

## PON기반 5G 프론트홀의 캐싱 성능 평가

정복래  
성결대학교 정보통신학과 교수

### Performance Evaluation of Caching in PON-based 5G Fronthaul

Bokrae Jung  
Professor, Department of Information Communication Engineering

**요약** 5G 인프라 보급과 더불어 기하급수적으로 증가하는 1인 미디어 방송, 유튜브와 같은 모바일 콘텐츠 서비스를 안정적으로 제공하기 위해서는 사용자 부근에 캐시 서버를 분산 배치하는 콘텐츠 전송 네트워크(CDN:Content Delivery Network) 도입이 필수적이다. 지역 캐시 없이 사용자가 콘텐츠 사업자(Content Provider)로부터 직접 서비스를 받는 트래픽이 늘어날수록 모바일 백홀(Backhaul)과 프론트홀(Fronthaul)에서 감당해야 할 부담은 상당히 증가하게 된다. 본 연구는 광기반 5G 프론트홀 구조와 캐싱 방법을 제안하여 모바일 백홀의 대역폭 및 서비스 품질을 개선하는 데 목적이 있다. 이를 위해 우선 전용 광케이블을 프론트홀로 사용하는 콘텐츠 전송 네트워크와 수동광가입자망(PON:Passive Optical Network)을 사용하는 구조를 제안한다. 그 위에 PON 캐싱에 특화된 집화된 콘텐츠 요청 방법을 제안하고 모델링과 시뮬레이션을 통해 그 성능을 기존의 방식과 비교한다. 제안된 PON 캐싱은 기존 캐싱이 없는 구조에 비해 최대 0.5초의 평균접근시간 감소, 1/n개의 수신된 요청 패킷 감소, 약 60% 백홀 대역폭 절감 효과를 나타냈다. 이 연구는 모바일 백홀 비용과 서비스 품질 사이에서 고민하는 통신사업자들에게 하나의 참고 자료가 될 수 있으며, 추후 캐시 적중률을 더욱 끌어올리는 방안으로 확장 될 것이다.

**주제어** : 캐싱, 콘텐츠 전송 네트워크, 백홀, 프론트홀, 수동광가입자망, 5세대 이동통신

**Abstract** With the deployment of 5G infrastructure, content delivery network (CDN) will be a key role to provide explosive growing services for the independent media and YouTube which contain high-speed mobile contents. Without a local cache, the mobile backhaul and fronthaul should endure huge burden of bandwidth request for users as the increase number of direct accesses from contents providers. To deal with this issue, this paper fist presents both fronthaul solutions for CDN that use dark fibers and a passive optical network (PON). On top of that, we propose the aggregated content request specialized for PON caching and evaluate and compare its performance to legacy schemes through the simulation. The proposed PON caching scheme can reduce average access time of up to 0.5 seconds, 1/n received request packets, and save 60% of backhaul bandwidth compared to the no caching scheme. This work can be a useful reference for service providers and will be extended to further improve the hit ratio of cache in the future.

**Key Words** : Caching, Content Delivery Network, Backhaul, Fronthaul, Passive Optical Network, 5G

\*Corresponding Author : Bokrae Jung(bokrae.jung@gmail.com)

## 1. 서론

유무선 통신기술의 발전과 더불어 IPTV(Internet Protocol Television)와 같은 통신 인프라를 이용한 방송, 영화 등의 콘텐츠 서비스가 일상화되고 되고 있다[1]. 최근 방대한 콘텐츠를 보유한 넷플릭스의 국내 상륙으로 촉발된 OTT(Over The Top) 시장은 거침없이 성장하고 있다. 게다가 애플tv+, 디즈니+와 같은 후발주자들도 국내 시장진입을 예고하고 있어 국내 토종 사업자들은 시장 변화에 적극적으로 대응하고 있다[2].

이렇듯 콘텐츠 서비스에 대한 수요와 투자는 날이 갈수록 증가하고 있다. 날로 고화질화 요구가 높아지고 있는 영화, 게임 콘텐츠를 원활하게 서비스하기 위해서는 분산된 캐시를 가입자 가까이에 두고 콘텐츠를 미리 옮겨 놓음으로써 전송 속도를 높이는 콘텐츠 전송 네트워크(CDN) 도입이 필수적이다. 특히 5G 시스템 인프라가 완전히 자리 잡게 된다면 초고화질을 지원하는 모바일 비디오 서비스가 백홀의 용량을 빠르게 잠식해 버리는 주요 원인이 될 수도 있다[3].

본 논문에서는 가입자단 전송망 역할을 하는 5G 프론트홀로써 전용 광케이블과(Dark fiber)과 PON을 기반으로 한 콘텐츠 전송 네트워크를 제시한다. 전용 광케이블은 광인프라가 풍부한 통신사업자에게 가장 간단히 무선접속망을 구축할 수 있는 수단을 제공한다. 반면 PON 시스템은 폭발적으로 증가하는 가입자들의 트래픽을 수용하기 위한 가장 유망한 대안 중의 하나이다. 국내 초고속 가입자망 서비스의 대부분을 PON 시스템에 의해 운영되고 있으며, 최근에는 10Gb/s 이상의 광 대역폭, 100km 서비스 영역, 1:256 분배율(splitting ratio)로 인한 높은 확장성을 제공하는 단계까지 진화하고 있다[9].

PON을 이용한 프론트홀 구조는 콘텐츠 전송 및 캐싱과도 잘 어울려 다음과 같은 장점을 발휘한다. 첫째, 하향 신호가 광분배기(splitter)를 거치면서 브로드캐스팅 되는 특징이 있는데, 이는 실시간 방송을 전달하기에 매우 적합한 구조이다. 둘째, PON에서는 사용자들의 콘텐츠 요청이 집화되어 전송되므로 사용자 콘텐츠 요청이 증가하더라도 실제 요청 패킷은 일정 주기 내에 단 한 번만 발송된다. 이는 콘텐츠 요청 증가에 따른 과도한 제어 패킷의 생성을 방지할 수 있다[6]. 마지막으로, OLT(Optical Line Terminal)에서 사용자들의 집화된 콘텐츠 요구들을 읽어서 다시 스케줄링 가능하

로 일정 시간 내의 중복된 콘텐츠에 대하여 반복된 요청은 단 한 번의 전송만으로 모든 사용자의 서비스 요청을 만족시킬 수 있다.

과거 콘텐츠 전송 네트워크에서 최적의 효과를 내는 캐시의 배치, 적절한 캐싱/교체 알고리즘 제시를 통한 적중률(Hit ratio) 개선에 관한 연구가 주류를 이루었다[5-8]. 일부에서는 기존의 PON 구조를 기반으로 지역 캐싱을 제공하기 위한 연구가 떠오르기 시작했다[10]. 여기서, 지역 캐시를 가입자 부근 ONU(Optical Network Unit)에 놓는 대신 광분배기가 위치한 원격 노드로 이동시켜 지역 캐시의 수와 백홀 트래픽 부담을 동시에 줄이고자 하였다. 그러나 이를 위해서는 별도의 전원공급 시설과 공간이 불가피하다. 반면, 지역 캐시를 ONU 부근에 위치시키고 SDN(Software-Defined Networking)을 이용하여 비디오 서비스를 제어하는 방법이 소개되었다[11]. 한 단계 더 나아가, [12]에서는 원격노드의 수동성을 해치지 않고 ONU 부근에 지역 캐시 간 통신을 가능하도록 하는 구조를 제안하였다. 위 두 연구는 SDN을 캐시 제어 방식으로 채택하고 있다는 공통점이 있으나 현시점에서 이를 갖추지 못한 사업자들의 호응을 받기에는 한계가 있다.

방송·통신 서비스의 인프라로 표준화된 PON을 5G 모바일 프론트홀의 중심에 놓고 그 본연의 구조와 프로토콜을 콘텐츠 캐싱과 결합하여 제어 방법을 설계하고 성능을 분석한 연구는 그리 많지 않았다. 이러한 맥락에서 본 논문은 현재 단계에서는 상기에 언급한 장점을 끌어낼 수 있는 콘텐츠 전송 네트워크와의 구조를 제시한다. 그 위에 PON 캐싱에 특화된 집화된 콘텐츠 요청 방법을 제안하고 그 성능을 기존의 방식과 비교해 본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 전용 광케이블과 PON을 프론트홀로 이용한 5G 콘텐츠 전송 네트워크 구조와 PON 캐싱을 위한 집화된 콘텐츠 요청과정을 살펴본다. 3장에서는 콘텐츠 캐싱을 위한 평균 접근 시간을 분석해 본다. 4장에서는 PON 캐싱과 전용 광케이블 기반의 일반 캐싱, 전용 광케이블 기반의 캐싱 기능의 없는 3가지 방식의 성능을 평가한다. 마지막 5장에서는 결론을 맺는다.

## 2. 5G CDN 구조 및 집화된 콘텐츠 요청

최근 이동통신 네트워크 핵심의 무게 중심은 셀사이

트에서 국사로 이동하고 있다. 통신기술의 발달과 장비 유지보수 비용의 절감 요구에 힘입어, DU(Digital Unit)의 기능을 셀사이트로부터 완전히 분리하고 국사에 이들을 집중시킨 C-RAN(Cloud-Radio Access Network) 구조의 형태로 이동통신 구조가 진화하고 있다[4]. 이렇게 한곳에 집적된 DU 장치들을 다른 말로 BBU(BaseBand Unit) pool이라고 한다. 위 그림과 같

이 C-RAN 구조에서 BBU pool과 RRH는 보통 광케이블로 연결되며 이 구간을 프론트홀이라 부른다. 또 BBU pool과 모바일 핵심망(Mobile Core) 사이의 잇는 백홀은 가입자 트래픽이 모바일 핵심망으로 빠져나가는 통로 역할을 한다.

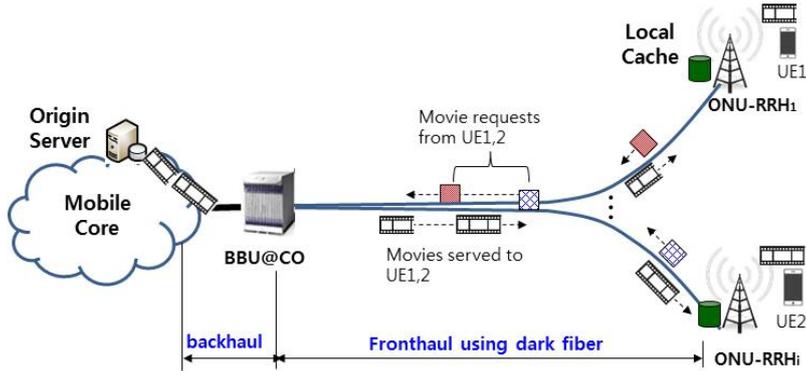


Fig. 1. 5G CDN architecture using dark fibers as fronthaul

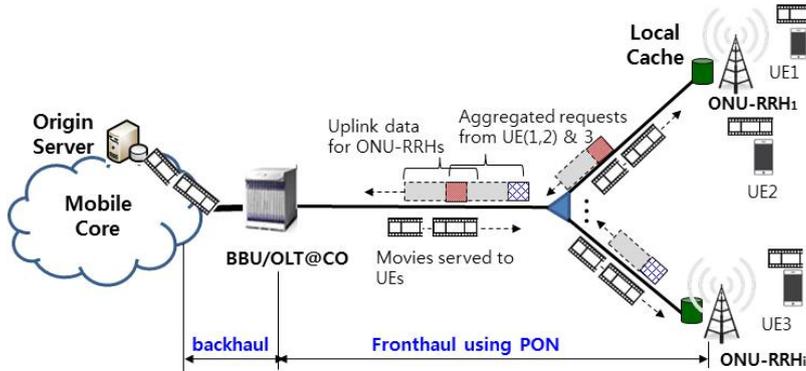


Fig. 2. 5G CDN architecture using PON fiber as fronthaul

Fig. 1은 광케이블을 프론트홀로 이용한 5G 콘텐츠 전송 네트워크를 나타낸 것이다. 이 그림은 셀사이트에 위치한 ONU-RRH들이 전용 광케이블(Dark Fiber)을 통하여 그들이 속한 BBU에 1:1로 연결되는 가장 일반적인 프론트홀 구성을 보여 준다. 그림에서는 셀 하나당 RRH의 개수 만큼 BBU를 연결에 필요한 광케이블의 개수도 동시에 늘어나게 된다. 여기에 셀 분할화를 적용하게 된다면 분할 개수의 곱에 비례하여 광케이블 개수가 더욱 증가할 것이다.

콘텐츠 전송 네트워크의 모바일 핵심망에는 모바일 사용자에게 서비스할 콘텐츠의 원본을 저장하고 있는 오

리진서버(Origin Server)가 있다. 반면에 ONU-RRH 부근에는 상대적으로 작은 용량이지만 사용자의 요청 빈도가 높은 콘텐츠를 오리진서버로부터 일부 복사하여 저장한 지역 캐시(Local Cache)가 위치해 있다. Fig.1에서 보는 바와 같이, 각 ONU-RRH는 사용자의 영화 요청이 왔을 때, 우선 지역 캐시에 접근하여 해당 콘텐츠의 유무를 확인한다. 만약 존재한다면 사용자는 빠르게 서비스를 받을 것이다. 그렇지 않으면, 해당 콘텐츠를 요청하는 패킷을 핵심망에 있는 오리진서버까지 보내야 하는데 이 경우 사용자는 요청한 영화에 응답을 받기까지 어느 정도의 지연을 감수해야 한다. 이 네트워크 구조에서

는 전용 광케이블을 사용하므로 사용자들은 다른 셀의 트래픽 상황과 관계없이 서로 독립적으로 요청 패킷을 보내고 응답 스트림을 받을 수 있다.

Fig. 2는 PON을 프론트홀로 이용한 5G 콘텐츠 전송 네트워크이다. 전자의 네트워크와 달라진 점은 ONU-RRH들의 전용 광링크가 어느 지점에서 단일 링크로 통합되어 BBU로 이어지는 부분이다. 여러 ONU-RRH에서 모인 신호들이 충돌로 인한 정보의 손실 없이 단일 링크로 전송되기 위해서 시분할 또는 파장분할 다중화 방식을 사용할 수 있다.

제시된 네트워크 구조는 특별히 시분할 다중화 방식으로 동작하는 E-PON(Ethernet-PON)을 프론트홀로 구성하고 있다. 각각의 ONU-RRH는 대역폭에 해당하는 타임슬롯(Time Slot)이 할당되어 있는데 이 속에는 이더넷 패킷 형식의 데이터 burst가 들어있다. 정교하게 동기화된 시분할 링크를 통해, 상향으로는 각각의 ONU-RRH에서 보낸 타임슬롯들이 충돌 없이 광결합기(combiner)를 통해 하나의 링크로 전송된다. 그림을 보면 각 ONU-RRH의 상향 데이터를 담은 타임슬롯

뒤에 해당 셀 사용자들의 콘텐츠 요청 정보를 수집한 REPORT 메시지가 따라붙는다.

이 구조에서는 사용자들의 콘텐츠 요청은 개별적으로 처리될 수 없고, 그들이 속한 특정 ONU-RRH의 할당된 타임슬롯 끝부분의 REPORT 메시지에 모여서 올라간다. 일정 길이의 타임슬롯이 모든 ONU-RRH에 똑같이 할당되었다고 가정하면, REPORT의 도래 주기는 Fig. 3과 같이 폴링 주기  $T_p$  가 된다. 이렇게 사용자들의 콘텐츠 요청이 즉시 보내지지 않고 집화되면서 Fig. 1의 네트워크 구조에 비해 사용자당 평균  $T_p/2$ 의 지연이 예상된다. 반면 사용자 콘텐츠 요청이 증가하더라도 실제 요청 패킷인 REPORT는 주기 내에 한 번만 발송된다. 한편, 국사에 배치된 OLT로부터 하향으로 흘러가는 데이터들은 광분배기(splitter)를 거치면서 여기에 연결된 모든 ONU-RRH들에게 동시에 브로드캐스트되고 그 중 목적지가 일치하는 패킷만 받아들이고 나머지는 모두 폐기한다.

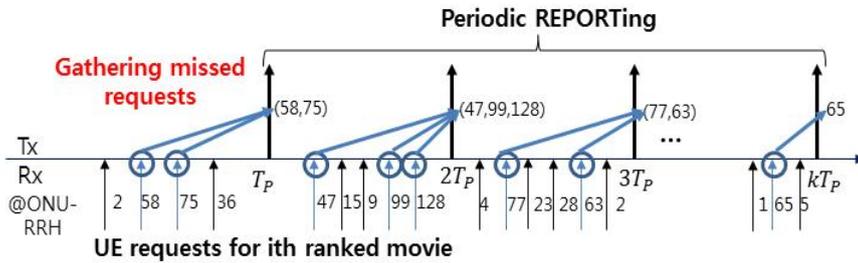


Fig. 3. Transmission process of aggregated periodical REPORT

### 3. 평균 접근 시간(Mean Access Delay)

영화와 같은 콘텐츠 요청의 행동성향은 일반적으로 다음과 같이 Zipf 분포를 따른다[13].

$$P(i) = \frac{C}{i^\alpha} \quad (1)$$

여기서 P(i)는 순위 i번째 영화를 요구할 확률이며  $\alpha$ 는 skew factor로 함수 곡선 왜곡의 정도를 나타낸다. 양의 값을 가지는 P(i)를 모두 더하면 1이 되므로 아래와 같이 상수 C를 구할 수 있다.

$$C = 1 / \sum_{j=1}^N \frac{1}{j^\alpha} \quad (2)$$

여기서 N은 이 시스템이 제공하는 총 영화의 개수를 의미한다. 사용자의 영화 요청이 서비스를 받기 위해 평균적으로 기다려야 하는 시간을 평균접근시간  $T_a$ 라고 하고 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$T_a = \left( \sum_{i=1}^K T_H^i + \sum_{j=1}^M T_M^j \right) / R \quad (3)$$

여기서 K와 M은 각각 적중(Hit) 그리고 미적중(Miss) 요청의 개수를 의미하며 이 둘의 합은 총 요청 개수 R과 같다 ( $K+M=R$ ).  $T_H^i$ 는 i번째 적중한 요청의 접근 시간,  $T_M^j$ 는 j번째 미적중 요청의 접근 시간을

의미한다.

한편, 콘텐츠 캐싱을 성능을 좌우하는 적중률 H는 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$H = \sum_{i=1}^K N_H^i / R \approx \sum_{i=1}^S P(i) \quad (4)$$

여기서  $N_H^i$ 는 i번째 영화에 적중한 요청개수이다. 캐시 서버에 영화의 순위가 오름차순으로 정렬되어 있다고 가정할 때 S는 캐시에 저장 가능한 영화의 개수를 의미하며 요청이 무한히 많아지면 적중률은 1에서 S까지 P(i)를 더한 값에 수렴한다.

#### 4. 성능 평가

본 논문에서 제시한 두 가지 구조와 콘텐츠 캐싱 제어는 OPNET modeler와 C프로그래밍을 이용하여 시뮬레이션하였다[14,15]. 캐싱과 관련하여 오리진 서버의 영화 개수는 1000개, 지역 캐시에는 최대 50개, skew factor는 0.801, 초당 평균 영화 요청 수는 5번으로 파라미터를 설정하였다. 프론트홀의 길이는 30km이며 링크속도는 최대 1Gb/s로 설정되었다. 전용 광케이블을 이용한 캐싱은 'Normal-caching', 전용 광케이블을 이용하지만 캐싱이 없으면 'No-caching', PON을 이용한 캐싱은 'PON-caching'라고 명명하였고 이 세 가지 방식에서 캐싱과 네트워크 성능을 평가하였다.

Fig. 4는 초당 요청 패킷 도달량을 나타낸 그래프이다. 즉, 초당 요청 수가 증가 될 때 오리진 서버에 들어온 요청 패킷 개수의 변화를 측정하는 것이다. PON-caching은 초당 요청 수와 관계없이 일정하게 하나의 요청 패킷만 서버에 도달한다. 이는 앞에서 언급하였듯이 일정 주기 안에서 사용자 요청들이 집화되어 한 번만 발송되기 때문이다. No-caching의 경우 모든 요청이 미적중되므로 오리진 서버에 모든 요청이 그대로 들어온다. 따라서 요청 수와 도달한 패킷 수는 같다. Normal-caching은 미적중된(missed) 요청 패킷만 도달하므로 결과가 나머지 둘의 중간에 위치하게 된다.

적중률에 따른 평균 접근 시간은 Fig. 5를 통해 파악할 수 있다. 적중률이 0일 때는 평균 접근 시간이 0.45였다가 적중률이 1에 도달할수록 그 값이 0에 접근한

다. Normal-caching과 PON-caching의 그래프가 겹쳐 보여서 성능의 차이를 분별하기 힘들다. 그러나 자세히 들어가 보면, 집화된 요청 방식을 사용하는 PON-caching이 Normal-caching보다 약간의 시간이 더 걸리는데 이 격차는 증감률, 즉 (PON-caching - Normal-caching)/PON-caching의 결과로 확인할 수 있다. 이 두 곡선의 격차는 0.2%로 시작해, 적중률이 1에 가까워질수록 0.15%로 더욱 줄어든다.

마지막으로 Fig. 6은 임의의 시간대에 영화 요청 시나리오는 넣고 백홀에 걸리는 실시간 트래픽을 측정하는 것이다. 여기서는 1-2시와 3-4시 구간에만 영화 요청을 가능하게 시나리오를 구성했다. No-caching의 경우 1, 3시에 요청이 시작되자마자 620Mbps 속도의 영화 스트리밍이 한 시간에 걸쳐 백홀로 흘러간다. 그러나 캐싱 기능이 있는 나머지 두 방식에서는 상대적으로 적은 평균 250Mbps 만으로도 요청된 서비스를 수행함을 알 수 있다. 이는 캐싱 기능이 없는 No-caching 방식에 비해 약 60%의 대역폭을 절감하는 효과가 있다.

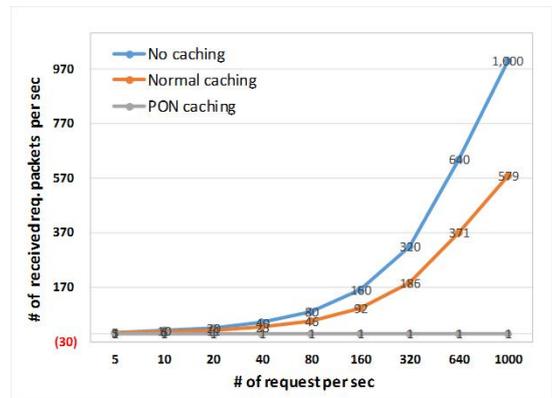


Fig. 4. Number of received packets per sec

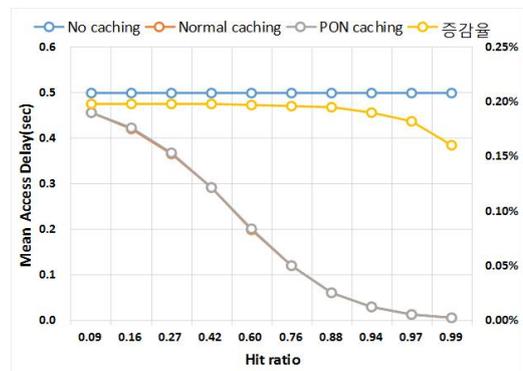


Fig. 5. Mean Access Delay

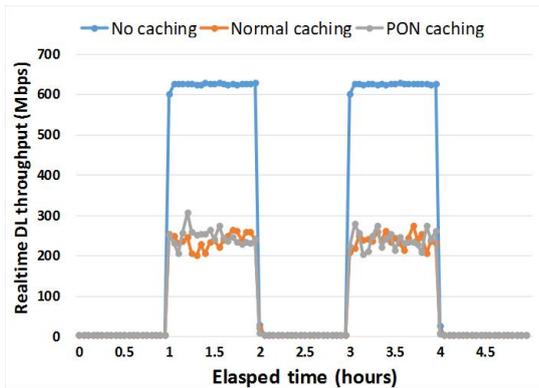


Fig. 6. Realtime downlink throughput

## 5. 결론

본 논문에서는 전용 광케이블과 PON을 5G 프론트홀로 사용하는 두 가지 CDN 구조를 제안한다. 특히 집화된 콘텐츠 요청 전송방법이 적용된 PON caching 방식을 제안하고 Normal-caching과 No-caching 방식과 비교한다. 제안된 방식은 No-caching에 비해 최대 0.5초의 평균접근시간 감소, 1/n개의 수신된 요청 패킷 감소, 약 60% 백홀 대역폭 절감 효과를 나타냈다.

## REFERENCES

- [1] S. H. Ju, M. Y. Song & B. K. Kim. (2018). The Effect of Personal trait on Perceived Value and Recommendation Intention : Focus on one-person media contents. *Journal of the Korea Convergence Society*, 9(12), 159-167.
- [2] D. Y. Moon & S. I. Kim. (2019). Study of Korean-Content Development Strategy: Focusing on Netflix and Watcha Play. *Journal of Digital Convergence*, 17(2), 399-404.
- [3] B. R. Jung. (2018). Evolution path of mobile fronthaul/backhaul architecture for 5G service. *Journal of KINGComputing*, 14(2), 16-23.
- [4] China Mobile Research Institute (2011). *C-RAN: The Road Toward Green RAN*.
- [5] M. A. Kader et al. (2015). Leveraging Big Data Analytics for Cache-Enabled Wireless Networks. *IEEE Globecom Workshops* (pp. 1-6). San Diego.
- [6] X. Wang et al. (2014). Cache in the air: exploiting content caching and delivery

techniques for 5G systems. *IEEE Commun. Mag.*, 5(2), 131-139.

- [7] C. D. Lee. (2019). A Smart Caching Scheme for Wireless Home Networking Services. *Journal of Digital Convergence*, 17(9), 153-160.
- [8] D. Y. Kim. (2017). A Comparison Study on Data Caching Policies of CCN. *Journal of Digital Convergence*, 15(2), 327-334.
- [9] G. Kramer et al. (2002), Ethernet PON (ePON): Design and analysis of an optical access network. *Photonic Network Communications*, 3(3), 307-319.
- [10] C. Jayasundara et al. (2010). Popularity-Aware Caching Algorithm for Video-on-Demand Delivery over Broadband Access Networks. *IEEE GLOBECOM 2010*. (pp. 1-5). Miami.
- [11] X. Li et al. (2014, March). Joint bandwidth provisioning and cache management for video distribution in software-defined Passive Optical Networks. *OFC 2014*. (pp. 1-3). San Francisco.
- [12] Y. Li et al. (2018). Cooperative video caching scheme over software defined passive optical network. *Journal of Network and Computer Applications*. 117, 86-100.
- [13] L. Adamic. (2002). *Zipf's Law and the Internet*. Palo Alto : HP Laboratories
- [14] K.Christensen. *Christensen Tools Page*. (Online). <http://http://www.csee.usf.edu/~kchriste>
- [15] OPNET Modeler. *Riverbed Technology*. (Online). <https://www.riverbed.com>

## 정복래(Bokrae Jung)

[정회원]



- 2010년 8월 : 한국과학기술원 정보통신공학과 (박사)
- 2011년 5월 : 한국전력기술(주) 원자로설계개발단 선임기술원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 성결대학교 정보통신공학부 부교수

· 관심분야: 광가입자망, 유·무선 통합망 기술, 그린에너지 통신망

· E-Mail : bokrae.jung@gmail.com