 따라 DLE들에게 CD DLPDU를 전송한다. CD DLPDU는 ES DLPDU의 경우와 달리 우선 순위를 가지고 있으며, CD DLPDU를 수신한 DLE는 CD DLPDU의 우선 순위보다 낮지 않은 우선 순위 데이터만을 선택하여 전송한다. 또한, ES DLPDU를 통하여 스케줄링 서비스를 수행하는 경우에 ES DLPDU를 수신한 DLE는 ES duration 동안 토큰을 보유함으로써 스케줄링 서비스를 연속적으로 수행할 수 있는데 반하여, LAS로부터 CD DLPDU를 수신한 DLE는 스케줄링된 단 한번의 스케줄링 서비스만을 수행한다. ES 또는 CD로 스케줄링 서비스를 수행하는 경우에 전체 링크 용량 가운데 스케줄링 작업에 할당되는 용량은 링크 파라미터인 V(MST)에 의하여 정의된다.

PT 또는 ES DLPDU를 통하여 delegated token을 수신한 DLE는 큐를 검색하여 다음에 수행되어야 할 작업을 선택한다. 선택된 데이터가 DT DLPDU인 경우에는 해당 데이터를 수신 DLE에 전송한다. 전송 큐를 검색하여 선택된 데이터가 타이머의 동기화를 요구하는 CT DLPDU인 경우에는 즉각 이를 보내고 TD 응답을 대기한다. 선택된 데이터가 전송 지연 시간 계산을 요구하는 RQ DLPDU인 경우에는 응답으로 RR DLPDU를 기다리게 된다. 만일에 선택된 데이터가 CD DLPDU라면 이는 링크 내의 다른 DLE에게 데이터 전송을 요구하는 경우이다. 즉, delegated token을 소유한 DLE는 CD DLPDU에 reply token을 실어서 전송하며, 이 때 reply token은 링크 내에서 dominant token이 된다. CD DLPDU를 통하여 reply token을 수신한 DLE는 데이터 전송 권한을 가지며, CD DLPDU의 우선 순위보다 낮지 않은 우선 순위 데이터를 큐에서 추출하여 DT DLPDU를 생성한 후 응답한다. 혹시 전송 과정 중에 에러가 발생한 경우에는 에러 코드를 포함하는 SR DLPDU를 생성

한 후 지정된 기간 이내에 응답한다. 만일 CD DLPDU를 전송한 DLE에서 지정된 기간 이내에 원하는 데이터를 수신하지 못한다면 V(MRC)(재시도 횟수를 제한하기 위한 변수로 최대 7회까지 허용)에 설정되어 있는 횟수만큼 반복해서 CD DLPDU를 전송한다.

Delegated token을 가진 DLE의 큐에 현재 전송하는 데이터 이후에 더 이상 전송할 데이터가 없으면 현재 전송하는 데이터의 frame control field의 최종 토큰 사용 서브 필드에 'F'라고 기록하여 전송하고 이렇게 기록된 DLPDU를 수신한 DLE는 현재의 데이터가 마지막 토큰 사용임을 알게 된다. 더 이상 자신의 큐에 전송할 데이터가 없으면 RT DLPDU를 생성하여 토큰을 LAS에게 반납한다. 토큰을 반납 받은 LAS는 스케줄링 테이블을 검사하여 다음번 스케줄링된 시간까지 PT DLPDU를 전송할 여유 시간이 있으면 V(TCL)의 리스트 중 V(DTA)(delegated token 이 마지막으로 전송된 주소를 기록하는 변수)에 기록된 주소의 바로 다음 주소로 PT DLPDU를 전송한다. LAS가 토큰을 반납 받은 후 다음번 ES DLPDU에 의한 데이터 전송 서비스를 수행하기 위하여 스케줄링된 시간까지의 동안에 새로운 PT 서비스를 수행할 만큼 충분한 시간이 남아 있지 않은 경우에는 DLE간의 전송 지연 시간을 계산하기 위해 측정하고자 하는 DLE에게 RQ DLPDU를 생성하여 전송한다. RQ DLPDU를 수신한 DLE는 측정된 전송 지연 시간 계산 값을 포함하는 RR DLPDU를 RQ DLPDU의 전송단으로 응답한다.

LAS는 링크의 유지 및 보수에 관한 작업을 수행하기 위하여 주기적으로 PN DLPDU를 생성하여 전송한다. PN DLPDU는 이전에 활성화되어 있지 않았던 DLE들에 대한 활성 여부를 검사하기 위한 목적으로 사용되며, PN DLPDU를 받은 DLE는 자신이 현재 존재하고, 활성 상태가 되려고 함을 LAS에게 알리기 위해 PR DLPDU를 생성하여 LAS에게 응답한다. LAS는 PN DLPDU를 전송한 후 PR DLPDU를 미리 지정된 모니터링 기간동안 기다린다. 만일 모니터링 기간동안 링크를 감시하여 링크의 비활성 상태가 계속되면 새로 활성화된 DLE가 없는 것으로 간주하고 다음의 계획된 작업을 수행한다. 링크에 새로운 DLE가 들어왔다는 응답을 수신하면 그 주소를 V(TCL)에 추가하여 다음 토큰 순환 서비스에서 토큰

을 할당할 수 있도록 한다.

링크 작동 중에 LAS가 고장난 경우에는 링크 내에 존재하는 여러 개의 LM DLE가 비활성 LAS에게 CL DLPDU를 전송하여 LAS 기능의 이전을 요구한다. 보통은 가장 낮은 주소의 LM DLE가 이 작업을 수행한다. LAS의 고장을 발견하면 LM DLE는 CL DLPDU를 보내고 지정된 기간동안 링크의 비활성 상태가 계속되는지를 감시하고 그 후에도 활성이 없으면 즉시 똑같은 CL을 한 번 더 보낸 후에 Random(0...3)×V(ST)동안 감시한다(여기서 V(ST)는 링크의 비활성 상태를 모니터링하기 위한 변수로 범위는 1~4095 octet duration이다). 그래도 링크의 비활성 상태가 계속되면 LM DLE 자신이 scheduler token을 가지고 있다고 가정하고 LAS 기능을 시작한다. 만일 CL DLPDU를 수신한 LAS가 LAS 기능을 이전하지 않고 계속 사용하고자 하는 경우에는 SR DLPDU로 응답하고, 기능 이전을 승낙하는 경우에는 우선 순위가 urgent로 고정된 TL DLPDU를 전송하여 LAS 기능 이전을 허가한다.

IEC/ISA 필드버스에서는 전원 소비를 절약하거나 빈번하게 사용되지 않아 항상 활성 상태일 필요가 없는 DLE를 FDC(Fractional Duty Cycle) DLE로 설정한다. FDC DLE는 사용되지 않는 동안에는 비활성 모드로 지정되며 사용이 필요하면 다시 활성 모드로 전환할 수 있다. 이 때 비활성(Sleep) 상태의 DLE를 활성(Full Operation) 상태로 전환하기 위해 사용하는 것이 WK DLPDU이다. WK DLPDU는 LAS만 사용할 권한이 있고, 우선 순위는 urgent로 고정되어 있으며, 이전에 스케줄링된 결과에 따라 전송한다. 반대로 활성(Full Operation) 상태의 DLE를 비활성(Sleep) 상태로 전환하기 위해서는 IDLE DLPDU를 사용한다. IDLE DLPDU는 scheduler token이나 delegated token을 가진 DLE가 전송할 수 있으며 우선 순위는 urgent로 고정되어 있다.

### III. IEC/ISA 필드버스 시뮬레이션 모델

네트워크 시스템은 사건이 발생할 때마다 시스템의 상태가 변화하는 이산 사건 시스템으로 분류된다<sup>[12]</sup>. 따라서 필드버스의 시뮬레이션 모델은 이산 사건 시스템의 모델링을 위한 전용 도구를 사용하여 개발할 수 있으며, 본 논문에서는 SIMAN/ARENA<sup>[13]</sup>를 이용

하여 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이산 사건 시스템 모델링 기법의 기본 개념은 시스템의 상태가 시간의 변화에 대하여 어떻게 변화하는가를 추적하는 기법으로, 시스템의 현 상태에서 앞으로 발생 가능한 모든 사건들 탐색하여 이들을 발생 시간의 순서에 따라 사건 스케줄링 리스트에 차례로 기록한다. 시뮬레이션 모델의 진행은 사건 스케줄링 리스트에 기록된 사건들을 발생되어야 할 사건의 순서에 따라 차례로 발생시킴으로써 시스템의 상태를 변화시키고, 변화된 상태에서 새로이 발생할 수 있는 사건들을 사건 스케줄링 리스트에 추가하는 방식으로 진행된다.

본 논문에서 사용하는 시뮬레이터는 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층만을 구현하였으며 전송 링크의 설정, 해제 기능은 생략하였다. 또한 실제 시스템에서 빈번하지 않아 성능에 큰 영향을 미치지 못하는 LAS 고장 또는 프레임간의 충돌 등의 경우도 배제하였다. 본 시뮬레이터는 bridge의 개념을 배제하고 32개 노드로 구성된 하나의 로컬 링크만을 다루었으며, 각종 파라미터의 변화에 대한 여러 가지 조건의 실험을 수행할 수 있도록 하였다. IEC/ISA 시뮬레이터에서 각 노드에 대한 모델은 크게 데이터 발생부와 토큰 수신시에 작동하는 데이터 전송부로 구성된다. 각 노드에서 데이터 발생 부분은 다시 PT 서비스에 의해 전송되어야 할 PT 데이터 발생부와 ES 스케줄링 서비스에 의해 전송되어야 할 ES 데이터 발생부로 나뉜다. 토큰 수신시에 데이터 전송에 관한 부분은 본 논문의 II장에 기술한 바와 같이 동작되도록 구현되었다. 또한 본 시뮬레이션 모델에는 IEC/ISA 필드버스에서 제공하는 DLPDU들의 전송 및 수신에 관한 상태 천이의 모델이 포함되어 있고, 큐잉 지연 시간 및 전송 지연 시간을 측정하여 이를 통계 처리하는 기능도 포함되어 있다.

본 연구를 통하여 개발된 시뮬레이션 모델은 IEC/ISA 필드버스의 데이터 링크 계층에서 수행되는 거의 모든 기능들이 모델링되었으나, 본 논문에서는 이들 가운데 데이터 전송 기능만을 요약하여 기술하기로 한다. 그림 1에는 각 노드에서 토큰 수신과 데이터 전송 사건을 중심으로 한 시뮬레이션 모델의 사건 스케줄링 구조가 나타나 있다. 시뮬레이션 모델의 초기화 과정에서는 네트워크 관련 파라미터들이 입력된다. 또한, 모든 노드들에 대하여 *message\_generation* 사건을 스케줄링한다. *message\_generation* 사건에서는

새로운 메시지를 발생시켜 메시지에 관련된 속성(즉, 전송 노드, 수신 노드, 메시지 길이, 발생 시간, 우선 순위 등)을 부여한 후 전송큐에 삽입한다. 또한 각 노드마다 주어진 메시지 발생 주기에 따라 다음에 새로운 메시지가 발생되도록 *message\_generation* 사건을 스케줄링한다. 스케줄링된 *message\_generation* 사건은 사건 스케줄링 리스트에 기록되어 해당 노드에서 연속적으로 메시지가 생성되도록 한다. 초기화 과정에서는 또한 LAS를 지정하고, 지정된 LAS 노드에서 토큰의 발생을 위하여 *first\_token\_passing* 사건을 스케줄링한다. *first\_token\_passing* 사건에서는 토큰 전달 시간 후에 *receive\_token* 사건이 발생되도록 이를 스케줄링한다. *receive\_token* 사건에서는 각 노드에서 토큰을 수신한 후 전송큐에 대기하는 메시지를 전송하는 과정이 진행된다. 즉, PT DLPDU를 통하여 토큰을 수신한 노드는 PT duration의 값을 C(RD)에 복사하고 C(RD)가 충분한 경우 PT DLPDU의 우선 순위에 부합하는 메시지를 선택하는 *select\_data* 사건을 스케줄링한다. 메시지가 전송되면 메시지 전송에 걸리는 시간 이후에 메시지가 수신되도록 *receive\_data* 사건이 스케줄링된다. C(RD)가 충분하지 못한 경우에는 RT DLPDU를 구성하여 토큰을 LAS에게 반납하는 *transmit\_RT* 사건과 LAS가 RT DLPDU를 수신하여 반납 받은 토큰을 처리하는 *receive\_RT* 사건을 스케줄링한다. 토큰을 받은 LAS는 다음으로 ES 서비스가 스케줄링된 때까지 남은 시간이 PT 서비스를 수행하기에 충분하지 검사하여 충분한 경우에는 V(TCL)에 기록된 모든 활성 노드들에 대한 토큰 순환이 완료되었는지를 검사한다. 토큰 순환이 완료되었으면 V(TTRT)와 V(ATRT)를 비교하여 PT DLPDU의 우선 순위를 조정된 후에 PT DLPDU를 전송하는 *transmit\_PT* 사건을 스케줄링한다. 다음 ES 서비스 스케줄링 시간까지의 남은 기간이 PT 서비스를 수행하기에 충분하지 않으면 스케줄링된 노드에 ES DLPDU를 전송하는 *transmit\_ES* 사건을 스케줄링한다.

데이터 전송 지연 시간의 계산은 데이터가 발생하는 순간부터 데이터가 네트워크를 통해 전송이 완료되는 기간까지를 측정하였으며, 이 때 큐에 삽입되는 순간부터 큐에서 추출되는 시간까지의 큐잉 지연 시간도 포함될 수 있도록 하였다. 본 시뮬레이션 모델에서는 네트워크 시스템의 이산 사건 모델에 응용 프로세스로

제어 시스템의 연속 시간 모델이 추가로 구현되었다. 제어 시스템은 콘트롤러와 플랜트로 구성되며, 콘트롤러 노드와 플랜트의 센서 노드에서는 일정한 샘플링 주기로 콘트롤러 데이터와 센서 데이터가 샘플링 되어 전송큐에 삽입되도록 구현하였다. 본 시뮬레이션 모델에서 제어 시스템이 접속된 노드의 경우에 콘트롤러 데이터와 센서 데이터를 저장하는 큐의 용량은 1로 제한하였다. 이는 제어 시스템이 가장 최근에 생성된 데이터를 사용하도록 하기 위해서이다. 그러나, 제어 데이터가 아닌 데이터를 저장하는 큐나 제어 시스템이 접속되지 않은 나머지 노드들의 전송큐는 데이터 손실이 전혀 일어나지 않을 만큼 그 용량을 충분히 크게 설정하였다.

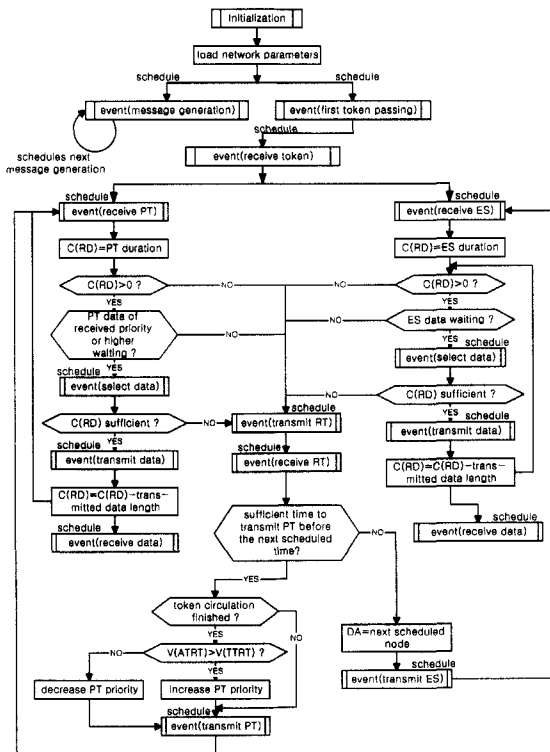


그림 1. IEC/ISA 필드버스 시뮬레이션 모델의 사건 스케줄링 구조

Fig. 1. Structure of Event Scheduling in the IEC/ISA Fieldbus Simulation Model.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 장에서는 앞에서 기술한 시뮬레이터를 이용하여 IEC/ISA 필드버스의 성능을 평가한다. 먼저 1절에서는 제어 시스템이 추가되지 않은 IEC/ISA 필드버

스 시스템의 전송 지연 시간에 대해 세 가지의 시나리오로 분석하며, 2절에서는 1절의 필드버스 시뮬레이션 모델에 제어 시스템을 추가하여, IEC/ISA 필드버스에서 실시간 전송을 요구하는 제어 데이터의 처리에 관한 성능을 제어 시스템 및 플랜트 출력을 통해 알아본다. 3절에서는 IEC/ISA 필드버스와 PROFIBUS의 우선 순위 성능을 비교 분석한다.

1. IEC/ISA 필드버스의 전송 지연 시간

본 절에서는 IEC/ISA 필드버스에서 데이터의 전송 지연 시간에 관한 특성을 (i) PT DLPDU를 이용한 토큰 순환 서비스만 이용한 경우, (ii) ES DLPDU를 이용한 스케줄링 서비스만 이용한 경우, (iii) PT 서비스와 ES 서비스를 모두 이용하는 경우의 세 가지 시나리오에 대하여 필드버스 파라미터 값의 변화에 대한 각 우선 순위 데이터의 전송 지연 시간을 분석한다. CD DLPDU를 이용하여 데이터를 전송하는 경우는 PT 또는 ES 서비스의 일부로 포함될 수 있으므로 이에 대한 성능 해석은 생략하였다.

본 논문에서는 네트워크의 전송 속도를 1 Mbit/s로 하였다. 네트워크 상에 발생하는 메시지들의 전체 트래픽 부하와 우선 순위별 트래픽 부하는 다음과 같이 정의된다.

$$G = \sum_{i=0}^3 G_i = \sum_{i=0}^3 \frac{N_i \cdot L_i}{B \cdot T_i}$$

여기서  $G_i$ 는 각 우선 순위별 트래픽 부하이며,  $i$ 는 우선 순위를 구분한다. 우선 순위 1(P=1), 2(P=2), 3(P=3)은 각각 PT 데이터에서 time-available, normal, urgent DLPDU의 우선 순위이다. 우선 순위 0은 ES 데이터로 우선 순위가 없는 경우이다.  $N_i$ 는 네트워크 내의 우선 순위가  $i$ 인 전송큐의 수,  $L_i$ 는 우선 순위  $i$  데이터의 길이,  $B$ 는 전송속도,  $T_i$ 는 우선 순위  $i$  데이터 발생 주기의 평균값이다. 본 시뮬레이션 실험에서 데이터 길이는 해당 우선 순위 데이터가 가질 수 있는 최대 데이터 길이로 지정하였으며, 발생 주기  $T_i$ 는 트래픽 부하  $G=0.8$ (높은 트래픽),  $G=0.5$ (중간 트래픽),  $G=0.2$ (낮은 트래픽)에 대하여 전체 트래픽 부하에서 각 우선 순위별 데이터가 차지하는 트래픽 부하의 비율이 균일하게 분포되도록 조정하였다.

1) PT 서비스만 이용한 경우

본 절에서는 LAS가 ES DLPDU는 사용하지 않고



PT DLPDU만 이용하여 V(TCL)에 정의된 활성 노드에 순차적으로 delegated token을 전송하도록 하는 경우에 데이터 지연 시간의 성능을 분석한다. PT 서비스만 수행하는 경우에 네트워크의 성능에 영향을 미치는 파라미터는 PT duration과 V(TTTR)가 있으므로 이 두 가지 파라미터의 변화에 대한 전송 지연 시간 특성을 조사하였다. 이 실험에 사용된 시뮬레이션 조건은 표 3과 같다. 각각의 노드는 우선 순위 1, 2, 3 데이터에 대한 전송큐를 각각 따로 가지고 있다. 각 우선 순위별 데이터의 길이는 제안서에서 제시하는 최대 길이에 오버헤드가 포함된 길이의 데이터가 지수 분포로 발생하도록 하였다. 시뮬레이션은 높은 트래픽 ( $G=0.8$ ), 중간 트래픽( $G=0.5$ ), 낮은 트래픽( $G=0.2$ )의 세 가지의 트래픽 부하에서 실험을 수행하였으며, 전체 트래픽 부하에서 우선 순위 1, 2, 3 트래픽 부하가 차지하는 비율은 동일하다.

표 3. PT 서비스에서 시뮬레이션 조건  
Table 3. Simulation condition for PT service.

종류	우선 순위	길이 (octet)	전송큐 수	발생 분포	발생 주기 (ms)		
					G=0.8	G=0.5	G=0.2
PT	1	268	32	지수분포	257	412	1029
	2	140	32	지수분포	134	215	538
	3	76	32	지수분포	73	117	292

먼저 트래픽 부하가  $G=0.8$ 이고 PT duration을 500 octet duration으로 고정시킨 상태에서 V(TTTR)가 변화하는 경우에 토큰에 지정되는 우선 순위의 횟수와 우선 순위 데이터들의 전송 지연 시간이 그림 2와 3에 나타나 있다. 그림 2에서 보면 V(TTTR)가 증가할수록 토큰의 우선 순위는 1로 인가되는 횟수가 많아지고 우선 순위 3으로 인가되는 횟수는 줄어든다. 즉, V(TTTR)가 크게 설정될수록 낮은 우선 순위 데이터의 전송 권한이 증가하여 낮은 우선 순위 데이터의 전송 지연 시간은 감소하고 높은 우선 순위 데이터의 전송 지연 시간은 서서히 증가하는 추세를 보인다. 그림 3에서 보면 V(TTTR)가 작게 설정될수록 우선 순위간에 데이터 전송 지연 시간의 차이가 증가한다. 또한 V(TTTR)의 설정 값을 매우 크게 증가시키면 각 우선 순위 데이터의 전송 지연 시간은 더 이상 변하지 않고 일정한 값이 유지된다. V(TTTR)가 매우 작게 설정된 경우(5ms 이하 구간)

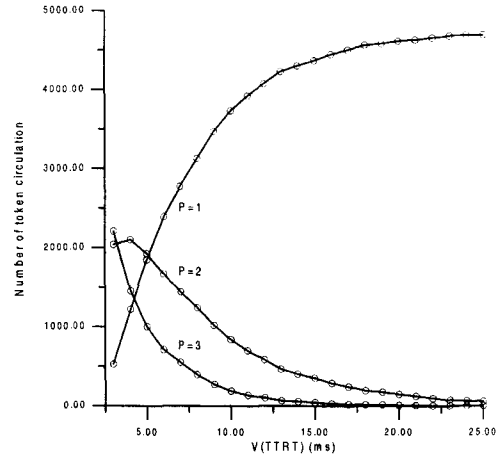


그림 2. 토큰의 우선 순위별 순환 횟수  
Fig. 2. Number of priority assigned to the delegated token.

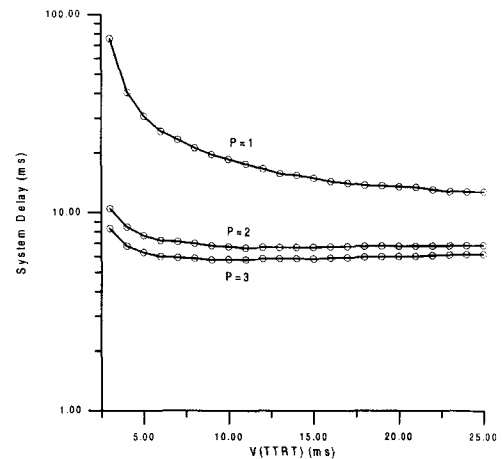


그림 3. V(TTTR)의 변화에 대한 전송 지연 시간 ( $G=0.8$ )  
Fig. 3. System delay with respect to the change of V(TTTR)( $G=0.8$ ).

에는 모든 우선 순위 데이터의 지연 시간이 커짐을 알 수 있다. 우선 순위는 이전의 V(ATRT)에 따라 결정되는데 V(TTTR)가 작은 경우에 PT의 우선 순위가 3으로 설정되면 우선 순위 3의 데이터만이 전송된다. 우선 순위 3의 데이터들이 모두 전송된 후에는 다른 우선 순위 데이터는 전송되지 않고 토큰은 공회전을 한다. 토큰이 공회전되면 V(ATRT)가 작아진다. 즉, 다음번 PT DLPDU 순환시 토큰의 우선 순위가 하향 조정되고 낮은 우선 순위의 데이터가 전송된다. 이 때 낮은 우선 순위 데이터의 길이는 상대적으로 크므로 전송에 많은 링크 용량을 소비하며, 따라서

V(ATRT)가 증가하게 되고 LAS에 의해 PT DLPDU의 우선 순위는 다시 상향조정된다. 즉, V(TTTR)가 매우 작게 설정되는 경우에 PT DLPDU의 우선 순위가 지주 바뀌고, V(ATRT)의 편차는 증가한다. 토큰 패싱 방식의 프로토콜에서 데이터 지연시간은 토큰 순환시간의 평균값과 편차에 직접적으로 비례한다<sup>[16]</sup>. V(ATRT)의 편차가 증가하면 전송큐에 도착한 데이터는 큰 V(ATRT)를 만날 확률이 증가되고, 따라서 데이터의 지연 시간은 증가한다.

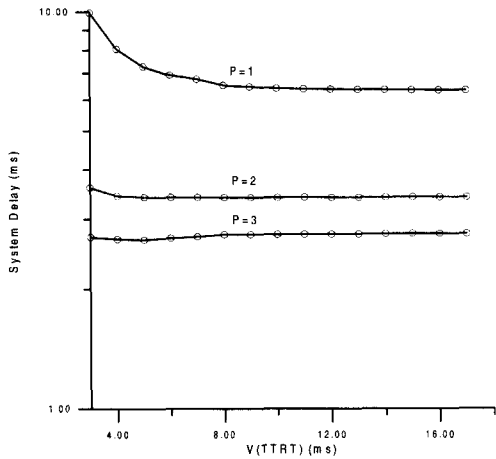


그림 4. V(TTTR)의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.5)

Fig. 4. System delay with respect to the change of V(TTTR)(G=0.5).

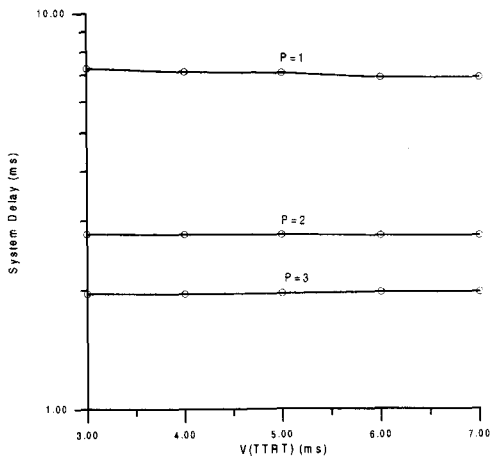


그림 5. V(TTTR)의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.2)

Fig. 5. System delay with respect to the change of V(TTTR)(G=0.2).

그림 4와 5에는 각각 네트워크 트래픽 부하가 각각 G=0.5, 0.2인 경우의 지연 시간이 나타나 있다. 트래픽 부하 G가 낮아질수록 V(TTTR) 변화에 대하여 우선 순위간 전송 지연 시간의 차이가 감소되고 G가 매우 낮은 경우에는 V(TTTR)의 변화에 대하여 우선 순위 데이터간에 큐잉 지연 시간의 차이는 현격하게 줄어든다. 즉, 네트워크의 트래픽 부하가 작을수록 V(TTTR)의 영향이 줄어들었다는 것을 알 수 있다. 그림 5에서 우선 순위간에 데이터 지연 시간의 차이는 우선 순위가 다른 메시지의 전송 시간과 메시지 발생 빈도가 다르기 때문이다.

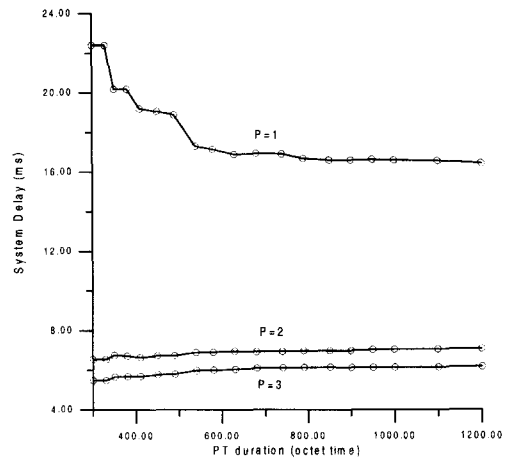


그림 6. PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.8)

Fig. 6. System delay with respect to the change of PT duration(G=0.8).

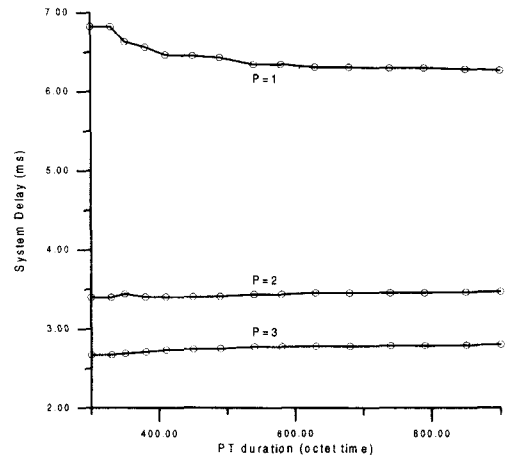


그림 7. PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.5)

Fig. 7. System delay with respect to the change of PT duration(G=0.5).

다음으로  $G=0.8$ 이고  $V(TTRT)=10ms$ 로 설정되었을 때, PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간의 변화가 그림 6에 나와 있다. PT duration이 증가할수록 우선 순위 1의 데이터 지연 시간은 감소하는 반면 우선 순위 2와 3의 데이터 지연 시간은 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 PT duration이 증가할수록 토큰을 소유한 노드가 낮은 우선 순위 데이터를 전송할 확률이 높아지기 때문이다. 그림 7, 8은 트래픽 부하가 각각  $G=0.5, 0.2$ 인 경우에 대해 PT duration의 변화에 따른 전송 지연 시간의 변화를 계산한 결과이다. 그림 7과 8의 결과로부터 트래픽 부하가 낮아질수록 전송 지연 시간은 감소하며 PT duration도 영향이 줄어들다는 것을 알 수 있다.  $V(TTRT)$ 와 PT duration에 대해 다양한 실험을 수행한 결과, 일반적으로  $V(TTRT)$ 의 변화가 우선 순위 데이터들의 성능에 미치는 영향은 PT duration의 변화에 의한 영향보다 현저한 것으로 나타났다. 따라서 IEC/ISA 필드버스의 우선 순위 기능은  $V(TTRT)$ 로 조정하는 것이 효과적이다.

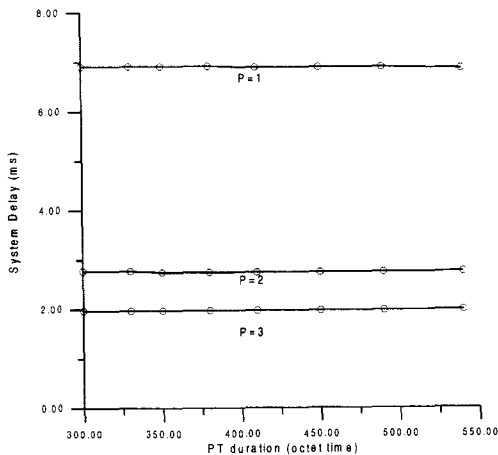


그림 8. PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간 ( $G=0.2$ )

Fig. 8. System delay with respect to the change of PT duration( $G=0.2$ ).

2) ES 서비스만 이용한 경우

본 절에서는 LAS가 미리 스케줄링된 노드에 ES DLPDU를 통해 토큰을 할당하는 방식만을 사용하는 경우에 전송 지연 시간의 특성에 대하여 기술한다. IEC/ISA 필드버스에서 ES DLPDU를 통한 토큰 전달 방식에서는 전송되는 데이터의 우선 순위가 없다.

ES 서비스는 주로 주기적으로 발생하는 데이터를 미리 스케줄링된 순서에 따라 전송하는 용도로 사용되므로 본 시뮬레이션 실험에서는 표 4와 같이 각 노드에서 데이터가 주기적으로 생성되는 것으로 하였다. 또한 발생하는 데이터의 길이는 최소 길이부터 최대 길이까지 균일 분포로 할당되도록 하였다. ES 서비스만을 이용하는 경우에 네트워크의 성능에 영향을 미치는 파라미터로는 ES duration이 있다. 따라서 본 절에서는 ES duration의 변화가 전송 지연 시간에 미치는 영향을 조사하였다. 본 실험에서 LAS의 스케줄링 테이블에서는 ES duration의 주기를 가지고 각 노드에 토큰을 분배하는 것으로 스케줄링하였다. 이 경우에 토큰을 수신한 노드는 최대 ES duration 동안 생성된 데이터를 전송한다.

표 4. ES 서비스에서 시뮬레이션 조건  
Table 4. Simulation condition for ES service.

종류	우선 순위	길이 (octet)	전송큐 수	발생 분포	발생 주기 (ms)		
					$G=0.8$	$G=0.5$	$G=0.2$
ES	없음	UNIF (13,268)	32	주기적	45	72	180

그림 9는  $G=0.2, 0.5, 0.8$ 의 세 가지 트래픽 부하에서 ES duration에 대한 전송 지연 시간의 변화를 나타낸 것이다.  $G=0.8$ 의 높은 부하의 경우에는 ES duration이 작으면 노드의 전송큐에서 대기하는 데이터의 개수가 증가함에 따라 지연 시간이 크지만, ES duration이 증가함에 따라 한 주기 동안에 전송할 수 있는 데이터의 양이 증가하면서 전체적인 전송 지연 시간은 줄어들기 시작한다. 이후부터는 ES duration이 증가할수록 전송 지연 시간이 급격히 감소하다가 어느 값 이상이 되면 다시 서서히 증가하는 형태를 보인다. 전송 지연 시간이 다시 증가하는 이유는 본 실험에서는 ES duration의 주기를 가지고 토큰이 분배되는 것으로 가정하였으므로 큐에 쌓인 데이터를 모두 전송할 수 있을 정도 이상의 ES duration을 갖게 되면 필요 이상으로 큰 값의 ES duration에 의해 링크 용량을 낭비하게 되기 때문이다.  $G=0.8$ 의 높은 부하에서 ES duration이 매우 낮게 설정된 경우(200ms 이하 구간)에 ES duration의 증가에 따라 지연 시간이 잠시 증가하는 이유는 한 노드가 토큰을 할당받은 후 ES duration이 소진될 때까지 토큰을 소유함에 따라

네트워크 내의 다른 노드들에 대한 큐잉 지연 시간이 증가하기 때문이다. 트래픽 부하가  $G=0.5$ 와  $0.2$ 인 낮은 부하의 경우에는 ES duration이 작더라도 큐에 남아 있는 데이터를 모두 전송하기에 충분하므로 ES duration이 증가함에 따라 전송 지연 시간도 단조 증가하며, 두 경우에서 전송 지연 시간은 큰 차이가 없다. 위의 결과에 미루어 ES duration은 각 노드의 전송큐에서 대기하는 데이터가 모두 전송될 수 있는 시간만큼으로 설정하는 것이 바람직하다. 모든 노드에서 데이터가 주기적으로 생성되는 경우에 전송큐에서 대기하는 데이터의 개수는 각 노드에서의 데이터 생성 주기와 밀접한 관계가 있으며, 따라서 ES 서비스를 수행하는 경우에는 각 노드에서의 데이터 생성 주기와 데이터 전송 시간을 고려하여 LAS의 스케줄링 테이블을 신중히 작성할 필요가 있다.

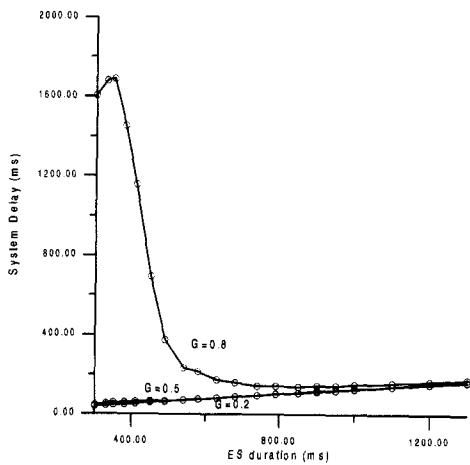


그림 9. ES duration에 대한 전송 지연 시간  
Fig. 9. System delay with respect to the change of ES duration.

3) PT와 ES를 동시에 이용한 경우

본 절에서는 앞 절에서 기술한 PT와 ES 서비스를 동시에 사용하는 경우에 대하여 기술한다. PT와 ES 서비스를 동시에 이용하는 경우에 네트워크의 성능은  $V(TTTR)$ , PT duration,  $V(MST)$ 에 의해 영향을 받는다. 본 절에서는  $V(TTTR)$ , PT duration,  $V(MST)$ 의 변화가 전송 지연 시간에 미치는 영향을 조사하였다.  $V(TTTR)$  주기 내에서 PT 서비스와 ES 서비스의 관계는 그림 10에 나타나 있다. LAS가 가지고 있는 스케줄링 테이블에는 네트워크 내에 존재하는 각 노드의 ES 서비스 시작 시간과 서비스 주기

가 기록되어 있다. LAS는 스케줄링 테이블을 참조하여 미리 스케줄링된 노드에 ES DLPDU를 전송하여 스케줄링된 데이터를 ES duration 동안 전송할 수 있도록 한다. ES 서비스가 종료되어 토큰이 LAS에 반납되면 LAS는 다음번 ES 서비스 시작 시간까지 PT 서비스를 수행할 수 있는지 확인한다. 이 때 서비스가 가능할 정도의 시간(즉, LAS가 PT DLPDU를 전송하고, 이를 수신한 노드가 PT duration 동안 데이터를 전송할 시간)이 충분하면  $V(TCL)$  상의 다음 DLE에게 PT DLPDU를 전송하고, 충분하지 않은 경우에는 다음 스케줄링된 시간까지 기다렸다가 ES DLPDU를 스케줄링된 DLE에게 전송한다.

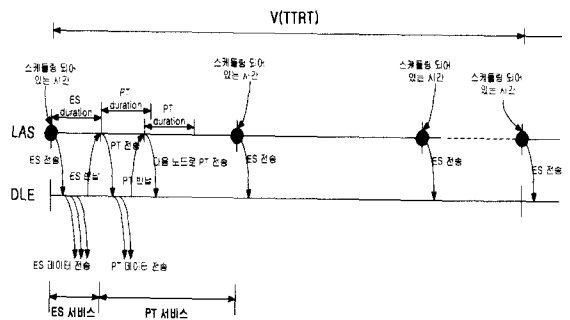


그림 10. PT 서비스와 ES 서비스의 관계  
Fig. 10. Relationship between PT and ES services.

표 5. PT와 ES 서비스에서 시뮬레이션 조건

Table 5. Simulation condition for PT and ES services.

종류	우선 순위	길이 (octet)	전송큐 수	발생 분포	발생 주기 (ms)		
					$G=0.8$	$G=0.5$	$G=0.2$
PT	1	268	32	지수분포	343	549	1372
	2	140	32	지수분포	179	287	717
	3	76	32	지수분포	97	156	389
ES	없음	ES duration	32	주기적	$V(TTTR)$		

본 절에서 수행하는 시뮬레이션 조건은 표 5와 같으며 PT 서비스의 경우 각 우선 순위별 데이터가 차지하는 트래픽 부하는 모두 동일하게 설정하였다. 각각의 노드는 PT 서비스를 위한 우선 순위 1, 2, 3 큐와 ES 서비스를 위한 하나의 큐를 가지고 있다. 본 실험에서 스케줄링에 의하여 ES 데이터를 전송하는

경우에 각 노드에서 ES 데이터는 V(TTRT)의 주기로 발생하며 생성되는 데이터의 길이는 ES duration과 같은 값으로 설정하여 ES 서비스를 할당받은 각 노드는 ES duration의 모든 기간을 사용하도록 하였다. 본 실험에서 주기적으로 발생하는 ES 데이터는 발생 즉시 전송될 수 있도록 스케줄링 되었다.

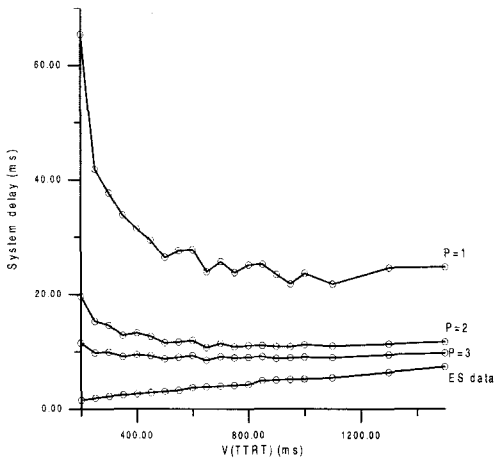


그림 11. V(TTRT)의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.8)

Fig. 11. System delay with respect to the change of V(TTRT)(G=0.8).

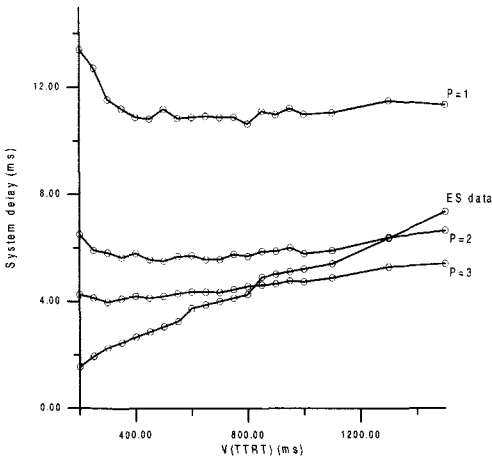


그림 12. V(TTRT)의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.5)

Fig. 12. System delay with respect to the change of V(TTRT)(G=0.5).

먼저 트래픽 부하가  $G=0.8$ 이고 PT duration=300 octet time,  $V(MST)=0.25$ 인 경우에 V(TTRT) 값의 변화에 대한 전송 지연 시간의 변화가 그림 11에

나타나 있다. 그림 11에서 보면 PT 데이터의 전송 지연 시간에 대한 특성은 앞의 1절의 PT 서비스만을 이용한 경우와 유사하다. 그러나 PT 서비스만 이용한 경우에 비해 PT와 ES 서비스를 모두 이용하는 경우에는 V(TTRT)의 변화에 따라 PT 데이터의 전송 지연 시간이 증감을 반복하는 현상이 일어난다. 이는 V(TTRT)의 일정 비율이 ES 서비스에 할당되었으므로 V(TTRT)의 증가가 PT 서비스의 빈도만을 증가시키는 것이 아니고 ES 서비스 시간도 증가시켜 PT DLPDU에 의해 할당되는 토큰의 우선 순위에서 더 민감한 영향을 끼치기 때문이다. 또한 ES 데이터의 지연 시간은 V(TTRT)가 증가함에 따라 단조 증가하는데, 이는 ES 데이터의 길이를 V(TTRT)와 V(MST)에 의해 결정되는 파라미터인 ES duration과 같도록 하였으므로 V(MST)가 고정된 상태에서 V(TTRT)가 증가하면 ES 데이터의 길이가 증가하여 전송 지연 시간이 증가하기 때문이다. 그림 12와 13은 각각  $G=0.5$ 와  $0.2$ 인 경우에 V(TTRT)의 변화에 대한 전송 지연 시간이다. 그림 11, 12, 13으로부터 트래픽 부하가 낮을수록 전송 지연 시간은 감소하고 V(TTRT)의 영향도 줄어든다는 것을 알 수 있다.

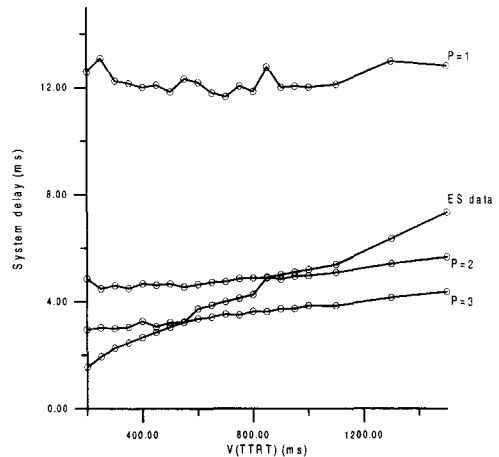


그림 13. V(TTRT)의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.2)

Fig. 13. System delay with respect to the change of V(TTRT)(G=0.2).

다음에는  $V(TTRT)=300$  ms,  $V(MST)=0.25$ 로 설정된 경우에 PT duration의 변화가 전송 지연 시간에 미치는 영향을 조사한다. 그림 14는  $G=0.8$ 의 높은 부하에서 전송 지연 시간을 얻은 결과이다.

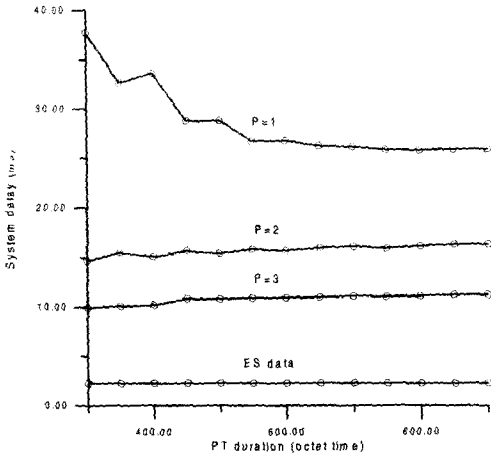


그림 14. PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간( $G=0.8$ )  
 Fig. 14. System delay with respect to the change of PT duration( $G=0.8$ ).

전송 지연 시간은 일정한 값을 갖게 된다. 그림 15와 16은 트래픽 부하가  $G=0.5$ 와  $0.2$ 인 경우에 PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간이 나타나 있으며, 트래픽이 낮을수록 PT duration의 변화에 대한 영향이 감소함을 보여준다.

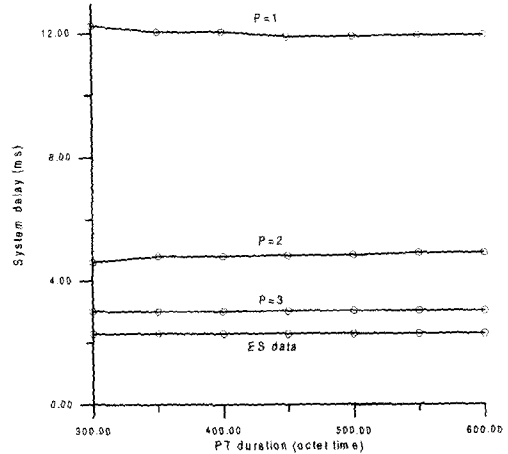


그림 16. PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간( $G=0.2$ )  
 Fig. 16. System delay with respect to the change of PT duration( $G=0.2$ ).

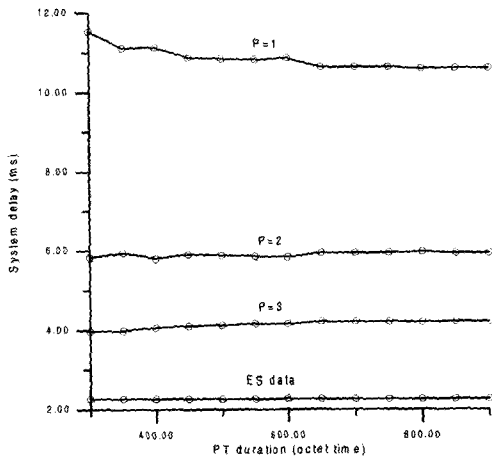


그림 15. PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간( $G=0.5$ )  
 Fig. 15. System delay with respect to the change of PT duration( $G=0.5$ ).

그림 14에서 보면  $V(TTRT)$ 와  $V(MST)$ 가 고정되어 있으므로 ES duration이 고정되어 ES 데이터의 지연 시간은 일정하다. 우선 순위가 1인 데이터는 PT duration이 증가할수록 전송될 기회가 증가되기 때문에 전송 지연 시간이 감소한다. 이에 반하여 우선 순위 2와 3의 데이터는 우선 순위 1 데이터의 전송에 링크 용량을 빼앗기게 되므로 전송 지연 시간이 증가한다. 하지만 트래픽 부하가 정해져 있으므로 PT duration이 어느 값에 이르르면 각 우선 순위 데이터의

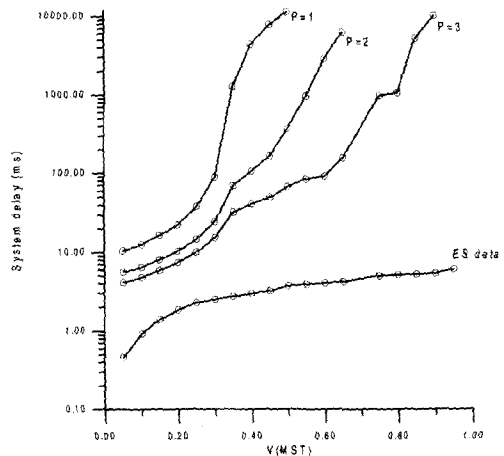


그림 17.  $V(MST)$ 의 변화에 대한 전송 지연 시간( $G=0.8$ )  
 Fig. 17. System delay with respect to the change of  $V(MST)$ ( $G=0.8$ ).

다음으로 그림 17에는  $G=0.8$ 이고  $PT=300$  octet time,  $V(TTRT)=300$  ms로 고정된 경우에  $V(TTRT)$ 중에 ES 서비스에 할당하는 비율을 나타내는  $V(MST)$ 를 변화시켜 얻은 전송 지연 시간이 나타

나 있다.

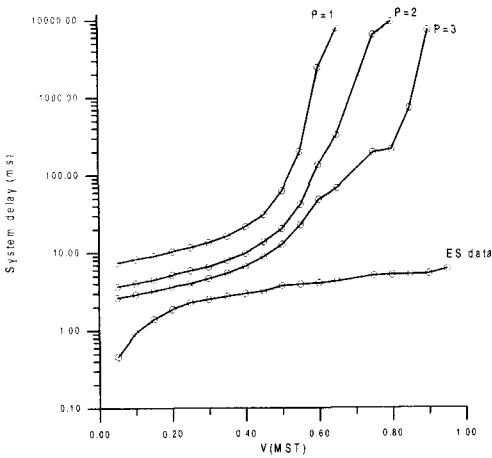


그림 18. V(MST)의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.5)

Fig. 18. System delay with respect to the change of V(MST)(G=0.5).

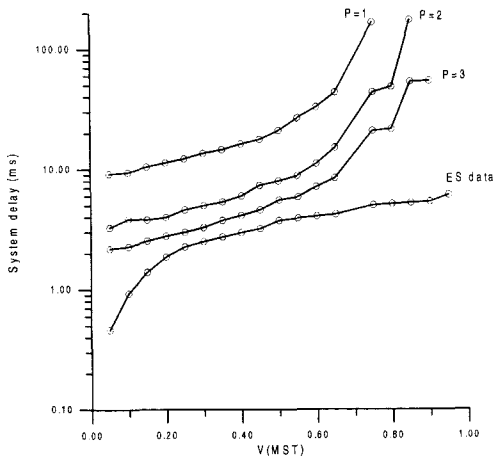


그림 19. V(MST)의 변화에 대한 전송 지연 시간 (G=0.2)

Fig. 19. System delay with respect to the change of V(MST)(G=0.2).

그림 17에서 보면 ES 데이터의 길이가 V(MST)에 비례하여 증가하므로 V(MST)가 증가할수록 ES 데이터의 지연 시간이 증가한다. 그림에서 보면 ES 데이터의 지연 시간 증가율에 비해 PT 데이터의 지연 시간은 훨씬 급격히 증가하는 모습을 보이는데 이는 V(MST)가 증가하면서 전체 링크 용량 중 PT 서비스에 할당되는 링크 용량이 크게 줄어들기 때문이다.

V(MST)가 매우 큰 값으로 설정되면 거의 모든 링크 용량을 ES 서비스에 소비하여 낮은 우선 순위의 PT 데이터는 전송 기회가 없어진다. 그림 18과 19는 G=0.5와 0.2일 때 V(MST)가 전송 지연 시간에 미치는 영향을 조사한 것이다. 그림 17, 18, 19로부터 트래픽 부하가 낮을수록 V(MST)의 변화가 전송 지연 시간에 미치는 영향이 적다는 것을 알 수 있다.

2. IEC/ISA 필드버스에서 제어 데이터의 처리

본 절에서는 IEC/ISA 필드버스의 노드에 컨트롤러와 플랜트로 구성된 제어 시스템을 접속시키는 경우에 제어 데이터의 전송 특성을 분석한다. 그림 20에 나타난 바와 같이 본 시뮬레이터에서 노드 1은 센서와 액츄에이터를 포함하는 플랜트 노드로 지정되고 노드 2는 컨트롤러 노드로 지정되어, 노드 1과 노드 2가 하나의 제어 루프를 구성한다. 제어 루프에 포함된 노드들은 매 10ms 마다 제어 데이터를 생성하며, 나머지 30개의 노드에서는 주어진 트래픽 부하에 따라 데이터가 발생되도록 하였다.

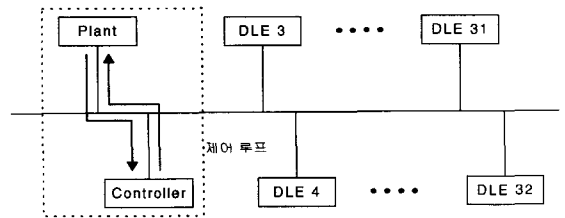


그림 20. 제어 시스템이 접속된 네트워크의 구성

Fig. 20. Configuration of network with control system.

제어 데이터를 전송하는 경우에 그림 21에 나타난 바와 같이 매 10ms 마다 센서에서 주기적으로 생성되는 센서 데이터는 센서의 전송큐에 저장되어 있다가 플랜트 노드가 토큰을 수신하면 전송큐에서 추출되어 컨트롤러 노드로 전송된다. 센서 데이터를 수신한 컨트롤러 노드는 센서 데이터를 바탕으로 컨트롤러 데이터를 생성한 후 컨트롤러 노드의 샘플링 순간에 전송큐에 삽입한다. 컨트롤러 역시 10ms의 주기로 데이터를 샘플링한다. 컨트롤러 노드는 토큰을 수신하면 전송큐에 저장되어 있는 컨트롤러 데이터를 액츄에이터로 전송한다. 본 시뮬레이션 모델에서 센서 및 컨트롤러의 전송큐는 용량이 1인 버퍼로 동작하도록 하였다.

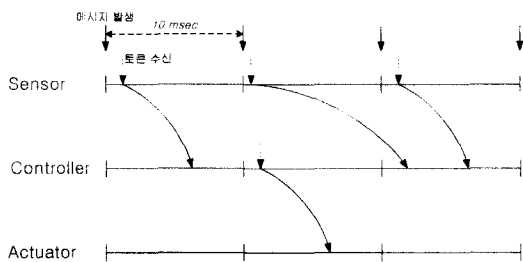


그림 21. 주기적인 제어데이터의 전송  
Fig. 21. Transmission of periodic control data.

이상적인 제어 및 플랜트 출력을 얻기 위해서 주기적으로 생성되는 센서 데이터는 다음번 센서 데이터가 발생하기 이전에 컨트롤러로 전송이 완료되어야 한다<sup>14)</sup>. 또한 컨트롤러 데이터도 다음의 컨트롤러 데이터가 발생하기 전에 액츄에이터로 전송이 완료되어야 한다. 즉, 네트워크를 통하여 센서 또는 컨트롤러 데이터를 전송하는 과정이 10ms라는 샘플링 주기 이내에 완료되어야 한다. 본 논문에서 사용된 제어 시스템의 플랜트와 컨트롤러의 전달 함수는 다음과 같이 정의되며 이들의 블록 다이어그램은 그림 22에 나타나 있다. 그림 22에서 기준 입력  $r$ 의 크기는 1로 하였다.

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

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

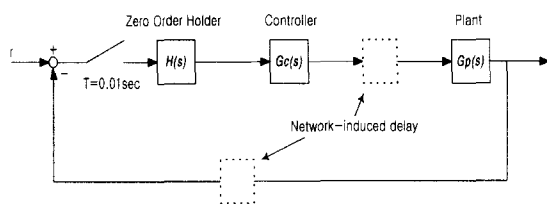


그림 22. 제어 시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 22. Block diagram of control system.

본 실험에서 LAS는 1절의 그림 10에 나타난 바와 같이 PT와 ES 서비스를 모두 제공한다. PT 데이터의 경우에 우선 순위가 1과 3의 데이터는 지수 분포로 발생하며, 우선 순위가 2인 데이터는 주기적으로 발생한다. 또한, ES 서비스에 의해 전송될 스케줄링 데이터는 주기적으로 발생한다. 본 실험에서 제어 데이터는 PT 서비스로 전송하는 경우와 스케줄링에 의해 ES 서비스로 수행하는 경우에 대하여 분석하였다.

PT 서비스를 수행하는 경우에는 제어 데이터를 우선 순위 2(normal)로 전송하도록 하였고 ES 서비스를 이용하는 경우에 제어 데이터는 스케줄링에 의하여 전송되는 것으로 하였다.

1) ES 서비스로 제어 데이터를 전송하는 경우

네트워크에 접속된 제어 시스템에서 발생하는 제어 데이터를 ES 스케줄링 서비스를 이용하여 전송하는 경우에 PT와 ES 데이터의 발생에 대한 시뮬레이션 조건은 표 6에 주어져 있다. 표 6에 나타난 바와 같이 노드 1과 2에서 제어 데이터는 10ms의 주기로 발생한다. 본 실험에서는 ES DLPDU를 이용한 스케줄링 서비스가 제어 데이터 발생 주기와 동일한 10ms의 주기로 정확하게 제어 데이터를 전송하도록 스케줄링하는 경우와 제어 데이터의 발생 주기보다 훨씬 큰 주기로 제어 데이터를 전송하도록 스케줄링하는 경우를 비교하였다. 표 7에서 CASE 1은  $V(TTRT)=10ms$ ,  $PT\ duration=300\ octet\ time$ ,  $V(MST)=0.74$ 로 설정하여 각 노드는 10ms마다 ES 서비스를 수행할 수 있도록 한 것이다. CASE 2와 3은  $V(TTRT)$ 와  $V(MST)$ 를 조정하여 ES duration은 CASE 1과 같으나 ES 스케줄링 서비스의 주기를 증가시킨 경우이다.

표 6. ES 서비스를 통한 제어데이터 전송 시뮬레이션 조건

Table 6. Simulation condition for control data transmission through ES service.

종류	우선 순위	길이 (octet)	전송 큐 수	발생 분포	발생 주기 (ms)
PT	1	268	32	지수 분포	343
	2	30	32	주기적	38
	3	20	32	지수 분포	26
ES	일반 데이터	30	30	주기적	47
	제어 데이터	30	2	주기적	10

표 7. ES 서비스에서 제어데이터 전송 주기 스케줄링

Table 7. Scheduling of control data transmission period in the ES service.

CASE	V(TTRT) (ms)	V(MST)	PT duration (octet time)	ES duration (octet time)
1	10	0.74	300	30
2	20	0.49	300	30
3	30	0.33	300	30



표 8. ES 서비스에서 제어데이터 전송 실패 횟수

Table 8. Number of rejected control data in the ES service.

CASE	센서 데이터 전송 실패 수	컨트롤러 데이터 전송 실패 수
1	0/100	0/100
2	50/100	50/100
3	66/100	66/100

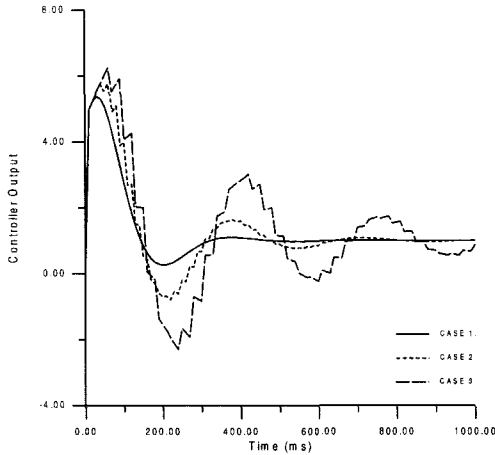


그림 23. ES 스케줄링 변경에 따른 제어 출력  
Fig. 23. Control output with respect to the change of ES scheduling.

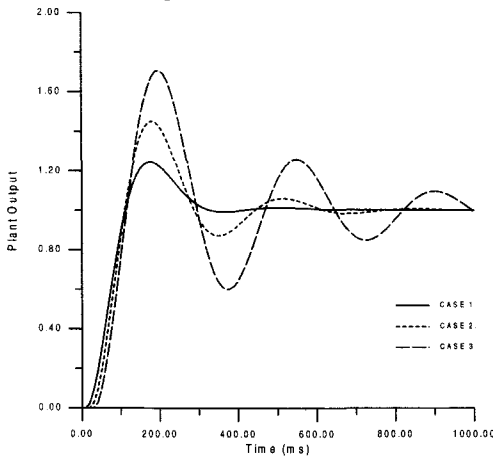


그림 24. ES 스케줄링 변경에 따른 플랜트 출력  
Fig. 24. Plant output with respect to the change of ES scheduling.

그림 23과 24는 ES 스케줄링 주기를 각각 10, 20, 30ms로 변경하였을 때의 제어 출력과 플랜트 출력의 결과이며, 표 8에는 각 경우에 대하여 큐 용량이 1인 전송큐에서 포화상태로 인하여 전송되지 못한 데이터

의 개수가 비교되어 있다. 그림 23, 24와 표 8에서 ES 스케줄링 주기가 제어 데이터의 발생 주기와 동일한 10ms로 설정된 경우에는 제어 데이터의 손실도 없었고 제어 및 플랜트 출력도 최적의 성능을 보이는 것으로 나타났다. ES 스케줄링 주기가 제어 데이터의 발생 주기보다 크게 설정되는 경우에는 손실되는 제어 데이터의 개수가 많아져 결과적으로 제어 시스템의 성능이 크게 저하됨을 알 수 있다. 따라서 ES 서비스를 통하여 제어 데이터를 전송하는 경우에 스케줄링 주기는 제어 데이터의 발생 주기와 동일하게 설정되어야 한다.

2) PT 서비스로 제어 데이터를 전송하는 경우

제어 시스템에서 주기적으로 발생하는 데이터를 PT 서비스의 우선 순위 2를 통하여 전송하는 경우에 데이터 발생에 대한 시뮬레이션 조건은 표 9와 같다. 먼저 PT duration=300 octet time, V(MST)=0.25로 고정된 경우에 V(TTRT)의 변화에 대한 제어 시스템의 성능을 도출한 결과가 그림 25와 26에 나타나 있으며, 각 경우에 센서와 컨트롤러 노드에서 전송에 실패한 데이터의 개수는 표 10에 나타나 있다.

표 9. PT 서비스를 통한 제어데이터 전송 시뮬레이션 조건

Table 9. Simulation condition for control data transmission through PT service.

종류	우선 순위	길이 (octet)	전송 큐 수	발생 분포	발생 주기 (ms)	
PT	1	268	32	지수 분포	343	
	2	일반 데이터	30	30	주기적	47
		제어 데이터	30	2	주기적	10
	3	20	32	지수 분포	26	
ES	없음	30	32	주기적	38	

표 10. PT 서비스에서 V(TTRT) 변화에 대한 제어데이터 전송 실패 횟수

Table 10. Number of rejected control data with respect to the change of V(TTRT) in the PT service.

V(TTRT) (ms)	센서 데이터 전송 실패 수	컨트롤러 데이터 전송 실패 수
50	23/100	23/100
100	34/100	34/100
200	26/100	26/100

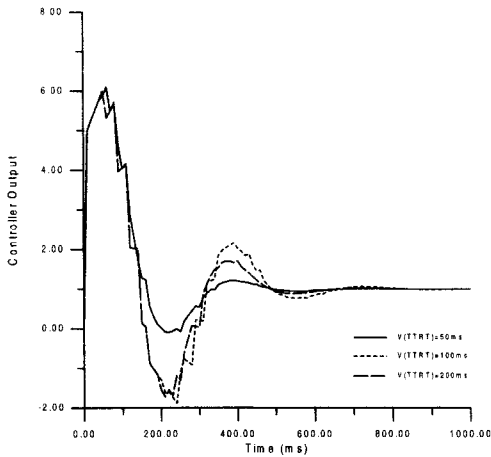


그림 25. V(TTRT)의 변화에 대한 제어 출력  
Fig. 25. Control output with respect to the change of V(TTRT).

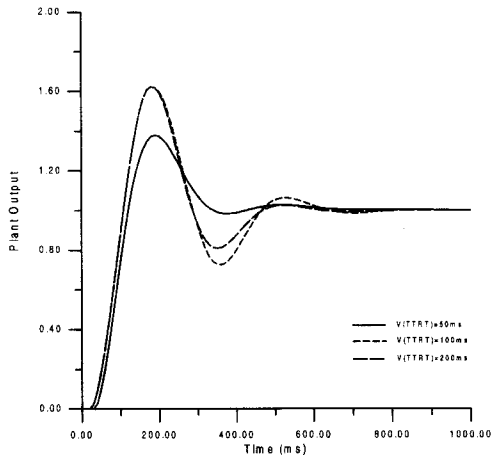


그림 26. V(TTRT)의 변화에 대한 플랜트 출력  
Fig. 26. Plant output with respect to the change of V(TTRT).

V(TTRT)가 50ms 일 때 각각 23개의 제어 데이터가 센서와 콘트롤러에서 전송되지 못하고 유실되었다. V(TTRT)가 100ms로 증가하면서 전송에 실패하는 제어 데이터의 개수가 34개로 증가하였으나 V(TTRT)가 200ms로 설정되면 다시 26개로 감소하였다. 이 때 제어 성능은 전송에 실패한 데이터의 개수가 적을수록 향상된다. 이처럼 제어 성능이 V(TTRT)에 따라 단조 증가 혹은 감소하지 않는 것은 V(TTRT)의 일정 비율을 ES 서비스에 할당하였으므로 1절의 그림 11에서 기술한 바와 같이 V(TTRT)의 증가가 PT 서비스의 빈도만을 증가시키는 것이 아니고 ES 서비스 시간도 증가시켜 ES 서

스 전에 PT 서비스를 한 번 더 수행할 수 있는지의 여부에 민감한 영향을 끼치기 때문이다.

그림 27, 28과 표 11은  $V(TTRT)=100ms$ ,  $V(MST)=0.25$ 로 고정된 경우에 PT duration의 변화에 대한 전송 지연 시간의 결과를 도출한 것이다. 그림 27과 28로부터 PT duration이 증가할수록 제어 시스템의 성능은 감퇴함을 알 수 있다. PT duration이 크게 설정되면 한 노드에서 PT 데이터 전송에 더 많은 링크 용량을 소비하고 따라서, 제어 시스템이 접속된 노드에 다시 토큰이 인가되는 기간이 길어져 제어 데이터의 유실이 증가된다. PT duration이 50 octet time으로 설정된 경우에는 한 노드에서 우선 순위 3과 2의 데이터를 하나씩만 보낼 수 있는 기간이다. 즉, 이 경우에는 우선 순위 1은 전혀 전송될 수 없고 모든 링크 용량은 스케줄링되어 있는 ES 서비스와 우선 순위 3, 2 데이터의 전송에만 할당되므로 제어 시스템에서 전송에 실패하는 데이터의 개수가 감소하여 제어 시스템의 성능이 향상된다.

표 11. PT 서비스에서 PT duration 변화에 대한 제어데이터 전송 실패 횟수

Table 11. Number of rejected control data with respect to the change of PT duration in the PT service.

PT duration (octet time)	센서 데이터 전송 실패 수	콘트롤러 데이터 전송 실패 수
50	14/100	15/100
300	34/100	34/100
500	35/100	38/100

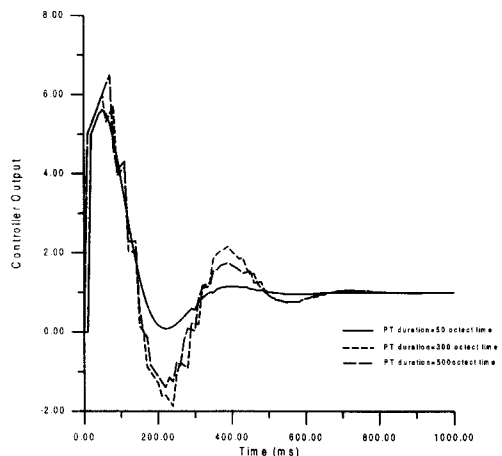


그림 27. PT duration의 변화에 대한 제어 출력  
Fig. 27. Control output with respect to the change of PT duration.

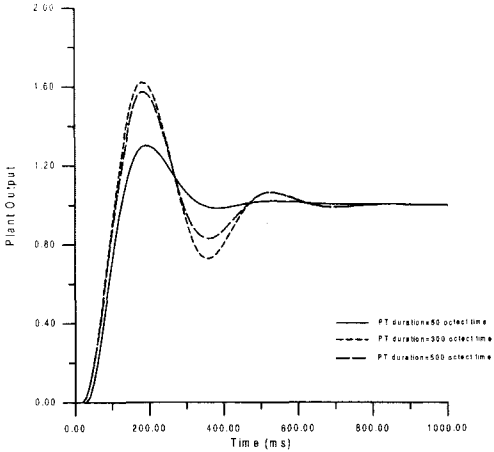


그림 28. PT duration의 변화에 대한 플랜트 출력  
Fig. 28. Plant output with respect to the change of PT duration.

다음으로 PT duration=300 octet time, V(TTRT)=100ms로 고정된 경우에 V(MST)의 변화가 제어 시스템의 성능에 미치는 영향을 조사한 결과가 그림 29, 30과 표 12에 나타나 있다.

표 12. PT 서비스에서 V(MST) 변화에 대한 제어데이터 전송 실패 횟수

Table 12. Number of rejected control data with respect to the change of V(MST) in the PT service.

V(MST)	센서 데이터 전송 실패 수	컨트롤러 데이터 전송 실패 수
0.05	18/100	17/100
0.15	29/100	30/100
0.25	34/100	34/100

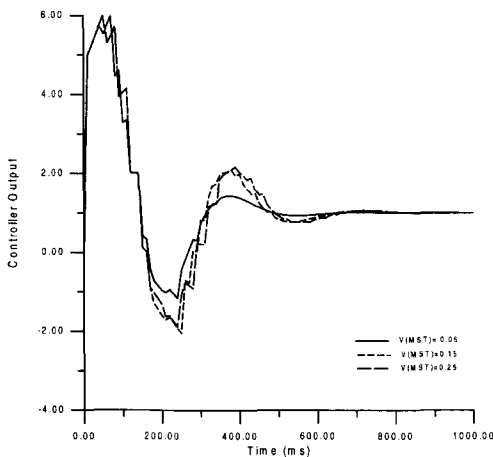


그림 29. V(MST)의 변화에 대한 제어 출력  
Fig. 29. Control output with respect to the change of V(MST).

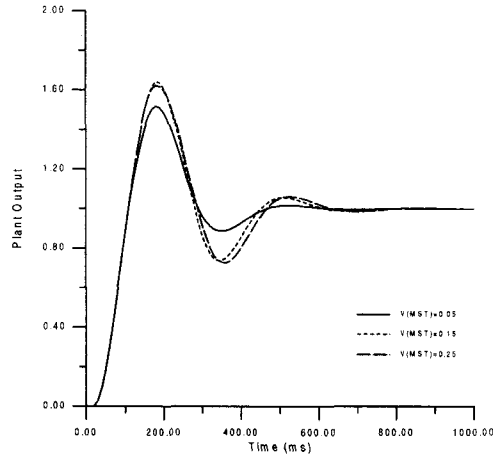


그림 30. V(MST)의 변화에 대한 플랜트 출력  
Fig. 30. Plant output with respect to the change of V(MST).

V(MST)는 설정된 V(TTRT) 중에서 스케줄링 서비스에 할당하는 비율을 의미한다. 본 실험은 스케줄링이 아닌 PT 서비스에 의해 제어 데이터가 전송되는 경우이므로 스케줄링 서비스에 할당하는 비율인 V(MST)가 낮을수록 PT 서비스의 빈도가 증가하여 제어 시스템의 성능이 향상된다.

3. IEC/ISA 필드버스와 PROFIBUS의 성능 비교

본 절에서는 IEC/ISA 필드버스와 PROFIBUS의 우선 순위 성능을 비교 분석한다. PROFIBUS는 토큰 전달 방식으로만 동작된다. 토큰은 미리 지정된 순서에 따라 네트워크 내의 각 노드를 차례로 방문하며, 토큰을 수신하여 데이터 전송 권한을 부여받은 노드는 전송큐에 높은 우선 순위 메시지가 있는가를 검사한 후 대기하고 있는 메시지가 없는 경우에는 다음 노드로 토큰을 전달하고 메시지가 대기하고 있는 경우에는 수신 노드에 메시지를 전송한다. PROFIBUS에서는 high와 low의 두 가지 우선 순위 등급을 제공한다. PROFIBUS의 우선 순위 기능도 토큰이 네트워크 내의 모든 노드를 방문하는데 소요되는 토큰 순환 시간에 의하여 동작되나 IEC/ISA 필드버스와 다른 점은 토큰 자체에 우선 순위가 없고, 우선 순위 데이터의 전송 결정은 각 노드가 판단한다는 것이다. 즉, 각 노드에서 토큰을 수신하면 토큰을 수신한 노드는 토큰이 실제로 토큰이 한바퀴 돌아오는데 소요된 시간인 T<sub>TRT</sub>(Real Token Rotation Timer)과 네트워크 파

라미터로 지정된  $T_{TRT}$ (Target Token Rotation Timer)을 비교한다. 만일  $T_{RRT}$ 가  $T_{TRT}$ 보다 큰 경우에는 높은 우선 순위 메시지 하나만이 전송될 수 있다. 만일  $T_{RRT}$ 가  $T_{TRT}$ 보다 작은 경우에는  $T_{TRT}$ 가 만료될 때까지 여러 개의 데이터를 전송할 수 있으며, high 우선 순위 메시지를 우선적으로 전송한다.

PROFIBUS의 시뮬레이션 모델 역시 이산 사건 모델링 기법을 통하여 구현되었으며, 시뮬레이션 모델에서 사건을 스케줄링하는 절차에 대한 구조도가 그림 31에 나타나 있다. PROFIBUS의 시뮬레이션 모델 역시 데이터 링크 계층의 지연 시간만을 고려하며, IEC/ISA 필드버스의 시뮬레이션 모델과 같은 조건으로 실험을 수행하였다. 즉, PROFIBUS에서는 high와 low의 두 개의 우선 순위 등급만을 제공하므로 IEC/ISA 필드버스에서도 time-critical과 time-available의 두 개의 우선 순위 데이터들만이 생성되는 것으로 가정하여 두 가지 프로토콜의 성능을 동일한 트래픽 부하에 대하여 비교하였다. 표 13에는 IEC/ISA 필드버스와 PROFIBUS의 시뮬레이션 조건이 주어져 있다. 표 13에서 메시지의 길이는 데이터와 오버헤드를 포함한 길이이다. 실험은  $G=0.8, 0.5, 0.2$ 의 세 가지 트래픽 부하에 대하여 수행하였으며, 각각의 트래픽 부하에서 high 또는 time-critical 우선 순위 데이터와 low 또는 time-available 우선 순위 데이터는 주어진 트래픽 부하에서 각각 50%를 차지하는 것으로 하였다. PROFIBUS의 경우에는 0.5Kbit/s, 1.5Kbit/s 및 12Mbit/s의 전송 속도를 지원하지만 본 절에서는 IEC/ISA 필드버스의 우선 순위 기능에 대한 성능 비교를 그 목적으로 하므로 두 가지 시뮬레이션 모델에 대해 전송 속도를 1Mbit/s로 설정하여 실험하였다. 본 실험에서 IEC/ISA 필드버스의 PT duration은 300 octet time으로 고정하였다.

표 13. IEC/ISA 필드버스와 PROFIBUS의 시뮬레이션 조건

Table 13. Simulation condition for IEC/ISA fieldbus and PROFIBUS.

우선 순위	길이 (octet)	노드 수	발생 분포	발생 주기 (ms)		
				$G=0.8$	$G=0.5$	$G=0.2$
high, time-critical	14	32	지수 분포	9	15	36
low, time-available	255	32	지수 분포	163	262	653

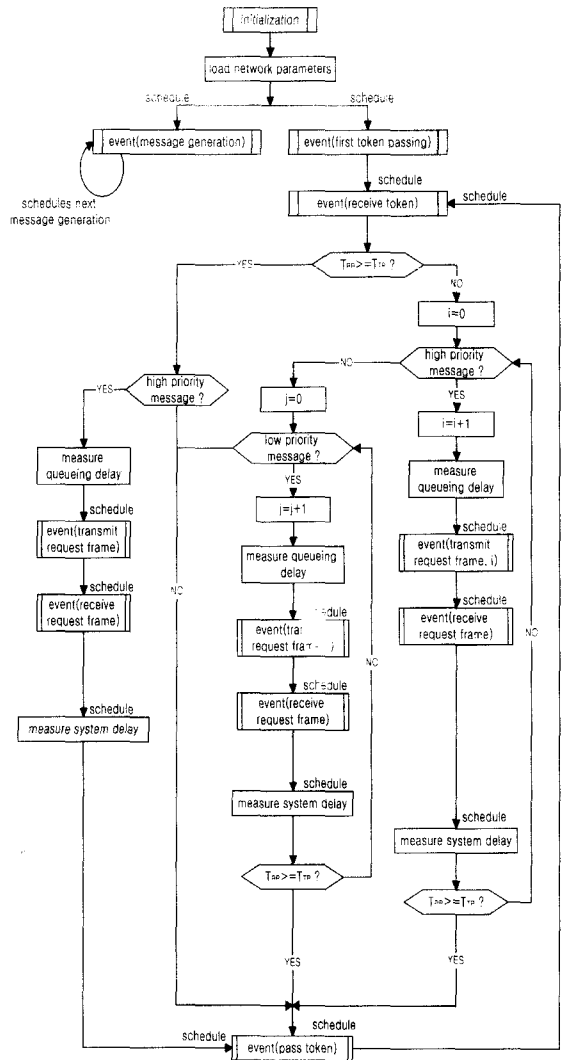


그림 31. PROFIBUS 시뮬레이션 모델의 사건 스케줄링 구조

Fig. 31. Structure of Event Scheduling in the PROFIBUS Simulation Model.

그림 32, 33, 34에는 트래픽 부하  $G=0.8, 0.5, 0.2$ 에서 TRT(또는 PROFIBUS의  $T_{TRT}$ ) 값의 변화에 대한 high(time-critical) 우선 순위와 low(time-available) 우선 순위 데이터의 전송 지연 시간이 나타나 있다. PROFIBUS에서 TRT의 단위는 bit time 이지만 그림에서는 시간(ms) 단위로 환산하였다. 그림 32부터 34에 나타난 바와 같이 high 우선 순위 데이터의 지연 시간은 low 우선 순위 데이터의 지연 시간에 비하여 상대적으로 적으며, 이러한 차이는 TRT 값이 증가할수록 줄어든다. 또한, 네트워크의 트래픽

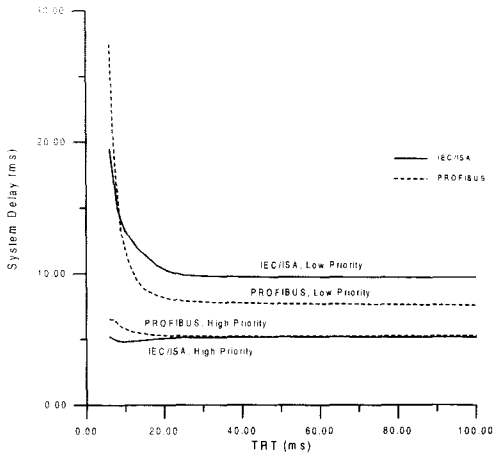


그림 32. TRT 변화에 대한 우선 순위 성능 비교 (G=0.8)

Fig. 32. Comparison of priority scheme with respect to the change of TRT(G=0.8).

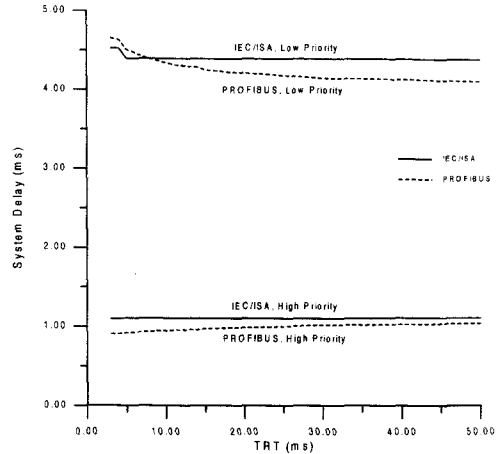


그림 34. TRT 변화에 대한 우선 순위 성능 비교 (G=0.2)

Fig. 34. Comparison of priority scheme with respect to the change of TRT(G=0.2).

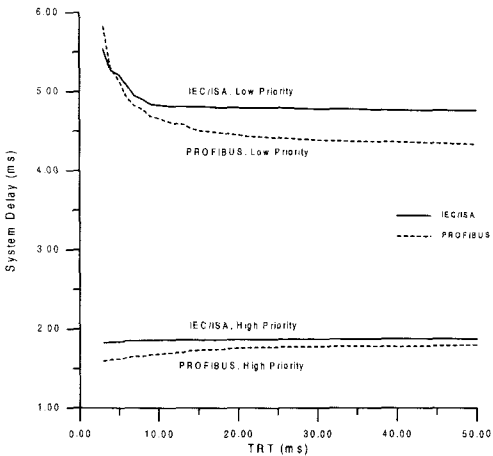


그림 33. TRT 변화에 대한 우선 순위 성능 비교 (G=0.5)

Fig. 33. Comparison of priority scheme with respect to the change of TRT(G=0.5).

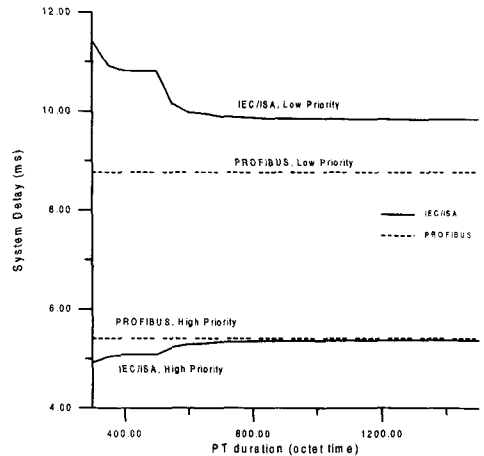


그림 35. PT duration 변화에 대한 우선 순위 성능 비교(G=0.8)

Fig. 35. Comparison of priority scheme with respect to the change of PT duration (G=0.8).

부하가 증가할수록 high 우선 순위 데이터의 지연 시간과 low 우선 순위 데이터의 지연 시간의 차이는 두드러진다. 그림 32부터 34에서 보는 바와 같이 PROFIBUS에서 제공하는 우선 순위 기능이 IEC/ISA 필드버스의 우선 순위 기능에 비해 TRT 변화에 대하여 더 민감함을 알 수 있다. 그림 32에서 TRT가 매우 작게 설정된 경우에 IEC/ISA 필드버스의 경우와 마찬가지로 PROFIBUS에서도 high 우선 순위 데이터의 지연 시간이 증가하는 것을 볼 수 있

다. 이는 G=0.8로 트래픽 부하가 매우 높아 전송큐에 많은 데이터가 적재하는데 반해 TRT가 너무 작게 설정되어서 각 노드가 토큰을 받았을 때 전송큐에 쌓인 데이터 가운데 하나만을 전송하여 데이터의 큐잉 지연 시간이 증가하기 때문이다.

그림 32, 33, 34의 경우에 IEC/ISA 필드버스에만 존재하는 PT duration은 300 octet time으로 고정되어 있으며 이는 1절의 그림 6에서 보는 바와 같이 매우 작은 값이다. 따라서, IEC/ISA 필드버스의 PT

duration의 변화에 대한 성능 비교를 추가로 수행하였으며, 그 결과가 그림 35부터 37까지에 나와 있다. 이 경우에 TRT의 값은 15ms로 고정하였다. 그림 35, 36, 37에서 보는 바와 같이 IEC/ISA 필드버스에서는 PROFIBUS에서 제공되지 않는 파라미터인 PT duration을 통하여 우선 순위 기능을 추가로 조정할 수 있다.

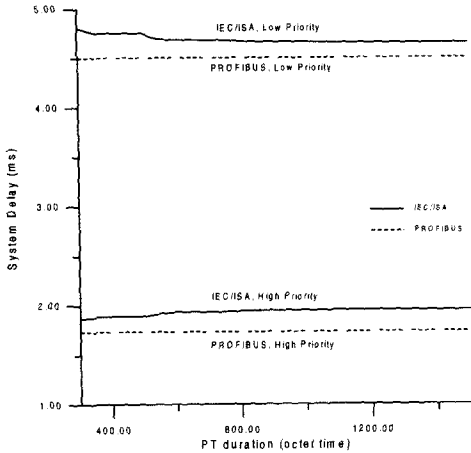


그림 36. PT duration 변화에 대한 우선 순위 성능 비교(G=0.5)

Fig. 36. Comparison of priority scheme with respect to the change of PT duration(G=0.5).

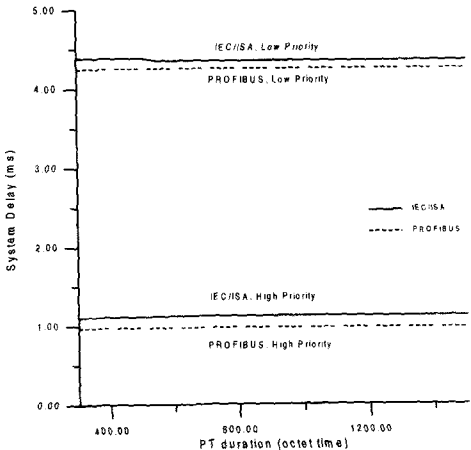


그림 37. PT duration 변화에 대한 우선 순위 성능 비교(G=0.2)

Fig. 37. Comparison of priority scheme with respect to the change of PT duration(G=0.2).

### V. 결론 및 추후 연구 사항

본 연구에서는 필드버스의 국제 규격으로 제정되고 있는 IEC/ISA 필드버스의 시뮬레이션 모델을 개발하였고 시뮬레이션 모델을 이용하여 IEC/ISA 필드버스의 토큰 순환에 의한 데이터 전송 방식과 스케줄링에 의한 데이터 전송 방식에 대한 데이터 전송 지연 시간의 특성에 대하여 분석하였다. 또한 IEC/ISA 필드버스에 제어 시스템이 접속된 경우에 토큰 할당의 방법과 네트워크 파라미터의 변화에 따른 제어 데이터의 성능에 대해서도 분석하였다.

본 연구를 통하여 수행된 시뮬레이션 결과에 의하면 IEC/ISA 필드버스에서 PT 서비스만을 수행하는 경우에는 서로 다른 우선 순위를 갖는 데이터의 지연 시간이 V(TTRT)에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, ES 서비스만을 수행하는 경우에는 데이터의 지연시간을 최소화 할 수 있는 ES duration의 최적 값이 존재한다는 것을 알아내었다. PT와 ES 서비스를 동시에 수행하는 경우에는 PT 서비스 관련 파라미터인 PT duration, V(TTRT)와 더불어 ES 서비스 관련 파라미터인 V(MST)가 네트워크 시스템의 성능에 커다란 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 IEC/ISA 필드버스에서 주어진 트래픽 부하에 대하여 각각의 데이터들에 대한 성능 요구 사항을 만족시키기 위하여서는 네트워크 파라미터 즉, V(TTRT), PT duration, V(MST) 등을 적절히 선정하여야 할 필요가 있다.

컨트롤러와 플랜트로 구성된 제어 시스템이 IEC/ISA 필드버스를 통하여 접속되는 경우에 여기서 발생하는 제어 데이터들의 실시간 처리와 관련된 성능 분석을 수행한 결과, ES 서비스를 통하여 제어 데이터를 전송하는 경우에는 시스템의 응답이 ES 스케줄링 주기에 매우 민감하며, PT 서비스를 통하여 제어 데이터를 전송하는 경우에는 PT duration에 대한 변화보다 V(TTRT)에 대한 변화에 훨씬 민감한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 시뮬레이션 결과를 통해 네트워크 파라미터들의 설정이 각 우선 순위 데이터와 주기적 데이터의 전송 지연 시간에 미치는 영향의 정도를 파악할 수 있었으며, 또한 필드버스에 접속되는 제어 시스템의 제어 성능에 미치는 영향도 자세히 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 실제의 자동화 시스템에

IEC/ISA 필드버스를 접속하는 경우에 네트워크 파라미터를 설정하는데 필요한 정보를 제공하며, 아직 검증되지 않은 IEC/ISA 필드버스의 성능을 미리 평가할 수 있게 하는 근거가 된다.

본 논문에서는 또한 이미 독일 국가 표준으로 채택되어 생산 현장에서 응용되고 있는 PROFIBUS와 필드버스의 국제 규격인 IEC/ISA 필드버스에서 TRT의 설정에 따른 우선 순위 기능을 상호 비교 분석하였다. PROFIBUS가 IEC/ISA 필드버스에 비하여 TRT 변화에 더욱 민감한 반응을 보였으나, IEC/ISA 필드버스는 PT duration을 이용하여 추가로 우선 순위 기능을 조정할 수 있다.

본 연구를 통하여 개발된 시뮬레이션 모델은 IEC/ISA 필드버스의 성능을 미리 예측할 수 있으며, 따라서 IEC/ISA 필드버스가 도입되는 제어 및 자동화 시스템의 설계시 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 본 논문에서는 각 파라미터의 변화에 따른 IEC/ISA 필드버스의 우선 순위 데이터 전송 특성 및 실시간 데이터 처리 성능에 대하여 평가하였는데, 추후 연구 사항으로 네트워크 시스템이 실제로 동작될 수 있는 여러 가지 환경에서 본 연구를 통하여 도출된 네트워크 파라미터들의 최적값을 도출할 수 있는 네트워크 최적 설계 알고리즘을 개발할 필요가 있다. 네트워크 최적 설계 알고리즘은 네트워크에 접속된 응용시스템들의 성능 요구사항을 만족시키는 동시에 네트워크의 자원을 최대한 활용하도록 하는 서로 상반된 설계 기준을 만족하여야 할 것이다.

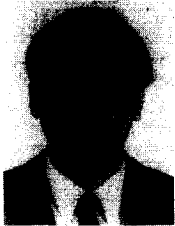
#### 참 고 문 헌

- [1] J. R. Jordan, *Serial Networked Field Instrumentation*, John Wiley & Sons, 1995.
- [2] G. Olsson and G. Piani, *Computer Systems for Automation and Control*, Prentice-Hall, 1992.
- [3] *MAP 3.0 Specification 1993 Release*, World Federation of MAP/TOP Users Groups, 1993.
- [4] 홍승호, 김기암, 김지용, 고성준, "분산제어 및 자동화 시스템과 필드버스", 제어·자동화·시스템 공학회지 제2권, 제4호, pp. 19-29, 1996. 7
- [5] ISA-dS50.02, Draft Standard : *Fieldbus Standard for Use in Industrial Control Systems, Part, 4 : Data Link Protocol Specification*, 1996.
- [6] ISA-S50.02-1992. *Standard for use in Industrial Control Systems. Part 2 : Physical Layer Specification and Service Definition*, 1992.
- [7] A. D. Stefano and O. Mirabella "Evaluating the Fieldbus Data Link Layer by a Petri Net-Based Simulation", *IEEE Trans. on Industrial Electron*, Vol. 38, no. 4, pp.288-297, Aug. 1991.
- [8] S. Cavlieri, A. D. 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, no. 3, pp.297-306, June. 1993.
- [9] 이성근, 홍승호, "시뮬레이션 모델을 이용한 IEC/ISA 필드버스 시스템의 데이터 링크 계층 성능 분석", 제어·자동화·시스템 공학회지 제2권, 제3호, pp. 209-219, 1996. 9
- [10] DIN 19 245, *Profibus Standard Part 1 and 2*, 1991.
- [11] K. Bender, *PROFIBUS-The Fieldbus for Industrial Automation*, Carl Hanser Verlag & Prentice Hall, 1993.
- [12] C. G. Cassandras, *Discrete Event Systems: Modeling and Performance Analysis*, IRWIN, 1993.
- [13] C. D. Pegden, R. E. Shannon and R. P. Sadowski, *Introduction to Simulation Using SIMAN*, McGraw-Hill, 1995.
- [14] S. H. Hong, "Scheduling Algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 255-230, June, 1995.
- [15] A. B. Mnaouer, T. Ito, H. Tanaka, W. Yoo, T. Sekiguchi, "Asynchronous Bandwidth Allocation and Parameter Setting in the Fieldbus Protocol," *Trans. of the IEE of Japan C*, Vol. 117-C, No. 7, pp. 962-970, July 1997.
- [16] S. H. Hong, "Approximate Analysis of

Timer- Controlled Priority Scheme in the Single-Service Token-Passing Systems,"

IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 2, pp. 206-215, 1994. 4.

저 자 소 개



洪 承 鎬(正會員)

1956년 5월 31일생. 1982년 연세대 기계공학과 졸업, 1985년 텍사스공대 기계공학과 공학석사, 1989년 펜실베이니아주립대 기계공학과 공학박사, 1989년~1992년 한국전자통신연구소 선임연구원, 1992년~현재 한양대 제어계측공학과 부교수. 주관심분야는 분산제어 및 자동화 통신망, 필드버스



高 晟 準(正會員)

1970년 11월 28일생. 1996년 한양대 제어계측공학과 졸업, 1998년 한양대 제어계측공학과 공학석사, 1998년~현재 LG산전 전력연구소 연구원. 주관심분야는 산업용 네트워크, 배전자동화용 통신장치, 송배전자동화 시스템