

무선랜 상에서 공평성을 제공하는 EDCF 기법의 성능평가

최희원 최기현*, 이재경**, 신동렬*

Performance Analysis and Evaluation of EDCF Supporting Fairness in Wireless LANs

Kee-Hyun Choi*, Jae-Kyung Lee**, Dong-Ryeol Shin* *Regular Members*

요약

무선랜은 MAC 프로토콜과 스케줄링 알고리즘과 같은 다양한 기술을 이용하고 있으며 이런 기술 대부분은 주로 공평성과 서비스 차등화를 주로 다루고 있다. 그러나 대부분의 무선랜 시스템은 하나의 QoS 측면만을 고려하고 있기 때문에 이러한 기술을 동시에 제공하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 공평성과 차등서비스를 동시에 제공하기 위해서 Distributed Fair Scheduling(DFS)기법과 Enhanced Distributed Coordinated Function(EDCF) 기법을 이용하여 빠른 처리를 요구하는 트래픽의 처리뿐만 아니라 같은 우선순위를 갖는 트래픽의 공평성을 보장할 수 있는 F-EDCF를 제안하고 Markov 프로세스를 이용한 성능평가를 통하여 그 타당성을 검토한다. 성능평가에서 기존의 EDCF 방식보다 평균 전송량과 공평성뿐만 아니라 지연시간 또한 개선됨을 확인 할 수 있다.

Key Words : WLAN, QoS, EDCF, DFS, Fairness

ABSTRACT

Wireless LAN (WLAN) has greatly benefited from the introduction of various technologies, such as MAC protocol and scheduling algorithm. The majority of these technologies focus on fairness or service differentiation. However, it is difficult to use these technologies to provide many benefits to WLAN simultaneously because the current WLAN system only focuses on the provision of a single aspect of QoS. Unfortunately, multimedia applications require both service differentiation and fairness. Therefore, this paper combines Distributed Fair Scheduling (DFS) and Enhanced Distributed Coordinate Function (EDCF), to provide both fairness and service differentiation simultaneously. Furthermore, we show numerical analysis using Markov process. The simulation results demonstrate that F-EDCF outperforms the EDCF, in terms of throughput, fairness, and delay viewpoints.

I. 서론

무선랜 상에서 QoS를 지원하는 방법은 트래픽의 특성에 따른 우선순위를 두어 시간에 구애를 받는 트래픽일 경우 보다 빠른 처리를 해줌으로써 사용자에게 보다 높은 서비스를 제공해 주는 방법과 각

사용자가 보낼 수 있는 대역폭을 보장해주는 방법으로 구분 할 수 있다. 유선망에서 이미 그 효율성이 입증된 많은 알고리즘이 최근 무선망에서 연구가 진행 중이며 유사한 성능을 보이고 있다. 하지만, 대부분의 연구는 공평성이나 우선순위 중 하나에 목표를 두고 그 성능평가를 하기 때문에 최근에 등장한 유비쿼터스 환경에서 복합적 트래픽을 처리

※ 본 연구는 경기도의 경기도 지역협력연구센터 사업(2007-000-0410-003)과 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 추진되고 있는 지식경제부의 유비쿼터스 컴퓨팅 및 네트워크 원천 기반기술 개발사업의 과제(08B3-B1-10M)로 지원된 것임.

* 성균관대학교 정보통신 공학부({gyunee, drshin}@ece.skku.ac.kr), ** 충주대학교 정보제어공학부(jklee@cjnu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-02-100, 접수일자 : 2008년 2월 26일, 최종논문접수일자 : 2008년 7월 29일

하기에 역부족이다. 따라서 이러한 환경에서 효율적인 트래픽 관리를 위해서는 QoS 기법 또한 복합적인 기법을 제공해야만 한다. 본 논문에서는 EDCF (Enhanced Distributed Coordinate Function)^{[4][5][6]}와 공평성을 제공하는 DFS(Distributed Fair Scheduling)^[2]를 이용하여 우선순위 스케줄링뿐만 아니라 같은 우선순위를 갖는 트래픽에 대해서도 공평성을 제공함으로써 복합 환경에서 효율적인 트래픽 처리를 가능하게 하는 F-EDCF^[1]를 제안하고 그 성능평가를 보인다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 다루게 될 QoS 기법들에 대해서 알아보며, III장에서는 F-EDCF를 소개하고 모의실험 결과를 분석하며, IV장에서는 F-EDCF의 수학적인 모델링을 보이며, V장에서는 수학적인 모델링의 실험결과를 보인다. VI장은 본 논문의 결론이다.

II. 연구 배경

2.1 Distributed Fair Scheduling

DFS^[2]는 유선망에서 사용되는 SCFQ(Self Clock ed Fair Queuing)를 IEEE 802.11 MAC 스케줄링에 적용한 방식으로 백오프 간격을 흐름 별 가중치와 패킷의 길이를 이용하여 계산한다. 예를 들면, 가중치를 w_i 가지며 k 번째 패킷의 길이가 l_i^k 라고 할 때 다음의 수식들을 이용해서 백오프 간격을 구할 수 있다.

$$B_i = \left\lceil \text{ScalingFactor} * \frac{l_i^k}{w_i} \right\rceil \quad (1)$$

수식 1에서 구해진 백오프 값은 충돌이 발생할 확률이 크기 때문에 mean 값이 1인 랜덤 변수를 ρ 를 이용하여 다음과 같이 다시 계산된다.

$$B_i = \lceil \rho * B_i \rceil \quad (2)$$

ρ 값은 [0.9, 1.1] 사이의 균등분포(uniform distribution) 랜덤 변수이다. 일단 충돌이 발생하면 표준 IEEE 802.11 방식의 스케줄링 방식은 중단되고 DFS 방식의 백오프 스케줄링 방식이 적용된다. 공식 2를 이용해서 백오프를 계산할 경우 백오프 간격이 패킷의 크기에 따라서 그 값이 클 수 있다. 이럴 경우 오히려 전송하는데 필요 없는 지연시간을 유발하게 되어 성능이 감소된다. 이런 문제를 해결하

기 위해서 논문 [2]에서는 공식 2(선형사상)에서 나온 값을 이용해서 지수사상, 제곱근 사상 방식을 제공한다. 지수사상에서 Δ 값은 선형사상에서 계산된 백오프 간격이며, 이 값이 문턱 값을 넘을 경우 새로운 공식을 적용하게 된다. K_1 과 K_2 는 상수이며 공식에서 사용된 모든 변수 및 상수 값은 논문[2]에서 사용된 값을 사용한다.

Exponential mapping:

$$B_i = \gamma(\Delta) = \begin{cases} \Delta, & \text{if } \Delta < \text{Threshold} \\ \lceil \text{Threshold} + K_1 * (1 - e^{-K_2 * \Delta - \text{Threshold}}) \rceil, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

제곱근사상은 지수사상과 마찬가지로 계산된다. 지수사상과 제곱근사상은 선형사상에서 계산된 값을 압축시키는 효과를 제공한다. 여기서 문턱 값(threshold)은 80으로 계산한다.

Square root mapping:

$$B_i = \psi(\Delta) = \begin{cases} \Delta, & \text{if } \Delta < \text{Threshold} \\ \lceil \sqrt{\text{Threshold} * \Delta} \rceil, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 Enhanced Distributed Coordinate Function

EDCF는 트래픽 범주(TC: Traffic Categories)를 정의하고 이에 따라서 다양한 트래픽을 분류한다. 각 노드는 일반적으로 4개[10,11] 내지 8개[9]의 TC를 기본으로 해서 패킷을 처리하게 된다. 따라서 4개에서 8개에 해당하는 가상의 큐에서 각기 다른 경쟁 윈도우(contention window)를 가지게 된다. EDCF는 우선순위 별로 AIFS(Arbitrary interframe space), CW_{max}/CW_{min} 를 다르게 적용하여 백오프 간격을 계산하기 때문에 우선순위에 따른 차등서비스가 가능하다. 각 TC는 DCF 고유의 방식을 그대로 사용하지만, 각각의 TC는 채널을 점유할 확률이 위에 언급된 값들로 인해서 서로 다르게 된다. EDCF는 서비스 제공자에 따라서 어떤 조합도 허용하고 있다. 채널이 유희상태일 때 각 노드는 패킷을 전송하기 위해 각자의 AIFS를 기다린 후에 자신의 CW_{min} 의 크기에서 랜덤하게 선택된 수만큼의 슬롯 타임을 기다리며 랜덤하게 선택된 백오프 값이 0이 되었을 때도 채널이 유희 할 경우 전송기회를 얻게 된다. 랜덤하게 선택된 백오프 값이 0이 되었을 때 충돌이 발생할 경우 802.11e EDCF의 백오프 방식을 통해 다시 계산된다. 이러한 802.11e EDCF의 패킷 전송방식은 우선순위가 매겨진 패킷의 AIFS와

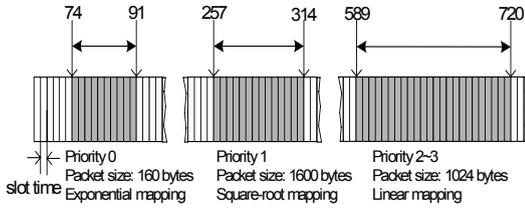


그림 1. F-EDCF의 경쟁 윈도우 할당 방식

CW_{min} 값의 차별화를 통해서 차등서비스(DiffServ)를 제공할 수 있다는 것을 알 수 있다.

III. F-EDCF

F-EDCF는 II장에서 소개한 알고리즘을 이용하여 복합적인 네트워크 환경에서 효율적인 트래픽 관리를 제공해준다¹¹. 본 논문에서는 NS2에서 EDCF 모듈을 이용하여 실험하였다^{12,13}.

EDCF는 우선순위를 기반으로 하여 IFS(Inter-frame space)와 백오프 간격을 다르게 조정하여 차등적인 서비스를 제공하지만 기본적으로 수식 3과 같이 일정한 경쟁윈도우(CW)를 사용하기 때문에 동일한 백오프 간격을 갖는 경우 충돌할 가능성이 높다. 다시 말해, 같은 우선순위를 갖는 트래픽의 충돌 발생할 확률은 같으며, 그 결과 공평성을 제공하기 어렵게 된다. 우선순위 방식의 EDCF에 공평성을 제공하는 DFS를 합치는 것은 각 방식이 사용하는 QoS 파라미터가 다르기 때문에 F-EDCF에서는 같은 우선순위를 갖는 TC의 경우 동일한 사상함수를 적용하고 우선순위가 다를 경우 DFS에서 제안한 3개의 사상함수를 이용해서 경쟁윈도우(CW)를 분리한다. 표 1은 우선순위에 따른 사상함수와 QoS 파라미터를 보여준다.

F-EDCF는 같은 우선순위일 경우 DFS에서 주는 이점을 그대로 얻을 수 있다. 따라서 네트워크상에 높은 우선순위를 필요로 하는 트래픽이 많을 경우에 경쟁으로 인한 충돌을 회피하여 공평성뿐만 아니라 전송률 또한 증가하게 되며, 서로 다른 우선순위를 갖는 트래픽이 많을 경우 DFS에서 사용하는

표 1. 실험에 사용한 파라미터

우선순위	CW_{min}	CW_{max}	AIFS	사상함수
0	15	255	50	Exp.
1	31	511	100	Sqrt.
2	63	1023	150	Linear
3	63	1023	150	Linear

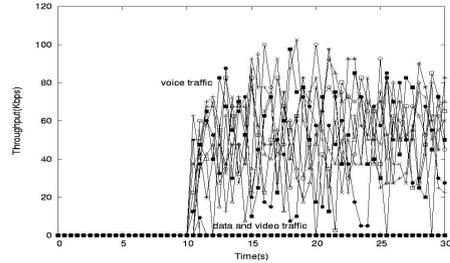


그림 2. EDCF의 시간대별 throughput

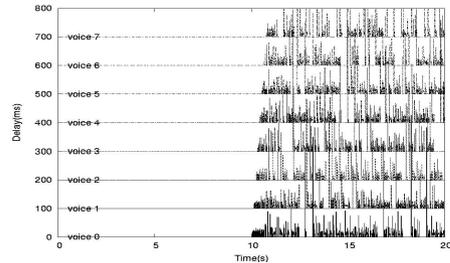


그림 3. EDCF의 시간대별 지연시간

3개의 사상함수를 이용하기 때문에 EDCF의 특징을 반영 할 수 있게 된다. 그림 1은 F-EDCF를 사용할 경우 경쟁윈도우가 할당되는 것을 보여준다.

그림에서와 같이 각 4개의 우선순위는 3개의 사상함수를 사용하여 충돌이 발생할 경우 경쟁윈도우를 조정한다. 우선순위에 따라 각 트래픽의 경쟁윈도우는 이격되기 때문에 EDCF의 특성에 영향을 주지 않을 뿐 아니라 같은 우선순위의 트래픽의 경우 공평성을 보장 할 수 있게 된다.

그림 2는 EDCF를 이용했을 경우 실험결과이다. 각 노드에서 발생하는 트래픽의 시간 별 전송률의 변화를 보여준다. 데이터 트래픽과 비디오 트래픽의 경우 최상위 우선순위 트래픽인 음성 트래픽의 서비스로 인하여 거의 전송되지 않는 것을 알 수 있다. 음성 트래픽의 경우 같은 우선순위를 갖는 다수의 트래픽의 경쟁으로 인하여 전송률에 심한 기복이 있음을 알 수 있다. 그림 3은 같은 조건일 경우 각 노드별 지연시간의 변화를 보여준다. 비록 평균 전송률은 64Kbps를 보여주지만 시간대별로 전송률의 기복으로 인하여 지연시간 또한 각 노드마다 격차가 큼을 알 수 있다. 그림 3에서 voice 0~7까지 8개의 트래픽의 음성 서비스의 시간대별 지연시간을 보여준다. 지연시간이 중간에 0으로 되는 부분은 충돌로 인해 전송되지 않고 있음을 나타낸다. 따라서 사용자는 제대로 된 음성 서비스를 받지 못한다고 볼 수 있다.

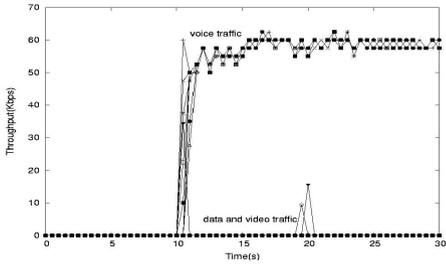


그림 4. F-EDCF의 시간대별

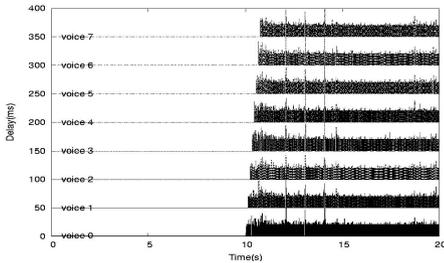


그림 5. F-EDCF의 시간대별 전송시간

F-EDCF는 같은 우선순위를 갖는 트래픽에 대해서 충돌을 최소한으로 줄이고 공평성을 보장할 수 있는 DFS에서 사용하는 경쟁원도우 할당방식을 사용하기 때문에 보다 많은 수의 상위 우선순위 트래픽을 처리 할 수 있다. 그림 4는 F-EDCF를 이용할 경우 전송률의 변화를 시간대별로 나타낸 것이다. 8개의 음성 트래픽 모두 시간대 별로 기록 없이 평균 60Kbps의 전송률을 나타낸다. 비록 전송률에 있어서 다소 감소가 있었지만 실제 사용자가 느끼는 서비스의 질은 그림 5에서 볼 수 있듯이 증가했다고 볼 수 있다. 시간대별로 지연시간은 모든 음성 트래픽이 일정하며 서비스가 중지되는 시간대가 없는 것을 확인 할 수 있다. 우선순위 스케줄링 방식을 사용하는 EDCF에 DFS 방식의 공평성 제공 메커니즘을 결합한 F-EDCF의 모의실험 결과는 복잡한 트래픽이 많고 우선순위가 높은 트래픽이 네트워크를 점유할 경우 효율적인 트래픽 관리가 가능함을 보여준다. 현재 F-EDCF에서는 4개의 우선순위를 두어 관리를 실험 하였지만 다양한 경쟁원도우 할당방식을 적용할 경우 클래스를 세분화하여 서비스할 수 있다. 4개 이상의 우선순위의 처리를 위한 경쟁원도우 할당방식은 현재 연구 중에 있다.

$$W_{i,j} = \begin{cases} 2^j CW_{\min}[i] & (0 \leq j \leq m) \\ 2^m CW_{\min}[i] = CW_{\max} & (m < j \leq m+a) \end{cases} \quad (5)$$

IV. 포화 전송률(Saturation throughput)

4.1 패킷 전송 확률

이 장에서는 Markov chain을 이용한 수학적인 모델링을 통해서 F-EDCF의 성능평가를 하고 그 타당성을 검토한다. 그림 6은 전형적인 IEEE802.11e의 Markov 모델이다^{[4][5][6]}. IEEE802.11 모델 [7][8]에 클래스에 따른 처리와 재전송 메커니즘을 적용하였다. 백오프 과정에서 두 모델의 차이점이 있다. EDCF 모델은 각 우선순위에 해당하는 하나의 프레임 전송하는데 실패했을 경우 또는 내부적으로 서로 다른 우선순위의 프레임이 충돌이 났을 경우 백오프 과정을 실행한다. 또한 재전송 메커니즘을 적용하여 재전송 한계치에 도달 여부에 따라서 경쟁원도우의 값이 결정된다. 우선순위 i 클래스에 있는 큐를 $n_i(i=0, \dots, 3)$ 라 하고 $b(i,t)$ 와 $s(i,t)$ 는 각각 시간 t 에서 우선순위 i 를 갖는 노드의 백오프 count er와 백오프 stage의 stochastic 프로세스로 정의한다. 전송이 실패할 경우 재전송 시도 횟수는 m 으로 표현하고 이 값은 경쟁 원도우가 최대치에 도달하기 전까지의 값이다. 만약 경쟁원도우가 최대치를 도달한 후일 경우 그 시도 횟수를 a 로 표현하면 $m+a+1$ 번의 재전송을 할 경우, 그 이후에는 해당 패킷을 큐에서 누락시킨다. 공식 5는 클래스 i 가 stage j 에 있을 경우 경쟁원도우 $W_{i,j}$ 를 나타낸다. 그림 6에서 p_i 는 충돌확률을 의미하며, 백오프 과정과 독립적이다[1]. F-EDCF는 4개의 우선순위를 가지며 각 우선순위 별로 DFS 사상함수를 적용하기 때문에 EDCF 모델에서 수정이 필요하다. 따라서 공식 5는 다음과 같이 수정된다.

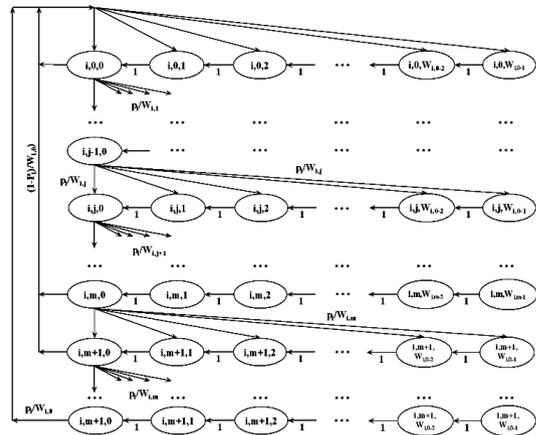


그림 6. EDCF의 2 dimensional Markov 모델

$$\tilde{W}_i = \begin{cases} \left\lceil \frac{\tilde{\rho} * \text{ScalingFactor} * l}{\omega} \right\rceil & , i = 2, 3 \\ \left\lceil \tilde{\rho} * (\sqrt{\text{Threshold} * \Delta}) \right\rceil & , i = 1, \text{ where } \tilde{\rho} = 1.1 \\ \left\lceil \tilde{\rho} * (\text{Threshold} + K_1 * (1 - e^{-K_2 * (\Delta - \text{Threshold})}) \right\rceil & , i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

F-EDCF 는 각 우선순위 별로 백오프 간격이 공식 5에 의해서 $[0, W_i - 1]$ 로 정해지게 되며, 재전송 한계치에 도달할 경우 해당 패킷은 누락되고, 전송이 실패할 경우 백오프 간격은 공식 6을 이용해서 다시 할당 받게 된다. 따라서 EDCF 모델에서와 같이 stage에 따른 상태 천이가 발생하지 않고 충돌이 발생하더라도 같은 stage에 있게 된다. 따라서 한 단계 천이 확률(one-step transition probability)은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pr\{(i, j, k) | (i, j, k+1)\} &= 1 & k \in [0, \tilde{W}_i - 2], j \in [0, m+a] \\ \Pr\{(i, 0, k) | (i, j, 0)\} &= (1 - P_i) / \tilde{W}_i & k \in [0, \tilde{W}_i - 1], j \in [0, m+a-1] \\ \Pr\{(i, j, k) | (i, j-1, 0)\} &= P_i / \tilde{W}_i & k \in [0, \tilde{W}_i - 1], j \in [1, m+a] \\ \Pr\{(i, m, k) | (i, m+a, 0)\} &= 1 / \tilde{W}_i & k \in [0, \tilde{W}_i - 1] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 j 는 단순히 전송 시도횟수를 의미하는 변수로 작용하고, \tilde{W}_i 는 백오프 간격을($\tilde{W}_i - W_i$), W_i 은 경쟁윈도우 크기를, W_i 은 경쟁윈도우 시작 위치(공식 6에서 $\tilde{\rho} = 0.9$)를 의미한다. 따라서 공식 6의 4가지 확률은 다음과 같이 해석 될 수 있다.

- 1) 우선순위 I를 갖는 노드에서 백오프 시간계수는 채널이 유희 할 때 각 슬롯 시간마다 1씩 감소한다.
- 2) 전송이 성공할 경우 새로운 백오프 간격을 계산하여 새로운 백오프 슬롯 시간을 결정한다. 재전송 계수기는 0으로 재설정된다.
- 3) 재전송이 발생할 경우 새로운 백오프 간격을 계산하여 새로운 백오프 슬롯 시간을 결정한다.
- 4) 재전송 한계에 도달 할 때까지 백오프 간격을 계산하여 새로운 백오프 시간 슬롯 시간을 결정한다.

각 확률에 따른 해석 1~4에서 백오프 간격은 전송이 실패했거나 성공했을 때에도 같은 구간에서 설정됨을 알 수 있다. 다시 말해, F-EDCF는 전송의 성패여부에 관계없이 우선순위 별로 사상함수를 이용해서 그 구간을 분리시킨다. 따라서 같은 우선순위 노드(정확히 그 노드의 해당 큐)에서 발생하는 패킷은 같은 백오프 구간에서 할당 받게 된다. 그러

나 같은 백오프 구간에서 할당된 각 노드들 중에서 임의의 노드가 전송이 성공할 경우 그 노드의 다음 패킷의 백오프 시간 슬롯은 $[0, \tilde{W}_i - 1]$ 에서 랜덤하게 선택되는 것이 아니라, $[W_i, \tilde{W}_i - 1]$ 사이에서 선택되기 때문에 이전 백오프 구간에서 할당된 모든 패킷의 전송이 보장될 수 있다. 이 특징은 DFS에서 보여주는 공평성 보장 메커니즘과 수정 메커니즘³⁾을 적용하기 때문에 SCFQ의 효과를 보여 줄 수 있다. DFS는 단순히 백오프 구간을 옮기는 것이 아니라 현재 전송중인 패킷의 NAV내의 백오프 정보를 이용하여 백오프 구간을 이동하게 된다. 따라서 백오프 구간을 고정시킴으로써 발생하는 불이익을 줄일 수 있으며 단순히 우선순위에 따라 백오프 구간을 고정시키는 EDCF 방식과 차이점이 있다.

다음은 EDCF의 정상분포(stationary distribution)에 대해서 알아본다. 논문 [4], [7]과 같이 클래스 i 에 있는 노드에 대한 정상분포 $b_{i,j,k}$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} b_{i,j,k} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{s(i,t) = j, b(i,t) = k\} \quad \text{for } j \in (0, m+a), k \in (0, \tilde{W}_i - 1) \\ b_{i,j-1,0} \cdot p &= b_{i,j,0} \rightarrow b_{i,j,0} = p_i^j \cdot b_{i,0,0} \quad \text{for } j \in (0, m+a) \end{aligned}$$

공식 8은 논문 [4], [7]의 공식에서 k 의 범위가 다르며, 논문 [7], [8]과 마찬가지로 다음의 공식을 유도할 수 있다. 여기서 F-EDCF에서 j 의 값(각 stage에 해당하는 백오프 구간)은 우선순위에 따라서 고정되기 때문에 j 값은 단순히 충돌이 발생한 경우를 의미한다.

$$b_{i,j,k} = \frac{\tilde{W}_i - k}{\tilde{W}_i} \cdot \begin{cases} (1 - p_i) \sum_{j=0}^{m+a} b_{i,j,0} & j = 0 \\ p_i^j \cdot b_{i,j-1,0} & 0 < j < m \\ p_i^m \cdot (b_{i,m+a-1,0} + b_{i,m+a,0}) & m \leq j \leq m+a \end{cases} \quad (9)$$

공식 9는 다음과 같이 표현할 수 있다^{4)[7]}.

$$b_{i,j,k} = \frac{\tilde{W}_i - k}{\tilde{W}_i} b_{i,j,0} \quad \text{for } j \in (0, m+a), k \in (0, \tilde{W}_i - 1) \quad (10)$$

공식 10과 정규화조건(normalization condition)을 적용하면 다음의 공식을 유도 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{m+a} \sum_{k=0}^{\tilde{W}_j-1} b_{i,j,k} &= \sum_{j=0}^{m+a} b_{i,j,0} \sum_{k=0}^{\tilde{W}_j-1} \frac{\tilde{W}_j - k}{\tilde{W}_j} = \sum_{j=0}^{m+a} b_{i,j,0} \frac{\tilde{W}_j + 1}{2} \\ &= \frac{1}{2} \left[\sum_{j=0}^m b_{i,j,0} (\tilde{W}_j + 1) + \sum_{j=m+1}^{m+a} b_{i,j,0} (\tilde{W}_j + 1) \right] \\ &= b_{i,0,0} \left[\frac{(\tilde{W}_i + 1)(1 - p_i^{m+1}) + p_i^{m+1} (\tilde{W}_i + 1)(1 - p_i^a)}{2(1 - p_i)} \right] = 1 \quad (11) \end{aligned}$$

공식 11에서 $W_{i,j}$ 는 공식6에서와 같이 백오프 stage와 관계없이 일정하다. 따라서 $W_{i,j} = \bar{W}_i$ 가 되며 공식 8에서의 관계를 이용하면 $b_{i,0,0}$ 을 구할 수 있다.

$$b_{i,0,0} = \frac{2(1-p_i)}{(\bar{W}_i+1)(1-p_i^{m+1})}, j \in [0, m]$$

$$b_{i,0,0} = \frac{2(1-p_i)}{p_i^{m+1}(\bar{W}_i+1)(1-p_i^a)}, j \in [m+1, m+a] \quad (12)$$

공식 12를 이용하여 특정 슬롯 시간에서 우선순위 i 를 가지는 노드가 전송할 확률을 τ_i 라 하면, 각 노드는 백오프 계수의 값이 0이 될 때 전송을 시도하게 된다. 여기서 j 값은 충돌의 횟수이고 범위에 관계없이 그대로 이용하면 τ_i 를 쉽게 구할 수 있다.

$$\tau_i = \sum_{j=0}^{m+a} b_{i,j,0} = \sum_{j=0}^m b_{i,j,0} + \sum_{j=m+1}^{m+a} b_{i,j,0}$$

$$= \frac{2}{(\bar{W}_i+1)} + \frac{2p^m(1-p_i^a)}{(\bar{W}_i+1)(1-p^{m+a+1})} \quad (13)$$

여기서 τ_i 는 p_i 에 관한 함수로 볼 수 있으며, p_i 는 충돌이 발생할 확률이므로 다음과 같이 표현할 수 있다. 공식 12에서 W_i 값은 EDCF의 경우 j 의 범위에 따라서 다르지만 F-EDCF는 j 의 범위에 상관없이 일정하게 사상되므로 다음 공식으로 표현할 수 있다.

$$p_i = 1 - \left(\prod_{h=0}^{i-1} (1-\tau_h)^{n_h} \right) (1-\tau_i)^{n_i-1} \left(\prod_{h=i+1}^{N-1} (1-\tau_h)^{n_h} \right) \quad (14)$$

지금까지 살펴본 바와 같이 우리는 F-EDCF의 패킷 전송 확률을 구하기 위해서 2차원 전이 확률을 우선순위 별로 구하고, 각 우선순위에 따라 경쟁원도우 값을 고정함으로써 전송 확률을 구했다.

패킷을 성공적으로 전송할 확률 $P_{s,i}$ 와 시스템 상에 적어도 하나의 노드가 전송을 시도할 확률 P_{tr} 을 구하면 시스템 전송률 S_i 를 구할 수 있다. 우선순위 별로 계산할 필요가 없으며 P_{tr} 와 $P_{s,i}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_{tr} = 1 - \left(\prod_{h=0}^{N-1} (1-\tau_h)^{n_h} \right)$$

$$P_{s,i} = n\tau_i(1-\tau_i)^{n_i-1} \prod_{h=0, h \neq i}^{N-1} (1-\tau_h)^{n_h}$$

$$p_s = \sum_{i=0}^{N-1} P_{s,i} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{n\tau_i}{1-\tau_i} (1-p_{tr}) \quad (15)$$

4.2 전송률(throughput)

전송률 S_i 는 전송할 때 겪은 모든 지연시간과 패킷 크기로 구할 수 있다. 지연시간에는 모든 슬롯 시간과 전송 지연시간을 포함한다. L_i 는 우선순위별 패킷이고 $T(L_i)$ 는 전송시간이다.

$$S_i = \frac{P_{s,i}T(L_i)}{(1-P_{tr})\sigma + P_sT_s + |P_{tr} - P_s|T_c} \quad (16)$$

여기서, T_s 는 성공적으로 전송이 되었을 경우 채널이 점유된 시간이고, T_c 는 충돌이 발생할 경우 채널이 점유된 시간이다. σ 는 슬롯 시간이다.

$T_H = PHY_{hdr} + MAC_{hdr}$ 이고 δ 는 전송 지연시간이라고 하면 다음 공식을 구할 수 있다.

$$T_s = T_H + T_{L_i} + SIFS + \delta + T_{ACK} + AIFS[i] + \delta$$

$$T_c = T_H + T_{L_i} + AIFS[i] + \delta \quad (17)$$

공식 17은 무선랜 상에서 기본적인 전송 매커니즘을 이용했을 경우의 시간이며 모든 노드가 전송 도달 가능한 거리에 있을 때이다. RTS와 CTS를 사용할 경우는 다음과 같다.

$$T_s = RTS + SIFS + \delta + CTS + SIFS + \delta + T_H$$

$$+ T_{L_i} + SIFS + \delta + T_{ACK} + AIFS[i] + \delta$$

$$T_c = RTS + AIFS[i] + \delta \quad (18)$$

V. 성능평가

본 논문에서는 4개의 우선순위를 두어 실험하였다. 각 우선순위별로 패킷의 크기는 일정하고 모든 노드는 전송할 패킷을 항상 가지고 있다고 가정한다. 실험에 사용한 파라미터는 표 2와 같다. F-EDCF는 경쟁원도우의 크기가 패킷의 크기와 우선순위에 따른 사상함수에 의해 계산된다. 우선순위 0은 가장 높은 우선순위이며 3은 최하위 우선순위를 의미한다. 패킷 크기는 최상위 우선순위의 경우 160byte, 우선순위 1은 1600byte, 2와 3은 1024byte를 사용하고, 우선순위별 노드 수의 비율을 1:1:2:2로 설정 하였다.

그림 7과 8은 각각 basic 방식과 RTS/CTS 방식을 적용했을 경우 전송률을 나타낸다. Basic 방식과 RTS/CTS방식에서 노드 수가 증가함에 따라 F-EDCF의 경우 모든 우선순위에서 전송률이 증가한다. 그림 9와 그림 10은 우선순위가 높은 트래픽

표 2. 실험 파라미터

MAC header	224 bits
PHY header	192 bits
ACK	112 bits + PHY header
RTS	160 bits + PHY header
CTS	112 bits + PHY header
Channel bit rate	1 Mbit/s
Propagation delay	2 μ s
슬롯 Time	20 μ s
SIFS	10 μ s
ShortRetryLimit	7
AIFS[0]	SIFS+2*슬롯 time(50 μ s)
AIFS[1]	SIFS+3*슬롯 time(70 μ s)
AIFS[2]	SIFS+4*슬롯 time(90 μ s)
AIFS[3]	SIFS+4*슬롯 time(90 μ s)
CW _{min} [0]	15
CW _{min} [1]	31
CW _{min} [2]	63
CW _{min} [3]	63
CW _{max} [0]	255
CW _{max} [1]	511
CW _{max} [2]	1023
CW _{max} [3]	1023

의 수가 작을 때 전송률을 보여준다. 이 경우 F-EDCF에서 사용하는 사상함수의 스케일링 값을 수정했다(ScalingFactor=0.06). F-EDCF의 경우 실시간 서비스를 요구하는 트래픽의 수에 상관없이 효율적인 처리를 통해서 실시간 서비스를 보장해 줄 수 있음을 알 수 있다.

전송률뿐만 아니라 패킷의 충돌 확률과 누락 확률 및 지연시간도 성능평가에 중요한 부분이며 실시간트래픽의 경우 지연시간이 높게 되면 사용자가 만족할만한 서비스를 제공받지 못하게 되고 실제로 의미 없는 트래픽의 전송이 이루어졌다고 말할 수 있다. 그림 11과 12는 패킷의 충돌 확률과 지연시간을 보여준다. 노드의 수가 증가함에 따라서 EDCF와 F-EDCF의 지연시간은 증가한다. F-EDCF는 전체 노드 수가 적을 때 각 우선순위 별로 지연 시간이 EDCF보다 작다. 지연 시간은 각 우선순위

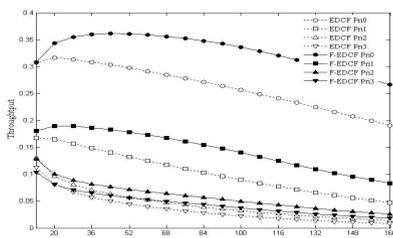


그림 7. EDCF와 F-EDCF의 전송률(Basic 모드)

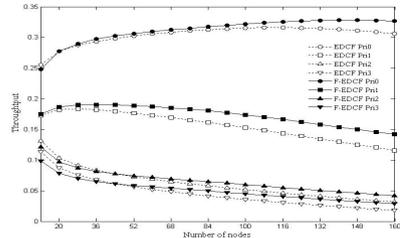


그림 8. EDCF와 F-EDCF의 전송률(RTS/CTS 모드)

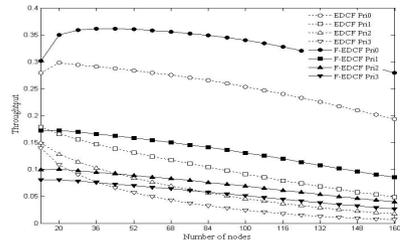


그림 9. EDCF와 F-EDCF의 전송률 (Basic 모드, 작은 노드 수)

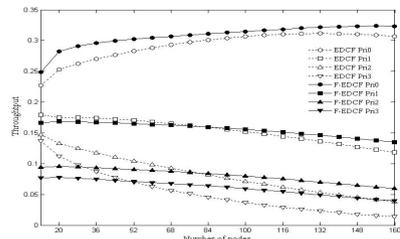


그림 10. EDCF와 F-EDCF의 전송률 (RTS/CTS 모드, 작은 노드 수)

별로 백오프 계수기가 0이 될 때까지의 모든 시간, 전송 지연시간과 타임아웃 될 경우의 시간을 고려한 시간이며 충돌 확률이 작을수록 지연시간은 작게 됨을 알 수 있다.

F-EDCF는 우선순위 별로 경쟁 윈도우를 고정시키기 때문에 전송이 성공한 후 작은 백오프로 다시 할당 받을 확률이 작다. 반면에 EDCF의 경우 작은 백오프 값으로 다시 할당될 수 있으며, 이전 시간대에 우선순위 큐에 도착한 패킷들과 다시금 경쟁을 하여 충돌 확률을 높인다. 그림 13은 패킷의 누락 확률이다. 패킷의 누락 확률은 전송을 다시 시도한 만큼의 충돌 확률을 곱해서 얻을 수 있다.

$$P_{i,drop} = p_i^{retry+1}, \quad retry = 0, 1, \dots, m + a \quad (19)$$

모든 우선순위의 전송률을 더하면 시스템 전송률을 얻을 수 있으며 그림 14는 시스템 전송률을 나타낸다. F-EDCF는 충돌 확률 및 누락 확률이 작기

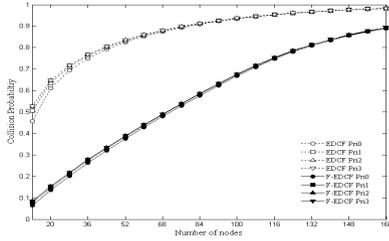


그림 11. EDCF와 F-EDCF의 충돌 확률(p_i)

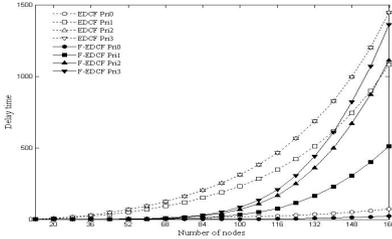


그림 12. EDCF와 F-EDCF의 전송 지연시간

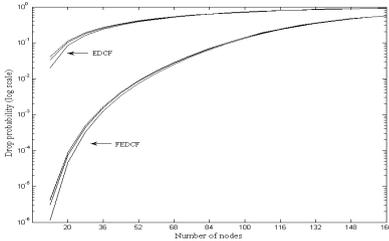


그림 13. EDCF와 F-EDCF의 누락 확률

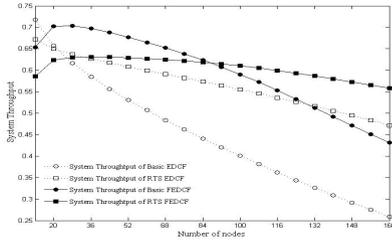


그림 14. EDCF와 F-EDCF의 시스템 전송률

때문에 전체적인 전송률에서도 높게 나타난다.

VI. 결 론

EDCF는 우선순위 별로 트래픽을 분류하고 경쟁 윈도우와 AIFS를 다르게 설정함으로써 우선순위 서비스를 제공한다. 하지만 같은 우선순위가 많을 경우 모의실험과 수학적 모델링에서 알 수 있듯이 사용자가 만족할만한 서비스를 제공하지 못함을 알

수 있다. 우선순위가 같은 경우 공평성을 보장해주지 못하게 되면 경쟁으로 인한 충돌 때문에 지연시간이 증가하고 전송률 또한 감소하게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 DFS에서 사용하는 공평성 보장 메커니즘을 EDCF에 적용함으로써 우선순위가 같은 경우에 경쟁으로 인한 충돌을 감소시키고 실시간 서비스에서 중요한 지연시간을 줄일 수 있다.

성능분석 결과 F-EDCF는 1) 우선순위가 같은 패킷의 공평성을 보장할 수 있으며 2) 우선순위에 따른 차등서비스를 제공할 수 있음을 확인할 수 있다. 결과적으로 공평성과 차등서비스를 동시에 제공할 수 있으므로 3) 사용자가 실제 느끼는 체감 품질(QoE)를 향상시킬 수 있다. 개선된 수학적 모델링을 통해 흐름별 전송률을 보다 정확하게 계산한다면 유비쿼터스 환경에 적합한 시스템을 구축할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] KeeHyun Choi, HoJin Shin, and DongRyeol Shin, "F-EDCF: Fair Scheduling with EDCF for Wireless LANs," *IEICE Transactions on Communication*, vol.E90-B, no.3, pp.696-699, March 2007.
- [2] N. H. Vaidya, P. Bahl, and S. Gupta, "Distributed Fair Scheduling in a Wireless LAN," *In Proc. Of ACM MOBICOM2000*, pp.167-178, August 2000.
- [3] KeeHyun Choi, HoJin Shin and DonRyoel Shin, "Delay and Collision Reduction Mechanism for Distributed Fair Scheduling in Wireless LANs," *ICCSA 2004, LNCS*, Vol.3046, pp.434-441, April 2004.
- [4] Sunghak Jeong, Minsu Kim, Jungpil Ryu, Donghun Jo, and Kijun Han, "An Analytical Model for Throughput of IEEE 802.11e EDCF," *MATA 2004, LNCS 3284*, pp.304-312, 2004.
- [5] Yang Xiao, "Performance analysis of IEEE 802.11e EDCF under saturation condition," *2004 IEEE International Conference on Communications*, vol.1, no., pp.170-174 Vol.1, 20-24 June 2004.
- [6] Jong-Deok Kim, Chong-Kwon Kim, "Performance analysis and evaluation of IEEE 802.11e EDCF," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vo. 4, No.1, pp.55-74, 2004.
- [7] Nitin Gupta and P. R. Kumar, "A Performance Analysis of the 802.11 Wireless LAN Medium Access

Control,” *Communications in Information and Systems*, Vol.3, No.4, pp.279-304, September 2004.

[8] G. Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.18, No.3, pp.535-547, March 2000.

[9] IEEE 802.11 WG. Draft Supplement to Standard 802.11-1999: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS). IEEE 802.11e/D2.0a, Nov. 2001.

[10] IEEE 802.11 WG. Draft Supplement to IEEE Standard 802.11-1999: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS). IEEE 802.11e/D5.0, 2003.

[11] IEEE 802.11 WG. Draft Supplement to IEEE Standard 802.11-1999: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS). IEEE 802.11e/D4.3, May 2003.

[12] The Network Simulator, ns-2. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>

[13] IEEE 802.11e EDCF MAC model for ns-2.28. Available: http://www.tkn.tu-berlin.de/research/802.11e_ns2/

최 기 현 (Kee-Hyun Choi)

정회원



2000년 2월 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업
2002년 2월 성균관대학교 전기 전자 및 컴퓨터 공학과 석사
2006년 8월 성균관대학교 정보통신 공학부 박사
2006년 9월~현재 성균관대학교 연구 교수

<관심분야> 무선네트워크, 유비쿼터스 컴퓨팅

이 재 경 (Jae-Kyung Lee)

정회원



1980년 2월 서울대학교 기계공학과 졸업
1982년 2월 KAIST 기계공학과 석사
1996년 2월 KAIST 기계공학과 박사
1997년~현재 충주대학교 정보제어공학과 교수

<관심분야> 이동로봇, 컴퓨터비전, 무선 센서 네트워크

신 동 렬 (Dong-Ryeol Shin)

정회원



1980년 성균관대학교 전자공학과 졸업
1982년 KAIST 전기전자공학 석사
1992년 Georgia Institute of Tech. 전기 및 컴퓨터 공학 박사
1994년~현재 성균관대학교 정보통신 공학부 교수

<관심 분야> 산업 네트워크, 네트워크 모델링, 성능평가