

문턱을 가진 패킷 교환 음성 다중화기의 성능 분석

正會員 張在申*, 李光哲*, 申炳喆*, 宋昊星**

Performance Analysis of a Packet-Switched Speech Multiplexer with a Threshold Point

Jae Shin Jang*, Kwang Chul Lee*, Byung Cheol Shin*, Ho Sung Song* Regular Members

要 約

제한된 시간 지연을 갖는 패킷 교환 음성 다중화기에서 유입되는 음성 패킷의 증가율이 채널의 용량보다 크면 버퍼의 크기는 한정되어 있기 때문에 꼭 차게 될 것이다. 그리고 그 이후에 들어오는 음성 패킷은 지연에 따라 음성의 품질이 저하되는 것을 막기 위해 폐기시켜야 한다.

본 연구에서는 폐기되는 패킷의 양을 줄이기 위해 버퍼에 문턱 레벨을 둔 두 단계 흐름 제어를 소개한다. 버퍼의 점유도가 이 문턱 레벨보다 커지면 유입되는 음성 패킷의 부호화율을 줄여서(또는 패킷중에서 폐기시켜도 되는 부분을 폐기시킴으로써) 폐기시키는 패킷의 양을 줄인다.

문턱을 전후한 각 영역에서의 대기 행태는 유체 흐름 근사법으로 근사화 될 수 있고, 선형 미분 방정식의 행렬 형식으로 나타내어 진다. 그리고 미분 방정식의 해는 해당되는 고유치와 그의 고유벡터들로 나타내어 진다. 미지수들은 아래 영역, 윗 영역, 그리고 문턱에서의 버퍼 점유도에 의한 경계 조건에 의해 구한다.

이 해로써 폐기되는 패킷의 비율이 제한지연시간과 문턱의 위치에 대한 함수로 나타내어 진다. 해석 결과를 검증하기 위해 컴퓨터 모의에 의한 수치적인 결과를 보인다.

ABSTRACT

In this work, a two level flow control with a buffer threshold point is introduced to reduce the amount of discarded packets in the packet voice multiplexer with limited delay. When the buffer level becomes higher over this threshold point, the coding rate of incoming voice signal will be reduced (or the multiplexer will selectively discard the droppable blocks of the packets) to diminish the number of discarded packets.

The queuing behavior for each level can be approximated with the fluid flow approximation method and can be represented as

*한국과학기술원(KAIST)

**삼성데이타시스템

論文番號 : 94332

接受日字 : 1994年 11月 22日

the matrix form of differential equations. These equations can be solved with boundary conditions of the probability of the buffer occupancy.

With these solutions, the percentage of discarded packets are represented as a function of allowed maximum packet delay and the location of threshold point. Some numerical results will be given using computer simulation to validate the analysis results.

I. 서 론

이제까지 음성 정보는 주로 전화 교환망을 통한 회선 교환 방식으로 전송되어 왔다. 그러나 최근에 들어서 광대역 종합 정보 통신망(Broadband Integrated Services Digital Network, B-ISDN)에 대한 연구에서는 음성과 화상을 위해서도 패킷 교환 기술의 응용을 시도하는 중이다. 또한 많은 패킷 음성 통신 시스템이 만들어 지고, 실험 중에 있다. Brady[21]의 연구에 의하면 음성 정보는 본래의 통계적 특성이 꾸준히 연속적이지 못하고 띄엄띄엄하게 나타나는(bursty) 특성을 갖고 있다. 말을 하는 동안(talkspurt period)에는 음성 정보를 생성해서 보내 주어야겠지만, 말을 하지 않는 기간(silence period)에는 음성 정보를 생성할 필요가 없다. 음성 신호에서는 이 두 상태가 계속 번갈아 나타나는데, 따라서 음성을 패킷 교환으로 전송하는 것이 회선교환으로 전송하는 것보다 합리적이라고 할 수 있다.

패킷 음성 통신에서는 주어진 채널 용량을 효율적으로 사용하기 위해서 여러개의 음성 source를 다중화(multiplexing)하는 것이 필요하다. 그림1에서 보는 바와 같이 다중화기에 N명의 화자(speaker)가 연결되어 있다고 가정하여 보자. 그리고 각 화자로부터 발생한 음성 패킷은 일단 버퍼에 저장되고, 버퍼에서는 먼저 들어온 패킷이 먼저 전송된다(First Come First Served, FCFS)고 가정한다.

지금까지 패킷 교환 음성 다중화기의 성능 분석과 항상성에 대한 많은 연구가 되었는데, Minoli[10][11]와 Coviello[12][13], 그리고 Seguel[14]등은 음성 패킷들이 서로 무관(mutually uncorrelated)하다는 가정하에 분석을 행하였고, Jeng [15]과 Sriram 등[16], 그리고 Heffes 등[17]은 버퍼의 크기가 무한한 경우를 연구했다. 또한 Janakiraman[18]과 Tanaka 등[19]은 제한된 시간 지연을 가진 패킷 음성 다중화기에 대한 연구를 하였다.

최근에 들어서는, Semi-Markov chain 모델과 Uniform Arrival and Service (UAS)모델을 이용한 음성 발생 과정에 대한 모델이 Daigle 등[1]에 의해 제안되었다. 또한 UAS 모델을 이용한 유체 흐름 근사화법(fluid flow approximation)에 의한 비음성 데이터 전송시의 성능에 관한 분석[20][6]과 음성 데이터 전송시의 성능에 관한 분석[3][5]이 연구된 바 있다. 본 연구에서도 위에서 언급한 것과 마찬가지로 패킷은 연속적인 흐름으로 유입된다는 가정하에 유체 흐름 근사화법을 이용한다.

음성 트래픽(voice traffic)은 컴퓨터의 데이터 트래픽(computer traffic)과는 달리 대화의 특성상 실시간(real time)으로 전송되어야 한다. 사람이 거부감을 느끼지 않고 대화할 수 있는 지연은 기껏해야 200ms 정도이다. 대화자들의 확률적 속성으로 인해 큐의 길이가 매우 길어지면 나중에 들어 온 패킷들의 대기 지연이 심각해 지는데, 이것들이 전송된다 하더라도 지연 시간 때문에 음성을 식별하는데 문제가 있고, 그러므로 필요 없는 전송이 되어 버린다. 따라서 패킷음성 다중화기의 설계자는 버퍼의 길이를 무제한으로 놓을 수는 없고 유한한 크기로 제한해야 할 것이다.

음성 신호는 보통 64kbps의 PCM(Pulse Code Modulation)방법으로 전송하나, 그 자체 내에 많은 중복성을 갖고 있어서 32kbps 또는 24, 16kbps등으로 낮추어 보내는 것도 가능하다(이를 variable rate coding이라 한다).

또한 64kbps PCM이나 32kbps의 ADPCM(Adaptive Differential PCM)에서 음성의 한 표본(sample)이 차지하는 몇 개의 비트 중에서 네트워크 내의 혼잡(congestion)이 심한 경우에는 이들 중 LSB(Least Significant Bit)부터 시작하여 몇 비트를 빼기하면 음성이 거칠어지기는 하지만 수신단에서 본래의 음성을 재생해 낼 수 있다(이를 bit dropping 방법이라 한다).

혼잡이 일어났을 때 혼잡을 제어하는 방법에 대해서는 Yin, Li와 Stern[4]에 의해 정리된 바 있다. Yin 등은 먼저 혼잡이 일어났다고 보는 기준을 두 가지로 나누었다. 본 연구에서 다룰 것은, 제한된 버퍼 크기 안에서 큐의 길이가 어느 정도(문턱, threshold)를 넘으면 혼잡이 일어났다고 보고 제어를 하는 것(buffer content threshold)이다.

그리고 음성 데이터를 줄이는 방법은 세 가지로 나누었는데, 본 연구에서 다룰 방법은 Embedded Encoding을 사용하여, 폐기시켜도 지장없는 블록(droppable blocks)을 폐기하는 방법과 두 샘플 중에서 한 샘플 만을 전송하는 방법(even/odd samples)으로, 두 방법은 모두 부호화율을 감소시킨다는 동일한 가정하에서 분석 가능하다.

따라서 본 연구의 주된 관점은 다음과 같다. 먼저 패킷 음성 다중화기의 버퍼 길이는 통화에 불편이 없다고 생각되는 어떤 정해진 최대 크기로 제한된다. 그 최대 크기를 넘어서 들어오는 패킷은 어차피 대기 지연(queueing delay) 때문에 전송된다하더라도 심각한 지연현상을 보이므로 폐기한다는 계획이다. 이러한 상황에서 폐기되는 패킷의 양을 최소한으로 줄이기 위해서 적당한 버퍼 점유도의 문턱(buffer content threshold)을 둔어, 버퍼 점유도가 이 문턱을 넘을 경우, 음성의 부호화율을 감소시키는 것이다. 위와 같은 가정하에서 큐 길이의 확률 분포를 구하고 전체 발생하는 패킷에 대한 손실된 패킷의 비율을 구해본다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. II절에서는 UAS 모델을 소개하고 버퍼의 대기 행태(queueing behavior)를 구하기 위한 상태방정식을 유도한다. III절에서는 하나의 문턱을 가진 다중화기의 대기행태를 분석하고 수치적인 결과를 보인다. IV절에서는 분석과 모의실험(simulation)에 대한 종합적인 검토와 앞으로의 나아가 갈 방향등을 제시하고자 한다.

II. Uniform Arrival and Service 모델

1. 모델의 설명

본래 패킷 음성 다중화기에 들어오는 음성 패킷은 16ms를 단위로 하는 이산적인 입력이다. 하지만 본 연구에서는 이산적인 분석을 하지 않고 들어오는 패킷은

연속적이고, 큐의 길이도 연속적으로 변한다고 가정하는 이른바 균일 도착과 서비스(Uniform Arrival and Service) 모델을 사용한다. 이 모델은 Daigle과 Langford[1]에 의해 제안되었고 Tucker[3]에 의해 일정한 부호화율을 갖는 패킷 음성 다중화기에서, 허용되는 시간 지연에 대한 패킷 손실을 구하는 데 사용되었다. 이 모델에서 음성의 발생은 Weinstein[2]에 의해 제안된 방법으로 모델화 되어 있다. 즉, 각 화자의 말하는 시간(talkspurt length)은 지수 분포(exponential distribution)를 가지고, 현재 말하고 있는 화자의 숫자는 아주 강한 Semi-Markov Process로 보아서 동시에 둘 이상이 증가하거나 둘 이상 감소하지 않는다고 보는 것이다. 그림1에는 총 통화자의 수가 N명이고, i명의 통화자가 실제 말하고 있으며 전송 채널 용량이 c명분인 패킷 교환 음성 다중화기에 대한 모델이 그려져 있다.

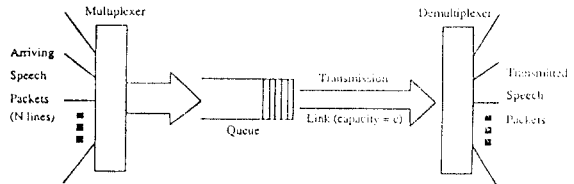


그림 1. 패킷 교환 음성 다중화기의 모델
Fig. 1. Model of a packet-switched voice multiplexer with a threshold point

여기에서 상태(능동 화자의 숫자, number of active speakers)의 천이율을 결정하는 인자들은 다음과 같다.

$$1/\mu = \text{평균 말하는 시간(mean talkspurt length)}$$

$$1/\lambda = \text{평균 조용한 시간(mean silence length)}$$

그리고 상태 i에서 상태 j로의 천이율 $p(i, j)$ 은

$$\begin{aligned}
 p(i, i+1) &= (N-i)\lambda & i \neq N \\
 p(i, i-1) &= i\mu & i \neq 0 \\
 p(i, j) &= 0 & |i-j| \neq 1
 \end{aligned} \tag{1}$$

로 되고, 그림2에 나타나 있다(그림2에는 각 상태에

서 빠져 나가려는 경우들만 표시되어 있다).

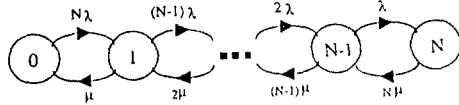


그림 2. 화자 활동도 모델
Fig. 2. Talker activity model

그리고 상태 i 에서 빠져나가려는 천이율을 $p^*(i)$ 라고 정의하면 $p^*(i)$ 는

$$p^*(i) = p(i, i+1) + p(i, i-1) = (N-i)\lambda + i\mu \quad (2)$$

이고 또한 $p^*(i) = 1 - p(i, i)$ 임을 알 수 있을 것이다.

i 명의 화자가 말을 하고 있을 평형 확률 b_i 는 다음과 같이 구해 질 수 있다. 한 사람의 화자가 말을 할 평균 확률을 a 한다면 a 는 평균 말하는 시간을 평균 말하는 시간과 평균 조용한 시간의 합으로 나눈 것이 되고, 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$a = \frac{\mu^{-1}}{\mu^{-1} + \lambda^{-1}} = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad (3)$$

이제 각 화자가 모두 독립적으로 a 의 확률을 가지고 말을 한다고 생각하면, i 명의 화자가 말을 할 확률은 이 항분포를 따르므로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} b_i &= nC_i a^i (1-a)^{N-i} \\ &= nC_i \left\{ \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \right\}^i \left\{ 1 - \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \right\}^{N-i} \\ &= nC_i \frac{\lambda^i \mu^{N-i}}{(\lambda + \mu)^N} \\ &= nC_i \frac{(\lambda/\mu)^i}{(1 + \lambda/\mu)^N} \end{aligned} \quad (4)$$

(단, 여기서 $nC_i = \binom{N}{i}$)

Weinstein[2]은 이 모델을 화자 활동도 모델(Talker Activity Model)이라고 불렀고 Daigle과 Langford[1]은 상 과정(Phase Process)이라고 불렀다.

2. 분석

A. 상태 방정식의 유도

전체 화자수를 N , 큐의 최대 길이를 m 이라고 할 때, $0 \leq i \leq N, t \geq 0, 0 \leq x \leq m$ 인 i, t, x 에 대해서 $P_i(t, x)$ 를 큐의 길이가 x 를 넘지 못하고 시간 Δt 에서 i 명의 화자가 말을 하고 있을 확률이라고 정의하자. 그리하면 t 를 아주 작은 시간 간격이라고 할 때, 다음과 같은 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} P_i(t + \Delta t, x) &= P_{i-1}(t, x - r_i \Delta t) p(i-1, i) \Delta t \\ &\quad + P_{i+1}(t, x - r_i \Delta t) p(i+1, i) \Delta t \\ &\quad + P_i(t, x - r_i \Delta t) (1 - p^*(i) \Delta t) + o(\Delta t), \end{aligned} \quad (5)$$

$0 \leq x \leq m, 0 \leq i \leq N$

여기서 $i < 0$ 에 대해서는 $P_i(t, x) = 0, p(i, i+1) = 0$ 이다.

위 식에서 r_i 는 i 명의 화자가 능동적(active, 즉 말을 하고 있을 때)일 때의 큐 길이의 변화율이다. 큐의 길이의 변화율은 패킷의 도착률(arrival rate, a_i)에서 서비스율(service rate, s_i)을 뺀 값이므로 $r_i = a_i - s_i$ 가 된다.

(5)식을 조금 변형하면 다음과 같이 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_i(t + \Delta t, x) - P_i(t, x - r_i \Delta t)}{\Delta t} &= P_{i-1}(t, x) p(i-1, i) - P_i(t, x) p^*(i) \\ &\quad + P_{i+1}(t, x) p(i+1, i), \end{aligned} \quad (6)$$

$0 \leq x \leq m, 0 \leq i \leq N$

(3)식의 좌변의 첫번째 항은 편미분의 정의에 의해서 $\partial P_i / \partial t$ 가 되고 두번째 항도 편미분의 정의에 의해서 $r_i (\partial P_i / \partial x)$ 가 된다. 따라서 (6)식은 다음과 같이 바뀌어진 다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i(t, x)}{\partial t} + r_i \frac{\partial P_i(t, x)}{\partial x} &= p(i-1, i) P_{i-1}(t, x) - p^*(i) P_i(t, x) \\ &\quad + p(i+1, i) P_{i+1}(t, x), \end{aligned} \quad (7)$$

$0 \leq x \leq m$

이제 우리는 시간 t 에 관계 없는 정상 상태에서의 평형 확률에만 관심이 있으므로 $F_i(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t, x)$ 로 정의하면 (7)은 다음과 같이 된다.

$$r_1 \frac{dF_1(x)}{dx} = p(i-1, i)F_{i-1}(x) - p^*(i)F_1(x) + p(i+1, i)F_{i+1}(x) \quad (8.a)$$

$$r_0 \frac{dF_0(x)}{dx} = -p^*(0)F_0(x) + p(1,0)F_1(x) \quad (8.b)$$

$$r_N \frac{dF_N(x)}{dx} = p(N-1, N)F_{N-1}(x) - p^*(N)F_N(x) \quad (8.c)$$

(평형확률이므로 $\partial P_i/\partial t = dF_i/dt = 0$)

그러므로 (8)식을 행렬형식으로 쓴다면 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$D \frac{dF(x)}{dx} = MF(x) \quad (9)$$

이때

$$F(x) = [F_0(x) F_1(x) \dots F_{N-1}(x) F_N(x)]^T,$$

$$D = \text{diag} \{ r_0, r_1, r_2, \dots, r_{N-1}, r_N \}$$

이고

$$M = \begin{bmatrix} -p^*(0) & p(1,0) & & & & & & \\ p(0,1) & -p^*(1) & p(2,1) & & & & & \\ & p(1,2) & -p^*(2) & p(3,2) & & & & \\ & & & & \ddots & & & \\ & & & & & p(N-2, N-1) & & \\ & & & & & & -p^*(N-1) & \\ & & & & & & p(N-1, N) & \\ & & & & & & & p(N, N-1) \\ & & & & & & & -p^*(N) \end{bmatrix}$$

가 된다.

B. 상태 방정식의 해

zk를 $D^{-1}M$ 의 고유치(eigenvalue)라 하고 ϕ_k 를 그에 해당하는 고유 벡터(eigenvector)라 하면 위의 미분방정식의 해는 다음과 같다[3].

$$F(x) = \sum_{k=0}^N a_k \exp(z_k x) \phi_k \quad 0 < x < m \quad (10)$$

여기서 a_k 는 올바른 경계 방정식을 풀어서 찾아야 하는 상수이다.

III. 하나의 문턱 레벨을 갖는 다중화기의 분석

1. 경계 방정식

큐의 길이가 커져도 음성의 부호화율이 변하지 않을 때의 경계 조건은 Tucker[3]에 의해 제안되었고 이미 해결된 바 있다. Tucker가 분석한 문제는 r_i 가 항상 $(i-c)$ 의 값을 갖는다. 본 연구에서는 큐의 길이가 어느 문턱(threshold) 이상이면 부호화율을 감소시켜 제어하는 방법을 사용한다.

즉, 큐의 길이가 문턱을 넘지 않았을 때에는 큐 길이 x 의 변화율은 Tucker의 경우와 같이 도착률(arrival rate) a_i 는 i 이고 서비스율(service rate) s_i 는 c 가 되어서 r_i 는 $(i-c)$ 이지만, 큐의 길이가 문턱을 넘어섰을 때면 도착률 a_i 가 부호화율을 감소시킨 만큼 줄어들어서 $a_i = ir$ ($0 < r < 1$)이 된다(여기서 r 은 부호화율의 감소 비이다). 그래서 큐길이의 변화율 r_i 는 $(ir-c)$ 가 된다. 이것을 식의 형태로 써보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_i &= i-c & 0 \leq x < Q_{th} \\ r_i &= ir-c & Q_{th} \leq x < m \end{aligned} \quad (11)$$

그림3에는 큐의 길이에 따른 부호화율이 64kb/s에 대한 비로써 그려져 있다. 즉 그림3은 Q_{th} 아래에서는 64kb/s로 음성을 부호화하고 그 위에서는 $r*64kb/s$ 로 음성을 부호화한다는 것을 보여주고 있다.

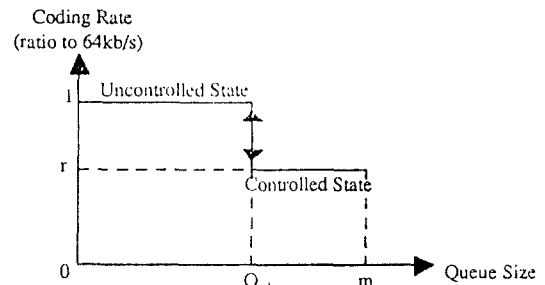


그림 3. 하나의 문턱을 갖는 다중화기의 큐 길이의 변화에 따른 부호화율의 변화
Fig. 3. Coding rate of a multiplexer with one threshold as a function of queue length

위와 같은 추론 하에 큐 길이 x 에 대해서 다음과 같이 두 개의 상태방정식이 세워지게 된다.

$$D_1 \frac{dF_L(x)}{dx} = MF_L(x) \quad 0 < x < Q_{th} \quad (12)$$

$$D_2 \frac{dF_U(x)}{dx} = MF_U(x) \quad Q_{th} < x < m \quad (13)$$

여기서 D_1 과 D_2 는 각각

$$D_1 = \text{diag}\{-c, 1-c, 2-c, \dots, (N-1)-c, N-c\}$$

$$D_2 = \text{diag}\{-c, r-c, 2r-c, \dots, (N-1)r-c, Nr-c\}$$

이고, $F_L(x)$ 와 $F_U(x)$ 는 각각

$$F_L(x) = [F_{L0}(x) F_{L1}(x) \dots F_{LN}(x)]^T \quad (14)$$

$$F_U(x) = [F_{U0}(x) F_{U1}(x) \dots F_{UN}(x)]^T \quad (15)$$

이다.

이렇게 했을 때 $F_L(x)$ 와 $F_U(x)$ 가 어떤 의미를 갖는지 다음과 같이 정리할 수 있다.

$F_{Li}(x)$: 하위 영역에서 i 명의 능동적인 화자가 있을 때 큐의 길이가 x 를 넘지 않을 확률, 즉 $\Pr\{0 \leq \text{queue length} \leq x\}$ 이다.

$$F_{Li}(x) = \sum_{k=0}^N a_{1k} \exp(z_{1k}x) (\phi_{1k})_i \quad 0 < x < Q_{th} \quad (16)$$

$F_{Ui}(x)$: 상위 영역에서 i 명의 능동적인 화자가 있을 때 큐의 길이가 x 보다 크지 않을 확률, 즉 $\Pr\{0 \leq \text{queue length} \leq x\}$ 이다.

$$F_{Ui}(x) = \sum_{k=0}^N a_{2k} \exp(z_{2k}x) (\phi_{2k})_i \quad Q_{th} < x < m \quad (17)$$

(16)식과 (17)식에서 z_{1k} , ϕ_{1k} 와 z_{2k} , ϕ_{2k} 는 각각 $D_1^{-1}M$ 과 $D_2^{-1}M$ 의 고유치와 그에 해당하는 고유벡터를 의미한다. $\{\phi_{1k}\}_i$ 는 벡터 ϕ_{1k} 의 i 번째 원소를 나타낸다.

이제 경계 방정식을 세우기 위해 큐 길이가 변화의 과도행태(transient behavior)를 고찰해 보기로 하자.

그림4(a)는 하나의 문턱을 가진 다중화기에서 시간에 따라 변하는 큐 길이의 변화를 보여준 한 예이다. 시간 0에서 t_1 까지는 능동 통화자의 숫자 i 가 채널의 용량 c 보다 작아서 ($i-c < 0$) 큐는 증가하지 않고 계속 비어있는 상태가 된다. 그리고 시간 t_1 에서는 i 가 $\lceil c \rceil$ ($\lceil x \rceil$ 는 x 를

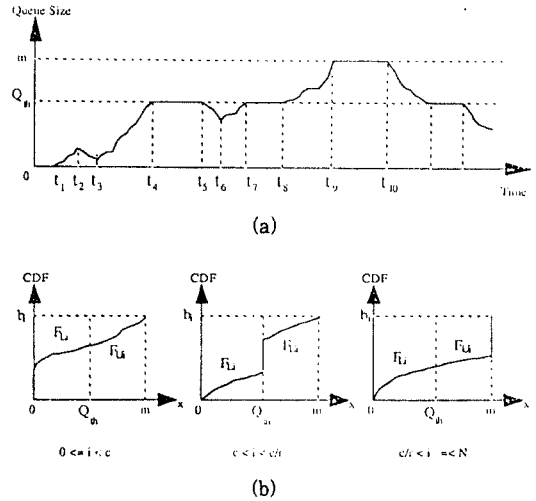


그림 4. (a) 하나의 문턱을 갖는 다중화기에서 시간에 따른 큐 길이 변화
(b) 확률 분포 함수의 대체적인 모양
Fig. 4. (a) Queue length of a multiplexer with one threshold as a function of time
(b) Example of cumulative distribution function (CDF)

넘지 않는 가장 큰 정수)보다 큰, 즉 $\lceil c \rceil + 1$ 이므로 버퍼가 증가하는데 시간 t_2 에서는 i 가 다시 $\lceil c \rceil$ 가 되어 큐가 감소하게 된다. 시간 t_3 에서는 i 가 다시 $\lceil c \rceil + 1$ 이상이 되어 큐는 다시 증가하기 시작하는데, 계속 증가다가 큐의 길이가 문턱(Q_{th})에 다다르면(시간 t_4 에서), 다중화기는 음성의 부호화율을 r 만큼 감소시켜 큐의 증가율이 ir 이 되고 ir 이 c 보다 작게 되면 큐가 증가하지도 않고 감소하지도 않아서 i 가 c 보다 작아지거나(이 경우에는 큐가 $i-c$ 의 변화율로 감소한다) c/r 보다 커질 때(이 경우는 큐가 $ir-c$ 의 변화율로 증가한다)까지 큐의 길이는 Q_{th} 에 머무르게 된다. 그림4(a)에서는 시간 t_5 에 i 가 $\lceil c \rceil$ 가 되어 큐가 감소하고 있다. t_6 에서 i 가 다시 $\lceil c \rceil + 1$ 이 되어 큐가 증가하고 t_7 에서 t_8 까지는 위와 같은 경우가 반복되며 t_8 에서 i 가 $\lceil c/r \rceil + 1$ 이 되면 큐는 $ir-c$ 의 변화율로 증가해서 t_9 에서 큐의 길이가 제한된 길이에 이르르면 다중화기는 큐의 길이를 제한된 최대 길이로 유지하게 된다. 즉, 패킷의 손실은 항상 이 부분에서만 일어나게 된다. 시간이 t_{10} 이 되어서 i 가 $\lceil c/r \rceil$ 이하가 되면 큐는 감소하고 전에서와 같은 일들이 i 의 변화에 따라 무작위적으로 반복된다.

위와 같이 큐의 길이에 대한 제어를 한다면, 확률 밀

도 함수에서 다음과 같이 정의할 수 있는 델타 함수들이 나타난다.

π_i : i명의 화자가 능동적일 때

큐의 길이가 $x=0$ 에 있을 확률

Q_i : i명의 화자가 능동적일 때

큐의 길이가 $x=Q_{th}$ 에 있을 확률

θ_i : i명의 화자가 능동적일 때

큐의 길이가 $x=m$ 에 있을 확률

그리고 각 델타 함수들은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\pi_i = F_{Li}(0+)$$

$$Q_i = F_{Ui}(Q_{th}+) - F_{Li}(Q_{th}-)$$

$$\theta_i = b_i - F_{Ui}(m)$$

위의 과도 행태(transient behavior)의 고찰에 의해서 다음과 같이 생각할 수 있다.

- (1) 큐 길이가 0에 머물 수 있는 경우 : $i < c$ 인 경우에만
- (2) 큐 길이가 문턱에 머물 수 있는 경우
: $c < i < r$ 인 경우에만
- (3) 큐 길이가 최대치에 머물 수 있는 경우
: $i > r$ 인 경우에만

따라서 확률 분포 함수는 그림4(b)와 같은 모양을 띠게 될 것이고, 경계 조건과 경계 방정식은 다음과 같이 된다.

(1) $i < c$ 일 때

$$\theta_i = 0 \rightarrow b_i = F_{Ui}(m) \tag{18}$$

$$= \sum_{k=0}^N a_{2k} \exp(z_{2k}m) \{\phi_{2k}\}_i$$

$$Q_i = 0 \rightarrow F_{Li}(Q_{th}) = F_{Ui}(Q_{th}) \tag{19}$$

$$\rightarrow \sum_{k=0}^N a_{1k} \exp(z_{1k}Q_{th}) \{\phi_{1k}\}_i - \sum_{k=0}^N a_{2k} \exp(z_{2k}Q_{th}) \{\phi_{2k}\}_i = 0$$

(2) $c < i < r$ 일 때

$$\pi_i = 0 \rightarrow F_{Li}(0) = 0 \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \sum_{k=0}^N a_{1k} \{\phi_{1k}\}_i &= 0 \\ \theta_i = 0 \rightarrow b_i &= F_{Ui}(m) \\ &= \sum_{k=0}^N a_{2k} \exp(z_{2k}m) \{\phi_{2k}\}_i \end{aligned} \tag{21}$$

(3) $i > r$ 일 때

$$\begin{aligned} \pi_i = 0 \rightarrow F_{Li}(0) &= 0 \\ \rightarrow \sum_{k=0}^N a_{1k} \{\phi_{1k}\}_i &= 0 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned} Q_i = 0 \rightarrow F_{Li}(Q_{th}) &= F_{Ui}(Q_{th}) \\ \rightarrow \sum_{k=0}^N a_{1k} \exp(z_{1k}Q_{th}) \{\phi_{1k}\}_i &= \sum_{k=0}^N a_{2k} \exp(z_{2k}Q_{th}) \{\phi_{2k}\}_i = 0 \end{aligned} \tag{23}$$

위의 경계 조건을 이용해서 우리는 a_{1k} 와 a_{2k} 를 구할 수 있다. 미지수의 갯수는 $2(N+1)$ 개이고 방정식의 갯수도 (18)에서 (23)까지 $2(N+1)$ 개이므로 위의 방정식을 풀 수 있다.

2. 패킷의 손실

음성 패킷이 폐기되는 것은, 큐의 길이가 최대치를 넘을 때 발생한다. 큐의 길이가 $x=m$ 일 확률은 ϕ_i 이므로

$$\phi_i = b_i - F_{Ui}(m) \tag{24}$$

으로 나타내어 지고, $i > c$ 에 한해서만 음성 패킷이 폐기되므로 총 폐기되는 양은

$$\sum_{i=K}^N (i-r-c) \theta_i \quad (K = \lceil c/r \rceil + 1) \tag{25}$$

로 표현될 수 있다. 전체 화자가 말하는 양은 각각의 화자가 active한 확률에 전체 화자를 곱한 숫자가 되므로, 각각의 화자가 active할 확률은

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \tag{26}$$

로 표현되고, 패킷 손실은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Packet Loss} = \frac{\sum_{i=c}^N (ir - c) \theta_i}{aN} \quad (27)$$

3. 분석 결과

본 연구에서 사용된 파라미터들은 다음과 같다. 평균 말하는 시간(mean talkspurt length) μ^1 와 평균 조용한 시간(mean silence length) μ^2 는 Tucker(3)에 의해 측정된 값인 0.96초와 1.69초를 그대로 사용하였다. τ 를 최대 지연시간이라고 정의하면, 큐의 최대 길이는 비례식 $c : 1 = m : \tau$ 을 만족하므로 $m = c\tau$ 의 관계를 이용하여 원하는 최대 지연시간에 대한 최대 큐의 길이를 얻을 수 있다. 모의실험에서는 음성을 talkspurt와 silence로 구성된 2-상태 Markov 모델을 이용하였으며, 각 상태에 머무는 시간은 동일하게 0.96초와 1.69초이다. 모의실험 프로그램은 C언어로 구현하였고, 프로그램은 10⁵초동안 수행시켰다. 그림5에는 세 가지 경우에서 제한된 최대 지연 시간에 대한 패킷 손실의 백분율의 분석 결과와 모의 결과가 그려져 있다.

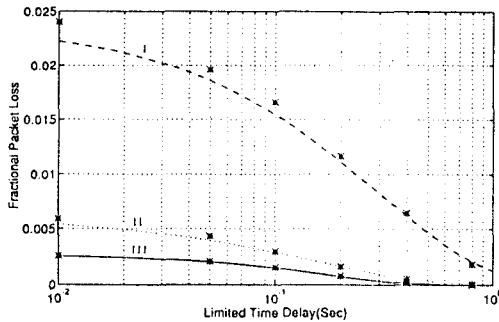


그림 5. 하나의 문턱을 갖는 다중화기에서 패킷 손실율의 분석 결과와 모의실험결과의 비교(m=c)
 — : Analysis, * : Simulation
 곡선 I : N=10, c=3.99, Q_{th}=0.75m, r=0.75
 곡선 II : N=20, c=7.99, Q_{th}=0.75m, r=0.75
 곡선 III : N=5, c=2.99, Q_{th}=0.75m, r=0.75

Fig. 5. Fractional packet loss of a multiplexer with one threshold by analysis and by simulation

그림6은 N=10, c=3.99일 때 문턱을 두지 않았을 경우와의 비교를 위해 문턱이 없는 경우와 문턱이 있는 경우를 한 좌표에다 표시해 보았다. 익히 예상되었던 결과이지만 1/5로 패킷의 손실이 줄어든 것을 알 수 있다.

다른 여러 가지 N과 c의 경우도 그 이상의 폭으로 줄어든다.

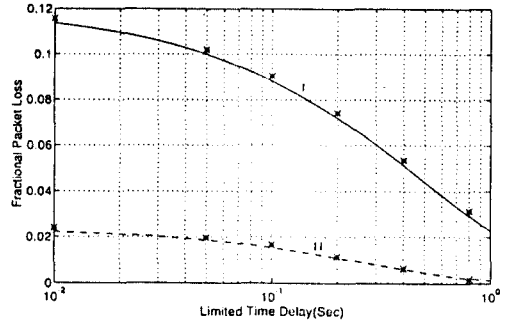


그림 6. 문턱이 있는 경우와 없는 경우의 패킷손실율의 비교 (N=10, c=3.99 일 때)
 — : Analysis, * : Simulation
 곡선 I : 문턱을 갖지 않는 경우
 곡선 II : 하나의 문턱을 갖는 경우 (Q_{th}=0.75m, r=0.75)

Fig. 6. Fractional packet loss of a multiplexer without threshold and with one threshold

그림7은 특정한 문턱 위치와 특정한 제한 지연 시간, 그리고 특정한 부호화율 감쇄비율 가질 때 큐의 길이에 대한 확률 분포 함수의 모양이다. 패킷의 손실 뿐 아니라 확률 분포 함수도 분석과 모의가 거의 일치함을 보여 주고 있다.

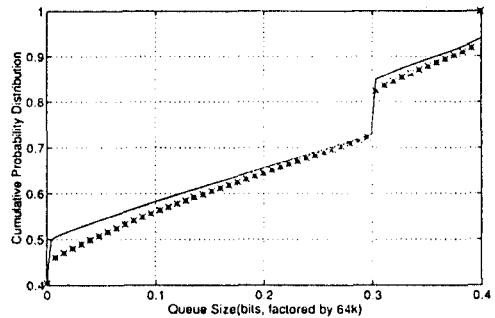


그림 7. 문턱이 있는 경우 확률 분포 함수의 분석과 모의실험결과 비교
 — : Analysis, * : Simulation
 (N=10, c=3.99, delay=0.1sec, Q_{th}=0.75m, r=0.75일 때)

Fig. 7. CDF of a multiplexer with one threshold by analysis and simulation

그림8은 최대버퍼크기에 대한 문턱위치의 비인 QR(Q_{th}/m)에 대한 감도분석을 보여 주며 QR값이 증가함에 따라 패킷손실이 증가함을 알 수 있다.

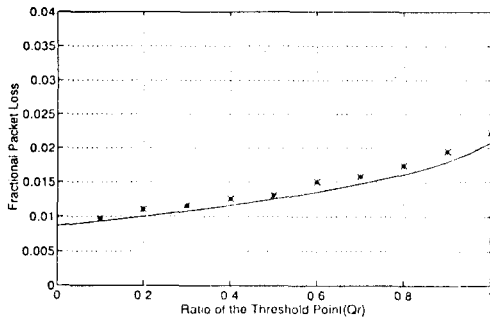


그림 8. $Q_r(=Q_{th}/m)$ 값의 변화에 따른 패킷손실의 변화
 — : Analysis, * : Simulation
 (N=10, c=3.99, delay=0.1sec, r=0.75일 때)
 Fig. 8. Fractional packet loss as a function of $Q_r(=Q_{th}/m)$

그림9는 부호화율 감소비인 r값에 대한 감도분석을 나타내며 r값이 증가함에 따라 문턱제어의 효과가 감소하여 패킷손실이 증가함을 볼 수 있다. 그림8과 그림9를 비교해 볼 때, r값과 Q_r 값이 증가함에 따라 모두 패킷 손실이 증가하지만 Q_r 의 경우에 비해 r값의 변화에 대한 패킷 손실의 증가량이 더 큰 것으로 보아 r값의 변화에 더 민감함을 알 수 있다.

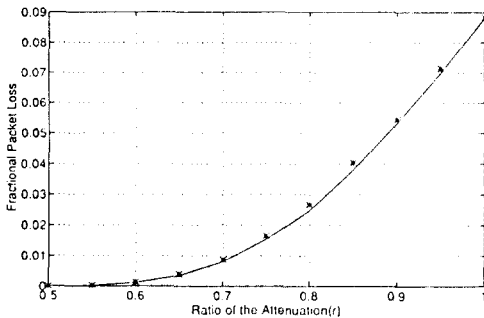


그림 9. r값의 변화에 따른 패킷손실의 변화
 — : Analysis, * : Simulation
 (N=10, c=3.99, delay=0.1sec, $Q_{th}=0.75m$ 일 때)
 Fig. 9. Fractional packet loss as a function of r

여기서 패킷 교환 음성 다중화기의 최적적인 설계를 위해서는 제한된 최대 지연 시간에 대한 최적의 문턱 위치와 그때의 손실율을 알아야 하는데, 그러기 위해서는 음성의 품질을 나타내는 척도가 있어야 한다. 가장 쉬운 예로는 음성의 coding rate 및 그에 따른 신호대 잡음비(Signal to Quantizing Noise Ratio,

SQNR)이나 packet loss ratio 및 delay 등을 음질 평가의 척도로 생각할 수 있다. 또한 설계 과정에서 발생하는 패러미터들 사이의 상호 trade-off를 구해야 하는데, 이에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이어서 최적의 문턱위치와 coding rate는 차후 연구과제라고 생각된다.

IV. 결 론

단순한 문턱을 갖는 다중화기의 경우, 익히 예상되었던 결과지만 패킷의 손실이 상당히 큰 폭으로 줄어 드는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서의 하나의 문턱을 갖는 다중화기의 확장인, 여러개의 문턱을 갖는 다중화기의 경우는 단지 미지수의 갯수가 늘어나는 것이 되므로, 문턱 사이의 영역을 모두 나누어서 각각 다른 r_i 에 대해서 상대방정식을 만든 후, 확률 분포 함수의 불연속점을 이용한다면 똑같은 방법으로 쉽게 풀릴 수 있을 것이다.

문턱에 의한 제어를 하지 않는 경우에는 손실율이 작을수록 전송되는 음성의 품질이 좋아진다고 할 수 있지만, 문턱에 의한 제어를 하는 다중화기에서는 그렇지 않다. 손실율을 낮추려면 문턱을 점점 내리면 되는데, 그렇게 한다면 버려지는 부분(큐의 최대치를 넘어서서 버려지는 것이 아니라 부호화율을 낮춤으로써 버려지는 패킷의 블럭)이 많아지므로 음성의 품질이 저하되기 마련이다. 그러므로 제한된 최대 지연 시간에 대해서 최적의 문턱 위치와 그때의 손실율을 알아내야만 최적의 설계가 가능할 것이다. 전송 품질은 문턱의 위치와 손실율의 함수인데, 문턱의 위치와 손실율 간에도 서로 무관하지 않은 복잡한 문제가 된다. 그러므로 전송 품질을 최대화 하는 문턱의 위치를 알아내는 것도 중요한 연구가 될 것이다.

앞의 분석에서도 보았지만, 단순한 문턱을 갖는 경우에는 큐의 길이가 문턱에 머무는 확률(확률 분포상의 불연속)이 존재한다. 이것은 큐의 길이 측면에서 본다면 별 문제가 없겠으나, 이러한 때의 음성 부호화율은 심각한 진동을 겪는다. 본 연구에서는 유체 흐름 근사화법을 써서 부호화율의 변화가 아주 짧은 시간 간격에서도 가능했지만, 실제의 다중화기의 경우에는 부호화율이 두 상태를 번갈아 가게 된다. 그러므로 이것은 시스템을 불안정하게 하는 요인중의 하나가 될 수 있는데, 이것을 없애는 방법으로서 문턱에 이력 현상(hysteresis

threshold)를 도입하는 것을 생각할 수 있다. 즉 부호화율을 낮추는 문턱을, 부호화율을 원래로 복원시키는 문턱보다 높게 잡으면 실제 다중화기의 경우에 예상되는 부호화율과 큐 길이의 진동을 막을 수 있다. 이러한 히스테리시스 특성을 추가했을 때의 대기 행태가 이론적으로 규명된다면 패킷 음성 다중화기의 보다 안정된 설계가 가능해질 것이다.

참고문헌

1. J.N.Daigle and J.S.Langford, "Models for analysis of packet voice communications systems," IEEE J. Select. Areas Commun., vol.SAC-4, pp.847-855, 1986.
2. C.J.Weinstein, "Fractional speech loss and talker activity model for TASI and for packet-switched speech," IEEE Trans. Commun., vol.COM-26, pp.1253-1257, 1978.
3. R.C.F.Tucker, "Accurate method for analysis of a packet-speech multiplexer with limited delay," IEEE Trans. Commun., vol.36, no.4, Apr. 1988, pp.479-483.
4. N.Yin, S.Q.Li and T.E.Stern, "Congestion control for packet voice by selective packet discarding," IEEE Trans. Commun., vol.38, no.5, May 1990, pp.674-683.
5. Roger C.F.Tucker, "Accurate method for analysis of a packet speech multiplexer," Elect. Lett., July 1983, pp.535-537.
6. D.P.Gaver and J.P.Lehoczky, "Channels that cooperatively service a data stream and voice message," IEEE Trans. Commun., vol.COM-30, No.5, May 1982, pp.1153-1162.
7. S.Karlin and H.M.Taylor, A First Course in Stochastic Processes, New York:Academic Press, 2nd Ed., 1975, pp.148.
8. Kemeny and Snell, Finite Markov Chains, Van Nostrand Co., 1960, pp.46.
9. Bruneel.H., "Analysis of buffer behavior for an integrated voice-data system," Elect. Lett., pp.72-74, 1983.
10. D.Minoli, "Issues in packet voice communication," Proc. IEE, vol.126, pp.729-740, 1979.
11. —, "General geometric arrival-constant server queue with applications to packetized voice," in Proc. Conf. Rec. Int. Conf. Commun., vol.3, pp.36.6.1-5, 1978.
12. G. J. Coviello, O. L. Lake, and G. R. Rebindo, "System design implications of packetized voice," in Proc. Conf. Rec. Int. Comput., 1977, pp.38.3.49-53.
13. G.J.Coviello, "Comparative discussion of circuit versus packet-switched voice," IEEE Trans. Commun., vol.COM-27, pp. 1153-1160, 1979.
14. J.Seguel, Y.Tanaka, and M.Akiyama, "Simulation analysis of the waiting time distribution of a packetized voice concentrator," Trans. IEEE Japan, vol.E65, pp.115-122, 1982.
15. Y.C.Jeng, "Approximations for packetized voice traffic in statistical multiplexer," in Proc. IEEE INFOCOM, Apr. 1984, pp. 256-259.
16. K.Sriram and W.Whitt, "Characterizing superposition arrival processes in packet multiplexers for voice and data," IEEE J. Select. Areas Commun., vol.SAC-4, pp.833-846, 1986.
17. H.Heffes and D.M.Lucantoni, "A Markov modulated characterization of packetized voice and data traffic and related statistical multiplexer performance," IEEE J. Select. Areas Commun., vol.SAC-4, pp.856-868, 1986.
18. N.Janakiraman, B.Pagurek, and J.E.Neilson, "Multiplexing low-speed buffered data terminals," IEEE Trans. Commun., vol. COM-28, pp.1838-1843, 1980.
19. Y.Tanaka, J.Seguel, and M.Akiyama, "Performance analysis of a voice packet multiplexer," Trans. IEEE Japan, vol.J65-B, pp. 539-546, 1982.
20. D.Anick, D.Mitra, and M.M.Sondhi, "Stochastic theory of a data-handling system with multiple sources," Bell Syst. Tech. J., vol.61, pp.1871-1894, 1982.

21. P.T.Brady, "A statistical analysis of on-off pattern in 16 con-versations," Bell Syst. Tech. J., vol.47, pp.73-91, 1968.
22. Ramesh Nagarajan, James F.Kurose and Don Towsley,"approximation technique for computing packet losses in finite-buffered voice multiplexers," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.9, no.3, Apr. 1991, pp.368-377.
23. A.I.Elwarlid and D.Mitra,"Fluid models for the analysis and design of statistical multiplexng with loss priorities on multiple classes of bursty traffic," IEEE INFOCOM, pp.415-425, 1992.
24. 우준석, 은종관, "Bit-dropping에 의한 overload control방식을 채용한 packet voice multiplexer의 성능분석에 관한 연구," 한국통신학회논문지, 1993년 1월, pp.110-123.
25. S.Q.Li, "Overload control in a finite message storage buffer," IEEE Trans. Commun., vol.37, no.12, Dec. 1989, pp.1330-1338.



張 在 申 (Jae Shin Jang) 정희원
 1965년 3월 25일생
 1990년 2월 : 동아대학교 전자공학과
 학사 졸업
 1992년 2월 : 한국과학기술원 전기및
 전자공학과 석사 졸업
 1992년 3월~현재 : 한국과학기술원
 전기및전자공학과 박사
 과정 재학중

※ 주관심분야 : 이동통신망, ATM Network 분야



李 光 哲 (Kwang Chul Lee)
 1969년 10월 29일생
 1993년 2월 : 한국과학기술원 전기및
 전자공학과 학사 졸업
 1995년 2월 : 한국과학기술원 전기및
 전자공학과 석사 졸업
 1995년 3월~현재 : 한국과학기술원
 전기및전자공학과 재학
 중

※ 주관심분야 : 멀티미디어 통신, ATM Network 분야



申 炳 喆 (Byung Cheol Shin) 정희원
 1952년 11월 2일생
 1975년 2월 : 서울대학교 전기공학과
 학사 졸업
 1977년 2월 : 한국과학기술원 전기및
 전자공학과 석사 졸업
 1984년 8월 : 한국과학기술원 전기및
 전자공학과 박사졸업

1977년 2월~1980년 2월 : 한국전자통신연구소 연구원
 1987년 3월~1988년 2월 : SRI International에서 Post
 Doc. 연수

1984년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 부교수

※ 주관심분야 : Multimedia 통신, High Speed Network,
 Wireless Communication, ATM Network
 분야

宋 昊 星 (Ho Sung Song)

1992년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사 졸업
 1994년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사 졸업
 1994년 2월~현재 : 삼성데이터 시스템 근무