

# HomePlug AV 네트워크에서의 성능 향상을 위한 적응적 Contention Window 조절 방식

\*윤성국, 윤정균, 박세웅  
\*서울대학교 전기·컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소  
\*{sgyoon, jyun, sbahk}@netlab.snu.ac.kr

## Adaptive Contention Window Mechanism for Enhancing Throughput in HomePlug AV Networks

\*Sung-Guk Yoon, Jeongkyun Yun, and Saewoong Bahk,  
\*School of Electrical Engineering and Computer Science, INMC

### 요 약

HomePlug AV (HPAV)는 맥내에 깔려있는 전력선을 이용하여 데이터 전송뿐만 아니라 음향과 영상까지 전송을 목표로 제정된 표준이다. 이 표준은 TDMA와 CSMA/CA 기술을 모두 사용할 수 있는 혼합된 형태의 Medium Access Control (MAC) 기술을 사용한다. HPAV의 CSMA/CA 프로토콜은 contention window (CW)와 deferral counter (DC)라는 두 가지 주요한 매개 변수를 가지고 네트워크를 제어한다. 본 논문에서는 CW와 DC가 성능에 미치는 영향을 여러 각도에서 조명하였고 이를 기반으로 HPAV MAC의 수율 (throughput)을 높이기 위한 적응적 Contention Window (CW) 조절 방식을 제안한다. 여러 실험을 통해 얻은 결과 CW가 DC보다 수율에 더 민감한 성질을 가지고 있어서 제안하는 방식은 DC는 기본값을 사용하고 CW만을 조정한다. 제안하는 방식은 단순히 네트워크가 과부하가 걸려있다면 CW를 두 배로 늘려주고 네트워크의 부하가 적으면 CW를 반으로 줄여 준다. 본 논문에서는 제안하는 방식과 HPAV 표준 방식, 다른 논문에서 제안한 방식을 수율과 공정성 (fairness)의 측면에서 비교한다. 모의실험과 수리분석을 통해 제안하는 방식이 여러 다양한 환경에서 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

### I. 서론

최근 디지털 가전 및 통신기술의 발달로 인해 홈 네트워크에 대한 관심이 증가하고 있다. 최근의 홈 네트워크는 가정에서의 끊임 없는 서비스를 제공함으로써 유비쿼터스의 시작이 되는 기술이 되고 있다.<sup>1</sup>

HomePlug Alliance에서 표준화한 HomePlug AV (HPAV) 기술[1]은 2005년에 표준화가 완료된 전력선 기반 통신으로서 기존의 control data 위주의 전력선 통신과는 달리 최대 150 Mbps로 통신이 가능한 최신 전력선 통신 기술이다.

HomePlug에 대한 연구는 HPAV의 출현 전 HomePlug 1.0 기반으로 연구되어 왔다. HomePlug 1.0은 HPAV와 동일한 CSMA/CA 프로토콜을 사용한다. 정민영의 논문[2]은 Markov chain을 기반으로 HomePlug CSMA/CA의 성능을 분석하였고 Campista 등[3, 4]은 HomePlug 1.0 CSMA/CA 성능향상 기법을 제안하였다. Tripathi 등은 [5]에서 모든 node가 항상 경쟁 node 수를 알고 있다는 가정 하에서 HomePlug CSMA/CA의 최적의 수율을 얻을 수 있는 기법을 제안하였다.

본 논문에서는 경쟁 node 수에 상관없이 항상 고속의 수율을 얻을 수 있는 방식을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 방식은 기존 [3] 연구와 달리 공정성의 손실 없이 수율을 향상시키고 CSMA/CA 환경에서 모든 node가 언제나 경쟁 node 수를 알아야

한다는 비현실적인 가정을 없애[5] 현실적으로 사용 가능하다. 본문에서 보일 heuristic 알고리즘의 성능은 계산 복잡도를 낮출 뿐 아니라 완전한 network 정보 없이 구동할 수 있게 디자인하였다. 홈 네트워크에서 과부하를 고려한다는 가정이 무리가 있을 수 있지만 차후 홈 네트워크 기술이 대중화 되고 보편화 되었을 경우와 HPAV 표준은 CSMA/CA 부분을 이웃한 집들과 공유하는 것을 정의하고 있다는 것을 고려한다면 홈 네트워크에서도 경쟁 node에 수에 관계없이 고속의 수율을 얻는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

이후 본 논문은 다음과 같은 구성을 따른다. II에서는 HPAV MAC에 대한 간략한 설명을 담고 III에서는 시스템 모델 및 분석을 한다. IV에서는 여러 가지 결과를 도시할 것이며 V에서는 결론을 맺음으로써 본 논문을 정리할 것이다.

### II. HomePlug AV MAC

#### A. 혼합 방식의 접근 제어

HPAV에서는 다양한 요구사항을 유연하게 대처할 수 있게 TDMA와 CSMA/CA가 혼재된 혼합 형식의 Access Mechanism 제공한다. 이런 혼합 access 방식을 제어하기 위해 HPAV MAC protocol은 각 논리 network마다 Central Coordinator (CCo)를 하나씩 두어 네트워크 관리를 담당한다. CCo는 주기적으로 오는 beacon region에서 beacon을 발송함으로써 네트워크 내에 있는 node들을 control한다. 한 beacon이 발송되고 다음 beacon이 발송되기 직전까지를 beacon period라고 부르는데 beacon 전송의 안정성을 위해 이 beacon period는 AC line cycle

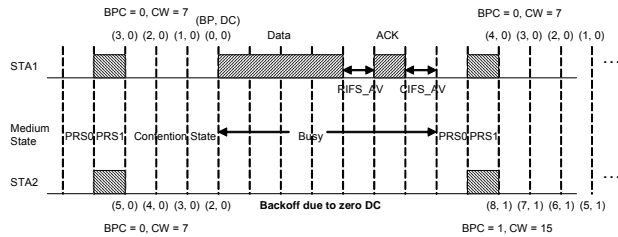


그림 1. HomePlug CSMA/CA timing 도

표 1. CW 와 DC

	High Priority		Low Priority	
	CW	DC	CW	DC
BPC = 0	7	0	7	0
BPC = 1	15	1	15	1
BPC = 2	15	3	31	3
BPC ≥ 3	31	15	63	15

과 동기화되어 있다. Beacon 은 매 2 AC line cycle 마다 한 beacon 이 전송된다. Beacon 은 마치 map 과 같은 기능을 담당하여 그 안에는 CSMA/CA region 이 어디인지 TDMA region 이 어디인지 등에 대한 정보가 들어있다. 따라서 Beacon 을 수신한 같은 network 에 있는 node 들은 이 beacon 에 있는 map 정보를 통해 CSMA/CA 의 위치와 TDMA 에서 service 중이었다면 자신이 언제 medium 에 접근해야 하는지를 알 수 있다.

### B. HomePlug CSMA/CA

HomePlug CSMA/CA (HomePlug 1.0 과 HPAV 는 동일한 CSMA/CA 를 사용하므로 HomePlug CSMA/CA 라는 용어를 사용한다.)는 binary random backoff algorithm 을 사용한다는 점에서 IEEE 802.11 CSMA/CA 와 유사하다. 하지만 두 protocol 사이에는 2 가지의 큰 차이점이 존재한다. 첫째는 Priority Resolution Period (PRP) 이고 둘째는 Deferral Counter (DC) 이다.

#### 1) PRP

PRP 는 각 data flow 들의 priority 를 부여하기 위해 정의한 기법이다. PRP 는 두 개의 Priority Resolution Slot (PRS)로 이루어져 있다. 각 node 들은 자신의 priority 를 표현해야 하는 slot 에 busy signal 을 전송하고 아니면 medium state 를 파악한다. 자신이 listen 하는 중 medium 이 busy 했다면 현재 network 에 자신보다 높은 priority 를 가진 flow 가 있다는 의미이므로 해당 node 는 경쟁에 참여하지 않는다. 즉, priority 경쟁에서 이긴 node 들은 IEEE 802.11 CSMA/CA 와 유사한 알고리즘으로 경쟁에 들어가고 경쟁에서 진 node 들은 higher priority data 가 전송을 마치고 다시 PRP 가 될 때까지 경쟁에 참여하지 않는다.

#### 2) DC

PRP 가 contending 하기 전 각 frame 들의 우선 순위와 관련한 mechanism 이라면 DC 는 실제 contending 할 때 사용하는 mechanism 이다. DC 는 HomePlug 에서 새롭게 추가된 매개 변수이다. 따라서 HomePlug 에서는 Backoff Procedure Counter (BPC), CW, DC 세 개의 매개 변수를 가지고 동작한다. DC 를 사용하면 각 node 은 충돌이 일어나지 않고도 binary random backoff 를 수행한다. 각 BPC 가 시작될 때에 node 는 DC 값을 표 1 에 설정된 값으로 설정된다. Medium 이 idle 하면 앞서 언급한 것과 같이 BC 를 하나 줄이고 busy 하고 DC 가 0 이 아닌 경우 BC 와 DC 를 하나씩 감소시킨다. Busy 하고 DC 가 0 인 경우 node 은 packet 전송을 시도하지 않았음에도 binary random backoff 를 수행한다. 그림 1 에서 STA2 는 전송을 시도하지 않았음에도 불구하고 자신의 DC 가 0

이고 medium 이 busy 하므로 backoff 를 수행하는 것을 확인할 수 있다. 즉, DC 로 인해 HomePlug CSMA/CA 에서는 충돌 없이 backoff 를 수행하므로 이는 IEEE 802.11 과 비교하여 상대적으로 적은 CW 값으로도 비슷한 충돌 확률을 얻을 수 있다.

## III. 수리분석 정리와 적응적 CW 조절 방식

IEEE 802.11 CSMA/CA 는 [6]에서 Markov Chain 과 포화 조건을 가정하여 분석이 되었고 HomePlug CSMA/CA 는 비슷한 조건 하에서 [3]에서 분석되었다. 이 장에서는 그 분석 방법들을 간단히 살펴보고 적응적 CW 조절 방식을 소개한다.

### A. 수율과 최적 $\tau$ 분석

Markov Chain 모델은 IEEE 802.11 의 경우 BPC 와 CW 의 두 parameter 로 분석하였으므로 2 차원 Markov Chain 이 되었지만 HomePlug 의 경우 새로운 매개 변수인 DC 의 추가로 3 차원 Markov Chain 의 형태를 가지게 된다.  $\tau$  는 임의의 node 가 packet 을 전송할 확률이다. 3 차원 Markov Chain 모델을 바탕으로  $\tau$  를 계산하면

$$\tau = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{M_{i-1}} P_{i,j,0} \quad (1)$$

$m$  은 maximum BPC stage 값을 의미하고  $M_{i-1}$  은 BPC stage  $i$  에서의 DC 값이다.  $P_{i,j,k}$  는 임의의 node 가 BPC  $i$  stage, DC value  $j$ , BC value  $k$  state 에 존재할 확률을 의미한다. Data packet 의 전송은 BC 가 0 인 경우에만 일어나므로 식(1)에서의  $\tau$  는 임의의 node 가 BPC stage 와 DC 값에 관계없이 BC 가 0 이 되는 state 에 존재할 확률을 더한 것이다.  $P_{i,j,k}$  는 numerical method 에 의해 구할 수 있다.

수율 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{sat} = \frac{P_{tr} P_s E[N_{payload}]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}(P_s T_s + (1 - P_s)T_c)} \quad (2)$$

$E[N_{payload}]$  는 payload 의 평균 크기이고  $\sigma$  는 idle slot time 을 나타내고  $T_s$  는 packet 전송이 성공하였을 때 걸리는 시간,  $T_c$  는 packet 전송이 충돌되었을 때 낭비되는 시간이다.

### B. DC 의 영향과 제안하는 적응적 CW 조절 방식

본 장에서는 DC 값에 따라 수율이 어떤 영향을 받는지 직관적으로 분석한다. DC 에 대한 분석은 2 단계로 나누어 진행한다. 먼저 DC 가 변함에 따라  $\tau$  가 어떻게 변하는지를 살펴보고 다음으로  $\tau$  가 변함에 따라 수율이 어떻게 변하는지 살펴본다.

첫째 DC 의 변화에 따른  $\tau$  의 변화를 살펴보면, HPAV 프로토콜은 DC 가 0 이고 medium 이 busy 할 때 backoff 하는 알고리즘을 가지고 있으므로 DC 가 1 줄어들면 Markov Chain 에서 한 행이 사라지는 것과 같다. 즉, 수식(1)의  $M_{i-1}$  가 1 줄어드는 것과 같다. 없어진 확률은 다음 BPC 로 uniform 하게 분산됨을 볼 수 있다. 일반적으로 다음 BPC 의 CW 크기는 현재 BPC 의 CW 크기보다 2 배 크므로 분산되어 다음 BPC 로 들어가 늘어난  $\tau$  의 값보다 현재 BPC 에서 행 없어짐으로 줄어드는 의 크기가 더

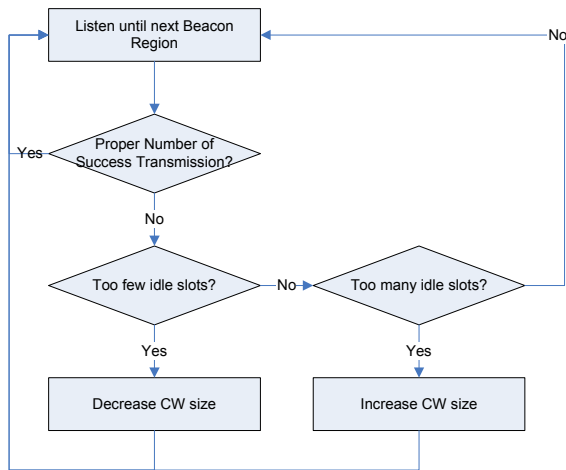


그림 2. 적응적 CW 조절 방식의 순서도

표 2. 수리분석 및 모의실험에 사용된 HPAV system parameter

평균 payload 크기 ( $E[N_{payload}]$ )	46280 bytes
PHY + MAC Header 시간	110.48 usec
PHY 전송 속도	150.19 Mbps
Beacon Period	33.33 msec
CIFS_AV	100 usec
RIFS_AV	30.72 usec
PRS0	35.84 usec
PRS1	35.84 usec
$\sigma$	35.84 usec
Response Timeout	140.48 usec

큰 것을 직관적으로 알 수 있다. 결과적으로 DC 를 감소시키면  $\tau$  가 감소하게 된다.

둘째로 에 변화에 따른 수율의 변화를 살펴보자. 수율은 현재  $\tau$  가 위치한 곳에 따라서  $\tau$  를 증가시킴으로써 증가를 야기할 수도 있고 감소를 야기할 수도 있다.

최적의  $\tau$  와 CW 를 구하기 위해서는 현재 network 에서 경쟁에 참여하고 있는 node 의 수(n)를 정확히 알아야 한다. 그러나 실제 상황에서 모든 node 가 그 수를 정확히 알고 있다는 것은 그다지 현실적인 가정이 아니다. 따라서 본 논문에서는 HPAV network 에 있는 모든 node 들이 최적의 CW 를 찾아가는 heuristic 알고리즘을 제안한다. CCo 의 역할 중 하나는 주기적으로 Beacon 을 발송하는 것이다. 이 Beacon 에 최적의 CW 값을 신는다. 또한 CCo 가 모든 node 의 전송을 들을 수 있다고 가정한다면 CCo 는 매 Beacon Period 에 이번 CSMA/CA Period 에서 몇 번의 성공적인 전송이 있었고 몇 번의 빈 slot 이 있었으며 몇 번의 충돌이 있었는지를 알 수 있다. 이와 같은 정보로부터 CCo 는 현재 CW 값이 적절한 지 여부를 파악할 수 있고 만약 적절하지 않다면 CW 값을 늘릴 것인지 줄일 것인지 빈 slot 과 충돌의 수로부터 찾을 수 있다. CCo 는 다음 Beacon Period 적합한 CW 값을 결정한 후 이번 Period 의 Beacon 에 그 값을 담아 broadcast 하고 HPAV network 에 있는 모든 node 들은 해당 값으로 CW 값을 조정한다. 그림 2 은 제안한 적응적 CW 조절 방식의 순서도이다. 'Proper number of success transmission'의 기준값은 10 으로 설정하였고 'too few idle slots'은 40 'too many idle slot'은 80 으로 설정하였다.

#### IV. 수리분석 및 모의실험 결과

본 장에서는 여러 수리분석 및 모의실험에 대한 결과를 기술할 것이다. 수리분석에는 앞 장에서 기술한 수식으로

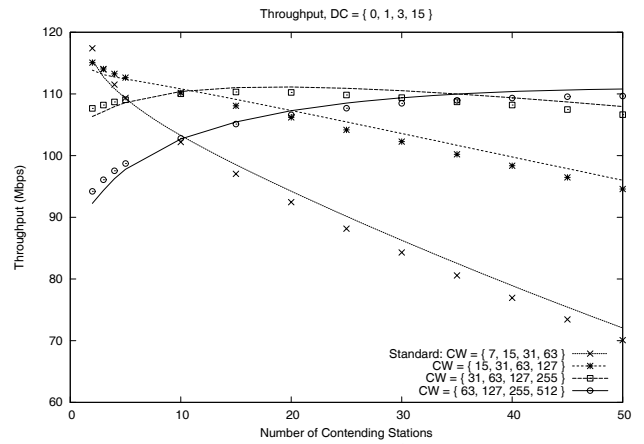


그림 3. CW 에 따른 수율 그래프

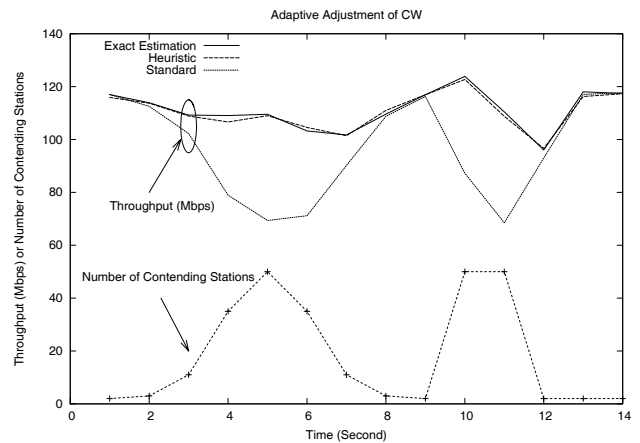


그림 4. 적응적 CW 조절 방식과 HPAV 표준 방식의 수율 비교

결과를 도출하였으며 모의실험은 C++로 작성한 event-driven 프로그램을 사용하였다. 표 2 에 있는 매개변수 들을 분석과 모의실험에 사용하였다. 모든 데이터는 같은 우선순위를 가진다고 가정하였다.

##### A. CW 변화에 따른 수율

그림 3 은 CW 값 변화에 따른 수율을 도시한다. 여기서는 모의 실험에 대한 결과와 수리분석에 대한 결과 모두 도시되어 있는데 두 결과의 차이가 별로 없음을 확인할 수 있다. 앞에서 언급한 것과 같이 최적의 CW 는 경쟁 node 의 수가 늘어남에 따라 수율이 현격히 줄어듦을 확인할 수 있었다. 위 4 가지의 CW 값을 변화시키면 1-50 사이의 어느 경쟁 상황에서도 약 110 Mbps 수율 이상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

##### B. 적응적 CW 조절 방식

그림 4 는 III-C 에서 제안한 heuristic algorithm 의 성능을 보여준다. ideal throughput 은 모든 node 들 네트워크에 active 한 node 수를 알고 있다는 가정하에 최적의 CW 값을 사용한 결과이고 heuristic throughput 은 3-C 에서 제안한 알고리즘으로 동작시켰을 때 얻은 수율이다. 위 두 수율의 단위는 Mbps 이다. Number of contending nodes 는 해당 시간에 active 한 node 의 수를 나타낸다. 이 실험에서는 node 의 수를 2 개에서 50 개까지 변화시키며 실험해 보았다. 전반적인 결과로 heuristic 알고리즘이 최적의 알고리즘과 별 차이가 없고 적응적 CW 조절 방식을 사용하지 않은 경우는 과부하에서 성능이 현격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

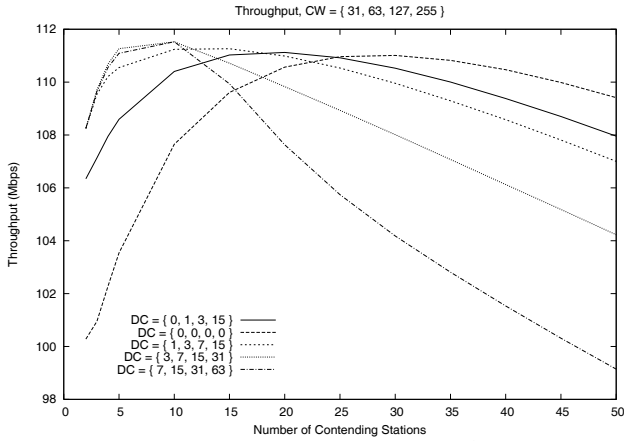


그림 5. 다양한 DC 값에 따른 수율 그래프

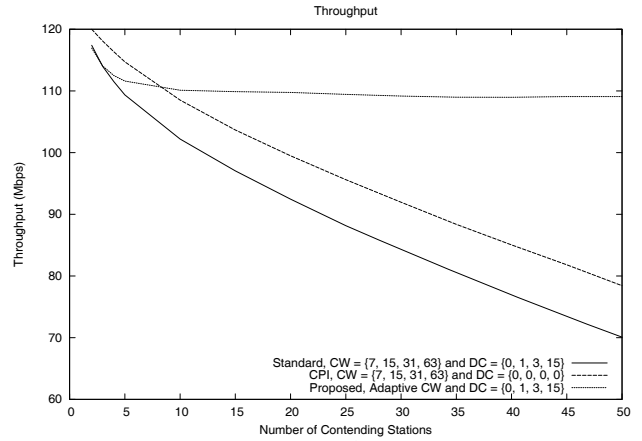


그림 6. 수율 비교

### C. DC 변화에 따른 수율

그림 5은 CW = {31, 63, 127, 255}로 고정하고 DC 값들을 변화시키며 측정한 수율 그래프이다. 실선이 기본 DC 값이며 그 그래프를 기준으로 maximum value 가 오른쪽에 있는 것이 DC 를 감소시킨 것이며 왼쪽에 있는 것이 DC 를 증가 시킨 것이다. DC = {3, 7, 15, 31}과 DC = {7, 15, 31, 63}의 경우 매우 낮은 경쟁 하에서 같은 수율을 보이는 것은 매우 낮은 경쟁 하에서는 DC 에 대한 영향 보다는 CW 에 대한 영향이 훨씬 커서 빈 slot 의 수가 수율을 좌우하기 때문이다.

### D. 다른 방식들과의 비교 분석

Campista 등은 [3]에서 HomePlug CSMA/CA 수율 향상 방식을 제안하였다. 제안하는 방식은 DC = {0, 0, 0, 0}으로 설정하는 것이고 이를 Contention window Proactive Increase (CPI)라고 명명하였다. CPI 는 backoff 를 자주하여 충돌을 방지하는 방식이다. 그림 6 에서 본 논문에서 제안하는 방식과 CPI 그리고 표준 방식의 수율을 비교하였다. CPI 가 낮은 경쟁 상황 (n 이 8 이하인 상황)에서 최고의 성능을 보이지만 CPI 는 표준의 수율 감소 형태를 그대로 재연한다. 본 논문에서 제안하는 방식은 경쟁 상황에 상관 없이 항상 좋은 수율을 보인다.

그림 7 에서는 공평성을 비교하였다. 공평성은 Jain 의 fairness index[7]를 가지고 평가하였다. Fairness index 는 아래 수식으로 얻을 수 있다.

$$\frac{E[X]^2}{E[X^2]} \quad (3)$$

1 이 가장 공평한 자원할당이고 1/n 이 가장 불공평한 자원할당이다. 본 논문에서 제안한 방식은 CPI 에 비해 공평성을 5 %정도 향상시켰다. CPI 는 표준보다 공평성이 낮아 공평성을 손해로 수율을 올리는 반면 본 논문에서 제안하는 방식은 전반적으로 수율과 공평성 모두에서 향상을 가져온다.

## V. 결론

본 논문에서는 HPAV 네트워크에서 contending node 에 수에 관계없이 고속의 수율을 얻을 수 있는 기법을 제안하였다. 위 제안은 수리 분석 및 모의 실험을 통해 검증하였다. 본 논문에서의 제안은 기존의 기법들과는 달리 공평성의 희생 없이 수율을 향상시켰으며 CSMA/CA 에서 사용할 수 있는 현실적인 가정으로 실제 구동 중에도 잘 돌아갈 수 있는 heuristic 알고리즘까지 제안하였다. 마지막으로 이

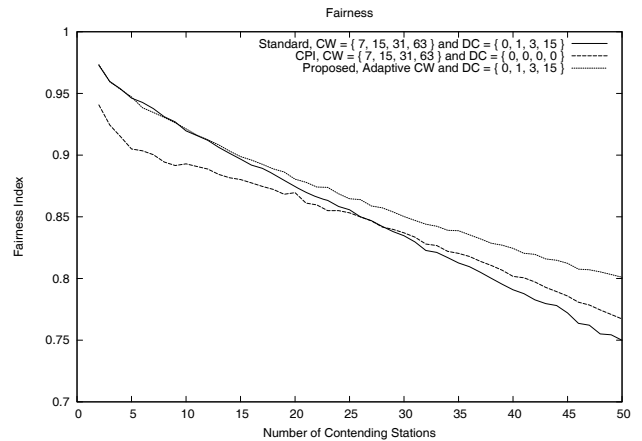


그림 7. 공평성 비교

논문에서는 HPAV 의 독특한 매개 변수인 DC 값에 대한 수율 변화와 공평성의 변화를 고찰하였다.

## 참고문헌

- [1] HomePlug AV Specification, HomePlug Powerline Alliance, Dec. 2005.
- [2] Min Young Chung, Myoung-Hee Jung, Tae-Jin Lee, and Yutae Lee, "Performance Analysis of HomePlug 1.0 MAC with CSMA/CA," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 24, no. 7, pp. 1411-1420, Jul. 2006.
- [3] Miguel Elias M. Campista, Lu'is Henrique M. K. Costa, and Otto Carlos M. B. Duarte, "Improving the Data Transmission Throughput over the Home Electrical Wiring," in Proc. LCN 2005, Sydney, Australia, Nov. 2005, pp. 318-325.
- [4] Miguel Elias M. Campista, Lu'is Henrique M. K. Costa, and Otto Carlos M. B. Duarte, "Improving the Multiple Access Method of CSMA/CA Home Networks," in Proc. CCNC 2006, Las Vegas, Nevada, USA, Jan. 2006, pp. 645-649.
- [5] K. Tripathi, J.-D. Lee, H. Latchman, J. McNair and S. Katar, "Contention Window based Parameter Selection to Improve Powerline MAC Efficiency for Large Number of Users," in Proc. ISPLC, Orlando, Florida, USA, Mar. 2006, pp. 189-193.
- [6] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Mar. 2000.
- [7] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Systems," DEC TR-301, Littleton, MA, 1984.