

전력선 환경을 고려한 CSMA/CA MAC 프로토콜의 성능 분석

이감록\*, 이재민\*, 명관주\*, 권옥현\*, 김요희\*\*

\*서울대학교 전기컴퓨터 공학부 \*\*한국전기 연구원 전기시험 연구소

Performance Analysis of CSMA/CA MAC Protocol in PLC Environments

Kam-Rok Lee\*, Jae-Min Lee\*, Kwan-Joo Myoung\*, Wook-Hyun Kwon\*, Yo-Hee Kim\*\*

\*School of EECS, Seoul National Univ. \*\*Electrical Testing & Research Lab., KERI

**Abstract** - 본 논문에서는 전력선 환경이 CSMA/CA MAC 프로토콜의 성능에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 전력선 환경의 특징이 분석되고, 이를 반영할 수 있는 테스트 베드를 구축한다. 테스트 베드를 통해 전력선 환경의 특성을 나타내는 패킷에러율을 구하고, 이를 이용해 CSMA/CA MAC 프로토콜의 성능을 분석한다. CSMA/CA MAC 프로토콜의 성능 분석을 위해 본 논문에서는, 시스템 모델을 제안하고, 시스템 모델로부터 성능 평가 요소인 패킷전송률과 패킷지연시간을 구한다. 마지막으로 수학적 결과를 통해 CSMA/CA MAC 프로토콜의 성능에 전력선 환경이 미치는 특징을 알아보고, 이를 개선할 수 있는 방법들이 논의된다.

1. 서 론

전력선은 포설 비용이 없고, 일반 가정에 편재되어 있다는 장점으로 인하여 홈 네트워크에 적합한 것으로 알려져 있고, 또한 최근에 기술의 발전과 함께 급격히 부상하고 있는 매체이다. 그러나, 한편으로 전력선은 통신을 목적으로 만들어진 매체가 아니기 때문에, 통신을 하기에는 열악한 환경을 가지고 있다[1,2]. 최근까지 이러한 열악한 환경을 극복하기 위한 많은 기술 및 방법들이 연구되고 있으나, 전력선 환경은 여전히 많은 문제를 안고 있다.

전력선 환경을 극복하기 위해서 접근해볼 수 있는 영역은, 크게 PHY 부분과 MAC 부분으로 나누어진다. 최근까지의 연구가 주로 PHY 부분에 집중되어 있지만, 전력선 통신의 목적 자체가 홈 네트워킹임을 생각해볼 때, MAC 부분에 대한 연구 또한 중요하다고 할 수 있다.

현재 전력선 통신에 사용되고 있는 MAC 프로토콜 중에서 CSMA/CA는 많은 PLC 업체들에 의해 사용되고 있다. 이는, 전력선 환경이 무선 환경과 비슷하다는 점 때문이기도 하지만, 전력선 홈 네트워킹의 환경이 CSMA 방식을 사용하기에 적합하다는 특징 때문이기도 하다. 그러나, 엄밀히 얘기하자면, 전력선 환경은 무선 환경에 비해 더욱 열악한 환경이며, 전력선 채널 자체의 특성으로 인해, CSMA/CA 프로토콜의 성능에 무선 환경과 다른 영향을 미칠 수 있다. 또한, CSMA/CA에서 사용하는 backoff 알고리즘은 충돌 횟수 및 채널의 특성에 민감하게 반응하고, 이는 CSMA/CA 프로토콜의 성능에 큰 영향을 준다. 이러한 점들은, 전력선 환경의 특성을 고려한 CSMA/CA 프로토콜의 성능 분석이 필요함을 나타낸다.

본 논문에서는 전력선 환경에서 CSMA/CA 프로토콜이 가지는 성능을 분석하기 위해 전력선 환경의 특징을 분석한다. 이를 위해 테스트 베드를 구축하고, 테스트베드로부터 전력선의 환경의 특징을 반영하는 요소인 패킷에러율(PER, Packet Error Rate) 및 성능 분석을 위해 필요한 요소들을 얻는다. 이는, 본 논문에서 CSMA/CA 프로토콜의 성능 분석을 위해 제안한 시스템 모델에 적용되며, 성능 평가 요소인 패킷전송률과 패킷지연시간을 통해 CSMA/CA 프로토콜이 전력선 환경에서 가지는 특

징이 분석된다.

2. 본 론

2.1 전력선 환경의 특징

2.1.1 전력선 환경 요소

전력선 환경 요소는 크게 네 가지로 구분된다[6].

- 신호 잡음 및 간섭
- 채널 임피던스
- 신호 감쇄
- 전력선 채널의 대역폭

전력선에 미치는 잡음 및 간섭 중에 가장 큰 영향을 미치는 것은 전력선 통신상에 연결되어 있는 가전기기들이다. 가전기기에 의해 발생하는 잡음은 다음과 같이 크게 네 가지로 구분된다.

- 60Hz 전력 주파수와 동기된 잡음 (SCR)
- 비동기된 주기적 잡음 (TV, 모니터)
- 배경 잡음 (전기청소기, 모터)
- 임펄스성 잡음 (낙뢰, 차단기, 모터 개폐시)

전력선 통신 시스템의 구현이 어려운 이유 중의 하나는, 전력선 통신에 영향을 미치는 임피던스 특성이 환경에 따라 크게 변하기 때문이다. 이는 전력선의 특성 임피던스가 변압기의 임피던스 및 부하의 임피던스와 병렬로 연결되어 있기 때문이다. 또한 전력선은 많은 기기 연결점을 갖는데, 기기가 접속될 때마다 특성 임피던스가 변하고 이는 전력선 통신에 방해 요소로 작용한다. 임피던스는 크게 세 가지로 분류된다.

- 분배변압기(distribution transformer)의 임피던스
- 사용되는 케이블의 임피던스
- 네트워크에 연결되어 있는 기기들의 임피던스

전력선 통신에 영향을 주는 또 하나의 요소인 신호 감쇄는 다음과 같이 네 가지 요소의 영향을 받는다.

- 시간에 따른 신호 감쇄
- 주파수에 따른 신호 감쇄
- 거리에 따른 신호 감쇄
- phase에 따른 신호 감쇄

전력선 채널의 대역폭은 전파법에 따라 제한되어 있다. 현재, 미국에서는 전력선 통신을 위해 100kHz - 450kHz의 350kHz를 허용하고 있고, 일본에서는 10kHz - 450kHz를 허용하고 있으며, 우리나라에서도 일본과 유사하게 10kHz - 450kHz를 허용하고 있다. 고속 전력선 통신에 대한 연구가 활발한 지금, 30Mhz정도까지의 대역폭을 사용할 수 있도록 전파법 개정이 필요하다.

2.1.2 전력선 채널 모델

전력선의 채널 모델은 [3]에 따라 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보여지는 H(f,t), A(t) 및 B는, 잡음 및 감쇄가 큰 범위내에서 시간과 주파수에 영향을 받아 변하기 때문에 수학적으로 계산해내기 어렵다. 따라서, 현재까지 전력선 채널 모델링은 지속적인 연구가 필요한 분야이며, 이는 전력선 채널에 대한 실험적 측정

이 불가피함을 나타낸다.

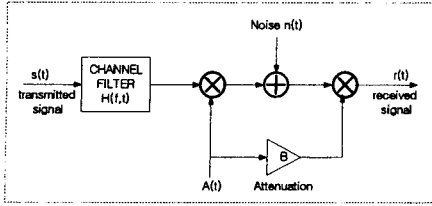


그림 1 전력선 채널 모델

## 2.2 시스템 모델

### 2.2.1 시스템 모델

CSMA/CA 프로토콜의 성능 분석을 위해 고정된 길이의 메시지와 ACK를 전송하는 M개의 노드를 가지고 있는 시스템을 고려한다. 이 때, 메시지와 ACK 패킷은 통신 채널의 에러의 영향을 받으며, 메시지의 전송은 기하학적 분포 (geometrical distribution)를 따른다. 각각의 노드는 backlogged state (버퍼에 하나의 패킷을 가지고 있는 상태)와 thinking state (버퍼가 비어 있는 상태)를 가지고 있다. 충돌이나 채널의 에러로 인하여, 또는 채널이 사용 중이어서 불투당하여 메시지 전송에 실패한 노드는 backlogged state로 들어간다. Backlogged state에 있는 노드는, 전송을 위한 패킷을 생성할 수 없고, 현재 버퍼에 있는 패킷의 전송을 성공한 후에 thinking state로 전환할 수 있다.

그림 2는 d초 간격으로 슬롯화된 분석 모델을 나타낸다[4].

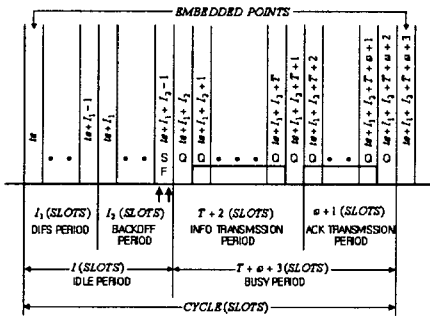


그림 2 CSMA/CA를 위한 분석 모델

### 2.2.2 성능 평가 요소 - 패킷전송률, 패킷지연시간

그림 2의 분석 모델과 [4]에 정의된 수학기호들을 사용하여, 패킷전송률과 전송지연시간을 구할 수 있다. 채널이 안정 상태(steady state)로 고려되기까지 요구되는 사이클의 수를 L이라고 한다. Busy period동안 backlog되는 패킷의 수의 합을 A(i)라고 할 때,

$$A(i) = \sum_{r=0}^{T+w+2} \sum_{j=i}^M [SQ^r]_{ij} + \sum_{r=0}^{T+e+2} \sum_{j=i}^M [FQ^r]_{ij} \quad (1)$$

이다.

이 때, L 사이클 동안 backlog되는 패킷의 전체 합은

$$\sum_{i=0}^M \pi_i L \left[ (I_1 + I_2 + \frac{1}{1-\delta_i}) i + A(i) \right] \quad (2)$$

L 사이클 동안의 슬롯의 전체 길이는

$$\sum_{i=0}^M \pi_i L \left[ I_1 + I_2 + \frac{1}{1-\delta_i} + 1 + P_s(i)(T+w+2) + (1-P_s(i))(T+T_{out}+2) \right] \quad (3)$$

이다. 따라서,  $T_s = T+w+2$ ,  $T_f = T+T_{out}+2$  라고

정의할 때 전체 backlog된 패킷 수의 평균 값  $\bar{N}$ 은,

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=0}^M \pi_i [\bar{I} + A(i)]}{\sum_{i=0}^M \pi_i [\bar{I} + 1 + P_s(i)T_s + (1-P_s(i))T_f]} \quad (4)$$

이다. 결국, 패킷전송률 S는, L사이클 동안의 전체 슬롯의 길이에 대한 메시지 전송에 성공한 슬롯의 길이의 비로 나타난다. 즉,

$$S = \frac{\sum_{i=0}^M \pi_i P_s(i)T}{\sum_{i=0}^M \pi_i [\bar{I} + 1 + P_s(i)T_s + (1-P_s(i))T_f]} \quad (5)$$

이다. Little's formula로부터 패킷지연시간은,  $D = \frac{\bar{N}}{S}$ 로 얻어진다.

## 2.3 테스트 베드

이미 언급한 대로, 전력선 채널 모델로부터 패킷에러율을 구할 수는 없으며, 이는 실험적 측정을 통해 얻어진다. 그림 3은 패킷에러율을 측정하기 위해 구축된 테스트 베드를 보여준다. 테스트 베드는, HNCP (Home Network Control Protocol) 프로토콜을 따르는 Tx 및 Rx 기기를 이용하여 실제 홈 환경에 가깝도록 구축되었다.

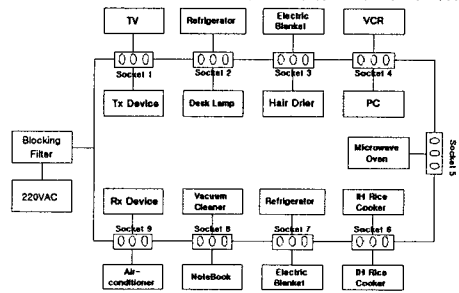


그림 3 전력선 홈 환경을 고려한 테스트 베드

표 1은, 그림 3을 통하여 1440개의 패킷을 Tx기기로 부터 Rx기기로 전송하였을 때, 얻어진 결과이다. 1440개의 전송 패킷 중에 1352개의 패킷이 성공적으로 수신되었고, 따라서, 패킷에러율  $P_e$ 는,

$$P_e = \frac{88}{1440} = 0.061 \quad (6)$$

로 얻어진다.

표 1 패킷에러율 측정 결과

RECEIVER												
Messages	Socket 1	Socket 2	Socket 3	Socket 4	Socket 5	Socket 6	Socket 7	Socket 8	Socket 9	Socket 10	Socket 11	Socket 12
S	Socket 1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
F	Socket 2	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20
N	Socket 3	20	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20
D	Socket 4	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
R	Socket 5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	Socket 6	0	2	3	20	20	20	20	13	20	20	20
	Socket 7	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	Socket 8	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	Socket 9	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	140	142	143	140	160	160	134	160	155	160	1352	
	TV	Desk Lamp	Electric Blanket	VCR	Microwave Oven	Refrigerator	Rx Cooker	Electric Blanket	Vacuum Cleaner	Air Conditioner		
		Hair Dryer	PC									

## 2.4 성능 분석

표 2는 그림 3의 테스트베드로부터 얻어진 값을 나타낸다. 그림 4와 그림 5는, 표 2로부터 얻어진 값을 시스템 모델로부터 구한 패킷전송률과 패킷지연시간에 적용하여 얻어진 수학적 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

표 2 timing parameters

Timing parameters	Milliseconds	Time slots
$d$ (time slot)	0.2	1
$I_1$ (DIFS)	15	75
$I_2$ (backoff)	40	200
$w$	5	25
$T$	41.6	208

그림 4는, 패킷전송률이 load의 수가 증가함에 따라 증가하다가, load의 수가 45정도에 이르렀을 때 더 이상 증가하지 않고 어느 일정한 레벨에 이르고, 그 후에는 오히려 감소하는 것을 보여준다. 이는 load의 수가 증가함에 따라, 전송률이 증가하지만, 그만큼 충돌 수도 증가하기 때문이다. 특히, 패킷전송률은 backoff의 길이에 따라 큰 변화를 갖는다는 것을 알 수 있는데, 그림 4에서 보듯이 backoff 길이가 최대값을 가질 때, 패킷전송률이 0.35 정도의 낮은 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이러한 경우에 CSMA/CA는 시스템의 성능을 악화시키고, 유용하지 못한 결과를 초래한다. 이러한 낮은 성능 결과는 CSMA/CA에서 사용하는 binary exponential backoff 알고리즘으로 인한 것이다. 이를 개선하기 위해서 backoff를 충돌 수에 따라 adaptive하게 수용하는 방법이 이용될 수 있다.

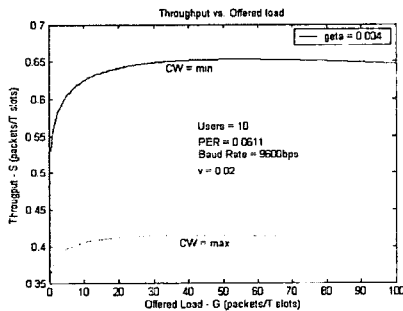


그림 4 load수 vs. 패킷전송률(exponential backoff) [5]에서 제안한 방법을 따라 backoff  $I_2$ 는

$$I_2 = \frac{z}{z} \times \sqrt{T} \quad (7)$$

과 같이 표현할 수 있다[4]. 이와 같은 adaptive backoff 방법을 적용하면, 그림 6과 같이 성능을 높일 수 있다. 따라서, 열악한 전력선 통신 환경에서는 잡음 및 패킷 충돌로 인한 패킷 손실이 높기 때문에, binary exponential backoff를 사용할 경우 시스템 성능이 매우 나빠지는 상황을 초래할 수 있고, 그러므로 이러한 경우에는 adaptive backoff 방법을 사용함으로써 시스템 성능이 저하되는 것을 막을 수 있다.

그림 5는, 시스템에서 요구되는 최대한의 패킷지연시간에 의해 패킷전송률이 결정될 수 있음을 보여준다.

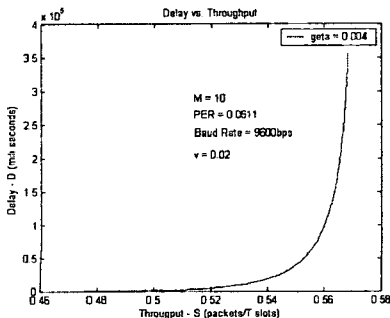


그림 5 패킷전송률과 패킷지연시간과의 관계

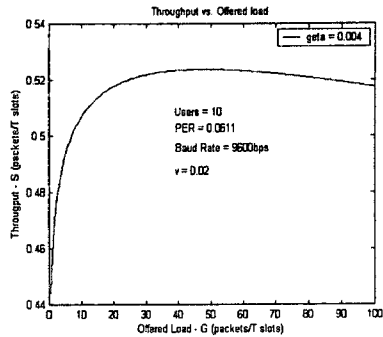


그림 6 load수와 패킷전송률(adaptive backoff)

### 3. 결 론

전력선은 열악한 환경을 가지고 있다. 본 논문에서는, 이러한 열악한 전력선 통신 환경에서 CSMA/CA 프로토콜의 특징을 알아보기 위해 분석 모델과 테스트베드를 이용하여 성능 분석을 하였다. 수학적 결과는, CSMA/CA 프로토콜이 adaptive backoff 알고리즘을 사용하여 시스템에 참여하는 노드들의 수를 예측할 수 있을 경우, 기존의 CSMA/CA 프로토콜에서 발생할 수 있는 시스템 성능의 저하를 막을 수 있다는 것을 보여주었다.

향후, CSMA/CA를 개선한 MAC 프로토콜의 제안과 좀더 정확한 분석 모델을 통해 전력선 환경에 더욱 적합한 MAC 프로토콜이 제안될 것으로 기대된다. 또한 전력선 채널 모델이 제안될 수 있다면, 이를 통해 정확한 패킷에러율을 적용할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 논문의 연구를 위해 도움을 주신 한국 전기연구원 및 PLC 포럼 코리아에 감사를 드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] R.M. Vines et al, "Noise on Residential Power Distribution Circuits", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 26, pp. 161-168, 1984
- [2] J.B. O'Neal, "Substation Noise at Distribution Line Communication Frequencies", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 30, pp. 71-77, 1998
- [3] Onunga, J.O. and Donaldson, R.W. "Personal Computer Communications on Intra-building Power Line LAN's Using CSMA with Priority Acknowledgments", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 2, pp. 180-191, Feb 1989
- [4] Kam Rok Lee et al, "Performance Evaluation of CSMA/CA MAC Protocol in low-speed PLC Environments", ISPLC2003, pp. 179-184, 2003
- [5] L. Fratta, G. Bianchi and M. Oliveri, "Performance Evaluation and Enhancement of the CSMA/CA MAC Protocol for 802.11 Wireless LAN's", PIMRC '96, vol. 2, pp. 392-396, Oct. 1996
- [6] O. Hooijen, H.C. Ferreira, H.M. Grove and A.J. Han Vinck, "Power Line Communications: an Overview", IEEE AFRICON 4th, vol. 2, pp. 558-563, Sep. 1996