

수중 무선 인지 네트워크를 위한 음파 주파수에 따른 채널대역폭 설정 연구

윤창호*, 최수한*

A Study on Channel Bandwidth Determination According to Acoustic Frequencies for Underwater Wireless Cognitive Networks

Changho Yun*, Suhan Choi*

요약

오픈 스펙트럼인 수중 음파 통신 대역의 스펙트럼 효율을 증가시키기 위해, 인지 네트워크 기술을 적용하려면 육상과 같이 수중 음파 대역에도 채널계획이 설정되어야 한다. 본 논문은 수중 음파 대역의 채널계획에 필요한 채널대역폭 설정에 관한 것이다. 이를 위해, 현존하는 상용 수중 음파 통신시스템들의 주파수와 채널대역폭 규격을 이용하여 주파수와 채널대역폭의 수식적 관계를 도출한다. 구체적으로 주파수가 설명변수, 채널대역폭이 종속변수인 회귀모델로 최소자승법 기반 선형회귀분석을 수행한다. 선형회귀분석 결과, 회귀모델의 선형성 가설과 오차항의 정규성 및 등분산성 가설이 95% 신뢰수준에서 채택되었다. 또한, 95%의 신뢰수준에서 주파수가 채널대역폭에 대해 밀접한 관련성이 있으며, 약 85.7%의 설명력을 가지고 있음을 확인하였다. 따라서 선형회귀분석을 통해 도출된 주파수에 따른 채널대역폭의 회귀식, 신뢰구간, 예측구간은 수중 음파 대역의 채널계획 시 채널대역폭을 예측하거나 설정하는데 활용될 수 있다.

키워드 : 선형 회귀, 수중 음파 통신, 인지 네트워크 채널 계획, 채널대역폭

Key Words : Linear regression, Underwater acoustic communication, Cognitive networks, Channel plan, Channel bandwidth

ABSTRACT

It is necessary to make a channel planning providing that we apply terrestrial cognitive network technologies to the open spectrum of underwater acoustic frequency bands in order to enhance its spectral efficiency. In this paper, we study the determination of the channel bandwidth required for the channel planning of the underwater acoustic frequency bands. For this purpose, a mathematical relationship between frequency and channel bandwidth is derived by employing the frequency and channel bandwidth specifications of existing commercial underwater acoustic communication systems. Specifically, a linear regression analysis based on the

※ 본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “다개체 해양 로봇의 협력 항법 및 수중 무선 인지 네트워크 핵심 기술 개발”에 의해 수행되었습니다(PES3560).

• First Author : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Ocean System Engineering Research Division, sgn0178@kriso.re.kr, 정희원

* Corresponding Author : Dankook Univ., Department of Mobile Systems Engineering, suhan@ Dankook.ac.kr, 정희원
논문번호 : 202009-234-B-RE, Received September 21, 2020; Revised October 21, 2020; Accepted November 3, 2020

least-squares method is conducted by considering a regression model where frequency is an explanatory variable and channel bandwidth is a dependent variable. As a result, the linearity hypothesis of the regression model, the normality hypothesis, and the homoscedasticity hypothesis of the errors are adopted with a confidence level of 95%, respectively. In addition, the significance hypothesis between two variables is adopted with a confidence level of 95%, and the coefficient of determination is roughly 85.7%. Accordingly, the linear regression results including the regression equation, the confidence interval, and the prediction interval can be applied to predict or set the channel bandwidth, as a part of the channel planning.

I. 서 론

음파 통신은 전자기파 통신, 광 통신에 비해 수중에서 신호를 더 멀리 안정적으로 보낼 수 있어, 가장 많이 사용되는 수중 무선 통신 방법이다^[1,2]. 현재 자원 탐사, 레저, 환경 관측, 군사적 정찰, 건설 등 다양한 응용 분야에서 수중 음파 통신을 사용하고 있고, 그 분야도 확대되고 있어 수중 데이터 트래픽도 증가하고 있다^[3,4]. 따라서 수중 음파 통신 시스템에 대하여 통신거리 연장, 안정적인 통신뿐만 아니라 급증하는 트래픽을 수용할 수 있도록 전송용량(capacity)의 증가가 요구된다^[5].

최근 수중 음파 통신 시스템의 수요 증가와 함께 소나, 어군탐지기, 센서 등의 다양한 음향 장비들이 개발되어 수중 음파 통신 시스템과의 주파수 간섭을 일으키고 있다^[6]. 음향 장비 이외에도 돌고래와 같은 수중 포유동물들도 음파를 사용하여 간섭을 유발하고 있다. 그림 1에서 보이는 것과 같이, 수중에서는 음파 주파수 대역마다 다양한 자연적 또는 인위적 간섭원들이 존재한다^[7]. 원하는 대역에 신호 세기가 큰 간섭원이 존재하면, 이 간섭원에 의한 배경 잡음이 원래 신호를 검출하지 못할 정도로 성능 열화를 초래할 수 있다.

협대역이며, 다양한 간섭원들이 존재하는 수중 음파 통신 환경에서는 고정된 주파수와 채널대역폭을 사용하는 기존 수중 음파 통신 방식을 적용하면 전송용량을 증가시키는 데 한계가 있다. 또한, 간섭원을 회피하기 위해 시공간적으로 자원이 제한적으로 활용되어 네트워크 수율을 희생시켜야 한다. 만약 수중에서도 대역 센싱(sensing), 공유(sharing), 접속(access)을 통해 유희 대역을 감지하여 대역을 할당하는 인지 네트워크 기술이 적용되면 주파수 이용률 증가와 낮은 전송지연 등의 전반적인 네트워크 성능을 향상시킬 수 있다^[8].

2014년 수중 인지 네트워크를 위한 프레임워크가 소개된 이후로, 간섭원들의 충돌을 회피하여 제한적인

음파 대역을 최대한 활용하는 기술들이 주로 개발되었다^[9]. [10]에서는 물리 계층과 데이터 링크 계층 간 협업을 통해 자연적, 인위적 간섭원들을 회피하는 대역 관리 기술이 개발되었다. [11]에서는 다중홉 수중 통신 네트워크 환경에서 돌고래가 받는 영향을 최소화하기 위한 dolphin aware data transmission (DAD-Tx) 기술이 제안되었다. 또한, [12]에서는 수중 인지 네트워크에서 충돌률을 고려하여 대역폭을 능동적으로 조절하는 동적 채널 제어 매체접속제어 프로토콜이 제안되었다.

지금까지의 수중 인지 네트워크를 위한 연구들은 데이터 링크 계층에서 간섭원 회피와 대역 이용률을 향상시키는 매체접속제어 기술들이 주를 이루고 있고, 수중에서 인지 통신을 위해 대역을 센싱하고, 대역을 공유하는 방법들의 개발은 초기화 상태이다. 또한, 수중에서 대역을 센싱하고 공유하기 위해서는 육상처럼 명확한 채널 계획(channel planning)이 필요하다.

육상에서는 국제전기통신연합 (ITU)의 전파규칙 (Radio Regulation)에 의해 주파수 대역이 업무별로 분배되고, 업무별 할당된 대역도 채널 계획에 의해 다수의 채널들로 분할된다^[10]. 이렇게 대역별로 채널 계획이 있어야, 이를 기준으로 인지 네트워크에서 유희 대역을 감지하기 위한 대역 센싱을 할 수 있다.

반면, 현재까지 수중 음파 대역은 주파수 사용 규칙

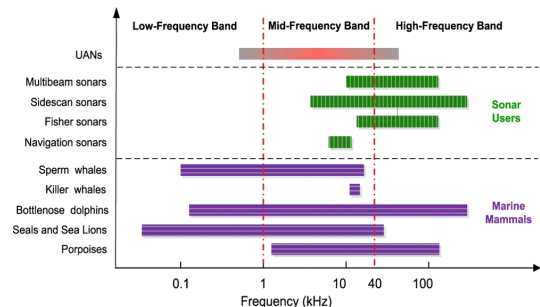


그림 1. 주파수 대역 대 자연적, 인위적 간섭원[7]
Fig. 1. Artificial and natural interferers according to acoustic frequencies.

이 전무하며, 자연적 사용자와 인위적 사용자가 혼재되어 원하는 대역을 점유하여 사용 중이다. 이러한 상황에서 수중에서 인지 통신을 사용하기 위해서는 대역을 센싱하고 공유할 수 있는 공통의 기준이 필요하다. 따라서 수중 인지 네트워크 구현을 위해서는 육상과 같이 수중 음파 대역 분할을 통한 채널 계획이 우선적으로 수립되어야 한다.

수중 음파 대역 채널 계획은 ITU-R 권고안과 같이 전체 수중 음파 대역을 다수의 채널로 분할하고, 각 채널 별 주파수 범위, 채널 번호를 설정하며, 각 채널의 대역폭을 결정하는 것이다. 그림 2는 수중 음파 통신 대역의 특성을 고려한 수중 음파 채널 계획의 예시이다. 이 예시에는 저주파수 대역일수록 채널 대역폭을 낮게 설정하고, 고주파수 대역일수록 채널 대역폭이 증가함을 보여준다. 수중 음파 통신 시스템들은 이러한 채널 계획을 기반으로 대역을 센싱하고, 트래픽 특성에 맞도록 채널을 점유할 수 있다.

채널 계획에서 채널 대역폭은 수중 인지 네트워크의 센싱의 효율과 밀접한 관계가 있다. 채널대역폭이 좁아 센싱을 촘촘하게 할 경우, 스캐닝 하는 시간이 길어지며, 전력 소모가 증가할 수 있다. 이는 배터리 수명이 짧은 수중에서 큰 제약사항이 될 수 있다. 반대로 센싱을 성글게 할 경우에는 간섭원들을 제대로 파악하지 못해 네트워크 성능을 떨어뜨릴 수 있다. 또한, 주파수가 증가함에 따라 대역폭도 증가하는 점을 반영하여 모든 주파수에서 균등한 대역폭을 적용하는 것이 아니라, 주파수에 따라 채널대역폭도 스캐닝 간격을 증가하도록 설정해야 한다.

본 논문은 수중 무선 인지 네트워크를 위한 채널 계획 중 채널 대역폭 설정에 관해 다룬다. 구체적으로 채널대역폭 설정을 위해 수중 음파 대역의 주파수와 채널대역폭 간의 관계를 수식적으로 도출하는 것이다. 도출된 주파수 대 채널대역폭의 관계를 이용하여 그림 2의 예시와 같은 채널 계획의 채널 대역폭을 설정하는데 적용한다.

수중 음파 통신 시스템의 주파수와 대역폭은 전송

거리, 데이터율, 송신 전력, 센서의 방향성 등의 시스템의 요구사항을 고려하여 설정할 수 있지만, 범용적으로 사용되는 채널 계획의 채널 대역폭은 특정 수중 음파 통신 시스템에 특성만 반영할 수 없다. 보다 많은 시스템들의 특성을 반영하기 위하여, 다양한 수중 어플리케이션에 적용되어 실효역에서 이미 성능이 검증된 상용 수중 음파 통신 시스템들을 고려한다. 즉, 주파수와 채널 대역폭의 관계를 상용 수중 통신 시스템의 주파수와 대역폭 규격 데이터를 기반으로 경험적으로 도출하는 것이다.

표 1에서와 같이 상용 수중 음파 통신 시스템의 주파수와 대역폭의 규격들은 통신거리, 데이터율, 운용수심, 송신 전력 등의 요구사항에 따라 결정되었다. 제조사와 모델별로 주어진 규격 데이터들에서 주파수와 대역폭의 관계를 바로 유추하기는 어렵다. 본 논문에서는 주파수가 높을수록 채널 대역폭이 증가한다는 점과 그림 3에서와 같이 상용 수중 음파 시스템의 주파수 대 채널대역폭 데이터의 산점도(scatter plot)가 선형성을 보이는 결과에 착안하여, 주파수와 채널 대역폭의 상관관계를 수식적으로 도출하기 위해 선형회귀 (linear regression) 분석을 적용한다. 수중 음파 대역의 채널 계획이 없는 상황에서, 실제 검증된 상용 시스템들의 규격과 이를 선형회귀 분석을 통해 도출한 방식은 기존에 제안되지 않은 방식이다.

이 방법은 현재 사용되고 있고 검증된 상용 시스템들의 규격으로부터 도출된 주파수와 채널 대역폭 정보를 이용하기 때문에 보다 현실적으로 채널 대역폭을 설정할 수 있는 장점이 있다. 또한, 선형회귀분석으로 도출한 예측 구간(prediction interval)을 이용하여 현재는 사용되지 않지만 향후 수중 통신 시스템에서 사용될 가능성이 있는 상용 수중 음파 시스템 주파수 범위 외의 주파수들에 대한 채널대역폭도 쉽게 예측할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 현재 사용되고 있는 상용 수중 음파 통신 시스템의 주파수와 채널대역폭 데이터를 분석하고 선형회귀분석에 적

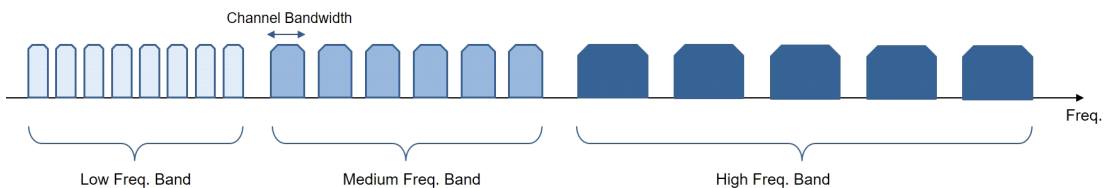


그림 2. 수중 인지 네트워크를 위한 채널 계획 예시
Fig. 2. An example of channel plan for underwater wireless cognitive networks.

표 1. 상용 수중 음파 시스템의 규격[14]
Table 1. The specification of commercial underwater acoustic communication systems.

제조사	모델명	주파수 (kHz)	채널 대역폭 (kHz)	통신 거리 (km)	데이터율 (kbps)
ApppliCon	SeaModem	30	10	0.4	2.25
	AM-AUV	24	6	5	1.5
AquaSeNT	AD-OFDM-13A	24	6	5	9
	AM-D2000	12	6	5	1.5
Aquatec	AQUAmodem 500	29	4	0.25	0.1
	AQUAmodem 1000	9.75	4.5	5	2
Blueprint Subsea	SeaTrac X150	28	8	1	0.1
	SeaTrac X110	28	8	1	0.1
	SeaTrac X010	28	8	1	0.1
Desert Star	SAM-1	37.5	9	1	0.15
Develogic	HAM.NODE	3.5	2	1.95	7
	HAM.NODE	10.5	5	1.95	7
	HAM.NODE	15.5	9	1.95	7
	HAM.NODE	23	12	1.95	7
	HAM.Base	52.5	25	1.2	10
DiveNET	Microlink	20	20	1	0.078
	Sealink C	10	10	8	0.088
	Sealink R	27.5	35	2.5	1.2
DSPComm	Sealink S	10	10	8	0.08
	Aquacomm	23	14	3	0.48
Evologics	Aquacomm Gen2	23	14	8	1
	S2CM HS	160	80	0.3	62.5
	S2CM 48/78	63	30	1	31.2
	S2CM 42/65	53.5	23	1	31.2
	S2CM 18/34	26	16	3.5	13.9
	S2CR 48/78	63	30	1	31.2
	S2CR 42/65	53.5	23	1	31.2
	S2CR 40/80	51	26	2	27.7
	S2CR 18/34	26	16	3.5	13.9
	S2CR18/34D	26	16	3.5	13.9
	S2CR 15/27	21	12	6	9.2
	S2CR 12/24	18.5	11	6	9.2
S2CR 7/17	12	10	8	6.9	
Kongsberg	eNode MiniS 34-180	26	10	1	6
	eNode MiniS 34-40V	26	10	4	6
Sercel	MATS 3G 12kHz	12.5	5	15	7.4
	MATS 3G 34kHz	34.5	9	5	24.6
Sonardyne	Modem6 Sub-Mini	26.8	11.5	2	9
	Modem6 Mini	26.8	11.5	3	9
	Modem6 Standard	26.8	11.5	5	9
LinkQuest	UWM1000	35.7	17.9	0.35	17.8
	UWM2000	35.7	17.9	1.5	17.8
	UWM2000H	35.7	17.9	1.5	17.8
	UWM2200	71.4	35.7	1	35.7
	UWM3000	10	5	3	5
	UWM3000H	10	5	3	5
	UWM4000	17	8.5	4	8.5
Subnero	UWM10000	10	5	10	5
	M25M	25	16.6	3	15
Teledyne Benthos	ATM	11.5	5	6	15.36
	ATM	18.5	5	6	15.36
	ATM	24.5	5	6	15.36
Tritech	Micron	24	8	0.5	0.04

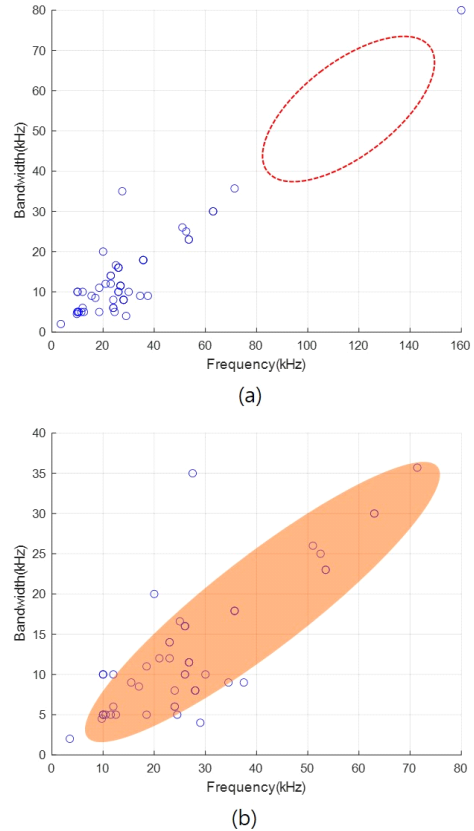


그림 3. 상용 수중 음파 통신 시스템의 주파수 대 채널대역폭 산점도 (a) 데이터 분석 전 산점도 (b) 데이터 분석 후 산점도
Fig. 3. The scatter plot of frequency vs. channel bandwidth of commercial underwater acoustic communication systems. (a) The scatter plot before analysis. (b) The scatter plot after analysis.

용할 데이터를 최종적으로 선정한다. 3장에서는 선형 회귀 모델을 설정하고, 선형회귀분석을 통해 수중 음파 주파수와 채널대역폭의 상관관계를 도출한다. 마지막으로, 4장 결론에서 본 논문을 마무리한다.

II. 상용 음파 통신 시스템의 수중 음파 주파수와 채널대역폭 데이터 분석

이 장에서는 상용 음파 통신 시스템들의 수중 음파 주파수와 채널대역폭 데이터를 분석하고, 선형회귀에 적용할 데이터를 선정한다. 데이터 선정과 관련하여, 그림1에서와 같이 자연적 간섭원들의 점유 대역폭은 선형회귀분석에 적용할 수 있도록 데이터화되어 있지 않으므로 적용할 수 없다. 또한, 수중 음파의 채널 계

획은 수중 음파 통신 시스템을 위해 적용하는 것이므로, 선형회귀분석에는 수중음파통신시스템의 주파수 대 채널대역폭 데이터를 적용한다.

[14]에서는 2020년까지 개발된 상용 수중음파통신 시스템들의 통신거리, 데이터율, 변복조, 수신, 변복조 방식, 송수신 출력, 무게, 온도, 비트오율 등의 규격을 상세하게 정리하고, 통신거리, 데이터율, 변복조 방식 등의 측면에서 상용 시스템들을 서로 비교 분석하였다.

본 논문에서는 [14]에서 정리된 상용 수중 음파 통신 시스템들 중 주파수, 채널대역폭, 통신거리, 데이터율 등의 규격들이 모두 명시된 시스템들을 고려한다. 제조사마다 규격이 다른 다수의 모델들을 출시하고 있어, 같은 제조사에서 주파수, 대역폭, 통신거리, 데이터율이 동일한 사양을 가지는 모델들은 중복 배제를 위해 하나만 선정하였다. 또한, 한 모델에서 다수의 데이터율이 가용할 때는 가장 큰 데이터율을 적용한다. 이상의 기준으로 선정된 제조사 및 모델별 상용 수중 음파 통신 시스템은 표 1과 같이 정리되며, 주파수 대 채널대역폭 데이터는 총 53개이다.

두 변수 간의 연관성을 분석하는 전통적인 방법인 한 변수에 대한 관측치를 x 축으로 하고 이에 대응하는 다른 변수의 관측치를 y 축으로 설정하여 모든 관측치를 산점도로 표현하는 것이다^[15]. 주파수와 채널대역폭의 상관관계를 도출하기 위해, 주파수를 x 축, 채널대역폭을 y 축으로 하는 산점도를 그림 3와 같이 도식하였다. 그림 3.a와 같이, 대부분의 주파수 대 채널대역폭 데이터는 주파수가 80 kHz 이하, 채널대역폭이 40 kHz 이하에 집중되어 있고, 주파수가 160 kHz일 때 하나의 데이터만 존재한다. 즉, 80 kHz에서 160 kHz 사이에는 데이터가 존재하지 않아 선형회귀 분석으로 해석하기 어렵다. 또한, 직관적으로 160 kHz 주파수 데이터는 회귀식에 영향을 주는 영향치(influential)가 될 수 있으므로 선형회귀분석 시 배제되어야 한다. 그림 3.b는 영향치를 배제한 총 52개의 주파수 대 대역폭 데이터를 적용한 산점도이다. 주파수가 0-80 kHz, 채널대역폭이 0-40 kHz 사이에 집중되어 있음을 알 수 있다. 또한 주파수가 증가할수록 채널대역폭이 증가하는 경향을 볼 수 있으므로 주파수와 채널대역폭은 대략적으로 양의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 다음 장에서는 이 데이터를 이용하여 선형회귀분석을 수행하고, 최종적으로 주파수 대 채널대역폭의 수식적 관계를 도출한다.

III. 선형회귀분석을 통한 수중 음파 주파수와 대역폭 상관관계 도출

이 장에서는 선형회귀 분석을 통하여 주파수 대 채널 대역폭과의 관계를 보여주는 회귀식, 신뢰구간 및 예측구간을 도출한다. 선형회귀 분석은 그림 4에서 도식된 절차에 따라 진행되고, MATLAB Statistics and Machine Learning Toolbox 소프트웨어를 사용하여 수행하였다.



그림 4. 선형회귀분석 절차
Fig. 4. The process of linear regression analysis.

3.1 선형회귀 모델링

수중 음파 주파수 대 채널대역폭의 상관관계 도출을 위해 하나의 독립변수를 적용하는 단순선형회귀 모델을 적용한다. 독립변수 또는 설명변수는 주파수 (kHz), 종속변수는 채널대역폭(kHz)으로 설정한다. 회귀모델은 주파수가 증가할수록 채널대역폭이 증가하도록 수식 (1)과 같이 정의한다^[16].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (1)$$

수식 (1)에서 y 는 종속변수, x 는 독립변수이다. β_0 와 β_1 는 회귀계수(regression coefficient)로서, 전자는 회귀직선의 절편(intercept)이며 후자는 회귀직선의 기울기(slope), ϵ 는 오차항이다. β_0, β_1 는 상수이며, ϵ 는 정규분포를 갖는 랜덤변수이다. 특정 관측치 x 에 대해, y 도 ϵ 의 영향으로 랜덤변수가 된다.

식 (1)에서 최소자승법(least square method)을 적용하여 회귀계수 β_0, β_1 을 추정하기 위해 아래와 같이 모델과 오차항에 대해 가설을 세운다. 이 가설들은 다음 장의 회귀분석을 통해 각각 검증한다.

- 모형의 선형성(linearity): y 는 x 와 선형관계를 가진다.
- 오차의 등분산성(homoscedasticity): 오차들의 분산 값들이 동일해야 한다.
- 오차의 정규성(normality): 오차들은 정규 분포를 가진다.
- 오차의 독립성에 대해서는 주파수 대 채널대역폭은 시계열 데이터가 아니므로 독립성 가정은 고려하지 않는다.

최소자승법으로 추정한 회귀식은 [16]에 정의되어 있으며, 아래의 수식과 같이 표현된다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (2)$$

식 (2)에서 $\hat{\beta}_0$ 와 $\hat{\beta}_1$ 은 회귀계수의 점추정치이며, 이 값들은 설명변수와 종속변수의 관측치(또는 주어진 데이터)를 이용하여 구한다. 이 때 설명변수와 종속변수의 관측치가 모두 n 개가 있다고 하면, 관측치는 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ 로 표현된다. 이 관측치의 평균을 각각 \bar{x} 와 \bar{y} 라고 할 때, $\hat{\beta}_0$ 와 $\hat{\beta}_1$ 은 $\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}, \hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 로 표현된다¹⁶⁾. \hat{y} 는 종속변수의 점추정치이며, 적합치(fitted value)라고 한다. \hat{y} 는 식 (2)와 같이 $\hat{\beta}_0$ 와 $\hat{\beta}_1$ 를 이용하여 도출한다.

3.2 잔차분석을 통한 이상값 배제

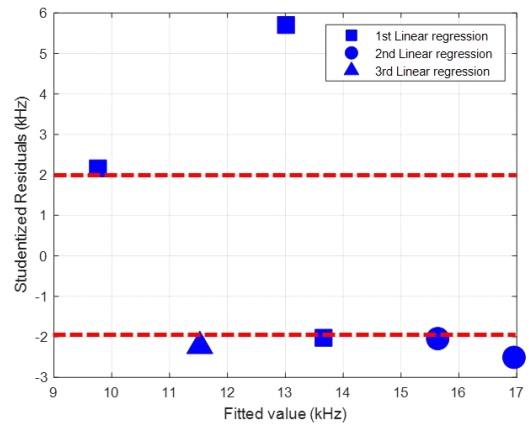
선형회귀분석을 통한 추정된 회귀식이 적용되려면, 오차항의 가설들과 회귀식의 선형성 가설이 채택되어야 한다. 이상값 배제는 추정된 회귀식이 가설을 만족시키기 위해서 필요한 그림 4와 같이 선형회귀분석의 과정이다.

잔차는 종속변수 관측치와 적합치의 차이 $y - \hat{y}$ 값이며, 실제 데이터에서 적합치가 얼마나 벗어나 있는지를 보여준다. 그림 3.b의 관측치들을 적용하여 선형회귀에 따른 잔차분석을 통해 회귀분석 시 악영향을 주는 이상치(outlier)를 찾는다. 선형회귀 분석에서 이상치의 배제는 관측 오류를 줄여 적합치의 정확도

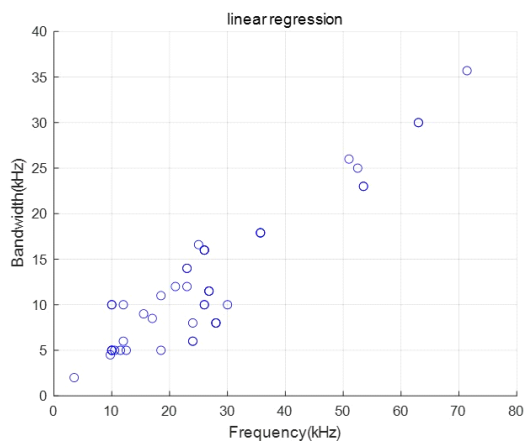
를 높이기 위해 수행되는 ‘wise practice’이며, 대체로 적합치를 추정하기 전에 이상치 테스트를 통해 이상치를 우선적으로 배제하도록 한다¹⁷⁾.

이상치 배제를 위해서, 스튜던트 잔차 (Studentized residual)를 고려하였고, 잔차의 절대 값이 ‘2’를 초과하는 경우는 배제된다¹⁸⁾. 그림 5.a에서 보듯이, 총 4회의 선형회귀를 통해 6개의 이상치가 발견되었다.

4번째 선형회귀를 통해 유효한 주파수-채널 대역폭 관측치 조합의 수는 총 46개이며, 이 관측치들의 산점도는 그림 5.b와 같이 도식된다. 이상값 배제 과정을 통해 6개의 데이터가 배제되었으나, 남은 46개의 데이터로부터 시스템의 특성을 반영하여 회귀식을 추정



(a)



(b)

그림 5. 선형회귀를 통한 이상치 발견 결과와 이상치를 배제한 주파수와 채널 대역폭 산점도 (a) 이상치 발견 결과 (b) 이상치를 배제한 데이터 산점도

Fig. 5. The results of observing outliers after linear regression and the scatter plot of frequency vs. channel bandwidth after excluding outliers. (a) The results of observing outliers. (b) The scatter plot of frequency vs. channel bandwidth after excluding outliers.

하며, 이 데이터 수는 회귀식을 추정하기 위해서 적절하다.

다음 장에서는 이 관측치들을 이용하여 회귀분석의 가설과 회귀계수의 유의성을 검정하고 최종적으로 회귀식과 신뢰구간 및 예측구간을 도출한다.

3.3 가정 및 유의성 검정

3.3.1 가설 검정

그림 6.a는 이상치를 배제한 관측치들의 산점도와 식 (2)를 적용한 적합선(fitted line)을 나타내고, 5.b는 적합치에 대한 스튜던트 잔차값들을 나타낸다. 그림 6.a를 통해 주파수 대 채널대역폭은 강한 양한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이는 식 (3)의 Pearson 상관 계수(correlation coefficient)를 통해서도 확인할 수 있

다¹⁵. 상관계수는 식 (2)의 회귀식에 관찰치가 근사하는 정도를 평가하는 통계량으로 주파수와 채널대역폭의 두 변수 사이의 선형 연관성의 강도를 측정한다. 상관계수는 -1과 1 사이에 값을 갖고 -1과 1에 가까울수록 각각 음과 양의 선형관계가 강하다는 것을 의미한다¹¹.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

식 (3)을 통해 상관계수는 0.9259가 나왔으며 ‘1’과 아주 가까우므로 강한 양의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 6.b에서 보듯이 스튜던트 잔차들이 적합치들에 대해 무작위로 분포하고, 특별히 ‘U’자 곡선 패턴이 없음을 확인할 수 있다. 이를 통해 우리는 모델이 선형성 가설을 만족함을 확인할 수 있다.

오차항의 정규성과 등분산성 가설들도 각각 특정 테스트 방법을 통해 검정할 수 있다. 정규성 가설은 데이터의 수가 2,000 미만일 때 적용하는 Shapiro-Wilk 테스트를 통해 검정된다¹⁶. 이 때, 귀무가설은 ‘모든 오차항들은 정규분포를 따른다’이며, 이 테스트를 통해 귀무가설이 만족하면 오차항들이 정규분포를 따른다는 것을 확인할 수 있다. 유의수준(significance level)이 0.05일 때, Shapiro-Wilk 테스트 결과 통계량은 0.9587, 이 때의 확률값(p-value)은 0.2035가 나왔다. 테스트로 도출된 확률값이 유의수준인 0.05보다 매우 크므로 정규성에 따른 귀무가설이 채택되어, 이 모델은 정규성 가설을 만족함을 확인할 수 있다.

오차항의 등분산성 가설은 Breusch - Pagan 테스트를 통해 검정할 수 있다¹⁶. 이 때, 귀무가설은 ‘모든 오차항들은 등분산성을 가진다’이며, 이 테스트를 통해 귀무가설이 만족하면 오차항들의 등분산성을 확인할 수 있다. 오차항의 등분산성 가설도 유의수준이 0.05일때, Breusch - Pagan 테스트 결과 검정하였다. 그 결과로 통계량은 0.3021, 확률값은 0.5826이 나왔다. 이 확률값이 유의수준인 0.05보다 매우 크므로 귀무가설이 채택됨을 확인할 수 있다. 또한, 그림 6.b를 통해 적합치들에 대한 잔차들이 특정 패턴이 없이 무작위로 분포함을 보이며, 이는 오차항들의 등분산성 가설을 증명하는 결과이다.

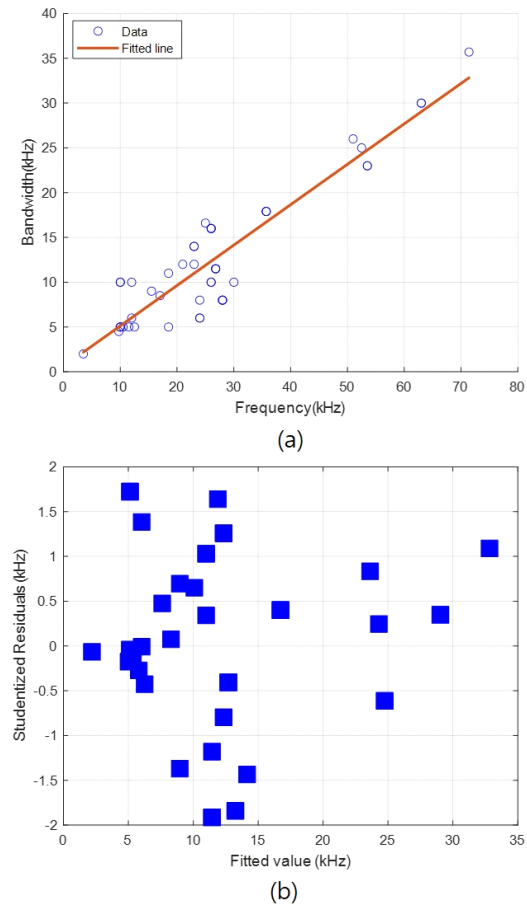


그림 6. 주파수 대 채널대역폭의 적합선과 산점도와 적합치에 따른 스튜던트 잔차 (a) 적합선과 산점도 (b) 적합치에 따른 스튜던트 잔차
Fig. 6. Fitted line and scatter plot between the frequency and the channel bandwidth. (a) Fitted line and scatter plot. (b) Studentized outliers according to fitted values.

3.3.2 유의성 검정 및 회귀식 도출

선형회귀분석에서 유의성 검정을 위해 설명변수와 종속변수의 상관관계를 보여주는 회귀식의 기울기인 $\hat{\beta}_1$ 가 고려된다. 즉, $\hat{\beta}_1$ 이 0이면 설명변수는 종속변수에 어떤 영향을 주지 않고, 설명변수는 종속변수를 설명할 수 없다. 따라서 귀무가설은 ' $\hat{\beta}_1$ 이 0이다'이며, 이 가설이 기각되어야 설명변수가 종속변수에 대해 유의함을 보여주는 것이다.

유의수준 0.05일 때, F-test를 통해 유의성 검정을 수행하였다. 그 결과 통계량은 약 264가 나왔으며 확률값은 3.2017×10^{-20} 이 나왔다. 이 확률 값은 유의수준보다 현저히 작으므로 이 가설은 기각되고 대립가설이 성립된다. 이는 기울기가 '0'이라는 귀무가설을 크게 기각시켜 주파수는 채널 대역폭에 유의함을 보여준다.

또한, 유의성 검정에 이어 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 도출한다. 결정계수는 선형회귀 모델의 적합도(goodness-of-fit)를 평가할 때 사용한다. 즉, 관측치와 적합치가 얼마나 일치하는지, 회귀식이 얼마나 정확한지를 나타내는 값이다. 결정계수는 종속변수의 관측치, 관측치의 평균, 적합치를 이용하여 식 (4)와 같이 도출할 수 있다¹⁶⁾.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \tag{4}$$

식 (4)를 이용하여 계산된 결정계수는 0.8573이다. 즉, 선형회귀 모델은 주파수와 채널대역폭에 의해 약 85.7% 설명된다고 해석할 수 있다. 가설 검정과 유의성 검정을 모두 만족시킨 회귀식은 기울기가 0.4512, 절편이 0.6132이며, $\hat{y} = 0.6132 + 0.4512x$ 로 표현된다. 즉, 채널대역폭은 주어진 주파수에 대해 도출된 회귀식을 통해 도출할 수 있는 것이다. 예를 들어, 주파수가 40 kHz일 때, 채널대역폭의 점추정치는 약 18.66 kHz이다.

3.4 신뢰 구간과 예측구간 도출

회귀식으로 도출한 적합치 \hat{y} 는 주어진 n 개의 데이터를 이용하여 구한 랜덤변수 y 의 평균값이며, 점추정치이다. \hat{y} 은 랜덤변수 y 의 불확실성(uncertainty)을 반영할 수 없어, 이 값이 실제 값을 확률이 낮다.

따라서 각 x 값에 대해 평균값 \hat{y} 의 범위 구간을 지정함으로써, 불확실성을 반영할 수 있다. 이때 이 구간 추정치를 신뢰구간(confidence interval; CI)이라고 한다¹⁵⁾. x_0 일 때, 신뢰구간은 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{y}_0 \pm t_{0.5\alpha, n-2} \sqrt{MSE \left(\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)} \tag{5}$$

식 (5)에서 $t_{0.5\alpha, n-2}$ 는 자유도가 $n-2$, 유의수준이 α 일 때 t 분포의 통계량이며, MSE 는 잔차 제곱의 평균값이며 $MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}$ 로 표현된다. 식 (5)를 이용하여, 95%의 신뢰수준 (confidence level)에서 도출한 신뢰구간은

$$\hat{y}_0 \pm 4.9742 \times \sqrt{0.0217 + \frac{(x_0 - 26.407)^2}{1.1385 \times 10^4}}$$

이다. 여기서 \hat{y}_0 는 앞 장에서 도출한 회귀식을 통해 $\hat{y}_0 = 0.6132 + 0.4512x_0$ 로 구할 수 있다. 예를 들어, 95%의 신뢰수준에서 주파수 40 kHz일 때의 채널대역폭의 신뢰구간은 [17.69, 19.62] kHz이다.

또한, 회귀식의 목적은 예측하지 않은 미래의 관측치 대한 예측(prediction)에 있다¹⁵⁾. 이 때, 미래의 관측치에 대한 구간추정치는 신뢰구간보다 불확실성이 더 증가하게 된다. 미래 관측치에 대한 구간추정치를 예측구간(prediction interval; PI)이라고 정의하고, 아래의 수식과 같이 표현된다.

또한, 회귀식의 목적은 예측하지 않은 미래의 관측치 대한 예측(prediction)에 있다¹⁵⁾. 이 때, 미래의 관측치에 대한 구간추정치는 신뢰구간보다 불확실성이 더 증가하게 된다. 미래 관측치에 대한 구간추정치를 예측구간(prediction interval; PI)이라고 정의하고, 아래의 수식과 같이 표현된다.

$$\hat{y}_0 \pm t_{0.5\alpha, n-2} \sqrt{MSE \left(\frac{n+1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)} \tag{6}$$

식 (6)을 이용하여, 95%의 신뢰수준에서 도출한 예측구간은 $\hat{y}_0 \pm 4.9742 \times \sqrt{1.0217 + \frac{(x_0 - 26.407)^2}{1.1385 \times 10^4}}$

이다. 예를 들어, 95%의 신뢰수준에서 주파수 40 kHz일 때의 채널대역폭의 예측구간은 [13.59, 23.72] kHz이다. 최종적으로 주어진 주파수와 채널대역폭의 관측치의 산점도, 적합선, 신뢰구간, 및 예측구간은 그림 7과 같이 도식된다. 또한, 도출된 회귀식, 신뢰구간과

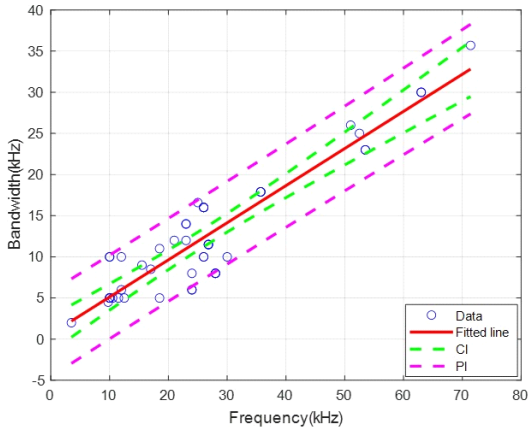


그림 7. 주파수 대 채널대역폭의 적합선, 산점도, 신뢰구간, 및 예측구간 도식
 Fig. 7. Fitted line, scatter plot, confidence interval, and prediction interval between the frequency and the channel bandwidth.

예측구간을 이용해 특정 주파수에서의 채널 대역폭을 추정할 수 있다.

IV. 결 론

수중에서는 주된 통신 수단으로 음파 통신을 사용하고 있으며, 음파 주파수 대역은 사용 규약이 없는 오픈 스펙트럼이다. 또한, 수중 음파 통신은 높은 비트오율, 인위적, 자연적 간섭원이 존재하여 통신의 신뢰성이 보장받기 힘들다. 이러한 상황에서 수중 음파 통신의 스펙트럼 사용 효율을 높이기 위해 육상의 인지 네트워크 기술을 적용하여 유휴한 스펙트럼을 찾으려고 해도 음파 대역의 채널 계획이 없어 그 효율성이 현저히 떨어질 수 있다.

본 논문에서는 수중 음파 대역의 채널 계획을 설정하기 위해 필요한 주파수 별 채널대역폭 설정에 관해 연구하였다. 보다 구체적으로, 상용 수중 음파 통신 시스템들의 주파수와 채널대역폭 규격을 이용하여 주파수와 채널대역폭의 수식적 관계를 도출하였다. 주파수와 채널대역폭의 산점도 분석을 통해 선형관계가 있음을 확인하여, 주파수가 설명변수, 채널대역폭이 종속변수인 회귀모델로 최소자승법 기반 단순선형회귀 분석을 수행하였다.

그 결과로, 주파수와 채널대역폭은 강한 양의 선형 관계가 있음을 확인하였고, 잔차분석을 통해 오차항의 등분산성과 정규성 가설을 검정하였으며, 회귀식의 기울기의 유의성 검정을 통해 채널대역폭이 주파수에 유의함을 확인하였다. 또한, 결정계수가 85.7%가 나

와 주파수가 채널대역폭을 잘 설명할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로, 주파수에 따른 채널대역폭을 추정할 수 있는 회귀식과 채널대역폭의 신뢰구간과 예측구간을 도출하였다.

도출된 회귀식, 신뢰구간, 예측구간은 수중 음파 대역의 채널 계획을 설계할 때, 주파수에 따른 채널대역폭을 설정하는데 활용될 수 있다. 또한, 수중 무선 인지 네트워크에서 사용 가능한 주파수를 효과적으로 센싱할 때도 활용될 수 있다.

본 논문은 수중 인지 네트워크를 적용하기 위한 채널 계획 설계 중에서 채널대역폭 설정에 관한 것이다. 후속 연구에는 수중 음파 채널 계획을 보다 상세하게 설계한다. 또한, 채널 공유를 위해 수중의 다양한 자연적, 인위적 간섭원들의 사용대역 분석과 이를 회피하여 채널을 공유하는 방법을 개발할 예정이다.

References

- [1] M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenge," *Mar. Technol. Soc. J.*, vol. 42, no. 1, pp. 103-116, Mar. 2008.
- [2] C. Yun and Y. K. Lim, "GSR-TDMA: A geometric spatial reuse-time division multiple access MAC protocol for multihop underwater acoustic sensor networks," *J. Sensors*, pp. 1-14, 2016.
- [3] M. Murad, A. Sheikh, M. Manzoor, E. Felemban, and S. Qaisar, "A survey on current underwater acoustic sensor network application," *Int. J. Comput. Theory Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 51-56, Feb. 2015.
- [4] Z. Jiang, "Underwater acoustic networks-issues and solutions," *Int. J. Intell. Control and Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 152-161, 2008.
- [5] C. Yun, J. Park, and S. Choi, "Backhaul resource allocation protocol for underwater cellular communication networks," *J. KICS*, vol. 42, no. 2, pp. 395-402, 2017.
- [6] J. Hildebrand, "Sources of anthropogenic sound in the marine environment," in *Report to the Policy on Sound and Marine Mammals: An Int. Wkshps.*, London, UK, 2004.
- [7] Y. Luo, L. Pu, M. Zuba, Z. Peng, and J. Cui,

“Challenges and opportunities of underwater cognitive acoustic networks,” *IEEE Trans. Emerging Topics in Comput.*, vol. 2, no. 2, pp. 198-211, Mar. 2014.

[8] G. Joshi, S. Nam, and S. Kim, “Cognitive radio wireless sensor networks: applications, challenges and research trends,” *Sensors*, vol. 13, no. 9, pp. 111197-11228, Sep. 2013.

[9] Y. Luo, L. Pu, M. Zuba, Z. Peng, and J. Cui, “Challenges and opportunities of underwater cognitive acoustic networks,” *IEEE Trans. Emerging Topics in Comput.*, vol. 2, no. 2, pp. 198-211, 2014.

[10] Y. Luo, L. Pu, H. Mo, Y. Zhu, Z. Peng, and J. Cui, “Receiver-initiated spectrum management for underwater cognitive acoustic network,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 1, pp. 198-212, 2017.

[11] X. Li, Y. Sun, Y. Guo, X. Fu, and M. Pan, “Dolphins first: Dolphin-aware communications in multi-hop underwater cognitive acoustic networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 4, pp. 2043-2056, 2016.

[12] Y. Luo, L. Pu, Z. Peng, and J. Cui, “Dynamic control channel MAC for underwater cognitive acoustic networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, CA, US, 2016.

[13] ITU-R, *Radio Regulations*, Retrieved Sep. 1, 2020, from <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR>

[14] M. Zia, J. Poncela, and P. Otero, “State of the art underwater acoustic communication modems: Classifications, analyses and design challenges,” *Wireless Pers. Commun.*, May 2020.

[15] S. Pak and T. Oh, “Correlation and simple linear regression,” *J. Vet. Clin.*, vol. 27, no. 3, pp. 427-434, 2010.

[16] X. Yan and X. G. Su, *Linear Regression Analysis-Theory and Computing*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2009.

[17] M. H. Kunter, C. J. Nachtsheim, J. Neter, and W. Li, *Applied Linear Statistical Models*, 5th Ed., McGraw-Hill, New York, 2005.

[18] C. G. Park, “Distinction of an outlier(s) using

difference based regression models,” *J. Korean Data & Inf. Sci. Soc.*, vol. 29, no. 2, pp. 339-350, 2018.

윤창호 (Changho Yun)



1999년 2월 : 창원대학교 전자공학과 공학사
 2004년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 공학석사
 2007년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 공학박사
 2007년~2008년 : North Carolina State Univ. 박사후연구원

2008년~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원
 2009년 3월~2015년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 겸임교원(부교수)
 2015년 3월~2018년 : 과학기술연합대학원대학교 해양시스템공학과 겸임교원(부교수)
 <관심분야> 해상 및 수중 네트워크 개발
 [ORCID:0000-0002-9495-1282]

최수한 (Suhan Choi)



1994년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 공학사
 1996년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 공학석사
 2006년 8월 : Univ. of Michigan, Ann Arbor 공학박사
 1996년 2월~1996년 12월 : 삼성종합기술원 주임연구원

1997년 1월~2010년 8월 : 삼성전자 책임연구원
 2010년 9월~2016년 8월 : 단국대학교 모바일시스템공학과 조교수
 2016년 9월~현재 : 단국대학교 모바일시스템공학과 부교수
 <관심분야> 통신이론, 정보이론, 무선통신, 이동통신시스템, 해상 및 수중 네트워크
 [ORCID:0000-0002-6588-2986]