

다수의 혼잡 노드와 멀티캐스트 연결을 가지는 비동기 전송망의 ABR 서비스에 대한 혼잡 제어

Congestion Control for the ABR Service of ATM Networks with Multiple Congested Nodes and Multicast Connections

노 지 명, 임 종 태
(Ji-Myong Nho and Jong-Tae Lim)

Abstract : Unbalance between user requirements and insufficient network resources makes a congestion. In the future, since the communication networks will have very heavy traffic, congestion will be more serious. The ATM network was recommended to support the B-ISDN service for the future multimedia communication. In the sense of congestion avoidance and recovery, the ABR service category in ATM networks allows the feedback flow control mechanism to dynamically allocate the idle bandwidth of the network to users fairly and to control the network congestion rapidly. In this paper, we introduce a congestion control scheme using systematical approach to confirm robust stability with respect to unknown round trip delay for the network which has both unicast and multicast connections.

Keywords : ATM networks, ABR service, multicast, multi-congestion, congestion control

I. 서론

통신망의 혼잡은 망의 제한된 서비스 자원과 이를 초과하는 사용자의 서비스 요청 사이의 불균형 현상을 말한다. 정보화 사회가 발전할수록 통신망에 대한 접속 욕구는 증가하게 되므로, 통신망에서의 혼잡은 점점 더 중요한 문제가 되고 있다. 또한 사용자의 욕구는 멀티미디어의 충분한 지원을 요청하는 방향으로 증가하고 있으며, 이러한 욕구를 충족시키기 위한 B-ISDN 서비스를 지원하기 위해 ATM(Asynchronous Transfer Mode) 전송망이 제안되어 왔다[1]. ATM망은 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 서비스를 제공하며, 그 중 ABR 서비스는 혼잡제어를 위해 캐환 트래픽 흐름 제어를 지원한다[2]. ABR 서비스에 대한 혼잡 제어를 위해 다양한 제어 알고리즘이 제안되어 왔으나[3]-[7], 순환 경유 지연(RTD: Round Trip Delay) 시간에 대해 강인한 안정성을 보장하는 관점을 다루지는 않았다. 또한, 일대일 통신방식인 유니캐스트 연결만 존재하는 경우에 대해서만 주로 다루었고, 멀티미디어 통신망의 기본 요소인 일대다 통신방식의 멀티캐스트는 ATM Forum에서도 멀티캐스트 ABR 서비스 규격을 위한 기초적인 틀로써의 지침만을 제공하고 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 유니캐스트 뿐만 아니라 멀티캐스트 연결도 지원하는 ABR 서비스를 위한 ATM 망을 고려하고, 이에 대해 순환 경유 지연 시간에 관하여 강인한 안정성을 보장하고, 다수의 혼잡 노드가 발생하는 경우나 멀티캐스트 연결이 존재하는 경우에 대한 망자원의 저활용성 문제를 보상하여 주는 혼잡 제어 기법을 제안한다.

II장에서는 망의 해석에 필요한 가정과 기호정의 및 고

려사항들에 대해 언급하고 III장에서는 이를 바탕으로 한 모델에 관하여 기술하며, IV장에서는 유니캐스트와 멀티캐스트 연결이 공존하며 혼잡 노드가 하나인 경우에 대한 해석과 제어기의 설계를 다루고, V장에서는 혼잡 노드가 다수인 경우에 대한 해석과 제어기의 설계를 다룬다. 마지막으로 VI장에서 본 논문의 결론을 도출한다.

II. 망에 대한 가정과 정의

본 논문에서는 ABR 서비스에서 유니캐스트와 멀티캐스트 연결을 지원하는 ATM 망을 고려한다. 망 모델을 위한 기본적인 가정은 다음과 같다.

1. 망에 대한 가정

다수의 스위칭 노드와 전송 링크를 가진 ATM 망을 고려하자. 노드는 ATM 스위치를 나타낸다. 각 링크는 각 서비스에 해당하는 우선 순위를 가지는 FCFS(First Come First Serve) 형태의 출력 버퍼들을 가진다. 서비스는 rt-VBR 서비스와 ABR 서비스가 존재하며, 우선 순위 계획법[8]에 의해서 각각의 서비스에 대한 대역폭을 먼저 할당한다.

i) 망은 L 개의 전송 링크에 의해 서로 연결된 S 개의 노드로 구성된다. 집합 $S = \{1, 2, \dots, S\}$ 는 노드의 집합을 나타내고, 집합 $L = \{1, 2, \dots, L\}$ 은 링크의 집합을 나타낸다. 노드 $s \in S$ 에 대해 집합 $O(s) \subset L$ 를 노드 s 의 출력 링크의 집합이라 한다. 출력링크 $l \in O(s)$ 은 x_l^u 와 x_l^r 의 두 가지 버퍼를 가지며, x_l^u 는 ABR 서비스용이고, x_l^r 는 rt-VBR 서비스용이다. x_l^u 는 x_l^r 에 비해 높은 우선 순위로 서비스를 받으며, 각 입력 링크는 버퍼가 없다.

ii) $x_l^u(n)$ 는 시간 슬롯 n 에서 x_l^u 에 저장되어져 있는 셀의 수를 나타내고, $x_l^r(n)$ 는 x_l^r 에 저장되어져 있는 셀의 수를 나타낸다. 각 출력 버퍼는 $X_l^u, X_l^r < \infty$ 의 유한한 크기를 가지며, 정상상태의 버퍼 점유량 \bar{x}_l^u, \bar{x}_l^r 와 비교하여 충분히 크고 \bar{x}_l^u, \bar{x}_l^r 는 각각 ABR과 rt-VBR의

QoS(Quality of Service)를 보장할 수 있도록 설정되어야 한다.

iii) 각 노드는 $c_p = 1/\tau_p$ (cells/sec)의 처리 용량을 가지며 τ_p 는 큐 처리, 스위칭 처리 및 라우팅 처리를 포함하여 노드가 하나의 셀을 처리하는 시간이다.

iv) 각 링크는 $c_l = 1/\tau_l$ (cells/sec)의 전송용량을 가지며, τ_l 는 하나의 셀을 전송하는데 걸린 시간을 나타낸다. 우선순위 계획법에 의해 전송용량 c_l 의 일부인 c_b 를 rt-VBR 연결을 위해 할당하고, 나머지 전송용량 c_a 를 ABR 연결을 위한 가용자원으로 할당한다. 우선순위 계획법의 계획주기는 ABR 제한 흐름 제어의 주기에 비해 충분히 크기 때문에 c_b 와 c_a 는 ABR 제한 흐름제어에 의해 시스템이 안정화되는 동안 일정한 값으로 유지된다. 링크는 전방방향의 구조를 가지며, 노드의 처리 용량은 노드에 접속된 링크의 전체 전송 용량보다 크다.

v) 망의 모든 연결은 유니캐스트 가상연결과 멀티캐스트 가상연결로 구성되며, 송신자와 수신자의 명확한 구분을 가진다. 따라서, 각 링크는 임의의 연결에 대하여 명확한 전송 노드 s_s 와 수신 노드 s_r 를 가진다. 연결은 연속된 링크열로 생각할 수 있으므로 \hat{L} 을 연속적인 링크열의 집합이라 하면, \hat{L} 은

$$\hat{L} = \{ \hat{l} | \hat{l} = (l_1, \dots, l_m), l_i \in L, i = 1, \dots, m \}$$

과 같이 표현되며, i 가 다르면 서로 다른 링크를 나타내고 m 은 링크열을 구성하는 링크의 수이다. 유니캐스트 연결 집합을 Ω^u , 멀티캐스트 연결집합을 Ω^m 이라 하면 전체 연결집합 $\Omega = \Omega^u \cup \Omega^m$ 이고, $\Omega^u \cap \Omega^m = \phi$ 가 되며, 연결집합을 링크열로 표현하면

$$\Omega^u = \{ (i) | i \in \hat{L} \},$$

$$\Omega^m = \{ (i_1, \dots, i_N) | i_i \in \hat{L}, i = 1, \dots, N \}$$

과 같이 표현된다. Ω^m 에서 연결의 모든 링크열은 같은 l_1 을 가지며, 첫 번째 분기점까지 같은 링크열을 가지며, 각 연결은 고유한 수신단 수를 나타내는 N 을 가진다.

vi) 트래픽의 흐름은 연결에 상응하고 링크의 부하는 링크를 지나가는 모든 연결의 트래픽이다.

vii) ATM망은 연결본위의 망이므로 연결이 설정된 이후 라우팅은 고정된다. 따라서, 링크 l 를 지나가는 모든 연결의 집합을 Ω_l 라 하면, Ω_l 는 새로운 연결이 설정되어지기 전까지는 일정하다.

viii) 두 개 이상의 링크를 공유하는 연결들은 공유하는 링크로 인해 각각의 트래픽 흐름의 방향으로 이루어지는 페루프를 형성하지 말아야 한다.

ix) 순방향 경유지연(FTD: Forward Trip Delay)은 송신단에서 수신단에 이르기까지의 처리지연, 전송지연 및 전파지연을 포함한다. 역방향 경유지연(BTD: Backward Trip Delay)은 트래픽 흐름의 역방향에 대한 모든 경유지연을 말한다.

x) 인접한 두 노드 사이의 FTD와 BTD는 같다.

xi) 연결 $\omega \in \Omega$ 의 RTD τ^ω 는 ω 의 송신단과 수신단 사이의 모든 FTD와 BTD의 합이 된다. 본 논문에서는 송신단과 혼잡이 발생한 링크 사이의 RTD를 고려한다.

xii) 제한정보는 BRM(Backward Resource Management) 셀에 의해 송신단으로 전송되며, 현 ATM망에서 사용하는 ER(Explicit Rate)를 사용하지 않고, PCR(Peak Cell Rate)에 대한 ACR(Allowed Cell Rate)의 비율값인 제어비율(control ratio)을 사용하며, 송신단에서 받은 제어비율에 의거하여 ACR을 계산한다[9].

xiii) 멀티캐스트 연결 $\omega \in \Omega^m$ 의 분기점은 연결에 포함된 두 개이상의 링크열에서 서로 다른 하부링크열이 시작되는 노드에 위치하며, 이들 하부링크열을 가지라고 부른다. 분기점은 전송되어져 오는 데이터를 각각의 가지에 복사하는 역할과 각각의 가지로부터 전송되어져 오는 제한정보를 취합하는데 있다. 멀티캐스트연결의 서로 다른 가지는 망내에서 겹쳐지는 경로를 가지지 않으며, 유니캐스트의 제한 제적과 멀티캐스트의 순방향 제적으로 형성되는 폐회로는 없다.

2. 송수신단

i) ABR 연결의 송수신단은 PCR과 MCR(Minimum Cell Rate)에 의해 특징지어지는 가상연결 $\omega \in \Omega$ 를 가지며, 망으로부터 전송받은 제어비율에 의해 $MCR \leq ACR \leq PCR$ 을 만족하는 ACR을 계산하고 이에 따른 전송속도로 데이터를 전송하며, 연결이 성립된 이후에 PCR과 MCR은 고정된 값을 가진다.

ii) 송신단은 셀계계를 무시할 수 있는 결정론적 유체흐름으로 해석할 수 있는 트래픽을 생성한다.

iii) 송신단의 처리지연 τ_s^ω 은 FTD나 BTD에 비해 충분히 작기 때문에 송신단은 BRM셀을 받음과 동시에 제한정보에 따라 ACR을 갱신한다. ACR의 갱신은 전송받은 제어비율을 사용하여 계산한다.

iv) 수신단의 처리지연 τ_r^ω 는 FTD나 BTD에 비해 충분히 작기 때문에 수신단은 FRM(Forward RM)셀을 받음과 동시에 BRM셀을 송신단으로 전송한다.

3. 제어기 구조

i) 각 노드는 각각의 출력 링크에 대응하는 혼잡제어기를 가지며, 제안된 제어 알고리즘에 따라 출력 버퍼와 전송되어져 오는 BRM셀의 정보와 연결의 상태 및 버퍼의 수위를 이용하여 주기적으로 제어비율을 계산하여 BRM셀을 이용하여 송신단으로 전송한다. 제어기는 하단으로부터 전송되어져 오는 유니캐스트 연결 BRM셀의 제어비율이나, 취합된 멀티캐스트 연결 BRM셀의 제어비율로부터 혼잡 제어를 위한 제한정보를 받는다.

ii) 제어주기는 시간 T 로 슬롯화되어져 있으며, 슬롯 n 에서 계산되어진 제어비율은 슬롯 시간 $[n, n+1)$ 동안에 수신한 유니캐스트 연결의 BRM셀에 대해서 동일한 제어비율로 갱신되며, 멀티캐스트 연결은 그 슬롯 시간 동안 각 가지로부터 수신한 BRM셀 중 최소의 제어비율로 취합하여 슬롯 $n+1$ 에서 새로운 제어비율을 계산할 때 사용한다. 멀티캐스트 연결의 제한정보의 취합은 분기점에서

일어나며, 제어주기마다 취합이 일어나고, 새로이 갱신된 제어비율을 BRM셀에 실어 전송한다.

iii) 제어기는 해당 링크를 통과하는 연결에 대해 링크용량을 공평하게 분배해야하며, 본 논문에서 제안한 제어기는 비례공평성[9] 기준을 사용하여 가용 용량을 분배한다.

III. 망 모델

망에 요청되는 트래픽의 양은 일반적으로 랜덤(random)한 경향을 지닐지라도, 해석의 편의성을 위해 대개의 경우 결정론적 유체 흐름 모델을 사용한다[10]-[12]. 이러한 확정 유체흐름 모델은 확률과정의 1차 모멘트를 이용한 근사값이다. 이 모델은 ABR과 같이 2차 모멘트가 작은 트래픽 특성을 가지는 연결에 적용하기는 유용하나, VBR과 같이 2차 모멘트가 큰 트래픽 특성을 가지는 연결에는 적절하지 못하다 이와 같은 일차 모멘트 근사 모델을 취하는 방법으로 점근적 평균기법을 사용하는 방법이 있다[13]. 본 논문에서는 이 방법에 근거한 모델을 사용한다.

케환 흐름 제어가 가능한 ABR버퍼만은 고려하므로 표기의 간략화를 위해 II장의 표기에서 윗첨자 a 를 생략하기로 한다. 링크 $l \in L$ 에 대해 시간 t 에서의 버퍼 점유량을 $x_l(t)$, 버퍼로 입력되는 전체 입력 전송률을 $f_l(t)$, 그리고 링크의 전송률을 $c_l(t)$ 라 하자. 결정론적 유체 운동 모델은

$$\dot{x}_l(t) = f_l(t) - c_l(t), \quad 0 \leq f_l(t), c_l(t) \quad (1)$$

와 같이 주어진다. ABR 서비스에서 연결 ω 의 요청전송률은 PCR이므로 PCR을 λ_ω° 라고 하면, 링크 l 에 대한 총 요청전송률 $f_l^\circ = \sum_{\omega \in \Omega_l} \lambda_\omega^\circ$ 와 같다. 링크 $l_0 \in L$ 에서 혼잡이 발생했을 때, 혼잡이 발생하지 않은 링크 $l \neq l_0$ 에서는 $f_l(t) \leq f_l^\circ \leq c_a$ 이기 때문에

$$x_l(t) = 0, \quad t_l^\circ \leq t, \quad \forall l \neq l_0$$

이다. 만약 버퍼가 초기에 $x_l(0)$ 만큼 점유되어 있다면 $t_l^\circ < T$ 는 버퍼 점유량이 0이 되는 시간이며, $x_l(0)$ 에 의해서 결정된다.

$\lambda_\omega(t)$ 를 송신단 s 에서의 ACR이라 하면 허용받은 만큼 전송한다고 할 때 링크 l_0 의 버퍼에 도달하는 트래픽의 총 전송률은

$$f_{l_0}(t) = \sum_{\omega \in \Omega_{l_0}} \lambda_\omega(t - \tau_{s,l_0}^\omega) \quad (2)$$

로 주어지며, 여기서 τ_{s,l_0}^ω 는 연결 ω 의 송신단에서 링크 l_0 까지의 FTD이며, 이 값은 망의 특성에 기인하는 값이다. BTD인 $\tau_{l_0,s}^\omega$ 는 가정으로부터 FTD와 같다. 따라서 본 논문에서 고려하는 RTD는 $\tau^\omega = \tau_{s,l_0}^\omega + \tau_{l_0,s}^\omega$ 가 된다. (2)를 (1)에 대입하면, 다음과 같은 버퍼의 상태 방정식을 얻는다.

$$\dot{x}_{l_0}(t) = \sum_{\omega \in \Omega_{l_0}} \lambda_\omega(t - \tau_{s,l_0}^\omega) - c_{l_0}(t), \quad l_0 \in L \quad (3)$$

이제, ABR의 케환 제어 회로를 고려하자. $p_{l_0}(t)$ 를 링크 l_0 에서 계산된 제어비율이라 하면, 제어비율은 BRM셀에 의해 T 의 주기로 전송되고, 송신단은 가장 최근에 수신한 제어비율로 ACR을 조절한다. 따라서, 새로이 조정된 ACR은

$$\lambda_\omega(nT + \tau_{l_0,s}^\omega + \delta t) = \mu_\omega^\circ + p_{l_0}(nT)(\lambda_\omega^\circ - \mu_\omega^\circ), \quad (4) \\ n=0, 1, \dots, \quad 0 \leq \delta t < T, \quad \forall \omega$$

와 같이 표현된다. 여기서 μ_ω° 는 MCR이며, $p_{l_0}(nT)$ 가 0과 1사이의 값이면 $MCR \leq ACR \leq PCR$ 를 만족한다. δt 는 송신단의 처리지연에 의한 요소이기 때문에, 가정에 의해 $\delta t=0$ 으로 놓는다. 해석을 간단히 하기 위해 $\mu_\omega^\circ = 0$ 이라 하면, (4)는

$$\lambda_\omega(t) = p_{l_0}(\lceil t - \tau_{l_0,s}^\omega \rceil_T T) \lambda_\omega^\circ, \quad \forall \omega \in \Omega_{l_0}$$

과 같이 쓸 수 있으며, $\mu_\omega^\circ \neq 0$ 경우도 쉽게 확장할 수 있다 [14]. 여기서

$$\lceil x \rceil_T = n, \quad \text{if } (n-1)T < x \leq nT, \quad \forall n$$

이며, (2)에서 $f_{l_0}(t)$ 는

$$f_{l_0}(t) = \sum_{\omega \in \Omega_{l_0}} p_{l_0}(\lceil t - \tau^\omega \rceil_T T) \lambda_\omega^\circ$$

와 같이 구해진다.

제어기는 매 T 주기마다 제어비율 $p_{l_0}(t)$ 를 계산하기 때문에, Z 영역에서 폐회로 시스템을 해석하기 위해 (3)을 이산화하면

$$x_{l_0}(nT + T) = \left[x_{l_0}(nT) + \int_{nT}^{(n+1)T} \sum_{\omega \in \Omega_{l_0}} \lambda_\omega^\circ p_{l_0}(\lceil t - \tau^\omega \rceil_T T) dt \right. \\ \left. - \int_{nT}^{(n+1)T} c_{l_0}(t) dt \right]_0^X \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, $[\cdot]_a^b$ 는 괄호내의 값이 최소값 a 와 최대값 b 사이에서 제한된다. (5)에서 X 는 버퍼의 크기를 나타낸다. 가정으로부터 $c_{l_0}(t)$ 는 c_a 로 놓을 수 있고, $d^\omega = \lceil \tau^\omega \rceil_T$ 라 하면 $p_{l_0}(t)$ 는

$$p_{l_0}(t) = \begin{cases} p_{l_0}((n-d^\omega)T), & nT \leq t < (n-d^\omega+1)T + \tau^\omega \\ p_{l_0}((n-d^\omega+1)T), & (n-d^\omega+1)T + \tau^\omega \leq t < (n+1)T \end{cases}$$

와 같이 주어지며, l_0 를 생략하면 (5)는

$$x(n+1) = \left[x(n) - c + \sum_{\omega \in \Omega} r_\omega^\circ ((1-\theta^\omega)p(n-d^\omega) + \theta^\omega p(n-d^\omega+1)) \right]_0^X \quad (6)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 $r_\omega^\circ = T\lambda_\omega^\circ$, $c = Tc_a$, $\theta^\omega = d^\omega - \tau^\omega/T$ 이다. r_ω° 는 λ_ω° 의 전송율로 시간 T 동안 입력된 트래픽 셀의 숫자이며, c 는 시간 T 동안 출력 링크를 통해 서비스되어진 셀의 숫자이다.

T에 따라 이산화 된 기준으로 r_ω° 를 제편성하기 위해서

$$r_d \equiv \sum_{\omega \in \Omega, d^\omega = d} (1 - \theta^\omega) r_\omega^\circ + \sum_{\omega \in \Omega, d^\omega = d+1} \theta^\omega r_\omega^\circ \quad (7)$$

$$\bar{D} \equiv \max_{\omega \in \Omega} \{d^\omega\}$$

를 정의하면, \bar{D} 는 링크 l_0 를 경유하는 연결의 이산화된 RTD 중 최대값이 된다. (7)을 이용하여 (6)으로부터 링크 l_0 에 대한 이산화된 폐회로 상태방정식을 구하면,

$$x(n+1) = \left[x(n) + \sum_{d=0}^{\bar{D}} r_d p(n-d) - c \right]_0^X \quad (8)$$

와 같이 얻을 수 있다.

노드 s 의 임의의 출력링크 $l \in O(s)$ 을 지나가는 모든 유니캐스트 연결의 집합을 Ω_l^u , 멀티캐스트 연결의 집합을 Ω_l^m 이라 하자. 그러면, 서로 다른 링크 $l, l_j \in O(s)$ 에 대해서 $\Omega_l^u \cap \Omega_{l_j}^u = \emptyset$ 이고, $\bigcup_{l \in O(s)} \Omega_l^u = \Omega_s^u$ 가 된다. 링크 l 의 버퍼 x_l 은 링크 l 을 지나가는 모든 연결, $\omega \in \Omega_l = \Omega_l^u \cup \Omega_l^m$,의 트래픽을 수용한다. 연결 ω 의 제어비를 $p^\omega(n)$ 는 멀티캐스트 연결의 경우 ω 의 가지로부터 전송되어져 오는 제어비율을 취합한 것이고 유니캐스트의 경우는 혼잡 제어기에서 제어 알고리즘에 의해 계산되어진 값이다 (8)은 멀티캐스트 연결이 존재하지 않는 경우에 대해서만 사용할 수 있으므로, 모든 연결을 고려한 버퍼 x_l 의 상태 방정식은

$$x_l(n+1) = \left[x_l(n) + \sum_{\omega \in \Omega_l} r_\omega^\circ p^\omega(n-d^\omega) - c_l \right]_0^X \quad (9)$$

과 같이 구할 수 있으며, p^ω 는 ω 에 의존한다.

IV. 단일 혼잡 노드의 경우

유니캐스트 연결과 멀티캐스트 연결이 혼재하며 혼잡이 발생한 링크 l 을 가지는 노드 s 를 고려하자. 동작점 근처에서 버퍼 x_l 의 상태 방정식 (9)는 제한치 이내에 동작하므로

$$x_l(n+1) = x_l(n) + \sum_{\omega \in \Omega_l^u} r_\omega^\circ p_l^u(n-d^\omega) + \sum_{\omega \in \Omega_l^m} r_\omega^\circ p_s^m(n-d^\omega) - c_l \quad (10)$$

과 같이 쓸 수 있다. (10)에서 우변의 두 번째 항은 유니캐스트 연결에 의한 입력 셀의 량이고 세 번째 항은 멀티캐스트 연결에 의한 입력 셀의 량이다.

1. 제어기 설계

노드 s 에서 분기점을 가지는 멀티캐스트 연결 $\omega \in \Omega_s^m$ 의 가지의 집합을 $O_\omega(s) \subseteq O(s)$ 라 하자. P형 제어기를 적용할 때 제어비율의 식은

$$p_l^u(n) = \begin{cases} \frac{c_l}{R_l^u + R_l^m} - \alpha_l(x_l(n) - \bar{x}_l) & \text{for } \omega \in \Omega_l^u, \\ \frac{c_l - g_s(n)}{R_l^u + R_l^m} - \alpha_l(x_l(n) - \bar{x}_l) & \text{for } \omega \in \Omega_l^m, \end{cases} \quad (11)$$

$$p_s^m(n) = \text{Consolidation}(p_{b_1}^m, p_{b_2}^m, \dots, p_B^m)$$

와 같이 주어지며, $R_l^u = \sum_{\omega \in \Omega_l^u} r_\omega^\circ$, $R_l^m = \sum_{\omega \in \Omega_l^m} r_\omega^\circ$ 이고, $p_l^u(n)$ 는 링크 l 의 혼잡 제어기에 의해 계산되어지는 연결 ω 의 제어비율이며, $p_s^m(n)$ 는 노드 s 에서 분기점을 가지는 연결 ω 에 대한 제한 제어 정보의 취합(consolidation)에 의한 결과를 나타낸다. $p_{b_i}^m$ 는 연결 $\omega \in \Omega_l^m$ 의 가지 $b_i \in O_\omega(s)$ 의 혼잡제어기로부터 계산되어지는 제어비율이며, B 는 $O_\omega(s)$ 의 카디날리티(cardinality)이고, $g_s(n)$ 는 취합에 의해 발생하는 망자원 저활용성을 보상하기 위해 도입되는 부분이다.

가용대역폭은 비례공정성을 만족시키기 위해 멀티캐스트 연결에 먼저 할당이 되고, 분기점에서 이들 제어 정보를 취합한 후 링크 l 의 제어기에서 이 정보를 이용하여 취합으로 인한 링크 용량의 이용률 저하를 보상하기 위해 링크 l 을 지나가는 유니캐스트 연결을 위한 제어비율의 계산에 사용한다. 여기서 취합을 위한 취합 처리용 시간 지연은 다른 지연 시간에 비해 작으므로 무시한다. 분기점에서 취합되는 제어비율은

$$p_s^m(n) = \min_{l \in O_\omega(s)} \{p_l^m(n)\}$$

와 같이 주어진다. 연결 $\omega \in \Omega_l^m$ 중에서 $p_l^m(n) = p_s^m(n)$ 를 만족하는 연결의 집합을 Ω_l^{m*} 이라 하고 그렇지 않은 연결의 집합을 $\Omega_l^{m'} = \Omega_l^m - \Omega_l^{m*}$ 라고 하자. 그러면, $g_s(n)$ 은 정상상태 해석으로부터

$$g_s(n) = \frac{R_l}{R_l^u} \sum_{\omega \in \Omega_l^{m'}} r_\omega^\circ p_s^m(n) - \frac{R_l^{m'}}{R_l^u} c_l \quad (12)$$

와 같이 주어지며, $R_l = R_l^u + R_l^m$ 이고 $R_l^{m'} = \sum_{\omega \in \Omega_l^{m'}} r_\omega^\circ$ 이다

2. 해석

위와 같은 시스템 설정에 따라 다음과 같은 보조정리를 도입한다.

보조정리 1 : 상기와 같은 시스템 설정 하에서, 링크 $l \in \bigcup_{\omega \in \Omega_s^m} O_\omega(s)$ 중에서 반드시 하나 이상은 $\Omega_l^{m'}$ 를 공집합으로 가진다.

증명 : [14] 참조

보조정리 1은 멀티캐스트 연결에 의한 취합에 어떠한 영향도 받지 않는 링크가 존재함을 나타내는 것으로 제한제어에 의한 시스템이 링크의 혼잡제어기에 의해서만 그 안정성이 결정됨을 나타낸다. $\Omega_l^{m'}$ 를 공집합으로 가지는 링크의 수는 노드 s 에서 분기점을 가지는 멀티캐스트 연결의 가지의 수보다 작거나 같다. 같은 경우, 노드 s 에 분기점 두는 모든 멀티캐스트 연결의 가지 l 의 $\Omega_l^{m'}$ 가 공집합되며, 이는 모든 가지가 같은 값을 전송하여 취합의 필요성이 없거나, 멀티캐스트 연결이 존재하지 않는 경우와 같고 멀티캐스트 연결을 고려한 해석이 필요가 없으므로, 논문에서는 그 값이 작은 경우에 대해서만 고려한다. 따라서, 보조정리 1로부터 $\Omega_l^{m'}$ 를 공집합으로 가지는 링크 반드시 존재하므로 이러한 링크를 최소링크라 부르며, 취합에 의해 영향을 받지 않는다. 최소링크의 집합을 L_0 라고 하고, \bar{L}_0 를 취합에 의해서 영향을 받는 링크의 집합이

고 하자. $R_l^{m_l} = \sum_{\omega \in \Omega_l^{m_l}} r_\omega^0$ 와 같이 놓고, (11)과 (12)를 (10)에 대입하면, 폐회로 상태방정식은

$$x_l(n+1) = x_l(n) - \alpha_l \sum_{\omega \in \Omega_l^1 \cup \Omega_l^1} r_\omega^0 (x_l(n-d^\omega) - \bar{x}_l) \quad (13)$$

$$- \sum_{\omega \in \Omega_l^m} r_\omega^0 \left(\sum_{\omega \in \Omega_l^m} \frac{r_\omega^0}{R_l^m} p_a^{\omega'}(n-d^\omega) - p_s^{\omega'}(n-d^\omega) \right)$$

와 같이 얻어진다. 링크 $l \in \bar{L}_0$ 에 대해서 (13)의 $p_s^{\omega'}(n-d^\omega)$ 는 ω 의 파라미터와 L_0 에 속한 링크의 버퍼 점유분, \bar{L}_0 의 다른 링크의 버퍼 점유분으로 나타난다. (7)에 따라 연결 $\omega \in \Omega_l^1 \cup \Omega_l^{m_1}$ 의 r_ω^0 는 r_d^1 로 재편성되고, 연결 $\omega \in \Omega_l^m$ 는 r_d^m 로, 연결 $\omega \in \Omega_l^{m_2}$ 는 $r_d^{m_2}$ 로 재편성된다. 해석의 편의를 위해 새로운 상태변수 $\hat{x}_l(n) = x_l(n) - \bar{x}_l$ 를 도입하고 $\|\Omega_l^{m_i}\|$ 를 M_i^l 라 놓으면 (13)은

$$\hat{x}_l(n+1) = \hat{x}_l(n) - \alpha_l \sum_{d=0}^{D_l^1} r_d^1 \hat{x}_l(n-d) \quad (14)$$

$$+ \sum_{i=1}^{M_l^m} r_d^{m_i} \alpha_{li} \left(\hat{x}_l(n-d_i) - \sum_{d=0}^{D_l^i} \frac{r_d^{m_i}}{R_l^{m_i}} \hat{x}_l(n-d) \right)$$

로 다시 쓸 수 있으며, d_i 는 i 번째 멀티캐스트 연결에서의 RTD이고, D_l^i 은 (13)의 우변 두 번째 항을 구성하는 연결이 가질 수 있는 최대의 RTD가 된다. l_i 는 그 연결의 분기점에 최소 제어비율을 전송하는 링크를 나타낸다. D 를 노드 a 를 지나가는 모든 연결의 T 에 관해 이산화된 최대의 RTD라 할 때 다음과 같은 두 벡터를 정의하면,

$$\hat{\mathbf{x}}_l(n) = [\hat{x}_l(n) \ \hat{x}_l(n-1) \ \cdots \ \hat{x}_l(n-D)]^T,$$

$$\hat{\mathbf{x}}^l(n) = [\hat{\mathbf{x}}_{l_1}^T(n) \ \hat{\mathbf{x}}_{l_2}^T(n) \ \cdots \ \hat{\mathbf{x}}_{l_{M_l^m}}^T(n)]^T$$

상태 방정식 (14)은

$$\hat{\mathbf{x}}_l(n+1) = \mathbf{A}_l \hat{\mathbf{x}}_l(n) + \mathbf{B}_l \hat{\mathbf{x}}^l(n) \quad (15)$$

과 같은 상태 방정식으로 쓸 수 있으며,

$$\mathbf{A}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0}_{(D_l^1+1) \times (D-D_l^1)} \\ \mathbf{0}_{(D-D_l^1) \times (D_l^1-1)} & \mathbf{0}_{(D-D_l^1) \times (D-D_l^1)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{l_1} & \mathbf{b}_{l_2} & \cdots & \mathbf{b}_{l_{M_l^m}} \\ \mathbf{0}_{D \times M_l^m D} & & & \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_l r_0^1 & -\alpha_l r_1^1 & \cdots & -\alpha_l r_{D_l^1-1}^1 & -\alpha_l r_{D_l^1}^1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

이다. 여기서 \mathbf{A} 는 $(D_l^1+1) \times (D_l^1+1)$ 행렬이고, \mathbf{b}_{l_i} 는 $r_d^{m_i}$, α_{li} , 그리고 $r_d^{m_i}/R_l^{m_i}$ 등의 상수로 표시되는 $1 \times D$ 벡터이다. 최소링크에 대해서, $\Omega_l^{m_i}$ 가 공집합이기 때문에, 다음 보조정리가 성립한다.

보조정리 2 : 최소링크 l 에 대해, α_l 가 다음과 같이 선택된다면

$$0 < \alpha_l < \frac{2}{R_l} \sin \frac{\pi}{4D+2}, \quad (16)$$

링크 l 의 평형상태 $\hat{\mathbf{x}}_l = \mathbf{0}$ 는 점근적으로 안정하다.

증명 : [14] 참조

이제 최소링크 이외의 링크도 모두 포함하여 고려하자.

\bar{L}_0 를 L_1, L_2, \dots, L_G 로 재편성할 때, L_i 에 속하는 링크는 L_0, \dots, L_{i-1} 에 속하는 링크의 제어비율에 의하여 영향을 받는다. 링크 집합 $L_i, 0 \leq i \leq G$ 에 대해서 $\|L_i\| = L_i$ 이고 L_i 의 버퍼집합은 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iL_i}$ 구성되어진다. 전체 시스템의 상태 벡터를

$$\hat{\mathbf{x}}(n) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{0L_0}(n) & \cdots & \hat{\mathbf{x}}_{0L_0}(n) & \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_{1L_1}(n) & \cdots & \hat{\mathbf{x}}_{1L_1}(n) & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_{GL_G}(n) & \cdots & \hat{\mathbf{x}}_{GL_G}(n) & \vdots \end{bmatrix}^T$$

라 놓으면 전체 시스템 상태 방정식은

$$\hat{\mathbf{x}}(n+1) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(n) \quad (17)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{0}_{L_0 D \times L_1 D} & \cdots & \mathbf{0}_{L_0 D \times L_G D} \\ \mathbf{B}_1 & \mathbf{A}_1 & \cdots & \mathbf{0}_{L_1 D \times L_G D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{B}_G & \vdots & \vdots & \mathbf{A}_G \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(n)$$

이고, 링크 그룹 $c, 1 \leq c \leq G$,에 대해서 \mathbf{B}_c 는 $L_c D \times (L_0 + L_1 + \dots + L_{c-1})D$ 행렬이고, \mathbf{A}_c 는

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{c1} & \cdots & \mathbf{0}_{D \times D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{D \times D} & \cdots & \mathbf{A}_{cL_c} \end{bmatrix} \quad (18)$$

와 같은 $L_c D \times L_c D$ 대각행렬이 된다.

전체 시스템을 안정화 할 수 있는 제어기의 설계를 위해 다음과 같은 정리를 유도할 수 있다.

정리 1 : 상기와 같은 시스템의 설정 하에서, 링크 $i \in L_c$

의 제어기가 (11)과 같은 형태를 가지고, 이득 α_i 가 다음과 같은 기준에 의해 선택되어진다면, 전체 망에 있어서 평형점 $\hat{\mathbf{x}}_e = \mathbf{0}$ 는 점근적으로 안정하다.

$$0 < \alpha_i < \frac{2}{R_i} \sin \frac{\pi}{4D+2} \quad (19)$$

증명 : (17)의 대각 행렬은 링크 그룹 c 에 대해 \mathbf{A}_c 로 구성되어져 있으며, \mathbf{A}_c 는 (18)과 같은 대각행렬로 구성되고 그 원소 행렬 $\mathbf{A}_{cl}, 1 \leq l \leq L_c$ 는 (15)의 \mathbf{A} 와 같은 형태가 된다. \mathbf{A}_{cl} 는 고립된 각 링크의 시스템 행렬을 나타내며, (17)의 고유치는 각 원소 행렬의 고유치의 합집합과 같으므로 각 \mathbf{A}_{cl} 의 고유치가 각각 단위원 내부에 위치할 경우 (17)의 \mathbf{A} 의 고유치도 모두 단위원 내부에 있게된다. 따라서 각 링크 i 의 특성 방정식은

$$\Phi_i(z) = z^{\bar{D}_i+1} - z^{\bar{D}_i} + \alpha_i \sum_{d=0}^{\bar{D}_i} r_d^i z^{\bar{D}_i-d}$$

와 같이 주어지므로 [15]로부터 α_i 를 (19)의 기준에 의해

선택하면 평형점 \hat{x}_o 는 접근적으로 안정하다. ■
 이와 같은 간략한 해석을 위해서는 $l_1, l_2 \in O_\omega(a)$, $l_1 \neq l_2$ 에 대해서 $p_{l_1}^o(0) < p_{l_2}^o(0)$ 라면, 모든 n 에 대하여 $p_{l_1}^o(n) < p_{l_2}^o(n)$ 과 같은 가정이 필요하다. 즉, 최소링크가 시간에 대해 고정적이어야 한다는 가정인데, 일반적으로, 이 가정은 성립하지 않는다. 따라서, 전체 시스템은 취합된 값을 이전 슬롯과 다른 링크에서 얻을 때 변하게되는 시변 시스템이 된다. 그러나 $A(n)$ 이 시변일 지라도 천천히 변한다면, 전체 시스템은 안정하다[16].

3 모의실험

그림 1과 같은 망을 고려하자. 각 링크의 전송속도는 155Mbps이고 링크의 길이는 100km이다. 따라서 전파지연 τ_{pd} 는 0.33ms이고 τ_s 는 2.74 μ s이므로 시간지연은 전파지연에 의해 좌우된다. 모든 연결은 점선으로 둘러싸인 노드를 경유한다. T 는 125 τ_s 이며, c 는 125셀이다. 각 링크에 속한 버퍼의 원하는 수위는 $\bar{x} = 100$ 셀이고 모의실험시간은 500T이다. 표 1은 모의 실험하는 망의 각 연결에 대해 기술하고 있으며, (19)에서 제어이득 α 를 한정짓는 값을 α^+ 라고 놓으면, $\alpha = 0.6\alpha^+$ 일 때의 결과를 보여준다. 링크 B 또는 C가 최소링크가 되고 멀티캐스트 연결 7에서 몇 번의 최소링크에 대한 전환이 일어나지만 느리게 변화하므로 전체 시스템은 해석에서 파악한 대로 안정화되어졌다.

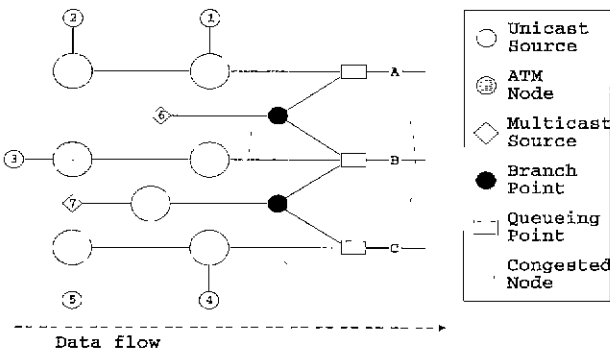


그림 1. 멀티캐스트 연결을 가지는 단일 혼잡 노드 망.
 Fig. 1. Single congested node with multicast sources.

표 1. 그림 1의 망에 대한 기술 ($c = T/\tau_s$).

Table 1. Network description of Fig. 1 ($c = T/\tau_s$).

연결	1	2	3	4	5	6	7
경유링크	A	A	B	C	C	A,B	B,C
PCR	$2c/3$	$c/3$	c	$2c/3$	$2c/3$	$c/3$	$c/3$
RTD	$2\tau_{pd}$	$4\tau_{pd}$	$4\tau_{pd}$	$2\tau_{pd}$	$4\tau_{pd}$	$2\tau_{pd}$	$4\tau_{pd}$

또한 멀티캐스트 연결 6의 제어비율 취합에 의해 링크 A의 이용률이 저하되는 것을 보상하기 위해 $p_A(n)$ 이 보다 높게(0.75 \rightarrow 0.8) 계산되어져 유니캐스트 연결 1,2가 그 보상분을 사용하고 있음을 알 수 있다.

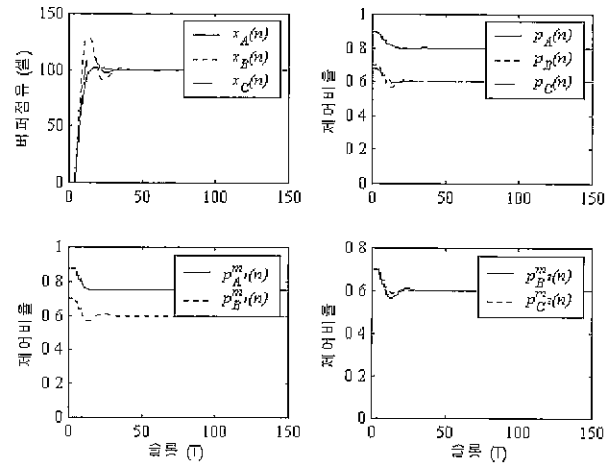


그림 2. $\alpha = 0.6\alpha^+$ 일 때의 시스템 동작.

Fig. 2. System behavior with $\alpha = 0.6\alpha^+$.

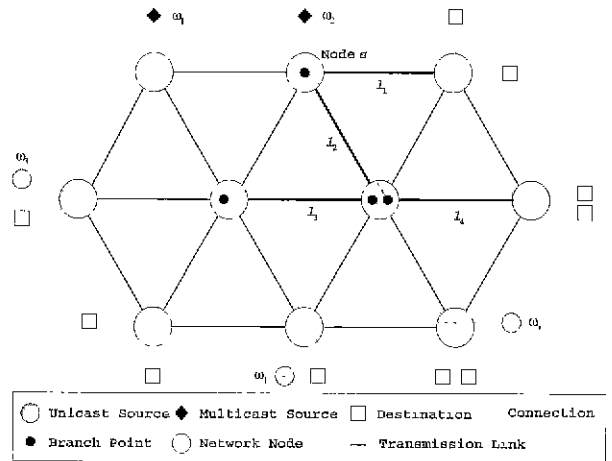


그림 3. 유니캐스트 및 멀티캐스트 연결을 가지는 망.
 Fig. 3. Network with unicast and multicast connections.

V. 다수의 혼잡 노드 경우

그림 3과 같은 유니캐스트 연결과 멀티캐스트 연결을 모두 가지는 망을 고려하자. 그림 3에서 ω_2 는 링크 l_2 와 l_4 에서 다중 혼잡을 만나고 유니캐스트 연결 ω_3 는 l_3 와 l_4 에서 다중 혼잡을 만난다. 노드 s 의 분기점은 링크 l_1 와 l_2 를 따라서 다수의 혼잡링크를 가지게 된다. 따라서 그림 3은 다수의 혼잡 노드에 유니캐스트와 멀티캐스트 연결이 모두 존재하는 망을 잘 나타내고 있다.

앞서의 가정에 의해 혼잡이 발생한 링크 l 의 버퍼 x_l 의 동력학 방정식 (9)는 동작점 부근에서

$$\begin{aligned}
 x_l(n+1) &= x_l(n) + \sum_{\omega \in \Omega_l^o} r_\omega^o p^\omega(n-d^\omega) - c_l \\
 &= x_l(n) + \sum_{\omega \in \Omega_l^o} r_\omega^o p_l^\omega(n-d^\omega) \\
 &\quad + \sum_{\omega \in \Omega_l^o} r_\omega^o p^\omega(n-d^\omega) - c_l
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

로 표현할 수 있다. 멀티캐스트 연결 $\omega \in \Omega_l^m$ 에 따라, ω 가

다수의 혼잡 링크를 가진다면, $p^w(n)$ 은 전송되어져 오는 값을 취합에 사용한다 그렇지 않으면 $p^w(n)$ 은 해당 링크에서 생성되는 값을 취합에 사용한다.

유니캐스트 연결의 집합 Ω_i^m 을 BRM셀에 있는 제어비율이 1보다 작은 값을 포함하고 있는지의 여부에 따라 $\bar{\Omega}_i^m$ 와 $\bar{\Omega}_i^m$ 로 나누고 멀티캐스트 연결 Ω_i^m 도 이와 같은 방법으로 $\bar{\Omega}_i^m$ 과 $\bar{\Omega}_i^m$ 로 나눈다. 즉, 불결무늬를 씌운 집합은 해당 링크로부터 수신단 방향으로 혼잡이 발생한 링크가 하나이상 존재하는 연결의 집합이며, 줄을 씌운 집합은 수신단에서 해당 링크까지 혼잡이 한번도 발생하지 않았음을 나타낸다. 멀티캐스트 연결의 경우는 IV장에서와 같이 각각 Ω_i^m 과 $\bar{\Omega}_i^m$ 의 두 집합으로 나뉘어진다. 또한 집합 Ω_i^m 은 송신단의 응답이 해당 노드에서 전송한 제어비율에 의한 것인가 그렇지 않은가에 따라 $\Omega_i^m(s)$ 과 $\Omega_i^m(\bar{s})$ 로 나뉜다. s_w 를 멀티캐스트 연결 w 의 제어비율을 마지막으로 갱신하는 노드를 나타낸다. 그러면, (20)은

$$\begin{aligned} x_i(n+1) &= x_i(n) - c_i \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_i^w(n-d^w) + \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_i^w(n-d^w) \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(s)} r_\omega^0 p_s^w(n-d^w) + \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(\bar{s})} r_\omega^0 p_s^w(n-d^w) \\ &= x_i(n) + \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_i^w(n-d^w) + \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_i^w(n-d^w) \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(s)} r_\omega^0 p_i^w(n-d^w) + \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(\bar{s})} r_\omega^0 p_s^w(n-d^w) \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(s)} r_\omega^0 p_i^w(n-d^w) + \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(\bar{s})} r_\omega^0 p_s^w(n-d^w) \quad (21) \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(\bar{s})} r_\omega^0 p_s^w(n-d^w) - c_i \end{aligned}$$

와 같이 쓸 수 있으며, p_i^w 는 링크의 제어기에서 계산되어진 값, p_i^w 는 하단으로부터 전송받은 값, p_s^w 는 노드 s 상의 분기점에서 취합된 값, p_s^w 은 노드 s_w 에서 취합되는 값이다.

1. 제어기 설계

최소값을 선택하여 전달할 경우는 시스템의 안정성을 보장할 수 있지만, 하단에 링크용량 이용률 저하를 초래할 수 있다. 따라서, 다중 혼잡제어에서는 하단에서 전송되어 오는 제어비율을 항상 보장해 준다. 이렇게 할 경우 시스템 전체의 안정성을 보장할 수 있으며, 링크용량의 이용률 저하도 막을 수 있다.

P-형 제어기를 적용할 경우 제어비율은

$$p_i^w(n) = \begin{cases} \frac{c_i - g_1(n)}{R_i^m + \bar{R}_i^m} - \alpha_i(x_i(n) - \bar{x}_i) & \text{for } \omega \in \bar{\Omega}_i^m, \\ \frac{c_i - g_s(n)}{R_i^m + \bar{R}_i^m} - \alpha_i(x_i(n) - \bar{x}_i) & \text{for } \omega \in \bar{\Omega}_i^m, \end{cases}$$

$$p_s^w(n) = \text{Consolidation}(p_{s_1}^w, p_{s_2}^w, \dots, p_{s_B}^w)$$

로 $g_1(n)$ 주어지며, $\bar{R}_i^m = \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0$, $R_i^m = \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0$ 이다. $g_1(n)$ 은 전송되어져 오는 값에 의해 예약되는 부분이며, $g_s(n)$ 은 취합에 대한 보상부분이다. 멀티캐스트 연결의 취합은 다음 식으로 주어진다.

$$p_s^w(n) = \min_{l \in O_w(s)} \{p_l^w(n) \text{ or } p_i^w(n)\}$$

$g_1(n)$ 은

$$g_1(n) = \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_i^w(n) + \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_i^w(n)$$

과 같은 값이 된다. 반면에 $g_s(n)$ 은 단일 혼잡 노드의 경우 정상상태 해석으로부터 구할 수 있었던 값이었지만 다수의 혼잡 노드가 존재하는 경우 상위의 분기점에 의한 알 수 없는 값에 의해 표현되어진다. 따라서, $g_s(n)$ 에 대해 다음과 같은 근사값 $\hat{g}_s(n)$ 을 사용한다.

$$\begin{aligned} \hat{g}_s(n) &= g_1(n) + \frac{\bar{R}_i^m}{R_i^m} (g_1(n) - c_i) \\ &\left(1 + \frac{\bar{R}_i^m}{R_i^m}\right) \left(\sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_s^w(n) - \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_i^w(n)\right) \end{aligned}$$

$\hat{g}_s(n)$ 을 사용함으로써 인한 정상상태 오차를 줄이기 위해 P-형 제어기 대신 PI-형 제어기를 적용하면

$$p_i^w(n) = \begin{cases} \frac{c_i - g_1(n)}{R_i^m + \bar{R}_i^m} - \alpha_i(x_i(n) - \bar{x}_i) \\ \quad - \beta \sum_{k=0}^n (x_i(k) - \bar{x}_i) & \text{for } \omega \in \bar{\Omega}_i^m, \\ \frac{c_i - \hat{g}_s(n)}{R_i^m + \bar{R}_i^m} - \alpha_i(x_i(n) - \bar{x}_i) \\ \quad - \beta \sum_{k=0}^n (x_i(k) - \bar{x}_i) & \text{for } \omega \in \bar{\Omega}_i^m. \end{cases} \quad (22)$$

와 같은 제어기의 구조를 가지게 된다.

2. 해석

새로운 상태 변수 $\hat{x}_i(n) = x_i(n) - \bar{x}_i$ 를 사용하여 (22)를 (21)에 대입하면

$$\begin{aligned} \hat{x}_i(n+1) &= \hat{x}_i(n) \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} \frac{r_\omega^0 (c_i - \hat{g}_s(n-d^w))}{R_i^m + \bar{R}_i^m} \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} \frac{r_\omega^0 (c_i - g_1(n-d^w))}{R_i^m + \bar{R}_i^m} \\ &- \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 \left(\alpha_i \hat{x}_i(n-d^w) + \beta_i \sum_{k=0}^{n-d^w} \hat{x}_i(k) \right) \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m} r_\omega^0 p_i^w(n-d^w) + \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(s)} r_\omega^0 p_i^w(n-d^w) \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(\bar{s})} r_\omega^0 p_s^w(n-d^w) \\ &+ \sum_{\omega \in \bar{\Omega}_i^m(\bar{s})} r_\omega^0 p_s^w(n-d^w + d^{s_w}) - c_i \end{aligned} \quad (23)$$

과 같고, d^{ss} 는 두 노드 s, s_w 사이의 BTD이다. 우변의 여섯 번째 항부터 여덟 번째 항까지는 멀티캐스트 연결의 다른 가지의 버퍼 동력학으로부터 결정된다. 보조정리 1로부터 이들 가지는 링크 l 로부터 영향을 받지 않는다. 또한 보조정리 1로부터, 최소링크가 존재할 때 그 링크는 단지 처음 두 개의 항에 의해서 버퍼의 동력학이 표현된다. 이와 같이, IV장에서와 마찬가지로 L_0 를 최소링크 집합으로 놓고 L_1, \dots, L_G 를 설정하면, $\hat{x}_i(n) = [\hat{x}_i(n), \hat{x}_i(n-1), \dots, \hat{x}_i(n-D_i)]^T$ 를 이용하여 (23)을

$$\hat{x}_i(n+1) = A_i \hat{x}_i(n) + B_i \hat{x}_i(n)$$

로 표현할 수 있고,

$$A_l = \begin{bmatrix} \tilde{A}_l & \mathbf{0}_{(D_l+1) \times (D_l-D_l)} \\ \mathbf{0}_{(D_l-D_l) \times (D_l+1)} & \mathbf{0}_{(D_l-D_l) \times (D_l-D_l)} \end{bmatrix}$$

$$B_l = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{l_1} & \mathbf{b}_{l_2} & \cdots & \mathbf{b}_{l_c} \\ \mathbf{0}_{D_l \times (D_l+D_{l_1}+\cdots+D_{l_c})} \end{bmatrix}$$

과 같이 쓸 수 있다. \tilde{A}_l 은 A_l 의 영이 아닌 부분을 나타낸다. B_l 는 다중 혼잡에 기인하는 부분과 멀티캐스트의 최소링크에 기인하는 부분으로 구성되어진다. 링크 그룹 L_0, L_1, \dots, L_G 의 순서로 전체망의 상태 벡터를

$$\hat{\mathbf{x}}(n) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{0L_0}^T(n) \cdots \hat{\mathbf{x}}_{0L_G}^T(n) \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_{1L_1}^T(n) \cdots \hat{\mathbf{x}}_{1L_c}^T(n) \vdots \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_{GL_c}^T(n) \cdots \hat{\mathbf{x}}_{GL_c}^T(n) \end{bmatrix}^T$$

와 같이 구성하면 상태방정식의 시스템 행렬 A 는 (17)에서와 같은 형태가 되고 정리 1로부터 모든 링크의 혼잡 제어기의 이득 α_l 을

$$0 < \alpha_l < \frac{2}{R + R_{m_1}} \sin\left(\frac{\pi}{4D+2}\right)$$

와 같은 기준에서 선택하고 β 를 α 에 비해 훨씬 작게 선택하며 ($\beta \leq \alpha/10$), 시변하는 형태를 고려할 때 $A(n)$ 가 느리게 변할 경우, 평형점 $\hat{\mathbf{x}}_e = \mathbf{0}$ 는 점근적으로 안정하다.

3. 모의실험

그림 4와 같은 망을 고려하자. 망의 물리적인 환경은 IV 장의 모의실험환경과 같고 표 2는 망에 존재하는 연결에 대해 기술하고 있다. 그림 5는 $\alpha = 0.6\alpha^+, \beta = 0$ 의 이득을 가지는 제어기를 사용했을 때의 모의 실험결과 이다. 멀티캐스트의 상위의 분기점들에 의한 하단의 링크로의 영향이 없기 때문에 모든 링크는 P-형 제어기에 의해 안정화된다. 그러나 표 2에서의 화살표와 같이 연결상황이 바뀌면 상위 분기점에서 다른 가지에 의해 최소 제어비를

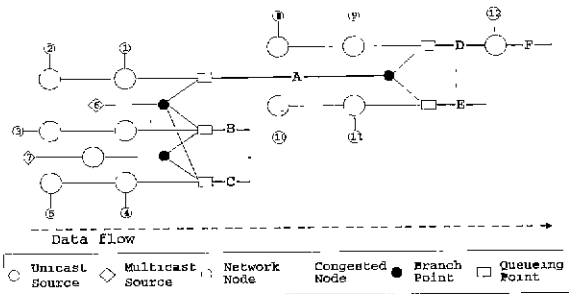


그림 4. 예제 시스템: 유니캐스트 및 멀티캐스트 연결을 가지는 다수의 혼잡 노드로 구성된 망.
Fig. 4. Example network: Multiple congested nodes with various connections.

표 2. 그림 4에 대한 망 기술 ($c = T/\tau_s$).

Table 2. Network description for Fig. 4 ($c = T/\tau_s$).

연결번호	1	2	3	4	5	6
통과링크	A,D,F	A	B	C	C	A,B,C,D,E
PCR	0.6c	0.6c	0.7c	0.6c	0.5c	0.5c
연결번호	7	8	9	10	11	12
통과링크	B,C	D	DF	E	E	F
PCR	0.5c	0.7c ⇒ 0.4c	0.7c ⇒ 0.3c	0.5c	0.5c	0.7c

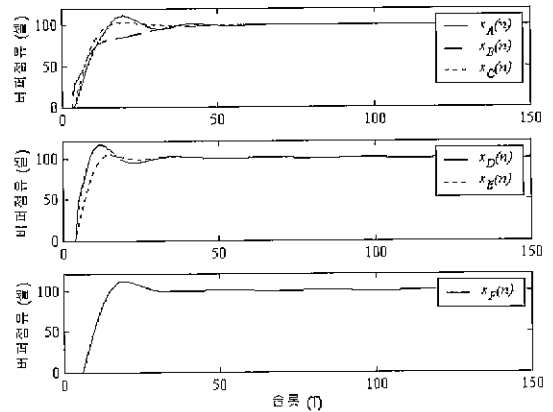


그림 5. $\alpha = 0.6\alpha^+, \beta = 0$ 일 때의 시스템 동작.

Fig. 5. System behavior with $\alpha = 0.6\alpha^+$ and $\beta = 0$.

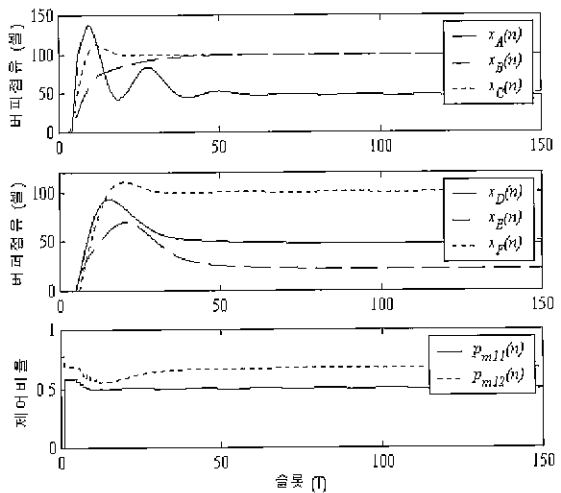


그림 6. 시스템 동작. 정상상태 오차.

Fig. 6. System behavior: Steady state errors.

이 선택되기 때문에 그림 6의 결과에서 알 수 있듯이 버퍼 x_A, x_D, x_E 는 정상상태 오차를 유발하게 된다. 정상상태 오차는 버퍼 수위의 상승으로 지연시간을 증가시켜 QoS를 만족시키지 못하는 경우를 유발한다. 따라서 정상상태 오차를 없애기 적절한 이득을 갖는 PI-형 제어기를 도입하면 그림 7에서처럼 정상상태 오차를 없앨 수 있다.

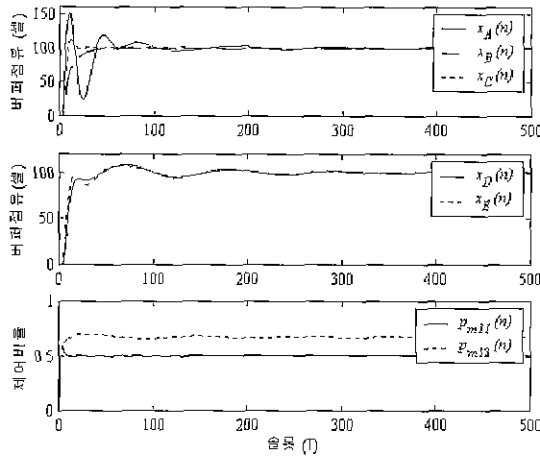


그림 7. $\alpha=0.6\alpha^+$, $\beta=0.1\alpha$ 일 때의 시스템 동작.
 Fig 7. System behavior with $\alpha=0.6\alpha^+$ and $\beta=0.1\alpha$.

VI. 결론

본 논문에서는 ATM망의 ABR 서비스에서 유니캐스트 연결 뿐만 아니라 멀티캐스트 연결도 존재하는 경우 RTD에 대해 강인한 안정성을 보장하는 제어기의 설계 기법을 제안하였다. 또한 제안된 설계 기법은 망의 자원을 최대한 이용할 수 있도록 하는데 주안을 두었으며, 다중 혼잡 노드 발생시에도 적용 가능성을 보였다.

참고문헌

[1] D. E. McDysan and D. L. Spohn, *ATM: Theory and Application*, McGraw-Hill, 1994.
 [2] The ATM Forum Technical Committee, *Traffic Management Specification 4.0*, April 1996. AF-TM-0056.0000.
 [3] R. Jain, "Congestion control and traffic management in ATM networks: Recent advances and a survey", *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 28, no. 13, pp. 1723-1738, 1996.
 [4] L. Roberts, *Enhanced PRCA (Proportional Rate Control Algorithm)*, AF-TM 94-0735R1, ATM Forum, 1994.
 [5] R. Jain, *ERICA switch algorithm: A complete description*, AF-TM 96-1172, ATM Forum, 1996.
 [6] Y.-C. Lu and C. Douligeris, "Rate regulation with feedback controller in ATM network - A neural

network approach", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 2, pp. 200-208, 1997.
 [7] R.-G. Cheng and C.-J. Chang, "Design of a fuzzy traffic controller for ATM networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 4, no. 3, pp. 460-469, 1996.
 [8] K.-H. Shim, J.-M. Nho, and J.-T. Lim, "On priority scheduling algorithm at ATM switches with multi-class output buffers", *IEICE Trans. on Communications*, vol. E82-B, no. 1 pp. 34-38, Jan., 1999.
 [9] J.-M. Nho, K.-H. Shim, and J.-T. Lim, "Congestion control with a new fairness criterion for multicast ABR service in ATM networks", *IEE Proc. Communications*, vol. 146, no. 2, pp. 181-184, 1999.
 [10] 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 no. 6, pp. 693-708, 1993
 [11] L. Benmohamed and S. M. Meerkov, "Feedback control of congestion in packet switching networks: The case of a multiple congested nodes", *Proc. of ACC*, Baltimore, pp. 1104-1108, January, 1994.
 [12] P. P. Mishra, H. Kanakia, and S. K. Tripathi, "On hop-by-hop rate based congestion control", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 4, no. 2, pp. 224-239, April, 1996.
 [13] J.-T. Lim, S. M. Meerkov, and T. Zeng, "Simplified description of slow-in-the-average markov walks", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 158, no. 2, pp. 476-486, 1991.
 [14] 노지명, 전송률을 기반으로 한 비동기 전송모드 네트워크의 다중 혼잡 제어에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문, 2000.
 [15] K.-H. Shim and J.-T. Lim, "Extreme-point robust stability of a class of discrete-time polynomials", *Electronics Letters*, vol. 32, no. 15, pp. 1421-1422, 1996.
 [16] F. Amato, G. Celentano, and F. Garofalo, "New sufficient conditions for the stability of slowly varying linear systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 38, no. 9, pp. 1409-1411, 1993.



노 지 명
 1990년 한국과학기술원 전기및전자공학 학과 졸업. 동대학원 석사(1994), 동대학원 박사(2000). 2000년3~현재 한국 전자통신연구원 선임연구원. 관심분야 통신망 흐름 제어, ATM 통신망, ATM-PON망.

임 종 태
 제어·자동화·시스템공학논문지 제4권, 제4호, 참조.