

# 밀리미터파 대역에서 지향성 CSMA/CA의 성능 향상을 위한 알고리즘

정회원 김 미 정<sup>\*o</sup>, 이 우 용<sup>\*\*</sup>

## Performance Enhancement Directional CSMA/CA Algorithm in mmWave Bands

Meejoung Kim <sup>\*o</sup>, Wooyong Lee <sup>\*\*</sup> *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 밀리미터파 대역을 사용하는 개인영역 무선통신 네트워크 표준의 하나인 IEEE 802.15.3c에서 지향성 CSMA/CA의 성능을 향상시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 saturation 환경에서 No-ACK 모드를 고려하여 마코프 체인으로 모델링하여 분석하였다. 마코프 체인 모델에서는 공간을 재활용하는 지향성 안테나의 특성과 IEEE 802.15.3c의 특성이 고려되었다. 분석실험을 통하여 경쟁윈도우 크기의 최적값을 얻었다. 제안한 성능향상 지향성 CSMA/CA 알고리즘이 기존의 지향성 CSMA/CA에 비해 훨씬 좋은 성능을 보여주는 결과를 얻었으며 이는 시뮬레이션으로 검증되었다. 얻은 결과는 밀리미터파 대역 개인영역 무선통신 네트워크의 성능을 향상시키는 모수의 선택과 MAC 프로토콜의 개발에 지침을 제공할 것으로 보인다.

**Key Words** : Millimeter Wave, Directional CSMA/CA, Optimal Contention Window, Markov chain, WPANs

### ABSTRACT

In this paper, an algorithm that enhances the conventional directional CSMA/CA protocol in IEEE 802.15.3c is proposed under saturation environments. For the algorithm, a Markov chain model is presented and analyzed in no-ACK mode. The effects of directional antennas and the features of IEEE 802.15.3c MAC are considered in the model. The optimal sizes of contention window are derived from the numerical results. The numerical results show that the proposed directional CSMA/CA algorithm outperforms conventional one. The overall analysis is verified by simulation. The obtained results provide the criterion for selecting the optimal parameters and developing a MAC protocol that enhances the performance of mmWave WPANs.

### I. 서 론

최근 밀리미터파 대역이라 불리는 30-300 GHz 대역에서 높은 전송률을 제공하는 근거리 무선전송에 대한 관심이 높아지고 있다. Federal Communications Commission(FCC)는 57-64 GHz 밀리미터파 대역을 누구나 사용 가능한 대역으로 할당하였다. 밀리미터파

개인영역 무선통신과 관련된 표준으로는 IEEE 802.15.3c와 ECMA-387이 있으며 현재 IEEE 802.11ad의 표준화가 진행 중이다.

밀리미터파 대역의 높은 주파수와 같은 고유한 특성은 수 기가급의 높은 전송률을 요구하는 무선 어플리케이션을 지원할 수 있다는 장점과 함께 다른 주파수 대역에 비해 심각하게 짧은 전파도달거리를 갖는

※ 본 연구는 지식경제부 IT 연구개발사업인 "비/저활용 대역 소출력 무선기기용 전송기술 개발" 및 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (No. 2011-0026694).

\* 고려대학교 공과대학 정보통신기술연구소(meejkim@korea.ac.kr) (°: 교신저자), \*\* 한국전자통신연구원(wylee@etri.re.kr), 논문번호: KICS2011-09-430, 접수일자: 2011년 9월 30일, 최종논문접수일자: 2011년 11월 2일

다는 단점이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 지향성 안테나의 사용이 고려되고 있다. 지향성 안테나는 전송 방향을 한곳에 집중함으로써 더 긴 전송거리를 확보할 수 있고, 좁은 안테나 빔은 자원을 공간적으로 재사용할 수 있게 한다.

지향성 안테나의 사용에 관한 연구로는 자원할당 알고리즘에 관한 연구<sup>[1]</sup>, mmWave WPANs에서의 연구<sup>[2-3]</sup>가 있으며, CSMA/CA 프로토콜에 관한 연구로는 IEEE802.11<sup>[4]</sup>, 802.15.4<sup>[5]</sup>, 802.15.3<sup>[6]</sup>, 그리고 802.15.3c<sup>[7]</sup>에 기반한 연구들이 있다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.3c에 기반한 개인영역 무선통신 네트워크(Wireless Personal Area Networks: WPANs)에서 기존의 지향성 CSMA/CA(Conventional Directional CSMA/CA: CD-CSMA)에 비해 자원을 효율적으로 사용함으로써 성능을 향상시킬 수 있는 알고리즘을 제안하고 마코프 체인으로 모델링하여 분석한다. 알고리즘을 적용하는 과정에서 최적의 경쟁윈도우(Contention Window: CW)의 크기를 결정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델을 설명한다. III장에서는 saturation 환경에서 성능향상 지향성 CSMA/CA(Enhanced Directional CSMA/CA: ED-CSMA) 알고리즘을 제안하고 이를 분석한다. IV장에서는 수율과 평균전송지연을 구체적으로 표현하고 실험결과는 V장에서 보여준다. 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

802.15.3c WPAN의 기본 토폴로지는 피코넷이다. 피코넷은 piconet coordinator(PNC)와 PNC의 전송 범위내의 여러 slave 장치(DEV)들로 구성되어 있으며 어떤 장치도 PNC의 역할을 할 수 있다. PNC는 이웃 장치 탐지과정을 통하여 피코넷의 정보를 수집하고 그를 기반으로 각 장치에게 통신을 할 수 있도록 채널을 할당하고 트래픽 로드를 제어하는 역할을 한다.

안테나 모델로는 flat-top model과 cone plus sphere model이 있다. 본 논문에서는 2차원에서의 cone plus circle model을 고려한다. 이 경우 메인로브와 사이드로브에서의 안테나 이득(gain)은 각각  $G_m = 2\pi\eta/\theta$ 와  $G_s = 2\pi(1-\eta)/(2\pi-\theta)$ 이다.  $\eta$ 와  $\theta$ 는 각각 안테나의 방사효율도와 메인로브의 안테나 각이다. 여기서는 IEEE 802.15.3c 표준에 나타난 경로손실모델을 사용한다. 경로손실모델에 관한 자세한 설명은 [7]에 잘 나타나있으므로 여기서는 생략한다.

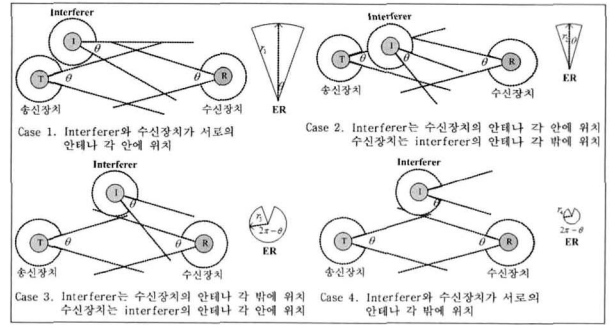


그림 1. 장치들의 위치에 따른 4가지 ER 반경  
Fig. 1. Four different ER radii for directional antenna pairs

## III. 알고리즘 제안 및 분석

### 3.1 감지영역과 배타영역

한 장치가 CSMA/CA 수행 시에 지향성 안테나를 사용할 때 이를 지향성 CSMA/CA (Directional CSMA/CA: D-CSMA)라 하자. D-CSMA/CA 과정에서 한 송신장치는 자신의 백오프 카운터를 줄이기 위해서 다른 송신장치들의 전송을 감지해야 한다. 한 송신장치가 다른 송신 장치의 송신을 감지하는 영역을 감지영역(Sensing Region: SR)이라 하자. 성공적인 전송을 위해서 한 송수신장치 쌍은 간섭을 받지 않아야 한다. 이러한 관점에서 [2]에서 다음과 같은 배타영역(Exclusive Region: ER)의 개념이 도입되었다. 한 송수신장치 쌍으로 구성된 한 플로우는 수신장치 주변에 배타영역을 형성한다. 그 플로우의 전송 성공을 위해서 동시에 전송하는 다른 플로우들의 송신장치는 모두 그 플로우의 수신장치의 배타영역 밖에 존재해야 한다.  $SR_t$ 과  $ER_r$ 을 각각 송신장치의 감지영역과 수신장치의 배타영역이라 하자. 그림 1은 수신장치와 간섭을 일으킬 수 있는 송신장치의 안테나 방향에 따른 배타영역의 형태와 반경을 도시하고 있다.

모든 송수신 쌍은 이웃장치 탐지과정과 빔포밍에 의해 서로 안테나 빔이 맞추어져 있다고 하자. 본 논문에서는 감지와 간섭을 일으키는 신호 세기가 같다고 가정한다. 모든 장치의 메인로브 이득  $G_{TM}$  사이드로브 이득  $G_{TS}$  그리고 송신전력  $P_T$ 가 같다고 가정하면,  $ER_r(SR_t)$ 의 반경은 다음과 같이 계산된다. (단위: m)

$$r_1 = \left\{ \frac{\kappa G_{TM} G_P P_T}{N_0 W} \right\}^{1/\alpha}, r_2 = \left\{ \frac{\kappa G_{TM} G_{RS} P_T}{N_0 W} \right\}^{1/\alpha},$$

$$r_3 = \left\{ \frac{\kappa G_{TS} G_P P_T}{N_0 W} \right\}^{1/\alpha}, r_4 = \left\{ \frac{\kappa G_{TM} G_{RS} P_T}{N_0 W} \right\}^{1/\alpha}. \tag{1}$$

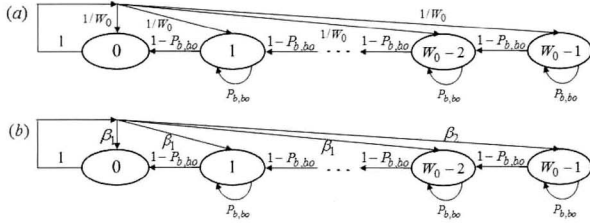


그림 2. 제안하는 알고리즘의 마코프 체인 모델  
Fig. 2. Markov chain model for the proposed algorithm

한 피코넷을  $L \times L$  크기의 방이라 하고  $2N$ 개의 장치들은 이 피코넷에 랜덤하게 분포되어 있다고 하자. 그러면 두 장치 간의 거리에 대한 확률밀도함수  $f(x)$ 는 다음과 같이 주어진다<sup>[8]</sup>.

$$f(x) = \begin{cases} 2 \frac{x}{L} \left( \frac{x^2}{L} - 4 \frac{x}{L} + \pi \right) \frac{1}{L} & \text{if } 0 \leq x \leq L \\ 2 \frac{x}{L} \left[ 4 \sqrt{\frac{x^2}{L^2} - 1} - \left( \frac{x^2}{L^2} + 2 - \pi \right) \right] \frac{1}{L} & \\ -4 \tan^{-1} \sqrt{\frac{x^2}{L^2} - 1} & \text{if } L < x \leq \sqrt{2} L \end{cases} \quad (2)$$

그림 1에 도시된 반경  $r_i$ 은 피코넷의 최대거리보다 클 수 있으므로  $r_{i,tx} = \min(r_i, \sqrt{2}L)$ 라 하자.  $SR_t$ 의 피코넷에 대한 비율  $P_{SR_t}$ 은 식 (3)에 나타나 있다.

$K_{SR_t}^N, K_{ER_r}^N, E_{con}$ 을 각각 피코넷 안에  $N$ 개의 플로우가 있을 때 한 송신장치의 백오프 카운터에 영향을 주는 송신장치의 수, 수신장치에 간섭을 일으키는 송신장치의 수, 한 송신장치 쌍의 통신에 영향을 미칠 수 있는 장치의 평균 수라 하면 이들은

$$E(K_{SR_t}^N) = E(K_{ER_r}^N) = (N-1)P_{SR_t}, \quad (4)$$

$$E_{con} = E(K_{SR_t}^N) + E(K_{ER_r}^N) - E(K_{SR_t \cap ER_r}^N) \quad (5)$$

이다. 여기서  $E(K_{SR_t \cap ER_r}^N)$ 은  $SR_t$ 과  $ER_r$ 의 공통영역에 위치한 평균 송신장치의 수로서  $(N-1)P_{SR_t \cap ER_r}$ 이며  $P_{SR_t \cap ER_r} = P_{SR_t}P_{ER_r}$ 이다.

### 3.2 성능 향상 지향성 CSMA/CA 알고리즘

알고리즘의 목적은 IEEE 802.15.3c 슈퍼프레임의 경쟁구간에서 자원을 효율적으로 사용하여 수율을 최대화하고 전송지연을 최소화하는 각각의 CW를 찾는 것이다. 한 장치에서 시스템을 바쁜 기간과 한기한 타임슬롯의 끝에서 관찰함으로써 임베디드 마코프체인 모델을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 No-ACK 모드만을 고려하였고 알고리즘에 쓰이는 마코프체인은 그림 2에 도시되어 있다. 제안하는 알고리즘의 기본 아이디어는 다음과 같다: 1) 계산된  $E_{con}$ 에 따라  $W_0$ 를 결정한다. 만일 그 값이 802.15.3c에서의  $W_0$ 의 디폴트 값인 8보다 작으면  $W_0$ 를  $E_{con}$ 으로 설정하고 그렇지 않으면 디폴트인 8로 설정한다. 2) 설정된  $W_0$ 가 디폴트 값보다 작은 경우와 디폴트로 설정된 경우에 대하여 각각 그림 2 (a)-(b)를 적용한다. 3) (a)가 적용되는 경우는  $0, \dots, W_0 - 1$  중 백오프 카운터를 선택하는 확률을 모두 같게 설정하고 (b)가 적용되는 경우는 충돌이 확률적으로 마지막 상태인  $W_0 - 1$ 에서만 일어날 수 있도록 백오프 카운터를 선택하는 확률을 결정하는 것이다. 4) 수율의 최대화나 지연의 최소화 등 목적에 맞는 최적의 CW값을 찾아낸다.

제안하는 알고리즘과 CD-CSMA의 차이점은 다음과 같다. CD-CSMA/CA에서  $W_0$ 는 디폴트 8로 고정되어 있고 송신장치는 매 전송 때마다  $[0, W_0 - 1]$ 에서 동일한 확률로 CW를 선택한다. 반면, 제안하는 알고리즘에서는  $W_0$ 를 주어진 디폴트와  $E_{con}$ 을 고려하여 결정하고 전송 전에 불필요하게 기다리는 시간은 최소화하면서 최대 CW는 디폴트를 넘지 않도록 결정

$$P_{SR_t} = \left[ \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \int_0^{r_{1,tx}} f(x) dx + \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \int_0^{r_{4,tx}} f(x) dx + \left( \frac{\theta}{2\pi} \right) \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right) \sum_{i=2}^3 \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx \right] - \left[ \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^3 \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right) \left\{ \prod_{i=1,2} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx + \prod_{i=1,3} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx \right\} + \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left\{ \prod_{i=1,4} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx + \prod_{i=2,3} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx \right\} \right] + \left[ \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left\{ \prod_{i=2,4} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx + \prod_{i=3,4} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx \right\} \right] + \left[ \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^4 \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \prod_{i=1,2,3} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx + \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^3 \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^3 \left\{ \prod_{i=1,2,4} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx + \prod_{i=1,3,4} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx \right\} \right] + \left[ \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^4 \prod_{i=2,3,4} \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx \right] - \left[ \left( \frac{\theta}{2\pi} \right)^4 \left( 1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^4 \prod_{i=1}^4 \int_0^{r_{i,tx}} f(x) dx \right] \quad (3)$$

하였다. 또한  $E_{con}$ 이 디폴트보다 큰 경우 충돌 및 지연을 최소화하도록 백오프 카운터를 선택하는 확률을 결정하였다.

### 3.3 마코프 체인 분석

1차원 이산시간 마코프 체인 모델의 상태  $b(t)$ 는 시간  $t$ 에서 한 장치의 큐에 있는 헤드 프레임에 대한 백오프 카운터 값으로 상태 공간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega = \{(b(t)) | 0 \leq b(t) \leq W_0 - 1, b(t) \text{는 정수}\}. \quad (6)$$

$T_{slot}$ 을  $pBackoffSlot$ 로 주어진 한 단위의 백오프 슬롯(backoff slot)이라 하자. 기호의 단순화를 위하여 천이확률  $P(b(t+T) = i_1 | b(t) = i_0)$  대신  $P(i_1 | i_0)$ 을 사용한다. 여기서  $T$ 는  $T_{slot}$ 나 또는 바쁜 구간의 지속 시간이며 천이확률은 다음과 같다.

$$P(i-1|i) = 1 - P_{b,bo}, P(i|i) = P_{b,bo}, i = 1, \dots, W_0 - 1, \\ P(i|0) = \begin{cases} 1/W_0, & i = 0, \dots, W_0 - 1, \text{ 그림 3(a)} \\ \beta_1, & i = 0, \dots, W_0 - 2, \\ \beta_2, & i = W_0 - 1 \end{cases} \quad (7)$$

여기서  $P_{b,bo}$ 는 백오프 상태에 있는 한 장치가 채널을 감지했을 때 채널이 바쁜 확률이고  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 는  $\beta_1 = 1/E_{con}$ ,  $\beta_2 = 1 - (W_0 - 1)/E_{con}$  로서  $(W_0 - 1)\beta_1 + \beta_2 = 1, \beta_1 \leq \beta_2$ 를 만족한다.  $\Omega$ 에 속한 상태는 안정상태확률  $\{b_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P(b(t) = i) : i \in [0, W_0 - 1]\}$ 이 존재한다. 안정상태확률 벡터  $b = (b_0, b_1, \dots, b_{W_0-1})$ 는 다음을 만족한다.

$$bP = b, \sum_{i=0}^{W_0-1} b_i = 1. \quad (8)$$

여기서  $P$ 는  $\Omega$ 를 사전식으로 나열했을 때의 상태 천이확률이다. 식 (8)를 풀면 그림 2(a)-(b)에 대하여 각각 다음과 같은  $\{b_i\}_{i=0}^{W_0-1}$ 을 얻는다.

$$\text{그림 2(a): } b_0 = \frac{2(1 - P_{b,bo})}{2(1 - P_{b,bo}) + W_0 - 1}, \\ b_i = \frac{W_0 - i}{W_0 \{(1 - P_{b,bo}) + (W_0 - 1)\}}.$$

그림 2(b):

$$b_0 = \frac{2(1 - P_{b,bo})}{2(1 - P_{b,bo}) + (W_0 - 1)\{\beta_1(W_0 - 2) + 2\beta_2\}},$$

$$b_i = \frac{2\{(W_0 - i - 1)\beta_1 + \beta_2\}}{2(1 - P_{b,bo}) + (W_0 - 1)\{\beta_1(W_0 - 2) + 2\beta_2\}}.$$

### 3.4 동시전송하는 장치들의 상호작용

한 쌍의 송수신장치가 통신하려는데 채널이 바쁘다고 느끼면, 송신장치 관점에서는 백오프 카운터를 줄이는 것이 보류되는 반면, 수신장치 관점에서는 그 interferer가 송신 장치의 감지영역에 없으면 그 송신 장치는 백오프 카운터를 줄일 수 있다. 송신장치의 백오프 카운터가 0인 경우 송신장치는 전송을 시작하기 전에 하나의 한가한 BIFS를 기다려야 하므로 두 바쁜 기간 사이에는 한가한 타임슬롯이 존재한다.  $P_b$ 와  $\tau$ 를 각각 관찰시점에서 채널이 바쁜 확률과 장치가 전송하는 상태일 확률이라 하자. 송신장치는 바로 전 타임슬롯이 한가한 경우에만 조건부 확률  $p_{tx}$ 로 전송하며  $p_{tx} = \tau / (1 - P_b)$ 이다.  $E(B)$ 와  $E(I)$ 를 각각 연속적인 바쁜 기간과 연속적인 한가한 타임슬롯 수라 하고,  $p_c$ 를 송신 장치가 전송할 때 한 타임슬롯에서 충돌이 일어날 확률이라 하면,  $E(B) = 1$ 이고  $p_c, E(I), P_b$ 는 다음과 같다.

$$p_c = 1 - (1 - p_{tx})^{E_{con}}, \\ E(I) = \frac{1}{1 - (1 - p_c)^{\{E(K_{SR_i}^N) + 1\} / E(K_{SR_i}^N)}}, \quad (9)$$

$$P_b = \frac{1 - (1 - p_c)^{\{E(K_{SR_i}^N) + 1\} / E(K_{SR_i}^N)}}{2 - (1 - p_c)^{\{E(K_{SR_i}^N) + 1\} / E(K_{SR_i}^N)}}. \quad (10)$$

## IV. 성능 분석

### 4.1 수율

본 연구에서는 실제로 성공적으로 전송된 프레임에 의한 시스템 수율  $Th_{sys}$ 을 고려한다.

$\Psi_1$ 와  $\Psi$ 를 각각 한 송신장치에 영향을 미치는 다른 송신장치가 전송할 때 그 송신장치의 전송성공확률과 그 송신장치를 포함하고 있는 그룹에 영향을 미치는 다른 송신장치가 전송할 때 그 그룹의 전송성공확률이라 하자. 그러면 이들은 다음과 같이 계산된다.

$$\Psi_1 = \frac{\left[ p_{tx} (1 - p_{tx})^{E_{con}} \cdot \left\{ (1 - p_{tx})^{E(K_{SR_i}^N) - E(K_{SR_i}^N \cap ER)} \right\} \left[ E(T_{pfslot}) / T_{slot} - 1 \right] \right]}{1 - (1 - p_{tx})^{E_{con} + 1}}, \\ \Psi = \{E(K_{SR_i}^N) + 1\} \Psi_1. \quad (11)$$

$P_{asuc}$ 와  $P_{acol}$ 를 각각  $E(K_{SR_i}^N)+1$ 개 송신장치의 전송성공확률 및 충돌확률이라 하면, 이들과 시스템 수율은 다음과 같다.

$$P_{asuc} = \Psi P_b, P_{acol} = (1-\Psi)P_b,$$

$$Th_{sys} = \frac{N}{E(K_{SR_i}^N)+1} \cdot \frac{P_{asuc}E(P)}{(1-P_b)T_{slot} + P_bE(T_{suc})}. \quad (12)$$

여기서  $E(P)$ 는  $E(T_{payload}) = T_{headers} + E(T_{data})$  시간동안 전송되는 평균 데이터량이다.

### 4.2 평균지연

여기서의 평균지연은 처리지연만을 고려한다. 처리지연은 프레임이 큐의 헤드에 있는 순간부터 전송이 완료된 시간까지로 정의한다.

$w(i)$ 와  $E(i)$ 를 각각 전송 전에 백오프 스테이지에서 기다린 타임슬롯 수 및 백오프 스테이지에서  $i$ 상태에 있는 송신장치가 전송을 완료할 때까지 걸린 평균시간이라 하면 다음과 같다.

$$w(0) = 1 + \chi_{\{\text{PNC uses BIFS}\}} + P_b E(K_{SR_i}^N) \{ \chi_{\{\text{PNC uses BIFS}\}} + 1 + l \},$$

$$w(i) = w(i-1) + 1 + P_b E(K_{SR_i}^N) \cdot \{ \chi_{\{\text{PNC uses BIFS}\}} + 1 + l \}, i = 0, \dots, W_0 - 1,$$

$$E(i) = \{w(i) + l\} \cdot T_{slot}, i = 0, \dots, W_0 - 1. \quad (13)$$

여기서  $\chi_A$ 는  $A$ 가 참이면 1 거짓이면 0인 함수이고,  $l$ 은  $pBackoffSlot$ 로 표현되는 데이터량이다. 그러면 평균 지연은 다음과 같다.

$$E(D) = \frac{1}{W_0} \sum_{i=0}^{W_0-1} E(i). \quad (14)$$

## V. 실험 결과

분석실험과 시뮬레이션은 매텔랩 7.7을 이용하였으며 시뮬레이션은 100번 수행하였다. 실험에 사용한 파라미터 값들은 IEEE 802.15.3c 표준에 기반한 것으로 다음과 같다:  $T_{SF_{max}} = 65535$ ,  $T_{CAP} = 6553$ ,  $pPHYSIFS_{Time} = 2.5$ ,  $pCCADect_{Time} = 4$ ,  $T_{beacon} = 50$ ,  $T_{slot} = BIFS = 6.5$ (단위:  $\mu\text{sec}$ ),  $\alpha = 2$ ,  $P_T = 10 \text{ mW}$ ,  $N_0 = -91.9 \text{ dB}$ ,  $W = 1728 \text{ MHz}$ ,  $P_R = -55 \text{ dB}$ , 데이터 전송률은  $1.65 \text{ Gbps}$ ,  $L$ 은 경로손실 모델을 이용하여 계

산된 전송거리를 사용하였으며  $\eta = 0.9$ 와  $1$ 을 사용하였다.  $l$ 은 두 개의 타임슬롯을 사용하였으며, 이는  $21.24 \cdot 10^3 \text{ bit}$ 에 해당한다. 다음 그림들에서는 ED-CSMA/CA와 CD-CSMA/CA을 비교하였다. 그림들에 나타난 바와 같이 모든 성능측도에서 ED-CSMA/CA이 CD-CSMA/CA보다 나음을 알 수 있다.

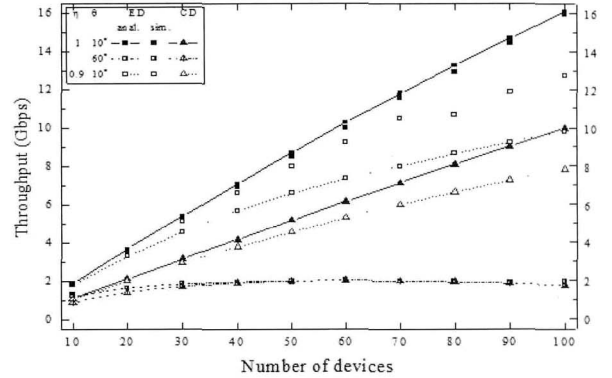


그림 3. 수율 비교  
Fig. 3. Comparison of throughputs

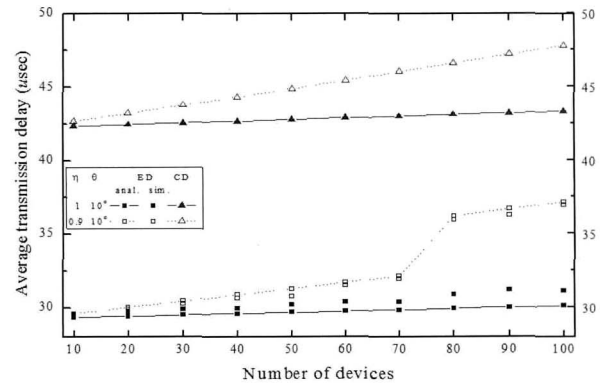


그림 4. 평균지연 비교  
Fig. 4. Comparison of average transmission delay

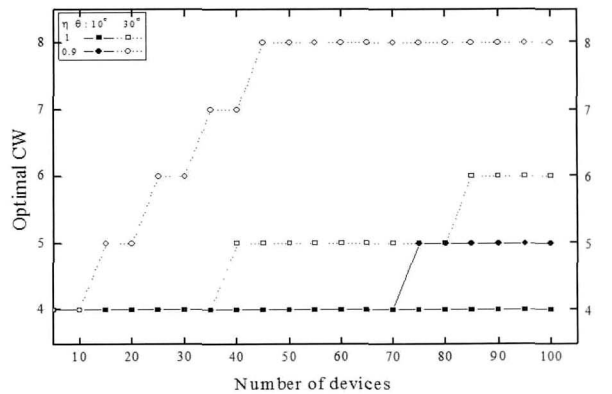


그림 5. 경쟁윈도우의 최적값  
Fig. 5. The size of optimal contention window

그림 3은  $\theta$ 와  $\eta$ 에 따른 시스템 수율  $Th_{sys}$ 을 비교한 것이다. ED-와 CD-CSMA/CA 모두에서  $\theta$ 는 작아지고  $\eta$ 는 커질수록 수율은 증가함을 알 수 있다. 이는 더 작은 안테나 각에서 더 많은 공간재활용이 가능하고, 사이드로브의 영향이 작을수록 간섭이 작아짐에 기인한다. ED-와 CD-CSMA/CA의 차이는  $\theta$ 가 작아질수록 커짐을 알 수 있다. 즉, 작은  $\theta$ 에 대해서 ED-CSMA/CA가 더 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.  $\theta$ 가 커지면 한 플로우의 전송에 간섭을 일으키는 송신장치의 수가 증가할 것이며 많은 장치가 존재하는 경우는 그 수가 더욱 증가할 것이다. 그러므로 큰  $\theta$ 에서는 전송성공확률이 어느 정도의 장치의 수까지는 증가하겠으나 그 수 이후로는 감소할 것이다.

그림 4는  $\eta$ 에 따른  $E(D)$ 을 비교한 것이다.  $\eta$ 가 커질수록 지연은 작아짐을 볼 수 있다.

그림 5는  $\theta$ 와  $\eta$ 에 따른 CW의 최적값  $W_0$ 을 도시하고 있다. 수율이 최대화되기 위해서는 장치의 수와 안테나 각이 커질수록  $W_0$ 가 커지는 것을 알 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.3c에 기반하여 성능향상 지향성 CSMA/CA 알고리즘을 제안하였다. 마코프 체인 모델을 이용하여 알고리즘을 분석하였고 분석결과는 시뮬레이션으로 검증되었다. 추후 본 연구는 알고리즘을 non-saturation인 경우와 Imm-ACK모드로 확장할 것이며, 또한 장애물을 고려하는 등 좀 더 실제 상황에 알맞도록 일반화해 나갈 것이다.

## 참 고 문 헌

[1] L. X. Cai, L. Cai, and X. Shen, and J. W. Mark., "Resource Management and QoS Provisioning for IPTV over mmWave-based WPANs with Directional Antenna," *Mobile Network Application*, 14, pp. 210-219, 2009.

[2] L. X. Cai, L. Cai, and X. Shen, and J. W. Mark., "REX: a Randomized EXclusive Region based Scheduling Scheme for mmWave WPANs with Directional Antenna," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 9(1), pp. 113-121, 2010.

[3] Y. Kim, M. Kim, W. Lee, and C.-H. Kang, "Power Controlled Concurrent Transmissions in mmWave WPANs," *IEICE Trans.on Commun.*,

E93-B(10), pp. 2808-2811, Oct. 2010.

[4] L.-C. Wang, A. Chen, and S.-Y. Huang, "A Cross-Layer Investigation for the Throughput Performance of CSMA/CA-Based WLANs With Directional Antennas and Capture Effect," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, 56(5), pp. 2756-2766, Sept. 2009.

[5] M. Kim and C.-H. Kang, "Priority-Based Service-Differentiation Scheme for IEEE 802.15.4 Sensor Networks in Nonsaturation Environments," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, 59(27), pp. 3524- 3535, Sept. 2010.

[6] Z. Yin and V. C. M. Leung, "Adaptive Contention Access Suspension in IEEE 802.15.3 MAC," in *Proc. BROADNETS*, pp. 187-196, Sept. 2007.

[7] M. Kim, Y. Kim, and W. Lee, "Performance Analysis of Directional CSMA/CA for IEEE 802.15.3c under Saturation Environments," *ETRI Journal* 게재 예정.

[8] Math world. Square line picking. Available at <http://mathworld.wolfram.com/SquareLinePicking.html>, Jan. 2005.

김 미 정 (Meejoung Kim)

정회원



1986년 2월, 1988년 2월 고려대학교 수학과(학사, 석사)  
1993년12월 Univ. of Minnesota(석사, 박사수료)  
1996년 8월 고려대학교 수학과(박사)  
2004년 8월~현재 고려대학교 정보통신기술연구소 (교수)

<관심분야> 무선통신시스템, 무선네트워크보안

이 우 용 (Wooyong Lee)

정회원



1989년 2월 고려대학교 전자공학과(학사)  
1991년 2월 1997년 2월 KAIST 전자공학과(석사, 박사)  
1997년 3월~현재 한국전자통신연구원 책임연구원  
<관심분야> 무선통신시스템,

WPANs