

# $H_\infty$ 이론을 이용한 ATM 망의 흐름 제어

## Flow Control of ATM Networks Using $H_\infty$ Method

강 태 삼  
(Taesam Kang)

**Abstract** : In this paper, proposed is an  $H_\infty$  based flow controller for the ATM networks. The round trip time-delay uncertainty is taken into account and robustness of the proposed controller is analyzed. Maximum allowable time-delay uncertainties are computed with different weightings on performance and robustness. And discussed is a time-domain implementation method of the proposed controller. Time domain simulation with realistic environment demonstrates that the performance of the proposed controller is much better than that of conventional one.

**Keywords** : flow controller, network ATM, time-delay,  $H_\infty$  controller

### I. 서론

일반적인 교통 시스템에서 신호 체계 또는 교통 제어 시스템은 길을 효율적으로 사용할 수 있게 하여 전체적으로 많은 교통량이 그 길을 통과하여 지나갈 수 있도록 한다. 이와 마찬가지로 컴퓨터 통신망에서 정보 흐름 제어 장치는 주어진 선로를 얼마나 효과적으로 사용할 수 있게 하느냐에 결정적인 역할을 한다. 컴퓨터 통신망 제어기술은 매우 첨단 기술이면서도 그동안 직관적인 접근에 기초하여 시행착오를 거치면서 개발되어 왔다. 최근들어 최신의 제어이론을 응용하여 통신망의 성능을 개선하려는 시도가 이루어지고 있다[1]-[6][18]-[21].

컴퓨터 통신망의 정보를 제어하는 전형적인 방법은 각 소스의 정보 전송 속도를 제어하여 병목 현상을 일으키는 선로의 오버플로우를 막는 것이다. 이 문제는 컴퓨터 통신망이나 관련된 문헌들에서 광범위하게 다루어져 왔다 [6][11][13][14]. 이 흐름 속도 제어에 의한 교통의 제어는 ATM 포럼에서 기준으로 선택된 방법이다[1]. 많은 사람들이 이 문제를 여러 가지 각도에서 접근하고 있다 [2]-[14][18]-[21]. PID 제어[5][21],  $H_2$  제어[19][20]에 기초한 제어기, 이득 설정을 강인하게 하는 방법[3], 게임 이론을 이용하는 방법[18] 등이 있다. 참고문헌 [12]에는 여러 가지 다양한 ATM 망 제어 방법들에 대한 조사 자료가 들어 있다. 통신망 제어에서 가장 어려운 점은 시간 지연이 존재하고, 제어 입력이 음수가 될 수 없으며, 또 소스가 보낼 수 있는 최대 전송 속도도 제한되어 있다는 것이다. 본 연구에서는 [8][15]에서 개발된 시간 지연이 있는 시스템에 대한  $H_\infty$  제어기법을 응용하여 통신망 흐름 제어를 설계하였다.

### II. 통신망 제어기 시스템

그림 1은 통신망 제어 시스템의 개략도이다. 통신망 제어기는 여러 다른 컴퓨터 통신망(소스)으로부터 데이터를

받은 후 이를 다시 다른 목적지로 보낸다. 여기에서는  $n$ 개의 소스가 자료를 보내고 한 개의 제어장치가 이를 받아서 다른 곳으로 보낸다고 가정한다. 병목 현상을 일으키고 있는 제어기는  $c(i)$  packets/(unit time)의 속도로 데이터를 내 보낸다고 가정한다. 그림에서  $r_i$ , ( $i=1, \dots, n$ )는 각 소스에서 데이터를 전송하는 속도를 나타낸다. 제어기는 각 소스의 전송 속도를 제어하여 병목 노드의 큐의 크기를 일정하게 유지하도록 제어한다. 큐의 크기를 일정 수준으로 유지하면 병목 노드에서는 항상 최대의 속도로 데이터를 내 보낼 수 있게 된다. 큐의 크기가 너무 커지면 교란이 생겼을 때 오버플로우가 생겨서 소스에서 보낸 데이터를 잃어버리게 된다. 또한 큐의 크기가 너무 작으면 교란이 생겼을 때 큐의 크기가 영이 되는 순간이 생길 수 있으며, 이때는 병목 노드에서 데이터를 전송할 수 있는 능력이 있는데도 불구하고 보낼 데이터가 없는 순간이 발생하게 된다. 그러므로 전송 효율이 떨어지는 결과를 초래하며, 또한 이 병목 노드가 연결된 다른 노드의 큐의 크기를 제어하는데도 불리한 교란으로 작용한다. 이는 다른 제어기에서 데이터를 보내라고 요청하여도 순간적으로 보낼 데이터가 없기 때문이다.

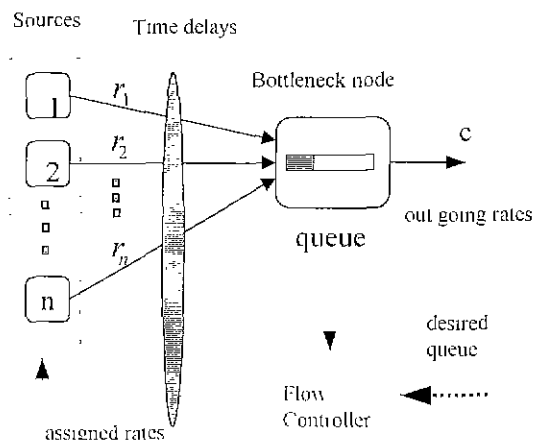


그림 1. 통신망 흐름 제어 시스템.  
Fig. 1. Network flow control system.

접수일자 : 2000. 5. 1, 수정완료 : 2000. 6. 30.

강태삼 : 호서대학교 전기공학부

※ 본 연구는 과학재단 및 호서대학교 지역협력연구센터의 부분적 지원으로 이루어졌습니다.

통신망 제어기가 큐의 크기를 제어하는 방법은 다음과 같다. 즉, 제어기는 현재 큐의 크기를 보고 각각의 소스가 보낼 수 있는 전송 속도를 피드백 해준다. 그러면 각 소스는 그 피드백 된 제어신호를 보고 그에 맞게 전송 속도를 조절한다. 그런데 제어기에서 소스로 피드백 신호가 전달 되는데도 시간 지연이 생기고, 소스가 피드백 신호를 보고 자기의 전송 속도를 조정하면 이것이 제어기가 있는 노드로 와서 제어기의 큐의 크기에 영향을 미치는데도 시간 지연이 생긴다. 즉,  $r_i(t)$ 의 속도로 데이터를 전송하는  $n$ 개의 소스가  $c(t)$ 의 속도로 데이터를 내 보내는 병목 노드에 연결된 그림 1의 시스템에서 큐의 크기를  $q(t)$ 라하면 플랜트는 다음과 같이 기술된다.

$$\dot{q}(t) = \sum_{i=1}^n r_i(t - \tau_i) - c(t) \quad (1)$$

여기서  $\tau_i$ 는 제어기가 피드백 신호를 준 후부터 그에 의해 조정된 전송 속도의 데이터가 소스  $i$ 에서 병목 노드에 도달하는데 까지 걸린 왕복 시간 지연(round trip time delay)를 나타낸다. (1)과 같이 이 시스템은 입력은 여러 개이고, 출력은 1개인 MISO(Multi Input Single Output) 시스템이다. 이때 각 소스에서 큐에 이르는 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$P(s) = \frac{1}{s} [e^{-\tau_1 s}, \dots, e^{-\tau_n s}] \quad (2)$$

$$= \frac{1}{s} [D_1(s), D_2(s), \dots, D_n(s)]$$

여기서 시간 지연  $\tau_i$ 의 기준 값을  $h_i$ 라하고  $\delta_i = (\tau_i - h_i)$ 라 두며,  $\delta_i \in (-\delta_i^+, \delta_i^+)$ 라고 하자. 즉  $\delta_i^+$ 는 불확실성의 범위를 나타낸다. 일반적으로  $c(t)$ 는 시간에 따라 느리게 변하며, 보통 상수로 놓기도 한다. 제어기의 입장에서 보면 일종의 교란이다

## II. 제어기 설계

### 1. 제어기의 안정도 강인성 문제

공칭 플랜트를  $H_\infty$  코프라이미 분해하면 다음과 같다.

$$P_o(s) = \frac{1}{s} [e^{-h_1 s}, \dots, e^{-h_n s}] = N_o M(s)^{-1} \quad (3)$$

여기서  $M(s) = s(s + \epsilon)^{-1} I_{(n \times n)}$ 이고,  $N_o(s) = \frac{1}{s + \epsilon} [e^{-h_1 s}, \dots, e^{-h_n s}]$ 이며,  $\epsilon > 0$ 은 임의의 상수이다. 이때 불확실성을 포함하는 플랜트는  $P = (N_o + \Delta_N) M^{-1}$ 으로 주어지며,  $\Delta_N(s)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta_N(s) = \frac{1}{s + \epsilon} [(e^{-\delta_1 s} - 1), \dots, (e^{-\delta_n s} - 1)] \quad (4)$$

$$\times \text{diag}(e^{-h_1 s}, \dots, e^{-h_n s})$$

일반적인 강인 제어 이론의 결과를 이용하면[17]  $K(s)$ 가 기준 플랜트  $P_o(s)$ 를 안정화시키고 다음 식을 만족하면  $K(s)$ 는 불확실성을 포함하는  $P(s)$ 를 안정화시킴을 보일 수 있다.

$$\|WK(1 + P_o K)^{-1}\|_\infty \leq 1 \quad (5)$$

여기서  $W = [w_1, \dots, w_n]$ 이고,  $w_i, w_i^{-1} \in H_\infty$ 이며  $|w_i(j\omega)| > \left| \frac{e^{-j\delta_i \omega} - 1}{j\omega} \right|, \forall \omega \in R, \delta_i \in (-\delta_i^+, \delta_i^+)$ 를 만족하여야 한다 간단하게  $w_i(s) = \delta_i^+$ 로 두면 된다.

### 2. 성능 유지 문제

성능 문제에서 가장 중요한 것은 큐의 크기  $q(t)$ 를 요구되어지는 큐의 크기  $q_d(t)$ 에 일치시키는 것이다. 여기서는  $q_d(s) = \frac{1}{s} \hat{q}(s)$ 이고,  $\hat{q}(s)$ 는 유한 에너지를 갖는 임의의 제한된 신호라 가정한다. 이때 추적 오차  $e(t) = q_d(t) - q(t)$ 는  $c(s)$ 가 큐의 크기에는 적분되어서 빼어지는 방향으로 작용함을 감안하면 다음 식을 만족한다:

$$e(s) = S_o(s) \frac{1}{s} (\hat{q}(s) + c(s)) \quad (6)$$

여기서  $S_o(s) = (1 + P_o(s)K(s))^{-1}$ 이다.  $K(s)$ 는 전체 시스템을 안정화시키는 제어기이고,  $P_o(s)$ 는  $s=0$ 에 극점을 가지고 있으므로  $S_o(0) = 0$ 이다 최종치 정리에 의해서 정상상태에서의 오차  $e_{ss}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} ([e^{-h_1 s}, \dots, e^{-h_n s}] K(s))^{-1} s (\hat{q}(s) + c(s))$$

$$= ([1, \dots, 1] K(0))^{-1} c_{ss}$$

여기서  $\hat{q}(s)$ 는 유한 에너지를 갖는 신호임을 이용하였다. 이 식에서 정상 상태에서의 오차가 영이 되려면 제어기가 원점을 극점을 가져야 됨을 알 수 있다.

다음으로 제어기의 성능에서 중요한 것은 전송 속도를 할당할 때 공평하게 배분하는 것이다. 각 소스에 주어지는 전송 속도는 다음과 같이 표현 된다.

$$[r_1(s) \dots r_n(s)]^T = \frac{K(s)}{1 + P_o(s)K(s)} \frac{1}{s} (\hat{q}(s) + c(s))$$

따라서 정상 상태에서 공평하게 전송 속도가 배분되기 위해서는 각 소스에 대한 제어 입력 즉,  $K(s)$ 의 각 원소  $K_i(s)$ 에 대하여 다음을 만족시키도록 하면 된다:

$$\lim_{s \rightarrow 0} K_i(s) ([e^{-h_1 s}, \dots, e^{-h_n s}] K(s))^{-1} = \frac{1}{n} \quad (7)$$

정상 상태 성능을 만족시키고, 또 기본적인 과도 상태 성능들을 만족시키는 제어기를 구하는 것은 다음과 같은 가중 감도 함수를 최소화하는  $K$ 를 구하는 것과 같다. 즉,

$$\text{minimize} \quad \|W_s(1 + P_o K)^{-1}\|_\infty \quad (8)$$

여기서  $K$ 는 공칭 플랜트를 안정화시키는 모든 제어기이며,  $W_s(s)$ 는 감도 가중 함수이다.

### 3. $H_\infty$ 최적화 문제

(5)를 만족시키면서 (8)을 만족시키는 제어기를 구하는 것은 매우 복잡하고 어려운 문제이다. 그러나 각 소스의 서로 다른 공칭 시간 지연들을 제어기에서 인위적으로 시간 지연을 삽입하여 같게 해 버리면 제어기 설계 문제가 훨씬 간단하여진다[16] 즉  $K(s)$ 를 다음과 같이 잡는다.

$$K(s) = D_e(s) \frac{1}{nh} K_v(s) \quad (9)$$

여기서  $D_e(s)$ 는 시간 지연들을 갖게하는 역할을 하며 다음과 같이 정의 된다. 그리고  $h$ 는  $h_i$  ( $i=1, \dots, n$ )의 최대 값이다. 여기서 시간지연의 최대값을 기준으로 갖게하는 것은 시간 지연을 늘일 수는 있어도 빠르게 할 수는 없기 때문이다.

$$D_e(s) = [e^{-(h-h_1)s}, \dots, e^{-(h-h_n)s}]^T \quad (10)$$

그리고  $K_v(s)$ 는 제어기의 스칼라 부분이며, 이러한 구조는 제어기와 제어기의 구조를 매우 단순하게 만들어 준다. (9)의 형태로 주어지는 제어기를 사용 할 때 (5)로 주어지는 안정도의 강인성 문제는 다음과 같이 변형된다.

$$\| W_1 K_v (1 + P_v K_v)^{-1} \|_{\infty} \leq 1 \quad (11)$$

여기서  $P_v(s) = e^{-hs}/hs$ 이고,  $W_1(s)$ 는 다음을 만족하는 불확실성에 대한 가중 함수이다.

$$| W_1(j\omega) | \geq \frac{1}{nh} \left| \sum_{i=1}^n \delta_i^+ e^{-j(h-h_i)\omega} \right| \quad \forall \omega. \quad (12)$$

(12)를 만족하는 간단한  $W_1(s)$ 는 다음과 같이 잡을 수 있다.

$$W_1(s) = \rho = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n \delta_i^+ =: \frac{\delta}{h}. \quad (13)$$

(8)로 주어지는 성능 문제를 같이 고려하면  $H_{\infty}$  최적화 문제는  $P_v(s) = e^{-hs}/hs$ 로 주어지는 단일입출력 플랜트를 안정화시키는 모든 제어기 중에서 다음의  $\gamma$ 를 최소화하는  $K_v(s)$ 를 찾는 것과 같다.

$$\left\| \frac{W_1(1 + P_v K_v)^{-1}}{W_1 K_v (1 + P_v K_v)^{-1}} \right\|_{\infty} \leq \gamma \quad (14)$$

4. 최적 제어기 계산

참고문헌 [15]의 정리 1 및 정리 2에 주어진  $H_{\infty}$  제어기에 대한 식을 자세히 보면 감도 가중 함수  $W_1(s)$ 의 극점은 게루프 전달함수  $L_v(s) := P_v(s)K_v(s)$ 의 극점으로 나타남을 알 수 있다. 한편 앞에서 설명한 바와 같이 정상 상태에서 좋은 성능을 나타내기 위해  $K_v(s)$ 는  $s=0$ 에 극점을 가져야 한다. 그리고  $P_v(s)$ 도  $s=0$ 에 극점을 가지고 있으므로  $W_1(s)$ 는  $s=0$ 에 2중 극점을 가져야 한다. 따라서  $W_1(s)$ 는 다음과 같이 잡는다.

$$W_1(s) = \frac{1}{(hs)^2} \quad (15)$$

이제  $W_1(s) = W_2(s)$ ,  $W_2(s) = \rho ks$ 라 정의 한다. 여기서  $\rho = \delta/h$ 는 시간 지연의 상대적인 불확실성을 의미한다. 그러면 (14)의 문제는 다음과 같이 주어지는 혼합 감도 최소화 문제와 같다.

$$\gamma_{opt} := \inf_{K_v \text{ stabilizing } P_v} \left\| \frac{W_1(1 + P_v K_v)^{-1}}{W_2 P_v K_v (1 + P_v K_v)^{-1}} \right\|_{\infty}. \quad (16)$$

(16)은 정규화된 주파수  $\hat{s} = ks$ 의 함수로 이루어져 있으며, 따라서 구해지는 제어기  $K_{v,opt}$ 도 정규화된 주파수  $\hat{s}$ 의 함수가 된다.

참고문헌[15]의 정리 1 및 정리 2를 이용하면, 최적 스칼라 제어기  $K_{v,opt}$ 는 다음과 같이 주어진다:

$$K_{v,opt} = \frac{R(\hat{s})}{1 + R(\hat{s}) \frac{e^{-\hat{s}}}{\hat{s}}} \left( \frac{1 - \gamma_{opt}^2 \hat{s}^4}{\gamma_{opt}^2 \hat{s}^4} \right) \quad (17)$$

여기서  $R(\hat{s})$ 는 다음과 같이 주어진다

$$R(\hat{s}) = \frac{\gamma_{opt}}{\rho} \frac{\hat{s}^3 (\alpha - \hat{s})}{(\hat{s} + a)(\hat{s}^2 + b\hat{s} + c)(\alpha + \hat{s})}$$

파라미터  $a, b, c, \alpha$  및  $\gamma_{opt}$ 는 다음과 같이 구한다: 고정된  $\gamma > 0$ 에 대하여 다음 식의 하나뿐인 양의 근  $x$ 를 구한다.

$$x^3 + \frac{1}{\gamma^2} x^2 - \frac{1}{\rho^4} = 0$$

이때  $a, b, c, \alpha$ 는 다음과 같다.

$$a = \frac{1}{\rho \sqrt{x}}, c = \rho a, b = \sqrt{2c - a^2},$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{1 - \rho e^{\frac{1}{\sqrt{\gamma}}} (\frac{1}{\sqrt{\gamma}} + a)(\frac{1}{\gamma} + b\frac{1}{\sqrt{\gamma}} + c)}{1 + \rho e^{\frac{1}{\sqrt{\gamma}}} (\frac{1}{\sqrt{\gamma}} + a)(\frac{1}{\gamma} + b\frac{1}{\sqrt{\gamma}} + c)}$$

그리고  $\gamma_{opt}$ 는 다음을 만족하는 최대의  $\gamma$ 이다.

$$1 + R(\beta) \frac{e^{-\beta}}{\beta} = 0, \text{ 단, } \beta = j\frac{1}{\sqrt{\gamma}}$$

표 1에 몇가지  $\rho$ 에 대하여 최적 제어기들의 파라미터들을 계산하여 나타내었다.

표 1.  $\rho$ 에 따른 제어기의 각 파라미터. Table 1. controller parameters with  $\rho$ .

$\rho$	0.2	0.8	2	10
$\gamma_{opt}$	1.37	2.43	3.74	8.77
$-\alpha$	0.61	0.45	0.36	0.23
$a$	1.73	1.10	0.82	0.49
$b$	1.67	1.03	0.75	0.42
$\sqrt{c}$	1.70	1.07	0.78	0.46

5. 안정도 여유

최적 제어기의 게루프 전달함수는 다음과 같다.

$$L_{opt}(s) = P_v(s)K_{v,opt}(s) = P_o(s)K_{opt}(s) \quad (18)$$

$$= \frac{R(\hat{s}) \frac{e^{-\hat{s}}}{\hat{s}}}{1 + R(\hat{s}) \frac{e^{-\hat{s}}}{\hat{s}}} \left( \frac{1 - \gamma_{opt}^2 \hat{s}^4}{\gamma_{opt}^2 \hat{s}^4} \right)$$

(18)을 보면  $L_{opt}(s)$ 는 정규화된 주파수  $\hat{s}$ 의 함수임을 알 수 있다. 이는 최적 제어기의 대역이 시간 지연  $h$ 에 반비례함을 나타낸다.

그림 2는 서로 다른  $\rho$  들에 대한  $L_{opt}(s)$ 의 나이퀴스트 선도이다. 그림을 보면  $\rho$ 가 증가할수록 임계점  $(-1, j0)$ 에서 나이퀴스트 선도 사이의 거리가 증가하며, 따라서 안정도 여유가 증가하는 것을 나타내고 있다.

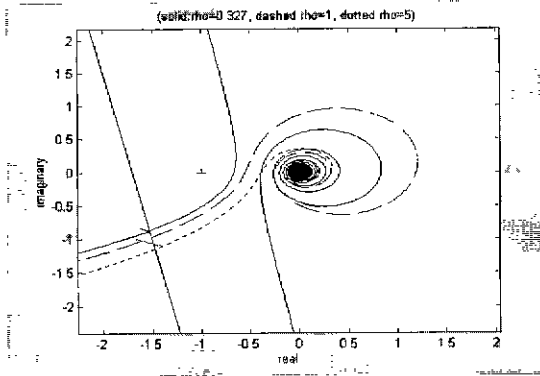


그림 2.  $L_{opt}(s)$ 의 나이퀴스트 선도  
Fig. 2. Nyquist plot of  $L_{opt}(s)$ .

이는  $\rho$ 가 최대 시간 지연  $h$ 에 대한 상대적인 시간 지연의 불확실성의 크기를 나타내는 것이므로 당연한 귀결이라 하겠다. 즉, 안정도 여유가 좋도록 하기 위해서는  $\rho$ 를 크게 하면 된다. 그러나  $\rho$ 가 커질수록 응답이 느려지므로 성능이 저하된다.

(14)가 성립하면 다음이 성립한다.

$$\left\| \frac{\rho}{\gamma_{opt}} K_{v,opt} (1 + P_v K_{v,opt})^{-1} \right\|_{\infty} \leq 1. \quad (19)$$

따라서 허용되는 최대 시간 지연 불확실성  $(h_{max} - h)/h$ 는  $\rho/\gamma_{opt}$ 이다. 그림 3은 이렇게 구한 허용되는 최대 시간 지연 불확실성과 보우드 선도에서 계산된 실제의 허용 시간 지연을 나타내고 있다.

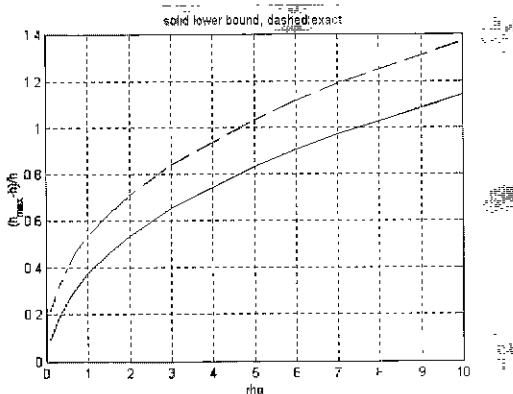


그림 3. 허용되는 시간 지연의 불확실성의 최대값.  
Fig. 3. Largest allowable time-delay uncertainty.

6. 제어기 구현 및 시뮬레이션 결과

(17)로 주어지는 제어기는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$K_{v,opt} = \frac{\gamma_{opt}}{\rho} \frac{(\hat{s} - \alpha)}{\hat{s}} \frac{1}{1 + F(\hat{s})} \quad (20)$$

여기서,

$$F(\hat{s}) = \frac{(\hat{s} + a)(\hat{s}^2 + b\hat{s} + c)(\hat{s} + \alpha) - (\hat{s}^4 - \gamma_{opt}^{-2})}{(\hat{s}^4 - \gamma_{opt}^{-2})} - \frac{\gamma_{opt} \rho^{-1} \hat{s}^2 (\hat{s} - \alpha) e^{-\hat{s}}}{(\hat{s}^4 - \gamma_{opt}^{-2})} \quad (21)$$

참고문헌 [15]의 정리 2의 인터폴레이션 조건을 살펴보면  $F(\hat{s})$ 는 안정한 전달 함수임을 알 수 있으며, 구체적으로 상태 방정식은 다음과 같이 주어짐을 알 수 있다.

$$F(\hat{s}) = C(e^{-\hat{s}} I - e^{-A})(\hat{s}I - A)^{-1}B \quad (22)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \gamma_{opt}^{-2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \frac{\gamma_{opt}}{\rho} [0 \ 0 \ \alpha \ -1]$$

(22)는  $F(\hat{s})$ 는 임펄스 응답이  $[0, 1]$ 에서만 존재하는 FIR 필터임을 말하고 있다.

(20)으로 주어지는 제어기의 디지털 구현은 PI 제어기와 FIR필터로 이루어진다. FIR 필터의 크기는 샘플링 시간을  $T_s$ 라 할 때,  $h/T_s$ 가 된다. 실제 구현시 각 소스가 보낼 수 있는 전송 속도는 제한 되어 있으므로, 만약 할당된 전송속도의 총 합이 소스가 보낼 수 있는 총 전송 속도보다 클 경우, 적분기 값이 과도하게 증가되어 성능에 악 영향을 미칠 수 있으며, 이런 경우를 대비해서 적분기의 값은 상한과 하한을 둘 필요가 있다. 또한 모든 소스가 포화되어 더 이상 전송 속도를 키울 수 없는 경우 적분기에서 오차를 적분하는 것은 무의미하므로 적분을 멈추도록 하였다.

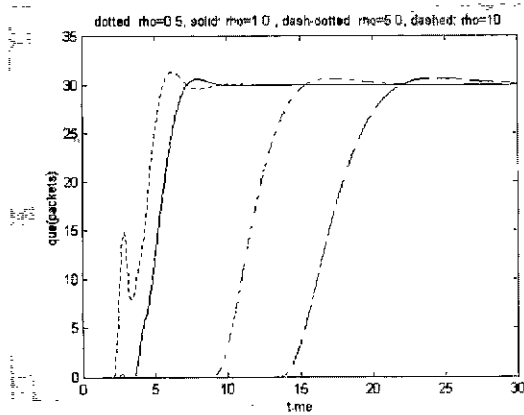


그림 4.  $\rho$ 에 따른 계단 응답들.  
Fig. 4. Step responses with  $\rho$ 's.

그림 4는 큐의 크기 명령이 계단 파형으로 주어졌을 경우 본 논문에서 제안된 제어기의 응답을 나타내고 있다.  $\rho$ 가 커질수록 반응은 느려지나 큐의 크기가 안정되게 유지되고,  $\rho$ 가 작을수록 응답 속도는 빨라지나 과도 상태의 흔들림이 많은 것을 알 수 있다. 이 응답을 보면  $\rho$ 가 1-5인 경우가 적당한 것을 알 수 있다.

그림 5는  $\rho=2$ 인 경우 서로 다른 시간 지연에 따른 스텝 응답을 나타낸다. 시간 지연이 2h일 때 불안정한데 이는 그림 3에서 보듯이 시간 지연 오차가 기준 시간 지연(1h)보다 0.7h를 넘기 때문이다.

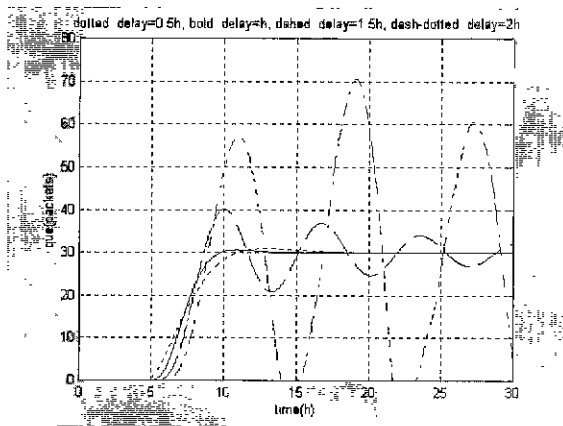


그림 5. 시간 지연의 불확실 성에 대한 계단 응답.  
Fig. 5. Step responses with time-delay uncertainties.

다음으로 실제적인 환경, 즉 소스의 레이트가 제한되어 있고, 시간에 따라 변화하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시스템의 출력은 큐의 크기이다. 그리고 시간 축의 단위는 최대 시간 지연 값(h)이다. 실제 환경과 비슷한 시뮬레이션을 위해 네트워크 상에서 있을 수 있는 비선형 성분들을 모두 포함시켰다. 즉, 제어 명령은 음수가 될 수 없도록 하였고, 또 제어 명령의 크기도 제한을 시켰다. 포화된 노드에서 밖으로 정보가 전송되는 속도는 60 packets/h로 가정하였다.

5개의 소스는 0h, 0h, 0.3h, 0.6h, 1h의 시간 지연을 가지고 반응한다고 가정하였다. 그림 6는 각 소스가 데이터를 보낼려고 요청하는 것을 나타낸 것이다. 그림에서 소스 1은 0h-700h의 시간동안 36 packets/h로 데이터를 내보내려하며, 소스 2는 250h-1000h 동안 42 packets/h로 데이터를 내보내려하고, 소스 3은 0h-100h, 150h-850h 동안 36 packets/h의 속도로 데이터를 내보내려하며, 소스 4는 400h-1000h 동안 30 packets/h의 속도로, 소스 5는 550h-1000h동안 25 packets/h의 속도로 데이터를 내보내려고 요청을 한다. 그림 7은 이러한 소스의 변화가 있을 때 큐의 응답을 나타낸다. 그림에서 실선 부분이 본 연구에서 제안한 제어기의 응답이며, 점선 부분은 기존에 나와 있는 제어기[3]의 응답이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 제안된 제어기가 반응 속도도 5배 정도 빠르고 오버슈트도 훨씬 적

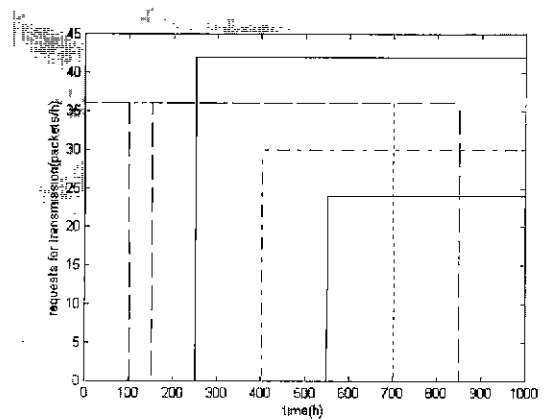


그림 6. 각 소스의 데이터 전송 요청.  
Fig. 6. Source connection and demands

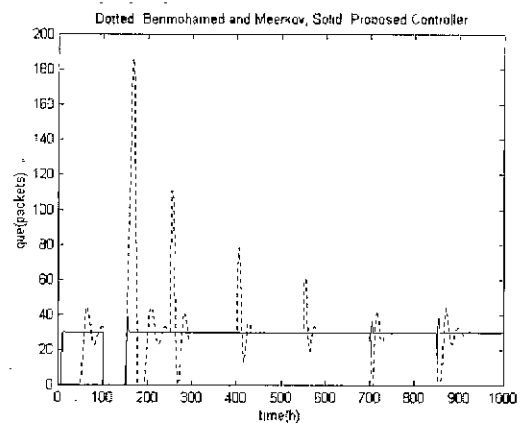


그림 7. 큐의 응답 비교.  
Fig 7. Comparison of responses.

은 것을 알 수 있다. 또한 소스의 개수가 증가할 때 본 연구에서 개발된 제어기는 큐의 크기에 전혀 흔들림이 없고, 소스의 개수가 작아질 때만 약간의 흔들림이 있음을 알 수 있다. 그리고 기존 제어기는 소스의 개수가 변할 때 큐의 크기가 영까지 내려와서 데이터 전송을 못하는 경우도 있지만 본 연구에서 개발된 제어기는 영까지 내려오지 않으므로 큐의 크기가 과도적으로 약간 변하지만 포화된 노드에서는 계속해서 전 속도로 데이터를 밖으로 전송할 수 있게 된다.

### III. 결론

본 연구에서 개발된 제어기는 계산이 약간 복잡하기는 하지만 시간 지연의 변화에 대하여 강인하며, 성능이 획기적으로 개선됨을 알 수 있고, 따라서 네트워크 제어에 응용된다면 효율을 크게 개선할 수 있을 것으로 기대 된다. 또한 이 이론은 시간 지연이 있는 시스템에 일반적으로 적용되므로, 대표적인 시간 지연 시스템인 온도 제어기 등에도 바로 이용 될 수 있다.

### 참고문헌

[1] ATM Forum Traffic Management AF-TM-0056.000.

- "The ATM forum traffic management specification version 4.0," April, 1996.
- [2] E. Altman, T. Basar, and R. Srikant. "Multi-user rate-based flow control with action delays: a team-theoretic approach," *Proc. of 36th Conference on Decision and Control*, San Diego, CA, pp. 2387-2392, December, 1997.
- [3] L. Benmohamed and S. M. Meerkov, "Feedback control of congestion in packet switching networks: the case of a single congested node," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 1, pp. 693-707, 1993.
- [4] J-C. Bolot and A. U. Shankar, "Dynamical behavior of rate-based flow control mechanisms," *Computer Communication Review*, vol. 20, no. 2, pp. 35-49, 1990.
- [5] F. Blanchin, R. Lo Cigno, and R. Tempo, "Control of ATM networks: Fragility and robustness issues," *Proc. of the American Control Conference*, Philadelphia, PA, pp. 2847-2851, June, 1998.
- [6] F. Bonomi and K. W. Fendick, "The rate-based flow control framework for the available bit rate ATM service," *IEEE Network*, pp. 25-39, March/April, 1995.
- [7] H. Dym, T. T. Georgiou, and M. C. Smith, "Explicit formulas for optimally robust controllers for delay systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, pp. 656-669, 1995.
- [8] C. H. Foias and A. Ozbay, Tannenbaum, *Robust Control of Infinite Dimensional Systems: Frequency Domain Methods*. LNCIS, no. 209, Springer-Verlag, 1996.
- [9] M. Fu, A. Olbrot, and M. Polis. "Edge theorem and graphical tests for robust stability of neutral time delay systems." *Automatica*, vol. 27, pp. 739-741, 1991.
- [10] J. Jaffe, "Bottleneck flow control," *IEEE Trans. on Communications*. vol. 29, pp. 954-962, 1981.
- [11] R. Jain, "Congestion control and traffic management in ATM networks: recent advances and a survey," *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 28, 1996, pp. 1723-1738.
- [12] S. Kalyanaraman, *Traffic Management for the Available Bit Rate (ABR) Service in Asynchronous Transfer Mode (ATM) Networks*, Ph.D. Thesis, Dept. of Computer and Info. Sci., Ohio State Univ., 1997.
- [13] A. K. Parekh and R. G. Gallager, "A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: the multiple node case," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 2, pp. 137-150, 1994.
- [14] K. K. Ramakrishnan and P. Newman, "Integration of rate and credit schemes for ATM flow control," *IEEE Network*, pp. 49-56, March/April, 1995.
- [15] O. Toker and H. Ozbay, " $H_\infty$  Optimal and suboptimal controllers for infinite dimensional SISO plants," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 40, pp. 751-755, 1995.
- [16] H. Ozbay, S. Kalyanaraman, and A. Iftar. "On rate based congestion control in high-speed networks: Design of an  $H^\infty$  based flow controller for single bottleneck," *Proc. of the American Control Conference*, Philadelphia PA, pp. 2376-2380, June, 1998.
- [17] K. Zhou, J. C. Doyle and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall, 1996
- [18] E. Altman, and T. Basar, "Multi user rate based flow control: Distributed game-theoretic algorithms," *Proc. of the 36th Conference on Decision & Control*, San Diego, California, USA. pp. 2916-2921, December, 1997.
- [19] E. Altman, and T. Basar, R. Srikant, "Multi-user rate based flow control: A team theoretic approach," *Proc. of the 36th Conference on Decision & Control*, San Diego, California, USA. pp. 2387 - 2392, December, 1997.
- [20] Y. Zhao, S. Q. Li, and S. Sigarto. "A linear dynamic model for design of stable explicit-rate ABR control schemes," *Proc. of INFOCOM '97*, Kobe pp. 283-292, Japan, 1997.
- [21] C. E. Rohrs and R. A. Berry, "A linear control approach to explicit Rate Feedback in ATM Networks", *Proc. of INFOCOM '97*, Kobe pp. 277-182, Japan, 1997.



강 태 삼

1963년 4월 6일생, 1986년 서울대 제어  
계측공학과 졸업, 동대학원 석사  
(1988), 동대학원 박사(1992). 1994년-  
현재 호서대학교 전기공학부 부교수.  
관심분야는 강인제어, 서보 제어, 온도

제어, 관성 센서.