

## 전달선로행렬 모델링에 의한 수중물체의 이동 시뮬레이션 방법에 대한 연구

박규철\* · 윤종락

### Underwater Moving Target Simulation by Transmission Line Matrix Modeling Approach

Kyu-Chil Park\* · Jong Rak Yoon

Department of Information and Communications Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

#### 요 약

시간영역 해석 기법의 하나인 전달선로행렬 모델링을 이용하여 수중물체 이동시 나타나는 도플러 효과를 구현하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 수중물체가 이동하는 상황을 고려하기 위해 입력 신호의 위치를 수중물체의 이동속도에 맞추어 매 시각마다 신호를 입력한 결과, 최대 2.47%의 아주 작은 오차 범위에서 도플러 효과를 얻을 수 있었다. 또한, 수중물체의 이동 속도를 조절하기 위해 입력 신호의 입력 속도를 조절하는 것에 의해 이론치와 비교하여 최대 0.63% 이내의 오차를 가지는 신뢰할 수 있는 수치 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

#### ABSTRACT

We do research on the simulation of Doppler effect from a target's moving under the sea by Transmission Line Matrix modeling which is one of numerical methods on time domain. To implement the effect, the input signal was entered at a moving node according to a moving target's moving speed. The result had maximum 2.47% error compared with the theoretical value. And from simulation results with speed control of a moving target, we could also obtain resonable results within 0.63% error range.

**키워드** : 전달선로행렬 모델링, 도플러 효과, 이동체, 업/다운 샘플링

**Key word** : Transmission Line Matrix Modeling, Doppler effect, moving target, up & down sampling

접수일자 : 2013. 07. 16 심사완료일자 : 2013. 07. 23 게재확정일자 : 2013. 08. 02

\* **Corresponding Author** Kyu-Chil Park(E-mail:kcpark@pknu.ac.kr, Tel:+82-51-629-6237)

Department of Information and Communications Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.8.1777>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

음파를 이용한 수중에서의 음파 전달 경로는 수중의 수직 온도 분포에 따른 음속 변화, 해저 및 수면에서 반사, 시변해양환경변화 등에 의해 특징적인 전달 경로를 나타낸다[1-3]. 송신기 및 수신기가 고정되어 있고, 수중 환경에 커다란 변화가 없는 경우, 수중음향통신을 하는 데 큰 문제가 없으나 무인 수중 잠수정, 자율 수중 잠수정과 같이 송신기가 고정되어 있지 않은 경우 모션과의 통신 및 제어를 위해 수중음향통신채널의 변화를 추정하는 것이 필수적이다. 이에 수중물체가 이동하는 상황을 고려한 시변 상황을 시간영역 해석 기법의 하나인 전달선로행렬 모델링(Transmission Line Matrix modeling, TLM modeling)[4-6]에 의해 구현하고자 하였다. TLM 모델링에 의한 물체의 이동에 관한 연구로는 논문[4]의 수신기의 위치를 이동하는 방법과 논문[5]에 흐름이 있는 필드에서의 계산 등이 보고되어 있다. 본 연구에서는 송신기의 위치를 이동시키는 방법으로 시도하였으며, 수치 시뮬레이션 결과와 이론치와의 비교를 통해 수중물체의 이동시의 음파 전달 모델링의 가능성을 살펴보았다.

## II. 전달선로행렬 모델링

수중물체의 모델링에 앞서 전달선로행렬 모델링에 대해 간략하게 설명하고자 한다. Huygens 원리에 바탕을 두고 있는 TLM 모델링은 파의 산란을 이용한 시간영역 해석기법으로, 해석하고자 하는 대상을 L-C로 구성된 2차원 기본 요소로 분할하고, 이 기본 요소의 회로 방정식과 파동방정식을 대응시켜 해석하는 방법이다. 그림 1은 해석 대상을 길이  $\Delta l$ 의 요소로 분할한 예를 나타낸 것이고, 그림 2는 2차원 기본 요소를 나타낸 것이다.

음압에 대한 파동 방정식 및 그림 2의 전압에 대한 회로 방정식은 각각 다음과 같이 주어진다[5-7].

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 2LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{\rho}{\kappa} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2)$$

여기서,  $p$ ,  $\rho$ ,  $\kappa$ ,  $V$ 는 각각 음압, 매질밀도, 체적탄성률, 전압을 나타낸다. 또한, 식 (1)~(2)로부터 전기계와 음향계의 대응 관계 및 매질의 전파속도는

$$p \equiv V, \quad u_x \equiv I_x, \quad u_y \equiv I_y \quad (3)$$

$$\rho \equiv L, \quad 1/\kappa = 2C \quad (4)$$

$$c = \sqrt{\kappa/\rho} = 1/\sqrt{2LC} = 1/\sqrt{2} c_0$$

로 주어진다. 여기서,  $c_0$ 는 자유공간에서의 매질의 전파속도에 해당된다. 이와 같은 관계를 이용하여 파동의 전달 문제를 전기적 등가회로로 변환해서 해석할 수 있게 된다.

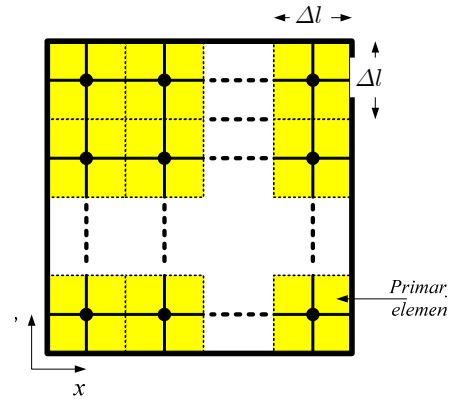


그림 1. 해석 대상의 요소 분할  
Fig. 1 Primary element for an object

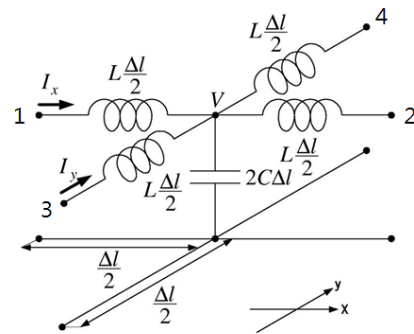


그림 2. 2차원 기본 요소  
Fig. 2 Two-dimensional primary element

다음으로 파의 전파 및 반사에 대해 알아보면, 그림 2의 회로로 구성된 모델에서 각 선분에 입력된 파는 임피던스의 차이에 의해 전파 및 반사가 일어나는 데에 필요한 것이 반사계수의 계산이다. 기본 요소의 특성 임피던스를  $Z$ 라 하면, 각 선분의 입력 임피던스는  $Z$ 이고, 출력 임피던스는 나머지 세 선분의 병렬연결이므로  $Z/3$ 이 되어 반사계수는 다음과 같이 주어진다.

$$s = \frac{Z/3 - Z}{Z/3 + Z} = -\frac{1}{2} \quad (5)$$

이로 부터 파의 전파 및 반사에 대한 산란 알고리즘은 다음과 같이 주어진다[5-7].

$${}_k V = \sum_{m=1}^4 (1+s) {}_k P^m = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^4 {}_k P^m \quad (6)$$

$${}_{k+1} S^n = {}_k V - {}_k P^n \equiv \frac{1}{2} \sum_{m=1}^4 {}_k P^m - {}_k P^n \quad (7)$$

여기서  ${}_k V$ 는 시각  $k$ 에서의 절점의 전압,  ${}_k P^n$ 은 시각  $k$ 에서 선분  $n$ 에서의 입력 펄스,  ${}_{k+1} S^n$ 은 시각  $k+1$ 에서의 선분  $n$ 으로의 반사 펄스에 해당된다. 즉, 임의의 시각  $k$ 에서 임의의 절점으로 입력된 펄스  $P$ 는 다음 시각  $k+1$ 에서의 반사파  $S$ 의 계산에 사용되며, 이 반사파는 각 인접 요소의 입력 펄스로 사용된다. 그 과정을 그림 3에 나타내었고, 해석하고자 하는 영역의 모든 요소에서 이러한 과정을 반복하면 음파의 전달 시뮬레이션이 가능하게 된다[5-7].

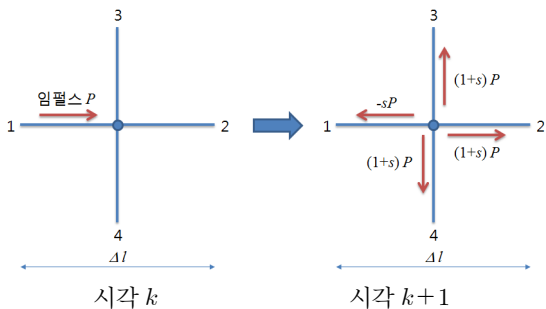


그림 3. 기본 요소에서의 파의 산란  
Fig. 3 Impulse scattering at the element node

### III. 수치 시뮬레이션 및 고찰

#### 3.1. 수중물체의 이동이 없는 경우

전달선로행렬 모델링의 경우, 기본 요소의 길이  $\Delta l$ 로 분할되어 있는 이산 시스템이므로, 시간 스텝  $\Delta t$ 도 이 기본 요소에 맞추어 진행하게 된다. 먼저 이동이 없는 상태에서 전파 성능을 평가하기 위하여 그림 4와 같은 계산 모델을 도입하였다. 가로 및 세로의 크기는 각각  $1100\Delta l \times 3\Delta l$ 이고, 좌우경계에서는 반사가 전혀 없고, 상하경계에서는 전반사인 준1차원(pseudo one dimensional) 무한공간으로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

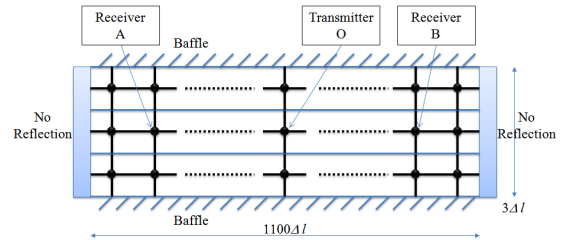


그림 4. 해석 모델  
Fig. 4 A simulation model

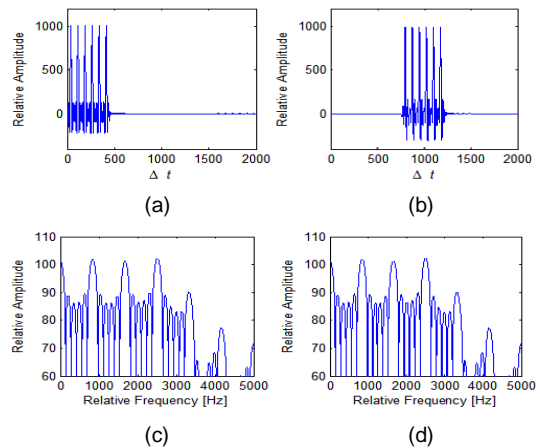


그림 5. 수중물체의 이동이 없는 경우의 송수신 신호  
Fig. 5 Transmitted and received signal when a vehicle is not moving under the sea

송신기 O의 위치는 계산 영역의 정중간인 (550, 2)에 위치해 있으며, 수신기의 위치는 O로부터 동일한 거

리(540 Δl)만큼 좌우로 떨어져 있는 A, B 두 곳으로 하였다. 수신기 A, B가 송신기 O로부터 동일한 거리만큼 떨어져 있어 동일한 신호가 수신될 것으로 예상되므로 수신기 A에서 수신한 신호와 그 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. 수신 신호 (b)는 약 760 Δl(= 540 × √2)만큼의 시간 지연이 있으며 음파 전파 과정에서 시간 신호에서는 약간의 왜곡이 발생하였지만 송신 신호와 매우 유사한 신호의 스펙트럼을 가지고 있으므로 음파 전달 시 물레이션이 제대로 진행되었음을 알 수 있다.

3.2. 수중물체의 이동이 있는 경우

다음으로 수중 물체의 이동을 시뮬레이션하는 방법에 대해 설명하고자 한다. 수중 물체가 이동하면서 신호를 전송하게 되면 도플러 현상이 발생하게 되고, 이는 수신측에서의 반송 주파수의 변동을 일으키게 된다. 그림 6에 나타낸 것과 같이 매질의 전송 속도가 v 인 환경에서 수중물체가 속도 vs 로 진행하게 되면 그 주파수 변이는 다음 식과 같이 주어진다[4, 8-9].

$$f_{go} = \frac{v}{v + v_s} f_0 \tag{8}$$

$$f_{come} = \frac{v}{v - v_s} f_0 \tag{9}$$

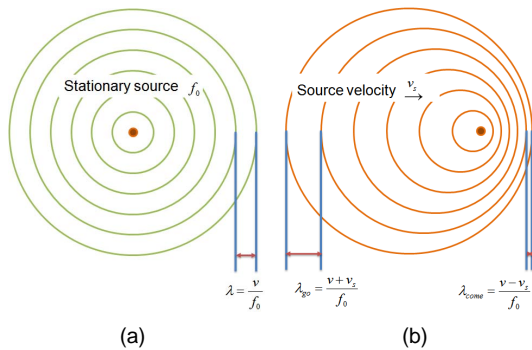


그림 6. 도플러 현상  
Fig. 6 Doppler effect

여기서 f0는 송신 신호의 주파수, fcome 과 fgo는 각각 물체가 수신기 쪽으로 다가오는 경우와 수신기로부터 멀어지는 경우를 나타낸다.

TLM 모델링에서 이러한 도플러 현상을 구현하기 위

하여 송신기 O를 A의 위치로 이동하는 것을 모의하였다. 수신기 A의 위치에서는 수중물체가 다가오는 방향이므로 주파수가 높아지게 되고, B의 위치에서는 그 반대 방향이므로 주파수가 낮아지게 될 것이다.

먼저 이산 시스템인 관계로 매 Δt 마다 Δl로 이동하는 것으로 하였고, 이동에 의한 불연속점 문제를 보상하기 위해 차단주파수 0.2π의 저역통과필터를 통과시켰다. 그림 7의 (a), (b)에 시간 신호와 (c), (d)에 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 예상한 대로 수신기 A에서의 시간 신호의 시간폭이 그림 3(a)에 비해 좁아져 있음을 알 수 있고, 그 주파수(c) 성분은 원 신호의 주파수보다 높아져 있음을 알 수 있다. 또한, 수신기 B의 신호는 A의 신호와 정반대의 특성을 보이고 있다. 식 (8)~(9)에 의한 이론치와 비교를 표 1에 나타내었는데 오차가 최대 2.47%로 매우 낮다는 것을 알 수 있고, 입력 신호의 위치를 바꾸며 신호를 입력하는 시도가 도플러 효과를 일으키기에 충분한 방법임을 알 수 있다.

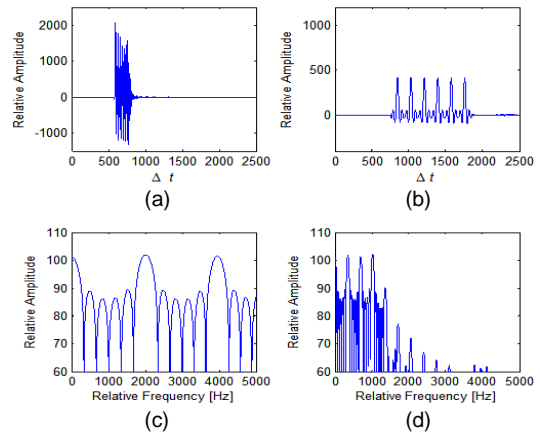


그림 7. 송수신 신호 (Δvs = Δl)

Fig. 7 Transmitted and received signal when a vehicle is moving under the sea (Δvs = Δl)

표 1. TLM 모델링 결과와 이론치 비교(Δvs = Δl)

Table. 1 Comparison with results from TLM modeling and theoretical value at Δvs = Δl

위 치	A		B	
	1st	2nd	1st	2nd
중심 주파수	1st	2nd	1st	2nd
TLM (Hz)	2,010	3,956	347	694
이론치 (Hz)	2,023	4,056	347	696
오차 (%)	0.67%	2.47%	0.03%	0.27%

다음으로 수중 이동체의 속도를 조절하는 것을 고려하고자 한다. 그림 7의 결과로 주어진 매 시간 스텝  $\Delta t$  마다  $\Delta l$ 로 송신기를 이동시키는 것은 실제 환경에서는 비행기가 초음속으로 비행하는 것과 같은 효과를 나타내므로 실제 수중물체의 이동과는 거리가 있다. 이에 수중 물체의 이동을 시간 스텝  $\Delta t$  보다 늦게 하는 것을 고려하고자 한다. 이산 시스템이므로 기본 요소의 절점에만 송신 신호의 값을 대입해야 하고, 인접한 두 절점의 중간 위치에서 신호를 대입하는 것은 불가능하므로 시간 스텝  $\Delta t$ 와 기본 요소 크기  $\Delta l$ 의 관계를 고려하여야 한다. 속도를 2배, 4배 늦추기 위해 시간 스텝  $2\Delta t$ ,  $4\Delta t$  마다  $1\Delta l$  진행하는 것으로 신호 입력에 변화를 주기 위해 표 2와 같은 것을 고안하였다. 여기서  $n$ ,  $k$ 는 각각 송신기의 위치, 이산 시각에 해당된다.

표 2. 송신기의 이동속도 조절

Table. 2 Regulation of a transmitter's moving speed

$\Delta v_s/\Delta l$	$n$	$n+1$	$n+2$	입력된 신호
1	$k$	a		a
	$k+1$		b	b
	$k+2$			c
2	$k$	a		a
	$k+1$	0		0
	$k+2$		b	b
	$k+3$		0	0
4	$k+4$		c	c
	$k$	a		a
	$k+1$	0		0
	$k+2$	0		0
	$k+3$	0		0
	$k+4$		b	b
	$k+5$		0	0
	$k+6$		0	0
$k+7$		0	0	
$k+8$			c	c

표 2에서 송신 신호가  $\{a, b, c\}$ 이고,  $\Delta v_s/\Delta l = 1$ 인 경우, 송신기의 위치가 1증가할 때 마다 신호가 입력되므로 입력 신호는 송신 신호와 동일한 간격, 동일한 신호로 주어지게 된다.  $\Delta v_s/\Delta l = 1/4$ 인 경우, 송신기의 위치가 1/4씩 증가할 때 마다 신호가 입력되어야 하지만, 이산 시스템인 관계로 신호의 입력은 항상 절점에서 이루어져야 한다. 절점  $n$ 의 다음 절점은  $n+1$ 이므로 정수배가 되는  $4\Delta t$ 가 되는 시점에 입력이 되어야

하므로  $\{a, 0, 0, 0, b, 0, 0, 0, c\}$ 인 신호를 입력한 것이 되고, 주파수 측면에서 보면 원래 신호를 4배 업 샘플링(up sampling)[10]된 것과 같다. 주파수 분석할 때는 반대로 4배 다운 샘플링(down sampling)을 하여야 주파수의 간격이 원 신호의 주파수 간격과 같아지게 된다.

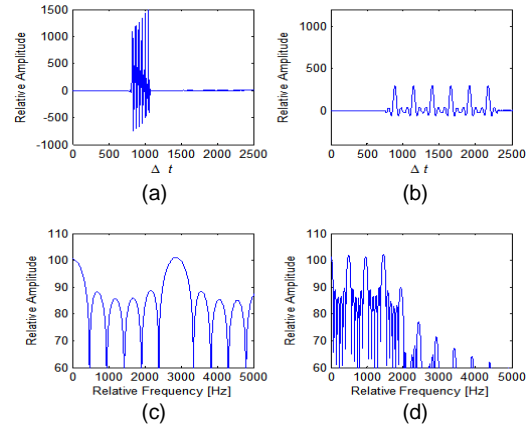


그림 8. 송수신 신호 ( $\Delta v_s = \Delta l/2$ )

Fig. 8 Transmitted and received signal when a vehicle is moving under the sea ( $\Delta v_s = \Delta l/2$ )

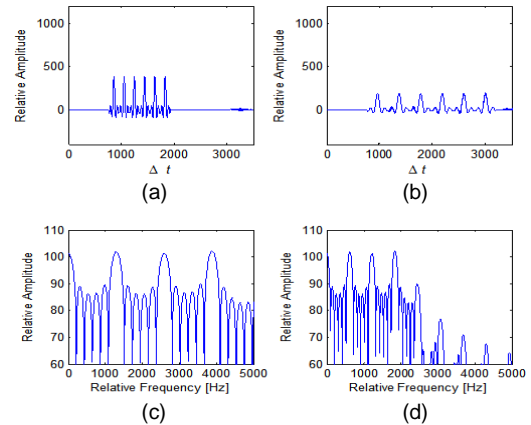


그림 9. 송수신 신호 ( $\Delta v_s = \Delta l/4$ )

Fig. 9 Transmitted and received signal when a vehicle is moving under the sea ( $\Delta v_s = \Delta l/4$ )

이러한 구현 방법을 바탕으로  $\Delta v_s/\Delta l = 1/2, 1/4$ 인 수치 시뮬레이션 결과를 그림 8과 9에 각각 나타내었다. 각각의 그림에서 (a)와 (b)는 각각 위치 A, B에서의 수신 신호, (c)와 (d)는 각각 주파수 스펙트럼에 해당

한다. 표 3과 4에 이론치와 비교한 결과를 나타내었으며 전체적으로 오차가 0.63% 이내로 거의 차이가 없음을 알 수 있고, 이러한 구현 방법이 수중물체의 이동 속도를 제어할 수 있고, 도플러 효과를 얻기에 충분하다는 것을 알 수 있다.

표 3. TLM 모델링 결과와 이론치 비교( $\Delta v_s = \Delta l/2$ )

Table. 3 Comparison with results from TLM modeling and theoretical value at  $\Delta v_s = \Delta l/2$

위 치	A		B	
	1st	2nd	1st	2nd
중심주파수				
TLM (Hz)	2,860	5,772	491	982
이론치 (Hz)	2,861	5,736	491	984
오차 (%)	0.04%	0.63%	0.00%	0.25%

표 4. TLM 모델링 결과와 이론치 비교( $\Delta v_s = \Delta l/4$ )

Table. 4 Comparison with results from TLM modeling and theoretical value at  $\Delta v_s = \Delta l/4$

위 치	A		B	
	1st	2nd	1st	2nd
중심주파수				
TLM (Hz)	1,296	2,592	619	1238
이론치 (Hz)	1,296	2,599	619	1241
오차 (%)	0.01%	0.25%	0.05%	0.26%

#### IV. 결 론

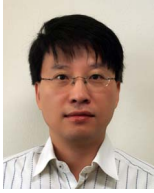
수중물체가 이동하는 상황을 고려한 시변 상황을 TLM 모델링에 의해 구현하고자 입력 신호의 위치를 움직여 가며 매 시각마다 신호를 입력한 결과, 아주 작은 오차 범위에서 도플러 효과를 얻을 수 있었다. 또한, 수중물체의 이동 속도를 조절하기 위해 디지털신호처리 기술인 업/다운 샘플링을 통해  $\Delta v_s/\Delta l = 1/2, 1/4$ 인 경우에 대한 수치 시뮬레이션을 행한 결과, 이론치와 비교하여 0.63% 이내로 거의 오차가 없는 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 구현한 방법이 수중물체의 이동 속도에 의한 도플러 효과를 얻기에 충분하다는 것을 알 수 있었으며, 수중물체의 이동을 동반하는 수중 음파전달 시뮬레이션 응용에도 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (C-D-2010-0294)

#### REFERENCES

- [ 1 ] J. H. Park, K. H. Park and J. R. Yoon, "Underwater Acoustic Communication Channel Simulator for Flat Fading," *Jpn. J. of Appl. Phys.*, vol. 49, pp. 07HG10, 2010.
- [ 2 ] K. V. Mackenzie, "Nine-term Equation for Sound Speed in the Ocean," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 70, no. 3, pp. 807-812, 1981.
- [ 3 ] George V. Frisk, *Ocean and Seabed Acoustics : A Theory of Wave Propagation*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1994.
- [ 4 ] Mansour Ahmadian, "Transmission Line Matrix (TLM) Modelling of Medical Ultrasound," Ph. D. dissertation, The University of Edinburgh, 2001. Matthew
- [ 5 ] Y. Kagawa, T. Hara, T. Tsuchiya, N. Wakatsuki and T. Tsuji, "Simulation of the Sound Wave Propagation in Velocity Varying Environment Based on Discrete Huygens' Model," *16th IMACS World Congress*, pp.1-6, 2000.
- [ 6 ] N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, 2nd ed., CRC Express, New York, 2001.
- [ 7 ] B. Fujii, "Sound propagation simulation using transmission line matrix model," Master's Thesis, Okayama University, 1994 [In Japanese].
- [ 8 ] J. R. Yoon, J. H. Park and Daniel Rouseff, "Bit Error Rate due to Moving Transmitter in Passive Time Reversal Underwater Acoustic Communication," *Jpn. J. of Appl. Phys.*, vol. 45, pp. 4862-4864, 2006.
- [ 9 ] Wikipedia. Doppler Effect [Internet]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect).
- [10] Robert J. Schilling and Sandra L. Harris, *Fundamentals of Digital Signal Processing using MATLAB*, Tomson Learning, New York, 2004.



**박규철(Kyu-Chil Park)**

2000년 오카야마대학 자연과학연구과 박사  
2002년 ~ 현재 부경대학교 정보통신공학과 교수  
※ 관심분야 : 음향정보처리, 역문제, 컴퓨터수치시뮬레이션



**윤종락(Jong Rak Yoon)**

1990년 플로리다 어틀랜틱대학교 박사  
1990년 ~ 현재 부경대학교 정보통신공학과 교수  
※ 관심분야 : 수중음향, 수중음향통신, 음향신호처리