

# QoS 지원을 위한 WLAN MAC 파라미터 운용 방안

정회원 정대인\*, 홍창현\*\*

## A Policy on WLAN MAC Parameters Usage for QoS Provisioning

Daein Jeong\*, Changhyun Hong\*\* *Reguler Member*

### 요약

본 논문은, IEEE 802.11e MAC의 QoS 지원 기능에 대한 연구로서, MAC의 파라미터별 QoS 관련성을 중심으로 살펴보았다. 지연 성능과 대역폭 할당의 두 QoS 지표에 대해 MAC 파라미터, 즉 CWmin 과 AIFS의 연관 관계를 살펴보고, 그 결과 효과적인 파라미터 운용 방안을 제시하였다. 클래스 간의 우선순위를 유휴 채널에의 접근성에 대한 차별로 해석함으로써, 대역폭이 아닌 지연 성능의 차별성이 클래스 간의 서비스 차별성 구현의 목표가 됨을 논의하였다. 이를 기반으로, 소위 지연-대역폭 커플링 문제를 위한 해결방안으로서 AIFS와 지연 성능과의 관계에 초점을 둔 연구 결과로 이어졌다. 이러한 관계의 분석을 위하여 MAC 동작에 대한 모델링 및 해석을 수행하였으며, 그 결과 AIFS와 지연 성능과의 관계를 도출하였다. 다양한 환경에서의 시뮬레이션과, MAC 해석 결과에 대한 시뮬레이션 등을 통하여, QoS 요구 사항에 대한 MAC 파라미터의 적절한 운용 방안을 논의하였다.

Key Words : WLAN, MAC, QoS, parameter tuning

### ABSTRACT

In this paper, we investigate the parameters of the IEEE 802.11e MAC protocol, CWmin and AIFS, in terms of their capability of QoS control. The delay and the bandwidth performances are selected as the QoS metrics to examine the characteristics of those parameters. A policy on MAC parameters usage, thereby, is proposed. We regard the MAC-level traffic classification as the differentiation in the channel accessibility, and thus the delay differentiation is referred to a main issue of the class-level QoS control. Realizing the tight relationship between the delay performance and the parameter AIFS, we derive an analytical expression of their relationship through an analysis of the MAC mechanism. Various simulations are examined which show the validity of our assertions, and a policy on the parameters usage is proposed based on those observations.

### I. 서론

WLAN에서 이동노드 간의 채널 공유는 MAC에 의해 이루어진다. IEEE 802.11e MAC에서는 QoS 지원을 위하여 4개까지의 트래픽 클래스, 즉 AC (Access Category) 설정이 가능하며, 각각 고유의 논리적/물리적 큐를 할당하여, 클래스 레벨에 따른 차별적 서비스를 제공 한다[1].(이하 본 논문에서

클래스와 AC는 같은 개념으로 혼용하여 사용한다.) 각 AC에 대해 MAC 파라미터들이 정의되어 있어 차등화 된 서비스의 제공이 가능하다.

이러한 MAC 메커니즘의 분석에 관련된 본 연구의 목적을 명시하기 위해서는, 우선 QoS 개념과 서비스 차별성에 대한 정의를 구별하여 기술할 필요가 있다. 지연 성능, 또는 가용 대역폭 등의 지표로 표현되는 QoS는 트래픽에게 제공하는 서비스 수준

\* 한국외국어대학교 전자정보공학부 (djeong@hufs.ac.kr)

\*\* (주) 씨에스티

논문번호 : KICS2005-07-268, 접수일자 : 2005년 7월 4일

※ 본 연구는 유비쿼터스 컴퓨팅 및 네트워크 원천기반기술개발사업의 연구지원 결과물임.

에 대한 절대적 의미를 갖는다. 예를 들어, 임의의 트래픽으로부터 지연 상한이 요구될 경우, 요구된 지연 상한을 만족하도록 자원을 할당하고자 하는 노력이 QoS 지원 개념이다. 여기서, 요구된 QoS의 차이와 클래스 간의 차별성 개념은 구별되어야 한다. 가령, 1Mbps를 요구하는 트래픽과 10kbps를 요구하는 트래픽은 모두 고유의 자원 할당을 요구한다는 측면에서는 동일하게 취급되며, 요구된 대역폭의 많고 적음은 차별성과는 별개로 이해된다. 즉, QoS 입장에서는 동일한 중요성을 갖는 것이다. 그렇다면 클래스별 차별성은 어떻게 해석이 되어야 하는가?

IEEE 802.11e MAC 메커니즘을 분석하면, 클래스 간의 차별성은 공유하는 채널에의 접근성(accessibility) 차별화로 이해될 수 있다. 클래스별 파라미터의 역할은 물론이고, 클래스 간에 적용되는 노드 내 스케줄링, 즉 virtual collision 개념[1]도 모두 접근성의 차별화로 인식될 수 있다. 접근성은 지연 성능과 직접적인 관련을 가지며, 이는 대역폭의 조정과는 다른 개념이다. 예로서 음성 트래픽은 접근성의 측면에서 가장 우선순위를 요구하는 트래픽으로 분류되며, 적은 대역폭 요구와는 무관하게 높은 차별성을 필요로 한다.

이미 많은 연구에서 적용하였듯이, 음성 서비스의 차별성을 위해 MAC 파라미터인  $CW_{min}$ (Contention Window)와 AIFS(Arbitrary Inter-Frame Space)의 값을 상대적으로 작은 값으로 할당한다[2]. 그러나, 그 결과로서 얻는 것은 해당 클래스의 지연 성능의 개선에만 그치는 것이 아니라 대역폭의 증가도 수반된다. 적은 대역폭을 필요로 하는 실시간 트래픽의 지연 성능을 만족시키기 위해 필요 이상의 대역폭을 증가시키는 비효율성 문제가 발생하는 것이다. 본 논문에서는 이를 지연-대역폭 커플링 문제로 부르기로 한다. 위 예로부터, 접근성의 차별화와 대역폭 조율의 구분이 명백히 되어야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는, 지연 성능의 충족 문제를 대역폭이 아닌 접근성의 조절로 해결함으로써, 지연-대역폭 커플링 문제를 해결하는 방안을 제시한다. 이를 위해서는, IEEE 802.11e MAC 파라미터들에 대한 활용 정책이 적절하게 정의될 필요가 있다. 클래스별 지연 성능의 조절을 수월하게 하는 파라미터를 구별하고, 다른 파라미터가 접근성 이외의 어떠한 측면에 효과를 갖고 있는지에 대한 분석이 필요하다. 본 논문에서는 시뮬레이션 등을 활용하여 이러

한 이슈에 대한 분석 결과를 정리하였다. 더 나아가, MAC 동작에 대한 해석을 기반으로 하여, 지연의 차별성을 만족하는데 필요한 MAC 파라미터 값의 결정 방안을 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IEEE 802.11e MAC 프로토콜에 대하여 간략히 기술하였다. 3장에서는 MAC 파라미터 중  $CW_{min}$ 와 AIFS의 QoS 지표별 제어 효용성에 대해 시뮬레이션을 통한 관측 결과를 정리하였고, 이를 기반으로 지연-대역폭 커플링 문제를 논의하였다. 4장에서는, 지연 제어를 위한 시스템 해석을 보였고, 이러한 결과들에 대한 검증은 위하여 필요한 시뮬레이션 결과들을 소개하였다. 5장에서는 결론 및 관련 사항들에 대한 논의를 하였다.

## II. MAC 모델링

IEEE 802.11e MAC을 정의하는 EDCA(Enhanced Distributed Channel Access)의 구현을 AIFS의 용도에 초점을 맞추어 기술하면 다음과 같으며, 그림 1에 간략히 도시하였다. 응용 계층으로부터 패킷이 발생하여 MAC 계층에 전송이 요청되면, MAC은 채널 상태를 체크한다. 패킷이 AC[i]에 속할 경우, 채널의 유희(idle) 기간이 AIFS; 동안 유지되면 패킷을 전송한다. AIFS; 기간 내에 다른 노드에 의한 채널의 점유가 감지되거나, 또는 전송한 패킷의 충돌이 감지되면 backoff 모드의 동작이 수행된다. 채널 점유의 종료가 감지된 후 다시 AIFS; 만큼의 시간을 기다린 후, 아래 설명과 같이  $CW_{min}$ 를 활용하여 설정된 backoff 타이머를 감소시키며, 이러한 감소가 지속되어 backoff 타이머가 0이 되면 패킷을 전송한다. Backoff 모드의 동작 도중 채널 점유가 감지되면 backoff 타이머 값의 감소를 중단(backoff holding)하고, 다시 AIFS; 만큼의 채널 유희가 유지된 이후에야 backoff 타이머의 감소가 재개된다. 전송한 패킷의 충돌이 감지되면 새로운 backoff 타이머를 설정하여 위의 backoff 모드 동작이 반복된다. 이러한 과정을 살펴보면, AIFS는 패킷 전송을 위한 최소한의 채널 모니터링 기간, 또는 backoff 모드에서 backoff 타이머 감소 재개를 위해 기다리는 시간으로서, MAC에서 패킷이 전송 완료되기까지의 기간에 AIFS는 최소 한번 개입된다. 첫 AIFS 동안 유희 기간이 지속되지 못할 경우, 이후 채널 점유가 한번 감지될 때 마다 AIFS가 한번 씩 더 개입된다.

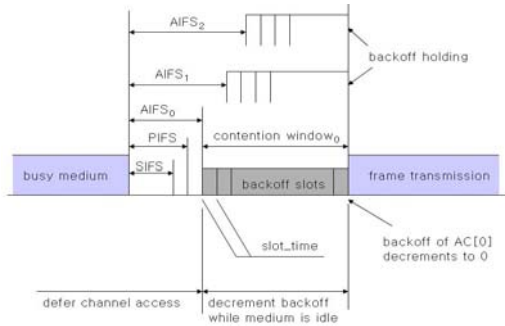


그림 1. IEEE 802.11e MAC 의 EDCA

한편, 클래스 단위의 또 다른 파라미터인  $CW_{min}$  는 backoff 모드 동작에서 정의된 backoff 타이머 값을 설정하는데 활용된다. 즉, 클래스  $i$  의 임의의 패킷이  $j$  번의 충돌을 경험하게 될 경우, 이 패킷의 재전송을 위해 설정되는 backoff 타이머의 설정 구간은  $[0, 2^j CW_{min} - 1]$ 로 조정된다. 이 구간 내에서, 균일한 확률 분포를 가정하여 선택된 임의의 값을 backoff 타이머 값으로 설정하는 것이다. 클래스별로 서로 다른 상수  $CW_{min}$  값을 할당하면, backoff 타이머가 가질 수 있는 상한 값이 서로 다르게 설정되며, 결국 매 backoff 모드 동작마다 채널 점유 기회를 갖기까지의 간격을 클래스별로 다르게 두어, 망 자원 활용 기회의 차별성이 유도되는 것이다. 여기서 주목할 점은, 클래스 간에 결정적 성격의 차별성을 주는 AIFS와는 달리,  $CW_{min}$ 는 backoff 타이머가 취할 수 있는 값의 상한을 결정할 뿐 실제 backoff 타이머 값의 설정에는 확률적 형태로 차별성을 유도한다는 점이다. 본 연구는, 바로 이러한 상이한 성격을 갖는 두 파라미터가 QoS에 각각 어떠한 방식으로 영향을 미치는가 하는 점에 대한 관심으로부터 출발하였다.

### III. MAC 파라미터의 QoS 제어 효과

본 장에서는, 클래스 단위로 설정되는 MAC 파라미터  $CW_{min}$ 와 AIFS가 QoS에 미치는 영향에 대한 관측을 한다. 시뮬레이션은 ns-2[3]를 사용하여 수행하였다. QoS 지표로는 두 가지, 즉 클래스별 지연 성능과 대역폭 값을 선택하였다. 지연 성능은 시뮬레이션 결과로부터 취합하였고, 대역폭은 시뮬레이션에서 관측되는 패킷의 충돌 확률을 이용하여, 참고문헌 [4]를 기반으로 산출되는 가용 대역폭 값을 취하였다. 이는, 가용 대역폭의 산출 결과에 따라 새로운 호 접속 요구의 허용 여부를 결정[5,6]하

는 호 접속 제어 알고리즘이 적용되는 경우, 가용 대역폭 산출의 정확성이 망 자원의 효율성을 결정짓는다는 점을 고려한 것이다. 참고로, [4]를 기반으로 설계된 호 접속 제어 알고리즘의 구현 과정을 간략히 정리하면 다음과 같다. 클래스  $i$  내의 플로우  $j$ 에 대해 측정된 충돌 확률 값  $p_{i,j}$ 을 기반으로, 포화상태를 가정하여 슬롯 당 각 플로우로부터 전송이 발생될 확률  $\tau_{i,j}$ 를 다음과 같이 구한다[5].

$$\tau_{i,j} = \frac{2(1-2p_{i,j})}{(1-2p_{i,j})(CW_{min,j}+1) + p_{i,j}CW_{min,j}(1-(2p_{i,j})^{m_i})} \quad (1)$$

여기서,  $m_i$ 는 AC별 파라미터로서 재 전송 횟수의 제한 값을 의미한다. 식 (1)을 이용하여, 플로우별 전송 관련된 여러 확률 값들을 구할 수 있으며, MAC 동작의 해석에 적용하여 플로우별 가용 대역폭을 산출해낼 수 있다. 자세한 내용은 참고문헌 [4,5]에 기술되어 있다.

시뮬레이션에서 주기적으로 측정된 충돌 확률 값을 이용하여 가용 대역폭을 구하였으며, 이러한 값이  $CW_{min}$  또는 AIFS 각각의 변화에 대해 어떠한 패턴으로 변화되는지 관측하였다. 이를 통해  $CW_{min}$  또는 AIFS 중 어느 것을 AC 간의 서비스 차별성을 구현하기 위해 활용하는 것이 적합한지를 확인하였다. 이는 앞에서 언급한 지연-대역폭 커플링 문제의 해결 방안을 찾는 과정으로도 이해될 수 있다.

#### 3.1 지연-대역폭 coupling 문제를 확인하기 위한 시험

첫 실험은, 저속의 실시간 트래픽과 고속의 트래픽이 WLAN 내에 공존하는 상황에 대하여 수행하였다. 동일 노드 내에 다중 클래스의 트래픽이 활성화된 환경을 구성하였다. AP 외에 노드의 개수는 5개이며 모든 노드 내에는 3개의 AC 트래픽이 활성화되어, 총 15개의 플로우로 구성된다. AC[0]는 실시간 트래픽으로서, 65kbps의 부하를 갖는다. AC[1]은 1Mbps, AC[2]는 1.7Mbps를 요구하며, 모두 비실시간 트래픽으로 가정한다. 모든 실험에서, 데이터 프레임은 36Mbps, 그 외의 프레임은 6Mbps로 전송하며, 위의 트래픽 부하는 그러한 환경에서 혼잡 상황을 유발함을 확인하였다. 혼잡 상황을 설정하는 이유는, 호 접속 제어 알고리즘이 포화상태를 가정하여 유도된 결과[4]라는 점과, 호 접속 제어는 혼잡 상황에 가까운 상황에서 필요하다는 점을 반영한 것이다.  $m_i$ 는 모든 클래스에 대해 7로 두었다.

세 개의 AC 간에 서비스 차별성을 구현하기 위한 파라미터로서  $CW_{min}$ 와 AIFS만을 고려한다. 두 파라미터의 단위는 0.02ms로 정의된 slot\_time이다. 먼저, 그림 2에서는 AIFS를 모든 AC에 대해  $DIFS + 3 * slot\_time$  (이하 AIFS 값은 이와 같은 경우 3으로 칭한다.)로 같게 설정하고,  $CW_{min}$ 는 AC[1] 및 AC[2]에 대해 각각 32, 32로 두며, AC[0]는 32로부터 16까지 감소시켜 가면서, 각 AC의 지연 성능 변화를 관찰한다. DIFS는 0.03ms로 두었다.

호 접속 제어 알고리즘에 의해 산출되는 가용대역폭의 변화를 각 AC별 임의의 플로우에 대해 관측하여 그림 3에 도시하였다. 모든 산출 값은 5회의 시뮬레이션을 수행하여 평균값을 취했다. 그리고 모든 실험에서 RTS/CTS 는 적용하지 않았다.

그림 2에서 볼 수 있듯이,  $CW_{min}$ 의 튜닝을 통한 AC 간의 지연 성능의 차별화는 완만하게 이루어진다. 반면, 그림 3에서 보듯이, 호 접속 제어 알고리즘에 의해 산출된 가용 대역폭은 저속인 AC[0]가 가장 큰 값을 갖는다. 이는, AC 간의 차별성을 구현하기 위해  $CW_{min,0}$ 를 작은 값을 갖도록 감소시킨 결과이다. 즉, 지연의 감소를 목적으로(본 실험에서는 지연 감소 효과가 미미하지만)  $CW_{min,0}$ 를 감소하였는데, 이는 곧 호 접속 제어의 입장에서는 대역폭의 증가를 유발하며, 저속인 AC[0]에게는 불필요한

대역폭의 낭비가 된다. 이는, 앞에서 언급한 지연-대역폭 커플링 문제의 단적인 예이다. 이러한 문제의 해결을 위해서는,  $CW_{min}$ 보다는 AIFS를 활용하여 지연 제어를 구현하는 방법을 고려해볼 수 있다. 그림 4와 그림 5에서는, AC[0], AC[1], AC[2]의  $CW_{min}$ 를 각각 64, 32, 32 로 고정시키고, AIFS는 AC[1]과 AC[2]에 대해서는 모두 5 로 두고 AC[0]에 대해서는 5부터 1로 감소시키면서 실험을 수행한 결과를 보였다. 여기서 중요한 점은, AC[0]의  $CW_{min}$  값을 오히려 다른 AC 들에 비해 큰 값을 주었다는 점이다. 우선권이 높은 클래스에 대해  $CW_{min}$  값을 작게 하는 것이 기존에 지연과 대역폭 모두의 차별성을 구현하는 방식이지만, 본 연구에서는  $CW_{min}$ 는 대역폭의 차별성에만 국한하여 활용하는 방식을 제안한다. 저속인 AC[0]에는 큰  $CW_{min}$  값을 주어 상대적으로 작은 대역폭이 할당되도록 하고, 반면에 지연의 차별성을 위해서는 AIFS 값을 작게 할당하여 지연의 차별성을 구현하고자 하는 것이다. 그림 2와 유사하게, AC[0]의 지연 값이 AIFS의 감소에 따라 완만한 감소를 보이고 있다. 주목할 점은, 그림 5에서 보듯이 호 접속 제어의 입장에서 AC[0]에 속한 플로우의 소요 대역폭 값이 앞의 실험에 비해 현저히 줄었다는 점이다. 이는, 지연과는 독립적으로 저역의 요구를 반영하기 위해 AC[0]의  $CW_{min,0}$  값을 다른 AC보다 큰 값으로 할당한 결과이다.

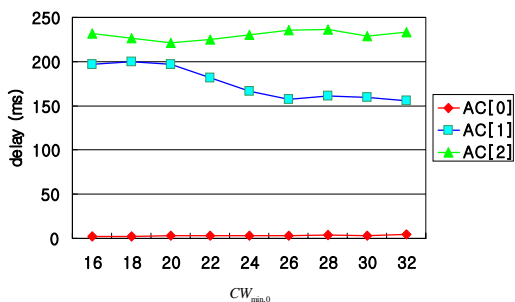


그림 2.  $CW_{min,0}$  변화에 따르는 AC별 지연 성능

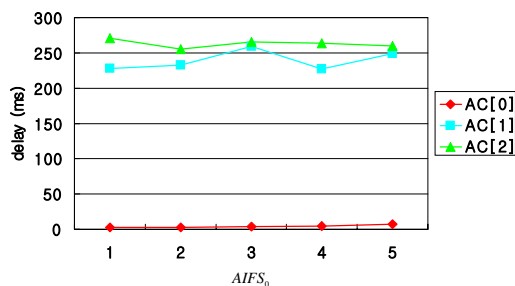


그림 4.  $AIFS_0$  변화에 따르는 AC별 지연 성능

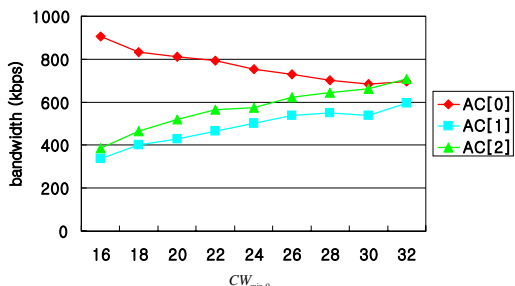


그림 3.  $CW_{min,0}$  변화에 따르는 AC별 가용 대역폭

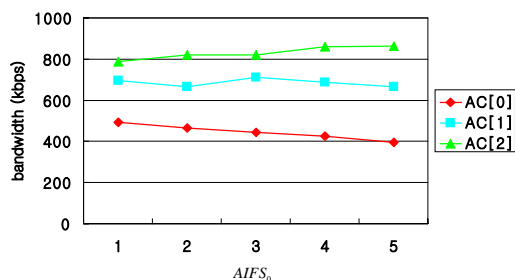


그림 5.  $AIFS_0$  변화에 따르는 AC별 가용 대역폭

3.2 지연 성능 제어를 확인하기 위한 시험

다음 실험에서는, 앞의 실험에 비해 지연 제어 효과가 드러나는 실험을 수행하였다. AC[0], AC[1], 그리고 AC[2]에 속한 플로우의 요구 대역폭을 각각 1Mbps, 0.065Mbps, 그리고 1Mbps로 두었다. 실시간 요구 트래픽인 AC[0] 트래픽을 광역으로 설정하였다. 이들 간의 지연 제어는 AIFS의 차별화로 구현하였는데, AC[1]과 AC[2]는 동일하게 5를 할당하였고, AC[0]에 대해서는 5부터 1까지 1씩 감소시켰다. 이 실험을, CW<sub>min</sub>가 AC[0], AC[1], AC[2]에 대해 32, 64, 32로 주어진 경우와, 32, 32, 32로 주어진 경우를 수행하여, 각각 그림 6과 7 및 그림 8과 9에 도시하였다.

그림 7에서 보듯이, CW<sub>min</sub>에 의한 대역폭 할당이 명확히 확인된다. 또한, AIFS가 AC 간의 대역폭 조율에 미미하게 영향을 미치는 것을 볼 수 있는데, 이는 가용 대역폭을 구하는 과정에 참고하는 플로우별 충돌 확률 값이 AIFS 튜닝에 영향을 받기 때문이다. 그림 6에 의하면, 지연 성능은 AIFS 값이 차별화되는 순간 이미 큰 영향을 받게 되는 점을 확인할 수 있다. 이는, AIFS가 접근성의 제어를 위해서 매우 민감한 변수임을 확인시켜 준다.

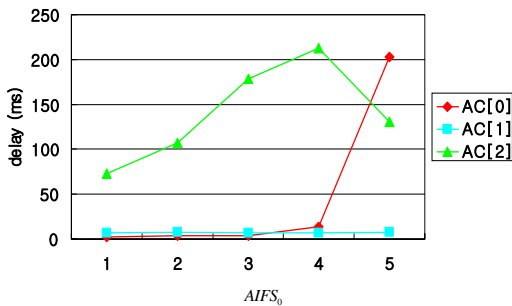


그림 6. AIFS<sub>0</sub> 변화에 따르는 AC별 지연 성능 (CW<sub>min,i</sub>=32, 64, 32)

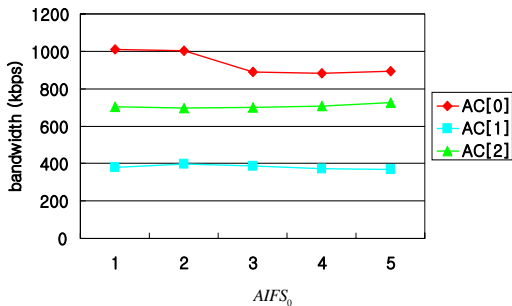


그림 7. AIFS<sub>0</sub> 변화에 따르는 AC별 가용 대역폭 (CW<sub>min,i</sub>=32, 64, 32)

그림 8과 9는, 모든 AC의 CW<sub>min</sub> 값을 동일하게 32로 두고 시험을 수행한 결과이다. 다른 변수들의 영향도 있지만, CW<sub>min</sub> 값이 동일한 이유로 AC 간의 대역폭 점유량 산출치가 서로 근접한 것을 볼 수 있다. 그림 9에서와 같이 AC별 대역폭의 근접성이, 그림 8에서 보이는 지연의 큰 차이에도 불구하고 유지된다는 점에서, AIFS를 통한 지연 성능의 차별화가 소위 지연-대역폭 커플링 문제의 해결 방안임을 입증해 준다.

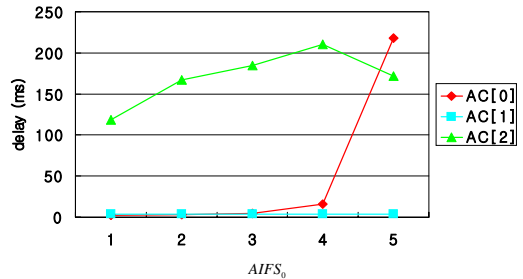


그림 8. AIFS<sub>0</sub> 변화에 따르는 AC별 지연 성능 (CW<sub>min,i</sub>=32, 32, 32)

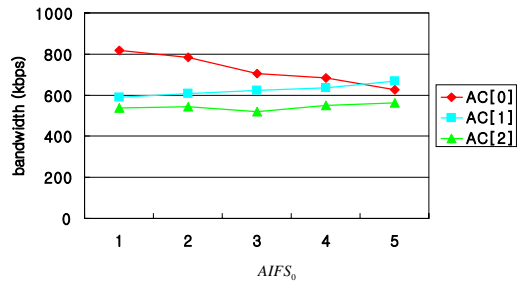


그림 9. AIFS<sub>0</sub> 변화에 따르는 AC별 가용 대역폭 (CW<sub>min,i</sub>=32, 32, 32)

이상의 실험에서, 지연의 차별성을 위해서는 AIFS의 조율이 CW<sub>min</sub>의 적용 보다는 적절함을 확인할 수 있다. 또한, 파라미터 CW<sub>min</sub>의 QoS 연관성에 대한 결과로서, 전체 대역폭 자원을 클래스별로 분배하는 비율을 일정하게 유지하기 위한 제어 수단으로서 CW<sub>min</sub>의 역할을 확인할 수 있다.

3.3 비 포화 상태에서의 파라미터 역할

이상의 실험은 포화 상태에서의 시험결과이며, 이는 호 접속 제어 알고리즘의 유도 과정[4]에서 포화 상태를 가정했다는 점에서 합당한 실험 시나리오이다. 부가적으로, 포화 상태가 아닌 상황에서의 파라미터의 QoS 관련 역할이 어떻게 되는지 확인한 바에 따르면, 혼잡 상황이 아닌 환경에서의 MAC



파라미터는 지연 성능에 주목할 만한 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 이는, 충돌에 대한 MAC의 처리 과정에서 파라미터 역할이 의미 있게 작용된다는 점에 비추어 당연한 결과이다.

#### IV. 지연 제어를 위한 AIFS 운용

3장에서와 같은 실험 결과 지연 제어를 위한 파라미터로서 AIFS를 활용하는 것이 적절함을 확인하였다. 남은 과제는 지연과 AIFS와의 관계를 정립하는 일이다. 그러한 관계를 기반으로 하여, 요구된 지연에 대한 적합한 AIFS 튜닝이 실현될 수 있는 것이다.

##### 4.1 지연 성능 해석

MAC의 분석으로부터, 충돌이 증가할수록  $CW_{min}$  보다는 AIFS의 영향이 커진다는 점을 주목하여, 제어의 필요성이 요구되는 높은 부하 상태에서의 효율적인 지연 성능 제어 방안으로서, AIFS를 통한 제어는 타당성이 있는 것으로 평가된다. 본 절에서는 이러한 결과를 적용하여, 클래스간의 지연 성능 차별성을 구현하기 위한 방법으로 AIFS 튜닝 방안을 연구한다. 클래스별 파라미터인 AIFS는 확률적인 관계로 접근성을 제어하는  $CW_{min}$ 에 비해 결정적(deterministic) 수량의 의미를 갖고 접근성을 제어한다는 측면에서, 보다 직접적인 영향을 미치는 효과가 있다. 주의할 점은, 특정 클래스의 AIFS 튜닝은 다른 클래스의 접근성에 영향을 미치므로, 결국 다른 클래스의 서비스 품질(특히 지연 성능)과 독립적인 위치에 있지는 않다는 점이다. 그러나, 앞의 식 (1)에서와 같이 가용대역폭을 구하는 과정에  $CW_{min}$ 가 영향을 미치는데 반해 AIFS는 직접적으로 관여하지 않으므로, 지연 제어를 위한 파라미터로 활용하기에 적절하다.

이러한 관측에 기반하여 본 절에서는, AIFS와 지연 성능 간의 관계식을 유도하고, 이를 토대로 요구된 지연 성능을 만족시키기 위한 파라미터 튜닝의 가능성을 확인하고자 한다. 관계식의 유도는 참고문헌 [7]의 분석 과정을 참조하였으며, 본 연구에서는 해석 과정에서 AIFS를 명시적으로 분리시켜, 목적하는 관계식의 유도를 가능토록 하였다. 포화 상태를 가정된 해석이며, 식 (1)에서 구한  $\tau_{i,j}$  값들을 기반으로 구현이 가능하다.

먼저, 임의의 클래스  $i$  패킷이 전송에 성공하기까지 겪는 충돌 회수의 기대 값( $E(N_{c,i})$ )은 다음과 같다. 임의의 슬롯에 전송이 발생할 확률을  $p_{busy}$ 로

둔다. 임의의 슬롯에 클래스  $i$ 에 속한 패킷의 성공적 전송이 발생할 확률을  $p_{s,i}$ 라고 할 때, 클래스  $i$ 로부터 발생한 패킷이 전송에 성공할 확률( $P_i^s$ )은  $p_{s,i}/p_{busy}$ 로 주어지며, 따라서 클래스  $i$ 에 속한 패킷이 성공적인 전송을 이루기까지 경험하는 충돌 회수의 기대 값은

$$E[N_{c,i}] = \sum_{j=0}^{\infty} j \frac{p_{s,i}}{p_{busy}} \left(1 - \frac{p_{s,i}}{p_{busy}}\right)^j = \frac{p_{busy}}{p_{s,i}} - 1 \quad (2)$$

이다. 여기서  $p_{s,i} = n_i \tau_i (1 - p_{busy}) / (1 - \tau_i)$ 이며,  $n_i$ 는 클래스  $i$ 에 속한 플로우의 개수이다. 충돌 이후, backoff 동작에 의한 지연 중 backoff holding 구간을 제외한 기간은 순수하게 backoff 타이머의 감소를 위한 시간( $T_i$ )이며, 이는 각 상황별 설정되는 backoff 타이머 값에 의존한다. 따라서, 그 평균 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[T_i] = \sum_{j=0}^{m_i} \frac{\min\{2^j CW_{min,i} - 1, CW_{max,i}\}}{2} \left(\frac{p_{s,i}}{p_{busy}}\right) \left(1 - \frac{p_{s,i}}{p_{busy}}\right)^j \times slot\ time$$

Backoff 타이머 값이,  $j$  번의 충돌 이후 구간  $[0, 2^j CW_{min,i} - 1]$  내에서 균등한 확률 값으로 임의의 값을 취하게 되며,  $m_i$  번까지의 재전송이 허용되고 contention window가  $CW_{max,i}$ 에 의해 제한됨을 반영하였다. 클래스  $i$ 에 속한 패킷이 겪는, 한번의 backoff 주기 동안 backoff holding의 발생 회수( $N_{h,i}$ )에 대한 기대 값은 다음과 같다.

$$E[N_{h,i}] = \min\left\{\frac{p_{busy}}{1 - p_{busy}}, 1\right\} \times \frac{E(T_i)}{slot\_time} - 1$$

위 식에는, 첫 전송의 경우도 포함하여, AIFS 구간의 마지막 슬롯이 시작되는 시점에서 backoff 타이머의 감소가 시작되는 MAC 규격에 따라 연속적인 backoff holding이 배제되는 점이 반영되었다. 이로부터, 클래스  $i$ 에 속한 패킷이 첫 전송을 위해, 또는 충돌 이후 재 전송에 이르기까지 경험하는 backoff 동작 기간 중, 채널 점유 감지에 따르는 backoff holding 기간( $H_i$ )의 평균 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E(H_i) = E(N_{h,i}) \left( \frac{P_s}{p_{busy}} T_s + \left( 1 - \frac{P_s}{p_{busy}} \right) T_c + AIFS_i \right)$$

$$= L_i + E(N_{h,i}) AIFS_i$$

여기서,

$$L_i = E(N_{h,i}) \left( \frac{P_s}{p_{busy}} T_s + \left( 1 - \frac{P_s}{p_{busy}} \right) T_c \right)$$

로 정의하였다. 위 식에서,  $P_s$ 는 임의의 슬롯에 성공적 전송이 발생할 확률 값이다. 또한,  $T_s$ 와  $T_c$ 는 각각 채널의 점유 상태가 유지되는 시간 구간으로서,  $T_s$ 는 성공적 패킷 전송이 이루어지는 경우의 평균 소요 시간,  $T_c$ 는 패킷의 충돌이 발생하는 경우의 평균 소요 시간을 각각 나타낸다. 주목할 점은, 본 논문에서는 backoff 타이머 감소의 재개를 위해 필요한 시간 구간인 AIFS를  $T_s$ 와  $T_c$ 로부터 분리하였다는 점이다. 이는 AIFS에 대한 관계식의 유도를 위해서이다. 그 결과

$$T_s = H + E(P) + SIFS + ACK + 2\tau$$

$$T_c = H + E(P^*) + \tau$$

와 같다.  $H, E(P), E(P^*), ACK, \tau$ 는 각각 패킷 헤더의 전송 시간, payload의 전송 시간, 충돌 시 가장 큰 payload의 전송시간, ACK 패킷의 전송 시간, 그리고 propagation 지연을 나타낸다. 이를 적용하여, 첫 전송 또는 충돌 이후 재전송이 있기 까지 backoff에 의해 지연되는 시간의 총합( $W_i$ )의 기대 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(W_i) = E(T_i) + E(H_i)$$

$$= E(T_i) + L_i + E(N_{h,i}) AIFS_i$$

이들을 종합하여, 클래스 i 패킷의 평균 지연 값 ( $E(D_i)$ )을 구하면 다음과 같다.

$$E(D_i) = E(N_{c,i}) \{ E(W_i) + T_c + T_o + AIFS_i \}$$

$$+ E(W_i) + T_s + AIFS_i$$

$T_o$ 는 패킷 충돌 시 채널 감지를 재개하기까지 걸리는 시간을 나타낸다. 이로 부터, 클래스 i의 지연 값과 AIFS<sub>i</sub>의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$AIFS_i = \frac{E(D_i) - [E(N_{c,i})(T_c + T_o) + \{E(N_{c,i}) + 1\} \{E(T_i) + L_i\} + T_s]}{\{E(N_{c,i}) + 1\} \{E(N_{h,i}) + 1\}}$$

위 식을 이용하여, 요구된 지연 성능을 만족하기 위한 AIFS의 튜닝이 가능하며, 이는 지연-대역폭 커플링 문제에 대한 해결 방안으로 제시될 수 있음을 앞에서 논의하였다.

## 4.2 시뮬레이션

위 관계식으로부터 AIFS와 여러 가지 파라미터 간의 상관관계를 도식적으로 확인할 수 있다. 본 절의 시뮬레이션에서는 이러한 확인작업을 수행하고, 그 결과에 기반하여 효과적인 AIFS 운용 방안을 살펴본다.

### 4.2.1 CW<sub>min</sub>과 AIFS의 관계

이 실험에서는, CW<sub>min</sub> 값을 변화시키면서, 상수로 주어진 지연 요구 값을 만족하기 위한 AIFS 값의 변화 추이를 관찰하였다. 즉, 일정한 지연 성능을 유지하기 위한 CW<sub>min</sub>와 AIFS의 관계를 관측했다. 앞 절에서 유도된 관계식을 활용하여 얻은 결과를 그림 10에 도시하였다.

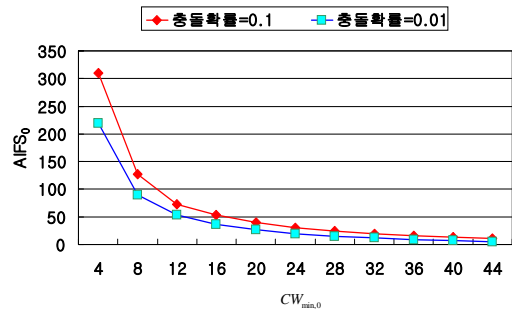


그림 10. CW<sub>min</sub>과 AIFS의 관계

두 변수 CW<sub>min</sub>와 AIFS<sub>i</sub> 이외의 변수는 고정되어 있는 것으로 가정한다. CW<sub>min</sub>와 AIFS<sub>i</sub>의 단위는 물리계층에서 정의된 슬롯타임으로 동일하다. CW<sub>min,1</sub>와 CW<sub>min,2</sub>는 모두 16으로 할당하였다. CW<sub>min,0</sub>가 4부터 44까지 변화해 갈 때, AC[0]의 충돌 확률을 0.01 또는 0.1로 유지하기 위해, 즉 AC[0]의 지연을 일정하게 유지하기 위해 필요한 AIFS<sub>0</sub> 튜닝 패턴은 CW<sub>min,0</sub> 값에 따라 차이가 있음을 보인다. CW<sub>min,0</sub> 값이 작은 범위 내에서 변화할 때 AIFS<sub>0</sub>는 급격한 변화를 보이고 있으며, CW<sub>min,0</sub> 값이 비교적 큰 범위에서 변화하는 경우에는 작은 AIFS<sub>0</sub>의 튜닝으로 일정한 지연이 유지됨을 보인다. 이는, CW<sub>min,0</sub>

값이 작은 범위에서는 대역폭에 미치는 영향이 크고, 반대로 큰 값의  $CW_{min,0}$ 는 대역폭의 변화에 미미한 영향을 미치기 때문이다.

#### 4.2.2 시스템 부하와 AIFS의 관계

두 번째 실험으로, WLAN 내에 주어지는 부하 변화에 대해 요구된 지연 성능을 유지하기 위한 AIFS 값의 변화 추이를 살펴보는 실험을 수행하였고, 결과를 그림 11에 도시하였다.

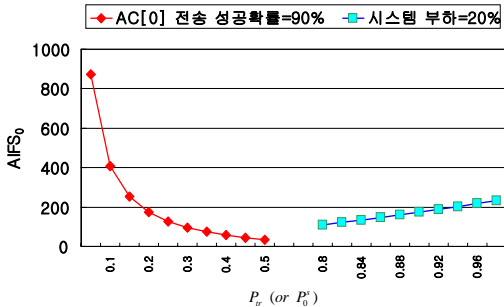


그림 11. 시스템 부하와 AIFS의 관계

두 경우에 대한 실험을 수행하였다. 그림 11에서 수평축은, 첫 실험에서는 시스템 부하( $P_{tr}$ )를, 두 번째 실험에서는 AC[0]의 전송 성공 확률( $P_0^s$ )을 각각 나타냄을 주의한다. 먼저, AC[0]에 속한 트래픽의 전송 성공 확률( $P_0^s$ )을 90%로 유지하고, 요구 지연 성능 10ms를 제공하기 위해 필요한 AIFS<sub>0</sub> 값을, 시스템 부하를 5%에서 50%까지 변화시켜 가면서 확인하였다. 15% 이내의 작은 부하에서는, 앞의 실험들에서 AIFS 값의 변화에 큰 영향 없이 비교적 작은 값의 지연을 갖는 점을 확인할 수 있었는데, 이는 위의 그림에서 매우 큰 AIFS<sub>0</sub> 값이 허용된다는 점에서 역시 확인이 된다. 두 번째 실험에서는, 시스템 부하를 20%로 유지하면서, 역시 지연 성능 10ms를 제공하기 위해 필요한 AIFS<sub>0</sub> 값을, AC[0]에 속한 트래픽의 전송 성공 확률이 80%로부터 98%까지 변하는 경우에 대해 구하여 편의상 같은 그림에 도시하였다. 전송 성공 확률의 변화에 거의 선형적인 영향을 받으며 변화되는 것을 볼 수 있다.

위의 실험들을 통하여 확인된 점은 다음과 같다. 즉, AIFS는  $CW_{min}$ 와 시스템 부하 각각에 대해 지수적 영향을 받는 반면, 이 두 변수가 고정되어 있는 경우 패킷의 전송 성공 확률에 대해서는 거의 선형적 관계를 갖는다. 이러한 결과를 통해 간접적

으로 확인할 수 있는 사항은,  $CW_{min}$ 의 변화가 지연 성능에 미치는 영향은 시스템 부하가 지연 성능에 미치는 영향과 같은 패턴을 갖는다는 점이다. 즉,  $CW_{min,0}$ 의 크기를 작은 쪽으로 튜닝 할 때 이는 AC[0]에 할당되는 대역폭을 증가시키므로, 결과적으로 AC[0]의 입장에서는 시스템 부하가 감소된 경우와 동일한 영향을 갖는다는 것이다. 이는, 3장에서의 여러 실험을 통해 확인된 사항, 즉,  $CW_{min}$ 는 AC 간의 대역폭 비율 조절을 위한 파라미터로서 유용하게 활용될 수 있다는 사실을 다시 확인시켜 준다.

#### 4.2.3 지연과 AIFS와의 관계

마지막으로, AIFS 튜닝에 따른 지연 값의 변화에 대한 실험을 수행하였다. 모두 AC[0]에 대해서 관측하였다. 먼저, AIFS<sub>0</sub> 값이 0.1ms로부터 1.4ms로 변화할 때 지연의 변화를 도시하였다. 이 때, 네트워크 부하는 세 가지 경우를 설정하였다. 즉 시스템 부하 값과, AC[0] 트래픽의 전송이 성공할 확률 값 조합이 (5%, 95%), (25%, 90%), 그리고 (45%, 85%)인 경우에 대해 지연의 변화를 관측하였으며, 그림 12에 도시하였다.

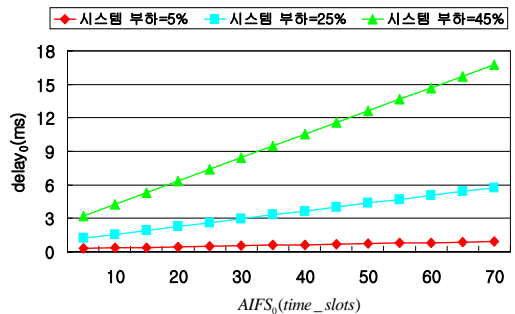


그림 12. 지연과 AIFS와의 관계

그림에서 보듯이, 세 경우에 대한 커브의 기울기를 비교하면, 시스템 부하가 증가할수록 AIFS의 영향은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는, 부하가 증가할수록 충돌의 기회가 증가하고, 따라서 backoff 과정에서 AIFS 개입이 증대되기 때문이다.

다음 실험에서는, 네트워크가 혼잡 상황에 머물러 있고, AC[0] 트래픽의 전송이 성공할 확률 값이 변화할 때 지연의 변화를 관측하였다. 네트워크는  $P_{tr} = 45\%$ 의 혼잡상황으로 설정하고, 이 때 AC[0]의  $P_0^s$ 을 0.55로부터 1.0까지 변화시키면서 AC[0]의 평균 지연 값을 관측하였다. AIFS<sub>0</sub>는 세 경우,



