

# 다중 사용자 정보이론에 대한 소개

박도형 | 최상원 | 정세영  
KAIST

## 요약

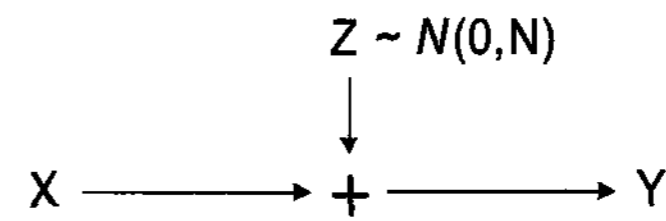
본고에서는 점 대점 통신 채널이 아닌 다중 사용자 채널에서의 채널 용량을 다루는 다중 사용자 정보이론에 대하여 설명한다. 대표적으로 Broadcast channel, Multiple Access channel, Relay channel, Interference channel 등이 있다. 본고에서는 각 채널에서의 채널 용량에 관한 연구 결과들을 정리하고 그 원리를 설명한다.

## 1. 서론

정보이론은 1948년 Shannon에 의하여 시작된 이래 통신의 이론적 한계를 알려주는 역할로써 통신 관련 연구에 큰 영향을 미쳤다 [1]. 통신 채널에서 정보를 전송하는 전송률의 이론적 한계를 채널 용량이라 하며, 점 대점 통신에서의 채널 용량은 Shannon 본인에 의하여 발견되었다. 그러나 현실적으로 이게 근접한 성능을 얻기 위한 통신 시스템에 관한 연구는 현재까지 계속 진행되고 있다.

(그림 1)과 같은 단일 송신단과 수신단으로 구성된 Gaussian 채널에서 전력  $P$ 로 얻을 수 있는 최대의 전송률인 채널 용량은 다음과 같다.

$$R < \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N} \right) \text{ (bits/sec/Hz)} \quad (1)$$



(그림 1) Gaussian channel

채널 용량을 발견하는 것은 inner bound와 outer bound를 찾는 방식으로 진행되었다. 실제로 오류 없이 전송 가능한 전송 방식을 찾는 방법으로 채널 용량의 최소 한도인 inner bound를 찾으며, 이론적으로 오류 없이 전송하는 것이 불가능한 전송률을 찾는 방법으로 채널 용량의 최대 한도인 outer bound를 찾는다. 이 두 한도가 만났을 때, 우리는 그것을 채널 용량이라고 부를 수 있다.

다중 사용자 Gaussian 채널에서는 일부 간단한 구조를 가지는 채널에 대하여 그 채널 용량이 발견되었다. 그러나 아직까지 발견되지 않은 채널이 다수 존재하며, 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 본고에서는 현재까지 다중 사용자 Gaussian 채널 용량에 관하여 진행된 연구를 정리한다. 다중 사용자 채널은 크게 네 가지로 구분되어 연구되었다. 단일 송신단으로부터 다수의 수신단에게 동시에 정보를 전송하는 Broadcast channel (BC), 다수의 송신단으로부터 단일 수신단에게 동시에 정보를 전송하는 Multiple access channel (MAC), 하나 이상의 중계기를 통해 단일 송신단이 단일 수신단에게 전달하는 Relay channel (RC), 그리고 다수의 송신단이 다수의 수신단에게 전달하는 Interference channel으로 (IC) 분류된다. 본론에서는 각 채널과 그 용량을 소개하고, 채널 용량의 전송률을 얻을 수 있는 전송 기법

을 알아보기로 한다.

## II. Broadcast channel

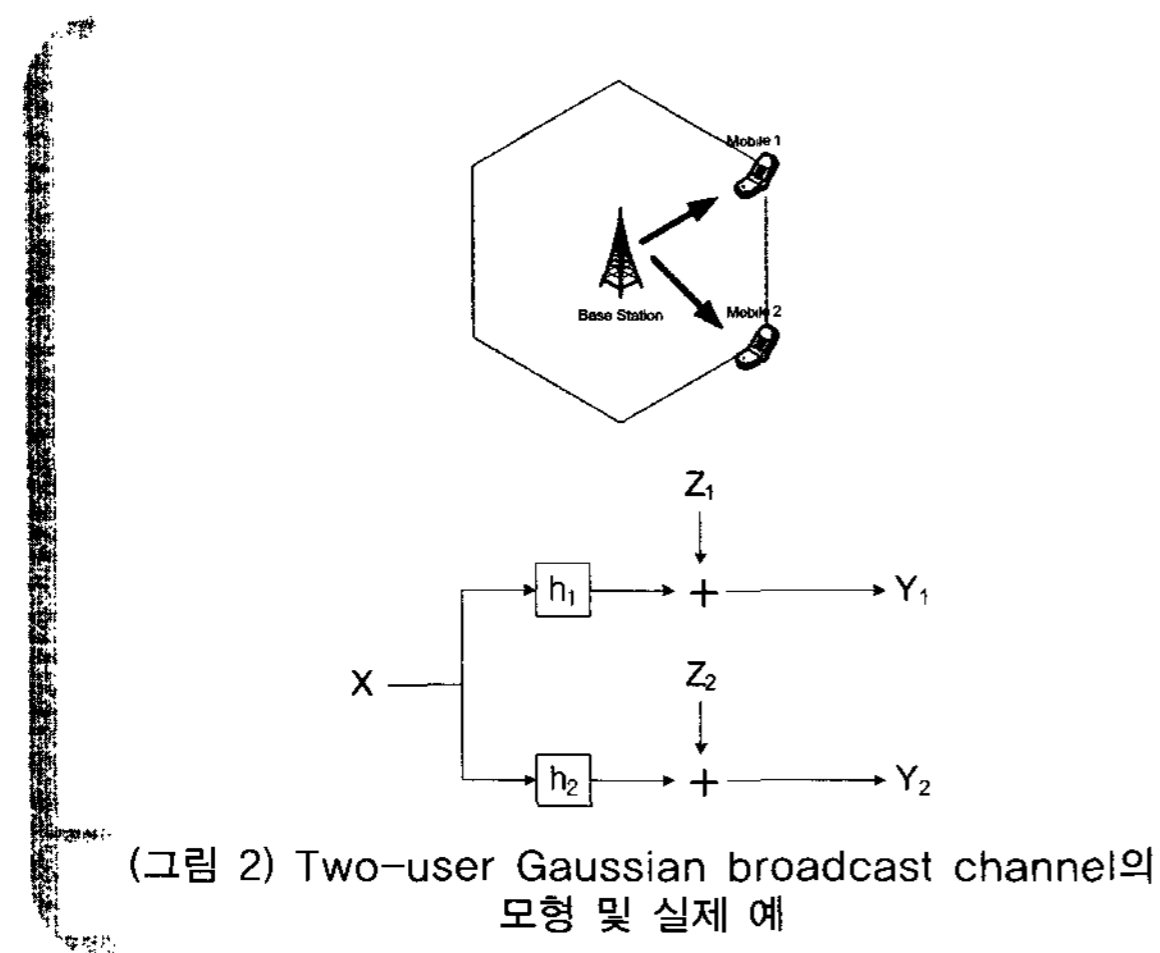
BC는 단일 송신단과 다수의 수신단이 존재하는 채널에서 각 수신단에게 독립적인 정보를 전달한다. 예를 들면, 이동통신 기지국이 각각의 단말에게 서로 다른 정보를 전달하는 상황을 BC의 일종으로 볼 수 있다.

### 1. Two-user Gaussian BC

본 고에서는 가장 간단한 경우인 2-user Gaussian BC를 고려한다. 이 채널은 송신단에서의 채널 입력  $X$ 와 다수의 수신단이 받게 되는 채널 출력  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ 가 존재한다. 입력 신호  $X$ 는 최대  $P$ 의 전력으로 전송할 수 있으며, 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$Y_i = h_i X + Z_i \quad Z_i \sim \mathcal{N}(0,1), \quad i = 1,2 \quad (2)$$

여기서 Gaussian noise의 noise power는 1로 가정하였다. 만일 다른 값  $N_i$ 를 가지더라도 채널 방정식에서  $\sqrt{N_i}$ 를 나누어서 등가적으로 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.  $h_i$ 는 송신단과 수신단  $i$ 간의 채널 이득이다. 채널 구조는 (그림 2)와 같이 표현할 수 있다. 일반적으로  $|h_1| \geq |h_2|$ 임을 가정한다.



Gaussian BC의 채널 용량은 Cover와 Bergmans에 의하여 발견되었으며 다음과 같다.

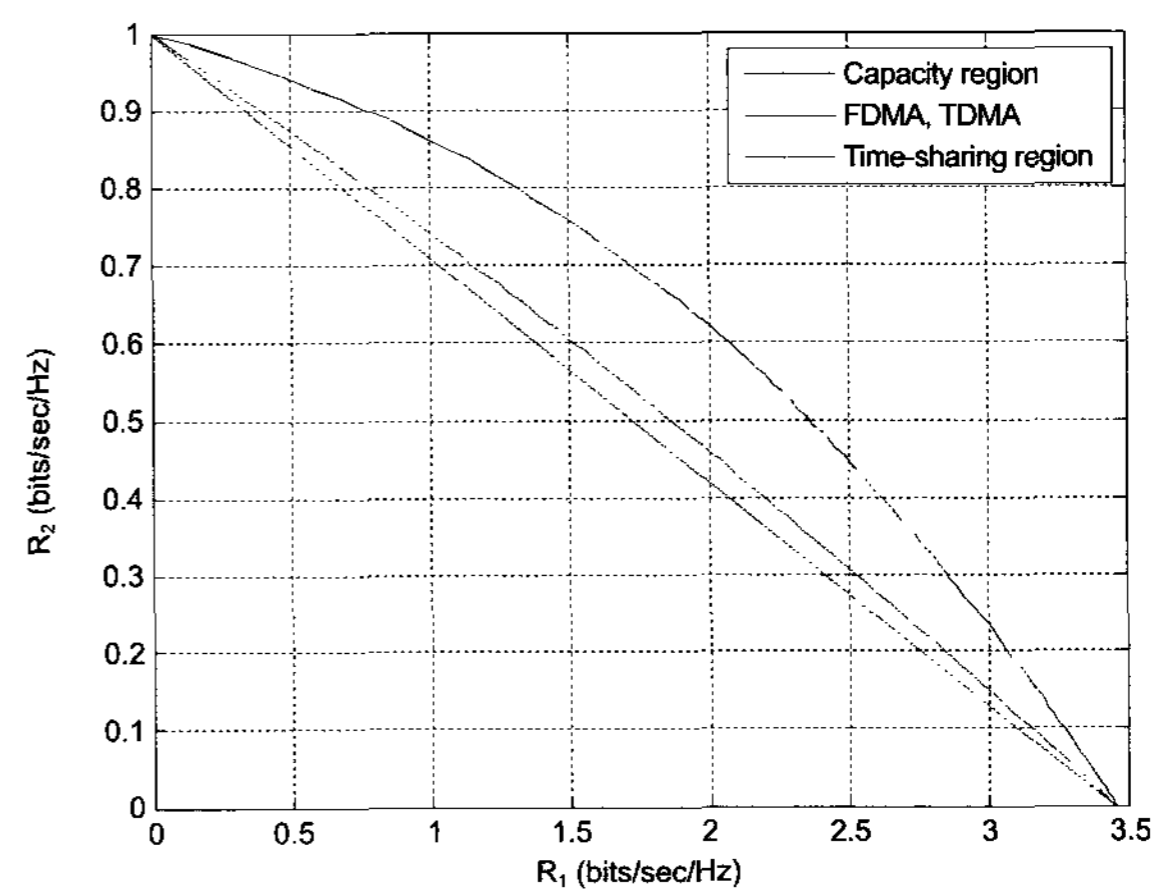
Theorem. Gaussian BC에서 수신단 1로의 전송률을  $R_1$ , 수신단 2로의 전송률을  $R_2$ 라 할 때, 채널 용량은 임의의  $\alpha$ 에 대하여 아래 식을 만족하는  $(R_1, R_2)$ 로 표현된다.

$$R_1 < \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \alpha |h_1|^2 P \right) \text{ (bps/Hz),}$$

$$R_2 < \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{(1-\alpha) |h_2|^2 P}{1 + \alpha |h_2|^2 P} \right) \text{ (bps/Hz)} \quad (3)$$

Gaussian BC의 채널 용량은 (그림 3)과 같이 형태로 그려진다.

Gaussian BC에서는 수신하는 신호 대 잡음 비 (Signal-to-Noise ratio, SNR)가 상대적으로 큰 수신단이 상대적으로 작은 수신단에게 보내질 신호를 완벽히 복원할 수 있다. 이러한 채널에서 채널 용량에 근접한 전송률을 얻을 수 있는 방법으로 superposition coding이 있다. Superposition coding은 실제로 무선 통신에서 사용되는 기법인 TDM(Time division multiplexing), FDM(Frequency division multiplexing) 등 보다 이론적으로 더 높은 전송률을 얻을 수 있음이 증명되었다 [3].



(그림 3) Gaussian BC의 채널 용량 (SNR<sub>1</sub>=10, SNR<sub>2</sub>=1)

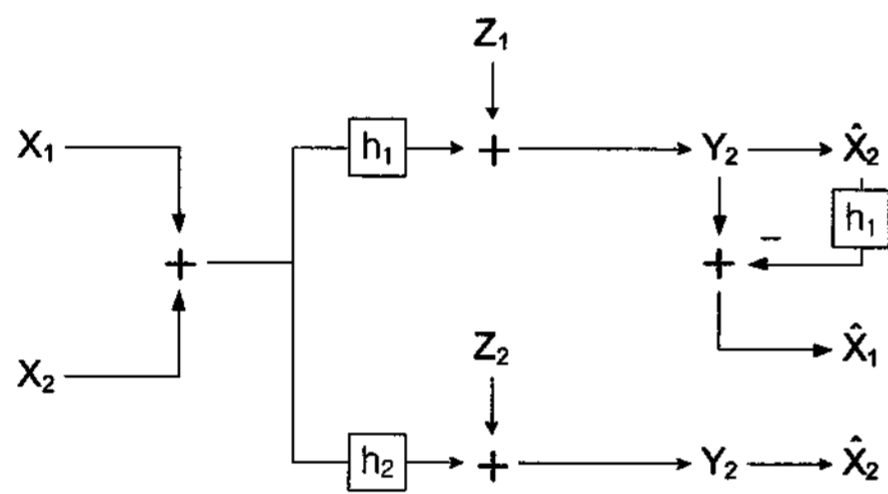
### 2. Superposition coding

Superposition coding은 TDM, FDM과 같이 시간 또는 주파수 대역을 분할하여 각 수신단에 할당하지 않고, 수신단에

게 보낼 신호를 더해서 전송한다. 따라서, 송신단에서 전송되는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$X = X_1 + X_2$$

이 때,  $X_1$ 은 수신단 1에게 전달할 정보에 대한 신호,  $X_2$ 는 수신단 2에게 전달할 정보에 대한 신호이다. 이에 따라, 각 수신단이 받는 신호는 모든 수신단에게 전달될 신호들이 더해진 신호에서 Gaussian noise가 더해진 값이 된다. 각 수신단이 정보를 수신하는 방법은 다음과 같다. 수신단 2는 받은 신호에서 자신에게 보내진 신호만을 복원한다. 따라서, 수신단 2는 수신단 1에게 전송될 신호  $X_1$ 를 noise로 간주한다고 볼 수 있다. 수신단 1은 수신단 2에게 전달될 신호  $X_2$ 를 완벽히 복원할 수 있으므로, 이를 먼저 복원한 뒤, 이를 수신 신호에서 제거한다. 그렇다면, 수신단 1은  $X_1 + Z_1$ 에서 신호를 복원하기 때문에, 더 높은 전송률을 얻을 수 있다. 이러한 구조는 (그림 4)와 같이 표현될 수 있다.



(그림 4) Superposition coding과 Successive interference cancellation

수신단이 3개 이상일 경우에도 마찬가지로, 더 높은 신호 대 잡음 비를 갖는 수신단이 더 낮은 신호 대 잡음 비를 갖는 수신단에게 보내질 신호를 완벽히 복원할 수 있다. 따라서, 복원된 다른 수신단으로의 신호를 먼저 제거함으로써 그 신호를 noise로 간주할 때보다 더 높은 전송률을 얻을 수 있다. 이러한 방식을 Successive interference cancellation(SIC)이라 한다.

### III. Multiple access channel

Multiple access channel은 다수의 송신단이 각각 독립적인

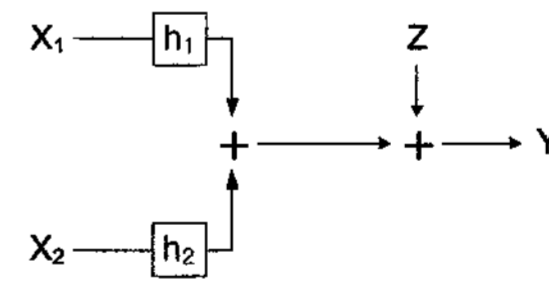
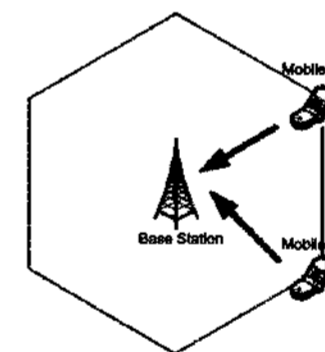
정보를 전송하여 단일 수신단에서 모든 정보를 수신하는 채널이다. 예를 들면, 여러 단말들이 각자의 정보를 기지국으로 전달하는 상황을 MAC의 일종으로 볼 수 있다.

#### 1. Two-user Gaussian MAC

MAC에서도 마찬가지로 가장 간단한 2-user Gaussian MAC을 고려하기로 한다. 다수의 송신단으로부터의 채널 입력  $X_1, X_2$ 가 존재하며, 각 입력 신호와 noise  $Z$ 가 더해진 단일 수신단으로의 채널 출력  $Y$ 로 구성된다. 각각의 송신단은  $P_1, P_2$ 의 전력으로 신호를 전송할 수 있다. 따라서, 채널 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y = h_1 X_1 + h_2 X_2 + Z, \quad Z \sim \mathcal{N}(0,1) \quad (4)$$

여기서도 앞의 BC에서 본 것과 같이 일반적으로 noise power가 1임을 가정할 수 있다. 각 송신단은 서로 독립적인 신호를 전송하고, 수신단은 모든 송신단에서 보내는 정보를 모두 복원해야 한다. 예컨대 이동통신 기지국으로 여러 단말이 정보를 보내는 상황을 생각할 수 있다. 본 고에서는 Gaussian BC에서와 마찬가지로 두 대의 수신단이 존재한다고 가정한다. 채널 구조는 (그림 5)와 같이 표현된다.



(그림 5) Two-user Gaussian multiple access channel의 모형과 실제 예

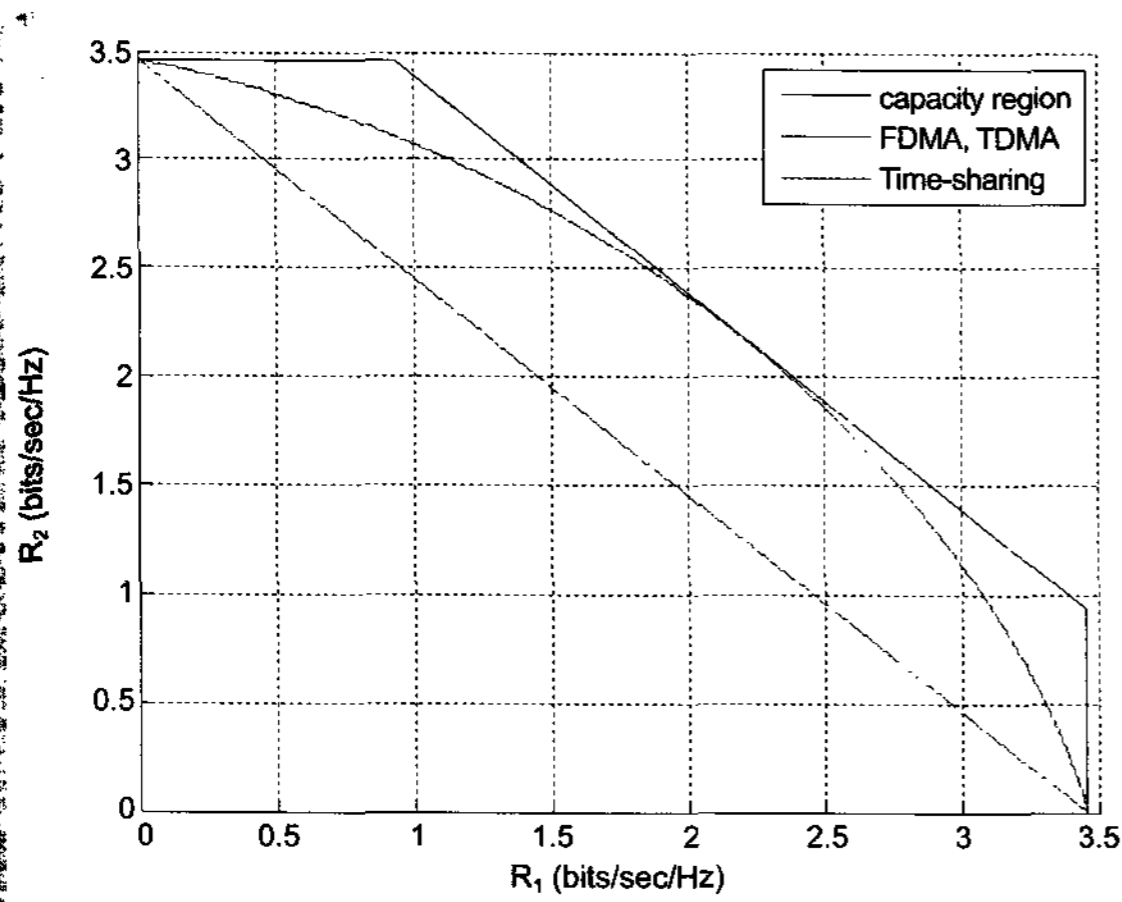
Gaussian MAC도 마찬가지로 채널 용량이 발견되었다. Ahlswede[2]와 Liao[3]가 이보다 더 일반적으로 가정된 MAC에서 채널 용량을 발견함으로써 Gaussian MAC에서의 채널 용량 역시 규명되었다. 이는 다음과 같이 쓸 수 있다.

Theorem. Gaussian BC에서 수신단 1로의 전송률을  $R_1$ , 수신단 2로의 전송률을  $R_2$ 라 할 때, 채널 용량은 임의의

에 대하여 아래 식을 만족하는  $(R_1, R_2)$  로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 R_1 &< \frac{1}{2} \log_2(1 + |h_1|^2 P_1) \text{ (bps/Hz)}, \\
 R_2 &< \frac{1}{2} \log_2(1 + |h_2|^2 P_2) \text{ (bps/Hz)}, \\
 R_1 + R_2 &< \frac{1}{2} \log_2(1 + |h_1|^2 P_1 + |h_2|^2 P_2) \text{ (bps/Hz)} \quad (5)
 \end{aligned}$$

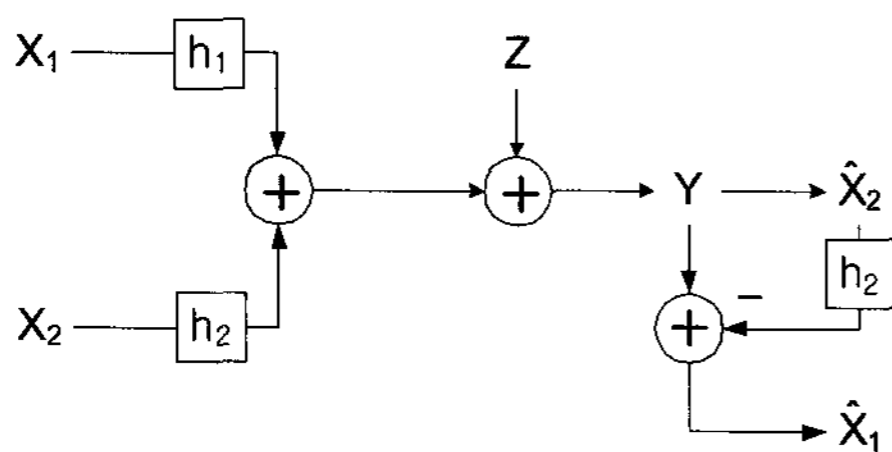
Gaussian MAC의 채널 용량은 (그림 6)과 같은 형태로 그려진다.



(그림 6) Gaussian MAC의 채널 용량 (SNR<sub>1</sub>=10, SNR<sub>2</sub>=10)

### 2. Successive Interference Cancellation (SIC)

Gaussian MAC에서 채널 용량에 근접한 전송률을 얻을 수 있는 기법은 수신단에서 SIC를 수행하는 방법이 있다. 이는 Gaussian BC에서도 보았듯이, 수신한 신호 중에서 한 송신단에서 보내진 신호를 먼저 복원하고 그 신호를 수신 신호에서 제거한 뒤 다른 신호를 복원하는 방식이다. 이는 (그림



(그림 7) Gaussian MAC에서의 SIC

7)과 같이 표현된다.

이를 일반화하면, 3대 이상의 송신단이 있는 Gaussian MAC에서도 마찬가지로 SIC를 이용한 방식이 이론적으로 채널 용량의 전송률을 얻을 수 있다.

## IV. Relay channel

RC는 단일 송신단과 단일 수신단 사이에 중계기가 존재하여 송수신 링크 사이의 정보 전송을 돕는 채널이다. 예를 들면, 이동통신 셀 내에서 충분한 전송률을 얻지 못하는 단말을 위해 중계기를 설치하여 전달하는 상황이 있다.

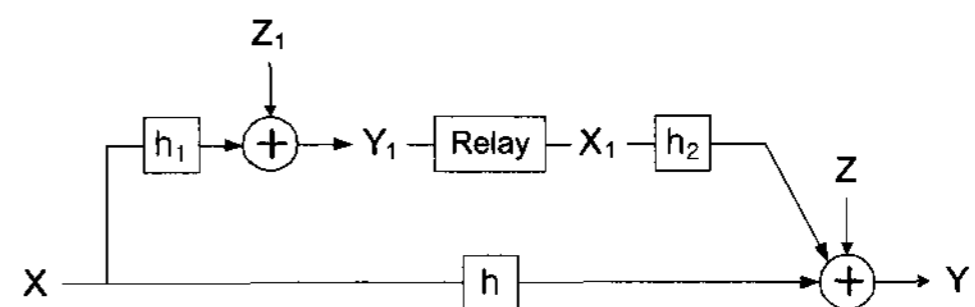
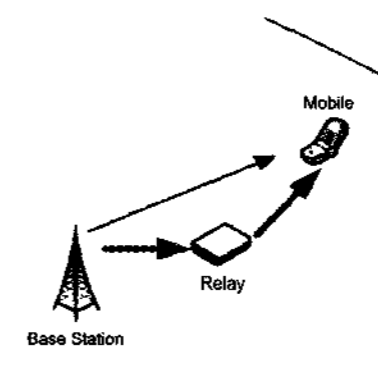
### 1. Three-terminal Gaussian RC

가장 기본적인 RC로 Three-terminal Gaussian RC가 있다. 이 채널에서는 단일 송신단의 채널 입력  $X$ 와 단일 수신단으로의 채널 출력  $Y$ 가 존재하여, 단일 중계기가 채널로부터 신호  $Y_1$ 을 받아서 송신단의 정보 전달을 돕는  $X_1$ 을 전송한다. 각각의 입력 신호  $X, X_1$ 은 최대  $P, P_1$ 의 power로 전송할 수 있다. 따라서, 채널 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y &= hX + h_2X_1 + Z, \quad Z \sim \mathcal{N}(0,1) \\
 Y_1 &= h_1X + Z_1, \quad Z_1 \sim \mathcal{N}(0,1)
 \end{aligned} \quad (6)$$

채널 구조는 (그림 8)과 같이 표현된다.

이 채널에서의 채널 용량은 아직 밝혀지지 않았다. 즉, 지금까지 발견된 전송 방식의 이론적 한계(inner bound)와 전

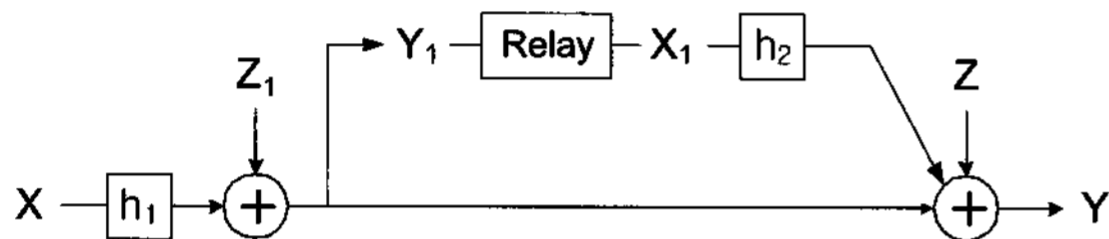


(그림 8) Three-terminal Gaussian relay channel의 모형과 실제 예

송률의 최대 한도 (outer bound)가 아직 만나지 못했음을 의미한다.

### 2. Gaussian degraded RC

일반적인 Gaussian RC에서는 그 채널 용량이 아직 발견되지 않았으나, Gaussian degraded RC에 대해서는 발견되었다. 이 채널은 아래와 같이 수신단이 중계기보다 더 낮은 신호대잡음비로 송신단에서 보내지는 신호를 수신하는 경우이다. 예를 들면, 이동통신 기지국이 단말에 정보를 전달할 때, 중계기가 단말보다 기지국에 더 가까이 위치하여 더 큰 신호를 받을 수 있을 때가 있다.



(그림 9) Gaussian degraded relay channel

이러한 채널은 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$Y = h_1X + h_2X_1 + Z_1 + Z, \quad Z \sim \mathcal{N}(0, N)$$

$$Y_1 = hX + Z_1, \quad Z \sim \mathcal{N}(0, 1)$$

이 때, 송신단은 최대 P의 전력으로 신호를 전송할 수 있고, 중계기는 최대 P1의 전력으로 신호를 전송할 수 있다. Gaussian degraded RC의 채널 용량은 Cover와 El Gamal에 의하여 발견되었으며[6], 다음과 같다.

Theorem. Three-terminal Gaussian degraded relay channel에서 송수신 링크 사이의 전송률을 R1이라 할 때 채널 용량은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \max_{0 \leq \alpha \leq 1} \min \left\{ \frac{1}{2} \log(1 + \alpha |h_1|^2 P), \frac{1}{2} \log \left( 1 + \frac{|h_1|^2 P + |h_2|^2 P_1 + 2\sqrt{(1-\alpha)PP_1}}{1+N} \right) \right\} \quad (7)$$

이러한 채널 용량은 단일 송수신 링크의 채널 용량인

$$\frac{1}{2} \log(1 + \frac{|h|^2 P}{1+N})$$

보다 더 크다는 것을 볼 수 있다. 즉, 중계기의 도움으로 인하여 더 높은 전송률을 얻을 수 있음을 의미한다. 위 채널 용량에 근접한 전송률로 신호를 전송하였을 경우, 송신단에서 오는 신호만으로는 수신단에서 복원이 불가능하지만, 중계기에서 전송되는 신호가 더해져서 복원이 가능하게 된다. 아래에서는 이러한 채널 용량에 근접한 전송률을 얻을 수 있는 전송 방식을 설명하기로 한다.

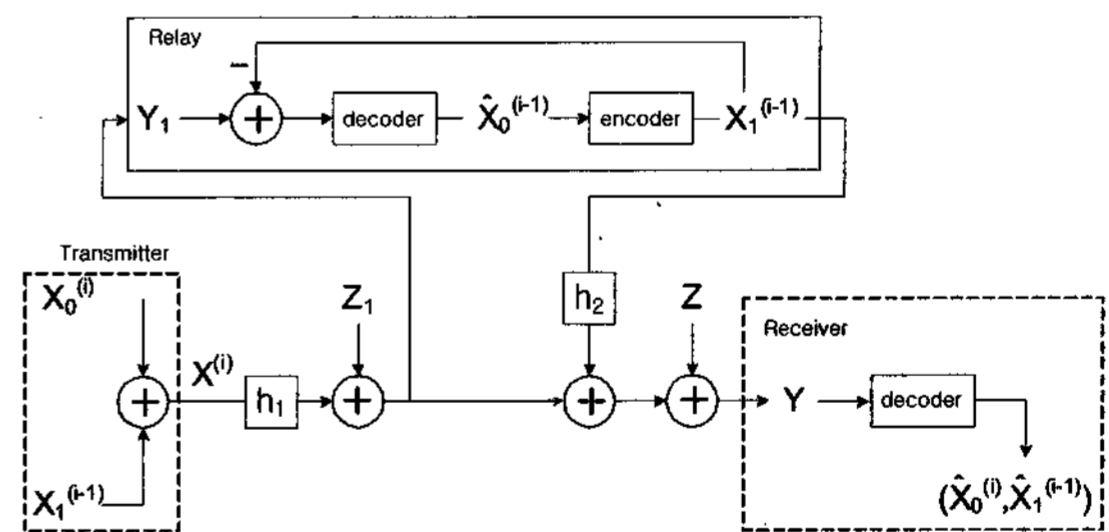
### 3. Block Markov coding

Three-terminal Gaussian degraded RC에서 채널 용량에 근접한 전송률을 얻을 수 있는 방법은 Cover와 El Gamal에 의하여 제안된 Block Markov coding이다[6].

앞의 BC에서 언급했듯이, 수신 신호 대 잡음 비가 더 높은 수신단은 수신 신호 대 잡음 비가 더 낮은 수신단으로 전달될 신호를 완벽히 복원할 수 있다.

따라서, Gaussian degraded RC에서는 중계기에서는 완벽히 복원할 수 있지만, 수신단에서는 그렇지 못한 정도의 전송률로 신호를 전달한다. 송신단에서 전송되는 신호를 완벽히 복원한 중계기는 수신단에서 신호를 복원할 수 있도록 보조 신호를 전송한다. 이 때, 이 채널의 용량에 근접한 전송률을 얻을 수 있다.

전송 방식은 다음과 같다.



(그림 10) Gaussian degraded RC에서의 Block Markov coding

<송신단>

1. 시간 t=0 에서는 중계기가 복원할 αP의 전력을 가진 신호 X0^(0)만을 전송한다.
2. 시간 t=i=1,2,... 에서는 중계기가 복원할 αP의 전력을 가진 신호 X0^(0)와 수신단이 복원할 (1-α)P의 전력을 가

진 신호  $X_0^{(i-1)}$ 을 더해서 다음과 같은 신호를 전송한다.

$$X^{(i)} = X_0^{(i)} + X_0^{(i-1)}$$

<중계기>

시간  $t=i$  에서 중계기는 다음과 같은 동작을 수행한다.

1.  $t=i-1$  의 단계 4.에서 생성된  $X_1^{(i-1)}$ 를  $P_1$ 의 전력으로 전송하고, 신호  $X_1^{(i)}$ 를 수신한다.
2. 수신한 신호  $X_1^{(i)}$ 으로부터  $t=i-1$ 에서 미리 생성된 신호  $X_1^{(i-1)}$ 을 제거한다.
3. 제거되고 남은 신호  $X_0^{(i)} + Z_1$ 에서 신호  $X_0^{(i)}$ 를 복원한다.
4. 복원된 신호  $X_0^{(i)}$ 에서 송신단에서 보내고자 하는 정보를 찾아서 다시 신호  $X_1^{(i)}$ 를 생성한다.

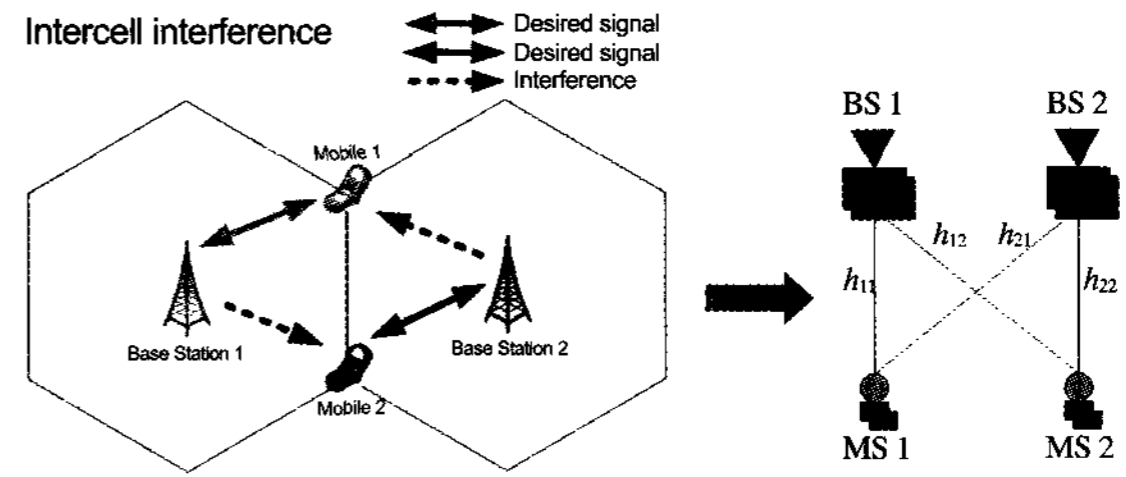
수신단에서는  $t=i$  에 수신된 신호  $Y^{(i)}$ 에서  $X_0^{(i)}$ 와  $X_1^{(i-1)}$ 를 복원하고 이를 이용하여 정보를 복원한다. 이 전송 방식은 간단히 설명하자면, 송신단의 정보를 중계기가 알 수 있을 만큼의 전력으로 신호  $X_0$ 를 중계기를 위해 전송한다. 그리고 중계기가 알게 된 정보를 수신단에게 전송할 신호와 같은 신호  $X_1$ 를  $X_0$ 에 더해서 보내는 것이다. 이 동작에 대한 블록도를 (그림 10)과 같이 표현할 수 있다.

## V. Interference channel

IC는 다수의 송신단과 다수의 수신단이 존재하는 채널에서, 각 송신단이 대응하는 수신단에게 정보를 전달하는 경우를 말한다. 이 때, 송신단에서 전송되는 신호들은 서로 간섭을 일으키게 된다. 이러한 채널의 예로써, (그림 11)과 같이 셀 경계 지역에서 각각의 기지국이 당하는 단말에 서비스하고 있는 상황을 생각해 볼 수 있다. 이와 같은 시나리오를 모형화하는 데 다음과 같은 필수적인 특징을 생각해볼 수 있다. (1) 서로 다른 BS 사이에 정보 교환이 없고 협력이 없다. (2) 서로 다른 MS 사이에 정보 교환이 없고 협력이 없다. 이와 같은 통신 상황을 모형화 하기에 적합한 채널 모형들 가운데 하나가 IC이다 [7].

### 1. 2-user Gaussian IC

본 고에서는 가장 간단한 IC인 2대 2 Gaussian IC를 고려한



(그림 11) 2-user interference channel의 모형과 실제 예 (셀 간섭 지역에서의 통신)

다. 우선 두 송신단에서 전송되는 채널 입력  $X_1, X_2$ 가 존재하며, 두 수신단으로 보내지는 채널 출력  $Y_1, Y_2$ 이 존재하여 다음과 같이 쓸 수 있다. 각각의 송신단은  $P_1, P_2$ 의 평균 전력으로 신호를 전송하며, 각각의 수신단은 이 채널을 거쳐 도달한 신호와 전력  $N_1, N_2$ 인 Gaussian noise를 함께 수신한다. 이것을 일반적으로 noise의 전력을 1로 가정하여 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Y_1 &= h_{11}X_1 + h_{21}X_2 + Z_1, & Z_1 &\sim \mathcal{N}(0,1) \\ Y_2 &= h_{12}X_1 + h_{22}X_2 + Z_2, & Z_2 &\sim \mathcal{N}(0,1) \end{aligned} \quad (8)$$

(8)에서  $h_{ij}$ 는 송신단  $i$ 에서 수신단  $j$ 로 전달되는 신호에 대한 채널 이득이며, 식 (8)에서 모든 값은 실수라 가정한다.

이 채널은 IC 중에서도 가장 간단한 모형임에도 불구하고, 그 채널 용량에 대한 완벽한 규명이 아직 이루어지지 않았다. 아울러, 이와 같은 간단한 채널 모형에 대한 이해를 통해 우리는 간섭을 쉽게 이해할 수 있고, 이러한 간섭을 처리하는 원리를 쉽게 도출할 수 있기에 이와 같은 채널을 다루는 것은 그 의미가 있다고 할 수 있다.

이와 같은 2-user Gaussian IC는 채널 이득 ( $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ )의 관계에 따라서, 채널 용량이 발견된 곳도 존재한다. 이에 대해서 아래에서 알아보도록 한다.

### 2. Strong interference ( $h_{11} \geq h_{12}, h_{21} \geq h_{22}$ )

Strong interference는 그 어구가 뜻하는 바와 같이 interference의 크기가 크다는 뜻, 다시 말해서, 각각의 송신단에서 각각의 수신단으로의 (desired link) 채널 이득보다 각각의 송신단에서 서로 다른 수신단으로의 (interfering link) 채널 이득이 더 큰 경우를 뜻한다. 상식적인 관점으로 보았을 때, 이러한 간섭의 세기가 커질수록 자신의 송신단에게서 전송되는 신호를 복원해야 하는 수신단의 입장에서

는 불리하다고 볼 수 있지만, 그렇지 않다. 오히려, 이와 같은 상황에서는 간섭의 세기가 커질수록, 다시 말해서, interfering link의 채널 이득이 desired link의 채널 이득보다 상대적으로 높을수록 성능이 좋아진다.

이러한 strong interference 경우의 송수신단 1 간의 전송률  $R_1$ , 송수신단 2 간의 전송률  $R_2$ 에 대한 채널 용량은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} R_1 &\leq \frac{1}{2} \log_2(1 + h_{11}^2 P_1), \\ R_2 &\leq \frac{1}{2} \log_2(1 + h_{22}^2 P_2), \\ R_1 + R_2 &\leq \frac{1}{2} \log_2(1 + h_{11}^2 P_1 + h_{21}^2 P_2), \\ R_1 + R_2 &\leq \frac{1}{2} \log_2(1 + h_{12}^2 P_1 + h_{22}^2 P_2). \end{aligned} \quad (9)$$

식 (12)에서 알 수 있듯이, interfering link의 채널 이득이 커질수록 두 송수신단이 보낼 수 있는 전송률의 합이 증가함을 알 수 있다.

Strong interference인 경우의 채널 용량은 다른 채널에 대해서도 언급했던 바와 같이 outer bound와 inner bound가 서로 일치함을 보임으로 채널 용량임을 증명할 수 있다.

IC에서 채널 용량의 inner bound는 각각의 송수신단이 각각의 수신단으로 오류 없이 정보를 전송할 수 있다는 전제하에서 보낼 수 있는 전송률로써 보일 수 있다. 그리고 채널 용량의 outer bound는 각각의 송수신단이 각각의 수신단으로 오류 없이 정보를 전송할 수 있다는 전제하에서 절대로 넘을 수 없는 전송률의 한계이다. 다른 채널들과 마찬가지로 여기서도 Fano's lemma를 바탕으로 채널 용량 이상의 전송률로 오류 없이 전송할 수 없음이 증명된다[8].

흥미로운 사실은 interfering link의 세기가 어느 한계를 넘어서면 마치 interfering link가 없는 것과 같은, 다시 말해서, interference가 전혀 없는 매우 이상적인 통신 상황을 만날 수 있다는 것이다 [9].

### 3. Non-strong interference

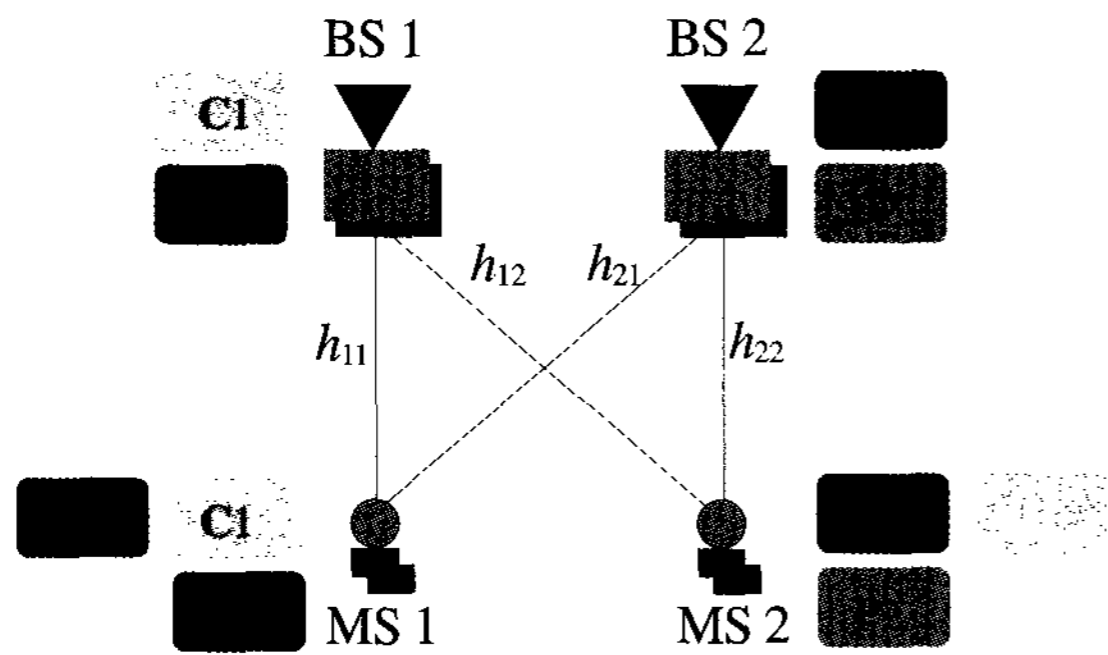
Strong interference가 아닌 그 밖의 모든 상황을 생각해

기에 앞서, interfering link의 채널 이득이 direct link의 채널 이득보다 매우 작을 때에는, 일반적으로 고려하는 것과 같이 간섭 역시 잡음으로 간주할 때가 가장 현명하여 이에 대해서도 capacity 결과가 최근에 밝혀진 바 있다 [10]. 이 때의 경우를 very weak interference라 한다.

Strong interference와 very weak interference를 제외한 나머지 경우에 대해서는 capacity에 대하여 완벽한 규명되지 않았다. 하지만, 최근에 발견된 주목할 만한 결과들을 통해 우리는 채널 용량을 얻을 수 있는 최적의 scheme에 대한 힌트를 얻을 수 있다. 지난 해, Etkin, Tse, Wang에 의하여 발견된 결과들은 IC에 대한 근본적인 이해를 돕고 있다 [11]. 이미, strong interference의 경우에 대한 결과를 통해 간섭을 잡음으로 여기는 것이 최적의 방식이 아닐 수 있음을 알고 있다. 또한, 최근에 capacity 결과가 나왔기에 수학적으로도 규명이 됐지만, 직관적으로도 interfering link의 채널 이득이 direct link의 채널 이득보다 매우 낮은 상황, 곧, interference가 매우 약한 상황에서는 interference limited가 아닌 noise limited이기에 잡음으로 보아도 큰 손실이 없음을 쉽게 알 수 있다. 이와 같은 두 가지 사실에 입각하여 일반적인 채널 상황에서는 (그림 12)에서 보인 바와 같은 message splitting and superposition 기술이 적합함을 알 수 있으며, [11]에서 이에 대한 수학적 규명이 이루어졌다.

(그림 12)는 message splitting and superposition coding에 대한 기술을 도식화한 것이다. 곧, 각각의 BS는 하나의 codeword를 보내는 것이 아니라, 두 가지 종류의 codeword를 보낸다. 한가지가 common message라 불리는 C1 과 C2 이고 private message 라 불리는 P1와P2 이다. 두 가지 종류의 message의 근본적인 차이점은 (그림 12)의 MS에서 극명하게 드러난다. 곧, Common message는 각각의 MS에서 모두 decoding을 하고, private message는 해당 MS에서만 decoding한다는 것이다. 이제, 이와 같은 기술이 왜 capacity와 일치하거나 근접하는지 직관적인 설명을 통해 규명해보도록 하자.

먼저, 양 극단의 경우는 (Strong IC and very weak IC) 이미 앞에 설명한 바와 같다. 문제는, 양 극단의 사이에 있는 IC인데, 이때의 해결책은 다음과 같다. 곧, 어느 정도의 interference는 신호로 인식하고 나머지 interference는 잡음으로 인식한다는 것이다. 여기서, 신호로 인식되는 것은



(그림 12) Message splitting and superposition coding

common message가 되는 것이고, 잡음으로 여기는 것은 private message가 되는 것이다. 이와 같은 직관적인 해석으로도 message splitting and superposition coding이 capacity를 achieving하는 좋은 scheme임을 쉽게 알 수 있다.

좀더 자세하게는, 어떤 capacity의 rate pair라도 1 bit이내의 rate pair를 위와 같은 scheme으로 달성함을 [11]에서 보였다.

#### 4. 그 밖의 다른 issue들

본고에서 다룬 기본적인 two-user Gaussian IC을 여러 방향으로 확장하여 연구가 진행되었다. 그 가운데 하나가 각각의 node가 여러 안테나를 구비했을 경우에 achieve 할 수 있는 rate pair에 대한 연구가 이루어졌다 [12]. 여기서, 제안한 scheme은 superposition coding을 multiple-input multiple-output 환경에 알맞게 optimize한 것이 주요 사항이다. 이 밖에도 capacity를 규명하고자 다양한 inner bound 및 outer bound가 제안되었다.

특별히, 눈여겨볼 것은 다양한 inner bound를 연구함으로써 실제 interference가 있는 통신 상황에서 interference를 관리하는 다양한 방법을 얻을 수 있었다는 것이다. 특히나, 양질의 quality of service가 (QoS) 요구되는 현재의 상황에서 이에 대한 연구를 통해, interference를 효과적으로 다룸으로써, 효율적인 통신을 이룰 수 있을 것이다.

## VI. 결 론

본고에서는 다중 사용자 정보이론을 통하여 다수의 사용자가 존재하는 채널의 채널 용량에 대한 연구 결과에 대하여 정리하였다. 위 기본적인 다중 사용자 채널에서의 채널 용량에 대한 연구는 Gaussian 채널뿐만 아니라 더 일반적인 채널에 대해서도 1970년대부터 활발하게 이루어졌다가, 현재는 채널 용량이 발견되지 않은 경우들이 open problem으로 남아 각국의 석학들이 이를 풀기 위하여 연구하고 있다. 특히, 지난 해에 근 30년간 개선되지 못했던 일반적인 BC와 IC의 채널 용량에 대한 outer bound가 새롭게 발견되면서, 채널 용량이 발견될 가능성을 한층 높여주고 있다.

위와 같은 연구와 더불어 1990년대 후반부터는 더 많은 사용자와 더 복잡한 구조를 갖는 채널에 대한 연구가 진행되기 시작하였다[13, 14, 15]. 또한 Ad hoc 네트워크와 같은 사용자가 매우 많은 채널에서의 용량에 대해서도 연구되었다. 이 때에는 정확한 채널 용량을 계산하기 어렵고, 일반적으로 사용자 수가 증가할 때 채널 용량이 어떠한 scale로 증가하는지에 대하여 연구하게 되었다.

이렇게 알아본 바와 같이 다양한 다중 사용자 채널에서의 채널 용량을 찾기 위한 연구는 앞으로도 계속 활발하게 연구될 전망이다.

## 참 고 문 헌

- [1] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," in *Bell System Tech. Journal*, Vol. 27, pp. 379-423, 623-656, Jul., Oct., 1948.
- [2] T. M. Cover, "Broadcast channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol. IT-18, No. 1, Jan. 1972, pp. 2-14.
- [3] P. P. Bergmans and T. M. Cover, "Cooperative broadcasting," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-20, no. 3, pp.317-324, May 1974.
- [4] R. Ahlswede, "Multi-way communication channels," in *Proc. 2nd Int. Symp. Inform. Transmission*, Tsahkadsor,



Armenia, U.S.S.R., 1971.

[5] H. Liao, "A coding theorem for multiple access communication," in *Int. Symp. Inform. Theory*, Asilomar, 1972; also "Multiple access channels," Ph.D dissertation, Dep. Elec. Eng., Univ. Hawaii, Honolulu, HI, 1972.

[6] T. M. Cover and A. El Gamal, "Coding theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol. IT-25, No. 5, Sept. 1979.

[7] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of information theory*, Wiley, 1991.

[8] M. H. M. Costa and A. A. El Gamal, "The capacity region of the discrete memoryless interference channel with strong interference," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-33, no. 5, pp. 710-711, Sep. 1987.

[9] A. B. Carleial, "A case where interference does not reduce capacity," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-21, no. 5, pp. 569-570, Sep. 1975.

[10] X. Shang, G. Kramer, and B. Chen, "A new outer bound and the noisy-interference sum-rate capacity for Gaussian interference channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, submitted for publication, 2007.

[11] R. H. Etkin, D. N. C. Tse, and H. Wang, "Gaussian interference channel capacity to within one bit," *IEEE Trans. Inform. Theory*, submitted for publication, 2007.

[12] X. Shang, B. Chen, and M. J. Gans, "On the achievable sum rate for MIMO interference channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 9, pp. 4313-4320, Sep. 2006.

[13] A. Reznik, S. R. Kulkarni, and S. Verdú, "Broadcast relay channel: capacity region bounds," in *Proc. Int. Symp. Inform. Theory*, pp.820-824, Sept. 2005.

[14] G. Kramer and A. J. van Wijngaarden, "On the white Gaussian multiple-access relay channel," in *Proc. Int. Symp. Inform. Theory*, p. 40, Jun. 2000.

[15] B. Schein and R. G. Gallager, "Gaussian parallel relay networks," in *Proc. Int. Symp. Inform. Theory*, p.22, Jun. 2000.

약 력



2005년 KAIST 학사  
2006년 ~ 현재 KAIST 석사과정  
관심분야: 정보이론, 오류 정정 부호

박도형



2002년 고려대학교 학사  
2004년 KAIST 석사  
2004년 ~ 현재 KAIST 박사과정  
관심분야: 다중 사용자 정보이론

최상원



2000년 MIT 박사  
2000년 ~ 2004년 Airvana, Inc. principal engineer  
2005년 ~ 현재 KAIST 부교수  
관심분야: 정보이론, 오류 정정 부호, 무선통신

정세영

