

사본 중복 전송 ARQ에서 일반화된 재전송 요청 규칙의 성능 분석

신우철, 김동준, 주재환, 최천원
단국대학교
E-mail : cchoi@dku.edu

Performance Analysis of Generalized Retransmission Request Rule for Multicopy Transmission ARQ

Woo Cheol Shin, Dong Joon Kim, Jea Hwan Ju, Cheon Won Choi
Dankook University
E-mail : cchoi@dku.edu

Abstract

In this paper, we consider a generalized rule of retransmission request, identified as (M, σ) rule for multicopy transmission ARQ. Following a revised rule to conform with a strict criterion for requesting a retransmission, we can reduce the probability that a packet accepted by the receiving node is still being infected with errors. In turn, such amendment invokes a degradation of delay and throughput performance. For a quantitative evaluation of (M, σ) rule, we develop an analytical method to calculate probability of error remains, maximum throughput, average and peak delays, and delay variation. From the numerical examples made by use of the analytical method, we observe a performance trade-off between probability of error remains and delay/throughput. We also confirm the adaptability of (M, σ) rule to meet various QoS requirements.

I. 서론

ARQ(automatic repeat request)는 재전송에 기반한 오류 제어 방식으로 재전송 유형에 따라 stop and wait ARQ, go back N ARQ, selective repeat ARQ 등으로 분류된다. ARQ에서 수신 노드는 수신한 패킷에서 오류가 검출되면 송신 노드에게 재전송 요청을 한다. 따라서 송신 노드는 패킷의 원본을 보전하고 사본을 전송하며 전송 성공을 확인한 후 원본을 폐기한다. ARQ의 문헌상 소개는 1960년 대로 거슬러 올라간다 [9]. 이 후 ARQ의 여러 가지 변이

가 발표되었으며 이 중 한 가지는 각 패킷에 대해 두 개 이상의 사본을 중복 전송하는 방식이다 [1][3][8]. 이러한 패킷의 사본을 중복 전송하는 방식은 하나의 사본만을 전송하는 방식에 비해 채널에서 비트 오류율(bit error rate)이 매우 높거나 전송률(data rate)에 비해 송신 노드와 수신 노드간의 전파 지연 시간(propagation delay time)이 상당히 긴 경우에 throughput이 상대적으로 높음이 밝혀졌다. 그러나 오류 검출은 불완전하므로, 오류 제어의 정확성을 향상시키기 위해 time diversity를 제공하는 사본 중복 전송 방식이 사용될 수 있다.

본 논문에서는 유한 회수의 재전송만이 허용되는 stop and wait ARQ 방식에 사본의 중복 전송 방식이 적용될 때, 수신 노드가 재전송 요청을 하는 일반화된 규칙으로 (M, σ) 규칙을 제안한다. (M, σ) 규칙에서 M 은 중복 전송되는 동일한 사본의 수이며, 정수 $\sigma \in \{1, \dots, M\}$ 는 M 개의 중복 사본에 대해 각각 오류 검출을 수행하였을 때 수신 노드가 패킷의 재전송을 요청하지 않기 위해 요구되는 최소의 비 오류 검출 사본의 수이다. (M, σ) 규칙이 적용될 때, σ 의 증가에 따라 패킷 상실률(packet loss rate)은 재전송 회수의 유한성으로 인해 상승한다. 또한 σ 의 증가는 재전송 횟수의 증가를 야기하므로 최대 throughput 및 지연 성능의 열화를 초래한다. 이와 반면에 패킷에 오류가 있어도 검출되지 않고 남아있을 확률인 오류 잔류 확률(probability of error remains)은 일반적으로 σ 의 증가에 따라 감소한다. 이와 같이 (M, σ) 규칙은 M 과 σ 의 변화에 따라 여러 성능 측면에서 상반된 결과를 가져온다. 본 논문에서는 여러 측면의 성능에 대한 계량적 분석을 위해 다음과 같은 해석적 방법을 개발한다. 첫째, 이진 대칭 채널(binary symmetric channel : BSC)에서 패킷 상실률과 오류 잔류 확률을 근사적으로 계산하는 해석적 방법을 밝히고, 이를 바탕으로 최대 throughput을 구하는 해석적 방법을 구한다. 또한 송신 노드에 패킷이 도착하는 시간을 Poisson point process로 모형화할 때

본 연구는 KIPA ITRC Project의 지원을 받았다.

패킷의 평균 지연 시간(average delay time), 최고 지연 시간(peak delay time), 지연 변이(delay variation)를 계산하는 해석적 방법을 밝힌다. 이어서 해석적 방법 및 모의 실험 방법으로 (M, σ) 규칙에서 파라미터 M 과 σ , 그리고 채널의 비트 오류율을 포함한 네트워크 환경에 연계된 파라미터가 오류 잔류 확률, 최대 throughput, 패킷 지연 시간 등에 미치는 영향을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 (M, σ) 규칙과 이에 수반된 사본의 선택 방법을 서술한다. 3 절에서는 오류 잔류 확률, 최대 throughput, 패킷 지연 시간의 분포 등을 계산하는 해석적 방법을 밝힌다. 4 절에서는 해석적 방법으로 (M, σ) 규칙의 계량적 성능 평가를 수행한다.

II. 재전송 요청을 위한 (M, σ) 규칙

본 논문에서 고려하는 ARQ 방식은 기본적으로 stop and wait ARQ 방식이다 [5][9]. 송신 노드는 오류 검출을 위해 부호화된 패킷을 전송하고, 수신 노드는 패킷을 받은 후 오류 검출을 수행하여 만약 오류가 검출되지 않으면 긍정적인 확인 메시지(positive acknowledgement : PACK)를 송신 노드에게 보낸다. 송신 노드는 패킷을 전송한 후 일정 시간을 대기하고 만약 이 시간 동안 PACK를 받지 못하면 기 전송한 패킷에서 오류가 발생하였다고 판단하여 패킷을 재전송한다. 이 때 임의의 패킷에 대해 유한한 횟수만의 재전송이 허용된다. 본 논문에서 송신 노드는 패킷을 (재)전송할 때 하나의 사본을 보내는 대신 M 개의 동일한 사본을 연속으로 전송한다. 수신 노드는 이러한 M 개의 사본을 받은 후 각 사본에 대해 오류 검출을 수행한다. 이러한 사본 중 오류가 검출되지 않은 사본이 σ 개 이상이면 (PACK를 보냄으로써) 수신 노드는 재전송을 요청하지 않는다. 이와 같이 사본의 수 M 과 이에 따른 PACK를 보내기 위한 최소의 오류가 검출되지 않는 사본 수 σ 로 재전송 요청 여부를 결정하는 규칙을 본 논문에서는 (M, σ) 규칙이라고 지칭한다.

(M, σ) 규칙에 의거하여 패킷을 접수한 후 수신 노드는 오류가 검출되지 않은 각 사본을 복호화한다. 이 때 복호화된 사본이 모두 동일하지 않으면 동일한 사본을 모아 균을 만들고 이 중 크기가 가장 큰 균에 속한 사본을 채택한다. 또한 가장 큰 균이 두 개 이상이면 uniform randomizer를 이용하여 이 중 하나의 균을 선택한다.

III. (M, σ) 규칙의 성능 분석

본 절에서는 (M, σ) 규칙이 적용될 때 평균 지연 시간, 최대 지연 시간, 지연 변이, 최대 throughput, 그리고 오류 잔류 확률을 계산하는 해석적 방법을 소개한다.

3.1 패킷 지연 시간의 분석

단위 데이터인 패킷은 길이가 N bits이고 payload와 header로 구성된다. 이 때 payload는 길이가 K bits이고, header는 payload를 오류 검출을 위해 (N, K) 부호를 사

용하여 부호화함으로써 추가된 부분이다. 패킷이 전송되는 채널은 비트 오류 확률 α 로 특징지어지는 이진 대칭 채널로 모형화한다. 그러면 임의의 패킷이 이러한 채널을 통해 수신 노드에 전달될 때, 이 패킷에서 오류가 발생할 확률 $\epsilon = 1 - (1 - \alpha)^N$ 이다. 한편 이 패킷에서 오류가 발생하고 그 오류를 검출할 확률을 δ 라고 하면, (M, σ) 규칙을 따라 송신 노드가 패킷의 재전송을 요청할 확률 γ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = \sum_{j=0}^{\sigma-1} \binom{M}{j} (1-\delta)^j \delta^{M-j} \quad (1)$$

송신 노드에서 수신 노드로의 데이터 전송률을 ζ , 송신 노드와 수신 노드간의 전파 지연 시간을 ϕ 라고 하자. 수신 노드가 송신 노드로 확인 메시지를 보내는 채널을 무잡음 채널(noiseless channel)로 모형화하자. 확인 메시지의 전송 시간이 무시할 정도로 짧다고 가정하면 송신 노드가 M 개의 동일한 패킷의 사본을 전송한 후 확인 메시지를 받기 위해 대기하는 최소 시간은 2ϕ 이다. 파라미터 β 를 다음과 같이 정의하자.

$$\beta = M \frac{N}{\zeta} + 2\phi \quad (2)$$

임의의 패킷의 M 개의 사본이 재전송되는 횟수를 R 이라고 하자. 이 때 재전송이 최대 ν 회로 제한된다고 가정하자. 그러면 확률 변수 R 은 다음과 같은 질량(mass)을 갖는다. 모든 $j=0, \dots, \nu-1$ 에 대해

$$\begin{aligned} P(R=j) &= (1-\gamma)^j \\ P(R=\nu) &= \gamma^\nu \end{aligned} \quad (3)$$

임의의 패킷의 (M 개의 사본의) 전송이 시작된 시점에서 이 패킷에 대한 확인 메시지가 송신 노드에 도착하거나 ν 번째 재전송 후 대기 시간이 종료되는 시점까지 소요되는 시간을 C 라고 하자. 그러면

$$C = [R+1] \cdot \beta \quad (4)$$

또한 확률 변수 C 가 갖는 분포 함수(distribution function)의 Laplace-Stieltjes 변환을 Φ_C 라고 하면

$$\Phi_C(s) = \frac{e^{-s\beta} - \gamma e^{-s\beta} + (\gamma e^{-s\beta})^{\nu+1} - e^{-s\beta} (\gamma e^{-s\beta})^{\nu+1}}{1 - \gamma e^{-s\beta}} \quad (5)$$

식 (5)로부터 확률 변수 C 의 평균은 다음과 같이 계산된다.

$$E(C) = \frac{\gamma - \gamma^{\nu+1}}{1 - \gamma} \quad (6)$$

패킷이 송신 노드에 도착하는 시간의 시퀀스를 Poisson point process로 모형화하고 도착률을 λ 라고 하자. 그러면 송신 노드를 도착률이 λ 이고 서비스 시간이 C 인 M/G/1 큐잉 시스템(queueing system)으로 볼 수 있다 [7]. 송신 노드에 n 번째 도착한 패킷의 대기 시간(즉, 패킷이 도착한 시점부터 패킷의 전송이 처음 시작되는 시점까지 소요된 시간)을 W_n 이라고 하자. 만약 $\lambda E(C) < 1$ 이

라면 $n \rightarrow \infty$ 에 대해 $W_n \rightarrow W$ 인 확률 변수 W 가 존재한다 [4]. 또한 W 가 갖는 분포 함수의 Laplace-Stieltjes 변

환을 Φ_w 라고 하면, M/G/1 큐잉 시스템에서 패킷이 떠나 는 시간 직후 큐의 길이에 대한 분석으로부터 다음과 같 이 구해진다 [4][6].

$$\Phi_w(s) = \frac{s[1-\lambda E(C)]}{s-\lambda+\lambda\Phi_C(s)} \quad (7)$$

한편, 수신 노드가 접수한 (즉, 수신 노드로부터 확인 메 시지를 받은) 패킷이 재전송 되는 횟수를 R^* 라고 하면 확률 변수 R^* 는 다음의 질량을 갖는다. 모든 $j=0, \dots, \nu$ 에 대해

$$P(R^*=j) = \frac{(1-\gamma)\gamma^j}{1-\gamma^{\nu+1}} \quad (8)$$

이러한 수신 노드가 접수한 패킷의 도착 시점부터 확인 메시지가 송신 노드에 도착한 시점까지 소요된 시간을 C^* 라고 하면 확률 변수 C^* 는 다음과 같은 표현된다.

$$C^* = [R^*+1] \cdot \beta \quad (9)$$

또한 C^* 가 갖는 분포 함수의 Laplace-Stieltjes 변환을 Φ_{C^*} 라고 하면

$$\Phi_{C^*}(s) = \frac{[1-\gamma][1-(\gamma e^{-s\beta})^{\nu+1}]}{[1-\gamma^{\nu+1}][1-\gamma e^{-s\beta}]} \quad (10)$$

한편, 정상 상태(steady state)에서 수신 노드가 접수한 패킷의 지연 시간(즉, 도착 시점부터 확인 메시지가 송신 노 드에 도착한 시점까지 소요된 시간)을 D^* 라고 하면 확률 변수 D^* 는 다음의 관계를 만족한다.

$$D^* = W + C^* \quad (11)$$

확률 변수 D^* 가 갖는 분포 함수의 Laplace-Stieltjes 변 환을 Φ_{D^*} 라고 하자. 그러면 식 (7)과 (10)의 변환으로부 터

$$\Phi_{D^*}(s) = \Phi_w(s)\Phi_{C^*}(s) \quad (12)$$

식 (12)의 양변을 미분하여 확률 변수 D^* 의 모든 차수의 모멘트(moment)를 계산할 수 있다.

3.2 오류 잔류 확률의 분석

오류 잔류 확률 θ 는 수신 노드가 접수한, 즉 긍정적 확인 메시지를 보낸 패킷에 오류가 남아있을 확률로 정의된다. 2 절에 서술된 바와 같이 수신 노드는 오류가 검출되지 않는 사본을 각각 복호화하여 얻은 K bits의 데이터 조각(segment) 중 우선 최다수를 차지하는 종류의 데이터 조각을 선택하고 이러한 종류가 두 가지 이상일 경우 균 일한 확률로 이 중 한 종류를 선택한다. 따라서 오류가 검출되지 않는 사본을 원래 오류가 없는 사본과 그렇지 않은 사본으로 이분함으로써 확률 θ 에 대해 다음과 같이 상계(upper bound)를 얻을 수 있다. 오류가 검출되지 않 은 사본의 수를 U 라고 하자. 그러면 모든 $j=0, \dots, M$ 에 대해

$$P(U=j) = \frac{\binom{M}{j}(1-\delta)^j\delta^{M-j}}{\sum_{i=0}^M \binom{M}{i}(1-\delta)^i\delta^{M-i}} \quad (12)$$

이러한 U 개의 사본 중 오류가 발생하지 않은 사본의 수

를 V 라고 하자. 그러면 모든 $i=0, \dots, j$ 에 대해

$$P(V=i|U=j) = \binom{j}{i} \left[\frac{1-\delta}{1-\delta} \right]^i \left[\frac{\delta}{1-\delta} \right]^{j-i} \quad (13)$$

오류 잔류 확률 θ 는 U 개의 사본을 오류가 발생한 사본 과 그렇지 않은 사본으로 이분할 때 V 개의 사본이 소수 일 확률보다 작으므로

$$\begin{aligned} \theta &\stackrel{\Delta}{=} \sum_{i=0}^M \left[\sum_{j=0}^{\lfloor \frac{i}{2} \rfloor} P(V=i|U=j)P(U=j)I_{(j \bmod 2=1)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{i}{2} \rfloor - 1} P(V=i|U=j)P(U=j)I_{(j \bmod 2=0)} \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} P(V=\lceil \frac{i}{2} \rceil | U=j)P(U=j)I_{(j \bmod 2=0)} \\ &\geq \theta \end{aligned} \quad (14)$$

3.3 최대 throughput의 분석

패킷의 재전송은 최대 ν 회만이 허용되므로 이로 인한 패킷의 상실이 발생한다. 이러한 패킷의 상실률을 ω 라고 하면 $\omega = \gamma^{\nu+1}$ 이다. 식 (4)에 정의된 시간 C 에 대해 평 균적으로 $E(C)$ 의 시간 동안 최대 한 개의 패킷이 전송 될 수 있고 이 중 상실되지 않고 오류가 남아있지 않은 패킷만을 선별하면 최대 throughput η 는 다음과 같이 표 현된다.

$$\eta = \frac{K}{E(C)}(1-\theta)(1-\omega) \quad (15)$$

또한 식 (14)에 주어진 θ 의 상계 $\bar{\theta}$ 를 이용하여 다음과 같 은 η 의 하계를 얻는다.

$$\bar{\eta} = \frac{K}{E(C)}(1-\bar{\theta})(1-\omega) \leq \eta \quad (16)$$

IV. (M, σ) 규칙의 계량적 성능 검토

본 절에서는 3 절의 해석적 방법을 이용하여 (M, σ) 규칙 의 파라미터 M 과 σ , 채널의 비트 오류율, 송신 노드에 가해지는 트래픽 부하 등이 오류 잔류 확률과 throughput 및 지연 성능에 미치는 영향을 계량적으로 검토한다.

본 절에서 사용하는 파라미터의 값은 부분적으로 GPRS 시스템에서 차용되었다 [2]. Payload의 길이는 400 bits로 고정되고 오류 검출을 위한 부호화에 CRC-12 부호가 사 용된다 [9]. (따라서 패킷의 길이는 412 bits이다.) 또한 송신 노드와 수신 노드간의 전파 지연 시간은 1 μ sec, 데이터 전송률은 20 kbps로 설정된다. 한편 중복 사본의 수 M 은 5로 고정되고 재전송 횟수는 최대 5 회로 제한 된다. 그림 1은 비트 오류율에 따른 오류 잔류 확률을 보 여 준다. (이 그림에서 오류 검출 확률 δ 는 모의 실험 방 법으로 구해졌다.) 예상한 바와 같이 σ 의 증가에 따라 오 류 잔류 확률이 현격히 저하됨을 관찰할 수 있다. 그림 2 는 비트 오류율에 따른 최대 throughput의 변화를 보여 준다. (이 그림에서 단위 시간(time unit)은 패킷의 payload 부분을 전송하는데 소요되는 시간이다.) 그림에서 σ 의 증가에 따라 최대 throughput이 단조 감소함을 볼

수 있다. 이로부터 오류 잔류로 인한 패킷 상실에 비해 재전송의 유한성으로 인한 패킷 상실이 최대 throughput에 주도적으로 작용함을 알 수 있다. 그림 3은 비트 오류율이 0.005일 때 트래픽 부하에 따른 평균 패킷 지연 시간을 보여 준다. (이 그림에서 패킷 도착 시간은 Poisson point process로 모형화되어 있다.) 모든 트래픽 부하에 대해 σ 의 증가에 따라 평균 지연 시간이 길어짐을 볼 수 있으며, 이는 σ 의 증가에 따른 재전송 횟수의 증가에 기인한다.

V. 결론

본 논문에서는 패킷을 중복 전송하는 ARQ 방식에서 수신 노드가 오류를 검출한 후 패킷의 재전송을 요청하는 일반화된 규칙으로 (M, σ) 규칙을 제안하였다. 이러한 (M, σ) 규칙은 파라미터 σ 의 변화에 따라 여러 성능 측면에서 상반된 결과를 보인다. 따라서 (M, σ) 규칙의 계량적 성능 평가를 위해 오류 잔류 확률, 패킷 상실률, 최대 throughput, 평균 패킷 지연 시간, 최대 패킷 지연 시간, 지연 번이 등을 계산하는 해석적 방법을 개발하였다. 이러한 해석적 방법을 이용하여 수행된 (M, σ) 규칙의 계량적 성능 검토를 통해 오류 잔류 확률과 throughput 및 지연 시간의 trade-off를 관찰하였다. 또한 다양한 QoS 요구 조건을 수용할 수 있는 (M, σ) 규칙의 적응성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] A. Annamalai and V. Bhargava, "Analysis and Optimization of Adaptive Multicopy Transmission ARQ Protocols for Time-varying Channels," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 46, No. 10, pp. 1356-1368, October 1998.
- [2] R. Bates, *GPRS - General Packet Radio Service*. McGraw-Hill, 2002.
- [3] H. Bruneel and M. Moeneclaey, "On the Throughput Performance of Some Continuous ARQ Strategies with Repeated Transmissions," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 34, No. 3, pp. 244-249, March 1986.
- [4] J. Cohen, *The Single Server Queue*. North-Holland, 1982.
- [5] J. Spragins, J. Hammond and K. Pawlikowski, *Telecommunications - Protocols and Design*. Addison-Wesley, 1991.
- [6] H. Takagi, *Queueing Analysis - A Foundation of Performance Evaluation*. North-Holland, 1991.
- [7] D. Towsley and J. Wolf, "On the Statistical Analysis of Queue Lengths and Waiting Times for Statistical Multiplexers with ARQ Retransmission Schemes," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 27, No. 4, pp. 693-702, April 1979.
- [8] E. Weldon, "An Improved Selective-repeat ARQ Strategy," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 30, No. 3, pp. 480-486, March 1982.
- [9] S. Wicker, *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*. Prentice Hall, 1995.

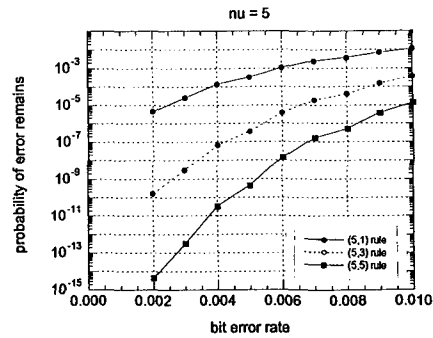


그림 1 비트 오류율에 따른 오류 잔류 확률
Figure 1 Probability of error remains with respect to bit error rate

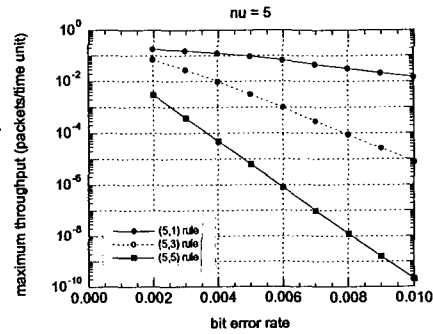


그림 2 비트 오류율에 따른 최대 throughput
Figure 2 Maximum throughput with respect to bit error rate

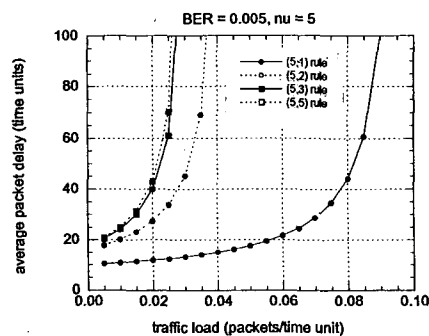


그림 3 트래픽 부하에 따른 평균 패킷 지연 시간 (비트 오류율 : 0.005)
Figure 3 Average packet delay time with respect to traffic load (bit error rate : 0.005)