

# 캐시 네트워크의 이론적 분석 연구 동향

한국과학기술원 | 진보람 · 이 용

## 1. 서론

하드웨어 기술 및 장비의 발달로 인해 전세계의 인터넷 규모 및 콘텐츠 데이터의 양은 기하급수적으로 증가하고 있다. IDC의 조사에 따르면 2006년에는 161 Exabyte에 해당하던 데이터 양이 2010년에는 988 Exabyte로 4년 동안 약 6배 증가하였다. 그 중 멀티미디어 콘텐츠에 대한 데이터 양이 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 콘텐츠의 인기도가 소수에 몰려있어 많은 사용자가 동일한 콘텐츠를 요청하는 특성을 갖는다. 하지만, 현재 IP(Internet Protocol) 기반 전송 방법은 전송을 요청하는 호스트와 콘텐츠를 소유한 호스트 간의 통신으로 이루어지기 때문에, ‘어떤’ 콘텐츠를 요청하는지의 정보보다는 호스트의 ‘위치(IP)’를 중요시 한다. 따라서, 동일한 콘텐츠들이 네트워크상에 사용자들의 요청 횟수만큼 반복하여 전송됨은 물론, 각 호스트간의 연결마다 일시적인 보안관계를 보장하기 위해 콘텐츠를 소유한 호스트의 경우 보안절차를 반복해야 한다.

이러한 비효율성을 개선하고자 CDN(Content Distributed Networks)과 ICN(Information Centric Networking), CCN(Content Centric Networking) 등의 아키텍처가 제안되었다[1-3]. 위의 콘텐츠 기반 아키텍처에서는 네트워크상에 캐시(caches)를 가정하고 캐시간의 형성된 네트워크를 이용하여, 콘텐츠를 요청하여 수신할 때까지의 지연시간을 줄이고 네트워크 전반의 트래픽 전송 비용을 감소한다는 공통점이 있다. 캐시 네트워크에 대한 연구는 이전부터 활발하게 이루어진 바 있다. 하지만, 캐시 네트워크 상의 토폴로지적 특성, 콘텐츠의 특성, 콘텐츠 요청의 특성 등 여러 요소들이 유기적으로 영향을 미치고 있기 때문에, 캐시 네트워크를 일반적으로 모델링하고 결과를 얻어내는 분석 방법 보다는 토폴로지를 단순하게 선형 또는 트리형으로 가정하는 등 캐시 네트워크의 몇 가지 요소를 특정하게 가정하

표 1 캐시 네트워크 관련 연구 분야 분류 및 관련 참고문헌 번호

캐시 네트워크의 요소 연구	콘텐츠 요청 패턴 모델링	[4], [5]	
	YouTube와 VoW의 콘텐츠 특성	[6], [7]	
	콘텐츠 교환 정책	[8]	
캐시 성능 연구	독립된 하나의 캐시(Single cache)	[9]-[11]	
	웹 캐시(Web cache)	[12]-[15]	
	캐시 네트워크	콘텐츠 교환 정책	[16]-[18]
		라우팅	[19]-[21]
무선 캐시 네트워크	[22], [23]		

고 그 외 다른 요소간의 상관관계 분석하는 연구가 주를 이룬다. 본고에서는 캐시 네트워크에 영향을 미치는 요소 중 표 1에 요약되어 있는 연구 분야에 한정하여 캐시 네트워크의 성능에 영향을 미치는 요소들과 캐시 네트워크에 대해 이루어지고 있는 몇 가지 분석주제에 대해 다루고자 한다.

## 2. 캐시 네트워크의 요소

캐시 네트워크의 성능을 높이기 위해서는 각 캐시는 들어오는 콘텐츠 요청을 최대한 많이 처리할 수 있어야 한다. 하지만, 모든 콘텐츠를 캐시에 저장할 수는 없다. 한정된 캐시의 용량에 비해 콘텐츠의 수는 많고 그 수가 지속적으로 급증하고 있기 때문에, 캐시에 우선적으로 갖고 있을 콘텐츠를 선별하기 위한 적절한 기준 확립이 필요하다. 본 장에서는 이와 관련하여 사용자 콘텐츠의 요청 패턴 및 콘텐츠 교환 정책에 관해 살펴해보도록 하겠다.

### 2.1 콘텐츠 요청 모델링

캐시 네트워크 연구에서는 다양한 특성을 갖은 콘텐츠가 혼재한 상황을 가정하고 있다. 콘텐츠의 종류보다는 그 인기를 기준으로 삼아 Zipf-like distribution으로 모델링하는데[4], 총 C개의 콘텐츠에 대해 그 중 i번째로 유명한 콘텐츠의 인기도는

$$p_i = \frac{K}{i^\alpha}$$

이며, 이때  $\frac{1}{K} = \sum_{i=1}^C \frac{1}{i^\alpha}$ 이고  $\alpha > 0$ 인 실수이다.  $\alpha$  값은 유명한 콘텐츠에 인기도가 몰리는 정도를 나타내는 변수로서  $\alpha$  값이 클수록 소수의 콘텐츠에 대다수의 인기도가 몰림을 의미한다. 예를 들어, YouTube 콘텐츠의 경우,  $\alpha$  값은 2~2.5[5]이다. 특히,  $\alpha = 1$ 인 경우를 Zipf 분포라고 하며 한 텍스트 안에 출연하는 단어의 빈도수(Zipf 1932), 도시별 인구수(Zipf 1949) 한 사이트의 웹 page 수나 한 사이트에 방문하는 사용자의 수는 이 분포를 따른다.

## 2.2 YouTube와 VoW의 콘텐츠 특성

사용자 중심의 콘텐츠 발생 및 유통이 가능해지면서 기존의 웹 콘텐츠뿐 아니라 비디오 및 멀티미디어 콘텐츠가 급증하고 있다. YouTube 또는 Video on We (VoW) 등 근래에 많이 사용되고 있는 인터넷 서비스의 사용자 콘텐츠 요청 패턴에 대한 분석은 이루어진 바 있다.

현재 인터넷 구조(CDN 솔루션을 이용하는 YouTube 동작 방식)에서, 캠퍼스 네트워크에서의 YouTube 트래픽 측정 데이터를 바탕으로 트래픽 특성을 분석한 결과, 일부 비디오 콘텐츠들은 지역적인 인기도와 네트워크 전체에서 측정된 인기도의 상관관계를 보였다[6]. 하지만, YouTube를 제외한 다른 콘텐츠에 대해서는 지역적인 인기도가 전체 인기도의 연관성이 낮은 것으로 확인되었다. 또한, 캠퍼스라는 특성 상 점심과 저녁 등 특정시간에 YouTube 콘텐츠 트래픽이 몰리는 경향성을 확인하였다.

반면, 스웨덴의 한 대학에서 발생하는 Video on We (VoW) 콘텐츠의 접속 패턴을 분석한 결과 YouTube와는 다른 양상을 보였다[7]. VoW는 단기간 내에 같은

비디오에 대한 요청이 자주 발생(temporal locality)하였고, 콘텐츠 내용에 따라 시간에 따른 요청 특성이 달랐다. 일례로 일반적인 비디오는 시간 전반에 대해 고른 분포를 보였으나, 교육용 비디오는 특정 시간대에 접속이 몰렸다. 또한, 웹 기반의 비디오 콘텐츠라는 특성상 도입부분만을 지켜보고 콘텐츠 이용을 결정하는 경우가 대다수였다. 이러한 요청 패턴을 고려하여, 콘텐츠 데이터를 부분적으로 캐시에 저장해 두면 네트워크 자원 이용의 효율성을 높일 수 있다. 덧붙여 이 논문에서는 VoW 요청패턴 분석을 통해 웹 다큐먼트 콘텐츠에 대해서는 Zipf 분포가 성립하는 반면, VoW라는 특정 콘텐츠에 대해서는 Zipf 분포가 어긋나는 것을 보였다.

## 2.3 콘텐츠 교환 정책

네트워크의 트래픽 감소 및 사용자가 콘텐츠를 받을 때까지의 시간을 감소하기 위해서는 캐시 네트워크 상에 존재하는 각 캐시가 적절한 콘텐츠를 저장하고 있어야 한다. 따라서 캐시에 저장된 콘텐츠에 대한 교환 정책은 사용자의 콘텐츠 요청 패턴과 깊은 상관관계를 갖고 있다. 콘텐츠 교환 정책에는 대표적으로 LFU와 LRU가 있으며 여타 파생된 정책의 근간이 된다[8]. 두 정책은 각각 요청의 빈도수(Frequency)와 최신성(Recency)을 기준으로 콘텐츠를 선택한다. LFU(Least Frequently Used)는 현재 캐시에 있는 콘텐츠 중 가장 요청 횟수가 적은 콘텐츠를, LRU(Least Recently Used)는 가장 요청된지 오래된 콘텐츠를 우선적으로 방출한다. RND(Random) 정책은 저장된 콘텐츠들 중에서 임의로 선택하여 방출하는 기법으로, 가장 구현이 간편하다. 이 외에도 콘텐츠의 빈도수와 최신성을 동시에 고려하거나 사이즈가 큰 콘텐츠를 캐시에서 우선적으로 삭제함으로써 좀 더 다양한 콘텐츠를 캐시에 저장하는 등 여러가지 방법이 있다.

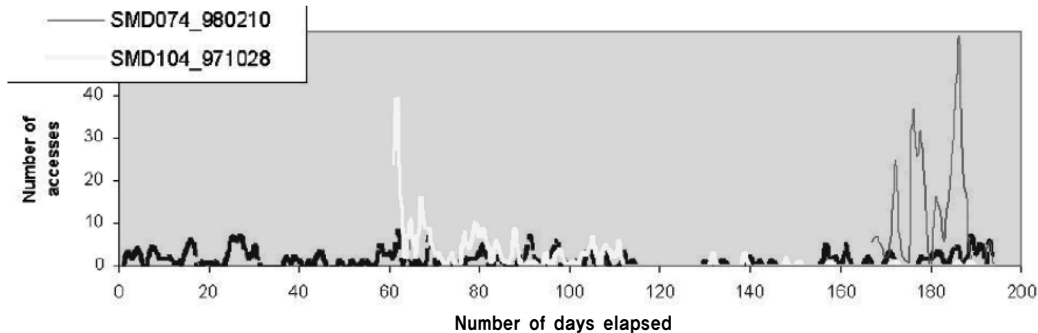


그림 1 비디오 요청 패턴; 일반적인 콘텐츠 요청(검은선)은 고르게 들어오는 반면, 교육용 비디오(하얀선)는 간헐적인 요청이 들어온다[7]

### 3. 캐시 성능 연구

캐시의 성능에 관한 초창기의 연구는 독립된 하나의 캐시를 대상으로 이루어졌다. LRU나 LFU, FIFO 등의 정책을 사용할 때 요청된 콘텐츠가 그 캐시에 있을 확률을 수식화 하였다[9-11]. 대다수의 연구결과에서는 콘텐츠 요청 패턴을 IRM(Independence Reference Model)으로 가정하여, 요청되는 콘텐츠 간의 관계성을 배제하는 등 환경을 단순화 하였다. 이후, 한 캐시에 대한 연구는 웹 캐시(Web cache)와 캐시 네트워크(cache network)까지 확장되어 진행되었다.

#### 3.1 웹 캐시 연구

웹 캐시 연구는 주로 특정한 토폴로지(트리 토폴로지, 라인 토폴로지)를 갖는 웹 캐시에 대한 연구가 이루어졌다. 그림 2와 같이 계층적으로 형성된 캐시(hierarchical caching)에서 플루이드 모델(fluid model)을 적용하여 웹 캐시(Web caching)를 하는 알고리즘에 대한 연구를 적용하여 진행하였다[12,13]. 계층적으로 이루어진 캐시들이 협력을 하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 알고리즘을 각각 제안하였고, 캐시 간의 협력을 하는 경우의 성능이 더 우수함을 입증하였다. 이후, [13]의 연구결과에서 직관적으로 서술하고 넘어가는 부분을 엄밀하게 수학적 표현하고 증명한 연구도 진행되었다[14].

유사한 연구로 [15]에서는 콘텐츠를 계층적으로 캐시(hierarchical caching) 하는 경우와 중간캐시의 연결 없이 직접적으로 캐시와 연결되는 분산적 캐시(distributed caching)하는 경우에 대한 성능을 웹 캐시의 지연

시간과 대역폭 사용정도, 캐시에 걸리는 요청 수의 측면에서 비교하고, 각각의 장단점을 보였다. 계층적 캐시방법은 대역폭의 사용정도가 낮은 반면, 상위 레벨에 존재하는 캐시에 높은 성능이 요구된다. 분산적 캐시 방법은 지연시간이 짧고 네트워크 전반에 걸쳐 트래픽이 분산된다는 장점이 있으나 대역폭의 사용량이 높다는 단점이 있다. [15]의 저자는 이 두가지 방법을 혼합하여, 계층적인 캐시를 유지하면서 같은 레벨에 존재하는 캐시 간의 협동적, 분산적 캐시 방법을 취하는 방법을 제안하였고, 이 제안된 방법이 지연시간을 낮춘다는 것을 밝혔다.

#### 3.2 캐시 네트워크 연구

최근 ICN에 대한 관심이 많아지면서 동시에 일반적인 캐시 네트워크에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 본 장에서는 캐시 네트워크의 콘텐츠 교환 정책, 콘텐츠 요청 라우팅, 무선 캐시 네트워크의 근사적 분석(asymptotic analysis)에 관한 최근 연구에 대해 살펴보도록 하겠다.

##### 3.2.1 캐시 네트워크에서 콘텐츠 교환 정책에 관한 연구

캐시 네트워크에서는 많은 요소들이 유기적으로 영향을 미치고 있기 때문에, 한 캐시를 대상으로 한 최적화된 알고리즘이나 기존의 결과를 캐시 네트워크로 그대로 확장시키는 데는 어려움이 있다. 또한 동일한 성능을 항상 보장 할 수도 없다. 그러나, 이러한 접근 방법이 불가능한 것만은 아니다. 한 캐시에 대해 마르코브 체인(Markov chain)으로 모델링 한 후, 이를 캐시 네트워크로 캐시 네트워크로 확장하여 연구하거나[17],

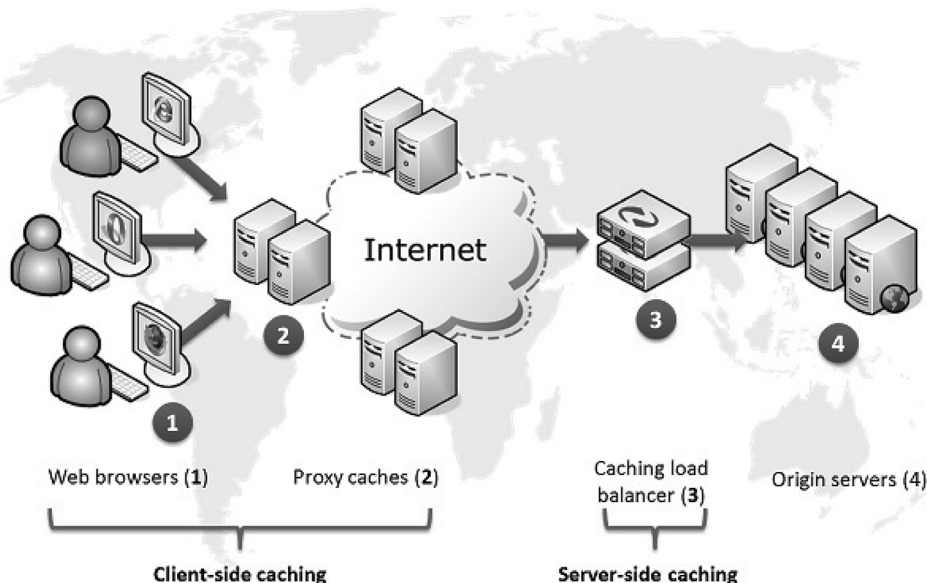


그림 2 계층적 캐시(Hierarchical caching)를 통한 웹 캐시(web caching)의 모델 [13]

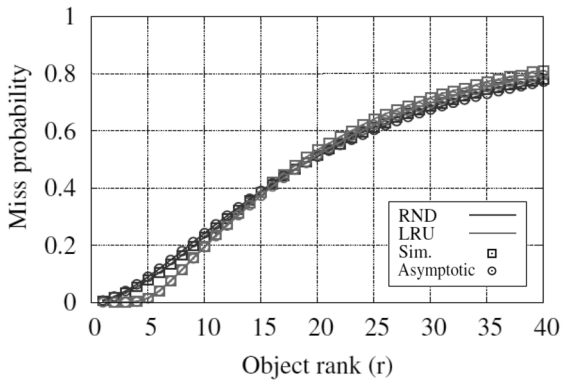


그림 3 독립된 캐시에서 두 정책(RND, LRU)에 대해 요청된 콘텐츠가 캐시에 존재하지 않을 확률(miss probability) [18]

한 캐시에서 LRU의 성능을 근사하는 알고리즘[11]을 다수의 캐시로 구성된 일반적인 토폴로지로 확장하여 각 캐시들이 LRU 정책을 사용할 때 네트워크의 성능을 근사할 수 있는 모델을 제안하는 등의 결과[16]가 있다.

각 캐시가 RND 정책을 사용할 때, 요청한 콘텐츠가 캐시에 있는 확률을 독립된 한 캐시와 캐시 네트워크를 대상으로 수식으로 나타낸 연구 결과도 있다[18]. 이 논문에서는 시뮬레이션을 통해 RND정책과 LRU 정책의 성능 비교를 하였다. 그림 3은 한 캐시에서 RND정책과 LRU정책을 사용하는 경우에, 요청된 콘텐츠가 캐시에 없을 확률(miss probability)을 나타낸 그래프이다. RND의 성능이 LRU와 비슷함을 확인할 수 있다. 더욱이, RND정책이 단순하게 작동하고 속도가 빠른 것을 감안하면 LRU에 비해 뒤떨어 지지 않음을 알 수 있다.

또한, 두 개의 계층으로 이루어진 트리 토폴로지를 가정하고, 각 계층에 있는 캐시가 어떤 정책을 선택할 때 가장 좋은 성능을 보이는지 확인하였다. 그림 4에서

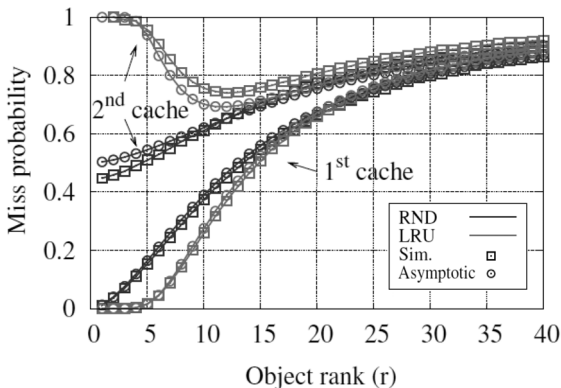


그림 4 두 개의 계층으로 이루어진 트리 토폴로지에서도 하위 계층(2nd) 캐시는 RND 정책을 상위 계층(1st) 캐시는 LRU 정책을 사용하는 것이 적합하다[18]

볼 수 있듯이 콘텐츠 요청이 직접적으로 자주 들어오는 하위계층(2nd) 캐시는 RND 정책을, 비교적 콘텐츠 요청이 적게 도달하는 상위 계층(1st) 캐시는 LRU 정책을 사용하는 경우 트리 토폴로지 상의 성능을 향상시킬 수 있다.

### 3.2.2 콘텐츠 요청 라우팅에 관한 연구

캐시 네트워크의 성능을 높이기 위해서는 3.2.1에서 본 바와 같이 캐시가 저장하고 있는 콘텐츠를 적절하게 교환해야 하고 이와 더불어 요청된 콘텐츠를 캐시 네트워크의 적절한 위치에 저장해야 한다. 또한 요청이 들어올 때마다 적절한 위치에 저장된 콘텐츠를 빠르게 찾아가는 것도 중요하다. 하지만, 네트워크 상의 사용자 수 대비 콘텐츠 수가 더 빠른 속도로 증가하고 있고, 현재 BGP의 FIB(Forwarding Information Base) 사이즈가 기하급수적으로 증가하는 상황을 감안할 때 현재와 동일한 방법을 기반으로 콘텐츠를 찾는 것은 네트워크 상의 극심한 오버헤드를 초래한다.

이러한 문제를 해결하고자 각 캐시들이 ‘빵부스러기(breadcrumbs)’와 같은 최소한의 정보(어떤 콘텐츠를 저장했고, 캐시에 요청된 콘텐츠를 어떤 캐시에서 찾았는지 등)를 갖고 있어서, 콘텐츠에 대한 요청이 각 캐시를 지날 때마다 그 캐시의 정보를 이용하여 콘텐츠

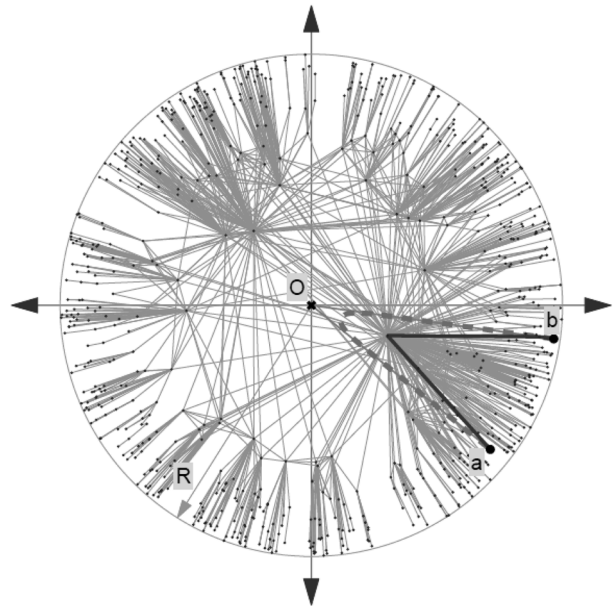


그림 5 쌍곡선 공간 상에서 각 캐시들이 검은점으로 위치하고 있을 때 캐시 a와 b 사이의 그리디 전송 알고리즘(greedy forwarding algorithm)을 이용한 라우팅 경로가 실선, 쌍곡선 공간(hyperbolic space) 상의 최단거리가 점선이다. 공간상에 위치한 캐시들의 위치를 고려했을 때, 두 선 사이에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다[21]

를 찾을 것을 제안한 연구가 있다[19]. 한 콘텐츠에 대한 요청이 반복적으로 들어오는 경우에는 최근에 어떤 캐시에서 콘텐츠를 받아왔는지의 정보를 알 수 있기 때문에, 적절한 경로 선택으로 중간 캐시에서 콘텐츠를 제공받을 수 있는 확률을 높일 수 있다.

최근 CAIDA(The Cooperative Association for Internet Data Analysis)에서도 NDN(Named Data Networking) 테스트베드를 이용하여 이와 비슷한 연구를 진행하고 있다. 2차원 평면상의 캐시 네트워크를 쌍곡선 공간(hyperbolic space) 상으로 옮겨 모든 캐시에 좌표를 지정하고 각 캐시는 지역적인 정보(자신의 좌표와 주변에 연결된 캐시의 좌표)를 갖고 있도록 한다. 쌍곡선 공간 상에서 목적지 좌표가 주어졌을 때, 그리디 전송 알고리즘(greedy forwarding algorithm)을 이용하여 거쳐가는 중간 캐시에서는 목적지 좌표와 가장 가까운 주변 캐시를 찾아 이동한다. 결정된 캐시들을 따라 이동하면 목적지까지의 경로가 결국 쌍곡선 공간상의 최단거리와 동일함을 확인할 수 있다[20,21](그림 5).

### 3.2.3 무선 캐시 네트워크의 근사적 분석(asymptotic analysis) 연구

이종 무선기기의 급증과 무선 기기간의 통신기술(ad-hoc network, device to device 등)이 제안 및 발전함에 따라 무선 네트워크 상의 캐시 네트워크 연구도 활발히 이루어지고 있다. 전체  $n$ 개의 노드가 있는 애드혹 네트워크에서 각 노드가 캐시를 하는 경우 링크의 용량이  $O(\sqrt{n})$ 에서  $O(1)$ 로 줄어들음을 확인하였다[22]. 이는 캐시를 함으로써 전송하는데 만들어지는 무선 기기간의 간섭(wireless interference)이 감소하기 때문이다. 다른 연구에서는 무선 네트워크 상에서 각 캐시에 저장된 콘텐츠가 휘발하는 컨셉을 제안하여 한정된 시간 동안만 콘텐츠가 캐시에 저장되는 모델을 제안하였다[23]. 캐시가 다음과 같은 방법으로 콘텐츠를 갖고 있는 경우 최대처리량(maximum throughput)은 그리드 토폴로지에서  $\frac{1}{n}$ 에서  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 으로 증가하고 랜덤 토폴로지에서는  $\frac{1}{\sqrt{n \log n}}$ 에서  $\frac{1}{\log n}$ 으로 증가한다.

## 4. 결론

본 글에서는 현재의 비효율적인 데이터 전송 방법을 개선하여 네트워크 전반의 트래픽 전송비용 감소 등의 성능 개선을 위해 제안된 ICN이나 CCN 등에서 고려되고 있는 캐시 네트워크에 대해 소개하였다. 먼저 캐시 네트워크에 영향을 미치는 요소인 콘텐츠 요청 패턴, 콘텐츠 교환 정책 등에 대해 개괄적으로 살펴 보았

다. 그 후 독립된 캐시의 연구로부터 웹 캐시, 캐시 네트워크까지의 이어진 연구흐름 속에서, 도출된 연구 결과들을 다루었다. 캐시 네트워크의 이론적 연구 중에서는 콘텐츠 교환 정책, 콘텐츠 요청 라우팅, 무선 캐시 네트워크의 근사적 분석의 최근 연구 결과에 중점을 두었다. 급증하는 콘텐츠 수와 이에 대한 수요로 야기되는 네트워크 성능 악화 문제를 개선하기 위한 방법 중 하나로서, 캐시 네트워크 연구는 현재도 활발하게 이루어지고 있으며, 미래에도 지속적으로 이루어질 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- [ 1 ] T. Koponen, M. Chawla, B.-G. Chun, A. Ermolinskiy, K. H. Kim, S. Shenker, and I. Stoica, "A data-oriented (and beyond) network architecture," in Proc. ACM SIGCOMM, 2007.
- [ 2 ] L. Zhang, D. Estrin, J. Burke, V. Jacobson, J. D. Thornton, D. K. Smetters, B. Zhang, G. Tsudik, D. Massey, C. Papadopoulos et al., "Named data networking(NDN) project," Relat'orio T'ecnico NDN-0001, Xerox Palo Alto Research Center-PARC, 2010.
- [ 3 ] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs, and R. L. Braynard, "Networking named content," in Proc. ACM CoNext, 2009.
- [ 4 ] L. Breslau, P. Cao, L. Fan, G. Phillips, and S. Shenker, "Web caching and zipf-like distributions: Evidence and implications," in Proc. IEEE Infocom, 1999.
- [ 5 ] M. Cha, H. Kwak, P. Rodriguez, Y. Ahn, and S. Moon, "I tube, you tube, everybody tubes," Sigcomm, 2007.
- [ 6 ] M. Zink, K. Suh, Y. Gu, and J. Kurose, "Characteristics of youtubenetwork traffic at a campus network-measurements, models, and implications," Computer Networks, 53(4):501-514, 2009.
- [ 7 ] S. Acharya, B. Smith, and P. Parnes, "Characterizing user access to videos on the world wide web," Electronic Imaging, Vol. 3969, p130-141, 2000.
- [ 8 ] S. Podlipnig and L. Böszörményi, "A survey of web cache replacement strategies," ACM Comput. Surv., 35(4):374-398, Dec. 2003.
- [ 9 ] P. Jelenković, "Asymptotic approximation of the move-to-front search cost distribution and least-recently-used caching fault probabilities," The Annals of Applied Probability, Vol. 9, No. 2, pp. 430-464, 1999.
- [10] P. R. Jelenkovic, X. Kang, and A. Radovanovic, "Near optimality of the discrete persistent access caching algo-

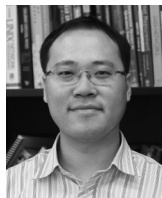
- rithm,” in Proc. International Conference on Analysis of Algorithms, 2005.
- [11] A. Dan and D. Towsley, “An approximate analysis of the LRU and FIFO buffer replacement schemes,” Performance Evaluation Review, Vol. 18, No. 1, pp. 143-152, 1990.
- [12] H. Che, Z. Wang, and Y. Tung, “Analysis and design of hierarchical Web caching systems,” in Proc. Infocom, 2001.
- [13] H. Che, Y. Tung, and Z. Wang, “Hierarchical Web caching systems: modeling, design and experimental results,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 7, pp. 1305-1314, 2002.
- [14] C. Fricker, P. Robert, and J. Roberts, “A versatile and accurate approximation for LRU cache performance,” in Proc. ITC, 2012.
- [15] P. Rodriguez, C. Spanner, and E. W. Biersack, “Analysis of Web caching architectures: hierarchical and distributed caching,” IEEE Transactions on Networking, Vol. 9, No. 4, pp. 404-418, 2001.
- [16] E. Rosensweig, J. Kurose, and D. Towsley, “Approximate models for general cache networks,” in Proc. Infocom, 2010.
- [17] G. Garcia, A. Beben, F. J. Ramon, A. Maeso, I. Psaras, G. Pavlou, N. Wang, J. Sliwinski, S. Spirou, S. Soursos, and E. Hadjioannou, “COMET: content mediator architecture for content-aware networks,” in Proc. Future Network and Mobile Summit, 2011.
- [18] M. Gallo, B. Kauffmann, L. Muscariello, A. Simonian, and C. Tanguy, “Performance evaluation of the random replacement policy for networks of caches,” in Proc. ACM SIGMETRICS, 2012.
- [19] E.J. Rosensweig, J. Kurose, “Breadcrumbs: Efficient, best-effort content location in cache networks,” in Proc. IEEE Infocom, 2009.
- [20] R. Kleinberg, “Geographic routing using hyperbolic space,” in Proc. IEEE Infocom, 2007.
- [21] M. Boguna, F. Papadopoulos, D. Krioukov, “Sustaining the Internet with hyperbolic mapping,” Nature Commun, Vol. 1, p62, 2010.
- [22] S. Gitzenis, G. S. Paschos, and L. Tassiulas, “Asymptotic laws for content replication and delivery in wireless networks,” in Proc. Infocom, 2012.
- [23] B. Azimdoost, C. Westphal, and H. R. Sadjadpour, “On the throughput capacity of information-centric networks,” arXiv preprint arXiv:1210.1185, 2012.

## 약 력



### 진보람

2009 경희대학교 이학부 (수학 전공) 학사  
 2011 경희대학교 수학과 석사  
 2010~2012 국가수리과학연구소 융복합수리과학 연구부 미래인터넷연구팀 연구원  
 2012년~현재 KAIST 전기및전자공학과 박사과정  
 E-mail : boramjin@lanada.kaist.ac.kr



### 이 용

1997 서울대학교 컴퓨터공학부 학사  
 1999 서울대학교 컴퓨터공학부 석사  
 2006 The University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 박사  
 2006~2008 Princeton University 전자공학과 박사후 연구원  
 2008~현재 KAIST 전기 및 전자공학과 교수  
 E-mail : yiyung@kaist.edu