

## MPC를 이용한 ATM망의 혼잡 제어

한성희, 윤태웅\*

고려대학교 메카트로닉스학과, 고려대학교 전기공학과\*

전화 : 02-3290-3695 / 핸드폰 : 011-9096-7382

### Congestion Control in ATM Using MPC

Sung-Hee Han, Tae-Woong Yoon\*

Dept. of Mechatronics, Korea University, Dept of Electric Engineering, Korea University\*

E-mail : shecho@cello.korea.ac.kr

#### Abstract

In this paper, the design of explicit rate-based congestion control in high speed communication networks is considered. The goal of congestion control is to achieve high link utilization, low packet loss, low delay, and fairness among the best-effort sources. To deal with the propagation delays associated with the best effort sources, An MPC technique is employed to solve the congestion problem[1] here. However, the problem with this method is that the closed loop performance relies highly on the knowledge of average service rate.

This paper focuses on coping with the problem described above by using a CARIMA model for service rate(available rate).

#### I. 서론

ATM에서는 서로 다른 종류의 사용자-네트워크 인터페이스를 위해 여러 종류의 서비스가 제공된다. 현재 ATM Forum에 의하여 정의된 표준으로는 다섯 가지의 서비스가 있으며 서비스의 성질에 따라 다른 통신

방법으로 하나의 ATM망을 이용하게 된다. 실시간으로 전송되어야 하거나 패킷 손실이 일어나면 안 되는 높은 우선 순위를 가지는 서비스인 CBR(constant bit rate)이나 VBR(variable bit rate) 같은 경우는 채널을 우선적으로 할당받게 되고, 남은 부분을 ABR(available bit rate)이 이용하게 된다. 따라서 ABR 교통량을 제어함으로써 전체 네트워크의 혼잡을 해결할 수 있다. 현재 ATM포럼에서는 이러한 혼잡 제어를 위하여 전송비율기반 혼잡 제어(rate-based congestion control)를 표준으로 채택했으며 이는 현재 노드의 사용 가능한 채널 용량을 기준으로 적절한 전송량을 각각의 전송측에 지정해 주는 방식이다.[2] ATM망에서 ABR 서비스에 어떠한 제어 이론을 적용하느냐의 문제는 시스템 모델의 수학적 특성과 그 제어 특성에 중점을 둘 것이냐에 따라 결정될 수 있다. 시간 지연을 해결하고 미래의 채널 용량 모델을 구성하는 것이 혼잡 제어 문제의 해결 초점이다. 본 논문에서는 통신망에서의 교통량을AR(autoregressive) 프로세스로 표현하고 모델 기반 예측 제어(MPC:model predictive control) 기법을 사용하는 방법에 대하여 알아보고[1] 그 문제점을 개선할 수 있는 방법을 제시한다.

#### II. MPC를 사용한 혼잡 제어

##### 2.1 ATM망의 혼잡 노드 모델

대부분의 상업적 ATM 스위치들은 셀 손실율을 낮추기 위하여 FIFO기반의 출력 큐잉을 사용하며 스위치의 출력부에 각각의 전송층에 전송량을 할당하는 제어기가 존재한다. (아래의 그림에서 HS는 높은 우선 순위를 가진 전송층, BS는 낮은 우선 순위의 전송층이다.)

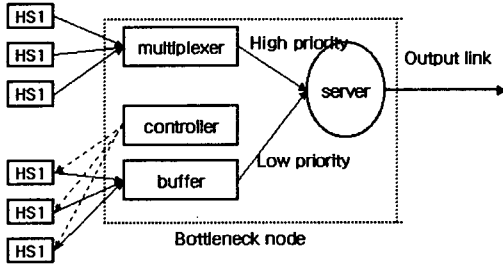


그림 1 ATM에서의 큐 모델[4]

큐모델:  $q_{n+1} = q_n + \sum_{m=1}^N v_{m,n} - d_n - \mu_n$  (2.1)

채널용량모델:  $\mu_n = \mu + \xi_n$  (2.2)

$\xi_n = \sum_{i=1}^L \alpha_i \xi_{n-1} + \phi_{n-1}$  ( $\alpha_i$ : 상수) (2.3)

$q_n$	큐 길이
$v_{m,n}$	제어기가 m번째 전송층에 할당한 전송량 (시간 지연 $d_m$ 을 가지고 ATM 스위치에 도착한다.)
$\mu_n$	사용 가능한 채널용량 (우선 순위의 채널 점유를 제외한 값)
$\mu$	일반적으로 서비스 가능한 용량
$\phi$	평균이 0이고 분산이 $\sigma^2$ 인 가우시안 시퀀스

### 2.2 MPC 적용

MPC는 일정한 현재의 시스템 상태와 출력의 측정에 의하여 예측된 상태값을 바탕으로, 일정 시간 동안의 open loop 최적 제어 문제를 푼 결과 도출된 제어 입력값들 중 첫 번째(현재) 제어 입력값만을 시스템에 인가한다.

상태 예측기를 통해 이러한 과정을 반복함으로써 결국 close loop 제어가 가능하다.

$x_n^a = q_n - Q, \quad u_{m,n} = v_{m,n} - a_m \mu$  (2.4)

( $a_m$ : 각 전송층들 간의 분배율,  $\sum a_m = 1$ )

라는 치환을 통하면 (2.1)은

$x_{n+1}^a = x_n^a + \sum_{m=1}^M u_{m,n} - d_n - \xi_n$  (2.5)

와 같이 표현되어 (2.6)과 같은 꼴이 되어 MPC를 적용할 수 있다.

시스템이 아래와 같이 표현될 때,

$x_{n+1} = Ax_n + Bu_n + G\phi_n$  (2.6)

$x_n = (x_n^1, \dots, x_n^k)^T$   
 $u_n = (u_n^1, \dots, u_n^M)^T$  (2.7)

상태 예측값은 칼만 필터(Kalman filter)를 사용하여 다음과 같이 표현된다.[3]

$\hat{x}(n+i|n) = A\hat{x}(n+i-1|n) + Bu(n+i-1)$  (2.8)

$\hat{x}(n|n) = \hat{x}(n|n-1) + M[y(n) - C^T\hat{x}(n|n-1)]$  (2.9)

( $M$ 은  $x$ 의 분산의 예측치들로 이루어지고 이는 리카티 방정식으로부터 구할 수 있다.)

예측치들의 열을 아래와 같이 놓으면,

$X = \begin{bmatrix} \hat{x}(n+1|n) \\ \hat{x}(n+2|n) \\ \vdots \\ \hat{x}(n+N-1|n) \\ \hat{x}(n+N) \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} u(n) \\ u(n+2) \\ \vdots \\ u(n+N-2) \\ u(n+N-1) \end{bmatrix}$  (2.11)

$X = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 & 0 \\ AB & B & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ A^{n-2}B & A^{n-3}B & \dots & B & 0 \\ A^{n-1}B & A^{n-2}B & \dots & AB & B \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} A\hat{x}(n|n) \\ A^2\hat{x}(n|n) \\ \vdots \\ A^{N-1}\hat{x}(n|n) \\ A^N\hat{x}(n|n) \end{bmatrix}$   
 $= PU + Q$  (2.12)

비용함수에 있어 큐의 길이가 항상 일정한 정도  $Q$ 를 유지하게 함으로써 최소의 패킷 손실(버퍼의 안정도), 최대한의 주어진 채널 용량 사용(최적화)을 얻을 수 있다. 따라서 (2.4)로 표현된 최소화할 비용함수

$J = \frac{1}{N} E \sum_{i=1}^N [(x_{n+i})^2 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{c_m^2} (u_{m,n-d_{m+i}} - a_m \xi_{n+i})^2]$  (2.13)

이며 예측기를 통한 미래의 값들(식 (2.10)-(2.12))로 표현할 수 있다.

$\hat{X}_n^a = Cq\hat{X}_n^a, \quad a_m \xi_{n-m} = CzX_n, \quad R = \begin{bmatrix} c_m & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & c_m \end{bmatrix}$  (2.14)

라고 놓으면 (2.13)은

$J = (Cq\hat{X})^T Cq\hat{X} + (U - Cz\hat{X})^T R (U - Cz\hat{X})$  (2.15)

가 되고 (2.12)를 이용하면 입력값으로만 이루어진 2차 함수가 되어 2차 프로그래밍으로 계산할 수 있다.

### 2.3 문제점

채널 용량이  $\mu$  근처에서 진동한다는 가정을 통하여 시스템  $X_{n+1} = AX_n + BU_n + G\phi_n$ 과 같은 시스템으로 만들어져 MPC를 통하여 계산된 제어 입력값은

$r_{m,n} = u_{m,n-d_m} + a_m \mu$ 라는 과정을 통하여 병목 노드가 각각의 전송층에 전송량을 할당한다. 알고 있다고 가정 한 채널의 평균값이 정확하지 않을 경우 좋은 결과를 얻기 힘들다. 또한 지연이 가장 작은 전송층의 전송량은 진폭이 심하다.

### III. 제어기 성능 향상을 위한 채널 용량 모델링

#### 3.1 AR 모델 변경

(2.2)-(2.3)과 같은 채널 용량 모델을

$$\xi_n = \frac{\sum_{i=1}^p \alpha_i \xi_{n-1} + \phi_{n-1}}{\Delta} \quad (3.1)$$

이라고 가정한다. (여기서  $\Delta$ 는  $(1-q^{-1})$ 이라는 shifting operator를 의미한다.) 즉, 적분기를 추가하여 변동 채널량이 이전의 모든 값들의 축적이라고 생각한다. 버퍼의 큐 방정식은

$$q_{n+1} = 2q_n - q_{n-2} + \sum_{m=1}^M \Delta v_{m,n-d_m} - \xi_n \quad (3.2)$$

으로 표현되어

$$X_{n+1} = A_{(\theta)} X_n + B_{(\theta)} \Delta V_n + G \phi_n \quad (3.3)$$

과 같은 꼴이 되어 2.2절과 같은 방법으로 상태값을 예측하고 그 예측값들과 미래의 입력값들의 열을 각각  $X$ ,  $\Delta V$ 로 표현한다.

#### 3.2 비용 함수 변경

변경한 AR 모델에 따라 비용함수

$$J_1 = \frac{1}{N} E \sum_{i=1}^N [(q_{n+i} - Q)^2 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{c_m^2} (\Delta v_{m,n+i})^2] \quad (3.4)$$

이 된다. 이와 같이 비용함수를 놓았을 때 채널 용량의 평균값과 관계없이 큐의 길이를 일정한 값으로 유지시킬 수 있다. 그러나 병목현상이 일어나기 전의 각각의 전송층들 사이에 채널 용량의 분할이 균등(fairness)하지 않은 경우 그 불균등함이 계속 유지되는 단점이 있다. 따라서 전송량에 대한 각 전송층들 간의 차이를 비용 함수에 추가한다. 그러면 새로운 비용함수를 아래와 같이 가정할 수 있다.

$$J_2 = \frac{1}{N} E \sum_{i=1}^N [(x_i)^2 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{c_m^2} \Delta v_{m,n+i}^2 + \sum_{l,m=1, l \neq m}^M (v_{l,n} - v_{m,n})^2] \quad (3.5)$$

새로운 시스템(3.3)이  $\Delta V$ 에 관한 것이므로

$$v(k) = \Delta v(k) + v(k-1) \quad (3.6)$$

$$v(0) = 0 \text{ 이면 } v(k) = \sum_{i=1}^k \Delta v(i) \quad (3.7)$$

예측기의 입력값 (2.12)에 맞게 정리하면

$$V = \begin{bmatrix} v(n) \\ v(n+2) \\ \vdots \\ v(n+N-2) \\ v(n+N-1) \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \Delta v(n) \\ \Delta v(n+2) \\ \vdots \\ \Delta v(n+N-2) \\ \Delta v(n+N-1) \end{bmatrix} = E \Delta V \quad (3.8)$$

이며 한 전송층만의 입력값은

$$V_j = \begin{bmatrix} v_j(n) \\ v_j(n+2) \\ \vdots \\ v_j(n+N-2) \\ v_j(n+N-1) \end{bmatrix} = F_j U = F_j E \Delta V \quad (3.9)$$

(2.14)와 같이 벡터 형태로 비용 함수를 표현하면

$$(X^T)^T X^0 + (\Delta)^T (I + \sum_{i,j=1, i \neq j}^M ((F_i - F_j) E)^T ((F_i - F_j) E)) \Delta V \quad (3.10)$$

이 되어 (2.12)를 이용하면  $J_2$ 는

$$\Delta V^T [P^T C_q^T C_q P + I + \sum_{i,j=1, i \neq j}^M ((F_i - F_j) E)^T ((F_i - F_j) E)] \Delta V + 2Q^T C_q^T C_q P \Delta V \quad (3.11)$$

로 이차함수가 되어  $\Delta V$ 에 대하여 최소값을 구할 수 있다.

### IV. 모의 실험

그림 1과 같은 병목 현상이 일어나는 노드에서 세 개의 전송층이 연결되어 있다. 각각의 시간 지연은 2, 4, 6이다. 전체 채널 용량  $\mu_n$ 을 나눠 갖는 비율은 동일하게 하기 위하여  $a_1 = a_2 = a_3$ 는 1/3이다.

AR프로세스는 2차에  $a_1 = a_2 = 0.4$ 이다. 예측 시간  $N=15$ 이며 실험시간은 500초까지이다. 이 링크의 용량은 3000이며 이 링크를 사용하는 고순 위의 데이터를 가정하기 위하여 임의의 mpeg파일(평균: 132, 분산:  $(226)^2$ )을 사용했다.

큐 길이는 5000으로 일정하게 유지하는 것이 목적이

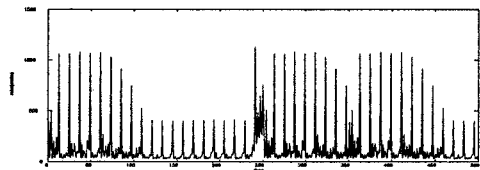


그림 2 높은 우선 순위를 가진 데이터

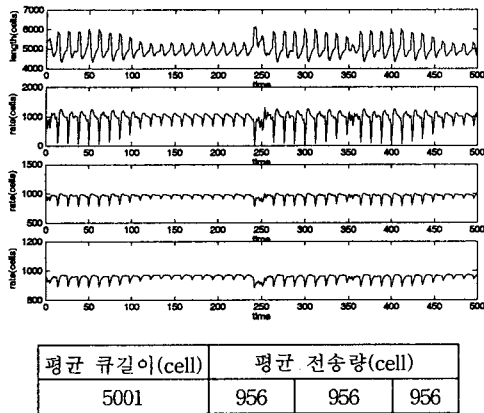


그림 3 정확한 평균값으로 모델 1을 사용

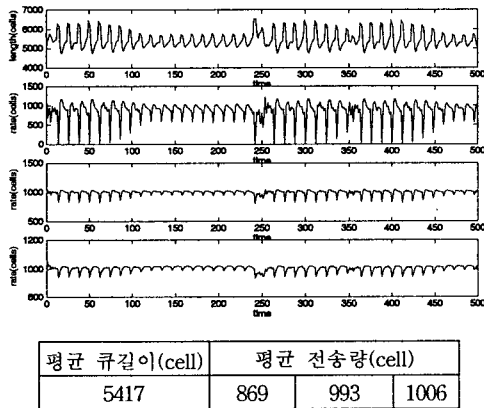


그림 4 10%의 오차가 있는 평균값으로 모델 1을 사용

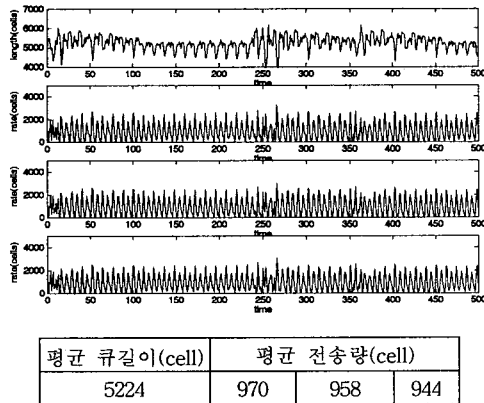


그림 5 모델 2를 사용

그림 3은 모델 1의 경우로 전송측들 간의 공평한 분배가 보장이 되고 큐의 길이가 원하는 값 근처에서 유지되고 있다.

그림 4의 경우는 채널 용량을 10%(287cell) 정도 초과해서 예측한 경우로 큐의 길이가 더 높은 값에서 유지되며 각각의 전송측들 간의 불균형이 관측된다. 보통의 채널 용량이 큰 실제 시스템의 경우 예상량의 오차는 더욱 클 것이다.

그림 5의 경우는 모델 2의 경우로 큐의 길이를 일정하고 유지하고 각각의 전송측들 간의 공평함을 보장해 주므로 평균값의 예상과 관계없이 같은 성능을 보인다. 그러나 전송량의 진폭이 다소 크다.

### V. 결론

MPC를 ATM망의 혼잡 제어에 적용했을 때의 결과는 전송측들 간의 공평한 분배, 채널용량의 예측 등에서 좋은 성능을 보인다. 게다가 변하는 딜레이나 최대-최소적 공평한 분배(max-min fairness)에서도 좋은 성능을 보인다. 다만 채널 용량의 정확한 평균값을 알 수 없는 경우에는 성능이 떨어질 수 있어 채널 변화 용량 모델에 적분기를 추가한 경우를 생각할 수 있으며 평균값의 정보에 관계없이 일정한 성능을 보여준다. 적분기를 추가한 경우에는 비용 함수 구성시 입력의 흔들림과 각 입력들 간의 차이에 대한 상대적인 비에 해당하는 파라미터를 조정해 줄 수 있다. 제어기의 개선을 위한 노이즈 모델의 선택은 고려할 만한 문제이며 AR프로세스의 파라미터와 차수의 값을 고정하지 않고 예측하는 것도 가능할 것이다.

### 참고문헌

- [1] Jun Yan, Robert R. Bitmead, "Model predictive control and state estimation: a network example," IFAC 15th Triennial world congress. 2002.
- [2] E. Altman, T. Basar & R. Srikant, "Congestion control as a stochastic control problem with action delays," Automatica 35, 1937-1950. 1999.
- [3] Karl J. Astrom, "Computer-controlled systems: theory and design, Prentice Hall, Inc. 1997.
- [4] Orhan C. Imer, Sonia Compans, Tamer Basar, & R. Srikant, "ABR Congestion control in ATM networks."
- [5] Hua O. Wang, Yongru Gu, Huajing Fang, Robust congestion control in high speed communication networks: a model predictive control approach," 2002.