

## 프레임 단위의 트래픽 주기성을 고려한 MPEG 비디오 멀티플렉서의 성능 분석

### Performance Analysis of the MPEG Video Multiplexer Considering Traffic Periodicity in Frame Level

강진규\*, 이창훈\*\*

Jin-Kyu Kang\*, Chang-Hoon Lie\*\*

#### ABSTRACT

In this study the cell arrival processes from pre-buffer into multiplexer for MPEG(Motion Picture Experts Group) coding video sources are analyzed with consideration of the traffic periodicity in frame level. The analysis is performed by introducing the two arrival models, that is, periodic on/off source model and periodic uniform arrival model. Modulated  $N^2/D/D/1$  queueing system is utilized in periodic on/off source model, while  $\Sigma N^2/D/D/1$  queueing system is used in periodic uniform arrival model. The presented models are validated by comparing with computer simulations. Numerical results for periodic uniform arrival model are shown to be very accurate, but those of periodic on/off source model are shown to be inaccurate as the number of sources are increased.

#### 1. 서론

MPEG(Motion Picture Experts Group)은 동영상의 압축·복원에 관한 국제적인 표준으로서, 압축후의 목표 비트율이 1~1.5 Mbps

인 MPEG-1과 3~20 Mbps인 MPEG-2는 이미 표준화가 완료되었거나 곧 완료될 예정이며, 수십 Mbps 수준의 비트율을 갖는 MPEG-4도 멀지 않은 시일내에 표준화가 이루어질 전망이다.

\* 대전산업대학교 산업공학과

\*\* 서울대학교 산업공학과

MPEG 코딩의 기본 개념은 프레임내 코딩(intraframe coding)과 프레임간 코딩(interframe coding)을 적절하게 조합하여 화면의 질과 전송 데이터의 압축도를 효과적으로 달성하자는 것이다. 즉 화면의 질을 높이고 오류의 전달을 방지하기 위해 주기적으로 프레임내 코딩을 수행하고, 전송되는 비트량을 줄이기 위해 프레임간 코딩을 프레임내 코딩의 프레임 사이에서 수행하는 것이다. 프레임내 코딩에 의해 압축된 영상은 I로 표시되며, 프레임간 코딩은 다시 예측(prediction)방식에 의한 영상(P로 표시)과 보간(interpolation)방식에 의한 영상(B로 표시)으로 구분된다.

따라서 MPEG에 의한 비디오 트래픽은 I, B, P 영상의 반복에 따라 프레임 내에서의 상관성(공간적 상관성)과 프레임간의 상관성(시간적 상관성)을 동시에 갖게 되며, 이는 셀 흐름상에서 프레임 단위의 주기성으로 나타난다.

이러한 MPEG 비디오 데이터의 주기성과 상관성은 비디오 멀티플렉서에 일시적 포화 및 지연 등의 현상을 일으키는 주된 요인이 된다. 이와 관련하여 비디오 트래픽이 주요 부분이 될 미래의 통신망에 대한 분석은 서비스 품질(QoS) 및 통신망 운영 차원에서 안정상태(steady state)에서의 평균적 개념보다는 시스템의 일시적 현상(transient behavior)에 대한 관심이 보다 필요한데, 본 연구는 이러한 관점에서 MPEG 비디오 멀티플렉서에 대한 수리적 분석을 시도하고자 한다.

이와 관련된 연구로서, Kröner[6]는 on/off 소스의 중첩 모형을 셀 수준과 버스트 수준으로 나누어 분석하였고, Norros[9], Roberts[13], Virtamo[15]는 주기적인 셀 도착이 이루

어지는 비디오멀티플렉서에 대한 대기모형 분석을 행하였으며, Kvoles[7]은 on/off 의 길이가 고정적인 경우의 주기적 on/off 소스에 대한 대기모형 분석을 시도하였다.

그러나 이들 연구는 MPEG 비디오 트래픽이 가지는 프레임 단위의 주기성, 즉 프레임의 종류에 따라 셀 발생수가 달라지는 특성을 고려하지 않았다. 즉, 프레임이 I, B, P 등으로 변화함에 따라 셀 발생수가 달라지게 됨으로써, 균일한 셀 전송시 주기적으로 셀 전송간격이 변하게 되며, 최대속도 전송시에는 on/off의 길이가 주기적으로 변하게 되는데, 이러한 트래픽 특성에 대한 수리적 분석이 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 MPEG 비디오 코더에서 발생된 셀이 pre-buffer를 거쳐 멀티플렉서에 입력되는 과정을, 최악의 트래픽 상황으로 프레임 단위의 최대속도 전송의 경우와 최선의 트래픽 상황으로 프레임내 균일속도 전송의 경우로 나누어, 이를 각각 주기적 on/off 소스 모형과 주기적 균일 도착 모형으로 파악하고, 각 경우에 대해 비디오 멀티플렉서의 성능 분석을 시도하고자 한다.

## 2. MPEG 비디오 데이터의 셀 흐름 과정

MPEG 비디오 코더에서 발생된 셀이 pre-buffer를 거쳐 멀티플렉서에 입력되는 과정은 그림 1과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 멀티플렉서의 성능에 영향을 주는 직접적인 트래픽은 pre-buffer를 거친 후의 셀 흐름 과정이다. pre-buffer는 비디오 코더에서 발생된 셀을 프레임 단위로 멀티플렉서에 전송하는 역할을 하

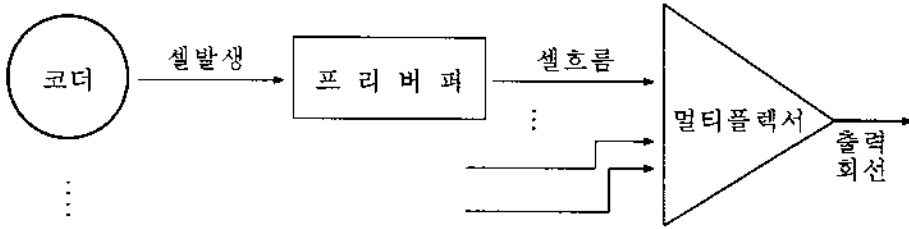


그림 1. 비디오 멀티플렉서

는데, 이의 물리적인 최대 속도를  $A$  cells/sec 라 할 때, 버퍼 또는 멀티플렉서의 상황에 따라 이 속도 이하로 셀을 전송하는 것을 가정할 수 있다. 일반적으로 비디오 소스에서 발생된 트래픽의 비트율을 조정하는 방법은 다음의 두가지에 의한다고 볼 수 있다.

첫째는 peak rate control로서, 이는 비디오 코더에서 정해진 양자화 단위(quantize scale)로 코딩된 결과 발생된 셀이 멀티플렉서에 보내지는 경우, 셀 수가 정해지면 프레임 내에서는 고정 비트율로 전송되는데, 코딩된 비트수가 미리 정해 놓은 값(peak threshold)보다 작으면 그대로 버퍼를 거쳐 멀티플렉서에 보내지만, 기준보다 크면 더 큰 양자화 단위로 다시 코딩하여, 비트율을 줄여 전송하는 것이다.

둘째는 shaping으로서, 이는 비디오 소스에서 발생된 프레임 단위의 셀을 멀티플렉서로 보내는 과정에서, 시스템의 상태에 따라 전송률을 조정하는 것이다.

이미 peak rate control을 코더에서 거친 후 발생된 셀이 버퍼를 거쳐 멀티플렉서에 입력되는 과정은 그림 2와 같이 세 가지 모형으로 파악할 수 있다.

그림 2의 (a)는 발생된 셀을 버퍼가 가지는 물리적인 최대 전송속도로 멀티플렉서에 보

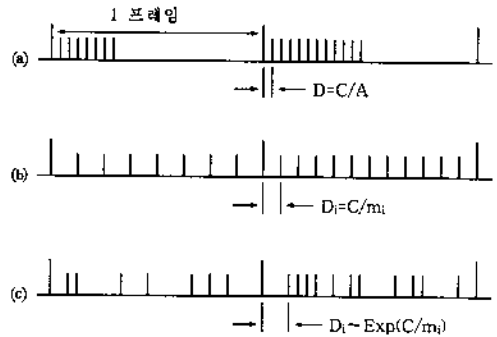


그림 2. 셀 도착 모형 (a) 주기적 on/off 소스 모형, (b) 주기적 균일 도착 모형, (c) 주기적 포와슨 도착 모형

내는 것으로, 멀티플렉서의 출력회선 속도를  $C$  cells/sec 라 하면, 1 셀당 전송시간은  $1/C$  초가 되고, 따라서 버퍼의 출력 속도를  $A$  cells/sec 라 하면, 셀 도착간격 시간,  $D=C/A$  으로 일정하다. 이는 트래픽에 어떠한 통제도 가하지 않으므로 실용성이 가장 좋으나, 네트워크의 성능에는 최악의 경우가 된다[7]. MPEG의 경우, I, B, P 방식에 의한 셀이 프레임 단위로 버퍼 출력회선의 최대 속도로 멀티플렉서에 전송된다. 이는 on의 길이가 각 방식에 따라 가변적인 주기적 on/off 트래픽(periodic on/off traffic) 모형으로 파악되며, 이러한 소스가  $N$  개 중첩된 경우는 주기적 on/off 소스의 중첩 모형이 된다.

그림 2 (b)는 프레임 단위로 발생된 셀을 그 프레임 기간에 동일한 셀 간격으로 전송 속도를 조정하는 것으로서, 궁극적인 shaper 개념이 적용된 것이다. 즉, I, B, P의 각 방식에 따른 평균 셀 발생수를  $m_i$ 라 할 때, 프레임의 종류에 따라 셀 발생간격이  $D=C/m_i$ 로 일정한 경우이다. 이는 프레임의 종류에 따라 프레임 단위로 셀 도착시간 간격이 변하는 주기적 CBR 트래픽 모형, 또는 주기적 균일 도착(periodic uniform arrival)모형으로 파악할 수 있다.

그림 2 (c)는 발생된 셀수에 따라 셀 도착시간이 평균  $C/m_i$ 의 지수분포를 따른다고 가정하는 주기적 포와슨 도착(periodic poisson arrival) 모형이다. 이는 코더에서 셀이 발생되는 과정을 프레임 이하 수준에서 관찰할 때 모형화할 수 있는 것이나, pre-buffer의 존재를 인정하게 되면 비현실적인 모형이 된다.

### 3. 주기적 on/off 소스 모형에 의한 분석

I 방식의 주기  $N$ , 한 GOP(group of picture) 내에서의 P 방식 주기  $M$ 인 MPEG 비디오 소스를 고려하자. 만약  $N=12, M=3$  이라면 프레임 순서는  $I\text{BBPBBPBBPBB}/I\cdots$ 와 같이 된다.

이제  $S$ 개의 동질의 소스가 중첩되어 있는 경우를 생각하자.

임의의 한 시점에서 그 프레임이 I, P, B 영상일 확률을 각각  $q_i (i=1,2,3)$ 라 하면, P 프레임은  $M$ 주기로 발생하나  $N$ 주기마다 I 프레임으로 나타나므로,

$$q_1 = \frac{1}{N}, \quad q_2 = \frac{1}{M} - \frac{1}{N} = \frac{N-M}{MN},$$

$$q_3 = 1 - q_1 - q_2 = \frac{N(M-1)}{MN} \quad (1)$$

이 된다. 각 상태에서의 프레임당 평균 셀 수를  $m_1, m_2, m_3$ 라 하고, 초당 프레임 수를  $f$ , on과 off상태에 있는 시간을 각각  $T_{on,i}, T_{off,i}$ 라 하면, 이의 셀 흐름은 그림 3에 나타난 바와 같고, 이들 개별 소스가 멀티플렉서에 다중화된 상태의 셀 흐름은 그림 4와 같다.

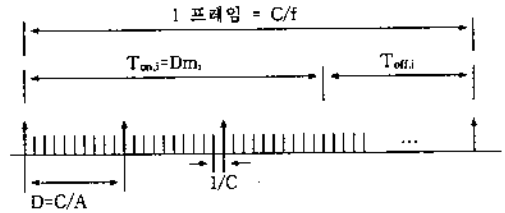


그림 3. 주기적 on/off 소스 모형의 셀 흐름

평균 on 상태 길이는  $D \cdot m_i$ 이므로, 임의의 시점에서 on 상태일 확률  $p_i$ 는,

$$p_i = \frac{f \cdot D \cdot m_i}{C}, \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

가 된다.

따라서 이 비디오 멀티플렉서 시스템은 서비스 시간이 일정하고( $1/C$ ), 서버가 하나이며, 도착이 주기적 on/off 소스 모형에 의해 일어나는 대기 시스템이다. 출력버퍼의 크기는 분석의 용이성을 위해 무한으로 가정한다.

임의의 시점에서 각 방식의 프레임이  $s_i$ 개씩 이라 하면, 이 대기시스템의 이용률  $\rho$ 는,

$$\begin{aligned} \rho &= \sum_{i=1}^3 \frac{s_i}{D} \cdot p_i \\ &= \frac{f}{C} \sum_{i=1}^3 m_i \cdot s_i \end{aligned} \quad (3)$$

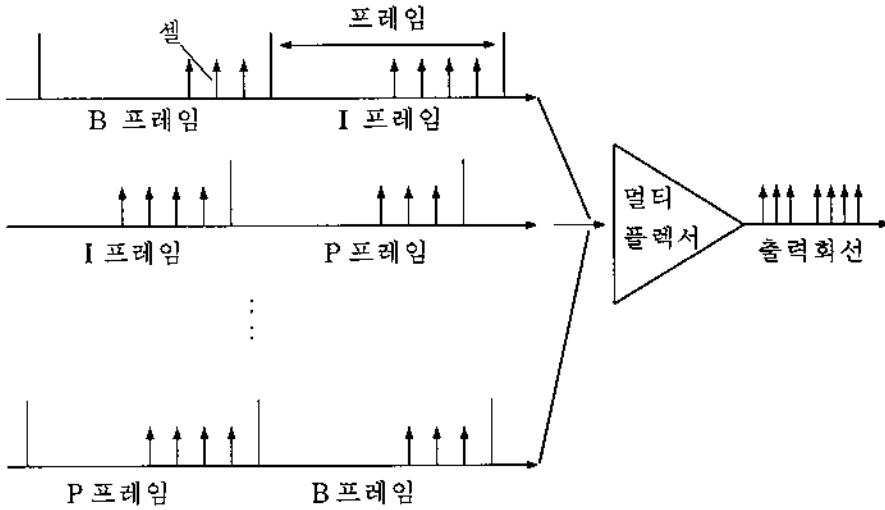


그림 4. 2차 셀 흐름 과정

이다.

시점  $t$ 에 대해서,  $L_t$  를 멀티플렉서의 시스템에 남아 있는 셀의 수라 하고,  $N(u, t)$  를 시간 구간  $[u, t)$  사이에 시스템에 도착하는 셀의 수라 하자. 또  $t$  시점에서 on 상태에 있는 MPEG 비디오 각 방식의 소스가  $n_i$  개씩 연결되어 있을 확률을  $U_i(n_1, n_2, n_3)$  라 하고, 그런 조건하에서  $x$  개 이상의 셀이 시스템에 존재할 확률을  $V_t(x)$  라 하자. 그러면,  $V_t(x)$ 는 시스템내 셀 수가 0인  $t$  이전의 임의의 시점  $t-s$  에서  $t$  까지  $s+x$ 개의 셀이 도착할 확률과 같다[13]. 즉,

$$\begin{aligned}
 V_t(x) &= \Pr\{L_t > x \mid n_1, n_2, n_3\} \\
 &= \sum_{s=1}^{\infty} \Pr\{N(t-s, t) = s+x\} \cdot \\
 &\quad \Pr\{L_{t-s} = 0 \mid N(t-s, t) = s+x\} \quad (4)
 \end{aligned}$$

이 된다. 그러면 시점  $t$  의 virtual waiting time, 즉, 시스템내의 셀 수 분포에 대한 생존함수

(survivor function),  $Q_t(x)$ 는 다음과 같다. 즉,

$$\begin{aligned}
 Q_t(x) &= \sum_{n_i \leq s_i} U_i(n_1, n_2, n_3) \cdot V_t(x) \\
 &= \sum_{n_i \leq s_i} U_i(n_1, n_2, n_3) \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \Pr\{N(t-s, t) = s+x\} \cdot \\
 &\quad \Pr\{L_{t-s} = 0 \mid N(t-s, t) = s+x\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

이 된다.

그런데 이 대기 시스템이 안정상태를 유지하기 위해서는 시스템 이용률  $\rho < 1$  이어야 한다. 이는 식(3)에 의하여  $\sum s_i p_i = \langle D \rangle$  인 조건이다. 이 조건을 만족하는 경우, 임의의 시간 구간  $[t-D, t)$ 에서 시스템 내에 존재하는 셀의 수가 0 인 시점, 즉, 대기 시스템이 빈상태가 반드시 존재하게 된다[7]. 따라서 이 모형은 시스템의 안정상태 조건 만족을 전제로 하면  $N^*D/D/1$  대기 시스템으로 근사화 할 수 있게 된다. 그림 5와 같이 시스템이 비는 시점  $t-s$ 를 시간 구간  $[t-D, t)$ 에서 고려하면, 식(5)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다. 즉,

$$Q(x) = \sum_{n_i \leq S_i} U_i(n_1, n_2, n_3) \cdot \sum_{s=1}^D \Pr \{ N(t-s, t) = s+x \} \quad i=1,2,3, n_i \leq S_i \quad (8)$$

$$\Pr \{ L_{t-s} = 0 | N(t-s, t) = s+x \} \quad (6)$$

이 된다. 식(6)의 우변은 3개의 확률 항으로 곱해진 상태이며, 이 각각의 확률을 효율적으로 구하는 것이 문제가 된다.

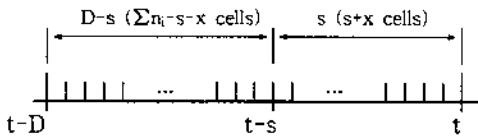


그림 5.  $[t-D, t)$ 에서의 시스템 상태

1)  $U_i(n_1, n_2, n_3)$ 의 계산

이는 S 개의 MPEG 비디오 소스가 연결되어 있을 때, 임의의 시점 t에서 I, P, B 방식의 프레임수가 각각  $s_1, s_2, s_3$  이고, 각각의 경우 on상태에 있는 프레임수가  $n_1, n_2, n_3$  인 확률의 곱이다. 각 방식의 프레임수가  $s_1, s_2, s_3$  일 확률을  $R_i(s_1, s_2, s_3)$  라 하면, 이는 시점 t에 관계없이 각각의 확률이  $q_1, q_2, q_3$  인 경우의 삼항 분포(trinomial distribution)를 따르게 된다. 즉,

$$R_i(s_1, s_2, s_3) = \frac{S!}{s_1! \cdot s_2! \cdot s_3!} q_1^{s_1} q_2^{s_2} q_3^{s_3},$$

단,  $s_1 + s_2 + s_3 = S, q_1 + q_2 + q_3 = 1$  (7)

이다. 또한, 각 프레임이 on 상태에 있을 확률은  $p_i$  의 모수를 갖는 베르누이 분포로 볼 수 있으므로,  $n_i$  개가 on 상태일 확률은,

$$P_i(n_1, n_2, n_3) = \prod_{i=1}^3 \binom{S_i}{n_i} p_i^{n_i} (1-p_i)^{S_i-n_i},$$

이 된다. 따라서,

$$U_i(n_1, n_2, n_3) = \sum_{\sum s_i = S} R_i(s_1, s_2, s_3) \cdot P_i(n_1, n_2, n_3) \quad (9)$$

이 된다.

2)  $\Pr\{N(t-s, t) = s+x\}$ 의 계산

구간  $[t-s, t)$ 에서  $s+x$  개의 셀이 도착할 확률은, 각 방식에 의한 셀 도착수를  $x_i$  라 할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$\Pr \{ N(t-s, t) = s+x \} = \sum_{\sum x_i = s+x} \prod_{i=1}^3 p_i(x_i) \quad (10)$$

이고,  $p_i(x_i)$  는 on 상태에 있는 각 방식의 프레임이 구간  $[t-s, t)$ 에서  $x_i$  개의 셀을 발생시킬 확률로서, 하나의 셀 도착이 일어날 확률은  $s/D$  의 확률을 가진 베르누이 시행으로 볼 수 있으므로,

$$p_i(x_i) = \binom{n_i}{x_i} \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^{x_i} \left(1 - \frac{s}{D}\right)^{n_i-x_i},$$

$i=1,2,3, n_i \leq S_i$  (11)

이 된다. 그러나 이 경우 on 상태에 있는 소스는 프레임의 형태에 관계없이 D 의 간격으로 셀을 보내기 때문에 식(10)과 식(11)은 다음과 같이 요약하여 쓸 수 있다. 즉,

$$\Pr \{ N(t-s, t) = s+x \} = \binom{\sum n_i}{s+x} \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^{s+x} \left(1 - \frac{s}{D}\right)^{\sum n_i - s - x}, \quad s+x \leq \sum n_i \quad (12)$$

이 된다.

3)  $\Pr\{L_{t-s}=0 | N(t-s, t)=s+x\}$ 의 계산

하나의 비디오 소스는 항상 D의 간격으로 셀을 보내기 때문에 임의의 시간구간  $[t-D, t)$ 에서 모든 소스는 하나의 셀을 보내게 된다. 따라서  $[t-s, t)$  구간에서  $s+x$  개의 셀이 도착하였다는 조건에서  $t-s$  시점에 버퍼에 셀이 존재하지 않을 확률은 시간 구간  $[t-D, t-s)$ 에서 나머지 셀이 균일하게 분포한다는 가정하에서 그 시점에서 셀 도착이 일어나지 않을 확률로 볼 수 있다. 즉,

$$\Pr\{L_{t-s}=0 | N(t-s, t)=s+x\} = 1 - \frac{\sum n_i - (s+x)}{D-s} = \frac{D - \sum n_i + x}{D-s} \quad (13)$$

이다. 따라서, 식(7)-(13)를 정리하면,

$$Q_t(x) = \sum_{n_1 \leq s} \sum_{\sum n_i = S} R_t(s_i) \cdot P_t(n_i) \cdot \sum_{s=t}^{\sum n_i - x} \left[ \frac{\sum n_i}{s+x} \right] \cdot \left[ \frac{s}{D} \right]^{s+x} \left[ 1 - \frac{s}{D} \right]^{\sum n_i - s - x} \cdot \frac{D - \sum n_i + x}{D-s} \quad (14)$$

이 된다.

식(14)는 동시에 on 상태에 있는 소스의 수  $\sum n_i$  가 셀 간격 D 보다 작을 때, 즉, 시스템이 안정 상태에 있을 때 정확하다. 그러나  $\sum n_i > D$  이면 순간적으로 버스트 수준의 포화 상태가 발생하는데 이는 매우 큰 셀 지연 혹은 셀 손실을 야기하므로, 셀 수준만이 고려된 식(14)는 한계를 갖게 된다. 그러나 시스템 유지를 위해  $\Pr(\sum n_i > D)$ 는 매우 작은 값,

예를 들어  $10^{-9}$  이하로 유지되도록 해야 하므로, 이를 고려하면 식(14)는 다음과 같이 약간의 수정을 거쳐 적용할 수 있게 된다. 즉,

(1)  $\sum n_i - x > D$ , 즉,  $x < \sum n_i - D$  이면, 이는 시스템의 일시적 포화상태를 나타내는 것으로 식(5)에서  $V_t(x)=1$  이라 할 수 있으므로,  $Q_t(x) = U_t(n_1, n_2, n_3)$  로 근사되고,

(2)  $\sum n_i - x \leq D$ , 즉,  $x \geq \sum n_i - D$  이면,  $Q_t(x)$ 는 식(14)를 그대로 적용한다.

4. 주기적 균일 도착 모형에 의한 분석

비디오 코더에서 발생된 셀이 버퍼의 물리적 최대 속도에 의해 전송되는 경우, 멀티플렉서에는 버스트 정도가 높은 트래픽이 입력되게 되어 셀 손실과 셀 지연의 측면에서 시스템의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 pre-buffer 에서 멀티플렉서에 셀을 전송하기 전에 트래픽의 버스트 정도를 낮추는 기능을 수행할 수도 있는데, 가장 궁극적인 형태는 프레임당 발생된 셀 수에 따라 멀티플렉서로의 전송률을 일정하게 조정하는 것이다. 따라서 한 프레임 내에서는 셀 도착간격이 일정하지만 셀이 많이 발생한 프레임에서는 보다 짧은 주기로, 셀이 적게 발생한 프레임에서는 긴 주기로 셀을 전송하게 되어 프레임 단위로 전송주기가 변하게 된다. MPEG 비디오 트래픽의 경우 I, P, B의 영상에 따라 뚜렷이 다른 셀 발생률을 보여주므로, 프레임의 영상 종류에 따라 전송 주기가 달라진다. 물론 각 방식마다의 영상에서도 셀이 많이 발생한 경우와 적게 발생한 경우를 구별할 수도 있으나, 그 차이는 시스템에서 조정할 수 있다고 보면, MPEG의 경우 세가지의 서

로 다른 전송 주기를 갖는 주기적 균일 도착 (periodic uniform arrival) 모형으로 파악된다. 따라서 이 경우의 멀티플렉서는  $\Sigma N_i * D_i / D$  모형, 유한 버퍼를 가정하는 경우,  $\Sigma N_i * D_i / D / 1 / K$  대기 모형으로 근사시킬 수 있다.

I, P, B 프레임의 프레임당 평균 셀 발생수를 각각  $m_1, m_2, m_3$  라 하면, 각 방식에 있어서의 셀 전송주기,  $D_i = C / (f \cdot m_i)$  이며, 이의 전형적인 셀 흐름이 그림 6과 같다.

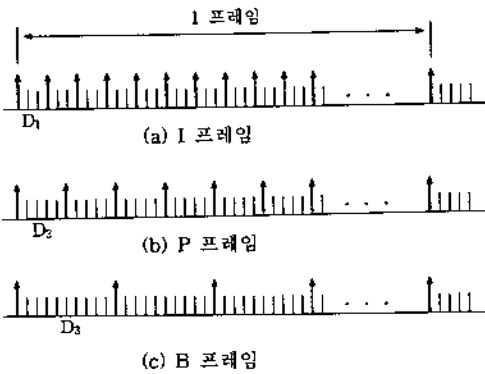


그림 6. 주기적 균일 도착 모형의 셀 흐름

S개의 MPEG 비디오 소스가 연결된 상황에서, 임의의 시점에서 각 방식의 소스 수가  $s_i$  개씩이라 하면, 이는 실제 셀 전송이 이루어지는 각 방식의 프레임 수  $n_i$ 와 같으므로, 시스템 이용률  $\rho$ 는, 다음 식으로 표현된다. 즉,

$$\rho = \sum_{i=1}^3 \frac{n_i}{D_i} = \frac{n_1 D_2 D_3 + n_2 D_1 D_3 + n_3 D_1 D_2}{D_1 D_2 D_3} \quad (15)$$

이 된다. 이제 D를  $D_1, D_2, D_3$  또는  $D_1, D_2, D_3$ 의 최소 공배수라 하면, 임의의 시간구간  $[t-D, t)$  에서 발생 가능한 최대 셀수  $n_0 = D \cdot \Sigma$

$(n_i / D_i)$  이며,  $\rho < 1$  인 조건을 만족하는 경우,  $[t-D, t)$  에서 임의의 시점에 시스템이 비어있을 확률이 존재하게 된다. 그 시점을 t에서부터 s이전의 시점이라 하면, 임의의 시점 t에서 x 이상의 셀이 존재할 확률은 t-s 시점에서 시스템이 비었다가  $[t-s, t)$  사이에서 s+x 개의 셀이 도착할 확률과 같다. 즉,

$$Q_t(x) = \sum_{\Sigma n_i = S} R_i(n_1, n_2, n_3) \sum_{s=1}^{n_0-x} \Pr \{ N(t-s, t) = s+x \} \cdot \Pr \{ L_{t-s} = 0 | N(t-s, t) = s+x \} \quad (16)$$

이다.

1)  $\Pr\{N(t-s, t) = s+x\}$  의 계산

$s/D_i$  의 정수부분을  $d_i, e_i = s/D_i - d_i$  라 하고,  $K_i$  를 모수  $n_i, e_i$  를 갖는 이항분포를 따른다고 가정하면, s 시간 동안 발생하는 셀의 수는 두 부분으로 나눌 수 있는데, 확정적인 값  $d = \Sigma d_i$  와 확률적인 값  $K = \Sigma K_i$  이다.

따라서, s 시간 동안 s+x 개의 셀이 발생할 확률은 K 가 s+x-d 의 값을 가질 확률이 된다. 즉,

$$\Pr \{ N(t-s, t) = s+x \} = \Pr \{ K = s+x-d \} \quad (17)$$

이다.  $k = s+x-d$  라 표시하면,

$$\Pr \{ K = k \} = \sum_{\Sigma k_i = k} \prod_{i=1}^3 \Pr \{ K_i = k_i \} \quad (18)$$

이고,  $K_i$  가 각각 이항분포를 따르므로,

$$p_i(k_i) = \Pr \{ K_i = k_i \}$$



$$= \binom{n_i}{k_i} e_i^{k_i} (1-e_i)^{n_i-k_i}, \quad k_i \leq n_i \quad (19)$$

이 된다.

2)  $Pr\{L_{t-s}=0 \mid N(t-s, t)=s+x\}$  의 계산

구간  $[t-D, t)$  사이에 발생하는 셀수  $n_D$  중  $s+x$  개가  $[t-s, t)$ 에 발생하게 되므로 나머지  $n_D-(s+x)$  개가  $[t-D, t-s)$ 에 발생한다. 만약 이들이 균일한 분포를 이룬다고 가정하면,  $[t-D, t-s)$ 구간의 임의의 시점에서 셀이 도착할 확률은  $(n_D-s-x)/(D-s)$  이고, 따라서 구하고자 하는 확률은 시점  $t-s$ 에서 셀 도착이 일어나지 않을 확률로 근사된다. 즉,

$$\begin{aligned} Pr \{ L_{t-s}=0 \mid N(t-s, t)=s+x \} &= 1 - \frac{n_D - (s+x)}{D-s} \\ &= \frac{D - n_D + x}{D-s} \end{aligned} \quad (20)$$

이다. 따라서 얻고자 하는 최종식은,

$$\begin{aligned} Q_1(x) &= \sum_{\sum n_i = S} R_1(n_1, n_2, n_3) \sum_{s=1}^{n_D-x} \sum_{\sum k_i = s+x-d} \\ &= \prod_{i=1}^3 p_i(k_i) \cdot \frac{D - n_D + x}{D-s} \end{aligned} \quad (21)$$

이 된다.

### 5. 시뮬레이션에 의한 모형의 검토

앞에서 제시한 수리적 모형의 타당성을 검토하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 절차는 그림 7과 같다.

시뮬레이션에 사용된 언어는 SIMAN이며, 수식의 계산은 Mathematica 소프트웨어에 의해 수행되었다. 시뮬레이션에 고려된 비디오

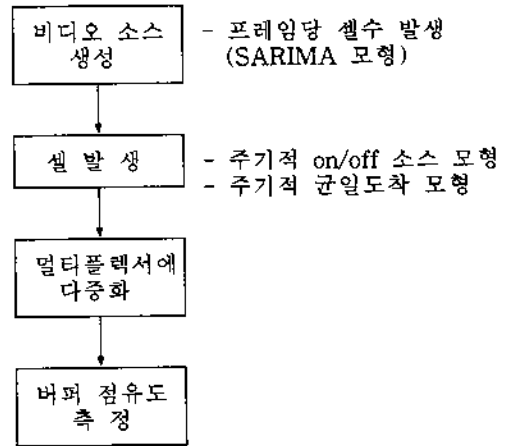


그림 7. 시뮬레이션 절차

소스는  $N=10, M=2$ , 즉 GOP의 구조가  $I/BPBPBPBP/I \dots$  인 MPEG 소스로 가정하였으며, 그 자료의 요약된 내용은 다음과 같다.

- 출력회선의 속도(C) : 150 Mbps
- 프리버퍼의 최대 전송속도(A) : 15 Mbps
- 셀 간격 :  $D = C/A = 10$
- 셀 발생 속도 :  
I프레임=5 Mbps, P프레임=2.5 Mbps, B프레임=1.25 Mbps

따라서 주기적 on/off 소스 모형에서의 확률값은,

$$q_1=0.1, q_2=0.4, q_3=0.5,$$

$$p_1=1/3, p_2=1/6, p_3=1/12$$

이고, 주기적 균일 도착 모형에서의 셀 발생 간격은,

$$D_1=30, D_2=60, D_3=120$$

이다.

비디오 소스의 수를 20, 30, 40에 대하여, 각 5 회씩 30-40 프레임에 걸쳐 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션의 시간을 줄이

기 위해, 프레임 동기화(frame synchronization)를 가정하였다. 즉, 예를 들어, 30개의 소스가 연결되어 있는 경우 임의의 시점에서 각 방식의 프레임수가 항상 평균값을 유지하도록 프레임의 시작 시점을 동기화 하는 것이다. 따라서 식(9)에서  $R(s)$ 항은 고려되지 않게 된다.

표 1. 버퍼점유도

S	구분		on/off 소스 모형		균일도착 모형	
	평균	분산	평균	분산	평균	분산
20	0.03208	5.93240	0.04799	4.97686		
30	0.10634	3.30976	0.13754	3.12084		
40	0.33486	2.82568	0.31233	2.21456		

표 2. 주기적 on/off 소스 모형의 시뮬레이션 결과(S=40)

x	Q(x)	시뮬레이션	식(14)
0	0.55601	0.55601	0.56396
1	0.18408	0.18408	0.21969
2	0.04261	0.04261	0.06906
3	0.00916	0.00916	0.01898
4	0.00237	0.00237	0.00471
5	0.00101	0.00101	0.00101
6	0.00082	0.00082	0.00022
7	0.00071	0.00071	4.09E-05
8	0.00058	0.00058	6.97E-06
9	0.00044	0.00044	1.08E-06

표 1은 시뮬레이션 결과 얻어진 각 모형의 버퍼점유에 대한 통계치이며, 표 2와 표 3은 각 모형에 대한  $Q(x)$ 를 수식과 시뮬레이션에 의해 구한 결과를 요약한 것이다. 또한, 그림 8, 그림 9는 각 모형에 대해 소스의 수가 20,

표 3. 주기적 균일 도착 모형의 시뮬레이션 결과(S=40)

x	Q(x)	시뮬레이션	식(21)
0		0.55724	0.54101
1		0.20545	0.20762
2		0.05816	0.06443
3		0.01431	0.01757
4		0.00330	0.00435
5		0.00072	0.00098
6		0.00017	0.00020
7		4.15E-05	3.84E-05
8		1.17E-05	6.63E-06
9		2.50E-06	1.28E-06

40인 경우  $Q(x)$ 값을 Log scale로 나타낸 것이다.

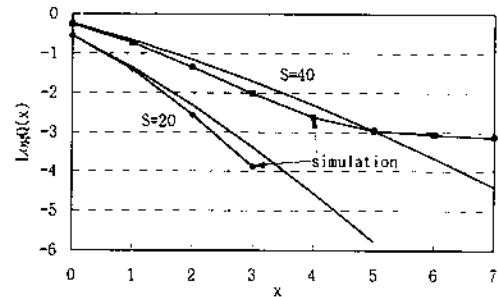


그림 8. 주기적 on/off 소스 모형의 시뮬레이션 결과

주기적 균일 도착 모형의 경우 수식에 의한 계산이 시뮬레이션 결과와 매우 유사한 것으로 나타났으나, 주기적 on/off 소스 모형의 경우는 다소의 오차를 보인다. 이는 표 1에서 보는 바와 같이 버스트 정도가 낮은 트래픽 하에서는 on/off 소스 모형이 균일 도착 모형보다 오히려 평균적으로 더 낮은 버퍼 점유율을 갖게 되어 버퍼의 셀 증가에 기여

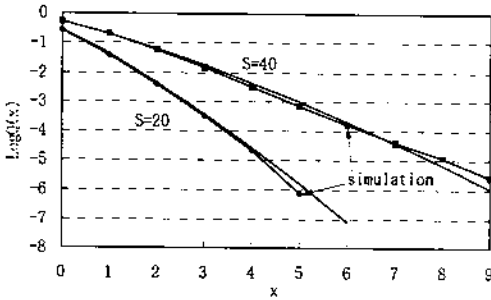


그림 9. 주기적 균일 도착 모형의 시뮬레이션 결과

하지 못하는 대신 트래픽 양이 많아지면, 일시적으로 버스트의 포화 현상이 나타나, 주기적 균일 도착 모형 보다 훨씬 큰 버퍼 점유 상태를 갖게 되기 때문이다.

따라서 식(14)는 버스트 포화 확률이 커짐에 따라 그 정확도가 떨어지는 한계를 갖게 된다. 이 시뮬레이션의 경우,  $S=40$  이면 버스트 포화 확률  $\Pr(\sum n_i > D)$ 가 0.045정도로 매우 큰 값을 갖게 되어 오차의 원인이 되었다. 그러나 이 확률은 시스템의 안정성을 위해서는 거의 0에 가까운 값이 되지 않으면 안되므로 크게 영향을 미치지 못한다고 할 수 있다.

### 6. 결론

프레임 단위로 트래픽의 주기성을 가지는 MPEG 코딩 비디오 데이터가 프리버퍼를 거친 후 멀티플렉서로 입력되는 2차 셀 흐름에 대한 분석이 두가지 모형에 의해 수행되었다. 즉,

- (1) 최악의 트래픽 상황으로서 주기적 on/off 소스 모형과
- (2) 최선의 경우로서 주기적 균일 도착 모

형

이다. 주기적 on/off 소스 모형은  $N^*D/D/1$  대기 시스템을 기초로 하여 MPEG의 트래픽 특성을 반영한 형태로 수립되었으며, 주기적 균일 도착 모형은  $\sum N_i^*D/D/1$  대기 시스템을 기초로 수립되었다.

제시된 모형은 시뮬레이션을 통하여 검증되었다. 주기적 균일도착 모형은 시뮬레이션 결과와 매우 유사하게 나타났다. 그러나 주기적 on/off 소스 모형의 수리적 결과는 소스의 수가 증가하면 정확도가 떨어지는데, 이는 on 상태의 소스 수가 많아지면 일시적으로 버스트 수준의 포화가 발생하여 급격한 셀 지연 증가가 일어나기 때문이다. 이를 보완하기 위해서는 셀 수준의 분석과 더불어 버스트 수준의 분석이 병행되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Baiocchi, A., Bléfari-Melazzi, N., Roveri, A. and Salvatore, F., "Stochastic Fluid Analysis of an ATM Multiplexer Loaded with Heterogeneous ON-OFF Sources : an Effective Computational Approach", *INFOCOM '92*, 405-414, 1992.
- [2] Cosmas, J. and Odinma-Okafor, A., "Characterisation of Variable rate Video Codecs in ATM to a Geometrically Modulated Deterministic Process Model", *Teletraffic and Datatrafic*, 773-780, 1991.
- [3] COST 224 Final Report, "Performance Evaluation and Design of Multiservice Networks", 101-189, 1991.
- [4] Heyman, D. P. and Tabatabai, A., "Statist-

- ical Analysis and Simulation Study of Video Teleconference Traffic in ATM Networks", *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 2, No. 1, Mar. 49-59, 1992
- [5] Izmailov, R. and Ayanoglu, E., "Priority Statistical Multiplexing of Mixed VBR Video and CBR Traffic in B-ISDN/ATM with Threshold Algorithm", *Proc. IEEE*, 910-918, 1993.
- [6] Kröner, H., "Statistical Multiplexing of Sporadic Sources - Exact and Approximate Performance Analysis", *Teletraffic and Datatraffic*, 787-793, 1991.
- [7] Kvoles, K. and Blaabjerg, S., "Bounds and Approximation for The Periodic On/Off Queue with Applications to ATM Traffic Control", *INFOCOM '92*, 487-494, 1992.
- [8] Manthorpe, S., Schormans, J., Pitts, J. and Scharf, E., "A Simulation Study of Buffer Occupancy in the ATM Access Network : Are Renewal Assumptions Justified ?", *Teletraffic and Datatraffic*, 801-805, 1991.
- [9] Norros, I., Roberts, J. W., Simonian, A. and Virtamo, J. T., "The Superposition of Variable Bit Rate Sources in an ATM Multiplexer", *IEEE J. sel. areas in Comm.*, Vol 9, No. 3, 378-387, Apr. 1991.
- [10] Pancha, P. and Zarki, M. E., "Bandwidth Requirements of Variable Bit Rate MPEG Sources in ATM Networks", *Proc. GLOBECOM '93*, 902-909, 1993.
- [11] Reininger, D. and Raychaudhuri, D., "Statistical Multiplexing of VBR MPEG Compressed Video on ATM Networks", *Proc. GLOBECOM '93*, 919-926, 1993.
- [12] Reininger, D., Melamed, B. and Raychaudhuri, D., "Variable Bit Rate MPEG Video: Characteristics, Modeling and Multiplexing", *ITC 14*, 295-306, 1994.
- [13] Roberts, J. W. and Virtamo, J. T., "The Superposition of Periodic Cell Arrival Streams in an ATM Multiplexer", *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 39, No. 2, 298-303, Feb. 1991.
- [14] Simonian, A. and Virtamo, J., "Transient and Stationary Distributions for Fluid Queues and Input Processes with a Density", *SIAM J. APPL. MATH.*, Vol. 51, No. 6., 1732-1739, Dec. 1991.
- [15] Virtamo, J. T. and Roberts, J. W., "Evaluating Buffer Requirement in an ATM Multiplexer", *Proc. GLOBECOM '89*, 1473-1477, 1989.