

### H<sub>∞</sub> 필터를 이용한 초고속 비동기전송망의 체증 제어

이수구, 김영중, 김범수, 임모택  
고려대학교 전기공학과

#### Congestion Control in ATM Networks using an H<sub>∞</sub> Filter

Su-Gu Lee, Young-Jung Kim, Beom-Soo Kim, Myo-Taeg Lim  
Dept. of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - 본 논문에서는 초고속 비동기전송(ATM)망에서의 체증 문제를 풀기 위해 H<sub>∞</sub> 필터 사용을 제안한다. 많은 제어기들에 대한 초기 연구들은 가용 비트율이 망 체증이 제거될 수 있도록 버퍼에서의 원하는 셀들의 큐의 길이를 원하는 값 범위내에서 성공적으로 조절될 수 있음을 보이고 있다. 본 논문에서는 망의 노이즈를 가우시안 랜덤 열로 근사화하는 ATM망에 대하여 현대 제어 기법인 H<sub>∞</sub> 필터를 적용한다. 따라서 제안한 H<sub>∞</sub> 필터는 망의 외란으로 발생하는 망의 출력의 영향을 미리 주어지는 H<sub>∞</sub> 노음값 이내로 유지시켜준다. 따라서 미리 주어지는 H<sub>∞</sub> 노음값이 작다면 제안한 H<sub>∞</sub> 필터는 외란에 강인한 성능을 보여줄 수 있다. H<sub>∞</sub> 필터 이득은 대수적인 리카티 방정식의 해로 구해진다.

#### 1. 서 론

현대에 크게 부각되고 있는 비동기전송모드(ATM)에서는 출발지(source)와 도착지(destination) 사이에 가상 회선이 설정되면 ATM 포럼에서 정의한 셀 지연 변동(Cell Delay Variation, CDV), 최대 셀 전송지연(Maximum Cell Transfer Delay), 셀 손실율(Cell Loss Ratio, CLR)을 포함하는 Quality of Service(QoS)를 만족시켜야 한다. ATM은 여러 종류의 트래픽 공존에 따른 체증 발생 하에서도 각각의 서비스가 대역폭의 이용효율을 높이면서 데이터의 무결성 및 QoS를 만족해야 한다. 다른 서비스들과 달리 ABR은 ATM 망의 대역폭이나 버퍼와 같은 가용 자원을 파악하여 동적으로 할당하고 자원 관리(Resource Management, RM) 셀을 이용한 피드백 메카니즘을 제공하고 있다. 이에 따라, 예측 할 수 없는 트래픽 흐름의 통계적 변동과 망내의 고장 등에 따른 체증하에서도 체증 영향을 최소화하고 체증 확산을 방지하면서 최고의 망 성능을 유지하고 최소의 셀 손실과 최대의 자원 활용성을 보장하기 위해서 ABR(Available Bit Rate) 체증 제어(Congestion Control)에 대한 연구가 많이 진행되어 왔으며[1][2], 아직도 이 문제는 계속 연구되어야 할 과제로 남아 있다. 본 연구진은 컴퓨터/통신 망의 중요 문제 중의 하나인 망 체증 제어, 특히 많은 연구자들이 고전과 현대 제어이론을 이용하여 연구해온 ABR 체증 제어 문제 등을[3]-[8] 현대 제어 기법인 H<sub>∞</sub> 필터 기법을 이용하여 해결하고자 한다.

#### 2. 강인 H<sub>∞</sub> 필터 설계

##### 2.1 강인 H<sub>∞</sub> 필터 설계

ATM 네트워크의 ABR 체증 피드백 제어 문제는 [3]에서 처음 시도되었다. 본 논문에서는 실제 패킷 큐 길이를 q(k)로 가용 비트율(ABR)을 r(k)로 표시한다. [3]에서 사용된 동특성은 다음과 같은 차분 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 q(k+1) &= Sat_Q(q(k) + r(k+1-d) - \mu) \\
 r(k+1) &= Sat_R(r(k) - \sum_{j=0}^1 \alpha_j(q(k-j) - q^0) \\
 &\quad - \sum_{i=0}^4 \beta_i r(k-i))
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $\mu$ 는 버퍼 서비스율로 일반적으로 상수로 가정되고,  $q^0$ 는 요구되는 큐의 길이, d는 소스에서부터 스위치로의 이산시 단위로 표현되는 큐 일주 시간, 그리고  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 요구되는 조건 (안정도, 요구되는 큐의 크기)을 제공하기 위해 선정되는 계수이다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는  $\sum_{j=0}^1 \alpha_j > 0$ 과  $\sum_{i=0}^4 \beta_i = 0$ 을 만족한다. 동특성 방정식에서 포화함수  $Sat_Q$ 는 큐 크기가  $0 < q(k) < Q$ 로 제한됨을 나타내고,  $Sat_R$ 는 비율이  $0 < r(k) < R$ 로 제한됨을 나타낸다. 따라서 상기 포화 요소의 존재로 인해서 (1)은 비선형 동적 시스템이다. 위의 동특성 방정식 (1)은 포화 함수를 배제함으로써 선형 시스템이라는 단순화 가정하에서 연구되어왔다[4][5]. 즉 (1)식에서 포화 함수를 제거하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 q(k+1) &= q(k) + r(k+1-d) - \mu \\
 r(k+1) &= r(k) - \sum_{j=0}^1 \alpha_j(q(k-j) - q^0) - \sum_{i=0}^4 \beta_i r(k-i)
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기에서 q(k)는 병목 노드에서의 큐의 크기를 말하며, r(k)는 k시간동안 소스에 대한 소스 비트율을 말하고,  $\mu$ 는 k시간에 ABR 트래픽에 대한 가용 서비스율을 말한다. 식 (2)는 식 (1)의 선형화된 표현이다. 또한 식 (1)은 중요 잡음을 고려하지 않은 이상적인 ATM 스위치 동특성을 나타내고 있다.

식 (2)에는 표준 통신 잡음뿐만 아니라 모델링 오차, 스위치 요소들의 불확실성 그리고 외부 외란에 따른 잡음이 포함되어야 한다. 선형 시스템에서 잡음 영향을 가우시안 랜덤 열로 가정함으로써 쉽게 해결할 수 있다. 따라서 가우시안 랜덤 열을 고려한 ATM 스위치에 대한 단순 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 q(k+1) &= q(k) + r(k+1-d) - \mu + w(k) \\
 r(k+1) &= r(k) - \sum_{j=0}^1 \alpha_j(q(k-j) - q^0) \\
 &\quad - \sum_{i=0}^4 \beta_i r(k-i) + w(k) \\
 y_1(k) &= q(k) + v_1(k) \\
 y_2(k) &= r(k) + v_2(k)
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기에서  $w(k), v_1(k), v_2(k)$ 는 밀도  $W(k), V_1(k), V_2(k)$ 와 영의 평균값을 갖는 가우시안 랜덤 열이며  $y_1(k)$ 와  $y_2(k)$ 는 상태 추정값이다.  $H_\infty$  필터를 사용하여  $q(k)$ 와  $r(k)$ 의 변위와 스위치 파라미터 변수들의 상위 경계값을 구할 수 있으므로 변위들을 허용 오차내로 유지할 수 있다. 따라서 (1)로 표현된 동특성에 확률 프로세서에 도입한 시스템에서 선형 2차 최적 제어기의 안정화 이득을 구할 수 있다. 동특성에서 고려된 확률 프로세서에 가정된 가우시안 랜덤 열을 물리적 특성이나 수학적 모델에 관계없이 모든 바운드된 외란에 적용할 수 있는  $H_\infty$  필터를 사용하여 제거할 수 있다[9].

다음과 같이 상태 공간 모델로 표현되며, 외란을 포함하는 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} X(k+1) &= AX(k) + B_1W(k) + B_2U(k), & X(0) &= 0 \\ Z(k) &= C_1X(k) + D_{12}U(k) & (4) \\ Y(k) &= C_2X(k) + D_{21}W(k) \end{aligned}$$

여기서,  $x(k) \in R^n$ 는 상태 변수이고,  $u(k) \in R^m$ 는 제어 입력이며,  $w(k) \in R^p$ 는 외란 입력이고,  $z(k) \in R^q$ 는 제어된 출력이다.  $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{12}, D_{21}$ 는 알려진 실수의 상수 행렬로 표현된다.

상수  $\gamma > 0$ 는 주어졌다고 가정하자. 그러면 어떤 외란에 대해 다음 조건들이 만족하는 추정치, 즉  $\hat{x}(k) = Ly(k)$ 가 존재한다면  $H_\infty$  노음 바운드에 드는 상태 벡터  $x$ 는 추정가능하다고 한다.

- (a) 필터  $L$ 은 균일하게 안정하다.
- (b) 시스템  $R$ 은 다음과 같은  $H_\infty$  노음 바운드를 만족시킨다.

$$\|R\|_\infty < \gamma \quad (5)$$

여기서,  $R$ 은 외란  $w$ 에 대한 추정 에러  $(\hat{x} - x)$ 로부터 구해지는 전달함수를 말한다[10].

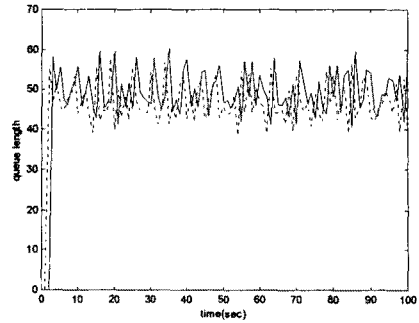
본 논문에서 이산 시스템의 상태 공간 모델에서  $H_\infty$  노음 임계값  $\gamma > 0$ 에 연관된 강인  $H_\infty$  제어 문제를 해결하는 것은 다음의 상태 변수  $X$ 를 포함하는 Riccati 방정식을 푸는 것으로 대변된다.  $H_\infty$  노음 임계값  $\gamma$ 에 연관된 Riccati 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X &= A^T X A - A^T X B (R + B^T X B)^{-1} B^T X A + Q \quad (6) \\ R &= \gamma^{-2} C_1^T C_1, \quad Q = \bar{B} \bar{B}^T \end{aligned}$$

여기서 구한  $\hat{x}$ 와  $x$ 의 차이에 대한  $H_\infty$  노음 임계값  $\gamma$ 에 항상 바운드됨을 다음 실험을 통해 보일 것이다.

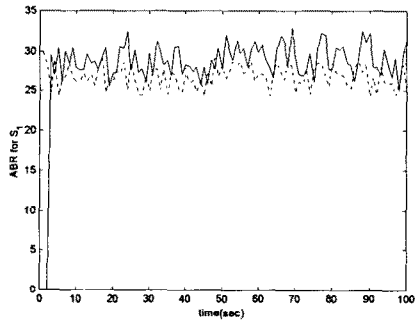
### 3 모의 실험

하나의 병목 노드를 통해 그들의 목적지로 연결되는 세 개의 ABR 소스의 경우에 대해 시뮬레이션을 행하였다. 각각의 소스에 해당하는 비트율을 30Mbps, 20Mbps, 10Mbps로 하였고, 서비스율인  $\mu$ 는 6Mbps, 원하는 큐의 길이는 60, 그리고 마지막 시간은 정상 상태에 도달하는데 충분한 값인 100으로 설정하였다. 게다가 큐의 초기 값은 0으로 설정하였다.  $H_\infty$  노음 임계값  $\gamma = 6$ 으로 설정하였다. 다음의 그림 1-그림 4는 각각 큐의 사이즈와 세 개의 가용 비트율에 대한 시뮬레이션 결과를 보이고 있다.



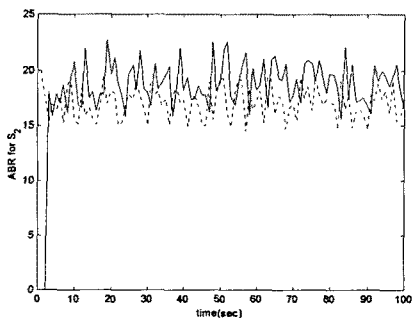
dot : original service rate  
line : estimated service rate

그림 1 The controlled queue size variation



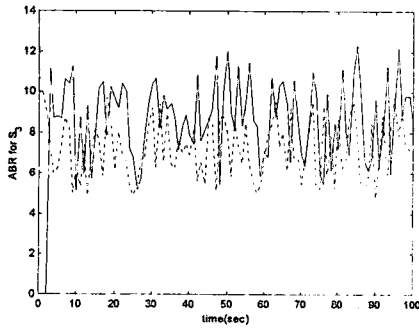
dot : original service rate  
line : estimated service rate

그림 2 Available service rate and estimated source rate for 1st source



dot : original service rate  
line : estimated service rate

그림 3 Available service rate and estimated source rate for 2nd source



dot : original service rate  
line : estimated service rate

그림 4 Available service rate and estimated source rate for 3rd source

큐의 길이를 원하는 값의 범위 내에서 사용하면서 세 개의 소스들의 가용 비트율(ABR)을 공정하게 나누어 이용하고 있다. 그리고 제안된  $H_\infty$  필터는 망의 외란으로 발생하는 망의 출력의 영향을 미리 주어지는  $H_\infty$  노음값 이내로 유지시켜줌을 실험을 통하여 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 초고속 비동기전송(ATM)망에서의 체증 문제를 풀기 위해  $H_\infty$  필터 사용을 제안한다. 본 논문에서는 망의 노이즈를 가우시안 랜덤 열로 근사화하는 ATM망에 대하여 현대 제어 기법인  $H_\infty$  필터를 적용한다. 제안된  $H_\infty$  필터는 망의 외란으로 발생하는 망의 출력의 영향을 미리 주어지는  $H_\infty$  노음값 이내로 유지시켜줌을 실험을 통하여 보여주고 있다. 따라서 미리 주어지는  $H_\infty$  노음값이 작아 제안한  $H_\infty$  필터는 외란에 강인한 성능을 보여주고 있다.

본 연구는 한국학술진흥재단 2002년도 선도연구자지원(KRF-2002-0410D00209)의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] R. Jain, "Congestion control and traffic management in ATM networks : Recent advances and a survey", Computer Networks and ISDN Systems, vol. 28, 1723-1738, 1996.
- [2] S. Floyd and K. Fall, "Promoting the use of end-to-end congestion control in the internet", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 7, 458-472, 1999.
- [3] L. Benmohamed and S. Mirkov, "Feedback control of congestion in packet switching networks : The case of a single congested node", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 1, 693-707, 1993.
- [4] L. Benmohamed and Y. Wang, "A control-theoretic ABR explicit rate algorithm for ATM switches with per-VC queueing", Proceedings of IEEE INFOCOM, 183-190, San Francisco, CA, 1998.
- [5] A. Kolarov and G. Ramamurthy, "A control-theoretic approach to the design of an explicit rate controller for ABR

service", IEEE/ACM Transactions on Networkings, vol. 7, 741-753, 1999.

[6] X. Shen and J. Mark, "A feedback flow control model for ABR services : An  $H_\infty$  optimization approach", Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, vol. 6, 489-502, 1999.

[7] E. Altman, T. Basar, and R. Srikant, "Congestion control as a stochastic control problem with action delays", Automatica, vol. 35, 1937-1950, 1999.

[8] O. Imer, S. Compans, T. Basar, and R. Srikant, "Available bit rate congestion control in ATM networks", IEEE Control Systems Magazine, vol. 21, 38-56, 2001.

[9] K. Zhou, J. Dolye, and K. Glover, Robust and Optimal Control, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.

[10] J. C. Dolye, K. Glover, P. P. Khargonekar and B. A. Francis, "State space solution to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems." IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 34, 831-846, 1989.