

# 대화형 VOD 서비스 구축을 위한 네트워크 구조 설계 및 분석

학생회원 정승욱\*, 정회원 정수환\*

## A Design and Analysis on Network Architecture for Interactive VOD Services

SungWook Jung\* *Student Member* Souhwan Jung\* *Regular Members*

### 요 약

VOD 서비스를 제공하기 위해서는 대용량의 저장매체와 전송 대역이 필요하며 이를 위해서는 막대한 네트워크 구축 비용이 필요하다. 이러한 VOD 서비스 구축 비용을 줄이기 위한 방법으로 분산 서버 구조를 바탕으로 한 망 계위 설계, topology에 따른 서버 위치 최적화, 프로그램 caching 등에 관한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 분산 트리 구조의 망에서 하위 준위와 상위 준위 링크간의 물리적인 전송 대역의 차이에 따른 전체 준위의 변화와 비용의 관계를 분석하여 전체 준위 크기의 제한 조건을 도출하였으며, 각 노드에서의 가지수와 비용의 관계를 분석하여 물리적으로 주어진 링크간의 전송 대역의 차에 적합한 망 구조를 설계하였다. 따라서 본 연구 결과는 VOD 서비스 제공에 적합한 경제적인 망 구조 설계와 노드 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### ABSTRACT

High-speed network resources and large storage devices on video servers are necessary to provide interactive VOD services to subscribers, therefore, building networks for VOD services requires a huge amount of cost. A number of studies on network hierarchy for distributed tree architecture, on optimized server allocation with a given network topology, and on program caching etc, are currently in progress.

In this study, given specific network resources, a cost effective network architecture including the optimal number of tree levels and the optimal number of branches at a node are designed by modeling cost functions, and some restrictions on network design are discussed. The results of this study are expected to be applied to network architecture design for interactive VOD services

### I. 서론

가까운 미래에 구축될 ATM 등의 초고속 정보통신 망에서 제공하는 광대역 네트워크 자원의 최대 수효는 멀티미디어 서비스, 그 중에서도 특히 고품질 영상정보를 가입자의 요구에 따라서 제공하는 Video

On Demand(VOD) 서비스가 될 것이다. VOD 서비스가 제공하는 동영상은 JPEG, MPEG, 디지털 HDTV 등이 주로 사용될 전망이며 이들 영상 데이터의 전송대역은 한 가입자에게 하나의 stream이 제공된다고 가정할 때, 동영상 JPEG은 약 10Mbps, MPEG-I 은 약1.5Mbps, MPEG - II는 6Mbps, 디지털 HDTV는

\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 초고속통신 연구실(swjung@ifcom.soongsil.ac.kr)

\*\* 숭실대학교 정보통신전자공학부(souhwanj@saint.soongsil.ac.kr)

논문번호:98307-0720,접수일자:

※ 본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제(981-0915-074-2) 지원으로 수행되었습니다.

20Mbps등이 요구된다. 즉 수천 혹은 수만의 가입자에게 이와 같은 서비스를 동시에 제공하기 위해서는 수십 혹은 수백 Gbps 단위의 전송대역이 필요하게 된다. 따라서 압축된 영상 stream의 저장을 위한 storage 공급이나 영상 프로그램 전송을 위한 전송대역의 확보 등을 위해 막대한 비용이 필요하다. 망 구성비용을 줄이기 위해서는 프로그램 caching 이나 stream sharing과 같은 기술의 적극적인 활용이 요구되고 있다<sup>1)</sup>.

망은 일반적으로 ATM 기간 망, ATM 지역 망, 가입자 망 등으로 계위 구조를 이룰 것이며 비디오 서버는 각 계위 준위의 교환기에 설치될 것이다. 예를 들어 국간망은 OC-48, OC-12등 지역망은 OC-12, OC-3등으로 구성할 수 있을 것이며 고속 가입자망을 구성하기 위해서 ADSL, VDSL 등의 기술들이 개발되고 있다.

지금까지 선행된 연구들에서 전송 대역과 저장 매체 비용의 trade-off 관계를 이용하여 망 구성비용을 최소화하기 위해서 분산 시스템이 제시되었고 이를 바탕으로 교신성의 정도를 높이고 또한 비용을 최소화하는 프로그램 caching에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 망 구성비용을 최소화하기 위해서 전송 대역 비용함수와 매체 비용함수를 정의하고 프로그램 Caching을 이용한 망의 관리를 이용하며 비용함수의 trade-off관계를 이용하여 가장 효과적인 망 구성에 초점을 둔다.

이 논문의 구성은 다음을 따른다. II장에서는 망의 논리적인 구조를 정의하고 효과적인 망의 사용을 위한 영화의 배치를 정의하고 III장에서는 망의 구성의 효율성을 비교할 수 있는 비용함수를 논의하며 IV장에서는 III장에서 정의한 비용함수를 이용하여 여러 가지 망의 구성을 비교하여 보고 마지막으로 V장에서는 결론을 정리한다.

## II. 망 구조와 프로그램 caching

### 2.1 망 구조

일반적으로 망의 물리적 구조와는 달리 논리적이고 계층적으로 관리되고 조직될 것이므로 망 구성 비용에 대한 분석을 단순화하기 위해서 논리적인 망 구조를 그림 1과 같이 balanced r-ary 트리라고 가정하였다. 각 트리의 노드는 교환기를 나타내며 노드와 노드를 선로라고 하고 마지막 준위의 노드를 headend라고 하고 headend 수의 총합을 H 라고 정의하였다. 그리고 각 교환기에는 영화를 저장할 수 있

는 서버가 붙을 수 있다. 그리고 각 계위 구조의 준위를 l로 나타내고 마지막 준위를 L이라고 나타내며 root 준위를 0 준위라고 정의하고 l 번째 준위에서 downstream방향의 선로를 l 준위 선로라고 하였다. 그리고 망 전체 사용자를 U 라고 나타내고 headend 당 사용자를 n이라고 나타내면 headend의 수, headend당 사용자의 수, 전체 사용자의 수, 가지의 수 그리고 마지막 준위의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>2)</sup>.

$$n = \frac{U}{H} = \frac{U}{r^L} \tag{1}$$

Balanced tree구조를 가진다고 가정하였기 때문에 각 준위의 선로들은 모두 동일한 전송 대역을 가지고 그리고 준위 l의 선로와 준위 l-1의 선로의 논리적인 전송 대역, 예를 들어서 OC-12와 OC-48,의 비율( $\alpha$ )을 식 (2)와 같이 정의하고 일반적인 경우로 확장하여 모든 준위의 전송 대역의 비가 동일한 망 구조를 가정하고 그 비를  $\alpha$  라고 하면,\*

$$\alpha = \frac{B_{l-1}}{B_l} \tag{2}$$

와 같이 정의할 수 있다. 여기에서  $B_l$ 은 l 준위의 downstream방향의 선로의 전송 대역이다<sup>3)</sup>.

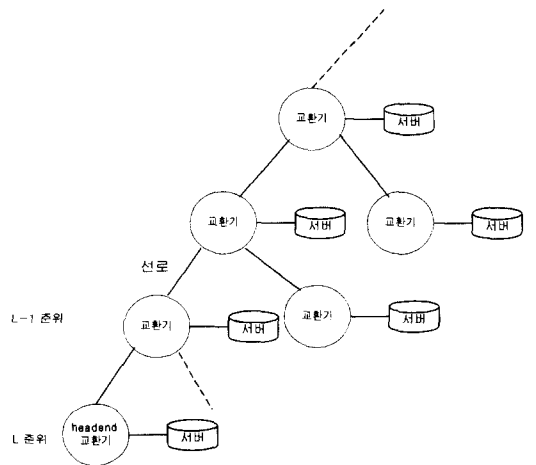


그림 1. 분산 망의 트리 구조

### 2.2 영화의 위치 선정

분산 망에서의 영화의 배치는 인기도가 높은 영화일수록 사용자측에 가까운 서버에 저장하는 방법이

가장 효과적이다. 인기도에 따라서 영화를 저장하는 준위를 달리하는 방법으로 메모리 caching과 비슷한 개념으로서 가장 자주 사용자들이 이용하는 영화를 사용자에게 가장 가까운 서버에 위치시키고 사용자들이 적게 이용하는 영화는 사용자로부터 멀리 있는 서버에 위치시키는 것이 망을 가장 효율적으로 이용하는 것이 될 것이다<sup>[3]</sup>. 각 영화에 대한 사용자들의 이용 빈도를 나타내기 위해서 Zipf's law를 이용하였다. Zipf's law는 주어진  $M$  개의 영화를 가장 인기 있는 영화부터 내림차순으로 인기도에 따라서 정렬을 하였을 때  $i$  번째 영화가 선택될 확률을 나타내며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$z(i) = X/i, X = 1 / \sum_{i=1}^M (1/i) \quad (3)$$

여기서  $z(i)$ 는  $i$  번째 영화를 사용자가 access할 확률이며,  $X$ 는 정규화 상수이다.

각 노드의 downstream 방향 선로의 전송 대역의 비가 일정( $\alpha$ )할 때 각 준위의 교환기에 붙어있는 서버에서 서비스해야 하는 영화 stream중 상위 준위로부터 오는 영화 stream의 비율은  $\frac{\alpha}{r}$ 와 같고 따라서 영화 stream중 각 준위의 각 서버에서 저장하고 있어야하는 비율은  $1 - \frac{\alpha}{r}$ 와 같이 된다. 그리고  $\frac{\alpha}{r}$ 의 값이 1보다 크다고 하면 모든 영화는 root에 있는 server에서 모든 영화를 제공하는 것이 된다. 따라서 사용자들이 전체 준위가  $L$ 인 임의의 망에서 전체 영화 편수를  $M$ 이라고 할 때 headend에 저장해야 할 영화는 가장 인기도가 높은 영화로부터  $i_L$  번째 영화까지를 저장한다고 했을 때 망 선로의 효율을 최대한 높이기 위해서는 식 (4)를 만족시키는  $i_L$  번째 영화까지를 저장해야 한다<sup>[3]</sup>.

$$\sum_{i=1}^{i_L} z(i) = 1 - \frac{\alpha}{r} \sum_{i=i_L+1}^M z(i) \quad (4)$$

$$= \frac{\alpha}{r}$$

그리고  $L-1$  준위의 각 서버에 저장 해야할 영화는  $i_L$ 까지의 영화가 headend에 저장되어 있다는 조건하에서  $i_{L-1}$  번째까지의 영화를 저장하는 것으로서 식 (5)를 만족시켜야 한다.

$$\frac{\sum_{i=i_{L-1}+1}^{i_L} z(i)}{\sum_{i=i_L+1}^M z(i)} = 1 - \frac{\alpha}{r} \quad (5)$$

그리고  $L-1$  준위의 서버는 그 위의 선로로부터 받아들이는 영화의 비율은 식 (6)과 같다.

$$\frac{\sum_{i=i_{L-1}+1}^{i_L} z(i)}{\sum_{i=i_L+1}^M z(i)} = \frac{\alpha}{r} \quad (6)$$

따라서 식 (5)와 식 (6)에서  $\sum_{i=i_{L-1}+1}^{i_L} z(i) = (\frac{\alpha}{r})^2$  을 유도할 수 있고 임의의  $L-K$  준위에 대하여 식 (7)을 구할 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\sum_{i=i_{L-K}+1}^{i_L} z(i) = (\frac{\alpha}{r})^{K+1} \quad (7)$$

식(7)이 현실적으로 정확하게 만족되지 않는 경우에는 우변을 가장 근접하게 만족하는  $i_{L-K+1}$  번째 영화를 찾아서  $i_{L-K+1}+1$  번째 영화부터  $i_{L-K}$  까지  $L-K$  준위에 있는 각 서버에 영화를 저장하면 된다. 만약  $L-K$  준위가 마지막 영화가 저장되는 준위라고 하면 이 준위에  $i_{L-K+1}+1$  번째 영화부터  $M$  번째 영화까지 저장될 것이다.

### III. 비용 함수

망 구성비용에 영향을 미치는 요소들은 매우 다양하다<sup>[5]</sup>. 따라서 각각의 망 구성 요소 비용을 전부 계산하는 것은 매우 어렵고 복잡하며 많은 시간을 요하므로 본 논문에서는 망 비용 중 사용자 단말측 장치인 Set-Top Box(STB) 비용과 가입자망의 비용을 제외한 비디오 서버의 비용과 기간망의 전송대역 비용만을 고려하고자 한다. 앞장에서 언급한 영화의 위치 결정방법에 따라 가장 효율적인 영화의 위치 선정을 위해 비용함수를 결정하고 이를 최소화하는 방법에 대하여 논의하고자 한다.

#### 3.1 망 선로 비용

망의 전송 대역 ( $B_1$ )이 증가함에 따라서 대역폭 당 가격은 감소한다고 가정한다. 선로 구성에 드는 고정 비용을  $a_1$ 이라고 하고 전송 속도에 따른 가격 상승분을  $a_2$ 라고 하면 식 (8)과 같이 망 선로 당 가격을 결정할 수 있다.

$$\text{비용/선로} = a_1 + (a_2 \times B_1) \quad (8)$$

따라서 전체 망 선로 비용을 결정하기 위해서 각

선로별로 비용을 산출하여 이를 합하면 될 것이다. Headend에서 서비스해야 할 대역폭은 headend당 사용자 수에 의해 결정될 것이며 사용자당 한편의 영화만을 요청한다고 가정하고 모든 사용자가 동시에 영화를 요청하여 시청하고 있다고 가정하면 headend에서 서비스 해야할 대역폭은 headend당 사용자 ( $n$ )와 영화 한편을 서비스하기 위해서 소모되는 대역폭 ( $B_s$ )의 곱 즉  $n \times B_s$  이 될 것이다. 그리고  $L-1$  준위 선로 대역폭은  $n \times B_s \times \alpha$  가 될 것이며  $L-K$  준위 선로 대역폭은  $n \times B_s \times \alpha^K$  와 같으며  $L-K$  준위의 선로 수는  $r^{L-K+1}$  와 같이 될 것이다. 가장 인기없는 영화가 저장되는 준위를  $L_i$  이라고 하면 전체 망의 선로 비용( $C_l$ )은 식 (9)와 같이 될 것이다. 여기서 가입자망 비용은 고려하지 않으므로 망 전체 선로 비용에서  $L$  준위의 선로 비용은 제외시켰다.

$$C_l = \sum_{i=1}^{L-L_i} (a_1 + a_2 \frac{U}{r^L} B_s \times \alpha^K) \times r^{L-k+1} \quad (9)$$

### 3.2 서버 비용

서버는 영화를 저장할 수 있는 하드디스크의 집합으로 생각할 수 있으므로 우선 하드디스크의 가격을 결정하여 이들의 대수적인 합으로 서버의 총 비용을 결정할 수 있을 것이다. 하드디스크의 가격을 결정하는 요소로 내부 대역폭과 디스크의 용량만을 고려하였고 저장 매체의 비용도 망 선로 비용과 마찬가지로 저장 용량( $C$ )이 증가하고 내부 입출력 대역폭( $B_d$ )이 증가할수록 저장 용량과 내부 입출력 대역폭 당 가격은 감소한다고 가정한다. 기본적으로 하드디스크를 생산 설치하는데 드는 비용을  $k_1$  라고 하고 저장 용량 당 대역폭 당 가격 상승분을  $k_2$  라고 하면 디스크 당 가격은 식(10)과 같다<sup>4)</sup>.

$$\text{비용/디스크} = k_1 + (k_2 C B_d) \quad (10)$$

시뮬레이션에서는 모든 영화의 크기는 동일하다고 가정하였으며 디스크의 크기는 항상 영화의 크기 (1GB)와 동일하다고 가정하고 디스크의 내부 대역폭을 변화시키면서 각 영화를 저장하기 위한 디스크 비용을 산출하였다. 영화는 인기도와 준위에 따라서 요구되는 대역폭이 달라질 것이다. 식 (7)을 이용하여  $L-K$  준위의 각 서버에 저장될 것 영화를 구하면  $i_{L-K+1} + 1$  번째 영화부터  $i_{L-K}$  번째 영화가

지 저장될 것이며 이 서버에서 서비스해야 할 사용자의 수는  $n \times r^K$  와 같이 될 것이다.  $L-K$  준위에 저장되어 있는 각 영화에 대하여 내부 대역폭은 식 (11)와 같이 될 것이다.

$$B_d = n \cdot r^K \cdot B_s \cdot z(i) \quad (11)$$

$$i_{L-K+1} + 1 \leq i \leq i_{L-K}$$

따라서  $L-K$  준위의 각 서버당 비용은 식 (12)와 같이 될 것이다.

$$\sum_{i=i_{L-K+1}}^{i_{L-K}} (k_1 + k_2 \cdot n \cdot r^K \cdot B_s \cdot z(i)) \quad (12)$$

그리고  $L-K$  준위의 서버의 수는  $r^{L-K}$  와 같이 되므로 각 준위 당 서버 비용은 식 (13)과 같이 될 것이다.

$$r^{L-K} \cdot \sum_{i=i_{L-K+1}}^{i_{L-K}} (k_1 + k_2 \cdot n \cdot r^K \cdot B_s \cdot z(i)) \quad (13)$$

영화가 저장되는 망 전체 서버 비용( $C_d$ )은 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$C_d = \sum_{K=0}^L (r^{L-K} \cdot \sum_{i=i_{L-K+1}}^{i_{L-K}} (k_1 + k_2 \cdot \frac{U}{r^L} \cdot r^K \cdot B_s \cdot z(i))) \quad (14)$$

망 비용은 망 선로 비용과 망 서버 비용으로 생각할 수 있으므로 식 (15)을 전체 네트워크 비용 합수로 정의하였다.

$$C_t = C_l + C_d \quad (15)$$

## IV. 실험 결과 및 토의

### 4.1 $a/r$ 의 변화에 따른 망 비용의 변화

전체 사용자 수는  $10^{10}$  명으로, 영화 수를 1000편으로, 영화 당 전송대역을 6Mbps로, 전체 준위를 10으로,  $a_1=4, a_2=1, K_1=10, K_2=1$ 로 가정하고  $a/r$  를 변화시키면서 각 준위별로 비용을 조사하였다.

준위가 상위(root에 가까운 방향)일수록 하나의 서버 비용은 높을 것이다. 그러나 하위 준위일수록 서버의 수가 지수적으로 증가할 것이므로 준위별 서버

비용은 상승할 것이다. 식 (14)를 이용하여 준위별 서버 비용을 시뮬레이션 한 결과도 그림 2(a)와 같이  $a/r$  이 매우 큰 경우를 제외하면 하위 준위일수록 준위별 서버 비용이 증가하는 결과를 얻었다.

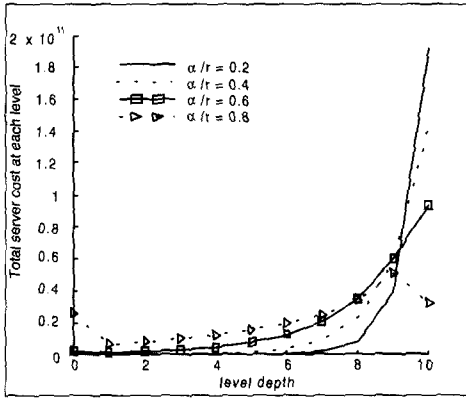


그림 2(a). 각 준위별 사용자 당 서버 비용

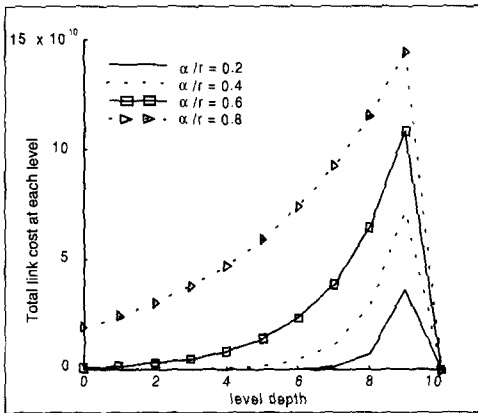


그림 2(b). 각 준위별 사용자 당 선로 비용

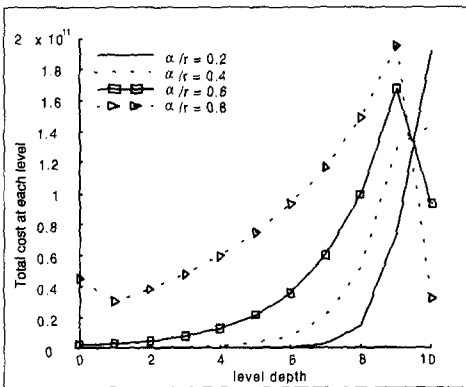


그림 2(c). 각 준위별 사용자 당 망 구성 비용

동일한 준위에서  $a/r$  이 작을수록 상위 준위로부터 서비스 받아야 할 영화의 수가 감소할 것이므로 선로 비용이 적게 들 것이다. 식 (9)를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과도 그림 2(b)와 같이  $a/r$  이 작을수록 선로 이용이 줄어든다는 결과가 나왔다.

준위별 망 구성 비용은 식 (15)와 같이 준위별 선로 비용과 서버 비용의 합으로 생각 할 수 있으며 그림 2(c)와 같은 결과가 나왔다. 전체 망 구성 비용은 근사적으로 그림 2(c)에서  $a/r$  곡선의 적분에 비례한다고 생각할 수 있을 것이며 그림 2(a)의  $a/r$  곡선의 면적과 그림 2(b)의  $a/r$  곡선의 면적으로 분리하여 분석할 수 있을 것이다.

그림 2(a)에서  $a/r$  의 변화에 의한 망 전체 서버 비용은 크게 변화하지 않는다는 것을 알 수 있으며 그림 (b)에서  $a/r$  가 증가할수록 망 전체 선로 비용은 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서  $a/r$  변화에 의한 전체 망 구성 비용 변화의 주요한 요소는 선로 비용이 된다는 것을 알 수 있으며  $a/r$  가 적을수록 즉 영화를 headend에 가까운 곳으로 분산시킬수록 root에 영화를 저장하는 집중화된 저장 방식에 비해서 선로 비용이 감소하여 전체 망 구성의 비용측면에서 유리하다는 것을 알 수 있다. 그리고 망 전체 비용을 감소시키기 위해서  $a/r$  를 충분히 작게 하여 가장 인기 없는 영화가 저장되는 준위를 headend 쪽으로 이동시키면 선로 비용이 상당히 감소할 것으로 예상된다.

#### 4.2 전체 준위의 변화에 따른 망 비용의 변화

실험 4.1에서 망 구성비용을 감소시키기 위해서 선로 비용을 감소시켜야 한다는 것을 밝혔다. 따라서  $a/r$  를 매우 적게 하면, 즉 영화를 분산시켜서 저장하면 망 구성비용을 줄일 수 있을 것이다. 그러나  $a/r$  가 매우 작은 경우 대부분의 영화가 하위 준위에 저장될 것이므로 전체 준위의 증가에 의한 서버 비용의 증가는  $r^2$ 에 비례하여 증가 할 것이 예상된다. 따라서 전체 준위가 적절한 준위이하로 한정된다는 것을 예상할 수 있다.

전체 망 구성 비용에 서버 비용과 선로비용의 기여도는  $a_1, a_2, K_1, K_2$ 에 따라 달라질 것이다. 이번 실험에서는 전체 준위의 증가에 따른 서버 비용 증가로 인한 전체 망 구성 비용의 상승을 막기 위해서 망의 전체 준위 크기가 어떤 범위 내로 제한되어야 한다는 것을 쉽게 관찰 할 수 있도록  $K_1, K_2$ 를 각각 400,100으로 증가시켰고 나머지 요소는 실험 4.1과

동일하게 하였다.

식 (14)를 이용하여 구한 그림 3(a)에서는 앞에서 예상한대로  $a/r$  이 작은 경우 전체 준위가 증가함에 따라 서버 비용의 지수적인 증가를 보였다.  $a/r$  이 큰 경우 대부분의 영화가 root에 저장될 것이므로 전체 준위의 증가에 서버 비용은 큰 영향을 받지 않을 것이며 실험의 결과와 일치한다.

그림 2(b)는 식 (9)를 이용하여 전체 준위의 변화에 의한 선로 비용의 변화를 구한 것이다.  $a/r$  이 작은 경우 headend에 대부분의 영화가 저장될 것이므로 식 (9)의  $L_i$  이 매우 클 것이다. 따라서 선로 비용은 전체 준위의 변화에 의한 영향을 적게 받을 것이며  $a/r$  이 큰 경우 즉 대부분의 영화가 root 서버에 저장될 경우 전체 준위의 증가에 의하여 선로 비용은 거의 선형적으로 증가 할 것이다.

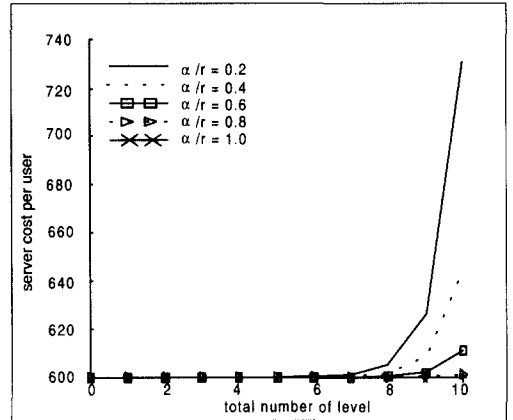


그림 3(a). 전체 준위의 변화에 의한 사용자당 서버비용의 변화

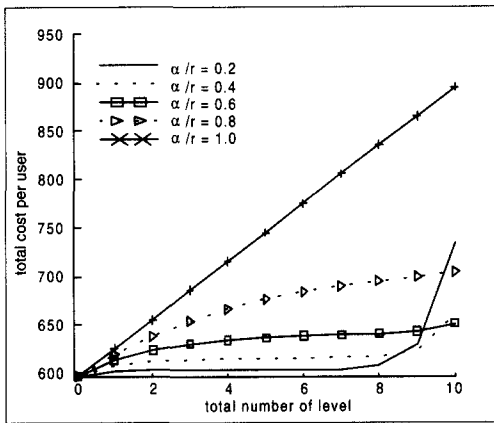


그림 3(c). 전체 준위의 변화에 의한 사용자 당 전체 망 구성 비용의 변화

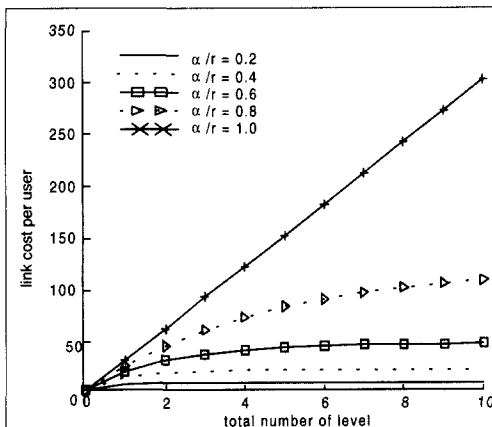


그림 3(b). 전체 준위 변화에 따른 사용자당 선로 비용의 변화

그림 3(c)은 식 (15)를 이용하여 전체 준위의 증가에 의한 망 구성 비용의 변화를 구한 결과이며  $a/r$  가 작은 경우 전체 준위의 변화에 따른 망 구성 비용 변화의 주요한 요소는 서버 비용이 되는 것을 보여 준다. 따라서 서버 비용이 급격히 증가하지 않는 범위 이하로 전체 준위가 제한되어야 알 수 있다. 그림 3(c)에서 전체 망 준위가 작을수록 망 구성비용이 적게 든다는 것을 알 수 있다. 그러나 하나의 headend에 너무 많은 사용자들이 있다면 사용자의 요구가 blocking되거나 서비스가 늦어져 QoS가 낮아지게 된다<sup>6)</sup>. 따라서 망 구성시 전체 준위를 무한정 작게 할 수는 없을 것이지만 전체 준위의 범위가 서버 비용이 급격히 증가하지 않는 범위로 제한시켜야 한다. 만약 사용자들이 매우 많아서 서버 비용이 급격히 증가하지 않는 범위 안으로 망 전체 준위가 제한되지 않으면 노드의 가지수( $r$ )를 증가시켜서 망 전체 준위를 감소시켜야 할 것이다. 그러나  $r$ 의 증가는 서버의 개수의 증가를 의미하는 것이므로 어떤 적당한  $r$ 의 값으로 제한되어야 것이다.

#### 4.3 가지수( $r$ )의 변화에 따른 비용의 변화

가지수의 변화에 따른 망 구성비용의 변화를 관찰하기 위해서 전체 준위를 10으로 하고 나머지 변수는 5.1의 실험과 같은 값으로 실험을 하였다.

$r$ 의 증가에 의한 망 구성 비용 변화 요인은 다음 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째는  $r$ 의 증가에 의한 headend 당 사용자 수의 감소와 각 준위 당 서버 수가 증가하는 현상이며 두 번째  $a/r$ 의 감소에 의한  $L_i$ 의 증가하는 현상이다. 두 번째 현상은  $L_i$ 이  $L$ 와 같이 될 때까지 존재하게 될 것이

다.

$r$ 의 변화에 의한 서버 비용의 변화를 관찰하기 위해서 식 (14)를 이용하였으며 그 결과 그림 4(a)와 같이 나왔다. 영화가 분산되어 저장되어 있을수록 즉  $\alpha$ 가 작을수록  $L_i$ 은 거의  $L$ 과 같으므로 두 번째 요인은 서버 비용에 큰 영향을 주지 못하며 첫 번째 요인의 작용에 의하여  $r$ 에 비례하여 서버 비용이 변화할 것이다. 반대로  $\alpha$ 가 큰 경우에는 두 번째 요인을 무시할 수 없다.  $L_i$ 이 감소하므로서 서버 수가 감소하여 서버 비용의 증가가 둔화되는 현상이 나타났다.

식 (9)를 이용하여  $r$ 의 변화에 의한 선로 비용의 변화를 실험한 결과 그림 2(b)와 같은 결과를 얻었다. 선로 비용의 경우 headend당 사용자 수의 감소로 인하여 선로 당 전송 대역폭의 감소와 각 준위 당 서버 수의 증가에 의한 선로 수 증가가 서로 상쇄되어 첫 번째 요인은 무시할 수 있을 것이다. 따라서 두 번째 요인에 의해서만 선로 비용이 영향을 받는다고 생각할 수 있으며 서버 비용에서와 마찬가지로  $\alpha$ 가 클수록 두 번째 요인의 영향을 많이 받을 것이다.  $r$ 이 증가하면  $L_i$ 이 증가하여 비용에 영향을 주는 선로의 수가 감소하여 선로 비용이 줄어들 것이다.

그림 4(c)는 식 (15)를 이용하여  $r$ 의 변화에 의한 전체 망 구성 비용의 변화를 구한 것이다. 앞에서 설명한 두 가지 요소의 trade-off에 의하여 주어진  $\alpha$ 에 적당한  $r$ 이 있다는 것을 알 수 있다.  $\alpha$ 가 작을수록 두 번째 요인에 의한 선로 비용과 서버 비용은 변화는 나타나지 않게 되고 첫 번째 요인의 작용에 의한 서버 비용이 변화에 따라 망 구성 비용은 변화하게 될 것이다.  $\alpha$ 가 클수록 두 번째 요인의 영향이 커지게 될 것이므로  $r$ 의 증가는 서버 비용과 선로 비용의 감소 요소로 작용하게 될 것이며  $L_i$ 이 headend 준위와 같은 준위가 될 때까지 작용하게 될 것이다.  $L_i$ 이 headend 준위와 같은 준위가 되면 두 번째 요인은 망 구성 비용 변화에 영향을 주지 못하며 첫 번째 요인만이 망 구성 비용 변화에 영향을 줄 것이므로  $r$ 에 비례하여 망 구성 비용이 급격히 증가하기 시작할 것이다.  $\alpha$ 의 그래프는 이러한 현상을 잘 보여 주고 있다. 결론적으로 주어진  $\alpha$ 에 따라서 망 구성시 적절한  $r$ 을 선택해야 한다는 것을 알 수 있으며  $\alpha$ 가 작은 경우  $r$ 을 작게 하여 망을 구성하는 것이 비용 측면에서 효과적이며  $\alpha$ 가 큰 경우  $\alpha$ 가 작은 경우 보다 상대적으로  $r$ 를

크게 하여 망을 구성하는 것이 효과적이라는 사실을 알 수 있다.

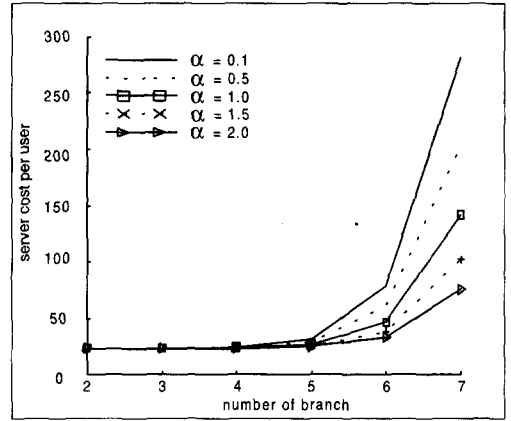


그림 4(a). 노드 가지수 변화에 의한 서버 비용의 변화

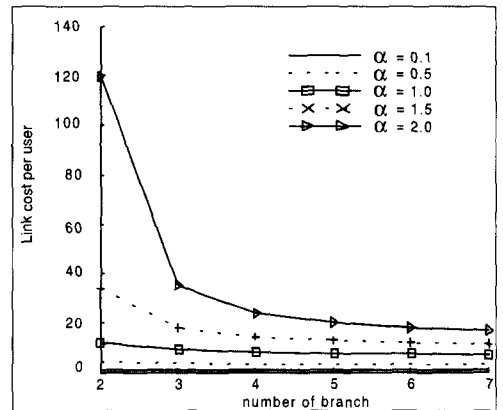


그림 4(b). 노드의 가지수 변화에 의한 선로 비용의 변화

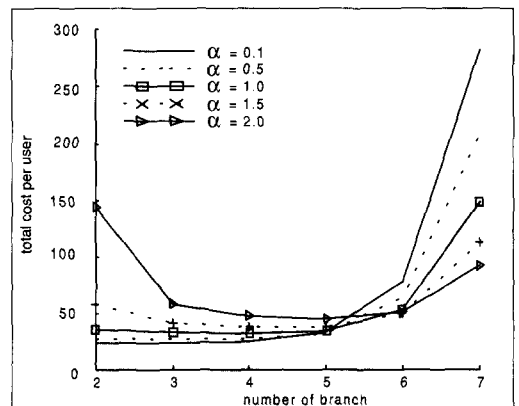


그림 4(c). 노드의 가지수 변화에 의한 전체 망 구성 비용의 변화

