



工學碩士 學位論文

기포/난류항적 산란신호의 모델링 이론과 실험적 검증

Modeling and Experimental Verification of Scattered Signal from Ship/Turbulence Wake

指導教授 金載 洙



2009年 2月

韓國海洋大學教 大學院

海洋開發工學科

池 潤 喜

本 論文을 池潤喜의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員	長	:	理學博士	崔	相	文	
委	員	•	工學博士	金	祐	湜	(FD)
委	員	•	工學博士	金	載	洙	



2009年 2月

韓國海洋大學教 大學院

海洋開發工學科

池 潤 喜

Modeling and Experimental Verification of Scattered Signal from Ship/Turbulence Wake

by YOON-HEE JI

Department of Ocean Development Engineering Graduate School of Korea Maritime University



As a part of the development of wake detection, the acoustic reverberation model is required for the simulation of the wake detector. Wake is separately divided to the ship wake by surface vessel and the turbulence wake by underwater vessel.

In this thesis, a reverberation model for the wake detection is presented. In case of the ship wake, the reverberation model consists of the acoustic scattering model due to the distribution of the micro-bubbles and the kinematic model for the moving active sonar. And, in case of the turbulence wake, the spectral spreading due to the acoustic doppler effect from moving scatterers is included in the reverberation model. In order to verify the developed reverberation model, a series of sea experiment was executed in September 2007 to obtain the spatial-temporal distribution of a bubble clouds and, acoustic water-tank experiment was executed in October 2007 to observe the scattering signals from the turbulence region. The measured signals were analyzed and compared with the simulated signals.

AF	BSTR	ACT	i	
목		차	ii	ĺ
ユ	림	목 차	·····in	Ţ
표	목	차		i
Ι.	서	론 …		L
	1.1	연구	배경 및 목적	1
	1.2	연구	내용 및 방법	2
Π.	기포	- 산란	항적	1
	2.1	항적	탐지	4
		2.1.1	항적의 정의	4
		2.1.2	기포항적의 음향산란	5
		2.1.3	이론적 배경	7
	2.2	운동	학적 모델1:	2
		2.2.1	고정 좌표계와 국부 좌표계12	2
		2.2.2	오일러 좌표 변환1;	3
	2.3	음향	학적 모델1	ō
		2.3.1	체적 잔향음	7
		2.3.2	해수면 잔향음22	3
		2.3.3	해수면 반사	7
	2.4	기포히	항적 음향산란신호의 모델링	3
		2.4.1	알고리듬22	3
		2.4.2	신호모의)
	2.5	음향	학적 및 운동학적 모델의 모의수치실험	1
		2.5.1	음향학적 모델 : 균일 분포(homogeneous distribution)	2
		2.5.2	음향학적 모델 : 가우시안 정규분포(gaussian distribution)	4
		2.5.3	운동학적 모델	3
	2.6	기포히	황적 음향산란신호의 획득	3
		2.6.1	2006년 12월 한국해양대학교 1차 해상실험)
		2.6.2	2007년 9월 한국해양대학교 2차 해상실험4	1

	2.7	획득신호의 분석
		2.7.1 2006년 12월 한국해양대학교 1차 해상실험45
		2.7.2 2007년 9월 한국해양대학교 2차 해상실험46
	2.8	자료동화를 통한 알고리듬 검증
Ш.	난투	루유동 항적
	3.1	항적탐지
		3.1.1 항적의 정의
		3.1.2 난류항적의 음향산란
		3.1.3 이론적 배경
	3.2	음향학적 모델
		3.2.1 체적 잔향음
	3.3	난류항적 음향산란신호의 모델링62
		3.3.1 알고리듬
		3.3.2 신호모의
	3.4	음향학적 모델의 모의수치실험64
		3.4.1 난류항적이 없는 경우
		3.4.2 원통형 난류항적(cylinderical turbulence region)
	3.5	난류항적 음향산란신호의 획득
		3.5.1 2007년 10월 음향수조실험
		3.5.2 획득신호의 분석
	3.6	모의신호와 실측신호의 특성
		3.6.1 신호 특성 비교
IV.	결된	<u>e</u> 72
참	고님	문 현

그림목차

Fig. 1-1 항적 음향특성 연구 흐름도	2
Fig. 2-1 항적의 기하학적 형상	4
Fig. 2-2 기포항적의 음향산란	5
Fig. 2-3 기포반경과 공진주파수	7
Fig. 2-4 감쇠 상수	9
Fig. 2-5 소산 단면	.0
Fig. 2-6 흡음 단면	.1
Fig. 2-7 산란 단면	.1
Fig. 2-8 운동학적 모델의 좌표계 설정	.2
Fig. 2-9 음향학적 모델의 구형 직각 좌표계	.5
Fig. 2-10 주파수에 따른 흡수손실	.6
Fig. 2-11 체적 잔향음의 단위체적	.8
Fig. 2-12 solid angle에 대한 개념도 ······1	.9
Fig. 2-13 단일 기포의 표적 강도2	21
Fig. 2-14 체적 산란강도	21
Fig. 2-15 구형확산에 의한 음파의 체적분할2	22
Fig. 2-16 해수면 잔향음의 입사면적2	23
Fig. 2-17 입사각에 따른 해수면 산란계수(좌)와 산란강도(우)	25
Fig. 2-18 해수면 입사면적	26
Fig. 2-19 입사면적의 적분	26
Fig. 2-20 해수면 산란과 반사	27
Fig. 2-21 알고리듬 흐름도	28
Fig. 2-22 잔향신호 모의과정(GUI)3	30
Fig. 2-23 균일 항적분포	32
Fig. 2-24 수치・해석적 체적 잔향음	32
Fig. 2-25 잔향음 준위와 Time Series (homogeneous)	33
Fig. 2-26 해수면 부근 산란신호	33
Fig. 2-27 가우스 항적분포	34
Fig. 2-28 잔향음 준위와 Time Series (gaussian)	34
Fig. 2-29 해수면 부근 산란신호	35
Fig. 2-30 (φ,θ,ψ)=(0°, 0°, 0°)일 때 체적의 적분 ··································	36
Fig. 2-31 (φ,θ,ψ)=(0°, 0°, 0°)일 때 해수면의 적분	36

Fig. 2–32 $(\phi, \theta, \psi) = (20^{\circ})$, 0°, 0°)일 때 체적의 적분	37
Fig. 2–33 $(\phi, \theta, \psi) = (20^{\circ}, 0.000)$	0°,0°)일 때 해수면의 적분	37
Fig. 2-34 간이형 항적탐지	7]	38
Fig. 2-35 기포항적 실험일	∠](06'~08')	38
Fig. 2-36 실험 해역 및 주	변 환경	39
Fig. 2-37 센처 거치대		39
Fig. 2-38 실험 장비의 구석	3	40
Fig. 2-39 실험 방법		41
Fig. 2-40 해양대 "아치호"		42
Fig. 2-41 기포항적의 형상		44
Fig. 2-42 신호분석 과정 …		45
Fig. 2-43 기포항적 유(우)/	'무(좌)의 산란신호 변화	45
Fig. 2-44 실측신호(좌)와	역산된 산란강도(우)	46
Fig. 2-45 0m궤적에서 주피	ት수 430kHz일 때 이동속도 9kts(좌)/12kts(우)[단위:dB]	47
Fig. 2-46 0m궤적에서 주피	ት수 450kHz일 때 9kts(좌)/12kts(우)[단위∶dB]	47
Fig. 2-47 0m궤적에서 주프	ት수 470kHz일 때 9kts(좌)/12kts(우)[단위∶dB]	48
Fig. 2-48 주파수 450kHz,	이동속도 9kts(0~50sec)[단위:dB]	48
Fig. 2-49 주파수 450kHz,	이동속도 9kts(60~200sec)[단위:dB]	49
Fig. 2-50 주파수 450kHz,	이동속도 9kts(210~350sec)[단위:dB]	50
Fig. 2-51 주파수 450kHz,	이동속도 9kts(360~410sec)[단위:dB]	51
Fig. 2-52 주파수 450kHz,	이동속도 9kts 경우 기포군의 3차원 분포[단위:dB]	52
Fig. 2-53 신호모의 GUI…		53
Fig. 2-54 실측신호와 모의	신호 비교(0~20sec)	54
Fig. 2-55 실측신호와 모의	신호 비교(30~50sec) ······	55
Fig. 2-56 실측신호와 모의	신호 비교(60~80sec) ······	56
Fig. 2-57 실측신호와 모의	신호 비교(90~110sec)	57
Fig. 3-1 PIV를 이용한 입	자유동 관측	58
Fig. 3-2 난류항적 탐지		59
Fig. 3-3 음향 도플러 개념		60
Fig. 3-4 알고리듬 흐름도		62
Fig. 3-5 잔향신호 모의과?	∃(GUI)	63
Fig. 3-6 모의된 잔향신호s	H 주파수 스펙트럼 ······	64
Fig. 3-7 모의수치실험 방법	g	65
Fig. 3-8 모의된 잔향신호와	H 주파수 스펙트럼 ······	65
Fig. 3-9 모의된 잔향신호s	H 주파수 스펙트럼 ······	66

Fig.	3-10	난류항적 발생수단 : 난류발생기(좌), 잠수함모형(우)
Fig.	3-11	난류항적 실험일지(07'~08')
Fig.	3-12	수조실험 구성 ~~~~~ 68
Fig.	3-13	획득된 신호의 형태
Fig.	3-14	1MHz인 경우 거리변화에 따른 음향에너지[단위:dB]
Fig.	3-15	1.5MHz인 경우 거리변화에 따른 음향에너지[단위:dB]
Fig.	3-16	실측신호(a)와 모의신호(b,c)의 주파수 특성 비교



표 목 차

Table.	2 - 1	모의수치실험 방법	1
Table.	2-2	아치호 제원표 [참고: 해양대 홈페이지]4	2
Table.	2-3	신호획득 방법	3
Table.	2-4	분석 데이터	6
Table.	3-1	모의수치실험 방법	4



I.서 론

1.1 연구 배경 및 목적

수중은 공기 중과 달리 전자기파나 광파의 큰 흡수손실로 인해 전달거리가 짧아 효 과적인 정보전달의 제약이 따른다. 반면에 흡수손실이 상대적으로 적은 탄성파인 음파 는 수중에서 초당 1500m/s의 속도로 주파수에 따라 전달거리가 수m~수천Km까지 되 며, 해양환경에 대한 정보를 포함하고 있어 수중에서 유일한 정보전달 매체로 여러 분 야에 응용되고 있다. 특히 군사 분야에서 능동소나(active sonar)와 수동소나(passive sonar)를 이용하여 수중물체에 의한 반향음(echo)이나 방사소음을 이용하여 목표물의 탐지와 식별에 가장 중요한 수단으로 이용되고 있고, 많은 연구가 필요한 분야이다.

1차대전 중에 음파탐지를 사용하여 적의 목표물을 탐지하는 음향어뢰가 개발되어 현 재까지 많은 나라에서 개발/운용하고 있다. 그러나 수중은 매우 복잡한 음향환경이며, 시대적으로 발전해가는 기술로 인해 음향어뢰에 대응하는 음향기만기(Acoustic Counter Measure, ACM)가 개발되어 음향어뢰와 기만기와의 모순이 생기기 시작하였다. 따라 서, 음향어뢰만으로 목표물을 탐지하는데 방해요소가 많아지면서 기존 음향어뢰의 탐지 방식과 달리 이동하는 수상/수중 운동체의 선체형상 및 톤수, 이동속도 그리고 흘수 등 과 같은 요소에 의해 발생되는 기포/난류항적을 탐지하는 항적추적어뢰(Wake Homing Torpedo, WHT)의 필요성이 대두되었다.

항적추적어뢰의 대상이 되는 항적은 수상/수중 운동체가 이동하는 후방에서 발생되 어 확산되면서 그 범위가 점점 넓어지며 발생조건에 따라 오랜 시간동안 수중에 잔존 하여 소멸될 때 까지 음향산란을 일으키게 되는데, 현재의 음향기만기와 같은 대응체제 로는 항적과 같은 광범위한 위장표적을 만드는 것이 곤란하다. 이러한 항적에 의한 음 향산란신호는 능동소나를 이용하여 목표물의 탐지를 가능하게 한다. 따라서, 장시간 음 향산란을 일으키는 기포/난류항적의 음향산란신호의 특성을 파악하고, 항적의 공간분포 에 따른 산란신호의 지속여부에 관한 연구가 필수적이다.

본 논문에서는 음향수조실험과 해상실험을 통하여 수상/수중 운동체의 이동으로 발 생하는 기포산란과 난류유동의 음향특성에 대한 실험적 연구와 동시에 음향이론을 바 탕으로 항적 음향산란신호의 모델링 알고리듬을 구현하여 실측자료와의 자료동화(data assimilation)를 통해 알고리듬을 검증하는 것에 목적이 있다.

1.2 연구 내용 및 방법

본 논문에서는 기포산란과 난류유동 항적에 의한 음향산란신호 모델링 알고리듬을 제시하기 위해 Fig. 1-1 의 방법으로 연구를 수행한다. 음향학적 이론에 근거하여 항적 의 공간분포에 따른 산란신호를 모의하기 위해 잔향음(Reverberation)이론을 바탕으로 알고리듬을 구현하였으며, 실제로 발생된 항적에 의한 실측 음향산란신호의 확인을 위 해 수조실험과 해상실험을 수행하였다.

기포산란 항적의 경우 알고리듬은 음향학적 모델(acoustic model)과 운동학적 모델 (kinematic model)로 이루어져 있다. 음향학적 모델에서는 미세기포의 공간분포를 임의로 설정하여 체적산란강도(volume scattering strength, S_v)로 변환하고, 운동학적 모델에서 는 해양공간의 고정 좌표계와 능동소나에 고정된 국부 좌표계를 설정하여 능동소나의 운동상태에 따른 좌표변환을 위한 오일러변환(Euler transform)을 기반으로 구현하였 다. 난류유동 항적의 경우 알고리듬은 음향학적 모델로만 이루어져 있으며, 난류영역의 분포를 설정하여 무작위(random)로 음향도플러(acoustic doppler)를 발생시켜 난류항적 으로부터 산란된 음원신호(source)의 파동변화에 따른 주파수 스펙트럼의 퍼짐현상 (spreading)을 적용하여 구현하였다.



Fig. 1-1 항적 음향특성 연구 흐름도

음향모델의 알고리듬 구현과 동시에 기포/난류에 대한 기초자료를 획득하기 위한 수 조실험과 실제 항적에 의한 음향산란신호를 획득하기 위한 해상실험을 수행하였다. 수 조실험을 시작으로 하여 수중의 안정적인 상태에서 발생하는 기포/난류에 의한 산란신 호를 획득하여 분석해 보고, 실제 불규칙적이고 복잡한 해상환경에서 실험을 진행하여 실제 운동체에 의해 발생되는 항적으로 부터의 실측 음향산란신호를 획득하였다. 음향 이론에 근거하여 구현된 알고리듬을 이용하여 모의수치실험을 수행해 보고, 구현된 알 고리듬의 검증을 위해 실측신호를 분석하여 그 신호의 특성을 알고리듬에 적용하여 모 의신호와 실측신호의 신호형태와 주파수 특성의 편차를 비교하여 실험적으로 검증하였 다.



Ⅱ. 기포산란 항적

2.1 항적탐지

2.1.1 항적의 정의

수상 운동체가 이동한 뒤 후방에는 하얀 물거품과 같은 많은 양의 미세기포가 발생 하게 되어 이동자취를 남긴다. 이를 기포항적(Ship Wake)이라고 하며, 발생은 프로펠 러 회전에 의한 공동현상(propeller-cavitation)과 선수·선미부의 형상에 의한 쇄과(breaking waves) 그리고, 신체 난류 경계층의 공기유입(entrainment of air)에 주로 기인한다[1].

기포항적 내 미세기포(micro-bubbles)는 발생 후 해수면을 따라 길게 연결된 기포층 을 만들어 수평으로 넓어지며, 항적의 기하학적 형상은 수상 운동체의 종류 및 선체형 상, 속도 등에 의해 결정된다. 항적은 그림 Fig. 2-1 과 같이 기하학적 형상으로 Near Wake, Far Wake, Kelvin Wake로 구성된다. 대표적인 형상으로 알려진 Kelvin 항적은 이동하는 선박의 후미에 표면장력파(surface-gravity wave)의 형태로 나타나 양쪽으로 갈라지며, 주로 쐐기 모양으로 반각이 약 19.5°로 알려져 있다. Kelvin 항적은 선박으로 부터 퍼져나가는 발산파(divergent wave)와 그 뒤를 따르는 횡파(transverse wave)로 구성된다. 발산파는 큰 선수파로 시작되고, 선수 양쪽에 이를 뒤따르는 비스듬한 파도 들이 차례로 사다리꼴을 이루며 퍼져 나간다. 선박의 양쪽으로 퍼져나가는 발산파 사이 에는 횡파가 발생한다. 횡파의 파정(crest)은 선체 근처에서는 선박의 진행 방향에 수직 한 발산파에 접근함에 따라 뒤로 굽으면서 발산파와 합쳐진다[2-3].



Fig. 2-1 항적의 기하학적 형상

Near Wake영역은 선박의 이동으로 인해 선수파가 깨짐으로서 주로 발생하는 기포 와 난류에 의한 영역이라고 할 수 있다. 여기에 포함되는 Ship Hull Region은 선체표 면과의 마찰력 때문에 선체부근 난류 경계층에서 공기 유입(air entrainment)으로 인해 발생하며, Bow Wave Region은 선수에 의한 쇄파(breaking wave)로 인해 발생한다. 또한 ISR(Initial Spreading Region)은 선박의 프로펠러에 의해 발생하며, 큰 발산 각을 가진다. Far Wake 영역은 항적이 감소되는 영역으로 주로 작은 해수면 거칠기의 형태 로만 나타난다[4].

2.1.2 기포항적의 음향산란

기포항적이 존재하지 않는 경우 음파의 산란은 일반적으로 해상풍에 의해 발생하는 해수표층의 기포 및 해수면 거칠기, 수중 부유물 등에 의해 발생된다. 해수표층의 기포 들은 해수의 렝뮈르 순환(Langmuir circulation)에 의해 해수표층 아래로 이동할 수 있 으며, 음파의 강한 산란을 일으키는 산란체(scatterers) 및 수중 주변소음(ambient noise)을 일으키는 기작이 된다[5]. Fig. 2-2 과 같이 수상 운동체의 이동으로 많은 양 의 미세기포가 발생되어 해수면 부근에 수m 두께의 기포층이 형성된 경우, 능동소나로 부터 방출된 음향에너지가 기포경계층에서 변형되어 지속적이고 매우 강한 잔향이 발 생된다.

잔향음(reverberation)은 수중에서 방출된 음과가 불 균질한 경계면에서 전반사 또는 산란되어 수신되는 시간에 따른 총합으로 이는 송신신호와 같은 주파수 특성을 나타내 며, 산란체와의 거리 및 송신신호의 세기에 따라 그 신호의 세기(intensity)가 달라져 소음(noise)과 구별되는 특징을 가진다[6].

해수 중에 잔존하여 수십 분 이상 음향산란을 일으키는 기포항적에 포함된 미세기포 의 반경은 8~200µm으로 알려져 있다[1]. 기포의 수명은 부력효과에 의한 기포의 상승률,



Fig. 2-2 기포항적의 음향산란

기포의 성장과 붕괴, 수축 등의 물리적 요인에 의해 결정되며, 200µm이상의 큰 기포는 빠른 시간 내에 해수면으로 상승하여 소멸되고 8µm이하의 작은 기포는 수압에 의해 소멸하게 된다. 해수 중의 기포는 방사형의 수축과 팽창운동을 반복하여 진동하게 되 고, 입사파에 의해 공진이 발생하는 경우 큰 음향산란강도(acoustic scattering strength) 를 나타낸다. 기포항적의 미세기포 반경에 대한 공진주파수 범위는 10~400kHz가 되며, 공진현상이 발생될 때 기포의 진폭은 최대가 되어 입사파로부터 최대 에너지가 방출된 다[7].

따라서, 해수면 아래에 위치하는 능동소나의 음향센서에서는 해수면을 향하여 400kHz이상의 고주파수의 음파를 송신하고, 기포층을 포함하는 입사체적과 해수면 경 계층에서 산란·반사되어 들어오는 수신단의 잔향신호를 통해 기포항적의 존재 유무를 판단한다. 기포항적의 산란신호 특성은 Fig. 2-2 과 같이 해수면 반사신호가 수신되기 이전에 해양에 공간적으로 발생된 수m의 기포층에 의한 산란신호가 먼저 수신되며, 해 수 중에 잔존하는 기포항적 내 미세기포의 시·공간적 분포변화에 따른 체적산란강도에 의해서 신호의 특성이 결정된다.

이렇게 기포항적의 탐지는 해수면 위의 수상 운동체가 이동한 후 후방에 발생되는 기포항적 내 미세기포의 음향산란신호 즉, 잔향신호를 이용하여 가능하게 된다.



2.1.3 이론적 배경

가. 공진 주파수

기포항적에 포함되는 미세기포 중 200µm이상의 큰 기포의 경우 수초 이내에 해수면 으로 상승하여 소멸하고, 그보다 작은 기포들은 주파수 범위 10~400kHz에서 강한 공 진이 발생하게 되는데, 이 때 기포의 반경과 공진주파수의 관계는 다음의 식으로 표현 된다[8].

$$f_R = (2\pi a)^{-1} \sqrt{3\gamma P_0 / \rho_w}$$
(1)

여기에서 a는 기포반경(cm), P₀는 정수압(=10⁶ dyne/cm²), γ는 기체의 비열비(=공기 의 경우 1.4), ρ_w는 물의 밀도(=1g/cm³)이다.

수심 $0m(P_0 = 1atm)$ 인 해수면에서의 공기(γ =1.4)에 대한 식 (1)은 다음과 같이 표현된 다.

$$f_R = \frac{326}{a} \tag{2}$$

수심 d에서 기포의 공진 주파수는 아래 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다[7].

$$f_R = \frac{326}{a} \sqrt{1 + 0.03d} \tag{3}$$

Fig. 2-3 은 정수압 $1atm = 10^5 N/m^2$, 물의 밀도 $\rho_w = 1000 kg/m^3$, 기포반경이 8~500 μm 일 때 식 (1)을 사용하여 기포반경과 공진주파수와의 관계를 나타낸 그래프이다.



Fig. 2-3 기포반경과 공진주파수

나. 감쇠 상수

감쇠 상수(damping constant)는 미세기포의 산란강도를 계산할 때 사용되는 변수로, 세 가지 요소로 구성되어 식 (4)와 같이 나타낸다[9-10].

$$\delta = \delta_{\rm th} + \delta_{\rm rad} + \delta_{\rm vis} \tag{4}$$

여기서 δ_{th} 는 열전도성(thermal conductivity)에 의한 감쇠 상수, δ_{rad} 는 재방사 (reradiation)에 의한 감쇠상수, δ_{vis} 는 전단 점성률(shear viscosity)에 의한 감쇠 상수로 아래와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\delta_{\rm th} = 3(\gamma - 1) \left[\frac{X(\sinh X + \sin X) - 2(\cosh X - \cos X)}{X^2(\cosh X - \cos X) + 3(\gamma - 1)X(\sinh X - \sin X)} \right]$$
(5)

$$\delta_{\rm rad} = \rho R_0^3 \omega^3 / 3\eta P_0 c \tag{6}$$

$$\delta_{\rm vis} = 4\omega\mu/3\eta P_0 \tag{7}$$

식 (5)에서 X는 $R_0(2\omega/D_1)^{\frac{1}{2}}$, η 는 $\gamma(1+\delta_{th}^2)^{-1}\left[1+3\frac{(\gamma-1)}{X}\left(\frac{\sinh X-\sin X}{\cosh X-\cos X}\right)\right]^{-1}$ 로 각각 계산 할 수 있으며, P_0 는 유체의 정역학적 압력(hydrostatic pressure in liquid), γ 는 기체의 비열비(ratio of specific heats of the gas), ρ,c,μ 는 각각 해수의 밀도 (density), 음속(sound speed), 전단점성(viscosity)을 나타내며, D_1 은 기포 안 공기의 밀도와 비열의 곱과 기포 안 공기의 열전도성의 비를 나타내는 기포의 물리적 특성을 나타내는 계수(constant)로 $0.2cm^2$ /sec을 사용한다. R_0 는 기포반경(radius of bubble), ω 는 각주파수(angular frequency)를 의미한다.



Fig. 2-4 감쇠 상수

Fig. 2-4 은 중심주파수가 500kHz일 때의 기포반경(8~500μm)에 대한 감쇠 상수를 식 (5),(6),(7)을 사용하여 기포반경에 따른 감쇠 상수의 변화와 세 가지 감쇠 상수의 총 합을 나타낸다.



다. 단면적 계수

감쇠 상수(damping constant)와 동일하게 미세기포의 산란강도를 계산할 때의 변수 로 단면적 계수(cross section)에는 소산단면(extinction cross section), 흡음단면 (absorption cross section), 산란단면(scattering cross section)이 있다. 기포의 진동은 소산단면에 의해 결정되는 입사음파에 의해 모든 방향으로 음파가 산란되는 재 방사에 의한 간섭현상으로 정의 할 수 있다. 공진주파수 f_r 에서 반경이 a인 기포의 경우, 주파 수 f에서 소산단면의 감쇠계수를 δ 로 표시하면 식 (8)으로 표현된다.

$$\sigma_e = \frac{4\pi a^2 \delta / k_r a}{(f_r^2 / f^2 - 1)^2 + \delta^2}$$
(8)

여기에서 $k_r a = 2\pi a / \lambda_r$ 이다.

또한 흡음단면은 식 (9)으로 표현된다.

$$\sigma_a = \frac{4\pi a^2 \left(\delta/k_r a - 1\right)}{\left(f_r^2/f^2 - 1\right)^2 + \delta^2} \tag{9}$$

마지막으로 산란단면은 식 (10)으로 표현된다.

$$\sigma_s = \frac{4\pi a^2}{(f_r^2/f^2 - 1)^2 + \delta^2} \tag{10}$$

따라서 최종적으로 소산, 산란, 흡음 단면의 관계는 다음과 같이 표현된다[7].

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_s \tag{11}$$

이 단면들은 공진주파수에서 최대가 되며 주파수가 공진으로부터 멀어 질수록 급격히 감소한다. Fig. 2-5~7은 산란단면 식 (8),(9),(10)을 사용하여 중심주파수가 500kHz일 때 기포의 반경(8~500μm)에 따른 단면적 계수를 나타낸 그래프이다.



Fig. 2-5 소산 단면



Fig. 2-7 산란 단면

2.2 운동학적 모델

2.2.1 고정 좌표계와 국부 좌표계

좌표계는 해양에 대응하는 고정 좌표계(global coordinate,(*X*, *Y*, *Z*))와 음원의 국부 좌표계(local coordinate,(*x*, *y*, *z*))로 구성된다. 표적과 음원은 고정 좌표계를 기준으로 서로 상대운동을 하고 있으며, 운동학적 모델의 좌표계는 Fig. 2-8 과 같이 정의된다. 여기서 표적은 수상 운동체로 정의하고, 음원은 수상 운동체에 의해 형성된 기포항적을 추적하는 능동소나로 정의한다.



Fig. 2-8 운동학적 모델의 좌표계 설정

Fig. 2-8 에서 고정 좌표계와 국부 좌표계는 오른손 좌표계를 사용하여 공간상의 3 차원 직교 좌표계가 설정되며, 표적과 음원은 각각 대응되는 좌표계의 축을 중심으로 회전 또는 이동한다. 보이는 바와 같이 이동의 진행방향이 각 좌표축의 양(+)의 방향을 나타낸다. 고정 좌표계에서 해수면은 Z=0이며, 수상 운동체를 그림과 같은 위치에 설 정하고 X축 양(+)의 방향으로 이동하면서 선미부에서 항적이 발생된다. 해수면 아래에 위치하는 능동소나는 국부 좌표계의 기하학적 축을 중심으로 하여 회전각에 의해 운동 하며, 고정 좌표계에 대해서는 해수면 아래 양(+)의 Z축에 위치하고 해수면(Z=0)을 항하여 음파를 방출한다.

2.2.2 오일러 좌표 변환

수상 운동체와 해수면 아래에 존재하는 음원 즉, 능동소나와의 상대적인 운동에 따른 좌표변환을 위해 3차원 직교좌표를 사용한 공간상의 회전변환 방법인 오일러 변환 (Euler transform)을 적용하였다[11].

음원은 국부적인 기하학적 축 (x_2, y_2, z_2) 을 중심으로 반시계 방향(counter clockwise) 의 회전 운동각(Euler angle)에 의한 회전운동을 한다. 회전운동으로 형성되는 음원의 빔 패턴(beam pattern)에 의한 입사체적과 해수면 입사면적을 정의하는 국부좌표는 식 (12)에 의해 해양 공간상에 대응하는 고정좌표로 변환할 수 있으며, 해양의 고정 좌표 계에서 정의된 표적의 좌표는 식 (13)에 의해 국부 좌표계로 변환될 수 있다[12].

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}^{=} \begin{bmatrix} \cos\psi - \sin\psi & 0\\ \sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi - \sin\phi\\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}^{+} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}$$
(12)

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}^{=} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 - \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{pmatrix}$$
(1)

여기서, (X_1, Y_1, Z_1) 는 고정 좌표계에 대응하는 표적의 좌표, (X_2, Y_2, Z_2) 은 해양에서 의 음원의 고정 좌표계의 좌표, (x_2, y_2, z_2) 는 국부 좌표계에서 음원의 좌표이다.

운동학적 모델에서는 음원의 국부좌표를 해양의 고정 좌표계로 변환하여 시뮬레이션 한다. 식 (12)을 이용하여 DCM (Direction Cosine Matrix)라는 함수(function)를 식 (14)와 같이 정의하여 모델에 적용하였다. 축 중심의 회전운동을 정의하므로 음원의 운 동은 각 축에 평행한 3가지 직선 운동성분과 x_2 축 중심의 좌우 흔들림(rolling), y_2 축 중심의 앞뒤 흔들림(pitching), z_2 축 중심의 선수 흔들림(yawing)의 3가지 회전 운동성 분을 정의하여 선박의 6자유도 운동성분을 모두 고려하였다. 회전운동은 국부 좌표계의 좌표축(x_2, y_2, z_2) 중심의 회전 운동각(ϕ, θ, ψ)에 의해 결정된다.

$$DCM = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

(14)

3)

운동학적 모델에 오일러 좌표변환을 적용함으로써 선박과 공간적 거리를 두고 움직 이는 해수면 아래 음원의 직선운동 및 회전운동에 의해 형성되는 빔 패턴의 방향성을 알 수 있으며, 음원으로부터 음파가 전달되면서 해양공간상의 입사체적과 해수면에 입 사되는 면적의 고정 좌표변환이 용이하여 어떠한 운동성분으로 정의하여도 기하학적 잔향음의 해석이 가능하다.



2.3 음향학적 모델

음향학적 모델에서는 해양공간을 단위체적(cell)으로 균일한 격자로 나누어 다중 산 란을 무시하고, 해양 내에 산란체(scatterers)들이 균일하게 분포한다고 가정하여 각 체 적에서의 산란강도를 적용하여 산란신호를 모의한다. 음파는 구형확산(spherical spreading) 을 가정하여 전파되며, Fig. 2-9 과 같은 구형 좌표계의 수직각(elevation angle: φ), 수 평각(azimuth angle: θ), 그리고 음원에서 산란체까지의 거리 r에 의해 입사체적과 입 사면적이 결정된다[13]. 입사체적과 면적의 공간적 위치는 수직/수평각(φ , θ)에 의해 결 정되는 빔 패턴에 의해 결정되고, 식 (15)과 같이 Bessel 함수(J_1)를 이용하여 음향센서 의 빔 패턴에 따른 송/수신신호의 가중치를 고려한다[14]. 여기서 k는 파수(wave number, $2\pi/\lambda$), $b(\theta)$ 는 빔 패턴, a는 센서의 반지름(m), θ 는 입사각(incidence angle) 이다.



Fig. 2-9 음향학적 모델의 구형 직각 좌표계

기포항적의 경우는 해수면 아래의 음향센서에서 기포층이 존재하는 해수면 상향으로 음파를 방출하게 되어 체적 잔향음(volume reverberation), 해수면 잔향음(sea-surface reverberation) 그리고, 해수면 반사(sea-surface reflection)를 고려하여 알고리듬을 구 현한다. 신호 모의 시 400kHz이상의 고주파수 음원신호를 사용하는데, 수중에서는 다 양한 경로로 전파되는 음파는 음향에너지의 일부가 열 형태로 변화되어 발생되는 흡수 손실(absorption loss)과 해양의 불 균질성에 의한 산란의 결과로 전달거리에 따른 기 하학적 확산손실(geometrical spreading loss)에 의해 음파의 세기가 감소된다. 흡수손 실은 주로 해수 중에 녹아있는 이온 화합물(MgSO₄,B(OH)₃)이나 유체 점성으로 인한 마찰로 발생하며, 이는 식 (16)으로 표현되고 주파수에 따른 흡수손실의 변화는 Fig. 2-10 으로 주파수에 강한 의존성(dependent)을 보이는 것을 알 수 있다[15-16]. 따라서, 수중에 전파되는 과정에 발생하는 음파의 총 전달손실(Transmission Loss, TL)은 확 산손실과 흡수손실의 합으로 식 (17)과 같이 적용하였다[7].



Fig. 2-10 주파수에 따른 흡수손실

$$\alpha = \frac{0.075f^2}{(0.8^2 + f^2)} + \frac{36f^2}{(5000 + f^2)} + 4.1 \times 10^4 f^2 \tag{16}$$

$$TL = 10\log_{10}r^2 + \alpha r \times 10^{-3} \ (dB/m) \tag{17}$$

체적 잔향음의 경우 해수면 상향으로 방출한 송신신호가 해수면에 도달하기 전 기포 층을 포함하는 입사체적에서 기포의 체적 산란강도(volume scattering strength, S_v)를 적용하고, 해수면 잔향음의 경우는 음파가 해수면에 입사될 때의 입사각(grazing angle), 주파수에 따른 Chapman-Harris의 해수면 산란강도(sea-surface scattering strength, S_s)실험식을 적용한다. 여기에 해수면에서 송신신호의 전반사를 고려한 후, 잔향음의 총 합산으로 기포항적의 산란신호를 모의한다. 잔향음의 계산은 송신기 (transducer)와 수신기(receiver)를 하나로 하여 측정하는 단방향(monostatic)을 가정한 다. 2.3.1 체적 잔향음

체적 잔향음(volume reverberation)은 다음과 같은 과정으로 정의된다.

음원으로부터 1m 거리에서의 음의 세기(intensity) I_0 의 음원준위(source level)는 식 (18)과 같은 관계가 있다.

$$SL = 10\log_{10} \frac{I_0}{I_{ref}} \tag{18}$$

임의의 거리 *r*에서의 음의 세기와 음원으로부터 단위거리에서의 음의 세기 *I*₀의 관계 는 다음과 같다.

$$I = I_i = I_0 \cdot (\theta, \phi) \cdot \left(\frac{r_{ref}}{r}\right)^2$$
(19)

여기서 $b(\theta,\phi)$ 는 송신 빔 패턴(transmitting beam pattern)을 나타낸다. dV체적으로 부터 잔향되는 음의 세기를 dI,이라 하면,

$$dI_r = I_i \cdot s_v \cdot dV = I_0 \cdot b(\theta, \phi) \cdot \frac{r_{ref}^2}{r^2} \cdot s_v \cdot dV$$
(20)

 $b(\theta,\phi)$ 는 송신기의 방향성, s_v 는 체적산란계수(volume scattering coefficient)이고, 식 (21) 과 같이 정의된다.

$$s_v = \frac{I_r / \text{unit volume}}{I_i} \tag{21}$$

그리고 체적산란강도(volume scattering strength, S_v)는 식 (22)과 같이 표현된다.

$$S_v = 10\log_{10}(s_v) = 10\log_{10}\left(\frac{I_r/\text{unit volume}}{I_i}\right)$$
(22)

여기서 체적산란강도는 단위체적(1m³)당 n개의 기포(bubble/m³)를 포함하는 산란강도로, 단위체적에 존재하는 산란체의 밀도와 밀접하게 관련된다. *dV*에 의한 수신기(receiver) 위치에서 음향의 세기는

$$dI_{rev} = dI_i \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \phi)$$

$$= I_0 \cdot b(\theta, \phi) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot s_v \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \phi) \cdot dV$$
(23)

여기서 $b^{'}(\theta,\phi)$ 는 수신 빔 패턴(receiver beam pattern)을 나타낸다. 전체 체적에 대한 수신기에서 음의 세기는 식 (24)으로 표현된다.

$$I_{rev} = \int dI_{rev}$$

$$= \int I_0 \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{b}'}{r^4} \cdot s_v \cdot dV$$

$$= I_0 s_v \int \frac{\mathbf{b} \cdot \mathbf{b}'}{r^4} dV$$
(24)

여기서 dV는 Fig. 2-11에 의하여 식 (25)과 같이 쓸 수 있다.

$$dV = \frac{c\tau}{2}r^2d\Omega \tag{25}$$

여기서 Ω 는 Solid angle을 나타내는데, 무차원으로 2차원에서 radian이 각도를 나타내 듯이 공간에서 어떠한 면적이 차지하는 각도를 나타내며, 식 (26)으로 정의 된다.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \tag{26}$$



Fig. 2-11 체적 잔향음의 단위체적



Fig. 2-12 solid angle에 대한 개념도

예를 들어 Fig. 2-12 과 같이 구형 좌표계인 경우 solid angle은 식 (27)과 같이 표현된 다.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{1}{r^2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} r d\theta \cdot r \cos\theta \cdot d\phi$$
(27)

무지향성 음원(omnidirectional source)인 경우 구의 표면적은 $4\pi r^2$ 이므로 식 (27)으로 부터 Ω 는 $4\pi r$ 된다.

Solid angle의 개념을 사용하여, 식 (24)에 식 (25)을 대입하면,

$$I_{rev} = \frac{I_0 s_v c\tau}{2r^2} \int b \, \dot{b} \, d\Omega \tag{28}$$

여기서 유효 등가 빔 폭(equivalent solid angle, Ω_e)은 식 (29)과 같이 정의한다.

$$\Omega_e = \int b \, \dot{b} \, \mathrm{d}\Omega \tag{29}$$

식 (13)을 사용하면 체적 잔향음의 세기는 식 (30)과 같이 표현된다.

$$I_{rev} = \frac{I_0 s_v c\tau}{2r^4} \Omega_e r^2 \tag{30}$$

체적 잔향음 준위(volume reverberation level, RL_v)은 식 (31)으로 나타내며,

$$RL_{v} = 10\log_{10} \left(\frac{I_{0}s_{v}c\tau}{2r^{4}} \Omega_{e}r^{2} \right)$$

$$= 10\log_{10} \frac{I_{0}}{I_{ref}} - 10\log_{10} \frac{r^{4}}{r_{ref}^{4}} + 10\log_{10}s_{v}r_{ref}^{3} + 10\log_{10} \left(\frac{c\tau\Omega_{e}r^{2}}{2r_{ref}^{3}} \right)$$
(31)

식 (32)으로 표현된다[7].

$$RL_v = SL - 2TL + S_v + 10\log_{10}V \tag{32}$$

따라서 기포항적의 음향산란신호 모델에 적용된 체적 잔향음은 식 (33)과 같다.

$$RL_{v} = SL - 2TL + S_{v} + 10\log_{10}V + BPT + BPR$$
(33)

*RL_v*는 체적 잔향음 준위(dB re 1μpa), *SL*은 음원준위(dB re 1μpa & 1m), *TL*은 확
산 손실과 흡수손실의 합으로 나타낸 전달손실(dB re 1m), *S_v*는 단위체적당 체적산란
강도(dB re 1m³), *V*은 체적(m³) 그리고 *BPT/BPR*은 송/수신 빔 패턴(dB)이다.



가. 체적산란강도

해수 중에는 플랑크톤, 물고기 등과 같은 생물학적 부유물이 존재한다. 이러한 해수 체적 내의 부유물은 산란체로 작용하여 음파의 산란에 큰 영향을 미쳐 표적 탐지에 장 애요소가 된다. 이 부유물들에 의해 음파가 산란되어 되돌아 올 때 체적 잔향음의 세기 는 수중 산란체의 밀도(density)와 밀접하게 관련되는 체적산란강도(volume scattering strength, *S_n*)에 의해 결정된다.

기포항적이 존재 하지 않는 경우는 일반적으로 해상풍에 의해 발생된 해수표면의 큰 기포 또는 생물체의 주간이동(diurnal movement)에 의해 영향을 받지만, 기포항적에 의한 미세기포가 발생한 경우 다양한 크기를 가지는 기포들의 공진에 의해 음향산란에 큰 영향을 끼친다. 수상 운동체의 이동으로 발생되어 선체 후방에 오랜 시간동안 잔존 하여 다양한 크기로 분포하는 기포의 개체 수에 의한 체적산란강도는 식 (34)과 식 (35)와 같이 정의된다[7].

단일 기포에 대한 표적강도(Target Strength, TS)는 식 (34)과 같이 표현된다.

$$TS = 10\log_{10}\frac{\sigma_s}{4\pi} = 10\log_{10}\frac{a^2}{(f_r^2/f^2 - 1) + \delta^2}$$
(34)

따라서, 해수의 단위체적(1m³)에 산란단면이 σ_s 인 n개의 기포(bubble/m³)를 포함하는 체적산란강도는 식 (35)으로 표현된다.

$$S_v = 10\log_{10}\frac{n\sigma_s}{4\pi} = 10\log_{10}\frac{na^2}{(f_r^2/f^2 - 1) + \delta^2}$$
(35)

여기서 a는 기포반경(m), f_r 은 공진주파수(Hz), 감쇠 상수(δ)는 2.1.3절에서 설명한 바 와 같이 열전도성, 전단 점성률, 재방사에 의한 합으로 계산된다.



Fig. 2-14 체적 산란강도

Fig. 2-13 은 중심주파수가 500kHz이고, 기포반경이 8~200μm인 단일 기포의 경우 표적강도를 나타내며, Fig. 2-14 는 단위체적(1m³)당 산란단면이 σ_s인 100개의 기포를 포함하는 경우 각각의 기포반경에 따른 체적산란강도를 나타낸다.

나. 체적의 적분

체적 잔향음은 센서의 빔 폭에 의해 형성된 음파의 체적을 수치적으로 적분하여 계 산된다. 무지향성인 경우 음파의 체적은 Fig. 2-15 과 같이 형성되며, Fig. 2-9에서 설 명한 바와 같이 전달거리 r, 빔 폭의 수직/수평각 φ 과 θ 의 증가율에 의해 해양 공간상 에 균등하게 분할된 다수의 단위체적(cell)을 모두 적분하며, 그 체적은 식 (36)으로 계 산된다.



Fig. 2-15 구형확산에 의한 음파의 체적분할

2.3.2 해수면 잔향음

해수면 잔향음(sea-surface reverberation)은 해수면의 거칠기(roughness)와 해수면 아래에 존재하는 기포에 의한 산란에 의해 발생되는 것으로 알려져 있으며, 해수면에 도달한 입사파의 음의 세기와 입사된 음파가 해수면의 산란체에 의한 산란으로 방사되 는 음파의 세기의 비로 계산된다.

앞 절에서 설명한 체적 잔향음의 체적 dV 대신 음파가 접하는 해수면 입사면적 dA으로 바꾸어 식 (37)과 같이 단위면적에서 발생되는 음파의 세기를 계산한다.

$$dI_{rev} = dI_i \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \phi)$$

$$= I_0 \cdot b(\theta, \phi) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot s_s \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \phi) \cdot dA$$
(37)

식 (37)에서 S_A 는 해수면에서의 산란계수(scattering coefficient)를 나타내며, 음파가 입 사되는 해수면의 전체면적에서 발생되는 수신기 위치에서 음파의 세기는 식 (38)과 같 이 표현된다.

$$I_{rev} = \int dI_{rev} = \frac{I_0 s_s}{r^4} \int b \cdot b' dA$$
(38)

(39)

식 (38)에서 음파의 입사면적(differential ensonified area) dA는 식 (39)과 같으며, Fig. 2-16 으로 표현된다. 여기서, ϕ 는 Horizontal angle을 나타낸다.



Fig. 2-16 해수면 잔향음의 입사면적

식 (39)을 식(38)에 대입하면,

$$I_{rev} = \frac{I_0 s_s}{r^4} \frac{c\tau}{2} r \int_0^{2\pi} b(\theta, \phi) b'(\theta, \phi) \mathrm{d}\varphi$$
(40)

여기서 음향센서의 방향이 수평에 가깝다고 가정하면 식 (40)의 적분은 다음과 같은 유효 등가 빔 폭(equivalent beam width, ϕ_e)으로 표현된다.

$$\phi_{e} = \int b(0,\phi)b'(0,\phi)\mathrm{d}\phi \tag{41}$$

이는 빔 패턴이 1인 경우로 환산한 유효 빔 폭(beam width)과 같고, 무지향성 음원 (omnidirectional source)의 경우 $\phi_e = 2\pi$ 가 된다.

해수면 잔향음의 세기는 식 (42)와 같이 표현된다.

$$I_{rev} = \frac{I_0}{r^4} \cdot s_s \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot r \cdot \phi_e \tag{42}$$

해수면 잔향음 준위(sea-surface reverberation, RL_s)은 식 (43)과 같이 나타내며,

$$RL_{s} = 10\log_{10} \left(\frac{I_{0}s_{s}c\tau}{2r^{4}} \phi_{e}r \right)$$

$$= 10\log_{10} \frac{I_{0}}{I_{ref}} - 10\log_{10} \frac{r^{4}}{r_{ref}^{4}} + 10\log_{10}s_{s} + 10\log_{10} \left(\frac{c\tau\phi_{e}}{2}r\right)$$
(43)

식 (44)으로 표현된다[7].

$$RL_s = SL - 2TL + S_s + 10\log_{10}A \tag{44}$$

따라서 기포항적의 음향산란신호 모델에 적용된 해수면 잔향음은 식 (45)과 같다.

$$RL_s = SL - 2TL + S_s + 10\log_{10}A + BPT + BPR$$

$$\tag{45}$$

 RL_s 는 해수면 잔향음 준위(dB re 1µpa), SL은 음원준위(dB re 1µpa & 1m), TL은 확산 손실과 흡수손실의 합으로 나타낸 전달손실(dB re 1m), S_s 는 단위면적당 해수면 산란강도(dB re 1m²), A은 입사면적(m²), ϕ_e 는 유효 수평각(equivalent azimuthal angle) 그리고 BPR/BPR은 송/수신 빔 패턴(dB)이다.

가. 해수면산란강도

해수면 잔향음은 해수면의 거칠기(roughness), 해상풍의 풍속(wind speed), 그리고 송신음원의 주파수(frequency) 등의 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는 해수면산란강도 (sea-surface scattering strength, *S_s*)에 따라 그 신호의 세기가 달라진다고 알려져 있다. 해수면의 경우 시·공간적인 변화가 심한 환경으로 해수면에서의 음파 간섭현상을 설명 하는데 여러 가지 요인들이 작용하기 때문에 많은 어려움이 따른다[17].

본 논문에서는 Chapman-Harris의 해수면산란강도 실험식을 적용하였으며, 식 (46) 과 같 이 계산된다. 여기서, $\beta = 158(vf^{1/3})^{-0.58}$ 으로 v는 풍속(m/s), θ 는 입사각(grazing angle), f는 송신음원의 주파수(Hz)를 나타낸다[18].

$$S_s = 3.3\beta \log_{10} \left(\frac{\theta}{30}\right) - 42.4 \log_{10} \beta + 2.6 \tag{46}$$

Chapman-Harris의 해수면산란강도 실험식은 저주파수의 산란인 경우 사용되는 산란 강도 모델로 본 논문에서 제시하는 400kHz 이상의 고주파수 해수면 산란모델에 적용 한 경우 실제로 많은 차이를 나타내는 단점을 가지고 있다. 그러나 고주파수 산란이 경 우 적용될 수 있는 실험식에 대한 문헌이 부족하여 식 (46)을 그대로 적용하였다. Fig. 2-17 은 Chapman-Harris의 해수면산란강도 실험식 식 (46)을 사용하여 주파수가 500kHz이고 입사각이 60~90°인 경우의 해수면산란강도를 나타낸다.



Fig. 2-17 입사각에 따른 해수면 산란계수(좌)와 산란강도(우)

나. 입사면적의 적분

국부좌표로 정의된 음원에서 송신된 음파가 Fig. 2-18 과 같이 고정좌표로 정의된 해양공간의 해수면에 투영되는 음파의 입사면적을 적분하기 위해 2.2절의 오일러 좌표 변환을 사용하여 음파가 해수면(Z=0)에 입사될 때의 면적을 구성하는 네 개의 꼭지점 을 찾는다.



Fig. 2-18 해수면 입사면적

해수면에 투영된 입사면적은 음원의 운동상태에 따라 정사각형이 아닌 네 개의 꼭지점 을 가지는 기하학적 면적을 가지게 되어 면적의 계산이 쉽지 않다. Fig. 2-19 은 두 벡 터의 곱으로 나타내는 외적의 면적을 나타내며, 음파의 입사면적을 적분할 때 면적을 구성하는 네 개의 꼭지점의 외적으로 면적을 적분한다[19].



Fig. 2-19 입사면적의 적분
기포항적의 음향산란신호 모델에서의 체적 잔향음과 해수면 잔향음은 균일하게 나눈 단위체적(cell)에 분포하는 산란체에 의한 산란으로 신호를 모의하지만, 해수면 반사의 경우 산란과 다르게 Fig. 2-20 과 같이 송신신호 해수면에서 전반사되어 수신되는 신 호를 모의한다. 전반사의 경우 수신되는 신호는 해수면 아래 수심 d에 위치한 음원에 서 송신된 신호가 2d인 위치의 Image Source에 수신되는 신호와 같다. 따라서, 산란 (scattering)과 반사(reflection)의 기하학적 확산손실의 차이는 Fig. 2-20 과 같이 다르 게 표현된다.



(산란) (반사)

Fig. 2-20 해수면 산란과 반사

해수면 반사에서 전달손실 *TL*은 음파의 전달거리에 따른 기하학적 확산손실과 주파 수에 따른 흡수손실의 합으로 식 (47)와 같이 표현되며, 해수면 반사준위(sea-surface reflection level, *RL_r*)는 식 (48)으로 나타낼 수 있다[7].

$$TL = 20\log_{10}2d + 2\alpha d \times 10^{-3} \tag{47}$$

$$RL_r = SL - TL + S_r \tag{48}$$

여기서, RL_r 은 해수면 반사준위(dB re 1 μ pa), SL는 음원준위(dB re 1 μ pa & 1m), TL은 전달손실(dB re 1m), S_r 은 해수면 반사손실(dB re 1m), α 는 흡수손실계수 (dB/km), d는 음원의 수심(m)이다.

2.4 기포항적 음향산란신호의 모델링

2.4.1 알고리듬

잔향신호의 모의는 Fig. 2-21 과 같이 우선, 기포항적의 분포를 임의로 정의하고, 해 양공간에 분할된 단위체적 내에 무작위(random) 위상을 가지는 산란체를 배치하여 음 원까지의 거리에 따른 전달손실과 송/수신 빔 패턴을 계산한다. 다음으로 200µm의 시 간영역의 음원신호를 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리듬을 이용하여 주파수 영역 으로 변환하여 음원과 산란체 사이의 거리 차에 따른 시지연(time-delay)을 고려한 후, 이를 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 알고리듬을 이용하여 다시 시간영역의 신 호로 변환한다[20]. 마지막으로 정의된 기포항적 분포에 따른 단위체적 내의 산란체와 해수면에서의 산란강도를 결정하고, 식 (33),(45),(48)에 보이는 바와 같이 음원준위, 전 달손실, 빔 패턴 및 체적/면적을 모두 고려하여 계산된 각 산란체에 의한 신호의 크기 를 시간영역의 시지연 신호에 곱해 주어 각 산란체로 부터의 산란신호를 계산한다. 이 렇게 계산된 모든 단위체적 내에 존재하는 산란체로 부터의 산란신호는 동일 시간대에 대한 총 합산을 하여 최종 잔향신호를 모의한다.



Fig. 2-21 알고리듬 흐름도

여기서, 해양에 발생된 기포에 의한 산란신호의 모의를 위해 알고리듬의 입력변수 (Input)는 Fig. 2-21 에 보이는 바와 같이 기포항적의 공간적 분포로 설정된다. 해양에 서의 음향산란은 해수면 상태에 의해서 다양한 특성을 나타내지만, 본 논문의 주 관심 사인 미세기포로 구성된 기포항적에 의한 음향산란은 수상 운동체에 의해 발생되는 기 포의 분포변화에 따른 체적산란강도에 크게 의존하여 다르게 나타난다. 체적산란강도는 시간(*t*), 수심(*z*), 기포반경(*φ*), 그리고 기포반경에 따른 산란 단면적(*σ*)과 단위체적당 기포의 개체수(*N*)의 함수로 식 (49)으로 정의될 수 있다[10,21]. 식 (49)에서는 해양공 간의 단위체적에 존재하는 기포군의 다양한 반경과 개체수에 대한 시·공간적 변화를 고려한 적분을 통해 체전산란강도를 계산한다. 그러므로 2.3.1절에서 설명한 바와 같이 기포항적 발생 후 시간이 지남에 따라 공간적으로 다양하게 존재하는 기포반경에 대한 체적산란강도를 식 (35)을 사용하여 모두 적분하여 계산해 주어야 한다. 그러나, 현재로 써는 여러 경우의 기포발생 조건에 대해 해양공간에 발생되는 기포반경의 분포를 확인 하고, 신뢰할 수 있는 측정이 어려운 것이 현실이다.

따라서, 본 논문에서는 해양공간상에 기포항적의 분포를 수치적인 방법을 통해 균일 분포(homogeneous distribution)와 가우시안 정규분포(gaussian distribution)을 선택적 으로 정의할 수 있도록 하였고, 이를 체적산란강도로 변환하여 처리하도록 하였다.



2.4.2 신호모의

기포항적에 의해 산란되어 발생하는 잔향신호를 모의하기 위해 Fig. 2-22 과 같은 과정을 수행한다. 신호를 모의하는 과정을 시각적으로 보이기 위해 Matlab 언어를 이 용하여 GUI(Graphical User Interface)로 표현하였다.



Fig. 2-22 잔향신호 모의과정(GUI)

$$signal(t) = \sqrt{2}\sin(2 \times \pi \times f_c \times t) \tag{50}$$

송심음원의 신호는 식 (50)을 이용하여 중심주파수에 따른 정현파의 신호를 발생시 키며, 여기서 *signal(t)*는 송신신호, *f_c* 중심주파수, *t*는 시간이다. 음원신호의 발생과 해수면 아래 음원의 심도를 설정하고, 기포항적의 공간분포를 균일분포(homogeneous) 와 가우시안 정규분포(gaussian)로 가정하여 임의로 정의할 수 있도록 하였다. Fig. 2-22 에서는 체적 및 해수면 잔향음을 계산할 때의 체적과 면적의 적분을 수행하는 과 정을 보이고 있다.

2.5 음향학적 및 운동학적 모델의 모의수치실험

구현된 알고리듬으로 Table. 2-1 과 같은 조건으로 몇 가지 모의수치실험을 수행하였다.

Case		환경설정			
음향학적 모델	 1) 균일 항적분포 2) 가우시안 항적분포 	* 음원 수심 : 40m * 빔 폭 : 5.5° * Pri : 0.1sec * Frequency : 500kHz * Pulse length : 0.2msec			
운동학적 모델	어뢰의 회전운동	* <i>x</i> 축 회전운동(Rolling) 3) <i>x</i> 축 회전 운동각 φ=0° 4) <i>x</i> 축 회전 운동각 φ=20°			

Table. 2-1 모의수치실험 방법

음파의 전달거리는 75m까지 1m간격으로 75개, 수직각은 5개, 수평각 30개로 체적을 분 할하여 각 단위체적에 1개의 산란체를 균일하게 배치하였다. 각 단위체적에 1개의 산란 체를 배치하여 충분한 신호간섭(interference)이 일어나도록 하였다. 2.5.1 음향학적 모델 : 균일 분포(homogeneous distribution)

Fig. 2-23 과 같이 해수 체적 내의 항적분포가 균일한(homogeneous distribution) 경 우 잔향음 모의수치실험을 수행하였다.



균일 항적분포일 경우 형성된 음파의 체적을 적분하여 Fig. 2-24 과 같이 수치적 방법으로 잔향음 준위를 계산하였으며, 해석적인 방법과 비교하여 알고리듬을 검증하였다.



Fig. 2-24 수치·해석적 체적 잔향음

Fig. 2-25 은 수치·해석적 체적 잔향음과 해수면 잔향음 그리고 해수면 반사를 고려 하여 총 합산으로 모의한 잔향음 준위와 Time Series이다. 해수면의 위치(40m)인 0.0533sec에서 해수면 잔향신호와 반사신호가 수신되는 것을 확인하였고, Fig. 2-26 와 같이 해수면 부근에 기포에 의한 산란이 나타나지 않도록 모의된 것을 확인하였다.



Fig. 2-26 해수면 부근 산란신호

2.5.2 음향학적 모델 : 가우시안 정규분포(gaussian distribution)

Fig. 2-27 과 같이 해수 체적 내 항적이 가우시안 정규분포(gaussian distribution)인 경우 잔향음 모의수치실험을 수행하였다. 해수면 근처에 항적이 가우시안 분포인 Fig. 2-28 의 잔향음 준위를 보면, 항적이 균일한 경우와 달리 해수면 근처에 분포한 기포층 에 의한 강한 체적산란강도로 인해 높은 잔향음 준위를 나타내는 것을 확인하였다.



Fig. 2-28 잔향음 준위와 Time Series (gaussian)



Fig. 2-29 해수면 부근 산란신호

Fig. 2-28 의 Time Series의 해수면 부분의 신호를 확대해보면 Fig. 2-29 와 같다. 균일 항적분포인 경우와 달리 해수면 잔향신호와 반사신호 이전에 가우스 항적분포에 따른 강한 체적산란강도에 의한 기포의 산란신호가 모의된 것을 확인하였다. 가우시안 항적분포에 따라 공간적으로 기포가 존재하지 않는 음원에서 가까운 부분의 산란신호 와 비교해 보면 해수면 아래 기포층에서 산란된 신호의 크기(amplitude)가 크게 모의된 것을 확인하였고, 해수면 부근을 기준으로 거의 대칭적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 2.5.3 운동학적 모델

선박의 회전운동에서 좌우 흔들림(rolling)에 대해 음원이 회전운동을 하지 않는 경우 와 회전운동을 하는 경우에 형성되는 빔 패턴에 따른 기하학적 체적 및 해수면의 적분 을 비교하였다.

가. 회전운동을 하지 않는 경우(x축 회전 운동각 $\phi = 0^{\circ}$)

음원이 회전운동을 하지 않는 경우 Fig. 2-22 의 산란신호 모의과정(GUI)과 동일한 Fig. 2-30,31 과 같이 해수면을 향하여 똑바른 콘(conical) 모양으로 형성된 빔 패턴에 의해 체적과 해수면의 적분을 수행하는 것을 확인 할 수 있다.



Fig. 2-30 $(\phi, \theta, \psi) = (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 일 때 체적의 적분



Fig. 2-31 (φ,θ,ψ) = (0°,0°,0°) 일 때 해수면의 적분

나. 회전운동을 하는 경우(x축 회전 운동각 $\phi = 20^{\circ}$)

음원이 *x*축 중심의 회전 운동각이 *φ* = 20°인 경우 좌우 흔들림(rolling)이 발생하며, 이때 식 (14)에 의해 반시계 방향으로의 회전운동 성분을 정의하게 된다. 이때 빔 패턴 은 Fig. 2-32 과 같이 형성되어 음파의 입사면적은 Fig. 2-33 과 같고, 오일러 좌표 변 환에 의해 음파가 해수 중에 전파되면서 발생되는 입사체적과 면적의 기하학적 수치적 분을 수행한다.



Fig. 2-32 (φ,θ,ψ) = (20°,0°,0°) 일 때 체적의 적분



Fig. 2-33 (φ,θ,ψ) = (20°,0°,0°) 일 때 해수면의 적분

2.6 기포항적 음향산란신호의 획득

기포항적에 의한 음향산란신호를 획득하기 위해 Fig. 2-35 과 같이 간이수조실험(6회)와 해상실험(3회)을 총 9회 수행하였다. 우선 해상실험에 앞서 간이수조에서 기포크기의 측정 을 위해 다양한 크기의 구멍을 가지는 기포발생판과 전기분해 그리고 밀키스파(milky-spa) 를 사용하여 광학(optics)측정과 ABS(Acoustic Bubble Spectrometer)측정을 수행하였다. 전 기분해법과 밀키스파로 발생되는 기포의 크기는 조절할 수 없었으나, 기포발생판은 공기량 을 조절하도록 산소압 조절 공급호스를 연결하여 기포의 크기를 다양하게 하여 측정하였다. 간이수조실험에서 기포의 기초자료를 획득한 후, 음향센서(transducer)를 사용하여 기포를 발생시키고 기포에 반사된 신호와 투과한 신호를 획득하였으며, 그 후 음향수조 에서 좀 더 많은 양의 기포를 발생시켜 Fig. 2-34 과 같은 간이형 항적탐지기를 이용 하여 기포에서 산란된 신호를 확인하였다. Fig. 2-35의 빨간색으로 표시된 부분은 실제 선박을 운용한 해상실험의 내용을 나타내고 있다.



Fig. 2-34 간이형 항적탐지기

2006'	12/1	기포	"1차 해양대 해상시험"
2007'	3/29~30 4/19~20 5/3~4 5/17~18 6/7~8 9/6~7 9/11~13	기포 기포 기포 기포 기포 기포	광학 측정 및 ABS측정 ABS측정 "간이수조" 신호획득 ABS측정 "음향수조동" 주파수와 국가량 신호획득 ADP, ADV 자료 획득 "2차 해양대 해상시험" (간)명)
2008'	3/18	기포	"3차 진해만 해상시험" (주장비)

Fig. 2-35 기포항적 실험일지(06'~08')

2.6.1 2006년 12월 한국해양대학교 1차 해상실험

가. 실험 구성도

기포항적의 존재 유무에 따른 음향산란신호의 변화를 확인하기 위해 2006년 12월 1 일 한국해양대학교 앞 방파제 내에서 해상실험을 수행하였다. 실험 해역은 Fig. 2-36 과 같이 수심이 약 4m의 조류의 흐름이 없고, 파도가 잔잔한 방파제 안쪽 이였다. 항 적발생 수단으로는 소형 모터보트를 사용하여 센서가 고정된 지점을 지나도록 운항하 였다[30].



Fig. 2-36 실험 해역 및 주변 환경

음향산란신호의 획득을 위해 빔 폭이 5.5°인 RESON사의 음향센서 TC3029 2개를 사용하여 각각 송신과 수신 하였으며, 해저 바닥에 음향센서를 고정하기 위해 자체 제 작된 Fig. 2-37 의 센서 거치대를 이용하였다. 해저 바닥에 센서 거치대를 고정시키기 위해 다이버 2명이 입수하여 수평을 맞추어 고정하는 설치작업을 수행하였다.



Fig. 2-37 센서 거치대

신호를 송신하고 수신신호를 저장하기 위한 실험장비는 Fig. 2-38 과 같이 구성하였 다. 송신신호를 발생시키는 신호발생기, 신호의 파형 및 크기를 확인하기 위한 오실로 스코프, 수신신호의 필터링과 증폭을 위한 아날로그필터를 사용하였다. 그리고 수신신 호를 저장하기 위해 그래픽 소프트웨어인 NI scope를 사용하였다.



나. 신호의 획득

신호의 획득은 항적 발생 전 주변소음(ambient noise)을 측정하고 난 후, 중심주파수 가 490kHz인 200µm의 정현파 신호를 송신하여 기포항적이 존재하지 않는 경우의 수 신신호와 소형 모터보트를 이용하여 기포항적을 발생시킨 후 해수 중에 존재하는 미세 기포에 의한 음향산란신호를 10M로 표본화(sampling)하여 저장하였다. 이때 사용된 센 서의 주파수 대역에서 수신감도(Receiving Voltage Sensitivity, RVS)는 -195 dB re 1V/µpa at 1m 이며, 신호획득 당시 기상청의 관측자료에 따르면 평균풍속 2.7m/sec으 로 비교적 안정적인 해상상태였다. 2.6.2 2007년 9월 한국해양대학교 2차 해상실험

가. 실험 구성도

소형 모터보트 보다 큰 수상 운동체를 이용하여 이동속도와 이동궤적에 따라 발생되는 기포항적의 음향산란신호 획득 및 지속성을 확인하기 위해 2007년 9월 11일~13일 3일 동안 한국해양대학교 앞 해상에서 Fig. 2-39과 같이 구성하여 해상실험을 수행하였다.



Fig. 2-39 실험 방법

음향산란신호의 획득을 위한 송/수신 음향센서는 빔 폭이 5.5°인 RESON사의 TC3029 2개를 Fig. 2-34 와 같은 고정치구에 센서를 부착한 간이형 항적탐지기를 해 저면에 고정시켰다. 센서를 해저 바닥에 단단히 고정시키는 작업을 하기 위해 해양대 다이버 2명이 입수하여 수평이 맞도록 조절하고, 음향센서의 표면에 오염물질이 쌓이지 않도록 닦아내는 작업을 하였다. 항적 발생 수단으로는 총톤수(Gross T.) 26.00ton의 해양대 "아치호"를 운항하였고, 발생된 기포항적 형상의 촬영을 위해 고도 180~200m 상공에서 RC헬기를 운용하였다.

실험 방법은 Fig. 2-39 과 같이 2개의 음향센서가 고정된 바로 위 지점을 0m궤적으 로 기준하여 해수면에 부이표시하고 5m의 간격으로 이동하여 20m궤적까지 "아치호"를 반복 운항하였고, 이동속도와 궤적의 변화에 따른 음향산란신호를 획득하도록 실험을 구성하였다. 항적 발생수단으로 사용된 해양대 "아치호"의 자세한 제원은 Table. 2-2 과 같으며, "아치호" 선체 형상은 Fig. 2-40 과 같다.



Fig. 2-40 해양대 "아치호"



Table. 2-2 아치호 제원표 [참고: 해양대 홈페이지]

구분	아치호	
용도(type)	탐사 및 통선	
재질	FRP	
길이(LOA)	18.50m	
길이(LBP)	17.21m	
폭(Breadth)	4.70m	
깊이(Depth)	2.20m	
흘수(Draft)	0.85m	
총톤수(Gross T.)	26.00ton	

나. 신호의 획득

Table. 2-3 과 같이 송신신호의 중심주파수, 아치호의 이동속도와 궤적의 변화를 주 어 여러 가지 경우에 따른 음향산란신호를 획득하도록 하였다. 200μm의 정현파 신호 를 송신한 후, "아치호"의 이동으로 발생된 항적 내 미세기포에 의해 산란되어 돌아오 는 수신단의 신호를 실시간모니터링으로 확인하여 기포가 소멸되었다고 판단될 때 까 지 메 10초 간격마다 산란신호를 저장하였다. 이때 사용된 센서의 주파수 대역에서 수 신감도는 -195 dB re 1V/μpa at 1m 이고, 각 중심주파수를 100kHz로 변이(shift)시켜 500kHz로 표본화하여 저장하였다.

신호획득은 9월 11일~12일 이틀에 걸쳐 이루어졌으며, 9월 11일의 경우 실험 당시 기상청의 관측자료에 따르면 평균풍속 1.7m/sec로 잔잔한 해상상태를 유지하였고 9월 12일의 경우 전일 보다 해수면이 거칠어져 백파가 보이기는 하였으나 평균풍속이 2.8m/sec으로 비교적 안정적이였다.

주파수(kHz)	속도(kts)	궤적(m)
430	6 9 12	e VTV
450	0, 5, 12	0, 5, 10, 15, 20
470	9, 12	
470		
490	6	
510	(900rpm)	
530		
490	9	0
510	(1000)	0
530	(1300rpm)	
490	12	
510	(1000)	
530	(1600rpm)	

Table. 2-3 신호획득 방법

다. 기포항적 고공 촬영

고공촬영을 통해 Fig. 2-41 은 이동속도가 9kts일 때 촬영된 항공사진으로 보이는 바 와 같이 기포항적의 기하학적 형상을 확인하였다. "아치호"의 이동방향의 뒤를 따라 발 생하는 대표적인 항적형상인 V자 모양의 Kelvin 항적과 선체의 형상에 따른 쇄파와 프 로펠러에 의해 발생하는 항적영역을 육안으로 확인할 수 있었다[3].



Fig. 2-41 기포항적의 형상

2.7 획득신호의 분석

2.6절에서 설명한 바와 같이 간이수조에서의 광학측정과 ABS측정 그리고, 음향측정 을 통하여 기포의 기초자료 및 음향신호를 획득하였고, 실제 해상에서 3회에 걸쳐 음향 산란신호를 획득하였다. 획득신호의 분석은 Fig. 2-42 과 같이 2단계로 이루어진다. 2006년 12월 1차 해상실험의 획득신호를 분석하여 기포항적의 발생 유무에 따른 산란 신호의 변화를 확인하였고, 그 후 송신신호의 주파수, 수상 운동체의 이동속도와 궤적 의 변화를 주어 획득한 2차 해상실험의 신호분석을 통하여 기포항적의 시·공간적 분포 를 확인하였다.



2.7.1 2006년 12월 한국해양대학교 1차 해상실험

가. 기포항적 유무에 따른 산란신호 확인

Fig. 2-43 과 같이 기포항적의 발생 유무에 따른 산란신호의 변화를 확인하였다. 기 포항적이 존재할 경우 해수면 반사신호 이전에 미세기포에 의한 산란신호가 먼저 수신 되는 것을 확인할 수 있었다[30].



Fig. 2-43 기포항적 유(우)/무(좌)의 산란신호 변화

2.6.2절에서 언급한 2차 해상실험에서 획득된 실측신호 중 Table. 2-4에 나타난 신호 들을 분석하여 주파수, 궤적, 이동속도에 따른 산란신호의 변화를 비교하였다.

	주파수(kHz)	궤적(m)	이동속도(kts
분석데이터	430, 450, 470	0, 5, 10, 15, 20	9, 12

Table. 2-4 분석 데이터

획득된 실측신호의 특징은 Fig. 2-44(좌) 과 같이 해수면 반사신호가 수신되기 이전 에 수상 운동체에 의해 발생된 기포항적 내의 미세기포에 의한 산란신호가 먼저 수신 되며, 그 신호의 크기(amplitude)는 항적 발생 후 시간경과에 따른 기포군의 밀도 (density of micro-bubbles) 변화에 밀접하게 관련되어 다르게 나타난다. 즉, 기포항적 내 미세기포의 공간상 밀집정도에 따라 기포의 체적산란강도가 결정되어 산란신호의 크기 및 지속여부에 영향을 준다. 따라서, 실측신호의 잔향음 준위로부터 2.3절에서 설 명한 식 (32)을 이용하여 체적산란강도를 역산하였다. Fig. 2-44(우) 과 같이 시간을 수 심으로 환산하여 1cm간격으로 나누어 수심별 기포의 체적산란강도를 정량화하여 시간 경과에 따른 기포군의 변화를 확인하였다.



Fig. 2-44 실측신호(좌)와 역산된 산란강도(우)

가. 음향산란신호의 지속성

0~20m의 궤적 중 "아치호"가 0m 궤적을 통과했을 때 고정된 지점에서 기포항적 발 생 경과시간에 따른 음향에너지의 변화를 확인하기 위해 Fig. 2-45,46,47 과 같이 나타 내어 송신신호의 주파수와 이동속도의 변화에 따른 음향에너지의 변화를 비교하였다. 그 결과 300sec(5분)이상 음향산란이 지속되는 것을 확인할 수 있었고, 주파수에 따라 음향에너지는 다양하게 나타나며 같은 주파수의 경우 이동속도가 빠른 12kts의 경우가 9kts인 경우보다 음향에너지가 더 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 430kHz의 경우 이동속도 변화에 대해 음향에너지의 뚜렷한 차이가 나타나지 않는 이유는 "아치 호"가 0m궤적을 벗어나 운항되었기 때문이다. 빨간색 실선을 기준으로 기포항적의 발 생 전/후의 음향에너지의 변화를 확인 할 수 있고, 수심 0~1m 사이의 붉은 띠로 나타 나는 부분은 해수면 부분으로 그림마다 해수면 위치의 변화가 발생하는데 그 원인은 국립해양조사원(NORI)의 관측결과에 의하면 시간신호를 획득하는 당시의 시간차에 따 른 분당 0.3cm의 조수간만 차에 의한 해수면 수위변화의 결과이다[22].





Fig. 2-45 0m궤적에서 주파수 430kHz일 때 이동속도 9kts(좌)/12kts(우)[단위:dB]

Fig. 2-46 0m궤적에서 주파수 450kHz일 때 9kts(좌)/12kts(우)[단위:dB]



Fig. 2-47 0m 궤적에서 주파수 470kHz일 때 9kts(좌)/12kts(우)[단위:dB]

나. 수중 기포군의 시·공간적 거동

기포항적 발생 후 해수면 아래에 잔존하는 수중 기포군의 거동양상을 확인하기 위해 수심(depth)과 궤적(track)에 대한 수중의 2차원 단면으로 식 (32)으로 역산된 체적산란 강도의 변화를 10초 간격의 시간변화에 대해 Fig. 2-48,49,50,51 으로 나타내었다[23-24].



Fig. 2-48 주파수 450kHz, 이동속도 9kts(0~50sec)[단위:dB]







Fig. 2-51 주파수 450kHz, 이동속도 9kts(360~410sec)[단위:dB]

ABITIME 40

Fig. 2-48,49,50,51 은 주파수 450kHz, 이동속도 9kts인 경우 시간신호가 획득된 모든 제적 0~20m에 대한 체적산란강도의 변화를 수심과 궤적에 대해 2D interpolation(보간 법)을 하여 나타내었다. 이 체적산란강도는 수중 미세기포의 공간적 밀도(density)와 밀 접한 관계를 가지고 있으며, 이를 이용하여 기포군의 분포와 거동양상에 대한 정보를 알 수 있다. x축은 "아치호"가 지나간 궤적에 따른 거리를 나타내고, y축은 시간영역의 신호에서 해저면에 고정시킨 송/수신센서로 부터의 거리를 환산하여 수심으로 나타내 었다.

해수면은 수심 0.5~1m 부근에 약 -20dB의 강한 체적산란강도를 나타내고 기포층은 대략 -40~-60dB의 체적산란강도가 나타나는 것을 확인하였고, 해수면 아래 1.5~3m부 근까지 확산되어 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 기포항적이 발생되기 직전의 0초 인 경우 수중에 산란체가 존재하지 않는 조용한 수중환경이나 발생 후에는 해수면 아래 2~4m까지 기포가 분포하며 매우 강한산란을 일으키는 산란체(scatterer)의 역할을 하 는 것을 할 수 있다. 기포항적이 발생된 후 0~410초로 시간이 경과됨에 따라 수중 기 포군이 공간적으로 확산되면서 점점 감소되는 소멸과정을 볼 수 있었고, 이렇게 수중의 2차원 단면에 시간변화에 따른 분포를 나타내어 기포군의 움직임을 시각적으로 확인할 수 있었다. 다. 3차원의 기포군 형상

주파수 450kHz, 이동속도 9kts인 경우 역산된 기포의 체적산란강도를 이용하여 시간 변화에 따른 기포군 거동을 나타낸 수심과 궤적에 대한 수중 2차원의 각각의 단면을 모두 합하여 수중 3차원의 한 공간에 시·공간적 변화에 따른 수중 기포군의 형상을 나 타내기 위해 Fig. 2-52 과 같이 수심(depth), 궤적(track), 경과시간(elapsed time)에 대 해 나타내었다.

기포항적이 발생되고 난 후, 수심과 궤적에 따른 기포의 분포 및 확산과 소멸의 과정 을 3차원의 공간에 나타냄으로써 경과시간에 따라 거동하는 기포군의 형상을 확인할 수 있었다.



Fig. 2-52 주파수 450kHz, 이동속도 9kts 경우 기포군의 3차원 분포 [단위:dB]

2.8 자료동화를 통한 알고리듬 검증

2007년 9월 11일~13일에 수행한 해상실험의 획득신호를 분석한 결과를 기포항적 음 향산란신호 모의 알고리듬에 적용하여 검증하였다. 알고리듬의 검증을 위해 획득신호를 분석하여 정량화한 기포의 체적산란강도를 자료화(data-base)하여 모의수치실험에 활 용하였고, Fig. 2-53 과 같이 GUI를 구성하여 획득신호와 모의신호의 비교를 용이하도 록 하였다[25].



Fig. 2-53 신호모의 GUI

수중 배경소음(ambient noise)는 백색잡음(white noise)으로 가정하고 AWGN(Additive White Gaussian Noise)를 적용하여 모의된 신호에 잡음을 섞었으며, 획득신호와 모의신 호의 비교는 실험방법이 송신 주파수 450kHz, 수상 운동체의 이동속도 9kts인 경우의 Fig. 2-54,55,56,57 과 같다.



Fig. 2-54 실측신호와 모의신호 비교(0~20sec)



Fig. 2-55 실측신호와 모의신호 비교(30~50sec)



Fig. 2-56 실측신호와 모의신호 비교(60~80sec)



Fig. 2-57 실측신호와 모의신호 비교(90~110sec)

획득신호의 0~0.002sec 사이에 처음 신호가 시작하는 부분의 신호크기가 크게 나타 나는 이유는 송·수신 센서를 나란히 배치하여 송신센서의 부엽(side lobe)에 의한 수신 신호이며, 모의된 잔향신호에서 해수면 반사부분의 신호형태는 단위체적 내에 산란체를 무작위로 배치시켜 신호를 모의한 간섭현상이다. 기포층의 잔향신호 부분은 획득신호와 약간의 편차가 있었으나, 신호의 형태가 유사하게 잘 구현되는 것을 확인하였다.

Ⅲ. 난류유동 항적

3.1 항적탐지

3.1.1 항적의 정의

수중 운동체의 프로펠러 회전에 의한 선체의 이동은 후류에 물 입자의 유동으로 인 한 불 균질한 난류 경계층을 발생시키는데, 이 영역을 난류항적(Turbulence Wake)이라 고 한다. 이는 프로펠러가 회전하면서 해수의 층간 혼합에 의한 미세한 온도 변화와 염 분 등의 변화를 발생시켜 음향산란의 기작이 된다.



Fig. 3-1 PIV를 이용한 입자유동 관측

Fig. 3-1 은 2층으로 설치되어 물을 순환시켜 가동하는 회류수조(circulating water-tank)에서 PIV(Particle Image Velocimeter)를 이용하여 관측한 물 입자유동의 예로, PIV를 이용하여 프로펠러 회전으로 발생하는 음향학적 경계층으로 작용하는 유 동의 양상을 확인할 수 있다. 또한, 해수 내에 존재하게 되는 부유물질은 난류영역 내 발생한 유동을 따라 멀리 확산하게 된다.

3.1.2 난류항적의 음향산란

난류유동 항적의 탐지는 난류 경계층에 의해 발생되는 음향 도플러를 이용한다. 수중

운동체의 이동이 없는 경우 수중소음이나 부유물에 의한 일시적인 잔향음이 일어나는 반면, 프로펠러 회전에 의해 발생된 불 균질한 난류 경계층이 존재하는 경우 난류 영역 내 물 입자의 유동에 의해 지속적인 음향산란을 일으킨다. 이때, Fig. 3-2 과 같이 물 입자의 유동과 함께 난류영역에 존재하는 부유물질의 입자가 확산하게 되는데, 이러한 영역 내 입자와 음원의 상대속도에 의해 송신신호가 잔향될 때 음향 도플러현상 (acoustic doppler effect)이 발생하게 된다. 이로 인한 잔향신호의 파장변화에 따른 도 플러 변이(doppler shift)로 주파수 스펙트럼의 퍼짐(spreading)현상이 발생하게 된다.



Fig. 3-2 난류항적 탐지

수중난류에서의 음향산란은 이론과 실험적으로 다루어진 대기난류의 경향과 유사한 것으로 알려져 있다. 대기 중 난류에 의한 음향산란의 주파수 스펙트럼은 여러 가지 요 소에 의존성을 보이는데, 이는 산란체적의 길이(*L*), 음원(source)과 수신(detector)까지 의 거리, 풍속, 송신 펄스길이, 송·수신기의 방향성 등에 의해 다양한 형태를 나타낸다 [26-27]. 난류영역에서는 음파가 전파될 때 공간적인 불 균질성에 의한 산란, 난류에 의한 음파의 흡수, 그리고 시간흐름에 따른 물 입자의 유동의 상호작용으로 음향 주파 수 스펙트럼이 넓은 대역으로 에너지를 나타내는 것을 확인 할 수 있다[28-29].

따라서, 난류유동 항적의 경우 난류영역에서 산란되어 돌아오는 수신신호의 파장변화에 따른 주파수 스펙트럼이 퍼지는 정도를 이용하여 난류영역의 존재유무를 탐지하게 된다.

3.1.3 이론적 배경

가. 음향 도플러

공간상에서 음원과 표적이 상대운동을 하는 경우, 도플러 현상은 음원과 관측자가 모 두 움직이는 경우 Fig. 3-3 으로 표현할 수 있다. 음원(*SR*_{torpedo})에서 방출된 음파가 어떤 거리와 시간을 두고 움직이는 표적(TR_{target})에 도달하면 이 표적이 다시 음원의 역할을 하여 재반사·산란되어 수신단에 수신된다.



Fig. 3-3 음향 도플러 개념

이때, 음원과 표적의 상대운동에 의한 음향 도플러는 음파가 전달되는 매질이 일정하고, 표적의 이동속도가 음속에 비해 작다는 가정 하에 식 (51) 과 같이 표현될 수 있다 [12]. 음원과 표적의 운동 상태에 따라 송신신호가 산란되어 돌아올 때, 음원의 파장이 압축또는 팽창하여 단위시간 내 수신단에 들어오는 잔향신호는 송신신호의 파동수와 다르게 관측된다. 음원과 표적이 서로 가까워지는 운동 상태의 경우 파동수가 증가하고 (up-doppler), 서로 멀어지는 경우 감소한다(down-doppler).

$$f_{doppler} = \frac{1 + \frac{\overrightarrow{n \cdot v}_{torpedo}}{c}}{\frac{1 + \overrightarrow{n \cdot v}_{target}}{c}} \cdot f_0$$
(51)

$$\Delta f = f_{doppler} - f_0 \tag{52}$$

여기서 c는 음속(m/s), $f_{doppler}$ 는 변화된 주파수(Hz), f_0 는 사용주파수(Hz), Δf 는 주파 \rightarrow 수변화량(Hz), $\vec{v}_{torpedo}$ 는 음원의 속도벡터, \vec{v}_{target} 는 물 입자의 속도벡터, \vec{n} 는 시선방 향단위벡터(line of sight) 이다.

3.2 음향학적 모델

난류유동 항적 음향산란신호 모델링 알고리듬 역시 기포항적과 동일하게 해양공간을 일정한 단위체적(cell)으로 나누어 각 체적에서의 산란강도를 적용하여 산란신호를 모 의한다. 식 (15)의 Bessel 함수를 이용하여 원반형 센서의 송/수신 빔 패턴(BPT/BPR) 을 적용하였고, 식 (16)의 주파수에 따른 흡수손실과 기하학적 확산손실의 합인 전달손 실 식 (17)을 적용하였다. 난류유동 항적의 경우 수중에서 발생되어 음향산란이 일어나 는 경계면은 해수의 체적이 된다. 따라서 난류항적의 경우에는 체적 잔향음(volume reverberation)만을 고려하여 음향산란신호를 모의한다. 또한, 난류모델이 기포모델과 다른 점은 각 단위체적에서 입자의 유동속도에 의한 음향 도플러를 발생시켜 모의한 모든 시간대의 잔향신호를 합산하여 도플러 변이 정도에 따른 주파수 스펙트럼의 퍼짐 (spreading)현상을 나타내는 총 잔향신호를 모의한다.

3.2.1 체적 잔향음

2.3.1절에서 설명한 체적 잔향음 식 (33)을 사용하여 계산한다.



가. 체적산란강도

난류항적의 경우 해수의 혼합과 그로 인한 온도, 염분, 밀도변화 등에 의해 산란이 발생된다고 알려져 있으나, 이에 따른 체적산란강도에 대한 이론적인 식의 문헌이 부족 하여 수치적인 방법을 통해 균일분포(homogeneous distribution)와 가우시안 정규분포 (gaussian distribution)로 가정하였다.

3.3 난류항적 음향산란신호의 모델링

3.3.1 알고리듬

잔향신호의 모의는 Fig. 3-4 과 같이 우선, 난류항적 내의 입자속도(velocity)의 분포 편차(standard deviation)를 임의로 정의하고, 기포모델과 동일한 과정으로 해양공간에 배치된 무작위(random) 위상을 가지는 산란체에 의한 시지연 신호를 모의한다. 다음으 로 임의의 수치값으로 정의된 난류항적 분포에 따른 단위체적 내의 산란체의 산란강도 를 이용하여 식(33)에 보이는 바와 같이 음원준위, 전달손실, 빔 패턴 및 체적을 모두 고려하여 계산된 각 산란체에 의한 신호의 크기를 시간영역의 시지연 신호에 곱해 주 어 각 산란체로 부터의 산란신호를 계산한다. 이렇게 계산된 모든 단위체적 내에 존재 하는 산란체로 부터의 산란신호는 동일 시간대에 대한 총 합산을 하여 최종 잔향신호 를 모의한다.

난류모델은 기포모델과 달리 체적 잔향음만을 계산하여 잔향신호를 모의하게 되는데 여기서, 알고리듬의 입력변수(Input)는 Fig. 3-4 에 보이는 바와 같이 난류항적 내 해수 의 혼합으로 발생된 난류유동을 따라 움직이는 입자속도의 분포편차로 설정된다. 따라 서 신호 모의 시 분할된 단위체적에 배치된 각각의 산란체마다 유동속도를 무작위로 설정하여 음원과 움직이는 산란체의 상대적 운동에 따른 음향 도플러 변이를 계산하고, 도플러 변이에 따른 신호의 파동수에 변화를 주어 잔향신호를 모의하도록 하였다.



Fig. 3-4 알고리듬 흐름도
3.3.2 신호모의

난류항적에 의해 산란되어 발생되는 잔향신호를 모의하기 위해 Fig. 3-5 과 같은 과 정을 수행한다. 신호를 모의하는 과정을 시각적으로 보이기 위해 Matlab 언어를 이용 하여 GUI(Graphical User Interface)로 표현하였다.



Fig. 3-5 잔향신호 모의과정(GUI)

송심음원의 신호는 기포모델과 동일하게 식 (50)을 이용하여 중심주파수에 따른 정 현파의 신호를 발생시킨다. 음원신호의 발생과 해수면 아래 음원의 심도 그리고 난류유 동에 따른 해수의 혼합으로 발생되는 수중 난류영역의 공간분포를 원통형 분포 (cylinder)로 가정하여 임의로 정의하였다. 원통형의 난류영역 내의 입자의 속도분포는 수치적인 방법으로 가정하여 정의할 수 있도록 하였다. Fig. 3-5 에서는 체적 잔향음을 계산할 때의 체적의 적분을 수행하는 과정을 보이고 있다.

3.4 음향학적 모델의 모의수치실험

구현된 알고리듬으로 Table. 3-1 과 같은 조건으로 몇 가지 모의수치실험을 수행하였다.

Case		환경설정
난류항적 존재 無	1) 난류항적이 없는 경우	* 음파전달거리 : 35m * 빔 폭 : 5.5° * Frequency : 500kHz * Pulse length : 1msec
난류항적 존재 有	2) 일정 도플러 발생	
	3) 무작위 도플러 발생	

Table. 3-1 모의수치실험 방법

음파의 전달거리는 35m까지 20개, 수직각은 8개, 수평각은 1개로 체적을 분할하고, 충분한 신호간섭(interference)를 위해 각 단위체적에 3개의 산란체를 균일하게 배치하였다.





Fig. 3-6 모의된 잔향신호와 주파수 스펙트럼

3.4.2 원통형 난류항적(cylinderical turbulence region)

수중에 원통형(cylinder) 난류항적의 영역과 체적산란강도를 Fig. 3-7 과 같은 설정으 로 하여 난류영역 내의 입자유동이 일정한 경우(uniform)와 무작위 경우(random)의 음 향산란신호를 모의하였다.



Fig. 3-7 모의수치실험 방법

가. 일정한 도플러가 발생한 경우(uniform)

난류영역 내에 입자의 유동이 150m/s로 일정하게 움직이는 경우 발생되는 도플러 변 이를 적용하여 잔향신호를 모의하였다. Fig. 3-8 에 보이는 바와 같이 난류영역인 0.031~0.036sec에서 난류항적에 의한 산란신호가 나타나며, 입자유동에 의해 454.55kHz 로 주파수 스펙트럼이 변이되도록 모의하였다.



Fig. 3-8 모의된 잔향신호와 주파수 스펙트럼

나. 무작위 도플러가 발생한 경우(random)

난류영역 내의 입자의 유동이 무작위로 움직이는 경우 발생되는 도플러 변이를 적용 하여 잔향신호를 모의하였다. Fig. 3-9 에 보이는 바와 같이 일정한 도플러인 경우 모 의한 신호와 동일하게 난류영역인 0.031~0.036sec에서 난류항적에 의한 산란신호가 모 의된 것을 확인할 수 있으며, 일정한 도플러가 발생된 경우와는 다르게 무작위 도플러 가 발생되는 경우 다양한 주파수 성분이 발생되므로 중심 주파수인 500kHz 부근에서 도플러 변이에 의해 주파수 스펙트럼이 퍼지는 현상이 나타나는 것을 모의된 신호를 통해 확인할 수 있다.



Fig. 3-9 모의된 잔향신호와 주파수 스펙트럼

3.5 난류항적 음향산란신호의 획득

난류항적 시험은 Fig. 3-11 과 같이 간이 및 음향수조실험(3회)과 해상실험(3회)으로 총 6회의 실험을 수행하였다. 간이수조에서 난류발생기를 이용하여 유량변화에 따른 난 류유동에너지를 측정하였고, 그 후 음향수조로 실험을 확대하여 수행하였다. 음향수조 실험 수행 시 수조에 미세입자를 첨가하여 Fig. 3-10 와 같은 난류발생기와 RC 잠수함 축소모형에 의해 발생된 난류영역에서 산란되어 돌아오는 신호를 획득하였다. 2007년 11월부터는 실제 잠수함을 기동하여 발생되는 난류항적의 산란신호를 획득하기 위해 포항과 동해에서 해상실험을 수행하였다. 본 논문에서는 복잡한 해상상태에서 획득된 해상실험 신호보다 안정적인 상태에서 획득된 신호를 분석하기 위해 Fig. 3-11 에 빨 간색으로 표시한 음향수조실험을 선택하였다.



Fig. 3-10 난류항적 발생수단 : 난류발생기(좌), 잠수함모형(우)



Fig. 3-11 난류항적 실험일지(07'~08')

3.5.1 2007년 10월 음향수조실험

가. 실험 구성도

2007년 10월 23일~24일 2일간 음향수조에서 난류발생수단을 RC 잠수함 축소 모형 과 난류발생기로 하여 발생된 난류항적에서의 음향산란신호를 획득하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 3-12 과 같이 난류발생수단과 음향센서 사이의 거리를 2m, 4m, 6m, 8m으로 변화시켜 음향산란신호를 획득하였으며, 간이형 항적탐지기에 -5°/0°/5°의 각도로 기울여 음향센서 3개를 부착하여 실험하였다.



Fig. 3-12 수조실험 구성

나. 신호의 획득

Fig. 2-34 의 간이형 항적탐지기를 이용하여 송신 주파수는 1MHz와 1.5MHz를 사용 하고, 난류발생기의 프로펠러 회전수는 2000rpm, 유량은 60*l*/min 으로 하여 발생되는 난류영역에서의 산란신호를 획득하였다. 3개의 음향센서 중 0°방향 즉, 난류항적에 90° 가 되는 방향의 센서에 수신되는 신호를 NI scope를 이용하여 저장하였으며, 신호획득 시 각 중심주파수를 300kHz로 변이(shift)시켜 1.5MHz로 표본화하였다. 3.5.2 획득신호의 분석

Fig. 3-13 은 음향센서와 난류발생수단의 거리가 2m로 떨어져있는 경우 획득된 음향 산란신호의 형태이다. 수신된 신호는 0.004~0.007sec의 난류항적 산란신호와 0.013~ 0.014sec의 수조벽면 반사신호, 그리고 0.0285~0.0295sec의 다중 반사신호로 나타난다. 이 중 수조벽면에서 반사되어 돌아온 신호를 FFT분석하면 송신신호와 같은 주파수 특 성을 나타내게 되는데, 이를 난류항적 산란신호의 주파수 특성과 비교하였다.



Fig. 3-13 획득된 신호의 형태

난류항적과 90°가 되는 음향센서로부터 획득된 신호로 도플러 효과는 거의 보이지 않으나 파란색으로 나타낸 수조벽면에서 반사된 신호와 빨간색으로 나타낸 난류항적에 서 산란된 신호의 주파수 특성이 다른 것을 확인할 수 있다. 난류발생수단으로부터 2m 간격으로 점점 멀리 떨어지면서 획득된 신호일수록 난류 항적의 산란신호의 크기가 작아지게 되는데, 이를 이용하여 발생된 난류항적의 분포양 상을 확인할 수 있다. 거리 2m, 4m, 6m, 8m에서 획득된 신호를 각각 거리별로 시간에 대한 평균을 취하여 얻은 음향에너지를 거리(Distance)에 대해 2D interpolation(보간 법)을 하여 Fig. 3-14,15 와 같이 나타내었다. Width(x축)의 10m부근에 강한 음향에너 지를 나타내는 이 부분이 수조벽면을 나타내며, 3~5m부근이 난류발생수단으로부터 발 생된 난류항적에서 산란된 신호이다. 난류발생수단으로부터 거리가 점차 멀어질수록 음 향에너지가 낮아지는 것을 확인할 수 있고, 난류항적이 점차 퍼지는 것을 확인할 수 있 다. 또한, 주파수 1MHz와 1.5MHz에 따라 반응특성이 다른 것을 알 수 있다.



따른 음향에너지[단위:dB]

Fig. 3-15 1.5MHz인 경우 거리변화에 따른 음향에너지[단위:dB]

3.6 모의신호와 실측신호의 특성

3.6.1 신호 특성 비교

Fig. 3-16 는 앞에서 분석한 음향수조실험에서 획득한 난류항적 산란신호와 모의수 치실험을 통해 모의된 난류영역 산란신호의 주파수 특성을 나타낸다. (a)와 (b)의 경우 주파수 스펙트럼 퍼짐현상은 보이지 않으나 도플러 변이에 의한 주파수 특성이 유사함 을 확인하였고, (c)의 경우 무작위로 발생시킨 도플러에 의해 주파수 퍼짐현상을 확인 할 수 있었다. 따라서 복잡한 해상에서 잠수함에 의해 발생된 난류항적에 의한 산란신 호의 주파수 스펙트럼 특성이 (c)의 경우와 유사할 것으로 예측된다.



Fig. 3-16 실측신호(a)와 모의신호(b,c)의 주파수 특성 비교

Ⅳ. 결론

수중 생물체나 기계적 운동체의 움직임에 의한 음향산란은 그 대상의 특성에 따라 다르게 나타나고 수중소음 역시 마찬가지이며, 이러한 신호들은 음향소나(acoustic sonar)를 사용하여 탐지가 가능하다. 수상/수중 운동체는 선체의 형상과 크기 그리고, 이동속도 등에 따라 다양한 항적(wake)의 특성을 나타낸다. 현재 항적에 의한 음향산 란신호를 탐지(detection)하기 위해서 항적에 대한 음향의 산란특성과 실제 산란신호에 대한 활발한 연구의 필요성이 부각되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 수상/수중 운동체 의 이동으로 선체 후방에 발생되는 기포산란과 난류유동 항적에 의한 산란특성을 연구 하기 위해 실제 선박을 운항하는 해상시험과 축소모형 잠수함 및 난류발생기를 이용하 여 음향수조실험을 수행하였으며, 이론적 배경에 의한 기포항적과 난류항적의 음향산란 신호 모의 알고리듬을 구현하고 실험을 통해 획득된 자료를 분석하여 알고리듬을 검증 해 보았다.

- (1) 기포산란 항적의 경우 2006년 12월 1일 모터보트를 운항하여 획득된 실측신호로 부터 기포항적의 존재 유무에 따른 음향산란신호의 변화를 확인하였다. 그 후 2007년 9월 11~13일 26.00ton의 해양대 "아치호"를 6kts, 9kts, 12kts의 속도로 운항하여 수행된 해상시험의 음향산란신호를 분석한 결과, 음향이론에 근거하여 산란신호의 특성을 특징지을 수 있는 기포의 체적산란강도(volume scattering strength,S_v)를 정량화할 수 있었다. 체적산란강도는 수중 기포군의 밀도(density)와 밀접하게 관련되며 주파수의 변화에 대해 다양한 응답을 보였고, 동일한 주파수의 경우 선박의 이동속도가 느린 경우 보다 빠른 경우 수중 기포군에 의한 음향에너지가 강하게 나타나며 최소 300초 이상 음향산란이 지속되는 것을 확인하였다.
- (2) 난류유동 항적의 경우 2007년 10월 23일 잠수함 축소모형과 다양한 프로펠러를 장착할 수 있도록 제작된 난류발생기를 이용하여 발생시킨 난류영역 내에서 산란된 음향신호를 획득하였다. 난류발생수단과 음향센서의 거리변화에 따라 획득된 신호 로부터의 음향에너지를 이용하여 난류영역의 분포양상을 확인하였고, 주파수 분석 결과 난류영역 내에서 산란된 신호는 음향 도플러에 의해 송신주파수와는 다른 특성이 나타나는 것을 확인 하였다.

구현된 알고리듬을 검증하기 위해 기포와 난류실험 분석결과의 자료동화를 통하여 실측신호와 비교해 보았고, 모의신호의 진폭 및 주파수의 특성이 잘 구현됨을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- M. V. Trevorrow, S. Vagles, and D. M. Farmer, "Acoustical measurement of microbubble within ship wakes," J. Acoust. Soc. Am vol. 95, pp. 1922–1930, 1994.
- [2] W. Alpers, R. Romeiser, I. Hennings, "On the Radar Imaging Mechanism of Kelvin Arms of Ship Wakes," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 4, pp. 1932–1934, 1998.
- [3] J. K. E. Tunaley, E. H. Buller, K. H. Wu, M. T. Rey, "The Simulation of the SAR Image of a Ship Wake," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 29, pp. 149–156, 1991.
- [4] R. D. Peltzer, W. D. Garrett, P. M. Smith, "A remote sensing study of a surface ship wake," IEEE Oceans, vol. 17, pp. 277–286, 1985.
- [5] B. K. Choi, S. W. Yoon, "Acoustic Bubble Counting Technique Using Sound Speed Extracted from Sound Attenuation," IEEE J. Ocean. Eng., vol. 26, pp. 125–130, 2001.
- [6] P. C. Etter, Underwater Acoustic Modeling, 2rd ed., E & FN SPON, 1996
- [7] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd ed., McGraw-Hill, New York 1983.
- [8] G. C. Gaunaurd, H. Huang, "Sound scattering by bubble clouds near the sea surface," J. Acoust. Soc. Am. vol. 107, pp.95–102, 2000.
- [9] A. I. Eller, "Damping constants of pulsating bubbles," J. Acoust. Soc. Am. vol. 47, pp. 1469–1470, 1970.
- [10] C. S. Clay, H. Medwin, Acoustical Oceanography: Principles and Applications, Wiley-Interscience, New York, 1977.

- [11] 최영호, " 수중물체에 대한 음향 표적강도의 수치해석과 실험적 검증", 석사 학위 논문, 한국해양대학교, 2005.
- [12] 성낙진, "능동 표적신호 합성", 석사 학위논문, 한국해양대학교, 1994.
- [13] W. S. Hodgkiss, Jr., "An Oceanic Reverberation Model," IEEE J. Ocean. Eng., vol. OE-9, pp. 63-72, 1984.
- [14] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, 3rd ed., Wiley, 1982.
- [15] F. H. Fisher, V. P. Simmons, "Sound absorption in sea water," J. Acoust. Soc. Am. vol. 62, pp. 558–564, 1977.
- [16] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. S., Computational Ocean Acoustical(AIP series in modern acoustics and signal processing), American Institute of Physics, New York, 1994.
- [17] S. T. McDaniel, "Sea surface Reverberation : A review," J. Acoust. Soc. Am. vol. 94, pp. 1905–1922, 1993
- [18] R. P. Chapman, J. H. Harris, "Surface backscattering strengths measured with explosive sources," J. Acoust. Soc. Am. vol. 34, pp. 1592–1597, 1962.
- [19] E. Kreyzic, Advenced Engineering Mathematics, 8th ed., John Wiley & Sons. Inc, New York, 1999.
- [20] A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, Discrete-Time Signal Processing, Prentice-Hall. Inc., New Jersey, 1989.
- [21] J. C. Novarini, R. S. Keiffer, G. V. Norton, "A model for variations in the range and depth dependence of the sound speed and attenuation induced by bubble clouds under wind-driven sea surfaces," IEEE J. Oceanic. Eng., vol. 23, pp. 423-438, 1998.

[22] 국립해양조사원, "http://www.nori.go.kr/".

- [23] 지윤희, 이재훈, 김재수, 김우식, 최상문, "항적에 의한 산란 신호의 실험적 연구," 해양무기 학술대회 논문초록집, pp. 64
- [24] 이재훈, 지윤희, 김재수, 김우식, 최상문, "항적내 미세기포의 시공간적 분포," 한국 해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 2317-2318
- [25] 지윤희, 이재훈, 김재수, 김우식, 최상문, "항적 산란 신호의 이론과 모델링," 한국 음향학회 춘계학술발표대회 논문집, pp. 191-192, 2008
- [26] C. Kaufman, " Scattering of Sound by Underwater Turbulence," J. Acoust. Soc. Am. vol. 49, pp. 1971, 1970
- [27] G. H. Goedecke, R. C. Wood, V. E. Ostashev, D. I. Havelock, Chueh Ting, "Spectral broadening of sound scattered by advecting atmospheric turbulence," J. Acoust. Soc. Am. vol. 109, pp. 1923–1934, 2001
- [28] M. S. Korman, R. T. Beyer, "The scattering of sound by turbulence in water," J. Acoust. Soc. Am. vol. 67, pp. 1980–1987, 1980
- [29] M. S. Korman, R. T. Beyer, "Nonlinear scattering of crossed ultrasonic beams in the presence of turbulence in water. II: Theory," J. Acoust. Soc. Am. vol. 85, pp. 611–620, 1989
- [30] 김정해, "항적의 미세 기포에 의해 산란된 신호의 모의와 실험적 연구", 석사 학위 논문, 한국해양대학교, 2007.