

위성 통신에서 신뢰성 향상을 위한 랜덤 선형 네트워크 코딩 기술

이 규 환*, 김 재 현^o

Random Linear Network Coding to Improve Reliability in the Satellite Communication

Kyu-Hwan Lee*, Jae-Hyun Kim^o

요 약

본 논문에서는 위성 통신에서 신뢰성 향상을 위한 랜덤 선형 네트워크 코딩 적용 기술을 제안한다. 제안하는 프로토콜에서는 PEP (Performance Enhancement Proxy)에서 네트워크 코딩된 여분의 패킷을 전송하여 만약 데이터 패킷이 무선 채널 에러에 의해 손실되었다 할지라도 복구 할 수 있다. 또한 본 논문에서는 제안한 프로토콜을 위성 통신에 적용했을 때의 TCP 처리율 수학적 모델을 제시하고 제안한 프로토콜의 성능을 평가했다. 성능 평가 결과, 제안하는 프로토콜은 발신 측 PEP에서 여분의 네트워크 코딩된 패킷을 전송하고 수신 측 PEP에서 여분의 네트워크 코딩된 패킷을 이용하여 손실된 패킷을 복구하기 때문에 패킷 손실률을 감소시켜 기존 TCP보다 처리율 측면에서 우수한 성능을 나타냈다.

Key Words : Satellite Communication, Random Linear Network Coding, TCP, Long RTT

ABSTRACT

In this paper, we propose a method for applying random linear network coding in satellite communication to improve reliability. In the proposed protocol, network-coded redundancy (NC-R) packets are transmitted in the PEP (Performance Enhancement Proxy). Therefore, if data packets is lost by wireless channel error, they can be recovered by NC-R packets. We also develop the TCP performance model of the proposed protocol and evaluate the performance of the proposed protocol. In the simulation results, It is shown that the proposed protocol can improve the TCP throughput as compared with that of the conventional TCP because the NC-R packets is sent by the sender-side PEP and the receiver-side PEP use these packets to recover the lost packets ,resulting in reducing the packet loss in TCP.

I. 서 론

위성 통신은 하나의 위성이 중계할 수 있는 통신 범위가 광범위하고 동시에 넓은 지역에 있는 다수

의 가입자에게 방송을 할 수 있기 때문에 군사적으로나 상업적으로 많이 이용되고 있다. 하지만 일반적으로 통신에 사용되는 위성은 정지위성으로 매우 긴 전송 지연 시간을 가지고 있고, 패킷 손실률도

* 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2011-0010967).

※ 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013R1A2A1A01016423).

• 주저자 : 아주대학교 전자공학과 무선인터넷 연구실, lovejiyoon7@ajou.ac.kr, 정희원

◦ 교신저자 : 아주대학교 전자공학과 무선인터넷 연구실, jkim@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-03-133, 접수일자 : 2012년 03월 22일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 30일

크기 때문에 위성 네트워크에서는 기존 TCP의 성능이 크게 저하될 수 있다. 위성 통신에서 기존 TCP의 성능이 저하되는 가장 큰 이유는 유선 통신 환경에 적합하게 설계된 기존 TCP는 라우터에서 버퍼 오버플로우에 의한 패킷 손실과 무선 단에서 발생하는 패킷 손실의 구별 없이 전송률을 낮추는 방식을 사용하기 때문이다. 그러므로 위성 네트워크에서 TCP의 성능을 향상하기 위하여 많은 PEP (Performance Enhancement Proxy) 연구들이 수행되었다^[1-4]. PEP는 네트워크 에이전트로 중단 간 통신의 성능을 향상하기 위해 사용되며 일반적으로 기지국이나 위성 모뎀에 적용된다. 하지만 기존 연구에서는 패킷 손실을 보상할 수는 없기 때문에 성능향상에 한계가 있다.

네트워크 코딩은 무선 환경에서 멀티캐스트뿐만 아니라 유니캐스트 응용에도 기존의 라우팅 방식을 사용했을 경우보다 더 나은 네트워크 처리량을 제공할 뿐 아니라 통신의 신뢰성을 제공할 수 있다. 그러므로 네트워크 코딩을 TCP에 적용한 TCP/NC 프로토콜을 이용하면 패킷 전송 신뢰성을 향상할 수 있기 때문에 위성 네트워크에서 TCP의 성능이 저하되는 문제점을 해결하기 위한 하나의 방법이 될 수 있다^[5]. TCP/NC 프로토콜은 랜덤 선형 네트워크를 이용하여 TCP로 보고되는 패킷 손실을 감추고, 여분의 네트워크 코딩된 패킷을 전송하여 패킷 손실을 보상하기 때문에 TCP의 성능을 크게 향상할 수 있다^[5]. TCP/NC에서는 발생된 패킷 손실은 좀 더 긴 패킷 왕복 시간 (Round Trip Time)으로 변환되기 때문에 패킷 왕복 시간으로 전송률을 제어하는 TCP-Vegas 프로토콜과 함께 사용하는 것이 적합하다^[6]. 하지만 일반적으로 많이 사용되는 TCP-Reno 프로토콜은 네트워크 혼잡 발생 시 ACK 패킷을 이용하여 전송률을 제어하기 때문에 TCP/NC를 사용하게 된다면 MAC 계층에서 버퍼 오버 플로우가 발생 할 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 위성 네트워크에서 여분의 네트워크 코딩된 패킷을 전송하여 위성 링크에서 손실된 패킷을 복구함으로써 패킷 전달 신뢰성을 향상하고 기존의 TCP와 호환되어 동작하는 네트워크 코딩이 적용된 PEP 기술을 제안하고 수학적 성능분석 모델을 통하여 그 성능을 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구에 대하여 살펴본다. 3장에서는 제안하는 프로토콜을 기술하고 4장에서는 수학적 성능 분석 모델 제시와 제안하는 프로토콜의 성능을 평가해 보고 5

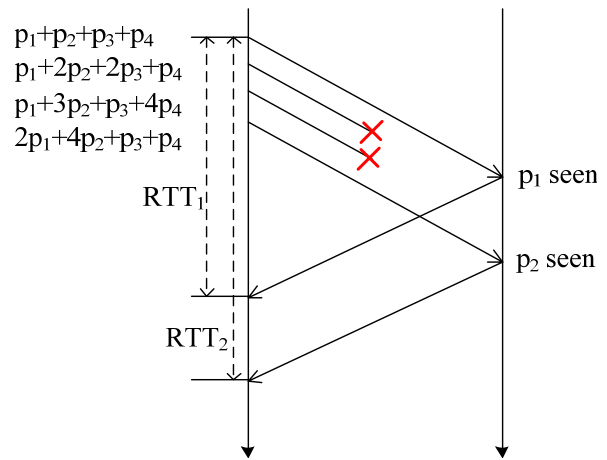


그림 1. TCP/NC의 동작 과정 예시
Fig. 1 Example of TCP NC operation

장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

2.1. TCP/NC

TCP/NC에서 네트워크 코딩을 적용하기 위한 네트워크 코딩 계층은 TCP와 네트워크 계층 사이에 존재하며 발신 측에서는 TCP 패킷을 수신하여 네트워크 코딩 패킷으로 변환하여 전송하고, 수신한 네트워크 코딩 ACK 패킷은 다시 TCP ACK로 변환하여 TCP에 전달한다^[5]. 수신 측에서는 수신한 네트워크 코딩 패킷을 TCP 패킷으로 변환하여 TCP에 전달하고, 네트워크 코딩 ACK 패킷을 전송한다. 그러므로 TCP의 동작에는 영향을 주지 않으면서 네트워크 코딩을 적용 할 수 있다. 그림 1은 네트워크 코딩 계층에서 패킷을 전송하는 과정을 설명한다. 기존 TCP는 유선망 기반으로 만들어져 있기 때문에 무선 단에서 패킷이 손실되면 네트워크 혼잡으로 인식하여 소스노드에서 전송률이 감소하는 현상이 발생하였다 하지만 TCP/NC의 수신 측에서는 디코딩에 필요한 패킷만 수신하면 되기 때문에 특정 패킷에 대한 ACK가 아닌 지금까지 수신한 패킷 수에 대한 정보만 네트워크 ACK 패킷을 통하여 전송하고, 발신 측 네트워크 코딩 계층에서는 수신한 네트워크 ACK 패킷을 TCP 패킷으로 변환하여 전송하기 때문에 패킷 손실이 발생하여도 TCP에서는 전송률이 감소하지 않는다. 패킷 손실이 발생하였을 경우에는 그림 1처럼 패킷 왕복 시간이 증가하여 TCP에 전달되기 때문에 TCP 프로토콜로 TCP Vegas를 사용하면 네트워크 혼잡 제어

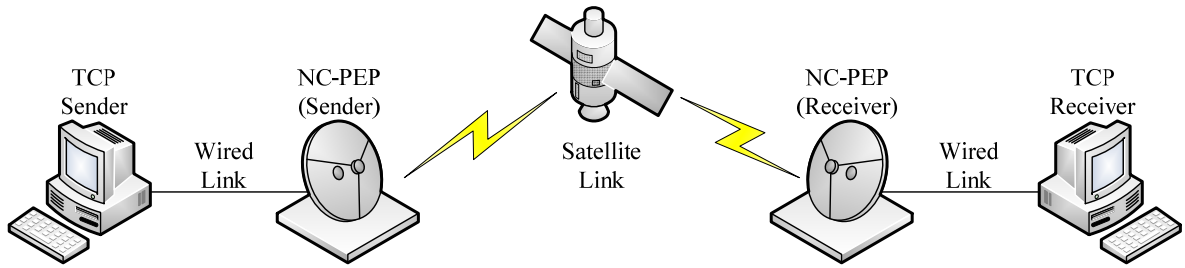


그림 2. 제안하는 프로토콜의 시스템 모델
Fig. 2 System model of the proposed protocol

도 가능하다. 또한 여분의 네트워크 코딩된 패킷을 전송하여 패킷 손실을 감소시키기 때문에 결과적으로 기존 TCP 보다 TCP 처리율 성능을 향상할 수 있다. 하지만 TCP/NC는 기존에 널리 사용되는 TCP Reno 프로토콜에는 적합하지 않고 TCP 발신자와 수신자의 프로토콜 수정이 필요하다. 본 장에서는 제안하는 프로토콜의 시스템 모델과 동작 과정에 대하여 살펴본다. 본 논문에서는 제안하는 프로토콜을 NC-PEP (Network-Coded PEP)라고 명칭한다.

III. 제안하는 프로토콜

3.1. 시스템 모델

본 연구에서 시스템 모델은 그림 2와 같다. 시스템 모델은 TCP 발신자와 수신자, 그리고 2개의 NC-PEP로 구성되어 있다. TCP 발신자와 수신자는 일반적으로 사용하는 TCP Reno 프로토콜을 사용하며, NC-PEP에 유선링크로 연결되어 있다. NC-PEP 들은 위성링크로 연결되어 있는 구조이다. 본 논문에서 제안하는 기술은 하위 계층의 오류 정정 기법들과 독립적으로 동작하기 때문에 하위 계층의 오류 정정 기법들에 대한 영향은 고려하지 않았다. 본 연구에서는 NC-PEP는 다음과 같은 가정 사항 하에 있다.

- 1) 유선링크와 위성링크의 데이터 전송률은 고정되어 있다. 또한 TCP의 세그먼트 크기도 고정되어 있다.
- 2) 패킷 손실은 위성의 포워드 링크에서만 발생한다. 그러므로 TCP ACK 세그먼트는 손실되지 않는다. 또한 유선링크에서 패킷 손실도 존재 하지 않는다.
- 3) 일반적으로 통신위성은 정지위성이 때문에 약 36,000km 고도위에 우주에서 지구의 자전 각속도와 같은 속도로 운동하기 때문에 패킷 왕

복 시간 (Round Trip Time, (RTT))는 500ms 이다. 유선링크에서 패킷 전송 지연은 거의 0에 가깝다.

본 연구에서 관련된 용어는 다음과 같다.

- 1) 네이티브 세그먼트: 가공되지 않은 순수한 TCP 세그먼트를 의미한다.
- 2) 여분의 네트워크 코딩 (Network-coded redundancy (NC-R)) 세그먼트: 랜덤 선형 네트워크 코딩을 이용하여 네이티브 세그먼트로부터 생성한 세그먼트이다. NC-PEP에서 위성링크에서 신뢰성을 향상하기 위하여 추가적으로 전송하는 세그먼트이다.
- 3) B and R : NC-PEP에서 B 는 랜덤 선형 네트워크 코딩 묶음의 크기이다. R 은 랜덤 선형 네트워크 코딩 묶음으로부터 생성하는 NC-R 세그먼트의 수이다. 그러므로 한 라운드에 R 개의 NC-R 세그먼트가 B 개의 네이티브 세그먼트로부터 수식 1과 같이 생성이 된다. X_k 와 Z_l 는 각각 네이티브와 NC-R 세그먼트를 의미하고, C 는 계수행렬이다. 이때 $1 \leq k \leq B, 1 \leq l \leq R$ 이다. 계수행렬 C 에서 $\alpha_{i,j}$ 는 q 크기의 유한필드 F_q 에서 추출된다 [7]. 이때 $1 \leq i \leq R, 1 \leq j \leq B$ 이다. 계수행렬의 행벡터는 각각의 NC-R 세그먼트의 계수집합을 의미하고 NC-R 세그먼트의 헤더의 형태로 수신 측 NC-PEP에 전달된다.

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_R \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_B \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \cdots & \alpha_{1,B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{R,1} & \cdots & \alpha_{R,B} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2. 제안하는 프로토콜의 동작 과정

NC-PEP의 동작과정은 그림 3과 같다. 그림 3에서 화살표는 네이티브 세그먼트의 전송을 의미하고,

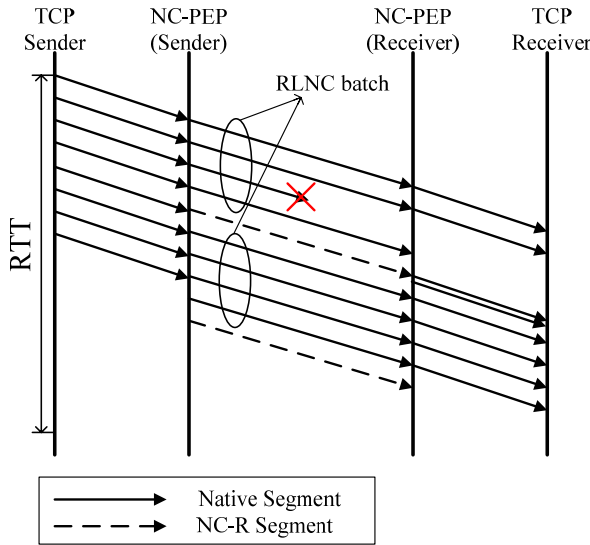


그림 3. 제안하는 NC-PEP의 동작과정 예시
Fig. 3. Example of proposed NC-PEP operation

접선 화살표는 NC-R 세그먼트의 전송을 의미한다. 자세한 동작과정은 다음과 같다.

- 1) 발신 측 NC-PEP: 발신 측 NC-PEP에서는 네이티브 세그먼트를 수신 측 NC-PEP에 전달하고, NC-R 세그먼트의 생성 및 전송을 위하여 인코딩 대기행렬에 저장한다. 인코딩 대기행렬에 B 만큼의 네이티브 세그먼트가 축적되면, 발신 측 NC-PEP는 NC-R 세그먼트를 생성하여 수신 측 NC-PEP에 전송한다. NC-R 세그먼트는 (1)에 의해서 생성된다.
- 2) 수신 측 NC-PEP: 수신 측 NC-PEP에서는 네이티브 세그먼트를 TCP 수신자에게 전달하고, RLNC를 이용한 손실된 네이티브 세그먼트의 복구를 위하여 디코딩 대기행렬에 세그먼트를 저장한다. 네이티브 세그먼트가 위성링크에서 손실되면 NC-PEP는 NC-R 세그먼트의 수신을 기다렸다가 (2)에 의해서 손실된 세그먼트를 복구한다. Y_n 은 수신 측 NC-PEP에서 수신한 네이티브와 NC-R 세그먼트이다. 이때 $1 \leq n \leq V$, $B \leq V \leq B+R$ 이다. 계수행렬 C_R 은 네이티브 세그먼트의 순서번호와 NC-R 세그먼트에 coefficient set을 통하여 구축이 가능하고, 수신 측 NC-PEP에서는 계

수행렬 C_R 의 역행렬을 Gauss-Jordan elimination을 이용하여 계산할 수 있다. 예를 들면, B 가 4이고 R 이 1일 때, 네이티브 세그먼트 중에 3번째 네이티브 세그먼트가 손실되고 NC-R 세그먼트에 의해서 복구된다고 할 때, 수신 측 NC-PEP에서 수식은 (3)과 같다. NC-R 세그먼트를 통한 패킷 복구 과정에서, 손실된 세그먼트 뒤에 성공적으로 수신한 네이티브 세그먼트들은 패킷 순서 뒤바뀔 현상을 해결하기 위하여 대기행렬에 저장만하고 TCP 수신자에게는 전달하지 않는다. 만약 손실된 세그먼트들이 NC-PEP에서 NC-R 세그먼트를 통하여 복구가 불가능하게 되면 TCP 수신자에게 전송하지 않은 대기행렬의 네이티브 세그먼트들을 TCP의 세그먼트 빠른 재전송과 빠른 복구 알고리즘의 동작을 위하여 TCP 수신자에게 전송된다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_B \end{bmatrix} = C_R \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_V \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = C_R^{-1} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_4 \\ Z_1 \end{bmatrix}, C_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \alpha_{1,3} & \alpha_{1,4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

IV. 성능 분석

본 장에서는 NC-PEP 성능분석 모델을 구성하고 결과 분석을 다음과 같이 수행하였다. 우선 TCP 세그먼트의 손실률을 유도하고 잘 알려진 TCP 성능 분석 모델을 통하여 TCP의 평균 TCP 처리율을 분석한다⁸⁾.

4.1. TCP 세그먼트 손실률

NC-PEP가 위성 네트워크에 적용되면 NC-R 세그먼트들에 의하여 TCP 세그먼트 손실률은 감소하게 된다. NC-PEP를 사용할 경우 TCP 세그먼트 손실률은 다음과 같다.

$$W_{NC} = \frac{2+b}{3b} + \sqrt{\frac{8(1-p_{NC})}{3bp} + \left(\frac{2+b}{3b}\right)^2} \quad (5)$$

$$T_{NC} = \min \left(\frac{W_m}{RTT}, \frac{1}{RTT \sqrt{\frac{2bp}{3}} + T_0 \left(1, 3 \sqrt{\frac{3bp}{8}} \right) p_{NC} (1 + 32p_{NC}^2)} \right) \quad (6)$$

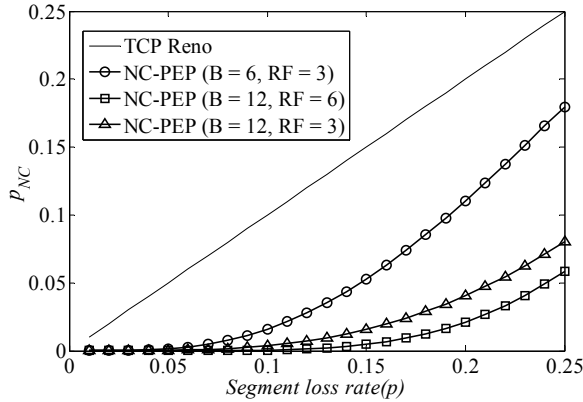


그림 4. NC-PEP를 적용한 위성 네트워크에서 세그먼트 손실률
Fig. 4. Segment loss rate in the satellite network with NC-PEP

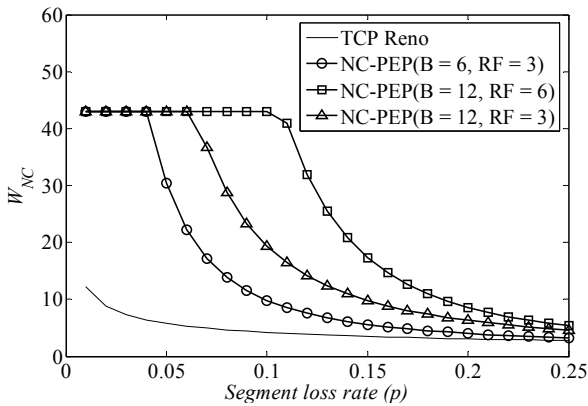


그림 5. NC-PEP를 적용한 위성 네트워크에서 평균 TCP 혼잡 제어 윈도우 크기
Fig. 5. Ave. TCP contention window size in the satellite network with NC-PEP

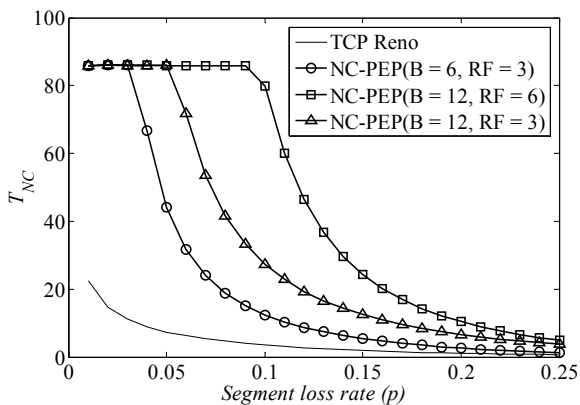


그림 6. NC-PEP를 적용한 위성 네트워크에서 평균 TCP 처리율
Fig. 6. Ave. TCP throughput in the satellite network with NC-PEP

$$p_{NC} = 1 - s_{NC},$$

$$s_{NC} = (1-p) + \sum_{k=B}^{B+R-1} \binom{B+R-1}{k} (1-p)^k p^{B+R-k}, \quad (4)$$

s_{NC} 는 NC-PEP를 사용할 경우 TCP 세그먼트가 성공적으로 TCP 수신자가 수신할 확률이고, p 는 NC-PEP를 사용하지 않았을 때 위성링크에서 TCP 세그먼트의 손실률이다.

4.2. TCP 성능 분석 모델

TCP 성능분석 모델로부터 NC-PEP를 적용했을 경우에 평균 혼잡 제어 윈도우 크기와 평균 네트워크 처리율은 각각 (5)와 (6)과 같다^[8]. b 는 ACK 세그먼트 전송 시 몇 개의 세그먼트에 대한 정보를 집약해서 보내는지에 대한 값이다. W_m 는 최대 혼잡 제어 윈도우 크기다. T_0 는 TCP의 timeout 값이다. NC-PEP를 적용할 경우 TCP 세그먼트 손실률 p 가 p_{NC} 로 바뀌기 때문에 기존의 TCP 성능 모델에서 p 를 p_{NC} 로 대체하면 제안하는 NC-PEP의 TCP 성능분석 모델을 손쉽게 도출할 수 있다. 논문에서는 패킷 왕복시간이 매우 길어 NC-PEP에서 발생하는 대기행렬 지연은 큰 영향을 미칠 수 없기 때문에 TCP 성능 분석 모델에서 NC-PEP에서 발생하는 대기행렬 지연은 고려되지 않았다.

4.3. 성능분석

본 연구에서는 TCP 세그먼트 크기를 1500bytes로 가정하고 TCP timeout 값을 1.5초로 가정하였다 [9]. 위성 링크의 전송률은 100Mbps로 가정했다. 그림 4는 위성 링크에서 세그먼트 손실률에 따른 NC-PEP를 적용한 위성 네트워크에서 세그먼트 손실률을 나타낸다. p_{NC} 는 수식 (4)에 제시되어 있듯이 NC-PEP를 적용했을 경우에 세그먼트 손실률이다. RF 는 R/B 을 의미한다. 그림 4를 살펴보면 만약 B 가 고정되어 있고 RF 의 값이 변화할 때, p_{NC} 는 RF 값의 증가에 따라 감소하는 것을 살펴볼 수 있다. RF 가 증가할수록 NC-R 세그먼트의 전송 수가 증가하기 때문이다. RF 가 고정되어 있고 B 의 값이 변화할 경우에는 B 가 증가할수록 p_{NC} 가 감소하는 것을 살펴볼 수 있다. 이는 NC-R 세그먼트에 B 가 증가할수록 더 많은 네이티브 세그먼트들이 인코딩되기 때문이다^[7].

그림 5와 6은 위성링크에서 세그먼트 손실률에

다른 NC-PEP를 적용하였을 경우에 평균 혼잡 제어 윈도우 크기와 TCP 처리율을 나타낸다. 평균 윈도우 크기의 단위는 패킷 왕복되는 시간 동안 전송하는 세그먼트 수이고, TCP 처리율의 단위는 초당 전송하는 세그먼트 수이다. 그림 5에서 보는 것과 같이 NC-PEP가 기존의 TCP 기법보다 평균 혼잡 제어 윈도우 크기가 증가하는 것을 살펴 볼 수 있고 이에 따라 그림 6에서처럼 TCP 처리율을 증가할 수 있는 것을 살펴 볼 수 있다. 또한 NC-PEP 적용 시 최적의 TCP 처리율을 달성하려면 최대한 큰 B 를 선택하고 세그먼트 손실률에 따라 RF 를 선택하는 것이 중요하다는 것을 살펴 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 위성통신에서 신뢰성을 향상하여 TCP 처리율을 증가할 수 있는 NC-PEP 기술을 제안하였다. 또한 NC-PEP의 성능을 분석할 수 있는 수학적 모델을 구성하여 NC-PEP의 성능을 평가했다. 성능분석 결과 제안하는 NC-PEP는 NC-R 세그먼트의 전송으로 위성 통신에서 패킷 전달 신뢰성을 향상하여 기존 TCP보다 TCP 처리율 성능이 향상하는 것을 살펴 볼 수 있었다. 그러므로 본 논문에서 제안한 NC-PEP는 위성 통신의 성능을 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] I. F. Akyildiz, G. Morabito, and S. Palazzo, "TCP-Peach: a new congestion control scheme for satellite IP networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 9, no. 3, pp. 307-321, June 2001.

[2] F. Peng, L. Wu, and V. C. M. Leung, "Cross-layer enhancement of TCP split-connections over satellites links," *Int. J. Satellite Commun. Networking*, vol. 24, no. 5, pp. 405-418, Sep./Oct. 2006.

[3] M. Ivanovich, P. Bickerdike, and J. Li, "On TCP performance enhancing proxies in a wireless environment," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 76-83, Sep. 2008.

[4] J. Liu, Z. Cao, and K. M. Junaid, "TP-Satellite: a new transport protocol for satellite IP networks," *IEEE Trans. Aerosp.*

Electron. Syst., vol. 45, no. 2, pp. 502-515, Apr. 2009.

[5] J. K. Sundararajan, D. Shah, M. Medard, S. Jakubczak, M. Mitzenmacher, and J. Barros, "Network coding meets TCP: theory and implementation," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 3, pp. 490-512, Mar. 2011.

[6] L. S. Brakmo and L. L. Peterson, "TCP Vegas: end to end congestion avoidance on a global Internet," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 13, no. 8, pp. 1465-1480, Oct. 1995.

[7] T. Ho, M. Medard, R. Koetter, D. R. Karger, M. Effros, S. Jun, and B. Leong, "A random linear network coding approach to multicast," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 10, pp. 4413-4430, Oct. 2006.

[8] J. Padhye, V. Firoiu, D. F. Towsley, and J. F. Kurose, "Modeling TCP Reno performance: a simple model and its empirical validation," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 8, no. 2, pp. 133-145, Apr. 2000.

[9] M. Allman, V. Paxson and W. Stevens, *TCP congestion control*, RFC 2581, Apr. 1999.

이 규 환 (Kyu-Hwan Lee)



2007년 아주대학교 전자공학부 졸업
 2007년~현재 아주대학교 전자공학과 석/박사 통합과정
 <관심분야> 네트워크 코딩, WLAN, 무선망 QoS, Ad-hoc, Mesh network 등

김 재 현 (Jae-Hyun Kim)



1987년~1996년 한양대학교
전산과 학사 및 석/박사 졸업

1997년~1998년 미국UCLA
전기전자과 박사 후 연수

1998년~2003년 Bell Labs,
Performance Modeling and

QoS Management Group, 연구원

2003년~현재 아주대학교 전자공학부 정교수

<관심분야> 무선인터넷 QoS, MAC 프로토콜,
IEEE 802.11/15/16/20, 3GPP, 국방 기술네트워
크 등