

논문 2006-43SC-4-5

시간지연을 갖는 LonWorks/IP 가상 디바이스 네트워크에서 직류모터의 위치추종제어

(Tracking Position Control of DC Motor on LonWorks/IP Virtual Device Network with Time Delay)

송 기 원*

(Ki Won Song)

요 약

LonWorks/IP 가상 디바이스 네트워크(VDN) 상의 전달지연은 실시간 분산제어 시스템의 성능과 안정성을 악화시킨다. LonWorks/IP VDN은 LonWorks 디바이스 네트워크와 IP(데이터) 네트워크와의 통합네트워크이다. LonWorks/IP VDN 상에서의 서보제어를 수행할 경우 시간지연은 확률적인 특성을 강하게 나타낸다. 산업현장에 대한 예지보전을 위한 실시간 분산제어 환경에서 즉각적인 응답은 필수불가결한 요소이다. 그러므로 네트워킹 된 분산제어시스템의 안정성을 보장하고 성능을 개선하기 위해서는 시간에 따라 가변적인 불확실한 시간지연을 보상할 필요가 있다. 본 논문에서는 출력 되먹임 루프에 적절한 필터와 외란관측기를 이용한 제어기를 제안한다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안된 제어기의 성능과 안정성이 Smith 예측기 기반의 내부모델제어기(IMC)의 제어결과와 비교 제시된다. 제안된 제어기는 IMC 보다 안정성과 추종성능을 상당히 개선시킬 수 있으며 외란과 잡음에 강인한 특성을 갖는 것을 보인다. 그러므로 제안된 제어기는 가변적인 시간지연을 갖는 LonWorks/IP VDN 상에서 예지보전을 위한 실시간 분산제어에 매우 적합하다.

Abstract

The network induced transmission delay deteriorates the performance and stability of the real-time distributed control system on LonWorks over IP (LonWorks/IP) virtual device network (VDN). LonWorks/IP virtual device network is an integrated form of LonWorks device network and IP data network. The time delay in servo control on the LonWorks/IP-based VDN has highly stochastic nature. In the real-time distributed servo applications for predictive maintenance on the factory floor, timely response is essential. Therefore, in order to guarantee the stability and to improve the performance of the networked distributed control system the time-varying uncertain time delay needs to be compensated. In this paper a control scheme based on disturbance observer with a band pass filter is proposed and tested through computer simulation. The result is compared with that of internal model controller (IMC) based on Smith predictor. It is shown that the proposed control scheme can significantly improve the stability and the tracking performance, and is more disturbance and noise tolerant than the IMC. Therefore, the proposed control scheme is well suited for the distributed servo control for predictive maintenance on LonWorks/IP-based virtual device network with time-varying transmission delay.

Keywords : Networked Distributed Control, LonWorks/IP Virtual Device Network(VDN), Internal Model Controller(IMC), Disturbance Observer.

I. 서 론

최근의 인터넷과 제어네트워크 또는 필드버스 네트

워크라고 불리는 디바이스 네트워크에 대한 통신과 네트워크 기술의 발달은 원격제어 구현을 가능하게 하고 있다. 이것은 현대의 산업 및 비즈니스 시스템에 있어서 컴퓨터, 통신 그리고 제어부문이 각각의 운용과 정보처리 수준에 맞게 통합되어가고 있음을 의미한다. 예로써 제조 플랜트, 차량, 항공기나 우주선과 같은 많은 복잡한 제어시스템에 있어서 직렬통신 네트워크가 감시

* 평생회원, 청주대학교 전자정보공학부
(Division of Electronics & Information Engineering,
Cheongju University)
접수일자: 2006년1월5일, 수정완료일: 2006년7월4일

용 컴퓨터, 제어기나 지능형 입출력 장치들 간의 정보와 제어신호의 교환을 위해 채택되어 있다.

특히 IP 네트워크의 편재성과 저비용구조는 정보에 대한 유비쿼터스 접근을 가능하게 한다. 이로 인해 IP 네트워크 상에서 분산제어 네트워크의 구현을 통해 산업현장의 정보에 대한 유비쿼터스 접근이 가능하게 된다. 그러므로 IP 네트워크는 서로 다른 네트워크 환경에서 광범위한 분산제어 시스템을 구현하는데 있어 매력적이다. 디바이스 네트워크 (또는 제어네트워크)는 IP 네트워크의 장점을 이용하여 서로 다른 두 네트워크 구성요소를 적절히 상호 연결하면 산업 현장의 정보에 대한 유비쿼터스 접근을 제공할 수가 있다. 일반적으로 산업현장의 네트워킹 된 분산제어 환경에서는 즉시 응답성이 매우 중요한 요소이다. 특히 실시간 서보제어나 제조공정에 대한 예지예방보전의 경우에는 더더욱 즉각적인 응답성능이 중요하다^[1,2]. 서보제어나 예지예방보전에 있어서 시간지연에 따른 문제는 반드시 해결되어야 하므로 이에 대한 적절한 예측 및 보상이 필수적으로 요구된다.

시간지연 문제는 여러 공학 분야에서 대두되는 까다로운 문제로 이를 해결하기 위해 수많은 연구가 진행되어져 왔다. 레이더나 수중음파탐지와 같은 응용에 있어 시간지연은 다중 전송경로와 송수신기 간의 잡음에 의한 간섭에 기인한다^[3,4]. 화학공정에서는 상대적으로 긴 시정수와 불감대가 시간지연을 초래한다^[5].

Smith 예측기는 Otto J. Smith에 의해 고안된 이래로 제어시스템에서 정적인 시간지연을 보상하기 위해 광범위하게 사용되어 왔다^[6]. 일반적으로 Smith 예측기 기반의 제어기를 내부모델제어기(IMC: Internal Model Controller)라고도 부른다. Smith 예측기 기반 제어기는 시스템에 대한 모델이 사전에 정확하게 규명되어 있을 경우 정적인 시간지연을 보상하는데 우수한 성능을 제공한다. 실제로 1980년대에는 Smith 예측기 기반의 IMC를 장착한 산업용 제어기들이 산업현장의 서보제어 시스템에 적용되었다^[5].

한편 불확실한 시간지연에 의한 제어문제는 정적인 시간지연에 대한 제어에 비해 적게 연구되고 있다. 일반적으로 불확실한 시간지연을 갖는 경우에는 안정성을 보장하기 힘들며, 안정성을 보장하기 위해서는 제어성능의 저하를 피할 수 없게 된다. LonWorks/IP 가상 디바이스 네트워크(VDN: Virtual Device Network) 상에서의 분산제어에 있어서 시간지연은 센서에서 제어기까지의 시간지연과 제어기에서 구동기까지 시간지연이 서

로 많이 다를 수 있다^[1]. 네트워킹 된 분산 제어시스템의 성능과 안정성을 확보하기 위해서는 시간지연은 예측되고 적절히 보상되어야 한다.

본 연구에서는 LonWorks/IP VDN이라고 하는 IP 네트워크와 LonWorks 디바이스 네트워크의 통합네트워크 구조에서 동작하는 새로운 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기는 시간지연에 대한 예측 보상기와 외란 관측기로 구성된다. DC 서보모터에 대한 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 제어기의 유효성이 변형된 Smith 예측기 기반 IMC 제어의 결과와 비교 제시된다. 제 II장에서는 LonWorks/IP VDN상에서의 시간지연에 대한 추정과 시간지연이 제어시스템에 미치는 영향이 조사된다. 가변적인 전송지연에 대한 예측과 보상을 위한 제어기가 제시된다. 제 III장에서는 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안된 제어기의 유효성을 Smith 예측기 기반의 IMC의 경우와 비교하여 제시한다. 제 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

1. 시간 지연의 영향

산업현장의 프로세스와 관련한 정보에 대한 유비쿼터스 접근을 가능하게 하는 LonWorks/IP VDN은 지능형 센서와 구동기가 실시간의 분산제어 네트워크에 통합되어 구성되고 IP 네트워크를 가로지르는 일대일 통신에 의해 특성화 된다. Fig. 1에 LonWorks/IP VDN 상에서 구현되는 전형적인 분산제어시스템의 구조를 나타내었다. LonWorks/IP 게이트웨이/인터넷 서버는 Ethernet과 LonWorks 네트워크 사이의 호환성을 이용한다. Ethernet 연결은 사용자로 하여금 IP 네트워크에 대한 접근을 지원하고, LonWorks 연결은 사용자가 TCP/IP 연결을 통해 어떤 워크스테이션을 통해서도 LonWorks 네트워크에 접근할 수 있도록 지원할 수 있다.

현재까지 서로 다른 네트워크의 전달특성에 대한 많은 연구가 수행되어져 왔다. 반면에 LonWorks/IP VDN과 같은 통합 네트워크에 대한 전달 특성에 관한 것은 상대적으로 덜 주목을 받아왔다. IP 네트워크와 LonWorks/IP VDN에 대한 전달 특성에 대한 연구가 수행되었다^[1]. 통신 패킷의 방향에 의존하여 네트워크 상에 구현된 분산제어시스템에서의 시간 지연은 쉽게 두개의 유형으로 구분될 수 있다. 하나는 센서와 제어기 사이의 시간지연이고, 다른 하나는 제어기와 구동기 사이의 시간지연이다. 시간지연이 발생하는 부분은 프

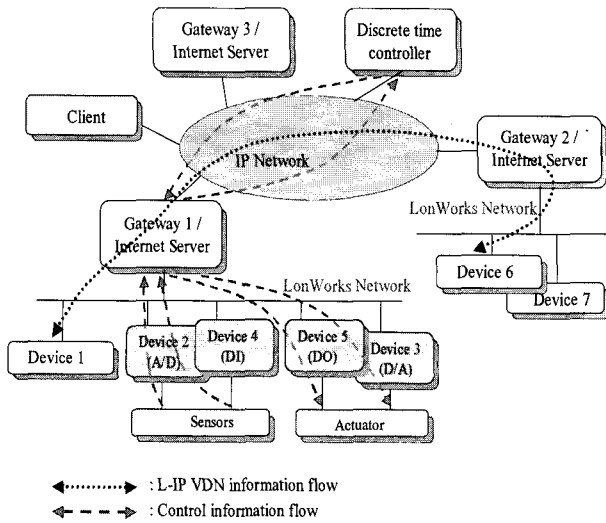


그림 1. LonWorks/IP 가상 디바이스 네트워크상에서의 분산제어시스템
 Fig. 1. Distributed Control Systems on LonWorks/IP Virtual Device Network.

로토콜 변환에 의한 지연과 분산제어 네트워크에서 발생하는 네트워크 전달지연을 들 수 있다. LonWorks/IP 네트워크 상에서의 네트워크 전달 지연은 단순히 디바이스 네트워크에서의 지연과 IP(데이터) 네트워크 상에서의 지연의 합이다. 디바이스 네트워크 상에서의 불확실한 시간지연은 LonWorks/IP 게이트웨이/인터넷 서버가 디바이스 네트워크 상의 센서노드로부터 정보를 수신할 때 발생한다. IP 네트워크상의 시간지연은 IP 네트워크 상의 노드들 간의 통신으로부터 발생한다.

데이터 네트워크 상에서의 시간지연은 원거리의 경우 Gaussian 분포를 나타내며, 비교적 단거리나 또는 많은 라우터를 거치는 경우에는 Gamma 분포나 지수함수 분포를 갖는다는 연구결과도 있다^[7]. LonWorks/IP VDN에서의 시간지연은 좀더 복잡한 분포를 나타낼 것이다. LonWorks/IP VDN 상에서 데이터 네트워크와 디바이스 네트워크 간의 왕복 데이터 전달 특성에 관한 연구 결과 두 가지 특성분포를 모두 갖는 것이 실험적으로 관측되었다. 이것은 시간지연이 네트워크 상에서의 정보의 전달지연 뿐만 아니라 LonWorks/IP 게이트웨이/인터넷 서버에서 프로토콜 변환에 소요되는 시간에도 영향을 받기 때문이다^[1].

2. 시변 시간지연에 대한 보상

Fig. 2에 시간지연을 갖는 분산제어시스템에 대한 변형된 Smith 예측기 기반 IMC의 구조를 나타내었다. Smith 예측기 기반 IMC는 클라이언트 웹 브라우저 화

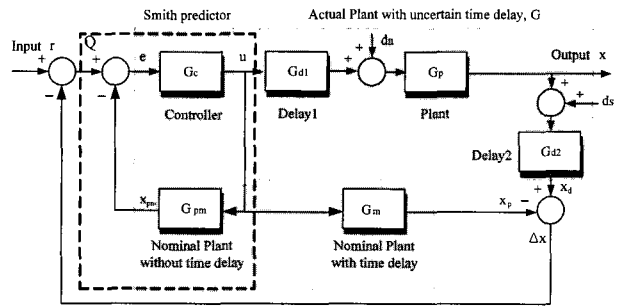


그림 2. Smith 예측기를 갖는 내부모델제어기 블록선도
 Fig. 2. Block diagram of Internal Model Controller(IMC) with Smith predictor.

면에서 자바 애플릿으로 구현될 수 있다. 데이터 네트워크 상에서 구현된 이산시간 제어기의 샘플링 간격은 디바이스 네트워크 상의 센서노드에서 측정하는 속도 샘플링 간격과는 다르며 서로 동기화되지 않는다. 여기서 시간지연을 보상하기 위하여 Smith 예측기가 사용되었다. 이 기법을 이용하면 시간지연이 폐루프 제어시스템의 특성방정식으로부터 완전하게 제거될 수 있다. 그러므로 시간지연을 갖는 프로세스에 대한 제어기 설계는 시간지연이 없는 시스템에 대한 제어기 설계로 축소될 수 있다.

Fig. 2에서 입력과 출력사이의 전달함수는 식(1)과 (2)로 표현될 수 있다.

$$\frac{X(s)}{R(s)} = \frac{G_c G_p G_{d1}}{1 + G_c G_{pm} - G_c G_m + G_c G_p G_{d1} G_{d2}} \quad (1)$$

$$G(s) = G_{d1}(s) G_p(s) G_{d2}(s) \quad (2)$$

G_p : 플랜트

G_{pm} : 플랜트 모델

G_d : 시간지연

G_m : 시간지연을 갖는 플랜트 모델

G_c : 제어기

G : 시간지연을 갖는 플랜트

시간지연에 대한 전달함수 G_{d1} , G_{d2} 는 둘 다 LonWorks/IP VDN에 의해 도입되므로 G_d 로 결합될 수 있다. 결과적으로 식(1)에서의 전달함수는 식(3)으로 표현될 수 있다.

$$\frac{X_d(s)}{R(s)} = \frac{G_c G_p G_d}{1 + G_c G_{pm} - G_c G_m + G_c G_p G_d} \quad (3)$$

만일 시간지연 τ 에 대하여 $|\tau s|$ 가 충분히 작다면 시간 지연 항은 영차 Pade 근사표기가 가능하므로 G_{pm} 과 G_m 은 (4)식으로 표현될 수 있다.

$$G_{pm} = \frac{B(s)}{A(s)}, G_m \cong G_{pm} \left(\frac{1}{\tau s + 1} \right) \quad (4)$$

만일 플랜트가 최소위상시스템이라면 IMC제어기 $Q(s)$ 와 $G_c(s)$ 는 각각 식(5)와 식(6)으로 설계될 수 있다.

$$Q(s) = \frac{1}{\lambda s + 1} \cdot \frac{A(s)}{B(s)} \quad (5)$$

$$G_c(s) = \frac{1}{\lambda s} \cdot \frac{1}{G_{pm}(s)} \quad (6)$$

식(6)에서 제어기 G_c 는 순수한 적분기, 이득 $1/\lambda$ 과 시간지연을 포함하지 않는 플랜트의 역 전달함수 $1/G_{pm}$ 로 구성된다. 만일 플랜트와 모델간의 오차가 없다면 Smith 예측기에서 매개변수 λ 는 원하는 응답을 얻기 위해 조절된다. 이 매개변수는 페루프 시스템의 성능에 관련된 오버슈트와 상승시간에 반영된다. 플랜트와 모델 사이의 오차가 존재할 때 λ 를 증가시키면 시스템의 강인성을 증가시킬 수 있다. 만일 예측모델 G_m 이 정확하게 시간지연을 갖는 플랜트 G 와 일치하면 입력과 출력사이의 전달함수는 (7)식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{X(s)}{R(s)} \cong \frac{1}{\lambda s + 1} \cdot \frac{1}{\tau_1 s + 1} \quad (7)$$

여기서 τ_1 은 제어기로부터 구동기까지의 시간지연을 나타낸다.

시간지연을 갖지 않는 플랜트가 최소위상 시스템이 아니라면 IMC는 식(6)으로 구현될 수 없다. 플랜트 G_p 가 다음의 (8)식으로 기술될 수 있다고 가정하면,

$$G_{pm} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{B^+(s)B^-(s)}{A(s)} \quad (8)$$

여기서 $B^+(s)$ 는 안정한 영점으로 구성되는 다항식이고 $B^-(s)$ 은 불안정한 영점으로 구성되는 다항식이다. 그러면 IMC $Q(s)$ 와 $G_c(s)$ 는 각각 (9)식과 (10)식으로 설계될 수 있다.

$$Q(s) = \frac{1}{\lambda s + 1} \cdot \frac{A(s)B^-(s)}{B^+(s)\psi} \quad (9)$$

$$G_c = \frac{A(s)B^-(s)}{B^+(s)[\lambda\psi s + (\psi - |B^-(s)|^2)]} \quad (10)$$

여기서 $\psi = \max |B^-(j\omega)|^2$, $\omega \in [0, \pi/T_s]$ 이고 T_s 는 표본화 주기를 나타낸다.

만일 예측모델 G_m 이 정확하게 시간지연을 갖는 플랜트 G 와 일치하면 입력과 출력사이의 전달함수는 (11)식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{X}{R} \cong \frac{1}{\lambda s + 1} \cdot \frac{1}{\tau_1 s + 1} \cdot \frac{|B^-(s)|^2}{\psi} \quad (11)$$

여기서 τ_1 은 제어기로부터 구동기까지의 시간지연을 나타낸다.

Smith 예측기 기반의 IMC의 추종제어 성능과 강인성은 매개변수 λ 에 대한 의존성이 강하다. (11)식에서 출력의 크기가 항상 목표치보다 작거나 같고 τ_1 의 값에 변함에 따라 가변적인 위상지연이 존재함을 나타내고 있다. 만일 시간지연이 정적이고, 실제 플랜트와 모델간의 오차가 없다면 Smith 예측기 기반 IMC는 PID 제어기보다 나은 성능을 제공할 수 있다. 그러나 비록 Smith 예측기 기반 IMC가 PI 제어기보다 성능이 우월하다고 할지라도 네트워킹 된 상태에서 제어에 있어서 시간지연은 시변이고 불확실하며 모델의 불일치는 알려지지 않는 시스템의 동적특성과 비선형성 등으로 인하여 항상 존재한다. 따라서 LonWorks/IP VDN상에 존재하는 불확실한 시간지연을 충분히 보상할 수 있는 새로운 제어기가 고안되어야 할 것이다.

네트워킹 된 제어시스템(NCS: Networked Control System)에서 시간지연에 관한 상당수의 연구결과들이 있다. 대부분의 경우 NCS의 안정성에 초점이 맞춰져 있다^[8-12]. 반면 LonWorks/IP VDN상에서 시변 시간지연에 관련된 제어시스템에 관한 연구는 그리 많지 않은 실정이다. LonWorks/IP VDN상에서 시변 전달지연은 항상 존재하는 것으로 특히 실시간 서보 제어에서는 안정성과 성능을 위해 반드시 보상되어야 한다.

3. 외란 관측기 설계

센서 잡음과 외란의 영향이 검토될 필요가 있다. Fig.

2에서 시간지연과 플랜트에 대한 오차가 없을 경우 외란 D_s 와 지연된 출력 X_d 와의 관계는 (12)식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{X_d(s)}{D_s(s)} = \frac{G_{d2}}{1 + G_c G_{pm}} \quad (12)$$

반면 외란 D_s 와 플랜트의 출력 X 와의 관계는 (13)식으로 주어진다.

$$\frac{X(s)}{D_s(s)} = \frac{G_c G_{pm} G_{d1} G_{d2}}{1 + G_c G_{pm}} \quad (13)$$

(12)식과 (13)식에서 외란 D_s 는 플랜트 출력과 지연된 플랜트 출력에 직접적으로 영향을 미친다. 외란이 작용할 때 제어시스템의 보다 나은 성능을 얻기 위해서는 외란, 모델의 부정확성과 시간지연의 예측오차에 대한 제어시스템의 강인성이 확보되어야 한다. 플랜트가 (14)식처럼 공칭의 플랜트와 곱셈형 오차로 표현된다고 가정하자.

$$G_p(s) = G_{pm}(s)(1 + G_\delta(s)) \quad (14)$$

여기서 $G_\delta(s)$ 는 모델링 오차를 나타낸다.

시간지연 예측오차는 $|\tau s|$ 가 충분히 작으면 $G_d(s) = e^{-\tau s}$, $G_{dm}(s) = e^{-\tau_m s}$, $G_{d1}(s) = e^{-\tau_1 s}$, $G_{d2}(s) = e^{-\tau_2 s}$ 일 때, (15)식으로 표현될 수 있다.

$$G_d(s) \cong \frac{1}{(\tau_m s + 1)} \left(1 - \frac{\tau_\delta s}{1 + \tau_\delta s} \right) \quad (15)$$

여기서 $\tau = \tau_m + \tau_\delta$ 이다.

Fig. 2에서 지연된 플랜트 출력과 예측 출력간의 차이를 $\Delta X(s)$ 라 하면, $\Delta X(s)$ 는 (16)식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta X(s) = \frac{G_{pm} G_{dm}}{1 + \tau_\delta s} (G_\delta - \tau_\delta s) U(s) \quad (16)$$

(16)식은 IMC에서 $G_c(s)$ 에 의해 어느 정도 여과되지만 모델의 부정확성과 시간지연 예측오차의 영향이 여전히 플랜트의 출력에 나타남을 내포하고 있다. 다항식 $(G_\delta - \tau_\delta s)$ 이 유한한 값이지만 일반적으로 0으로 수렴하는 것은 아니며, 함수 $\tau_\delta s / (1 + \tau_\delta s)$ 가 고주파 통과 필터로 동작한다. 출력을 표본화하는 순간에 부가

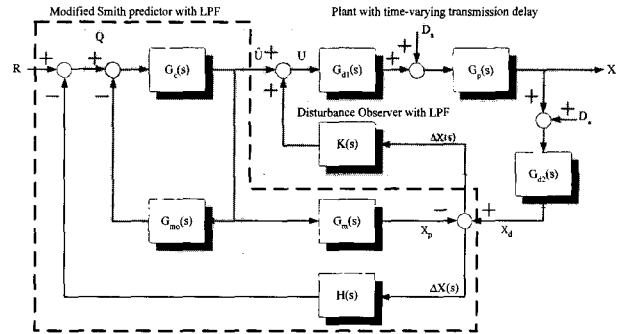


그림 3. 제안된 제어기의 블록선도
Fig. 3. Block diagram of the proposed control scheme.

되는 고주파 잡음이나 외란은 직접 제어기로 전달되기 때문에 제어시스템의 성능과 안정성을 악화시킨다. 제어시스템의 안정성을 확보하기 위해 제어기의 이득 여유를 희생시켜야 한다. 따라서 모델의 부정확성과 시간지연의 예측오차를 보상하기 위해서 외란 관측기가 필요하다. 또한 시간지연 예측오차에 의한 함수 $\tau_\delta s / (1 + \tau_\delta s)$ 의 영향을 효과적으로 줄이기 위해 되먹임 루프에 적절한 적절한 필터를 설치하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 형태로 구현되는 되먹임 루프에 적절한 필터를 갖는 Smith 예측기와 외란 관측기 기반의 제어기를 제안한다.

Fig. 3에서 외란관측기를 채택한 제어시스템의 지연된 출력 X_d 와 플랜트의 예측 출력 X_p 와의 차이는 (17)식으로 표현된다.

$$\Delta X(s) = X_d - X_p = G U - G_m \hat{U} \quad (17)$$

Fig. 3으로부터 H 와 K 가 같다고 가정하면 $Q, R, H, U, \Delta X, X_d$ 및 X 사이의 관계는 식(18-21)으로 표현될 수 있다.

$$\hat{U} = Q(R - H \cdot \Delta X) \quad (18)$$

$$U = QR + H \cdot \Delta X(1 - Q) \quad (19)$$

$$X_d = G_d G_p QR + G_d G_p H \cdot \Delta X(1 - Q) \quad (20)$$

$$X = G_{d1} G_p QR + G_{d1} G_p H \cdot \Delta X(1 - Q) \quad (21)$$

식(14-15)와 식(17-19)을 식(20)에 대입하면, 식(22)를 얻을 수 있다.

$$X_d \cong (1 + G_\delta) \left[1 - \frac{\tau_\delta s}{1 + \tau_\delta s} \right] G_m QR + (1 + G_\delta) G_m H(1 - Q) \Delta X \quad (22)$$

모델의 부정확성과 시간지연에 대한 예측오차의 영향을 특성화하기 위해서 불필요한 출력은 식(23)처럼 정의될 수 있을 것이다.

$$\Phi_d(s) \equiv -\tau_\delta s (1 + G_\delta) e^{-\tau_\delta s} G_m QR + G_\delta G_m QR + (1 + G_\delta) e^{-\tau_\delta s} G_m H(1 - Q) \Delta X \quad (23)$$

$\Phi_d(s)$ 의 크기는 넓은 주파수 범위에서 0으로 수렴해야 한다. 그러기 위해서 적절한 필터 $H(s)$ 가 식(24)의 조건에 맞게 설계될 수 있다.

$$\|H(j\omega)\| = \left[\frac{\|(G_\delta - \tau_\delta s (1 + G_\delta) e^{-\tau_\delta s}) QR\|}{\|(1 + G_\delta) e^{-\tau_\delta s} (1 - Q) \Delta X\|} \right] \quad (24)$$

적절한 필터는 보다 나은 실제 출력을 위해 구현될 필요가 있다. 그러나 오직 시간 지연된 출력만이 네트워크 채널을 통해 제어기에 전달되는 문제가 있다. 따라서 바람직하지 않는 출력과 원하는 출력과의 관계는 각각 식(25)와 식(26)으로 정의될 수 있다.

식(14-15)와 식(17-19)를 식(21)에 대입하면, 식(25)를 얻을 수 있다.

$$X = G_{pm} QR - \tau_1 s (1 + G_\delta) e^{-\tau_1 s} G_{pm} QR + G_\delta G_{pm} QR + (1 + G_\delta) e^{-\tau_1 s} G_{pm} H(1 - Q) \Delta X \quad (25)$$

모델의 부정확성과 시간지연에 대한 예측오차의 영향을 특성화하기 위해서 불필요한 출력을 $\Phi(s)$ 라 하면, $\Phi(s)$ 는 식(26)처럼 정의될 수 있을 것이다.

$$\Phi(s) \equiv e^{-\tau_1 s} G_{pm} \left[\frac{(G_\delta - \tau_1 s) QR + (1 + G_\delta) H(1 - Q) \Delta X}{(1 + G_\delta) H(1 - Q) \Delta X} \right] \quad (26)$$

$\Phi(s)$ 의 크기는 넓은 주파수 범위에서 0으로 수렴해야 한다. 그러기 위해서는 되먹임 루프에 식(27)과 같은 조건을 만족하는 필터를 필요로 한다.

$$\|H(j\omega)\| = \left[\frac{\|(G_\delta - \tau_1 s) QR\|}{\|(1 + G_\delta) (1 - Q) \Delta X\|} \right] \quad (27)$$

그러면 Q , R , H 와 ΔX 의 관계는 식(28-30)으로 주어진다.

$$\|H \cdot \Delta X\| = \left[\frac{\|(G_\delta - \tau_1 s) QR\|}{\|(1 + G_\delta) (1 - Q)\|} \right]_{s=j\omega} \quad (28)$$

$$\left\| \frac{\Delta X}{R} \right\| = \left[\frac{\|(G_\delta - \tau_1 s) Q\|}{\|(1 + G_\delta) (1 - Q) H\|} \right]_{s=j\omega} \quad (29)$$

$$\|\Delta X\| = \left[\frac{\|(G_\delta - \tau_1 s) QR\|}{\|(1 + G_\delta) (1 - Q) H\|} \right]_{s=j\omega} \quad (30)$$

식(27)에서 H 의 크기의 증가는 ΔX 의 크기의 감소를 의미한다. 적절한 필터 H 는 충분히 큰 시정수를 갖는다. 식(28)에 의하면 $H \cdot \Delta X$ 의 노음은 유한하다. 식(29-30)은 H 가 저역통과 필터이거나 주파수 선택 필터일 경우 그 크기가 저주파나 특정주파수에서는 크고, 그 이외의 고주파에서는 작기 때문에 고주파 성분에 의한 예측오차의 크기가 억제될 것이라는 것을 내포하고 있다.

적절한 필터 H 와 K 를 구현하기 위해 \hat{Q} 와 \hat{G} 를 식(31)과 식(32)로 정의한다.

$$\hat{Q} \equiv \frac{G_c}{1 + G_c G_{pm} (1 - G_{dm} H)} \quad (31)$$

$$\hat{G} \equiv \frac{G_d G_p}{1 - G_d G_p K} \quad (32)$$

그러므로 식(31-32)에 의해 입력과 출력 사이의 관계 식은 식(33)과 식(34)로 표현된다.

$$\frac{X_d}{R} = \frac{\hat{Q} \hat{G} (1 - G_{dm} G_{pm} K)}{1 + \hat{Q} \hat{G} H (1 - G_{dm} G_{pm} K)} \quad (33)$$

$$\frac{X}{R} = \frac{\hat{Q} \hat{G} (1 - G_{dm} G_{pm} K) G_{d2}^{-1}}{1 + \hat{Q} \hat{G} H (1 - G_{dm} G_{pm} K)} \quad (34)$$

위의 식(33-34)로부터 $G_{dm} G_{pm} K \neq 1$ 이어야함을 알 수 있다. 식(34)를 식(35)로 놓으면, 식(35)는 식(36-39)식으로 정의될 수 있다.

$$\frac{X}{R} \equiv \frac{N(s)}{L(s)} = \frac{N_1(s) N_2(s)}{L_1(s) + L_2(s)} \quad (35)$$

$$N_1(s) \equiv G_c G_{pm} \quad (36)$$

$$N_2(s) \equiv (1 + G_\delta) G_{d1} (1 - G_{dm} G_{pm} K) \quad (37)$$

$$L_1(s) \equiv 1 + G_c G_{pm} \quad (38)$$

$$L_2(s) \equiv G_c G_d G_p H - G_c G_{dm} G_{pm} H - G_d G_p K \quad (39)$$

식(35)가 $N_1(s)$ 와 $L_1(s)$ 만으로 표시되기 위해서는 식(37)에서 $\|G_{dm} G_{pm} K\|_{s=j\omega} \rightarrow 0$ 을, 식(39)에서 $\|L_2(j\omega)\| \rightarrow 0$ 을 만족해야 하므로 식(40)식으로 설계될 수 있다.

$$K(s) = k G_c(s) H(s) \quad (40)$$

여기서 $k \leq \max\|1 - (1 + G_\delta)e^{-\tau_\delta s}\|_{s=j\omega}$ 이고, $k \neq 0$ 이다.

식(40)에서 H 는 예측출력과 실제출력의 오차 성분에서 센서와 제어기 사이의 지연에 의한 외란 성분을 제거하도록 설계될 필요가 있다. 공칭의 플랜트가 순수한 적분기를 갖는 2차의 최소위상시스템일 경우에는 식(41)과 같은 2차 저주파 통과 필터로 설계될 수 있다.

$$H(s) = \frac{1}{1 + 2\zeta\tau_{\max}s + \tau_{\max}^2 s^2} \quad (41)$$

여기서 ζ 는 H 의 시간응답의 감쇠비 및 주파수 선택도를 나타내고, τ_{\max} 는 최대허용전송간격^[9,10]과 기준신호의 주파수를 고려하여 결정한다.

본 연구에서는 $\zeta = 1$, $\tau_{\max} = 1$ [sec] 로 하였다. τ_{\max} 를 평균 시간지연시간 약 2.8초 보다 작게 설정한 것은 이를 크게 할 경우 출력신호의 위상지연이 증가하기 때문이다. 만일 시간지연을 갖지 않는 공칭의 플랜트가 순수한 적분기를 갖는 최소위상시스템이면 식(40)은 식(42)로 대체될 수 있다.

$$K(s) = ks^{-1} G_{pm}^{-1}(s) H(s) \quad (42)$$

이때, k 는 $0 > k \geq -\max\|G_\delta\|_{s=j\omega} \cdot |1/\lambda|$ 이다.

따라서 적절한 필터 H 와 K 를 채택한 제안된 제어기는 제어시스템을 안정화시킬 수 있다. 특히 저주파 영역에서 시간지연 $|s^{-1}|_{s=j\omega} = \tau_1\omega$ 은 0에 가까운 유

한 값이므로 제안된 제어기는 시변 시간지연에 강한 특성을 나타낸다.

III. 실험

이전의 연구에서는 단위계단응답특성을 고려한 제어기를 설계하기 위해 성능지수를 도입하였다. Strictly Proper Stable Functions (SPSF)^[13]의 집합 개념을 이용하여 성능지수가 유한한 H2 노음을 갖는 Smith 예측기 기반 IMC를 설계하고, 구형과 추종실험을 통하여 유한한 시간지연을 갖는 경우 제어기의 타당성을 검증하였다^[14]. 본 연구에서는 이전의 연구에서 선보인 Smith 예측기 기반 IMC를 이용한 제어 결과와 외란관측기를 도입한 제안된 제어기의 위치추종 성능을 평가하기 위해서 상대적으로 느린 속도응답을 갖도록 부하를 가한 DC 서보모터를 제어 대상으로 하였다. 모터의 서보드라이브는 전압명령으로 구동된다. DC 서보모터의 동적특성은 실제 실험을 통하여 식(43)과 같이 규명되었다.

$$u = 0.3232\ddot{x} + 1.0772\dot{x} \quad (43)$$

입력 전압 u 와 출력 위치 x 와의 관계는 식(44)로 표현될 수 있다.

$$G_p = \frac{1}{s(0.3232s + 1.0772)} \quad (44)$$

컴퓨터 시뮬레이션에서 기준 신호는 swing 각이 ± 100 [deg]이고, 0.02 Hz 주파수를 갖는 정현파 신호로 하였다. 전달지연은 $1/3\pi$ Hz와 1 kHz 주파수로 0.3초와 4.8초 사이에서 랜덤하게 변화되도록 하였다. 시간지연 예측치의 평균이 1, 3, 5초로 설정하였고, 표본화 주기는 0.5초로 설정하였다. Figs. 4-9는 Smith 예측기 기반 IMC와 제안된 제어기의 추종성능을 비교하여 나타낸 것이다. Figs. 4-9에서 ‘-’선으로 표시된 것은 외란관측기를 적용한 경우 추종에러에 대한 모의실험결과이며, ‘...’선으로 표시된 것은 Smith 예측기 기반 IMC에 의한 추종에러 결과를 나타낸다. Figs. 4,5를 통하여 간헐적으로 발생하는 긴 지연시간을 제외하면 유한한 가변 시간지연의 평균값을 알고 있을 경우 기존의 Smith 예측기 기반의 IMC가 전체 제어시스템을 충분히 안정화시킬 수 있다.

Figs. 6,7을 통해서 전달 지연이 유한하며 랜덤하게 변할 경우 전달지연의 평균값을 모를 때는 Smith 예측

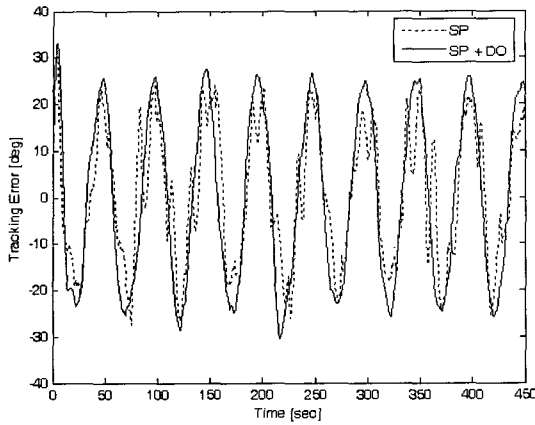


그림 4. 시간지연 τ 를 3초로 설정하고 시간지연 주파수를 1 kHz로 설정했을 때의 모의실험 결과.
 Fig. 4. Simulation results when τ is set to 3 sec and the frequency of time delay set to 1 kHz.

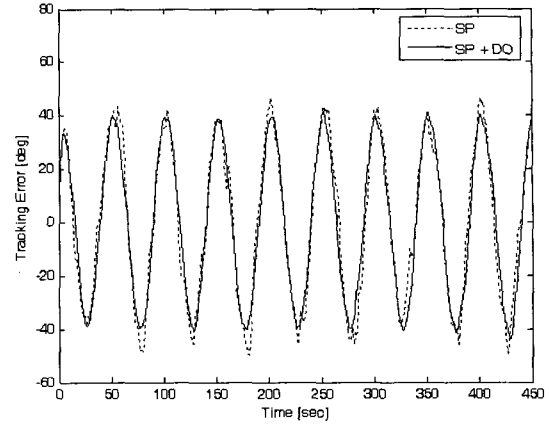


그림 7. 시간지연 τ 를 1초로 설정하고 시간지연 주파수를 $1/3\pi$ Hz로 설정했을 때의 모의실험 결과.
 Fig. 7. Simulation results when τ is set to 1 sec and the frequency of time delay set to $1/3\pi$ Hz.

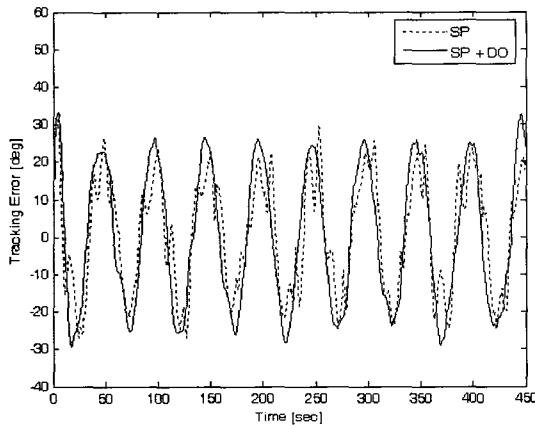


그림 5. 시간지연 τ 를 3초로 설정하고 시간지연 주파수를 $1/3\pi$ Hz로 설정했을 때의 모의실험 결과.
 Fig. 5. Simulation results when τ is set to 3 sec and the frequency of time delay set to $1/3\pi$ Hz.

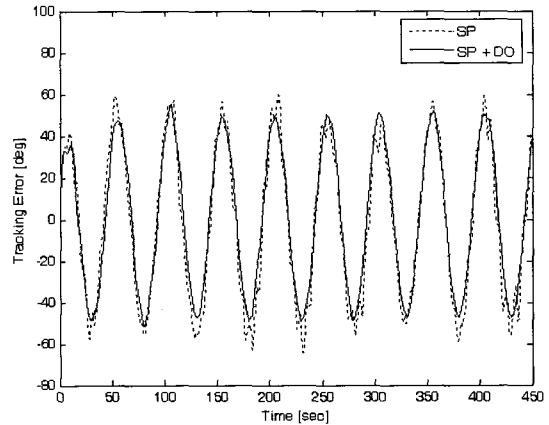


그림 8. 시간지연 τ 를 5초로 설정하고 시간지연 주파수를 1 kHz로 설정했을 때의 모의실험 결과.
 Fig. 8. Simulation results when τ is set to 5 sec and the frequency of time delay set to 1 kHz.

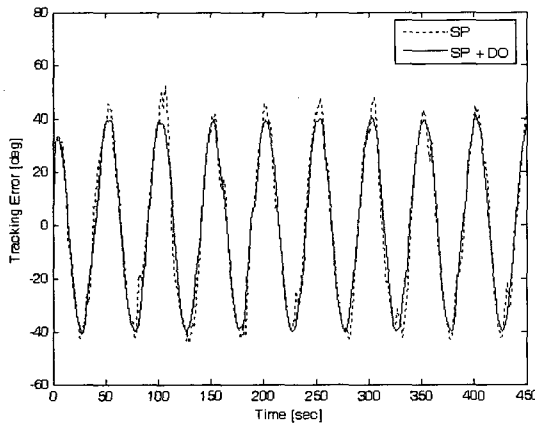


그림 6. 시간지연 τ 를 1초로 설정하고 시간지연 주파수를 1 kHz로 설정했을 때의 모의실험 결과.
 Fig. 6. Simulation results when τ is set to 1 sec and the frequency of time delay set to 1 kHz.

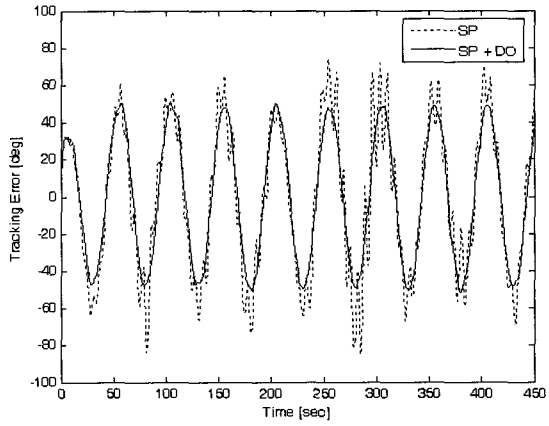


그림 9. 시간지연 τ 를 5초로 설정하고 시간지연 주파수를 $1/3\pi$ Hz로 설정했을 때의 모의실험 결과.
 Fig. 9. Simulation results when τ is set to 5 sec and the frequency of time delay set to $1/3\pi$ Hz.

기 기반 IMC는 시스템에 작은 이득 여유와 위상 여유를 제공함을 알 수 있다. 한편 Figs. 8,9를 통해서 전달 지연에 대한 오차가 커지면 Smith 예측기 기반 제어기는 제어시스템의 성능을 더욱 악화시킴을 알 수 있다. 반면 제안된 제어기는 시스템에 상대적으로 넓은 이득 여유와 위상여유를 제공함을 알 수 있다. 심지어 모델의 부정확성과 시간지연 예측 오차가 상당히 크고 넓은 주파수 범위의 외란이 작용하고 있을 때에도 제어시스템의 성능과 안정성이 보장됨을 알 수 있다. Figs. 4-9를 통하여 볼 때, 전반적으로 Smith 예측기 기반의 IMC 제어구조는 시간지연 예측오차와 외란에 민감하므로 전체 제어시스템의 안정성과 성능을 보장하는데 불충분하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 불확실한 시간지연을 갖는 LonWorks/IP VDN 상에서 실시간 제어를 위한 새로운 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기는 Smith 예측기 기반의 IMC, 외란 관측기와 고주파 잡음 및 외란제거를 위한 적절한 필터로 구성되었다. 제안된 제어기는 컴퓨터 시뮬레이션 결과 모델에 대한 부정확성과 시간지연에 대한 예측오차가 존재하는 경우에도 매우 강한 특성을 보였다. 따라서 제안된 제어기는 제어기와 구동기사이의 시간지연과 센서와 제어기사이의 시간지연이 다른 LonWorks-IP 가상 디바이스 네트워크상에서 분산 제어의 품질과 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Ki Won Song, Gi Sang Choi, Gi Heung Choi, and Jung Soo Kim, "LonWorks-based Virtual Device Network (VDN) for Predictive Maintenance", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 18, No. 1-3, pp. 67-79, October 2003, IOS Press.
- [2] Ki Won Song, Gi-Heung Choi, "Real-time Distributed Control in Virtual Device Network With Uncertain Time Delay for Predictive Maintenance (PM)", *J. Korean Institute for Industrial Safety*, Vol. 18, No. 3, pp. 154-159, September 2003.
- [3] Clifford G. Carter and E. Richard Robinson, "Ocean Effects on Time Delay Estimation Requiring Adaptation", *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 18, No. 4, pp. 367-378, October 1993.
- [4] Roy E. Bethel and Robert G. Rahikka, "Optimum Time Delay Detection and Tracking", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, No. 5, pp. 700-712, September 1990.
- [5] edited by William S. Levine, "Control System Fundamentals", CRC Press, pp. 215-237, 2000.
- [6] Ki Won Song, Gi Sang Choi, Gi Heung Choi and Jung Soo Kim, "Integration of Distributed Control Networks with IP Networks for Remote Control and Monitoring", in *Proc. of ICMIT*, pp. 377-80, Yamaguchi, Japan, December 2001.
- [7] J. W. Park and J. M. Lee, "Design and Implementation of internet-based Teleoperation Control System", in *Proc. of ICCAS*, pp. 452-455, Jeju, Korea, 2001
- [8] M. S. Branicky, S. M. Phillips, and Wei Zhang, "Stability of Networked Control Systems: Explicit Analysis of Delay", in *Proc. of ACC*, pp. 2352-2357, Chicargo, Illinois, June 2000.
- [9] Wei Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability of Networked Control Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 84-99, February 2001.
- [10] Silviu-Iulian Niculescu, Carlos E. de Souza, Luc Dugard, and Jean-Michel Dion, "Robust Exponential Stability of Uncertain Systems with Time-Varying Delays", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 43, No. 5, pp. 743-748, May 1998.
- [11] Gregory C. Walsh, Octavian Beldiman, and Linda G. Bushnell, "Asymptotic Behavior of Nonlinear Networked Control Systems", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 46, No. 7, pp.1093-1097, July 2001.
- [12] Gregory C. Walsh, Hong Ye, and Linda G. Bushnell, "Stability Analysis of Networked Control Systems", *IEEE Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 438-446, May 2002.
- [13] Weidong Zhang and Xiaomong Xu, "Simple Predictor for Processes with Time Delay", in *Proc. of AACC*, pp. 822-826, San Diego, California, June 1999.
- [14] Ki Won Song, Yong Gi Jung, Gi Sang Choi, and Gi Heung Choi, "Real-time Control on Virtual Device Network(VDN) with Uncertain Time Delay" in *Proc. of IEEK*, Vol. 26, No. 1, pp. 2517-2520, July 2003.

— 저 자 소 개 —



송 기 원(평생회원)

1994년 서울시립대학교 제어계측
공학과 학사 졸업.

1998년 서울시립대학교 제어계측
공학과 석사 졸업.

2003년 서울시립대학교 전자전기
공학부 박사 졸업.

<주관심분야 : 분산제어, 메카트로닉스, 로보틱스>