

# IEEE 802.16e WiMAX 시스템에서 업링크 ACK 패킷 전송 성능평가

정회원 전 경 구\*

## Performance Evaluation of Uplink ACK Packets Transmission in IEEE 802.16e WiMAX Systems

Kyungkoo Jun\* *Regular Member*

요 약

스마트폰 등의 무선 정보화 기기의 급속한 보급으로 IEEE 802.16e WiMAX와 같은 무선 고속데이터 망에 대한 수요가 늘고 있다. 데이터 수요의 대부분을 차지하는 모바일 어플리케이션들 중 상당수가 트랜스포트 계층으로 TCP를 사용하고 있는 상황에서 WiMAX 시스템의 TCP 성능개선은 매우 중요하다. 본 논문에서는 WiMAX 시스템에서 필연적으로 발생하는 업링크 패킷 버퍼링을 이용하여 효율적으로 ACK 패킷을 전송하는 방법을 제안한다. 제안방식은 기존 ACK 필터링을 지원함과 동시에 이전에는 처리할 수 없었던 piggyback ACK 패킷들도 payload 병합을 통해 처리한다. 그 결과, 업링크 ACK 패킷 전송에 필요한 무선대역폭을 감소시킬 수 있어 다운링크 성능 향상을 얻을 수 있다. 시뮬레이션을 통한 성능평가에서 ACK 패킷 전송에 필요한 대역폭이 개선된 것을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : WiMAX, TCP downlink, throughput, ACK filtering, Piggyback

ABSTRACT

The need for broadband wireless data networks such as IEEE 802.16e WiMAX systems increases as a variety of wireless information devices like smart phones are adopted rapidly in everyday life. Since most of mobile applications employ TCP as their transport layer protocol, the performance improvement of TCP in WiMAX systems is crucial. This paper proposes an efficient method to transmit uplink piggyback ACK packets by exploiting the uplink packet buffering which happens because of the resource allocation scheme of the WiMAX systems. The proposed method can support not only the ACK filtering but also the merging of the piggyback ACK packets. As a result, the bandwidth reduction in the piggyback ACK packet transmission leads to the improvement of the downlink throughput. The simulation results show that the bandwidth for the ACK packets reduces more than 90%, and the downlink throughput increases at least 30%.

### I. 서 론

스마트 폰 등의 이동형 정보화 기기의 대중화 및 급속한 보급으로 무선 고속 데이터망에 대한 수요가

늘고 있고, 그 중요성 또한 매우 커지고 있다. IEEE 802.16e WiMAX 시스템<sup>[1]</sup>은 3GPP 진영의 Long Term Evolution (LTE)<sup>[2]</sup> 시스템과 함께 그러한 수요를 맞춰줄 수 있는 기술이다.

※ 본 연구는 2010년도 인천대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

\* 인천대학교 임베디드시스템공학과 (kjun@incheon.ac.kr)

논문번호: KICS2010-11-517, 접수일자: 2010년 11월 1일, 최종논문접수일자: 2011년 5월 2일

데이터전송 수요를 발생시키는 어플리케이션들, 특히 스마트폰용 모바일 어플리케이션들 또한 매우 빠르게 증가하는 추세다. 상당수의 모바일 어플리케이션들은 TCP를 transport 계층의 전송 프로토콜로 이용한다. 따라서 WiMAX 시스템에서 TCP 트래픽 처리의 성능향상 및 이와 관련된 무선자원의 효율적인 이용은 매우 중요한 문제이다.

WiMAX 시스템의 셀은 하나의 base station(BS)과 복수의 mobile station (MS)들로 구성된다. BS는 core network와 연결되어 있고, MS들은 BS를 통해 외부네트워크와 연결된다.

BS가 대역폭을 직접 결정하고 할당하는 다운링크 스케줄링과 달리, 업링크 스케줄링은 request-and-grant 방식으로 MS가 필요한 대역폭을 요청하면 그에 따라 BS가 할당한다. 이러한 업링크 대역폭 요청과 할당에 소요되는 시간은 TCP 다운링크 트래픽에 대한 ACK 패킷 전송을 지연시켜 다운링크 성능에 부정적인 영향을 끼친다. 이는 TCP 전송성능은 역방향으로 전송되는 ACK 패킷의 전송성능에 크게 의존하기 때문으로, 특히 양방향 대역폭 차이가 큰 비대칭 네트워크에서는 영향이 더 크게 나타난다<sup>[3]</sup>.

WiMAX 시스템에서 TCP 성능향상과 관련된 연구들은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 적극적 cross layer 접근방식이다. TCP 계층 정보를 참조해서 MAC 계층의 무선자원 할당을 결정한다.<sup>[4,6]</sup> 다른 하나는 소극적 cross layer방식으로 TCP관련 메시지량을 줄이는 방식이다.<sup>[7-9]</sup>

우선 적극적 cross layer 방식을 살펴보면, [4]는 MAC계층의 ARQ를 TCP 트래픽에 적응적으로 적용하는 방법과 TCP 트래픽만을 위한 별도의 MAC 스케줄러를 제안하고 있다. [5]는 time division duplex (TDD)기반 WiMAX 시스템에서 업링크와 다운링크에 할당되는 시간비율을 적응적으로 조절하는 방법을 제안하고 있다. TCP 트래픽 상황, 프로파일, 그리고 무선간섭들을 고려하여 MAC 계층에서 비율을 결정한다. [6]은 TCP계층의 congestion 정보를 MAC 계층에서 참조하여 무선자원을 할당한다.

소극적 cross layer방식에서는, ACK 패킷량을 줄이는 방법과 제어메시지 교환에 따른 지연시간을 줄이는 방식이 있다. [7]에서는 다운링크 TCP 트래픽에 대해 ACK 패킷들을 전송할 때 ACK 필터링<sup>[10]</sup>을 적용한다. 필터링은 ACK 패킷에 담긴 acknowledgement 번호가 축적된다는 성질을 이용하여, 전송 큐에 쌓인 순차적인 ACK 패킷들 중 가장 나중 번호를 가진 ACK 패킷만을 보낸다. 그 결과 ACK 패킷 전송

지연시간이 짧아지고 전송성공 확률이 높아져서 다운링크 throughput이 향상된다. [8]에서는 ACK 패킷 대신 제어메시지를 이용하는 방법을 제시한다. 앞서 설명한 대로 WiMAX 시스템에서는 업링크로 ACK 패킷을 전송하려면 먼저 대역폭을 할당받아야 한다. 이를 위해 대역폭 요청 메시지, (bandwidth-request)를 BS에게 보낸다. [8]은 이 요청 메시지에 acknowledgement 번호를 포함시켜 ACK 패킷 전송을 대신한다. 이 방법을 ACK 필터링과 같이 적용하면 ACK 패킷들을 전송하지 않아도 된다. [9]는 TCP 업링크 트래픽의 성능 향상 방법을 제시하고 있다. MS가 ACK 패킷을 수신한 후 그 다음 TCP 데이터 패킷을 전송하게 되는데, 이 때 앞서 설명한 대로 MS는 BS에 bandwidth-request메시지를 보낸다. [9]에서는 BS가 MS로 향하는 ACK 패킷들을 모니터링 하여, MS의 요청 없이 미리 대역폭을 할당한다. 이것은 대역폭 요청과정에 따른 지연시간을 줄일 수 있다.

앞서 살펴본 적극적 cross layer 접근방식들의 단점은 실제 적용이 쉽지 않다는 것이다. 계층 독립적으로 설계된 MAC 계층이 TCP 계층의 정보를 이용하기 위해서는 많은 수정을 필요로 한다. 게다가 TCP 플로별로 정보를 모니터링 해야 하는 오버헤드도 크다.

반면 소극적 cross layer방법인 ACK 필터링 기반 방법들은 쉽게 적용이 가능하며, 성능개선 효과도 크다. 게다가 MS와 BS간 대역폭 요청과 할당관련 메시지 교환시간 동안에 ACK 패킷들이 버퍼링되기 때문에 필터링하기에 좋은 여건이 형성된다. 이러한 지연시간에 따른 버퍼링에 대해서는 2장에서 자세히 설명한다.

하지만 ACK 필터링의 단점은 piggyback ACK 패킷들에 대해서는 적용할 수 없다는 것이다. 데이터 payload를 가진 패킷이 ACK 정보도 같이 포함할 때 이를 piggyback ACK 패킷이라고 한다. 게다가 TCP 헤더의 PUSH옵션<sup>[11]</sup> 사용은 작은 크기의 piggyback ACK을 더 많이 발생시킬 수 있다. 이 옵션은 버퍼링된 데이터 량이 일정크기 이하일 경우에도 곧바로 패킷이 전송되도록 하기 때문이다. 지연시간을 줄여야 하는 interactive 어플리케이션 등에서 PUSH옵션을 사용한다. 이 때 패킷의 payload크기가 작으면서도 그 개수는 많아져 전송 오버헤드가 커진다.

PUSH 옵션이 사용될 경우 Nagle 알고리즘[13]에 의한 패킷 통합은 적용되지 않는다. 이 알고리즘은 작은 크기의 TCP 패킷들을 하나로 통합해 전송함으로써 전송 효율성을 향상시킬 수 있다. 이를 위해 패킷들을 전송 큐에서 일부러 지연시킨다. 하지만 PUSH

옵션을 사용한 패킷은 지연되지 않기 때문에 이 알고리즘을 적용할 수 없게 된다.

본 논문에서는 소극적 cross layer 방법을 제시하여, 기존 ACK 필터링 방식을 확장해서 piggyback ACK 패킷들을 처리할 수 있도록 한다. 이것은 패킷들의 payload를 병합하는 방식으로 패킷 개수를 줄인다. 특히 payload 크기가 작은 여러 개의 piggyback ACK들을 병합할 경우 헤더 전송 오버헤드를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 전체 전송하는 데이터 크기가 작아지기 때문에 MAC 계층의 payload 크기가 작아져 무선오류확률이 감소하여 전송 효율성이 높아진다. 그리고 적용면에서 제안방식은 기존의 적극적 cross layer 방식들과 달리 각 패킷의 acknowledgement number 정보만을 이용하는 소극적 cross layer 방법이기 때문에 실제 적용이 쉽다. 또한, 제안하는 방법은 WiMAX MAC 계층에서 수행되기 때문에 TCP/IP 스택을 변경할 필요가 없고, TCP/IP 헤더에 새로운 필드나 정보 추가를 하지 않기 때문에 기존 TCP와 호환에 문제가 없다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 WiMAX 시스템의 대역폭 할당과정에서 생기는 지연시간으로 인해 ACK 패킷들이 버퍼링되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인한다. 3장에서는 이러한 버퍼링을 이용하여 piggyback ACK 패킷들을 병합해 전송하는 방식을 제안하고, 이로 인한 장점을 살펴본다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안방식에 의한 성능향상을 기존 ACK 필터링 방식들과 비교한다. 5장에서는 논문을 마무리 짓는다.

## II. WiMAX 시스템의 ACK 패킷 버퍼링

본 장에서는 WiMAX 시스템의 업링크 대역폭 할당과정에서 생기는 지연시간으로 인해 MS들이 업링크 방향으로 전송하는 TCP의 ACK 패킷들이 버퍼링 되는 현상을 시뮬레이션을 통해 확인한다. 이러한 버퍼링은 WLAN에서는 나타나지 않는다.

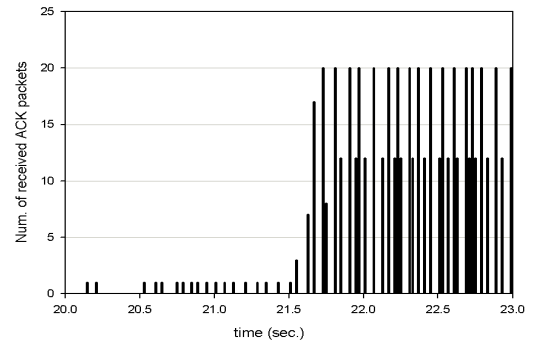
Request-and-grant 대역폭 할당방식에서는 메시지 교환으로 인해 실제 대역폭 할당 때까지 지연시간이 발생하고, 이것은 MS들이 업링크 ACK 패킷을 즉시 전송하지 못하고 버퍼링하는 원인이 된다. 게다가 가장 낮은 QoS 우선순위인 BE 클래스에 속한 TCP 트래픽은 네트워크 오버로드 상황에서 이러한 버퍼링이 더 심화될 수 있다.

하지만 이러한 버퍼링은 WLAN 환경에서는 잘 발생하지 않는다. WLAN의 CSMA 방식은 contention 원

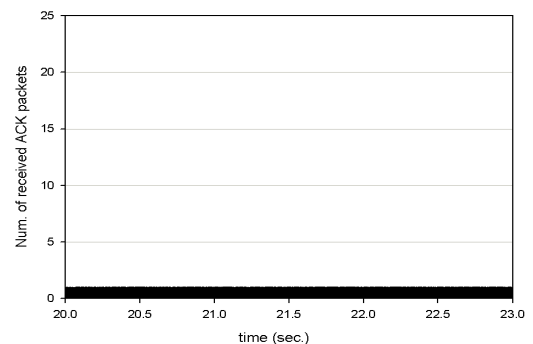
칙에 따라 대역폭을 사용하기 때문에, 메시지 교환에 따른 지연시간이 없기 때문이다.

WiMAX와 WLAN간의 버퍼링 차이점은 시뮬레이션에 의해 관찰이 가능하다. WiMAX 시스템에서 BS가 MS로 TCP 트래픽을 전송하도록 하여 MS가 ACK 패킷을 전송하도록 한다. BS의 전송 큐에는 512 바이트 payload를 갖는 TCP 패킷들이 계속 유지되도록 한다. TCP 전송은 시뮬레이션 시작 후 20초 시점부터 시작하는데, 이것은 WiMAX 시스템에서 MS가 BS에 등록하는 과정 등, 네트워크 설정이 안정화되기를 기다리기 위해서이다. WiMAX 무선 환경과 관련된 구성정보는 표 1과 같고 MS의 위치는 고정되어 있다. WLAN도 WiMAX 경우와 동일한 TCP 트래픽을 AP가 SS에게 전송하도록 한다. 시뮬레이션은 Qualnet 5.0<sup>[12]</sup>을 이용하여 진행한다.

그림 1-(a)는 WiMAX의 경우로 BS에서 수신하는 ACK 패킷 개수를 보여준다. 그림 1-(b)는 WLAN의 경우로 AP에서 수신되는 개수다. 패킷 개수를 비교해보면, WiMAX에서는 한 시점에 여러 개의 ACK 패킷들이 한꺼번에 수신되는 것을 볼 수 있다. 반면



(a) WiMAX



(b) WLAN

그림 1. WiMAX 시스템에서 발생하는 TCP의 ACK 패킷버퍼링 현상을 WLAN의 경우와 비교

WLAN은 한 개씩만 수신된다. 수신시간 간격을 보면 WiMAX의 간격이 WLAN보다 길다. 이러한 패킷 개수와 수신 간격의 차이는 앞서 설명한 버퍼링 때문이다. WLAN은 WiMAX와 비교할 때 상대적으로 빠른 시간간격으로 전송할 수 있어 ACK 패킷들이 버퍼링 없이 개별 전송되고, 도착간격도 짧다. TCP flow control에 따라 ACK 패킷이 점차 증가하게 되는데, WiMAX의 경우 burst하게 입력되는 패킷 개수가 증가하는 것으로 나타나고, WLAN에서는 패킷 도착 간격이 점차 단축되는 것으로 나타난다.

이러한 버퍼링은 ACK 패킷들을 좀 더 효율적으로 전송하는 데 이용될 수 있다. 필터링을 적용할 경우, 여러 개의 ACK 패킷을 하나로 통합할 수 있다. 하지만 piggyback ACK 패킷일 경우에는 기존 필터링 방식이 적용될 수 없다. 따라서 다음 장에서는 piggyback ACK 패킷들을 효율적으로 처리할 수 있는 방법을 제안한다.

### III. Piggyback ACK 패킷 병합

본장에서는 기존 ACK 패킷 필터링 기능을 지원함과 동시에 piggyback ACK 패킷들을 병합하여 ACK 패킷수를 감소시키는 방법을 제안한다. 이는 ACK 패킷 전송에 소요되는 대역폭을 감소시켜 TCP 다운링크 성능을 향상시킨다.

제안방식에서 패킷 병합은 MAC 계층의 convergence sublayer에서 실행된다. 이 sublayer에서는 TCP 계층으로부터 전달된 패킷들이 IP헤더가 부가된 후 큐에 저장되어 전송을 기다린다. 패킷들은 목적지 IP 주소, 포트번호 등에 따라 서비스 플로우로 구분되어 해당 큐에 저장된다. 따라서 패킷 병합은 큐별로 실행된다.

패킷 병합은 네 가지 경우로 나뉜다. 우선 몇 가지 기호와 용어부터 정의한다. ACK 패킷은 a로, piggyback ACK 패킷은 p로 표기한다. ACK 패킷의 헤더에 포함된 acknowledgement 번호는 ack num.으로 표기한다. 그리고 큐에 가장 최근에 저장된 패킷을 tail 패킷이라고 하고, 새로 저장하려는 패킷을 new 패킷이라고 하자. (tail, new)와 같이 tail 패킷의 종류를 앞에, new 패킷의 종류를 뒤에 표시한다고 할 때 병합의 네 가지 경우는 (a, a), (a, p), (p, a), (p, p)이다.

(a, a)와 (a, p)인 경우의 병합은 ACK 필터링과 동일하게 처리한다. tail 패킷을 큐에서 제거하고, new 패킷을 큐에 추가한다. (p, a)인 경우에는 new 패킷의 ack num.만 추출하고, new 패킷은 버린다. 이 ack

num.은 tail 패킷의 ack num.을 대체한다. 그리고 tail 패킷의 TCP와 IP 헤더의 체크섬을 다시 계산한다.

(p, p)인 경우에는 병합작업이 위 경우들보다 복잡하다. 앞서와 비슷하게 new 패킷의 정보를 이용해서 tail 패킷을 수정하고, new 패킷은 버린다. Tail 패킷에서는 payload와 헤더 모두를 수정해야 한다. Payload 부분에서는 new 패킷의 payload를 tail 패킷의 payload뒤에 붙여 병합시킨다. 헤더 부분은 TCP 헤더와 IP 헤더를 순차적으로 수정한다. TCP 헤더에서는 ack num.을 new 패킷의 것으로 대체하고, 체크섬을 다시 계산한다. IP 헤더에서는 total length를 new 패킷의 payload 크기만큼 증가시키고, 체크섬을 다시 계산한다.

제안 방식을 WiMAX 시스템에서 구현할 때 고려해야 할 세부사항들은 다음과 같다. 첫 번째로, 패킷 종류를 구분할 때, ACK 패킷여부는 TCP 헤더의 ACK bit을 이용하여 판단가능하며, IP 헤더에 표시된 패킷 크기가 40바이트보다 클 경우 piggyback ACK 패킷이다. 두 번째로 payload를 병합할 때는 병합 후 크기가 지정된 TCP maximum segment size (MSS) 보다 작을 경우에만 시행한다. 세 번째로 MAC 계층의 convergence sublayer에서는 header compression을 지원한다. 동일한 헤더 내용의 중복전송으로 인한 오버헤드를 감소시키는 것이 목적으로, 이전 패킷의 헤더와 다른 내용만 압축해서 전송한다. IP/UDP/RTP 패킷이 이러한 header compression의 대상이다. 제안 방식에서는 header compression되기 전 tail 패킷의 IP 헤더정보를 따로 저장하여 병합과정에서 이용한다. 필요할 경우 변경된 IP 헤더를 다시 압축한다.

이렇게 병합되는 piggyback ACK 패킷들은 여러 개로 분산되어 수신될 때와 정보전달 측면에서 전혀 차이가 없다. 게다가 WiMAX에서 필연적으로 발생하는 버퍼링을 이용하기 때문에 추가적인 패킷 지연에 따른 성능저하도 발생하지 않는다. 병합은 또한 패킷 헤더 전송량을 대폭 감소시킬 수 있기 때문에 대역폭이 asymmetric한 상황에서 보다 효과적으로 사용될 수 있다.

### IV. 시뮬레이션을 이용한 성능평가

시뮬레이션을 통해 제안방식의 성능을 기존 필터링 등 다른 방식들과 평가하기 위해 ACK 패킷 전송에 소요되는 대역폭의 변화를 비교한다. 시뮬레이션 툴로는 Qualnet 5.0을 이용했다.

시뮬레이션 환경은 하나의 WiMAX 셀로 이루어진

다. BS는 유선네트워크에 의해 두 개의 외부 호스트들, Host\_A와 Host\_B에 연결된다. IEEE 802.3인 유선네트워크는 100 Mbps 전송속도를 갖는다. 셀 안에는 MS\_A와 MS\_B가 있고 모두 BS와 동일거리만큼 떨어져 있으며, 위치는 고정되어 있다.

WiMAX 환경은 IEEE 802.16e를 기준으로 하며, 표 1은 자세한 설정을 보여준다. TDD방식을 사용하고 업링크와 다운링크 서브프레임 길이는 각각 10 msec이다. 시뮬레이션에서 header compression은 적용하지 않는다.

트래픽은 성능측정 대상 트래픽과 네트워크 로드 부여를 위한 트래픽이 있다. 전자는 다운링크 TCP 트래픽을 이용하고, 후자는 업링크 UDP 트래픽을 이용한다. TCP 트래픽은 Host\_A에서 BS를 거쳐 MS\_A로 전송된다. 512 바이트 payload 패키지를 계속적으로 전송한다. MS\_A는 TCP 패키지를 수신할 때마다 1 바이트 payload를 갖는 piggyback ACK 패키지를 전송한다. 이 때 TCP 헤더에 PUSH bit을 설정해서 지연 없이 전송되도록 한다. TCP의 MSS는 512로 설정한다.

네트워크 로드 발생을 위한 UDP 트래픽은 MS\_B에서 Host\_B로 전송된다. 이 트래픽은 variable bit rate 특성을 가진다. 패키지는 512 바이트 크기를 가지며 패키지 전송간 간격은 평균 183 microsec.의 지수함수 분포를 따른다. TCP와 UDP 트래픽들은 네트워크 안정화가 된 20초 시점부터 전송을 시작해서 80초간 진행한다.

QoS 클래스 지정에 있어서, TCP 트래픽은 우선순위 최하위인 BE클래스로, UDP 트래픽은 최상위 UGS클래스로 설정했다. 따라서 TCP 트래픽의 piggyback ACK 패키지 전송은 업링크 UDP 트래픽이 사용하고 남은 대역폭을 이용해서 전송된다.

성능비교를 위해 TCP의 기본 옵션인 delayed

표 1. WiMAX 파라미터

Parameter name	Value
Channel bandwidth	20MHz
FFT size	2048개
Cyclic prefix factor	9
Downlink subframe duration	10 ms.
Uplink subframe duration	10 ms.
Bandwidth request backoff min/max	3/15 slots
Number of used data subcarriers	1440개
Modulation schemes	QPSK, 16QAM, 64QAM
Coding	1/2,3/4,2/3

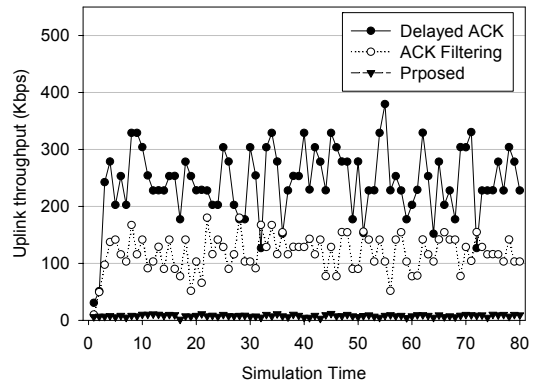


그림 2. 업링크 ACK 패키지 전송량

ACK과 ACK 필터링 방식을 동일한 시뮬레이션 환경에 적용하여 성능을 측정하였다.

그림 2는 MS\_A가 BS에게 업링크 ACK 패키지를 전송한 데이터량을 양을 보여준다. 제안방식을 사용할 때 사용한 평균 데이터량이 8 Kbps로, delayed ACK과 ACK 필터링의 243 Kbps, 117 Kbps보다 대폭 감소했음을 볼 수 있다. Delayed ACK과 ACK 필터링의 경우 piggyback ACK을 모두 전송해야 하기 때문에 업링크 전송량이 많은 반면 제안방식은 piggyback ACK 패키지들을 병합하기 때문에 업링크 대역폭이 대폭 감소하였다.

### V. 결 론

본 논문에서는 WiMAX 시스템에서 필연적으로 발생하는 업링크 패키지 버퍼링을 이용하여 효율적으로 piggyback ACK 패키지를 전송하는 방법을 제안하였고, 이를 통해 TCP 다운링크 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 제안방식에서는 기존 ACK 필터링을 지원함과 동시에 이전에는 처리할 수 없었던 piggyback ACK 패키지들도 payload 병합을 통해 처리할 수 있었다. 시뮬레이션을 통한 성능평가에서 ACK 패키지 전송에 필요한 대역폭은 90%이상 개선된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 제안방식은 WiMAX 시스템과 같이 전송과정에서 대역폭 요청/승인 절차를 가지면서, 그 절차에 따른 지연시간이 어느 정도 규칙적이고 예상 가능한 다른 시스템에 적용할 경우 성능개선을 기대할 수 있다.

본 논문에서 보완해야 할 점은, 시뮬레이션을 통한 제안기법의 성능향상 측정 및 비교는 한계성을 가지기 때문에 이를 보다 수식화 및 계량화할 필요가 있다. 그리고 다른 네트워크 시스템에 적용하기 위한 구

체적인 방법에 대한 연구도 진행할 필요가 있다. 따라서 향후 연구에서는 제안방식에 대한 수학적 분석을 통해 성능향상 효과를 이론적으로 검증해 본다. 또한 다른 유사 통신시스템, 예를 들어, 3GPP LTE 시스템에 제안방식을 적용할 수 있는 방법을 모색해 보고 그로 인한 성능향상을 분석할 예정이다.

### 참 고 문 헌

[1] IEEE 802.16-2005, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," Feb. 2006.

[2] <http://www.3gpp.org>

[3] H. Balakrishnan and V. Padmanabhan, "How network asymmetry affects TCP," *IEEE Commun. Mag.*, pp.60-67, Apr. 2001.

[4] X. Yang, M. Venkatachalam, S. Mohanty, et al., "Exploiting the MAC Layer Flexibility of WiMAX to Systematically Enhance TCP Performance," In *Proc. of Mobile WiMAX Symposium*, pp.60-65, 2007.

[5] C. Chiang, W. Liao, T. Liu, et al., "Adaptive Downlink and Uplink Channel Split Ratio Determination for TCP-Based Best Effort Traffic in TDD-Based WiMAX Networks," *IEEE Journal of Selected Areas in commu.* Vol. 27, Iss.2, pp.182-190, Feb. 2009.

[6] Y. Chiu, S. Hardy and T. Randhawa, "A TCP-Driven MAC Resource Allocation Scheme in a WiMAX network," in *Proc. of IEEE ICC*, pp.1-5, 2009.

[7] J. Wu, D. Kim and J. Mo, "TCP Performance over the WiBro Compatible 802.16e Systems," in *Proc. of ICACT*, pp.1752-1756, 2007.

[8] B. Moon and J. Mo, "Optimizing Uplink TCP-ACK Transmission in WiMAX OFDMA Systems," *IEEE Commu. Letters*, Vol.12, No.4, pp.256-258, Apr. 2008.

[9] N. Lasfar, J. Mo and B. Moon, "TCP-ACK Triggered Bandwidth Request Scheme in IEEE 802.16e Systems," in *Proc. of ICOIN*, pp.1-5, 2009.

[10] H. Wu, J. Wu, S. Cheng and J. Ma, "ACK Filtering on Bandwidth Asymmetry Networks,"

in *Proc. of APCC.OECC*, pp.176-178, Oct. 1999.

[11] RFC-793 Transmission Control Protocol

[12] <http://www.scalable-networks.com>

[13] RFC-896 Congestion Control in IP / TCP Internetworks

전 경 구 (Kyungkoo Jun)

정회원

한국통신학회 논문지 제34권 제6호 참조

현재 인천대학교 임베디드시스템공학과 부교수