DBpia

HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 성능 분석

정회원 김 종 원*, 종신회원 김 대 영**

Performance Analysis of HomePNA 2.0 MAC Protocol

Jong Won Kim* *Regular Members*, Dae Young Kim** *Lifelong Members*

요 약

Home Phoneline Networking Alliance (HomePNA) 2.0 기술은 기존의 댁내 전화 선로를 이용하여 홈 네트워크를 구축하는 기술로서, 4-32 Mbps의 고속 데이터 전송 속도를 제공한다. 이러한 HomePNA 2.0의 Medium Access Control(MAC) 프로토콜은 IEEE 802.3 Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) 방식을 사용하면서, Quality of Service(QoS) 알고리즘을 제공하고, 충돌 해결 알고리즘은 Distributed Fair Priority Queuing(DFPQ) 알고리즘을 사용한다. 본 논문은 HomePNA 2.0 MAC 프로토콜 성능의 중요 요소인 포화 처리율(Saturation Throughput), 패킷 지연(Packet Delay) 및 패킷 지터(Packet Jitter)에 대한 수학적인 모델을 제안하고, 이에 대한 모의 실험(Simulation) 결과를 제공하며, 각각의 모의 실험 결과를 분석함으로써, HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 성능을 종합적으로 분석한다.

Key Words : HomePNA, MAC, Saturation Throughput, Packet Delay, Packet Jitter

ABSTRACT

The Home Phoneline Networking Alliance (HomePNA) 2.0 technology can establish a home network using existing in-home phone lines, which provides a channel rate of 4-32 Mbps. HomePNA 2.0 Medium Access Control(MAC) protocol adopts an IEEE 802.3 Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) access method, Quality of Service(QoS) algorithm, and Distributed Fair Priority Queuing(DFPQ) collision resolution algorithm. In this paper, we propose some mathematical models about the important elements of HomePNA 2.0 MAC protocol performance, which are Saturation Throughput, Packet Delay and Packet Jitter. Then, we present an overall performance analysis of HomePNA 2.0 MAC protocol along with simulations.

Ⅰ. 서 론

최근에 개인용 컴퓨터(Personal Computer)가 가정 내의 업무, 통신, 교육 및 오락을 위하여 사용되는 강력한 플랫폼이 되었고, 인터넷은 다양한 정보 입수를 위한 필수적인 수단이 되었다. 또한 새로운 디지털 장치들이 많이 출현함에 따라서 음성, 데이터, 이미지 및 영상 정보의 디지털화가 급속히 진전되고, 이러한 디지털 정보들의 트래픽이 폭발적으로 증가하게 되었다. 이로 인하여 가정 밖의 액세스 망에 대한 고속화뿐만 아니라 가정 내의 댁내 망에 대한 고속화 요구가 급속히 증대되고 있다. 사무실에서는 디지털 장치들 간의 통신을 위하여 Local Area Network(LAN)을 사용하지만, 가정에서는 전통적인 LAN을 사용할 경우 가격 상승과 새로운 배선의 포설에 따른 어려움 때문에 지금까지 댁내 망의 구축이 활발하게 진전되지 않았다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존에 이미 설치되어 있는 전화 선로를 이용하여 고속 댁내 망을 구축하는 기술을 표준화하는 곳이 HomePNA이다[1].

* 한국전자통신연구원 센서네트워킹연구팀 (jongwkim@etri.re.kr)
** 충남대학교 공과대학장 (dykim@cnu.ac.kr)
논문번호 : KICS2005-08-342, 접수일자 : 2005년 8월 20일

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

HomePNA는 1998년 9월에 1 Mbps급의 Home PNA 1.0 규격을 표준화하였고, 1999년 5월에 Home PNA 1.0 규격을 보완한 HomePNA 1.1 규격을 표준화하였으며, 1999년 12월에 10 Mbps급의 Home PNA 2.0 규격을 표준화하였다[2].

HomePNA 2.0 규격은 HomePNA 1.0 규격과 마찬가지로 음성, ISDN 및 xDSL 데이터 서비스와 공존할 수 있도록 4.75-9.25 MHz의 주파수 대역을 사용하고, Quadrature Amplitude Modulation(QAM) 또는 Frequency Diverse QAM(FDQAM) 변조 방식을 사용하여 4-32 Mbps의 전송 속도를 제공한다. 또한 HomePNA 1.0 장치와 하향 호환성(Backward Compatibility)을 유지하고, 전송 속도 조절이 가능하며, 100 Mbps 이상의 속도를 제공할 수 있도록 확장 가능한 구조를 가지고 있다. HomePNA 2.0 MAC 프로토콜은 IEEE 802.3 CSMA/CD 방식을 사용하면서, 멀티미디어 서비스를 위하여 QoS 알고리즘을 제공하고, 충돌 해결 알고리즘은 IEEE 802.3의 Binary Exponential Backoff (BEB) 알고리즘을 개선한 DFPQ 알고리즘을 사용한다. 이와 같은 HomePNA 2.0 규격의 특징을 요약하면 표 1과 같다[3][4].

본 논문은 댁내 전화 선로를 사용하는 HomePNA 2.0 시스템의 MAC 프로토콜과 DFPQ 충돌 해결 알고리즘을 분석하고, HomePNA 2.0 MAC 프로토콜 성능의 중요 요소인 포화 처리율, 패킷 지연 및 패킷 지터에 대한 수학적인 모델을 제안하며, 이에 대한 모의 실험 결과를 제공하고, 각각의 모의 실험 결과를 분석함으로써, HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 성능을 종합적으로 분석한다. 2장에서는 HomePNA 2.0 시스템의 PHY Frame Format, MAC 프로토콜 및 DFPQ 충돌 해결 알고리즘을 분석하고, 3장에서 HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 포화 처리율, 패킷 지연 및 패킷 지터에 대한 성능을 분석하며, 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

표 1. HomePNA 2.0 규격의 특징

항 목	규 격
전송 속도	4-32 Mbps
전송 거리	500 feet(150m) 이상
변조 방식	4 Mbaud QAM, 2 Mbaud FDQAM
대역폭	4.75-9.25 MHz
중심 주파수	7 MHz
MAC 프로토콜	IEEE 802.3 CSMA/CD with QoS
최대 접속 스테이션 수	25 스테이션
사용 콘넥터	RJ11 Telephone Jack
기 타	- 새로운 배선, 허브, 스플리터, 필터 및 터미네이션 불필요 - FCC Part15 class B, Part68 규격 준수 - Plug-and-play 동작 - POTS, V.90, ISDN, G.lite와 공존 - HomePNA 1.0과 하향 호환성 유지

Ⅱ. HomePNA 2.0 시스템

2.1 HomePNA 2.0 PHY Frame Format

HomePNA 2.0 물리 계층 프레임 구조는 그림 1과 같이 저속의 헤더 (Header), 가변 속도의 페이로드 (Payload) 및 저속의 트레일러 (Trailer)로 구성된다. HomePNA 2.0 물리 계층 프레임은 송신 시에 Preamble과 Frame Control 필드의 첫 번째 16 비트를 제외하고 모두 혼화 (Scrambling)된다. 그림 1에서 Preamble은 4개의 16 심볼 시퀀스의 반복으로서 0xfc483084를 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) 인코딩 (Encoding)한 것이다. 또한 Frame Control 필드 내의 Payload Encoding 필드는 페이로드의 Constellation 인코딩 방식을 결정함으로써 송신 속도를 결정하고, 2-8 bits per Baud Constellation 인코딩, 2 MBaud FDQAM 변조 또는 4 MBaud QAM 변조를 사용함으로써, 4-32 Mbps의 전송 속도를 제공한다. End of Frame (EOF) 시퀀스는 4개의 심볼로 구성되고 0xfc를 QPSK 인코딩한 것이다[5].

HomePNA 2.0 물리 계층 프레임은 IEEE 802.3 이더넷 프레임 기반이다. 이더넷 프레임의 앞에는 16 바이트의 Preamble과 4 바이트의 Frame Control 필드가 있고, 뒤에는 2 바이트의 CRC16, 가변 길이의 PAD 및 1 바이트의 EOF가 있다. PAD는 프레임이 충돌 조각으로 오인되지 않도록, 프레임의 길이가 92.5 us 미만일 때 사용되고, 최소 유효 프레임 길이인 92.5 us를 보장한다.

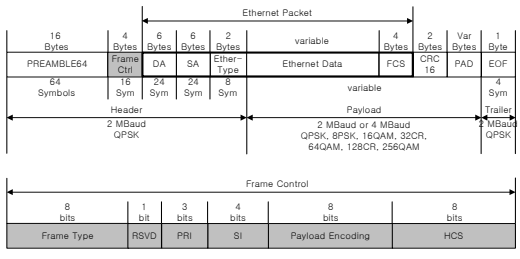

그림 1. HomePNA 2.0 물리 계층 프레임 구조

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

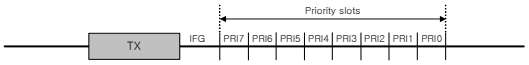

그림 2. HomePNA 2.0 우선 순위 슬롯 구조

2.2 HomePNA 2.0 MAC 프로토콜

HomePNA 2.0 MAC 프로토콜은 IEEE 802.3 CSMA/CD 방식을 사용하면서, 멀티미디어 서비스를 위하여 QoS 알고리즘을 제공하고, 충돌 해결 알고리즘은 새로운 DFPQ 알고리즘을 사용한다.

HomePNA 2.0의 QoS 알고리즘은 그림 2와 같이 8개의 우선 순위 슬롯 (Priority Slot)을 갖는 우선 순위 메커니즘을 사용한다. 서로 다른 트래픽의 등급은 우선 순위를 0부터 7까지 보유하고, 7이 가장 높다. 프레임 우선 순위를 기반으로 각각의 송신은 프레임을 분리하는 Inter Frame Gap (IFG) 이후에 해당되는 우선 순위 슬롯 안에서 일어난다. 그림 2와 같이 시간 간격들은 우선 순위가 감소하는 순서로 구성되므로, 높은 우선 순위의 트래픽은 낮은 우선 순위의 트래픽과 경쟁하지 않고 더 빨리 송신을 시작한다. IFG의 기간은 29 us이고, 우선 순위 슬롯의 기간은 21 us이다.

송신할 프레임을 가지고 있는 스테이션들은 반드시 캐리어(Carrier)를 감지하여야 하고, 만약 어떤 캐리어가 프레임 우선 순위에 해당하는 시간 슬롯 전에 감지되면 송신을 연기하여야 한다.

2.3 DFPQ 충돌 해결 알고리즘

HomePNA 2.0 MAC 프로토콜에서 모든 스테이션들은 다른 스테이션들의 프레임간의 충돌을 감지하기 위하여 매체를 감시한다. 유효 프레임의 최소 기간은 92.5 us이고, 최대 기간은 3,098 us이다. 어떤 스테이션이 프레임 송신을 시작한 후에 프레임 충돌을 감지하면 70 us 이내에 송신을 중지하여야 한다. 그러므로 32-92 us 기간의 프레임은 충돌 프레임으로 판단된다.

만약 충돌이 발생하면, 모든 스테이션들은 DFPQ라고 불리는 분산 충돌 해결 알고리즘을 시작한다. 알고리즘이 실행된 후에, 충돌에 포함된 모든 스테이션들은 송신할 순서를 나타내는 Backoff Level (BL)로 순서가 정해진다. 원하는 결과는 오직 하나의 스테이션이 BL 0가 되어서 채널을 얻을 수 있도록 하는 것이다. 성공적인 송신 후에, 모든 다른 스테이션들은 자신의 BL을 감소시키고, BL 0에 있는 하나의 새로운 스테이션이 송신을 시도한다. 수동 스테이션을 포함하여 모든 스테이션들은 Maximum Backoff Level(MBL)을 추적하기 위하여 매체에서의 동작을 감시한다. MBL을 감시하여, 충돌된 모든 스테이션들이 하나의 프레임을 성공적으로 송신할 때까지, 충돌되지 않은 스테이션들이 매체 접근을 위하여 경쟁하는 것을 허용하지 않는다. 오직 하나의 예외는 하나의 스테이션이 충돌이 일어난 우선 순위 슬롯보다 더 높은 우선 순위를 갖는 프레임을 가지고 있을 때이다. 모든 스테이션들은 각각의 우선 순위에 대하여 한 개씩, 8개의 BL 카운터와 8개의 MBL 카운터를 가져야 한다.

그림 3과 같이 충돌이 발생한 후에, 우선 순위 슬롯 전에 3개의 특수한 충돌 해결 신호 슬롯(Backoff Signal Slot : S0, S1, S2)이 나타난다. BL 카운터들과 MBL 카운터들은 이 신호 슬롯들을 통하여 결정된다. 이 신호 슬롯들의 기간은 각각 32 us이고, 오직 충돌 후에만 사용된다.

충돌 후에, 충돌 해결에 포함되는 활성 스테이션들은 한 개의 Backoff 신호를 송신하기 위하여 3개의 신호 슬롯 중 한 개를 임의로 선택한다. 2개 이상의 스테이션들이 같은 신호 슬롯에 한 개의 Backoff 신호를 송신할 수 있다. 만약 활성 스테이션이 자신이 선택한 신호 슬롯 전에 있는 신호 슬롯에서 Backoff 신호를 감지하면, 자신의 BL 카운터를 증가시킨다. MBL 카운터는 감지하는 각 Backoff 신호마다 증가되고, 성공적인 송신이 일어날 때 감소된다. MBL 카운터는 충돌 해결 주기가 진행 중일 때는 0이 아니다. 수동 스테이션들은 그들의 BL 카운터를 MBL 카운터와 같게 유지하여, 충돌 해결 주기가 끝날 때만 송신한다.

우리는 그림 4에서 4개의 스테이션들이 송신하기 위하여 경쟁할 때의 충돌 해결 과정의 예를 나타낸다.

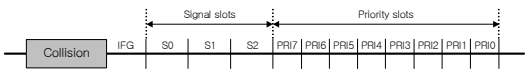

그림 3. HomePNA 2.0 신호 슬롯 구조

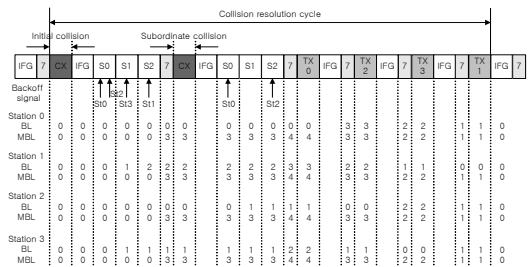

그림 4. 우선 순위 6을 갖는 4 개의 경쟁 스테이션의 예

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

그림 4에서 초기 충돌(Initial Collision)이 일어날 때, 각각의 충돌 스테이션은 3개의 신호 슬롯 중 한 개를 임의로 선택하고, 사용될 새로운 BL들을 결정하기 위하여 선택된 신호 슬롯 내에 한 개의 Backoff 신호를 송신한다. 2개 이상의 스테이션들이 같은 신호 슬롯 내에 Backoff 신호들을 송신할 수 있다. 모든 스테이션들은 Backoff 신호들을 감지한 신호 슬롯의 수에 의하여 MBL 카운터를 증가시키고, 성공적인 송신이 한 개 발생하면 MBL 카운터를 한 개 감소시킨다. (그림 4에서 모든 MBL 들은 2번째 우선 순위 7 슬롯에서 3이 되고, 3번째 우선 순위 7슬롯에서 4가 되며, 4번째 IFG 다음에 3이 된다.) 그리고 각각의 경쟁 스테이션은 자신이 선택한 신호 슬롯 전의 신호 슬롯들에서 감지하는 Backoff 신호의 수만큼 자신의 BL 카운터를 증가시키고, 성공적인 송신이 한 개 발생하면 BL 카운터를 한 개 감소시킨다. (그림 4에서 스테이션 1의 BL은 첫 번째 S2 슬롯에서 2가 된다.) BL 0를 갖는 경쟁 스테이션들은 Backoff 신호 순서 후 즉시, 해당되는 우선 순위 경쟁 슬롯에서 또다시 송신을 위한 경쟁을 한다. 그러므로 연속적인 종속 충돌 (Subordinate Collision)들이 일어날 수 있다. 종속 충돌에 대하여 MBL 카운터들은 Backoff 신호 슬롯의 수 만큼 증가시키고, 1을 뺀다. (그림 4에서 모든 MBL들은 3번째 우선 순위 7슬롯에서 4가 된다.) 종속 충돌에 참여한 스테이션들은 자신이 선택한 신호 슬롯 전의 신호 슬롯들에서 감지하는 Backoff 신호 슬롯의 수 만큼 자신의 BL 카운터를 증가시킨다. (그림 4에서 스테이션 2의 BL은 2번째 S1 슬롯에서 1이 된다.) 그러나 초기 충돌에만 참여한 다른 스테이션들은 자신의 BL 카운터를, 감지하는 Backoff 신호 슬롯의 수 만큼 증가시키고, 1을 뺀다. (그림 4에서 스테이션 1의 BL은 3번째 우선 순위 7슬롯에서 3이 된다.) 결국 오직 한 개의 스테이션만이 BL 0으로 남게되고 채널에 대한 접속을 성공적으로 얻는다. 그리고 이 충돌 해결 주기는 4개의 스테이션이 모두 성공적으로 송신을 완료하면 끝난다.

이와 같은 DFPQ 충돌 해결 알고리즘은 이더넷의 BEB 충돌 해결 알고리즘의 문제점인 Channel Capture 효과를 나타내지 않는다. 또한 포화된 망에서도 패킷 지연이 이더넷에 비하여 적다는 것을 성능 분석을 통하여 알 수 있다.

Ⅲ. HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 성능 분석

MAC 프로토콜의 성능은 보통 3개의 중요한 측정에 의하여 규정된다. 첫째는 모든 스테이션들이 항상 송신할 프레임을 가지고 있을 때, 주어진 여러 개의 스테이션들이 망에서 얻을 수 있는 포화 처리율이고, 둘째는 송신되는 프레임의 패킷 지연이며, 셋째는 패킷 지연의 변동인 패킷 지터이다.

3.1 포화 처리율

우리는 n개의 스테이션들이 존재하고 그들이 같은 우선 순위를 갖는 송신용 패킷들을 가지고 있다고 가정하고, 각 스테이션은 항상 각각의 성공적인 송신 후 즉시 송신할 수 있는 한 개의 패킷을 갖는다고 가정하며, BL 카운터들과 MBL 카운터들이 한계가 없다고 가정한다.

초기의 충돌이 발생한 후에, n개의 스테이션들은 Backoff 신호 슬롯들 중 한 개를 임의로 선택한다. 그러므로 각 활성 스테이션들이 한 개의 Backoff 신호 슬롯 Sj(j = 0, 1, 또는 2)를 선택할 확률 p는 1/3이다. 그런 충돌 스테이션들은 그들이 선택한 Backoff 신호 슬롯에 의하여 3 개의 그룹들로 분류된다. 같은 Backoff 신호 슬롯을 선택하는 충돌 스테이션들은 송신을 위하여 다시 경쟁하고, 이 것은 종속 충돌이 일어난다. 종속 충돌 스테이션들은 그들이 선택한 Backoff 신호 슬롯에 의하여 3 개의 그룹으로 비슷하게 분류된다. 이 과정은 모든 초기의 경쟁 스테이션들이 충돌을 해결하고 모든 프레임들을 성공적으로 송신할 때까지 반복된다.

n개의 스테이션들이 같은 우선 순위로 초기에 경쟁할 때, So, S1, S2 신호 슬롯을 선택한 스테이션 수를 각각 n_0, n_1, n_2 라고 하면, n 개의 스테이션들이 각각 n_0, n_1, n_2로 분류되는 확률은 식 (1)과 같다.

$$Pn(n_0, n_1, n_2) = \frac{n!}{n_0! \bullet n_1! \bullet n_2!} \bullet p^n, \text{for } n_0, n_1, n_2 \geq 0, n = n_0 + n_1 + n_2 \quad (1)$$

n개의 스테이션에 대한 충돌의 평균값을 C(n)이라 하면, C(n)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(n) = 1 + \sum_{n0=0}^{n} \sum_{n1=0}^{n-n0} \left\{ \frac{n!}{n_0! \bullet n_1! \bullet n_2!} \bullet p^n \bullet \sum_{j=0}^{2} C(n_j) \right\}, \text{for } n_0 + n_1 + n_2 = n \quad (2)$$

식 (2)에서 $n=n_o$, $n=n_1$, $n=n_2$ 인 경우를 고려하여 재 배열하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[6].

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

$$C(n) = \begin{cases} \dfrac{1 + C_1(n) + C_2(n)}{1 - 3 \bullet p^n}, & \text{for } n \geq 2, \\ 0, & \text{for } n = 0 \text{ and } 1 \end{cases} \quad (3)$$

단,

$$C_1(n) = \sum_{n0=1}^{n-1} \sum_{n1=0}^{n-n0} \left\{ \frac{n!}{n0! \bullet n1! \bullet n2!} \bullet p^n \bullet \sum_{j=0}^{2} C(nj) \right\} \quad (4)$$

$$C_2(n) = \sum_{n1=1}^{n-1} \left\{ \frac{n!}{n1! \bullet (n-n1)!} \bullet p^n (C(n1) + C(n-n1)) \right\} \quad (5)$$

식 (3)을 이용하여, 우리는 모든 n에 대한 충돌의 평균값을 반복적으로 얻을 수 있다. 그림 5는 스테이션들의 수가 변함에 따른 충돌의 평균값을 나타낸다.

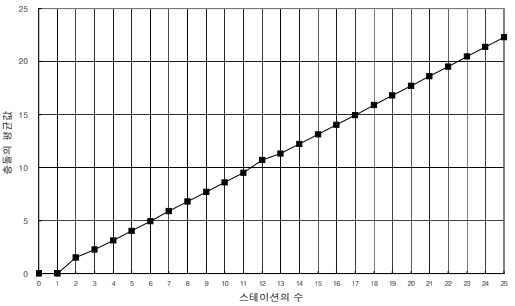

그림 5. 스테이션의 수에 따른 충돌의 평균값

그림 5에서 충돌의 평균값은 초기에 충돌하는 스테이션들이 증가함에 따라서 직선적으로 증가한다. 최대 접속 스테이션 (25개의 스테이션)에서도 충돌의 평균값이 약 22.3으로서, 스테이션의 수 이하이므로, 이더넷의 BEB 충돌 해결 알고리즘보다 성능이 우수하고, 이더넷의 BEB 충돌 해결 알고리즘의 문제점인 Channel Capture 현상이 나타나지 않음을 알 수 있다.

표 2. HomePNA 2.0 MAC 및 PHY 변수

변수	의미	값
n	스테이션 수	0 - 25
Fh	헤더 필드 길이	34 Bytes
Fp	페이로드 필드 길이	52 - 1514 Bytes
Ft	트레일러 필드 길이	1 Byte
Rh_t	헤더 필드와 트레일러 필드 전송 속도	4 Mbps
Rp	페이로드 필드 전송 속도	4 - 32 Mbps
Difg	IFG 기간	29 usec
Dpri	우선 순위 슬롯 기간	21 usec
Dcd	충돌 검출 기간	70 usec
Dsig	신호 슬롯 기간	32 usec
Lpri	우선 순위 수준	0 - 7

HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 성능 분석을 위하여 표 2와 같은 HomePNA 2.0 MAC 및 PHY 변수 (Parameter)들을 사용한다.

표 2의 변수들을 사용하여 HomePNA 2.0 프레임 전송 시 고려되는 지연 시간 및 전송 시간들을 구하면 다음과 같다. 식 (6)은 스테이션이 프레임의 첫 전송을 시작하기 전에 필요한 지연 시간이고, 식 (7)은 프레임 전송 시간이며, 식 (8)은 충돌 해결 평균 시간이다.

$$Dpre_tx = Difg + (7 - Lpri) \cdot Dpri \quad (6)$$

$$Df_tx = \left\{ \frac{8 \cdot (Fh + Ft)}{Rh - t} + \frac{8 \cdot Fp}{Rp} \right\} \cdot n + \{Difg + (7 - Lpri) \cdot Dpri\} \cdot (n - 1) \quad (7)$$

$$Dcoll_resol = C(n) \cdot \{Dcd + Difg + 3 \cdot Dsig + (7 - Lpri) \cdot Dpri\} \quad (8)$$

HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 포화 처리율 Th(n)은 n개의 스테이션에 대하여, 전체 프레임 전송 시간 동안 성공적으로 전송된 전체 페이로드 비트 수를 나타내고, 식 (9)와 같다.

$$Th(n) = \frac{8 \cdot Fp \cdot n}{Dpre_tx + Df_tx + Dcoll_resol}, n \geq 1 \quad (9)$$

그림 6은 스테이션의 수를 1부터 25까지 변화하면서, 우선 순위 수준 7에서, 페이로드 필드 길이가 각각 52, 500, 1000 및 1514 바이트인 경우에 대하여, 32 Mbp의 페이로드 필드 전송 속도에 대한 포화 처리율의 모의 실험 결과를 나타낸다. 그림 6에서 32 Mbps의 포화 처리율은 스테이션의 수가 증가함에 따라서 감소하고, 일정한 값으로 수렴하며, 우선 순위 수준이 높을수록, 페이로드 필드 길이가 길수록 포화 처리율이 더 높다는 것을 알 수 있다.

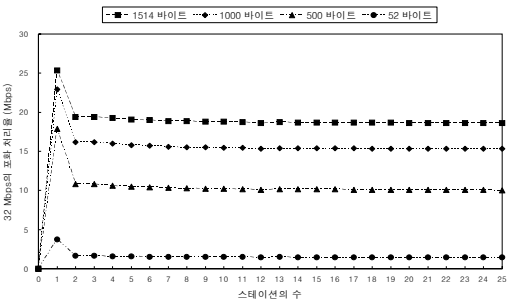

그림 6. 32 Mbps의 포화 처리율

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

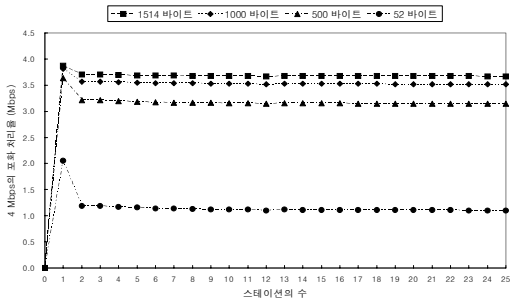

그림 7. 4 Mbps의 포화 처리율

그림 7은 스테이션의 수를 1부터 25까지 변화하면서, 우선 순위 수준 7에서, 페이로드 필드 길이가 각각 52, 500, 1000 및 1514 바이트인 경우에 대하여, 4 Mbp의 페이로드 필드 전송 속도에 대한 포화 처리율의 모의 실험 결과를 나타낸다.

그림 7에서 4 Mbps의 포화 처리율은 스테이션의 수가 증가함에 따라서 감소하고, 일정한 값으로 수렴하며, 우선 순위 수준이 높을수록, 페이로드 필드 길이가 길수록 포화 처리량이 더 높다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 6과 그림 7에서 페이로드 필드 전송 속도가 높을수록 포화 처리율이 더 높다는 것을 알 수 있다.

1개 스테이션의 포화 처리율 Th(1)은 우선 순위 수준 7에서 식 10과 같고, 페이로드 필드 전송 속도와 페이로드 필드 길이에 따른 포화 처리율의 영향은 그림 8과 같다. 그림 8에서 1개 스테이션의 포화 처리율은 페이로드 필드 전송 속도가 높을수록, 페이로드 필드 길이가 길수록 더 높다는 것을 알 수 있다. 또한 1개 스테이션이 1500 바이트의 페이로드일 때, 이더넷의 10Base-T의 전송 속도인 10 Mbps 이상을 제공하기 위해서는 HomePNA 2.0의 페이로드 전송 속도가 12Mbps 이상이 되어야 한다.

$$Th(1) = \frac{8 \cdot Fp}{99 + 8 \cdot Fp/Rp} \qquad (10)$$

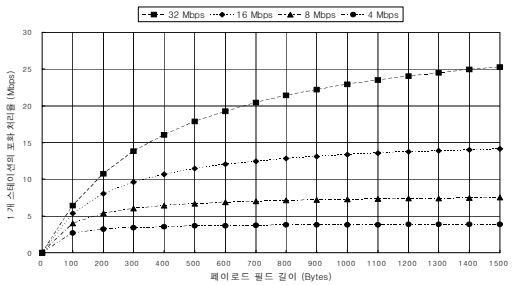

그림 8. 1 개 스테이션의 포화 처리율

정규화된 포화 처리율 Th_ns(n)은 n 개의 스테이션에 대하여, 전체 프레임 전송 시간에 대한 성공적으로 전송된 전체 페이로드 전송 시간의 비율을 나타내고, 식 (11)과 같다.

$$Th_ns(n) = \frac{\frac{8 \cdot Fp \cdot n}{Rp}}{Dpre_tx + Df_tx + Dcoll_resol}, \quad n \geq 1 \qquad (11)$$

그림 9는 스테이션의 수를 1부터 25까지 변화하면서, 페이로드 필드 길이가 최대 1514 바이트에서, 우선 순위 수준이 각각 7과 0이고, 페이로드 필드 전송 속도가 각각 32 Mbps와 4 Mbps인 경우에 대하여, 정규화된 포화 처리율의 모의 실험 결과를 나타낸다. 그림 9에서 정규화된 포화 처리율은 스테이션의 수가 증가함에 따라 감소하고, 일정한 값으로 수렴하며, 우선 순위 수준이 높을수록, 페이로드 필드 길이가 길수록, 페이로드 필드 전송 속도가 낮을수록 정규화된 포화 처리율이 더 높다는 것을 알 수 있다.

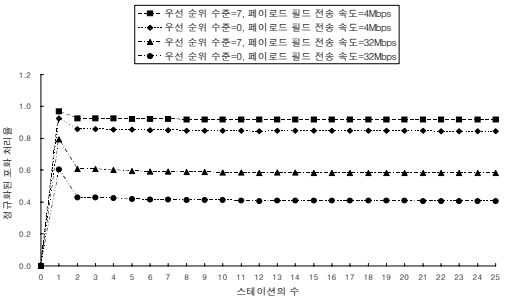

그림 9. 정규화된 포화 처리율

3.2 패킷 지연

IEEE802.1D에서 권고하는 트래픽의 형태에 따른 사용자 우선 순위 (User Priority)는 표 3과 같다[7].

표 3에서 Network Control은 망의 하부 구조를 유지하기 위한 제어 트래픽이고, Voice는 10 ms 이하의 지연과 지터가 요구되는 음성 트래픽이며, Video는 100 ms 이하의 지연과 지터가 요구되는 영상 트래픽이고, Controlled Load는 최소 대역폭을 보장받아야 하는 트래픽이며, Excellent Effort는 Best Effort 트래픽보다 우선적으로 전달해야 하는 트래픽이고, Best Effort는 기본적인 LAN 트래픽이며, Background는 다른 사용자의 망 사용에 영향을 주지 않는 대량의 전송 트래픽이다.

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

표 3. IEEE802.1D의 사용자 우선 순위

IEEE802.1D 사용자 우선 순위	약어	트래픽 형태
7(최상위)	NC	Network Control
6	VO	Voice, < 10 ms latency and jitter
5	VI	Video, < 100 ms latency and jitter
4	CL	Controlled Load
3	EE	Excellent Effort
0(default)	BE	Best Effort
2	-	Spare
1	BK	Background

HomePNA 2.0의 링크 계층은 IEEE802.1D에서 권고하는 트래픽의 형태에 따른 사용자 우선 순위를 HomePNA 2.0 물리 계층 프레임의 PRI 필드(3 비트)로 사상하는 역할을 하고, 사상하는 방법은 HomePNA 2.0 규격의 범위를 벗어나며, 구현 의존적이다. 우리는 표 3의 사용자 우선 순위를 절대적인 우선 순위 수준을 따르는 HomePNA 2.0 시스템의 우선 순위로 표 4와 같이 사상하고, 10 ms 이하의 지연과 지터가 요구되는 음성 트래픽을 가장 높은 우선 순위인 7로 설정한다.

표 4. HomePNA 2.0의 우선 순위

HomePNA 2.0 우선 순위	약어	트래픽 형태
7(최상위)	VO	Voice, < 10 ms latency and jitter
6	NC	Network Control
5	VI	Video, < 100 ms latency and jitter
4	CL	Controlled Load
3	EE	Excellent Effort
2	BE	Best Effort
1	-	Spare
0	BK	Background

HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 패킷 지연은 그림 4의 충돌 해결 과정에서, 프레임이 전송되는 시기에 따라서 최소, 평균 및 최대 패킷 지연이 결정된다. 최소 패킷 지연 Lmin(n)은 충돌 후 첫 번째 프레임으로 송신할 때 발생하고, 식 (6)과 식(8)의 합인 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Lmin\,(n) = Dpre_tx + Dcoll_resol \tag{12}$$

평균 패킷 지연 Lmean(n)은 충돌 후 중간 프레임으로 송신할 때 발생하고, 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Lmean\,(n) = Dpre_tx + Dcoll_resol + Df_tx_mean,\ n \geq 1 \tag{13}$$

단,

$$Df_tx_mean = \left\{\frac{8 \cdot (Fh + Ft)}{Rh_t} + \frac{8 \cdot Fp}{Rp}\right\} \cdot (n-1)/2 + \{Difg + (7 - Lpri) \cdot Dpri\} \cdot (n-1)/2 \tag{14}$$

최대 패킷 지연 Lmax(n)은 충돌 후 마지막 프레임으로 송신할 때 발생하고, 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Lmax\,(n) = Dpre_tx + Dcoll_resol + Df_tx_mac,\ n \geq 1 \tag{15}$$

단,

$$Df_tx_nax = \left\{\frac{8 \cdot (Fh + Ft)}{Rh_t} + \frac{8 \cdot Fp}{Rp}\right\} \cdot (n-1) + \{Difg + (7 - Lpri) \cdot Dpri\} \cdot (n-1) \tag{16}$$

식 (15)를 이용하여 음성 트래픽의 최대 패킷 지연을 분석하기 위하여, 그림 10은 스테이션의 수를 1부터 25까지 변화하면서, 우선 순위 수준을 7로 하고, 페이로드 필드 길이를 최소 프레임 필드인 92.5 us로 할 때, 음성 트래픽의 최대 패킷 지연의 모의실험 결과를 나타낸다.

그림 10에서 음성 트래픽의 최대 패킷 지연은 스테이션의 수가 증가함에 따라서 직선적으로 증가하고, 표 5와 같다. 표 5에서 최대 25개의 스테이션에서도 Lmax(25) = 7.29 ms로 수렴하고, 음성 트래픽

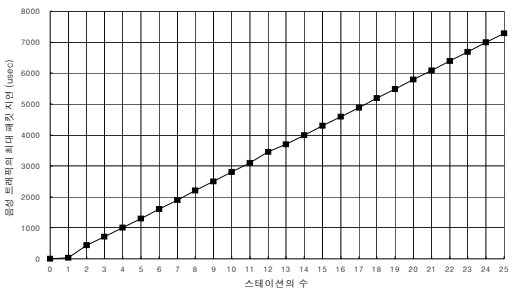

그림 10. 음성 트래픽의 최대 패킷 지연

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

표 5. 음성 트래픽의 Lmax(n) 값

스테이션의 수	Lmax(n) 값
5	1.3 msec
10	2.8 msec
15	4.29 msec
20	5.79 msec
25	7.29 msec

의 패킷 지연 요구 사항인 10 ms 이하를 충분히 만족시킴을 알 수 있다.

3.3 패킷 지터

패킷 지터는 패킷 지연의 변동으로서, 최대 패킷 지연과 최소 패킷 지연의 차이다. 그러므로 패킷 지터 Jp(n)은 식 (17)과 같고, 그림 11은 스테이션의 수를 1부터 25까지 변화하면서, 우선 순위 수준을 7로 하고, 페이로드 필드 길이를 최소 프레임 필드인 92.5 us로 할 때, 음성 트래픽의 패킷 지터의 모의 실험 결과를 나타낸다.

$$Jp(n) = \left\{\frac{8 \cdot (Fh + Ft)}{Rh_t} + \frac{8 \cdot Fp}{Rp}\right\} \cdot (n-1) + \{Difg + (7 - Lpri) \cdot Dpri\} \cdot (n-1),\ n \geq 1 \quad (17)$$

그림 11에서 음성 트래픽의 패킷 지터는 스테이션의 수가 증가함에 따라서 직선적으로 증가하고, 표 6과 같다. 표 6에서 최대 25 개의 스테이션에서도 Jp(25) = 2.92 ms로 수렴하고, 음성 트래픽의 패킷 지터 요구 사항인 10 ms 이하를 충분히 만족시킴을 알 수 있다.

Lawrence Loh et al.은 음성 트래픽의 최대 패킷 지연 Lmax(5)의 값을 1.15 ms로 계산하고, 음성 트래픽의 패킷 지터 Jp(5)의 값을 약 1 ms로 계산한다[8].

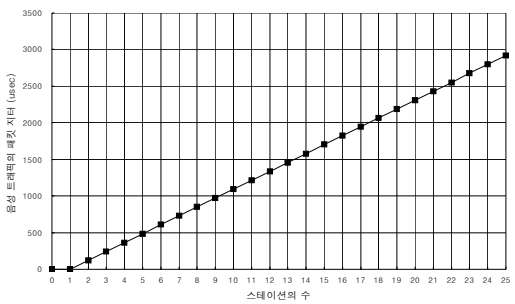

그림 11. 음성 트래픽의 패킷 지터

표 6. 음성 트래픽의 Jp(n) 값

스테이션의 수	Jp(n) 값
5	0.49 msec
10	1.09 msec
15	1.70 msec
20	2.31 msec
25	2.92 msec

본 논문은 음성 트래픽의 최대 패킷 지연 Lmax(5)의 값과 패킷 지터 Jp(5)의 값을 보다 정확하게 모의 실험하였고, Lmax(5)의 값은 1.3 ms로 나타나며, Jp(5)의 값은 0.49 ms로 나타난다.

Ⅳ. 결 론

본 논문은 HomePNA 2.0 시스템의 MAC 프로토콜과 DFPQ 충돌 해결 알고리즘을 분석하고, HomePNA 2.0 MAC 프로토콜 성능의 중요 요소인 포화 처리율, 패킷 지연 및 패킷 지터에 대한 수학적인 모델을 제안하며, 이에 대한 모의 실험 결과를 제공하고, 각각의 모의 실험 결과를 분석함으로써, HomePNA 2.0 MAC 프로토콜의 성능을 종합적으로 분석하였다.

포화 처리율은 스테이션의 수가 증가함에 따라서 감소하고, 일정한 값으로 수렴하며, 우선 순위 수준이 높을수록, 페이로드 필드 길이가 길수록, 페이로드 필드 전송 속도가 높을수록 포화 처리율이 더 높았다. 정규화된 포화 처리율은 스테이션의 수가 증가함에 따라서 감소하고, 일정한 값으로 수렴하며, 우선 순위 수준이 높을수록, 페이로드 필드 길이가 길수록, 페이로드 필드 전송 속도가 낮을수록 정규화된 포화 처리율이 더 높았다. 패킷 지연은 스테이션의 수가 증가함에 따라서 직선적으로 증가하고, 특히 음성 트래픽의 최대 패킷 지연은 최대 접속 스테이션에서도 7.3 ms 이하로서, 음성 트래픽의 패킷 지연 요구 사항인 10 ms 이하를 충분히 만족하였다. 패킷 지터는 스테이션의 수가 증가함에 따라서 직선적으로 증가하고, 특히 음성 트래픽의 최대 패킷 지터는 최대 접속 스테이션에서도 3 ms 이하로서, 음성 트래픽의 패킷 지연 요구 사항인 10 ms 이하를 충분히 만족하였다.

본 논문에서 제안된 수학적인 모델과 모의 실험 결과들은 HomePNA 2.0 시스템을 사용하는 홈 네트워크의 성능 분석과 설계에 적용될 수 있다. 향후 연구 과제로는 HomePNA 2.0 MAC 표준 규격에

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr

준하는 회로의 설계와 제작에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 김종원, 양재우, 김대영, "HomePNA 기술," *한국통신학회지*, Vol.17, No.11, pp.33-44, Nov. 2000.

[2] http://www.homepna.org

[3] HomePNA, "Interface Specification for Home PNA 2.0 10M8 Technology," Dec. 1999.

[4] HomePNA, "Interface Specification for Home PNA 2.0 10M8 Technology Link Layer Protocols," Dec. 1999.

[5] Walter Y. Chen, *Home Networking Basis*, Prentice Hall, 2004.

[6] Min Young Chung, Hee Chon Kim and Tae-Jin Lee, "HomePNA 2.0-Saturation Throughput Analysis," *IEEE Communications Letters*, Vol.7, No.11, pp.558-560, Nov. 2003.

[7] IEEE, "IEEE Std 802.1D," 1998.

[8] L. Loh and Y. Ozturk, "Quality of Support and Priority Management in HomePNA 2.0 Link Layer," *Proceedings of the Eighth IEEE Symposium on Computers and Communications ISCC2003*, Vol.2, pp.861-866, 2003.

김 종 원 (Jong Won Kim) 정회원

1980년 2월 한국항공대학교 항공전자공학과 학사

1998년 8월 충남대학교 전자공학과 석사

2003년 2월 충남대학교 전자공학과 박사 수료

1992년~현재 한국전자통신 연구원 책임연구원

<관심분야> 홈 네트워크, 액세스 네트워크, 유무선 MAC 프로토콜

김 대 영 (Dae Young Kim) 종신회원

1975년 서울대학교 전자공학과 학사

1977년 한국과학기술원 전기전자공학과 석사

1983년 한국과학기술원 전기전자공학과 박사

1983년~현재 충남대학교 정보통신공학과 교수

2005년 현재 충남대학교 공과대학장

2003년~현재 ANF(Advanced Network Forum) 의장

2002년~현재 APAN-KR 의장

2002년~현재 KIEF 의장

<관심분야> Advanced Communication Protocol, Advanced Internet Protocol, 무선 인터넷

Copyright (C) 2005 NuriMedia Co., Ltd.
www.dbpia.co.kr