

OFDMA 기반의 전력선 통신을 활용한 홈 네트워크에서 트리플 플레이 서비스의 QoS를 보장하기 위한 효율적 자원 할당 기법

Efficient Resource Allocation Schemes of OFDMA Based Power
Line Home Networks for the Triple Play Service with QoS Guarantee

강대호 · 윤성국 · 박세웅
Daeho Kang · Sung-Guk Yoon · Saewoong Bahk

전력선 채널은 임펄스 잡음(impulsive noise)과 주기정상성 잡음(cyclo-stationary noise)의 독특한 잡음 특성과 함께 임피던스 부정합(impedance mismatching)에 의한 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)의 특성을 가지고 있다. 또한 전력선 채널은 토폴로지와 잡음 소스의 변화가 자주 일어나지 않기 때문에 무선 채널과 같은 짧은 시간스케일의 채널 응답변화가 없다. 본 논문에서는 이러한 전력선 채널의 특성을 반영하여 OFDMA 방식을 도입한 홈 네트워크에서 트리플 플레이 서비스(Triple Play Service)의 QoS를 보장하면서 채널 사용효율을 높이는 자원 할당기법을 제안한다. 우선 전력선 채널에서의 다중 사용자 이득을 얻기 위한 채널 행렬을 제안하였고 이를 기반으로 한 처리량최대화 기법과 지연최소화 기법을 제안하였다. 모의실험을 통하여 두 가지 기법 모두가 음성과 영상 트래픽의 QoS 요구사항을 충족시키면서도 적은 양의 자원을 소비하는 것을 보였다.

주제어: 전력선 통신, Triple Play Service, OFDMA, 자원 할당, 홈 네트워크

The power line channel has two types of unique noises: impulsive noise and cyclo-stationary noise. In addition it has a frequency selective fading characteristic due to the impedance mismatching in the power line. Differently than other wireless networks, the communication topology and noise sources in the power line communication change rarely, so the channel response is quasi-static. In this paper, we propose efficient resource allocation schemes for OFDMA based power line home networks considering the Quality of Service (QoS) of Triple Play Service (TPS), which aim to achieve throughput maximization and delay minimization. Our proposed schemes use the channel matrix which contains the information about multiuser diversity. Through simulations, we show that our proposals meet users' various QoS requirements of the TPS traffic and efficiently use the power line channel.

Keywords: PLC, Triple Play Service, OFDMA, Resource Allocation, Home Network

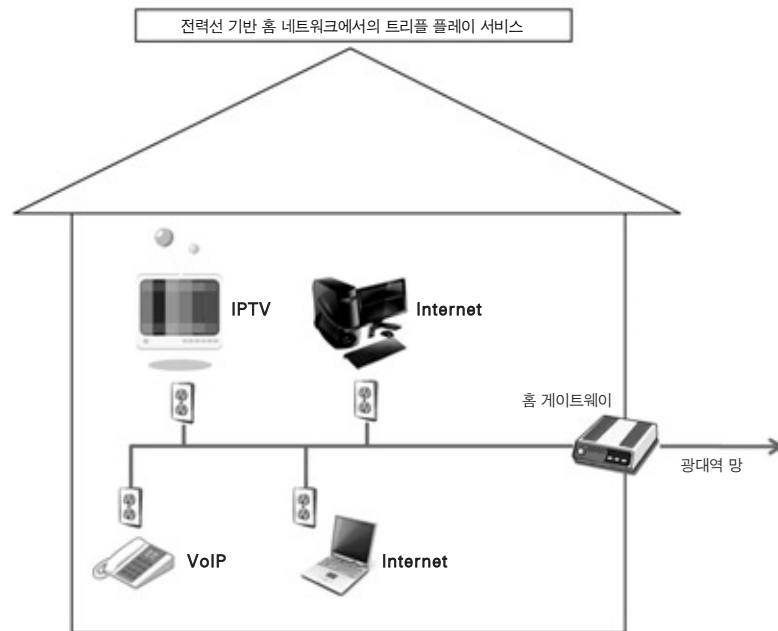


그림 1. 전력선 통신을 활용한 홈 네트워크에서의 트리플 플레이 서비스

I. 서론

최근 들어 맥내에서의 IPTV, VoIP와 같은 IP 기반 멀티미디어 서비스에 대한 수요가 늘어남에 따라 홈 네트워크에서 멀티미디어 서비스를 효율적으로 제공하는 것에 많은 관심이 모이고 있다. 최근 유무선 통신사업자들에게 신규 서비스로 각광 받고 있는 트리플 플레이 서비스(Triple Play Service)는 방송/통신 사업자의 세 가지 서비스(초고속 인터넷, 인터넷 전화, 방송)를 하나의 회선으로 묶어서 사용자들에게 저렴한 가격으로 제공하는 것이다. 트리플 플레이 서비스가 성공적으로 정착하기 위해서는 영상, 음성, 데이터 통신의 개별 서비스의 QoS (Quality of Service)를 보장하면서도 저비용으로 제공하는 것이 중요하다. 각각의 서비스가 요구하는 QoS로는 지연 제한, 패킷 손실률, 최소 요구 대역폭 등이 있다. 트리플 플레이 서비스를 구성하는 각 서비스의 트래픽이 서로 상이한 QoS 요구사항을 가지고 있음을 고려할 때 이들 트래픽을 홈 네트워크의 구성 방식에 따라서 효율적으로 스케줄링하는 것은 중요하다.

전력선 통신은 통신을 위한 별도의 케이블을 설치하지 않고 전력을 공급하기 위한 구리 전력 케이블을 활용하여 통신을 제공하며 집안의 벽에 의한 신호 감쇄가 없는 등의 장점을 가지고 있다. 그림 1은 전력선 통신을 활용한 홈 네트워크에서 트리플 플레이 서비스가 제공되는 모습을 보여준다. 이러한 전력선 통신의 표준화 작업은 다양한 단체에서 진행하고 있다[1]~[4]. ITU-T가 주관하여 표준화를 진행하는 G.hn 표준은 맥

내에 설치된 사용가능한 모든 통신 채널을 활용하여 홈 네트워크를 구축하는 방법을 제시한다. 사용가능한 통신 채널로 무선, 전화선, 케이블선, 랜선, 전력선 등을 고려하고 있으며 그 중 전력선 통신 방식을 고속 홈 네트워크 서비스를 위한 대표적인 기술로 기대하고 있다 [1]. 그리고 IEEE의 주관 하에 진행되는 IEEE P1901[2] 작업 그룹에서는 HomePlug Alliance[3] (이하 HPA) 기술과 Panasonic에서 제안한 기술[4]을 기반으로 홈 네트워크에서 고속 전력선 통신을 가능하게 하기 위한 표준을 제정하고 있다. 국내에서도 한국 전력공사 및 기술표준원에서 전력선 통신 표준을 제정하였고 제안한 국내 전력선 통신 기술이 ISO 전기기술 위원회 ISO/IEC 12139-1 규격으로 채택되는 등의 성과를 내고 있다.

전력선 통신 채널은 다른 유선통신 채널과는 다른 독특한 특성들을 지니고 있다. 먼저 전력선은 전력을 전력선에 연결된 노드들에게 전달하는 것을 목적으로 만들어졌기 때문에 전력선 채널은 무선 채널과 같이 공유 채널이다. 따라서 다수의 노드들에게 자원을 효율적으로 할당하기 위해서는 무선 채널에서와 같은 다원 접속 메커니즘이 필수적이다. 또한 전력선 채널의 응답은 다중경로 (multi-path) 및 임피던스 부정합 (impedance mismatching)에 의한 주파수 선택적 페이딩 (frequency selective fading)의 특성을 보인다[7]. 마지막으로 전력선 채널은 임펄시브 잡음 (impulsive noise)과 주기정상성 잡음 (cyclostationary noise)의 독특한 잡음 특성을 가진다. 임펄시브 잡음은 전기기기

의 전원 온/오프 또는 가전기기의 전력망 연결/분리와 같은 전력선 토폴로지의 급격한 변화에 의해 주로 발생하는 것으로 전 주파수 영역에서 높은 크기의 잡음성분을 만들어 낸다.¹⁾ 주기정상성 잡음은 전력선에 흐르고 있는 AC 전압이 원인으로 전압이 변화함에 따라 전기 기기의 회로 및 동작 특성 역시 주기적으로 변화하는 것에 의해 발생하는 잡음이다. 따라서 이 잡음은 AC 전압의 주기에 맞추어 발생하며 주파수 대역별로 서로 다른 세기를 보이는 경향이 있다. 또한 주기정상성 잡음과 주파수 선택적 페이딩 특성은 전력선 토폴로지의 변화가 발생하지 않는다면 그 형태를 유지하기 때문에 전력선 채널은 준정적(quasi-static) 특성을 지닌다고 말할 수 있다[5].

공유 채널에서 사용자들의 충돌을 방지하며 접속을 하기 위한 MAC(Medium Access Control)방식은 크게 경쟁기반방식과 예약기반방식으로 나눌 수 있다. 경쟁기반방식은 각 단말들이 확률적으로 채널을 접속하는 방식이다. 이 방식은 별도의 자원 예약없이 전송을 시도하므로 트래픽 요구량이 적고 빈번하게 트래픽이 도착하는 환경에서 처리성능이 우수하다. 또한 경쟁기반 방식은 주로 분산적으로 동작하기 때문에 큰 규모의 네트워크에서도 낮은 복잡도로 동작한다는 장점도 있다. 그러나 이 방식에서는 개별 트래픽의 QoS 보장이 어려우며 트래픽 요구량이 많은 환경에서는 충돌에 의한 자원 낭비가 심해진다는 단점이 있다. 예약기반방식은 자원 할당 제어를 위한 관리 노드와 자원 할당 정보를 주고 받기 위한 제어 패킷 오버헤드가 존재하지만 이를 통하여 서비스해야 할 트래픽의 QoS를 보장해줄 수 있다는 장점이 있다. 본 논문의 타겟 애플리케이션인 트리플 플레이 서비스는 고속의 인터넷 사용 뿐만 아니라 음성과 영상의 끊김없는 서비스를 보장해야 하기 때문에 높은 수준의 QoS를 요구할 뿐만 아니라 이들 서비스는 기본적으로 홈 게이트웨이와 각 서비스 노드들 사이의 1:N 형태의 트래픽을 발생시킨다[1]. 따라서 예약기반방식의 MAC이 트리플 플레이 서비스 환경에 더 적합하다고 볼 수 있다.

기존의 전력선 통신 표준들[2]~[4]은 주로 OFDM(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 방식으로 구성되었다. OFDM 방식은 멀티패스를 가지는 채널에서 부호간 간섭(inter-symbol interference)의 영향을 효과적으로 없앨 수 있으나 자원 할당 단위가 시간만으로 이루어져 있어 주파수 선택적 페이딩 채널의 특성을 효과적으로 사용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 OFDMA(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) 방식은 자원 할당 단위로 시간과 주파수 두 가지를 사용하기 때문에 각 사용자는

통신이 가능한 대역 중 선호하는 대역만 사용하는 것이 가능하여 다중 사용자 이득(multiuser diversity gain)을 추가적으로 얻을 수 있다. 앞서 언급한 것과 같이 전력선 채널은 주파수 선택적 페이딩 특성과 주기를 가지는 잡음 특성을 가지고 있기에 전력선 통신에서의 자원 할당방식으로 OFDMA 방식이 적합하다.

본 논문에서는 OFDMA 방식을 사용하는 전력선 통신 기반 홈 네트워크에서 트리플 플레이 서비스 트래픽의 QoS를 보장하면서 전력선 채널 사용의 효율을 높일 수 있는 자원 할당 기법을 제안한다. 이를 위하여 전력선 채널에서의 다중 사용자 이득을 얻기 위한 채널 행렬을 제시하고 이 채널 행렬을 기반으로 한 두가지 자원 할당 방식-처리량최대화 자원 할당 기법과 지연최소화 자원 할당 기법-을 제안하였다. 모의 실험에서는 트리플 플레이 서비스의 각 트래픽의 지연에 관한 누적 확률 분포와 고정된 음성, 영상 노드가 존재하는 상황에서 데이터 트래픽의 처리용량을 기존에 제안되었던 기법과 비교하여 본 논문에서 제안된 자원 할당 기법이 더 나은 지연 및 처리량 성능을 가지고 있음을 보였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 본 논문과 관련된 연구들을 소개한다. III장에서는 기본적인 시스템 모델과 트리플 플레이 서비스 트래픽의 특성에 대하여 설명한다. IV장에서는 다중 사용자 이득을 얻기 위한 채널 행렬 구성방법과 함께 제안하는 자원 할당 기법에 대하여 자세히 설명한다. 모의실험의 결과와 분석 및 토론은 V장에서 다룬다. 마지막으로 VI장에서 본 논문을 마무리한다.

II. 관련 연구

[1]에서는 ITU-T의 G.hn 표준 기반 홈 네트워크의 개략적인 구조와 물리계층(PHY Layer) 및 데이터 링크 계층(Data Link Layer)에 대하여 설명하고 있다. G.hn에서 제안하는 홈 네트워크에서는 외부 광대역 망과 맥 내의 전화/케이블/전력선/무선 네트워크와의 연결을 담당하는 하나의 주거용 게이트웨이가 존재하고 각각의 네트워크 별로 존재하는 도메인 마스터는 네트워크 내의 노드들에게 할당되는 자원을 관리하는 역할을 담당한다. [2]에서는 고속 전력선 통신을 위한 물리 계층 및 MAC 계층 방식에 대하여 제안하고 있는데 두가지 물리 계층이 존재한다는 점이 특이한 사항이다.

[6]에서는 전력선 채널에서 발생하는 임펄시브 잡음의 세기 및 빈도에 관한 통계조사와 더불어 임펄시브 잡음의 발생을 분할 마르코프 체인 기법을 활용하여 모델링하고 그 결과를 제시하였다. 연구 결과에 따르면 집 안과 같이 상대적으로 전기적 교란이 덜한 지역에서는 임펄시브 잡음의 발생빈도와 지속시간, 크기 등이 정상적인 통신을 불가능하게 할 정도가 아님을 확인할 수 있다. [5]에서는 전력선 채널에서 전력선 채널에 연

1) 이 잡음을 시간 축으로 보았을 때 임펄스와 같이 보인다(6).

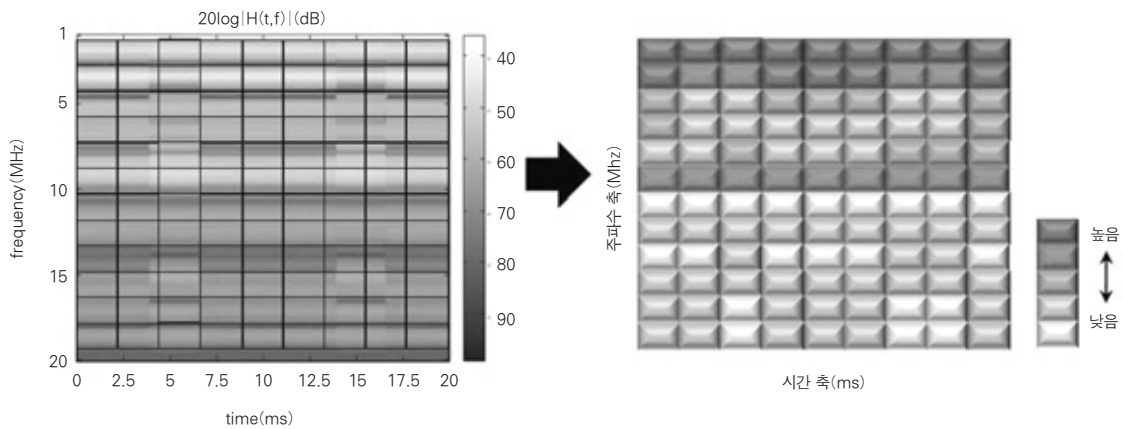


그림 2. 측정된 전력선 채널 응답을 기반으로 한 데이터 블록 당 전송능력

결된 가전기기들이 시간에 따라 임피던스 값이 변하는 특성을 보이며 주기정상성 잡음을 발생시킨다는 것을 측정을 통하여 확인하였고 전력선 채널을 LPTV (Linear Periodic Time Varying) 시스템과 주기정상성 잡음 부분이 더해진 형태로 모델링하였다. [7]에서는 실내 전력선 채널 환경을 9개의 클래스로 분류한 다음, 30kHz~100MHz 대역에서의 동질 대역폭 (coherence bandwidth) 및 실효치 지연 확산값을 측정 장소에 따라서 조사하였다. 그림 2는 실제 전력선 채널 응답을 기반으로 한 OFDMA 프레임의 채널 정보의 예를 보여준다. 그림 2에서 왼쪽 부분이 실제로 측정된 채널 응답의 크기이며 오른쪽 부분은 측정된 값을 기반으로 하여 프레임의 각 데이터 블록에서의 전송능력을 개괄적으로 나타낸 것이다.

공유 매체에서 각종 어플리케이션의 QoS를 보장하기 위한 연구는 무선 네트워크를 중심으로 많이 수행되었다. [8]에서는 IEEE 801.11e 표준에서 제안하는 무선 랜에서 QoS를 보장하기 위한 방법들에 대한 설명과 함께 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function(EDCF) 및 Hybrid Coordination Function(HCF)에 대한 모의실험을 통해 802.11e가 기존 시스템에 비해 지연 QoS 요구조건을 더 잘 만족시킴을 보였다.

[9]에서는 IEEE 802.11b 기반의 무선 랜에서 VoIP의 지연 요구조건에 따른 서비스 용량의 상한을 분석하였고, [10]에서는 예약기반 및 경쟁기반방식의 두 MAC 기법을 동시에 사용하는 무선 네트워크에서 비디오 스트리밍 서비스의 QoS를 보장하면서 서비스 용량을 극대화하는 방법에 대하여 연구하였다. 이처럼 무선 통신에서는 QoS를 보장하기 위한 사전 연구가 많이 진행되고 있는데 무선 채널과는 다른 특징을 가진 전력선 채널을 고려하면 무선에서의 이러한 연구 결과를 전력선 통신에서 그대로 적용시킬 수는 없다.

전력선 통신 환경에서도 서비스 용량 최대화 및 어플리케이션의 QoS 보장에 관한 연구가 근래에 수행되고 있다. [11]에서는 CSMA/CA 매체 접근 제어방식을 사용하는 전력선 통신 환경에서 사용되는 주파수를 네트워크 노드의 수와 네트워크 코디네이터/노드 사이의 주파수 선택적 페이딩 특성에 따라 분할하여 사용함으로써 전송용량 및 공평성을 향상시키는 방법을 제시하였다. [12]에서는 중압 전송 선로를 활용한 광대역 전력선 망과 무선 랜이 혼합되어 있는 네트워크에서 서비스 중인 어플리케이션의 QoS를 조절하면서 호 블로킹율(call blocking rate)를 최소화 하는 호 수락 제어(call admission control) 방법에 대하여 연구하였다. 이들 연구는 QoS 보장 및 서비스 용량 최대화라는 목표에서는 본 논문과 유사하나 적용 대상이 다르다.

[13]에서는 PRMA(Packet Reservation Multiple Access) 기반의 전력선 통신 시스템에서 멀티미디어 서비스의 지연 요구사항 충족 및 전송용량 최대화를 위한 타임 슬롯 할당 및 우선 순위 부여방법에 관한 방법을 제안하였다. 하지만 위 연구는 전력선 채널의 고유한 특성을 고려하지 못하고 있으며 트래픽별 우선순위를 부여하기 위한 과정에서 동일 우선순위 내의 노드들 사이에 공평성의 문제가 발생할 수 있다.

III. 시스템 모델 및 트리플 플레이 서비스 트래픽의 특징

본 장에서는 기본적인 시스템 모델과 트리플 플레이 서비스 트래픽의 특징에 대하여 설명한다.

1. 시스템 모델

본 논문에서는 홈 네트워크를 위한 OFDMA 방식

표 1. H.264/AVC의 레벨별 화질 정보

화질의 정도	그림의 크기	프레임 레이트	최대 요구 전송속도	그림의 크기에 대한 참조 프레임의 최대 숫자
1	QCIF	15	64 Kbps	4
1b	QCIF	15	128 Kbps	4
1.1	CIF or QCIF	7.5 (CIF)/30(QCIF)	192 Kbps	2(CIF)/9(QCIF)
1.2	CIF	15	384 Kbps	6
1.3	CIF	30	768 Kbps	6
2	CIF	30	2 Mbps	6
2.1	HHR(480i or 576i)	30/25	4 Mbps	6
2.2	SD	15	4 Mbps	5
3	SD	30/25	10 Mbps	5
3.1	1280x720p	30	14 Mbps	5
3.2	1280x720p	60	20 Mbps	4
4	HD Formats(720p or 1080i)	60p/30i	20 Mbps	4
4.1	HD Formats(720p or 1080i)	60p/30i	50 Mbps	4
4.2	1920x1080i	60p	50 Mbps	4
5	2kx1k	72	135 Mbps	5
5.1	2kx1k or 4kx2k	120/30	240 Mbps	5

의 전력선 통신을 고려한다. 홈 네트워크는 하나의 PHG(Powerline Home Gateway)와 여러 대의 노드들로 이루어져 있다. PHG는 홈 네트워크와 광대역 접속망(Broadband Access Network)을 연결해 주는 역할과 노드들에게 할당되는 OFDMA 자원을 스케줄링하는 역할을 담당한다. 노드는 트리플 플레이 서비스를 받는 대상을 의미한다.

OFDMA 프레임의 구조는 사용방식에 따라서 차이가 있으나 일반적으로 그림 2의 오른쪽과 같은 형태를 가진다. 이때 OFDMA 프레임의 길이는 수율이나 지연 등의 시스템의 성능을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 전력선 채널은 AC 전원주기에 따라서 채널 응답이 변하는 특성을 가지고 있으므로 프레임의 길이를 AC 전원의 주기의 정수배로 맞추는 것이 채널 특성을 활용하는데 효과적이다.²⁾

OFDMA 시스템의 최소 자원 할당 단위는 블록이다. 한 블록은 m 개의 부반송파가 모인 하나의 부 채널과 n 개의 심볼로 구성되어 있다. 응용 계층에서 내려오는 패킷은 그 크기에 따라 MAC 계층에서 하나의 블록에 할당되어 전달될 수도 있고 데이터 크기가 큰 경우 여러 개의 블록에 단편화시켜 전달될 수도 있다. 본 논문에서 실제로 사용한 시스템 변수는 V장에서 정리한다.

2. 트리플 플레이 서비스 트래픽의 특징

트리플 플레이 서비스는 음성, 영상, 데이터의 세가지 서비스로 구성된다.

음성 트래픽의 경우 두개의 상태를 가지는 마르코프 체인으로 모델링할 수 있고 각 상태의 지속시간은 지수 분포로 모델링할 수 있다[14]. 하나의 상태는 토크 스푼트(talk spurt) 상태로 음성 서비스 이용자가 이야기를 하는 구간이며 다른 하나는 무음 상태로 음성 서비스 이용자간의 대화가 없는 구간이다. 음성 트래픽은 적은 전송속도만을 요구하는 대신 엄격한 지연한도를 요구한다.

영상 트래픽의 경우는 사용되는 코딩방식 및 압축 기술에 따라 요구 데이터량의 차이가 매우 크다. 표 1은 최근에 주로 사용되는 H.264/AVC 영상 코딩 기준에서 제시하는 영상의 품질 및 요구되는 전송속도를 보여준다[15]. 여기서 일반적으로 말하는 FULL-HD 급의 영상은 level 4.2에 해당하는 것으로 1920x1080의 해상도와 60p의 프레임 레이트로 영상을 표현하는 것을 의미하며 이를 달성하기 위해 요구되는 최대 전송속도는 약 50 Mbps이다. H.264/AVC 기준에서 영상 데이터는 세가지 종류의 프레임으로 인코딩된다. I-프레임은 디코딩의 기본이 되는 프레임으로 독자적으로 디코딩할 수 있는 반면 데이터량이 크다. 나머지 B-프레임과 P-프레임은 I-프레임을 기준으로 하여 인코딩되는 프레임으로 I-프레임에 비해 상대적으로 작은 데이터량을 가진다[10]. 영상 트래픽 역시 지연한도 요구사항

2) HPA에서 만든 최신 전력선 통신 표준인 HPAV(HomPlug AV)에서도 비전 프레임의 주기를 AC 전원 주기의 2배로 설정하고 있다[16].

이 있으나 음성의 요구사항보다는 그 한도가 크고 전송 속도는 음성보다 훨씬 높은 속도를 요구한다.

데이터 트래픽은 웹 브라우징이나 FTP 트래픽으로 모델링할 수 있으며 본 연구에서는 지연시간에는 민감하지 않으나 최대한의 수율을 원하는 트래픽으로 모델링하였다.

IV. 제안하는 자원 할당 기법

본 장에서는 OFDMA 방식을 활용하여 다중 사용자 이득을 얻기 위한 기법을 설명한다. 제안하는 기법을 사용하기 위해 채널 행렬이 필요하고 이 행렬을 기반으로 한 두가지 자원 할당 방식-처리량최대화 자원 할당 방식과 지연최소화 자원 할당 방식-에 대하여 설명한다. 제안하는 방식들은 하향 링크에 적용되는 것을 가정한다.

1. 다중 사용자 이득을 위한 채널 행렬 생성

제안하는 시스템에서는 한 OFDMA 프레임을 M 개의 부 채널과 N 개의 시간슬롯으로 분할한다. 각 노드는 채널 응답에 따른 $M \times N$ 채널 응답 행렬을 생성하고 이 정보를 PHG에 전송한다. 여기서 행렬의 각 원소는 해당 자원 블록을 통하여 해당 노드로 보낼 수 있는 비트 수를 의미한다. PHG는 모든 노드의 채널 행렬을 수합하여 저장한 후³⁾ 이들 행렬 원소의 값들을 활용하여 채널 행렬 R 을 생성한다. R 은 다음과 같은 $M \times N$ 행렬이다.

$$R = \begin{pmatrix} (r_{11}, l_{11}, k_{11}) & \dots & (r_{1N}, l_{1N}, k_{1N}) \\ \dots & \dots & \dots \\ (r_{M1}, l_{M1}, k_{M1}) & \dots & (r_{MN}, l_{MN}, k_{MN}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 r_{ij} 는 자원 블록 (i, j) 에서의 최대 전송가능 비트 수이며 l_{ij} 는 해당 전송가능 비트수를 가진 노드의 ID, 그리고 k_{ij} 는 해당 자원 블록이 할당되었는지 여부를 알려 주는 지시변수로 해당 자원 블록이 이미 할당되었을 경우 1, 그렇지 않을 경우 0의 값을 가진다.

2. 처리량최대화 자원 할당 기법

모든 노드가 항상 보낼 데이터를 가지고 있다면 최적의 자원 할당 기법은 단순히 프레임 (i, j) 자원 블록을

행렬 R 의 l_{ij} 가 사용하게 하면 된다. 그러나 각 노드들이 데이터를 항상 가지고 있지 않고 유한한 크기의 데이터를 가지고 있는 경우에는 최적의 자원 할당을 구하는 것이 쉽지 않다. 각 노드 k 의 큐에 쌓여 있는 데이터의 양을 p_k 라고 하고 d_{ij} 는 자원 블록 (i, j) 에 실제 할당된 비트 수라고하면 노드 k 에 자원 블록 (i, j) 가 할당된 경우 d_{ij} 는 다음과 같은 수식으로 구할 수 있다.

$$d_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & \text{if } p_k \geq r_{ij} \\ p_k & \text{if } p_k < r_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

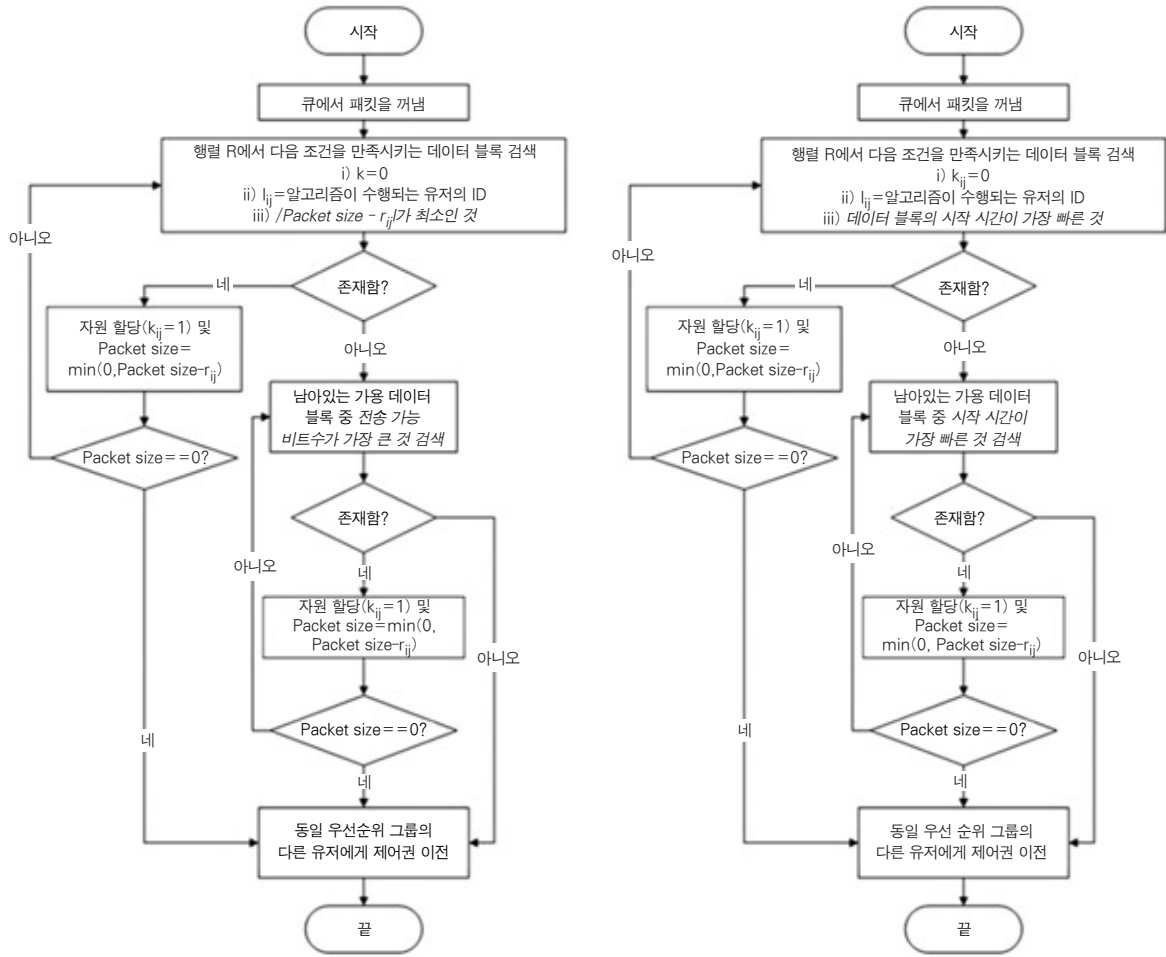
d_{ij} 를 구한 후 p_k 를 $p_k = p_k - d_{ij}$ 로 업데이트 한다. 최적의 자원 할당 기법은 모든 i, j, k 조합으로 d_{ij} 를 구하고 식 (3)의 목적함수를 달성하는 방법으로 표현할 수 있다.

$$\min_{i, j, k} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (r_{ij} - d_{ij}) \quad (3)$$

하지만 위 방식은 단순히 채널이 좋은 노드만을 우선하여 자원을 할당하는 방식이므로 공평성의 문제가 있다. 따라서 제안하는 자원 할당 기법에서는 높은 우선순위부터 동일한 우선순위를 지닌 노드들 사이에서 순환 순서 방식으로 노드를 선택하여 하나의 패킷 단위로 자원 블록을 할당해 준다. 그리고 할당 시 해당 자원 블록에 해당하는 k_{ij} 의 값을 1로 설정하여 다른 노드에 의해 자원 블록을 빼앗기는 경우는 일어나지 않도록 한다. 즉 네트워크에 높은 우선순위 노드의 수가 n , 낮은 우선순위 노드의 수가 m 이라고 하면 n 개의 노드들이 지닌 패킷들이 모두 전송될 수 있을 때까지 순환 순서 방식으로 자원 블록을 할당한 후 남은 자원 블록들을 m 개의 노드들에게 순환 순서 방식으로 할당하는 것이다. 이런 방식으로 동일한 우선순위를 지닌 노드들 사이의 공평성을 보장하면서 우선순위에 기반한 자원 할당을 할 수가 있다. 이런 방식으로 자원 블록들을 채워 나가다가 사용 가능한 자원 블록들을 모두 할당하게 되면 알고리즘은 종료된다

그림 3의 (a)는 제안하는 알고리즘의 세부적인 동작을 나타낸다. 순서가 돌아온 노드의 한 패킷을 추출한 후 이 패킷의 크기 정보를 저장하고 행렬 R 에서 아직 사용되지 않고 l_{ij} 가 자신의 ID와 동일한 자원 블록을 찾는다. 그 중 패킷 크기와 자원 블록의 전송가능 비트 수 차이가 최소인 자원 블록을 검색하여 해당 자원 블록에 패킷을 할당하고 만약 패킷이 아직 다 전송되지 못했다면 이 과정을 반복 수행한다. 이 과정에서 아직 사용되지 않고 l_{ij} 가 자신의 ID와 동일한 자원 블록이 없으면 남은 자원 블록 중 가장 높은 속도를 낼 수 있는 자원 블

3) 각 노드로부터 수합된 $M \times N$ 채널 응답정보는 제안하는 알고리즘에서 다시 사용되므로 PHG에 저장되어 있다.



(a) 처리량최대화 자원 할당 기법의 동작흐름도

(b) 지연최소화 자원 할당 기법의 동작흐름도

그림 3. 제안하는 알고리즘의 동작흐름도

록을 사용한다. 마지막으로 해당 패킷을 전송시킬 수 있을 만큼 자원 블록을 할당했으면 다음 노드의 한 패킷을 선택하여 동일한 과정을 반복한다. 이 반복은 사용 가능한 자원 블록이 없을 때까지 계속된다.

3. 지연최소화 자원 할당 기법

지연최소화 자원 할당 기법도 처리량최대화 기법과 동일하게 행렬 R을 사용하고 패킷 단위로 자원 할당이 수행된다. 기본 알고리즘의 동작은 4.2에서 제안한 알고리즘과 유사하지만 자원 블록 할당 기준이 다르다. 그림 3의 (b)는 제안하는 지연최소화 자원 할당 기법의 동작흐름도를 보여준다. 이 기법에서 자원 블록 할당 기준은 행렬 R에서 아직 사용되지 않고 l_{ij} 가 자신인 자원 블록 중 가장 빠른 시간슬롯에 존재하는 자원 블록을 패킷에 우선적으로 할당하는 것이다 이러한 조건을 만족

시키는 자원 블록이 없는 경우 단순히 가장 빠른 시간 슬롯에 존재하는 자원 블록을 우선적으로 할당하여 준다. 이렇게 함으로써 트래픽의 지연을 최소화할 수 있다.

V. 모의실험 결과

모의실험은 C++ 프로그래밍 언어로 작성된 프로그램을 기반으로 수행하였다. 실험 대상이 된 기법들은 본 논문에서 제안된 두 가지 자원 할당 방식과 함께 CL-NC PRMA (Cross Layer - Non Collision Packet Reservation Multiple Access) 방식 [13]이다. CL-NC PRMA는 OFDM 방식을 사용하는 예약기반의 자원 할당 방식이다. 자원 할당은 프레임을 기반으로 이루어지며 하나의 프레임을 여러개의 타임슬롯으로 나누어 데이터를 전송할 수 있도록 해준다. 그리고 각

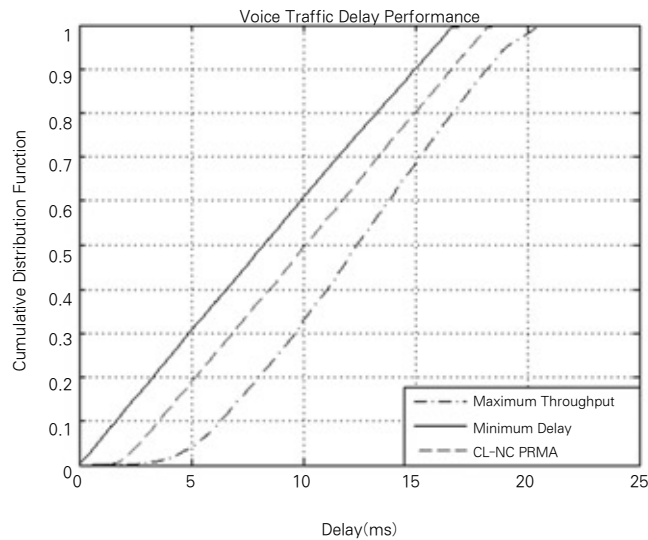


그림 4. 음성 트래픽 지연에 대한 누적확률분포

표 2. 모의 실험에 적용된 변수들의 값

내용	적용값
사용 주파수 대역	2~30MHz
부반송파수	900개
OFDMA 심볼의 길이	45.6us(가드 인터벌 포함)
타임슬롯의 길이	547.2us(12 심볼)
프레임의 길이	16.67ms(약 30 타임슬롯)
코딩 레이트	1/2 또는 16/21
사용가능 변조 기법	BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM
자원 블록의 구성	10*30(부반송파수 * OFDMA 심볼수)
자원 블록의 최대 전송가능 비트수	914bits
프레임의 최대 전송률	148.068Mbps
음성 패킷의 크기	160octets
영상 패킷의 크기	1024octets
데이터 패킷의 크기	512octets
음성 트래픽 노드의 수	2
음성 트래픽 패킷의 평균 도착시간	3.3 ms
영상 트래픽 노드의 수	1
영상 트래픽 노드의 요구 처리량	50 Mbps(HDTV 기준 값)
데이터 트래픽 노드의 수	3

프레임의 첫번째 타임슬롯에는 여러개의 미니슬롯으로 이루어진 제어 타임슬롯이 위치하여 이 프레임에서의 경쟁을 통하여 노드들은 자원을 예약할 수 있다.

비교 및 분석되는 내용은 트리플 플레이 서비스 트래픽별 지연 성능과 고정된 음성, 영상 노드가 존재하는 상황에서의 데이터 노드에게 제공되는 처리용량 성능이다.

모의실험에서 물리 계층의 변수들은 HPAV Specification[16]에서 제시하는 값들을 기반으로 하였으며 실험에 포함된 노드들은 2명의 음성 노드, 1명의 HDTV 영상 노드, 그리고 3명의 데이터 노드로 구성되어 있다. 모의실험이 수행된 시간은 60초이다. 사용된 전력선 채널 모델은 그림 2에서와 같이 주파수 선택적

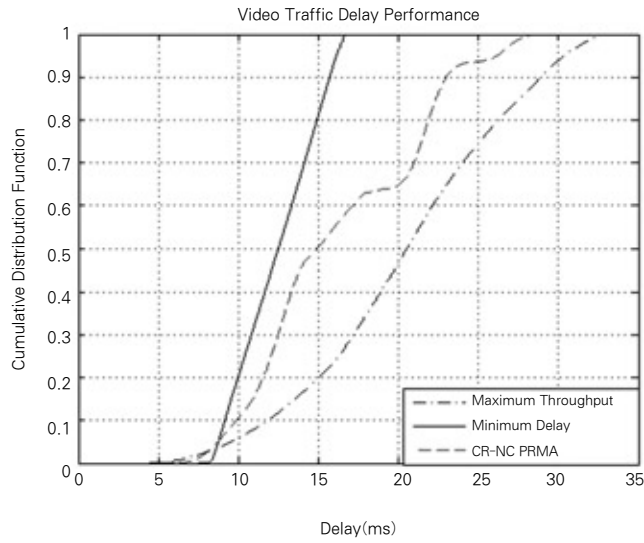


그림 5. 영상 트래픽 지연에 대한 누적확률분포

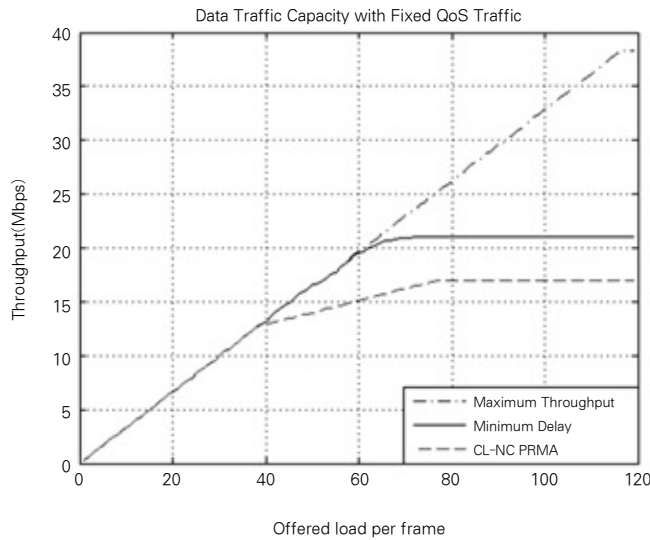


그림 6. 제안하는 기법과 CL-NC PRMA 기법의 데이터 트래픽 처리용량

페이딩 특성과 주기정상성 잡음 특성을 고려하여 임의로 생성하였다. 표 2는 본 모의실험에서 사용된 파라미터들과 실험조건을 보여준다.

1. 지연 성능 평가

그림 4는 음성 트래픽의 지연에 대한 누적확률분포를 보여준다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 지연최소화 자원 할당 방식과 CL-NC PRMA 방식의 경우 처리량

최대화 자원 할당 방식에 비해 낮은 지연을 보여줌을 확인할 수 있다. 하지만 음성 트래픽의 경우, 그 양이 적기 때문에 전송용량이 충분한 현재의 시스템에서는 모든 자원 할당 기법이 요구사항을 만족시켜 주고 있다.

그림 5는 HDTV 규격 영상 트래픽의 지연에 대한 확률누적분포이다. 그래프에서 보면 지연최적화 자원 할당 기법이 다른 두 방식에 비해 전반적으로 더 나은 지연 성능을 보여줌을 확인할 수 있다.

CL-NC PRMA 방식의 경우 OFDM 방식을 기반

으로 동작하기 때문에 주기정상성 잡음이 있는 구간에서 다중 사용자 이득을 얻기 힘들다. 그리고 CL-NC PRMA 방식의 결과에서 지연이 계단 형식을 취하는 이유는 AC 전원에 동기화되어 발생하는 주기정상성 잡음에 의하여 이 부분의 전송가능 비트수가 상대적으로 적어 우선순위가 낮아지기 때문이다. 이와 관련해서는 V 장 2절에서 더 자세히 설명한다.

2. 고정된 음성, 영상 트래픽 상황에서의 데이터 트래픽 처리 용량

그림 6은 데이터 트래픽의 부하가 증가함에 따라 각 자원 할당 방식이 제공할 수 있는 데이터 트래픽의 처리량을 나타낸다.

그래프를 보면 제안된 두가지 방식이 CL-NC PRMA 방식에 비하여 높은 처리량을 보여줌을 확인할 수 있다. 사용된 채널 모델에서 처리 최대화 자원 할당 기법의 경우 약 38Mbps까지의 전송률을 보여주었으며 지연 최소화 자원 할당 기법의 경우 약 21Mbps, CL-NC PRMA 방식의 경우는 약 17Mbps의 최대 처리량을 보여주었다. 이러한 결과는 제안하는 방식이 OFDMA 기반 시스템에서 동작하기 때문에 각 노드에 적합한 주파수를 할당해 줌으로써 주기정상성 잡음과 주파수 선택적 페이딩 환경이 존재하는 전력선 채널에서 다중 사용자 이득을 얻을 수 있기 때문이다.

3. 토론

본 논문에서 제안하는 자원 할당 방식은 IV장1절에서 제안한 행렬 R을 기본으로 동작한다. 해당 노드들이 본인의 데이터를 올바르게 인식할 수 있으려면 할당된 자원의 위치를 각 노드에게 전달해 주어야 한다. 제안하는 기법에서는 각 목적에 따라 처리량을 늘릴 것인지 지연을 줄일 것인지만 고려하고 인접한 자원 블록을 할당하는 것은 고려하지 않고 있다. 따라서 제안하는 기법을 사용했을 때 한 노드가 수신할 데이터에 대하여 자원 블록들이 산개한 형태로 할당될 수 있을 가능성이 있다. 이는 자원 블록의 위치를 알려주기 위한 제어 정보 오버헤드를 야기할 것이다. 그러나 전력선 채널은 준정적이고 홈 네트워크의 경우 노드의 수가 많지 않다고 가정한다면 성능에 큰 영향을 미칠 정도의 오버헤드는 발생하지 않을 것이라고 예상할 수 있다. 이러한 오버헤드까지 고려한 자원 할당 방식의 설계는 추후 연구 주제이다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 무선 셀룰러 망에서의 OFDMA 자원 할당을 고려한 선행 연구들과 유사한 면이 있다. 그러나 전력선 채널은 무선 채널과 달리 노드간 채널 특성이 각기 다르면서 준정적인 특성이 있으므로 본 논문에서 제안한 자원 할당 알고리즘과 이에 대한 모의 실험 결과가 전력선 통신에 대한 후속 연구의

디딤돌이 될 것으로 기대한다.

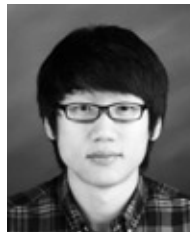
VI. 결 론

본 논문에서는 홈 네트워크에서 트리플 플레이 서비스 트래픽의 QoS를 보장하는 OFDMA 기반 전력선 통신에서의 효율적 채널 자원 할당 기법을 제안하였다. OFDMA 방식은 주파수 선택적 페이딩 특성과 주기정상성 잡음 특성을 가지는 전력선 채널에서 자원 할당 시 제어할 수 있는 변수가 시간과 주파수 두 개이므로 시간 변수 하나만 가지고 제어하는 직교주파수분할다중보다 더 좋은 성능을 보인다. 제안한 자원 할당 방식은 처리량최대화 기법과 지연최소화 기법 두가지가 있는데 둘다 QoS 트래픽의 요구사항을 만족시키는 것을 확인할 수 있었고 하나는 처리량에 다른 하나는 지연에 강점을 가지고 있으므로 상황에 맞게 적용할 수 있을 것으로 기대한다. 추가 연구로는 제안한 자원 할당 방식의 수학적 분석 모델과 함께 제어 오버헤드까지 고려한 자원 할당 방식에 대하여 고려할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] V. Oksman and S. Galli, "G.hn: The New ITU-T Home Networking Standard," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, No. 10, Oct. 2009, pp. 138-145.
- [2] IEEE. Draft standard for broadband over power line networks: medium access control and physical layer specifications. IEEE P1901. <http://grouper.ieee.org/groups/1901/>
- [3] The HomePlug Powerline Alliance; <http://www.homeplug.org/>
- [4] The HD-PLC Alliance; <http://www.hd-plc.org/>
- [5] F.J. Canete, J.A. Cortes, L. Diez, and J.T. Entrambasaguas, "Analysis of the Cyclic Short-Term Variation of Indoor Power Line Channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 24, No. 7, Jul. 2006, pp. 1327-1338.
- [6] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Powerline Communications," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 44, No. 1, Feb. 2002, pp. 249-258.
- [7] M. Tlich, G. Avril, and A. Zeddani, "Coherence Bandwidth and its Relationship with the RMS delay spread for PLC channels using Measurements up to 100MHz," *IFIP International Federation for Information Processing*, Vol. 256, 2008, pp. 129-142.
- [8] S. Mangold, S. Choi, P. May, O. Klein, G. Hiertz, and L. Stibor, "IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality

- of Service," in Proc. European Wireless, Florence, Italy, Feb. 2002.
- [9] D.P. Hole and F.A. Tobagi, "Capacity of an IEEE 802.11b Wireless LAN supporting VoIP," in Proc. IEEE International Conference on Communications, Paris, France, Jun. 2004.
- [10] R. Zhang, R. Ruby, J. Pan, L. Cai, and X. Shen, "A Hybrid Reservation/Contention-Based MAC for Video Streaming over Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, Vol. 28, No.3, Apr. 2010, pp. 389-398.
- [11] S.-G. Yoon, D. Kang, and S. Bahk, "OFDMA CSMA/CA Protocol for Power Line Communication," in Proc. International Symposium on Power Line Communications, Rio de Janeiro, Brazil, Mar. 2010.
- [12] G.I. Tsiropoulos, D.G. Stratogiannis, and P.G. Cottis, "Call Admission Control with QoS Guarantees for Multiservice Wireless-Broadband over Power Line Networks," in Proc. International Symposium on Wireless Communication Systems, Reykjavik, Iceland, Oct. 2008.
- [13] A. Papaioannou and F.-N. Pavlidou, "A Cross-layer Scheduling Scheme for Multimedia Services over Power Line Networks," in Proc. International Symposium on Power Line Communications, Jeju Island, Korea, Apr. 2008.
- [14] N. Batsios and F.-N. Pavlidou, "Performance of CDMA/PRMA as an Access Technique for Integrated Services in a UMTS High Altitude Platform System," in Proc. Wireless Personal Communications, Vol. 32, No. 3-4, Feb. 2005.
- [15] G.J. Sullivan, P. Topiwala, and A. Luthra, "The H.264/AVC Advanced Video Coding Standard: Overview and Introduction to the Fidelity Range Extensions," in Proc. SPIE Conference on Applications of Digital Image Processing, Aug. 2004.
- [16] HomePlug AV System Specifications, ver. 1.0.1, Mar. 2007.



강대호
(Daeho Kang)

2010: 서울대학교 전기공학부 학사
 2006~2008: (주) 젤라인 근무
 2010~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사과정
 E-mail: dhkang@netlab.snu.ac.kr
 Tel: +82-2-880-8434



윤성국
(Sung-Guk Yoon)

2006: 서울대학교 전기공학부 학사
 2006~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석, 박사
 통합과정
 E-mail: sgyoon@netlab.snu.ac.kr
 Tel: +82-2-880-8434



박 세 응
(Saewoong Bahk)

1984: 서울대학교 전기공학과 학사
1986: 서울대학교 전기공학과 석사
1991: Univ. Of Pennsylvania 박사
1991~1994: AT&T Bell Lab.
1994~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
Email: sbahk@snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-8414
Fax: +82-2-880-8214