
스트리밍 서비스를 위한 적은 지연의 응용계층 멀티캐스트 트리 구축

Building Low Delay Application Layer Multicasting Trees for Streaming Services

김종경

백석대학교 정보통신학부

Jong-Gyung Kim(jokykim@hanmail.net)

요약

스트림 재생의 질은 스트리밍 서버의 부과된 부하(loads)와 종단간의 전송경로의 트래픽에 의한 지터(Jitter)의 두 가지 요인에 의해 결정된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위하여 적은 지연 레벨 멀티캐스트(Low Delay level multicast) 트리 구축 방법을 제안하고자 한다. 또한, 스트리밍 질을 고려하여 네트워크의 혼잡이 발생할 경우는 전송 경로를 동적으로 변경하는 기법을 제안한다.

이 기법은 첫째, 서버의 과부하를 완화하기 위한 오버레이 구조를 구축하고 둘째, 클라이언트의 지터를 감소하기 위하여 종단 간 사용가능한 업로드(Upload) 대역폭과 지연(Latency)의 비가 균형을 이루도록 트리를 구성한다.

본 논문의 성능 평가를 위하여 본 논문과 유사한 P2CAST[4]와 비교하여 참여노드 평균 접속회수, 평균 대역폭 사용량, 서비스 요청 거부율, 노드 수에 따른 RTT 측정, 그리고 결함확률에 따른 평균 노드 접속 수 등을 실험한 결과, 약 15%~24% 정도의 성능 향상을 보였다.

■ 중심어 : |스트리밍 서비스|P2P|응용계층 멀티캐스트|ALM|

Abstract

The quality of stream remaking is decided the load of a server and Jitter through the traffic of the transmission path between end to end. In order to improve these problems in this paper, I propose tree construction method of low-delay-level-multicast. In this case which the network congestion will be occurred by streaming quality, I also propose the technique which dynamically changes the transmission path.

This technique first constructs the overlay structure for relaxing the overload of server. Secondly, in order to decrease Jitter of client, it makes upload bandwidth and low latency balanced. In the evaluation of the performance, this paper showed better enhancement of about 15%~24% than P2CAST[4] in the simulation about node average join count, average bandwidth, service request refusal ratio, RTT measurement of nodes, and node average join count by defect ratio.

■ keyword : |Streaming Services|P2P|Application Layer Multicast|ALM|

I. 서론

스트리밍 서비스는 서버의 대역폭을 절약하는 방식으로 하나의 스트리밍을 다수의 클라이언트들이 공유하는 개념의 멀티캐스트 기법을 사용한다. 이 문제점들을 해결하기 위한 대안으로 많은 논문들이 응용계층 멀티캐스트(Application layer multicast)를 활용하는 기법들을 제안하였다[1-4].

응용계층 멀티캐스트 기법에서 멀티캐스트의 효율은 오버레이 토폴로지 구성에 의해 대부분 결정되어진다. 응용계층에서 트리의 구성은 네트워크 토폴로지 정보를 이용하여 라우터(Router)가 수행하는 방법과 달리 라우팅 정보가 없는 상태에서 데이터를 전송을 하게 된다. 이는 불필요한 패킷을 복제하게 되거나 지연이 증가하는 문제점이 발생하게 될 뿐만 아니라 네트워크의 혼잡으로 이어질 가능성이 높아진다. 그러므로 효과적인 전송경로의 선택은 신중하게 결정해야하는 문제이다. 일반적으로 스트림 재생의 질은 스트리밍 서버에 부과된 부하(loads)와 종단간의 전송경로의 트래픽에 의한 지터(Jitter)의 두 가지 요인에 의해 결정된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 지연에 민감한 스트리밍 서비스에 유용한 적은 지연 레벨 멀티캐스트(Low Delay level multicast) 구조를 구축하는 기법을 제안한다. 제안내용은 첫째, 서버의 과부하를 완화하기 위한 오버레이 구조를 구축하는 것이고 둘째, 클라이언트의 지터를 감소하기 위하여 종단간 적은 지연과 사용가능한 업로드 대역폭의 비가 균형을 이루는 멀티캐스트 전송 트리를 구성하는 기법이다.

이를 구현하기 위하여 참여시간(Join time)과 일정 버퍼시간과의 시간차이를 기준으로 세션 및 피어 레벨을 구성한다. 레벨에서는 가장 적은 지연과 사용 가능한 대역폭 가진 피어들을 연결하는 멀티캐스트 트리를 구성하는데, 그 방법은 다음과 같다. 첫째, 트리의 높이는 낮고 넓게 유지한다. 둘째, 지연(Round-Trip Time 혹은 Hop)과 사용가능한 대역폭을 고려하여 트리를 구축한다. 셋째, 스트리밍 질을 고려하여 네트워크의 혼잡이 발생할 경우는 전송 경로를 동적으로 변경한다. 이러한 기법은 서버의 수용성을 늘려주고, 네트워크의 지연을

최소화할 수 있다.

이 논문의 구성은 제 1장에서는 연구배경의 전반적인 개요를, 제 2장에서는 관련 연구를 언급한다. 제 3장에서 본 논문에서 제안하는 낮은 지연의 레벨 멀티캐스트 트리 구축 기법에 대하여 기술하고, 제 4장 실험 및 고찰에서는 본 논문의 제안기법과 P2Cast[4]에 대하여 비교한 실험결과를 보여준다. 마지막으로 제 5장에서 결론을 기술한다.

II. 관련 연구

응용계층 멀티캐스트 기법은 응용계층에서 종단 시스템을 멀티캐스트 트리로 구성하는 방식이다. Coopnet[3]과 SplitStream[6]은 실시간 비디오 스트리밍을 위한 시스템으로서 Multiple Description Coding을 적용하여 피어의 장애가 발생하더라도 데이터의 손실을 최소화한다. 이는 VOD를 위한 기능은 지원하지 않지만 재생점이 다른 사용자들을 관리하는 기법은 제공되지 않는다.

ZIGZAG[1]는 계층 구조의 클러스터 기반 기법으로서 모든 멤버들을 확장성 있는 계층 구조로 형성하고, 동적 특성들을 소화할 뿐만 아니라 멀티캐스트 트리의 제어 트래픽을 감소시킬 수 있으나 네트워크의 유동적인 환경에서 개념적인 대역폭을 다루는 이러한 기법들은 현 인터넷에서 적용하기엔 무리가 따른다. 특히 VOD 스트리밍 서비스에는 이런 구조로는 해결될 수 없다.

P2Cast[4]는 본 논문과 유사한 논문으로서 패칭을 사용하여 VoD 서비스 설계에 초점을 둔 응용 계층 멀티캐스트 기법이다. 이 논문은 장애가 발생할 때마다 서버가 개입하여 해결하는 방식을 사용함으로써 서버의 병목현상 때문에 문제가 발생할 소지가 크다.

III. 적은 지연 레벨 멀티캐스트 트리

1. 개요

스트리밍 서비스를 받기 위해서 적은 지연 레벨 멀티캐스트 피어들은 가장 최근에 개설된 멀티캐스트 트리의 해당 세션과 레벨에 참여해야만 한다.

참여 방법의 기본 개념은 다음과 같다. 새로운 세션은 새로이 참여하려는 피어의 시간과 바로 이전에 참여한 피어의 시간의 차이가 일정 버퍼크기를 초과할 때는 새로 참여한 피어를 루트 피어로 개설되고, 그렇지 않을 경우는 기존 세션에 참여시킨다. 레벨은 같은 세션 안에서 일정 버퍼 크기 시간마다 체인 형태로 트리를 구성하여 자식피어에게 동일한 스트림 데이터 블록을 전송하기 위한 피어들의 그룹 단위이다.

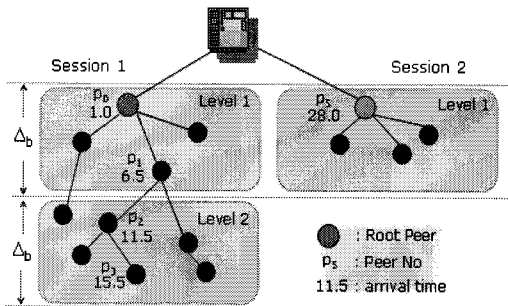


그림 1. 적은 지연의 레벨 멀티캐스트 트리의 예

[그림 1]은 적은 지연의 레벨 멀티캐스트 트리의 구성하는 예를 보여주고 있다. 이 그림에서 버퍼크기를 10이라고 했을 때, 피어 P_0 가 시간 1.0에 스트림 서비스를 받기 위하여 세션1의 루트 피어로 참여하여 새로운 레벨1에 참여한다. 시간 6.5에 P_1 이 참여하였다고 가정할 때, P_1 은 세션1의 레벨1에 있는 피어들 중에서 사용 가능한 업로드 대역폭과 지연사이의 최대값을 이루는 P_0 를 부모피어로 하여 트리에 참여하였다. 그리고 시간 11.5에 P_2 가 멀티캐스트 트리에 참여하려고 했을 때, P_0 의 참여시간의 차이가 Δ_b 를 초과하여 다른 레벨을 구성하여 트리에 참여하게 된다. 한편, P_3 는 시간 28.0에 트리에 참여하려고 하였지만 세션1의 레벨2에서 가장 늦게 참여한 P_3 의 요청시간 15.5와의 시간차이가 Δ_b 를 초과하여 새로운 세션인 세션 2를 루트로 하는 트리를 구성하게 된다.

2. 적은 지연 레벨 멀티캐스트 트리 구축

멀티캐스트 분배 트리를 구축하는데 있어서 동시에 비용 및 지연 등과 같은 여러 측정 요소들을 최소화하는 것은 NP-Complete 유형의 Steiner Tree Problem으로 알려져 있다[5]. 따라서 여러 피어들에게 동시에 스트림 분배하기 위한 효율적인 멀티캐스트 트리 구축 방법은 어떤 측정 요소를 우선적으로 고려할 것인가 하는 문제로 귀결된다.

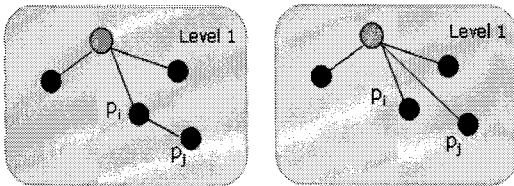
본 논문의 멀티캐스트 트리는 서버의 과부하의 해소와 지터 문제를 완화하기 위한 참여 지연을 가장 우선적으로, 대역폭을 차선으로 선택하여 구축하는 기법을 사용한다. 참여 지연을 줄이기 위한 기본적인 참여 전략은 가장 최근에 형성된 세션의 레벨에 참여된 리프 노드로 접근한다. 리프 노드의 부모 대역폭이 새로운 자식 클라이언트를 받아들이기 위해 충분할 경우는 리프 노드의 형제 피어로 참여하고, 그렇지 않을 경우는 리프 피어의 자식피어로 참여하는 피어 참여 알고리즘을 사용하는데 실행 순서는 아래와 같다.

- 단계 1 : 적은 지연의 레벨 멀티캐스트 트리에 참여하려는 클라이언트는 우선 서버에 접속을 하여 가장 최근에 생성된 세션 루트의 IP 주소를 가지고 세션 루트에 접근을 시도한다.
피어 P_j 의 서비스 요청시간 t_j 라고 하고 당 세션의 레벨그룹에 처음 참여한 시간을 t_0 와 레벨그룹의 마지막으로 참여한 시간을 t_n 이라고 했을 때 다음 방법에 의해 세션과 레벨그룹을 형성한다. 우선 레벨 그룹의 형성은 조건식 $t_j - t_0 \leq \Delta_b$ 에 만족할 경우는 P_j 을 기존 세션의 레벨그룹에 참여시키고, 아닐 경우는 새 레벨을 형성하여 참여시킨다. Δ_b 시간마다 새로운 레벨그룹을 형성하여 자식 피어들에게 연속적 비디오 스트림을 전송하는 멀티캐스트 트리를 구성한다. 그리고 세션의 형성은 참여피어 P_j 가 조건식 $t_j - t_n > \Delta_b$ 이 만족하였을 경우는 새 세션을 설정하여 P_j 를 루트 피어로 참여시켜 서버로부터 스트림의 처음 부분부터 전송받게 한다.

- 단계 2 : 멀티캐스트 세션에 참여를 원하는 클라이언트는 세션 루트로부터 해당 레벨에 참여하고 있는 피어들의 집합 $S_{(l)}$, 부모후보 피어 P_i 의 업로드 대역폭을 $rate_{p_i \rightarrow p_j}$, 그리고 P_i 와 P_j 의 지연을 $l_{p_i \rightarrow p_j}$ 라고 정의 할 때, 식.1에 만족하는 피어를 찾는다.

$$\max_{p_i \in S_{(l)}} \left(\frac{rate_{p_i \rightarrow p_j}}{l_{p_i \rightarrow p_j}} \right) \quad (1)$$

- 단계 3 : 리프 피어 P_i 는 자신의 부모 피어가 P_j 의 요청을 수용할 대역폭이 존재하는지를 파악한다. 만약에 P_i 의 부모 피어가 P_j 를 서비스할 충분한 대역폭을 가지고 있으면 이 클라이언트를 [그림 2]의 (b)와 같이 P_i 의 부모 피어의 자식피어 즉, P_i 의 형제 피어로 참여시키고, 그렇지 않을 경우는 [그림 2]의 (b)와 같이 P_i 를 부모피어로 참여시킨다.



(a) p_j 를 p_i 의 자식노드로 참여 (b) p_j 를 p_i 의 형제노드로 참여

그림 2. 클라이언트 참여 프로세스

이와 같이 레벨을 체인 형태의 넓고 짧은 트리는 네트워크 트래픽을 절감하는 장점을 가지고 있다. 또한, 적은 참여 지연시간을 위한 참여 프로세스에서 리프 피어로 참여하는 방식은 연속적인 스트리밍 서비스를 원활히 수행하도록 도움을 준다.

3. 결합탐지 및 전송경로 변경

스트림을 제공하는 피어가 장애로 인하여 어떤 클라이언트가 멀티캐스트 트리에서 단절이 되었다면 새로운 부모 피어를 선택해야만 한다.

멀티캐스트 트리에 참여되어 있는 피어들이 스트림 서비스를 받을 수 없게 되는 경우는 다음의 두 가지이

다. 첫 번째의 경우는 링크의 혼잡이 발생하는 경우로, 혼잡 링크와 인접해있는 모든 경로는 부정적인 영향을 받는다. 이 혼잡 링크를 결합 탐지를 하기 위하여 피어에게 r_{min} 을 부여하고 P_i 와 P_j 의 스트림 전송률 $rate(p_i \rightarrow p_j)$ 일 때, $rate(p_i \rightarrow p_j) < r_{min}$ 이 성립되면 전송결합이 발생하였다고 추정할 수 있는데 다음 두 가지의 경우이다.

3.1 부모피어 P_i 가 이탈인 경우

이 경우는 위의 첫 번째에 해당하는 것으로 자식 피어 P_j 가 부모 피어 P_i 에게 스트림 전송저하 메시지를 보낸다. 만약 P_i 가 어떤 응답도 없으면 트리에서 이탈한 경우로 P_j 는 새로운 부모를 찾아 멀티캐스트 트리 로 복원시키기 위해 3.1절에 언급한 방법을 사용한다.

3.2 부모피어 P_i 가 살아있는 경우

이 경우에는 그러나 P_i 가 살아있다면 P_i 와 조부모 피어 P_k 사이의 전송률 $rate_{p_k \rightarrow p_i}$ 을 측정하게 된다. 첫째는 $rate_{p_k \rightarrow p_i} \geq r_{min}$ 으로 전송경로의 전송률은 문제가 없지만 P_i 와 P_j 사이에서 r_{min} 이하로 떨어지는 경우이다. P_j 는 P_i 에게 해지 메시지를 보내고 새로운 부모 피어를 선정하는 알고리즘을 수행한다. 둘째의 경우는 $rate_{p_k \rightarrow p_i} < r_{min}$ 으로 P_j 의 부모피어와 조부모피어 P_k 사이에서 전송경로 혼잡 때문에 발생하는 문제이다. P_j 의 부모피어 P_i 는 조부모피어 P_k 에게 해지 메시지를 보낸다. 그리고 P_i 는 자신의 조부모피어들 중에서 식. 1에 만족하는 피어를 선택하여 멀티캐스트 트리를 재연결 시킨다. 이러한 프로세스는 프로세스의 부하를 줄이기 위해 필요에 따라 순환적으로 수행한다.

IV. 실험 및 고찰

본 논문의 성능을 평가하기 위하여 다음의 측정 기준에 의거 시뮬레이션 기법을 사용한다.

- (1) 참여 성공을 위한 피어들의 평균 접속 횟수 와 (2)

피어들의 평균 네트워크 사용량에 대한 정보 그리고 (3) 클라이언트가 스트림 서비스를 받기 위하여 서버에 참여 하였을 때 서비스 요청 거부율을 측정하였다. 또한, (4) 피어의 수에 따라 트리의 질을 평가하는 RTT 수치와 (5) 부모피어의 결합으로 인하여 복원을 위한 Peer의 평균 접속 횟수 즉, Recovery 동안에 접속한 클라이언트 피어 수를 의미하는 것으로 얼마나 빨리 결합에 대해 복원하는 가를 측정하였다.

P2cast와 비교 실험을 위하여 동일한 환경으로 구성하고 시뮬레이션은 SSFNet[7] 시뮬레이션 프레임워크를 사용하였으며, SSFNet은 프로세스 기반 이산 사건 중심 시뮬레이션 커널(Process-based Discrete Event-oriented Kernel)이다. 시뮬레이션 커널의 소스는 공개되지는 않았으나 그 중에서 네트워크의 시뮬레이션을 지원하는 라우터 링크 네트워크 인터페이스 카드 등 대부분의 인터넷 서브시스템들을 시뮬레이션 하는데 필요한 다양한 객체들이 자바언어로 시스템을 변경하여 구현할 수 있다.

전체 네트워크는 총 100 노드들로 4 노드들로 구성된 하나의 Transit 네트워크와 12 Stub 도메인으로 구성하였다. 이 네트워크에서 각 노드는 하나의 클라이언트를 구성할 수 있으며, 비디오 스트림을 제공할 수 있는 충분한 대역폭을 가지고 있는 LAN이다. 두 노드 사이의 라우팅은 Shortest Path Algorithm을 사용하였으며 네트워크 대역폭 용량은 동시에 22개를 처리할 수 있는 backbone 링크와 7개의 비디오 스트림을 제공할 수 edge 링크로 설정하였다. 서버는 Transit 네트워크에 설치하고 서버에 저장된 비디오는 100분 길이의 하나의 비디오를 사용하는 것을 가정한다. 그리고 클라이언트의 도착율은 포아송 분포(Poisson distribution)에 따르며 새로 도착한 클라이언트는 네트워크 노드들 중에서 임의의 위치에 참여시킨다. 멀티 캐스트 트리를 형성된 이후에 2분마다 하나의 클라이언트가 Connection Failure 발생하도록 하였다. 이것은 Failure 장에 의한 재연결의 성능을 살펴보기 위해 사용된다.

[그림 3]은 참여를 희망하는 피어들의 수에 따라 참여를 위하여 접속한 피어들의 평균횟수를 측정한 결과이다. 본 제안기법의 빠른 트리 탐색으로 인하여

P2Cast보다 적은 접속 횟수로 부모피어를 선택하는 결과를 보여준다. 전체 네트워크 트래픽에 많은 영향을 미치게 된다.

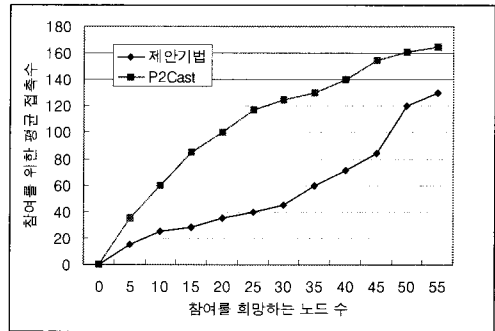


그림 3. 참여 평균 접속 횟수

[그림 4]는 요청회수에 따른 피어들의 평균 대역폭 사용량을 측정한 그림이다. 본 제안기법이 P2Cast보다 대역폭 사용이 적은 것으로 나타났으며, 이는 적은 지연을 가지는 피어들을 연결하여 트리를 구축한 결과라 생각된다.

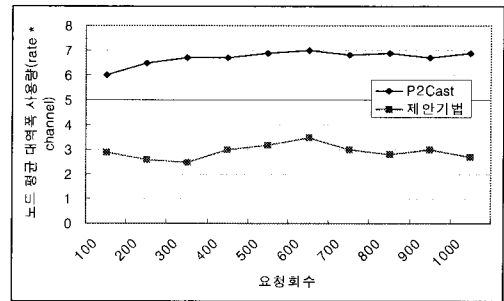


그림 4. 요청회수에 따른 평균 대역폭 사용량

[그림 5]는 스트림 서버로 서비스를 요구하는 클라이언트들의 요청횟수에 따라 서비스 요청 거부 비율을 나타내는 그래프이다. 이 그림에서 유니캐스트 기법은 클라이언트들이 서버로 요청하는 횟수가 많아지면 요청 거부율이 증가한다. 본 제안기법은 P2Cast보다 우수한 성능을 보이고 있는데, 이는 세션과 레벨을 구성하는 피어들이 서버의 역할을 대신한 결과로 서비스 요청 거부율이 낮은 것으로 판단된다.

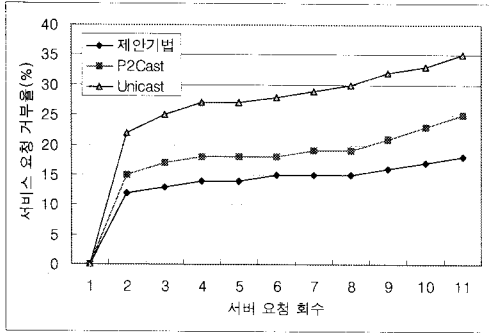


그림 5. 서비스 요청 거부율

[그림 6]은 노드 참여 수에 따른 RTT 측정된 수치이다. 트리를 형성한 피어들 사이에 지연의 정도를 측정 한 것으로써 P2Cast 보다 약 30% 정도의 지연이 낮은 것으로 나타났다.

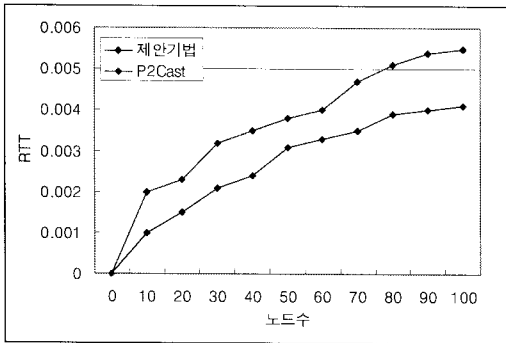


그림 6. 노드 수에 따른 RTT 측정

[그림 7]은 결합확률에 따라 복원을 위한 피어들의 평균 접속 횟수를 측정 한 그림이다. 멀티 캐스트 스트림을 전송하는 도중 전송경로의 결합과 혼잡이 발생하면 새로운 부모 피어에 대한 재연결 평균 접속 횟수를 표현한 것이다. 본 논문의 제안기법은 인접해 있는 피어를 찾아 한 홉씩 상향식 방식을 채택하는 복구 트리 구축 알고리즘인 반면에 P2Cast는 가장 대역폭이 많은 피어를 찾아 하향식으로 프로세스를 수행하는 방법이다. 따라서 본 기법이 P2Cast에 비해 적은 횟수의 접속으로 복구됨으로써 빠른 수행의 특징을 볼 수 있다.

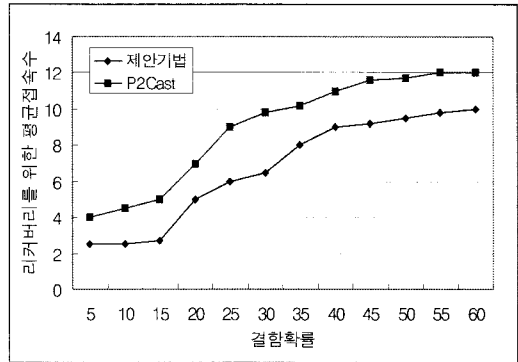


그림 7. 결합확률에 따른 평균 노드 접속 수

V. 결론

본 기법은 지연에 민감한 스트리밍 서비스에 적합하도록 적은 지연 레벨 멀티캐스트 트리 구축방법을 제안 하였다. 따라서 첫째, 서버의 과부하를 완화하기 위한 오버레이 구조기반의 구축방법과 둘째, 클라이언트의 지터를 감소하기 위하여 사용가능한 업로드 대역폭의 비와 중단간 적은 지연이 최대값을 이루는 멀티캐스트 전송 트리를 구성하는 기법이다.

본 논문의 기법을 평가하는 실험에서는 다음과 같은 결론을 얻었다. 우선, 전체 네트워크의 트래픽과 스트리밍 질에 미치는 참여 평균 접속 횟수의 측정 실험에서는 약 25%정도의 우수성을 보여주었고, 요청회수에 따른 피어들의 평균 대역폭 사용량을 측정 한 실험평가에서는 P2Cast는 제일 큰 대역폭을 찾는 알고리즘의 구현으로 전송경로가 길어 본 제안기법보다 대역폭 사용량이 20% 이상 증가하였다. 그리고 서비스 요청 거부율에서는 본 제안기법이 P2Cast보다 약 15% 정도의 성능 향상을 보여주었고, 적은 지연을 평가하는 실험인 노드 수에 따른 RTT 측정은 본 제안기법이 노드수가 계속적으로 증가하더라도 P2Cast보다 RTT 수치가 완만하게 상승하는 좋은 결과를 보여 주었다. 마지막으로 트리의 강건성을 보여주는 실험인 결합확률에 따른 평균 노드 접속 수에서는 본 제안기법이 18% 정도의 우수성을 보여주었는데 리커버리를 위한 접속수가 늘어나면 날수록 전송경로의 결합과 혼잡이 발생하여 복원

을 위한 접속한 평균 노드 수가 멀티캐스트 트리의 질이 좌우될 수 있다.

이상과 같이 본 연구는 적은 지연을 고려한 멀티캐스트 트리 구축 알고리즘이 한정된 컴퓨터와 네트워크의 자원을 활용 측면에서 미치는 긍정적인 결과를 보여주었다.

향후, 주문형 스트림에서 구현해야 할 빨리감기, 되감기 등의 VCR 기능을 수행하였을 때 멀티캐스트 트리에 미치는 영향과 스트리밍 질을 평가하는 과제가 필요하다.

참고 문헌

[1] D. A. Tran, K. A. Hua, and T. T. Do, "A Peer-to-Peer Architecture for Media Streaming," in IEEE journal on Selected Areas in Communications, Vol.22, No.1, 2004(1).

[2] V. N. Padmanabhan, H. J. Wang, P. A. Chou, and K. Sripanidkulchai, "Distributing streaming media content using cooperative networking," in ACM/IEEE NOSSDAV, Miami, FL, USA, 2002(5).

[3] V. N. Padmanabhan, H. J. Wang, and P. A. Chou, "Resilient peer-to-peer streaming," in IEEE ICNP, Atlanta, GA, USA, 2003(11).

[4] G. Yang, S. Kyungwon, F. James, D. Kurose, F. Towsley, "P2Cast: peer-to-peer patching scheme for VOD service," in Proceeding of the twelfth International Conference on WWW, 2003.

[5] B. Wang and J. C. Hou, "Multicasting routing and its QOS extensions: Problems, Algorithms, and Protocols," IEEE Networks, Vol.14, pp.90-104, 2000(1).

[6] M. Castro, P. Druschel, A. M. Kermarrec, A. Nandi, A. Rowstron, and A. Singh, "SplitStream: High-bandwidth Multicast in

Cooperative environments," in ACM SOSP, Bolton Landing, NY, USA, 2003(10).

[7] <http://www.ssfnet.org/ssfImplementations.html>

저자 소개

김 종 경(Jong-Gyung Kim)

정회원



- 1990년 2월 : 호원대학교 컴퓨터공학과 학사
- 1993년 2월 : 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과 석사
- 1996년 8월 : 아주대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사

<관심분야> : 멀티미디어 시스템 응용 및 S/W 시스템 구조, P2P 네트워크, 멀티캐스팅