

Profibus-DP에서의 원격 피드백 제어 시스템 구축

이경창*, 강송*, 이석**

Implementation of Remote Feedback Control System via Profibus-DP Network

Kyung Chang Lee*, Song Kang* and Suk Lee**

ABSTRACT

As many sensors and actuators are used in many automated systems, various industrial networks are adopted for real-time distributed control. In order to take advantages of the networking, however, the network implementation should be carefully designed to satisfy real-time requirements considering network delays. This paper presents the implementation of a remote feedback control system via Profibus-DP network for real-time distributed control. More specifically, the effect of the network delay on the control performance evaluated on Profibus-DP testbed. Also, the traditional PID gain tuning methods are used to demonstrate the feasibility of the remote feedback control.

Key Words : remote feedback control system(원격 피드백 제어 시스템), Profibus-DP(프로피버스-DP), fieldbus(필드버스), network delay(네트워크 지연), industrial network(산업용 네트워크)

1. 서론

최근 고성능의 마이크로 프로세서가 급속하게 발전함에 따라, 대다수의 제어 시스템은 디지털 제어 시스템으로 대체되었다. 특히, 산업용 컴퓨터를 이용한 디지털 제어 시스템은 뛰어난 유연성(flexibility)과 적응성(adaptability)을 가지고 있기 때문에, 공정 자동화(process automation)나 조립 자동화(assembly automation)과 같은 분야에서 필수적인 역할을 하게 되었다. 그러나, 시스템이 복잡해지면서 더 많은 수의 필드기기들(field devices)-센서, 구동기, PLC(Programmable Logic Controller), 산업용 컴퓨터 등과 같은-이 사용됨에 따라, 시스템에서 처리되어야 할 데이터량이 급속하게 증가되었다. 이

로 인하여, 단일 시스템으로는 실시간 처리가 어렵게 되었으며, 시스템의 신뢰성 확보도 어렵게 되었다. 또한, 기존의 일대일로 연결되는 점대점(point-to-point) 연결방식으로는 너무 많은 배선을 필요로 하게 됨에 따라, 시스템의 유지 및 보수가 커다란 문제로 대두되었다.

이러한 문제로 인하여, 점대점 연결방식의 시스템들은 네트워크를 이용한 분산형 연결방식으로 대체되고 있는 추세이다. 즉, 제어기와 필드기기들을 일대일로 연결되는 점대점 방식에서 단일한 전송 매체를 사용하는 산업용 네트워크(industrial network)를 이용하여 연결하는 방식으로 전환됨으로써 시스템의 성능향상과 단순화, 신뢰성 증대 등의 장점을 얻을 수 있게 되었다.^(1,2)

* 부산대학교 지능기계공학과

** 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

산업용 네트워크에 접속되는 필드기기에서 발생하는 데이터들은 크게 산발적 실시간과 주기적 실시간, 그리고 비실시간 데이터의 세 가지 종류로 구분될 수 있다. 이러한 데이터들은 하나의 전송 매체를 통하여 원활하게 전송될 수 있어야 한다. 만약, 이러한 데이터들이 제대로 관리되지 못하면 산발적 데이터나 주기적 실시간 데이터가 정해진 한계치 내에 전송되지 못하게 됨으로써, 즉, 네트워크 지연(network delay)이 발생하게 됨으로써, 시스템의 성능이 저하될 뿐만 아니라 시스템에 치명적인 해를 입히게 된다. 따라서, 산업용 네트워크는 산발적 데이터나 주기적 실시간 데이터가 정해진 한계치 내에 전송되어야 한다는 조건, 즉, 실시간 요구 조건이 만족되도록 설계되어야 한다.⁽³⁾

이러한 목적으로, 1980년대 초반 GM에서 MAP (Manufacturing Automation Protocol)이 개발되었다. 그러나, MAP은 OSI 참조 모델(Open System Interface reference model)의 7개 계층을 모두 사용하기 때문에, 실시간 요구 조건의 만족에는 한계를 보여주었다. 이에 따라, 1980년대 후반, 필드기기들 간의 실시간 통신을 지원할 수 있는 산업용 네트워크 즉, 필드버스(fieldbus)가 개발되었으며, 현재, Profibus, WorldFIP, Fieldbus Foundation, CAN (Controller Area Network), Device-Net, Control-Net 등과 같은 프로토콜들이 사용되고 있다. 특히, 최근에는 IEC에 의해 Profibus, WorldFIP, Fieldbus Foundation 등을 포함하는 IEC 61158 필드버스 표준이 개발되었으며, 발전소와 같은 공정 시스템, 부품 조립라인 등과 같은 조립 시스템을 중심으로 활발하게 적용되고 있다.^(4,5)

특히, 공정 시스템이나 조립 시스템에서는 그림 1과 같이 하나의 공통된 작업을 위하여 다수의 필

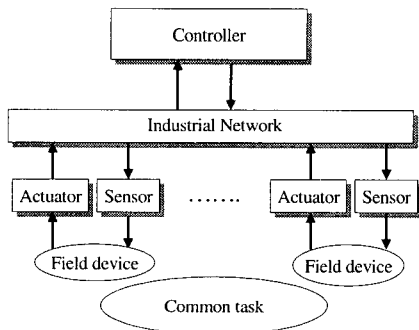


Fig. 1 Closed-loop control system via a network

드기기들이 사용되어야 할 필요가 있다. 이러한 시스템의 경우, 필드기기들은 복잡한 작업의 수행이나 공동 작업을 위하여 산업용 컴퓨터나 중대형 PLC와 같은 단일 제어기에 의하여 동시에 제어되어야 한다. 최근에는 이러한 네트워크를 이용한 제어 시스템에 대한 연구가 여러 분야에서 진행되고 있다. 이러한 연구들 중 대표적인 것으로, 완전 분산 제어 시스템(fully distributed control system)에서 네트워크의 영향 평가에 관한 연구가 진행된 바 있으나, 이는 주로 성능 평가에 초점을 맞추었다.⁽⁶⁾ 또한, Profibus-FMS에서의 플랜트 제어에 관한 연구가 진행된 바 있으나, 이는 네트워크 성능변수의 조절에 의한 플랜트 제어에 초점을 맞추었다.⁽⁷⁾

이에 따라, 본 논문에서는 필드기기와 하나의 제어기가 Profibus-DP에 연결된 원격 피드백 제어 시스템의 구조를 제안하며, 네트워크 지연의 원인을 규명하고자 한다. 본 논문은 5장으로 구성되어 있다. 2장에서는 공정 시스템용 네트워크로 주로 사용되는 Profibus-DP 네트워크에 대하여 설명하며, 3장에서는 Profibus-DP 네트워크를 이용한 원격 피드백 제어 시스템의 구조를 제시하며, 네트워크를 구성할 때 발생할 수 있는 네트워크 지연에 대하여 분석한다. 4장에서는 DC 모터를 플랜트로 하여 실험 모델을 구성하여 응답 특성을 평가하고, 네트워크 지연의 영향을 최소화할 수 있는 제어기 설계 방법을 제시한다. 마지막으로, 5장에서는 본 연구의 결론을 서술한다.

2. Profibus-DP 프로토콜

Profibus는 응용계층의 종류에 따라 FMS, DP 및 PA로 구분한다. Profibus-FMS(Fieldbus Message Specification)는 다양한 실시간 통신 서비스의 사용이 가능하므로, 대다수의 생산시스템에 적합하다. Profibus-DP(Decentralized Peripherals)는 빠른 데이터 전송이 가능하므로, 주로 분산된 필드기기들 간의 실시간 통신이 요구되는 분산 제어 시스템나 원격 제어 시스템용 네트워크로 적합하다. Profibus-PA (Process Automation)는 전자기적 간섭에 대한 내성(intrinsic safety)을 가지므로, 원자력 발전소와 같은 특수한 환경에 적합하다.^(8,9)

특히, Profibus-DP는 통신 방식으로 폴링(polling)을 사용한다. 여기에서, 폴링이란 산업용 컴퓨터와 같은 중앙 제어기가 한 번에 하나씩 필드기기에

데이터 전송을 요구하는 요청 프레임(request frame)을 전송하고, 이에 해당되는 필드기기는 응답 프레임(response frame)을 전송하는 방식을 말한다. 이러한 통신 방식으로 인하여, Profibus-DP는 일정한 시간 이내에 응답을 받을 수 있게 된다.

그림 2에는 Profibus-DP 프로토콜의 구조를 나타내었다. Profibus-DP는 실시간 요구 조건을 만족시키기 위하여, OSI 참조 모델 7계층 중 1, 2계층인 PHY(PHYSical layer)와 FDL(Fieldbus Data Link layer)만을 사용한다. 또한, 네트워크 관리 기능의 수행을 위하여 FMA1/2(Fieldbus MAnagement layer 1 & 2)를 사용하며, 사용자 인터페이스(user interface)와 FDL간에 데이터 교환이 원활하게 이루어질 수 있도록 DDLM(Direct Data Link Mapper)을 사용한다.

Profibus-DP의 전송 매체로는 RS485가 사용되며, 전송속도는 9.6Kbps에서 12Mbps까지 가능하다. Profibus-DP에 접속되는 스테이션들은 DP 마스터 클래스 1(DP master class 1, DPM1), DP 마스터 클래스 2(DP master class 2, DPM2) 및 슬레이브 스테이션(slave station)으로 구분된다. DPM1은 사전에 정해진 폴링 주기 동안 슬레이브에게 폴링을 수행하는 중앙 제어기로서의 역할을 하는 스테이션으로, PLC나 산업용 컴퓨터 등이 여기에 해당된다. DPM2는 네트워크 모니터를 통하여 성능 측정이나 진단, 네트워크 성능 변수의 유지 등의 역할을 수행한다. 마지막으로, 슬레이브는 입력 정보를 수집하거나, 주변 기기에 출력 정보를 보내는 필드기기로서의 역할을 수행한다. 여기에서, DPM1과 같은 마스터 스테이션은 다른 스테이션에게 전송을 하거나 전송을 요구할 수 있으나, 슬레이브는 마스터의 요청에 의해서만 통신에 참여할 수 있다.

Profibus-DP의 토폴로지에는 모노 마스터 구성

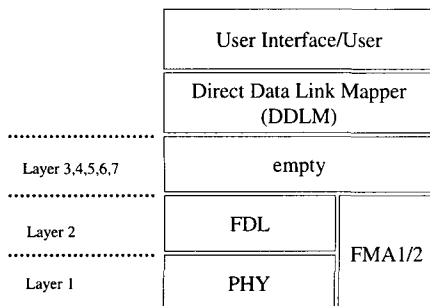


Fig. 2 Architecture of Profibus-DP protocol

(mono master configuration)과 멀티 마스터 구성(multi master configuration)이 사용된다. 모노 마스터 구성에서는 하나의 마스터 스테이션, 즉, DPM1만이 사용되며, DPM1은 정해진 폴링 주기 내에 슬레이브와의 통신을 수행한다. 이 때, 폴링 주기는 중앙 제어기의 응용 프로그램 주기보다 짧아야 한다. 여기에서, 폴링 주기는 대다수의 엄격한 실시간(hard real-time) 시스템에서 10msec 정도라고 알려져 있다.⁽⁴⁾ 멀티 마스터 구성에서는 여러 개의 마스터가 하나의 전송 매체에 연결될 수 있다. 즉, 네트워크에는 다수의 DPM1, 각 DPM1의 통제를 받는 슬레이브들, 그리고 부가적인 설정 및 진단을 수행하는 DPM2로 구성되어 있다.

그림 3에는 Profibus-DP의 통신 모델을 나타내었다. 사용자 응용 프로그램을 가진 사용자 인터페이스는 FDL과의 원활한 통신을 위하여 DPRAM(Dual Port RAM)을 이용한다. DPRAM의 입출력 프로세스들은 일정주기마다 DPRAM의 해당 입력 버퍼(input buffer)에 기록되어 있는 수신된 데이터를 읽거나, 전송할 데이터를 해당 모듈의 출력 버퍼(output buffer)에 기록한다. 또한, FDL은 DPRAM의 출력 버퍼로부터 데이터를 읽어 각 슬레이브로 송신하거나, 각 슬레이브로부터 응답 프레임을 수신하여 해당 DPRAM의 입력 버퍼에 기록한다. 이러한 통신 모델의 특성-응용 프로세스와 통신 기능이 DPRAM에 의하여 분리되어 있는 특성-으로 인하여, Profibus-DP는 엄격한 실시간 통신 시스템에서 요구되는 실시간 요구조건을 만족할 수 있다.

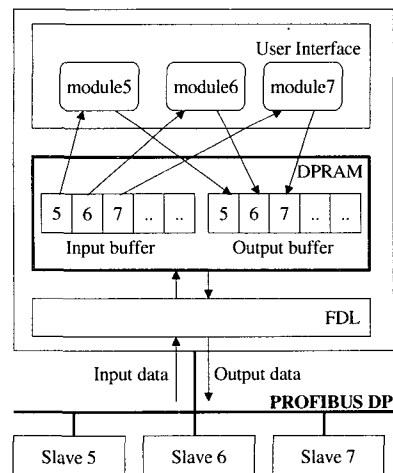


Fig. 3 Communication model of Profibus-DP

3. Profibus-DP에서의 원격 피드백 제어 시스템의 구조

3.1 원격 피드백 제어 시스템의 구조

Profibus-DP는 매우 빠른 응답 특성을 가지며, 분산된 필드기기들간의 엄격한 실시간 요구 조건을 만족하기에 충분한 성능을 가진다. 본 논문에서는 Profibus-DP 네트워크의 성능을 평가하기 위하여 실험 모델을 구현하였다. 실험 모델에는 마스터 역할을 하는 한 대의 컴퓨터와 슬레이브 역할을 하는 다수의 컴퓨터가 접속되어 있다. 그림 4는 Profibus-DP의 응답 특성, 즉, 네트워크에 접속되어 있는 슬레이브의 수에 따른 반응시간을 보여준다. 여기에서, 반응시간이란 마스터가 첫 번째 슬레이브에게 통신 요청을 보내고 나서부터 마지막 슬레이브로부터 응답을 받았을 때까지 걸린 시간으로 정의된다. 실험 모델에서 마스터는 2바이트(byte)의 메시지를 10msec마다 슬레이브들로 폴링을 수행하며, 슬레이브는 2바이트의 메시지로 응답한다. 그림에서 전송속도가 1.5Mbps일 때, 1개의 슬레이브만이 통신에 참여하는 경우 반응시간이 215 μ sec로 나타났으며, 12개의 슬레이브가 통신에 참여하는

경우에도 3msec 이하로서, 매우 빠른 반응시간을 나타내었다. 또한, Profibus-DP의 전송속도가 12Mbps인 경우, 1개의 스테이션에서 37 μ sec만이 소요되며, 12개의 스테이션에서 1msec이하의 반응시간을 나타내었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 제어기와 필드기기간의 샘플링 주기가 10msec 정도인 엄격한 실시간 시스템에서, 단일 제어기가 최소 12개 이상의 필드기기들을 동시에 제어할 수 있을 정도로 Profibus-DP 네트워크의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

그림 5에는 원격 피드백 제어 시스템의 응용 프

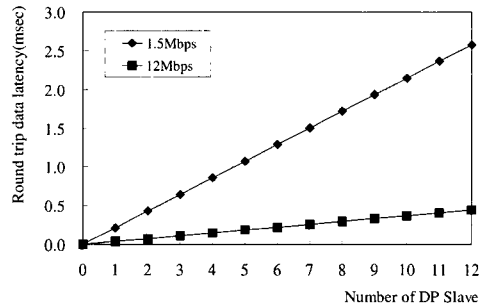


Fig. 4 Overall response time of Profibus-DP

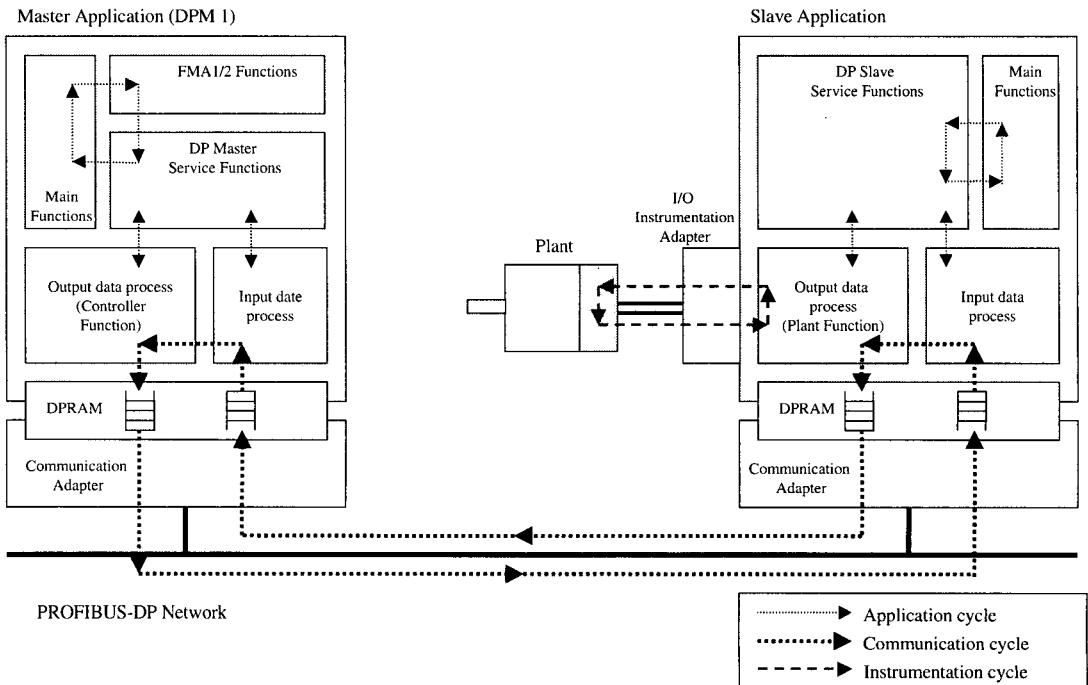


Fig. 5 Structure of application programs of remote feedback control system

로그럼 구조를 나타내었다. 그림에서 제어 시스템은 마스터/슬레이브 응용 프로그램, DPRAM 및 통신 어댑터(communication adapter)로 구성되어 있다. 또한, 제어 시스템은 응용 사이클(application cycle), 통신 사이클(communication cycle) 및 계측 사이클(instrumentation cycle)의 세 가지 사이클로 동작한다. 여기에서, 응용 사이클에서는 마스터/슬레이브 응용 프로그램의 시작과 정지 및 DP 서비스 함수의 실행에 필요한 정보가 교환되며, 통신 사이클에서는 DPRAM과 통신 어댑터를 통하여 마스터와 슬레이브간의 데이터 교환이 이루어진다. 마지막으로, 계측 사이클에서는 I/O 계측 어댑터(I/O Instrumentation Adapter)를 통해 플랜트 제어를 위한 정보의 교환이 이루어진다.

마스터 응용 프로그램의 통신 순서는 다음과 같다. 마스터 응용 프로그램에서, 통신이 시작되면 메인 함수(main function)에 의해 FMA1/2 함수(FMA1/2 function) 및 DP 마스터 서비스 함수(DP master service function)가 실행되어 통신 초기화가 이루어진다. 그리고 나서, 슬레이브와의 데이터 교환을 위하여 입출력 데이터 프로세스(input/output data process)가 실행되며, DP 마스터 서비스 함수와의 데이터 교환이 이루어진다. 특히, 출력 데이터 프로세스에는 제어기 함수가 구현되어 있으며, 제어기 함수는 입력 데이터 프로세스로부터 피드백 신호를 읽어 플랜트의 제어 신호를 생성하거나, 슬레이브로의 전송을 위하여 제어 신호를 DPRAM 출력 버퍼에 저장한다.

슬레이브도 이와 동일한 방식으로 통신을 초기화하고 나서, 입출력 데이터 프로세스를 실행한다. 여기에서, 출력 데이터 프로세스에는 플랜트 함수가 구현되어 있으며, 플랜트 함수는 입력 데이터 프로세스로부터 읽은 제어 신호를 이용하여 플랜트의 제어를 수행하거나, 플랜트의 피드백 신호를 마스터로 전송하기 위하여 DPRAM 출력 버퍼에 저장한다.

마스터의 통신 어댑터는 입출력 데이터 프로세스와 동기를 유지하면서, DPRAM 출력 버퍼의 제어 신호를 슬레이브에게 전송하거나, 슬레이브로부터 수신한 피드백 신호를 DPRAM 입력 버퍼에 저장한다. 슬레이브도 이와 동일한 방식으로 제어 신호를 DPRAM 입력 버퍼에 저장하거나, 피드백 신호를 마스터에게 전송한다.

3.2 Profibus-DP에서의 네트워크 지연 특성

Profibus-DP 네트워크를 이용하여 원격 피드백 제어 시스템을 구성하는 경우, 다양한 원인으로 인하여 제어 신호 및 피드백 신호의 전송에 지연이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 전송 지연을 네트워크 지연으로 정의하였다.

Profibus-DP에서 발생하는 네트워크 지연은 다음과 같은 세 가지 원인에 의하여 발생한다.^(8,9)

첫째, 사용자 인터페이스에서 동작하는 응용 프로그램과 Profibus 인터페이스 모듈(interface module)간의 동기화 방식에 의하여 네트워크 지연이 발생한다. 그림 6은 현재 가장 널리 사용되고 있는 Siemens사의 ASPC2와 SPC3과 같은 통신 프로토콜 칩(chip)을 사용하였을 경우에 발생하는 네트워크 지연을 나타내고 있다. 그림에서, T_{MAPC} 는 마스터에서 응용 프로그램이 동작하는 주기인 마스터 응용 주기(master application cycle)이며, T_{DP} 는 Profibus-DP 네트워크의 통신 주기(폴링 주기)인 DP 통신 주기이다. 또한, 가로축은 시간의 진행 방향을 나타내며, 화살표는 각 모듈들간의 데이터의 이동을 의미한다. 그림 6.A에서, T_{MAPC} 와 T_{DP} 가 동일한 경우, 마스터 응용 프로그램에서 데이터를 전송하고 나서 슬레이브로부터 응답을 받기까지 총 4 통신 주기에 해당되는 네트워크 지연이 발생한다. 즉, 마스터 응용 프로그램이 전송해야 할 데이터를

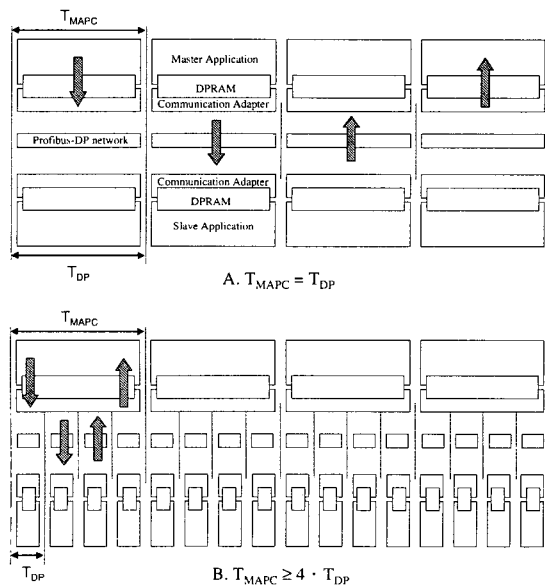


Fig. 6 Network delay due to dead time of protocol chip

DPRAM에 저장하는 데 1주기, 네트워크를 통하여 슬레이브에게 전송되는 데 1주기, 슬레이브로부터 마스터로 전송되어 DPRAM에 기록되는 데 1주기, 마스터 응용 프로그램이 DPRAM으로부터 읽어 들이는 데 1주기가 걸린다. 이러한 네트워크 지연은 통신 프로토콜 칩의 불감시간(dead time)에 의하여 발생한다. 그림 6.B는 현재 주로 사용되고 있는 보상 방법을 나타내고 있다. 그림에서 T_{DP} 주기를 T_{MAPC} 주기보다 4배 이상 짧게 함으로써, 즉, 마스터에서 응용 프로그램이 1회 동작할 때 DP 통신 주기가 4회 이상 동작하도록 조절함으로써, 네트워크 지연을 해결할 수 있다. 그러나, 이러한 방식의 경우 마스터 응용 프로그램에서 생성된 데이터가 반복적으로 전송되기 때문에, 네트워크 자원이 낭비된다는 단점이 있다.

둘째, Profibus-DP에서 사용되는 데이터 교환 서비스(data exchange service)의 특성에 의하여 네트워크 지연이 발생한다. 그림 7에는 데이터 교환 서비스의 절차를 원시함수(primitive)와 PDU(Protocol Data Unit)를 사용하여 나타내었다. 그림에서 슬레이브는 마스터로 전송해야 할 데이터가 있는 경우, Function_Upd.req 원시함수를 사용하여 DPRAM의 출력 버퍼에 저장한다. 그리고 나서, 슬레이브가 마스터로부터 요청 프레임, 즉, SRD_REQ_PDU를 수신하면, 슬레이브는 DPRAM의 입력 버퍼에 저장되어 있는 데이터를 읽어 마스터에게 응답 프레임, 즉, SRD_RES_PDU를 송신한다. 또한, 슬레이브는 수신된 데이터를 DPRAM의 입력 버퍼에 기록하고, SRD.ind 원시함수를 사용하여 사용자 인터페이스에게 데이터가 수신되었음을 알린다. 이러한 서비스 방식에 따라, 마스터에서 송신된 데이터가 슬레이브에서 처리되어 수신되는 데까지 최소 1 통신 주기 이상의 네트워크 지연이 발생하게 된다. 이러

한 지연은 프로토콜 규격에 정의되어 있는 문제이기 때문에, 원격 피드백 제어 시스템을 구성할 때 보상이 되어야 한다.

셋째, 슬레이브에서 DP 통신 주기와 플랜트 샘플링 주기간의 비동기로 인하여 네트워크 지연이 발생한다. 스테이션에는 통신 모듈과 플랜트 모듈이 독립적으로 동작되기 때문에, 동기화가 이루어져야 한다. 일반적으로, 이러한 동기의 유지는 사용자 인터페이스에서 보상되어야 하지만, 매우 빠른 주기를 가지고 실행되는 두 모듈의 동기화를 이루는 것은 실제적으로 매우 어려운 일이다. 따라서, Profibus-DP에서 원격 피드백 제어 시스템을 구성할 경우에는, 슬레이브의 비동기화 문제로 발생할 수 있는 1 통신 주기의 네트워크 지연을 고려하여야 한다.

이상에서 살펴 본 바와 같이, Profibus-DP에서 발생하는 네트워크 지연들 중 인터페이스의 불감시간에 의한 네트워크 지연은 T_{MAPC} 를 $4 \cdot T_{DP}$ 이상으로 설정함으로써 보상이 가능하다. 그러나, 서비스 특성과 슬레이브에서의 비동기화에 의한 네트워크 지연은 현실적으로 보상이 불가능하거나 매우 어렵다. 따라서, Profibus-DP에서 원격 피드백 제어 시스템을 구성할 경우, 이러한 2 통신 주기 이상의 네트워크 지연이 보상될 수 있도록 설계되어야 한다.

4. 원격 모터 제어에의 응용 및 성능 평가

4.1 플랜트 선정

본 연구에서는 원격 피드백 제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여, Tamagawa사의 TS3728 DC 모터를 플랜트로 선정하여 실험 모델을 구성하였다. 또한, 플랜트의 제어 입력을 위해서는 12비트 D/A 컨버터, 인코더 출력을 위해서는 16비트 카운터를 사용하였다. 실험 모델에서, 플랜트 샘플링 시간은 10ms로, 기준입력은 1000rpm으로 설정하여 속도제어를 수행하였다.

플랜트의 전달함수는 스텝응답법을 이용하여 식 (1)과 같이 1차 함수로 나타내었다.⁽¹⁰⁾

$$G(s) = \frac{v(s)}{u(s)} = \frac{543.47}{0.12s + 1} \quad (1)$$

모터 제어기의 설계 사양을 최대오버슈트(M_p)는 20% 이하, 2% 정착시간(T_s)은 1sec 이하, 감쇠비(ζ)는 0.5로 설정하고, 근궤적법(root locus)을 이용하여 PID 제어기를 설계하면 식 (2)와 같다.⁽¹⁰⁾ 여기

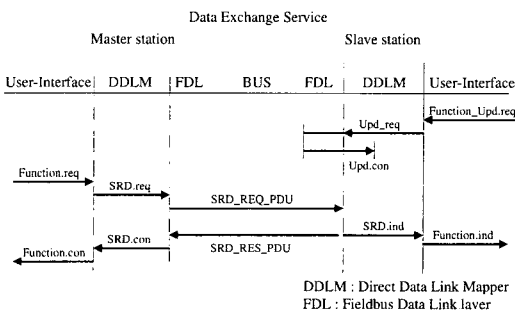


Fig. 7 Network delay caused by service characteristics

에서, K_d 는 미분이득, K_p 는 비례이득, K_i 는 적분이득이며, $K_d=0.0001$, $K_p=0.011$, $K_i=0.2$ 이다.

$$G_{PID}(s) = K_d s + K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

$$= \frac{0.0001s^2 + 0.011s + 0.2}{s}$$

설계된 제어기를 사용하여 플랜트의 스텝 응답을 측정한 결과는 그림 8과 같다. 그림에서 PID 제어기를 일대일로 연결하였을 경우 $M_p=17\%$, $T_s=0.7\text{sec}$ 로 나타났으며, 설계된 PID 제어기는 설계사양을 만족하고 있음을 알 수 있다.

4.2 Profibus-DP 네트워크 실험 모델 구성

그림 9에는 Profibus-DP를 이용한 원격 피드백 제어 시스템의 실험 모델을 나타내었다. 실험 모델에서, 1대의 제어기와 3대의 DC 모터가 Profibus-DP 네트워크에 연결되어 있으며, 1대의 제어기가 3대의 DC 모터를 동시에 제어하는 기능을 수행한다. 이러한 형태는 산업용 네트워크의 장점을 얻기 위하여, 공동 작업을 수행해야 하는 DC 모터들이 제어기 한 대에 일대일로 연결되는 점대점 연결방식에서 산업용 네트워크로 연결된 분산형 연결방식으로 대체된 것이라 볼 수 있다.

각 스테이션들의 네트워크 인터페이스로는 Siemens의 SAB-C165 마이크로컨트롤러와 마스터 및 슬레이브 전용 프로토콜 칩인 ASPC2와 SPC3을 장착한 Softing사의 PROFiBoard를 사용하였다. Profibus-DP의 전송속도는 1.5Mbps로 설정하였으며, 데이터 전송량은 2바이트(byte)로 설정하였다. 여기에서, 데이터 전송량이 2바이트인 이유는 DC 모터의 엔코더 카운트 신호가 16비트이므로 2바이트로

처리가 가능하기 때문이다. 또한, DC 모터의 샘플링 주기는 10msec로 설정하였으며, DP의 폴링 주기(T_{DP})는 네트워크 지연의 영향을 약화시킬 수 있는 $T_{MAPC} \geq 4 \cdot T_{DP}$ 통신 사이클 관계에 따라, $1/5 \cdot T_{MAPC}$ (즉, 2msec)로 설정하였다.

그림 10에는 플랜트가 제어기에 일대일로 연결되었을 때 설계된 식 (2)의 PID 제어기를 원격 모터 제어 시스템에 적용하였을 경우의 모터 응답을 나타내었다. 그림에서, M_p 는 30%로 설계사양을 초과하였으며, T_s 도 1.15초로 설계사양을 초과하였다. 이러한 결과는 3~4 통신 주기의 네트워크 지연으로 인하여, 모터의 피드백 신호가 3~4 샘플링 주기만큼 늦게 제어기에 도착하기 때문에 발생한다. 즉, Profibus-DP에서는 프로토콜의 문제 및 비동기화뿐만 아니라 응용 프로그램에서의 비동기화 문제로 최소 3 폴링 주기 이상의 네트워크 지연이 발생하기 때문에, 모터의 피드백 신호가 3~4 샘플링 주기만큼 늦어지기 때문이다. 따라서, 모터의 설계사양을 만족시키기 위해서는 네트워크 지연을 고려한 PID 제어기 설계가 이루어져야 한다.

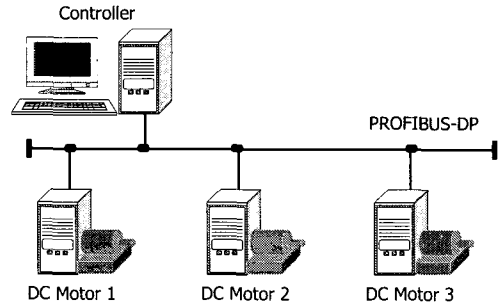


Fig. 9 Architecture of remote feedback control system

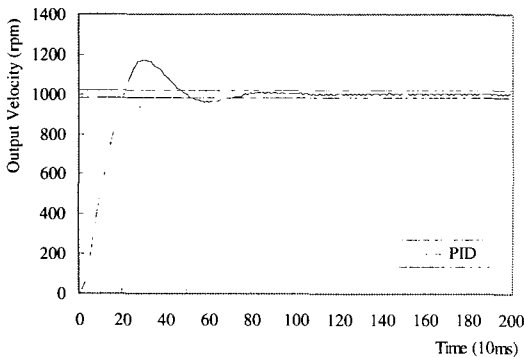


Fig. 8 Response using the PID controller without network

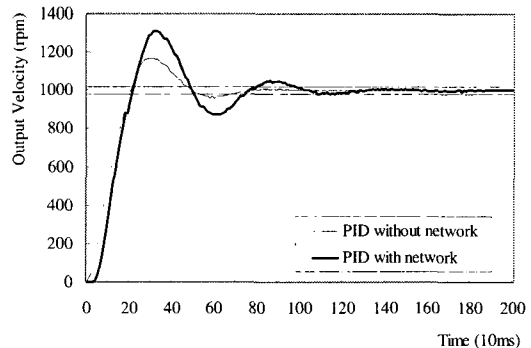


Fig. 10 Effect of network delay on a remote PID control system

4.3 네트워크 지연을 고려한 제어기 설계

본 논문에서는 네트워크 지연을 시간 지연 시스템(time delay system)의 시간 지연 개념으로 정의하여 네트워크 지연을 보상할 수 있는 방법을 제시하였다.

시간 지연 개념을 이용한 제어기 설계 방법은 모델 기반 방법과 무모델 기반 방법으로 나눌 수 있다. 모델 기반 방법으로는 Smith 예측기⁽¹¹⁾, GAP(Generalized Analytical Predictor)⁽¹²⁾, IMC(Internal Model Control)⁽¹³⁾ 등이 있으며, 무모델 기반 방법으로는 Ziegler-Nichols 계수조정법⁽¹⁴⁾, Cohen-Coon 계수조정법⁽¹⁵⁾, 피지 예측기⁽¹⁶⁾ 등이 있다. 그러나, 모델 기반 방법은 모델의 정확도에 따라 제어기 보상 능력이 크게 달라지기 때문에, 실용적이지 못한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 따라서, 본 연구에서는 무모델 기반 방법 중의 하나인 Ziegler-Nichols 계수조정법과 Cohen-Coon 계수조정법을 이용하여 네트워크 지연을 보상하였다.

4.3.1 Ziegler-Nichols 계수조정법에 의한 보상

Ziegler-Nichols 방법⁽¹⁴⁾은 무모델 기반 PID 계수조정법들 가운데 가장 대표적인 방법으로써, 시간 지연 함수를 플랜트 전달함수에 추가시켜 PID 제어기의 계수값을 구하는 방식이다. 식 (3)은 모터를 1차 함수로 가정하였을 때, 지연시간이 존재하는 플랜트의 전달함수를 나타낸 것이다. 여기에서, 3~4 샘플링 주기의 네트워크 지연을 플랜트의 시간 지연(delay time) L로 고려하였으며, L값은 네트워크 지연의 최소값인 3으로 선정하였다.

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (3)$$

$$= \frac{543.47}{0.12s+1} e^{-3s}$$

Ziegler-Nichols 계수조정법은 이러한 지연시간을 가진 플랜트 전달함수와 표 1의 식을 이용하여 PID 제어기의 계수를 결정하는 방법이다. 여기에서, L은 지연시간, T는 시정수(time constant), K는 정상이득(gain constant)을 나타낸다. 이러한 방법으로 $K_d=0.000132$, $K_p=0.008832$, $K_i=0.147$ 의 PID 계수값을 구할 수 있다.

그림 11은 Ziegler-Nichols 계수조정법에 의해 보상된 PID 제어기를 이용한 모터의 응답이다. 그림에서 M_p 는 17%로, T_s 는 0.7초로서, 설계사양을 만족시키고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로 볼 때, Ziegler-Nichols 계수조정법은 네트워크 지연을 어느 정도 보상할 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

Table 1 Ziegler-Nichols & Cohen-Coon tuning method

	K_p	T_i	T_d
Z-N	$1.2T/KL$	$2L$	$0.5L$
C-C	$\frac{T}{KL} \left(\frac{16+3L}{12T} \right)$	$\frac{L[32+6(L/T)]}{13+8(L/T)}$	$\frac{4L}{11+2(L/T)}$

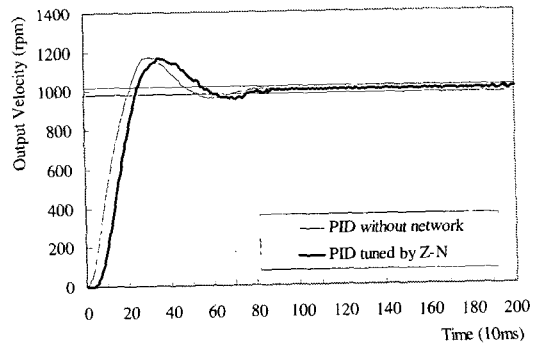
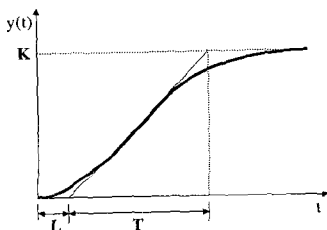


Fig. 11 Response of PID controller tuned by Ziegler-Nichols method

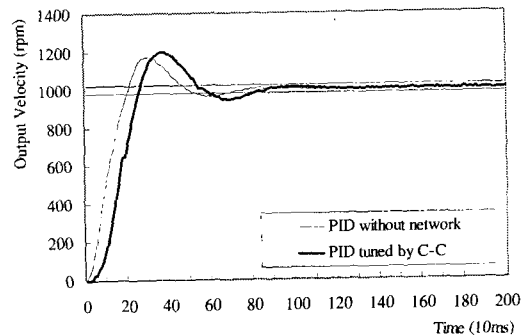


Fig. 12 Response of PID controller tuned by Cohen-Coon method

4.3.2 Cohen-Coon 계수조정법에 의한 보상

Cohen-Coon 계수조정법⁽¹⁵⁾은 Ziegler-Nichols 방법과 유사한 방법으로써, 식 (3)의 전달함수와 표 1의 수식을 이용하여 PID 제어기의 계수값을 구하는 방법이다. 이러한 방법으로 $K_d=0.00011$, $K_p=0.0102$, $K_i=0.153$ 의 PID 계수값을 구할 수 있다.

그림 12는 Cohen-Coon 계수조정법에 의해 설계된 PID 제어기를 이용한 모터의 응답성이다. 그림에서 M_p 는 20%, T_s 는 0.8초로서, Ziegler-Nichols 계수조정법보다는 성능이 좋지 못하지만, 설계사양을 만족시키고 있음을 확인하였다. 이러한 결과로 볼 때, Cohen-Coon 방법 역시 어느 정도 네트워크 지연을 보상할 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 필드버스를 이용하여 원격 피드백 제어 시스템을 구축하는 방법을 제시하였으며, 네트워크의 영향으로 인하여 네트워크 지연이 발생함을 확인하였다. 또한, 필드버스로 Profibus-DP를, 플랜트로 DC 모터를 선정하여 원격 피드백 제어 시스템의 실험 모델을 구현하였으며, 일대일로 연결되었을 경우의 플랜트의 응답 성능과 네트워크를 통하여 연결되었을 경우의 응답 성능을 비교하였다. 마지막으로, 네트워크 지연을 시간 지연 시스템의 시간 지연 개념으로 고려함으로써, 네트워크 지연이 어느 정도 보상될 수 있음을 확인하였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 필드버스를 이용하여 원격 피드백 제어 시스템 구성할 때 발생하는 네트워크 지연은 플랜트의 성능을 저하시키는 주된 요인이 되므로, 네트워크 지연을 고려한 제어기 설계가 이루어져야 한다.

둘째, Profibus-DP 네트워크에서 네트워크 지연은 프로토콜 지연과 비동기화 문제로 인하여 발생한다. 특히, 응용 프로그램의 비동기화 문제는 제어기와 플랜트의 응용 프로그램 설계 방식에 따라 증가될 수 있기 때문에, 비동기화 지연을 최소화시킬 수 있도록 사용자 응용 프로그램을 효율적으로 설계하여야 한다.

셋째, 네트워크 지연은 시간 지연을 가진 시스템으로 간주할 수 있다. 따라서, 네트워크 지연은 시간 지연을 고려한 제어기 설계방법을 이용하여

어느 정도 보상될 수 있다.

참고 문헌

1. Rembold, U., Nnaji, B. O. and Storr, A., Computer Integrated Manufacturing and Engineering, Addison-Wesley, 1993.
2. Ray, A., "Networking for Computer-Integrated Manufacturing," IEEE Network, vol. 2, no. 3, pp. 40-47, 1988.
3. PNO, Profile for Variable Speed Drives, PROFIDRIVE, version 2.0, Profibus International, 1997.
4. 이경창, 김인준, 이석, "공장자동화를 위한 필드버스 프로토콜의 평가," 한국정밀공학회지, 제14권, 제4호, pp. 46-55, 1997.
5. 홍승호, 박태진, "필드버스를 이용한 생산자동화 시스템 구축 기술 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제3호, pp. 91-102, 1999.
6. Cavalieri C., Stefano, A. D., Mirabella, O., "Impact of fieldbus on communication in robotic systems," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, No 1, pp. 30-48, 1997.
7. 이경창, 김기웅, 김희현, 이석, "실시간 페루프 제어 시스템을 위한 Profibus-FMS 네트워크의 구현," 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제6권, 제5호, pp. 92-98, 2000.
8. Popp, M., The Rapid Way to Profibus, Profibus International, 1997.
9. PNO, Technical Overview - Hints and Tips, <http://www.profibus.com>, 1999.
10. Ogata, K., Modern Control Engineering, Prentice-Hall, 1990.
11. Smith, O. J., "Closer control of loops with dead time," Chemical Engineering Process, Vol. 53, No. 5, pp. 217-219, 1959.
12. Wellons, M. C. and Edgar, T. F., "The generalized analytical predictor," Industrial Engineering on Chemical Research, Vol. 26, No. 8, pp. 1523-1536, 1987.
13. Morari, M. and Zafiriou, E., Robust process control, Prentice-Hall, 1989.
14. Ziegler, J. G. and Nichols, N. B., "Optimum Settings for Automatic Controllers," Transactions

- on ASME, Vol. 64, 1942.
15. Cohen, G. H. and Coon, G. A., "Theoretical consideration of retarded control," Transactions on ASME, Vol. 75, 1953.
 16. Jang, M. J. and Chen, C. L., "Fuzzy successive modelling and control for time-delay system," International Journal on Systems Science, Vol. 27, No. 12, pp. 1483-1490, 1996.
 17. Zhao, F., Ou, J. and Du W., "Pattern-based fuzzy predictive control for a chemical process with dead time," Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 13, pp. 37-45, 2000.