

논문 2007-44SC-1-5

LonWorks/IP 가상 디바이스 네트워크에서 외란관측기와 ZPETC를 이용한 추종제어

(Tracking Control using Disturbance Observer and ZPETC on LonWorks/IP Virtual Device Network)

송 기 원*

(Ki Won Song)

요 약

LonWorks/IP VDN은 LonWorks 디바이스 네트워크와 IP(데이터) 네트워크와의 통합네트워크로 산업현장에 대한 유비쿼터스 접근을 제공하여 설비에 대한 예지 및 예방보전을 가능하게 한다. 산업현장에 대한 예지 및 예방보전을 위한 실시간 분산제어 환경에서 즉각적인 응답은 필수불가결한 요소이다. LonWorks/IP 가상 디바이스 네트워크(VDN) 상에서 불확실한 시간지연은 산업현장에 대한 실시간 예지 및 예방보전을 위해 분산 제어를 수행할 때 시스템의 안정성과 성능을 악화시킨다. 따라서 네트워크된 분산제어시스템의 안정성을 보장하고 성능을 개선하기 위해서는 시간에 따라 가변적인 불확실한 시간지연을 보상할 필요가 있다. 본 논문에서는 LonWorks/IP VDN와 같은 분산제어 환경 하에서 서보 제어를 수행하는 경우에 외란관측기와 위상지연 보상기로 ZPETC(Zero Phase Error Tracking Controller)를 도입한 제어구조가 제시되고 컴퓨터 모의실험이 수행된다. 제안된 제어기의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통하여 외란관측기를 도입한 Smith 예측기 기반의 내부모델제어기(IMC)의 제어결과와 비교 제시된다. 제안된 제어기는 외란과 잡음에 강인한 특성을 가지며, 주기적인 신호에 대한 추종성능을 상당히 개선시키므로 가변적인 시간지연을 갖는 LonWorks/IP VDN 상에서 주기적인 작업 수행에 필요한 분산 서보제어에 매우 적합하다.

Abstract

LonWorks over IP (LonWorks/IP) virtual device network (VDN) is an integrated form of LonWorks device network and IP data network. LonWorks/IP VDN can offer ubiquitous access to the information on the factory floor and make it possible for the predictive and preventive maintenance on the factory floor. Timely response is inevitable for predictive and preventive maintenance on the factory floor under the real-time distributed control. The network induced uncertain time delay deteriorates the performance and stability of the real-time distributed control system on LonWorks/IP virtual device network. 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 for. In this paper, under the real-time distributed control on LonWorks/IP VDN with uncertain time delay, a control scheme based on disturbance observer and ZPETC(Zero Phase Error Tracking Controller) phase lag compensator is proposed and tested through computer simulation. The result of the proposed control is compared with that of internal model controller (IMC) based on Smith predictor and disturbance observer. It is shown that the proposed control scheme is disturbance and noise tolerant and can significantly improve the stability and the tracking performance of the periodic reference. 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 delay.

Keywords : LonWorks/IP Virtual Device Network(VDN), time delay, disturbance observer, Zero Phase Error Tracking Controller(ZPETC), Internal Model Controller(IMC).

* 평생회원, 청주대학교 전자정보공학부

(Division of Electronics & Information Engineering, Cheongju University)

접수일자: 2006년8월23일, 수정완료일: 2006년12월26일

I. 서 론

IP 네트워크의 편재성과 저비용구조는 정보에 대한 유비쿼터스 접근을 가능하게 하고 있으며, 이를 이용한 제어네트워크 또는 필드버스 네트워크라고 불리는 디바이스 네트워크에 대한 통신과 네트워크 기술의 발달은 광범위한 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 감시용 컴퓨터, 제어기나 지능형 입출력 장치들 간의 정보와 제어신호의 교환을 위해 채택되어 있다^[1].

한편, 산업현장의 네트워킹 된 분산제어 환경에서는 즉시 응답성이 매우 중요한 요소이다. 특히 실시간 서보제어나 제조공정에 대한 예지예방보전의 경우에는 더욱더욱 즉각적인 응답성능이 중요하다^[2]. 서보제어나 예지예방보전에 있어서 시간지연에 따른 문제는 반드시 해결되어야 하므로 이에 대한 적절한 예측 및 보상이 필수적으로 요구된다.

일정한 시간지연을 보상하는 경우 Otto J. Smith에 의해 고안된 Smith 예측기가 널리 알려져 있다^[3]. 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 IMC가 적용된 제어기들이 산업현장의 서보제어시스템에 적용되었다^[3].

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)과 같은 분산제어네트워크 환경에서의 시간지연과 같이 센서에서 제어기까지의 시간지연과 제어기에서 구동기까지의 시간지연이 서로 많이 다를 경우도 있다^[2]. 이러한 경우 네트워킹 된 분산 제어시스템의 성능과 안정성을 확보하기 위해서 시간지연 예측오차를 효과적으로 보상하여 시간지연에 의해 발생하는 시스템의 안정성과 성능저하를 방지하는 Smith 예측기를 이용한 외란관측기 기반의 IMC 제어구조가 연구되었다^[4]. 그 결과 제어대상에 대한 모델링 오차와 시간지연 예측오

차가 존재하는 경우에도 제어대상을 선형 시불변 시스템으로 근사화 할 수 있게 된다. 이렇게 되면 미래의 목표치를 알고 있는 추종제어의 경우 시스템에 대한 모델을 기반으로 하는 ZPETC(Zero Phase Error Tracking Controller)^[5]와 같은 위상보상기를 채택하면 추종제어의 성능을 좀 더 향상시킬 수가 있다.

따라서 본 연구에서는 미래의 목표치를 알고 있는 경우 네트워크상의 불확실한 시간지연에 대한 예측기, 외란 관측기와 위상보상기로 ZPETC를 적용하는 제어구조를 제안한다. 비선형적 요소와 모델 선형화 과정에서 발생하는 모델링 오차를 갖는 제어대상에 대한 컴퓨터 모의실험을 수행한다. 제안된 제어기의 유효성이 변형된 Smith 예측기와 외란관측기 기반 IMC 제어의 결과와 비교 제시된다. 제 II장에서는 LonWorks/IP VDN 상에서의 시간지연 예측과 시간지연이 제어시스템에 미치는 영향을 효과적으로 보상하는 제어구조를 제시하고, ZPETC를 이용해 위상보상을 통한 추종제어 성능을 개선하는 방법을 제시한다. 제 III장에서는 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안된 제어기의 유효성을 Smith 예측기와 외란관측기 기반의 IMC의 경우와 비교하여 제시한다. 끝으로 제 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

1. Smith 예측기와 외란관측기 기반의 IMC

지능형 센서와 구동기가 실시간의 분산제어 네트워크에 통합되어 구성되고, IP 네트워크를 가로지르는 일대일 통신에 의해 특성화되는 LonWorks/IP VDN 상에서 구현되는 전형적인 분산제어시스템의 구조를 Fig. 1

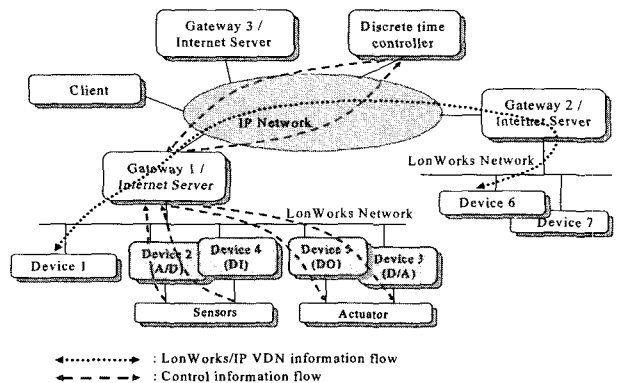


그림 1. LonWorks/IP 가상 디바이스 네트워크상에서의 분산제어시스템
Fig. 1. Distributed Control Systems on LonWorks/IP Virtual Device Network.

$$H(s) = \frac{1}{1 + 2\zeta\tau_{\max}s + \tau_{\max}^2s^2} \quad (7)$$

여기서 ζ 는 H 의 시간응답의 감쇠비 및 주파수 선택도를 나타내고, τ_{\max} 는 최대허용전송간격^[7,8]과 기준신호의 주파수를 고려하여 결정한다.

τ_{\max} 를 평균 시간지연시간 보다 크게 할 경우 출력 신호의 위상지연이 증가하게 되므로 평균 시간지연보다 작게 할 필요가 있다. 본 연구에서는 $\zeta = 1$, $\tau_{\max} = 1$ [sec]로 하였다. 식(6-7)로 H 와 K 가 설계되어 결합된 Fig. 2의 Smith 예측기 기반 IMC 제어구조는 전체 제어시스템을 안정화시킬 수 있다. 결과적으로 입력과 출력 사이의 폐루프 전달함수 $G_{cl}(s)$ 는 식(8)과 같이 유한입력에 대해 유한출력을 나타내어 안정하고, 일정한 시간지연 τ_{m1} 을 갖는 일차의 선형 시불변 시스템으로 근사되어 표현될 수 있다. 이것은 IMC 제어구조의 장점이 될 수 있다.

$$G_{cl}(s) \equiv \frac{X(s)}{R(s)} \approx \frac{G_c G_{pm} G_{d1}}{1 + G_c G_{pm}} \approx \frac{e^{-\tau_{m1}s}}{\lambda s + 1} \quad (8)$$

여기서, λ 는 IMC 제어구조의 G_c 에 포함되는 강인안정성 관련 매개변수이고, τ_{m1} 은 샘플링 간격의 정수배에 해당하는 평균 시간지연이다.

2. 위상 보상기

식(8)과 같이 설계되는 안정한 폐루프 제어시스템은 출력이 기준입력에 대해 τ_{m1} 만큼의 시간지연을 포함하게 된다. 미래의 목표치를 알고 있는 경우에 위상보상을 위해 ZPETC를 도입하면 시스템의 추종제어 성능을 개선할 수 있다^[5]. 앞 절에서 제시한 제어구조가 제어대상에 대한 모델링 오차와 불확실한 시간지연에 대한 예측오차를 보상하여 전체 폐루프 제어시스템이 식(8)과 같이 표현될 수 있기 때문이다.

위상지연을 보상하기 위해 ZPETC를 설계하기 위해서는 폐루프 제어시스템의 전달함수를 이산시간 형태로 표시할 필요가 있다. zero order hold를 감안한 이산시간 전달함수 형태^[11]로 표시하면 샘플링 간격이 상당히 작을 경우 식(9)으로 표현가능하다.

$$G_{cl}(z^{-1}) \equiv \frac{X(z^{-1})}{R(z^{-1})} = T \frac{z^{-d} B_{cl}(z^{-1})}{A_{cl}(z^{-1})} \quad (9)$$

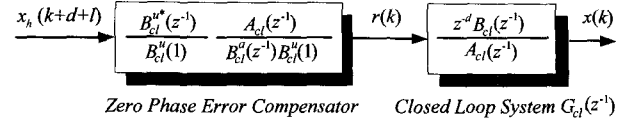


그림 3. 위상보상을 위한 ZPETC 제어구조

Fig. 3. Zero Phase Error Tracking Controller for Phase Lag Compensation.

여기서 $T \approx (1 - e^{-sT})/s$ 는 샘플링 간격이고, $d = \tau_{m1}/T$ 인 샘플수로 나타낸 시간지연이다.

Fig. 3에 위상지연을 0으로 하는 ZPETC 제어구조를 나타내었다. 식(10)에서 $B_{cl}(z^{-1})$ 에 단위원 밖의 불안정한 영점이 존재하지 않는 경우 위상보상기는 기준입력을 $r(k)$ 라 하고 바람직한 출력을 $x_h(k)$ 라 하면, 이산시간영역에서 식(10)과 같은 perfect tracking controller 형태로 설계된다^[16].

$$r(k) = \frac{A_{cl}(z^{-1})}{B_{cl}(z^{-1})} x_h(k+d) \quad (10)$$

$B_{cl}(z^{-1})$ 가 단위원 내부의 안정한 영점 $B_{cl}^a(z^{-1})$ 과 단위원 밖의 불안정한 영점 $B_{cl}^u(z^{-1})$ 으로 이루어져 $B_{cl}(z^{-1}) = B_{cl}^a(z^{-1})B_{cl}^u(z^{-1})$ 로 표시되면 식(11)과 같은 ZPETC의 형태로 설계된다^[16].

$$r(k) = \frac{A_{cl}(z^{-1})B_{cl}^{u*}(z^{-1})}{[B_{cl}^u(1)]^2 B_{cl}^a(z^{-1})} x_h(k+d+l) \quad (11)$$

여기서, $B_{cl}^u(1)$ 은 단위원 밖의 영점으로 이루어진 다항식 $B_{cl}^u(z^{-1})$ 의 계수의 합을, $B_{cl}^{u*}(z^{-1})$ 은 $z^{-l}B_{cl}^u(z)$ 을, l 은 $B_{cl}^u(z^{-1})$ 의 불안정한 영점의 개수를 나타낸다.

식(8)은 식(9)의 형태로 변환하였을 때, 불안정한 영점을 포함하지 않으므로 위상보상기는 (12)식으로 설계될 수 있다.

$$r(k) = \frac{1 - e^{-T/\lambda} z^{-1}}{T/\lambda} x_h(k+d) \quad (12)$$

III. 실험

IMC 제어구조를 이용한 시간지연을 보상하는 방안

들이 시도되어 왔다^[1,3,4,12,13]. 단위계단응답 특성을 고려한 제어를 설계하기 위해 성능지수를 도입하고, Strictly Proper Stable Functions (SPSF)^[12]의 집합 개념을 이용하여 성능지수가 유한한 H2 노음을 갖는 Smith 예측기 기반 IMC를 설계하고, 구형과 추종실험을 통하여 유한한 시간지연을 갖는 경우 제어기의 타당성을 검증하였다^[13]. 근자의 연구에서는 Smith 예측기 기반 IMC를 이용한 제어 결과와 외란관측기를 도입한 제어구조를 통하여 DC 모터의 위치추종제어 성능을 개선하는 방안을 제시하였다^[4].

본 연구에서 제안된 제어기의 성능을 평가하기 위해서 상대적으로 느린 속도응답을 갖도록 말단에 회전부하를 직결한 DC 서보모터를 제어 대상으로 하였다. 제어대상은 서보드라이브, 모터, 회전부하와 각도센서의 구조로 이루어져 있고, 회전부하는 매끄러운 미끄럼 접촉면을 갖고 있다. 이러한 환경에서 제어대상의 동적특성은 회전 부하와 접촉면 사이에 작용하는 마찰력의 영향을 받는다. 모의실험에는 마찰에 대한 기억효과는 반영하지 않고 정지-미끄럼 현상을 반영하여 Fig. 2에서 G_p 에 해당하는 제어대상의 동적특성을 식(13)과 같이 선정하였다^[14].

$$u = 0.2938\ddot{x} + 1.0772\dot{x} + f(\dot{x}, u)$$

$$f = \begin{cases} F_s \operatorname{sgn}(u), & \text{if } \dot{x} = 0 \\ F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}), & \text{elseif } |\dot{x}| > |\dot{x}_s| \\ (F_c + (F_v - F_c)e^{-\beta\dot{x}}) \operatorname{sgn}(\dot{x}), & \text{others} \end{cases} \quad (13)$$

여기서, u 는 아날로그 토크 명령전압이고, \dot{x} 는 모터의 회전속도를 나타낸다. F_s 는 정지 마찰력, F_c 는 Coulomb 마찰력, F_v 는 점성 마찰력, β 는 정지-미끄럼 계수이고, \dot{x}_s 는 정지-미끄럼 한계속도를 나타낸다.

모의실험에서는 식(14)에서의 계수들의 값을 각각 $F_s = 0.5436$, $F_c = 0.25$, $F_v = 0.50$ 과 $\beta = 9.0$ 으로 하였다. Fig. 2에서 G_{pm}, G_m 에 적용된 제어대상에 대한 입출력 모델은 식(14)에서 $f(\dot{x}, u) = 0$ 으로 놓았을 때의 동적특성 $u = 0.2938\ddot{x} + 1.0772\dot{x}$ 과 약 10%의 모델링 오차가 나타나도록 식(14)로 정하였다.

$$u = 0.3232\ddot{x} + 1.0772\dot{x} \quad (14)$$

모의실험에서 기준 신호는 swing 각이 ± 100 [deg]이고, 0.02 Hz 주파수를 갖는 정현파 신호로 하였다. 모

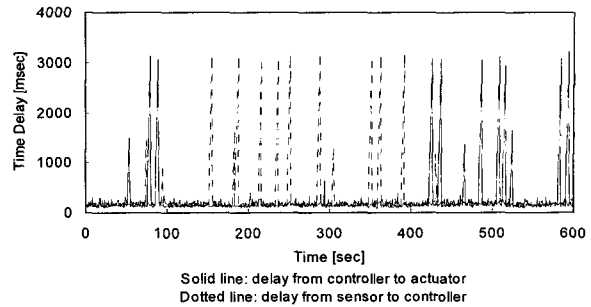


그림 4. 시간지연.
Fig. 4. Time delay sequences.

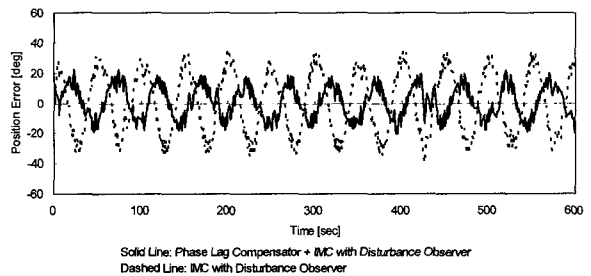


그림 5. Smith 예측기와 외란관측기 기반의 IMC와 제안된 제어구조의 모의실험 결과 비교 ($\tau_m = 1$ sec).
Fig. 5. Comparison of the simulation results between IMC based on Smith predictor and disturbance observer, and the proposed control ($\tau_m = 1$ sec)

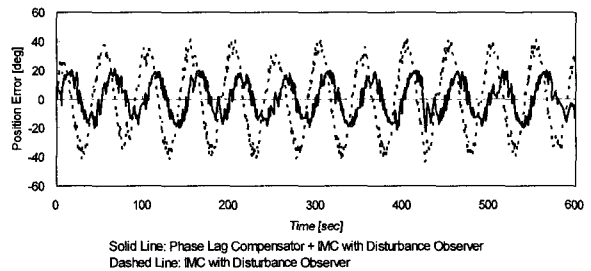


그림 6. Smith 예측기와 외란관측기 기반의 IMC와 제안된 제어구조의 모의실험 결과 비교 ($\tau_m = 2$ sec).
Fig. 6. Comparison of the simulation results between IMC based on Smith predictor and disturbance observer, and the proposed control ($\tau_m = 2$ sec)

의실험에 사용된 시간지연은 Fig. 4에 제시된 실측치를 이용하였다. 시간지연은 1초 이상의 간헐적으로 긴 시간지연 항들을 제외하고 대부분 500ms 이하에서 불확실한 변화특성을 나타내고 있다. 모의실험에서 시간지연 예측치의 평균 τ_m 은 1초와 2초로 설정하여 사용하였다. 제어이득 계산에 사용한 표본화 주기는 0.5초의

고정값을 이용하였다.

Fig. 5-6에 Fig. 2의 제어구조와 Fig. 3의 제안된 제어구조의 모의실험결과를 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6은 τ_m 을 각각 1초와 2초로 했을 때의 실험결과이다.

Fig. 5-6에서 Fig. 2에 제시된 제어구조는 모델의 부정확성과 시간지연 예측 오차가 크고, 넓은 주파수 범위의 외란이 작용할 때에도 제어시스템의 성능과 안정성을 보장한다^[4]. 미래의 목표치를 알고 있는 경우에 위상보상기를 추가한 제어구조는 위상지연을 억제하여 추종제어 성능을 향상시킬 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 불확실한 시간지연을 갖는 LonWorks/IP VDN 상에서 실시간 제어를 위해 외란관측기와 Smith 예측기 기반의 IMC 제어구조에 위상보상기를 적용한 제어구조를 제안하였다. 위상보상기 뒷단의 외란 관측기와 Smith 예측기 기반의 IMC 제어구조는 불확실한 시간지연의 영향과 제어 대상에 대한 모델링 오차를 보상하여 페루프 시스템을 일정한 시간지연을 갖는 간단한 일차의 선형 시불변 시스템으로 표현될 수 있게 한다.

이것은 위상보상기의 구현을 용이하게 해주어 제안된 제어구조가 위상지연을 효과적으로 보상하여 추종제어 성능을 향상시킬 수 있게 한다. 따라서 제안된 제어구조는 제어기와 구동기사이의 시간지연과 센서와 제어기사이의 시간지연이 불확실하고 서로 다른 LonWorks-IP 가상 디바이스 네트워크상에서 실시간 분산 제어의 성능과 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] edited by William S. Levine, "Control System Fundamentals", CRC Press, pp. 215-237, 2000.
- [4] Ki Won Song, "Tracking Position Control of DC Motor on LonWorks/IP Virtual Device Network with Time Delay", *Journal of IEEK*, SC Vol. 43, No. 4, pp. 35-44, July 2006.
- [5] Masayoshi Tomizuka, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control" *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 109, pp. 65-68, March 1987.
- [6] 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, Chicago, Illinois, June 2000.
- [7] Wei Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability of Networked Control Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 84-99, February 2001.
- [8] 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.
- [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, July 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, May 2002.
- [11] Charles L. Phillips, and H. Troy Nagle, "Digital Control System Analysis and Design 3rd ed." *Prentice Hall*, pp. 430-464, 1995.
- [12] Weidong Zhang and Xiaomong Xu, "Simple Predictor for Processes with Time Delay", in *Proc. of AACC*, pp. 822-826, San Diego, California, June 1999.
- [13] 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.
- [14] edited by William S. Levine, "Control System Applications", CRC Press, pp. 195-208, 2000.

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>