

# Ethernet을 통한 실시간 네트워크 제어시스템 설계

## Real-Time Networked Control System Design via Ethernet

김창유\*, 임현\*\* 이영삼\*\*\*, 권오규\*\*\*\*

(Chang-Yu Kim, Hyun Lim, Young-Sam Lee, Oh-Kyu Kwon)

**Abstract** - Recently, network systems are widely used in several areas, and some considerable attentions have been directed to the Networked Control System(NCS). In NCS, network-induced delays are inevitable, and they sometimes degrade the performance of networked control systems to be a source of potential instability. In this paper, We proposes a compensation method for networked control system subject to network-induced delays by using a simple method, which is based on a sort of predictive strategy. To evaluate its feasibility and effectiveness, a real-time NCS for a rotary inverted pendulum is implemented via an Ethernet. Based on the experimental results, we show that the proposed simple method can be a practical and feasible solution to NCS design.

**Key Words** : Real-time control, ethernet, TCP/IP, networked control system, delay

### 1. 서론

최근 제어 시스템 분야에서 각종 산업 및 상업적 시스템들은 센서, 구동장치, 제어기가 통합된 구조에서 따로 분리되어 펌드버스 등의 네트워크를 통해 연결되어 있는 네트워크 기반 제어시스템(networked control system, NCS)구조로 바뀌어 가고 있다. 그 이유는 네트워크 기반 제어시스템은 비용 절감, 시설이나 전력 소모면에서의 경제성, 설치나 운용의 편의성 등 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문이다[1].

이 논문에서 다루고 있는 네트워크 기반 제어시스템은 단순히 원격에서 제어 명령이나 모니터링을 하는 것이 아니라, 제어기 자체를 원격에 두고 제어 루프가 실시간 네트워크를 통해 폐루프로 구성되어 있는 시스템을 말한다[2][3]. 이와 같이 네트워크를 통해서 폐루프가 형성되는 네트워크 기반 제어시스템을 구축할 때의 최대의 문제점은 네트워크를 통한 데이터의 통신에 시간지연이 발생한다는 점이다. NCS에서는 네트워크 버스의 대역폭, 데이터를 전송할 노드의 수와 각 메시지의 우선순위로 인하여 전송에서의 지연시간이 필수적으로 존재하게 되는데, 이러한 네트워크 지연시간은 불규칙하게 발생하고, 제어기는 현재의 플랜트상태를 알 수 없으므로 시스템을 제어하는데 많은 어려움이 존재한다. 따라서 이러한 불규칙한 시간 지연에 의한 제어시스템의 성능 저하 및 불안정성을 방지하는 연구가 필요하다.

이 논문에서는 네트워크 기반 제어 시스템을 분석하여 안

정확을 보장하는 제어를 설계하는 방법을 제시한다. 그리고 이 방법의 유효성을 보이기 위하여, TCP/IP로 연결된 네트워크 제어 시스템에 대해 적용하고 제어기가 효과적으로 동작하는 결과를 제시한다.

### 2. 네트워크 제어시스템

#### 2.1 네트워크 제어시스템 모델

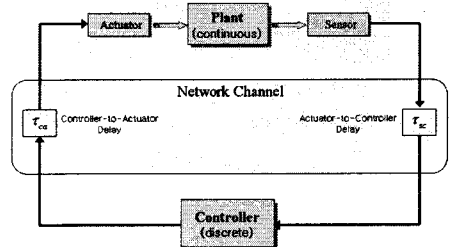


그림 1 네트워크 기반 제어시스템의 블록선도

그림 1과 같이 네트워크 기반 제어시스템은 크게 플랜트와 제어기 그리고 네트워크 시스템으로 구성된다. 여기에서 플랜트는 일반적으로 센서(sensor)와 구동기(actuator)를 포함하고 있다. 또한 일반적으로 플랜트를 수학적인 모델로 표현을 하면 연속형 시스템이 되고, 네트워크 시스템이나 제어기는 컴퓨터 등의 디지털 시스템으로 구성이 되므로 이산형 시스템으로 묘사가 가능하다.

센서, 제어기, 구동기 등의 요소는 시스템에 따라서 시간 구동형(time-driven)이나 사건 구동형(event-driven)으로 가 정할 수 있다. 시간 구동형은 입력신호를 받아들이는 때나 출

#### 저자 소개

- \* 김창유 : 仁荷大學 電氣學科 碩士課程
- \*\* 임현 : 仁荷大學 電氣學科 學士課程
- \*\* 이영삼 : 仁荷大學 電氣學科 助教授
- \*\*\* 권오규 : 仁荷大學 電氣學科 正教授

력신호를 전송할 때, 모든 동작이 외부의 클럭신호에 따라서 일정한 샘플링 주기마다 동작하는 형태이다. 반면에 사건 구동형은 장치에 입력이 도착할 때 마다 즉각적으로 반응하는 형태이다. 이렇게 센서나 구동기 등의 장치가 어떤 구동방식을 지니는가에 따라 서로 다른 형태의 제어기법이 적용되어야 하므로 네트워크 기반 제어시스템에서는 이를 사전에 정의하는 것이 중요하다[6]. 이 논문에서 다루는 대상 플랜트의 센서는 시간-구동형 센서라고 가정하여 일정한 샘플링 주기마다 플랜트의 출력을 샘플링한다. 또한 샘플링된 신호는 일정한 주기의 timer interrupt에 의해 제어기로 보내진다. 그리고 제어기는 데이터 신호가 통신 시스템에 의해 도달할 때 마다 동작하는 사건-구동형이라고 가정한다.

일반적으로 네트워크 기반 제어시스템에서 발생하는 네트워크 지연은 발생 위치에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 센서-제어기(sensor-to-controller)지연  $\tau_{sc}$ 와 제어기-구동기(controller-to-actuator)지연  $\tau_{ca}$ 가 그것인데, 사물변 제어기에 대해서는 이 센서-제어기 지연과 제어기-구동기 지연을 합쳐서  $\tau = \tau_{sc} + \tau_{ca}$ 로 동시에 고려할 수 있다. 또한 본 논문에서 사용하는 제어기는 정적 제어기로서 제어입력을 계산하는데 걸리는 시간 때문에 생기는 계산 지연(comutation time)은 네트워크 지연에 비해서 작은 것으로 간주하여 전체 지연  $\tau$ 에 포함된다고 가정한다.

## 2.2 Ethernet을 통한 네트워크 제어시스템

이더넷(Ethernet)은 가장 광범위하게 설치된 근거리통신망 기술이다. 이더넷의 가장 큰 특징은 다중접근충돌처리(CSMA/CD)이다. 만약 데이터를 전송하는 시점에 다른 장치가 동시에 전송을 시작하면서 충돌이 발생하게 되면 충돌한 데이터들은 폐기되고, 데이터를 전송한 장치들에게 재전송을 요구하게 된다. 각 장치들은 예측할 수 없는 어느 일정시간을 대기한 후 성공할 때 까지 일정 회수만큼 데이터를 재전송한다. 따라서 이더넷 기반에서는 네트워크로 인한 시간지연을 예측할 수 없다.

또한 네트워크 제어시스템에서 통신프로토콜은 중요한 부분이다. 가장 주요한 프로토콜에는 TCP와 UDP가 있다. TCP는 연결 지향적이며 자체적으로 오류를 처리한다. 여기서 연결지향이란 말은 데이터를 전송하는 측과 데이터를 전송받는 측에서 전송의 데이터 전송선로를 만든다는 의미이다. 따라서 신뢰성있는 데이터의 전송이 가능하다. 반면에 UDP는 비연결지향적이며 오류를 처리하거나 순서를 재조형시켜주는 기능을 가지고 있지 않다. 단순히 데이터를 전송하거나 수신하기만 하는 프로토콜이다. 본 논문에서는 TCP를 기반으로 하여 네트워크를 설계하였기 때문에 데이터의 전송 오류는 없다고 가정하고 시간지연만이 존재한다고 가정한다.

## 3. 네트워크 제어시스템 설계

이 논문에서 다루는 NCS의 구조는 시간-구동형 센서와 구동기 그리고 사건-구동형의 제어기로 구성되어 있다. 아래 그림은 client와 server사이에 시간 지연이 있는 NCS의 타이밍 선도이다.

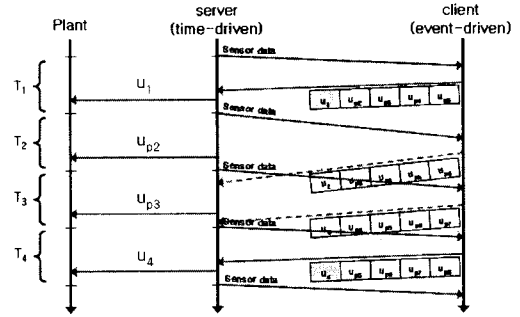


그림 2 시간지연이 있을 때의 타이밍 선도

server쪽에서 현재 플랜트의 센서측정값을 client쪽으로 보내게 된다. 센서측정값을 전달받은 client에는 플랜트와 구동기 시스템을 정확히 모델링한 수학적 모델이 있다고 가정한다. 한번의 sensor 데이터를 받은 동안에 자체적으로 몇 번의 루프를 돌아서 예측가능한 제어입력  $up1, up2, up3, up4, \dots$  등을 구하게 되고, server로 보내는 데이터 패킷에 현재의 제어입력신호와 예측된 제어 입력을 같이 보내게 된다.

만약 client에서 보낸 제어신호가 정해진 시간 안에 server에 도착하면 현재의 제어입력신호인  $u$ 가 쓰이게 된다. 하지만 제어신호가 정해진 시간 안에 도착하지 않으면 먼저 보내진 제어입력 중에서 지연된 시간만큼 예측된 예측 제어입력이 쓰여지게 된다. 예를 들어  $T_2$ 에서 정해진 시간 안에 제어입력이 들어오지 않은 경우  $T_1$ 에서 보내졌던  $up2$ 를 사용하게 된다. 계속해서  $T_3$ 에서도 정해진 시간 안에 제어입력이 들어오지 않은 경우에는  $T_1$ 에서 보내졌던  $up3$ 를 사용하게 된다.

## 4. 실험 및 결과분석

이 논문에서는 네트워크 제어시스템을 회전형 도립진자(Rotary Inverted Pendulum)를 제어대상으로 하고 TCP/IP 방식의 네트워크를 이용하여 구성한다.

### 4.1 회전형 도립진자

실험에 사용할 회전형 도립진자의 모습은 그림 3과 같다.

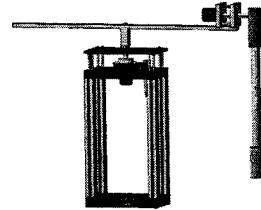


그림 3 회전형 도립진자

그림의 도립진자는 진자와 팔(arm)의 각도를 측정하는 엔코더로 구성되어 있으며 구동기로는 DC모터가 있다.

### 4.2 실시간 네트워크 제어시스템 구성

본 논문에서 구성한 네트워크 제어시스템은 도립진자와 센

서를 관장하는 8bit micro processor, 제어기 PC, 네트워크로 구성되며 그 개요도는 아래 그림과 같다.

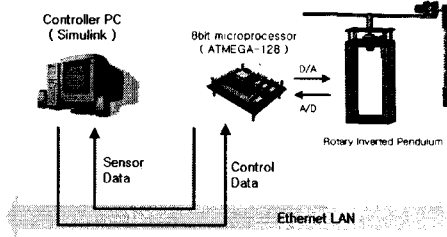


그림 4 네트워크 개요도

센서부에는 8bit micro processor가 있어서 도립진자의 센서 입력을 담당한다. 제어부에는 센서부로부터 받은 신호를 이용하여 제어입력신호를 계산하는 MatLab Simulink 프로그램이 있다. 이 두 PC간의 네트워크는 TCP/IP 방식을 이용한 Ethernet 환경으로 구성한다. 또한 제어부에는 TCP/IP 소켓 프로그램을 dll파일로 만든 후 user defined function인 S-function을 사용하여 Simulink 환경에서 곧 바로 TCP/IP를 이용할 수 있도록 했다. 네트워크 허브의 방식과 속도 및 갯수는 중요하지 않으며 제어기 PC와 센서간의 시간지연만이 문제가 된다. 센서와 제어기 PC간의 네트워크는 TCP/IP를 사용하며 서로 다른 허브를 거쳐 정보를 교환하는 형태를 이룬다. 실험에서는 센서부가 server가 되어 네트워크 Port를 개방하고 대기하면 제어부 PC가 client가 되어 센서부의 네트워크 IP Address를 입력하여 고정 IP로 연결된다. 두 대간의 시간지연을 측정하기 위하여 TCP/IP 프로토콜 상의 응답 신호의 왕복시간을 측정하여 그 시간을 2등분하여 지연된 시간을 알려주고 신호가 손실된 정도를 알려준다.

#### 4.3 실험결과

네트워크를 통해 여러 번에 걸쳐 시간지연을 측정한 결과 평균 시간지연은 0.8[msec]정도가 측정되었다. 또한 전송 데이터의 오류나 손실이 발생한 경우는 없었다. 샘플링 타임은 8[msec]로 하였고 예측입력신호는 총 6개로 하여 구성하였다. 그림 5와 6은 Simulink상에서 확인한 실험결과이다.

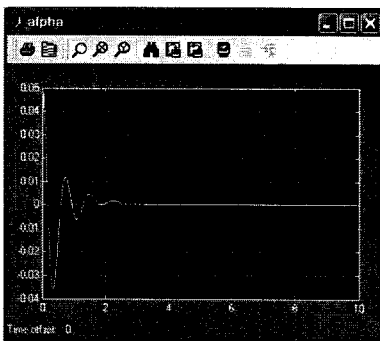


그림 5 시간지연을 고려한 경우 NCS

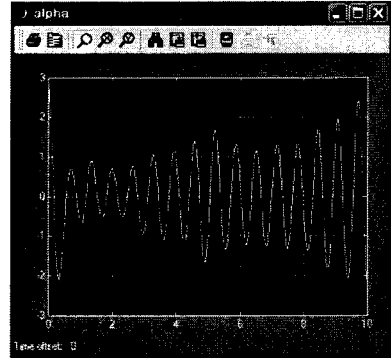


그림 6 시간지연을 고려하지 않은 경우의 NCS

## 5. 결론

이 논문에서는 시간 구동형 방식으로 설계된 네트워크 기반 실시간 제어 시스템을 위한 온라인 지연 보상기를 제시하였다. 이 보상기는 빠른 계산속도를 지닌 컴퓨터에서 플랜트의 입력 전달시 발생하는 지연시간을 보상할 수 있는 예측 제어입력을 계산하여 미리 보내는 방식으로 구성되었다. 그리고 최첨단 도립진자를 네트워크 제어시스템에 적용하는 실험을 통해 이 방법의 유효성을 확인하였다. 도립진자는 불안정하고 응답이 빠른 시스템이기 때문에 지연된 데이터 입력이 일정 수 이상 연속으로 들어올 경우 제어가 불가능하다. 그러므로 네트워크 제어시스템을 구성하려는 대상이 최대 시간지연에 견딜 수 있는 범위를 미리 조사되어야 할 것이며 이를 보상할 수 있는 방법을 제안하고 시간지연의 크기를 알 수 없는 경우 적절한 대응방법연구가 차후 과제이다.

## 참 고 문 헌

- [1] R.S. Raji, "Smart networked for control", IEEE Spectrum, vol. June, pp. 49-50, 1989.
- [2] M.Y. Chow and Y. Tipsuwan, "Networked-based control systems: a tutorial", the 27th annual conference of the IEEE industrial electronics society, pp. 1593-1602, 2001.
- [3] J.W. Overstreet and A. Tzes, "An internet-based real-time control engineering laboratory", IEEE Control System Magazine, vol. 19, pp. 19-34, 1999.
- [4] J. Nilsson, Real-time Control Systems with Delays, Ph.D. thesis. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1998.
- [5] Ho-Jun. Yoo, Design of Network Control System with Time Delay, Ph.D. thesis. Inha University, 2003
- [6] U.Ozguner, H.Goktas, H.Chan, J.Winkelman, M.Liubakka, and R.Krotolica, "Automotive suspension control through a computer communication network", IEEE conference on control applications, 1992
- [7] L. Wang, M. Yu, T. Chu, "An LMI Approach to NCSs with Data Packet Dropout and Transmission Delays", 43rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3545-3550, 2004