

# ARQ 시스템에서 네트워크 부호화를 사용한 양방향 협력통신의 성능 분석

변일무<sup>o</sup>, 김광순<sup>o</sup>

연세대학교 전기전자공학과

## Performance of Two-way Cooperative Communication Protocols Using Network Coding for ARQ Schemes

Ilmu Byun<sup>o</sup>, Kwang Soon Kim<sup>o</sup>

Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University

{dlfan, ks.kim}@yonsei.ac.kr,

### 요 약

양방향 중계 채널 (two-way relay channel) 은 2 개의 노드가 중계기 (relay) 의 도움을 받아 양방향의 정보를 주고 받는 협력 통신 (cooperative communication) 채널이다. 기존의 협력 통신에서는 중계기가 시간 또는 주파수 자원을 나누어 양방향으로 신호를 송신하지만, 네트워크 부호화 (network coding) 를 사용한 양방향 중계 채널에서는 중계기가 동일 자원을 사용하여 두 단말로 신호를 동시에 송신하므로 기존 기법보다 높은 통신용량을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 ARQ 환경에서 네트워크 부호화를 사용한 협력통신 프로토콜을 제안하고, 이를 스테이트 다이어그램 (state diagram) 을 이용하여 성능을 분석하였다.

### 1. 서론

협력 통신 (cooperative communication) 기법은 여러 명의 사용자가 있는 환경에서 두 단말간의 통신을 중계기 (relay)가 도움으로써 다중안테나에서와 같은 송신 다이버시티 (transmit diversity) 를 얻는 기법이다. 이 기법은 애드혹 (ad-hoc) 네트워크나 메쉬 (mesh) 네트워크와 같이 기지국이 없는 환경에서도 통신 시스템의 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다. [1]에서는 이론적으로 송신단, 수신단, 그리고 중계기의 3 개의 노드가 있는 환경에서 협력 통신의 용량 (capacity)을 이론적으로 얻었다. 그 후, 실제로 협력 통신을 수행하기 위한 프로토콜과 전송 기법이 제안되었다 [2][3]. DF (decode-and-forward) 방식은 중계기에서 송신단으로부터 수신한 신호를 복원한 뒤 다시 부호화하여 수신단으로 전송하는 방식으로, 만약 중계기에서 수신을 실패하는 경우에는 협력 통신이 이루어지지 않기 때문에 성능 저하가 발생한다 [2]. AF (amplified-and-forward) 방식은 중계기가 송신단으로부터 수신한 신호를 가공하지 않고 단순히 증폭만 시켜서 수신단으로 보내는 기법이다 [3]. AF 방식에서는 DF 방식과 같은 성능 저하는

없지만, 수신단에서 송신단과 중계기 간의 채널을 알아야 하는 단점이 있다. 세 번째는 CF (compressed and forward) 방식으로, 중계기에서 수신한 신호를 양자화 (quantization) 한 다음에 송신단으로 전송하는 기법이다 [1]. [4]에서는 중계기와 송신단 간의 채널 상황에 따라 전송형식을 변화하는 선택중계 (selection relaying) 기법과 수신단이 수신에 실패하면 중계기가 재송신을 하는 증분중계 (incremental relaying) 기법을 제안하고, 아웃티지 (outage) 확률 관점에서 기존 기법과 함께 성능을 분석하였다.

네트워크 부호화 (network coding) 기술은 패킷 레벨 (packet level)에서 부호화기법을 적용 하는 기법으로 전체 네트워크의 용량을 증가시킬 수 있는 장점이 있다 [5]. 그러므로 최근에는 협력 통신의 성능을 향상시키기 위해 협력통신과 네트워크 부호화를 결합한 양방향 중계 채널 (two-way relay channel)에 대한 연구가 있었다. [6]에서는 전이중 (full duplex) 협력통신 모델에서 네트워크 부호화를 사용한 다양한 프로토콜의 전송률의 범위 (achievable rate region)를 구했다. [7]에서는 각 노드와 기지국이 최대율결합 (Maximum ratio combining) 을 사용하는 것이 가능한 환경을 가정하고, 네트워크 부호화를 사용할 때 중계기를 선택하고 중계기의 전송전력을

구하는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 ARQ 채널 상황에서의 네트워크 부호화를 사용한 양방향 협력 통신에서 프로토콜을 제안하고 스테이트 다이어그램을 사용하여 제안한 프로토콜의 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 네트워크 부호화를 사용한 양방향 협력통신의 시스템 모형을 보이고, 3 장에서는 ARQ 가 있는 양방향 중계 채널에서 양방향 의 전송률의 비를 일정하게 유지하면서 패킷 전송 시간을 줄일 수 있는 프로토콜을 제안한다. 4 장에서는 제안한 프로토콜을 스테이트 다이어그램을 사용하여 성능을 분석한다. 5 장에서 제안한 프로토콜의 성능과 수학적으로 분석한 결과를 비교하고, 6 장에서 결론을 맺는다.

## 2. 시스템 모형

본 논문에서는 그림 1 에서와 같이 두 명의 사용자와 하나의 중계기가 있는 양방향 중계 채널을 가정한다. 양방향 중계 채널에서의 협력 통신은 두 명의 사용자가 서로 한 부호어 (codeword) 만큼의 정보를 주고 받은 후에, 중계기에서 양방향으로부터 수신한 부호어를 복호화 (decoding) 한 뒤 네트워크 부호화 기법을 사용해 만든 부호어를 양쪽으로 동시에 전송함으로써 이루어진다. 이와 같이 양방향 중계 채널에서는 그림 2 와 같이 3 단계 (step) 로 양방향 통신을 할 수 있으므로, 기존에 제안된 [2]-[4]와 같은 기법들이 4 단계로 양방향 통신이 이루어진 것보다 적은 시간에 동일한 데이터를 전송할 수 있는 장점이 있다.

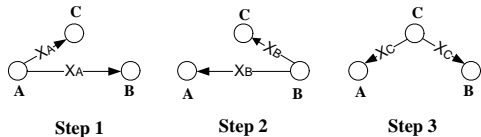


그림 1. 양방향 협력통신 모형

각 노드의 수신신호는 식(1)과 같이 정의하였다.

$$y_{\beta}[m] = h_{\alpha,\beta}[m]x_{\alpha}[m] + n_{\beta}[m]. \quad (1)$$

위 식에서  $\alpha = \{A, B, C\}$ ,  $\beta = \{A, B, C\}/\alpha$  이다.  $y_{\beta}[m]$  는 노드  $\beta$  에서의  $m$  번째 수신 신호이고  $x_{\alpha}[m]$  는 노드  $\alpha$  의  $m$  번째 송신신호이다.  $n_{\beta}[m]$  은  $\beta$  의  $m$  번째 수신 잡음 (noise)을 나타낸다. 잡음은 독립이고 동일 분포를 갖는 정규 확률 변수로 평균은 0 이고, 분산은 1 이다. 노드  $\alpha$  와  $\beta$  간의 채널은  $h_{\alpha,\beta}$  이고 매 전송마다 독립이고 균일 분포를 갖는 정규 확률 변수로 평균은 0, 분산은 1 인 블록 페이딩 채널 (block fading channel)

이다.  $x_C$  는  $x_A$  와  $x_B$  를 이용하여 네트워크 부호화한 신호로 식 (2)와 같이 계산한다.

$$x_C = x_A \oplus x_B. \quad (2)$$

각각의 노드는 평균 SNR (signal to noise ratio) 정보를 알고 있으며 이에 따른 변조 방식을 결정할 수 있다. 또한, 각 부호어의 복호 성공 여부를 나타내는 ACK/NACK 정보를 공유하는 ARQ (automatic repeat request) 채널 환경을 가정한다. 최대 재전송 횟수는  $M$  이고, ARQ 환경에서의 스루풋 (throughput) 은

$$\eta = \frac{E[R]}{E[T]} \quad (3)$$

과 같이 구할 수 있다 [9]. 위 식에서  $E[T]$  는 평균 전송시간이고  $E[R]$  은 평균 전송률이다.

$\alpha' = \{A, B\}$ ,  $\beta' = \{A, B\}/\alpha'$  일 때, 최대 재전송 횟수  $M$  이 충분히 크면,  $\beta'$  이  $\alpha'$  로부터 수신한 신호의 복호화를 실패할 확률은 0 이라고 가정할 수 있으므로, 복호화에 성공했을 때의 전송률이  $R_{\alpha'}$  이면 양방향의 평균 전송률은

$$E[R] = R_A + R_B \quad (4)$$

가 된다.

## 3. 양방향 협력통신 프로토콜

양방향중계채널에서는 중계기가 수신한 신호를 복호화한 뒤 네트워크 코딩을 해서 양방향으로 전송하므로, 기본적인 형태는 DF 와 같다. 그러므로 본 논문에서는 양방향중계채널에서의 프로토콜을 NDF (network coded decode and forward) 전송 프로토콜이라고 한다. NDF 통신 프로토콜은 다음과 같다.

1. 노드 A 가 노드 B 와 중계기인 노드 C 로 동시에 송신
2. 노드 B 또는 노드 C 가 수신 신호의 복호화를 성공할 때 까지 반복 송신
3. 노드 B 또는 중계기가 복호화를 성공하면, 노드 B 가 노드 A 와 노드 C 로 동시에 송신
4. 노드 A 또는 노드 C 가 수신 신호의 복호화를 성공할 때 까지 반복 송신, 둘 중 한 단말이 복호화를 성공하면 송신 중단하고 노드 C 에서 송신 시작
5. 노드 C 에서 노드 A 와 노드 B 로 송신 시작
6. 노드 A, B 모두 다른 노드로부터 신호의 복호화를 실패한 경우에는 중계기에서 네트워크 부호화된 신호를 양방향으로 전송. 이와 달리 한 노드만 복호화에 실패한 경우에는 네트워크 부호화를

사용하지 못하고, 수신에 실패한 노드에게만 신호를 송신

7. 노드 A,B 모두 복호화를 성공하면 다시 처음으로 돌아가 노드 A가 송신을 시작

ARQ 환경에서 각 단계의 최대 재전송 횟수가 M 이므로, 양방향의 수신에 한번에 성공하면 총 2 번의 전송으로 양방향 통신을 마칠 수 있고, 계속해서 수신을 실패하면 최대 4M 번의 전송을 한 후 양방향 통신을 마치게 된다.

#### 4. 협력통신 프로토콜의 성능 분석

[8]에서 양방향의 전송률이 같은 경우와 다른 경우 모두 선형 네트워크 부호화를 사용한 신호의 성능과 거의 동일한 것을 보였다. 그러므로 네트워크 부호화를 사용하지 않은 단 방향 통신의 오류 확률을 사용하여 네트워크 부호화를 사용한 신호의 성능을 구할 수 있다. 그림 2 는 양방향 협력통신 프로토콜의 스테이트 다이어그램이다. 실제 정확한 스테이트 다이어그램을 그리기 위해서는 C 가 다른 노드  $\alpha'$  로부터 몇 번째 수신만에 복호화를 성공했는지에 따라서 스테이트를 나누어야 한다. 왜냐하면 C 가 n 번째 수신 만에 복호화를 성공하면, 이후 수신 노드  $\beta'$ 에서 C 로부터 수신한 m 개의 신호와  $\alpha'$ 로부터 수신한 n 개의 신호를 합하여 복호화를 하게 되므로, n 값에 따라 성능이 달라지기 때문이다. 그러나 일반적으로 경로 감쇄효과로 인해,  $\alpha'$ 로부터 수신한 신호가 C 로부터 수신한 신호보다 매우 작기 때문에,  $\alpha'$ 로부터 수신한 신호의 영향은 거의 없으므로 가정하여 그림 2 와 같은 스테이트 다이어그램을 그릴 수 있다.

1 단계의  $A_m$  은 m 번째 전송의 스테이트이고, 2 단계의  $B_m$  은 C 는 복호화를 성공했지만, B 는 복호화를 실패한 이후의 노드 B 의 m 번째 전송의 스테이트이다. 2 단계의  $C_m$  은 B 가 복호화를 성공한 이후의 노드 B 의 m 번째 전송의 스테이트이다. 3 단계의  $D_m$  은 A,B 모두 복호화에 실패하고 C 가 양방향 신호의 복호화를 성공해서 양방향으로 네트워크 부호화된 신호를 m 번째 송신하는 경우의 스테이트이다.  $E_m$  은 A 는 복호화에 성공하고, B 는 복호화에 실패한 경우로, C 에서 B 로만 신호를 m 번째 송신하는 스테이트이고,  $F_m$  은 B 만 복호화에 성공해 C 에서 A 로만 신호를 m 번째 송신하는 스테이트이다. 표 1 에서 스테이트 다이어그램의 브랜치 값들을 나타내었다.

$S_m$  이 링크 x 의 m 번째 전송 신호의 복호화 성공을 나타내는 사건이라고 하면,

$$q_x(m) = \Pr_x(\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, S_m) = p_x(m-1) - p_x(m) \quad (5)$$

은 m 번째 전송에서 신호의 복호화를 성공할 확률

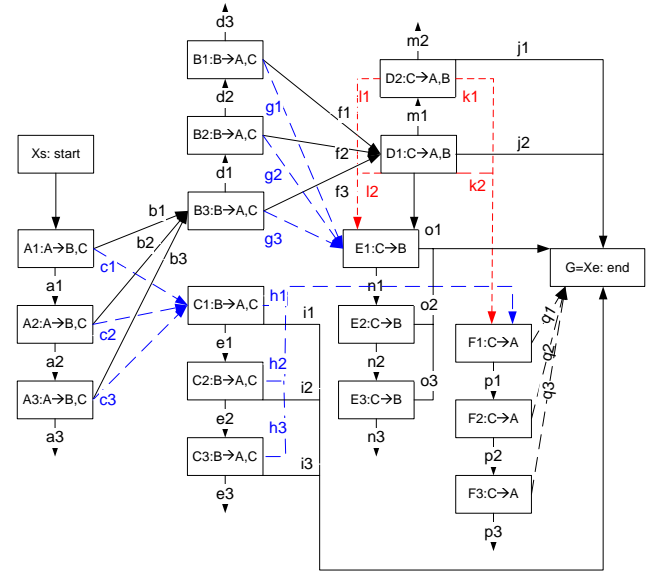


그림 2. 양방향 협력통신 프로토콜의 스테이트 다이어그램

State from	branches
$A_m$	$a_m = p_1(m m-1)p_2(m m-1)T$ $b_m = p_1(m m-1)(1-p_2(m m-1))T$ $c_m = (1-p_1(m m-1))T$
$B_m$	$d_m = e_m = p_3(m m-1)p_4(m m-1)T$ $f_m = h_m = p_3(m m-1)(1-p_4(m m-1))T$ $g_m = i_m = (1-p_3(m m-1))T$
$D_m$	$j_m = (1-p_5(m m-1))(1-p_6(m m-1))T$ $k_m = (1-p_5(m m-1))p_6(m m-1)T$ $l_m = p_5(m m-1)(1-p_6(m m-1))T$ $m_m = p_5(m m-1)p_6(m m-1)T$
$E_m$	$n_m = p_5(m m-1)T$ $o_m = (1-p_5(m m-1))T$
$F_m$	$p_m = p_6(m m-1)T$ $q_m = (1-p_6(m m-1))T$

표 1. 스테이트 다이어그램의 브랜치 값들

이고,

$$p_x(m) = \Pr_x(\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_m) = 1 - \sum_{l=1}^m q_x(l) \quad (6)$$

은 m 번째 전송까지 신호의 복호화를 실패할 확률이다.  $x = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  으로, 1 과 2 는 각각 1 단계의 A-B 링크와 A-C 링크를 나타낸다. 3 과 4 는 2 단계의 B-A 링크와 B-C 링크이고, 5 와 6 은 3 단계의 C-B 링크와 C-A 링크를 뜻한다. 그러므로, 표 1 에서  $p_1(m|m-1)$  은 1 단계의 A-B 링크의 수신단 B 가 m-1 번째 수신까지 복호화를 실패한 상태에서, m 번째 수신에서 복호화를 실패할 확률이다. 그림 2

의 스테이크 다이어그램과 표 1 의 브랜치 값들을 사용하여 식(7)과 같은 스테이트 방정식을 세울 수 있다.

$$\begin{aligned}
A_1 &= X_s, \quad A_m = p_1(m-1)p_2(m-1)T^{m-1}A_1 \\
B_1 &= \sum_{m=1}^M p_1(m)q_2(m)T^m A_1 = B_A(T)A_1, \\
B_m &= p_3(m-1)p_4(m-1)T^{m-1}B_1 \\
C_1 &= \left( \sum_{m=1}^M q_1(m)p_2(m-1)T^m + p_1(M)p_2(M)T^M \right) A_1 = C_A(T)A_1 \\
C_m &= p_3(m-1)p_4(m-1)T^{m-1}C_1 \\
D_1 &= \sum_{m=1}^M p_3(m)q_4(m)T^m B_1 = D_B(T)B_1 \\
D_m &= p_5(m-1)p_6(m-1)T^{m-1}D_1 \\
E_1 &= \left( \sum_{m=1}^M q_3(m)p_4(m-1)T^m + p_3(M)p_4(M)T^M \right) B_1 \\
&\quad + \sum_{m=1}^M p_5(m)q_6(m)T^m D_1 = E_B(T)B_1 + E_D(T)D_1 \\
E_m &= p_5(m-1)T^{m-1}E_1 \\
F_1 &= \sum_{m=1}^M p_3(m)q_4(m-1)T^m C_1 + \sum_{m=1}^M q_5(m)p_6(m)T^m D_1 \\
&= F_C(T)C_1 + F_D(T)D_1 \\
F_m &= p_6(m-1)T^{m-1}F_1 \\
X_e &= \left( \sum_{m=1}^M q_3(m)p_4(m-1)T^m + p_3(M)p_4(M)T^M \right) C_1 \\
&\quad + \left( \sum_{m=1}^M q_5(m)q_6(m)T^m + p_5(M)p_6(M)T^M \right) D_1 \\
&\quad + \left( \sum_{m=1}^M q_5(m)T^m + p_5(M)T^M \right) E_1 + \left( \sum_{m=1}^M q_6(m)T^m + p_6(M)T^M \right) F_1 \\
&= G_C(T)C_1 + G_D(T)D_1 + G_E(T)E_1 + G_F(T)F_1 \\
(7)
\end{aligned}$$

식(7)의 스테이트 방정식을 정리하여 식(8)과 같은 트랜스퍼 함수 (transfer function)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
f(T) &= \left\{ (G_D(T) + G_E(T)E_D(T) + G_F(T)F_D(T))D_B(T) \right. \\
&\quad \left. + G_E(T)E_B(T) \right\} B_A(T) + (G_F(T)F_C(T) + G_C(T))C_A(T) \\
(8)
\end{aligned}$$

식(8)을 미분하여, 최종적으로  $E[T]$ 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
E[T] &= \left. \frac{df(T)}{dT} \right|_{T=1} \\
&= 1 + \sum_{m=1}^{M-1} p_1(m)p_2(m) + C_A \left( 1 + \sum_{m=1}^{M-1} p_3(m)p_4(m) + F_C \left( 1 + \sum_{m=1}^{M-1} p_6(m) \right) \right) \\
&\quad + B_A \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{M-1} p_3(m)p_4(m) + E_B \left( 1 + \sum_{m=1}^{M-1} p_5(m) \right) \right. \\
&\quad \left. + D_B \left( 1 + \sum_{m=1}^{M-1} p_5(m)p_6(m) + E_D \left( 1 + \sum_{m=1}^{M-1} p_5(m) \right) + F_D \left( 1 + \sum_{m=1}^{M-1} p_6(m) \right) \right) \right\} \\
(9)
\end{aligned}$$

식(9)에서  $T=1$  이므로  $B_A(T)$ ,  $C_A(T)$ ,  $F_C(T)$ ,  $E_B(T)$ ,  $D_B(T)$ ,  $E_D(T)$ ,  $F_D(T)$  각 값들을 간략히

$B_A, C_A, F_C, E_B, D_B, E_D, F_D$ 로 나타내었다.

앞서 평균 전송시간을 구하였고, 평균 전송률은 식(4)와 같이 구할 수 있다. 그러므로 식(4)와 (10)의 결과를 식(3)에 대입하여 최종적인 스루풋을 얻을 수 있다.

## 5. 모의 실험 결과

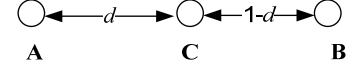


그림 3. 간단한 협력 통신 모델

프로토콜의 실제 성능과 수학적 분석의 비교를 위해 모의 실험을 수행하였다. 본 모의 실험에서는 그림 3 과 같이 C 가 A,B 와 일직선 상에 위치한다고 가정하였다.  $d$  는 A 와 C 간의 거리이고,  $a$  는 경로 감쇄 (path-loss) 지수로 4 로 하였다. A,B 사이의 채널 이득 (channel gain) 은  $g_{A,B} = 1$  이고, A 와 C 사이의 채널 이득은  $g_{A,C} = d^{-a}$ , C 와 B 사이의 채널 이득은  $g_{C,B} = (1-d)^{-a}$ 이다. 또한 매 전송마다 채널은 독립적으로 변한다 (block fading channel). 기본적으로 채널 코드를 사용하지 않은 비부호화 (uncoded) 상황을 고려하였고, 한 부호어는 하나의 심볼로 가정하였다. ARQ 채널상황에의 재전송방식은 단순한 반복 송신 기법을 사용하였고, 수신 기법은 체이스 결합 (chase combining) 기법을 사용하였다. 변조 방식은 긴 주기 SNR 정보를 이용하여 정해지고 양방향의 전송율이 일정하게 유지되는 상황을 가정하였다. 최대 재전송횟수는 20 으로 두었고, ACK/NACK 신호의 오류는 없는 것으로 가정하였다. 목표 오류율은  $10^{-3}$  으로 두었고, 이때의 아웃티지 (outage) 확률은

$$p_{x'}(m) = \Pr \left( g_{\alpha\beta} \sum_{l=1}^m |h_l|^2 \leq \frac{\bar{\gamma}_{\text{target}}}{\bar{\gamma}} \right) \quad (10)$$

와 같이 구할 수 있다  $x' = \{1, 2, 3, 4\}$ .  $\bar{\gamma}$  는 송신신호의 SNR 값이고,  $\bar{\gamma}_{\text{target}}$  은 목표 오류율을 만족하기 위한 임계값 (threshold) 이다. 3 단계에서는  $\beta'$ 에서  $\alpha'$  으로부터 수신한 신호와 중계기로부터 수신한 신호를 결합하여 신호를 복원하기 때문에 이를 고려하여 아웃티지 확률을 구해야 한다. 중계기의 위치가 비교적 중간에 위치한 경우에는  $\beta'$ 이  $\alpha'$  으로부터 수신한 신호의 크기가 C 로부터 수신한 신호의 크기보다 매우 작기 때문에 이를 무시할 수 있지만, 만약 C 가  $\alpha'$  에 가까우면  $\beta'$ 이  $\alpha'$  으로부터 수신한 신호의 크기와 C 로부터 수신한 신호의 크기가 비슷하므로 이 경우는  $\alpha'$ 의 신호를 고려하여야 한다. 이 경우  $g_{\alpha',C}$  가 크므로 대부분 단 한번의 전송으로 C 에서  $\alpha'$ 의 신호를 복호화하므로,  $\beta'$ 이  $\alpha'$  으로부터 수신한 신호는 한번에 그친다. 그러므로

### 3 단계에서의 아웃티지를

$$p_{x'}(m) \approx \Pr\left(g_{A,B} |h_1|^2 + g_{C,\beta'} \sum_{l=1}^m |h_l|^2 \leq \frac{\bar{\gamma}_{\text{target}}}{\bar{\gamma}}\right) \quad (11)$$

와 같이 구할 수 있다  $x' = \{5, 6\}$ . 그림 4 와 5 는 모의 실험과 4 장에서 분석한 결과를 각각 SNR 과 거리에 따라 비교한 그래프이다. 그림 4 에서 양방향의 전송률이 같은 경우와 다른 경우 모두 SNR 이 낮을 때는 분석한 결과와 모의 실험이 조금 차이가 났지만, SNR 이 높아짐에 따라 모의 실험과 분석 결과가 일치함을 확인 할 수 있었다. 그림 5 은 양방향의 변조방식이 QPSK 인 경우의 거리  $d$  에 따른 양방향 스루풋의 변화를 나타낸 그래프이다.  $d$  가 0.5 인 경우에 양방향 스루풋이 가장 높은 것을 알 수 있고, 중간을 기준으로 대칭을 이룸을 알 수 있다. 또한, 모의 실험과 분석은  $d$  가 0.5 일 때가 가장 비슷하고 C 가 한쪽으로 치우칠수록 오차가 발생함을 알 수 있었다. 그리고 NDF 프로토콜이 기존의 DF 프로토콜보다 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. 모의 실험 결과를 통해, 수학적으로 성능을 분석한 결과가 모의실험과 잘 일치함을 알 수 있었다.

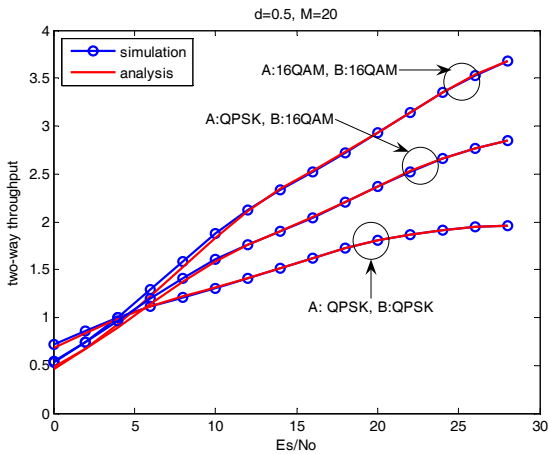


그림 4. SNR 에 따른 모의 실험과 분석의 성능 비교

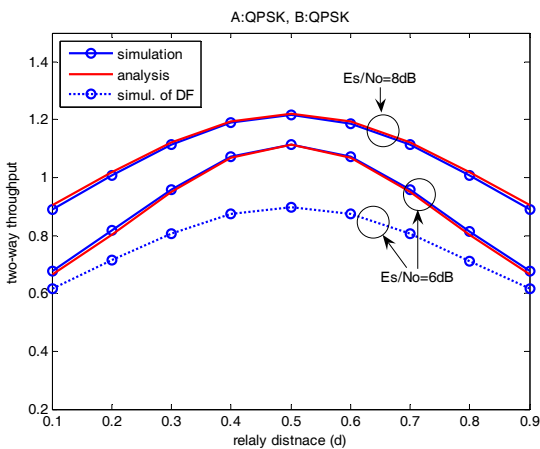


그림 5. d 에 따른 모의 실험과 분석의 성능 비교

### 6. 결론

본 논문에서는 ARQ 환경에서 네트워크 부호화를 사용한 양방향 중계 채널에서의 협력통신 프로토콜을 보이고, 이를 수학적으로 분석하였다. [8]에서 보인 네트워크 부호화된 경우에도 기존의 단방향 협력 통신보다 성능의 열화가 거의 없다는 사실을 바탕으로 스테이트 다이어그램을 이용하여 협력통신 프로토콜을 분석하였고, 제안한 기법이 기존기법보다 좋은 것을 알 수 있었다. 또한 성능 분석의 결과를 사용하면 긴 주기 SNR 을 바탕으로 ARQ 환경에서 초기 전송률을 정할 수 있다.

### 7. 참고문헌

- [1] T.M. Cover and A.A. El Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol 25, April 2005, pp. 572-584.
- [2] A. Sendonaries, E. Erkip, and B. Aazhang, "user Cooperation Diversity Part I and Part II," *IEEE Commun.*, vol. 51, November 2003, pp. 1927-1948.
- [3] J.N. Laneman, G.W. Wornell, and D.N.C. Tse, "An Efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks," *Proc. IEEE Inter. Symp. Inform. Theory (ISIT)*, Washington D.C., U.S.A., June 2001, pp. 294.
- [4] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G.W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol 50, December 2004, pp. 3062-3080.
- [5] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y.R. Li, and R.W. Yeung, "Network information Flow," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, July 2000, pp. 1204-1216.
- [6] B. Rankov, A. Wittneben, "Achievable rate regions for the two-way relay channel," *Proc. IEEE Inter. Symp. Inform. Theory (ISIT)*, Seattle, WA, U.S.A., July 2006, pp. 1668-1672.
- [7] J. Hwang and S.-L. Kim, "A two-phase algorithm for network coding enabled cellular systems," *Proc. ACM Inter. Wireless Commun. and Mobile Comput. (IWCMC)*, Hawaii, U.S.A., June 2007, pp. 73-78.
- [8] 변일무, 김광순, "ARQ가 있는 양방향 중계 채널에서 네트워크 부호화를 사용한 협력통신 기법," *Telecommun. Review*, 17권 6호, pp. 996-1008, 2007년 12월.
- [9] G. Caire and D. Tuninetti, "The throughput of Hybrid ARQ Protocols for the gaussian collision channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, no. 5, July 2001.