

# 손실이 있는 무선 링크에서의 경쟁기반 전달방식 분석

## (An Analysis of Contention-Based Forwarding in Lossy Wireless Links)

나 종근<sup>†</sup>      김 종 권<sup>\*\*</sup>  
(Jongkeun Na)      (Chong-kwon Kim)

**요약** 무선 애드-혹 망에서 경쟁기반 전달방식은 다중 수신자 중에서 채널상태가 최적인 수신자를 선택하므로 전송실패율을 낮춘다. 그러나, 경쟁기반 전달방식은 다중 수신자간에 동시전송에 따른 충돌문제로 인하여 전송지연을 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 손실이 있는 무선 링크 환경에서 경쟁기반 전달방식이 경험할 수 있는 지연 및 충돌을 반영한 분석모델을 제시한다. 분석모델을 통해서 무선링크모델 및 지연모델에 따른 단일-홉 전송에서의 기대되는 전송지연(delay)과 목적지로의 전진(progress)을 구한다. 분석결과로써 최적의 지연 및 전진을 얻기 위해서는 무선링크의 특성이 고려된 지연모델이 선택되어야 함을 밝힌다.

**키워드** : 무선 네트워크, 멀티홉 포워딩, 경쟁기반 전달방식

**Abstract** Contention-based forwarding in wireless ad-hoc networks reduces transmission failure rate by selecting one receiver with good channel among multiple receivers. However, contention-based forwarding may increase transmission latency due to the collision problem caused by the simultaneous transmission among multiple receivers. In this paper, we present an analytic model that reflects the delay and collision rate of contention-based forwarding in lossy wireless links. Through the analytic model, we calculate the expected delay and progress in one-hop transmission under given wireless link model and delay model. Based on the analytic results, we observe that delay model should be adapted to wireless link model for optimal performance in contention-based forwarding.

**Key words** : Wireless Ad-hoc Networks, Lossy Wireless Links, Contention-based Forwarding

### 1. 서론

지금까지 무선 애드-혹 망에서의 멀티-홉 전송에 관한 연구는 단일수신자선택 전달방식에 기반을 두고 이루어져 왔으나, 최근에 와서 무선링크의 브로드캐스트 특성을 이용하여 기회적 이득을 취할 수 있는 경쟁기반

전달방식에 관한 관심이 높아지고 있다[1-4]. 특히, 경쟁기반 전달방식은 안정된 품질(quality)을 제공하는 유선망과 다르게 링크의 품질이 동적으로 변화하는 무선 망 환경에 적합하다[5]. 이웃노드정보에 기초하여 다음 전달자를 결정하는 단일수신자선택 전달방식의 경우, 채널상태가 동적으로 변화하는 무선환경에서 패킷 재전송이 증가하는데 이는 상태변화이전에 획득된 이웃노드정보에 기초하여 다음-홉의 전달자를 선택하기 때문이다. 이에 반해, 경쟁기반 전달방식은 패킷전송 순간에 이를 수신한 노드중에서 전달비용이 가장 낮은 노드를 해당 패킷의 전달자로 선택한다. 따라서, 경쟁기반 전달방식은 이웃노드에 대한 정보를 필요로 하지 않으며, 위치와 시간에 따라서 변화하는 무선링크에서 전송순간에 채널상태가 좋은 수신노드를 이용하므로써 기회적 이득을 얻는다.

경쟁기반 패킷전달에 있어서 다음-홉 결정은 목적지

<sup>†</sup> 학생회원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부  
jkna@popye.snu.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수  
ckim@popye.snu.ac.kr

논문접수 : 2006년 8월 22일  
심사완료 : 2007년 11월 20일

Copyright©2008 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지 : 정보통신 제35권 제1호(2008.2)

까지의 배달비용(delivery cost)이 가장 적은 수신노드가 먼저 송신노드에게 응답하게 함으로써 이루어진다. 각 수신노드는 자신의 배달비용에 비례하게 지연을 경험한 이후에 송신노드에 응답한다. 따라서, 수신노드들 중에서 가장 적은 전달비용을 지불하는 수신노드가 전달자가 된다. 배달비용은 각 수신노드의 위치[2] 및 잔여 에너지[3], 또는 다른 라우팅 메트릭(예, min-hop)을 고려하여 결정될 수 있다. 배달비용에 따른 지연은 지연 모델에 의해서 결정된다. 경쟁기반 전달방식에 있어서 하나의 도전은 [1,4]에서 소개 되었던 것처럼 경쟁구간에서의 응답지연을 최소화하고 동시에 하나 이상의 수신노드가 거의 동시에 응답하고자 할 때 발생할 수 있는 충돌을 가능하면 낮추는 것이다.

본 논문에서는 무선링크의 특성에 기반하여 경쟁기반 전달방식의 성능을 분석하고자 한다. 분석의 초점은 경쟁구간에서의 응답 지연 및 충돌을 반영한 단일-홉 전송에서의 기대지연(expected delay)와 기대전진(expected progress)을 구하는데 있다. 제안된 분석모델을 통해서 무선링크모델(단순링크, 손실링크)에 따른 각 수신노드의 응답 시도율을 구하고, 지연모델(선형, 지수, 스프라인)에 따른 경쟁구간에서의 충돌율/성공율을 구한다. 기대되는 지연 및 전진은 지연모델과 응답 시도율 그리고 충돌율/성공율에 의해서 결정된다. 분석결과로써, 최적의 지연 및 전진을 얻기 위해서는 무선링크의 특성이 고려된 지연모델을 선택해야 한다. 단순링크모델(Simple Link Model)의 경우, 지수(Exponential) 지연함수가 낮은 지연 및 높은 전진을 보장하는데 반해서, 손실링크모델(Lossy Link Model)에서는 스프라인(Spline) 지연함수가 좋은 성능을 보인다.

2장에서 배경지식으로써 손실이 있는 링크모델 및 경쟁기반 전달방식의 특징을 기술한다. 3장에서 무선링크의 특성 및 경쟁구간에서의 지연 및 충돌 특성을 반영한 경쟁기반 전달방식의 분석모델을 제안한다. 4장에서 주어진 무선링크모델 및 지연모델에 기반하여 경쟁구간에서의 응답 시도율과 충돌율/성공율을 구하고 이를 이용하여 경쟁기반 전달방식의 성능을 비교/분석한다. 5장에서 모의실험 결과를 보이며, 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. 연구 배경

### 2.1 무선 링크 모델

최근 무선망에 관한 실험연구에 따르면 기존의 분석이나 시뮬레이션에서 주로 사용되어 왔던 단순링크모델(즉, 전송자로부터 주어진 전송반경 R보다 가까운 거리에 있는 모든 노드는 오류없이 패킷수신이 가능한 링크 모델)은 실제 무선링크의 특성을 반영하지 못한다. [6]에 따르면, 실제 무선링크의 패킷수신율(PRR, Packet

Reception Rate)은 거리에만 의존하여 이분법적으로 결정되는 것이 아니라 대신, 넓은 구간에서 그림자 및 페이딩의 영향으로 인하여 확률/통계적으로 결정된다. 식 (1)의 PRR(d)은 MICA2 센서모트(Sensor Mote)의 응집력있는 FSK(Frequency Shift Keying) 변조와 NRZ(None-Return-to-Zero) 소스코딩을 적용할 때 거리에 따른 패킷수신율을 나타낸다. 여기서, d는 송신자와 수신자사이의 거리,  $\gamma(d)$ 는 거리 d에서의 SNR, f는 프레임 길이(바이트)을 의미한다. PRR은 라디오 특성(변조 방식, 소스코딩)에 따른 비트오류비율(BER, Bit Error Ratio)을 반영한  $\gamma(d)$ 의 함수이며,  $\gamma(d)$ 는 무선채널의 특성(패스손실지수 n, 그림자 효과  $\sigma$ , 노이즈)를 반영한다. 여기서,  $\gamma(d)$ 는 로그-노멀 그림자 패스 손실 모델(log-normal shadowing path loss model)[8]에 기반함을 가정한다.

$$PRR(d) = (1 - \frac{1}{2} \exp(\frac{\gamma(d)-1}{2 \cdot 0.64}))^{8f} \quad (1)$$

그림 1은 거리에 따른 PRR의 변화(식 (1)에 대한 Matlab 결과)를 보여준다. 실제 무선 링크는 넓은 영역의 전이영역(TR, Transitional Region)을 가지며, 이 영역에서의 패킷수신율은 확률적으로 0.9 보다 작고 0.1 보다 높다. TR에서 동일한 거리에서의 PRR이 달라지는 것은 채널상태가 시간에 따라서 변화한다는 것을 의미한다. 이것은 패킷 전달시 다음-홉을 선택하는데 있어서 그 순간에 PRR이 높은 노드를 선택함으로써 이득을 얻을 수 있으므로 시사한다. 본 논문에서는 [6]에서 얻어진 실제 무선 링크 특성을 반영한 손실링크모델(Lossy Link Model)을 이용하고자 한다. 다른 변조방식 및 소스코딩에 따른 PRR(d)의 계산식과 TR의 시작( $TR_s$ )와 끝( $TR_e$ )에 대한 계산식은 [6]에서 참조될 수 있다.

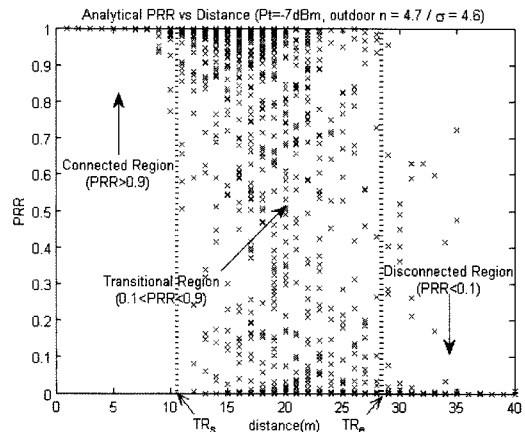


그림 1 전이영역(Transitional Region)의 존재

2.2 기획적 접근방식

기획적 접근방식은 전이영역(TR)을 갖는 무선 링크의 특성을 이용하고자 한다. 공간적 움직임이 없는 상황에서 전이영역 구간에서의 무선채널의 상태는 계속해서 변화한다고 볼 수 있다. 패킷 전달시, 미리 다음-홉을 선택하여 유니캐스트하는 단일수신자선택 전달방식은 패킷 재전송을 경험할 확률이 크다. 왜냐하면, 선택된 수신노드가 TR에 존재할 경우 채널상태가 좋음에서 나쁨으로 변화할 경우, 여러 번 재전송을 시도해야 패킷을 성공적으로 전달할 수 있다. 또한, 패킷수신을 보장하는 그림1의 연결된 영역(connected region)에 있는 노드를 전달자로 선택하는 경우는 기대되는 전진(advance)이 너무 작기 때문에 목적지까지 가는데 더 많은 홉을 필요로 하며, 이로 인해서 에너지 효율성 측면에서 손해를 본다. 따라서, 우리는 가능하다면 전이영역에 있는 노드를 전달자로 이용해야 할 필요가 있다.

기획적 접근방식은 기본적으로 경쟁기반 전달방식에 기초한다. 대표적인 경쟁기반 전달방식으로는 CBF(Contention Based Forwarding)[1], IGF(Implicit Geographic Forwarding)[2], SIF(State-free Implicit Forwarding)[3]가 있다. 공통적으로 CTS 지연 또는 RTS/CTS를 사용하지 않을 경우 ACK 지연을 이용한다. 그림 2는 CTS 지연을 이용한 패킷전송의 예를 보여주고 있다. 패킷을 전송하고자 하는 송신자(S)는 목적지와 전송할 데이터의 크기를 표시한 후 BRTS (Broadcast RTS)를 브로드캐스트한다. BRTS를 수신한 수신노드(R1,R2,R3)들은 자신이 유효한 전달영역에 있는지, BRTS를 받았을 때의 채널상태(SNR, Signal-to-Noise Ratio)에 기초하여 주어진 크기의 데이터 패킷을 수신할 수 있는지, 등을 검사한다. 전달자로서의 자격이 있다면, 자신이 배달비용에 비례하여 CTS 전송을 지연시킨다( $R1 < R3 < R2$ ). 그림에서 R1이 가장 작은 지연을 경험하므로 CTS 전송에 성공한다. 나머지 R2, R3는 R1의 CTS 전송이 성공했음을 인식하는 순간에 자신의 CTS 전송을 포기한다. 결과적으로 전송순간에 R1이 다음-홉의 전달자로 선택된다.

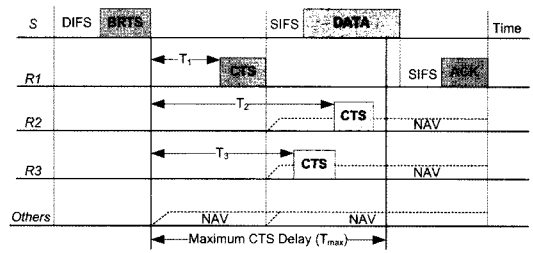


그림 2 CTS 지연을 이용한 경쟁기반 전달방식

2.3 지연 및 충돌 문제

단일수신자선택 전달방식과 비교하여, CTS 지연을 사용하는 경쟁기반 전달방식에 있어서 중요한 관심사항은 응답지연과 충돌이다. BRTS/CTS 교환에 따른 최대 지연시간( $T_{max}$ )을 작은 값으로 제한할 경우, 수신노드들간의 CTS 전송을 위한 경쟁이 심해지므로 그만큼 충돌가능성 또한 증가한다. 반대로,  $T_{max}$ 을 크게 주는 경우 CTS 충돌을 작게 유지할 수 있지만 대신 평균지연이 증가한다. 이러한 지연과 충돌사이의 이율배반성은 경쟁기반 전달방식의 분석을 복잡하게 만든다. 그림 2에서, 만약 ( $T_3 - T_1$ )이 csTime(Carrier Sensing Time)보다 작을 경우 충돌이 일어난다. 이때, S는 충돌로 인하여 R1이 보낸 CTS를 제대로 받을 수 없는 상황이 발생한다. 만약 다른 수신노드(R2)가 없다면, S는  $T_{max}$ 까지 기다렸다가 타임아웃되어 BRTS를 재전송한다. 반면, R2가 충돌로 인하여 R1과 R3로부터 전송된 CTS를 해석하지 못할 경우 자신의 CTS를 성공적으로 전송함으로써 전달자가 될 수 있다. 어떤 수신노드가 전달자로 선택되는냐에 따라서 단일-홉에서 전진(progress)이 달라진다. 높은 전진을 보장하는 수신노드가 높은 확률로 전달자가 되는 것이 바람직하다.

응답지연( $\tau$ )을 줄이기 위해서 최대지연시간( $T_{max}$ )을 작게 하면 그로 인해서 충돌확률이 높아진다. 따라서, 충돌에 따른 BRTS 재전송이 증가하므로 전체적인 지연은 더 커질 수 있다. 본 논문에서는 이러한 경쟁기반 전달방식의 성능을 분석하고자 한다. [4]에서 소개된 지연 및 충돌에 대한 개별적인 단순분석과는 다르게, 경쟁 구간에서의 지연모델에 따른 지연시간과 충돌 가능성을 함께 고려하여 단일-홉 전송에서 기대되는 지연과 전진을 구할 수 있는 분석모델을 제시한다.

3. 분석 모델

모든 노드는 자신의 위치를 알고 있으며 위치기반 라우팅을 수행하며, 노드의 분포는 평균 $\lambda$ 를 갖는 포아송(Poisson) 분포를 따른다고 가정한다[1,4,10]. 그림 3에서와 같이 위치기반 라우팅을 수반하는 경쟁기반 전달방식에서 어떤 BRTS 수신노드가 CTS를 지연시켜서 응답을 시도할 전제조건은 다음 두 사건이 동시에 발생할 경우이다. BRTS를 성공적으로 수신한 상태에서 현재 채널상태(즉, BRTS 수신시 SNR값)을 고려하여 주어진 크기의 데이터 패킷을 성공적으로 수신할 수 있어야 하며(이를 사건  $E_1$ 이라고 하자), 동시에 자신보다 더 낮은 배달비용(즉, 목적지까지의 거리)을 가진 수신노드가 없어야 한다(이를 사건  $E_2$ 라고 하자). 그러므로, 패킷 수신여부를 결정짓는 링크모델  $m_i$ 이 주어지면 ( $r, \theta$ )에 위치한 어떤 수신노드가 응답을 시도할 확률, 즉 응답

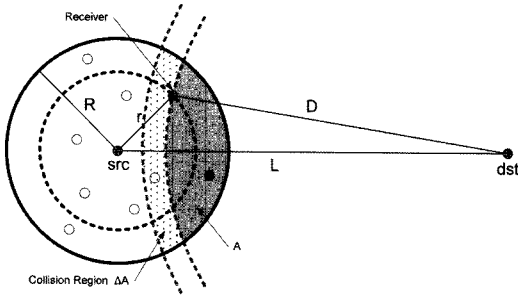


그림 3 수신노드의 위치에 따른 기하학적 해석

시도율은 식 (2)와 같이 결정될 수 있다.

$$AR_m(r, \theta) = P(E_1 \cap E_2) = P(E_1)P(E_2 | E_1) \quad (2)$$

송신노드가 방송한 BRTS를 수신한 이후 각 수신노드가 CTS로 응답할 때까지의 지연시간( $\tau$ )은 지연함수에 의해서 결정된다. 기본적으로 지연함수( $f$ )는 수신노드의 배달비용(delivery cost)에 따라 다음과 같은 필요충분조건을 만족해야 한다.

$$d_i \leq d_j \Leftrightarrow f(d_i) \leq f(d_j) \text{ for } \forall i, j \in \text{Receivers}$$

여기서  $d_n$ 는 수신노드  $n$ 의 배달비용을 의미한다. 결과적으로, 지연함수는 배달비용에 따라 증가하는 일대일 대응함수의 형태가 된다. 그림 3에서 기본적으로 영역  $A$ 가 크다는 것은 목적지로 전진하는 거리가 작으므로 배달비용이 높음을 의미한다. 그러므로, 영역  $A$ 는 배달비용으로 해석될 수 있다. 따라서, 본 분석에서의 지연함수는 위치에 따라 주어진 영역  $A$ 의 함수  $f(A): A \xrightarrow{f} \tau$ 로써 영역  $A$ 에 따라 증가하는 일대일 대응함수  $f^{-1}(\tau) = A$ 로 정의된다.

다중 수신자에 의한 응답경쟁으로 충돌이 발생할 가능성이 있다. 두 수신 노드  $i, j$ 의 지연시간을 각각  $\tau_i, \tau_j$ 라고 할 때,  $\tau_j - \tau_i < \delta_{cs}$ 이면 충돌이 발생한다. 여기서  $\delta_{cs}$ 는 캐리어 검출(carrier sensing)에 걸리는 시간을 의미한다. 따라서, 충돌이 일어날 확률은 그림 3에서와 같이 한 수신노드가 응답을 시도한 조건하에서 주어진  $\Delta A$  영역에 또 다른 수신 노드가 하나 이상 존재할 확률과 같다. 여기서 충돌영역  $\Delta A$ 는 지연함수의 역함수를 이용하여  $\Delta A = f^{-1}(f(A) + \delta_{cs}) - A$ 로 얻어진다. 그러므로, 지연함수  $f$ 가 주어진 경쟁기반 전달방식에서 각 수신노드의 응답이 시도되었을 때 충돌율(CR, Collision Rate)과 성공율(SR, Success Rate)은 식 (3)과 같이 정리된다. ( $r, \theta$ )에 위치한 수신노드의 응답성공율  $SR_{m,f}$ 은 시도율  $AR_m$ 과 지연함수  $f$ 에 의존하는  $CR_{m,f}$ 에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

$$CR_{m,f}(r, \theta) = (1 - e^{-\lambda \Delta A}) AR_m(r, \theta)$$

$$SR_{m,f}(r, \theta) = AR_m(r, \theta) - CR_{m,f}(r, \theta) = e^{-\lambda \Delta A} AR_m(r, \theta) \quad (3)$$

경쟁구간의 기대지연시간  $E_{m,f}[\tau]$ 는 식 (4)와 같이 정리된다. 기대지연은 성공율을 반영한 기본지연, 즉  $f(A)SR_{m,f}(r, \theta)$ 과 충돌율을 반영한 추가지연, 즉  $T_{\max} CR_{m,f}(r, \theta)$ 의 합으로 표현된다. 기본지연이 작더라도 충돌율이 클 경우 기대지연이 증가하는 효과를 반영한다. 단일-홉 전송에서의 기대전진  $E_{m,f}[p]$ 는 식 (5)와 같이 응답 성공율을 이용하여 구할 수 있다. 여기서, 목적지 방향으로 수신노드가 전진한 거리는 그림 3에서의 ( $L-D$ )와 같다.

$$E_{m,f}[\tau] = \int_{0-\pi/2}^R \int_{0-\pi/2}^{\pi/2} [f(A)SR_{m,f}(r, \theta) + T_{\max} CR_{m,f}(r, \theta)] d\theta dr \quad (4)$$

$$E_{m,f}[p] = \int_{0-\pi/2}^R \int_{0-\pi/2}^{\pi/2} [(L-D)SR_{m,f}(r, \theta)] d\theta dr \text{ where } D = \sqrt{L^2 + r^2 - (2Lr \cos \theta)} \quad (5)$$

경쟁구간에서의 지연과 제어패킷(BRTS/CTS/ACK) 및 데이터패킷(DATA) 전송시간을 포함한 단일-홉에서의 기대지연시간,  $E_{m,f}[\tau_h]$ 은 식 (6)과 같이 표현될 수 있다. 여기서,  $T_m$ 는 메시지  $m$ 을 전송하는데 걸리는 시간을 의미하며,  $k$ 는  $E_{m,f}[\tau]$ 를 제외한 고정된 전송시간을  $T_{\max}$ 로 환산하기 위한 비례상수이다. 단일-홉 전송에서의 기대전진(식 (5))과 기대지연(식 (6))을 구했으므로, 단-대-단(end-to-end)에서의 기대지연  $E_{m,f}[\tau_e]$ 는 식 (7)로 정리된다.

$$E_{m,f}[\tau_h] = T_{BRTS} + E_{m,f}[\tau] + T_{CTS} + SIFS + T_{DATA} + SIFS + T_{ACK} = E_{m,f}[\tau] + kT_{\max} \quad (6)$$

$$E_{m,f}[\tau_e] = E_{m,f}[\tau_h] \frac{L}{E_{m,f}[P]} \quad (7)$$

## 4. 성능 분석

앞장에서 기술된 분석모델에서, 경쟁구간에서의 응답 시도율은 주어진 무선링크모델( $m$ )에 의해서 결정되고, 충돌율과 성공율은 시도율의 분포와 주어진 지연함수( $f$ )에 의존함을 보였다. 여기서는 두가지의 링크모델( $m_1$ : 손실링크모델,  $m_2$ : 단순링크모델)과 3가지의 지연함수( $f_1$ : 선형,  $f_2$ : 지수,  $f_3$ : 스프라인)를 다루고자 한다.

### 4.1 링크모델에 따른 응답 시도율

응답 시도율은 어떤 무선링크모델을 가정하느냐에 따라 달라질 수 있다. 전이영역을 갖는 손실링크모델을 가정할 경우, 응답 시도율은 식 (2)와 같다. 여기서,  $L$ 은 송신자와 목적지간의 거리,  $D$ 는 수신자와 목적지간의 거리,  $R$ 은 라디오 전송범위, 최대전달영역은  $A_{\max} = \text{Area}(L, R, 0, 0)$

이다. 그림 3에서, 영역A에 존재하는 수신자들 중에서 최소한 하나 이상의 수신자가 패킷을 성공적으로 수신할 사건을  $E_3$ 라고 하자. 그러면, 식 (8)에서  $P(E_1)$ 는 거리  $r$ 에서의 패킷수신을 PRR이 되고, 조건확률  $P(E_2|E_1)=1-P(E_3)$ 로 표현되며  $P(E_3)$ 은 식 (9)와 같이 유도된다. 만약에 단순링크모델을 가정한다면,  $P_d(r)=1$ 과  $P_a(A)=1$ 이므로  $AR_{m_2}(r, \theta) = e^{-\lambda A}$ 가 된다.)

$$AR_{m_1}(r, \theta) = P(E_1)P(E_2 | E_1) = P_d(r)(1 - P(E_3)) = P_d(r)e^{-\lambda P_a(A)}$$

여기서,  $A = Area(L, R, r, \theta)$ ,  $P_d(r)$ 은 거리  $r$ 에서의 패킷수신율,  $P_a(A)$ 은 영역 A에서의 평균 패킷수신율을 나타냄.

$$P(E_3) = \sum_{n=1}^{\infty} [ \left( \frac{\lambda A}{n!} e^{-\lambda A} \right) \left( \sum_{x=1}^n \binom{n}{x} P_a(A)^x (1 - P_a(A))^{n-x} \right) ]$$

$$= 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{\lambda A}{n!} e^{-\lambda A} \right) (1 - P_a(A))^n \right]$$

$$= 1 - e^{-\lambda A} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[\lambda A(1 - P_a(A))]^n}{n!} \right)$$

by the power series of  $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$

$$= 1 - e^{-\lambda P_a(A)}$$

그림 4는 수신자의 위치에 따른 응답 시도율의 분포를 보여주고 있다. 여기서, 평균노드수는 20이며 각  $P_d(r)$ 과  $P_a(A)$ 은 [6]에서 주어진 전송파워( $P_t = -7\text{dBm}$ ), 채널모델( $n=4.6/\sigma=4.7$ ), 라디오모델(NRZ, Coherent FSK,  $f=50\text{bytes}$ ), 그리고 노이즈모델( $NF=-105\text{dBm}$ )을 적용하여, 수식 1을 통해서 계산된다. 송신노드로부터 멀리 떨어져 있는 수신 노드의 경우 자신보다 높은 우선순위를 가진 수신자가 거의 없음에도 불구하고 패킷을 수신할 확률 즉 PRR이 작으므로 응답 시도율이 떨어진다. 반대로, 가까이 있는 노드의 경우 PRR은 높으나 자신

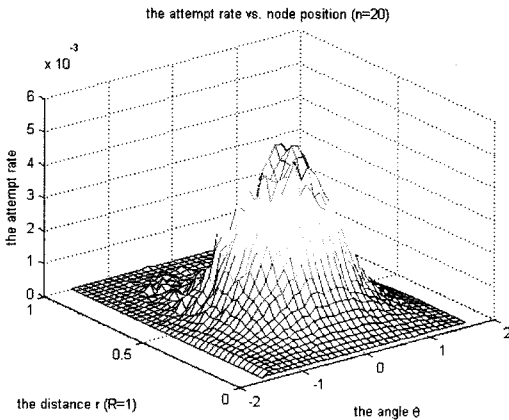


그림 4 손실링크모델에서의 응답 시도율 분포

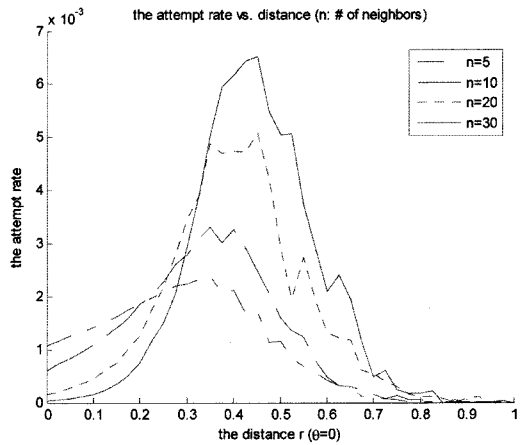


그림 5 손실링크모델에서의 평균노드수에 따른 응답 시도율

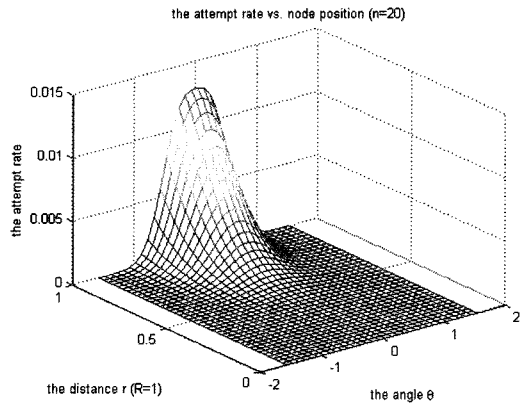


그림 6 단순링크모델에서의 응답 시도율 분포

보다 우선순위가 높은 수신노드가 있을 확률이 크므로 작은 응답 시도율을 갖는다. 결과적으로 우리는 전이영역(TR)에 있는 수신노드가 전달자가 될 확률이 가장 높음을 알 수 있다. 그림 5는 평균노드수를 다르게 했을 때의 응답 시도율을 보여 주고 있다. 노드밀도가 높아짐으로 해서 상대적으로 목적지로의 전진거리가 더 큰 수신노드의 응답 시도율이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7은 비교를 위하여 단순링크모델을 적용했을 때의 응답 시도율의 분포 및 평균노드수에 따른 변화를 보여준다. 응답 시도율의 분포는 링크모델에 따라서 차이가 크음을 알 수 있다.

#### 4.2 지연 모델

지연모델은 지연함수( $f$ )로 구체화된다. 본 논문에서는 [4]에서 소개된 선형(식 (9))와 지수(식 (10)) 지연함수 뿐만 아니라 전이영역을 고려한 스플라인(Spline) 지연함수(식 (11))를 정의한다. 이차 스플라인(Quadratic Sp-

1) [4]에서는 단순링크모델에 기반하여 지연 및 충돌을 분석했다.

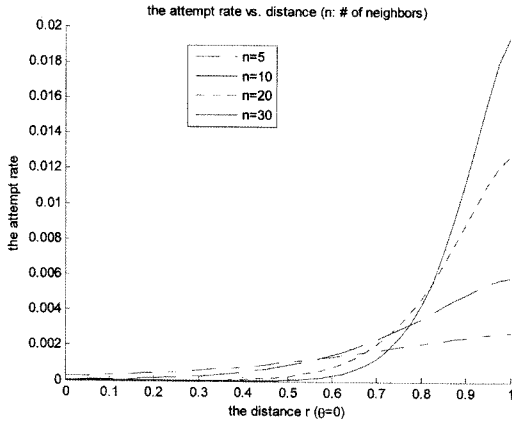


그림 7 단순링크모델에서의 평균노드수에 따른 응답 시도율

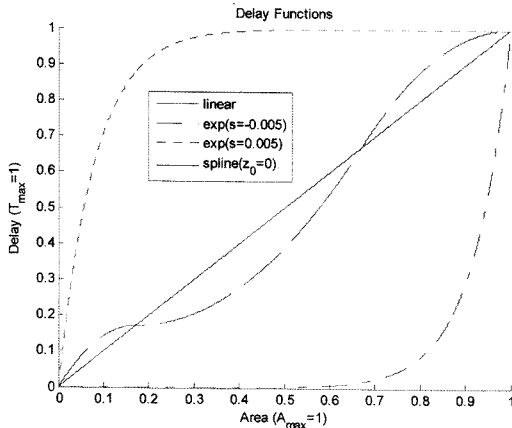


그림 8 지연모델에 따른 지연함수의 영역 대비 지연시간

line) 지연함수는 4개의 point로 정의되며 전이영역의 시작( $TR_s$ )와 끝( $TR_e$ )에 따라서 형태가 결정된다. 그림 8은 영역A에 따른 각 지연함수의 결과를 보여주고 있다. 수신노드 위치에 따른 영역A를 배달비용으로 정의함으로써 각 지연함수는 영역A에 비례하는 지연시간을 갖는다.

$$f_1(A) = T_{\max} \left( \frac{A}{A_{\max}} \right) \quad (10)$$

$$f_2(A) = T_{\max} \left( \frac{1 - e^{-sA}}{1 - e^{-sA_{\max}}} \right) \quad (11)$$

$$f_3(A) = \begin{cases} S_0(A) & \text{for } x_0 \leq A \leq x_1 \\ S_1(A) & \text{for } x_1 < A \leq x_2 \\ S_2(A) & \text{for } x_2 < A \leq x_3 \end{cases}$$

where  $S_i(x) = y_i + z_i(x - x_i) + \frac{z_{i+1} - z_i}{2(x_{i+1} - x_i)}(x - x_i)^2$ ,  $z_{i+1} = -z_i + 2 \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$

$$(x_i, y_i) = \begin{cases} (A_{\max}, T_{\max}) & \text{for } i = 0 \\ \left( \text{Area}(L, R, TR_s, 0), T_{\max} \left( \frac{\text{Area}(L, R, TR_s, 0)}{A_{\max}} \right) \right) & \text{for } i = 1 \\ \left( \text{Area}(L, R, TR_e, 0), T_{\max} \left( \frac{\text{Area}(L, R, TR_e, 0)}{A_{\max}} \right) \right) & \text{for } i = 2 \\ (0, 0) & \text{for } i = 3 \end{cases}$$

### 4.3 충돌율과 성공율

식 (3)의 충돌율(CR, Collision Rate)은 주어진 링크 모델과 지연함수에 따른 응답 시도율과 최대지연시간 ( $T_{\max}$ ) 대비  $\delta_{cs}$ 의 비율 그리고 평균노드수( $\lambda$ :노드밀도)에 의존한다. 예를 들어, 선형지연함수가 적용된 경우,  $\Delta A = A_{\max}(\delta_{cs} / T_{\max})$ 이므로  $CR_{m,f_i} = (1 - e^{-\lambda \Delta A (\delta_{cs} / T_{\max})}) \times AR_m$ 임을 알 수 있다. 다른 지연함수가 적용될 경우에도, 기본적으로 위 세가지 파라미터에 의해서 충돌율이 결정된다. 식 (3)에서 응답 시도율( $AR_m$ )이 정규화된 확률이므로 각 지연모델에 대한 기대충돌확률(ECP, Expected Collision Probability)과 기대성공확률(ESP, Expected Success Probability)은 다음과 같다.

$$ECP_{m,f} = \int_0^R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} CR_{m,f}(r, \theta) d\theta dr \quad \text{그리고}$$

$$ESP_{m,f} = \int_0^R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} SR_{m,f}(r, \theta) d\theta dr = 1 - ECP_{m,f}$$

그림 9와 그림 10은 손실링크모델에서의 각 지연모델의 기대충돌확률을 보여주고 있다. 그림 9에서 지수 지연모델의 경우,  $\delta_{cs}/T_{\max}=0.01$ 일 경우에도 0.4이상의 충돌확률을 보이는 반면, 선형 지연모델과 스프라인 지연모델은 낮은 충돌확률을 보인다. 모든 지연모델에 있어서  $\delta_{cs}/T_{\max}$ 가 0.3이상의 경우 0.7이상의 높은 충돌확률을 보임을 알 수 있다. 또한, 충돌확률에 있어서 스프라인 지연모델이 선형 지연모델 보다 항상 더 좋은임을 알 수 있다. 이것은 전이구간에서의 스프라인 지연함수의 기울기가 선형 지연모델의 그것에 비해 더 크므로 나타난 결과이다. 그림 10은  $\delta_{cs}/T_{\max}=0.1$ 일 때 평균이웃노드수에 따른 기대충돌확률을 보여 주고 있다. 예상했듯이, 평균노드수가 증가할 할수록 충돌확률 또한 증가한다. 다만, 지수 지연함수의 경우 증가폭이 더 크다. 그림 11과 그림 12은 단순링크모델을 적용했을 때의 기대충돌확률을 보여주고 있다. 손실링크모델에서와 달리,  $Exp(s=0.005)$ 가 가장 낮은 충돌확률을 보인다. 이는 단순링크모델에서의 응답 시도율이 높은 부분(그림 6 단순링크모델에서의 응답 시도율 분포 참조)에서 지연함수의 기울기가 높기 때문이다. 이러한 결과는 링크모델에 따른 응답 시도율의 분포에 따라서 충돌율을 최소화할 수 있는 최적의 지연함수를 선택해야 함을 시사한다.

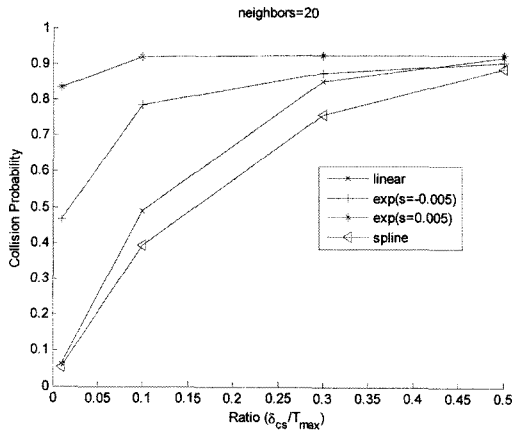


그림 9 손실링크모델에서의  $\delta_{cs}/T_{max}$  비율에 따른 기대충돌확률

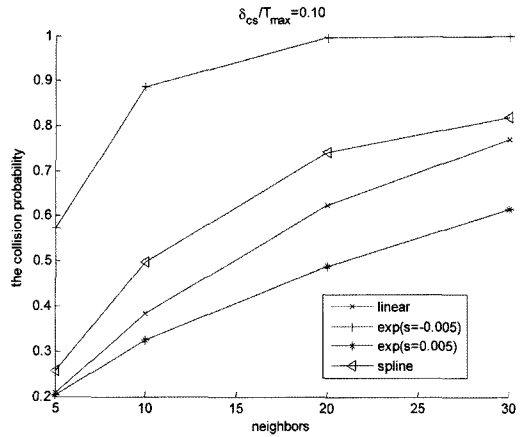


그림 12 단순링크모델에서의 평균이웃노드수에 따른 기대충돌확률

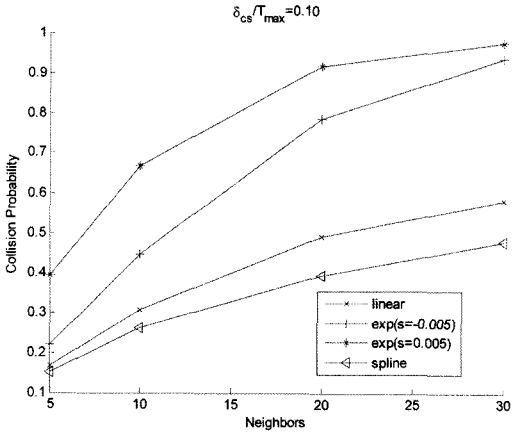


그림 10 손실링크모델에서의 평균이웃노드수에 따른 기대충돌확률

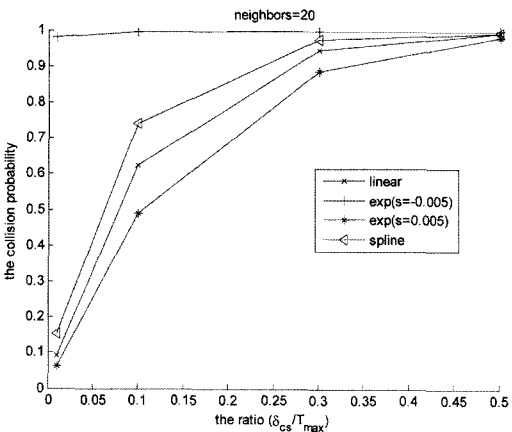


그림 11 단순링크모델에서의  $\delta_{cs}/T_{max}$  비율에 따른 기대충돌확률

#### 4.4 기대지연

경쟁구간에서의 기대지연(식 (4))은 응답 성공율과 충돌율을 모두 반영한 결과이다. 그림 13과 그림 14는 손실링크모델에서의 각각  $\delta_{cs}/T_{max}$ 와 평균이웃노드수에 따른 기대지연을 보여 주고 있다. 충돌율이 아주 작거나 ( $\delta_{cs}/T_{max}$ 이 0.01이하 또는 평균노드수가 10이하) 또는 아주 큰 경우,  $\exp(s=-0.005)$  지연함수는 다른 지연함수에 비해 상대적으로 작은 기대지연을 갖는다. 반면, 충돌율을 어느정도 허용하는 경우 스플라인 지연함수가 가장 좋은 기대지연을 보인다. 그림 14에서 스플라인 지연모델의 경우, 노드수가 증가하면서 기대지연이 감소한다. 이는 충돌율에 의한 추가지연이 늘어난 것에 비해 상대적으로 성공율에 의한 기본지연이 더 감소하기 때문이다.

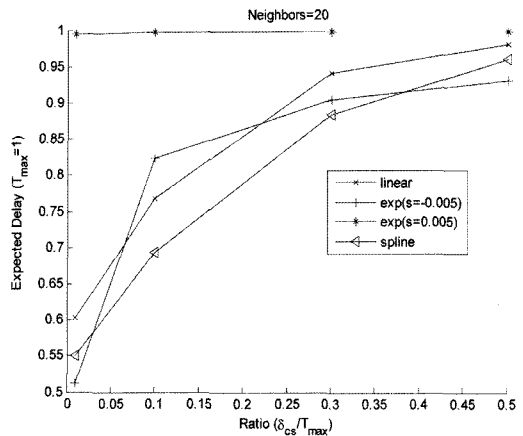


그림 13 손실링크모델에서의  $\delta_{cs}/T_{max}$  비율에 따른 기대지연

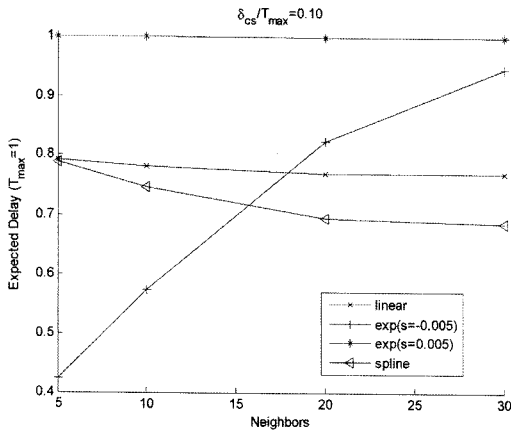


그림 14 손실링크모델에서의 평균이웃노드수에 따른 기대지연

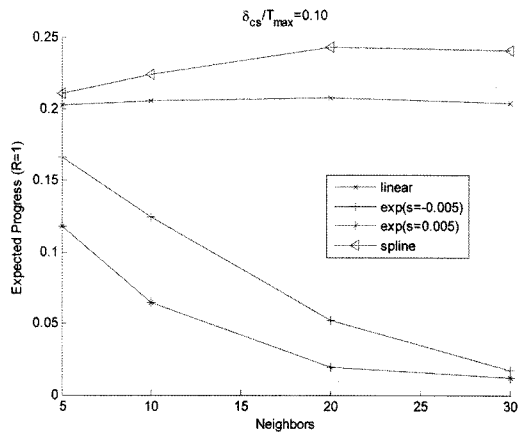


그림 16 손실링크모델에서의 평균이웃노드수에 따른 기대전진

4.5 기대전진

기대전진(식 (5))은 응답 성공율에 의해서 결정된다. 그림 15와 그림 16은 손실링크모델에서의 각 지연모델에 따른 기대전진의 결과를 보여준다. 그림 15에서 스프라인 지연모델의 경우, 응답 시도율이 상대적으로 높은 전이영역 구간에서의 충돌율을 최소화시킴으로써 선형 지연모델 보다 좋은 결과를 보인다. s=0.005인 지수 지연모델의 경우, 목적지로의 전진이 큰 구간(즉, 비연결 영역)에서 충돌율을 최소화할 수 있지만 반면 손실링크 모델에서 응답 시도율 자체가 작으므로 이득을 얻지 못한다. 반대로, s=-0.005인 지수 지연모델의 경우, 목적지로의 전진이 작은 구간(즉, 연결 영역)에서 충돌율을 최소화할 수 있는 지연함수의 기울기를 가지므로 높은 기대전진을 얻을 수 없다.

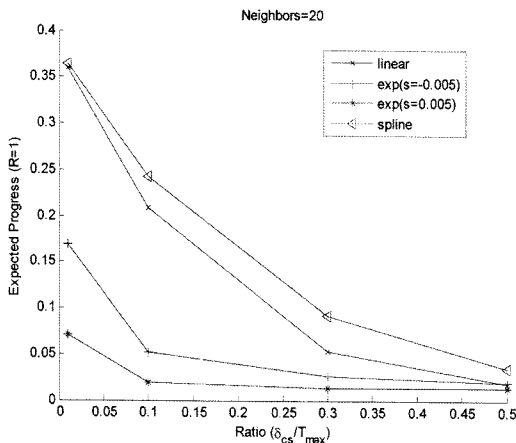


그림 15 손실링크모델에서의 delta\_cs/T\_max 비율에 따른 기대전진

4.6 요약

손실링크모델과 단순링크모델에서의 각 지연함수의 성능비교(기대지연 및 기대전진)를 통한 관찰내용을 정리하면 다음과 같다.

- 경쟁구간에서의 응답 시도율(=충돌율+성공율)은 주어진 링크모델로부터 유도되며 충돌율과 성공율은 지연 모델에 의해서 결정된다. 따라서, 링크모델에 적합한 지연모델을 사용해야 최적의 성능을 보장할 수 있다. 전이영역에서 높은 시도율을 보이는 손실링크모델의 경우, 이 구간에서 가장 작은 충돌율을 보이는 스프라인 지연모델이 다른 지연모델에 비해 기대지연 및 전진측면에서 우수함을 보인다. 반면, 전송거리 R내에서 완전 수신을 가정하는 단순링크모델의 경우, 높은 응답 시도율을 보이는 곳이 전송거리 R에 가까운 부분이며 그 부분에서의 충돌율을 적게 유발하는 지수 지연모델이 좋은 성능을 보인다.
- 경쟁구간에서의 응답 지연은 지연함수와 성공율의 곱으로 표현된 기본지연시간과 충돌이 발생한 경우 추가되는 충돌율에 비례한 추가지연시간의 합으로 모델링 된다. 경쟁기반 전달방식에서 기대되는 전진(progress)은 전달자로 선택되었을 때 의미가 있으므로 각 수신노드의 응답 성공율에 의해서 결정된다. 우리는 단일-홉 전송에서의 기대 지연 및 전진을 토대로 목적지까지 기대되는 홉-수(hop count) 및 지연을 예상할 수 있다.

5. 모의실험

4장에서 제안된 분석모델을 이용하여 링크모델과 지연함수의 연관성이 경쟁기반 전달방식의 성능에 미치는 영향에 대하여 기대 지연 및 전진측면에서 수치적으로



분석해 보았다. 이 장에서는 분석모델에 기반한 수치분석결과를 보완하기 위해 ns2[12] 시뮬레이션(버전 v2.26)을 이용하여 경쟁기반 전달방식의 성능을 분석하고자 한다.

**5.1 시뮬레이션 환경**

우리는 ns2에 경쟁기반 전달방식이 가능하도록 관련 802.11 MAC 코드를 수정했으며, 위치기반 라우팅 프로토콜인 GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)[11] 코드(ns2 v2.1b13)를 이식하여 사용했다. 그리고, 손실이 있는 링크를 모델링하기 위해서 섀도잉(shadowing)과 레일레이(Rayleigh) 페이딩 효과가 결합된 신호전파 모델[9]을 추가로 이식하여 이용하였다.

물리계층 및 MAC 관련 시뮬레이션 파라미터는 ns2에서 기본적으로 914MHz WaveLAN DSSS 무선 인터페이스에 따른 값들을 사용했다. 캐리어 센싱(carrier sensing)과 관련하여 802.11b SIFS(Short Inter-Frame Space)가  $\delta_{cs}=10\mu s$ 로 사용되며 최대지연시간은  $T_{max}=10*\delta_{cs}$ 로 설정되었다. 그림 17은 시뮬레이션에서 사용된 링크모델을 보여주고 있다. 전이영역(Transitional Region)을 갖는 링크모델을 에뮬레이트(emulate)하기 위해 패스손실지수  $n=2.3$ , 그림자 효과  $\sigma=4.6$ , 도플러 쉬프트(Doppler Shift) 1Hz가 사용되었다. 여기서 RxThreshold (-94dBm)는 수신 가능한 한계파워를 의미한다. 즉, 수신된 파워가 RxThreshold 보다 낮으면 데이터를 수신할 수 없다. 그림에서 50m 떨어진 노드의 경우 거의 모든 데이터를 수신할 수 있고, 150m 떨어진 노드의 경우 전이영역에 속하고, 250m 떨어진 노드는 대부분의 경우 데이터 수신에 어려움을 알 수 있다. 단순링크모델로는 Two Ray Ground 신호전파모델(유효전송반경 R=250m)이 사용되었다.

GPSR의 경우 비콘(beacon)메시지의 주기를 1초로 했고, 목적지에 가장 가까운 이웃노드를 선택하여 패킷

을 전달한다. 그리고, 1500m x 500m 크기의 랜덤(random) 토폴로지에 대하여 평균이웃노드수(node degree)로서 10(노드수 38개)과 20(노드수 76개)을 설정하여 각각 시뮬레이션을 수행한다. 소스노드를 위치(100,100)에 목적지노드를 위치(1400,400)에 고정하였고, 초당 4개의 UDP 패킷(512Bytes)을 생성한다. 각각의 지연모델에 대하여 실험이 행해졌으며, 시뮬레이션 결과는 총 10개의 랜덤 토폴로지에 대하여 실험한 결과값에 대한 평균으로 표시된다.

**5.2 시뮬레이션 결과**

시뮬레이션 결과로써 소스노드로부터 보내어진 패킷이 목적지 노드까지 도착할 때까지 경험한 평균지연시간 및 평균패스길이(홉-수)를 고려한다. 평균지연시간 및 평균패스길이는 각각 4장에서 수치적으로 분석한 단일-홉에서의 기대지연(=평균지연시간/평균패스길이) 및 기대전진(=소스와 목적지사이의 거리/평균패스길이)에 해당한다.

그림 18과 그림 19는 노드밀도가 낮은 경우와 높은 경우 대하여 링크모델 및 지연모델에 따른 평균지연시간의 결과를 보여주고 있다. 우선, 단순링크모델의 패킷 지연이 손실링크모델의 지연 보다 크게 작은 이유는 손실링크모델(그림 17 참조)에서 그림자 및 페이딩 효과에 의해서 MAC 프레임 (RTS/CTS/DATA/ACK) 교환에 있어서 손실(loss)이 발생하므로 이에 따라서 재전송이 빈번히 발생하기 때문이다. 따라서, 단순링크의 지연과 손실링크의 지연을 직접적으로 비교하지 말아야 한다. 그림 18과 그림 19에서 단순링크모델의 경우 지수형 지연함수가 가장 낮은 지연을 보인 반면 손실링크모델의 경우 선형 지연함수 및 스플라인 지연함수가 낮은 지연을 보인다. 이는 4장에서 수치적으로 분석한 내용과 일치하는 결과이다. 그리고, 그림 18과 비교해서 그림 19에서 노드밀도가 높아짐에 따라서 그림 14에서와 같이

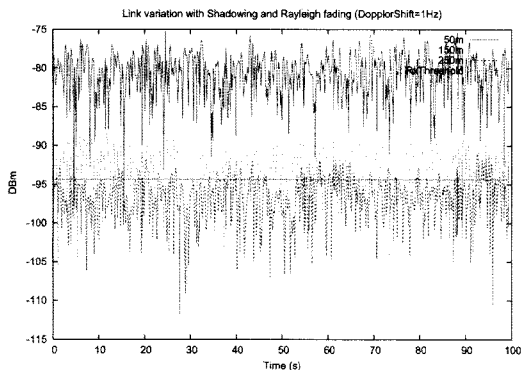


그림 17 그림자 효과 및 레일레이(Rayleigh) 페이딩을 갖는 링크모델

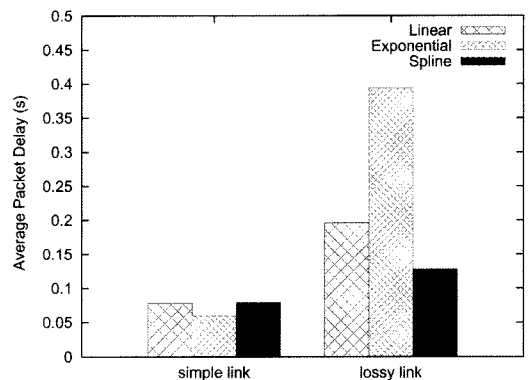


그림 18 평균 패킷 지연시간에 대한 결과(평균이웃노드 수:10)

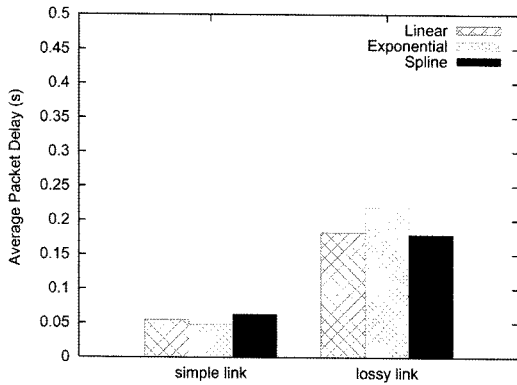


그림 19 평균 패킷 지연시간에 대한 결과(평균이웃노드 수:20)

각 지연모델에 대하여 평균지연이 낮아지는 경향을 파악할 수 있다.

그림 20과 그림 21은 노드밀도가 낮은 경우와 높은 경우 대하여 링크모델 및 지연모델에 따른 평균패스길이의 결과를 보여주고 있다. 단순링크모델(two-ray ground model)의 경우 패스손실(path loss)이 고려된 250m의 제한된 전송반경을 가지는 것에 비해 손실링크모델의 경우 채널상태가 좋은 경우 250m이상의 거리에 있는 노드에게도 패킷을 전달할 수 있다. 즉 손실링크모델에 의한 기회적 전송이 가능하다. 그림 20에서 전체적으로 단순링크모델 보다 손실링크모델의 평균패스길이가 작은 것은 손실링크에서의 기회적 전송능력과 작은 노드밀도가 원인이 된다. 그림 21에서 알 수 있듯이 단순링크모델에서 노드밀도가 증가될 경우 더 많은 이웃노드가 전달자가 될 수 있으므로 평균패스길이가 향상되므로 손실링크모델과 거의 비슷해진다.

그림 20과 그림 21에서 단순링크모델의 경우 지수 지연모델을 사용했을 때 가장 낮은 패스길이는 갖는데, 이는 4장에서 분석된 결과와 일치된다. 반면, 손실링크모

델의 경우 지연모델에 따라서 큰 차이를 보이지 않으며, 그림 21에서 노드밀도가 증가해도 평균패스길이는 줄어들지 않다. 이러한 결과는 4장에서 분석된 패킷수신율(PRR)을 정확히 결정할 수 있는 손실링크모델과 달리 시뮬레이션에서 사용된 손실링크의 경우, 좀 더 복잡한 채널상태변화를 경험하기 때문에 발생한다.

### 6. 결론

본 논문에서는 링크모델에 기반하여 경쟁구간에서의 각 수신노드의 응답 시도율, 충돌율/ 성공율을 모델링하였고, 이를 기반으로 단일-홉 전송에서의 기대지연 및 기대전진에 대한 수치분석을 행하였다. 또한, 3가지 지연모델(선형, 지수, 스플라인)에 대하여 지연 및 전진측면에서 비교/분석하였다.

제안된 분석모델은 주어진 무선링크모델에서 어떤 지연모델이 사용되었을 때 실제 네트워크에서 지연 및 전진측면에서 어느 정도 성능을 낼 수 있는지 파악하는 것을 가능케 한다. 본 논문에서 우리는 링크모델의 특성이 주어질 경우, 가능한 낮은 지연 및 높은 전진을 보장하는 지연모델을 찾을 수 있음을 보였다. 성능분석을 통해서, 단순링크모델을 적용하면 지수 지연모델이 더 좋은 성능을 보인 반면, 손실링크모델을 적용할 경우 전이 영역을 고려한 스플라인 지연모델이 기대되는 지연 및 전진 측면에서 우수함을 보였다. 또한, 모의실험을 통해서 링크모델과 지연모델이 경쟁기반 전달방식에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

### 참고 문헌

[1] Holger Fußler, Jorg Widmer, Michael Kasemann, Martin Mauve, Hannes Hartenstein, "Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks," Elsevier's Ad Hoc Networks, Vol.1, No.4, pp. 351-369, Nov. 2003.  
 [2] B. M. Blum, T. He, S. Son, and J. A. Stankovic,

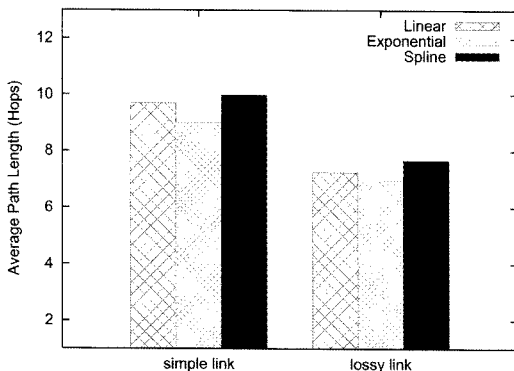


그림 20 평균 패스 길이에 대한 결과(평균이웃노드수:10)

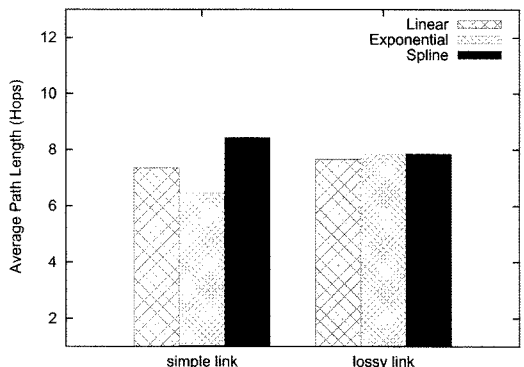


그림 21 평균 패스 길이에 대한 결과(평균이웃노드수:20)

- "IGF: A Robust State-Free Communication Protocol for Sensor Networks," TR-CS-2003-11, CS Department, University of Virginia, 2003.
- [3] Dazhi Chen, Jing Deng, Parmod K. Varshney, "A State-Free Data Delivery Protocol for Multihop Wireless Sensor Networks," in Proc. of IEEE Wireless Communications & Networking Conference (WCNC'05), Mar 2005.
- [4] Primoz Skraba, Hamid Aghajan, and Ahmad Bahai, "Distributed Passive Routing Decisions in Mobile Ad-Hoc Networks," in Proc. of IEEE Vehicular technology Conference (VTC'04), Sept. 2004.
- [5] Sanjit Biswas and Robert Morris, "Opportunistic Routing in Multi-Hop Wireless Networks," ACM SIGCOMM Computer Communication Review (CCR), Vol.34, No.1, pp. 69-74, Jan. 2004.
- [6] M. Zuniga and B. Krishnamachari, "Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links," in Proc. of IEEE International Conference on Sensor and Ad-hoc Communications and Networks (SECON'04), Oct. 2004.
- [7] Karim Seada, Marco Zuniga, Ahmed Helmy, Bhaskar Krishnamachari, "Energy-Efficient Forwarding Strategies for Geographic Routing in Lossy Wireless Sensor Networks," in Proc. of The International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (ENSS'04), pp. 108-121, ACM Press, 2004.
- [8] Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications," Second Edition, Prentice Hall.
- [9] C. Komninakis, "A Fast and Accurate Rayleigh Fading Simulator, In Proc. of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'03), Dec. 2003.
- [10] Martin Haenggi, "On Routing in Random Rayleigh Fading Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 4, Issue 4, pp. 1553-1562, July 2005.
- [11] B. Karp, H. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in Proc. of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'00), Aug. 2000.
- [12] Ns Notes and Documentation, Available from: <<http://www.isi.edu/vint/nsnam/>>, 2000.



김 종 권

1981년 서울대학교 산업공학과(학사). 1982년 미국 조지아 공과대학교 산업공학과(석사). 1987년 미국 일리노이 대학교 전산학과(박사). 1984년~1987년 IBM 산호세 연구소 연구조원. 1987년~1991년 미국 Bellcore 통신연구소 연구원. 1991년~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 차세대 인터넷, 초고속 라우터, 이동통신



나 종 근

1992년 아주대학교 전자계산학과 학사  
1995년 아주대학교 컴퓨터공학과 석사  
2007년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사. 2007년~현재 미국 USC 박사후과정. 관심분야는 라우팅 알고리즘 및 프로토콜, 무선 센서망