

# 이동 무선 네트워크의 전송 성능 향상을 위한 적응적 FEC 알고리즘

안 종 석<sup>†</sup> · John Heidmann<sup>††</sup>

## 요 약

무선 이동 네트워크에서 대부분의 패킷 손실은 네트워크 체중(congestion)보다는 전송(propagation) 오류에 의해 발생된다. 이러한 전송 오류에 의한 패킷 손실을 방지하여 전송 효율을 향상하기 위해 무선 네트워크에서는 FEC(Forward Error Correction) 알고리즘을 채택하고 있다. 그러나 정적인 FEC 방식은 연속적으로 변화하는 무선 채널의 전송 오류율에 알맞은 정적 코드(check code)를 채택하지 못해 도리어 전송 효율이 저하되는 문제가 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해서는 채널의 상태에 따라 FEC를 동적으로 변경하는 것이 필요하다. 본 논문은 무선 채널 특성의 이론적 분석과 저 출력 라디오파를 이용하는 센서(sensor) 네트워크상에서의 실험적 측정을 통해서, 적응적 FEC 기법이 무선 네트워크의 전송 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 보여준다. 또한 전송 에러율이  $10^{-3}$  정도로 상당히 오류가 많은 무선 네트워크에서 적용할 수 있는 적응적 FEC 기법, FECA(FEC-level Adaptation) 기법을 제안한다. 마지막으로 FEC 알고리즘의 성능 비교를 위해 패킷 시뮬레이션에서 비트 레벨(bit-level) 오류를 시뮬레이션할 수 있는 통합 시뮬레이션 기법을 소개한다. 통합 시뮬레이션을 통해 FECA는 정적 FEC에 비해서 지속적으로 무선 채널 오류율에 알맞은 FEC 정적 코드를 채택하여 성능을 향상시키는 것을 확인하였다.

## An Adaptive FEC Algorithm for Mobile Wireless Networks

Jong-Suk Ahn<sup>†</sup> · John Heidmann<sup>††</sup>

## ABSTRACT

Wireless mobile networks tend to drop a large portion of packets due to propagation errors rather than congestion. To improve reliability over noisy wireless channels, wireless networks can employ forward error correction (FEC) techniques. Static FEC algorithms, however, can degrade the performance by poorly matching their overhead to the degree of the underlying channel error, especially when the channel path loss rate fluctuates widely. This paper investigates the benefits of an adaptable FEC mechanism for wireless networks with severe packet loss by analytical analysis or measurements over a real wireless network called sensor network. We show that our adaptive FEC named FECA (FEC-level Adaptation) technique improves the performance by dynamically tuning FEC strength to the current amount of wireless channel loss. We quantify these benefits through a hybrid simulation integrating packet-level simulation with bit-level details and validate that FECA keeps selecting the appropriate FEC-level for a constantly changing wireless channel.

**키워드 :** 링크계층 FEC(Link-level FEC), 동적 에러 복구 알고리즘(Dynamic Error Recovery Algorithm), 무선 이동 네트워크(Wireless Mobile Networks)

### 1. 서 론

최근에 이르러 이동성과 향상된 전송 속도로 인해 무선 네트워크가 활발히 사용되고 있다. 그러나 아직도 무선 네트워크는 과도한 전송 오류, 즉 높은 BER (Bit Error Rate) 수치때문에 전송 효율이 유선 네트워크에 비해서 현저히 낮다. 평균 무선 네트워크 BER은 약  $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 으로 평가되고 있는 데, 이 수치는 무선 네트워크에서 전송 에러 방지

나 복구없이 패킷을 전송하는 경우에 대부분 패킷들이 전송 오류에 의해 손실된다는 것을 의미한다. 또한 무선 채널 BER은 짧은 시간동안에도 연속적으로 변하며 변화 폭이 크다는 특성이 있어 정적인 FEC 기법은 효율적으로 무선 네트워크의 전송 에러를 복구하기 어렵다. 이러한 문제는 특히 저 출력 라디오 파를 이용하는 센서 네트워크에서는 첨예하게 발생한다. 실제로 이러한 과도한 전송 에러에 대비없이 센서 네트워크에서 데이터를 전송하는 경우 패킷 손실률이 50% 이상이 되었다[1].

무선 채널 에러의 특성은 크게 두개의 모델, 광대역 페이딩 (large-scale fading) 모델과 협대역 페이딩 (small-scale fading)

\* 본 연구는 2001학년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음.

† 종신회원 : 동국대학교 컴퓨터 공학과 교수

†† 비회원 : USC/ISI computer scientist

논문접수 : 2002년 4월 28일, 심사완료 : 2002년 7월 2일

ing) 모델로 나누어 설명한다. 이 두 모델은 시간적으로는 대략적으로 장기적인 현상과 단기적인 현상에 각각 해당된다 [2]. 대역 페이딩은 송신자(Transmitter)와 수신자(Receiver)사이의 T-R거리에 반 비례하여 평균 신호 파워가 감소하는 것을 예측한다. 감소하는 속도는 T-R거리의 지수 식으로 표현되는데, 통신환경의 특성에 따라 이 지수값은 1~6의 값을 갖는다.

협대역 페이딩 모델은 수신자와 송신자간의 상대 위치가 변화하게 될 때, 평균값이 아닌 임의의 시간에 신호 파워값을 확률적으로 예측한다. 이러한 임의의 시간의 신호 파워 값의 변화는 두가지 물리적 현상, 다중경로(multi-path) 간섭과 도플러 효과(Doppler Effects)에 의해 기인된다. 다중경로 간섭은 신호를 구성하는 다중 신호파가 송신자에서 전파되는 과정에서 각 신호파들이 진행하는 거리가 달라지게 되어, 출발할 때와는 다른 구성 신호파들이 수신단에 도착한다. 따라서 수신단에서는 신호파들은 송신단과는 다른 페이즈(phase)로 합쳐지게 되어, 송신단에서 출발할 때와는 상이한 신호가 수신된다. 도플러 현상은 송/수신자가 이동하게 되면 신호파들의 주파수가 변화하는 현상으로 다중 경로 간섭 현상과 마찬가지로 수신 신호의 모습이 송신때의 모습과는 달라진다. 이러한 두 모델은 무선채널에서는 수신 출력이 평균적으로는 송/수신간의 거리가 증가할수록 서서히 감소하나, 순간적으로는 출력이 급격히 변동하는 특성을 예측한다.

무선 MAC(Medium Access Control) 프로토콜은 안정적인 전송을 위해서 빈번한 전송 에러를 방지 또는 교정하는 기법들을 사용한다. 방지 기법으로는 물리계층에서는 변/복조 방식과 멀티플렉싱(multiplexing) 방법을, 링크(link) 계층에서는 인터리빙(interleaving)기법 등을 사용한다. 변/복조 방식은 한 물리 신호가 표현하는 정보량을 조절하여 무선 채널의 전송 오류를 방지하는 것으로, 전송 속도와 전송 오류률간의 반비례 관계가 있다. 멀티플렉싱 기법인 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)와 FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum)은 비트별 할당되는 대역폭을 증가시키거나 한 채널에 할당된 전송 신호(carrier)의 주파수를 무작위적으로 바꾸어줌으로써, 버스티(bursty) 에러가 하나의 비트 또는 하나의 프레임을 연속적으로 손상시키는 것을 방지한다. 인터리빙 방식 또한 버스티에러에 의해 하나의 프레임이 모두 훼손되는 것을 대비하는 방식으로, 여러 송신자들의 프레임들을 잘게 나누어 섞어 보낸다. 에러 교정 기법으로는 ARQ(Automatic ReQuest)방식과 FEC방식 두 종류로 나누어지는 데, 이 방식들은 각각 후향적(reactive) 및 전향적(proactive)으로 발생한 전송 에러를 수정한다.

대부분의 무선 네트워크들은 위에서 언급한 에러 방지 또는 복원 기법들을 중복적으로 두 개의 하위 계층에서 사용하고 있다. 특히 전송 에러율이 높은 채널에서는 대부분 FEC 기법을 사용하는데, FEC 기법은 정정 코드의 부하로

인해 전송 효율이 저하되는 문제가 있다. 즉 채널 에러를보다 과도한 정정 코드의 사용으로 인해 대역폭이 낭비된다. 대역폭 손실을 줄이기 위해서 무선 네트워크들에서는 여러 단계의 FEC 코드가 제공되며, 채널의 상태와 응용 프로그램의 요구 조건에 따라 알맞은 FEC 코드를 선택한다. 일례로 GSM[3]은 네 개의 FEC 단계를 제공하는데, 이들은 정정 코드 크기가 전체 프레임 크기의 0, 25%, 33%, 50%을 각각 차지한다.

연속적으로 BER이 변화하는 무선 채널에서 정적 FEC 기법의 성능을 개선하기 위해, 본 논문에서는 채널 상태에 따라 정정 코드의 부하를 동적으로 조절하는 FECA(FEC-level Adaptation)라고 명명한 적응적 FEC알고리즘을 제안한다. FECA는 기존의 타입(type)-II 하이브리드(hybrid) ARQ 방식이 아닌 타입-I 하이브리드 ARQ방식[4]에 속한다. 타입-II 방식은 전송 에러로 데이터 패킷이 훼손된 경우에 정정 코드만을 재 전송하는 방식이며, 타입-I 방식은 데이터와 정정 코드를 같이 재 전송하는 방식이다

FECA는 수신자측으로부터 특정한 피드백(feedback) 정보없이 적절한 FEC 단계를 결정하는 기법으로 센서 노드에 있는 용량이 작은 메모리에서도 구현될 수 있는 간단한 구조를 갖고 있다. 채널의 상태의 변화 상태에 적절히 대응하는 FEC 단계를 동적으로 결정하기 위해서, FECA는 사용하는 FEC 단계를 BER이 높은 경우에는 상위 FEC 단계로, 낮은 경우에는 하위 FEC 단계로 변화하며 적절한 FEC 단계를 결정한다. 높은 BER 상태의 발생은 패킷 손실에 의해서, 낮은 BER 상태의 발생은 과거의 데이터를 기반으로 예측된 현재 FEC 단계의 지속 시간에 의해 추정한다. 실제 센서 네트워크에서의 수집한 데이터 분석에 의하면, 센서 무선 채널의 BER 변화 속도는 FECA의 동적 전이 속도보다는 느린 것으로 확인되었다. 마지막으로 본 논문에서는 패킷 시뮬레이션에 비트 레벨의 에러를 표현할 수 있는 하이브리드 시뮬레이션을 통해, FECA가 BER이 연속적으로 변화하는 무선 채널에서 알맞은 FEC 단계를 발견하는 것을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 관련 연구들을 소개하며, 제 3장에서는 적응적 알고리즘이 무선 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있는 가능성을 분석적으로 또한 실험적으로 살펴본다. 제 4장에서는 FECA 구조를 설명하며, 제 5장에서는 패킷 시뮬레이터에서 무선 네트워크의 비트 에러를 시뮬레이션 할 수 있는 방안들을 소개한다. 제 6장에서는 다양한 전송 에러 분포하에서 FECA의 성능을 측정하며, 마지막으로 제 7장에서는 실험 결과를 요약하고 차후 연구 과제를 기술한다.

## 2. 관련 연구

FECA는 두 개의 기법, FEC 기법과 링크 계층의 적응적 메카니즘(mechanism)을 결합한 기법으로 이들 두 분야의

관련 연구들을 살펴본다.

응용 계층 FEC는 유선 네트워크에서는 체증에 의한 패킷 손실을 복구하며, 링크 계층의 FEC는 무선 네트워크에서는 전송 오류에 의한 비트 손상을 복구한다. 일례로, 실시간 응용 프로그램들은 재 전송 지연없이, 패킷 손실을 실시간적으로 복구하기 위해서 과거에 전송된 패킷들을 다시 현재의 패킷에 덧붙여 보내는 FEC 방식을 사용한다. 최근에 Bolot[5]은 수신자측에서 보고되는 평균 패킷 손실률에 따라 현재 패킷에 덧붙여 전송하는 중복 데이터의 양을 조절하는 응용 계층의 적응적 FEC기법을 제안하였다.

링크 계층의 FEC기법들은 데이터를 재 전송하는 여부에 따라, 타입-I과 타입-II ARQ 하이브리드 방식으로 분류된다. 타입-II는 재 전송시에 정정 코드만을 전송하며, 타입-I은 데이터를 포함하여 정정 코드를 재 전송한다. 타입-II는 전송 오류가 작은 무선 네트워크에서는 효율적인데, 손상된 데이터 패킷이 수신자에 저장되었다고 가정한다. 그러나, 저전력 센서 네트워크와 같이 패킷의 프리앰블이 손상되는 경우에는 데이터 패킷 자체를 수신하지 못하기 때문에, 프리앰블이 빈번히 손상되는 네트워크에서는 타입-II가 비효율적이다. 타입-II가 데이터를 복구하기 위해서는 데이터 패킷을 포함한 이후에 재 전송한 모든 정정 코드 패킷들을 수신해야 하기 때문이다. 또한 타입-II는 재 조립을 위한 버퍼의 관리 등 프로토콜이 복잡해지는 문제가 있다.

이들 두 계층의 FEC 기법을 비교해 보면, 링크 계층 FEC는 응용 계층 FEC에 비해 패킷의 크기와 BER의 지속 시간이라는 두 가지 제한 조건을 갖고 있다. 즉 네트워크 체증은 패킷의 크기에 별로 영향을 받지 않는 반면에, BER에 의한 패킷 손실은 패킷 크기에 의존한다. 링크 계층 FEC 기법은 정정 코드의 크기의 증가로 인해 훼손되는 바이트(byte) 수보다 더 많은 바이트들을 정정할 수 있어야 한다. 또한 인터넷에서의 체증은 오랜 시간 적어도 몇 시간정도 지속하나, 무선 채널 상태는 수 ms(milliseconds)만에 급격히 변화하는 특성을 갖고 있다. 따라서, 링크 계층 FEC 기법이 전송 성능을 향상하기 위해서는 링크간 피드백을 통해 무선 채널 변화에 빠르게 적응해야 한다.

링크 계층의 동적 적응성 연구[6-8]로는 MTU(Maximum Transmission Unit), 변조 방식, 그리고 전송 속도 등을 측정된 평균 패킷 손실률 또는 신호대 잡음비, SNR (Signal-to-Noise Ratio)에 맞추어 동적으로 변경하는 연구들이 있다. 특히 Holland[8]은 수신자로 부터 피드백된 SNR의 값에 따라 송신자가 알맞게 변조 방식을 선택하는 기법을 제안하였다. SNR이 작은 경우에는 잡음에 강한 변조 방식을, SNR이 큰 경우에는 속도가 빠른 변조 방식을 선택한다. 또한 이 논문은 이론적 분석을 통해 무선 채널에서 측정된 BER 상태가 적어도 다음 패킷이 재 전송될 때까지 지속되는 것을 보여 주었다. 즉 무선 채널에서 적응적 기법을 사

용함으로써, 성능이 향상될 수 있다는 것을 확인했다.

FECA는 채널의 상태에 따라 동적으로 정정 코드의 크기를 변화시키는 타입-I ARQ 하이브리드에 속하는 적응적 알고리즘이다. 위에서 언급한 다른 알고리즘들과는 다르게 채널의 상태에 대한 명시적(explicit) 정보없이, 패킷 손실 정보만을 가지고 동작하는 복구 알고리즘이다. Holland가 제안한 기법에서는 매 패킷의 도착시에 수신단에서 측정된 SNR 정보가 필요하며, 다른 두 개의 알고리즘들은 평균 패킷 손실률 정보가 필요하다. 또한 위의 기법들은 전송 에러를 방지하는 기법들인 반면에 FECA는 훼손된 패킷을 복구하는 방식이다. 그러나 FECA는 이들 알고리즘들과 함께 간섭없이 협조적으로 동작한다. 참고로 기존 무선 네트워크에서는 안정적 전송을 위해서 이미 오류 복구 알고리즘들과 에러 방지 기법들이 무선 프로토콜 스택에 중복적으로 사용되고 있다. 즉 이들 알고리즘이 중복적으로 구현되면, 이들은 서로 간섭없이 분포도와 지속시간이 다른 다양한 전송 오류를 방지하며, 훼손된 패킷을 복구할 것이다.

### 3. 무선 이동 네트워크에서 적응성 적용 고찰

링크계층의 적응적 알고리즘의 성능은 BER 변동 지속 시간과 변동의 크기에 밀접한 관계가 있다. 만약 무선 채널의 BER이 과거 상태와의 연관성(correlation)없이 무작위적(random)으로 변화한다면, 과거에 측정된 채널 특성에 근거하여 동작하는 적응적 알고리즘은 성능을 향상할 수 없다. 만약 연관성이 존재한다면, 연관성의 지속 시간과 BER 변화 범위에 맞추어 적응적 알고리즘의 변수들을 알맞게 결정해야 한다. 이 절에서는 이론적 분석과 실제 센서 무선 네트워크상의 실험 데이터를 바탕으로 무선 채널 연관성의 지속 시간과 변화 범주를 평가한다.

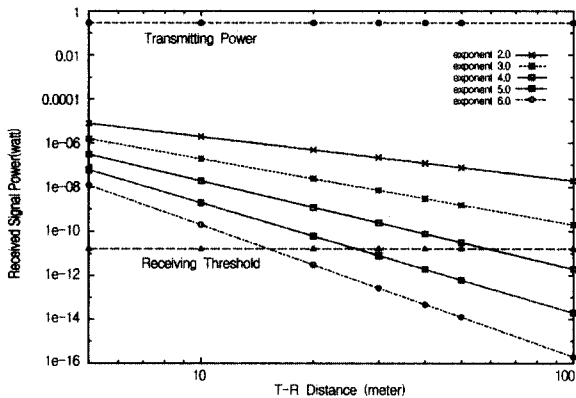
#### 3.1 이론적 분석

본 절에서는 두 개의 관계, 즉 BER과 광대역 페이딩 현상과, BER과 협대역 페이딩 현상과의 관계를 이론적으로 살펴본다. 광대역 페이딩에 의한 BER의 변화를 평가하기 위해서는 (BER, SNR)과 (SNR, T-R거리)을 각각 관련짓는 두 개의 이론적 수식을 고려해야 한다. 첫째, BER은 신호 출력을 데이터 전송 속도로 나눈 Eb/No(Ratio of signal energy per bit to noise power density per Hertz)[9]에 반비례한다. 이 수식에 의하면 변조 방식을 사용하지 않는 가시영역(line-of-sight)이 아닌 무선 채널상에서는, 대략적으로 신호 출력이 10배로 감소할 때 BER은 10배로 증가하며, 가시영역내에서는 같은 신호 출력 감소에 BER은 100배정도로 증가한다.

둘째, SNR은 T-R거리에 반비례하여 지수적으로 감소하는데, (그림 1)은 광대역 페이딩 모델의 하나인 LNS(Log-

Normal Shadowing)모델에 근거하여 이러한 관계를 보여주고 있다. (그림 1)에서는 1m의 기준거리(close-in reference distance), 0.2818W 송신 출력, 그리고 수신단의 신호 임계치를  $1.559 \times 10^{-11}$ W인 914Mhz Lucent LAN환경하에서의 T-R거리에 따른 수신 파워의 감소 추세를 보여준다. (그림 1)에서 송신 출력값과 수신 임계값은 두 개의 수평선으로 표현되어 있는 데, 수신 임계값은 신호와 잡음을 구별하기 위한 임계치(threshold)이다. 라디오파 송/수신기[10]에서는 동작하는 무선 채널의 상태에 따라 이 임계치를 알맞게 변경할 수 있다. 잡음이 적을 때는 임계치를 낮게, 잡음이 많을 때는 임계치를 높게 정한다. 기준거리는 자유 공간 모델과 LNS를 적용하는 경계치를 의미하는 것으로, 기준 거리 이전에서의 수신 파워는 T-R거리의 자승의 비율로 감소한다.

(그림 1)에서 지수값인 3에서 6인 네 개의 사선은 가시영역이 아닌 신호의 전파를 방해하는 많은 방해물이 있는 빌딩내의 무선 채널을 나타내며, 나머지 한 사선은 가시영역 내 또는 자유 공간에서의 T-R거리와 신호 출력과의 관계를 나타내고 있다. 네 개의 사선은 대략 10m거리에서 10배 정도로 SNR이 저하되는 것을, 나머지 한 선은 100m 거리에서 같은 정도로 SNR이 감소하는 것을 보여준다.

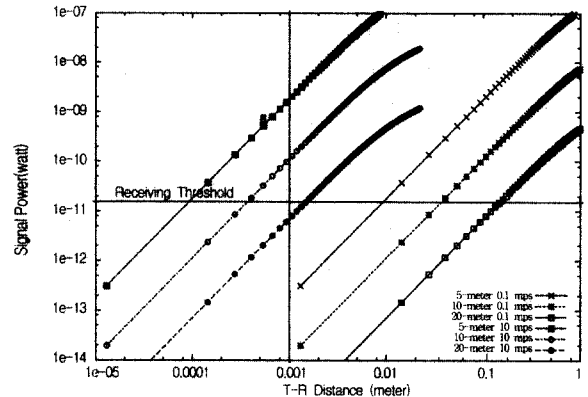


(그림 1) 광대역 페이딩에 의한 평균 출력 감소

이러한 위의 두 개의 이론적 결과에서, SNR은 T-R거리의 증가함에 따라 비 가시 영역내에서 빠르게 감소하며, BER은 SNR이 감소함에 따라 가시 영역에서 빠르게 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 대략적 수치에 근거하여, 평균 BER은 대부분의 사무실과 자유 공간과 같은 대부분의 무선 통신 상황에서는 수초 이내에 변하지 않는다고 생각할 수 있다. 일례로 수신자가 방해물이 있는 사무실에서 0.5m/s의 속도로 멀어지고 있을 때, 신호 출력은 매 10m마다 10배 정도로 감소하므로 BER은 10배 정도 증가하게 된다. 즉 평균 BER은 매 20초마다 10배정도로 변화하는 데, 이 지속 시간은 채널 상태를 파악하기 위한 RTT(Round Trip Time) 시간을 수십 ms로 가정할 때, FEC의 정정 능력을 채널 상태에 적용하기 위한 시간으로는 충분하다.

(그림 2)에서는 수신자가 이동할 때 협대역 페이딩 모델의 하나인 레일리(Rayleigh) 페이딩에 의해 감소된 출력과 이 감소된 출력이 지속되는 시간과의 관계를 보여준다. (그림 2)는 (그림 1)에서 가정했던 무선 랜상에서 T-R거리가 각각 5m, 10m, 그리고 20m일때 두 가지 속도 0.1m/s와 10m/s로 수신자가 송신자로부터 멀어질 때의 감소되는 신호 출력과 그 감소된 출력의 지속 시간간의 상관관계를 보여준다. (그림 2)의 여섯 개의 출력 감소 선의 최대 출력값은 LNS모델에서 지수가 3인 경우의 평균 출력값이다. 또한 (그림 2)의 수평 및 수직선은 각각 수신 임계값과 1ms RTT를 나타낸다.

(그림 2)에서 알 수 있듯이, 속도와 T-R 거리에 따라 임의의 신호 출력의 평균 지속 시간은 수 us에서 수 s의 범위에 있다. 또한 이들 여섯 개의 선을 비교하면, BER 지속 시간은 수신자가 송신자로부터 멀어질수록 증가하며, 반대로 BER 지속시간은 수신자의 이동 속도에는 반비례하여 감소하는 것을 알 수 있다.



(그림 2) 협대역 페이딩에 의한 평균 페이딩 지속시간

(그림 2)에서 BER 지속 시간과 RTT 선을 비교해 보면, FECA가 빠른 협대역 페이딩의 변화에는 적용하지 못하는 것을 알 수 있다. 즉 RTT 수직선의 왼편 영역에서의 협대역 페이딩은 RTT보다 빠르게 변화하게 되고 FECA는 이러한 BER의 변화에는 동적으로 적용할 수 없다. (그림 1)과 (그림 2)의 분석은 다음과 같이 요약된다. 즉 채널의 상태를 측정하는데 적어도 한 RTT이 소요되는 FECA기법이 대부분의 광대역 페이딩에 의한 BER의 변화에는 적용할 수 있으나, 협대역 페이딩에 의한 BER의 변화에는 제한적으로 적용할 수 있다.

### 3.2 센서 네트워크에서의 무선 채널 특성 측정

3.1절에서는 일반적인 전파 모델에 근거하여 FECA는 대부분의 무선 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있는 가능성을 보여주었다. 그러나 이러한 분석은 주로 셀룰러폰과 802.11랜(LAN)과 같은 고출력 라디오파를 사용하는 네트워

크를 대상으로 한 것이다. FECA는 저출력 라디오파를 이용하는 무선 센서 네트워크에 사용할 기법이므로, 이 절에서는 900Mz의 저출력 라디오파를 이용하는 8비트 모트(mote) [1]라고 불리는 센서 노드들간에서 수집한 실험적 데이터의 분석 결과에 의거하여 FECA의 적용 가능성을 살펴본다.

FECA를 사용할 때 센서 네트워크 성능의 향상 가능성을 알기 위해서, 센서 네트워크에서의 BER 연관성 변화 정도와 패킷 크기와 손상률(덧 붙여지는 정정코드의 바이트 수와 손상된 바이트의 비율)의 관계를 측정한다. BER의 연관성 확률은 임의의 패킷이 손상되었을 때, 차후에 전송되는 다음 패킷이 계속 같은 정도로 훼손되는 확률을 의미한다. 패킷 크기와 손상률의 관계는 정정 코드의 크기의 변화에 의한 BER의 변화 정도를 측정하게 된다. 패킷 크기에 따른 손상률 증가를 측정함으로써, 센서 네트워크에서 정정 코드를 증가함으로써 성능이 향상되는 것을 확인한다.

(그림 3)에서는 센서 네트워크의 연관성 정도를 나타낸다. 이를 위해서 송신자 모드가 35바이트(4바이트의 헤더와 31바이트의 사용자 데이터) 패킷을 ack없이 5.6kbps의 속도로 수신자 모트에게 지속적으로 보내는 실시간 센서 네트워크에서 수집한 패킷 트레이스(trace)를 이용하였다. 이 실험은 USC/ISI의 복도에서 근무 시간대에 수행하였는데, USC/ISI에서는 모트와 무선전화가 850~950MHz ISM(Industrial, Scientific and Medical) 주파수 대역을 공유하고 있어서 서로간의 신호 간섭이 극심하여 채널 에러율이 상당히 높다. 이러한 극심한 간섭 문제로 인해서, USC/ISI에서는 전송되는 전체 패킷의 10%이상은 패킷의 프리앰블이 훼손되어 수신 모드가 수신하지 못하며, 또한 수신한 패킷중의 90%이상이 전송 에러로 손상된다. (그림 3)의 세 개의 곡선은 T-R거리가 각각 1m, 3m 그리고 5m 정도에서 수집한 데이터를 나타내며, 각 곡선상의 점들은 삼 일간에 걸쳐 각 1시간 정도에 측정된 데이터의 평균을 나타낸다.

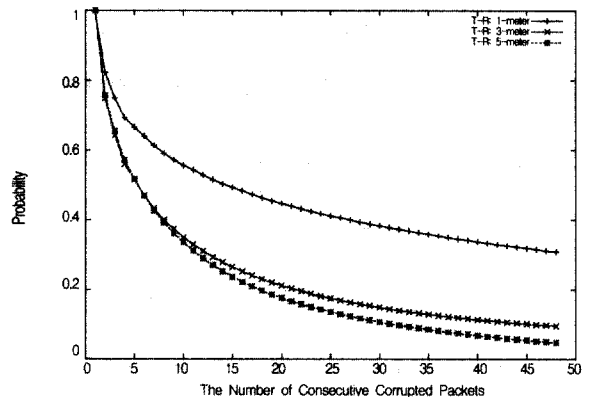
(그림 3)에서 x축 값  $n$ 은 연속적인 패킷 그룹의 크기를 의미한다. 실험에서 수집한 전체 패킷 갯수가  $m$ 개일때, 일련의  $n$ 개의 패킷으로 이루어진  $n$ -패킷그룹은 이 전체의  $m$ 개 패킷에서  $(m-n+1)$ 개가 존재한다. (그림 3)의 y축 값은  $(m-n+1)$ 개의 전체  $n$ -패킷그룹중에서 같은 FEC 레블에 속하는  $n$ -패킷그룹의 비율을 나타낸다. 일례로 x축 값은 5이고 y축 값은 30%일때, 이는 연속된 5개의 패킷들이 30% 확률로 같은 FEC 레블에 속하며, 이는 같은 FEC 레블로 이들 연속적으로 손상된 5개 패킷들을 복원할 수 있다는 것을 의미한다.

손상된 패킷을 복원하기 위해 알맞는 FEC 레블은 다음과 같이 결정한다. 이 실험에서는 35바이트 패킷에서 최대 25바이트가 손상된 것으로 관찰되었으므로, 이 네트워크의 효과적인 에러 복구를 위해서 다섯 개의 FEC 레블을 가정하였다. 각 FEC 레블은 5, 10, 15, 20 그리고 25바이트의

오류를 수정할 수 있다고 설정하였다. 링크 계층의 FEC 알고리즘[11]에서 복구의 기본 데이터 단위를 심볼(symbol)로 칭하는데, 이 실험에서 심볼 크기를 8비트로 정하였다. 심볼의 크기는 채널의 특성들에 의해 알맞게 정해지며, 심볼의 크기가  $x$ 일 때 덧붙여진 정정 코드로 복구할 수 있는 최대 패킷의 크기는  $2^x$ 이다..

(그림 3)에서 연속적으로 전송되는 패킷들사이에서는 강한 BER 양성 연관성이 존재하는 것을 보여준다. 일 예로, (그림 3)에서는 T-R 거리가 1m일때 다음에 전송되는 패킷은 60%의 확률로 전의 패킷과 같은 수의 바이트가 손상되며 따라서 같은 FEC 레블로 복원할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 실험 결과는 Holland 논문[8]에서 측정된 결과와 일치한다. 즉 Holland는 패킷을 전송할 때 바로 전에 전송한 패킷의 BER에 근거하여 알맞는 변조 방식을 선택하면 성능이 개선된다고 주장하였다.

그러나, (그림 3)의 세 개의 곡선을 비교할 때, T-R 거리가 멀어질수록 이웃한 패킷간의 FEC 레블 연관성은 감소한다. 이는 T-R 거리가 증가할수록 패킷 시작 심볼이 빈번히 손상되어, 수신단에서 수신되는 패킷 수가 감소하기 때문이다. 즉, T-R 거리가 멀어질수록 임의 패킷 다음에 수신단에 도착하는 패킷은 송신자단에서 전송된 다음 패킷이 아닐 확률이 크다. 이들 평균 패킷간 시간은 T-R거리가 1m, 3m, 그리고 5m일 때 각각 134ms, 200ms, 그리고 462ms로 측정되었다. (그림 3)에 나타난 상관관계 확률 분포도와 평균 패킷간 시간을 이용하여 평균 BER 지속 시간을 계산하며, 세 위치의 평균 BER지속 시간은 각각 902ms, 950ms, 1579ms이다. 이 결과는 (그림 2)의 분석 결과와 일치되는 것으로, T-R거리가 증가될수록 같은 BER의 상태가 오래동안 지속된다. 즉 실험한 무선 센서 네트워크에서는, 임의의 패킷이 손상되었을 때, 같은 정도의 BER이 대략 900ms이상 지속된다.

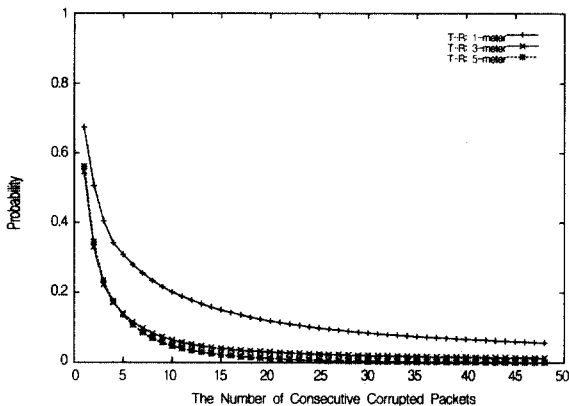


(그림 3) ISI에서의 센서 무선 네트워크 상관함수

FECA는 정확한 채널 정보가 없기 때문에 BER의 변화에 빠르게 적응하지 못한다. 즉 채널 상태가 개선된 경우에

FECA는 FEC 레블을 바로 하향하지 못하고 점진적으로 낮춘다. (그림 4)에서는 이렇게 점진적으로 FEC 레블을 바꾸는 경우에도 성능이 향상되는 것을 알기 위해서 비교적 느린 저주파 채널 상태 변화를 측정하였다. 이러한 저주파 무선 채널 상태를 측정하기 위해, (그림 3)에서 같은 FEC 레블에 속하는 그룹 수를 계산할 때와는 다르게 하나의 다른 FEC 레블이 두 개의 같은 레블간에 있을 때는 이 다른 레블도 같은 레블로 간주하였다. 예를 들어, 연속적으로 손상된 패킷들의 FEC 레벨이 2, 2, 3, 2, 1, 1라고 할 때, 두 개의 레블 2 사이에 있는 FEC 레블 3은 레블 2로 간주하여  $n$ -패킷그룹 수를 계산한다. 이 예에서 FEC 레블 2에 속하는 4-패킷 그룹이 하나 존재하므로, 4개의 패킷이 같은 FEC 레블로 같은 확률은 1/3이다.

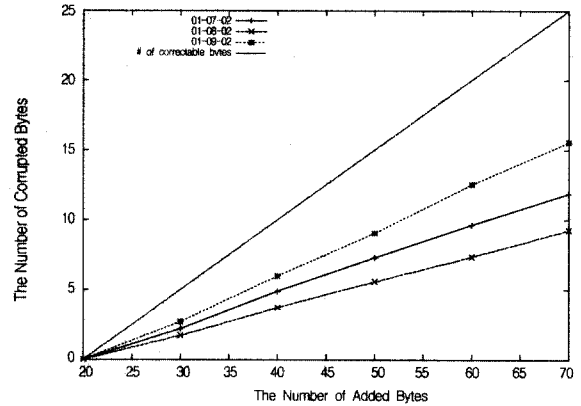
(그림 4)에서는 USC/ISI 무선 채널은 최대 수초에 이르는 긴 시간동안에 강한 BER 연관성이 존재하는 것을 나타낸다. 일례로, (그림 4)에서  $x$  축값이 5일때  $y$  축값은 0.5이므로, 다섯 개의 연속되는 패킷은 같은 정도의 전파 에러에 훼손될 확률이 50% 이상이라는 것을 의미한다. 또한 세 지점에서 평균적인 상관관계의 지속 시간은 900ms에서 각각 2.1s, 2.0s, 그리고 4.4s까지 확장된다. 이러한 결과는 무선 채널에 관한 명시적인 정보의 부족과 피드백 지연으로 인해 현재의 BER에 즉시 적응하지 못하고 저주파 변화에 적응하는 경우에도 여전히 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다.



(그림 4) ISI에서의 센서 무선 네트워크에서의 장시간 상관함수

마지막으로 (그림 5)에서는 T-R 거리가 3m일때 정정 코드의 증가로 인한 손상률과 정정률의 증가 속도를 비교한다. 증가된 정정 코드의 바이트 수는 (그림 5)의  $x$  축 값에서 원점의 값 20바이트를 뺀 값이며,  $y$  축은 증가된 손상 바이트 수를 나타낸다. (그림 5)의 하위의 세 사선은 각각 다른 날에 측정된 측정 값을 표시하며 사선상의 각 점은 한시간 동안의 평균값을 나타낸다. 가장 상위의 사선은 추가된 정정 코드에 의해 복원할 수 있는 최대 바이트 수를 나타낸다. 참고로 FECA가 사용하는 FEC 알고리즘에서는

두 바이트의 정정 코드를 첨가하게 되면 한 바이트를 복원할 수 있다. (그림 5)의 세 개의 측정치 사선중의 가장 상위 사선은 가장 높은 손상률을 나타내는데, 10바이트 추가할 때에 최대 3바이트가 더 손상되는 것을 나타낸다. 그러나 이 사선은 복구율을 나타내는 사선에 아래에 있는데, 이는 복구율이 손상률보다는 빠르게 증가한다는 것을 의미한다.



(그림 5) 패킷 크기와 손상된 바이트의 수와 관계

#### 4. FECA 알고리즘

이 절에서는 RTT의 10배이상 동안에 지속되는 협대역 페이딩에 의한 BER 변화와 광대역 페이딩에 의한 BER 변화에 점진적으로 적응할 수 있는 FECA 알고리즘을 소개한다. FECA 기법은 패킷 손실의 발생을 타임아웃(timeout)과 같은 암시적인(implicit) 정보로 알 수 있을 때, 여러개의 적용 가능한 FEC 레블중에서 현재 채널 상태에 가장 알맞는 FEC 레블을 결정하는 기법이다. 참고로 이러한 검색 알고리즘 구조는 채널 상태를 알려주는 정보가 암시적이거나 또는 명시적이거나에 따라 달라진다. Holland[8]의 방법에서와 같이 전 패킷의 수신 출력값을 알 수 있는 경우에는, 송신자는 쉽게 현재 패킷을 전송할 때 알맞는 FEC 레블을 결정할 수 있다. 이는 기존 프로토콜의 ack헤더에 측정된 BER 값을 저장할 수 있게 수정해야 한다.

패킷의 도착을 알려주는 ack만으로 채널의 상태를 파악하여 알맞는 FEC 레블을 찾는 문제는 RLM(Receiver-driven Layered Multicast)[12] 문제와 유사하다. RLM 프로토콜은 패킷 손실률에 근간하여 각 수신단에 이용 가능한 대역폭에 알맞는 멀티캐스트 그룹의 수를 결정하는 알고리즘이다. 이때 수신하는 멀티캐스트 그룹들의 전송률 합은 FECA가 찾으려는 FEC 레블과 대응된다. 이러한 점에 착안하여 FECA 구조를 RLM과 유사하게 디자인하였다.

그러나, 이 알고리즘은 적용하려는 변화의 지속 시간이 상이하다는 점에서 알고리즘 구조가 달라진다. RLM은 천천

히 변화하는 저주파 대역폭 변화에 적용하는 반면에, FECA는 링크간의 빠른 피드백을 이용하여 빠르게 변화하는 BER 변화에 적응해야 한다. 또한 RLM은 다른 노드의 멀티캐스트 그룹의 가입과 탈퇴로 인한 대역폭의 변화와 자기 자신의 그룹 수의 변화로 인한 대역폭 변화를 구별해야 하는 문제가 있다. 이에 반해 FECA는 다른 노드의 FEC 레벨의 변화가 자신 채널의 상태 변화에 영향을 미치지 않는다. 이러한 주위 노드들과의 통계적인 대역폭의 공유로 인해 RLM은 평균 패킷 손실율에 기반하여 저 주파의 대역폭 변화에만 적용할 수 있다. 일 예로 대역폭의 변화를 측정하기 위해 RLM은 평균 네트워크 체증 정도를 측정할 때, 세 개의 시간 윈도우(100초, 10초, 1초)중 하나를 이용하여 이 시간 동안에 평균 패킷 손실률을 측정한다. 이에 반해 FECA는 다른 노드의 동작에 영향을 받지 않으므로 즉시에 채널의 변화에 따라 FEC 레벨을 변화할 수 있다.

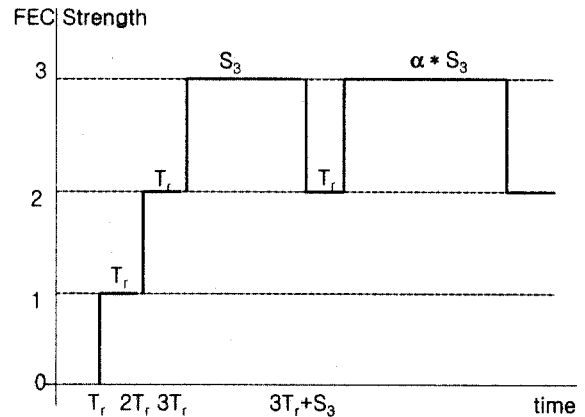
이러한 차이점을 바탕으로 대부분의 흐름제어 알고리즘들은 빠른 상태 변화에 반응하지 않기 위해서 평균가중치를 이용하는 반면에, FECA는 패킷 손실이 발견되었을 때에는 바로 다음 상위 단계 FEC 레벨을 채택한다. 패킷 손실에 대한 즉각적인 반응은 RTT보다 빠르게 BER이 변화하는 무선 채널에서 채널의 상태를 잘못 예상하게 되어 과중한 정정 코드를 사용하게 된다. 이러한 오판의 영향을 최소화하기 위해 더 이상의 패킷 손실이 발생하지 않으면 FECA는 하위 FEC 레벨로 다시 되돌아간다.

하위 레벨로 하향하는 적절한 탈퇴시간(drop time)을 결정하기 위해, FECA는 사용하는 모든 FEC 레벨에는 그 레벨에서 언제 다음 하위 레벨로 탈퇴하는 시기를 결정하는 탈퇴 타이머가 있다. 이러한 탈퇴 타이머는 지수적 백오프(exponential back-off) 알고리즘에 의해 관리된다. 패킷이 손실될 때마다 FECA는 다음 상위 레벨에 가입하게 되면, 이때 채택된 새로운 상위 레벨의 탈퇴 타이머는 가중치  $\alpha$  ( $>1$ )를 곱하여 최대  $T_{max}$  까지 지수적으로 증가시킨다. 이러한 동작은 FECA가 어느 한 레벨이 빈번히 채택되면, 이 레벨의 탈퇴 타이머아웃 시간이 증가되고, FECA는 패킷 손실이 없는 상황에서는 이 레벨로 안정화된다. 즉 이 두 변수  $\alpha$ 와  $T_{max}$ 는 사용중인 현재 FEC 레벨을 낮추어 채널 상태가 개선되었는 지를 검색하는 검색 빈도수를 결정한다. 일례로,  $\alpha$  값이 작으면 타이머의 값이 느리게 증가되어 현재 사용하는 FEC 레벨에서 빈번히 하향되는 효과가 있다.

FECA에는 현재 채택되지 않은 FEC 레벨들의 탈퇴 타이머를 지수적으로 감소시키는 하나의 검사 타이머(polling timer)가 있다. FEC 레벨에 가입할 때마다 탈퇴 타이머를 증가하는 것이 학습에 해당되며, 다른 FEC 레벨들의 탈퇴 타이머값을 감소하는 것은 더 이상 유효하지 않는 과거의 학습 내용을 잊는 것에 해당된다. 이를 위하여, 검사타이머가 매  $T_p$ 을 초과할 때마다, FECA는 붕괴 가중치(decay

factor)  $\beta$  ( $<1$ )를 현재 사용중인 FEC 레벨을 제외한 다른 레벨의 탈퇴 타이머에 곱해주어 최소  $T_{min}$ 까지 감소시킨다. 즉 FECA가 어떤 레벨을 채택해서 더 이상 패킷 손실이 발생하지 않을 때는 채널 상태가 좋아진 것을 의미하고, 한번 하향하게 되면 다음의 모든 하위 FEC 레벨들을 빠르게 재검색할 필요가 있다.

(그림 6)에서는 예를 통해서 현재 FEC 레벨  $L_{cur}$ 를 채널의 변화에 따라 적응적으로 변화시키는 FECA의 동작을 설명한다. 먼저 FECA는  $L_{cur}$ 을 처음 세 개의 패킷들이 연속적으로 손실되는  $3T_r$  ( $T_r$ : 링크계층의 재전송 타임 아웃시간) 동안에는 0에서 3으로 증가한다. 다음은 성공적으로 전송되므로 FECA는 레벨 3의 탈퇴 타이머가 초과할 때까지 레벨 3을 유지한다.  $S_3$  시간뒤에 탈퇴 타이머가 초과되면 채널상태가 점점하기 위해  $L_{cur}$ 을 레벨 2로 낮춘다. 이때 패킷 손실이 다시 발생하므로 FECA는  $L_{cur}$ 을 레벨 3으로 복원하고 레벨 3의 탈퇴 타이머 값을  $\alpha$  배수만큼 증가한다. 이 동작과 병행하여 감시 타이머는  $T_p$ 가 초과했을 때마다 다른 레벨들의 탈퇴 타이머 값을  $\beta$  배만큼씩 계속적으로 감소시킨다.



(그림 6) FECA의 동작 예제

### 5. 무선 채널의 전송 에러 시뮬레이션 방법

최근, 무선네트워크이 인터넷으로 통합되면서 무선 채널의 버스티 에러가 상위계층 알고리즘의 성능에 미치는 영향을 활발히 연구하기 시작했다. 이러한 추세 맞추어 패킷 레벨 네트워크 시뮬레이터[13, 14]에는 유무선 네트워크 관련 알고리즘들과 다양한 무선 채널의 모델이 포함되기 시작했다. 참고로 무선 채널의 다양한 특성으로 인해 각 무선 네트워크의 성능 분석을 위해서 이들 다양한 모델중 알맞는 것을 선택해야 한다.

일례로, 현재 ns-2의 버전 2.1b8a[14]에는 세 개의 광대역 페이딩 분석 모델(자유 공간, 두 신호 지면 반사(two-ray ground reflection) 그리고 웨도잉(shadowing) 모델)과 하나

의 협대역 페이딩 모델(Ricean 분포)[15]이 구현되어 있다. 이러한 모델을 이용하여 ns는 수신된 패킷들의 평균 신호 파워를 계산하고, 계산된 신호 출력과 수신 임계치를 비교하여 패킷 손실을 확정적으로(deterministically) 또는 확률적으로 결정한다. 현재 이러한 방법은 패킷의 전송 지연(transmission delay)시간동안 내내 같은 페이딩이 발생한다는 가정하고 있어 패킷 크기와 관계없이 같은 패킷 손실률이 적용되는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 Holland는 패킷의 전송 지속 시간이 현재 계산된 협대역 페이딩 지속 시간보다 큰 경우에는, 협대역 지속 시간이 초과할 때마다 Ricean 분포 확률을 이용해서 다시 신호 출력을 계산한다.

또한 무선 채널 상태를 보다 정확하게 시뮬레이션하기 위해서, 패킷 시뮬레이터에서는 다음의 두 가지 방식을 사용할 수 있다. 즉, 임의의 특정 무선 네트워크를 시뮬레이션하기 위해 실제 무선 네트워크 상에서의 수집한 데이터를 기반으로 하는 table-driven 방식[16]과, 일반적인 채널의 특성을 자세히 시뮬레이션하기 위한 채널 시뮬레이터[17, 18]가 그것이다. 이러한 방식들은 손상된 비트의 위치와 손상된 비트 수 등 비트 레블 에러를 상세히 시뮬레이션할 수 있는 장점이 있다 그러나 전자는 어느 특정한 네트워크의 데이터를 기반으로 채널 에러를 모델링했기 때문에 일반적인 무선 네트워크에서는 적용되지 않는 단점이 있고, 채널 시뮬레이터는 계산량이 과도하다는 단점이 있다.

비록 패킷 레블 에러 모델이 대다수 무선 관련 알고리즘 평가에 알맞지만, 비트 레블의 상세한 모델링(손상된 비트의 수와 손상된 비트들의 위치 등)을 요구하는 FEC와 같은 링크 레블 알고리즘의 평가에는 적당하지 않다. 또한 위의 두가지 방식 또한 특정 네트워크만을 모델링하며, 과도한 계산량이 요구되기 때문에 적당하지 않다. 본 논문에서는 비트 레블 에러의 모델링을 위해서 Gilbert 채널 모델인[19] 두 상태 Markov 체인을 이용하였다. 이 Markov 체인은 이전의 연구자들이[6, 20] 링크 레블 ARQ와 FEC를 연구할 때 무선 채널을 모델링할 때 사용되었다. 두 상태 Markov 체인은 버스티 오류를 나타내는 데, 한 상태는 짧은 기간의 높은 오류를 상태를 다른 상태는 긴 기간의 낮은 에러를 상태를 나타낸다. 이 두 상태들은 각각 광대역과 협대역 페이딩에 각각 대응된다고 생각할 수 있다. 이 방법은 특정한 무선 환경을 대표하지는 않지만, 일반적인 무선 채널의 상태를 나타낸다.

ns-2에서 FEC와 무선 에러 생성 부분은 무선 네트워크의 프로토콜 스택(stack)중의 모듈(module)로 구현된다. 참고로 ns-2에서는 하나의 프로토콜 계층이 하나의 모듈로 구현된다. 송신자가 패킷을 송신할 때, FEC 계층은 송신단에서는 정해진 FEC 레블의 정정 코드의 크기에 따라 전송되는 패킷의 크기를 증가하고, 하위 무선 에러 모델은 손상

된 비트수를 확률적으로 계산하여 이를 패킷 헤더에 기록한다. 수신측의 FEC 모듈은 정해진 FEC의 정정 능력과 수신된 패킷의 손상여부를 비교하여 패킷의 복원 여부를 결정한다. 복원될 수 있는 패킷들은 상층의 MAC 계층으로 이동되며, 그렇지 못한 패킷들은 버려진다.

## 6. 시뮬레이션 평가

이 절에서는 시뮬레이션을 통하여 송/수신자 정지하고 있는 상태와 수신자가 이동하는 상태에서 각각 FECA 성능을 평가하였다. 먼저, 송/수신자가 정지되어 있는 환경에서 FECA의 성능 평가를 한다. 이를 위하여, 무선 채널의 버스트 오류를 나타내는 두 상태 Markov 체인에서 높은 BER을 나타내는 on상태는 (5%, 10ms)로, 낮은 BER을 나타내는 off상태는 ( $x$ , 1s)로 결정한다. 이때  $x$ 는 0에서 3%의 범위의 값을 갖는 변수이다.

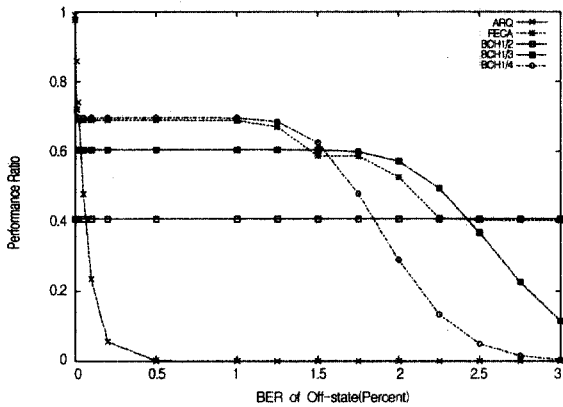
(그림 7)에서는 off상태의 BER 값인  $x$  값을 변화하면서 FECA의 성능을 ARQ를 포함한 세계의 정적 FEC 알고리즘(1/4BCH, 1/3BCH, 1/2BCH)[21]들과 비교한다. 참고로 BCH(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)는 다중 에러를 정정하기 위한 해밍(Hamming) 코드의 변형이다. (그림 7)의  $y$  축에 표시된 성능 비율은 각 알고리즘의 성능을 에러가 없는 채널에서의 최대 성능으로 나눈 비율이다. 성능은 주어진 시간내에 전송된 총 데이터 비트들이며, 이때 시뮬레이션한 네트워크 구조는 하나의 송신자가 1023바이트 패킷을 512kbps의 무선 802-11b MAC 채널을 통해서 수신자에게 계속적으로 전달하는 구조이다. (그림 7)의 각 곡선은 5번 시뮬레이션의 평균 값을 나타내는 데 한번 시뮬레이션은 100초동안 실행하였다. 이러한 측정치의 편차는 1%보다 작기 때문에, 측정치의 컨피던스 간격(confidence interval)은 (그림 7)에는 표현하지 않았다.

(그림 7)의 ARQ의 재전송 방식은 802.11b 재전송 방식으로, stop-and-wait와 백오프(back-off) 알고리즘으로 특징질 수 있다. 이 실험에서는 MAC 프로토콜 특성의 의존하지 않기 위해서 RTS, CTS 그리고 ACK과 같은 제어 패킷이 아닌 데이터 패킷들만이 무선 채널의 버스트 에러에 손상된다고 가정하였다. 1/4, 1/3, 1/2 FEC 코드를 위해서는, BCH(1023, 768, 26), BCH(1023, 708, 34) 그리고 BCH(1023, 523, 55)를 사용하였다. 여기에서 괄호안의 세 값들은 데이터와 정정 코드를 포함한 총 비트 수, 데이터 비트 수, 그리고 복구할 수 있는 비트 수를 각각 나타낸다. FECA는 0, 1/4, 1/3, 그리고 1/2 레블중 한 레블을 동적으로 선택하며, FECA의 변경가능한 파라미터  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_p$ 들은 각각 2, 0.9, 1s, 6ms로 정하였다. 이때 6ms를 선택한 이유는 6ms가 이 실험의 802.11b 네트워크 구조에서 최소 재전송 타임 아웃 시간이기 때문이다.



(그림 7)에서 off상태 BER가 증가함에 따라 ARQ 성능이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. BER가 0.5%에 도달하며, 대부분의 패킷들이 손상되므로, ARQ의 재전송 메카니즘은 이러한 에러율이 높은 무선 채널에서는 비효율적이다. 0.1% BER은 평균적으로 1023비트 프레임에서 1비트가 손상되는 것을 의미한다. 이에 반해 세 정적 FEC 알고리즘들은 off상태의 BER이 0.1%미만일 때는 정적 코드의 부하로 인해 ARQ에 비해 성능이 떨어진다. 그러나 에러율이 0.1%이상일 때는 1/4와 1/3BCH의 성능은 각각 1.25%와 2%의 하락(cutoff)지점 전까지는 일정하다. 마지막으로 1/2 BCH는 다른 코드에 비해 에러율이 낮을 때는 성능이 저하되나, 강한 정적 능력 때문에 높은 에러율 범위에서는 성능이 향상된다.

마지막으로, FECA와 다른 알고리즘들을 비교하였을 때, 주기적인 짧은 기간동안 지속되는 높은 BER의 변동에도 불구하고 FECA는 FEC 레블을 무선 채널의 평균 BER 변화에 적절하게 적응시키는 것을 확인할 수 있다. 즉, 네개의 구간, [0, 0.5%], [0.5%, 1.5%], [1.5%, 2.275%], [2.275%, 3%]에서 각각 ARQ, 1/4BCH, 1/3BCH, 1/2BCH의 정적능력을 선택함으로써, FECA는 전 구간에서 최상의 성능을 거두었다. 그러나 FECA가 이들 네 개의 정적 복구 알고리즘 보다는 약간의 성능 저하가 있는 데, 이는 FECA의 동적 적응에 따른 부하에 기인한다. 즉 FECA는 높은 BER 상태때에 상향된 FEC 레블이 off상태에서도 한동안 유지되기 때문이다.

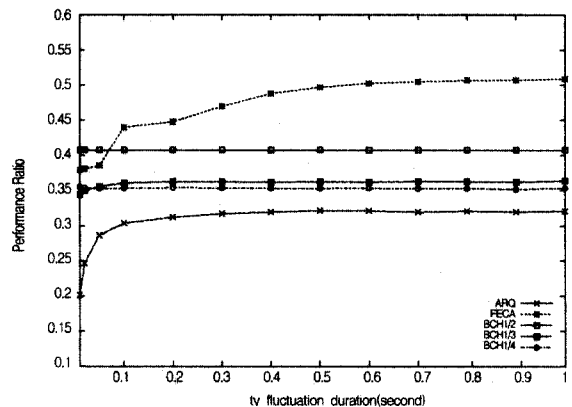


(그림 7) 무선네트워크에서의 다섯 개의 에러 정적 알고리즘의 성능

두 번째 실험에서는 수신자가 두 장소사이를 계속 움직일 때 FECA의 성능을 평가한다. 위의 실험에서 수신자가 한 장소에 머물러 있는 환경을 두 상태 Markov체인으로 모델링 하였으므로, 이러한 이동 무선채널은 두 개의 두 상태 Markov체인으로 나타낸다. 각각의 두 상태 Markov체인은 (5% BER, 5ms), (0.3% BER,  $t_b$ ) 그리고 (5% BER, 5ms), (3% BER,  $t_b$ )으로 정하고, (그림 8)의 x축 변수인  $t_b$ 는 10ms에

서 1s범위의 값을 갖는다. 두 개의 두 상태 Markov체인의 전이 확률은 0.7로, 그리고 같은 Markov체인에 머물 확률은 0.3으로 정하였다. 또한 단기 BER 변동에 FECA가 빠르게 적응하기 위해 이 실험에서는  $T_{max}$ 를 100ms로 정하였다.

(그림 8)에게서, FECA를 제외하고 다른 네 개의 정적 복구 알고리즘들은  $t_b$ 값에 상관없이 일정한 성능을 제공하는 것을 알 수 있다. 구체적으로는, 1/3BCH와 1/4BCH는 거의 같은 성능을 보여주고 있는 데, 이는 3% BER상태에서 같은 수의 패킷들이 손실되기 때문이다. ARQ는 낮은 에러상태의 지속 시간이 커질수록 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. FECA도  $t_b$ 가 커짐에 따라 계속적으로 성능이 향상되는 데, 1s지점에서 1/2BCH보다 최대 12%까지 성능이 향상된다. 이러한 이유는 변동 BER 상태가 오랜 시간동안 지속되면, FECA는 각 상태에서 가장 적합한 FEC 레블에 안정적으로 적용되어 성능이 향상되기 때문이다.  $t_b$ 가 50ms 이하일 때는 BER이 빠르게 진동되는 상태를 의미하며, 이때 FECA는 ARQ, 1/3BCH, 1/4BCH 보다 성능이 높지만 1/2BCH보다는 성능이 낮다. 하나의 패킷을 성공적으로 수신하기 위해서는 약 6ms가 소요되며, 50ms는 약 9개의 패킷을 송신할 수 있는 시간이다. 이는 FECA가 안정화되어 성능 향상을 달성하기 위해서는 임의 BER 상태는 9 RTT 이상은 지속되어야 한다는 것을 의미한다. 마지막으로 BER이 50ms보다 더 빠르게 진동을 한다면 FECA가 안정화하지 못하고 진동하게 되어 성능이 저하된다.



(그림 8) 이동 무선 채널에서의 다섯 개의 에러 정적 알고리즘의 성능

### 7. 결 론

본 논문은 적응적 FEC 알고리즘인 FECA를 제안했는데, FECA는 성능을 향상시키기 위해 채널의 상태에 따라 동적으로 신뢰성과 효율성을 교환할 수 있는 알고리즘이다. 본 논문에서는 센서 네트워크 실험을 통해 저 출력 라디오 무선 채널의 비트 레블 에러의 특성을 평가하였으며, 시뮬레이

션을 이용하여 기존의 정적인 FEC 기법과 FECA의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 실험 결과에 의하면, BER이 빠르게 변하지 않은 상태의 다양한 에러 분포도에서는 FECA는 다른 정적인 FEC나 ARQ알고리즘에 비해서 성능이 향상되었다. 현재 FECA를 UCB모트[22]에 구현중에 있으며, 앞으로는 시뮬레이션이 아닌 실제 센서 네트워크에서 FECA의 성능을 측정할 것이다.

참 고 문 헌

[1] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, and D. Ganesan., "Building Efficient Wireless Sensor Networks with Low-Level Naming," www.cs.ucsd.edu/sosp01/papers/heidemann.pdf SOSP01, October, 2001.

[2] T. S. Rappaport., "Wireless Communications : Principles and Practice," Prentice Hall, 1996.

[3] GSM 05.03 Channel coding.

[4] S. Lin and D. J. Costello, "Error Control Coding," Prentice Hall, 1983.

[5] J. C. Bolot, S. Fosse-Parisis, and D. Towsley, "Adaptive FEC-Based Error Control for Internet Telephony," Infocom'99, pp.1453-1460, April, 1999.

[6] P. Lettieri and M. B. Srivastava., "Adaptive Frame Length Control for Improving Wireless Link Throughput, Range, and Energy Efficiency," Proceedings of Infocom'98, pp. 564-571, April, 1998.

[7] G. Wu, C-W. Chu, K Wine, J. Evans, and R. Frenkiel. "WINMAC : A Novel Transmission Protocol for Infostations 49<sup>th</sup>," IEEE Vehicular Conference Proceeding, pp.1340-1344, May, 1999.

[8] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, "A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks," ACM SigMobile, pp.236-250, July, 2001.

[9] Sklar. B., "Digital Communications : Fundamentals and Applications," Prentice Hall, 2001.

[10] TR100 Chip manual, http://www.rfm.com.

[11] http://www.csl.sony.co.jp/person/morelos/ecc/codes.html.

[12] S. McCanne, V. Jacobson, and M. Vetterli., "Receiver-driven Layered Multicast," Proceedings of the SIGCOMM Vol.26, No.4, pp.117-130, 1996.

[13] M. Takai, R. Bagrodia, A. Lee, M. Gerla, "Impact of Channel Models on Simulation of Large Scale Wireless Networks," Proceedings of MSWiM'99, pp.7-14, August, 1999.

[14] Wireless and Mobility Extensions to NS-2, http://www.monarch.cs.cmu.edu/cmu-ns.html.

[15] R. J. Punnoose, P. V. Nikitin, and D. D. Stancil, "Efficient

Simulation of Ricean Fading within a Packet Simulator," Proceedings of VTC'00, pp.764-767, September, 2000.

[16] A. Kumar and R. Gupta, "Capacity Evaluation of Frequency Hopping Based Ad-hoc Systems," Proceedings of SigMetrics01, pp.133-142, June, 2001.

[17] C. M. Keller, "Generic Channel Simulator," MIT Lincoln Laboratory Project Report AST-46, August, 1997.

[18] Rappaport, T. S., S. Y. Seidel, and K. Takamizawa., "Statistical Channel Impulse Response Models for Factory and Open Plan Building Radio Communication System Design," IEEE Transactions on Communications, Vol.COM-39, No.5, pp.794-806, May, 1991.

[19] M. Zorzi. "Performance of FEC and ARQ Error Control in Bursty Channels under Delay Constraints," Proceedings of VTC'98, pp.1390-1394, May, 1998.

[20] E. N. Gilbert, "Capacity of a Burst-Noise Channel," Bell Syst. Tech. J., Vol.39, pp.1253-1266, Sept., 1960.

[21] W. Peterson and E. Weldon, Jr., "Error-Correcting Codes," 2<sup>nd</sup> Edition, The Massachusetts Institute of Technology.

[22] J. Hill, R. Szweczyk, A. Woo, S. Hollar, A. Culler, and K. Pister, System Architecture Directions for Network Sensors, Proceedings of the 9<sup>th</sup> international conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, pp.93-104, Nov., 2000.



안 종 석

e-mail : jahn@dgu.edu

1983년 서울대학교 전자공학과 졸업(학사)

1985년 KAIST 전기및 전자 공학과 졸업 (석사)

1985년~1989년 삼성전자 주임 연구원

1995년 USC(University of Southern California) 컴퓨터 공학과 졸업(박사)

1995년~1996년 삼성전자 선임 연구원

1996년 현재 동국 대학교 컴퓨터 공학과 부교수

2001년~2002년 USC/ISI 교환 연구원

관심분야 : 컴퓨터 네트워크 시뮬레이션, 무선 통신, 플로우 콘트롤 알고리즘, 라우팅 알고리즘

John Heidmann

e-mail : johnh@isi.edu

He received a B.S. degree from the University of Nebraska-Lincoln and M.S. and Ph.D. degrees from UCLA. He is currently a computer scientist at USC/ISI and a research assistant professor at USC. His interests are at networking protocols, simulation, traffic modeling and embedded system.