

# 공장자동화를 위한 필드버스 프로토콜의 평가

이경창\*, 김인준\*\*, 이석\*\*\*

## Evaluation of Fieldbus Protocol for Factory Automation

Lee Gyoung Chang\*, Kim In Joon\*\*, Lee Suk\*\*\*

### ABSTRACT

Networking for manufacturing is gaining importance as a nerve system of computer-integrated manufacturing (CIM). Among the various network types, the most inexpensive type called fieldbus is specifically aimed to interconnect simple devices such as sensors and actuators. For this purpose, there are several choices of the protocols such as Profibus, WorldFIP, Foundation Fieldbus, and IEC/ISA fieldbus. This paper presents the simulation results of Profibus and WorldFIP. Both protocols have been simulated in order to evaluate the performance such as transmission delay and throughput under different protocol parameter settings and traffic conditions.

**Key Words** : Profibus, WorldFIP, Fieldbus (필드버스), Simulation (시뮬레이션), Performance Evaluation (성능 평가), CIM (컴퓨터통합생산)

### 1. 서론

최근 수년간 중앙처리장치의 처리능력 향상과 전자기술의 발달 및 컴퓨터의 단가 하락으로 인하여, 생산활동의 많은 공정과 장비들에서 자동화가 이루어졌다. 특히, 생산 주문의 처리에서부터, 설계, 가공, 판매에 이르기까지 생산활동의 대부분 공정에서 컴퓨터가 이용됨으로써, 생산성 향상이 이루어졌다. 그러나, 효과적인 생산시스템 구축을 위하여 추진되어온 자동화는 전체적인 생산공정에 초점을 맞추는 대신 각각의 독립적인 생산공정과 장비들의 요소자동화에 치중됨으로써 자동화의 섬(islands of automation)을 형성하게 되었으며, 정보의 부족과 통합화의 미비로 인하여 기대했던 만큼

의 생산성 향상을 이루지 못하였다.

이와 같은 인식 하에서 독립적으로 분산되어 있는 생산공정과 장비들을 응답이 매우 빠른 하나의 폐루프 제어 시스템(interactive closed-loop control system)으로 통합하려는 컴퓨터 통합 생산(computer integrated manufacturing, CIM) 개념이 등장하였으며, 컴퓨터 통합 생산을 실현하기 위해서는 기업에서 발생하는 다양한 활동들이 유기적으로 결합되어야 한다는 필요성이 제기되었다<sup>(1-3)</sup>.

그림 1의 미국 과학기술국(NIST) 첨단 생산연구시설(Advanced Manufacturing Research Facility, AMRF) 모델에서는 생산시스템을 다섯 개의 계층적인 구조로 모델링하였다<sup>(4)</sup>. 이 모델에서는 생산시스템의 통합을 위하여, 각 계층 내의 원활한 정

\* 부산대학교 대학원

\*\* 대우정밀공업주식회사

\*\*\* 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

보교환을 위하여 수평적인 통합과, 인접한 상하 계층간의 정보교환을 위하여 수직적인 통합의 필요성을 제시하고 있다. 따라서, 생산활동의 각 공정에서 생성되는 정보들을 수집, 분석, 가공 및 저장하고, 각 공정에서 필요로 하는 각종 정보들을 실시간에 제공할 수 있는 정보의 통합화를 가능하게 하는 생산시스템의 다양한 생산장비들간의 통신이 중요하게 부각되었다.

1980년대 초반, 이기종 생산장비들간의 원활한 통신을 위하여, MAP, MiniMAP과 같은 프로토콜들에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 그러나, MAP은 공장 자동화 환경에서 매우 다양한 통신 기능을 제공하는 프로토콜이지만, 구조상 OSI (Open Systems Interconnection) 참조모델(Reference Model)에서 제시하는 7계층을 모두 가지고 있어, 생산현장의 필드에 설치된 각종 제어 및 자동화 장비에서 생성되는 데이터의 실시간 통신을 지원하기에는 적합하지 않은 것으로 인식되었으며, 이에 따라 1980년대 후반 필드 장비들간의 실시간 통신을 지원하는 필드버스가 개발되었다<sup>5)</sup>.

필드버스의 연구와 개발은 ISA와 IEC에서 국제 표준안 제정을 공동으로 추진하면서 활발히 이루어졌으며, 현재에는 독일 표준인 Profibus, WorldFIP 기구의 WorldFIP, Fieldbus Foundation 기구의 Foundation Fieldbus, ODVA(Open DeviceNet Vendor Association)의 DeviceNet, Interbus Club의 Interbus, 빌딩자동화용으로 사용되는 Echelon사의 LonWorks 등이 있다. 그러나, 필드버스는 아직 표준화가 이루어지지 않았으며, 어떠한 프로토콜도

성능상의 절대적 우위를 점하고 있지 못하기 때문에, 제어 및 자동화 장비 생산업체들은 개발한 장비의 통신 인터페이스를 어느 프로토콜에 맞추어야 할지 고민하고 있으며, 사용자들은 사용할 필드버스의 선정에 어려움을 겪고 있다.

따라서, 본 논문에서는 생산현장에서 가장 많이 사용되고 있는 프로토콜들 중, 동기신호, 사건메시지 등과 같은 비주기 메시지가 주로 생성되는 조립 생산(discrete-part production)<sup>6)</sup>에 적합하다고 알려진 Profibus와, 샘플링 메시지 등과 같은 주기 메시지가 주로 생성되는 공정생산(process production) 또는 분해생산(discomposing production)<sup>6)</sup>에 적합하다고 알려진 WorldFIP의 데이터링크계층에 대한 해석을 바탕으로, 이산 사건 시뮬레이션 언어인 SIMAN<sup>7)</sup>을 이용하여 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 또한, 공장에서 전송되는 데이터 유형에 대한 분석을 바탕으로 4가지의 가상 공장 시나리오를 작성하였고, 이를 시뮬레이션 모델과 결합시켜 각 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통하여 본 논문에서는 메시지의 특성에 따른 프로토콜의 성능을 평가하고, 두 프로토콜의 장단점을 비교, 분석하였을뿐만 아니라, 각 프로토콜의 성능 변수가 각 프로토콜에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. Profibus와 WorldFIP

필드버스는 사용하고 있는 매체접속제어방식에 따라 크게 중앙제어방식과 분산제어방식으로 나눌 수 있다. 중앙제어방식은 제어기가 각 스테이션들

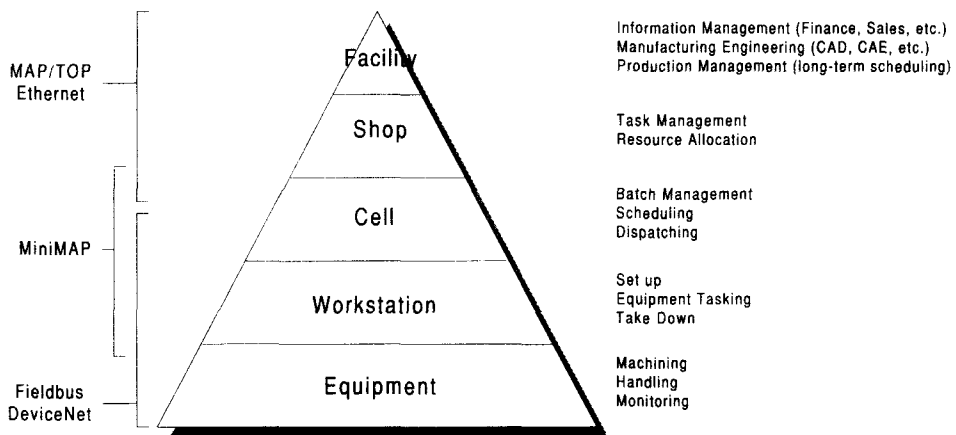


Fig. 1 Network Types for AMRF Architecture

Table 1. Comparison of Fieldbus Protocol

Network	Profibus	WorldFIP	IEC/ISA fieldbus
Topology	bus	bus	bus
Access Method	Token passing with master/slave	Polling with scheduling of BA	Token Passing and Polling of LAS
Transmission rate	FMS:9.6k ~ 500k, DP:9.6k ~ 1.5M	31.25k, 1M, 2.5M	31.25k, 1M, 2.5M
Max. Devices	127 nodes	256 nodes	128 nodes
Medium	TP(Twisted Pair), Optical Fiber	TP	TP, Optical Fiber
Error detection	CRC8 + HD4	CRC16	CRC16

# LAS : List of Active Station, CRC : Cyclic Redundancy Check, HD : Hamming Distance  
 BA : Bus Arbitrator

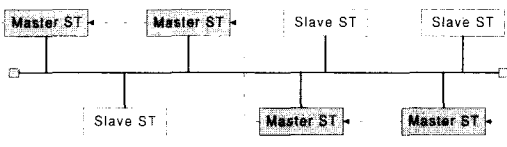


Fig. 2 Topology of Profibus

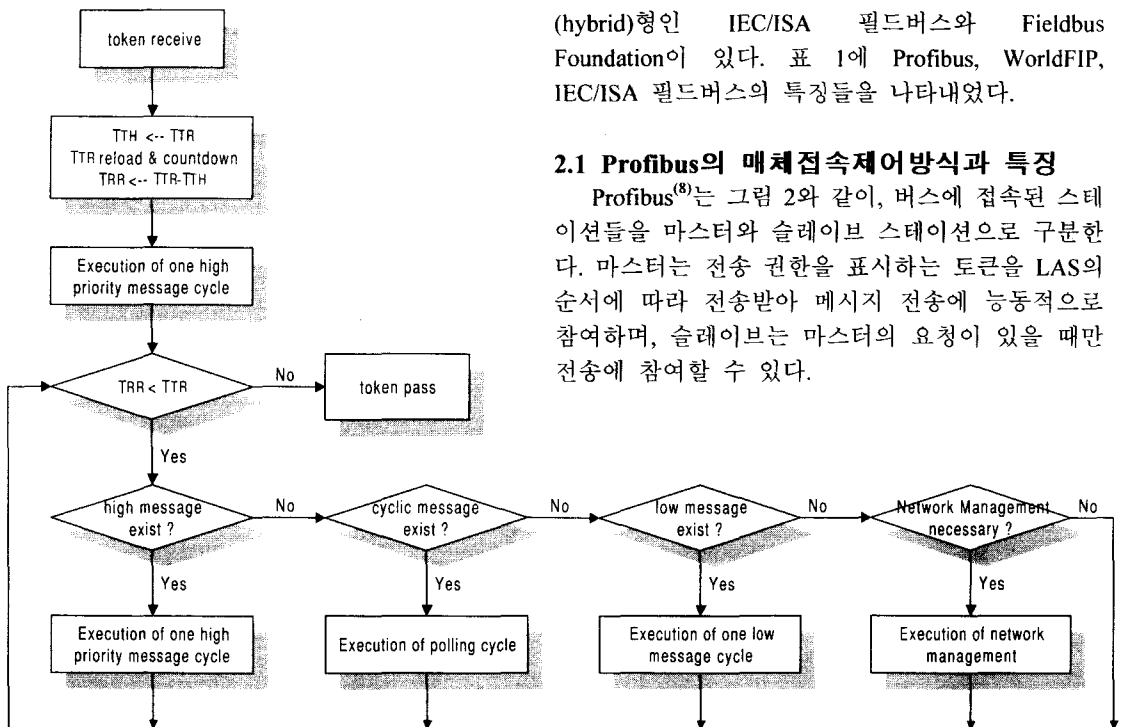


Fig. 3 Flow Chart of Message cycle

에게 전송권한을 부여하는 방식으로 버스중재자-생산자-소비자(Bus Arbitrator, BA-Producer-Consumer) 모델을 사용하는 WorldFIP가 있으며, 분산제어방식은 각 스테이션들이 순차적으로 전송권한을 가지는 방식으로 마스터-슬레이브(Master-Slave) 모델에 의한 토큰 패싱(Token Passing) 방식을 사용하는 Profibus가 있다. 또한, LAS(List of Active Station)에 의한 폴링과 토큰 패싱 방식이 혼합된 하이브리드(hybrid)형인 IEC/ISA 필드버스와 Fieldbus Foundation이 있다. 표 1에 Profibus, WorldFIP, IEC/ISA 필드버스의 특징들을 나타내었다.

2.1 Profibus의 매체접속제어방식과 특징

Profibus<sup>(8)</sup>는 그림 2와 같이, 버스에 접속된 스테이션들을 마스터와 슬레이브 스테이션으로 구분한다. 마스터는 전송 권한을 표시하는 토큰을 LAS의 순서에 따라 전송받아 메시지 전송에 능동적으로 참여하며, 슬레이브는 마스터의 요청이 있을 때만 전송에 참여할 수 있다.

마스터는  $T_{TR}$ (Target Rotation Time),  $T_{RR}$ (Real Rotation Time),  $T_{TH}$ (Token Holding time)의 타이머를 가진다. 여기서,  $T_{TR}$ 은 토큰이 버스를 1회전하는데 예상되는 시간으로, 네트워크의 성능을 고려하여 사용자가 설정하는 시간값이며,  $T_{RR}$ 은 실제 토큰이 버스를 1회전하는데 걸린 시간으로 네트워크 시스템의 카운터(counter)에 의해 측정되는 값이다. 또한,  $T_{TH}$ 는  $T_{TR}-T_{RR}$ 로 계산되며, 마스터 스테이션이 얼마나 오랜 시간동안 전송을 할 수 있는가를 판단하기 위하여 사용된다.

Profibus는 메시지 사이클(message cycle)을 이용하여 자신이 생성한 메시지를 다른 스테이션에게 보내거나(send mode), 다른 스테이션에게 메시지 전송을 요청(request mode)한다. 또한, 비순환 요청 또는 전송/요청 모드(Acyclic Request or Send/ Request Mode)와 순환 전송/요청 모드(Cyclic Send/Request Mode)를 이용한다. 비순환모드는 일반적인 메시지의 전송을 의미하며, 순환모드는 Poll List에 정의되어 있는 스테이션 순서대로 Polling의 수행을 의미한다.

그림 3은 마스터 스테이션의 메시지 사이클의 순서도를 나타낸 것이다. 마스터 스테이션은 토큰을 받은 직후, 하나의 상위 우선순위 메시지 사이클을 실행한 후,  $T_{RR} < T_{TR} (T_{TH} < 0)$ 내에서, 남아있는 상위 우선순위 메시지 사이클, 순환(cyclic) 사이클, 하위(low) 우선순위 메시지 사이클 순서로 메시지 사이클을 실행한다. 또한,  $T_{RR} < T_{TR}$ 이고,  $T_{GUD}$ (GAP Update Time)이 경과되었을 경우 새로운 스테이션의 추가나,  $T_{GAPL}$ (GAP List, 마스터 스테이션 사이에 있는 슬레이브 스테이션들의 리스트)의 변경 등과 같은 네트워크 관리(network management) 등을 수행한다.

Profibus는 비주기 메시지가 전송용량의 대부분인 조립생산환경에 적합하며, 마스터와 슬레이브

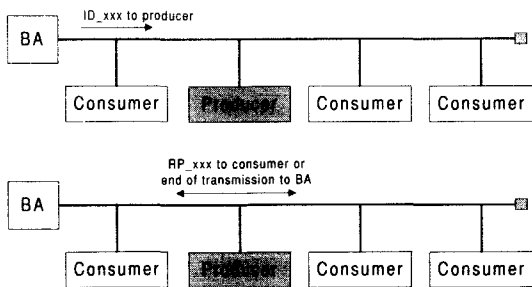


Fig. 4 Topology of WorldFIP

스테이션의 구성을 조절함으로써 다양한 환경에 적용 가능하다. 또한, 토큰 패싱 방식과 같은 분산 제어방식의 특징인 스테이션들간에 전송용량의 균등한 분배를 이룰 수 있다. 그러나, 주기 데이터를 처리하기에 불편하며, 메시지의 시간 제약 조건을 통계적으로만 만족시킨다는 단점이 있고, 특정 마스터 스테이션에 트래픽이 과도하게 부과될 경우 제대로 적응하지 못한다는 단점이 있다.

## 2.2 WorldFIP의 매체접속제어방식과 특징

WorldFIP<sup>(9)</sup>는 그림 4와 같이, 버스에 접속된 스테이션들을 버스중재자, 생산자, 소비자로 구분한다. 버스중재자는 사용자의 사전 설정과 생산자 스테이션들의 요청에 의해 스케줄된 순서에 따라 식별자(identifier, ID) 프레임을 전송함으로써 전송권한을 생산자 스테이션에 부여하는 기능을 가진 스테이션이다. 또한, 생산자는 고유한 주소(address)를 가진 변수(variable)와 메시지(message)를 생성하는 스테이션이며, 수신자는 그 변수와 메시지를 수신하는 스테이션이다.

그림 5와 같이, 버스중재자는 전송을 하기 위하

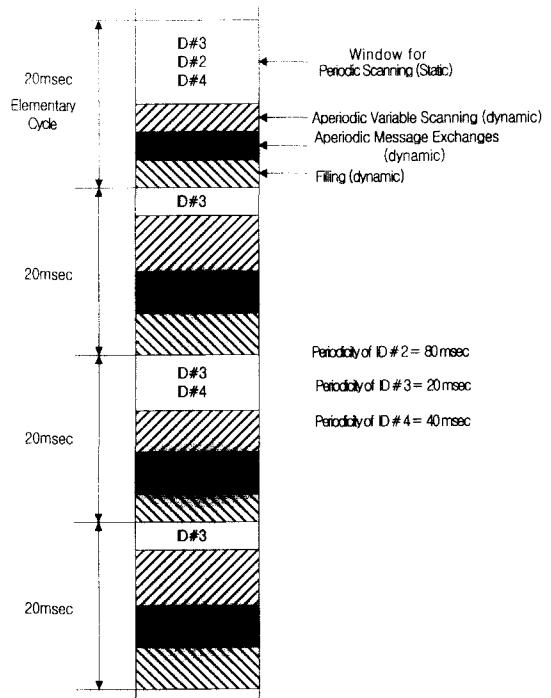


Fig. 5. Transmission Sequence of Data in Elementary cycle

여, 기본주기 내에 스케줄된 순서대로 ID 프레임을 버스로 방송한다. 이때, 방송된 프레임의 ID와 일치하는 변수나 메시지를 가진 생산자 스테이션이 ID 프레임을 수신받은 후, 이 ID와 일치하는 변수나 메시지를 수신자 스테이션으로 전송하거나, 다른 ID를 가진 메시지에 대한 스케줄을 버스중재자에게 요청하기도 한다. 이러한 과정을 거친 후, 생산자 스테이션은 지정된 ID에 관한 전송이 끝났음을 알리는 ACK 프레임(acknowledge frame)을 방송하게 되고, 버스중재자는 스케줄된 순서대로 다음 ID 프레임을 버스로 방송함으로써 각 스테이션들의 전송을 제어한다.

버스중재자는 그림 5와 같은 4개의 윈도우(window)에 따라 ID 프레임을 방송한다. 특히, 버스중재자의 기본주기(elementary cycle)는 주기 메시지 발생간격들의 최대공약수로 설정해야 하며, 기본주기보다 정수배로 큰 주기를 가진 메시지는 기본주기의 배수 간격으로 스케줄을 해야 한다. 즉, 그림에서 주기 메시지의 발생간격이 각각 80m, 20m, 40msec이므로, 최대공약수인 20msec로 기본주기를 설정하고, ID 2의 경우는 4번의 기본주기(80msec)마다 스케줄을 한다. 또한 버스중재자는 스케줄된 주기 스캐닝(periodic scanning of variables, messages and requests), 비주기 변수 스캐닝(aperiodic scanning of variables), 메시지 교환(aperiodic exchange of message)순으로 ID 프레임을 방송하며, 기본주기 내에 스케줄된 ID 프레임이 없는 경우 동기화를 위하여 Filling 프레임을 추가로 전송한다.

### 3. 가상 공장 시나리오 및 시뮬레이션 모델 구성

#### 3.1 필드에서 생성되는 메시지에 대한 분석

표 2는 대부분의 필드에서 생성되는 메시지들의 특성을 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 그래픽파일, 데이터파일 또는 수치제어장치의 프로그램과

같은 메시지의 경우, 전송지연에 크게 민감하지 않을 뿐만 아니라, 메시지의 길이도 매우 길다. 그러나, 동기신호, 센서신호 또는 사건신호 등과 같은 메시지의 경우, 길이는 짧으나 메시지 전송 지연에 매우 민감하게 반응하며, 전송 지연이 발생하였을 경우 전체 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다<sup>(10)</sup>.

이와 같은 특성에 기초하여 필드에서 생성되는 메시지들을 다음과 같은 3가지 종류로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 종류는 긴급한 주기 메시지(urgent periodic message)로 센서, 구동기 등과 같은 장치들에서 생성되는 제어신호로 1~8바이트의 짧은 길이로 10~100msec 사이의 일정한 간격으로 생성된다. 이러한 메시지들은 전송지연에 매우 민감하여, 다음 메시지가 생성되기 전까지 전송되어야 하며, 그렇지 못할 경우 제거되어 버리게 됨으로써, 시스템의 성능을 저하시키게 된다. 두 번째 종류는 긴급한 비주기 메시지(urgent aperiodic message)로 고장과 같은 이상신호, 상태정보 등과 같은 사건메시지로서, 1~8바이트의 짧은 길이로 불규칙적으로 생성된다. 이러한 메시지들은 전송지연에 가장 민감한 유형으로, 가장 먼저 전송되어야 할 필요가 있다. 세 번째 종류는 긴급하지 않은 비주기 메시지(normal aperiodic message)로 PLC, CNC 등의 제어 프로그램, 공정 데이터 등과 같은 데이터 파일들로서 10K비트 이상의 긴 길이로 가끔씩 생성되며, 전송지연에는 거의 영향을 받지 않는다.

#### 3.2 가상 공장 시나리오 설계

본 논문에서는 필드에서 생성되는 메시지들의 특성을 바탕으로 3가지의 가상 공장 시나리오를 구성하였다.

시나리오 1은 접속되어 있는 모든 스테이션에서 비주기 메시지만이 생성된다고 가정한 조립생산 환경으로서, 컨베이어 시스템에서 공압회로 내의 네트워크, 고장진단장치에서의 각 장치들간의 네트

Table 2. Types of Messages Characteristics

message type characteristic	graphic files	data files	numeric control programs	synchronization signals	sensor signals	event message
allowed delay	1-100s	1-100s	1-100s	1-100ms	20-100ms	0.1-80ms
message length	>10kbits	1-10kbits	>10kbits	8-64bits	<10kbits	8-84bits
frequency of appearance	rarely	very rarely	very rarely	very frequently	frequently	rarely
classification	non-time-critical messages			time-critical messages		

워크와 같은 예에서 찾아볼 수 있다. 이 시나리오는 비주기 메시지 처리에 적합하다고 알려진 Profibus의 성능을 평가하고, WorldFIP의 적응능력을 평가하기 위하여 구성하였다.

시나리오 2는 접속되어 있는 모든 스테이션에서 주기 메시지만이 생성된다고 가정한 공장생산환경으로서, 화학공장라인에서 상태정보를 주기적으로 전송하는 장치들간의 네트워크와 같은 예에서 찾아볼 수 있다. 이는 주기 메시지 처리에 적합하다고 알려진 WorldFIP의 성능을 평가하고, Profibus의 적응능력을 평가하기 위하여 구성하였다.

시나리오 3은 전체 스테이션의 1/2에서는 주기 메시지만이, 나머지 1/2에서는 비주기 메시지만이 생성된다고 가정한 일반적인 공장환경으로서, 상태정보나 제어신호를 주기적으로 전송하는 센서, 구동기와 같은 장치들과 비주기적인 데이터들을 전송하는 운동제어기(motion controller)와 같은 장치들이 함께 사용되는 셀제어기(cell controller)와 같은 예에서 찾아볼 수 있다. 이는 일반적인 공장 환경에서 Profibus와 WorldFIP의 성능을 평가하기 위하여 구성하였다.

Profibus는 시나리오에 따라 각 스테이션을 마스터와 슬레이브로 구분해야 한다. 시나리오 1에서는 전송권한의 균등한 분배를 이루기 위하여 모두 마스터로 설정하며, 시나리오 2에서는 주기 메시지가 주로 생성되는 환경에 적합하다고 알려진 형태인 하나의 마스터와 나머지의 슬레이브로 설정하여, 마스터가 다른 스테이션들로 폴링을 하게 설정한다. 시나리오 3에서는 비주기 메시지를 생성하는 스테이션은 마스터로, 주기 메시지를 생성하는 스테이션은 슬레이브로 설정하며, 마스터는 토큰을 획득하였을 경우, 메시지를 전송하거나, 슬레이브로 전송을 요청하는 것으로 설정한다.

WorldFIP의 경우 모든 시나리오에서, 버스중재자는 ID\_DAT의 식별자 프레임을 전송하고, 이 식별자 프레임과 일치하는 ID를 가진 생산자 스테이션이 ID\_DAT를 수신받은 후 전송을 시작하게 한다. 이 경우, 전송해야 할 메시지가 비주기인 경우에는 비주기 메시지 전달 서비스를 수행하고, 주기인 경우에는 주기 변수 교환 서비스를 수행한다. 특히, 비주기 메시지 전달 서비스는 주기 변수가 있을 경우에만 수행할 수 있는 서비스이나, 스테이션에 주기 변수가 없다고 할 지라도 메시지 길이가 0인 주기 변수가 있다고 가정하여 전송하는 것으로

가정한다.

### 3.3 시뮬레이션 모델 개발

Profibus와 WorldFIP의 시뮬레이션 모델은 각 프로토콜에서 도시되어 있는 데이터링크계층의 상태도(state diagram)를 근거로, SIMAN Ver 5.를 이용하여, 다음과 같은 몇 가지 가정을 바탕으로 개발하였다.

① 두 프로토콜의 전송속도는 1Mbps로 동일하다고 가정한다.

② 주기 메시지의 전송 큐는 1로 설정하여, 다음 메시지가 생성될 때까지 전송되지 못할 경우 전송 큐로부터 제거되는 것으로 가정하며, 비주기 메시지의 전송 큐를 100개로 충분히 크게 설정하고, 그 이상을 넘어설 경우 제거되는 것으로 가정한다.

③ Profibus의 경우 주기와 비주기를, WorldFIP의 경우 상위와 하위 우선순위를 구분하지 않으나, 두 모델의 비교를 위하여, 모든 메시지는 주기 상위, 비주기 상위, 비주기 하위로 구분한다. 즉, Profibus는 주기 상위와 비주기 상위를 동일한 상위 우선순위 메시지로, WorldFIP는 비주기 상위와 비주기 하위를 동일한 비주기 메시지로 고려하여 전송을 하게 되며, 이 경우 프로토콜의 변경은 필요없다.

④ 스테이션의 입출입은 없다고 가정한다. 즉, 네트워크에 연결된 스테이션의 수는 변동이 없다고 가정한다.

⑤ 응용계층, 사용자계층, 데이터링크계층과 각 계층간의 인터페이스(interface)에 의한 전송지연은 OS와 응용프로그램의 성능에 따라 달라지므로, 시뮬레이션 모델에서는 동일한 것으로 가정하여, 전송지연의 차이는 무시한다.

⑥ 하드웨어에 의한 처리시간은 통신이론에서 주로 사용되는 1비트타임으로 동일한 것으로 가정하여 전송지연의 차이는 무시한다.

⑦ 전송매체에서 비트타임으로 표현되는 전파지연은 전송속도와 케이블의 길이에 따라 달라진다. 이론적으로 전송속도가 1Mbps인 경우 200m 전파에 1비트타임이 소요되나, 이는 프로토콜의 전송지연에는 거의 영향을 미치지 않으므로, 케이블의 길이에 따른 전송지연의 차이는 무시한다.

⑧ 케이블, 네트워크 카드, 응용프로그램은 신뢰성이 높다고 가정하여, 에러가 없는 것으로 한다.

본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델의 스테이션 수는 30개로 구성하였으며, 전체 트래픽을 10%에서 100%까지 10%씩 증가시켜가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 트래픽 계산은 식 1에서 구해지며, 식에서 N은 스테이션 개수이며,  $L_i$ 는  $i$ 번째 스테이션에서의 평균 메시지 길이,  $T_i$ 는  $i$ 번째 스테이션에서의 평균 메시지 발생 간격, B는 전송속도를 나타낸다.

$$G = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{T_i B} \quad (1)$$

시뮬레이션 모델에서 주기 메시지는 한 스테이션에 주기 메시지를 생성하는 장치들을 더 많이 접속하여, 동일한 발생주기로 생성되는 메시지의 길이를 길게 함으로서 트래픽을 증가시켰으며, 비주기 메시지는 한 스테이션에 비주기 메시지를 생성하는 장치들을 더 많이 접속하여, 동일한 길이를 가진 비주기 메시지들을 더 자주 발생되게 함으로서 트래픽을 증가시켰다.

이런 가정들을 바탕으로 하여, 주기 메시지의 경우 발생간격을 10msec의 상수로 유지하고, 메시지 길이를 4바이트의 상수분포에서 42바이트의 상수분포로 트래픽을 증가시켰으며, 비주기 메시지의 경우 메시지 길이를 최소 1바이트, 최빈 20바이트, 최대 100바이트의 삼각분포로 유지하고, 발생간격을 최소 100  $\mu$ sec, 최빈 72msec, 최대 218msec의 삼각분포에서 최소 100  $\mu$ sec, 최빈 7msec, 최대 22msec의 삼각분포로 트래픽을 증가시켰다. 또한, 시뮬레이션 실행 시간을 60sec로 충분히 길게 하여, 확률에 의한 영향을 제거하였으며, 결과값은 다수의 시뮬레이션을 통한 결과값의 평균을 사용하였다.

프로토콜의 성능을 평가하기 위해 두 가지 성능 변수를 사용하였다. 첫 번째는 식 2의 메시지 전송 지연(transmission delay)으로, 메시지가 생성된 후 전송이 완료될 때까지 걸린 시간으로 정의하며, 두 번째는 식 3의 처리율(throughput)로, 전송된 메시지 길이를 생성된 메시지 길이로 나눈 비율로 정의한다.

$$\text{Delay} = T_{\text{transmitted}} - T_{\text{produced}} \quad (2)$$

$$\text{Throughput} = \frac{L_{\text{transmitted}}}{L_{\text{produced}}} \quad (3)$$

#### 4. 시뮬레이션을 통한 성능평가

##### 4.1 $T_{TR}$ , Elementary Cycle의 영향 평가

먼저 Profibus와 WorldFIP의 성능변수로 알려져 있는  $T_{TR}$ 과 기본주기가 두 프로토콜에 미치는 영향을 평가하기 위하여  $T_{TR}$ 과 기본주기를 주기 메시지 발생간격의 0.5, 1, 1.5, 2배인 5msec, 10msec, 15msec, 20msec로 변화시켜가면서 시뮬레이션을 수행하며, 이 때 생성되는 메시지의 전송지연과 처리율을 비교하여 프로토콜의 성능을 평가하였다<sup>(11)</sup>.

그림 6과 그림 7은 비주기 메시지만이 생성되는 환경인 시나리오 1에서 Profibus의 상위 및 하위 우선순위 메시지의 전송지연과 처리율을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 트래픽이 50% 이하에서, 비주기 상위 및 하위 메시지의 전송지연이 10msec 이하로 낮게 나타났으며, 처리율은 1로 나타났다. 그러나, 트래픽이 50% 이상이 되면, 메시지의 전송지연은 급격히 증가하기 시작한다.

특히, high 메시지의 처리율은 트래픽이 60%에서 서서히 감소하기 시작하여, 트래픽이 100%일 때

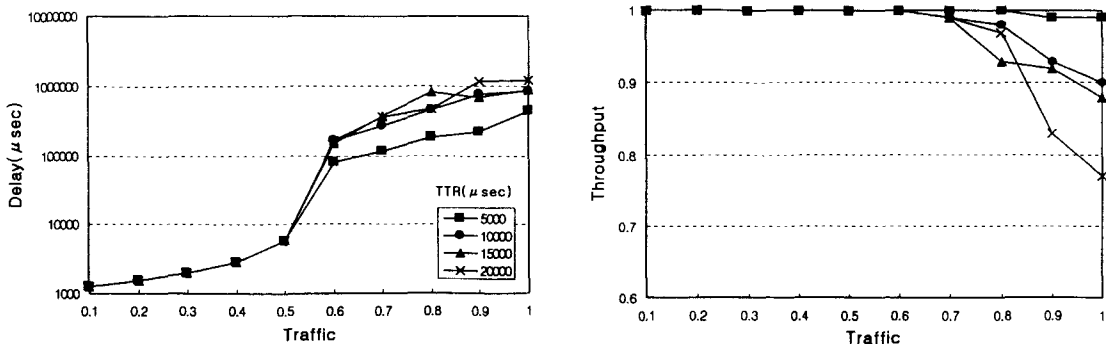


Fig. 6 Delay and Throughput of High Priority Message with Profibus

에는 0.7~1.0 사이의 값을 가지게 된다. 그러나, low 메시지의 경우, 트래픽이 50% 이상에서부터 처리율이 급격하게 감소하기 시작하여, 트래픽이 100%일 때에는 0.1~0.4 정도의 매우 낮은 값을 가지게 된다. 이는 high 메시지의 전송을 위하여 low 메시지의 전송을 포기하게 하는 우선순위 도구에 의한 결과이다. 또한, 트래픽이 50% 이상이 될 때, 전송지연이 급격하게 증가하는 이유는 토큰의 전송, 오버헤드 등을 포함한 총 전송량이 매체의 전송용량을 초과하기 때문이다.

$T_{TR}$ 에 의한 영향을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 트래픽이 50% 이하에서는  $T_{TR}$ 은 high 및 low 메시지의 전송지연과 처리율에는 거의 영향을 미치지 못한다. 그러나,  $T_{TR}$ 이 작아지면 전송지연이 약간 증가하는 경향을 보이고 있으나, 그 차이는 매우 미미하였다. 트래픽이 50% 이상에서는  $T_{TR}$ 이 커질 경우 high 메시지의 전송지연은 증가하는 반면, low 메시지의 전송지연은 감소하였으며, high 메시지의 처리율은 감소하는 반면, low 메시지의 처리율은

증가하는 경향을 보이고 있다. 이는  $T_{TR}$ 이 증가하면, 한 스테이션에서 토큰을 받은 후 전송큐에 저장된 비주기 high 메시지를 모두 전송하고 난 후에도,  $T_{TR}$ 이 종료되지 않는 상황이 자주 발생하게 되고, 이 시간동안 비주기 low 메시지를 더 많이 전송하게 된다. 따라서, 다른 스테이션들은 비주기 low 메시지가 전송되고 있는 시간동안 더 기다린 후 토큰을 받게되어 high 메시지의 전송지연이 증가하는 현상을 보이게 된다.

그림 8은 주기 메시지만이 발생하는 환경인 시나리오 2번에서 WorldFIP의 주기 메시지의 전송지연과 처리율을 비교한 것이다. 기본주기가 15msec, 20msec로 주기 메시지의 발생간격인 10msec보다 큰 경우, 트래픽이 낮을 때에도 처리율이 0.67과 0.5를 보이고 있다. 이는 스테이션에서 1주기에 각각 1.5개와 2개의 주기 메시지가 생성되지만, 그 중 1개만이 전송되고 나머지는 제거되어 버리기 때문이다. 따라서, WorldFIP의 기본주기는 프로토콜 규약에 규정되어 있는 것과 같이, 주기 메시지 발생

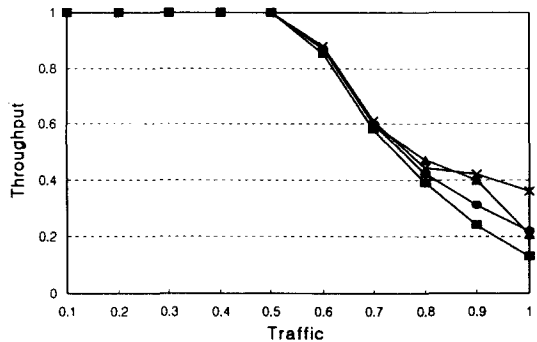
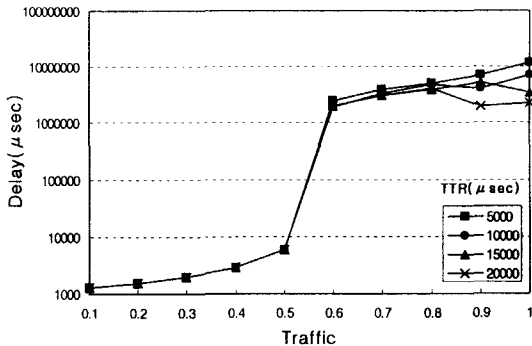


Fig. 7 Delay and Throughput of Low Priority Message with Profibus

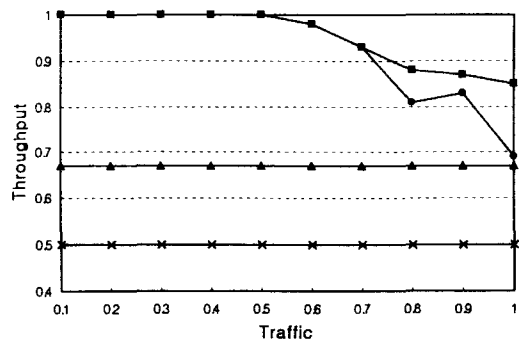
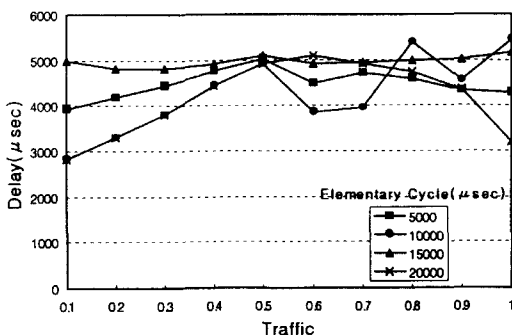


Fig. 8 Delay and Throughput of Periodic Message with WorldFIP



간격들의 최대공약수가 되어야 한다.

기본주기가 5msec와 10msec일 때, 주기 메시지의 전송지연은 트래픽이 50% 이하에서는 증가하는 경향을, 트래픽이 50% 이상에서는 불규칙적인 경향을 보이고 있다. 그 이유는 트래픽이 50% 이하에서는, 비록 전송지연은 증가할 지라도 처리율은 1로 유지될 수 있기 때문이며, 트래픽이 50% 이상에서는 기본주기 이상 지연되는 메시지들은 제거됨으로서, 전송되는 메시지의 전송지연에 영향을 미치지 때문이다. WorldFIP의 경우도 Profibus와 마찬가지로, 트래픽이 50%일 때, 처리율이 감소하기 시작하는데, 이는 ID 전송이나 메시지의 오버헤드 등을 포함한 총 전송량이 매체의 전송용량을 초과하기 때문이다.

**4.2 Homogeneous 트래픽에서의 성능 평가**

이 시뮬레이션에서는  $T_{TR}$ 과 기본주기의 영향에 대한 결과를 바탕으로 하여, Profibus의  $T_{TR}$ 과 WorldFIP의 기본주기를 각각 10msec로 두고 본 연구에서 작성한 가상 공장 시나리오 중 주기 메시지나 비주기 메시지만이 생성되는 시나리오 1과 2에서 시뮬레이션을 수행하며, 이 때 생성되는 메시지의 전송지연과 처리율을 비교함으로써 두 프로토콜의 성능을 평가하였다.

그림 9는 비주기 메시지만이 발생하는 시나리오 1에서의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 보듯이, Profibus의 경우 트래픽이 50% 이하에서는 비주기 high 및 low 메시지의 전송지연이 6msec 정도의 매우 낮은 전송지연을 보이고 있으며, 처리율은 1로 나타나고 있다. 그러나, 트래픽이 50% 이상이 되면 비주기 high 및 low 메시지의 전송지연이 급격히

증가한다. 또한, 비주기 high 메시지의 처리율은 거의 1을 유지하고 있으나, 비주기 low 메시지의 처리율은 급격히 떨어져 트래픽이 100%가 되었을 경우 처리율은 0.2로 나타나고 있다. 이는 high 메시지를 우선 전송하려는 우선순위 도구의 영향 때문이다.

WorldFIP의 경우 40% 이하의 낮은 트래픽에서도 10msec로, Profibus보다 상대적으로 높은 전송지연을 보이고 있으며, 트래픽이 40% 이상을 넘어설 경우 전송지연이 급격히 증가한다. 또한, 트래픽이 50%를 초과하면, 비주기 high 및 low 메시지의 처리율은 급속히 감소한다. 이는 WorldFIP의 경우 우선순위 도구가 없기 때문에, 전송지연에 매우 민감한 high 메시지와 그렇지 못한 low 메시지를 구분하지 못하기 때문이다. 특히, high 우선순위의 메시지의 경우, 트래픽이 50% 이상으로 높은 경우에도, Profibus의 전송지연이 증가하더라도 처리율은 1에 가까운 값을 유지하고 있으나, WorldFIP는 높은 전송지연과 낮은 처리율을 보이고 있다.

이상의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 두 프로토콜을 비교해 보면, 전송지연에 민감한 고장신호, 동기신호나 사건 메시지와 같은 비주기 메시지만이 생성되는 경우 Profibus가 상대적으로 효율적임을 알 수 있다.

그림 10은 주기 메시지만이 발생하는 시나리오 2에서의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 보듯이, 두 프로토콜 모두 6msec 이하로 심각한 전송지연은 발생하지 않고 있다. 처리율의 경우, Profibus는 트래픽이 20%때부터 점차적으로 감소한다. Profibus의 경우 토큰이 논리적 링을 순환하는데 걸리는 시간이 주기 메시지의 발생 간격인 10msec 이내인 경우

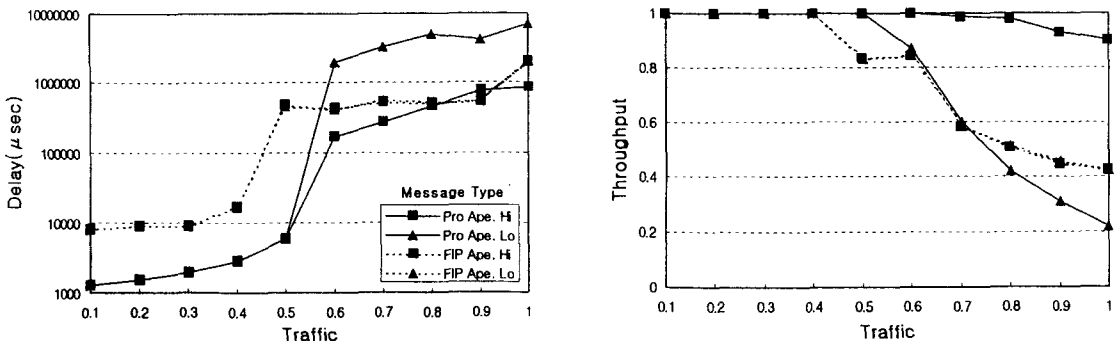


Fig. 9 Comparison of Delay and Throughput under Scenario 1

에 주기 메시지를 전송할 수 있으나, 그 이상이 되었을 경우 재거되어 버리고 다음 주기 메시지를 전송하게 된다. 이러한 현상은 스테이션의 수가 많거나, 트래픽이 증가될 경우 자주 발생하게 되어, 주기 메시지의 처리율이 낮아지게 된다. 스테이션의 수를 10개로 한 시뮬레이션에서는 트래픽이 40% 때까지 처리율이 1을 유지하였으나, 스테이션의 수가 30개인 경우에는 트래픽이 20% 때부터 점차적으로 감소하였으며, 트래픽이 100%가 되었을 때 처리율이 거의 0.5까지 감소하게 된다. 그러나, WorldFIP의 경우 트래픽이 50% 이하에서는 처리율이 1을 보이고 있으며, 트래픽이 50%를 넘어설 경우 서서히 감소하고 있다.

이상의 결과에서 보듯이 센서, 액츄에이터 등과 같은 장치들의 샘플링 메시지와 같은 주기 메시지만이 생성되는 경우 WorldFIP가 상대적으로 효율적임을 알 수 있다.

### 4.3 Mixed 트래픽에서의 성능 평가

이 시뮬레이션에서는 Profibus의  $T_{TR}$ 과 WorldFIP의 기본주기를 10msec로 두고, 주기 메시지와 비주기 메시지가 동시에 생성되는 시나리오 3에서 시뮬레이션을 수행하며, 이 때 생성되는 메시지의 전송 지연과 처리율을 비교함으로써 두 프로토콜의 성능을 평가하였다.

그림 11은 주기 메시지와 비주기 메시지가 함께 발생하는 보다 일반적인 공장 환경을 모델링한 시나리오 3에서 시뮬레이션한 결과이다. 그림에서 비주기 메시지의 처리는 비주기 메시지만이 생성되는 환경인 시나리오 1의 결과와 유사하고, 주기 메시지의 처리는 주기 메시지만이 생성되는 환경인 시나리오 2의 결과와 유사함을 알 수 있다.

먼저 Profibus에 대해 살펴보면, 비주기 메시지의 경우 트래픽이 50% 이하에서는 전송지연이 10msec 이하로 매우 낮으며, 트래픽이 80%가 될 때까지 high와 low의 전송지연이 50msec로 비교적 낮

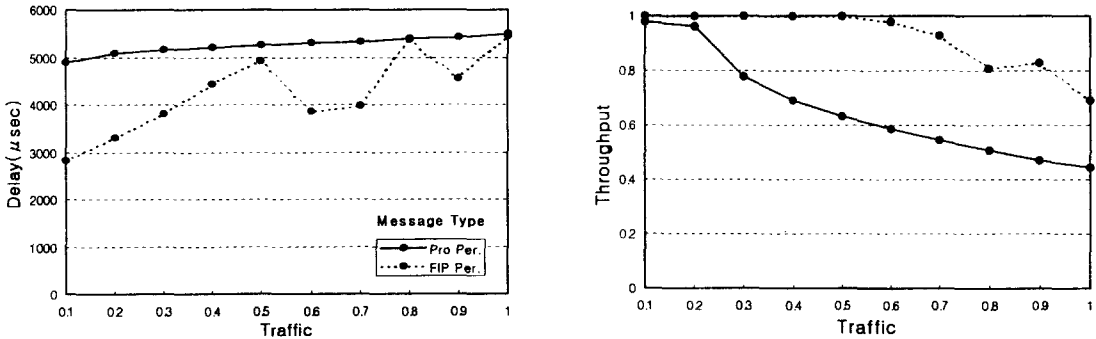


Fig. 10 Comparison of Delay and Throughput under Scenario 2

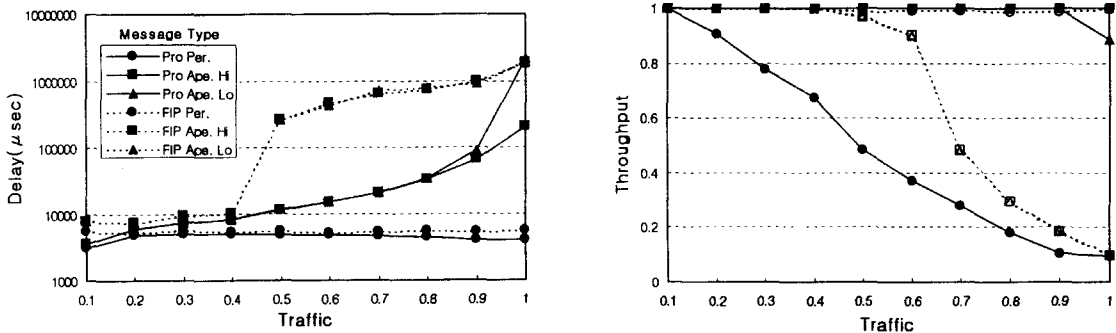


Fig. 11 comparison of Delay and Throughput under Scenario 3

게 나타나고, 처리율은 거의 1을 유지한다. 그러나, 트래픽이 80% 이상이 되었을 경우 비주기 high의 전송지연은 완만히, 비주기 low의 전송지연은 급속하게 증가하지만, 비주기 high의 처리율은 1, 비주기 low의 처리율은 거의 1에 가까운 0.85의 값을 유지한다. 그러나, 주기 메시지의 경우, 전송지연은 10msec 이하로 나타났으나, 처리율은 트래픽이 거의 10%에서부터 감소하기 시작하여 트래픽이 100%가 되었을 경우에는 0.1이 된다.

이 점은 시나리오 1과 2의 결과와 차이가 나는 것으로서, Profibus의 경우 전송용량의 대부분을 비주기 메시지 전송에 우선적으로 할당하는 경향이 있기 때문인 것으로 평가된다. 즉, 각 스테이션은 토큰을 받은 직후, 주기 메시지나 비주기 high 메시지 하나를 전송하고 나서, 전송이 가능한가를 체크한 후 비주기 high 메시지를 전송한다. 그러나, 트래픽이 높을 경우에는 토큰이 논리적 링을 순환하는 데 걸리는 시간이 주기 메시지의 발생간격인 10msec보다 커지는 현상이 자주 발생하게 되며, 이 결과 생성된 주기 메시지는 제거되어 버리게 된다.

WorldFIP에 대해 살펴보면, 주기 메시지의 전송지연은 10msec 이하로 낮게 나타나고 있으며, 트래픽이 100%일 경우에도 거의 1에 가까운 처리율을 보이고 있다. 그러나, 비주기 메시지는 트래픽이 40%에 도달할 때까지 1의 처리율을 보이지만, 그 이상이 될 경우 급속히 감소하여, 트래픽이 100%가 되었을 경우 0.1의 처리율까지 감소한다.

이 그림에서 시나리오 2와는 달리, 트래픽이 50% 이상에서도 주기 메시지의 처리율이 1인 이유는 다음과 같다. WorldFIP는 기본주기가 시작되면, 버스중재자에 스케줄되어 있는 순서대로, 주기 스케닝을 먼저 하게 되며, 주기 스케닝을 모두 하고 난 후, 기본주기가 남았을 경우 비주기 메시지를 전송하게 된다. 그러나, 시나리오 2의 결과에 따라 주기 메시지의 트래픽이 전체의 50% 이상이 되면, 기본주기의 대부분을 주기 메시지를 전송하는데 소요하므로, 비주기 메시지를 보낼 수 있는 시간이 거의 없게 되기 때문이다.

이상의 결과를 바탕으로 볼 때, 샘플링 신호 및 구동신호와 같은 주기 메시지와 불규칙적으로 발생하는 이상신호, 공암신호 등과 같은 비주기 high 메시지가 공존하는 경우 Profibus는 비주기 high 메시지 처리에, WorldFIP의 경우는 주기 메시지 처리에 효율적임을 알 수 있다. 또한, 20% 이하의 낮은 트

래픽에서 두 프로토콜 모두 만족할만한 성능을 가지며, 주기 및 비주기 메시지 처리에 효율적으로 동작하는 것으로 평가된다. 또한, 트래픽이 40% 이하에서 WorldFIP는 주기 및 비주기 high 메시지를 큰 전송지연없이 처리를 하고 있지만, Profibus는 주기 메시지를 제대로 처리하지 못함을 알 수 있다. 그러나, 이는 Profibus의 주기 메시지 큐 용량을 1로 하였을 경우이며, 큐 용량을 증가시켰을 경우 전송지연은 증가할 지라도 원활한 주기 메시지 처리가 이루어짐을 관찰할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 필드에 설치된 각종 센서, 모터, 밸브, 단일루프제어기, PLC, CNC, 로봇 등과 같은 자동화기기들간의 원활한 통신을 이루어주는 필드 버스들 중 마스터 스테이션들간의 토큰 패싱 방식을 사용하는 분산형 네트워크인 Profibus와 중앙제어기에 의한 폴링 방식을 사용하는 중앙집중형 네트워크인 WorldFIP의 시뮬레이션 모델을 SIMAN Ver. 5를 사용하여 개발하였다. 또한, 공장 내에서 발생하는 데이터들의 특성에 대한 분석을 바탕으로 3가지의 가상 공장 시나리오를 구성하였다. 또한, 이를 시뮬레이션 모델의 입력 데이터로 사용하여 시뮬레이션을 수행하고, Profibus와 WorldFIP의 데이터링크계층에 대한 성능을 평가 및 비교함으로써, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Profibus의 Target Rotation Time( $T_{TR}$ )이 길수록 하위 우선순위를 위한 시간할당이 증가하여 트래픽이 높은 경우에 하위 우선순위의 처리율이 높아지고 전송지연은 감소하는 경향을 보인다.

(2) WorldFIP의 기본주기는 주기 메시지 발생간격들의 공약수이어야 하며, 그렇지 않을 경우에는 메시지들이 전송되기 전에 제거됨으로서, 처리율의 저하를 초래한다.

(3) 비주기 메시지만이 발생하는 환경에서 Profibus와 WorldFIP를 비교하였을 때, 트래픽이 낮은 경우에 Profibus가 더 낮은 전송지연을 보였다. 또한, WorldFIP에서는 비주기 메시지의 우선순위가 없기 때문에, 높은 트래픽의 경우 모든 메시지의 처리율이 저하하는 경향을 보여 주었다. 이러한 관찰을 토대로 Profibus가 비주기 메시지의 처리에 보다 효율적이라고 할 수 있다.

(4) 주기 메시지만이 발생하는 환경에서는 두 프로토콜이 비슷한 전송지연을 보이고 있으나, Profibus의 처리율이 낮은 트래픽에서도 1에 못 미치고 있음을 관찰하였다. 이러한 현상은 토큰이 순환하는데 걸리는 시간이 메시지 발생 주기보다 길어져, 전송되지 못한 메시지들이 제거되기 때문에 발생한다. 이러한 결과를 토대로 주기 메시지의 처리에는 WorldFIP가 더 우수함을 입증하였다.

(5) 주기 및 비주기 메시지가 혼합되어 있는 환경에서 Profibus는 WorldFIP보다 양호한 전송지연을 보이지만, 주기 메시지의 처리율이 저하되는 단점을 보이고 있다. 이러한 결과는 큐용량과  $T_{TR}$ 의 선정에 영향을 받아서 생긴 것이기 때문에, 큐용량과  $T_{TR}$ 의 선정에 세심한 배려가 요구된다. 한편, WorldFIP의 경우에는 기본주기의 선정이 매우 단순하지만, 우선순위를 제공하지 않아서 실시간 비주기 메시지를 처리하는데 어려움이 있다.

(6) 본 연구의 결과들은 제어 및 자동화장비 생산업자들이 개발된 장비들의 통신방식을 선정하는 경우나, 사용자들이 자신의 공장에 설치할 필드버스의 종류를 선정하는 경우, 두 필드버스의 성능에 대해 비교 및 평가할 수 있는 자료로 사용될 수 있을 것이다.

향후 연구과제로는 변화하는 환경에서 사용자의 요구전송지연을 만족시킬 수 있는 Profibus의  $T_{TR}$ 과 WorldFIP의 기본주기를 탐색하는 온라인 성능제어에 관한 연구가 필요하며, 공정제어 환경에 적합하다고 알려진 Profibus DP와 WorldFIP와의 성능 비교가 이루어져야 한다. 이 외에도 CSMA 방식을 사용하는 DeviceNet이나 LonWorks, LAS에 의한 폴링과 토큰 패싱 방식이 혼합된 하이브리드형인 Foundation Fieldbus, 국제표준으로 제안되고 있는 IEC/ISA Fieldbus에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하고, 성능의 비교 및 평가가 수행되어야 한다.

## 후기

본 연구는 학술진흥재단 '96 자유공모과제와 부산대학교 기성회 재원 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. J.T.O' Rourke, "Case for Computer Integrated Manufacturing," Keynote Address, NSF Workshop on Computer Networking for Manufacturing Systems, 1987.
2. A. Ray, "Networking for Computer-Integrated Manufacturing," IEEE Network, Vol. 2, No. 3, pp.40~47, 1988.
3. 이상호, "컴퓨터 통합생산을 위한 컴퓨터 네트워크의 성능관리에 관한 연구," 공학박사 학위논문, 부산대학교, 1997.
4. U. Rembold, B.O. Nnaji, A.Storr, Computer Integrated Manufacturing and Engineering, Addison-Wesley, 1993.
5. 홍승호 외, "분산제어 및 자동화 시스템과 필드버스," 제어·자동화·시스템공학회지 제 2권, 제 4호, pp19~29, 1996.
6. 조규갑, 정현석, 생산시스템 공학 입문, 도서출판 기술, 1994.
7. C.D. Pegden, Robert E. Shanon, R. P. Sadowski., Introduction to Simulation Using SIMAN, McGraw Hill, 1991.
8. Profibus Trade Organization, DIN 19245 Profibus Standard, 1991.
9. WorldFIP, WorldFIP Specification, 1995.
10. K. Bender, PROFIBUS : The Fieldbus for Industrial Automation, Prentice Hall, 1993.
11. 이경창, 김인준, 이석, "시뮬레이션을 이용한 필드버스 프로토콜의 성능 평가," '97 한국자동제어학술회의, pp676~679, 1997.