

# 입수 충격 수중 순간 소음에 대한 실험적 연구

## Experimental Study on Underwater Transient Noise Generated by Water-Entry Impact

정영철, 성우제<sup>†</sup>, 이근화\*, 김형록\*\*

(Youngcheol Jung, Woojae Seong<sup>†</sup>, Keunhwa Lee\*, and Hyoungrok Kim\*\*)

서울대학교 조선해양공학과, \*서울대학교 해양시스템공학연구소, \*\*국방과학연구소 제6기술연구본부  
(접수일자: 2013년 7월 3일; 수정일자: 2013년 8월 19일; 채택일자: 2013년 8월 28일)

**초 록:** 본 연구에서는 입수 충격에 의한 수중 순간 소음을 연구하기 위해, 황해에서 발사대를 이용하여 해상 실험을 진행하였다. 해상시험선인 청해호 우현상에서 발사대를 이용하여 실린더 물체를 수직으로 발사하였으며, 이때 발생하는 소음을 하이드로폰으로 측정하였다. 실험에서는 원통형, 원뿔형, 반구형 두부 형상을 가진 3가지 종류의 실린더 물체가 사용되었다. 측정된 신호는 시간적으로 확연하게 구분되어 3단계로 전시되었다: (1) 초기 충돌 및 물체 진동 단계, (2) 개방 공동 유동 단계, (3) 공동 붕괴 및 거품 진동 단계. 대부분의 경우, 거품 진동 단계의 파형이 초기 충돌 및 물체 진동 단계에 비해 우세하게 나타났다. 공동이 붕괴되기 시작하는 핀치 오프 시간은 0.18 ~ 0.2 s에 발생하였으며, 평균 거품 지속 시간은 0.9 ~ 1.3 s로 지속되었다. 입수 충격 소음은 100 Hz 이하의 대역에서 에너지가 집중되어 있었으며, 생성되는 소음은 두부 형상, 물체 질량, 발사 속도에 의해 영향을 받았다. 결과적으로, 거품 주파수에서 에너지 스펙트럼 밀도의 크기는 원통형, 원뿔형, 반구형 순으로 나타났으며, 동일 입수체에 대해서는 초기 에너지가 클수록 거품 주파수에서 에너지 스펙트럼 밀도가 크게 나타났다. 최종적으로, 버블이 폭발하는 물리적 현상을 기반으로 모의된 신호와 계측 값간 비교 결과 만족스러운 결론을 얻을 수 있었다.

**핵심용어:** 잠수함, 수동소나, 입수, 충격 소음, 순간 소음, 천이 소음

**ABSTRACT:** To study the water-entry impact noise, on-board experiment using a small launcher firing various objects was performed in the Yellow Sea. As the launcher fires a cylindrical object from the ship vertically, generated noise is measured with a hydrophone on the starboard of Chung-hae, Marine surveyor. Three types of cylindrical objects, which have noses of flat-faced, conical, and hemisphere, were used during the experiment. The measured noise exhibits a time-dependency which can be divided into three phases: (1) initial impact phase, (2) open cavity flow phase, (3) cavity collapse and bubble oscillation phase. In most cases, the waveform of bubble oscillation phase is dominant rather than that of initial impact phase. Pinch-off time, where a cavity begins to collapse, occurs at 0.18 ~ 0.2 second and the average lasting time of bubble was 0.9 ~ 1.3 second. The energy of water-entry impact noise is focused in the frequency region lower than 100 Hz, and the generated noise is influenced by the nose shapes, object mass, and launching velocity. As a result, energy spectral density on the bubble frequency is higher in the order of flat-faced, conical, hemisphere nose, and the increase of initial energy raises the energy spectral density on the bubble frequency in the cylinder body of same shape. Finally, we compare the measurements with the simulated signals and spectrum based on the bubble explosion physics, and obtain satisfactory agreements between them.

**Keywords:** Submarine, Passive sonar, Water-entry, Impact noise, Transient noise, Intermittent noise

**PACS numbers:** 43.30.Nb, 43.30.Zk

<sup>†</sup>Corresponding author: Woojae Seong (wseong@snu.ac.kr)  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Building 34, Room 306, Seoul National University, 1, Gwanak-Ro,  
Gwanak-Gu, Seoul 151-744, Republic of Korea  
(Tel: 82-2-880-8359, Fax: 82-2-888-9298)

“이 논문은 2013년 한국음향학회 춘계학술대회에 투고했던 논문입니다.”

# 1. 서론

## 1.1 개요 및 연구 현황

순간 소음은 일시적이고 불규칙하게 발생하는 혹은 빈번하면서도 규칙적으로 발생하는 신호로 정의될 수 있다.<sup>[1]</sup> 순간 소음은 지속시간이 매우 짧으며, 최대값으로 급격하게 증가하였다가 감소하는 경향을 보인다. Urlick<sup>[1]</sup>은 순간 소음을 크게 생물학적 소음과 비생물학적 소음으로 나눈 바 있다. 생물학적 소음은 고래류, 민어, 딱총새우 등으로 생물간의 통신, 방어, 위치이동의 수단으로 사용된다. 비생물학적 소음은 비, 지진, 화산 폭발, 파도 등과 같은 자연적 발생 소음과 어뢰, 기뢰 등 수중무기 발사, 어뢰 충수, 잠수함 해치 여닫음, 소노부이 입수 충격 등과 같은 군사적 발생 소음으로 구분된다. 본 연구에서는 비생물학적 소음 중 소노부이의 입수 충격 시 발생하는 수중 순간 소음에 대해서 연구하였다(Fig. 1).

소노부이의 입수 충격력은 낙하 속도에 비례하며, 일정 고도 이상에서 낙하시 종단속도(terminal velocity)에 도달한다. 소노부이 상세 제원에 따른 종단속도는 Table 1과 같다.<sup>[2]</sup>

Table 1. Terminal speed of falling ASW sonobuoy with parachute.<sup>[2]</sup>

ASW Sonobuoy	mass (kg)	$C_d \times A$ ( $m^2$ )	$\beta = \frac{mg}{(C_d \times A)}$	terminal velocity (m/s)
AN/SSQ-41B	7.30	0.1273	562.88	29.50
AN/SSQ-53A	10.54	0.1273	812.86	35.45
AN-SSQ-62	17.69	0.2202	788.19	34.91

여기서  $C_d$ 는 항력 계수(drag coefficient), A는 기준 면적(reference area),  $\beta$ 는 탄도 계수(ballistic coefficient),

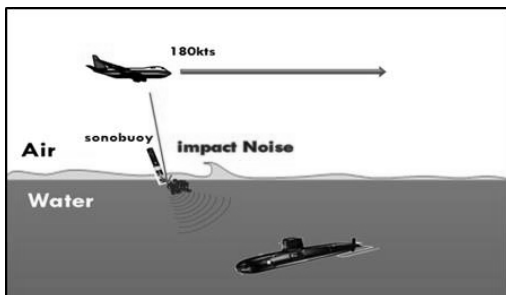


Fig. 1. Example of water-entry impact noise.

$m$ 은 소노부이의 질량,  $g$ 는 중력 가속도이다.

기존의 입수 충격 문제는 크게 초기 충돌 단계에 대한 연구와 입수 이후 공동 생성에 대한 연구로 진행되었다.

초기 충돌 단계에 대한 연구는 입수체의 형태, 입수 각도에 따른 충격력 등 유체역학적 해석에 관한 것이었다. von Karman<sup>[3]</sup>은 수상 항공기의 입수 충격력을 연구하기 위해 2차원의 입수 문제를 뿔기와 하부가 평평한 형태에 대하여 해석 하였으며, 그 후 Wagner,<sup>[4]</sup> Shiffman과 Spencer<sup>[5]</sup>는 자유 표면의 상승 효과를 고려하여 입수 문제를 해석하였다. Chuang<sup>[6]</sup>은 다양한 선저 구배의 각(deadrise angle)을 가진 원뿔의 입수 충격력을 실험적으로 연구하여 식으로 도출하였다.

공동에 대한 연구는 최초로 Worthington<sup>[7]</sup>이 구의 입수 충격에 의한 공동 현상과 물체의 거칠기에 따른 튀김 현상 등을 연구하였으며, 이후에 Richardson,<sup>[8]</sup> May<sup>[9]</sup>는 높은 Froude 수의 입수에 의한 공동 형성 과정을 포텐셜 유동과 항력의 수단으로 연구하였다. Birkhoff 와 Zarantonello<sup>[10]</sup>는 공동의 운동에 대한 연구를 위해 2차원 해석적 모델을 활용하였으며, 최근에는 Glasheen 과 McMahon,<sup>[11]</sup> Duclaux 등<sup>[12]</sup>이 디스크, 구와 실린더를 이용하여, 낮은 Froude 수의 입수에 대한 공동의 형성과 붕괴 현상을 연구하였다.

한편 Uber 등<sup>[13]</sup>은 수조에 수중 청음기를 설치하여 물체의 입수로 나타나는 음향적 특징을 연구를 하였다. 결과에서 나타난 음향적 특징으로 공동에 의한 거품 진동이 우세하게 나타났으며, 관계된 주파수는 물체의 형태, 에너지에 의존한다고 확인하였다. Fox 등,<sup>[14]</sup> Corbett 등<sup>[15]</sup>은 파형의 진폭, 상승시간, 주파수 특성 분석 등을 통해 기뢰(Mk-36, Mk-39)의 입수로 발생하는 주된 음향 신호는 공동의 붕괴에 의한 거품 진동에 기인하는 것으로 확인하였다.

또한 Hoover 등<sup>[16]</sup>은 구의 입수 충격력을 확인하기 위해 수조에 수중 청음기를 설치한 후 수신된 신호를 분석하였다. 연구 결과로 입수 충격 소음이 초기 충돌 및 물체 진동(initial impact and object vibration) 단계, 개방 공동 유동(open cavity flow) 단계, 공동 붕괴 및 거품 진동(cavity collapse and bubble oscillation) 단계로 나타나는 것을 확인하였으며 이론적인 알고리

듬과 비교 분석하였다.

### 1.2 입수 충격 소음의 발생 단계

입수 충격 소음의 발생단계는 3단계로 구분된다.<sup>[16]</sup> 초기 충돌 및 물체 진동 단계에서는 일정 속도로 입수하는 물체와 유체간 순간적인 접촉으로 물체의 초기 운동량과 에너지는 유체로 전달된다. 이때 강제인 입수체의 상하 진동으로 고주파수 대역의 공명 주파수가 발생하고, 입수 충격력은 공명 주파수와 함께 수중에서 충격 파(shock wave)의 형태로 전달된다.<sup>[16-17]</sup> 개방 공동 유동 단계는 입수체가 입수 이후 수중으로 하강할 때 입수체의 후면에서 공동이 생성되는 단계이다. 이때 공동은 대기로부터 닫히며, 공동의 부피는 점차 커지고 길어진다.<sup>[16]</sup> 공동 붕괴 및 거품 진동 단계는 입수 충격 이후 일정 수심에서 최대의 크기에 도달한 공동의 직경이 감소하기 시작하며 거품이 진동하는 단계이다. 여기서 공동 직경의 감소를 공동 붕괴(cavity collapse)라고 하며, 입수 충격 이후 공동이 붕괴하기 시작하는 시간을 핀치 오프 시간(pinch-off time)이라고 한다.<sup>[12, 16]</sup>

본 연구에서는 입수 충격 소음의 단계적 발생에 따른 물리적 현상을 이해하고, 실제 해상 실험을 통해 발생하는 입수충격 소음의 특징을 도출한다. 여기서 입수체는 두부형상, 질량, 발사 속도의 변이에 두었으며, 이에 따른 수중 소음의 변화도 확인한다. 또한 실험 결과를 토대로 입수충격 소음의 알고리즘을 제시하여 유사한 신호를 모의한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 입수 충격 소음 측정을 위한 해상 실험 개요 및 신호 분석 방법을 설명한다. 제3장에서는 해상 실험 결과를 기술하였으며, 제4장에서는 알고리즘 소개 및 시뮬레이션과 실험 결과간 비교/검증을 수행하였다. 제5장에서는 본 논문의 결과 및 토의에 대한 내용이 제시된다.

## II. 입수 충격 소음 해상 실험

### 2.1 실험 환경 및 도구

입수 충격 소음 해상 실험은 2일(총 4시간) 동안 군산 서방 86 NM 해상, 국방과학연구소 청해호에서 진행되었다. 실험 해역 기상은 맑았으며, 풍속계의 계

측결과 1일차 바람 속력은 9.3 m/s로 보퍼트 풍력계급<sup>[18]</sup>(Beaufort wind force scale)에 따라 해상상태 5를 보였고, 2일차 바람 속력은 3.9 m/s로 해상상태 3을 보였다.

본 연구에서는 순간 소음을 발생시키기 위해 알루미늄 재질인 원통형 실린더(직경10 cm×길이 30 cm)형상의 모형 입수체를 제작하였다(Fig. 2). 입수체의 두부 형상은 원뿔형과 반구형으로 제작하여 조립 가능하도록 하였다. 추가로 입수체의 질량 변화를 주기 위해 질량의 가감이 가능한 분리체도 제작하였다(Table 2). 또한 입수체를 일정 높이에 고정시키고 용수철의 힘과 중력의 힘으로 수직 낙하할 수 있도록 철 재질의 고정 발사대(길이 70 cm×직경12 cm)를 제

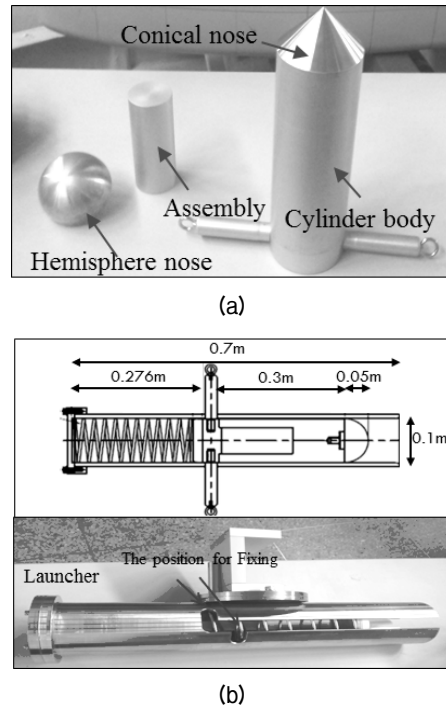


Fig. 2. Experimental apparatus for generating underwater noise of water-entry impact: (a) water-entry body and (b) launcher.

Table 2. Mass of water-entry body with hemisphere, flat-faced, conical noses.

Mass of water-entry body	Hemisphere nose (kg)	Flat-faced nose (kg)	Conical nose (kg)
Water-entry body with assembly	8.8	6.6	7.8
Water-entry body without assembly	7.6	5.4	6.6

작하였다. 발사대 용수철 상수는 71.449 kg/m이며, 변위값은 31 cm, 26 cm의 2개로 조절 가능하다.

2.2 측정 및 분석 방법

입수 충격 소음 측정을 위한 해상 실험은 다음과 같은 방법으로 진행되었다. 발사대는 Fig. 3과 같이 청해호 우현, 수면 상 높이 3.5m에서 설치되었으며, 수중청음기는 수심 3 m에 설치되었다. 여기에 사용된 수중청음기(RESON사, Model TC-4014)는 모든 방향에 대하여 수신감도(receiving sensitivity)가 -185 dB re V/1μPa로 거의 일정한 무지향(omni-directional)으로서 주파수 1 Hz~ 100 kHz에서 편차 2 dB이내의 일정한 수신 감도 특성을 가지고 있다.

실험은 총 10개의 경우에 대해서 5회 반복하였다.

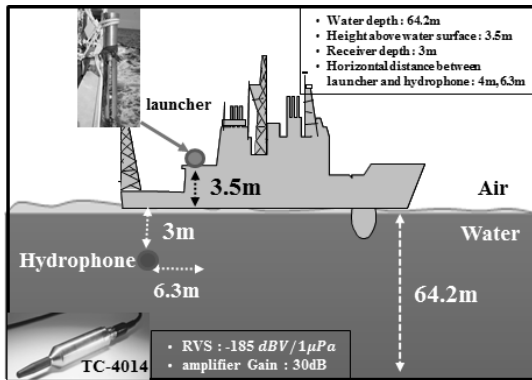


Fig. 3. Experimental geometry for underwater noise measurement of water-entry impact.

발사 단계는 Table 3과 같이 순차적으로 진행되었으며, 입수체가 움직이지 않도록 우현 현측에 고정시키고 수직으로 낙하 할 수 있도록 실험을 진행하였다.

순간 소음은 샘플링 주파수 100 kHz로 각 케이스 별 발생 이전부터 시작하여 10초간 녹음되었다. 녹음하는 동안 청해호에서 방사되는 소음을 줄이기 위하여 주기관 등 선내 잡음원의 가동을 중지하였다. 수신신호는 10 Hz~ 100 kHz의 신호를 일정하게 증폭시켜주는 특성을 가진 증폭기(amplifiers, B&K 2693)를 거쳐 A/D 변환기(NI, PCI-6110)를 이용하여 디지털 신호로 저장되었다.

실험 데이터 처리 시 수신된 시간 영역의 신호를 이용하여 수중 청음기의 수신감도 -185 dB re V/1μPa, 측정용 증폭기의 이득 30 dB 등을 보상하여 시계열 신호를 분석하였으며, 스펙트로그램(spectrogram)은 수중에서 음압 준위 산정 기준인 1 μPa을 기준으로 해닝 창 함수(hanning window), 데이터 개수(nfft)는 1024개, 오버랩(overlap)은 50 %를 이용하여 분석하였다. 또한 시간적으로 지속성이 없는 입수 충격 소음을 분석하기 위해 소음이 발생한 시간부터 소멸 시간까지를 포함한 2s의 데이터로 에너지 스펙트럼 밀도(Energy Spectral Density, ESD)를 분석하였으며, 케이스 별 비교를 위해 평균화 된 값을 사용하였다.

Table 3. Experimental cases of water-entry impact noise on first and second day.

Case	Experimental cases during first day (5 trial in case)	fall velocity (m/s)	distance (m) <sup>1)</sup>	Case	Experimental cases during second day (5 trial in case)	fall velocity (m/s)	distance (m) <sup>1)</sup>
A	Body with conical nose(7.8 kg) / spring firing in the 1 stage(26 cm)	8.3198	6.3	E	Body with hemisphere nose(7.6 kg) / spring firing in the 2 stage(31 cm)	8.3369	6.3
B	Body with conical nose(6.6 kg) / spring firing in the 2 stage(31 cm)	8.3451		F	Body with hemisphere nose(7.6 kg) / spring firing in the 1 stage(26 cm)	8.3208	
C	Body with flat-faced nose(6.6 kg) / spring firing in the 1 stage(26 cm)	8.3266		G	Body with conical nose(7.8 kg) / spring firing in the 2 stage(31 cm)	8.3355	
D	Body with flat-faced nose(5.4 kg) / spring firing in the 2 stage(31 cm)	8.3589		H	Body with conical nose(6.6 kg) / spring firing in the 1 stage(26 cm)	8.3266	
				I	Body with flat-faced nose(6.6 kg) / spring firing in the 2 stage(31 cm)	8.3451	
			J	Body with flat-faced nose(5.4 kg) / spring firing in the 1 stage(26 cm)	8.3363		

<sup>1)</sup>: horizontal distance between hydrophone and launcher.

### III. 실험 결과

#### 3.1 입수 충격 소음 특징 분석 결과

본 절은 해상 실험 결과 중 공통적으로 나타나는 입수 충격 소음의 특징에 대하여 제시한다. Fig. 4(a)는 질량 7.8 kg, 원뿔형 입수체인 케이스 G에 대한 신호 압력 파형이다. 신호의 파형을 자세히 살펴보면 펄스의 길이 약 0.12 ms인 임펄스의 신호가 배경 잡음에 비해 크게 나타나다가 음 (-)의 방향으로 감쇄되었으며, 이후 진폭이 서서히 증가하다가 감소하며, 초기 임펄스 신호에서 약 0.2s 이후 초기 임펄스에 비해 진폭의 크기가 큰 신호가 들어왔다. 이 신호는 초기 음(-)의 방향으로 진폭을 갖고 있었으나, 이어서 양(+)의 방향으로 진폭을 보이며, 진동하는 동시에 약 0.06 s 진폭이 증가하였다가 감쇄하는 경향

을 보였다. 모든 케이스에 대하여 파형을 분석한 결과, 진폭 차이가 다소 불규칙하게 나타났으나 파형에 대한 경향은 일치하였다.

본 실험 결과의 파형은 Huang 등,<sup>[19]</sup> Hoover 등,<sup>[16]</sup> Franz<sup>[20]</sup>의 실험 결과와 유사하게 나타난다. 따라서 입수 충격 소음을 Hoover 등<sup>[16]</sup>이 제시했던 초기 충돌 및 물체 진동 단계와 개방 공동 유동 단계, 거품 진동 단계의 3단계로 나누어 해석할 수 있었으며, 대부분의 경우 거품 진동 단계의 파형이 초기 충돌 및 물체 진동 단계에 비해서 우세하게 나타났다.

Fig. 4(a)에서 보듯이 핀치 오프 시간을 확인하기 위해 초기 충돌 및 물체 진동 단계에서 거품이 발생하기 시작하는 시간까지 확인한 결과 케이스별 다소 차이가 발생하였으나 평균 0.18~0.2s로 나타났다.

Fig. 4(b)는 케이스 G에 대한 스펙트로그램이다. Fig. 4(b)와 같이 초기 충돌 및 물체 진동 단계에서는

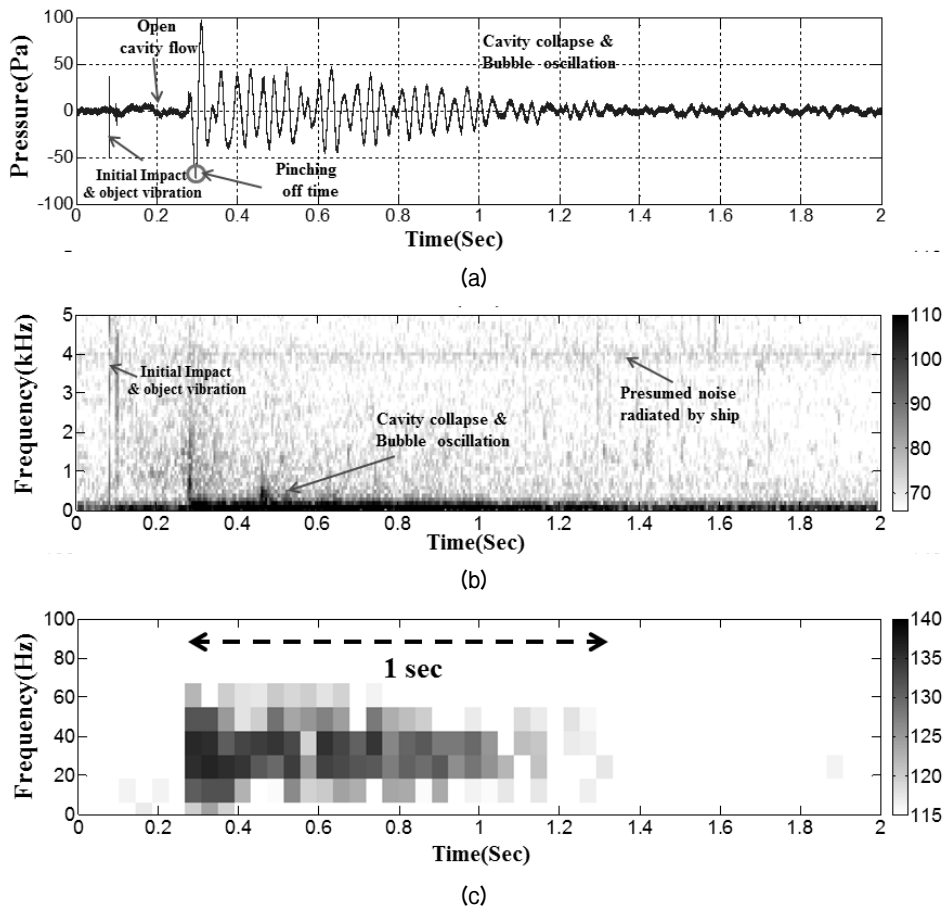


Fig. 4. (a) Original waveform in case G. (b) the spectrogram frequency band from 0 Hz to 5 kHz. (c) the frequency spectrogram for visualization of lasting time of bubble in case G.

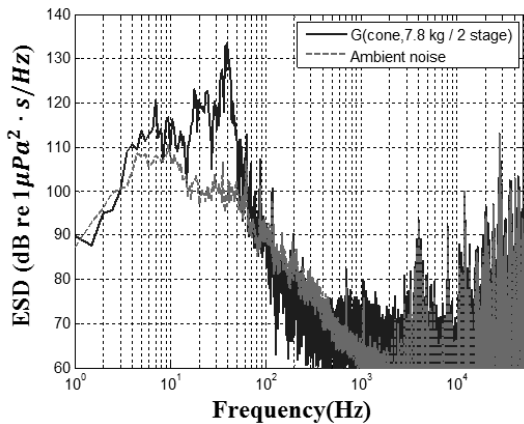


Fig. 5. Energy spectral density comparison between case G and ambient noise.

전 주파수 범위에 걸쳐 임펄스 형태의 신호가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 100 Hz 이하의 저주파수 대역에서 거품 준위 스펙트럼이 우세하게 나타나는 것을 확인하였다. 거품의 지속시간을 확인하기 위해 Fig. 4(c)와 같이 주파수 대역과 준위 값 축을 조정하여 상대적 변화를 확인해 보았다. 스펙트럼 준위는 주파수 20~60 Hz 대역에서 강하게 형성되는 것을 확인하였으며, 케이스에 따라 다소 차이가 있는 등 조건에 따른 선형적인 변화는 확인할 수는 없었으나, 평균 0.9~1.3s 동안 지속되는 것을 확인하였다. 한편 배경소음을 살펴보면 4 kHz 이상의 대역에서 협대역 신호가 지속적으로 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 보조기계류에 의한 선박 방사소음으로 추정된다.

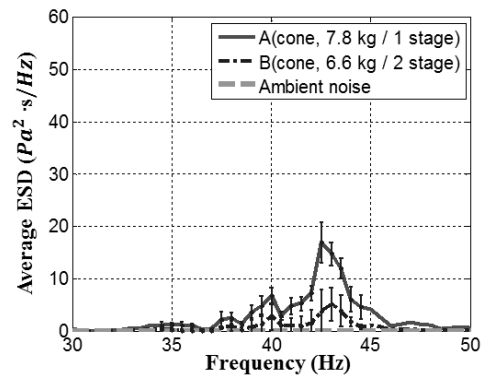
Fig. 5는 케이스 G와 배경소음간 에너지 스펙트럼 밀도에 대한 비교 결과이다. 에너지 스펙트럼을 살펴보면 100 Hz 이하의 저주파수 대역에서 주변소음에 비해 에너지가 높게 형성되어 있다. 반면에 100 Hz 이상의 대역에서는 다소 에너지는 증가하였으나 함정의 보조기계류로 추정되는 주변 소음에 묻혀서 정확한 에너지 크기를 확인할 수 없었다. 여기서 중심 주파수는 41 Hz로 거품 진동에 의한 에너지가 우세하였다.

3.2 두부 형상 및 에너지에 따른 준위의 변화

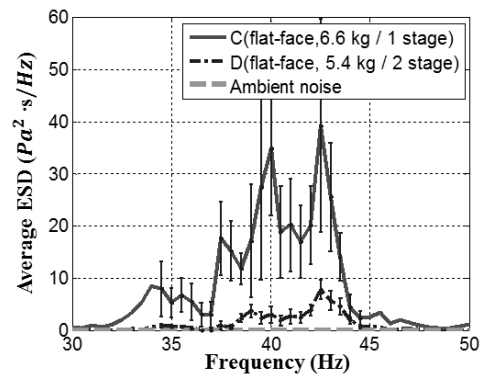
먼저 케이스별 비교를 위해 입수 충격 이전의 위치 에너지(potential energy)와 탄성 에너지(elastic energy)

Table 4. Initial energy which is a sum of potential and elastic energy in all case.

Case	Initial Energy(J)	Case	Initial Energy(J)
A	269.95	F	264.11
B	229.81	G	270.97
C	228.79	H	228.79
D	188.65	I	229.81
E	305.27	J	187.63



(a)



(b)

Fig. 6. Average energy spectral density in frequency band from 30 Hz to 50 Hz during experiment of first day. (a) conical nose. (b) flat-faced nose.

를 합한 모든 케이스에 대한 초기 에너지를 Table 4와 같이 구하였다.

Fig. 5에서 보듯이 주파수 100 Hz 이상의 입수 충격 소음은 배경소음에 묻혀서 정확한 에너지 크기를 확인할 수 없었다. 따라서 에너지가 집중되어 있는 30~50 Hz 대역에서 평균 ESD를 선형 크기로 분석하였다. Fig. 6(a), (b)는 첫째 날 원뿔형, 원통형의 경우에 대한 비교 결과이고, Fig. 7(a), (b), (c)은 둘째 날 반구

형, 원뿔형, 원통형의 경우에 대한 비교 결과이다. 여기서 각 케이스의 평균 ESD에 대한 표준편차(standard deviation)도 나타내었으며, 표준편차는 평균 값과 크게 겹치지 않아 케이스에 대한 비교는 가능하였다.

다음은 두부 형상에 따른 에너지의 크기 비교 결과이다. 첫째 날에는 초기 에너지의 크기가 유사한 원통형의 B가 원뿔형의 C에 비해 중심 주파수의

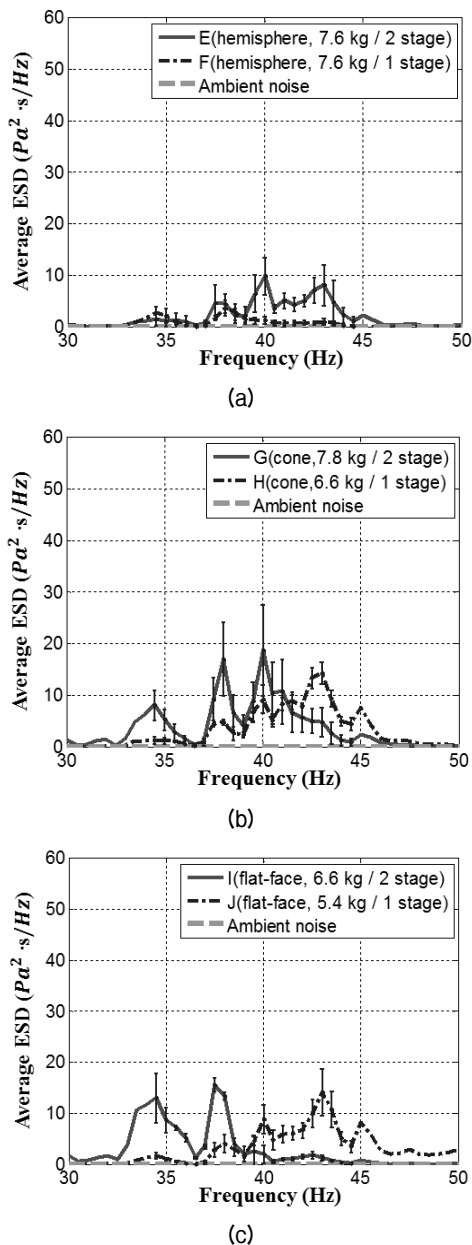


Fig. 7. Average energy spectral density in frequency band from 30 Hz to 50 Hz during experiment of second day. (a) hemisphere nose. (b) conical nose. (c) flat-faced nose.

ESD가 크게 나타났다. 둘째 날에는 원뿔형의 G가 초기 에너지가 크거나 조금 낮은 반구형의 E와 F에 비해 중심 주파수의 ESD가 크게 나타났다. 또한 초기 에너지의 크기가 유사한 원통형의 I가 원뿔형의 H에 비해 중심 주파수의 ESD가 크게 나타났다. 가정 사항으로 해상의 파고가 높을 때 두부 형상이 평평할수록 중심 주파수에서의 ESD는 커지고 표준편차가 크게 나타날 것이다. 그 이유는 평평한 두부 형상의 입수체가 수직으로 입수 시 원뿔형, 반구형에 비해 파고에 의한 충돌이 크므로 이에 따라 변화된 입수 각도와 입수 표면적은 입수 충격력 및 공동 생성에 영향을 주기 때문이다. 첫째 날의 바람은 9.3 m/s이고, 둘째 날의 바람은 3.9 m/s로 첫째 날의 파고가 상대적으로 높았다. 첫째 날 원통형의 C는 둘째 날의 I에 비해 상대적으로 ESD의 크기가 크며, 표준편차가 크게 나타났다. 그러나 첫째 날 원뿔형의 A와 B는 둘째 날 원뿔형의 G와 H에 비해 크게 차이가 나지 않았다.

두 번째로 두부 형상이 동일한 입수체에 대해서 에너지의 크기를 비교하였다. Fig. 6에서 보듯이 실험 첫째 날에는 초기 에너지가 상대적으로 큰 A, C의 경우가 B, D의 경우에 비해 중심 주파수의 평균 ESD가 크게 나타났다. Fig. 7의 둘째 날에서도 초기 에너지가 상대적으로 큰 E, G, I의 경우가 F, H, J의 경우에 비해 중심 주파수의 ESD가 크게 나타났다.

결과적으로 초기 에너지가 유사한 경우 원통형, 원뿔형, 반구형 순으로 중심 주파수에서 ESD의 크기를 보였으며, 두부 형상이 동일한 입수체의 경우 초기 에너지가 상대적 클수록 중심 주파수에서의 ESD가 더 크게 나타났다.

## IV. 입수 충격 소음 모델링

### 4.1 입수 충격 소음 모의신호 생성 알고리즘

본 절에서는 입수 충격 소음의 단계적 물리 현상을 기반으로 모의신호 생성을 위한 알고리즘을 제시한다. 알고리즘은 구 형상의 입수체를 바탕으로 제시하였다. 입수 충격 소음 발생 3단계의 과정 중 초기 충돌 및 물체 진동 단계에서는 Hoover 등<sup>[6]</sup>이 적용한 쌍극자 음원(dipole source) 이론을 적용하였다.

초기 충돌 및 물체 진동 단계에 대한 알고리즘에

서 구가 유체를 통과 할 때 발생하는 충격력  $F_0$ 는 식(1)과 같이 주어지고, 쌍극자 음원의 형태로 식(2)와 같이 수중청음기에 전파된다. 또한 구의 상하 진동으로 발생하는 모드의 주파수는 식(3)과 같이 주어진다.<sup>[5,16]</sup>

$$F_0 = \frac{dm_{added}/dy}{1+m/m_{added}} V^2 = \frac{dm_{added}/dy}{(1+m/m_{added})^3} V_0^2, \quad (1)$$

$$p = \frac{\cos \theta}{8\pi} \left[ \frac{F_0 \exp(i\omega t - ikr)}{r^2} + \frac{i\omega F_0 \exp(i\omega t - ikr)}{rc} \right], \quad (2)$$

$$f = \frac{0.3c_s}{r_0(1+\sigma)^{1/2}}. \quad (3)$$

여기서  $r$ 은 구 중심에서 청음기까지 거리,  $\theta$ 는 구 중심에서 수신기를 바라본 각도,  $m$ 은 구의 질량,  $m_{added}$ 는 부가 질량,  $V_0$ 는 초기 낙하 속도,  $V$ 는 부가 질량이 고려된 입수 속도,  $r_0$ 은 구의 반직경,  $x$ 는 구와 해수면간 접촉 원의 반직경,  $y$ 는 구의 잠기는 깊이,  $c$ 는 수중 음속,  $c_s$ 는 구 재질 음속,  $\sigma$ 는 구 재질에 대한 푸아송 비(Poisson's ratio)이다.

개방 공동 유동 단계에서 포텐셜 반신 유동(potential half-body flow) 이론을 적용하였으며, Fig. 8에서 보듯이 균일한 유동장 안에 공동의 움직임으로 발생하는 압력은 식(4)와 같이 주어진다.<sup>[16]</sup>

$$p = \frac{1}{2} \rho V^2 \left[ 2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta - \left( \frac{r_0}{r} \right)^4 \right]. \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $V$ 는 낙하 속도,  $r_0$ 는 구의 반직경,  $r$ 은 구 중심이 수신기를 바라보는 시선 거리,  $\theta$ 는 구의 중심에서 수신기를 바라보는 각도이다.

공동 붕괴 및 거품 진동 단계에서는 거품의 형태

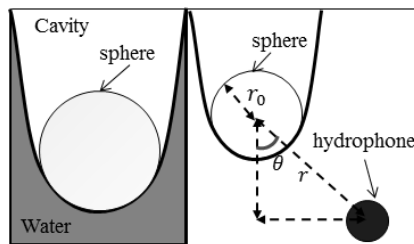


Fig. 8. Geometry of potential half-body flow theory.

를 구형으로 가정하고 단극자 음원(monopole source) 이론을 적용하였다. 거품의 최초 진폭은 식(5)와 같이 정수압(hydrostatic pressure)으로 가정하였으며, 표면장력은 상대적으로 영향이 적어 무시하였다.<sup>[11]</sup>

$$p_0 = p_{Hydrostatic} = \rho g H. \quad (5)$$

Fig. 9에서 보듯이 공동의 깊이는 Glasheen과 McMahon,<sup>[11]</sup> Duclaux 등<sup>[12]</sup>이 실험적으로 도출한 Table 5와 같이 적용하였다. 펀치 오프 시간은 실험 값이 동일 반직경에 대한 Table 5의 결과 값에 비해 상대적으로 크게 나왔다. 식(6)에서 펀치 오프 시간의 계수  $\alpha$  값은 입수체의 형상에 의존하며 본 실험 입수체에 대한  $\alpha$  값은 2.52~2.8로 나타났으므로, 해당 값에 대한 펀치 오프 시간을 적용했다.<sup>[12]</sup>

$$\tau = \alpha \sqrt{R_0/g}. \quad (6)$$

여기서  $\tau$ 는 펀치 오프 시간,  $H$ 는 공동 깊이,  $R_0$ 는 물체의 반직경,  $H_p$ 는 공동 목 위치,  $g$ 는 중력가속도,  $R/H$ 는 공동 직경 대 공동 깊이 비(relative cavity depth to radius),  $H_p/H$ 는 공동 목 위치 대 공동 깊이의 비(relative neck position to cavity depth)이다.

거품 주파수는 생성되는 실제 거품과 동일한 부피를 가진 구형 거품을 이용하여 반직경을 구하고, 식(7)

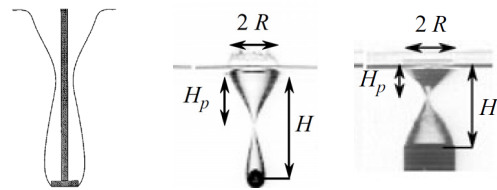


Fig. 9. Cavity photograph of water entry for disk, sphere, cylinder.<sup>[11-12]</sup>

Table 5. Dynamics of water entry cavity for disk, cylinder, sphere.<sup>[11-12]</sup>

Physical parameter	Disk	Cylinder	Sphere
$\tau$	$2.285 \sqrt{R_0/g}$	$2.285 \sqrt{R_0/g}$	$2.06 \sqrt{R_0/g}$
$R/H$	$2.297 \sqrt{Fr}$	$(4/27Fr)^{1/3}$	$1.6 \sqrt{Fr}$
$H_p/H$	-	$H_p/H = \frac{1}{3}$	$H_p/H = \frac{1}{2}$



과 같이 Minnaert<sup>[21]</sup> 계산식을 이용하여 예측한다. 거품에 대한 음압은 식(8)와 같이 단극자 음원으로 구할 수 있으며, 식(9)에 따른 시간 지연을 적용한다. 여기서 거품 진동이 처음 시작 될 때 진폭이 증가하였다가 감쇄하는 경향을 고려한다. 식(8)에서 증가 상수  $b$ 는 실험 값에 기초하였으며, 감쇄상수  $\beta$ 는 거품의 공명 주파수를 고려하여 계산한다.<sup>[22]</sup> 실험 결과에 따르면 거품은 20~60 Hz 대역에서 넓게 형성되나 본 알고리즘에서는 중심 주파수 41 Hz와 주변 우세한 주파수 대역에 대한 소수의 거품 압력을 혼합하여 식(10)과 같이 개수만큼 평균화하였다.

$$\omega_n = \frac{1}{a_0} \sqrt{\frac{3\gamma p_a}{\rho}}, \quad (7)$$

$$p_{bubble}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } 0 \leq t < \tau + \frac{r}{c} \\ \frac{p_0 r_0}{r} \exp(bT) \exp(i\omega_n T) & \text{for } \tau + \frac{r}{c} \leq t < \tau + \frac{r}{c} + t_i \\ \frac{p_0 r_0}{r} \exp(-\beta(T-t_i)) \exp(i\omega_n (T-t_i)) & \text{for } \tau + \frac{r}{c} + t_i \leq t < T \\ 0 & \text{for } t \geq T \end{cases}, \quad (8)$$

$$T = t - \frac{r}{c} - \tau, \quad (9)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N p_{bubble}}{N}. \quad (10)$$

여기서  $a_0$ 는 구형 거품의 반직경,  $\gamma$ 는 비열 상수,  $p_a$ 는 주변기압,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $c$ 는 수층 음속,  $r$ 은 구 중심에서 청음기간 거리,  $b$ 는 증가 상수,  $\beta$ 는 감쇄 상수,  $\tau$ 는 피치 오프 시간,  $t_i$ 는 거품 진폭의 증가 시간이다.

#### 4.2 모의신호와 실험결과간 비교

실험결과에 따른 알고리즘을 비교/검증하기 위해 Fig. 10과 같이 구형상의 입수체를 토대로 질량, 청음기 위치, 낙하 속도 등은 동일하게 한 후 실험 계측값과 비교하였다. 여기서 적용된 구의 직경은 0.1 m, 낙하 속도는 8.3355 m/s로 주었으며, 샘플링 주파수는 100 kHz, 피치 오프 시간은 0.2 s, 증가 상수는 1.5, 생

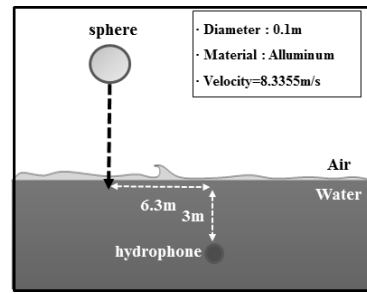


Fig. 10. Simulation geometry of water entry noise.

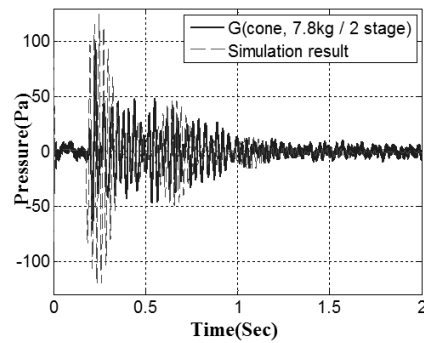


Fig. 11. Comparison of the total time series between simulation and case G.

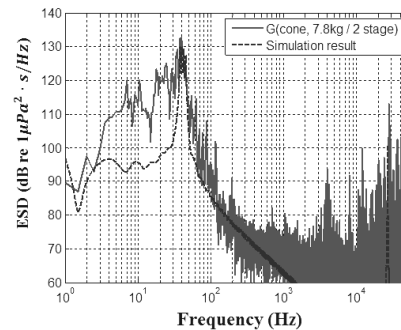


Fig. 12. Comparison of the energy spectral density on log scale between simulation and case G.

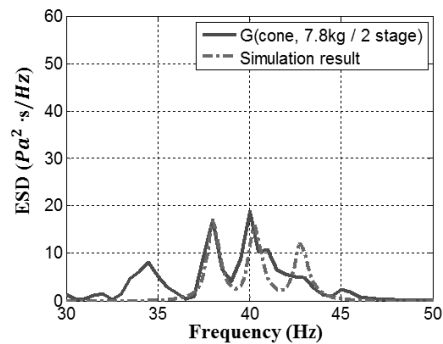


Fig. 13. Comparison of the energy spectral density on linear scale between simulation and case G.

성되는 거품의 우세 주파수 등은 실험결과를 적용하였다.

시뮬레이션 결과, Fig. 11과 같이 시간에 따른 진폭의 크기는 다소 차이가 있으나, 유사한 파형이 생성됨을 확인하였다. 스펙트럼 비교는 Figs. 12와 13과 같이 선형 크기와 로그 크기로 비교하였다. 먼저 스펙트럼 결과를 로그 크기로 비교 시 입수 충격 소음은 38, 40, 42 Hz 주파수에서 거품으로 인한 에너지가 크게 나타났으며, 초기 충돌 및 물체 진동 단계로 인해 고주파수 대역에서도 광대역 스펙트럼과 구의 공명 주파수가 같이 나타났다. 그러나 고주파수 대역의 스펙트럼 비교는 실제 실험결과가 주변소음에 묻혀서 정확한 비교는 할 수 없었다. 선형 크기로 30~50 Hz 주파수 대역에서 스펙트럼을 비교 시에도 거품 주파수의 강한 에너지 분포를 확인할 수 있었다.

## V. 결론 및 토의

본 연구는 입수 충격에 의한 수중 순간 소음의 특성을 연구하기 위해 실제 해상에서 실험을 하였다. 실험 분석 결과로 입수 충격 소음은 기존 연구되었던 결과와 유사하게 초기 충돌 및 물체 진동 단계, 개방 공동 유동 단계, 공동 붕괴 및 거품 진동 단계 3단계로 전시되었다. 대부분의 경우 거품 진동 단계의 파형이 초기 충돌 및 물체 진동 단계에 비해 우세하게 나타났다. 스펙트로그램 상 초기 충돌 및 물체 진동 단계에서는 짧은 순간 전 주파수 범위에서 임펄스 형태로 전시되었으며, 이후 핀치 오프 시간에 도달 시 주파수 100 Hz 이하 대역에서 거품 소음이 우세하게 발생했다. 또한 공동이 붕괴되기 시작하는 핀치 오프 시간은 0.18~0.2 s에 발생하였으며, 평균 거품 지속 시간은 0.9~1.3 s로 지속되었다. 결국, 입수 충격 소음은 100 Hz 이하의 주파수 대역에서 에너지가 집중되어 있었으며, 생성되는 소음은 두부 형상과 입수 이전 초기 에너지에 의해 영향을 받고 있었다. 유사한 수준의 초기 에너지를 기준으로 두부 형상에 따른 ESD를 비교했을 때 중심 주파수에서 원통형, 원뿔형, 반구형 순으로 에너지의 크기가 나타났다. 또한 두부 형상이 동일한 입수체의 경우 초기 에너지가 클수록 중심 주파수에서 에너지의 크기가 크

게 나타났다.

한편 실험 결과를 토대로 입수 충격 소음 모의 생성 신호 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘을 통해 시뮬레이션 한 결과 예측결과와 유사한 파형을 보였으며, 스펙트럼에서는 우세한 거품 주파수와 초기 충돌 및 물체 진동에 의한 광대역의 스펙트럼과 구의 공명 주파수를 확인 할 수 있었다. 그러나 알고리즘은 입수체를 구 형상으로 모델링하는 등 단순화 하였으므로, 향후 실린더 형상의 입수체로 구체화 할 필요가 있으며, 구의 낙하 속력의 증가, 실험 횟수 증가 등 추가 실험을 통한 알고리즘 개선이 필요하다.

## 감사의 글

본 논문은 국방과학연구소 지원을 받아 수행한 “장-3 소나시뮬레이터 개발” 연구과제 결과 중 일부입니다. 실험에 도움을 주신 한양대학교 최지웅 교수와 김선효, 고명권, 한동균 연구원, 국방과학연구소, 청해호 관계자분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

## References

1. R. J. Urick, *Ambient Noise in the Sea* (Peninsula, Los Altos, 1986), chapter 7, pp. 1-19.
2. R. A. Holler, “High altitude launch of ASW sonobuoys,” U. S. Naval Air Dev. Cent. Rep. NADC-8155-30 (1981).
3. T. von Karman, “The impact of seaplane floats during landing,” NACA Technical Note, **321** (1929).
4. H. Wagner, “Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces,” *Z. Angew. Math. Mech.* **12**, 193-235 (1932).
5. M. Shiffman, R. Courant and D. C. Spencer, “The force of impact on a sphere striking a water surface,” *Appl. Math. Panel Rep.* **42** IR AMG - NYU No. 105 (1945).
6. S. L. Chuang, “Slamming of rigid wedge shaped bodies with various deadrise angles,” DTRC Rep. 2268 (1966).
7. A. M. Worthington, *A Study of Splashes* (Longmans Green and Company, London, 1908), pp 73-129.
8. E. G. Richardson, “The impact of a solid on a liquid surface,” *Proc. Phys. Soc.* **61**, 352-367 (1948).
9. A. May, “Vertical entry of missiles into water,” *J. Appl. Phys.* **23**, 1362-1372 (1952).
10. G. Birkhoff and E. H. Zarantonello, *Jets, Wakes, and Cavities* (Academic Press, New York, 1957), pp. 64-256.
11. J. W. Glasheen and T. A. McMahon, “Vertical water entry

- of disks at low froude numbers,” *Phys. Fluids* **8**, 2078-2083 (1996).
12. V. Duclaux, F. Callé, C. Duez, C. Ybert, L. Bocquet and C. Clanet, “Dynamics of transient cavities,” *J. Fluid Mech.* **591**, 1-19 (2007).
  13. B.D. Uber and R. J. Fegan Jr, *Acoustic Signatures Accompanying Low-velocity Water Entry*, (Master’s thesis, Naval Post-graduate School, 1973).
  14. F. E. Fox, W. C. Connolly, J. L. Hunter and R. L. Meister, “Model experiments on the acoustic signal from airdropped mines,” Catholic Univ of America Washington DC, Rep. Nonr 894-00 (1952).
  15. J. W. Corbett and R. E. Lanou, “Analysis of mine-drop signatures for rise-time, amplitude, and frequency characteristics,” ESL Technical Memorandum, Rep. Nonr 609 (1953).
  16. W. R. Hoover and V. C. D. Dawson, “Hydrodynamic pressure measurements of the vertical water entry of a sphere,” Naval Ordnance Lab White Oak MD, Rep. NOLTR 66-70 (1966).
  17. L. Likhterov, “High-frequency acoustic noise emitted by initial impact of solid sphere falling onto liquid surface,” *Phys. Fluids* **10**, 321-323 (1998).
  18. *UK Meteorological Office: The Beaufort Scale*, <http://www.metoffice.gov.uk/learning/library/publications/factsheets/>, 2010.
  19. C. J. Huang and T. M. Tien, “Research of a solid object impacting on the water surface,” *PIERS Proceeding*, Cambridge, USA, 846-849 (2010).
  20. G. J. Franz, “Splashes as sources of sound in liquids,” *J. Acoust. Soc. Am.* **31**, 1080-1096 (1959).
  21. M. Minnaert, “On musical air-bubbles and the sounds of running water,” *Philos Mag.* **16**, 235-248 (1933).
  22. C. Devin Jr, “Survey of thermal, radiation, and viscous damping of pulsating air bubbles in water,” *J. Acoust. Soc. Am.* **31**, 1654-1667 (1959).

## 저자 약력

### ▶ 정 영 철(YoungCheol Jung)



2007년 2월: 해군사관학교 정보통신공학과 학사  
2012년 2월 ~ 현재: 서울대학교 조선해양공학과 석사과정

### ▶ 성 우 제(WooJae Seong)



1982년: 서울대학교 조선해양공학과 학사  
1990년: M.I.T. 해양공학과 박사  
1991년: M.I.T. Post-doctoral Associate  
1992년 ~ 1996년: 인하대학교 선박해양공학과 조교수  
1996년 ~ 현재: 서울대학교 조선해양공학과 교수

### ▶ 이 근 화(Keunhwa Lee)



2000년: 서울대학교 조선해양공학과 학사  
2006년: 서울대학교 조선해양공학과 박사  
2011년 ~ 2012년: Visiting scholar, Marine Physical Laboratory, SIO, UCSD.  
2006년 ~ 현재: 서울대학교 해양시스템공학연구소 연구교수

### ▶ 김 형 록(Hyoungrok Kim)



1989년: 서울대학교 해양학과 학사  
1991년: 서울대학교 해양학과 석사  
2001년: 서울대학교 지구환경과학부 박사  
2002년 ~ 2004년: 미국 해군대학원(NPS) 연구원  
2005년 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원