

시변 지연과 공정 대역 할당을 고려한 ABR 트래픽 흐름 제어기 설계와 성능 해석

정희원 박 섭 형*, 송 성 호**, 이 봉 영***

Design and Performance Analysis of an ABR Traffic Flow Controller Considering Time-Varying Delays and Fair Rate Allocation

Seop Hyeong Park*, Seong Ho Song**, Bong Young Lee*** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 시변 지연을 고려한 ABR 트래픽 제어 모델에 대하여 고전적인 설정값 추적(set-point tracking) 제어 알고리즘에 기반을 둔 전송률 제어 알고리즘을 제안하고 점근적 안정성을 이론적으로 분석하였다. 제안한 제어기는 링크와 버퍼 큐 길이의 오차에 비례하는 함수와 공정 대역 할당 기준을 보장하는 함수를 포함하는 구조를 지니고 있다. 제안한 제어기의 시변 지연 시스템 모델에 대한 점근적 안정성을 증명하기 위하여 시간 영역에서 Razumikhin 정리를 이용한 Lyapunov 방법을 도입하였으며, 제안한 제어기가 정상 상태에서 공정 대역 할당을 보장한다는 것도 아울러 증명하였다. 이론적으로 증명한 제어 시스템의 성능을 모의 실험을 통하여 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a flow control algorithm for an ABR flow control model with time-varying delays, which is based on conventional set-point tracking algorithms. We also theoretically analyze the asymptotic stability of the ABR traffic flow control system. The proposed controller consists of two functions: One is proportional to the error of the buffer queue length and the other is to guarantee the fair rate allocation. In order to prove the asymptotic stability of the proposed controller, we use the Lyapunov method and the Razumikhin theorem. We also prove that the proposed controller guarantees the fair rate allocation in a steady state. Furthermore, simulation results show that the proposed controller makes the system stable and guarantees the fair-rate allocation.

I. 서 론

ATM (Asynchronous Transfer Mode) 망은 특성이 다른 여러 가지 서비스를 효율적으로 수용하기

위해서 서비스 등급을 몇 가지로 구분하여 지원한다. ATM 서비스는 서비스 품질 보장 여부에 따라 크게 다음과 같은 두 범주로 구분할 수 있다. 첫째는 호 설정 단계에서 서비스 품질 (QoS: quality of service)이 보장되는 서비스로 CBR (constant bit

* 한림대학교 전자공학부 (shpark@hcc.ee.hallym.ac.kr),

**한림대학교 전자공학부 (ssh@hcc.ee.hallym.ac.kr)

*** 한국통신 통신망연구소 (yiby@kt.co.kr)

논문번호 : 98257-0628, 접수일자 : 1998년 6월 28일

* 본 연구는 한국통신의 '99년도 HAN/B-ISDN NTB 위탁연구 과제에 수행되었습니다.

rate), nrt-VBR (non-real-time variable bit rate), rt-VBR (real-time variable bit rate) 서비스가 여기에 속한다. 둘째는 품질 보장형 서비스에 할당하고 남은 링크의 가용 대역폭을 활용하여 데이터를 전송하는 서비스로 ABR (Available Bit Rate) 서비스가 여기에 속한다.

ABR 서비스는 호 설정 단계에서 트래픽 파라미터 가운데 최저 셀 전송률(MCR: minimum cell rate)과 최고 셀 전송률(PCR: peak cell rate) 만큼 협상해 놓고 수시로 변하는 망의 가용 대역폭 범위 안에서 서비스 전송률을 변화시킨다. 따라서 ABR 서비스는 셀 손실에는 매우 민감하지만 셀 지연에는 영향을 받지 않는 파일, 영상 따위의 데이터 전송에 적합한 서비스라 할 수 있다.

트래픽 관리 관점에서 두 서비스에는 분명한 차이가 있다. 품질 보장형 서비스의 경우엔 소스는 호 설정 단계에서 협상한 트래픽 파라미터를 지켜야 하며 이 경우에만 서비스 품질을 보장받을 수 있다. 즉, 망(network)소스의 데이터 전송률을 조절하지 않고 소스가 전송률을 조절하는 개방 루프(open loop) 제어 기법이 사용된다. ABR 서비스에서는 망이 트래픽 상태를 관찰하면서 폭주가 발생하지 않도록 각 소스의 데이터 양을 지속적으로 조절하는 폐루프(closed loop) 피드백(feedback) 제어 기법이 사용된다.

고속 ATM 망에서 트래픽 폭주를 방지하기 위한 방법의 하나로 피드백을 이용한 전송률 기반 제어 기법에 관한 연구가 심도 있게 진행되어 왔고^[1-8], ATM Forum은 ABR 서비스의 흐름 제어 기법의 표준으로 피드백을 이용한 전송률 기반 제어 기법을 채택하였다^[11].

ATM Forum은 피드백 제어 기법에 의한 ABR 흐름 제어 기법의 타당성을 보이기 위해서 TM (Traffic Management) 규격 4.0에 간단한 제어 기법 몇 가지론 예로 들었다^[11]. [11]에 소개된 기법은 트래픽 폭주 여부를 알려 주는 이진 피드백(binary feedback) 기법과 각 소스가 조절해야 할 데이터 양을 구체적으로 알려 주는 ER(explicit rate) 피드백 기법으로 구분된다. 그러나 이런 제어 기법들의 성능을 평가할 때 앞에서 열거한 성능 평가지수를 정량적으로 제시할 수 있는 방법이 없기 때문에 단순한 실험 모델에 적용한 모의 실험 결과들 토대로 성능을 평가할 수밖에 없다. 이런 관점에서 [11]에 소개된 방법들을 발견적(heuristic) 해결 방법이라고 부를 수 있다.

이와 같은 한계를 극복하기 위한 시도로서 최근에 고전 제어 이론을 바탕으로 ABR 트래픽 제어 알고리즘을 설계하고 성능을 분석하려고 하는 시도가 활발하게 이루어지고 있다. 고전 제어 이론을 이용하여 피드백 제어 시스템을 설계하면 여러 가지 성능 평가 지수를 정량적으로 해석할 수 있다는 장점이 있다.

고전 제어 기법에 근거한 기존의 연구들은 대부분 노드에서 각 소스에 지정한 데이터 전송률 정보가 소스에 도달한 후에 변경된 데이터 전송률이 노드에 도달할 때까지 소요되는 왕복(round-trip) 시간 지연을 상수로 가정하여 여러 가지 전송률 제어 기법을 설계하였다. 또한 제어기의 안정성과 성능을 분석하기 위해서 주파수 영역에서 폐루프 시스템의 극점 위치를 고려한 해석 방법을 이용하였다^[1-7]. 그러나, 주파수 영역 분석 기법은 시간 지연을 상수로 가정해야만 하는 한계가 있다. 따라서 기존의 연구들은 실제 망에서의 상황과는 다르게 망에서 발생하는 시간 지연을 상수로 가정할 수밖에 없었고, 시뮬레이션을 통하여 시변 지연에 따른 성능 변화를 파악하는 정도였다.

또한 공정 대역 할당 문제는 ABR 트래픽 제어 기법의 중요한 평가 기준의 하나이고 이에 대한 정의도 다양하다^[13]. 따라서 제어 기법을 설계할 때 공정 대역 할당을 고려해야 하는데 지금까지 제안된 고전 제어 기법 기반 알고리즘들은 설계 과정에서 공정 대역 할당 문제를 고려하지 않았으며 단지 실험을 통해서 max-min 공정 대역 할당을 만족한다는 것을 확인하였다^[13].

본 논문에서는 좀더 정확한 모델로서 시변 지연을 고려한 ABR 트래픽 제어 모델을 고려하고 고전적인 설정값 추적(set-point tracking) 제어 알고리즘에 기반을 둔 공정 대역 할당을 보장하는 전송률 제어 알고리즘을 제안한다. 또한 제안한 알고리즘의 점근적 안정성과 공정 대역 할당 여부를 이론적으로 증명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 본 논문에서 사용한 모델과 제안하는 전송률 제어 알고리즘을 설명한다. 3절에서는 제안한 알고리즘의 안정성과 공정 대역 할당 여부를 증명하기 위하여 시간 영역에서 이론적 접근 방법을 제시하고, 안정적인 ABR 트래픽 제어용 위한 충분 조건을 제시한다. 4절에서는 3절에서 이론적으로 규명한 안정성과 공정 대역 할당 여부를 모의 실험을 통하여 검증하고, 5절에서는 결론을 맺는다.

II. 시변 지연을 고려한 ABR 트래픽 제어 모델과 비례 제어 알고리즘

본 절에서는 단일 병목 링크(bottleneck node)에 대하여 시변 지연 ABR 트래픽 모델과 제어 알고리즘을 제시한다. 일반적으로 네트워크 안에서 모든 노드에서 병목 현상이 발생할 수 있지만, 이론 전개를 단순하게 하기 위하여 네트워크에서 병목 현상이 발생한 노드를 하나라고 가정하였다^[1].

그림 1은 단일 병목 링크에 대한 ABR 트래픽 제어 모델을 나타낸다. 여기서 $r_i(t)$ 와 $r_i'(t)$ 는 각각 소스에서 노드까지의 전송 시간 지연과 노드에서 소스까지의 전송 시간 지연을 의미하며, $r_i(t) = r_i'(t) + \tau_i(t)$ 이다. 대부분의 기존 연구들은 이러한 단일 병목 링크 모델에서 식(1)과 같이 $r_i(t)$ 와 $\mu(t)$ 를 상수로 가정하고, 이 모델에 대하여 여러 가지 전송률 설계 기법을 제시하고 있다^[9].

$$\dot{q}(t) = \sum_i r_i(t - \tau_i) - \mu \quad (1)$$

여기서 $q(t)$ 는 링크 버퍼의 현재 큐 길이(queue length)를 나타내고, $r_i(t)$ 는 n 개의 ABR 소스 중에서 i 번째 소스의 데이터 전송률을 나타내며, μ 는 링크의 서비스율(service rate)을 나타낸다.

일반적으로 소스로부터 전송된 데이터가 노드에 도달할 때까지 시간 지연이 당연히 발생하기 때문에 식 (1)에서 알 수 있듯이 현재의 링크 버퍼의 큐 길이 변화율은 소스의 시간 지연을 고려한 식으로 표시해야 한다. 그런데 실제 ATM 망에서는 이런 시간 지연은 망의 상태에 따라서 수시로 변하기 때문에 시변 시간 지연으로 모델링해야 한다. 따라서 본 논문에서는 식 (1)의 모델 대신에 식 (2)에 표현된 시변 지연이 포함된 ABR 트래픽 모델을 고려한다.

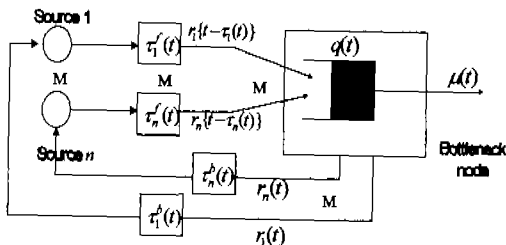


그림 1. 단일 병목 링크를 가진 ATM 망

$$\dot{q}(t) = \sum_i r_i(t - \tau_i(t)) - \mu(t) \quad (2)$$

고전 제어 분야에서는 식 (2)와 같은 모델에 대한 다양한 제어 기법들이 알려져 있다^[11]. 본 논문에서는 이 가운데 가장 일반적이라고 할 수 있는 비례 제어 알고리즘에 기반을 둔 전송률 제어 기법을 제안하고 그 성능을 분석한다.

식 (2)에 대한 비례 제어 알고리즘을 이용하면 i 번째 소스의 전송률은 다음과 같이 표현된다^[11].

$$r_i(t) = \{-K_i(q(t) - q_T) + f_i(t)\}^+, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

여기서, $\{\cdot\}^+$ 는 음이 아닌 함수를 나타내며, q_T 는 목표 큐 길이이고, $f_i(t)$ 는 공정 대역폭 할당을 보장하기 위해 정의한 함수로서 $\sum_i f_i(t) = \mu(t)$ 를 만족하도록 정의한다. 식 (3)에서 K_i 는 제어 이득으로서 양수이며, 이 변수의 값을 적절히 선택함으로써 흐름을 안정적으로 제어할 수 있다.

참고 1 : 식 (3)으로 주어지는 제어 알고리즘은 기존 연구 중 1차 속도 기반 흐름 제어 알고리즘(first order rate-based flow control)^[1,3,9]을 포함하는 일반화된 형태이다. 기존의 알고리즘^[1,3,9]들은 서비스율을 제어 알고리즘에 포함시키지 않았으며, 단순히 큐 길이의 문턱값(threshold)만을 고려하였다. 이 경우에 버퍼 큐 길이를 원하는 값으로 조절하지 못하는 단점이 있다. 식 (3)에서 제어 이득 K_i 를 적절히 선택한다면, 병목 링크의 큐 길이를 원하는 설정값으로 제어할 수 있다. ■

참고 2 : 식 (3)에서 공정 대역폭 할당을 보장하기 위한 함수 $f_i(t)$ 는 사용자의 편의에 따라서 임의로 정의할 수 있다. 다음과 같은 몇 가지 예^[12]를 고려할 수 있다.

- 1) $f_i(t) = \frac{\mu(t)}{n}$: Max-min 알고리즘. 즉, 모든 VC의 MCR이 0이고 모든 VC에 대해서 일률적으로 동일한 대역을 할당하는 경우
- 2) $f_i(t) = r_i^{\min} + (\mu(t) - \sum_i r_i^{\min})/n$: 모든 VC에 대해서 MCR을 할당하고 남은 대역을 일률적으로 할당한 경우이며, 여기서 r_i^{\min} 은 i 번째 VC의 MCR을 의미한다.

3) $f_i(t) = r_i^{\min} + w_i(\mu(t) - \sum_{j=1}^n r_j^{\min})$: 모든 VC에 대해서 MCR을 할당하고 남은 대역을 각 VC에 할당된 가중치에 비례하여 할당한 경우이다. 예를 들면, 가중치들 $w_i = r_i^{\min} / \sum_{j=1}^n r_j^{\min}$ 으로 정의하면, 각 VC의 MCR에 비례하여 남은 대역을 할당하게 된다. ■

III. 시변 지연을 고려한 ABR 트래픽 제어 기법의 안정성 해석

본 절에서는 시변 지연이 존재하는 제어 시스템의 안정성을 해석하기 위한 시간 영역 접근 방법인 Lyapunov 방법을 소개하고, 이를 이용하여 안정성을 증명한다.

먼저 Lyapunov 방법 가운데 시간 지연 미분 방정식 형태로 주어지는 시스템의 안정성을 증명하는 데 매우 유용한 정리인 Razumikhin 정리를 소개한다.

1. Razumikhin 정리

식 (4)로 주어지는 일반적인 시간 지연 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x(t-\theta)) \\ x(\theta) &= \phi(\theta), \quad \forall \theta \in [-r, 0] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $x \in R^n$ 이고, 함수 $\phi: [-r, 0] \rightarrow R^n$ 는 초기 조건을 결정하는 연속 함수이며, 함수 f 는 다음 식을 만족한다.

$$f(t, 0) = 0, \quad \forall t > 0 \quad (5)$$

본 논문에서 $\|x(t)\|$ 는 일반적인 벡터의 노름(norm)을 의미하며, 초기 조건 함수 ϕ 의 노름은 다음과 같이 정의한다.

$$\|\phi\| = \max_{\theta \in [-r, 0]} \|\phi(\theta)\| \quad (6)$$

다음의 보조 정리는 Razumikhin 정리로서 식 (2)와 식 (3)으로 주어지는 시변 지연 ABR 트래픽 모델의 안정성 해석에 있어서 매우 유용한 정리이다.

보조 정리 1 [10, Section 5.4]

$$\begin{aligned} u(s) > 0, v(s) > 0, w(s) > 0, \quad \forall s > 0 \\ u(0) = v(0) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

을 만족하는 연속이고, 엄밀 단조 증가 함수(strictly monotonous increasing function) $u, v, w: R^+ \rightarrow R^+$ 에 대하여 다음을 만족하는 연속 함수 $V: R^+ \times R^n \rightarrow R^+$ 가 존재한다고 가정하자.

- i) $u(\|x\|) \leq V(t, x) < v(\|x\|), \quad \forall t \geq 0, x \in R^n$
- ii) 만약, $\beta(s) > s, \quad \forall s > 0$ 을 만족하는 연속 미감소(nondecreasing) 함수 $\beta(s)$ 에 대하여

$$V(t + \theta, x(t + \theta)) < \beta(V(t, x)), \quad \forall \theta \in [-r, 0], t > 0$$

을 만족하면,

$$\frac{dV(t, x)}{dt} \leq -u(\|x\|), \quad \forall t \geq 0$$

이다.

그러면, 식 (4)로 주어지는 시스템은 점근적으로 안정하다. ■

보조 정리 1에서 함수 $V(t, x)$ 를 Lyapunov 함수라고 하며, 이는 시스템의 안정성을 증명하기 위하여 흔히 도입되는 함수이다. 이와 같이 Lyapunov 함수를 이용하여 안정성을 해석하는 방법을 Lyapunov 방법이라고 한다.

2. 시변 지연 ABR 트래픽 제어 모델의 점근적 안정성 해석

본 연구에서는 안정성을 해석하기 위하여 시변 지연에 대하여 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1 : 다음을 만족하는 양수 τ_i^M 이 존재한다.

$$\begin{aligned} 0 < \tau_i(t) \leq \tau_i^M, \quad \forall t \in [0, \infty), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ 0 < \tau_1^M \leq \tau_2^M \leq \dots \leq \tau_n^M \end{aligned} \quad (8)$$

가정 2 : 링크 서비스율은 상수이다.

가정 1은 소스와 노드간의 거리에 따라서 전송 시간 지연이 비례한다고 가정한다면 의미가 있다. 가정 2는 링크 서비스율을 기존의 연구 결과들과 마찬가지로 상수로 가정한 것이다. 링크의 서비스율은 일반적으로 시변으로 모델링이 되어야 하나, 이런 모델에 대해서는 이론적으로 점근적 안정성을 증명할 수 있는 이론이 아직까지 정립되어 있지 않다. 서비스율이 시변인 경우에는 시뮬레이션을 통하여 제시된 기법의 성능을 분석한다.

이제, 보조 정리 1을 이용하여 식 (2)와 (3)으로 주어지는 시변 지연 ABR 트래픽 제어 모델의 점근적 안정성을 보장하기 위한 충분 조건을 제시한다. 식 (3)으로부터

$$q(t) < q_T + \frac{f_i}{K_i}, \quad \forall i \quad (9)$$

이 만족되면, 전송률은 양수가 된다. 식 (3)은 비선형 함수를 포함하기 때문에 본 논문에서는 편의상 큐 길이 $q(t)$ 가 식 (9)를 만족한다고 가정한다.

정리 1

큐 길이 $q(t)$ 가 식 (9)를 만족한다고 가정하자. 만약, 식 (3)으로 주어지는 전송률 알고리즘에서 제어 이득 K_i 가

$$\sum_i K_i r_i^M < 1 \quad (10)$$

을 만족하면, 가정 1과 가정 2를 만족하는 식 (2)와 (3)으로 주어지는 ABR 트래픽 제어 시스템은 점근적으로 안정하다. 즉, $t \rightarrow \infty$ 이면 $q(t) \rightarrow q_T$ 이다.

증명 큐 길이 오차 $e(t)$ 를

$$e(t) = q(t) - q_T \quad (11)$$

으로 정의하면, 식 (2)와 (3)으로부터 큐 길이 오차 $e(t)$ 는 다음을 만족한다.

$$\dot{e}(t) = -\sum_i K_i r_i e(t - \tau_i(t)) \quad (12)$$

그런데, $e(t - \tau_i(t))$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e(t - \tau_i(t)) = e(t) - \int_{-\tau_i(t)}^0 \dot{e}(t + \theta) d\theta \quad (13)$$

따라서, 식 (12)는 다음을 만족한다.

$$\dot{e}(t) = -\sum_i K_i r_i e(t) + \int_{-\tau_i(t)}^0 \sum_i K_i r_i e(t - \tau_j(t) + \theta) d\theta \quad (14)$$

이제, 식 (14)로 주어지는 큐 길이 오차 시스템의 점근적 안정성을 증명하기 위하여 Lyapunov 함수 $V(t, e(t))$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$V(t, e(t)) = \frac{1}{2} e^2(t) \quad (15)$$

식 (15)로 주어지는 함수 $V(t, e(t))$ 는 보조 정리 1의 i)을 만족하는 함수 u, v 를 쉽게 구할 수 있다. 따라서, 점근적 안정성을 보이기 위하여 식 (10)을 만족하는 경우에 보조 정리 1의 ii)가 만족된다는 사실을 증명하면 된다. 보조 정리 1의 ii)에서 함수 $\rho(s)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\rho(s) = (1 + \delta)s, \quad \forall s \geq 0 \quad (16)$$

여기서, 양수 δ 는 다음을 만족한다.

$$\delta < 2 \left(\frac{1}{\sum_i K_i r_i^M} - 1 \right) \quad (17)$$

이제, 식 (15)를 미분하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V(t, e(t)) &= \dot{e}(t) e(t) \\ &= -\sum_i K_i r_i e(t) \times e(t) + \int_{-\tau_i(t)}^0 \sum_i K_i r_i e(t - \tau_j(t) + \theta) d\theta \end{aligned} \quad (18)$$

그런데,

$$-\int_{-\tau_i(t)}^0 e(t) e(t - \tau_j(t) + \theta) d\theta \leq \int_{-\tau_i(t)}^0 \frac{1}{2} (e^2(t) + e^2(t - \tau_j(t) + \theta)) d\theta \quad (19)$$

이므로, 식 (18)은 다음을 만족한다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V(t, e(t)) &\leq -\sum_i K_i r_i e^2(t) + \frac{1}{2} \sum_i K_i \sum_j K_j \int_{-\tau_i(t)}^0 (e^2(t) + e^2(t - \tau_j(t) + \theta)) d\theta \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_i K_i \sum_j K_j \int_{-\tau_i(t)}^0 e^2(t - \tau_j(t) + \theta) d\theta \end{aligned} \quad (20)$$

만약, Lyapunov 함수 $V(t, e(t))$ 가 임의의 $\xi \in [t - 2 \max_i \tau_i^M, t]$ 에 대하여 다음을 만족한다고 가정하자.

$$V(t, e(\xi)) < (1 + \delta) V(t, e(t)) \quad (21)$$

그러면, 가정 1, 식 (15)와 (21)로부터 식 (20)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V(t, e(t)) &\leq -\sum_i K_i r_i e^2(t) + \frac{1}{2} \sum_i K_i r_i^M \sum_j K_j r_j e^2(t) \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_i K_i r_i \left(\sum_j K_j r_j^M (1 + \delta) e^2(t) \right) \\ &= -\epsilon \sum_i K_i r_i e^2(t) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, 식 (17)로부터 ϵ 은 다음 식을 만족한다.

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{2} \sum_i K_i r_i^m (2 + \delta) > 0 \quad (23)$$

따라서, 보조 정리 1 의 ii)에서

$$w(\|e\|) = \epsilon \sum_i K_i \|e(t)\|^2 \quad (24)$$

으로 가정하면, 식 (22)와 (23)으로부터 보조 정리 1의 ii)가 성립한다는 것을 알 수 있고, 보조 정리 1로부터 식 (12)로 주어지는 큐 길이 오차 시스템은 점근적으로 안정하다. 그러므로, $t \rightarrow \infty$ 이면 $e(t) \rightarrow 0$, $q(t) \rightarrow q_T$ 이다. 또한 식 (3)에서 $q(t) \rightarrow q_T$ 이면, $r_i(t) \rightarrow f_i(t)$ 가 되어 공정 대역 할당 조건을 만족한다. ■

$$r_i(t)$$

참고 3 : 식 (10)으로 주어지는 제어 이득 조건에서 시변 시간 지연의 상한값을 상수 시간 지연으로 대체하면, [9, Proposition 3.3]에서의 결과들을 얻을 수 있다. 따라서 식 (10)은 [9, Proposition 3.3]을 포함하는 일반화된 형태이다. ■

IV. 모의 실험과 고찰

이 절에서는 제안한 알고리즘과 안정성 해석 방법의 타당성을 입증하기 위하여 수행한 모의 실험 내용과 그 결과물 제시하고 실험 결과물 분석한다. 모의 실험을 위해 설정한 환경은 대부분 [9]에서 사용한 환경과 같게 하였으나, 본 논문에서는 시변 지연 시스템을 고려하기 때문에 [9]의 환경에 상수 시간 지연 변수를 시변 지연 변수로 대체하였다. 모의 실험 환경은 표 1과 같다.

첫째는 식 (2)에서 병목 링크의 서비스율 $\mu(t)$ 가 상수인 경우이고, 둘째는 $\mu(t)$ 가 시간에 따라 변하는 함수인 경우이다. 현재 서비스되고 있는 ABR VC 개수는 30개로 가정하였다. i 번째 VC의 왕복 시간 지연 값 $r_i(t)$ 는 충분히 큰 경우를 포함시키기 위하여 $0.01 \leq r_i(t) \leq 0.04$ 로 가정하였다. 제어 시스템을 안정하게 하는 제어 이득 K_i 는 식 (10)을 만족해야 하는데, 이 경우에 $r_i^m = 0.04$, $\forall i$ 이므로, $K_i < \frac{5}{6}$, $\forall i$ 가 한 해가 될 수 있다.

실제 ABR 제어 시스템은 되먹임 정보가 RM 셀을 통해서 전달되기 때문에 되먹임 신호가 불연속 입력임을 지닌다. 이런 영향을 고려하기 위하여 표 본 유지(sample and hold) 방법으로 되먹임 신호를

표 1. 모의 실험 환경

| 항목 \ 경우 | A | B |
|-----------|---|--|
| 서비스율 | 150 Mbps | $1.3 \times 10^8 + 2 \times 10^7 \sin(120\pi t)$ |
| VC ABR 개수 | 30 | |
| $r_i(t)$ | $0.01 \leq r_i(t) \leq 0.04$ | |
| $f_i(t)$ | $f_i(t) = r_i^{\min} + w_i(\mu(t) - \sum_j r_j^{\min})$ | |
| q_T | 500 cells | |
| $q(0)$ | 8000 cells | |
| K_i | 0.8 | |
| 샘플링 주기 | 0.00452 sec (10 RM cell period : 150Mbps 가정) | |

표현하였으며, 각 소스의 전송률 제어는 10개 RM 셀마다 수행하였다⁹⁾. 그림 2와 그림 3은 각각 경우 A와 B의 모의실험 결과이다. 정리 1에서 증명한 바와 같이 상수 서비스율인 경우에는 정상상태에서 실질 큐 길이인 500셀로 정확히 제어가 되었다. 시변 서비스율인 경우에는 대체로 500 셀을 중심으로 서비스율의 변화에 따라서 정상 상태 큐 길이가 변화하지만, 안정성에는 큰 영향을 미치지 않는다.

공정 대역폭 할당에 대하여 결과를 살펴보면, 경우 A에서는 표 1의 대역폭 할당식 f_i 에서 각 소스마다 주어지는 가중치 w_i 에 비례하여 대역폭 할당이 이루어지고, 정상 상태에서 정확히 원하는 공정 대역폭 할당이 이루어지는 것을 알 수 있다. 본 모의 실험에서 가중치는 임의로 정한 값으로 그림 2와 그림 3은 $w_1 = 0.0108$, $w_8 = 0.0430$ 인 경우에 대역폭 할당 결과를 나타낸다. 경우 B에서는 서비스율이 변하기 때문에 ABR 소스의 가용 대역폭이 변하고 이에 따라 대역폭 할당이 변하게 되는데, 표 1의 f_i 에 대한 식에서 각 소스마다 주어지는 가중치 w_i 에 비례하여 대역폭 할당이 이루어지고, 이 가중치가 클수록 많은 대역을 차지하고 변화폭도 커지는 것을 알 수 있으며, 정상 상태에서 실제 소스의 전송률은 f_i 와 같아진다. 두 경우 모두 각 VC의 MCR은 편의상 0으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

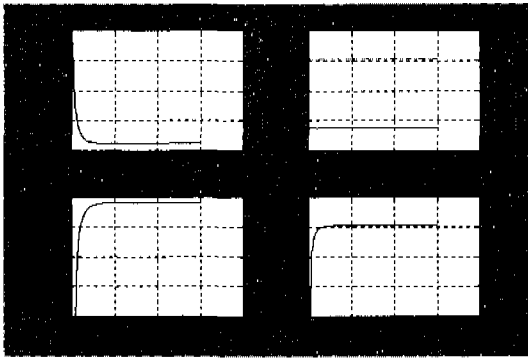


그림 2. 경우 A에 대한 모의 실험 결과

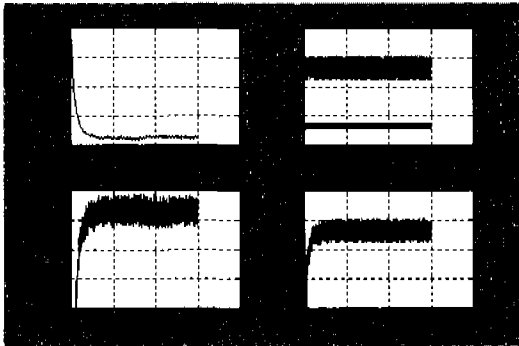


그림 3. 경우 B에 대한 모의 실험 결과

V. 결 론

본 논문에서는 시변 지연을 고려한 ABR 트래픽 제어 모델과 고전적인 설정값 추적(set-point tracking) 제어 알고리즘에 기반을 둔 전송률 제어 알고리즘을 제안하고 그 성능을 이론적으로 분석하였다. 기존의 연구 결과들은 상수 시간 지연 시스템 모델만을 사용하였고 공정 대역 할당 문제를 효과적으로 다루는데 한계가 있었다. 본 논문에서 제안한 알고리즘들은 다양한 형태의 공정 대역 할당 기준을 수용할 수 있는 일반화된 알고리즘이다. 이러한 형태의 알고리즘은 TM 4.0에 제시된 ER 기반 제어 알고리즘들에 비해서 계산량이 상대적으로 적기 때문에 실시간 구현에 유리할 뿐 아니라 제어 시스템의 안정성과 정상 상태에서 공정한 대역 할당을 보장한다는 것을 수학적으로 증명할 수 있다는 장점이 있다.

또한 본 논문에서는 주파수 영역에서는 해석이 불가능한 시변 지연 시스템 모델의 점근적 안정성을 증명하기 위하여 시간 영역에서 Razumikhin 정

리론 이용한 방법을 도입하였으며, 서비스율이 상수인 경우에 대한 이론적인 분석을 하였다. 병목 링크의 서비스율이 시변 함수로 표현되는 경우에는 모의 실험을 통하여 제안한 시스템의 안정성을 확인하였으며, 이에 대한 이론적인 분석은 향후 연구 과제로 남겨 두었다.

참 고 문 헌

- [1] L. Benmohamed and S.M. Meerkov, "Feedback control of congestion in packet switching networks : The case of single congested node," IEEE/ACM Trans. Networking Vol.1, No.6, pp.693 -708, 1993.
- [2] F. Bonomi, K.W. Fedick, "The rate-based flow control framework for the available bit rate ATM servic," IEEE Network, Vol.9, No.2, pp.25-39, 1995.
- [3] S. Chong, R. Nagarajan, and Y. T. Wang, "First-order rate-based flow control with dynamic queue threshold for high-speed wide-area ATM networks," Proc. SPIE conference on Performance and Control of Network Systems, Vol.3231, pp.259 -270, 1997.
- [4] C. E. Rohrs and R. A. Berry, "A linear control approach to explicit rate feedback in ATM networks," Proc. IEEE INFOCOM'97, pp.277 -282, 1997.
- [5] Y. Zhao, S. Q. Li, and S. Sigarto, "A linear dynamic model for design of stable explicit-rate ABR control schemes," Proc. IEEE INFOCOM'97, pp.283 -292, 1997.
- [6] A. Kolarov and G. Ramamurthy, "A control theoretic approach to the design of closed loop rate based flow control for high speed ATM networks," Proc. IEEE INFOCOM'97, pp.293 -301, 1997.
- [7] L. Benmohamed and Y. T. Wang, "A control-theoretic ABR explicit rate algorithm for ATM switches with per-VC queueing," Proc. IEEE INFOCOM'98, pp.183-191, 1998.
- [8] E. Altman, T. Basar, and R. Srikant, "Robust rate control for ABR services," Proc. IEEE INFOCOM'98, pp.166-173, 1998.
- [9] S. Chong, R. Nagarajan, and Y. T. Wang,

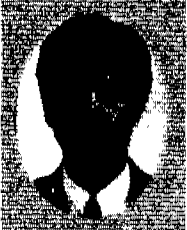
“Designing stable ABR flow control with rate feedback and open-loop control : first-order control case,” Performance Evaluation, Vol. 34, pp.189-206, 1998.

1992년~현재: 한국통신 통신망연구소 선임연구원
(실장)


<주관심 분야> 광통신 기술, 통신망 기술

- [10] J. Hale and S. M. V. Lunel, *Introduction to functional differential equations*, Springer-Verlag, New York, 1993.
- [11] B.C. Kuo, *Automatic Control Systems*, 7th ed., Prentice Hall, 1995.
- [12] B. Vandlore, S. Fahmy, R. Jain, R. Goyal, and M. Goyal, “General weighted fairness and its support in Explicit Rate switch algorithm,” submitted to *Computer Communications Journal*, Feb. 1999.
- [13] E. J. Hernandez-Valencia, L. Benmohamed, R. Nagarajan, and S. Chong, “Rate control algorithms for the ATM ABR service,” *European Transactions on Telecommunications*, Vol. 8, No. 1, pp.7-20, Jan,-Feb., 1997.

박 섭 형(Seop Hyeong Park) 정회원
 한국통신학회 논문지, 제22권 제4호 참조
 현재: 한림대학교 정보통신공학부 부교수.
 <주관심 분야> 네트워크 트래픽 제어, 멀티미디어 통신, 음성 및 영상 신호 처리

송 심 호(Seong Ho Song) 정회원

 1987년 2월: 서울대 제어 계측공학과 졸업.
 1991년 2월: 동대학원 석사
 1995년 2월: 동대학원 박사
 1998년~현재: 한림대학교 전자공학부 조교수

<주관심 분야> 전실 제어 및 응용, 시간 지연 시스템, 비선형 제어, 트래픽 제어

이 봉 영(Bong Young Lee) 정회원

 1982년 2월: 고려대학교 물리학과 졸업
 1989년 2월: 일본 오사카대학 진기공학분야 물리계 석사
 1992년 2월: 동대학원 박사
 1984년~1985년: 삼성정밀연구소 연구원