

ATM 망의 혼잡 제어

강태삼

호서대학교 전기공학부

1. 서론

ATM(Asynchronous Transfer Mode)은 스위칭 방식의 통신 방법으로 통신망의 백본으로 현재 주로 이용되고 있으며, 또한 사용자들의 요구가 멀티미디어의 충분한 지원을 요청하는 방향으로 증가함에 따라, 이러한 요구를 충족시키기 위한 B-ISDN 서비스를 지원하기에 적합한 ATM 전송망이 그 시장을 넓히고 있다 [1].

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 ATM 망에서 정보 흐름 제어 장치는 주어진 선로를 얼마나 효과적으로 사용할 수 있게 하느냐에 결정적인 역할을 한다. 그리고 이 정보의 흐름은 병목현상을 일으키는 노드에 의하여 결정된다. 병목 현상을 일으키는 곳에서 데이터 손실을 줄이고, 각 사용자의 요구에 공평하게 대응하기 위해서는 데이터를 보내는 각 소스의 전송 속도를 제어할 필요가 있는데 이것이 혼잡 제어 (congestion control) 문제이다.

2. ATM 망의 서비스 구성

ATM에서 데이터는 셀(cell) 또는 패킷(packet)이라 불리는 53 바이트(byte)의 데이터 묶음으로 나뉘어져서 보내어진다. 각 셀에는 출발지와 도착지 및 VC(virtual channel) 등에 대한 정보가 들어 있으며, 중간 중간에 있는 스위칭 노드들을 통과하면서 목적지까지 셀이 전송되어진다.

각 소스(source) 또는 응용에서 필요한 데이터 전송 서비스에 부응하기 위해서 ATM 망은 다음과 같은 서비스 시스템을 갖추고 있다. 즉, CBR(Constant Bit Rate), rt-VBR(real time Variable Bit Rate), nrt-VBR(non-real time VBR), ABR(Available Bit Rate), UBR(Unspecified Bit Rate) 등의 서비스가 그것이다. (1)CBR 서비스는 연결이 된 동안 계속하여 일정한 속도로 데이터를 전송하는 것이 요구되는 응용에 필요

한 것으로 시간 지연에 대하여 비교적 엄격한 조건이 요구된다. 이것은 비디오 컨퍼런스나 텔레비전, 원격 학습 등에 이용된다. (2)rt-VBR 서비스는 시간에 민감한 응용을 위한 것으로, 시간 지연 및 시간지연 변화에 대하여 매우 엄격한 조건이 요구된다. CBR과 다른 점은 시간에 따라 다른 속도의 전송 속도를 필요로 한다는 것이다. 다시 말하면, rt-VBR 소스는 평균적으로 일정 속도의 전송 속도를 필요로 하지만 한번씩 빠르게 변화하는 양의 데이터 전송을 필요로 하는 것으로 특징 지워질 수 있다. 예를 들어 압축된 비디오 데이터는 각 화면마다 그 사이즈가 다른 반면 일정한 속도로 프레임이 갱신되어야 하므로, 데이터 전송의 측면에서 보면 실제적인 데이터 전송 속도는 시간에 따라 변하게 된다. (3)nrt-VBR 서비스는 순간적인 트래픽(traffic)의 특징을 가지면서, 시간 지연이나 시간 지연의 변화에 대하여는 엄격하지 않은 제한을 가지는 응용들에 사용되는 것으로, 비행기 예약, 은행 처리, 공정 감시 등에 이용될 수 있다. (4)UBR 서비스는 앞에서 언급된 CBR과 두 종류의 VBR에서 사용되다 남은 ATM의 용량(capacity)을 이용하기 위한 것이다. 즉, 특히 VBR의 경우는 전송 요구가 순간적으로 변하며, 따라서 순간 순간마다 ATM의 용량 중 일부가 남게 되는데, 이 남은 용량을 이용한다. 이것은 일정치 않은 시간 지연과 셀 손실(cell loss)을 감수할 수 있는 응용에 사용될 수 있으며, 텍스트, 데이터 및 이미지 전송, 원격 터미널 등에 이용될 수 있다. UBR에서는 혼잡에 대한 정보가 되먹임(feedback) 되지 않는다. (5)ABR 서비스는 UBR 서비스에 해당되는 부분에 혼잡에 대한 정보를 추가하여, 각 소스가 혼잡 정보를 되먹임 받을 수 있게 한 것이다. 각 소스가 혼잡에 대한 정보에 따른 정보 또는 조치를 되먹임 받음으로써 각 소스는 전송 속도를 제어하여 데이터의 손실을 줄이고 전송 속도를 개선할 수 있다. 이 ABR 서비스가 바로 혼잡 제어에서 이용되는 서비스이며, CBR, VBR(rt-VBR 또는 nrt-VBR) 서비스에서 쓰고 남은 용량을 효과적으로 공평하게 배분하는 역할을 한다. 특히 혼잡에 대한 정보를 제공하거나, 직접 각 소스가 보낼수 있는 전송 속도를 지정하여 줌으로써 효

과적으로 혼잡을 막아 셀 손실, 시간 지연 등을 최소화한다. 각종 제어 이론을 이용한 혼잡 제어는 대부분이 ABR 서비스를 효과적으로 이용하기 위한 것이며, 최근에 많은 연구들이 진행되고 있다[1-14, 18-26]. 그림 1은 이제까지 설명한 ATM 서비스들이 선로의 용량을 할당 받아 사용하는 패턴을 시간에 따라 그린 것이다. 이 그림에서 보면 CBR은 계속하여 일정한 용

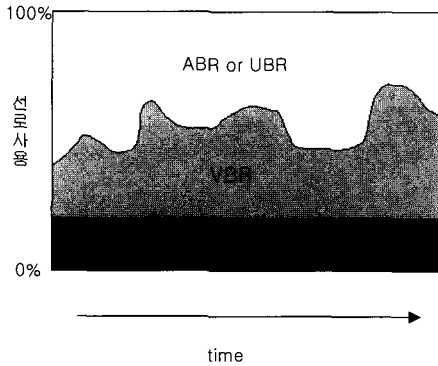


그림 1. 선로 용량 배분.

량을 할당 받아 사용하고 있으며, VBR이 그다음으로 시간에 따라 순간적으로 변하는 용량을 할당 받아 사용하고, 나머지 용량, 즉, CBR과 VBR이 쓰고 남은 용량을 UBR 또는 ABR이 사용하고 있음을 알 수 있다.

3. ABR 트래픽 제어

그림 2는 소스(Source End System)와 목적지(Destination End System) 사이에 데이터 및 되먹임 정보가 전달되는 것을 나타내고 있다.

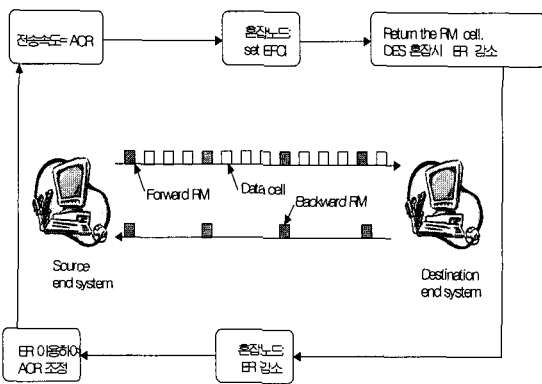


그림 2. ABR 연결에서 데이터 셀과 RM 셀의 흐름

소스는 데이터 셀을 보내면서 주기적으로 RM (Resource Management) 셀을 보낸다. RM 셀은 ABR에

서 각 소스의 전송 속도 ACR(Available Cell Rate)를 조정하기 위하여 사용되는 제어 정보 용 셀로서, 혼잡 노드를 지나면서 그 노드에 의하여 혼잡 정보가 EFCI(Explicit Forward Congestion Indication)에 기록된다. 또한 목적지 자체가 혼잡될 경우 목적지는 RM 셀의 ER(Explicit Rate)를 감소시켜 소스에서 ACR을 줄이게 하여 결과적으로 전송 속도를 줄일 수도 있다. 그림에서 보듯이 RM 셀은 목적지에서 방향을 바꾸어 다시 같은 경로를 거쳐 소스로 돌아 오는데, 혼잡 노드를 거치면서 ER이 감소되고, 결과적으로 소스에서 ACR이 조정 된다. 혼잡 제어를 위해 혼잡 노드의 제어기는 목적지에서 돌아오는 RM 셀을 기다릴 필요 없이 바로 RM 셀에 정보를 기록하여 소스로 보낼 수 있다. 또한 그림에서는 한 개의 소스와 목적지 만 나와 있지만 실제로는 여러개의 소스와 목적지들이 연결되어 있게 된다.

4. ABR 혼잡 제어 시스템의 수학적 모델링

그림3은 ATM 망의 ABR 혼잡 제어 시스템의 개략도이다. 제어기는 여러 다른 소스로부터 데이터를 받은 후 이를 다시 다른 목적지로 보낸다. 여기에서는 n 개의 소스에서 자료를 보내고 한 개의 제어장치가 이를 받아서 다른 곳으로 보낸다고 가정한다. 혼잡 현상을 일으키고 있는 제어기는 $c(t)$ cells/(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 혼잡 노드의 큐의 크기를 일정하게 유지하도록 제어한다. 큐의 크기를 일정 수준으로 유지하면 혼잡 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 교란

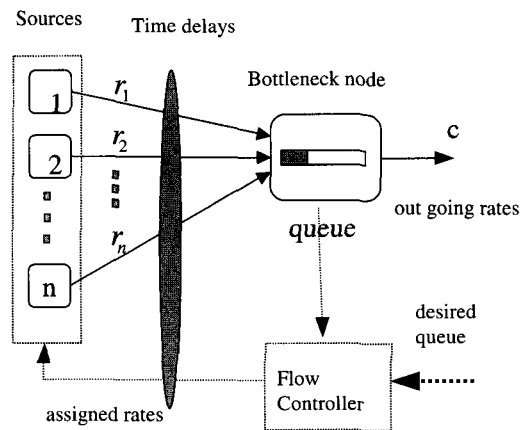


그림 3. 통신망 흐름 제어 시스템.

이 생겼을 때 큐의 크기가 영이 되는 순간이 생길 수 있으며, 이 때는 혼잡 노드에서 데이터를 전송할 수 있는 능력이 있는데도 불구하고 보낼 데이터가 없는 순간이 발생하게 된 것이므로 전송 효율이 떨어지는 결과를 초래하며, 또한 이 혼잡 노드가 연결된 다른 노드의 큐의 크기를 제어하는 데도 불리한 교란으로 작용한다. 이는 다른 제어기에서 데이터를 보내라고 요청하여도 순간적으로 보낼 데이터가 없기 때문이다.

통신망 제어기가 큐의 크기를 제어하는 방법은 다음과 같다. 즉, 제어기는 현재 큐의 크기를 보고 각각의 소스가 보낼 수 있는 전송 속도(ER)를 피드백 해준다. 그러면 각 소스는 그 피드백된 제어신호를 보고 그에 맞게 전송 속도를 조절한다. 그런데 제어기에서 소스로 피드백 신호가 전달되는데도 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 혼잡 노드에 연결된 그림 3의 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 τ_i 는 제어기가 피드백 신호를 준 후부터 그에 의해 조정된 전송 속도의 데이터가 소스 i 에서 혼잡 노드에 도달하는데 까지 걸린 왕복 시간 지연(round trip time delay)를 나타낸다. 이 시간 지연은 각 노드 또는 소스가 데이터를 처리하는 시간 지연 및 원거리에 따른 전달 지연을 포함한다. 데이터를 처리하는데 걸리는 시간은 전달 지연 시간에 비하여 매우 작다. 그렇지만 이것은 소스 또는 노드의 상태에 따라 시간 지연이 달라질 수 있으므로 시간 지연을 불확실하게 만드는 요인이 된다. 식(1)로 주어지는 혼잡제어 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 τ_i 의 기준 값을 h_i 라하고 $\delta_i = (\tau_i - h_i)$ 라 두며, $\delta_i \in (-\delta_i^-, \delta_i^+)$ 라고 하면, $D_i(s) = e^{-(h_i + \delta_i)s}$ 와 같이 주어지며, δ_i^+ 는 불확실성의 범위를 나타낸다. 앞에서 설명한 바와 같이 $c(t)$ 는 VBR의 변화에 따라 불규칙적으로 변하며, 양

의 값만을 가진다. 식(1) 및 식(2)에서 보듯이 ATM 망의 혼잡 제어를 위한 플랜트 모델은 시간 지연만 없다면 매우 간단한 시스템이다. 그런데 문제는 전송 속도에 비하여 시간 지연이 매우 크다는 것이다. 예를 들어 ATM 망이 150 Mbps의 속도로 데이터를 전송한다고 가정하면 1개의 셀을 보내는 데는 $(53 \text{ byte/cell} \times 8 \text{ bit/byte}) / (150 \times 10^6 \text{ bps}) \approx 3 \times 10^{-6}$ 초이다. 만약 소스와 목적지가 북미 대륙의 양 끝에 위치하고 있다면 왕복 전달 지연시간만 30 ms 정도 된다. 따라서 만약 목적지에서 혼잡이 발생하여 전송 속도를 제어하기 위한 신호를 내 보내고 소스가 이를 받아 전송 속도를 조절하여 그것이 목적지에 도달하는 데 30 ms가 걸리며 그동안 소스는 이미 $30 \times 10^{-3} / 3 \times 10^{-6} = 1 \times 10^4 \text{ cells} = 4.24 \times 10^6$ 바이트의 데이터를 이미 내보낸 상태가 된다. 따라서 ATM 망의 혼잡 제어 시스템은 이 시간 지연에 의한 효과를 반드시 고려해야 한다. 시간 지연을 고려하지 않은 여러 제어 알고리즘들은 안정성을 유지하기 어렵다. 또한 제어 입력은 음수가 될 수 없으며, 또한 소스가 내보낼 수 있는 최대 전송 속도도 제한되어 있다. 그리고 그림 1에서 알 수 있듯이 ABR이 쓸 수 있는 용량 $c(t)$ 는 CBR 및 VBR의 상태에 따라 변하므로 제어기의 입장에서 보면 교란처럼 동작한다. 따라서 효과적인 제어기는 이러한 비선형성 및 시간 지연을 잘 극복할 수 있어야 한다.

5. 제어기 설계 문제

일반적인 제어기에서와 마찬가지로 제어기의 안정도 강인성과 성능을 유지하는 것이 문제이다. 또한 제어기는 각 노드에서 실시간으로 운영되므로 제어 알고리즘이 간단할수록 유리하며, 또한 큐의 크기를 작게 유지할 수 있어야 한다.

5.1 제어기의 안정도 강인성 문제

공칭 플랜트를 H_∞ 코프라이밍 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 제어기의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 시간 지연에 대한 불확실성을 포함하는 플랜트는 $P = (N_o + \Delta_N) M^{-1}$ 으로 주어지며, $\Delta_N(s)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta_N(s) = \frac{1}{s + \epsilon} [(e^{-\delta_1 s} - 1), \dots, (e^{-\delta_n s} - 1)] \times \text{diag}(e^{-h_1 s}, \dots, e^{-h_n s}) \quad (4)$$

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.

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

여기서 $W=[w_1, \dots, w_n]$ 이고, $w_i, w_i^{-1} \in H_\infty$ 이며 $|w_i(j\omega)| \geq \left| \frac{e^{-j\delta_i\omega} - 1}{j\omega} \right|, \forall \omega \in R, \delta_i \in (-\delta_i^+, \delta_i^+)$ 를 만족하여야 한다. 예를 들어 간단하게 이를 만족하는 W 는 $w_i(s) = \delta_i^+$ 이다.

5.2 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. 즉, $q_d(t)$ 는 그 크기가 발산하지 않고 진동하는 진폭도 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 함수이며, 대표적인 예는 계단 함수나 여러개의 계단함수의 조합으로 이루어진 구형과 함수 등이다. 이때 추적 오차 $e(t) = q_d(t) - q(t)$ 는 $c(s)$ 가 큐의 크기에는 적분되어서 빠져지는 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_∞ 는 다음과 같이 주어진다.

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

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

다음으로 제어기의 성능에서 중요한 것은 전송 속도를 배분할 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:

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

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,

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

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

5.3 H_∞ 최적화 문제

식(5)를 만족시키면서 식(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.

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

여기서 $D_e(s)$ 는 시간 지연들을 같게하는 역할을 하며 다음과 같이 정의 된다. 그리고 h 는 $h_i (i=1, \dots, n)$ 의 최대값이다. 여기서 시간지연의 최대값을 기준으로 같게하는 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 $K_i(s)$ 는 제어기의 스칼라 부분이며, 이러한 구조는 제어기와 제어기의 구조를 매우 단순하게 만들어 준다.

식(9)의 형태로 주어지는 제어기를 사용 할 때 식(5)로 주어지는 안정도의 강인성 문제는 다음과 같이 변형된다.

$$\|W_s K_i(1 + P_o K_i)^{-1}\|_\infty \leq 1 \quad (11)$$

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

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

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

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

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

$$\left\| \begin{matrix} W_s(1+P_vK_v)^{-1} \\ W_vK_v(1+P_vK_v)^{-1} \end{matrix} \right\|_\infty \leq \gamma \quad (14)$$

이와 관련된 제어기 설계 세부 내용은 참고 문헌 [22]에 상세히 나와 있다.

6. 실제적 환경에서 제어기들의 응답

실제적인 환경, 즉 소스의 전송 속도가 제한되어 있고, 그림 4와 같이 시간에 따라 변화하는 경우에 대한 최근에 설계된 제어기의 응답들은 그림 5와 같다. 여기서 시스템의 출력은 큐의 크기이다. 그리고 시간 축의 단위는 최대 시간 지연 h (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. 그림3은 각 소스가 데이터를 보낼려고 요청하는 것을 나타낸 것이다. 그림에서 소스1은 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 내 보내려고 요청을 한다. 그림4는 이러한 소스의 변화가 있을 때 큐의 응답을 나타낸다. 그림에서 실선 부분은 참고문헌 [22]에서 제안된 제어기의 응답이며, 점선 부분은 참고문헌 [3]에서 개발된 제어기의 응답이다. 그림5에서 볼 수 있듯이 같은 입

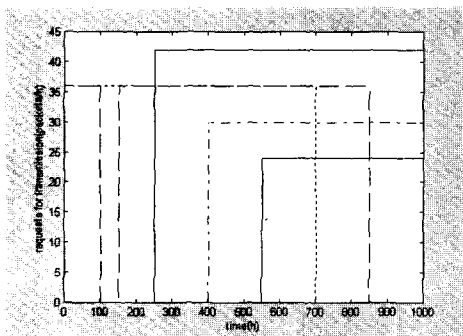


그림 4. 각 소스의 전송 요청.

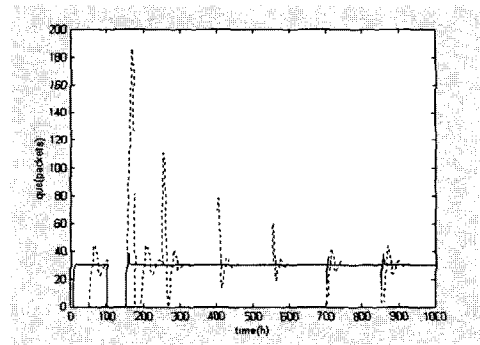


그림 5. 제어기에 따른 큐의 응답 비교.

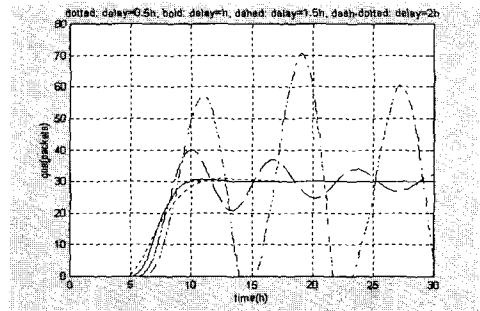


그림 6. 시간 지연의 불확실성에 대한 계단 응답.

력에 대해서도 정상 상태 오차는 없지만 과도 상태에서 오버슈트 및 정착 시간 등은 매우 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그림6은 참고 문헌 [22]에서 제안된 제어기가 기준 시간 지연 1h를 중심으로 변화함에 따라 응답이 바뀌는 것을 나타내고 있으며, 시간 지연이 기준 시간의 2배 정도 되었을 때 큐의 응답은 진동하는 불안정한 양상을 보임을 알 수 있다.

7. 기존의 연구 결과 및 연구 동향

ATM 망의 제어기술은 매우 첨단 기술이면서도 직관적인 접근에 기초하여 시행착오를 거치면서 개발되어 오다가 최근 들어 제어이론을 응용하여 통신망의 성능을 개선하려는 시도들이 이루어지고 있다 [1-6,18-21]. ATM 망의 정보를 제어하는 전형적인 방법은 각 소스의 정보 전송 속도를 제어하여 병목 현상을 일으키는 선로의 오버플로우를 막는 것이다. 이 문제는 ATM 망이나 관련된 문헌들에서 광범위하게 다루어져 왔다[6,11,13,14]. ABR 서비스를 이용한 ATM 망의 혼잡 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. 최근 국내에서도 ATM 망의 혼잡 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[22-24].

8. 결론

ATM 망은 속도에 비하여 상대적으로 꽤 긴 시간 지연과 시간 지연의 불확실성을 포함하고 있으며, 또 특성상 음의 입력을 가할 수 없으며, 양의 방향 입력도 소스의 최대 전송 속도에 의하여 제한되고, VBR의 변화에 따른 교란이 존재하는 시스템이다. 이러한 ATM 망에서 혼잡을 제어하기 위한 제어기는 특히 시간 지연 및 시간 지연의 불확실성에 따른 플랜트의 불확실성에 대해서 잘 대처할 수 있어야 한다. 이 긴 시간 지연은 직관적으로 설계되어 이용되어 오던 망 제어기들이 잘 동작하지 않게 하는 요인이 되었으며, 결과적으로 제어 기술의 도입을 필요로 하게 하였다. ABR의 ER(Explicit Rate)을 직접 제어하여 혼잡을 제어하는 문제는 최근에 와서 매우 많은 주목을 받고 있으며, 다각적인 방법으로 제어가 시도되고 있다. 효과적인 ATM 망의 혼잡 제어기 개발은 앞으로의 통신 망 산업의 경쟁력에 큰 파급 효과를 가져올 것이다.

참고문헌

- [1] ATM Forum Traffic Management AF-TM-0056.000, "The ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0," April 1996.
- [2] Altman, E., 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] Benmohamed, L., 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] Bolot, J-C., and A U. Shankar, "Dynamical behavior of rate-based flow control mechanisms," *Computer Communication Review*, vol. 20, No.2, pp. 35-49, 1990.
- [5] Blanchini, F., R. Lo Cigno, R. Tempo, "Control of ATM networks: Fragility and robustness issues," *Proc. of the American Control Conference*, Philadelphia, PA, pp. 2847-2851, June 1998.
- [6] Bonomi, F., 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] Dym, H., 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] Foias, C., H. Ozbay, A. Tannenbaum, *Robust Control of Infinite Dimensional Systems: Frequency Domain Methods*, LNCIS, No. 209, Springer-Verlag, 1996.
- [9] Fu, M., A. Olbrot, M. Polis, "Edge theorem and graphical tests for robust stability of neutral time delay systems," *Automatica*, vol. 27, pp. 739-741, 1991.
- [10] Jaffe, J., "Bottleneck flow control," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 29, pp. 954-962, 1981.
- [11] Jain, R., "Congestion control and traffic management in ATM networks: recent advances and a survey," *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 28, pp. 1723-1738, 1996.
- [12] Kalyanaraman, S., *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] Parekh, A. K., 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] Ramakrishnan, K. K., and P. Newman, "Integration of rate and credit schemes for ATM flow control," *IEEE Network*, pp. 49-56, March/April 1995.
- [15] Toker, O., and H. Ozbay, " H_∞ Optimal and suboptimal controllers for infinite dimensional SISO plants," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 40, pp. 751-755, 1995.
- [16] Ozbay, H. Kalyanaraman, S., and Iftar, A., "On rate based congestion control in high-speed networks: Design of an H^∞ based flow controller for single bottleneck," *Proceedings of the American Control Conference*, Philadelphia PA, pp. 2376-2380, June 1998
- [17] Zhou, K., Doyle, J.C., Glover, K., *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall, 1996
- [18] Altman, E. and Basar, T., "Multi-user Rate Based Flow control: Distributed Game-Theoretic Algorithms," *Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control*, San Diego, California, USA. pp. 2916-2921, December 1997.
- [19] Altman, E., and Basar, T., Srikant, R., "Multi-user Rate Based Flow control: A Team Theoretic Approach," *Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control*, San Diego, California, USA. pp. 2387 - 2392, December 1997.
- [20] Zhao, Y., Li, S. Q., and Sigarto, S., "A Linear

- Dynamic Model for Design of Stable Explicit-Rate ABR Control Schemes," *Proceedings of INFOCOM '97*, Kobe Japan, pp. 283-292, 1997.
- [21] Rohrs C. E. and Berry R.A., "A Linear Control Approach to explicit Rate Feedback in ATM Networks", *Proceedings of INFOCOM '97*, Kobe Japan, pp. 277-182, 1997.
- [22] 강태삼, " H_∞ 이론을 이용한 ATM 망의 흐름 제어," 제어자동화시스템공학 논문지, 6권 8호, pp. 617-622, 2000.8.
- [23] 김형중, 여인권, Jitendra K.Manandha, "VOD에서 멀티캐스팅을 위한 최적 채널 모델링," 제어자동화시스템공학 논문지, 6권 8호, pp. 623-628, 2000.8.
- [24] 노지명, 임종태, "다수의 혼잡노드와 멀티캐스트 연결을 가지는 비동기 전송망의 ABR 서비스에 대한 혼잡 제어," 제어자동화시스템공학 논문지, 6권 8호, pp. 629-637, 2000.8.
- [25] 조혁래, 정송, 장주옥, "세션의 동적 대역폭 요구를 지원하는 최대-최소 흐름 제어," 제어자동화시스템공학 논문지, 6권 8호, pp. 638-651, 2000.8.
- [26] 권옥현, 김형석, "유무선 통신에서의 제어 이론 적용에 대한 연구 개관," 제어자동화시스템공학 논문지, 6권 8호, pp. 652-658, 2000.8.

강 태 삼

1963년 4월 6일생, 1986년 서울대 제어계측공학과 졸업, 동대학원 석사(1988), 동대학원 박사(1992). 1994년-현재 호서대학교 전기공학부 부교수. 관심분야는 강인제어, 서보 제어, 온도제어, 관성 센서, ATM 망 제어.