

논문 2012-49-11-2

# 전송시간의 변화가 큰 네트워크에서 네트워크 코딩을 적용한 전송 지연시간 개선 방법 및 성능 분석

(Delay Improvement from Network Coding in Networks with High  
Coefficient of Variation of Transfer Time)

이 구 연\*, 이 용\*\*

(Goo Yeon Lee and Yong Lee)

## 요 약

본 논문에서는 전송시간의 변화가 큰 네트워크 환경에서 네트워크 코딩을 이용한 종단간 메시지 지연 단축 스킴을 제안한다. 제안된 스킴에서는 메시지를 여러개의 패킷( $g$ 개의 패킷)으로 분할하고, 이에 대하여 네트워크 코딩을 수행함으로써 리던던시 패킷( $r$ 개의 패킷)을 포함하여 만들어진 패킷들( $g+r$ 개의 패킷)을 전송한다.  $g+r$ 개의 패킷 중에서  $g$ 개의 패킷이 도착하면 메시지가 복구되므로 전체적인 메시지 전송지연은 단축된다. 일반적으로 네트워크는 전송하는 패킷의 최대 크기 제한을 두고 있으므로, 이러한 환경에서 본 논문에서 제안한 스킴에서의 지연 단축 효과 및 전송 비용을 고려하여 최적의 패킷 분할 수 및 리던던시 패킷의 수에 대한 분석을 수행한다. 분석 결과로부터 제안된 스킴은 전송시간의 변화가 큰 네트워크에서 큰 효과를 내며, 특히 긴급한 메시지의 전송이 필요할 때 유용함을 알 수 있다.

## Abstract

In this paper, we focus on end-to-end transfer delay improvement by using network coding and propose a scheme where a message is divided into several packets which are network coded generating additional redundancy with the results that the number of transmitted packets increases. In networks with high coefficient of variation of transfer time, increased number of packets could reduce the transfer time of the message to a destination. For the proposed scheme, we investigate the optimum number of divided packets and redundancy considering transfer delay reduction and additional transmission cost caused by using network coding under the restriction of maximum transmission packet size. From the results of the investigation, we see that the proposed scheme is effective in networks having high variability of transfer time and would be very useful and practical especially for the case that expedited deliveries of messages are needed.

**Keywords**: 종단간 지연 단축, 네트워크 코딩, 최대 전송 패킷 사이즈, 전송비용

## I. 서 론

지금까지 네트워크 코딩에 대한 연구는 주로 네트워크 운영의 효율성과 용량 증가 등의 측면을 주로 다루어 왔다. 그러나 종단간 전송 시간 향상과 관련된 네트워크 코딩의 효과는 거의 다루어 지지 않았다. 유선망이나 셀룰러 망처럼, 안정된 전송시간을 갖거나 전송시

\* 정회원, 강원대학교 컴퓨터학부  
(Dept. of Computer Eng. Kangwon National University)

\*\* 정회원, 코넬대학교 연구원  
(Dept. of ECE, Cornell University)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2012-0004625)

접수일자: 2012년2월8일, 수정완료일: 2012년10월29일

간의 변화가 작은 네트워크에서는 네트워크 코딩의 적용으로 인한 메시지 전송 시간 향상이 크게 기대되지 않는다. 반면에 애드혹 네트워크나 센서 네트워크처럼 전송시간의 변화의 폭이 큰 네트워크에서는 네트워크 코딩을 사용할 경우 메시지 전송 시간의 향상이 클 것으로 기대된다. 따라서 네트워크 코딩을 적용할 경우의 메시지 전송시간의 향상에 대한 연구가 필요하며, 특히 이런 연구 결과는 노드들이 항상 이동하고 이에 따라 전송 시간의 변화가 큰 애드 혹 네트워크 및 sparse 무선 네트워크의 설계에 유용할 것이다.

이에 본 논문에서는 네트워크 코딩을 위한 메시지 지연 단축을 위한 스킴을 제안하고 그 성능을 분석한다. 제안된 스킴이 적용할 경우의 예를 들면 다음과 같다. 한 소스 노드가 전송시간의 변화가 큰 네트워크를 통해 목적지 노드로 긴급 메시지를 보내고자 한다. 이 메시지의 기대 전달시간은 네트워크 일반적인 평균 전달 시간보다 훨씬 빨라야 한다고 가정하자. 소스 노드는 이 메시지를  $g$ 개의 패킷으로 나누고 네트워크 코딩을 통하여  $r$ 개의 리던던시 패킷과 함께 목적지 노드에게 전송한다. 목적지 노드에서는  $g+r$ 개의 패킷 중에  $g$  개의 패킷이 도착하면 메시지를 복구할 수 있게 된다. 이때 먼저 도착한  $g$ 개 패킷의 전송 시간은 일반적인 메시지의 전송시간보다 짧을 것이다.

이와 같은 전송시간의 단축은 리던던시 패킷의 추가로 인한 네트워크 자원의 추가 사용으로 인하여 얻어진다. 이러한 네트워크 자원의 추가 사용은 소스 노드가 네트워크에 지불하는 전송비용의 증가로 이루어진다. 따라서 네트워크 코딩으로 인한 네트워크 전송 시간의 감소와 전송 비용의 증가는 트레이드오프 관계에 있게 된다. 일반적으로 네트워크는 전송하는 패킷의 최대 크기 제한을 두고 있으므로, 본 논문에서는 이러한 환경에서 위의 트레이드오프에 대한 최적의 분할 패킷의 수 및 리던던시 패킷의 수를 분석하고자 한다.

## II. 관련 연구

지금까지 네트워크 코딩으로 인한 지연시간 개선에 대한 연구는 주로 코딩으로 인한 지연을 최소화하는 방향으로 진행되어 왔으며<sup>[1, 3, 5~6]</sup>, 각 노드에서의 코딩과 디코딩 수행시간을 줄여서 네트워크 처리율을 향상시키기 위한 연구들이 대부분이다<sup>[1, 6~8]</sup>. Cleju 등은 오버래

이 네트워크에서 네트워크 코딩을 수행하는 노드들을 가정하여, 패킷의 전송 속도를 높이고 패킷 전송 지연이 작게 유지되도록 하는 방법을 제시하였으며, 네트워크 내에 네트워크 코딩을 적용한 노드를 몇 개만 추가하더라도 전송 지연의 향상이 있음을 보여주었다<sup>[7]</sup>. 또한 전송지연을 향상시키기 위한 최적의 네트워크 코딩 적용 노드의 수를 구하였다.

[1][3][4] 등의 논문에서는 처리율과 코딩 지연 사이의 관계에 대하여 연구하였다. 이 논문들은 주로 코딩 알고리즘을 개선하여 코딩 지연을 감소시키거나, 코딩 스케줄링을 제어하여 코딩 지연을 줄이는 방법에 대하여 연구하였다.

[1]에서는 전통적인 스케줄링 방법과 비교하여 네트워크 코딩을 이용할 경우의 지연 성능에 대하여 관찰하고 이를 개선하기 위한 정책들을 제안하였으며 지연 분석을 위해 필요한 지연 표현 방법을 제안하였다. 그리고 적절하고 점근적인 값의 시스템 변수들로 코딩과 스케줄링을 이용하여 지연 성능이 좋아짐을 보여주었다. 저자들이 보여준 결과는 신뢰성 없는 네트워크에서 코딩을 이용할 경우 유효한 지연 개선 효과를 가질 수 있음을 나타낸다.

Swapna 등은 랜덤 선형 네트워크 코딩(random linear network coding)에서 디코딩 지연 성능과 처리율을 수신자의 수와 관련하여 분석하였다<sup>[3]</sup>. [4]에서는 다양한 노드 이동성을 갖는 네트워크에서 네트워크 코딩의 처리율과 지연사이의 트레이드오프에 대하여 연구하였다.

Wu 등과 Prasad 등은 지연 측면에서 네트워크내에서의 네트워크 코딩의 이점을 살펴보았다<sup>[2, 6]</sup>. 또한 [9][10]에서는 네트워크 코딩 지연의 모델링 방법을 보여주고 있다. Dikaliotis 등은 패킷 이레이저(erasure) 네트워크에서 네트워크 코딩을 사용할 경우의 지연 향상 효과에 대하여 분석하였다<sup>[11]</sup>.

## III. 분석 모델

송신 노드(sender)가 수신 노드(recipient)에게 메시지를 보내는 경우를 가정하자. 송신노드와 수신 노드의 시각에서는 두 노드사이에 그림 1과 같은 전달 네트워크가 있는 것으로 모델링할 수 있다.

그림 1의 모델에서 전달 네트워크의 패킷 전송 시간

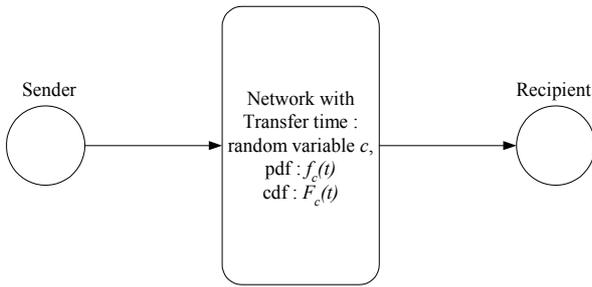


그림 1. 네트워크 코딩을 적용한 전송 시간 향상 분석을 위한 모델

Fig. 1. An analytical model for delay improvement using network coding.

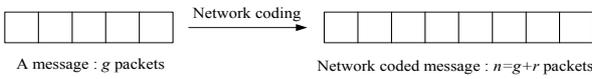


그림 2. 메시지의 네트워크 코딩 과정

Fig. 2. Network coding of a message.

을 랜덤 변수  $c$  로 나타내고, pdf 및 cdf를 각각  $f_c(t)$  및  $F_c(t)$ 로 주어진다 가정한다.

위와 같은 환경에서, 송신 노드가 보낼 메시지가 있을 경우 본 논문에서 제안한 다음과 같은 스킴에 따른다. 먼저 해당 메시지를  $g$  개의 패킷들로 분할한다.

분할된  $g$ 개의 패킷을 네트워크 코딩을 수행하여  $n=g+r$ 개의 패킷들을 생성한다(그림 2 참조). 즉 네트워크 코딩과정에서  $r$ 개의 리던던시 패킷이 추가된다. 생성된  $n$ 개의 패킷을 전송한다. 수신노드는 먼저 도착하는  $g$ 개의 패킷들로부터 원래의 메시지를 복구할 수 있다.  $n$ 개의 패킷중 먼저 도착하는  $g$ 개의 패킷에 대한 지연은 정상적인 패킷 지연보다 적어지게 되므로, 송신 노드는 메시지를 빨리 목적지에 전송할 수 있게 된다.

위의 제안된 스킴에서, 송신 노드는 메시지의 지연시간 감축에 대한 대가로서 네트워크에 추가적인 비용을 지불하게 되는데, 본 논문에서는 지연시간 감축과 추가 비용 사이에서의 최적의 분할 패킷 수 및 리던던시 패킷 수에 대한 분석을 수행한다. 다음은 분석을 위해 본 논문에서 이용된 가정이다.

- 네트워크의 전송시간이 길고, 패킷 전송시간의 변화의 폭이 크다고 가정한다.
- 송신 노드에서의 transmission 시간과 큐잉 시간은 패킷의 전달시간에 비하여 매우 작아 무시할 수 있다고 가정한다..
- 네트워크 코딩을 이용하여 보내는 긴급 메시지의

양은 제한되고 매우 적어서 네트워크의 전송 지연 시간의 분포에 영향을 주지 않는 것으로 가정한다.

- 각 패킷들은 송신 노드로부터 동시에 전송되더라도 각각 독립적인 경로로 전송될 수 있다고 가정한다. 이런 특징을 가질 가능성 있는 네트워크의 예들은 다음과 같다.

1. 네트워크의 경로가 매우 길어서 패킷들이 중간 노드에서 각기 다른 방향으로 전송될 수가 있는 경우
2. 네트워크 토폴로지가 매우 다양하고 동적으로 변화하여 임의의 중간 노드에서의 패킷 전송의 다음 홉 노드가 그때그때 달라지는 경우
3. 노드들이 계속 움직이면서 만나는 다른 노드들에게 패킷들을 전달하는 sparse 애드혹 네트워크 등

- 본 논문에서는 그림 1의 전달 네트워크의 패킷 전송 시간을 평균전달시간이  $1/\lambda_c$ 인 지수분포를 갖는 경우를 고려한다. 즉  $f_c(t)$  및  $F_c(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$f_c(t) = \lambda_c e^{-\lambda_c t}; F_c(t) = 1 - e^{-\lambda_c t} (t > 0) \quad (1)$$

#### IV. 네트워크 코딩에 의한 종단간 전송 지연 비용 향상 분석

##### 1. 네트워크 코딩 및 분석 과정

본 논문에서 제안한 스킴에서의 네트워크 코딩 과정은 그림 3과 같다. 먼저 길이가  $L$ 인 메시지를  $g$ 개의 패킷으로 분할하고(각 패킷의 크기는  $\frac{L}{g}$ 임), 이를 네트워크 코딩을 수행하여  $r$ 개의 패킷이 추가된  $n=g+r$ 개의 패킷을 전송한다.

네트워크 코딩을 수행하지 않을 때에는 분할 과정만을 수행할 수 있으며, 이 경우 메시지는  $g$ 개의 패킷으로 나뉘어 전송한다. 여기서  $g=1$ 의 경우는 분할과정을 수행하지 않는 경우를 뜻한다.

네트워크 코딩을 적용하는 경우 송신 노드는 메시지를 리던던시와 함께 총  $n=g+r$  개의 패킷을 보내나, 이 중 목적지 노드에 먼저 도착한  $g$  개의 패킷으로부터 원본 메시지가 복구될 수 있다. 그러므로  $n$ 개의 송신 패

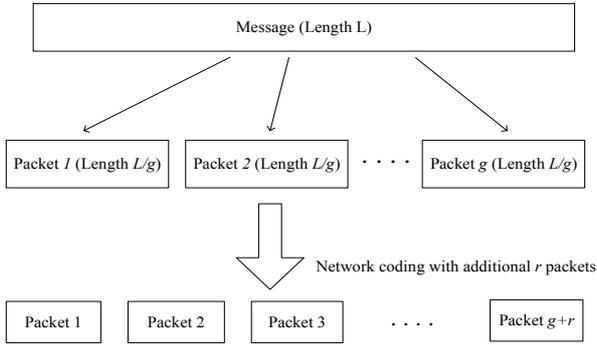


그림 3. 크기  $L$ 인 메시지에 대한 분할 및 네트워크 코딩 과정

Fig. 3. Fragmentation and network coding of a message with length  $L$ .

킷 중에서  $g$ 번째로 도착한 패킷의 지연이 그 메시지의 전달지연이 된다. 그 지연을 랜덤변수  $d$ 라고 하고,  $d$ 의 pdf를  $f_d(t)$ 라고 한다면, [12]로부터  $f_d(t)$ 를 구할 수 있다.

$$f_d(t) = \frac{n!}{(g-1)!(n-g)!} f_c(t) [F_c(t)]^{g-1} [1 - F_c(t)]^{n-g} \quad (2)$$

(1)식을 (2)식에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_d(t) &= \frac{n!}{(g-1)!(n-g)!} f_c(t) [F_c(t)]^{g-1} [1 - F_c(t)]^{n-g} \\ &= \frac{n!}{(g-1)!(n-g)!} \lambda_c e^{-\lambda_c t} [1 - e^{-\lambda_c t}]^{g-1} [e^{-\lambda_c t}]^{n-g} \\ &= \frac{n!}{(g-1)!(n-g)!} \lambda_c e^{-(n-g+1)\lambda_c t} [1 - e^{-\lambda_c t}]^{g-1} \\ &= \frac{n!}{(g-1)!(n-g)!} \lambda_c e^{-(n-g+1)\lambda_c t} \sum_{k=0}^{g-1} \frac{(g-1)!}{k!(g-1-k)!} (-1)^k e^{-k\lambda_c t} \\ &= \frac{n!}{(n-g)!} \lambda_c \sum_{k=0}^{g-1} \frac{(-1)^k}{k!(g-1-k)!} e^{-(n-g+1+k)\lambda_c t} \end{aligned} \quad (3)$$

$r=n-g$ 을 식(3)에 대입하면 다음과 같다.

$$f_d(t) = \frac{(g+r)!}{r!} \lambda_c \sum_{k=0}^{g-1} \left[ \frac{(-1)^k}{k!(g-1-k)!} e^{-(r+1+k)\lambda_c t} \right] \quad (4)$$

따라서 메시지의 평균 지연시간  $\bar{d}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{d} &= \int_0^{\infty} t \cdot f_d(t) dt \\ &= \frac{(g+r)!}{r!} \lambda_c \sum_{k=0}^{g-1} \left[ \frac{(-1)^k}{k!(g-1-k)!} \int_0^{\infty} t e^{-(r+1+k)\lambda_c t} dt \right] \\ &= \frac{(g+r)!}{r!} \lambda_c \sum_{k=0}^{g-1} \left[ \frac{(-1)^k}{k!(g-1-k)!} \frac{1}{(r+1+k)^2 \lambda_c^2} \right] \\ &= \frac{(g+r)!}{r!} \frac{1}{\lambda_c} \sum_{k=0}^{g-1} \left[ \frac{(-1)^k}{k!(g-1-k)!} \frac{1}{(r+1+k)^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

## 2. 비용 요소 및 결과 분석

송신노드가 긴급 전송으로 메시지를 보낼 경우에는 메시지 전달시간이 빠르고 늦음에 따른 이익 또는 비용을 계상하게 된다. 즉 빨리 도착하게 되면 이익이 커지고, 반대로 늦게 도착하면 이익이 작아지는 것으로 해석할 수도 있고, 또는 마찬가지로 관계로서 이익은 비용의 개념으로 대치되어, 빨리 도착하게 되면 비용이 줄어들고, 늦게 도착하면 비용이 많이 드는 구조로서 해석할 수도 있다. 본 결과 분석에서는 패킷을 전달하는데 송신 노드가 네트워크에 지불하는 전달 비용을 같이 고려하게 되므로, 위의 두 가지 해석 중에서 후자의 “비용” 해석을 취한다. 메시지 전달 지연에 따른 비용함수는 메시지 전달 지연의 함수로서 나타낼 수 있다. 즉 메시지 전달 지연에 따른 비용함수를  $K(\bar{d})$ 라고 하자.

네트워크를 통하여 패킷을 전달할 때 송신 노드가 네트워크에 지불해야 하는 비용은 여러 가지 요소로 구성될 수 있으나, 본 논문에서는 메시지에 대하여 총 전송된 비트 수 및 전송된 패킷의 수, 그리고 수신 노드에서 역 네트워크 코딩을 통해 메시지를 복구하는 비용의 세 가지만을 고려한다. 총 전송된 비트수는 네트워크의 대역폭을 사용하면서 발생된 비용이며, 패킷의 수 관련 비용은 네트워크내의 노드들에서 패킷의 처리를 위한 프로세싱을 수행하면서 발생한 비용이다. 또한 역 네트워크 코딩을 통한 메시지 복구 비용은 수신된 목적지 노드에서의 프로세싱 비용이다.

본 결과 분석에서 패킷 당 전송에 필요한 소요비용을  $H$ 라고 하자. 그러면 전송 패킷의 수가  $n=g+r$  이므로 전체 패킷 수에 대한 전달 비용은  $H \cdot n = H \cdot (g+r)$  이 된다. 또한 메시지 길이  $L$  bits 에 대한 전송비용을  $B$ 라고 하면 총 전송 비트수는  $\frac{L}{g}(g+r)$  이므로 그에 대한 전달 비용은  $\frac{B}{g}(g+r)$ 가 된다. 일반적으로 역 네트워크 코딩은 역행렬의 계산을 거치며,  $m \times m$ 의 역행렬 계산의 가장 빠른 알고리즘의 complexity는  $O(m^3)$ 으로 주어진다. 본 스킴에서는 수신 노드에서  $g$ 개의 패킷을 수신하면 원본 메시지의 복구를 할 수 있으므로  $g \times g$ 의 역행렬 계산이 필요하다. 그러므로 이에 대한 계산 비용을  $Q \times g^3$ 라 가정한다. 여기서  $Q$ 는 단위 계산량당 소요되는 비용이다.

위의 비용 요소에 대한 여러 가정으로부터, 우리는

메시지 전달에 대한 총 비용,  $C_L$ , 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_L = K(\bar{d}) + (g+r)\left(\frac{B}{g} + H\right) + Q \cdot g^3 \quad (6)$$

(1) 평균 전송지연

이 절에서는 위의 식들을 이용하여 전송 지연의 향상에 대하여 구체적으로 고찰한다.  $\lambda_c = 0.1$  이라고 가정하면, 한 패킷의 평균 네트워크 전송 지연이 10이 된다. 그림 4는 식(5)로부터 분할 패킷의 수와 리턴던시 패킷 수의 변화에 따른 평균 지연시간을 보여준다. 그림 4로부터 분할 패킷의 수,  $g$ 가 커짐에 따라 메시지 전송 지연시간도 증가함을 알 수 있다. 즉,  $a < b$ 일 때,  $g=a$ 의 메시지 지연시간이  $g=b$ 인 경우보다 낮게 나타난다.  $g=1$ 인 경우는 제일 낮은 지연시간을 보여준다. 또한 리턴던시 패킷의 수가 증가할수록 메시지의 전달 지연 시간은 크게 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 리턴던시 패킷의 증가로 소스 노드가 보내는 총 패킷의 수,  $n$ 이 증가하지만,  $n$ 개의 패킷 중에서  $g$ 개의 패킷만이 목적지에 도착하게 되면 메시지를 복구할 수 있으므로 목적지에 먼저 도착하는  $g$ 개의 패킷의 지연시간이 크게 낮아지게 되기 때문이다. 이 지연시간이 메시지 전송의 실제 지연시간이 된다.

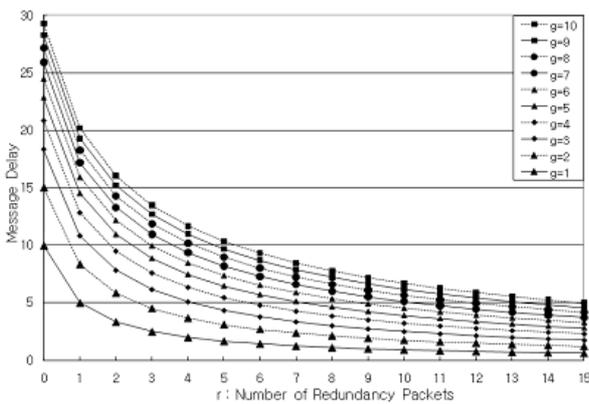


그림 4.  $g$  와  $r$  의 변화에 따른 메시지 지연시간  
Fig. 4. Message delay when  $g$  and  $r$  vary.

(2) 종단간 전송 지연 비용

본 절에서 메시지 전달 지연에 따른 비용함수  $K(\bar{d})$ 에 대하여  $K(\bar{d}) = 1 \times \bar{d}$  과  $K(\bar{d}) = \exp(0.1 \times \bar{d})$  의

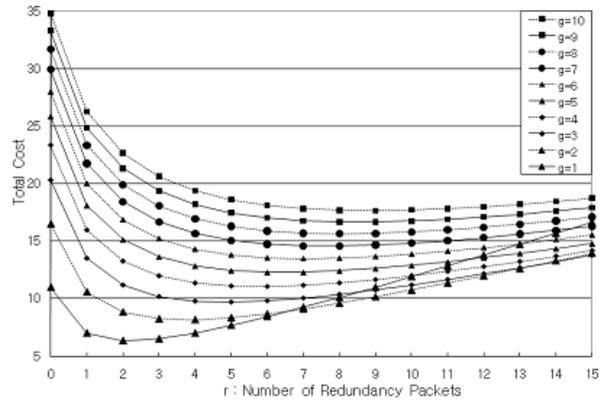


그림 5.  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  이고  $K(\bar{d}) = 1 \times \bar{d}$  에서의 메시지 전송의 총 비용

Fig. 5. Total cost for a message delivery when  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  and  $K(\bar{d}) = 1 \times \bar{d}$ .

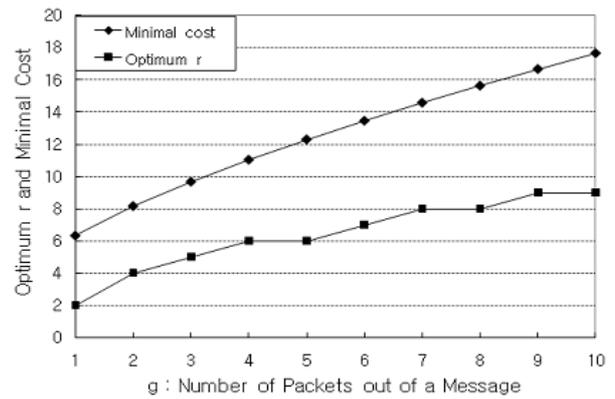


그림 6.  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  이고  $K(\bar{d}) = 1 \times \bar{d}$  에서의  $g$ 의 변화에 따른 최소 비용과 이를 만족하는 최적의  $r$  값

Fig. 6. Minimum total cost and optimal value of  $r$  when  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  and  $K(\bar{d}) = 1 \times \bar{d}$  as  $g$  varies.

두 가지 경우를 고려한다. 물론 송신 노드입장에서 다른 임의의 비용함수를 가정하여 적용할 수 있으며, 어느 경우에도 본 논문에서 분석한 과정을 그대로 따라갈 수 있다.

그림 5는 식 (6)에서의 총 비용을  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  이고  $K(\bar{d}) = 1 \times \bar{d}$  을 적용할 때의 결과를 나타낸 그래프이다. 또한 그림 6은 그림 5에서 메시지의 분할 패킷의 수  $g$ 에 따른 최소의 비용과 그때의 리턴던시 패킷의 수  $r$ 값을 나타내었다. 그림 5 및 6의 그림에서 네트워크 코딩으로 인코딩된 패킷의 수가 증가함에 따라 총 비용이 최소가 되는 리턴던시 패킷의 수도 증

가함을 알 수 있다. 또한 패킷의 수,  $g$ 가 증가함에 따라 총 비용도 또한 증가하는데 그 이유는 식(6)에서 보여주는 것처럼,  $g$ 의 증가가 네트워크 코딩된 총 패킷의 수( $n=g+r$ )의 증가에 영향을 미치기 때문이다.

그림 7과 그림 8은  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  이고  $K(\bar{d}) = \exp(0.1 \times \bar{d})$ 를 적용할 때 메시지 전송의 총 비용과 최소 비용을 각각 그래프로 나타낸 것이다.

그림 5와 그림 7에서  $g=1$ 일 때, 총 비용이 최적의 값을 나타낸다. 이는 최선의 비용을 얻기 위해서는 메시지를 여러 개의 패킷으로 분할하지 않아야 한다는 것을

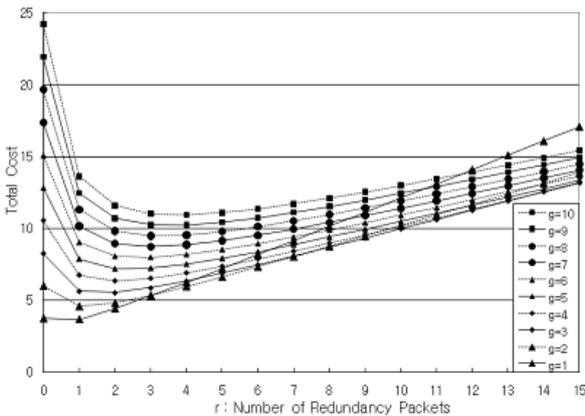


그림 7.  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  이고  $K(\bar{d}) = \exp(0.1 \times \bar{d})$ 에서의 메시지 전송의 총 비용

Fig. 7. Total cost for a message delivery when  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  and  $K(\bar{d}) = \exp(0.1 \times \bar{d})$ .

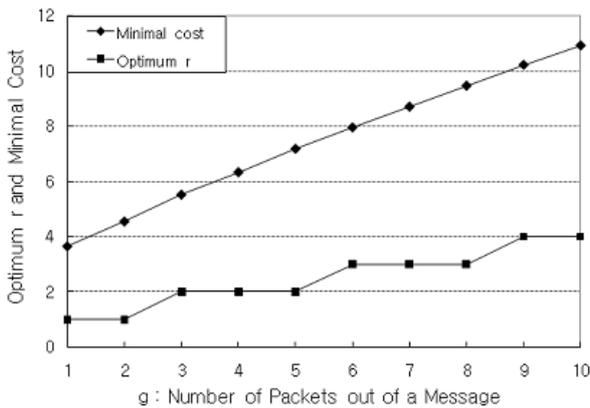
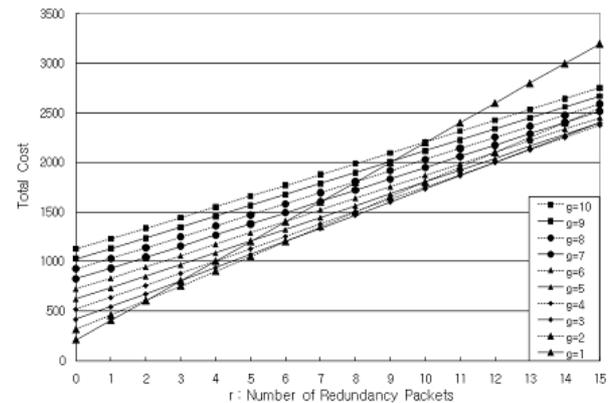


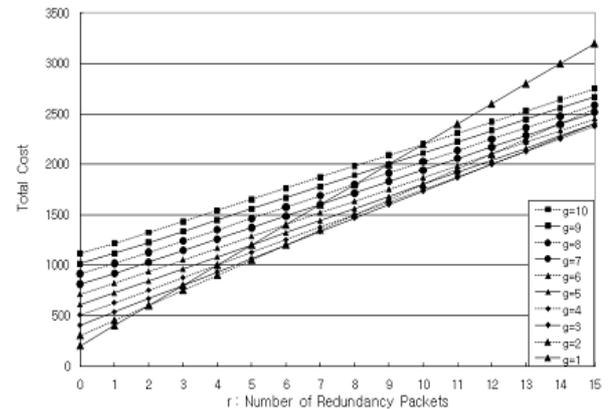
그림 8.  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  이고  $K(\bar{d}) = \exp(0.1 \times \bar{d})$ 에서의  $g$ 의 변화에 따른 최소 비용과 이를 만족하는 최적의  $r$  값

Fig. 8. Minimum total cost and optimal value of  $r$  when  $B=0.5, H=0.5, Q=10^{-5}$  and  $K(\bar{d}) = \exp(0.1 \times \bar{d})$  as  $g$  varies.

의미한다. 그림 6에서는  $g=1, r=2$ 일 때 최소 비용이 6.3333임을 보여준다. 그림 8은  $g=1, r=1$ 일 때 최소 비용이 3.6487임을 보여준다. 그러나 일반적으로 모든 네트워크는 패킷의 전송에 있어서 최대 패킷 사이즈( $P$ )를 규정하고 있기 때문에, 만약 메시지 크기  $L$ 이  $P$ 보다 큰 경우, 메시지는  $L/g \leq P$ 인 최소 크기의  $g$ 로 분할되어 전송되어야 한다. 예를 들어  $L=10,000$ 이고  $P=2,000$ 라 가정하면,  $g=5$ 가 되고 이 경우의 최소 비용은 그림 5와 그림 6으로부터  $r=6$ 일 때, 최소비용이 12.3이 되고 그림 7과 그림 8에서는  $r=2$ 일 때 최소비용이 7.184가 됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 9.  $B=100, H=100, Q=10^{-5}$  일 때, 지연시간 비용 함수가 (a)  $K(\bar{d}) = 1 \times \bar{d}$  와 (b)  $K(\bar{d}) = \exp(0.1 \times \bar{d})$  인 경우 메시지 전송의 총비용

Fig. 9. Total cost for a message delivery when  $B=100, H=100, Q=10^{-5}$  and (a)  $K(\bar{d}) = 1 \times \bar{d}$ , (b)  $K(\bar{d}) = \exp(0.1 \times \bar{d})$ .

$H$ 의 값 및  $B$ 의 값은 노드가 메시지 전달을 위해 네트워크에 지불해야 하는 비용과 관계가 있다. 그러므로  $H$  및  $B$ 의 값이 커질수록 전달 비용이 늘어나게 되고, 메시지를 빨리 전달함으로써 얻는 이익은 상대적으로 비중이 작아지게 된다. 그림 9(a) 및 그림 9(b)에 이러한 경우에 대한 분석 결과의 예로서  $B=100$ ,  $H=100$ ,  $Q=10^{-5}$  일 때, 지연시간 비용 함수가 각각  $K(\bar{d})=1 \times \bar{d}$  와  $K(\bar{d})=\exp(0.1 \times \bar{d})$  일때의 총 비용을 나타내었다.

위의 그래프에서  $g=1$  및  $r=0$ 일 때, 총비용은 최소가 되며, 분할 패킷의 수가 늘어날수록, 또한 리턴던시 패킷의 수가 늘어날수록 총 비용은 급격히 늘어나는 것을 알 수 있다. 즉 송신 노드는 패킷 전달 비용이 비싸므로 이를 최소로 하기 위해 원본 메시지를 하나의 패킷으로 리턴던시 패킷이 없이 그대로 전송하는 것이 가장 유용함을 나타낸다.

## VII. 결 론

본 논문에서는 네트워크 코딩을 이용하여 메시지를 전송하면 전달 지연시간이 크게 줄어들 수 있다는 점에 착안하여, 전송시간의 변화가 큰 네트워크 환경에서 네트워크 코딩을 이용한 종단간 메시지 지연 단축 스킴을 제안하였다. 그리고 제안된 스킴에 대하여 메시지 지연의 단축 효과를 조사하였으며, 또한 네트워크 코딩을 수행함에 따른 추가 비용을 고려한 총 비용에 대한 최적의 분할 패킷 수 및 리턴던시 수를 분석하였다. 분석 과정에서 메시지 지연에 대한 비용으로 지연에 대한 선형적인 값 및 지수 값을 갖는 두 가지 함수를 고려하였으며, 네트워크 전달 비용으로는 전송된 총 비트수 및 패킷 수, 그리고 수신 노드에서 메시지를 복구하는 프로세싱 비용을 고려하였다. 분석결과로부터, 송신노드는 패킷을 분할하지 않은 상태에서 리턴던시를 추가한 네트워크 코딩을 이용하는 것이 가장 효율적임을 알 수 있었다. 그러나 메시지의 길이가 긴 경우, 일반적으로 네트워크는 최대 전송 패킷 사이즈를 운영하고 있으므로, 메시지의 분할을 수행해야 하는데, 이 경우 패킷의 크기를 최대 전송 패킷사이즈에 가장 가깝도록 분할하여, 본 논문에서 구한 최적의 리턴던시 패킷 수에 맞추어 네트워크 코딩을 수행하여 전송해야 비용을 최소화할 수 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Atilla Eryilmaz, Asuman Ozdaglar, Muriel Medard, and Ebad Ahmed, "On the Delay and Throughput Gains of Coding in Unreliable Networks", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 54, No. 12, pp. 5511-5524. Dec. 2008.
- [2] Xiaofu Wu, Chunming Zhao, and Xiaohu You, "Generation-Based Network Coding over Networks with Delay", in 2008 IFIP International Conference on Network and Parallel Computing, pp.365 - 368, Shanghai, China, Oct. 2008.
- [3] B. T. Swapna, Atilla Eryilmaz, and Ness B. Shroff, "Throughput-Delay Analysis of Random Linear Network Coding for Wireless Broadcasting", in 2010 IEEE International Symposium on Network Coding(NetCod), pp. 1-6, Toronto, ON, June 2010.
- [4] Chi Zhang, and Yuguang Fang, "Throughput-Delay Tradeoffs in Large-Scale MANETs with Network Coding," in IEEE INFOCOM 2009, pp. 199-207, Rio de Janeiro, April 2009.
- [5] Maricica Nistory, Joao Barrosy, Fausto Vieira, Tiago T. V. Vinhozay and Joerg Widmerz, "Network Coding Delay: A Brute-Force Analysis", in Information Theory and Applications Workshop(ITA) 2010, pp.1 - 5, SanDiego, CA, Jan. 2010.
- [6] K. Prasad and B. S. Rajan, "Single-Generation Network Coding for Networks with Delay", in IEEE ICC 2010, pp.1-6. CapeTown, SouthAfrica, May 2010.
- [7] Nicolae Cleju, Nikolaos Thomos, and Pascal Frossard, "Network coding node placement for delay minimization in streaming overlays", in IEEE ICC 2010, pp. 1 - 5, Cape Town, South Africa, May 2010.
- [8] Rui A. Costa, Daniele Munaretto, Joerg Widmer and Joao Barros, "Informed Network Coding for Minimum Decoding Delay", in 5<sup>th</sup> IEEE MASS 2008, pp.80-91, Atlanta, GA., Sept. 2008.
- [9] Yang Xiaoj, "Delay Modeling for Wireless Network Coding Multicast", in IEEE CMC 2010, pp.86-89, Shenzhen China, April 2010.
- [10] Ali Mahmino, Jerome Lacan and Christian Fraboul, "Guaranteed Packet Delays with Network Coding", in 5<sup>th</sup> IEEE Annual Communications Society Conference on SECON

Workshops '08., pp. 1 - 6, San Francisco, CA, June 2008.

- [11] Theodoros K. Dikaliotis, Alexandros Dimakis, Tracey Ho and Michelle Effros, "On the Delay Advantage of Coding in Packet Erasure Networks", in 2010 IEEE Information Theory Workshop, pp.1-5, Dublin, Aug. 2010.
- [12] Saeed Ghahramani, "Fundamentals of Probability", 2nd Ed, Prentice-Hall, pp. 346, Eq.(8.16), 2000
- [13] Kun-Cheng Chung, Yi-Chin Li and Wanjiun Liao, "Exploiting Network Coding for Data Forwarding in Delay Tolerant Networks", in IEEE 71st VTC 2010 Spring, pp. 1 - 5, Taipei, May 2010.
- [14] Wai-Leong Yeow, Anh Tuan Hoang and Chen-Khong Tham, "On Average Packet Delay Bounds and Loss Rates of Network-Coded Multicasts over Wireless Downlinks", in IEEE ICC 2009, pp. 1 - 6, Dresden, June 2009.
- [15] Wai-Leong Yeow, Anh Tuan Hoang and Chen-Khong Tham, "Minimizing Delay for Multicast-Streaming in Wireless Networks with Network Coding," in IEEE INFOCOM 2009, pp. 190 - 198, Rio de Janeiro, April 2009.
- [16] F. Chiti, R. Fantacci, R. A. Johnson, V. Crnojević, and D. Vukobratović "End-to-end Delay Analysis for Reliable Communications over Lossy Channels: Integrating Network Coding and ARQ Schemes", in IEEE GLOBECOM 2009, pp.1 - 5, Honolulu, HI, Nov. 2009.
- [17] Zhiguo Ding, Ma Zheng and Kin K. Leung, "Impact of Network Coding on System Delay for Multi-source Multi-destination Scenarios", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.59 No.2, pp.831 - 841, Feb. 2010.

---

— 저 자 소 개 —

---



이 구 연(정회원)

1986년 서울대학교 전자공학과  
(학사)

1988년 KAIST 전기및전자공학과  
(석사)

1993년 KAIST 전기및전자공학과  
(박사)

1993년~1996년 디지콤정보통신 연구소

1996년 삼성전자

1997년~현재 강원대학교 컴퓨터학부 교수

<주관심분야 : 이동통신, 네트워크보안, 인터넷, 초고속통신망, ad-hoc 네트워크>



이 용(정회원)-교신저자

1997년 연세대학교 컴퓨터과학과  
(석사)

2001년 연세대학교 컴퓨터과학과  
(박사)

1993년~1994년 디지콤정보통신  
연구소

2001년~2003년 한국정보보호진흥원 선임연구원

2004년~2005년 코넬대학교 방문연구원

2005년~2007년 삼성전자 통신연구소 책임연구원

2008년~2010년 충주대학교 전자통신공학전공  
조교수

2009년~현재 코넬대학교 방문연구원

<주관심분야 : Mobile and Wireless Security, Ubiquitous Sensor Network, Wireless Mesh Network, Mobile Ad hoc network>