

# 전체 채널 정보와 부분 채널 정보를 이용하는 중계 노드 선택 기반 증폭 후 전달 중계 시스템의 성능 비교

## Performance Comparison of Relay Selection-Based Amplify-and-Forward Relaying Systems using Full or Partial Channel Information

이 인 호\*

(In-Ho Lee)

### 요 약

본 논문에서는 전체 채널 정보와 부분 채널 정보를 이용하여 중계 노드를 선택하는 각각의 증폭 후 전달 중계 시스템을 고려한다. 여기서, 소스 노드와 목적지 노드간의 직접 통신 링크를 고려한다. 그리고, 전체 채널 정보와 부분 채널 정보를 이용하여 중계 노드를 선택하는 각각의 증폭 후 전달 중계 시스템에 대한 아웃티지 확률을 레일레이 페이딩 채널을 가정하여 분석한다. 특히, 각각의 시스템에 대하여 정확한 아웃티지 확률과 아웃티지 확률의 하한, 그리고 점근적인 아웃티지 확률 식들을 유도한다. 또한, 전체 채널 정보와 부분 채널 정보를 이용하여 중계 노드를 선택하는 각각의 증폭 후 전달 중계 시스템에 대하여 얻을 수 있는 코딩 이득을 제시한다. 수치적 결과를 통해, 모든 분석 표현식들을 검증하고, 첫 번째와 두 번째 홉의 평균 채널 전력이 상이한 경우와 중계 노드의 수가 상이한 경우에 대하여 각각의 시스템에 대한 코딩 이득을 비교한다.

### Abstract

In this paper, we consider the amplify-and-forward relaying systems with the relay selection (AF-RS) using full channel information (FCI) and using partial channel information (PCI), respectively, in which the direct communication link between a source and a destination is available. And, the outage probabilities for the AF-RS using FCI and using PCI are investigated in Rayleigh fading channels, respectively. We provide exact outage probabilities, tight outage probability lower bounds, and asymptotic outage probabilities, respectively. And also, we present coding gains achievable by the AF-RS using FCI and using PCI. Through numerical investigation, all the analytic expressions are verified, and the coding gains are respectively evaluated with different average channel powers for the first and the second hop as well as different numbers of relays.

**Key words** : Relay selection, amplify-and-forward relaying, cooperative diversity, partial channel information, outage probability

† 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [(GRRC한경2011-B03), 물류센터 관리를 위한 저전력 사물 통신 및 네트워크 기술 연구]

\* 주저자 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 및 IT융합기술연구소 조교수

† 논문접수일 : 2012년 8월 1일

† 논문심사일 : 2012년 12월 3일

† 게재확정일 : 2012년 12월 3일

## I. 서 론

협력 다이버시티(diversity)는 차세대 무선 통신 시스템에서 높은 데이터율을 제공하는 기술이다. 협력 다이버시티 시스템에서, 중계 노드(node)는 소스(source) 노드로부터 수신한 신호를 목적지 노드로 전달하고, 목적지 노드는 소스 노드와 중계 노드로부터 다수의 신호를 수신한다. 그리고, 목적지 노드는 다수 신호를 결합하여 다이버시티 이득을 얻는다. 대표적인 중계 방식으로, 증폭 후 전달 (amplify-and-forward, AF) 방식과 디코딩 후 전달(decode-and-forward, DF) 방식이 있다. AF 방식에서, 중계 노드는 소스 노드로부터 수신한 신호를 단순히 증폭하여 목적지 노드로 전송한다[1],[2]. 반면에, DF 방식에서는 중계 노드가 소스 노드로부터 수신한 신호를 디코딩한 후 다시 인코딩하여 목적지 노드로 전송한다[1],[2]. AF 방식은 DF 방식보다 낮은 복잡성을 요구하며, 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)에서 DF 방식과 유사한 성능을 제공한다[3].

협력 다이버시티는 소스 노드와 중계 노드 간 간섭을 피하기 위하여 직교 채널을 이용하여 전송하기 때문에 스펙트럼 효율(spectral efficiency)의 감소를 초래한다[1],[4]. 따라서, 협력 다이버시티 시스템에서 중계 노드 수의 증가는 스펙트럼 효율의 큰 손실을 유발할 수 있다. 이와 같은 비효율적인 채널 자원의 이용을 보완하기 위하여, 가장 좋은 종단간 링크(link) 품질을 제공하는 하나의 중계 노드를 선택하여 전송하는 기법이 제안되었다[5].

[6]에서, 듀얼 홉(dual-hop) AF 시스템을 고려하여 가장 좋은 중계 노드의 선택 기법에 대한 아웃티지(outage) 성능을 레일레이 페이딩(Rayleigh fading) 채널하에서 분석하였다. 여기서, 중계 노드 선택을 위하여 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 모든 채널 정보(full channel information, FCI)를 이용하기 때문에, 큰 피드백 오버헤드(feedback overhead)를 필요로 한다. 따라서, [7]에서는 부분적인 채널 정보(partial channel information, PCI)를 이용하는 중계 노드 선택 기법을 제안하였고, 듀얼 홉 AF 시스템에서 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 비트 오차율 성능을

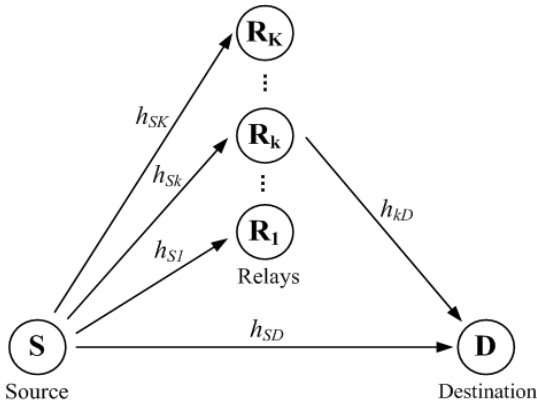
레일레이 페이딩 채널하에서 분석하였다. 여기서, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법은 하나의 중계 노드를 선택하기 위하여 첫 번째 홉의 채널 정보만을 이용한다. PCI 기반 중계 노드 선택 기법은 피드백 오버헤드 및 전력 소비량을 감소시켜 자원이 제한적인 네트워크(즉, 지능형 교통 시스템 지원을 위한 차량 간 혹은 센서간 무선 통신 시스템)의 생존시간을 향상시킬 수 있다. [8]과 [9]에서는 듀얼 홉 AF 시스템에서 FCI와 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 아웃티지 성능을 레일레이와 나카가미(Nakagami) 페이딩 채널에서 각각 분석하였다. [10]에서는 다중 사용자를 고려한 듀얼 홉 AF와 DF 시스템에서 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 아웃티지 성능과 다이버시티 이득을 레일레이 페이딩 채널에서 분석하였다.

[6], [8]-[9]에서는 소스 노드와 목적지 노드간의 직접 링크를 무시하였지만, [10]에서는 직접 링크를 고려하여 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 성능을 평가하였다. 이와 같이, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법은 직접 링크의 존재하에 연구되어왔지만, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법은 직접 링크를 무시한 연구가 대부분이다. 따라서, 본 논문에서는 직접 링크를 갖는 듀얼 홉 AF 시스템을 고려하여 FCI와 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 아웃티지 성능을 레일레이 페이딩 채널하에서 분석하여 성능을 비교한다. 특히, 아웃티지 확률의 하한과 점근적인 아웃티지 확률 식들을 유도하고, FCI와 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법으로부터 얻을 수 있는 코딩(coding) 이득을 제시한다. 수치적 결과를 통해, 모든 분석 표현식들을 검증하고, 첫 번째와 두 번째 홉의 평균 채널 전력이 상이한 경우와 중계 노드 수가 상이한 경우에 대하여 각 기법에 대한 코딩 이득을 비교한다.

## II. 시스템 모델

### 1. 시스템 소개

<그림 1>과 같이, 직접 링크를 갖는 듀얼 홉 AF 시스템에서  $K$ 개의 중계 노드중 하나의 중계 노드를



〈그림 1〉 중계 노드 선택 기법을 이용하는 직접 링크를 갖는 협력 AF 시스템  
 〈Fig. 1〉 Cooperative AF relaying systems with the direct link using a single-relay selection

선택하는 기법을 고려한다. 모든 노드들은 하나의 안테나를 갖고, 중계 노드들은 반이중 모드로 동작한다고 가정한다. 협력 AF 시스템에서, 소스 노드는 첫 번째 시간 슬롯(slot) 동안  $K$ 개의 중계 노드와 목적지 노드로 신호를 전송하고, 두 번째 시간 슬롯 동안  $K$ 개의 중계 노드중 선택된 하나의 중계 노드만 수신한 소스 노드의 신호를 증폭하여 목적지 노드로 전달한다. 여기서, 소스 노드가 중계 노드의 선택을 수행하며, FCI 기반의 중계 노드 선택의 경우에 첫 번째 홉과 두 번째 홉을 모두 고려하여 가장 좋은 종단간 링크 품질을 갖는 중계 노드를 선택하고, PCI 기반의 중계 노드 선택의 경우에 첫 번째 홉만 고려하여 소스 노드와 중계 노드간 링크들중 가장 좋은 링크 품질을 갖는 중계 노드를 선택한다. 목적지 노드는 두 시간 슬롯 동안 수신된 신호들을 최대 비율 결합(maximal ratio combining, MRC)을 이용하여 결합한다.

<그림 1>과 같이, 소스 노드와 목적지 노드간 (S-D) 채널 계수를  $h_{SD}$ 라 하고, 소스 노드와  $k$ 번째 중계 노드간(S-R<sub>k</sub>) 채널 계수를  $h_{Sk}$ 라 하고,  $k$ 번째 중계 노드와 목적지 노드간(R<sub>k</sub>-D) 채널 계수를  $h_{kD}$ 라 하자. 본 논문에서는 블록 플랫 페이딩(block flat fading) 채널을 가정하고, 모든 채널들은 평균이 0인 독립 복소 가우시안(Gaussian) 랜덤(random) 변수들

이라고 가정한다. 그리고,  $h_{SD}$ 의 분산은  $\omega_{SD}$ 이고, 모든 중계 노드( $k=1,2,\dots,K$ )에 대하여  $h_{Sk}$ 의 분산은  $\omega_{SR}$ 으로 같고, 모든 중계 노드에 대하여  $h_{kD}$ 의 분산은  $\omega_{RD}$ 으로 같다고 가정한다. 각 중계 노드는 증폭 이득을 얻기 위하여 S-R<sub>k</sub> 링크의 채널 정보를 완벽하게 안다고 가정하고, 목적지 노드는 수신 신호들의 MRC 결합을 위하여 S-D 링크와 선택된 중계 노드에 대한 S-R<sub>k</sub> 링크와 R<sub>k</sub>-D 링크의 채널 정보를 완벽하게 안다고 가정한다. 또한, 소스 노드가 중계 노드의 선택을 수행하기 위하여, FCI 기반의 경우에 소스 노드는 첫 번째 홉과 두 번째 홉의 채널 정보를 모두 안다고 가정하고, PCI 기반의 경우에 소스 노드는 첫 번째 홉의 채널 정보만을 안다고 가정한다.

## 2. 종단간 신호 대 잡음비

듀얼 협력 AF 시스템에서 선택된 중계 노드가  $k^*$ 라 하면, 첫 번째 시간 슬롯에서 선택된 중계 노드와 목적지 노드가 수신한 신호는 각각 다음과 같다.

$$y_{Sk^*} = h_{Sk^*}x + e_{Rk^*} \quad (1)$$

$$y_{SD} = h_{SD}x + e_{SD} \quad (2)$$

여기서,  $x$ 는  $E[x^2] = P$ 인 소스 노드에서 송신된 복소 심볼(symbol)이고,  $e_{Rk^*}$ 와  $e_{SD}$ 는 선택된 중계 노드와 목적지 노드에서의 평균 0과 분산  $\sigma^2$ 을 갖는 가산 복소 백색 가우시안 잡음(additive complex white Gaussian noise, AWGN)을 각각 의미한다. 선택된 중계 노드는 두 번째 시간 슬롯에서 증폭 이득  $\alpha_{k^*}$ 를 이용하여 수신 신호를 증폭한 후 목적지 노드로 증폭된 신호를 전송한다. 따라서, 목적지 노드에서 수신한 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{k^*D} &= h_{k^*D}\alpha_{k^*}y_{Sk^*} + e_{k^*D} \\ &= h_{k^*D}\alpha_{k^*}(h_{Sk^*}x + e_{Rk^*}) + e_{k^*D} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 소스 노드와 중계 노드의 송신 전력을 같다고 가정하여, 중계 노드  $k^*$ 의 송신 전력을 만족시키는  $\alpha_{k^*} = \sqrt{P/(|h_{Sk^*}|^2P + \sigma^2)}$ 을 이용한다. 그리고,

$e_{k^*D}$ 는 목적지 노드에서의 평균 0과 분산  $\sigma^2$ 을 갖는 AWGN을 의미한다. 그러므로, 선택된 중계 노드에 대한 S-R<sub>k\*</sub>-D 링크의 종단간 SNR은 다음과 같이 얻어진다[3].

$$\gamma_{k^*} = \frac{|h_{S^*}|^2 \rho |h_{k^*D}|^2 \rho}{|h_{S^*}|^2 \rho + |h_{k^*D}|^2 \rho + 1} = \frac{\gamma_{S^*} \gamma_{k^*D}}{\gamma_{S^*} + \gamma_{k^*D} + 1} \quad (4)$$

여기서,  $\rho = P/\sigma^2$ ,  $\gamma_{S^*} = |h_{S^*}|^2 \rho$ ,  $\gamma_{k^*D} = |h_{k^*D}|^2 \rho$ 이다. FCI 기반의 중계 노드 선택 기법과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 중계 노드 선택 방법은 각각 다음과 같다[8],[9].

$$k_F = \arg \max_{k=1,2,\dots,K} \{\gamma_k\} \quad (5)$$

$$k_P = \arg \max_{k=1,2,\dots,K} \{\gamma_{S^*}\} \quad (6)$$

여기서, FCI 기반의 경우에  $k^* = k_F$ 이고, PCI 기반의 경우에  $k^* = k_P$ 이다. 그리고,  $\gamma_k$ 는  $k$ 번째 중계 노드에 대한 종단간 SNR이고, 이것은 식(4)에서  $k^*$ 를  $k$ 로 대체하여 얻어진다.

목적지 노드에서 소스 노드와 선택된 중계 노드로부터 수신한 신호를 MRC 결합하여 얻어진 신호는  $y_D = \omega_S y_{SD} + \omega_{k^*} y_{k^*D}$ 이다. 여기서,  $\omega_S = \frac{1}{\sqrt{h_{SD}}}$ ,

$$\omega_{k^*} = \frac{\alpha_{k^*} h_{S^*} h_{k^*D}}{\alpha_{k^*}^2 |h_{k^*D}|^2 + 1}$$

이고,  $\bar{h}$ 는 복소 곱레를 의미한다.

다. 최종적으로, FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들에 대한 MRC 결합 신호의 SNR은 각각 다음과 같다.

$$\gamma_F^{CT} = \gamma_{SD} + \gamma_{k_F} \quad (7)$$

$$\gamma_P^{CT} = \gamma_{SD} + \gamma_{k_P} \quad (8)$$

여기서,  $\gamma_{SD} = |h_{SD}|^2 \rho$ 이다.

### III. 아웃티지 확률 분석

아웃티지 확률은 용량이 목표 용량  $R$ 보다 작은 확률로 정의한다. 다음에서는, 듀얼 홉 협력 AF 시

스템에서 FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들에 대한 정확한 아웃티지 확률 식들과 아웃티지 확률의 하한 식들을 각각 유도한다.

#### 1. 정확한 아웃티지 확률 식

##### 1) FCI 기반의 중계 노드 선택 기법

식(7)을 이용하여, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 용량은 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

$$C_F^{CT} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_F^{CT}) \quad (9)$$

여기서,  $1/2$ 은 소스 노드와 목적지 노드간 신호 전송을 위하여 두 개의 시간 슬롯이 이용됨을 의미한다. 식(7)과 식(9)를 이용하여, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 아웃티지 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} O_F^{CT} &= \Pr\{C_F^{CT} < R\} = \Pr\{\gamma_{k_F} < 2^{2R} - 1 - \gamma_{SD}\} \\ &= \int_0^{2^{2R}-1} F_{\gamma_{k_F}}(2^{2R} - 1 - x) p_{\gamma_{SD}}(x) dx \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $F_{\gamma}(\cdot)$ 는 랜덤 변수  $\gamma$ 의 누적 분포 함수(cdf)이고,  $\gamma_{SD}$ 의 확률 밀도 함수(pdf)는 다음과 같이 주어진다.

$$p_{\gamma_{SD}}(x) = \frac{1}{\rho \omega_{SD}} e^{-x/\rho \omega_{SD}} \quad (11)$$

식(4)와 식(5)를 이용하여,  $\gamma_{k_F}$ 의 cdf를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{k_F}}(x) &= \Pr\{\max_{k=1,2,\dots,K} \{\gamma_k\} < x\} \\ &= \prod_{k=1}^K \Pr\{\gamma_k < x\} = \prod_{k=1}^K F_{\gamma_k}(x) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, [11]의 식(14)로부터 다음 식이 주어진다.

$$F_{\gamma_k}(x) = 1 - 2e^{-x\left(\frac{1}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)} \sqrt{\frac{x(x+1)}{\rho\omega_{SR}\rho\omega_{RD}}} \times K_1\left(2\sqrt{\frac{x(x+1)}{\rho\omega_{SR}\rho\omega_{RD}}}\right) \quad (13)$$

여기서,  $K_1(\cdot)$ 는 두 번째 종류의 1차 수정 베셀 함수를 의미한다. 따라서, 듀얼 홉 협력 AF 시스템에서 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 정확한 아웃티지 확률은 식(11)-식(13)을 식(10)에 대입하여 얻을 수 있다. 식(10)에서, 적분 문제 해결의 어려움으로 인하여 본 논문에서는 정확한 아웃티지 확률 식에 대한 closed-form 형태를 제시하지 않는다.

## 2) PCI 기반의 중계 노드 선택 기법

식(8)을 이용하여, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 용량은 다음과 같이 표현된다[4].

$$C_P^{CT} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_P^{CT}) \quad (14)$$

식(8)과 식(14)를 이용하여, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 아웃티지 확률은 다음과 같이 얻어진다.

$$O_P^{CT} = \Pr\{C_P^{CT} < R\} = \Pr\{\gamma_{k_p} < 2^{2R} - 1 - \gamma_{SD}\} = \int_0^{2^{2R}-1} F_{\gamma_{k_p}}(2^{2R} - 1 - x) p_{\gamma_{SD}}(x) dx \quad (15)$$

여기서, [8]의 식(4)로부터 다음과 식이 주어진다.

$$F_{\gamma_{k_p}}(x) = 1 + \sum_{k=1}^K \binom{K}{k} (-1)^k 2 \sqrt{\frac{kx(x+1)}{\rho\omega_{SR}\rho\omega_{RD}}} \times e^{-x\left(\frac{k}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)} K_1\left(2\sqrt{\frac{kx(x+1)}{\rho\omega_{SR}\rho\omega_{RD}}}\right) \quad (16)$$

그러므로, 듀얼 홉 협력 AF 시스템에서 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 정확한 아웃티지 확률은 식(11)과 식(16)을 식(15)에 대입하여 얻을 수 있다. 그러나, FCI의 경우처럼 식(15)에서의 적분 문제를 해결하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 정확한 아웃

티지 확률의 closed-form 형태를 제시하지 않는다.

## 2. 아웃티지 확률의 하한

아웃티지 확률의 하한에 대한 closed-form 형태를 얻기 위해  $k$ 번째 중계 노드에 대한 S-R<sub>k</sub>-D 링크의 종단간 SNR의 상한을 다음과 같이 이용한다.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_{Sk}\gamma_{kD}}{\gamma_{Sk} + \gamma_{kD} + 1} < \min\{\gamma_{Sk}, \gamma_{kD}\} \quad (17)$$

[3]과 [12]에서는 높은 SNR에서 식(17)로부터 얻은 아웃티지 확률의 하한이 정확한 아웃티지 확률과 매우 유사함을 보여준다.

### 1) FCI 기반의 중계 노드 선택 기법

$\gamma_{k_f}^U = \max_{k=1,2,\dots,K}\{\min\{\gamma_{Sk}, \gamma_{kD}\}\}$ 라 하자. 식(10)과 유사하게, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 아웃티지 확률의 하한은 다음과 같이 주어진다.

$$B_F^{CT} = \Pr\left\{\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{SD} + \gamma_{k_f}^U) < R\right\} = \int_0^{2^{2R}-1} F_{\gamma_{k_f}^U}(2^{2R} - 1 - x) p_{\gamma_{SD}}(x) dx \quad (18)$$

$\gamma_{k_f}^U$ 의 cdf는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{k_f}^U}(x) &= \Pr\{\max_{k=1,2,\dots,K}\{\min\{\gamma_{Sk}, \gamma_{kD}\}\} < x\} \\ &= \prod_{k=1}^K \Pr\{\min\{\gamma_{Sk}, \gamma_{kD}\} < x\} \\ &= \prod_{k=1}^K \Pr\{1 - \Pr\{\gamma_{Sk} \geq x\} \Pr\{\gamma_{kD} \geq x\}\} \\ &= \prod_{k=1}^K \Pr\{1 - (1 - F_{\gamma_{Sk}}(x))(1 - F_{\gamma_{kD}}(x))\} \\ &= \left\{1 - e^{-x\left(\frac{1}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)}\right\}^K \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,  $F_{\gamma_{Sk}}(x) = 1 - e^{-x/\rho\omega_{SR}}$ 와  $F_{\gamma_{kD}}(x) = 1 - e^{-x/\rho\omega_{RD}}$ 이 이용된다.

식(11)과 식(19)를 식(18)에 대입하여, FCI 기반의

중계 노드 선택 기법에 대한 아웃티지 확률의 하한의 closed-form 형태를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 B_F^{CT} &= \int_0^{2^{2R}-1} \left\{ 1 - e^{-\left(2^{2R}-1-x\right)\left(\frac{1}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)} \right\}^K \\
 &\quad \times \frac{1}{\rho\omega_{SD}} e^{-\frac{x}{\rho\omega_{SD}}} dx \\
 &= \int_0^{2^{2R}-1} \sum_{k=0}^K \binom{K}{k} (-1)^k e^{-k\left(2^{2R}-1-x\right)\left(\frac{1}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)} \\
 &\quad \times \frac{1}{\rho\omega_{SD}} e^{-\frac{x}{\rho\omega_{SD}}} dx \\
 &= \sum_{k=0}^K \binom{K}{k} (-1)^k e^{-k\left(2^{2R}-1\right)\left(\frac{1}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)} \Psi_k \quad (20)
 \end{aligned}$$

여기서,  $\frac{1}{\rho\omega_{SD}} = \frac{k}{\rho\omega_{SR}} + \frac{k}{\rho\omega_{RD}}$  이면,

$$\Psi_k = \frac{2^{2R}-1}{\rho\omega_{SD}} \quad (21)$$

이고, 그렇지 않으면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Psi_k &= \frac{\rho\omega_{SR}\rho\omega_{RD}}{\rho\omega_{SR}\rho\omega_{RD} - k\rho\omega_{SD}(\rho\omega_{SR} + \rho\omega_{RD})} \\
 &\quad \times \left\{ 1 - e^{-\left(2^{2R}-1\right)\left(\frac{1}{\rho\omega_{SD}} - \frac{k}{\rho\omega_{SR}} - \frac{k}{\rho\omega_{RD}}\right)} \right\} \quad (22)
 \end{aligned}$$

## 2) PCI 기반의 중계 노드 선택 기법

$\gamma_{k_p}^U = \min\{\gamma_{S_k^p}, \gamma_{k_p^D}\}$  라 하자. 식(15)에서 처럼, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 아웃티지 확률의 하한은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 B_P^{CT} &= \Pr\left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{SD} + \gamma_{k_p}^U) < R \right\} \\
 &= \int_0^{2^{2R}-1} F_{\gamma_{k_p}^U}(2^{2R}-1-x) p_{\gamma_{SD}}(x) dx \quad (23)
 \end{aligned}$$

$\gamma_{k_p}^U$  의 cdf는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 F_{\gamma_{k_p}^U}(x) &= \Pr\{\min\{\gamma_{S_k^p}, \gamma_{k_p^D}\} < x\} \\
 &= 1 - \Pr\{\gamma_{S_k^p} \geq x\} \Pr\{\gamma_{k_p^D} \geq x\} \\
 &= 1 - (1 - F_{\gamma_{S_k^p}}(x))(1 - F_{\gamma_{k_p^D}}(x)) \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$= 1 + \sum_{k=1}^K \binom{K}{k} (-1)^k e^{-x\left(\frac{k}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)} \quad (25)$$

여기서, 다음의 cdf들이 이용된다.

$$\begin{aligned}
 F_{\gamma_{S_k^p}}(x) &= \Pr\{\max_{k=1,2,\dots,K}\{\gamma_{S_k^p}\} < x\} \\
 &= \left(1 - e^{-\frac{x}{\rho\omega_{SR}}}\right)^K = 1 + \sum_{k=1}^K \binom{K}{k} (-1)^k e^{-\frac{kx}{\rho\omega_{SR}}} \quad (26)
 \end{aligned}$$

$$F_{\gamma_{k_p^D}}(x) = \Pr\{\gamma_{k_p^D} < x\} = 1 - e^{-\frac{x}{\rho\omega_{RD}}} \quad (27)$$

식(11)과 식(25)를 식(23)에 대입하여, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 아웃티지 확률의 하한의 closed-form 형태를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 B_P^{CT} &= \int_0^{2^{2R}-1} F_{\gamma_{k_p}^U}(2^{2R}-1-x) \frac{1}{\rho\omega_{SD}} e^{-\frac{x}{\rho\omega_{SD}}} dx \\
 &= \int_0^{2^{2R}-1} \frac{1}{\rho\omega_{SD}} e^{-\frac{x}{\rho\omega_{SD}}} + \sum_{k=1}^K \binom{K}{k} (-1)^k \frac{1}{\rho\omega_{SD}} \\
 &\quad \times e^{-\left(2^{2R}-1-x\right)\left(\frac{k}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right) - \frac{x}{\rho\omega_{SD}}} dx \\
 &= 1 - e^{-\frac{2^{2R}-1}{\rho\omega_{SD}}} + \sum_{k=1}^K \binom{K}{k} (-1)^k \frac{1}{\rho\omega_{SD}} \\
 &\quad \times e^{-\left(2^{2R}-1\right)\left(\frac{k}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)} \Omega_k \quad (28)
 \end{aligned}$$

여기서,  $\frac{1}{\rho\omega_{SD}} = \frac{k}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}}$  이면,

$$\Omega_k = 2^{2R} - 1 \quad (29)$$

이고, 그렇지 않으면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Omega_k &= \left( \frac{1}{\rho\omega_{SD}} - \frac{k}{\rho\omega_{SR}} - \frac{1}{\rho\omega_{RD}} \right)^{-1} \\
 &\quad \times \left\{ 1 - e^{-\left(2^{2R}-1\right)\left(\frac{1}{\rho\omega_{SD}} - \frac{k}{\rho\omega_{SR}} - \frac{1}{\rho\omega_{RD}}\right)} \right\} \quad (30)
 \end{aligned}$$

## 3. 점근적 아웃티지 확률

듀얼 홉 협력 AF 시스템에서 FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들의 다이버시티 이득과 코딩 이득을 구하기 위하여 SNR 근사식  $e^{a/\rho} \approx \rho \rightarrow \infty 1 + a/\rho$  을 상기 유도한 아웃티지 확률의 하한 식에 적용한다.

1) FCI 기반의 중계 노드 선택 기법

식(11)과 식(19)에 SNR 근사식을 이용하여,  $\gamma_{SD}$ 의 pdf와  $\gamma_{k_p}^U$ 의 cdf는 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$p_{\gamma_{SD}}(x) \approx \rho \rightarrow \infty \frac{1}{\rho \omega_{SD}} \left(1 - \frac{x}{\rho \omega_{SD}}\right) \quad (31)$$

$$F_{\gamma_{k_p}^U}(x) \approx \rho \rightarrow \infty \left\{ x \left( \frac{1}{\rho \omega_{SR}} + \frac{1}{\rho \omega_{RD}} \right) \right\}^K \quad (32)$$

식(31)과 식(32)을 식(18)에 대입하여, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 점근적 아웃티지 확률을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} B_F^{CT} &\approx \rho \rightarrow \infty \int_0^{2^{2R}-1} (2^{2R}-1-x)^K \left( \frac{1}{\rho \omega_{SR}} + \frac{1}{\rho \omega_{RD}} \right)^K \\ &\quad \times \frac{1}{\rho \omega_{SD}} \left(1 - \frac{x}{\rho \omega_{SD}}\right) dx \\ &= \frac{1}{\rho \omega_{SD}} \left( \frac{1}{\rho \omega_{SR}} + \frac{1}{\rho \omega_{RD}} \right)^K \sum_{k=0}^K \binom{K}{k} (2^{2R}-1)^{K-k} \\ &\quad \times (-1)^k \int_0^{2^{2R}-1} \left( x^k - \frac{x^{k+1}}{\rho \omega_{SD}} \right) dx \\ &\approx \rho \rightarrow \infty \frac{1}{\rho \omega_{SD}} \left( \frac{1}{\rho \omega_{SR}} + \frac{1}{\rho \omega_{RD}} \right)^K \sum_{k=0}^K \binom{K}{k} (2^{2R}-1)^{K-k} \\ &\quad \times (-1)^k \frac{(2^{2R}-1)^{k+1}}{k+1}. \\ &= \frac{1}{\rho \omega_{SD}} \left( \frac{1}{\rho \omega_{SR}} + \frac{1}{\rho \omega_{RD}} \right)^K \frac{(2^{2R}-1)^{K+1}}{K+1} \quad (33) \end{aligned}$$

또한, 식(33)의 점근적 아웃티지 확률은 다음과 같이 단순하게 표현될 수 있다.

$$B_F^{CT} \approx \rho \rightarrow \infty (\rho G_F)^{-(K+1)} \quad (34)$$

여기서,  $G_F$ 는 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 코딩 이득[13]을 의미하고, 식(33)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$G_F = \frac{1}{2^{2R}-1} \left\{ \frac{1}{(K+1)\omega_{SD}} \left( \frac{1}{\omega_{SR}} + \frac{1}{\omega_{RD}} \right)^K \right\}^{-\frac{1}{K+1}} \quad (35)$$

식(34)로부터, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 다이버시티 이득은  $K+1$ 임을 알 수 있다.

2) PCI 기반의 중계 노드 선택 기법

식(26)과 식(27)에서 SNR 근사식을 이용하여,  $\gamma_{S_p}$ 와  $\gamma_{k_p D}$ 의 cdf들은 다음과 같이 각각 얻어진다.

$$F_{\gamma_{S_p}}(x) \approx \rho \rightarrow \infty \left( \frac{x}{\rho \omega_{SR}} \right)^K \quad (36)$$

$$F_{\gamma_{k_p D}}(x) \approx \rho \rightarrow \infty \frac{x}{\rho \omega_{RD}} \quad (37)$$

식(36)과 식(37)을 식(24)에 대입하여,  $\gamma_{k_p}^U$ 의 cdf를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{k_p}^U}(x) &\approx \rho \rightarrow \infty 1 - \left\{ 1 - \left( \frac{x}{\rho \omega_{SR}} \right)^K \right\} \left( 1 - \frac{x}{\rho \omega_{RD}} \right) \\ &= \left( \frac{x}{\rho \omega_{SR}} \right)^K + \frac{x}{\rho \omega_{RD}} - \frac{x^{K+1}}{\rho^{K+1} \omega_{SR}^K \omega_{RD}} \\ &\approx \rho \rightarrow \infty \begin{cases} \frac{x}{\rho \omega_{SR}} + \frac{x}{\rho \omega_{RD}} & \text{for } K=1 \\ \frac{x}{\rho \omega_{RD}} & \text{for } K \geq 2 \end{cases} \quad (38) \end{aligned}$$

식(31)과 식(38)을 식(23)에 대입하여, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 점근적 아웃티지 확률을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} B_P^{CT} &\approx \rho \rightarrow \infty \int_0^{2^{2R}-1} (2^{2R}-1-x) \frac{\Phi}{\rho \omega_{SD}} \\ &\quad \times \left( 1 - \frac{x}{\rho \omega_{SD}} \right) dx \\ &= \frac{\Phi}{\rho \omega_{SD}} \left\{ (2^{2R}-1)^2 - \left( 1 + \frac{2^{2R}-1}{\rho \omega_{SD}} \right) \frac{(2^{2R}-1)^2}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(2^{2R}-1)^3}{3\rho \omega_{SD}} \right\} \\ &\approx \rho \rightarrow \infty \frac{\Phi}{2\rho \omega_{SD}} (2^{2R}-1)^2 \quad (39) \end{aligned}$$

여기서,

$$\Phi = \begin{cases} \frac{1}{\rho\omega_{SR}} + \frac{1}{\rho\omega_{RD}} & \text{for } K=1 \\ \frac{1}{\rho\omega_{RD}} & \text{for } K \geq 2 \end{cases} \quad (40)$$

또한, 식(39)의 점근적 아웃티지 확률은 다음과 같이 단순하게 표현될 수 있다.

$$B_P^{CT} \approx_{\rho \rightarrow \infty} (\rho G_P)^{-2} \quad (41)$$

여기서,  $G_P$ 는 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 코딩 이득[13]이고, 식(39)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$G_P = \frac{1}{2^{2R}-1} (2\omega_{SD}\omega_{RD})^{1/2} \text{ for } K \geq 2 \quad (42)$$

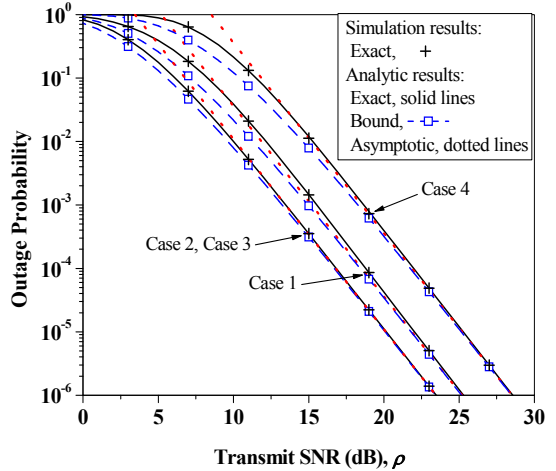
식(41)로부터, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 다이버시티 이득이 2임을 알 수 있다.

#### IV. 수치적 결과

수치적 결과에서, 네 가지 상이한 시뮬레이션 조건들(즉, Case1, Case2, Case3, Case4)을 고려한다. Case1에서  $\omega_{SD} = \omega_{SR} = \omega_{RD} = 1$  이고, Case2에서  $\omega_{RD} = 10$ ,  $\omega_{SD} = \omega_{SR} = 1$  이고, Case3에서  $\omega_{SR} = 10$ ,  $\omega_{SD} = \omega_{RD} = 1$  이고, Case4에서는  $\omega_{SD} = 0.1$ ,  $\omega_{SR} = \omega_{RD} = 1$ 이다. 여기서, Case2는 두 번째 홉이 첫 번째 홉보다 상대적으로 높은 평균 채널 전력을 갖는 경우이고, Case3은 그 반대 경우인 첫 번째 홉이 두 번째 홉보다 상대적으로 높은 평균 채널 전력을 갖는 경우이다. 그리고, Case4는 직접 링크의 평균 채널 전력이 상대적으로 작은 경우이다.

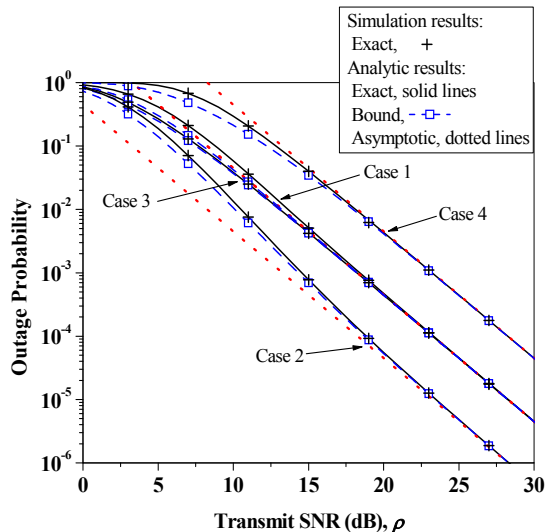
<그림 2>와 <그림 3>은 FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들을 이용하는 듀얼 홉 협력 AF 시스템에 대한 아웃티지 확률을  $K=2$ 와  $R=1$ 에 대하여 각각 보여준다. <그림 2>와 <그림 3>은 식(10)과 식(15)의 정확한 아웃티지 확률의 결과가 시뮬레이션 결과와 완벽하게 일치함을 보여준

다. 또한, 식(20)과 식(28)의 아웃티지 확률의 하한과 식(33)과 식(39)의 점근적 아웃티지 확률이 높은 SNR에서 정확한 아웃티지 확률과 같음을 보여준다.



<그림 2>  $K=2$ 이고  $R=1$ 일 때, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법을 이용하는 듀얼 홉 협력 AF 시스템의 아웃티지 확률

<Fig. 2> Outage probability for the dual-hop cooperative AF-RS using FCI when  $K=2$  and  $R=1$



<그림 3>  $K=2$ 이고  $R=1$ 일 때, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법을 이용하는 듀얼 홉 협력 AF 시스템의 아웃티지 확률

<Fig. 3> Outage probability for the dual-hop cooperative AF-RS using PCI when  $K=2$  and  $R=1$



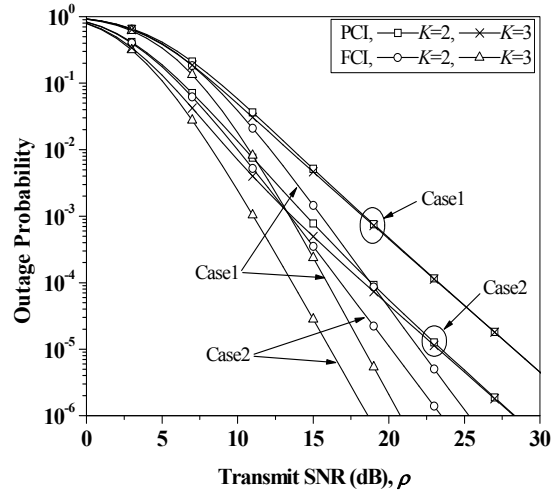
<그림 2>에서는 식(34)에서 보여주는 것과 같이  $K=2$ 일 경우, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 다이버시티 이득이 3임을 보여준다. 또한, 그 다이버시티 이득이 평균 채널 전력에 영향을 받지 않음을 보여준다. FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 코딩 이득은 식(35)로부터 Case1에서 0.3, Case2과 Case3에서 0.45, Case4에서 0.14임을 알 수 있다. 즉, 채널들의 평균 전력의 증가는 코딩 이득을 증가시키지만, 다이버시티 이득에는 영향을 주지 않는다.

<그림 3>에서는 식(41)에서 보여주는 것처럼  $K=2$ 일 때, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 다이버시티 이득이 2임을 보여준다. 또한, 그 다이버시티 이득이 평균 채널 전력에 영향을 받지 않음을 보여준다. PCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 코딩 이득은 식(42)로부터 Case1과 Case3에서 0.471, Case2에서 1.491, Case4에서 0.149임을 알 수 있다. 즉, 두 번째 홉과 직접 링크의 평균 채널 전력의 증가는 코딩 이득을 증가시키지만, 첫 번째 홉의 평균 채널 전력은 코딩 이득에 영향을 주지 않는다. 이 점에서 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법과 상이한 특징을 갖는다고 할 수 있다.

<그림 2>와 <그림 3>에서 FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들에 대한 아웃티지 성능을 비교하면, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법이 FCI기반의 중계 노드 선택 기법보다 더 높은 코딩 이득을 제공함을 알 수 있다. 그러나, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법이 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법보다 높은 다이버시티 이득을 제공하기 때문에 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 아웃티지 성능이 더 우수하다. 그 이유는 코딩 이득보다 다이버시티 이득이 아웃티지 성능에 더 큰 비중을 차지하기 때문이다.

<그림 4>에서는  $R=1$ 이고  $K=2,3$  일 때 FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들을 이용하는 듀얼 홉 협력 AF 시스템의 아웃티지 성능을

비교한다. <그림 4>는 낮은 SNR 영역에서 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법과 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 성능이 유사함을 보여준다. 그러나,  $K=2,3$ 에 대해, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법은 각각 다이버시티 이득 3과 4를 제공하고, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법은 모든 경우에 다이버시티 이득 2를 제공하기 때문에, SNR이 증가할수록 FCI



<그림 4>  $K=2,3$ 이고  $R=1$ 일 때, FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들을 이용하는 듀얼 홉 협력 AF 시스템의 아웃티지 확률 비교

<Fig. 4> Comparison of Outage probabilities for the dual-hop cooperative AF-RS using FCI and using PCI when  $R=1$  and  $K=2,3$

기반의 중계 노드 선택 기법이 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법보다 월등히 좋은 성능을 제공한다. <표 1>은 <그림 4>에서 FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들에 대한 코딩 이득을 각각 보여준다. <표 1>로부터, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법에 대한 코딩 이득은 중계 노드 수의 영향을 받지 않지만, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 코딩 이득은 중계 노드 수가 증가함에 따라 감소한다. 또한,  $K=2,3$ 일 때, Case1과 Case2 사이의 코딩 이득 차이를 각각 비교하면, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법이 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법 보다 코딩 이득 차이가 크음을 알 수 있다. 즉, 두 번째 홉의 평균 채널 전력이 좋아지면, PCI 기반의 중계 노

〈표 1〉 FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들에 대한 코딩 이득 비교

〈Table 1〉 Coding gain comparison of FCI-based and PCI-based relay selection schemes

시뮬레이션 조건	중계 노드 수 ( $K$ )	FCI에 대한 코딩 이득	PCI에 대한 코딩 이득
Case 1	2	0.3	0.471
Case 2	2	0.45	1.491
Case 1	3	0.28	0.471
Case 2	3	0.439	1.491

드 선택 기법에 대한 코딩 이득의 상당한 개선을 기대할 수 있음을 의미한다.

## V. 결 론

본 논문에서는, 소스 노드와 목적지 노드간 직접 링크를 갖는 듀업 홉 협력 AF 시스템에서 FCI 기반과 PCI 기반의 중계 노드 선택 기법들에 대한 아웃티지 성능을 레일레이 페이딩 채널하에서 분석하였다. 특히, 각각의 중계 노드 선택 기법들에 대한 정확한 아웃티지 확률 식들, 아웃티지 확률의 하한 식들, 점근적인 아웃티지 확률 식들을 유도하였다. 또한, 점근적인 아웃티지 확률 식들을 이용하여 각각의 중계 노드 선택 기법들에 대한 코딩 이득을 구하였다. 수치적 결과를 통해, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법은 두 번째 홉의 평균 채널 전력이 좋아질 때 큰 코딩 이득의 향상을 제공한다. 그리고, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 코딩 이득은 중계 노드 수의 영향을 받지 않지만, FCI 기반의 중계 노드 선택 기법의 코딩 이득은 중계 노드 수가 증가할수록 감소한다. 또한, PCI 기반의 중계 노드 선택 기법은 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법보다 낮은 다이버시티 이득을 제공하지만, 낮은 SNR 영역에서 FCI 기반의 중계 노드 선택 기법과 유사한 아웃티지 성능을 제공한다.

## 참고문헌

- [1] J. N. Laneman and D. N. C. Tse, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp.3062-3080, Dec. 2004.
- [2] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 6, pp.1963-1968, Nov. 2004.
- [3] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 6, pp.1126-1131, Nov. 2003.
- [4] N. C. Beaulieu and J. Hu, "A closed-form expression for the outage probability of decode-and-forward relaying in dissimilar Rayleigh fading channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 12, pp.813-815, Dec. 2006.
- [5] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp.659-672, Mar. 2006.
- [6] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, pp.3450-3460, Sep. 2007.
- [7] I. Krikidis, J. Thompson, S. McLaughlin, and N. Goertz, "Amplify-and-forward with partial relay selection," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, pp.235-237, Apr. 2008.
- [8] J.-B. Kim and D. Kim, "Comparison of tightly power-constrained performances for opportunistic amplify-and-forward relaying with partial or full channel information," *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 2, pp.100-102, Feb. 2009.

- [9] C. Zhong, K.-K. Wong, S. Jin, M.-S. Alouini, and T. Ratnarajah, "Asymptotic analysis for Nakagami-m fading channels with relay selection," in *proc. of IEEE International Conference on Communications(ICC)*, Kyoto, Japan, June 2011.
- [10] J. Kim, D. S. Michalopoulos, and R. Schober, "Diversity analysis of multi-user multi-relay networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 7, pp.2380-2389, July 2011.
- [11] V. Emamian, P. Anghel, and M. Kaveh, "Multi-user spatial diversity in a shadow-fading environment," in *Proc. of 56th IEEE Vehicular Technology Conference(VTC)*, pp.573-576, Sep. 2002.
- [12] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "Performance analysis of two-hop relayed transmissions over Rayleigh fading channels," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference(VTC)*, pp.1992-1996, Sep. 2002.
- [13] Z. Wang and G. B. Giannakis, "A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 8, pp.1389-1398, Aug. 2003.

저자소개



이 인 호 (Lee, In-Ho)

2011년 3월 ~ 현 재 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 조교수  
 2010년 4월 ~ 2011년 3월 : 한양대학교 ERICA 부설연구소 공학기술연구소 박사후과정  
 2008년 9월 ~ 2010년 4월 : 삼성전자 DMC 연구소 책임연구원  
 2005년 3월 ~ 2008년 8월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사 졸업  
 2003년 3월 ~ 2005년 2월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사 졸업  
 1996년 3월 ~ 2003년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사 졸업