LonWorks-IP 가상 디바이스 네트워크상에서 예지 및 예방보전을 위한 DC 서보모터의 분산제어

송 기 원
청주대학교 전자정보공학부
(2006. 4. 11. 접수 / 2006. 8. 14. 채택)

Distributed Control of DC Servo Motor on LonWorks-IP Virtual Device Network for Predictive and Preventive Maintenance

Ki Won Song
Division of Electronics & Information Engineering, Cheongju University
(Received April 11, 2006 / Accepted August 14, 2006)

Abstract : LonWorks over IP(LonWorks-IP) virtual device network(VDN) is an integrated form of LonWorks device network and IP data network. In especially real-time distributed servo applications on the factory floor, timely response is essential for predictive and preventive maintenance. The time delay in servo control on LonWorks-IP based VDN has highly stochastic nature. LonWorks-IP based VDN induced transmission delay deteriorates the performance and stability of the real-time distributed control system and can't give an effective preventive and predictive maintenance. In order to guarantee the stability and performance of the system, and give an effective preventive and predictive maintenance, LonWorks-IP based VDN induced time-varying uncertain time delay needs to be predicted and compensated. In this paper new PID control scheme based on Smith predictor, disturbance observer and band pass filter is proposed and tested through computer simulation about position control of DC servo motor. It is shown that how can the proposed control scheme be designed to minimize the effects of uncertain varying time delay and model uncertainties. The validity of the proposed control scheme is compared and demonstrated with the comparison of internal model controllers(IMC) based on Smith predictor with and without disturbance observer.
Key Words : LonWorks-IP Virtual Device Network(VDN), disturbance observer, predictive and preventive maintenance, Internal Model Controller(IMC), time delay

1. 서 론

산업현장의 각종 설비에 대한 웹 기반의 실시간 예지 및 예방보전은 원격 분산 감시 및 제어 네트워크을 통한 장비의 효율성과 신뢰성 평가를 통해 수행될 수 있다[1]. 웹 기반의 실시간 예지 및 예방보전은 가상 디바이스 네트워크를 필요로 한다. 또한 가상 디바이스 네트워크는 LonWorks-IP VDN과 같은 분산제어환경을 필수로 요구한다[1]. LonWorks-IP 가상 디바이스 네트워크(LonWorks-IP VDN)는 웹 기반의 유비쿼터스 원격 분산 감시 및 제어를 통해 산업현장에 대한 실시간 예지 및 예방보전을 가능하게 한다[1,2]. 산업현장에 대한 실시간 예지 및 예방보전을 위해 가장 중요한 것이 원격 감시 및 제어시스템의 즉시 응답성이다. 특히 LonWorks-IP VDN과 같은 분산제어환경에서는 더더욱 그러하다. 분산제어 네트워크에서는 시간지연이 산업현장에 대한 효과적인 실시간 예지 및 예방보전에 큰 문제를 발생시키기 때문이다. 특히 실시간 서보프로세스를 포함하는 경우 효과적인 예지 및 예방보전을 위해서 시간지연에 대한 적절한 예측 및 보상이 필수적으로 요구된다.

시간지연 문제는 공학의 여러 분야에서 대두되는 문제로 레이더나 수중음파탐지 분야에서는 다중 전송경로와 송수신 잡음의 간섭에 기인한다[3,4]. 화학공정에서는 상대적으로 긴 시정수와 불감대가 시간지연 문제를 초래한다[5]. 시간지연을 보상하기 위해 Smith

gwsong@cju.ac.kr

예측기가 널리 사용되어 왔다[5]. 제어대상이 정확하게 규명되면 Smith 예측기 기반의 내부모델제어기(Internal Model Controller)는 정적인 시간지연을 보상하는데 우수한 성능을 나타낸다. 실제로 1980년대에는 Smith 예측기 기반의 IMC를 채택한 상당수 산업용 제어기들이 산업현장에 적용되기도 하였다[5].

그러나 불확실한 시간지연과 제어대상에 대한 모델링 오차가 있는 경우 제어시스템의 안전성과 성능이 저하되어 효과적인 실시간 예지 및 예방보전을 기대하기 어렵다. 따라서 효과적인 예지 및 예방보전을 위해 시간지연 문제는 반드시 해결되어야 한다.

본 연구의 목적은 LonWorks-IP VDN을 근간으로 하는 개방형 분산제어 환경에서 DC 서보 모터의 위치추종제어 모의실험을 통해 시간지연 문제를 해결하여 산업현장에 대한 효과적인 예지 및 예방보전을 구현하는데 있다. 이를 위해 확률적인 불확실성을 나타내며 센서에서 제어기까지의 시간지연과 제어기에서 구동장치까지의 시간지연이 서로 많이 다른 경우 이를 효과적으로 예측하고 보상하는 제어기 설계방법을 제시하고자 한다. 또한 제어 대상에 대한 모델링 오차와 랜덤한 시간지연의 영향을 제거하는 외란관측기를 포함하거나 포함하지 않는 경우의 Smith 예측기 기반 IMC 제어와 본 연구에서 제안하는 외란관측기와 Smith 예측기 기반 PID 제어에 대한 컴퓨터 모의실험결과 비교를 통해 제안된 제어기의 타당성을 제시하고, 이를 바탕으로 실시간 예지 및 예방보전을 수행할 때 효과가 있음을 제시하고자 한다.

2. 제어기 설계

2.1. 시간지연의 영향

LonWorks-IP VDN은 산업현장의 프로세스 정보에 대한 유비쿼터스 접근을 가능하게 한다. Fig. 1에 LonWorks-IP VDN 상에서 구현되는 전형적인 분산제어시스템 구조를 나타내었다. LonWorks-IP VDN은 지능형 센서와 구동장치가 실시간의 LonWorks 분산제어 네트워크에 통합되어 구성되고 IP 네트워크를 가로지르는 일대일 통신특성에 의해 특성화 되는 네트워크이다. Ethernet 연결은 사용자로 하여금 IP 네트워크에 대한 접근을 지원하고, LonWorks 연결은 사용자가 TCP/IP 연결을 통해 어떤 워크스테이션을 통해서도 LonWorks 네트워크에 접근할 수 있도록 한다.

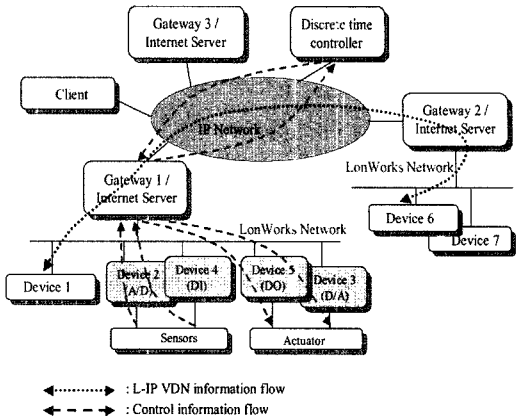

Fig. 1. Distributed Control Systems on LonWorks/IP Virtual Device Network.

Fig. 1에서 보이는 정보의 흐름에 있어서 통신 패킷의 방향에 의존하여 네트워크상에 구현된 분산제어시스템에서의 시간지연은 쉽게 두개의 유형으로 구분될 수 있다. 둘 중 하나는 센서와 제어기 사이의 시간지연이고, 다른 하나는 제어기와 구동기 사이의 시간지연이다. 시간지연이 발생하는 부분은 프로토콜 변환에 의한 지연과 분산제어 네트워크에서 발생하는 네트워크 전달지연을 들 수 있다. LonWorks-IP 네트워크상에서의 네트워크 전달 지연은 단순히 디바이스 네트워크에서의 지연과 IP(데이터) 네트워크상에서의 지연의 합이다. 디바이스 네트워크상에서의 불확실한 시간지연은 LonWorks-IP 게이트웨이/인터넷 서버가 디바이스 네트워크상의 센서노드로부터 정보를 수신할 때 발생한다. IP 네트워크상의 시간지연은 IP 네트워크 상의 노드들 간의 통신으로부터 발생한다.

따라서 LonWorks-IP VDN에서의 시간지연은 상당히 확률적이며 복잡한 분포를 나타낸다[6]. 이는 산업현장에 대한 효과적인 실시간 예지예방보전에 장애를 일으킬 수 있는 요인이 되므로 적절히 예측되고 보상되어야 한다.

2.2. 시간지연에 대한 보상

LonWorks-IP VDN은 지능형 분산제어노드로 구성되어 관리되는 네트워크로 각각의 노드들은 서로 다른 업체 제품 사이의 상호운용호환성과 일대일 통신특성 및 비트레벨부터 제어레벨까지 지원하므로 산업현장의 자동화에 매우 유용하다. LonWorks-IP VDN을 이용하여 산업 현장의 자동화를 구현할 경우 제어네트워크의 주소범위는 그 규모에 따라 수십에

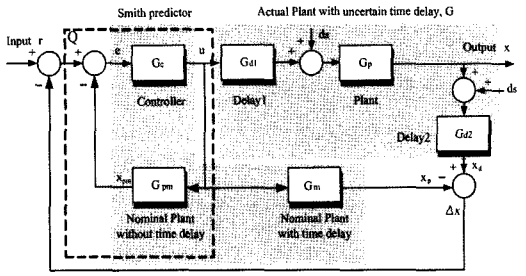

Fig. 2. Block diagam of modified Smith predictor based control scheme.

서 수만 개 이상을 필요로 한다. 산업현장의 자동화 시스템에 대한 효율적인 예지 및 예방보전을 위해서 수많은 지능형 센서와 구동기는 정확한 시기에 물리량을 계측하고 정해진 작동을 수행해야 한다. 산업현장에는 간단한 계측 및 작동 등의 온/오프 프로세스뿐만 아니라 여러 가지 구동기를 사용하는 실시간 응답성이 매우 중요한 서보프로세스가 존재하는 경우도 있다. DC 서보모터에 부하가 연결된 플랜트는 그 일례가 될 수 있을 것이다. 이런 의미에서 불확실한 시간지연이 존재하는 LonWorks-IP VDN 상에서 DC 서보모터에 대한 분산제어 실험이 산업현장의 설비시스템에 대한 효율적인 예지 및 예방보전을 위해 수행될 필요가 있다.

시간지연 예측 및 보상과 관련하여 Fig. 2에 변형된 Smith 예측기를 기반으로 하는 제어구조에 대한 블록선도를 나타내었다. 시간 지연이 일정하며 제어대상에 대한 모델링 오차가 없다면, Smith 예측기 기반의 제어구조는 제어시스템의 특성방정식으로부터 시간지연을 완전하게 제거할 수 있게 된다. 이것은 시간지연을 갖는 프로세스에 대한 제어기 설계가 시간지연이 없는 시스템에 대한 제어기 설계로 축소될 수 있음을 의미한다.

일정한 시간지연을 갖는 시스템에 Smith 예측기를 도입할 경우 대개 IMC 제어구조를 갖는다. 이것은 시간지연이 완벽하게 보상되고 제어대상에 대한 모델링 오차가 없을 경우 IMC 제어형태는 단일 입력과 단일 출력의 경우 입출력 관계가 일차 선형 시불변 시스템에 대한 전달함수 형태로 표현되기 때문이다.

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

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

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

여기서 G_p는 실제 제어대상을, G_{pm}는 제어대상에 대한 공칭의 모델을, G_d는 시간지연을, G_m은 시간지연을 갖는 제어대상의 공칭모델을, G_c는 제어기를, 그리고 G는 시간지연을 갖는 제어대상에 대한 전달함수를 나타낸다.

만일 시간지연 τ에 대하여 $|\tau s|$가 충분히 작다면 시간 지연 항은 영차 Pade 근사표기가 가능하므로 G_{pm}과 G_m은 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$G_{pm}\approx\frac{B(s)}{A(s)},\ G_m\cong G_{pm}\left(\frac{1}{\tau s+1}\right) \tag{3}$$

공칭의 제어대상이 최소위상시스템으로 표현되는 플랜트라면 IMC 제어기의 경우 G_c는 식 (4)와 식 (5)로 설계될 수 있다.

$$G_c(s)=\frac{1}{\lambda s}\cdot\frac{1}{G_{pm}(s)} \tag{4}$$

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

공칭의 제어대상이 최소위상시스템이 아닌 불안정한 영점을 갖는 안정한 플랜트인 경우는 식 (6)과 식 (7)로 설계될 수 있다.

$$G_c=\frac{A(s)B^-(s)}{B^+(s)\left[\lambda\psi s+\left(\psi-|B^-(s)|^2\right)\right]} \tag{6}$$

$$Q(s)=\frac{1}{\lambda s+1}\cdot\frac{A(s)B^-(s)}{B^+(s)\psi} \tag{7}$$

여기서, $B(s)=B^+(s)\,B^-(s)$에서 $B^+(s)$는 안정한 영점으로 구성되는 다항식을, $B^-(s)$는 불안정한 영점으로 구성되는 다항식을 나타내고, $\psi=\max|B^-(j\omega)|^2$, $\omega\in[0,\pi/T_s]$이며, T_s는 표본화 주기를 나타낸다.

만일 예측모델 G_m이 정확하게 시간지연을 갖는 플랜트 G와 일치하면 입력과 출력사이의 전달함수는 식 (8)로 표현될 수 있다.

$$\frac{X}{R}\cong\frac{1}{\lambda s+1}\cdot\frac{1}{\tau_1 s+1}\cdot\frac{|B^-(s)|^2}{\psi} \tag{8}$$

여기서 τ_1은 제어기로부터 구동장치까지의 시간

지연을 나타낸다.

Smith 예측기 기반의 IMC의 추종제어 성능과 강인성은 매개변수 λ에 대한 의존성이 강하다. 식 (8)에서 출력은 항상 목표치보다 작거나 같고, τ_1이 가변적인 위상지연이 존재할 경우, 안정성과 성능이 저하됨을 알 수 있다. 시간지연이 일정하고 모델링 오차가 없는 경우 Smith 예측기 기반 IMC 제어구조는 PID 제어구조보다 나은 성능을 제공할 수 있다. 그러나 네트워킹 된 상태에서 시간지연은 시변이고 불확실하며, 제어대상에 대한 모델링 오차로 인하여 제어시스템은 외란과 잡음의 영향을 받으므로 안정성과 성능이 악화되게 된다. 따라서 LonWorks-IP VDN 상의 불확실한 시간지연 예측 오차와 모델링 오차의 영향을 효과적으로 보상할 수 있는 방법이 고안될 필요가 있다.

2.3. 외란관측기 기반 제어기 설계

Fig. 2에서 시간지연에 대한 예측오차와 제어대상에 대한 모델링 오차가 없다고 가정하면, 외란 D_s와 플랜트의 출력 X와의 관계는 식 (9)로 주어진다.

$$\frac{X(s)}{D_s(s)} = \frac{G_c G_{pm} G_{d1} G_{d2}}{1 + G_c G_{pm}} \tag{9}$$

시간지연에 관한 상당수의 연구는 네트워킹 된 제어시스템(NCS: Networked Control System)의 안정성에 초점이 맞춰져 왔다[7-10]. 한편 식 (9)를 통해서 외란 D_s는 출력에 직접적인 영향을 주게 됨을 알 수 있다. 외란이 작용할 때 제어시스템의 보다 나은 성능을 얻기 위해서는 외란, 모델의 부정확성과 LonWorks-IP VDN 상의 불확실한 시간지연 예측오차에 대한 제어시스템의 강인성이 확보되어야 한다. 따라서 시간지연 예측오차와 모델링 오차에 의해 발생하는 센서 잡음 및 부하에서 발생하는 외란의 영향을 외란으로 간주하고 이를 소거하는 외란 관측기를 설계하고자 한다. 실제 제어대상이 식 (10)처럼 공칭의 모델과 곱셈형 오차로 표현된다고 가정하자.

$$G_p(s) = G_{pm}(s)\,(1 + G_\delta(s)) \tag{10}$$

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, 식 (11)로 표현될 수 있다.

$$G_d(s) \cong \frac{1}{(\tau_m s + 1)}\left(1 - \frac{\tau_\delta s}{1 + \tau_\delta s}\right) \tag{11}$$

여기서, $\tau = \tau_m + \tau_\delta$이다.

Fig. 2에서 지연된 출력과 예측 출력간의 차이를 $\Delta X(s)$라 하면, ΔX는 식 (12)로 표현될 수 있다.

$$\Delta X(s) = \frac{G_{pm} G_{dm}}{1 + \tau_\delta s}(G_\delta - \tau_\delta s)\,U(s) \tag{12}$$

식 (12)는 제어기 $G_c(s)$에 의해 여과되지만 모델의 부정확성과 시간지연 예측오차의 영향이 플랜트의 출력에 나타남을 내포하고 있다. 다항식 $(G_\delta - \tau_\delta s)$이 0이 아닌 유한한 값이며, 함수 $\tau_\delta s/(1 + \tau_\delta s)$는 고주파통과 필터로 동작한다. 출력 표본화 순간에 부가되는 고주파 잡음이나 부하에서의 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 필터를 설치하는 것이 필요하다. 따라서 Fig. 3과 같은 형태로 구현되는 되먹임 루프에 적절한 필터를 갖는 Smith 예측기와 외란 관측기 기반의 제어구조를 도입한다.

Fig. 3에서 적절한 필터 H와 외란 관측기 K가 같다고 가정하면, 기준신호와 출력 및 예측오차 ΔX와의 관계는 식 (13)으로 표현될 수 있다.

$$X = G_{pm} QR - \tau_1 s(1 + G_\delta) e^{-\tau_1 s} G_{pm} QR + G_\delta G_{pm} QR + (1 + G_\delta) e^{-\tau_1 s} G_{pm} H(1 - Q)\Delta X \tag{13}$$

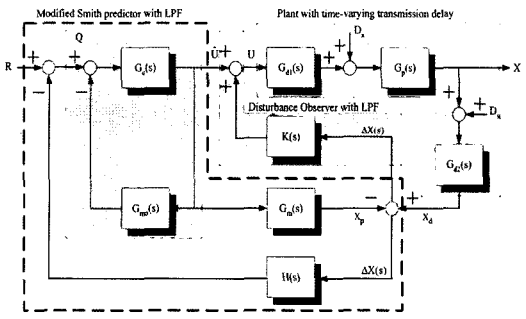

Fig. 3. Block diagram of the proposed control scheme.

모델의 부정확성과 시간지연에 대한 예측오차의 영향을 특성화하기 위해서 불필요한 출력을 $\Phi(s)$라 하면, $\Phi(s)$는 식 (14)로 정의될 수 있을 것이다.

$$\Phi(s) \equiv e^{-\tau_1 s} G_{pm} \begin{bmatrix} (G_\delta - \tau_1 s)QR + \\ (1+G_\delta)H(1-Q)\Delta X \end{bmatrix} \tag{14}$$

$\Phi(s)$의 크기는 넓은 주파수 범위에서 0으로 수렴해야 한다. 그러기 위해서는 되먹임 루프에 식 (15)와 같은 조건을 만족하는 필터를 필요로 한다.

$$|H(j\omega)| = \left[\frac{\|(G_\delta - \tau_1 s)QR\|}{\|(1+G_\delta)(1-Q)\Delta X\|} \right] \tag{15}$$

적절한 필터 H와 외란 관측기 K를 구현하기 위해 $\hat{Q}$와 $\hat{G}$를 식 (16)과 식 (17)로 정의한다.

$$\hat{Q} \equiv \frac{G_c}{1 + G_c G_{pm}(1 - G_{dm} H)} \tag{16}$$

$$\hat{G} \equiv \frac{G_d G_p}{1 - G_d G_p K} \tag{17}$$

그러면, 입력과 출력 사이의 관계식은 식 (18)로 표현된다.

$$\frac{X}{R} = \frac{\hat{Q}\hat{G}(1 - G_{dm} G_{pm} K) G_{d2}^{-1}}{1 + \hat{Q}\hat{G}H(1 - G_{dm} G_{pm} K)} \tag{18}$$

(18)식으로부터 $G_{dm} G_{pm} K \neq 1$이어야함을 알 수 있다. 식 (18)을 식 (19)로 정의하면, 식 (19)는 식 (20)-(23)으로 정의될 수 있다.

$$\frac{X}{R} \equiv \frac{N(s)}{L(s)} = \frac{N_1(s) N_2(s)}{L_1(s) + L_2(s)} \tag{19}$$

$$N_1(s) \equiv G_c G_{pm} \tag{20}$$

$$N_2(s) \equiv (1 + G_\delta)\, G_{d1}(1 - G_{dm} G_{pm} K) \tag{21}$$

$$L_1(s) \equiv 1 + G_c G_{pm} \tag{22}$$

$$L_2(s) \equiv G_c G_d G_p H - G_c G_{dm} G_{pm} H - G_d G_p K \tag{23}$$

식 (19)가 $N_1(s)$와 $L_1(s)$만으로 표시되기 위해서는 식 (21)에서 $\| G_{dm} G_{pm} K \|_{s = j\omega} \to 0$을, 식 (23)에서 $\| L_2(j\omega) \| \to 0$을 만족해야 하므로 식 (24)로 설계될 수 있다.

$$K(s) = k G_c(s) H(s) \tag{24}$$

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

식 (24)에서 H는 예측출력과 실제출력의 오차성분에서 센서와 제어기 사이의 지연에 의한 외란성분이 제거되도록 K가 순수한 적분항을 포함하지 않게 설계될 필요가 있다. 공칭의 플랜트가 순수한 적분기를 가지는 2차 시스템이면 제어기 $G_c(s)$의 형태가 IMC인 경우 식 (25)와 같은 2차 저주파 통과필터로 설계될 수 있으며, PID 제어기인 경우 적분항을 상쇄하기 위해 식 (26)과 같은 2차 주파수 선택필터로 설계될 수 있다.

$$H(s) = \frac{1}{1 + 2\zeta\tau_{\max} s + \tau_{\max}^2 s^2} \tag{25}$$

$$H(s) = \frac{s}{1 + 2\zeta\tau_{\max} s + \tau_{\max}^2 s^2} \tag{26}$$

여기서, ζ는 H의 시간응답의 감쇠비 및 주파수 선택도를 나타내고, τ_{max}는 최대허용전송간격(maximum allowable transmission interval)[7]과 기준신호의 주파수를 고려하여 결정한다.

3. 모의실험

제어 대상에 대한 모델링 오차와 불확실한 시간지연의 영향을 외란으로 간주하고 이를 효과적으로 보상하는 제어구조를 도입하여 DC 서보모터의 위치추종제어 모의실험을 수행하였다. 외란관측기가 없는 경우와 있는 경우 Smith 예측기 기반 IMC 제어기와 제안된 제어기의 모의실험 결과를 비교하여 제안된 제어기의 우수성을 입증하고자 하였다. 이를 통해 불확실한 시간지연이 존재하는 LonWorks-IP 상에서 산업현장에 대한 예지 및 예방보전이 가능함을 제시하고자 하였다.

컴퓨터 모의실험 환경을 Fig. 4에 제시하였다. 모의실험에 사용된 제어대상인 DC 서보모터는 말단에 부하를 가하지 않을 경우 고속의 속도응답을 보

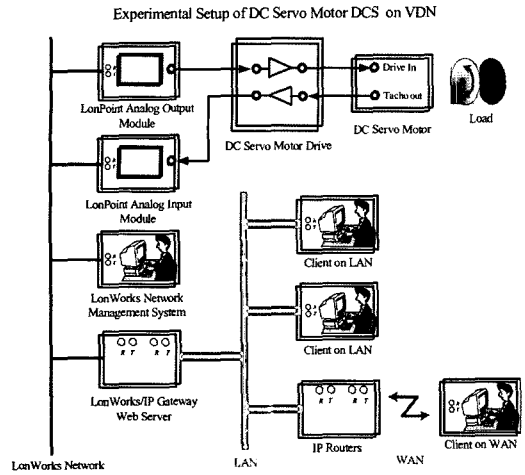

Fig. 4. Virtual experimental setup for computer simulation.

인다. 시간지연이 모터의 응답속도에 비해 매우 길고 불확실한 LonWorks-IP 네트워크상에서 서보제어를 수행하기 위해서 제어대상이 느린 속도응답 특성을 나타내도록 부하를 인가하였다. DC 서보모터를 구동하는 서보드라이브는 DA 변환기의 아날로그 전압명령으로 구동된다. 말단에 부하를 가한 DC 서보모터의 동적특성은 실제 실험을 통해 입력 전압 u와 출력 위치 x와의 관계가 식 (27)과 식 (28)로 규명되었다.

$$u = 0.3232\ddot{x} + 1.0772\dot{x} \tag{27}$$

$$G_{pm} = \frac{1}{s(0.3232s + 1.0772)} \tag{28}$$

모의실험은 Matlab의 Simulink를 이용하였으며, 모의실험에서 사용한 기준 신호는 swing 각이 ±100 [deg]이고, 0.02 Hz 주파수를 갖는 정현파 신호 $r(t) = 100sin(0.04\pi t)$로 하였다. 제어대상인 말단에 회전관성 부하가 인가된 DC서보모터에 대한 모델링 오차를 반영하기 위해 모의실험에 적용한 공칭플랜트의 입출력 특성은 식 (29)로 하였다.

$$G_p = \frac{3.4035}{s(s + 3.3662)} \tag{29}$$

이것은 식 (27)과 식 (28)로 규명된 실제 플랜트와 약 10%의 오차를 갖는다. 전달지연은 지연발생 주파수 f_{td}로 각각 1/3π Hz와 1kHz의 경우에 대하여 3초 이하의 지연시간을 갖고, 양방향 지연시간의 합이 6초 이하에서 랜덤하게 변화되도록 하였다. Smith 예측기에 적용한 시간지연에 대한 평균 예측치를 각각 1, 3, 5초로 설정하였다. 제어기의 이득계산에 고정된 표본화 시간을 사용하였고, 그 값은 0.5 초로 하였다. 제어기 G_c가 IMC일 때와 PID 제어기일 때 모두 안정도 강인성을 위해 매개변수 λ를 도입하였다. 그 값은 최대허용전송간격을 3 초로 하였을 때의 60%에 해당하는 1.8초로 하였다. PID 제어기에서 각각의 이득은 시간지연이 없는 경우를 가정한 상태에서 Ziegler-Nichols 기법으로 결정하였다. 필터 H 설계에는 기준신호에 대한 주파수 전달 특성이 고려되어야 한다. 저주파통과 필터나 주파수선택 필터 모두 기준신호에 대한 주파수 전달이득이 서로 비슷해야 하므로 G_c가 IMC 인 경우, 매개변수 ζ와 τ_{max}를 모두 1로 하였고, PID 제어기인 경우에는 ζ와 τ_{max}를 각각 1과 5로 설정하였다.

4. 모의실험 결과 비교 및 분석

4.1. 실험 결과 비교

Figs. 5~10은 모의실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Figs. 5~6의 결과를 놓고 볼 때, 시간 지연 예측치를 작게 하면 세 형태의 제어기 모두 추종오차가 ±30° 이내에 들어 비슷하였으나 외란관측기를 도입한 경우가 그렇지 않은 경우보다 외란의 영향이 작았다.

한편, Figs. 7~8을 살펴보면 시간지연 예측값을 크게 하면 할수록 IMC 제어구조는 PID의 경우보다 추종오차의 진폭이 ±50°내외로 커지게 됨을 알 수 있다. 반면 PID 제어구조의 경우에는 ±20° 내외로 유지됨을 알 수 있다.

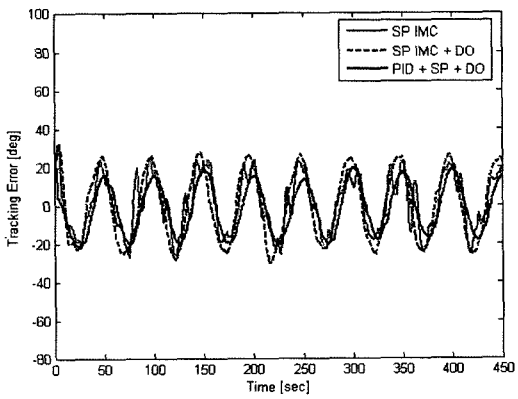

Fig. 5. Simulation results when is set to 1sec and the frequency of time delay set to 1kHz.

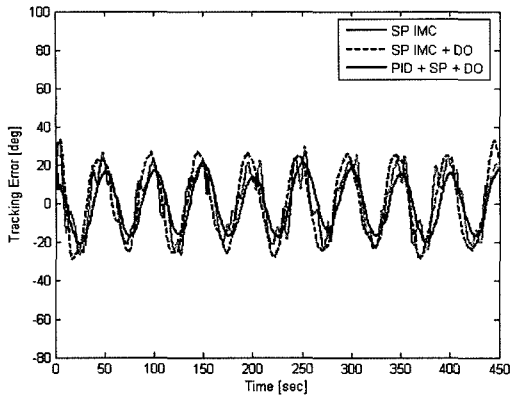

Fig. 6. Simulation results when is set to 1sec and the frequency of time delay set to 1/3π Hz.

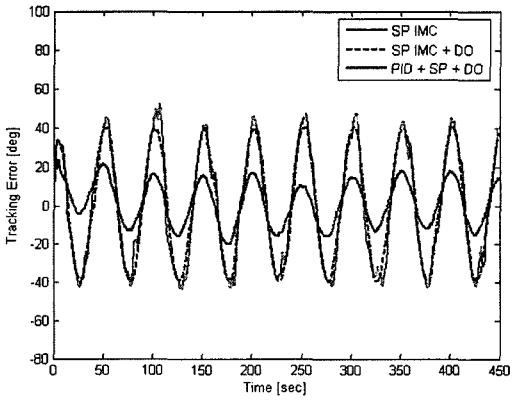

Fig. 7. Simulation results when is set to 3sec and the frequency of time delay set to 1kHz.

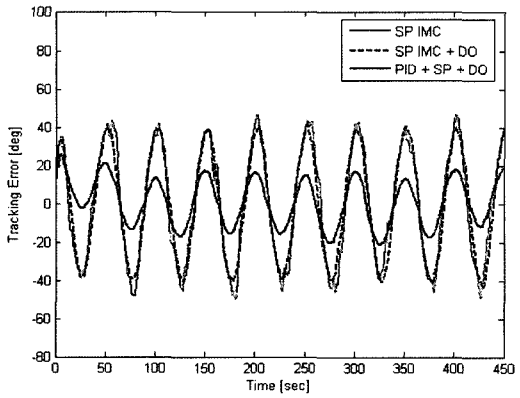

Fig. 8. Simulation results when is set to 3sec and the frequency of time delay set to 1/3π Hz.

또한 IMC 제어구조를 사용하는 경우에도 외란관측기를 도입한 경우가 그렇지 않는 경우보다 추종오차의 파형이 단조롭고 안정적으로 나타났다. 이러

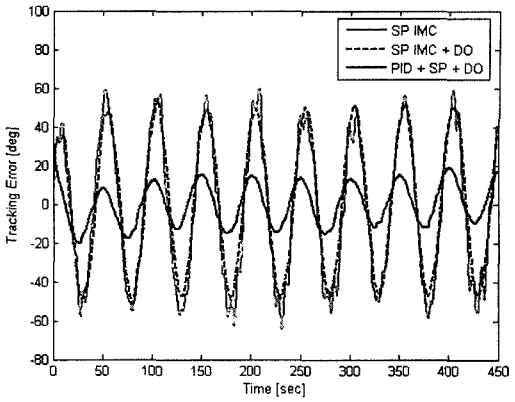

Fig. 9. Simulation results when is set to 5sec and the frequency of time delay set to 1kHz.

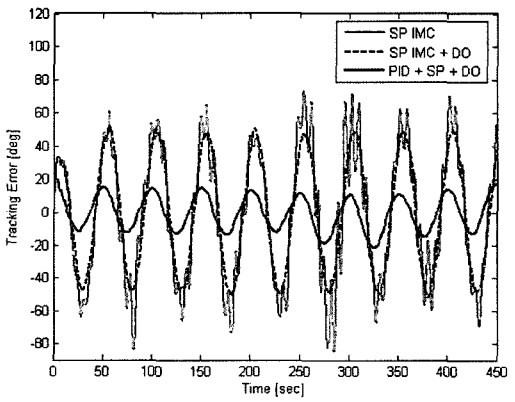

Fig. 10. Simulation results when is set to 5sec and the frequency of time delay set to 1/3π Hz.

한 사실은 외란관측기가 시간지연 예측오차가 순간적으로 변함에 의해 발생하는 효과를 효과적으로 축소시키는 역할을 수행한다고 볼 수 있다.

Figs. 9~10을 통하여 예측오차의 평균값이 더 커지면 외란관측기를 도입하지 않는 경우 추종오차의 고주파 성분이 ±60° 이상으로 증가하게 되어 시스템의 불안정성을 증대시킴을 알 수 있다. 반면, 외란관측기를 도입한 경우에는 IMC 제어구조에서 비록 추종오차의 진폭이 커지기는 하지만 고주파성분이 효과적으로 감쇄됨을 알 수 있다. 이것을 통해 외란관측기가 시스템의 안정성과 강인성을 증대시킬 수 있음을 알 수 있다. 외란관측기를 도입한 PID 제어구조의 경우에는 추종오차가 ±20° 이내의 작은 값의 범위 안에서 유지됨을 알 수 있다.

4.2. 실험 결과 분석

실험 결과 외란관측기를 도입하는 경우가 그렇지

않은 경우에 비해 예측오차의 순간적인 변화에 강인하고 안정적인 추종제어 결과를 나타내었다. 이것은 본 연구에서 제안한 외란관측기가 효과적으로 시간지연 예측오차에 기인한 고주파성분의 영향을 효과적으로 감쇄시킬 수 있음을 입증하는 것이라고 볼 수 있다. 또한 제어대상에 대한 모델링 오차가 존재하는 경우에 Smith 예측기와 외란관측기 기반 IMC 제어구조는 제어대상에 대한 모델링 오차에 의해 추종오차의 크기가 커지게 됨을 알 수 있었다. 이와 달리 본 연구에서 제안한 Smith 예측기와 외란관측기 기반 PID제어기는 모델링 오차의 영향을 효과적으로 상쇄시킬 수 있었다. 이것은 IMC의 경우 제어대상에 대한 동적특성이 완전히 소거되지 않아 입출력 관계가 일차시스템으로 표현되지 않기 때문인데 반해 PID 제어구조는 모델링 오차를 효과적으로 감쇄시키기 때문이다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 불확실한 시간지연을 갖는 LonWorks-IP VDN 상에서 실시간 응답성이 중요한 프로세스의 일례로 DC 서보모터를 대상으로 하는 분산제어 실험을 통해 산업현장의 프로세스에 대한 효과적인 실시간 예지 및 예방보전을 수행할 수 있음을 제시하였다. 고주파 잡음과 외란제거를 위해 되먹임 루프에 적절한 필터를 도입하고 외란관측기와 Smith 예측기를 이용하여 시간지연을 예측하고 보상하는 제어기 설계방법을 제시하였다. 제안된 제어기의 성능과 안전성은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 외란관측기와 출력 되먹임 루프에 필터가 있는 경우와 없는 경우의 Smith 예측기 기반의 IMC 제어 결과와 비교 평가되고 검증되었다. 검증결과 제안된 제어기는 모델에 대한 부정확성과 시간지연에 대한 예측오차가 존재하는 경우에도 매우 강인한 특성을 보였다. 따라서 본 연구는 불확실한 시간지연을 갖는 LonWorks-IP VDN상에서 여러 종류의 서보프로세스가 존재하는 산업현장에 대한 실시간 예지 및 예방보전에 효과가 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1) Gi Heung Choi, "Transmission Characteristics in LonWorks/IP-based Virtual Device Network for Predictive Maintenance", Journal of the KIIS, Vol. 17, No. 4, pp. 196~201, 2002.

2) Ki Won Song, Gi-Heung Choi, "Real-time Distributed Control in Virtual Device Network With Uncertain Time Delay for Predictive Maintenance(PM)", Journal of the KIIS, Vol. 18, No. 3, pp. 154~159, 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, 1993.

4) Roy E. Bethel and Robert G. Rahikka, "Optimun Time Delay Detection and Tracking", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, No. 5, pp. 700~712, 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. 377~380, Yamaguchi, Japan, 2001.

7) 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, 1998.

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, 2000.

9) 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, 2001.

10) 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, 2002.