논문 2009-04-15

불확실성이 존재하는 네트워크 제어시스템의 강인 지연의존 안정성 판별법

(Robust Delay-dependent Stability Criterion for Uncertain Networked Control System)

박 명 진, 권 오 민*, 박 주 현
(Myeongjin Park, Ohmin Kwon, Ju H. Park)

Abstract : In this paper, the problem of stability analysis for networked control systems with norm-bounded parameter uncertainties is investigated. By construction Lyapunov's functional, a new delay-dependent stability criterion for uncertain networked control system is established in terms of LMIs (linear matrix inequalities) which can be easily by various convex optimization algorithms. One numerical example is included to show the effectiveness of proposed criterion.

Keywords : Networked control system (NCS), Time-varying delay, Stability, Lyapunov's method, Linear matrix inequality (LMI)

Ⅰ. 서 론

오늘날 많은 제어시스템들은 다양한 센서와 액츄에이터들을 필요로 하기 때문에 구조가 점점 복잡해지고 있다. 중앙집중형 점대점(centralized point-to-point) 접속 방식의 시스템에서는 센서와 액츄에이터 수에 비례하여 배선수가 늘어나며, 이에 따라 유지 관리 및 확장의 어려움이 커진다. 이러한 문제점 때문에 네트워크 제어시스템(Networked Control System: NCS)으로 대체되고 있다. 특히, 대규모 제어시스템(large scale control system)이나 분산형 제어시스템(distributed control system)은 플랜트에 산재한 여러 시스템들을 모두 연결하여 제어에 필요한 데이터를 주기적으로 교환해야 하므로 NCS에 대한 관심이 고조되고 있다.

네트워크를 제어시스템의 공유 버스(common bus)로 적용하면 시스템 구성과 배선작업이 용이하다는 이점이 있지만, 시스템의 여러 구성 요소들이 한정된 네트워크 버스를 공유하기 때문에 데이터 교환과정에서 데이터 처리시간 및 전송시간에 대한 영향을 고려해야 하는 문제가 발생하게 된다. 이러한 NCS에서 야기되는 시간지연(제어기와 엑츄에이터 간의 지연, 센서와 제어기 간의 지연 그리고 제어기 내 계산상의 지연)은 제어시스템의 성능 및 안정성을 크게 해칠 수 있다[1,2].

이와 같은 문제를 다루기 위해 시간 지연이 고려된 시스템에 대한 안정성 분석에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[1-11]. 특히, 시간 지연에 따른 NCS의 안정도 분석과 관련하여, NCS의 안정도를 보장하는 센서와 제어기 사이의 최대 데이터 전송 주기(Maximum Allowable Transfer Interval: MATI)가 유도되었다[2].

본 논문에서는 시변 구간을 갖는 지연을 고려한

* 교신저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2009. 04. 10., 수정일 : 2009. 05. 23., 채택확정 : 2009. 06. 08.
박명진, 권오민 : 충북대학교 전기공학과
박주현 : 영남대학교 전기공학과
※ 본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

기호
$\mathbf{R}^n$: n-차원의 유클리드 공간
$\mathbf{R}^{m\times n}$: $m\times n$ 실수 행렬의 집합
$\|\cdot\|$: 유클리드 벡터 놈
X, Y: 양한정 대칭행렬
$diag\{\cdots\}$: 대각행렬
$*$: 대칭행렬 주대각의 하부 원소

NCS의 개선된 안전성 판별법을 제안하겠다. 적절한 Lyapunov 함수를 구성하여 제안된 시스템의 안정성을 위한 조건은 선형행렬부등식(Linear Matrix Inequality: LMI)으로 표현되며 convex 최적화 기법을 통해서 쉽게 해를 구할 수 있다. 수치예제를 통해 제안된 안정성 판별법의 우수성을 보이겠다.

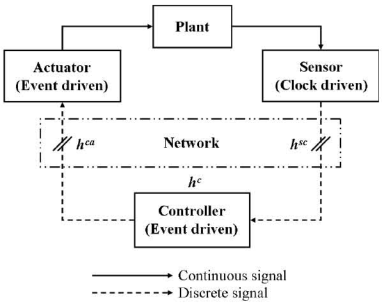

그림 1. 네트워크 제어시스템
Fig. 1. A networked control system

Ⅱ. 문제 설정

우리는 그림 1과 같은 네트워크를 통해 제어되는 시스템을 고려한다.

$$\dot{x}(t) = [A + \triangle A(t)]x(t) + [B + \triangle B(t)]u(t) \tag{1}$$

여기에서 $x(t) \in \mathbf{R}^n$은 상태 벡터, $u(t) \in \mathbf{R}^m$는 입력 벡터, A와 B는 알고 있는 시스템 행렬이다. $\triangle A(t)$과 $\triangle B(t)$는 시간변화에 따른 불확실한 행렬로 다음과 같은 형태로 가정한다.

$$[\triangle A(t) \;\; \triangle B(t)] = DF(t)[E_a \;\; E_b] \tag{2}$$

여기에서 D, E_a, E_b는 적절한 차원의 알고 있는 실수의 상수행렬이고, $F(t)$는 다음의 부등식을 만족하는 불확실한 행렬이다.

$$F^T(t)F(t) \le I \tag{3}$$

제어 네트워크에서는 데이터가 제어기와 원격조작 시스템 간을 이동할 때 네트워크 지연이 야기될 것이다. 제어기와 액츄에이터 간의 지연을 h^{ca}, 센서와 제어기 간의 지연을 h^{sc}, 그리고 제어기의 계산상의 지연을 h^c로 정의한다.

앞에서 정의한 지연들을 고려한 다음의 제어기 원리를 시스템 (1)에 적용한다.

$$u(t^+) = Kx(t - h_k^{sc} - h_k^c), \; t \in kT + h_k^{sc} + h_k^c, \; \forall k \in N \tag{4}$$

여기에서 T는 샘플링 주기, N는 자연수의 집합, K는 제어기 이득이다.

제어기 (4)를 고려한 시스템 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}&\dot{x}(t) = [A + \triangle A(t)]x(t) + [B + \triangle B(t)]Kx(kT),\\ &t \in [kT + h_k, (k+1)T + h_{k+1}), \; \forall k \in N\end{aligned} \tag{5}$$

여기에서 $h_k = h_k^{sc} + h_k^c + h_k^{ca} > 0$는 데이터가 플랜트에서 센서를 통해 제어기로 전송된 후, 액츄에이터를 통해 플랜트로 전송될 때의 kT순간동안 지연되는 시간을 의미한다. 그리고 $h(t) = t - kT$를 정의하면, 시스템 (5)은 다음과 같이 기술된다.

$$\dot{x}(t) = [A + \triangle A(t)]x(t) + [B + \triangle B(t)]Kx(t - h(t)) \tag{6}$$

여기에서 $h(t)$는 $t \ne kT + h_k$에서 $\dot{h}(t) = 1$인 부분적으로 선형이고 $t = kT + h_k, \; \forall k \in N$에서 불연속이며, $h_L = \min_{k \in N}\{h_k\}$, $h_U = \max_{k \in N}\{T + h_{k+1}\}$를 정의하면 $h(t)$는 다음을 만족하게 된다.

$$0 < h_L \le h(t) \le h_U \tag{7}$$

그 결과, 시스템 (5)는 시변 지연의 범위가 고려된 시스템 (6)과 등가이고, 시스템 (6)은 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + BKx(t - h(t)) + Dp(t),\\ p(t) &= F(t)q(t),\\ q(t) &= E_a x(t) + E_b Kx(t - h(t))\end{aligned} \tag{8}$$

본 논문의 목적은 (7)을 만족하는 지연이 고려된 시스템 (8)의 지연의존 안정성 분석하는 것이다.

주요 결과를 유도하기 전에 다음의 사실과 보조정리를 제시한다.

사실 1.(Schur complement) 일정한 값의 대칭행렬 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$이 주어지고, $\Sigma_1 + \Sigma_3^T \Sigma_2^{-1} \Sigma_3 < 0$이면 다음을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} \Sigma_1 & \Sigma_3^T \\ \Sigma_3 & -\Sigma_2 \end{bmatrix} < 0, \text{ 또는 } \begin{bmatrix} -\Sigma_2 & \Sigma_3 \\ \Sigma_3^T & \Sigma_1 \end{bmatrix} < 0$$

사실 2. 실수 벡터 a, b와 적절한 차원을 갖는 임의 행렬 $Q>0$에 대하여 다음이 성립한다.

$$\pm 2a^T b \le a^T Q a + b^T Q^{-1} b$$

제약 조건이 완화된 안정성 판별법을 유도하기 위해 적분 형태의 상한 유계를 유도하는 다음의 보조정리를 사용한다.

보조정리 1. 임의의 상수행렬 $M \in \mathbf{R}^{n\times n}$, $M=M^T>0$, 그리고 스칼라 $\gamma>0$가 주어지면 벡터 함수 $x:[0,\gamma]\to\mathbf{R}^n$는 다음과 같이 정의되는 적분 관계를 나타낸다.

$$\left(\int_0^{\gamma} x(s)ds\right)^T M \left(\int_0^{\gamma} x(s)ds\right) \le \gamma \int_0^{\gamma} x^T(s) M x(s) ds \tag{9}$$

보조정리 2. 스칼라 $h(t)\ge 0$와 임의의 상수행렬 $Q\in\mathbf{R}^{n\times n}$, $Q=Q^T>0$이 주어지면 다음의 부등식을 적용한다.

$$-\int_{t-h(t)}^{t} \dot{x}^T(s) Q \dot{x}(s) ds \le h(t)\zeta^T(t)\mathbf{X}Q^{-1}\mathbf{X}^T\zeta(t) + 2\zeta^T(t)\mathbf{X}[\mathrm{x}(\mathrm{t}) - \mathrm{x}(\mathrm{t}-\mathrm{h}(\mathrm{t}))] \tag{10}$$

여기에서 $\mathbf{X}$는 적절한 차원을 갖는 고정되지 않은 가중치 행렬이고 $\zeta^T(t)$는 다음과 같다.

$$\zeta^T(t) = [x^T(t)\ x^T(t-h(t))\ x^T(t-h_L)\ x^T(t-h_U)\ \dot{x}^T(t)\ p(t)] \tag{11}$$

증명. 사실 2를 사용하여 다음의 부등식을 적용하면

$$-2\int_{t-h(t)}^{t} (\mathbf{X}^T\zeta(t))^T \dot{x}(t) ds \le \int_{t-h(t)}^{t} [\zeta^T(t)\mathbf{X}Q^{-1}\mathbf{X}^T\zeta(t) + \dot{x}^T(s)Q\dot{x}(s)]ds \tag{12}$$

다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} -\int_{t-h(t)}^{t} & \dot{x}^T(s)Q\dot{x}(s)ds \le \\ & \int_{t-h(t)}^{t} \zeta^T(t)\mathbf{X}Q^{-1}\mathbf{X}^T\zeta(t)ds \\ & +2\int_{t-h(t)}^{t} (\mathbf{X}^T\zeta(t))^T\dot{x}(s)ds \\ = {} & h(t)\zeta^T(t)\mathbf{X}Q^{-1}\mathbf{X}^T\zeta(t) + 2\zeta^T(t)\mathbf{X}[\mathrm{x}(\mathrm{t}) - \mathrm{x}(\mathrm{t}-\mathrm{h}(\mathrm{t}))] \end{aligned} \tag{13}$$

이로써 증명을 마친다.

Ⅲ. 주요 결과

본 장에서는 시변 지연 (7)이 고려된 NCS의 새로운 지연의존 안정성 판별법을 유도할 것이다. 주요 결과를 소개하기 전에 유도되는 행렬을 간단하게 하기 위해 다음과 같이 주석을 정의한다.

$$\begin{aligned} & \Sigma = [\Sigma_{(i,j)}], (i,j=1,\cdots,6), \\ & \Sigma_{(1,1)} = R_2 - Q_1 + P_1A + A^TP_1^T,\ \Sigma_{(1,2)} = P_1BK, \\ & \Sigma_{(1,3)} = Q_1,\ \Sigma_{(1,4)} = 0,\ \Sigma_{(1,5)} = R_1 - P_1 + A^TP_2^T, \\ & \Sigma_{(1,6)} = P_1D,\ \Sigma_{(2,2)} = 0,\ \Sigma_{(2,3)} = 0,\ \Sigma_{(2,4)} = 0, \\ & \Sigma_{(2,5)} = K^TB^TP_2^T,\ \Sigma_{(2,6)} = 0, \\ & \Sigma_{(3,3)} = -R_2 + R_3 - Q_1 - \frac{Q_2}{h_U - h_L},\ \Sigma_{(3,4)} = \frac{Q_2}{h_U - h_L}, \\ & \Sigma_{(3,5)} = 0,\ \Sigma_{(3,6)} = 0,\ \Sigma_{(4,4)} = -R_3 - \frac{Q_2}{h_U - h_L}, \\ & \Sigma_{(4,5)} = 0,\ \Sigma_{(4,6)} = 0, \\ & \Sigma_{(5,5)} = h_L^2 Q_1 + (h_U - h_L)(Q_2 + Q_3) - P_2 - P_2^T, \\ & \Sigma_{(5,6)} = P_2D,\ \Sigma_{(6,6)} = -\varepsilon I, \\ & \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 & X_1^T & X_2^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \\ & \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0 & Y_1^T & 0 & Y_2^T & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \\ & \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{X}+\mathbf{Y} & \mathbf{X} & -\mathbf{Y} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ & \Phi = \begin{bmatrix} E_a & E_bK & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{14}$$

이론 1. 제어기 이득 K, $h_U \ge h_L > 0$인 스칼라 h_U, h_L이 주어지고, 다음의 LMI (15)와 (16)을 만족하는 양한정 행렬 R_i, $Q_i(i=1,2,3)$, 스칼라 $\varepsilon>0$, 그리고 임의 행렬 P_i, X_i, $Y_i(i=1,2)$이 존재하면 시스템 (8)은 $0<h_L\le h(t)\le h_U$와 $\dot{h}(t)\le h_D$에 대하여 점근적으로 안정하다.

$$\begin{bmatrix} \Sigma+\Gamma+\Gamma^T & \varepsilon\Phi^T & (h_U-h_L)\mathbf{Y} \\ * & -\varepsilon I & 0 \\ * & * & -(h_U-h_L)Q_3 \end{bmatrix} < 0 \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma+\Gamma+\Gamma^T & \varepsilon\Phi^T & (h_U-h_L)\mathbf{X} \\ * & -\varepsilon I & 0 \\ * & * & -(h_U-h_L)Q_3 \end{bmatrix} < 0 \tag{16}$$

증명. 양한정 행렬 R_i, $Q_i(i=1,2,3)$에 대해, Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V=\sum_{i=1}^{2} V_i \tag{17}$$

여기에서

$$\begin{aligned} V_1 =& \ x^T(t)R_1x(t)+\int_{t-h_L}^{t} x^T(s)R_2x(s)ds \\ &+\int_{t-h_U}^{t-h_L} x^T(s)R_3x(s)ds \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} V_2 =& \ h_L\int_{t-h_L}^{t}\int_{s}^{t}\dot{x}^T(u)Q_1\dot{x}(u)duds \\ &+\int_{t-h_U}^{t-h_L}\int_{s}^{t}\dot{x}^T(u)Q_2\dot{x}(u)duds \\ &+\int_{t-h_U}^{t-h_L}\int_{s}^{t}\dot{x}^T(u)Q_3\dot{x}(u)duds \end{aligned} \tag{19}$$

$V_i(i=1,2)$의 시간에 대한 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 =& \ 2x^T(t)R_1\dot{x}(t) \\ &+x^T(t)R_2x(t)-x^T(t-h_L)R_2x(t-h_L) \\ &+x^T(t-h_L)R_3x(t-h_L)-x^T(t-h_U)R_3x(t-h_U) \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 =& \ h_L^2\dot{x}^T(t)Q_1\dot{x}(t)-h_L\int_{t-h_L}^{t}\dot{x}^T(s)Q_1\dot{x}(s)ds \\ &+(h_U-h_L)\dot{x}^T(t)Q_2\dot{x}(t)-\int_{t-h_U}^{t-h_L}\dot{x}^T(s)Q_2\dot{x}(s)ds \\ &+(h_U-h_L)\dot{x}^T(t)Q_3\dot{x}(t)-\int_{t-h_U}^{t-h_L}\dot{x}^T(s)Q_3\dot{x}(s)ds \end{aligned} \tag{21}$$

보조정리 1을 사용하여 다음을 얻고

$$-h_L\int_{t-h_L}^{t}\dot{x}^T(s)Q_1\dot{x}(s)ds \le \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h_L)\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix} -Q_1 & Q_1 \\ * & -Q_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h_L)\end{bmatrix} \tag{22}$$

$$-\int_{t-h_U}^{t-h_L}\dot{x}^T(s)Q_2\dot{x}(s)ds \le (h_U-h_L)^{-1}\begin{bmatrix} x(t-h_L) \\ x(t-h_U)\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix} -Q_2 & Q_2 \\ * & -Q_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x(t-h_L) \\ x(t-h_U)\end{bmatrix} \tag{23}$$

보조정리 2를 사용하여 $\dot{V}_2$의 적분 형태 중 나머지 하나를 다음과 같이 어림한다.

$$\begin{aligned} &-\int_{t-h_U}^{t-h_L}\dot{x}^T(s)Q_3\dot{x}(s)ds \\ =& -\int_{t-h(t)}^{t-h_L}\dot{x}^T(s)Q_3\dot{x}(s)ds \\ &-\int_{t-h_U}^{t-h(t)}\dot{x}^T(s)Q_3\dot{x}(s)ds \\ \le& \ (h(t)-h_L)\zeta^T(t)\mathbf{X}Q_3^{-1}\mathbf{X}^T\zeta(t) \\ &+2\zeta^T(t)\mathbf{X}[x(t-h_L)-x(t-h(t))] \\ &+(h_U-h(t))\zeta^T(t)\mathbf{Y}Q_3^{-1}\mathbf{Y}^T\zeta(t) \\ &+2\zeta^T(t)\mathbf{Y}[x(t-h(t))-x(t-h_U)] \end{aligned} \tag{24}$$

여기에서 $\zeta(t)$는 (11), $\mathbf{X}$와 $\mathbf{Y}$는 (14)에 정의되어 있다.

제약 조건이 완화된 결과들을 유도하기 위한 도구로 임의 행렬 $P_i(i=1,2)$를 고려한 다음의 식을 추가한다.

$$\begin{aligned} 0 =& \ 2[x^TP_1+\dot{x}^T(t)P_2]\times \\ &[-\dot{x}(t)+Ax(t)+BKx(t-h(t))+Dp(t)] \end{aligned} \tag{25}$$

또한 (2)와 (3)로부터 다음의 부등식이 유도되므로

$$p^T(t)p(t)\le q^T(t)q(t) \tag{26}$$

다음의 부등식을 만족하는 양의 스칼라 ε이 존재하게 된다.

$$\varepsilon[\zeta^T(t)\Phi^T\Phi\zeta(t)-p^T(t)p(t)]\ge 0 \tag{27}$$

여기에서 Φ는 (14)에 정의되어 있다.

(18)-(27)로부터 S-procedure[12]를 적용하면, $\dot{V}=\sum_{i=1}^{2}\dot{V}_i$는 다음과 같은 새로운 상한 유계를 갖게 된다.

$$\dot{V}=\zeta^T(t)\Omega\zeta(t) \tag{28}$$

여기에서

$$\begin{aligned} \Omega =& \ \Sigma+\Gamma+\Gamma^T+\varepsilon\Phi^T\Phi+(h(t)-h_L)\mathbf{X}Q_3^{-1}\mathbf{X}^T \\ &+(h_U-h(t))\mathbf{Y}Q_3^{-1}\mathbf{Y}^T \end{aligned} \tag{29}$$

그리고 Σ, Γ는 (14)에 정의되어 있다.

다음은 $h(t)$에 대하여 행렬 $\mathbf{X}Q_3^{-1}\mathbf{X}^T$, $\mathbf{Y}Q_3^{-1}\mathbf{Y}^T$

의 convex 조합이므로

$$(h(t)-h_L)\mathbf{X}Q_3^{-1}\mathbf{X}^T+(h_U-h(t))\mathbf{Y}Q_3^{-1}\mathbf{Y}^T \quad (30)$$

다음과 같이 $h_L \le h(t) \le h_U$에서 $\Omega<0$인 조건과 상응하는 두 개의 유계 LMI로 다룰 수 있다.

$$\Sigma+\Gamma+\Gamma^T+\varepsilon\Phi^T\Phi+(h_U-h_L)\mathbf{Y}Q_3^{-1}\mathbf{Y}^T<0 \quad (31)$$

$$\Sigma+\Gamma+\Gamma^T+\varepsilon\Phi^T\Phi+(h_U-h_L)\mathbf{X}Q_3^{-1}\mathbf{X}^T<0 \quad (32)$$

사실 1을 사용하면 부등식 (31)과 (32)는 LMI (15)와 (16)와 각각 등가이므로, LMI (15)와 (16)를 만족한다면 시스템 (8)은 점근적으로 안정함을 보장할 수 있다. 이로써 증명을 마친다.

IV. 수치예제

본 장에서는 수치예제를 통해 본 논문에서 유도된 결과인 이론 1의 성능을 보이겠다.

예제 1. 다음의 시스템[1]을 고려하자.

$$\dot{x}(t)=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & -0.1\end{bmatrix}x(t)+\begin{bmatrix}0\\ 0.1\end{bmatrix}u(t) \quad (33)$$

시스템 (33)는 연속 상태 되먹임 제어기 $u(t)=-Kx(t)$로 네트워크를 통하여 제어되는 시스템으로 가정하자. 여기에서 $K=[3.75\ 11.5]$이다.

표 1은 네트워크를 통하여 제어되는 시스템 (33)의 점근적으로 안정성이 보장됨을 보이는 기존의 결과들과 본 논문의 이론 1을 근거로 한 MATI를 보여주고 있다.

표 2는 네트워크를 통하여 제어되는 시스템 (33)이 시변 지연 구간의 하한 유계의 다른 값들에 대한 MATI를 보여주고 있다.

표 1. 기존의 결과들과 본 논문을 근거로 한 MATI
Table 1. MATI based on some existing results and this paper

방 법	MATI (s)
Zhang et al.[1]	4.5×10^{-4}
Kim et al.[9]	0.7805
Yue et al.[10]	0.8871
Jiang and Han[11]	1.0081
이론 1	**1.0386**

표 2. h_L의 다른 값들에 대한 시변 지연의 MATI
Table 2. MATI of the time-varying delay for different h_L

h_L	0	0.1	0.5
MATI (s)	1.0386	1.0514	1.0713

V. 결 론

본 논문은 NCS의 새로운 지연의존 안정성 판별법을 제안하였다. 시스템의 제약조건이 완화된 안정성 판별법을 얻기 위한 고정되지 않은 가중치 행렬이 고려된 적분 형태의 유계 방법은 안정성 판별법의 알맞은 영역을 개선하기 위해 사용되었다. 또한 수치예제를 통하여 소개한 판별법의 우수성과 기존의 결과들보다 개선되었음을 보였다.

참고문헌

[1] W. Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability of networked control systems," IEEE Control System Magazine, Vol. 21, pp. 84-99, Feb. 2001.

[2] G. C. Walsh and H. Ye, "Scheduling of networked control systems," IEEE Control System Magazine, Vol 21. pp. 57-65, Feb. 2001.

[3] V.B. Kolmanovskii and A. Myshkis, Applied theory of functional differential equations, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1992.

[4] J. Hale and S.M.V. Lunel, Introduction to functional differentail equations, Springer-Verlag, New York, 1993.

[5] S.-I. Niculescu, Delay effects on stability: a robust control approach LNCIS 269, Springer, 2001.

[6] J. Yoneyama, "Robust stability and stabilizing controller design of fuzzy systems with discrete and distributed delays," Information

Sciences, Vol. 178, pp. 1935-1947, 2008.
[7] S. Xu and J. Lam, "Improved delay-dependent stability criteria for time-delay systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 50, pp. 384-387, 2005.
[8] C.H. Lien, "Delay-dependent stability criteria for uncertain neutral systems with multiple time-varying delays via LMI approach," IEE Proceedings, Control Theory Application, Vol. 152, pp. 707-714, 2005.
[9] D. S. Kim, Y.S. Lee, W.H. Kwon and H.S. Park, "Maximum allowable delay bounds of networked control systems," Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 1301-1313, 2003.
[10] D. Yue, Q.-L. Han and J. Lam, "Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty," Automatica, Vol. 41, pp. 999-1007, 2005.
[11] X. Jiang and Q.-L. Han, "New stability criteria for linear systems with interval time-varying delay," Automatica, Vol. 44, pp. 2680-2685, 2008.
[12] S. Boyd, L. El. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, Linear matrix inequality in system and control theory, SIAM, Philadelphia, 1994.

저 자 소 개

박 명 진

2009년 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 학사.
현재, 충북대학교 전기공학과 석사과정.
관심분야: Networked Control System, Neural Network 등
Email: netgauss@chungbuk.ac.kr

권 오 민

1997년 경북대학교 전자공학과 학사.
1999년 포항공과대학교 전기전자공학부 석사.
2004년 포항공과대학교 전기전자공학부 박사.
현재, 충북대학교 전기공학과 조교수.
관심분야: Time-Delay Systems, Embedded Linux 기반 Control System 등
Email: madwind@chungbuk.ac.kr

박 주 현

1990년 경북대학교 전자공학과 학사.
1992년 경북대학교 전자공학과 석사.
1997년 포항공과대학교 전기전자공학부 박사.
현재, 영남대학교 전기공학과 부교수.
관심분야: Adaptive Signal Processing, Network Control System, Neural Network
Email: jessie@ynu.ac.kr