

A Comparative Study on Off-Path Content Access Schemes in NDN

Junseok Lee[†] · Dohyung Kim^{††}

ABSTRACT

With popularization of services for massive content, the fundamental limitations of TCP/IP networking were discussed and a new paradigm called Information-centric networking (ICN) was presented. In ICN, content is addressed by the content identifier (content name) instead of the location identifier such as IP address, and network nodes can use the cache to store content in transit to directly service subsequent user requests. As the user request can be serviced from nearby network caches rather than from far-located content servers, advantages such as reduced service latency, efficient usage of network bandwidth, and service scalability have been introduced. However, these advantages are determined by how actively content stored in the cache can be utilized. In this paper, we 1) introduce content access schemes in Named-data networking, one of the representative ICN architectures; 2) in particular, review the schemes that allow access to cached content away from routing paths; 3) conduct comparative study on the performance of the schemes using the ndnSIM simulator.

Keywords : Information-centric Networking, Named-data Networking, Access to the Off-path Cached Content

NDN에서 Off-Path 콘텐츠 접근기법들에 대한 성능 비교 연구

이 준 석[†] · 김 도 형^{††}

요 약

인터넷에서의 대용량 콘텐츠들에 대한 서비스가 일반화됨에 따라 기존 TCP/IP 프로토콜에서의 비효율적인 데이터 전송에 대한 문제점들이 제기되었고, 그 결과로 정보중심네트워크 (Information-centric networking) 패러다임이 새롭게 제시되었다. 정보중심네트워크에서는 IP와 같은 위치 식별자를 대신하여 콘텐츠 이름을 통해 콘텐츠 접근이 이루어지며, 네트워크 노드들 (e.g., 라우터)은 캐시를 활용하여 전송중인 콘텐츠들을 저장하여 이후 발생하는 사용자 요청들에 대한 서비스를 수행할 수 있다. 사용자 요청이 멀리 위치한 콘텐츠 서버가 아닌 가까운 네트워크 캐시에서 서비스될 수 있게 됨에 따라 서비스 지연 감소, 네트워크 대역폭의 효율적 사용, 서비스 확장성 확보 등의 이점이 소개되었다. 그런데 이와 같은 정보중심네트워크에서의 이점들은 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠가 얼마나 적극적으로 활용될 수 있는지에 의해 결정될 수 있다. 본 논문에서는 1) 정보중심네트워크의 대표적인 아키텍처 중의 하나인 Named-data Networking (NDN) 에서의 콘텐츠 접근 기법에 대해 소개하고, 2) 특별히 라우팅 경로를 벗어나 캐시되어 있는 콘텐츠들을 접근할 수 있도록 하기 위해 제안된 기법들에 대한 리뷰를 진행하며, 3) ndnSIM 시뮬레이터를 활용하여 이들 기법들에 대한 성능 비교 평가를 진행한다.

키워드 : 정보중심네트워크, 이름기반네트워킹, 라우팅 경로외의 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠 접근기법

1. 서 론

노드들의 위치정보(e.g., IP 주소)를 바탕으로 두 노드들 사이에 데이터를 전달하는 목적으로 개발된 인터넷은 지난 수십년동안 사용자들의 요구를 반영하며 다양한 서비스를 제공할 수 있는 거대한 플랫폼으로 발전해왔다. 최근 들어 대용량 콘텐츠를 기반으로 하는 서비스가 인터넷상에서 보편화되고 일반화되면서(Fig. 1), 단순히 두 노드들 사이에 데이터를

전달하는 기존 인터넷 모델의 비효율성이 논의되었고, 이 문제를 해결하기 위한 해결책들 중의 하나로 정보중심네트워크라는 새로운 인터넷 모델이 제안되었고, 다양한 형태의 아키텍처들[2-6]로 구현되었다.

전송자 주도의 TCP/IP 네트워크에서와는 달리 정보중심네트워크에서는 데이터 수신자가 우선적으로 interest라고 불리는 요청메시지를 전송함으로써 통신이 시작된다. 이 interest는 IP등과 같은 콘텐츠의 위치 식별자 대신 콘텐츠 자체를 식별하는 콘텐츠 이름을 사용하여 라우팅된다. 콘텐츠들은 전달 과정에서 네트워크 노드들에 설치되어 있는 캐시에 저장될 수 있는데, 이렇게 분산 저장되어 있는 콘텐츠들을 활용하여 이후 발생하는 interest들이 서비스될 수 있다. 따라서, 정보중심네트워크에서는 같은 콘텐츠가 동일한 링크에서 중복 전송되는 것을 최소화할 수 있게되어, 링크 대역폭

※ 본 논문은 2019년도 강원대학교 대학회계 학술연구 조성비(No. 520190059) 및 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT연구센터육성사업의 연구결과로 수행되었음(IIP-2021-2018-0-01431).

† 비 회 원 : 강원대학교 컴퓨터공학과 학·석사통합과정

†† 종신회원 : 강원대학교 컴퓨터공학과 조교수

Manuscript Received : September 13, 2021

Accepted : October 1, 2021

* Corresponding Author : Dohyung Kim(d.kim@kangwon.ac.kr)

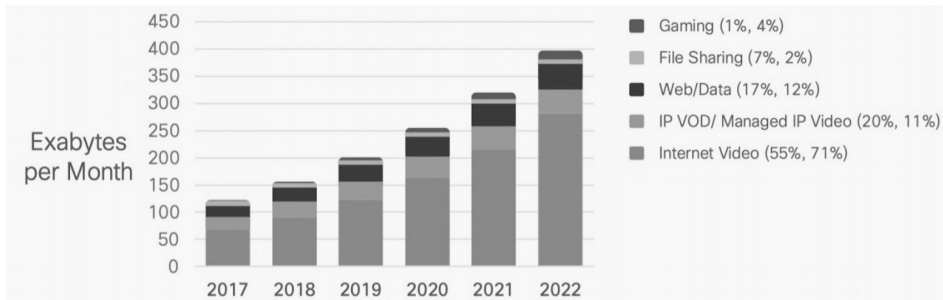


Fig. 1. Application Traffic Growth [1]

을 효율적으로 사용할 수 있다(Fig. 2). 뿐만 아니라, 사용자들이 멀리 위치해 있는 콘텐츠 서버 대신 가까운 곳의 네트워크 캐시로부터 콘텐츠를 서비스 받을 수 있게 됨에 따라 서비스 지연시간이 줄어들 수 있다. 그리고 서버가 처리해야 하는 사용자 요청들이 네트워크 캐시들에서 분산 처리됨으로써, 서비스의 확장성에도 도움이 될 수 있다.

이와 같은 정보중심네트워크에서의 이점은 얼마나 캐시를 잘 활용할 수 있느냐에 의해서 결정되게 된다. 더 많은 요청 메시지가 캐시를 통해 서비스될 수 있도록 하기 위해 캐시 자체를 효과적으로 관리하는 기법들이[7-11]에서 제안이 되었다. [7,8]에서는 제한된 크기의 캐시에 인기있는 콘텐츠들을 유지할 수 있는 캐시 관리 기법들이 연구되었다. [9-11]에서는 같은 콘텐츠가 비슷한 위치에서 중복적으로 저장됨으로써 캐시 공간이 비효율적으로 활용되는 문제를 해결하기 위한 기법들이 소개되었다. 그런데 각각의 캐시가 잘 관리되어 인기 있는 콘텐츠들이 선택적으로 저장되어 있다고 할지라도, 사용자 요청들이 목적하는 콘텐츠가 저장되어 있는 캐시에 접근할 수 없다면 캐싱으로 인한 이득이 최대화될 수 없다.

대표적인 정보중심네트워크 아키텍처인 Named-data Networking (NDN)에서는 interest가 라우팅되면서 경로상에 존재하는 네트워크 노드들의 캐시만을 접근할 수 있다[2]. 따라서, 사용자 주변 노드들의 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠들이 (interest 라우팅 경로에 포함되어 있지 않음으로써) 사용

되지 않는 상황이 발생할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하고자 [14-28]에서 라우팅 경로 밖의 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠를 활용하기 위한 기법들이 콘텐츠 액세스 기법들이 제안되었다. 이 기법들은 크게 Proactive 기법들과 Reactive 기법들로 구분될 수 있다. Proactive 기법들은 캐시의 카탈로그를 네트워크에 전파함으로써 라우팅 경로의 다변화를 가져오는 방법이다. Reactive 기법들은 interest 수신시 라우터가 interest를 복사하여 여러 네트워크 인터페이스로 내보냄으로써 네트워크 캐시에 저장되어 있는 목적하는 콘텐츠를 찾는 방법들이다. 본 논문에서는 NDN에서의 콘텐츠 액세스 기법들의 특징들을 리뷰하고 각 방법의 장단점을 살펴본다. 또한, ndnSIM 시뮬레이터를 활용하여 각 제안된 방법들의 대표적인 기법들에 대한 성능 비교 평가를 진행한다. 그리고 이를 바탕으로 reactive 및 proactive 기법들의 근본적인 문제점들에 대한 토의를 진행한다.

본 논문의 이어지는 내용은 다음과 같다. 우선 2절에서 NDN 아키텍처에 대한 소개와 NDN에서의 캐싱에 대한 리뷰를 진행한다. 3절에서는 NDN에서의 콘텐츠 접근 기법들에 대한 분류 및 각 기법에 대한 장단점에 대한 논의를 진행한다. 제안된 기법들에 대한 ndnSIM 시뮬레이터 기반의 성능 비교 평가 결과를 4절에서 소개하며, 5절에서 proactive 및 reactive 기법에 대한 근본적인 문제점들을 고찰하고 논문을 마무리한다.

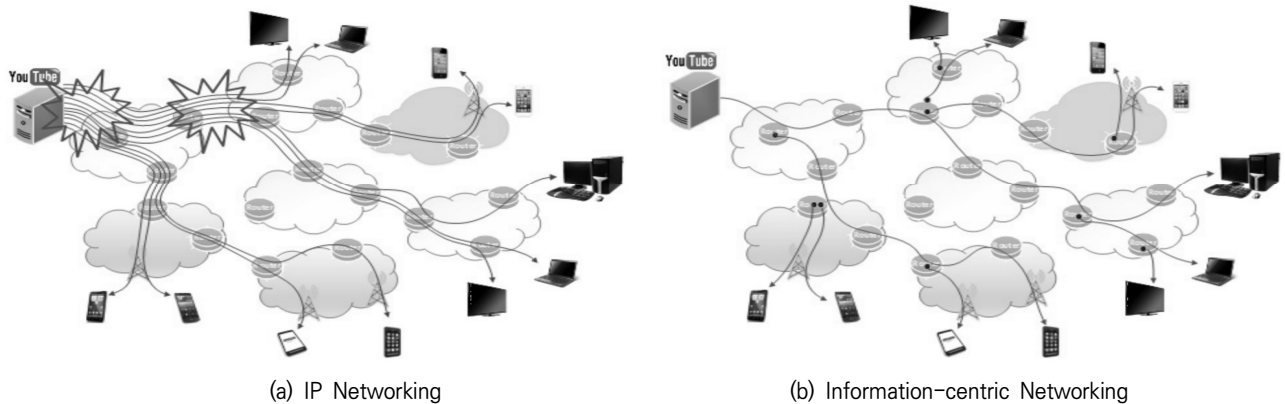


Fig. 2. IP vs. ICN

2. Preliminaries

2.1 Routing in NDN

NDN은 콘텐츠의 이름 정보와 위치 정보를 매핑시켜주는 별도의 중앙집권적 서버를 도입하지 않은 대표적인 분산형 정보중심네트워크 아키텍처이다. NDN에서의 통신은 사용자가 수신하기 원하는 콘텐츠의 이름이 담긴 요청 메시지(interest)를 네트워크에 내보냄으로써 시작된다. interest를 수신한 라우터는 content store (CS)라 불리는 로컬 캐시에서 interest에 기록된 이름의 콘텐츠가 있는지를 확인한다. 만약 콘텐츠가 CS에 존재하면 interest가 전달된 방향, 즉 interest를 수신한 인터페이스로 해당 콘텐츠를 전송한다. 콘텐츠가 CS에 존재하지 않을 경우, Pending Interest Table (PIT)라 불리는 테이블에 interest와 함께 interest를 수신한 인터페이스를 기록하고 (만약 이미 동일한 interest에 대한 PIT entry가 존재할 경우에는 interest를 수신한 인터페이스를 이미 존재하는 entry에 추가적으로 기록함), Forwarding Information Base (FIB)라 불리는 라우팅 테이블을 통해 다음 라우터로 interest를 전송하게 된다. PIT는 콘텐츠가 담긴 response 메시지를 라우팅하는데 사용되는 테이블이다. 라우터가 response를 수신할 경우, 가장 먼저 response에 담겨 있는 콘텐츠를 CS에 저장하게 된다. 그리고는 PIT를 검색하여 매칭되는 interest와 함께 기록되어 있는 인터페이스, 즉 사용자가 위치한 방향의 인터페이스 쪽으로 response를 전달하게 된다. 만약 매칭되는 interest가 존재하지 않을 경우에는 보안상의 이유로 response를 드랍시킨다. 이와 같이 NDN에서는 콘텐츠 이름을 사용하여 라우팅이 이루어질 수 있으며, 요청메시지가 라우팅되는 과정에서 네트워크 노드들이 가지고 있는 복사본을 통해서 콘텐츠가 효과적으로 서비스될 수 있다는 특징이 있다.

2.2 Caching in NDN

NDN에서의 캐시는 분산형태의 서비스 제공, 효과적인 손실 회복, 이동성 지원등과 같이 다양한 목적으로 활용될 수 있다. 특별히 캐시를 통하여 사용자로부터 가까운 위치에서 콘텐츠가 제공될 수 있도록 함으로써, 1) 동일한 콘텐츠가 같은 링크상에서 중복해서 전달됨으로써 발생될 수 있는 비효율적인 링크 사용을 피할 수 있고, 2) 콘텐츠가 전달되는 시간이 줄어들어 따라 서비스 품질이 향상될 수 있으며, 3) 사용자 요청들이 서버가 아닌 네트워크 상의 캐시들로부터 서비스될 수 있기 때문에, 콘텐츠 제공자 측의 서비스 인프라 확장성에 도움이 될 수 있다. 이와 같은 캐시로부터의 이점은 캐시의 성능, 즉 캐시가 얼마나 많은 양의 사용자 요청을 처리하게 되느냐에 의해서 결정된다. 더 많은 양의 사용자 요청(interest)이 캐시에서 서비스 되도록 하기 위해서는 캐시가 더 인기 있는 콘텐츠들을 가지고 있을 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서 First In First Out (FIFO) Least Recently Used (LRU), Least Frequently Used (LFU) 등과 같은 전

통적인 캐시 관리기법 이외에도 확률 기반의 캐싱 기법[7], 콘텐츠 제공자 도움형 캐싱 기법[8] 등이 제안되었다. 동일한 인기도의 콘텐츠 중에서는 캐시로부터 더 멀리 위치해있는 서버로부터 제공되는 콘텐츠를 캐시에서 서비스하는 것이 링크 대역폭의 효율적인 사용 및 서비스 지연 감소 측면에서 이득이 될 수 있기 때문에, 콘텐츠 서버까지의 거리를 고려하여 콘텐츠를 선택적으로 캐싱하는 기법[9]도 소개 되었다. 또한 콘텐츠가 캐싱되는 위치에 대한 다양한 연구도 진행이 되었다. 근처에서 동일한 콘텐츠가 중복 캐싱됨으로써 캐시 공간이 비효율적으로 사용될 수 있는 문제를 해결하기 위해 (1/흡수)의 확률을 적용하여 콘텐츠를 캐싱하는 기법[11]이 제안되었다. 그리고 네트워크 엣지에서만 캐싱하는 것으로도 충분히 효과적일 수 있다는 연구[12]에 기반하여 경로상 가장 마지막 라우터의 캐시에만 콘텐츠를 저장하는 기법[13], 소비자에게 가까워질수록 더 높은 확률을 적용하여 캐싱하는 기법[10] 등도 제안되었다.

3. Access schemes for Off-path Cached Content in NDN

Section 2.1에서 기술된 NDN 기본 라우팅 기법하에서 interest는 라우팅 경로상에 존재하는 캐시 (i.e., on-path 캐시)들에 의해서만 서비스될 수 있다. 즉, 목적하는 콘텐츠가 아무리 사용자 근처에 있는 캐시에 존재한다 할지라도 interest가 FIB에 의해서 전달되는 과정에서 거처가는 캐시가 아니거는 interest를 서비스할 수 없는 한계가 존재한다. 이와 같은 문제를 해결하고자 라우팅 경로외에 위치한 캐시(i.e., off-path 캐시)를 활용할 수 있도록 하는 “off-path 캐시에 저장된 콘텐츠 액세스 기법”들이 제안되었다. off-path 캐시에 저장된 콘텐츠 액세스 기법들은 크게 Proactive 기법과 Reactive 기법으로 나눌 수 있다. Proactive 방법에서는 라우터들이 주기적으로 주변 라우터들의 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠 정보들을 파악한다. 라우터가 interest를 수신하게 되면 이 정보를 바탕으로 interest를 목적하는 콘텐츠가 저장되어 있는 캐시 쪽으로 포워딩 할 수 있게 된다. Reactive 방법에서는 라우터가 주변 라우터들과 미리 캐싱되어 있는 콘텐츠들에 대한 정보 교환을 하지 않는다. 대신, 수신한 interest를 복사하여 여러 인터페이스로 내보냄으로써 목적하는 콘텐츠가 주변 캐시에 저장되어 있는지를 찾는다. 본 Section에서는 Proactive 및 Reactive 범주에 속한 여러 off-path 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠 액세스 기법들을 리뷰한다.

3.1 Proactive Schemes

Proactive 방법에서 라우터들은 로컬 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠 정보들(캐시 카탈로그)을 주변 라우터들에게 주기적으로 플로딩한다. 이렇게 주기적으로 플로딩 되는 캐시 카탈로그를 통해서 각각의 라우터들은 주변 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠 정보를 파악하고, 도착한 interest를 어느 쪽으

로 포워딩할지를 결정할 수 있게 된다. 캐시 카탈로그를 플로딩하는 과정에서 네트워크 대역폭을 크게 소모할 수 있다는 점, 플로딩 이벤트 사이에 캐시에서 콘텐츠가 사라질 경우 interest가 존재하지 않는 콘텐츠 쪽으로 포워딩 될 수 있다는 점, 주변 캐시정보들을 주기적으로 받아서 처리하는 과정에서 발생할 수 있는 오버헤드 등이 문제일 수 있다.

1) Intra-AS Cooperative Caching

동일한 콘텐츠가 Autonomous System (AS) 내의 라우터들 사이에서 여러 번 중복해서 저장되는 것을 방지하기 위해서 주기적으로 라우터들 간에 캐시된 콘텐츠 정보를 교환하는 방법[14]이 제안되었다. 이렇게 라우터가 같은 AS내의 이웃 라우터들에 저장된 콘텐츠 정보를 파악할 수 있게 됨에 따라, interest는 off-path 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠에 대한 접근이 가능해진다. 정보 교환 범위를 AS내로 제한함으로써 정보 교환에 따른 오버헤드가 너무 커지는 것을 방지할 수 있으며, 정보 교환과정에서의 지연을 최소화할 수 있는 이점이 있다. 그러나 앞서 언급했던 Proactive 방법의 문제점들에 대한 근본적인 해결책을 제시하지는 못한다.

2) Hashing to Map Content Names to Routers

[15,16]에서는 콘텐츠 이름을 hashing하여 그 결과에 따라 지정된 라우터에 콘텐츠를 저장하는 방법을 제안하였다. 이 방법에서 라우터가 interest를 수신하게 되면, interest에 기록된 콘텐츠 이름으로 hashing을 수행하여 그 결과값에 따라 특정 라우터 쪽으로 interest의 경로를 설정함으로써 off-path 캐시에 저장되어있는 콘텐츠에 접근할 수 있게 된다. [14]에서처럼 라우터들간에 캐시된 콘텐츠들의 정보를 교환하지 않고도 off-path 캐시를 활용할 수 있는 장점이 있는 반면, 여러 라우터들 간의 조직화(coordination) 과정이 필요하며 또한 hashing 과정에서 콘텐츠의 인기도 및 다양한 특성들이 반영되기 어렵다는 단점이 존재한다.

3) Bloom Filter Based Information Exchange

[17,18]의 저자들은 Bloom Filter를 사용하여 캐시된 콘텐츠 정보를 교환함으로써, 캐시정보 전달과정에서 발생할 수 있는 오버헤드를 최소화하였다. 또한, 전송된 정보들로 라우터의 FIB가 너무 커지는 것을 방지할 수 있는 Bloom Filter 병합 기법을 제안하였다. 그러나 [17]에서도 언급된 것처럼 Bloom Filter를 사용하게 되면 false positive, false negative가 발생할 수 있는데, 이로 인해 캐시된 콘텐츠들에 대한 정확한 정보전달이 어려울 수 있다. 그리고, 정보 교환 주기를 너무 짧게 설정하면 캐시된 콘텐츠 정보가 불필요하게 중복 교환되게 되고 이로 인해 네트워크 자원이 낭비될 수 있다. 반면 정보 교환 주기를 너무 길게 설정하면, 캐시에서 콘텐츠가 사라졌음에도 이전에 전달되었던 정보가 적시에 업데이트 되지 못함으로써 interest가 제대로 라우팅 될 수 없는 현상이 발생할 수 있다.

3.2 Reactive Schemes

Reactive 방법에서는 라우터들이 수신한 interest를 복사하여 여러 인터페이스로 내보냄으로써 off-path 캐시들에 저장되어 있는 콘텐츠에 접근할 수 있다. 이렇게 복사된 여러 개의 interest들이 서로 다른 캐시들에서 서비스 될 경우, 중복된 콘텐츠 전송이 발생하게 된다. 이와 같은 interest와 response의 중복 전송은 분명 더 가까운 곳에 위치한 콘텐츠를 서비스할 수 있도록 함으로써 서비스 지연시간을 단축시키는 이점을 가져오지만, 네트워크 대역폭이 불필요하게 소모될 수 있다는 문제점을 야기시키기도 한다.

1) Exploration and Exploitation

[19]의 저자들은 FIB를 사용해서 interest를 서버 쪽으로 전송하는 기본적인 라우팅기법 이외에 interest를 플로딩해서 off-path 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠를 찾는 방법(exploration)을 소개하였고, 특별히 두 가지 방법을 같이 혼용하는 하이브리드 기법에 대해서 제안하였다. 인기도가 높은 콘텐츠는 주변 캐시에 저장되어 있을 확률이 높기 때문에 하이브리드 기법에서는 인기도가 높은 콘텐츠를 요청하는 interest의 경우 플로딩 방법을 사용하여 콘텐츠를 주변 캐시에서 찾는 것이 좋을 수 있음을 언급하고 있다. 그리고 인기도가 낮은 콘텐츠에 대한 interest는 FIB를 활용하는 NDN기본 라우팅 방법을 사용할 것을 언급하고 있다. 이와같은 하이브리드 방법은 FIB 크기를 줄일 수 있으며, 인기없는 콘텐츠에 대한 exploration 과정에서 발생할 수 있는 리소스 낭비를 줄일 수 있다. 그러나 exploration 과정에서 중복된 데이터 전송이 발생할 수 있으며, (Zipf-like 분포등과 같은 콘텐츠의 인기도 분포를 고려했을때) 인기없는 콘텐츠들에 대해서 FIB를 구성하는 것은 FIB의 확장성에 문제가 있을 수 있다[20].

2) INFORM

Exploration 과정에서 모든 인터페이스로 interest를 플로딩하게 되면 큰 오버헤드가 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 INFORM[21]의 저자들은 기존 경로상의 인터페이스 이외 추가적으로 하나의 인터페이스만 무작위로 선택하여 interest 복사본을 전송하는 새로운 exploration 기법을 제안하였다. 그리고 이와 같은 exploration 과정을 주기적으로 수행하면서 exploration 과정에서 수집된 정보를 바탕으로 콘텐츠별 최적 경로를 업데이트하고, 이 최적 경로를 다음번 exploration을 수행할 때까지 사용하는 기법을 소개하였다. 이를 위해 각 라우터는 interest를 전송해서 response를 받기까지의 시간, 즉 RTT를 기반으로 Q값을 계산하여 테이블에 저장하게 된다. 제안된 방법은 exploration 과정에서 전송되는 인터페이스의 갯수를 제한하고, exploration과 exploitation을 번갈아서 수행함으로써 [19]에 비해 오버헤드를 크게 줄일 수 있었다. 그러나 exploration 과정에서 interest 중복전송이 발생하게 되고, 이로 인해 중복된 데이터 전송 문제가 여전히 존재하게 된다.

3) D-FIB

무작위로 네트워크 인터페이스를 선택하여 interest를 전송하는 기존의 방법보다 더 효과적으로 캐시된 콘텐츠를 찾기 위해 [22]의 저자들은 Downstream-FIB (D-FIB) 방법을 제안하였다. D-FIB에서 라우터는 콘텐츠를 사용자 방향으로 전달하면서 사용자 측 방향, 즉 콘텐츠가 전달된 방향을 테이블에 기록하게 된다. 그리고는 이후에 해당 콘텐츠에 대한 interest를 수신할 경우, 테이블에 기록된 방향 쪽으로 interest를 전송함으로써 캐시된 콘텐츠를 찾게 된다. 이 방법에서 역시 FIB로 설정된 기존 경로 이외 D-FIB에 기록된 추가적인 경로들로도 interest가 전송되기 때문에 중복된 데이터 전송이 불가피하게 발생할 수 있다. 뿐만아니라, 전달되는 콘텐츠 정보를 테이블에 기록하면서 발생하는 스토리지 오버헤드 역시 문제가 될 수 있다.

4) DIVER

Exploration 과정에서 발생하는 콘텐츠 중복전송 문제를 해결하기 위해서 DIVER[23]의 저자들은 meta-request의 사용을 제안하였다. Exploration과정에서 콘텐츠의 중복전송이 발생하는 이유는 interest의 복사본이 여러 인터페이스로 전송되기 때문이다. 따라서 DIVER는 exploration과정에서 interest 패킷 대신 meta-interest (interest에 기록된 콘텐츠 이름의 접두사 정보를 담은) 를 사용하게 된다. 이 패킷을 수신한 주변 노드들은 자신들의 캐시에 meta-interest에 기록되어 있는 접두사에 해당하는 콘텐츠들을 검색한다. 만약 해당하는 콘텐츠들이 있을 경우, Generalized Bloom Filter (GBF)를 사용하여 해당 콘텐츠들의 정보를 응답메시지에 담아 전송하게 된다. 이렇게 수집된 정보들은 exploitation 과정에서 최적의 위치로 interest를 포워딩하는데 사용되게 된다. 이와같이 DIVER는 meta-interest를 전송하여 주변 캐시의 콘텐츠 정보를 수집하기 때문에 콘텐츠의 중복 전송을 발생시키지 않으며, GBF를 사용함으로써 정보 교환과정에서의 메시지 오버헤드 문제를 최소화할 수 있었다. 그러나 GBF 관련 연산을 수행하기 위해 라우터에서 추가적인 오버헤드가 발생할 수 있는 문제가 존재한다. 또한, hash 연산에서의 false positive 및 수집된 정보의 유효기간 문제로 인해 콘텐츠가 실제 존재하지 않는 캐시로 interest가 포워딩 될 수도 있다. 이 경우 interest 재전송이 발생하게 되며 결과적으로 서비스 지연이 증가하는 문제가 발생할 수 있다.

5) Network-coding enabled NDN

네트워크 코딩 기술을 활용한 콘텐츠 액세스 기법들이 [20, 24-28]에서 소개되었다. 특히, [20,24]에서는 라우터 등과 같은 네트워크 노드들이 동일한 콘텐츠에 속한 여러 chunk에 대해 코딩 기법을 적용하여 encoded block을 생성하게 된다. 사용자는 이렇게 생성된 encoded block들을 decoding 하기에 충분한 개수만큼 수신하여 (정확히 표현하면 선형독립적

으로 encoding된 충분한 개수의 encoded block들을 수신하여) 원래의 콘텐츠를 복원한다. 따라서, 이 기법에서 사용하는 원래 콘텐츠 chunk가 아닌 encoded block을 요청하는 interest를 전송하게 된다. interest를 수신한 라우터들은 interest에 담겨있는 정보(사용자가 몇개의 encoded block을 수집했는지 정보)를 확인하고 자신들의 캐시가 추가로 decoding에 도움이 될 수 있는 정보를 제공할 만큼 충분한 갯수의 chunk를 가지고 있는지를 판단하게 된다. 만약 충분한 갯수의 chunk들을 가지고 있을 경우에는 이 chunk들로 새로운 encoded block을 생성하여 사용자에게 전달하게 된다. 이런 방식으로 encoded block들을 요청하는 interest를 사용하게 되면, 여러 라우팅 경로를 통해 interest가 플로딩되더라도 그 응답으로 동일한 encoded block이 중복해서 돌아오는 것이 아니라, 서로 다른 encoded block이 수신될 수 있기 때문에 데이터 중복전송으로 인한 오버헤드 문제가 최소화될 수 있다. 그러나 라우터에서 encoded block을 생성하는 과정에서 큰 컴퓨팅 오버헤드가 발생할 수 있는 문제가 있다. 또한, 콘텐츠 chunks들을 순서대로 필요로 하는 streaming 서비스 등에는 encoded block을 통해 콘텐츠를 전송하는 것이 적합하지 않을 수 있다.

4. Comparative Study using ndnSIM

이전 section에서 언급된 기법들(Table 1) 중 각 카테고리에서 대표적인 기법들, 즉 NDN basic [2], Proactive [14], INFORM [21], D-FIB[22]을 ndnSIM [29] 시뮬레이터에 구현하여 성능비교평가를 수행하였다. 성능비교평가는 Fig. 3에 보여지는 것과 같이 총 28개의 라우터들로 구성된 Australian Rocketfuel 토폴로지[30]를 사용하여 진행하였다. 라우터들 간의 링크 딜레이는 10ms, 라우터와 사용자 노드 사이의 링크 딜레이는 2ms으로 설정하였다. 총 7개의 서버가 Producer-side edge router에 각각 하나씩 연결되어 10⁶개의 서로 다른 콘텐츠들을 제공하고 있으며, Consumer-side edge router마다 각각 3개씩 연결되어 있는 사용자 노드들이 (총 18개) 이들 콘텐츠 들에 대해서 요청 메시지를 생성하게 된다. 요청되는 콘텐츠들의 인기도는 Zipf-mandelbrot 분포를 따르며 Zipf상수 α 는 0.7, 1.0으로 달리하면서 시뮬레이션을 진행하였다. 라우터들에 설치되어 있는 캐시의 크기도 전체 콘텐츠 양의 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%로 변경하면서 성능비교평가를 수행하였다. 그리고 비교기법들의 파라미터들로서 Proactive에서 라우터들은 interest 패킷을 수정하여 캐시 카탈로그 정보를 교환할 수 있도록 하였으며, 교환 범위는 [31]에서의 연구내용을 바탕으로 2홉으로 설정하였다. 교환 주기는 각 라우터에서 캐시 크기만큼의 콘텐츠를 수신하는 시간으로 설정하였다. Proactive기법은 interest를 복사하지 않고 off-path 캐시쪽에서만 전송하는 기법(Proactive w/o

Table 1. Comparison of Access Schemes in NDN

Categories	Schemes	Duplicate content transfer	Retransmission due to false routing information	Computational overhead (for off-path cached content)	Message overhead	Storage overhead (for off-path cached content)
Basic NDN	[2]	no	no	-	no	no
Proactive	[14]	no	yes	light	heavy	yes
	[15, 16]	no	no	light	no	no
	[17, 18]	no	yes	heavy	moderate	moderate
Reactive	[19]	yes	no	light	heavy	no
	[21]	yes	little	light	heavy	yes
	[22]	yes	little	light	moderate	yes
	[23]	no	yes	moderate	light	moderate
	[20, 24-28]	no	-	heavy	no	no

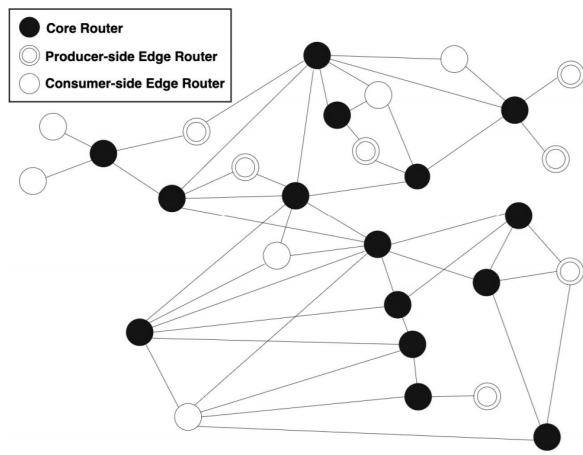


Fig. 3. Simplified Australian Rocketfuel Topology

Replication)과 interest를 복사하여 기본 라우팅 경로와 off-path 캐시 쪽으로 모두 전송하는 기법(Proactive w/ Replication)으로 구분해 두 기법 모두에 대해서 성능평가를 진행하였다. D-FIB에서 추가로 복사할 수 있는 interest 개수의 상한값(TFC margin)은 사용자와 서버 간의 라우팅 경로 중 최장거리와 같은 7로 설정하였다. 총 시뮬레이션 시간은 총 2,000초이며, 이 중 1000초가 지난 이후부터의 1,000 초 동안의 결과를 그래프로 나타내었다.

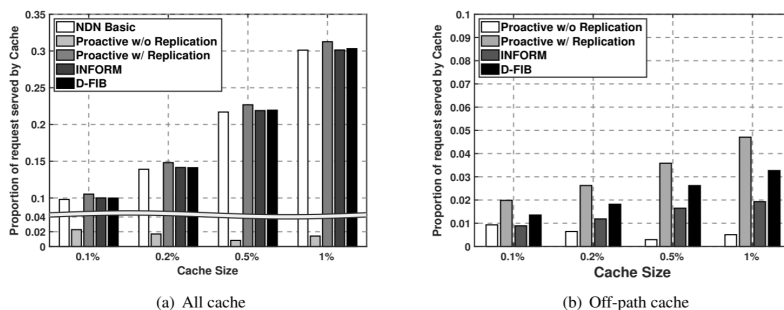
Fig. 4와 Fig. 5는 캐시에서 서비스된 콘텐츠의 양¹⁾을 나타내는 그래프이다. zipf 상수 α 가 클수록 더 많은 interest가 cache로부터 서비스된 것을 확인할 수 있다. 그리고 Proactive w/o Replication을 제외하고는 비교기법들이 NDN basic 보다 더 많은 양의 콘텐츠를 캐시에서 서비스하고 있음을 확인할 수 있다. Proactive w/o Replication의 경우에는 노드들 간 교환된 캐시 카탈로그 정보가 최신의 캐시 상태를 반영하지 못하는 문제로 인해, 이미 캐시에서 사라진 콘텐츠에

1) 캐시에서 서비스되는 콘텐츠 양이 많을수록 캐시를 활용함으로써 얻을 수 있는 이득이 커지게 된다. 따라서, 이 metric은 기법들로부터의 benefit 중 하나로 해석될 수 있다.

대해서도 interest가 캐시 쪽으로 잘못 포워딩 될 수 있다 (Fig. 6). 이로 인해서 실제로 캐시에서 서비스될 수 있는 콘텐츠 수가 매우 작게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이와 같은 현상은 노드들 간의 캐시 카탈로그 교환 주기를 더 짧게 함으로써 해결할 수 있다. 하지만, 이 경우 빈번한 카탈로그 교환으로 인해 메시지 오버헤드가 크게 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 다른 비교군들의 결과를 살펴보면, Proactive w/ Replication가 다른 Reactive 방법들보다 off-path 캐시에서 더 많은 interest를 서비스한 것을 확인할 수 있다. 이는 [31]에서의 “2홉의 검색 반경만으로도 off-path 캐시를 활용하여 효과적으로 interest를 서비스할 수 있다” 는 주장과 일치하는 결과이다. INFORM 및 D-FIB에서는 복사된 interest를 주변 노드 전체가 아닌 선택된 인터페이스를 통해서만 포워딩하기 때문에 off-path 캐시로부터의 interest 서비스 횟수가 작게 보고 되고 있다. 랜덤하게 인터페이스를 선택하는 INFORM에 비해서 이미 서비스된 방향으로 포워딩을 수행하는 D-FIB가 1.5에서 2배만큼 off-path 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠를 잘 활용할 수 있음을 또한 확인할 수 있다.

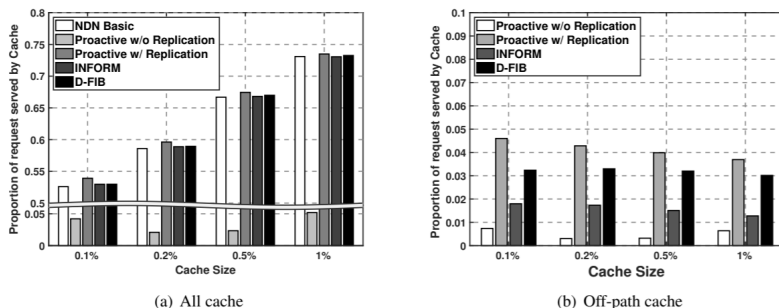
Fig. 6의 결과를 살펴보면 Proactive w/ replication 및 Reactive 기법들에서도 interest 재전송이 발생하는 것을 볼 수 있다. 복사된 interest가 주변 캐시 쪽으로 포워딩 되는 과정에서, 경로를 따라 포워딩 되는 interest (원본 interest 혹은 다른 사용자가 같은 콘텐츠를 요청하면서 생성한 interest)와 aggregation될 수 있다. 만약 복사된 interest가 주변 노드의 캐시에서 해당 콘텐츠를 찾지 못할 경우, NACK이 생성되고 aggregation된 PIT entry를 소진하면서 사용자 쪽 방향으로 라우팅되는 현상이 발생할 수 있다. 이 경우, 이후에 경로를 따라 서버로부터 전달되는 콘텐츠는 매칭되는 PIT entry를 찾지 못해 버려지게 되고, 그 결과로 interest 재전송이 발생할 수 있게 된다.

사용자가 콘텐츠를 수신하기까지의 콘텐츠 전달 홉 수는 Fig. 7에 나타나있다. 더 작은 홉 수를 보일수록 사용자의 요청이 더 가까운 캐시에서 서비스되었음을 나타내며, 결과적



Scheme	All cache				Off-path cache			
	0.1%	0.2%	0.5%	1%	0.1%	0.2%	0.5%	1%
NDN basic	0.098	0.139	0.217	0.301	0.000	0.000	0.000	0.000
Proactive (w/o repl.)	0.023	0.017	0.008	0.014	0.009	0.006	0.003	0.005
Proactive (w/ repl.)	0.105	0.148	0.227	0.313	0.020	0.026	0.036	0.047
INFORM	0.100	0.142	0.219	0.301	0.009	0.012	0.017	0.019
D-FIB	0.099	0.141	0.220	0.303	0.014	0.018	0.026	0.032

Fig. 4. Proportion of Interests Served by Caches ($\alpha=0.7$)



Scheme	All cache				Off-path cache			
	0.1%	0.2%	0.5%	1%	0.1%	0.2%	0.5%	1%
NDN basic	0.526	0.586	0.667	0.730	0.000	0.000	0.000	0.000
Proactive (w/o repl.)	0.042	0.021	0.023	0.052	0.007	0.003	0.003	0.006
Proactive (w/ repl.)	0.539	0.596	0.674	0.735	0.046	0.043	0.040	0.037
INFORM	0.530	0.589	0.668	0.731	0.018	0.017	0.015	0.012
D-FIB	0.530	0.589	0.670	0.732	0.032	0.033	0.032	0.030

Fig. 5. Proportion of interests served by caches ($\alpha=1.0$)

Scheme	$\alpha = 0.7$				$\alpha = 1.0$			
	0.1%	0.2%	0.5%	1%	0.1%	0.2%	0.5%	1%
NDN basic	0	0	0	0	0	0	0	0
Proactive (w/o repl.)	277240	315628	345814	341870	330872	346498	347062	332256
Proactive (w/ repl.)	49	66	124	182	110	91	96	94
INFORM	1	0	0	0	2	1	1	0
D-FIB	4	1	0	0	2	3	3	1

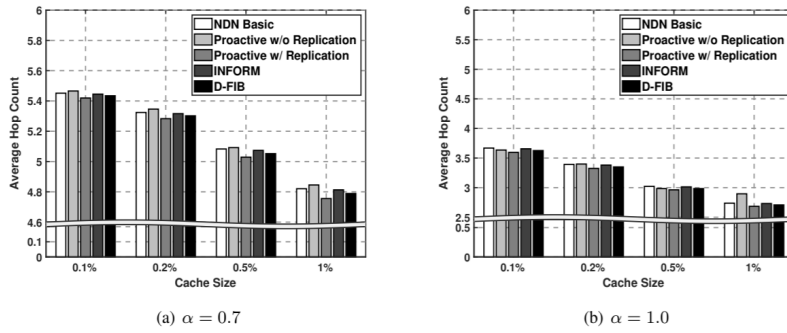
Fig. 6. Number of Interest Retransmissions

으로 사용자 QoS가 높은 경우를 의미한다. zipf 상수 α 가 클수록 더 많은 콘텐츠가 캐시에서 서비스 됨에 따라 콘텐츠의 전달 홉 수가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Proactive w/ Replication가 가장 많은 콘텐츠를 캐시에서 서비스하기 때문에 콘텐츠 전달 홉 수가 가장 작게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각 기법에서의 오버헤드를 확인하기 위해서 interest와 response가 포워딩 된 횟수²⁾를 측정하여

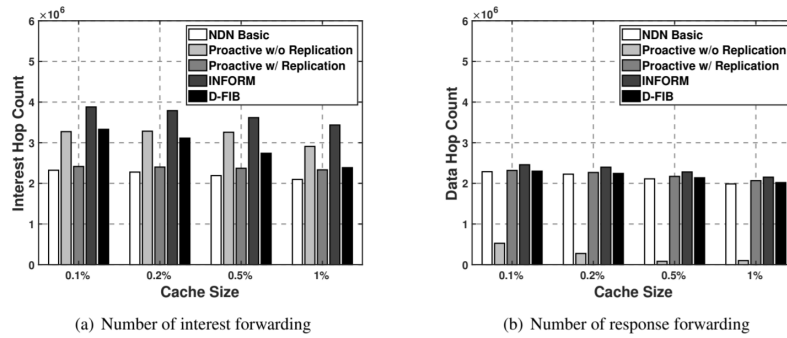
나타낸 그래프이다. zipf 상수 α 가 클수록 더 가까운 캐시에서 interest가 서비스될 수 있기 때문에 $\alpha=1.0$ 에서 interest와 response 포워딩 횟수가 더 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. NDN basic에서는 interest가 복사되지 않고 라우팅

2) 동일한 양의 콘텐츠를 서비스 함에 있어서 interest와 response 전달 횟수가 많을수록 더 많은 리소스 (링크 대역폭, 라우터 컴퓨팅 자원) 를 소모하게 된다. 따라서, 이 metric은 기법들의 operational cost를 나타낸다고 볼 수 있다.



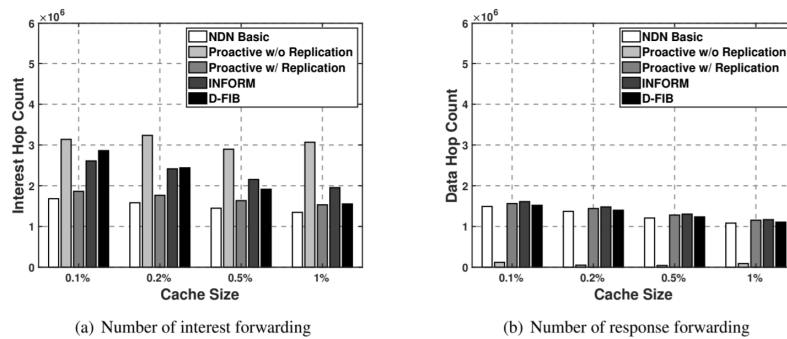
Scheme	$\alpha = 0.7$				$\alpha = 1.0$			
	0.1%	0.2%	0.5%	1%	0.1%	0.2%	0.5%	1%
NDN basic	5.451	5.324	5.083	4.82	3.669	3.392	3.012	2.738
Proactive (w/ repl.)	5.420	5.283	5.030	4.756	3.596	3.326	2.962	2.684
INFORM	5.445	5.316	5.073	4.813	3.656	3.381	3.013	2.731
D-FIB	5.434	5.302	5.052	4.790	3.626	3.350	2.984	2.708

Fig. 7. Hop Distance Content Moved



Scheme	Interest forwarding ($\times 10^6$)				Response forwarding ($\times 10^6$)			
	0.1%	0.2%	0.5%	1%	0.1%	0.2%	0.5%	1%
NDN basic	2.32	2.28	2.19	2.09	2.29	2.23	2.19	2.09
Proactive (w/ repl.)	2.41	2.40	2.37	2.33	2.32	2.27	2.17	2.07
INFORM	3.88	3.49	3.61	3.44	2.46	2.40	2.28	2.15
D-FIB	3.33	3.11	2.74	2.39	2.30	2.25	2.14	2.02

Fig. 8. Overhead Under $\alpha=0.7$



Scheme	Interest forwarding ($\times 10^6$)				Response forwarding ($\times 10^6$)			
	0.1%	0.2%	0.5%	1%	0.1%	0.2%	0.5%	1%
NDN basic	1.68	1.58	1.45	1.35	1.49	1.37	1.20	1.08
Proactive (w/ repl.)	2.60	1.76	1.64	1.53	1.56	1.44	1.28	1.15
INFORM	1.84	2.42	2.15	1.95	1.61	1.48	1.30	1.16
D-FIB	2.86	2.44	1.91	1.55	1.51	1.40	1.23	1.10

Fig. 9. Overhead Under $\alpha=1.0$

경로를 따라 포워딩 된다. 그럼에도 interest 포워딩 횟수가 response 포워딩 횟수보다 살짝 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 중복된 interest들이 라우터에서 aggregation되면서 나타난 결과이다. INFORM은 interest를 가장 공격적으로 복사함으로써 캐시된 콘텐츠를 찾기 때문에 가장 많은 interest 포워딩 횟수를 보여주고 있으며, 그 결과로 중복된 콘텐츠 전송 빈번히 발생해 가장 큰 response 포워딩 횟수를 나타내고 있다. 반면 D-FIB의 경우는 기존 라우팅 경로 이외에 콘텐츠 정보가 테이블에 기록되어 있을 경우에만 interest를 전송하기 때문에, 중복 콘텐츠 전송이 INFORM에 비해 상대적으로 적게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

5. Discussion & Conclusion

본 논문에서는 정보중심네트워크의 아키텍처 중의 하나인 NDN에서의 콘텐츠 접근 기법들에 대해 살펴보고, ndnSIM을 활용하여 대표적인 기법들에 대한 성능비교평가를 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 종합해보면, 캐시에 저장되어 있는 콘텐츠 정보를 주변 노드들과 주기적으로 교환하고, 수신된 interest를 복사하여 기존의 라우팅 경로 및 주변 캐시로 모두 전송하는 형태의 Proactive 기법에서 캐시된 콘텐츠가 가장 많이 활용될 수 있는 것을 확인하였다. 하지만, interest의 중복 전송에도 불구하고 교환된 정보의 유효성 문제(최신 캐시 상태를 반영하지 못하는 문제)로 인해 interest 재전송이 발생한다는 점, 그리고 interest 복사에 따른 콘텐츠의 중복전송이 불가피하다는 점이 이 기법의 한계임을 또한 확인하였다. 주기적으로 캐시된 콘텐츠 정보를 교환하는 proactive 기법에서는 교환된 정보의 유효성을 효과적으로 보장하는 것이 중요한 이슈일 것으로 생각된다. 그리고, interest 복사본을 활용하는 reactive 기법들에서는 최소 개수의 복사본을 생성하면서도 효율적으로 캐시된 콘텐츠를 찾을 수 있도록 하는 콘텐츠의 위치 추정기법이 중요 연구 방향 중 하나일 것이다.

References

- [1] V. Cisco, "Cisco visual networking index: Forecast and trends, 2017-2022," White Paper 1.1, 2018.
- [2] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs, and R. L. Braynard, "Networking named content," *Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, ACM, pp.1-12, 2009.
- [3] S. Tarkoma, M. Ain, and K. Visala, "The publish/subscribe internet routing paradigm (PSIRP): Designing the future internet architecture," *Future Internet Assembly*, pp.102-111, 2009.
- [4] Dannewitz, C. "Netinf: An information-centric design for the future internet," *Proceeding 3rd GI/ITG KuVS Workshop on The Future Internet*, Vol.6, 2009.
- [5] G. García, et al., "COMET: Content mediator architecture for content-aware networks," *2011 Future Network & Mobile Summit*, IEEE, pp.1-8, 2011.
- [6] D. Lagutin, K. Visala, and S. Tarkoma, "Publish/subscribe for internet: PSIRP perspective," *Future Internet Assembly 2010*, pp.84.
- [7] G. Bianchi, A. Detti, A. Caponi, and N. Blefari-Melazzi, "Check before storing: What is the performance price of content integrity verification in LRU caching?" *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.43, No.3, pp.59-67, 2013.
- [8] S. Lee, I. Yeom, and D. Kim, "T-caching: enhancing feasibility of in-network caching in ICN. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol.31, No.7, pp.1486-1498, 2020.
- [9] Z. Ming, M. Xu, and D. Wang, "Age-based cooperative caching in information-centric networks," *In 2012 Proceedings IEEE INFOCOM Workshops*, IEEE, pp.268-273, 2012.
- [10] I. Psaras, W. K. Chai, and G. Pavlou, "Probabilistic in-network caching for information-centric networks," *In Proceedings of the Second Edition of the ICN Workshop on Information-centric Networking*, pp.55-60, 2012.
- [11] W. K. Chai, D. He, I. Psaras, and G. Pavlou, "Cache 'less for more' in information-centric networks," *In International Conference on Research in Networking*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.27-40, 2012.
- [12] S. K. Fayazbakhsh, et al., "Less pain, most of the gain: Incrementally deployable ICN," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.43, No.4, pp.147-158, 2013.
- [13] V. Sourlas, L. Tassiulas, I. Psaras, and G. Pavlou, "Information resilience through user-assisted caching in disruptive content-centric networks," *In 2015 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, IEEE, pp.1-9, 2015.
- [14] J. M. Wang, J. Zhang, and B. Bensaou, "Intra-AS cooperative caching for content-centric networks," *In Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking*, pp.61-66, 2013.
- [15] S. Saha, A. Lukyanenko, and A. Ylä-Jääski, "Cooperative caching through routing control in information-centric networks," in *Proceeding INFOCOM*, Turin, Italy, pp.100-104, 2013.
- [16] S. Wang, J. Bi, J. Wu, and A. V. Vasilakos, "CPHR: In-network caching for information-centric networking with partitioning and hash-routing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.24, No.5, pp.2742-2755, 2016.

- [17] Y. Wang, K. Lee, B. Venkataraman, R. L. Shamanna, I. Rhee, and S. Yang, "Advertising cached contents in the control plane: Necessity and feasibility," *In 2012 Proceedings IEEE INFOCOM Workshops*, IEEE, pp.286-291, 2012.
- [18] A. Marandi, T. Braun, K. Salamatian, and N. Thomos, "BFR: a bloom filter-based routing approach for information-centric networks," *In 2017 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops*, IEEE, pp.1-9, 2017.
- [19] R. Chiocchetti, D. Rossi, G. Rossini, G. Carofiglio, and D. Perino, "Exploit the known or explore the unknown? Hamlet-like doubts in ICN," *In Proceedings of the Second Edition of the ICN Workshop on Information-centric Networking*, pp.7-12, 2012.
- [20] X. Hu, S. Zheng, G. Zhang, L. Zhao, G. Cheng, J. Gong, and R. Li, "An on-demand off-path cache exploration based multipath forwarding strategy," *Computer Networks*, Vol.166, Article 107032, 2020.
- [21] R. Chiocchetti, D. Perino, G. Carofiglio, D. Rossi, and G. Rossini, "Inform: A dynamic interest forwarding mechanism for information centric networking," *In Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking*, pp.9-14, 2013.
- [22] O. Ascigil, V. Sourlas, I. Psaras, and G. Pavlou, "Opportunistic off-path content discovery in information-centric networks," *In 2016 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN)*, IEEE, pp.1-7, 2016.
- [23] I. V. Bastos and I. M. Moraes, "A diversity-based search-and-routing approach for named-data networking," *Computer Networks*, Vol.157, pp.11-23, 2019.
- [24] X. Hu, S. Zheng, L. Zhao, G. Cheng, and J. Gong, "Exploration and exploitation of off-path cached content in network coding enabled named data networking," *In 2019 IEEE 27th International Conference on Network Protocols (ICNP)*, IEEE, pp.1-6, 2019.
- [25] M. Montpetit, C. Westphal, and D. Trossen, "Network coding meets information-centric networking: An architecture case for information dispersion through native network coding," *Proceeding ACM Workshop on NoM Hilton Head Island*, pp.1-6, 2012.
- [26] G. Zhang and Z. Xu, "Combing CCN with network coding: An architectural perspective," *Computer Networks*, Vol.94, pp.219-230, 2016.
- [27] J. Saltarin, E. Bourtsoulatze, N. Thomos, and T. Braun, "Netcodccn: A network coding approach for content-centric networks," *Proceeding INFOCOM*, 2016.
- [28] Q. Wu, Z. Li, G. Tyson, S. Uhlig, M. A. Kaafar, and G. Xie, "Privacy-aware multipath video caching for content-centric networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.34, No.8, pp.2219-2230, 2016.
- [29] S. Mastorakis, A. Afanasyev, I. Moiseenko, and L. Zhang, "NDNSIM 2: An updated NDN simulator for NS-3," NDN, Technical Report NDN-0028, Revision 2. 2016.
- [30] F. Solano, T. Stidsen, R. Fabregat, and J. L. Marzo, "Label space reduction in MPLS networks: How much can a single stacked label do?" *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.16, No.6, pp.1308-1320, Dec. 2008.
- [31] L. Wang, S. Bayhan, J. Ott, J. Kangasharju, A. Sathiseelan, and J. Crowcroft, "Pro-diluvian: Understanding scoped-flooding for content discovery in information-centric networking," *In Proceedings of the 2nd ACM Conference on Information-Centric Networking*, pp.9-18, 2015.



이 준 석

<https://orcid.org/0000-0002-4526-7863>

e-mail : jslee435@gmail.com

2021년 ~ 현 재 강원대학교 컴퓨터공학과
학·석사통합과정

관심분야 : Computer Networking,
Machine Learning



김 도 형

<https://orcid.org/0000-0002-6364-1505>

e-mail : d.kim@kangwon.ac.kr

2004년 아주대학교 정보및컴퓨터공학부
(학사)

2014년 KAIST 전산학과(박사)

2014년 ~ 2018년 성균관대학교 PostDoc.
및 연구교수

2018년 ~ 2019년 아주대학교 소프트웨어학과 조교수

2019년 ~ 현 재 강원대학교 컴퓨터공학과 조교수

관심분야 : Computer networking, Future Internet
Architecture, Machine Learning