라스트 홉 무선 네트워크에서 TFRC의 성능향상을 위한 손실 구별 기법

(Loss Discrimination Mechanism for Improving the Performance of TFRC in Last-hop Wireless Networks)

정 규 민 † 구 자 헌 †
(Kyumin Jeong) (Jahon Koo)

정 광 수 ††
(Kwangsue Chung)

요 약 TFRC(TCP Friendly Rate Control)는 비디오 스트리밍 응용의 요구 조건을 만족시키는 혼잡제어 기법으로써, 손실 사건률과 왕복 지연 시간 등의 정보를 이용하여 전송률을 조절한다. 그런데 TFRC는 무선 네트워크에서 발생하는 손실을 모두 혼잡 손실로 판단하고 혼잡제어를 수행하기 때문에 성능이 저하되는 문제가 있다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 ECN(Explicit Congestion Notification) 정보를 이용하는 새로운 손실 구별 기법을 제안하였다. 실험을 통해 제안한 기법이 무선 네트워크에서 TFRC의 성능을 향상시킴을 확인하였다.

키워드 : TFRC, 혼잡제어, Wireless, 손실 구별 기법, ECN, SLD

Abstract The TFRC is a congestion control mechanism which supports the requirements of video streaming applications and controls its sending rate by using the information such as loss event rate and RTT (round-trip time). However, TFRC has a performance degradation in wireless networks because it performs congestion control by judging all the losses occurred in wireless network as a congestion signal. In this paper, we propose new loss discrimination mechanism which is using ECN in order to solve the performance degradation of TFRC. Through the results of simulation, we proved that the proposed mechanism can improve the performance of TFRC.

Key words : TFRC, Congestion control, Wireless, Loss discrimination mechanism, ECN, SLD

1. 서 론

다양한 무선 접속 기술의 등장으로 무선 네트워크를 통한 인터넷 사용이 증가하고 있다. 이에 따라 무선 환경에서도 인터넷의 주요 응용 서비스 중 하나인 비디오 스트리밍 서비스에 대한 요구가 증가하고 있다. 비디오 스트리밍 같은 멀티미디어 응용 서비스는 일정 수준의 사용자 품질을 제공하기 위해 대역폭 보장을 필요로 한다. 또한 예측 가능하고 낮은 전송 지연을 요구하며, 일정 수준의 패킷 손실은 허용하는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징들을 지원하기 위해 다양한 멀티미디어 전송 기법과 프로토콜에 대한 연구가 진행되고 있다.

TFRC(TCP Friendly Rate Control)는 손실 사건률과 왕복 지연 시간 등의 정보를 측정하여 TCP Reno의 스루풋을 모델링한 방정식에 적용해 전송률을 조절한다. 이러한 TFRC는 TCP와 친화적인 전송 특징을 가지는 동시에 전송률을 완만하게 변화시키는 특징이 있어 멀티미디어 응용에 적합한 혼잡제어 기법이다[1,2]. 그러나 TFRC는 무선 네트워크의 불안정한 채널 특성으로 인해 발생하는 손실을 모두 혼잡 손실로 판단하여 혼잡제어를 수행하기 때문에, 무선 채널의 특성이 변할 때 멀티미디어 트래픽의 품질 보장에 필요한 대역폭을 충분하게 얻지 못하는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 라스트 홉 무선 네트워크에서 TFRC의 성능을 향상시키기 위한 새로운 손실 구별 기법인 SLD(Signal Lamp based Loss Discriminator) 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 SLD 기법은 TFRC 수신측에서 수신되는 패킷의 타입을 이용해 혼잡상태를 4 가지로 구분하고, 각 상태에서 혼잡 손실이 발생할 확률을 계산해 손실 원인을 구별한다. 이를 통해 TFRC가 무선 손실을 혼잡 손실로 판단하여 전송률을 줄이는 오작동을 줄여 TFRC의 성능을 향상시켰다.

· 본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임
· 이 논문은 2009 한국컴퓨터종합학술대회에서 '라스트 홉 무선 네트워크에서 TFRC의 성능향상을 위한 손실 구별 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

† 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과
kmjeong@cclab.kw.ac.kr
jhkoo@cclab.kw.ac.kr
†† 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@kw.ac.kr

논문접수 : 2009년 8월 13일
심사완료 : 2009년 11월 10일

Copyright©2010 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: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제16권 제2호(2010.2)

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 TFRC 피드백 기법을 기술하고, 3장에서 제안한 손실 구별 기법에 대해 상세히 기술한다. 4장에서는 실험을 통해 제안한 기법의 성능을 평가하였으며, 5장에서는 결론 및 향후 과제에 대해 기술한다.

2. TFRC 피드백 기법

TFRC의 수신측은 패킷 손실을 탐지했을 때 loss event rate를 계산하고, 최소한 1 RTT(Round Trip Time)마다 한번씩 송신측으로 피드백 정보를 전송한다. 송신측은 피드백 정보를 이용하여, 식 (1)에 따라 전송률을 계산한다.

$$X = \frac{S}{RTT\sqrt{\frac{2p}{3}} + RTO\left(3\sqrt{\frac{3p}{8}}p(1+32p^2)\right)} \quad (1)$$

식 (1)에서 X는 초당 바이트수로 계산된 전송률, S는 바이트 단위의 패킷 크기, RTT는 왕복 시간, RTO (Retransmission TimeOut)는 재전송 타임아웃 시간, p는 loss event rate이다.

그림 1은 수신측이 loss event rate를 계산하는 데 필요한 Loss Interval Length를 계산하는 과정을 나타낸다. 수신측은 새로운 패킷이 수신될 때마다 LH(Loss History)를 갱신한다. LH는 현재 갱신 중인 Loss Interval의 첫 패킷의 수신 시간을 기준으로, 1 RTT 이후에 손실 패킷이나 마킹 패킷이 발견되면 현재의 Loss Interval을 종료시키고 그 길이를 계산해 저장한다.

LH는 최근 8개의 Loss Interval Length를 유지하며, 수신측은 식 (2)에 따라 Loss Interval들의 평균 길이 값(LI_{Avg})을 계산한다. 식 (2)에서 사용되는 n 값은 8이며, LI_i는 i번째 Loss Interval Length를 의미한다. 각 Loss Interval에 대한 가중치 w_i는 가장 최근의 Loss Interval부터 (1, 1, 1, 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2)에서 하나씩 선택되어 부여된다.

$$LI_{Avg} = \max\left(\frac{\sum_{i=0}^{n-1} LI_i\omega_i}{\sum_{i=0}^{n-1}\omega_i}, \frac{\sum_{i=1}^{n} LI_i\omega_{i-1}}{\sum_{i=1}^{n}\omega_{i-1}}\right) \quad (2)$$

마지막으로 식 (3)에 따라 loss event rate인 p를 계산해 송신측으로 피드백한다.

$$p = \frac{1}{LI_{Avg}} \quad (3)$$

송신측은 피드백 정보에 포함되어 있는 loss event rate를 사용하여 식 (1)에 따라 전송률을 조절한다. 그런데 TFRC는 loss event rate에 혼잡 정보만 포함된다고 가정하고 있기 때문에, 무선 네트워크에서 동작할 경우에는 충분한 대역폭을 사용할 수 없다. 이때 loss event rate는 실제보다 더 크게 계산되어 결과적으로 TFRC의 전송률이 낮아진다.

TFRC은 손실을 혼잡 손실과 무선 손실로 구별하여 각각 다르게 반응함으로써 성능이 개선될 수 있다. 이와 관련한 연구 중 TF-WMFC는 loss event rate 대신 ECN(Explicit Congestion Notification) 필드가 마킹된 패킷의 수신률을 이용하여 전송률을 조절한다. 이를 통해 무선 손실이 전송률에 미치는 영향을 효과적으로 제거할 수 있다. 그러나 TF-WMFC는 모든 손실 정보를 무시하기 때문에 마킹된 패킷이 무선 에러로 인해 손실될 경우에는 혼잡제어 기능이 무력화된다. Biaz는 수신되는 패킷들의 전송 간격을 측정해 손실 원인을 구별한

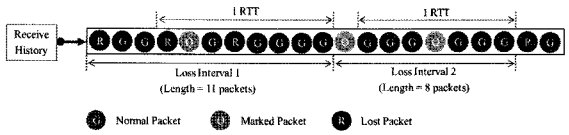

그림 1 Loss Interval Length 계산을 위한 Loss History

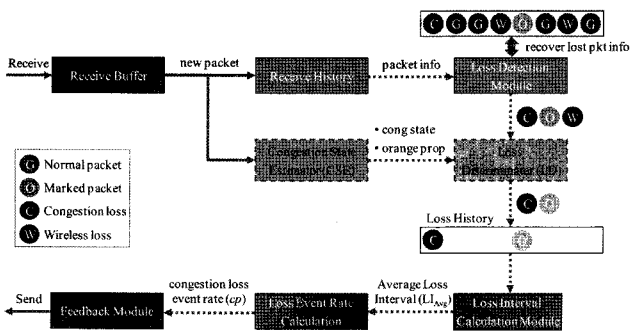

그림 2 SLD 기법이 적용된 TFRC 피드백 기법

다. Spike는 패킷의 상대적인 단방향 지연 시간을 측정하고, 이 값의 증감에 따라 혼잡 손실과 무선 손실이 발생하는 영역을 구분한다. 그러나 Biaz나 Spike와 같이 시간적인 정보를 이용해 손실 원인을 구별하는 기법들은 프로토콜 스택의 다른 계층에서 에러 복구 기법이 사용될 때, 손실 구별의 정확도가 저하되는 문제점을 가지고 있다[3-5].

본 논문에서는 이러한 문제점을 고려하여 TFRC의 ECN 기능을 확장하는 새로운 손실 구별 기법인 SLD (Signal Lamp based Loss Discriminator)를 제안한다.

3. SLD(Signal Lamp based Loss Discriminator)

본 논문에서 제안한 SLD 기법은 혼잡상태 추정 모듈(Congestion State Estimator)과 손실 원인 구별 모듈(Loss Discriminator)로 구성된다. 그림 2는 SLD 기법이 적용된 새로운 TFRC 피드백 기법을 나타낸다. 그림 3에서 정상적으로 수신된 패킷은 G(Green), ECN 필드가 마킹된 패킷은 O(Orange), 혼잡 손실된 패킷은 C (Red, Congestion Loss), 무선 손실된 패킷은 W(Red, Wireless Loss)로 표현된다.

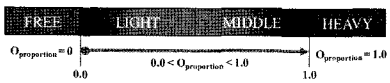

그림 3 혼잡상태 구분

SLD 기법은 TFRC 수신측의 피드백 기법과 함께 동작한다. TFRC 수신측은 패킷을 수신할 때마다 RH (Receive History)와 CSE(Congestion State Estimator)에 패킷 정보를 기록한다. RH는 최근에 수신된 패킷들의 시퀀스 넘버와 수신 시간을 기록한 리스트를 유지한다. LDM(Loss Detection Module)은 RH를 이용해 Red 패킷이 있는지 탐지하고, Red 패킷의 시퀀스 넘버와 예상 수신 시간을 복구해, LD(Loss Discriminator)로 전달한다. 여기에서 Red 패킷은 손실된 패킷을 의미하며, 아직 혼잡 손실이나 무선 손실로 구분되지 않은 상태이다.

CSE는 RH와 유사하게 최근 1 RTT 동안 수신된 패킷들의 리스트를 유지하며, 패킷이 수신될 때 마다 Orange 패킷의 비율과 연속 수신 경향을 계산하여 혼잡상태를 추정한다.

LD는 추정된 혼잡상태에 따라 손실 원인이 혼잡 손실일 확률을 계산해 Red 패킷을 RC(Red Congestion Loss)와 RW(Red Wireless Loss)로 구분한다. LD는 RC 패킷과 Orange 패킷만을 Loss History로 전달하며, RW 패킷은 Green 패킷과 동일하게 취급되어 Loss Interval을 갱신하는 과정에서 제외된다.

3.1 CSE(Congestion State Estimator)

CSE는 혼잡상태를 결정하기 위해 최근 1 RTT 동안 실제로 수신되는 패킷에 대한 정보를 유지한다. 패킷이 수신될 때마다 Green 패킷과 Oragne 패킷의 수를 갱신하고, 해당 RTT 동안 수신되는 Orange 패킷의 비율($O_{proportion}$)과 Orange 패킷의 연속 수신 경향(O_{trend})을 계산하여, 혼잡상태 추정과 손실 원인 구별에 활용한다.

그림 4는 제안한 SLD 기법에서 정의한 혼잡상태 구분을 나타낸다. 혼잡의 정도에 따라 FREE, LIGHT, MIDDLE, HEAVY로 상태를 정의하며, 상태를 구분하는 기준은 $O_{proportion}$과 O_{trend} 이다.

```
For each packet arrival
    if it is orange packet
        Decrease MIDDLE_threshold
        Reset G_trend
        Increase O_trend
    else if it is green packet
        Increase G_trend
        Decrease O_trend
        if G_trend > 1
            Increase MIDDLE_threshold

    if O_trend > MIDDLE_threshold
        C_state = MIDDLE
    else C_state = LIGHT
```

그림 4 LIGHT-MIDDLE 혼잡상태 결정 알고리즘

$O_{proportion}$의 구간이 0, $0 < O_{proportion} < 1$, 1.0 일 때, 각각 FREE, LIGHT-MIDDLE, HEAVY 상태로 정의한다. 추가적으로 O_{trend}를 이용해 LIGHT와 MIDDLE을 구분한다. 각 상태는 손실된 패킷이 탐지된 시점의 혼잡 정도를 나타내는데 FREE는 네트워크에서 아직 혼잡이 발생하지 않아 패킷이 마킹되지 않고 있는 상태를 나타낸다. LIGHT부터 MIDDLE까지는 Orange 패킷의 비율이 점차 증가하고 있는 상태를 나타내며, 특히 MIDDLE은 네트워크 혼잡이 심화되어 Orange 패킷이 연속적으로 수신되는 경향을 보이는 상태를 나타낸다. HEAVY는 최근 수신된 패킷이 모두 Orange 패킷인 상태를 나타낸다.

3.2 LD(Loss Discriminator)

LDM(Loss Detection Module)은 패킷 손실을 탐지하고 손실된 패킷의 순서 번호와 예상 수신 시간 정보를 복구해 LD로 전달한다. 이 때 LD는 CSE로부터 전달받은 C_{state} 와 $O_{proportion}$를 이용해 식 (4)~(7)에 따라 각 상태에서 발견된 패킷이 혼잡으로 인해 손실됐을 확률(P_c)을 계산한다. 그리고 이 확률에 따라 탐지된 패킷 손실의 원인을 판정한다. 손실된 패킷이 무선 손실로 판

정될 확률(P_w)은 $1-P_c$ 이다.

FREE : $P_c = 0.0$ (4)

LIGHT : $P_c = Light_c \cdot O_{proportion}$ (5)

MIDDLE : $P_c = (Heavy_c - Middle_c) \cdot O_{proportion} + Middle_c$ (6)

HEAVY : $P_c = Heavy_c = 1.0$ (7)

혼잡상태가 FREE일 경우는 네트워크에 혼잡이 없는 상태라고 가정하고, P_c 의 값은 0으로 한다. 즉, 혼잡 손실이 발생할 확률은 0%이다. 반대로 HEAVY일 경우에는 혼잡이 극심한 상태이므로 혼잡 손실이 발생할 확률을 100%로 한다. HEAVY 상태일 때도 무선 손실이 발생할 가능성이 있지만, 전송률을 줄여 혼잡상태를 완화시키는 것이 급선무이므로 무선 손실이 발생할 가능성은 고려하지 않는다.

LIGHT와 MIDDLE 상태에서 혼잡 손실이 발생할 확률을 계산하는 이유는 RED(Random Early Detection) 라우터에서 일시적인 혼잡(Transient Congestion)이 발생했을 때 수신측에서 수신되는 모든 패킷이 마킹되지 않았더라도 이미 혼잡 손실이 발생했을 수도 있기 때문이다. 이는 RED 라우터에서 마킹 확률을 결정하는 기준이 되는 평균 큐 길이가 실제 큐의 길이에 빠르게 수렴하지 못하기 때문이다. 본 논문에서는 이를 고려하여 Orange 패킷의 수신 비율과 연속 수신 경향을 이용해 LIGHT와 MIDDLE 상태를 정의한다. 식에서 $Light_c$, $Middle_c$, $Heavy_c$ 는 각 상태에서 P_c 의 최대값을 제한한다.

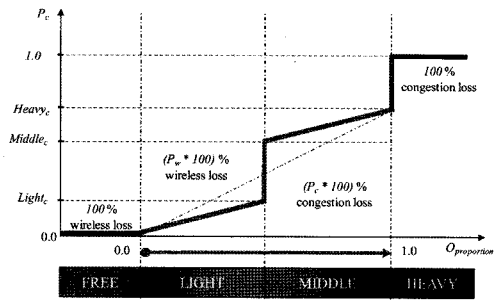

그림 5 혼잡상태에 따른 Pc의 변화

그림 5는 혼잡상태에 따른 P_c 의 변화를 도시화한다. 혼잡의 경중에 따라 LIGHT 상태에서보다 MIDDLE 상태에서 혼잡 손실이 발생할 확률이 더 크다는 것을 고려해 식 (8)과 (9)와 같이 LIGHT와 MIDDLE 상태에 각기 다른 가중치(ω_L, ω_M)를 주어 각 상태에서 P_c 의 범위를 차등화한다.

$$Light_c = (Heavy_c / 2) \cdot \omega_L \quad (8)$$

$$Middle_c = (Heavy_c / 2) \cdot \omega_M \quad (9)$$

4. 실험 및 성능 평가

4.1 실험 환경

본 논문에서 제안한 SLD 기법의 성능을 평가하기 위해 ns-2(network simulator)를 사용하여 그림 6과 같은 실험 환경을 구성하였다.

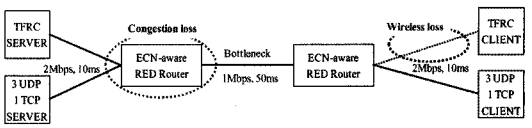

그림 6 실험 환경

전송되는 패킷의 사이즈는 1000 바이트로 하였고, 실험은 60초 동안 진행하였다. 무선 링크에 적용되는 링크 에러율은 0%에서 10%까지 1%씩 증가시키며 실험하였다. 실험에서 $MIDDLE_{threshold}$ 의 초기값은 2, $Heavy_c$ 의 값은 1.0, ω_M 의 값은 1.5, ω_L 의 값은 0.5으로 설정하였다.

4.2 실험 결과

무경쟁 상황과 경쟁 상황에서 TFRC, TFRC-SLD, TFRC-Spike의 성능을 비교한다. 경쟁 트래픽은 CBR (Constant Bit Rate), Exponential, Pareto 등 랜덤하게 발생하는 3개의 UDP 트래픽과 FTP 트래픽을 발생시키는 TCP로 구성된다.

그림 7은 무경쟁 상황에서 TFRC와 TFRC-SLD, TFRC-Spike의 평균 전송률을 나타낸다. 손실 원인을 구별하지 않는 TFRC는 링크 에러율이 증가함에 따라 성능이 급격하게 저하된다. 이 때문에 TFRC는 링크를 독점적으로 사용하고 있는 상황에서도 가용 대역폭을 충분히 활용하지 못하는 문제를 보인다. 반면 TFRC- SLD와 TFRC-Spike는 손실 원인을 구별하고 혼잡 손실에만 반응하여 전송률을 조절하기 때문에 무선 손실이 발생하는 상황에서도 일정한 성능을 유지한다. 링크 에러율이 증가함에 따라 평균 전송률이 줄어드는 이유는 무선에러로 인해 손실되는 패킷의 수도 증가하기 때문이다.

그림 8은 경쟁 상황에서의 평균 전송률을 나타낸다. 무경쟁 상황과 유사한 결과를 보이고 있다. TFRC-SLD와 TFRC-Spike의 평균 전송률이 링크 에러 레이트에 비례적으로 변하지 않는 이유는 경쟁 트래픽이 랜덤하게 발생하기 때문이다.

ARQ가 사용되는 무선 네트워크 환경에서 SLD 기법의 손실 구별 성능을 검증하기 위한 실험을 진행하였다. 성능 평가 항목은 두 가지다. 하나는 혼잡 손실을 무선 손실로 잘못 판단하는 경우로 혼잡 손실 오판률 (Congestion Misclassification Rate, M_c)이라고 한다. 혼잡 손실 오판률이 증가한다는 것은 혼잡 손실이 발생했을

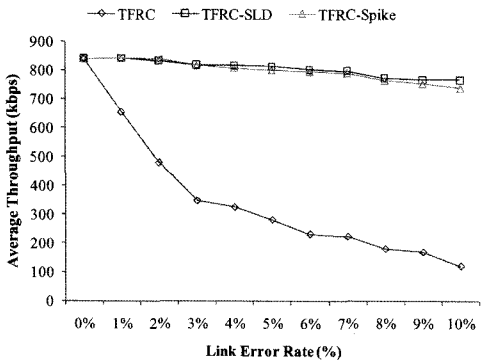

그림 7 평균 전송률(무경쟁)

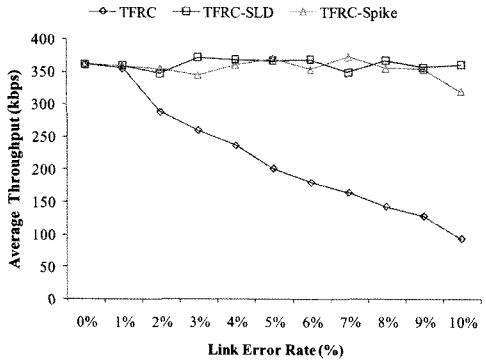

그림 8 평균 전송률 (경쟁)

때 수신측에서 혼잡 손실을 무선 손실로 오인하기 때문에 송신측이 혼잡제어를 수행하지 못한다는 것을 의미한다. 다른 하나는 무선 손실을 혼잡 손실로 잘못 판단하는 경우이다. 이를 무선 손실 오판률(Wireless Misclassification Rate, M_w)이라고 한다.

표 1은 ARQ가 사용되어 무선 손실이 100% 복구된다고 가정했을 때의 실험 결과를 나타낸다. 실험에서 재전송 타임아웃은 100ms, 재전송 시도 회수는 7회로 설정하였다. SLD 기법은 ARQ가 사용되지 않는 환경에서의 실험 결과보다 조금 더 높은 무선 손실 오판률을 보인다. 이로 인해 TFRC-SLD의 전송률이 불필요하게 감소되는 경우가 발생할 수 있지만 손실 구별 기법으로서의 기능을 여전히 유지하고 있다. 그러나 ARQ에 의해 무선 손실이 복구하는 데 걸리는 시간은 Spike 기법의 임계값 설정에 큰 영향을 주기 때문에 Spike 기법이 혼잡 손실을 무선 손실로 잘못 판단하는 경우가 늘어난다. 표 1에서 Spike 기법이 링크 에러율이 2~6%, 10%일 때 높은 혼잡 손실 오판률을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 값이 높아지면 TFRC 수신측이 혼잡 손실 정보를 피드백하지 않기 때문에 TFRC 송신측이 혼잡제어를 수행하지 못하고, 결국 네트워크의 혼잡 상황이 악화될 수 있다. 링크 에러율이 8%일 때는 혼잡 손실이 발생하지 않았다.

표 1 ARQ 적용시 혼잡 손실과 무선 손실 오판률(%)

Link Error Rate		0%	1%	2%	4%	6%	8%	10%
SLD	M_c	0	0	0	0	0	0	0
	M_w	0	5.6	5.0	3.2	8.3	6.9	4.2
Spike	M_c	0	0	90	100	75	0	20
	M_w	0	0	0	0	0	3.0	0

본 논문에서 제안한 SLD 기법이 적용된 TFRC-SLD는 경쟁 상황에서 TFRC-Spike와 비슷한 수준의 전송 성능을 보인다. 이를 통해 SLD 기법이 Spike 기법과 마찬가지로 TFRC의 성능 향상을 위한 손실 구별 기법으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, ARQ가 적용되는 무선 네트워크 환경에서 SLD는 Spike보다 나은 손실 구별 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 무선 네트워크의 불안정한 채널 특성으로 인해 발생하는 TFRC의 성능 저하를 개선하기 위해 ECN 정보를 기반으로 동작하는 새로운 손실 구별 기법인 SLD 기법을 제안하였다. SLD 기법은 혼잡상태에 따라 혼잡 손실과 무선 손실을 구별하여 라스트 홉 무선 네트워크 환경에서 TFRC의 전송 성능을 향상시켰다. 향후, 본 논문에서 제안한 SLD 기법의 손실 구별 성능을 검증하기 위해 기존 손실 구별 기법들과의 추가적인 비교 실험 및 평가를 수행할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] J. Padhey, V. Firoiu, D. Towsley, and J.Kurose, "Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol.28 no.4, pp. 303-314, October 1998.

[2] S. Floyd, M. Handley, J. Padhey and J. Widmer, "TCP Friendly Rate Control (TFRC) : Protocol Specifi-cation," RFC5348, September 2008.

[3] S. Bae and S. Chong, "TCP-Friendly Wireless Multi- media Flow Control Using ECN Marking," *Proc. of the IEEE GLOBECOM*, vol.2, pp.1794-1799, November 2002.

[4] S. Biaz and N. Vaidya, "Discriminating congestion losses from wireless losses using interarrival times at the receiver," *Proc. of the IEEE Symposium ASSET'99*, pp.10-17, March 1999.

[5] S. Cen, P. C. Cosman and G. M. Voelker, "End-to-End Differentiation of Congestion and Wireless Losses," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.11, issue 5, pp.703-717, October 2003.