

공학석사 학위논문

수중물체에 대한 음향 표적강도의 수치해석과
실험적 검증

Numerical Modeling and Experimental Verification
for Target Strength of Submerged Objects

지도교수 김 재 수

2004년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

최 영 호

本 論 文 을 崔 榮 浩 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

심 사 위 원 장 최 상 문 공학박사



심 사 위 원 최 경 식 공학박사



심 사 위 원 김 재 수 공학박사



2004년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 개 발 공 학 과

최 영 호

Numerical Modeling and Experimental Verification for Target Strength of Submerged Objects

by

Young-Ho Choi

Department of Ocean Development Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Target Strength(TS) is an important factor for the detection of target in active sonar system, so that the numerical model for the prediction of TS is widely being developed. For the frequency range of several kHz, the most important scattering mechanism is known to be the specular reflection, which is largely affected by the geometrical shape of the target. In this paper, a numerical algorithm to predict TS is developed based on Kirchhoff approximation which is computationally efficient. The developed algorithm is applied to the canonical targets of simple shape, for which the analytical solutions exist. The numerical results show good agreement with the analytical solutions. Also, the algorithm is applied to more complex scatterers, and compared with the experimental data obtained in the water tank experiment for the purpose of verifying the developed numerical model. Discussions on the effect of spatial sampling and the other aspects of the numerical modelling are presented.

목 차

| | |
|---|----|
| Abstract | I |
| 목 차 | II |
| 그 립 목 차 | IV |
| 표 목 차 | V |
| | |
| 1. 서 론 | 1 |
| 1.1. 연구 목적 및 필요성 | 1 |
| 1.2. 연구 내용 및 구성 | 2 |
| | |
| 2. 표적강도의 수치해석 이론 | 3 |
| 2.1. 표적강도의 정의 | 3 |
| 2.2. 수치해석 기법의 종류와 특징 | 4 |
| 2.3. Kirchhoff approximation | 6 |
| | |
| 3. 표적강도의 수치해석 프로그램 | 8 |
| 3.1. 프로그램 개요 | 8 |
| 3.2. 프로그램 알고리즘(Algorithm) | 10 |
| 3.2.1. 오일러 변환(euler transform) | 10 |
| 3.2.2. 음영지역 제거(shadow zone removal) | 12 |
| 3.2.2. 격자 재생성 기법(re-meshing method) | 14 |
| | |
| 4. 단위표적 이론해 검증 | 17 |
| 4.1. 구형 단위표적 | 17 |
| 4.1.1. 구형 단위표적의 이론해 | 17 |
| 4.1.2. 구형 단위표적의 이론해 검증 | 19 |
| 4.2. 원통형 단위표적 | 23 |
| 4.2.1. 원통형 단위표적의 이론해 | 23 |
| 4.2.2. 원통형 단위표적의 이론해 검증 | 25 |
| | |
| 5. 축소표적 실험 검증 | 29 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 5.1. 축소표적 실험 환경 및 축소표적 제원 | 29 |
| 5.1.1. 축소표적 실험 계측장비의 구성 | 29 |
| 5.1.2. 표적 반향음과 잔향음의 구별 조건 | 31 |
| 5.1.3. 표적 자세각의 정의 | 33 |
| 5.1.4. 축소표적의 제원 | 33 |
| 5.2. 축소표적의 근거리음장 조건 표적강도 실험검증 | 35 |
| 5.3. 축소표적의 원거리음장 조건 표적강도 수치해석 | 37 |
| | |
| 6. 요약 및 결론 | 41 |
| | |
| 참 고 문 헌 | 42 |

그림 목 차

| | | |
|-----------|--|----|
| Fig. 2.1 | 표적강도의 정의 | 3 |
| Fig. 2.2 | ka 값에 따른 음향산란 영역 | 4 |
| Fig. 2.3 | Kirchhoff approximation의 기하학적 모식도 | 7 |
| Fig. 3.1 | 수치해석기법의 개요 | 8 |
| Fig. 3.2 | UAL-TS의 구성도 | 9 |
| Fig. 3.3 | UAL-TS의 좌표계(왼손 좌표계) | 10 |
| Fig. 3.4 | UAL-TS의 오일러 변환 | 11 |
| Fig. 3.5 | 음영지역의 판단 조건 | 12 |
| Fig. 3.6 | 후면제거법에 의한 음영지역 제거 | 13 |
| Fig. 3.7 | 예외적인 음영지역 | 13 |
| Fig. 3.8 | 동일 격자 요소 내의 위상차 | 14 |
| Fig. 3.9 | 격자 재생성 조건 | 15 |
| Fig. 3.10 | 격자 재생성-이분법(bisection method) | 15 |
| Fig. 4.1 | 구형 단위표적의 거울면반사 이론 | 17 |
| Fig. 4.2 | 음향산란 영역별 표적강도 | 19 |
| Fig. 4.3 | 구형 단위표적 모델 | 20 |
| Fig. 4.4 | 구형 단위표적의 표면 격자 | 21 |
| Fig. 4.5 | 주파수별 신뢰성 검증 결과, Re-mesh알고리즘 유.무별 결과 비교 | 22 |
| Fig. 4.6 | 근거리음장과 원거리음장의 경계 | 23 |
| Fig. 4.7 | 원통형 단위표적 모델 | 26 |
| Fig. 4.8 | 구형 단위표적 원거리음장과 근거리음장에서의 반사 메커니즘 | 26 |
| Fig. 4.9 | 원통형 단위표적의 거리별 표적강도(측면: 0°) | 27 |
| Fig. 4.10 | 원통형 단위표적의 근거리음장 검증 | 28 |
| Fig. 4.11 | 원통형 단위표적의 원거리음장 검증 | 28 |
| Fig. 5.1 | 축소표적의 표적강도 실험 계측 모식도 | 29 |
| Fig. 5.2 | 신호처리 시스템의 구성도 | 30 |
| Fig. 5.3 | 계측에 사용된 신호처리 시스템 | 30 |
| Fig. 5.4 | 축소표적 실험 수평 및 수직 단면 배치도 | 31 |
| Fig. 5.5 | 표적 반향음과 잔향음의 구별 | 32 |
| Fig. 5.6 | 표적 자세각의 정의 | 33 |

| | |
|--|----|
| Fig. 5.7 축소표적의 기하학적 제원 | 34 |
| Fig. 5.8 축소표적의 근거리음장 조건 표적강도 실험검증 결과 | 37 |
| Fig. 5.9 구형과와 평면과의 음향반사 특성 | 38 |
| Fig. 5.10 원거리음장에서의 축소표적 표적강도 수치해석 | 39 |

표 목 차

| | |
|---------------------------------------|----|
| Table 2.1. 국가별 표적강도 수치해석 프로그램 | 3 |
| Table 3.1 수치해석 과정별 특징과 전용프로그램 | 8 |
| Table 4.1 구형 단위표적의 이론해 검증 환경조건 | 19 |
| Table 4.2 구형 단위표적의 격자 요소생성 조건 | 21 |
| Table 4.3 원통형 단위표적의 이론해 검증 환경조건 | 25 |

1. 서론

1.1. 연구 목적 및 필요성

전자기파와 광파는 공기 중에서의 정보전달 매체로는 유효하나 수중에서는 큰 흡수손실로 인해 전달거리가 짧아 적용분야가 극히 제한되어 있다. 이에 반해 압력파인 음파는 공기 중에서는 전자기파와 광파에 비해 응용분야가 협소하지만 수중에서는 상대적으로 흡수손실이 극미하여 현재까지 가장 유효한 정보전달 매체로 알려져 있고 여러 분야에 걸쳐 응용되고 있다.

음파는 수중통신, 수중물체 탐지, 수중측량, 해저지층 탐사 등 다양한 수중분야에 적용되고 있으며, 대부분의 경우 활발한 연구 활동과 해외 교류를 통해 국내의 기술 집적도가 높은 편이다. 그러나 수중물체 탐지분야는 군사적 특수성으로 인한 선진국들의 자국 기술력 보호로 기술 집적도가 낮은 편이어서 많은 연구가 수행되어야 하는 분야이다.

수중물체의 탐지는 수동소나(passive sonar)를 이용한 수동탐지(passive detection) 분야와 능동소나(active sonar)를 이용한 능동탐지(active detection) 분야로 나뉘어진다. 수동탐지는 수중물체가 방사하는 방사소음을 분석하여 수중물체의 방향과 신호 성분이 무엇인지를 알아내는 탐지방식이며, 능동탐지는 협대역 운용주파수를 수중에 방사하여 수중물체에 반사되어 돌아오는 반향음(echoes)을 탐지하는 방식으로 반향음의 세기에 따라 탐지여부가 결정된다.

표적강도(Target Strength: TS)는 수중물체의 음향반사정도를 나타내는 척도이므로 능동탐지의 중요한 인자(parameter)가 된다. 표적강도의 해석은 탐지의 목적에서는 수중물체를 식별과 분류에, 피탐지의 목적에서는 수중물체의 피탐지 확률의 증대에 응용된다. 이의 구체적인 응용분야로 민간 분야에서는 어군탐지, 음향측심 등이 있으며, 군사 분야에서는 수중함탐지, 수중함의 음향설계, M&S(modeling and simulation)등이 있다.

수중물체의 표적강도 해석기법은 크게 이론 해석기법, 실험 해석기법, 수치 해석기법으로 나눌 수 있으며, 각각 해석기법별 특징은 다음과 같다.

이론 해석기법은 이론적인 해가 존재하는 단순형상의 조합으로 수중물체를 근사하여 표적강도를 해석하는 기법으로 해석시간과 비용이 적게 든다는 장점이 있는 반면 대부분의 실제 수중물체가 단순형상의 조합으로 근사되지 않기 때문에 정확한 해석이 힘들며 형상과 형상의 접합부분에서 해석오차를 수반한다는 단점이 있다. 그러므로 실제 수중물체 보다는 단순한 형상의 해석이나 수치 해석기법의 검증에

적합한 해석기법이라 할 수 있다.

실험적 해석기법은 실제 수중물체를 상사조건을 만족하도록 축소하여 해상, 호수, 음향 수조등에서 실험적으로 표적강도를 해석하는 기법으로 세 가지 해석기법 중 실제 현상을 반영하여 가장 정확하게 해석하는 기법이다. 그러나 실험에 따른 시간소요가 많으며 계측장비의 구성과 축소표적의 제작에 많은 투자비용이 든다는 단점이 있다.

수치적 해석기법은 컴퓨터를 이용하여 물체 형상에 격자를 생성하고 격자의 지배방정식을 통해 표적강도를 해석하는 기법이다. 곡면을 수치적으로 근사시키기 때문에 이로 인한 수치계산 오차를 수반하며 일부 수치해석기법에서는 표적의 외부 형상만을 고려하기 때문에 표적의 표면을 투과하여 내부에서 재방사 되는 음파들의 효과를 해석하기 어렵다는 단점을 가진다. 그러나 해석시간과 비용이 적게 들며 복잡한 형상의 해석이 가능하다는 장점을 가진다.

본 논문에서 이러한 표적강도 해석기법별 장단점을 감안하여 수중물체의 표적강도 수치해석(Kirchhoff approximation)프로그램을 개발하였고 이를 이론 해석과 실험 해석에 의해 검증하였으며, 검증결과 신뢰성을 확인하였다.

1.2. 연구 내용 및 구성

본 논문은 표적강도의 수치 해석기법과 이를 검증하는 내용으로 총 6장과 부록으로 구성되었다.

1장은 서론으로 논문의 개괄적 내용과 목적 및 필요성 되었다.

2장은 표적강도의 이론, 수치 해석기법의 종류와 특징 그리고 본 논문에서 사용할 Kirchhoff approximation 특징과 유도에 대하여 소개하였다.

3장은 수치 해석 프로그램의 전체적인 개요와 프로그램의 핵심 알고리즘인 오일러 변환, 음영처리 기법, 요소 재생성 기법 소개하였다.

4장에서는 수치 해석 프로그램을 이론해가 알려진 구형과 원통형의 두 가지 단위표적에 대하여 검증하여 신뢰성을 확인하였다.

5장에서는 세 가지 형태의 축소표적의 표적강도 실험을 통해 수치 해석 프로그램을 검증하여 신뢰성을 확인하였고 원거리음장(far-field)과 근거리음장(near-field)의 표적강도에 대하여 논의하였다.

6장은 요약 및 결론으로 본 논문의 결과에 관한 논의와 추후 연구방향을 제시하였다.

2. 표적강도 수치해석 이론

2.1. 표적강도의 정의

표적강도(Target Strength, TS)란 수중 표적의 음파 반사정도를 나타내는 척도로 식(2.1)과 같이 음원으로부터 표적으로 입사하는 음파의 세기(incident intensity: $I_{inc.}$)와 표적의 음향반사 중심으로부터 단위거리(1m)에서 측정된 반사 음파(reflect intensity: $I_{ref.}$)의 세기의 비로 정의 된다[1].

$$TS = 10 \log_{10} \frac{I_{ref.}}{I_{inc.}} \Bigg|_{r=1m} \quad (2.1)$$

단, Fig. 2.1과 같이 입사하는 음파는 원거리음장(far-field)의 평면파(plane wave)조건 이고, 반사되는 음파는 구형확산(spherical spreading)을 하며, 단위거리 1m에서의 세기로 정의된다.

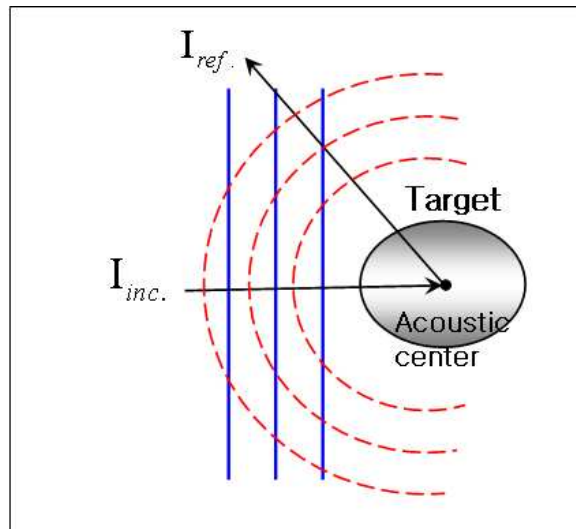


Fig. 2.4 표적강도의 정의

표적강도는 능동소나방정식(active sonar equation)인 식(2.2)의 중요한 변수로서 탐지측면에서는 수중 표적의 능동탐지(active detection)확률, 표적의 위치추정 및 표적분류의 변수가 되고, 설계측면에서는 잠수함 음향 설계 매개변수(design parameter)로 사용된다.

$$EL = SL - TL_1 + TL_2 + TS - (NL \text{ or } RL) + DI \quad (2.2)$$

식(2.2)에서 EL은 반향음 준위(Echo Level), SL은 음향축(acoustic axis)을 따라서 음원으로부터 1m 거리에서 측정된 음원준위(Sound Source Level), TL_1 과 TL_2 는 각각 음원에서 표적의 전방향전파와 표적에서 음원으로의 후방향 전파에 따른 전달손실(Transmission Loss)로 해양환경의 변화가 미소하다면 둘의 값은 같아지고 $2TL$ 이 된다. NL과 RL 각각 소음준위(Noise Level)와 복반사 준위(Reverberation Level)로써 해양환경에 따라 선택적으로 사용한다. TS는 표적강도, DI는 음원의 지향성지수(Directivity Index)이다.

2.2. 수치해석 기법의 종류와 특징

능동소나 시스템에서는 파수(k : wave number)와 표적 크기(a : target dimension)의 곱인 매개변수 ka 값에 따라 음향산란 영역이 구분되며, 음향산란 영역별로 음향산란 특성들이 달라진다. 음향산란영역은 Fig. 2.2와 같으며, ka 값의 증가에 따라 Rayleigh 영역(Rayleigh region), 공진 영역(resonance region), 물리광학 영역(physical optics region), 기하광학 영역(geometric optics region)으로 구분된다[2].

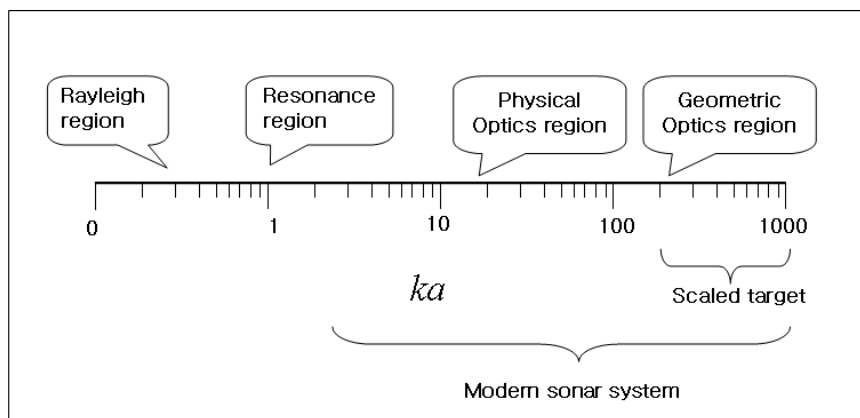


Fig. 2.2 ka 값에 따른 음향산란 영역
 k (wave number), a (target dimension)

Rayleigh 영역은 표적의 크기가 파장보다 상당히 작은 경우이고 공진 영역은 표적의 크기가 파장에 근사하는 경우이다. 물리광학 영역은 ka 가 대략 10 이상의 값을 갖는 경우로 대부분의 현대적인 소나 시스템은 이 영역에 해당된다. 기하광학 영역은 ka 가 대략 100 이상의 값을 갖는 영역으로, 해는 음선이론(ray theory)에 의해 구해진다.

현대소나 시스템의 음향산란 영역은 Fig. 2.2에서처럼 대부분이 물리광학 영역과 기하광학 영역에 속하며, 이들 영역에의 음향산란 특성은 거울면반사(specular

reflection)특성을 보인다[3]. 거울면반사 특성은 표적의 기하학적 형상에 의해 지배되기 때문에 표적의 기하학적 형상을 알 수 있다면, 수치해석을 통한 표적강도의 해석 및 예측이 가능하다.

표적강도의 수치해석은 표적의 표면을 격자 생성(mesh generation)을 통해 수치적으로 근사시키기 때문에 이로 인한 수치계산 오차를 수반한다. 또 일부 수치해석 기법에서는 표적의 외부 형상만을 고려하기 때문에 표면을 투과하여 내부에서 재방사(reradiation)되는 음파의 효과를 해석하기 어렵다는 단점도 있다. 그러나 해석시간과 비용면에서 실험적 해석에 비해 경제적이며, 복잡한 형상의 해석이 가능하다는 장점으로 인해 표적강도 해석에 많이 이용되고 있으며, 현재까지 알려진 표적강도 수치해석 기법으로는 FEM(Finite Element Method), BIE(Boundary Integral Equation), BEM(Boundary Element Method), GTD(Geometrical Theory of Diffraction), Kirchhoff approximation 등이 있다[4].

일반적으로 FEM, BIE, BEM은 저주파수 수치해석 기법으로 저주파수에서는 비교적 정확한 결과를 보이지만, 고주파수에서는 오차의 누적으로 결과의 부정확성을 보인다고 알려져 있으며, GTD와 Kirchhoff approximation은 고주파수 근사 수치해석기법으로 저주파수에는 부정확하지만 고주파수에서는 빠른 계산시간과 비교적 정확한 해를 도출한다고 알려져 있으며, Kirchhoff approximation이 GTD보다 계산시간이 빠르고 프로그램으로의 적용이 용이한 것으로 알려져 있다[4].

Table 2.1. 국가별 표적강도 수치해석 프로그램[4]

| Participants | Affiliation | Code | Method |
|--------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------------|
| R. Berg | Kockums (SE) | ARTES | Kirchhoff |
| L. Gilroy | DRDC (CA) | BASIS | GTD |
| | | AVAST | FEM/BEM |
| | | ASBIEM | BIE |
| I. Karasalo | FIO (SE) | XFEM-S | BIE Kirchhoff |
| I. MacGillivray | DSTO (AU) | Model 3 | Kirchhoff |
| M. Ter Morshuizen A. Volker | TNO-TPD (NL) | RASP | Fraunhofer/ Kirchhoff |
| H. G. Schneider Ch. Fiedler | FWG (GE) | ZIELMA SYSNOISE | Kirchhoff BEM |

※ SE(sweden), CA(canada), AU(australia), NL(netherlands),
GE(germany)

Table 2.1을 보면 현재 Kirchhoff approximation이 가장 많이 사용되는데 이는 현대 소나시스템이 고주파수 시스템이기 때문이다. 고주파수 시스템의 수치해석

에는 고주파수 근사해법인 GTD와 Kirchhoff approximation이 적합하며, 그중에서도 빠른 계산시간과 프로그램으로의 적용이 용이한 Kirchhoff approximation이 적합하다. 본 논문에서는 이러한 점에 의거하여 Kirchhoff approximation을 이용하여 표적강도 수치해석 프로그램을 개발 및 검증하였다.

2.3. Kirchhoff approximation

표적에서 반사된 반사음장은 표적 표면의 법선방향 면적 적분식인 식(2.3)의 Helmholtz-Kirchhoff 적분으로 표현된다[3].

$$U(x,y,z,t) = \frac{1}{4\pi} \int_s \left\{ U \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \right) - \left(\frac{e^{-ikr}}{r} \frac{\partial U}{\partial n} \right) \right\} ds \quad (2.3)$$

여기서 $U(x,y,z,t)$ 는 표적에서 반사된 시공간상의 음압, U 는 표적 표면에서 반사된 음압, k 는 파수, r 은 음원과 표적 격자 요소간의 거리, n 은 법선방향을 의미한다. 표면에서 반사된 음압 U 는 표적의 재질과 음원의 주파수에 따라 반사(reflection)되는 정도가 달라진다. 그렇기 때문에 식(2.4)와 같이 반사계수(reflection coefficient) R 과 표적 표면의 음압 U_s 의 곱으로 표현할 수 있다. 식(2.4)를 표적 표면의 법선 방향으로 편미분하면 식(2.5)와 같고 식(2.5)를 통해 식(2.3)은 식(2.6)과 같은 1차 Kirchhoff approximation으로 유도된다.

$$U = RU_s \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial n} = -R \frac{\partial U_s}{\partial n} \quad (2.5)$$

$$U(x,y,z,t) = \frac{R}{4\pi} \int_s \left\{ \frac{\partial}{\partial n} \left(U_s \frac{e^{-ikr}}{r} \right) \right\} ds \quad (2.6)$$

U 를 P 로 치환하고, Fig. 2.3의 기하학적 조건을 이용하면 U_s 는 근사적으로 식(2.7)과 같이 표현할 수 있으며, 식(2.7)을 이용하여 식(2.6)은 식(2.8)과 같은 Fresnel approximation으로 표현된다.

$$U_s = p_{inc} \approx \frac{p_o r_o \text{Dexp}(-ikr_s)}{r_s} \quad (2.7)$$

여기서 p_{inc} 는 음원으로부터 입사된 표적 표면의 음압, D 는 음원의 방향성(directionality), r_o 는 기준 거리(reference distance), p_o 는 기준 거리 r_o 에서의 기준 음압(reference pressure)을 의미한다.

$$p = \frac{p_o r_o R}{4\pi} \int_s D \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \frac{\exp[-ik(r_r + r_s)]}{r_r r_s} \right\} ds \quad (2.8)$$

여기서 r_s 는 음원과 표적 격자 요소간의 거리, r_r 는 수신기와 표적 격자 요소간의 거리를 의미한다.

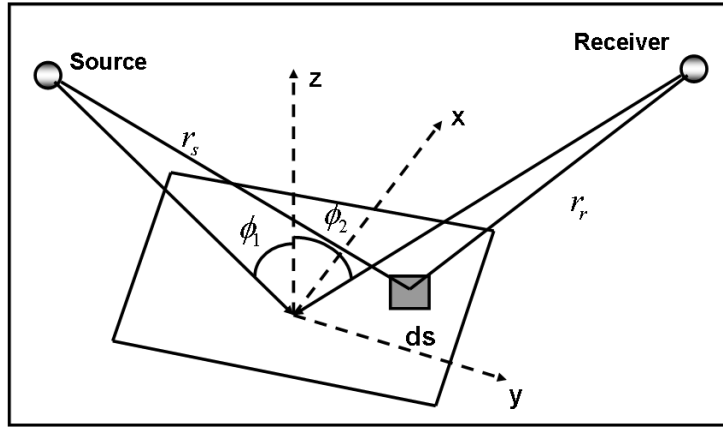


Fig. 2.3 Kirchhoff approximation의 기하학적 모식도

식(2.8)의 괄호안식을 식(2.9)의 W 로 치환하여 Fig. 2.3의 기하학적 조건을 이용하면 식(2.8)의 법선방향 편미분항은 식(2.10)과 같이 근사할 수 있으며, 이를 이용하여 식(2.8)을 최종적으로 식(2.11)과 유한근사식으로 표현할 수 있다. 식(2.11)은 식(2.8)의 수치해석적 표현으로 N 은 표적 표면 격자 요소의 개수를 의미한다.

$$W = \frac{\exp[-ik(r_r + r_s)]}{r_r r_s} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial W}{\partial n} \approx -ik(\cos \phi_1 + \cos \phi_2) W \quad (2.10)$$

$$p = \frac{p_o r_o R}{4\pi} \sum_{j=1}^N -ik(\cos \phi_1 + \cos \phi_2) \left\{ \frac{\exp[-ik(r_{rj} + r_{sj})]}{r_{rj} r_{sj}} \right\} \quad (2.11)$$

3. 표적강도 수치해석 프로그램

3.1. 프로그램 개요

수치해석과정은 Fig. 3.1과 같이 모델링(modeling), 전처리(pre-processor), 수치해석 엔진(numerical engine), 후처리(post-processor)의 과정으로 나누어지며, 각각의 과정별 특징과 전용프로그램은 Table 3.1과 같다.

Table 3.2 수치해석 과정별 특징과 전용프로그램

| 수치해석 과정 | 특징 | 전용프로그램 |
|---------|---|--|
| 모델링 | 수치해석대상이 되는 물체의 기하학적 형상 데이터를 생성하는 과정 | Solidworks, Proe, Catia, Autocad, Patran |
| 전처리 | 모델의 기하학적 체원을 바탕으로 유한개의 요소로 분할하는 과정(meshing), 모델의 표면 또는 내부에 2차원 또는 3차원의 유한 요소를 생성한다. | Hypermesh, IDEAS, Patran, Gambit |
| 수치해석 엔진 | 수치해석 기법을 이용하여 모델을 해석하는 과정 | Ansys, Nastran, Sysnoise, Dytran, Abaqus |
| 후처리 | 해석된 결과를 여러 가지 방법으로 표현하는 과정 | Hypermesh, Patran, IDEAS |

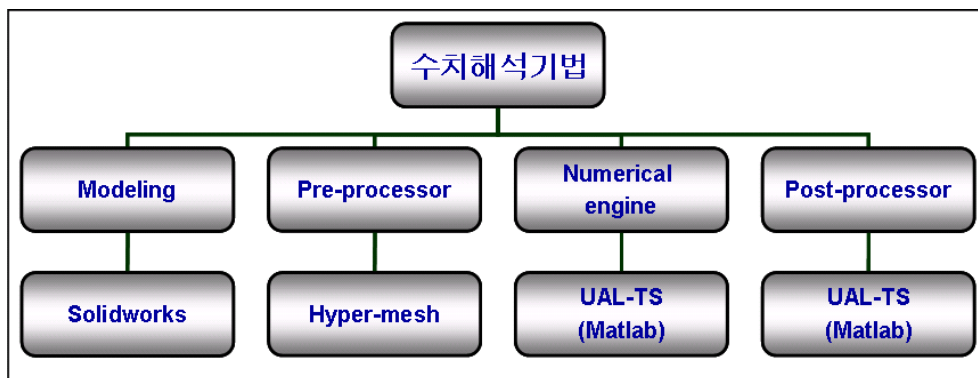


Fig. 3.1 수치해석기법의 개요

과거의 상용수치해석 프로그램은 각과정이 분리되어 과정별 전용프로그램이 있었으나 현재는 많은 기술축적에 의해 전과정을 통합 처리하는 추세로 발전하고 있다. 그러나 수치해석 엔진과 후처리 과정은 수치해석 기법에 따라 달라지지만 모

모델링과 전처리 과정의 경우 데이터 처리 규약만 다를 뿐 해석기법에 상관없이 동일하다. 또 모델링과 전처리 과정은 3차원의 경우 복잡한 처리과정과 수치오차의 처리 등 많은 기술 축적을 필요로 하기 때문에 전 과정을 통합처리 하는 것은 본 논문에서는 큰 의미가 없다. 그러므로 UAL-TS는 수치해석 엔진과 후처리 과정만을 포함하며, 모델링 과정은 Solidworks를 전처리 과정은 Hypermesh를 사용하였다.

본 논문에서 개발된 UAL-TS는 Kirchhoff approximation을 이용한 표적강도 수치해석 프로그램으로 수치해석 엔진과 후처리 과정을 Matlab으로 개발하였다. 일반적으로 Matlab은 행렬연산(colon operator)에 비해 루프연산의 계산속도가 취약한 것으로 알려져 있기 때문에[5] 수치해석 엔진의 대부분이 행렬연산으로 처리 되었으며, 후처리 과정은 Matlab의 내장 그래픽 함수를 사용하였다.

UAL-TS의 수치해석 엔진 구성은 Fig. 3.2와 같다. UAL-TS는 크게 데이터 변환부(data transform part)와 해석부(analysis part)로 구성되어 있다.

데이터 변환부는 전처리 프로그램인 Hypermesh의 아스키 데이터(ascii data)를 Matlab의 바이너리 데이터(binary data)변환한다. 이런 변환과정을 거치는 이유는 대용량 데이터의 경우 아스키 데이터보다 바이너리 데이터가 용량, 수치 오차, 해석 속도 부분에서 이득이 크기 때문이다.

해석부는 오일러 변환(euler transform), 음영지역 제거(shadow zone removal), 격자 재생성(re-mesh)의 세 부분으로 구성되어 있으며, 각각의 특징은 3.1.1~3.1.3절에서 설명한다.

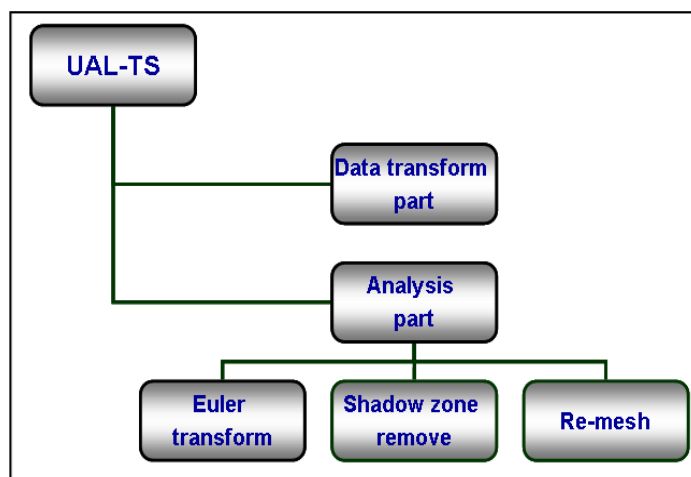


Fig. 3.2 UAL-TS의 구성도

3.2. 프로그램 알고리즘(algorithm)

3.2.1. 오일러 변환(Euler transform)

표적강도는 음원과 표적 사이의 각도에 따라 크기가 달라지기 때문에 각도별 표적강도의 해석은 큰 의미를 가진다. 각도별 표적강도 해석을 표적강도 빔패턴 (beam pattern)이라 하며, 일반적인 빔패턴 구현 알고리즘(algorithm)으로는 표적의 회전과 음원의 회전 두 가지 방법이 존재한다.

표적의 회전은 음원이 고정된 상태에서 표적이 기하학적 중심축을 기준으로 회전을 하는 방법으로 실험에서 음원의 정확한 위치 제어가 어려운 반면 표적의 회전은 용이 하기 때문에 이 방법을 사용한다. 그러나 수치해석에서는 표적의 모든 격자 요소들이 회전하여야 하므로 해석량이 많아 해석시간이 늘어나고 수치오차가 누적된다는 단점이 있다.

음원의 회전은 표적이 고정된 상태에서 표적의 기하학적 중심축을 기준으로 음원이 회전하는 방법으로 실험에서는 구현하기 어려운 방법이나 수치해석에서는 쉽게 구현 된다. 음원의 회전만을 수행하기 때문에 표적의 회전 방법에 비해 해석시간의 단축과 수치계산 오차의 축소라는 장점이 있다. 그렇기 때문에 UAL-TS는 음원의 회전방법을 사용한다.

음원의 회전 알고리즘으로는 오일러 변환(Euler transform)이 있다. 오일러 변환은 3차원 직교좌표 공간상의 회전변환 방법으로는 식(3.1)~식(3.4)와 같다. UAL-TS의 좌표계는 Fig. 3.3의 왼손좌표계를 사용한다.

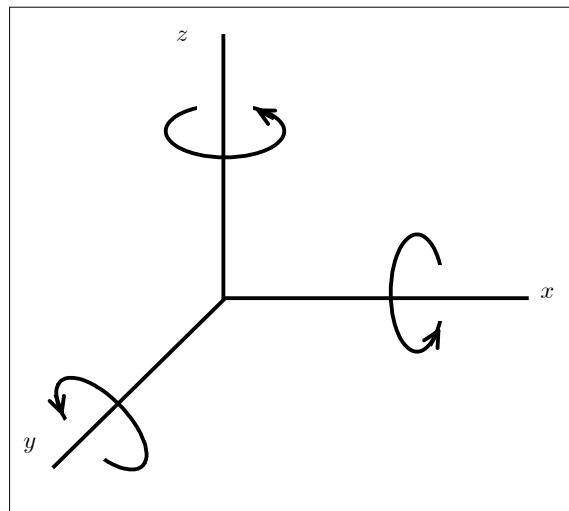


Fig. 3.3 UAL-TS의 좌표계(왼손 좌표계)

$$[T_R]_x^\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$[T_R]_y^\phi = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[T_R]_z^\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[T_R]_{ARB} = [T_R]_x^\alpha [T_R]_y^\phi [T_R]_z^\theta \quad (3.4)$$

식(3.1)~식(3.3)은 각각 x, y, z축에 대한 회전변환 행렬이다. 이를 식(3.4)와 같이 행렬연산을 하면 표적의 기하학적 중심축을 기준으로 음원을 3차원 직교좌표 공간 상의 임의의 위치로 회전변환 할 수 있다.

Fig. 3.4는 실제 프로그램상에서 표적의 기하학적 중심축을 기준 음원의 위치가 회전하는 것을 보여주고 있다. 여기서 음원은 z축을 기준으로 10간격으로 회전하고 있다.

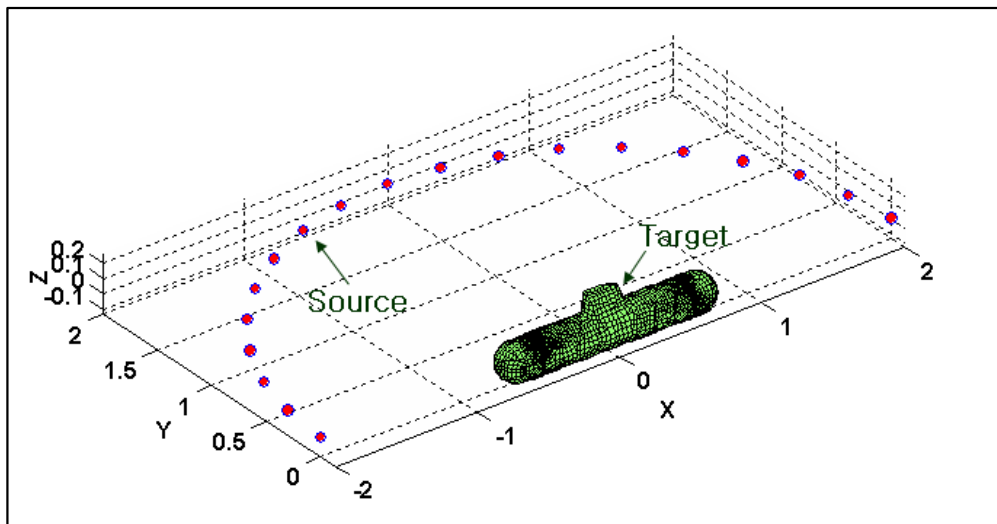


Fig. 3.4 UAL-TS의 오일러 변환

3.2.2. 음영지역 제거(shadow zone removal)

UAL-TS는 자유공간(free space)에서의 Kirchhoff approximation으로 음원과 표적의 격자 요소사이에 Direct path만이 있어 고유음선(Eigen ray)이 하나만 존재한다. 그러므로 음원에서 표적을 바라보았을 때 보이지 않는 음영지역(shadow zone)은 표적강도에 기여하지 못한다. 식(2.11)에서 \cos 항에 의해 음영지역은 미소한 값을 가지기 때문에 표적강도에 기여하지 못하지만 해석시간의 단축을 위해서 음영지역을 제거할 필요가 있다.

음영지역의 제거 방법으로는 물체공간법과(object-space method)와 영상공간법(image-space method)이 있다.[24] 물체공간법은 물체와 물체의 부분들을 비교하여 음영지역을 판별하는 방법으로 후면제거법(back-face removal)이 있다. 영상공간법은 투영(projection)면상의 각 화소(pixel)위치에서 음영지역을 판별하는 방법으로 깊이버퍼법(depth-buffer method), 주사선법(scan-line method)등이 있다. UAL-TS에서는 물체공간법인 후면제거법 알고리즘을 구현하였다.

후면제거법은 물체의 후면을 구별하는 간단한 물체공간법으로 Fig. 3.5에서처럼 음원과 표적 격자요소간의 사이각으로 음영지역을 판단한다. Kirchhoff approximation은 고주파수 근사해법으로 회절은 고려하지 않기 때문에 90° 이상일 경우 음영지역이라 판단할 수 있다.

식(3.5)는 벡터 \vec{r} 과 격자 요소의 법선벡터 \vec{n} 의 벡터내적을 이용하는 판별식으로 계산된 값이 0과 1사이값 이면 음영지역이 아니다.

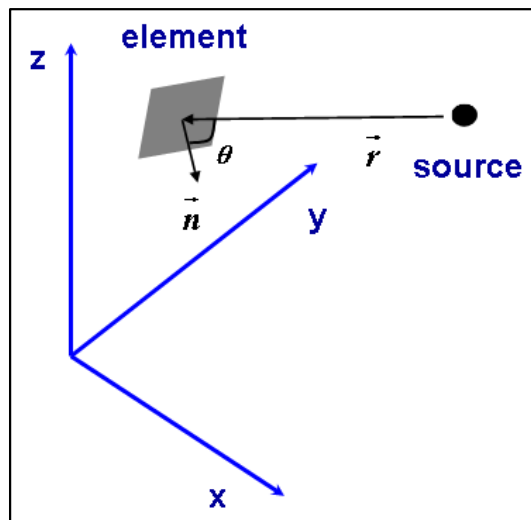


Fig. 3.11 음영지역의 판단 조건

$$0 < \cos \theta = \frac{\vec{n} \cdot \vec{r}}{|\vec{n}| |\vec{r}|} < 1 \quad (3.5)$$

Fig. 3.6은 프로그램에서 후면제거법을 사용하여 음영지역을 제거한 그림이다.

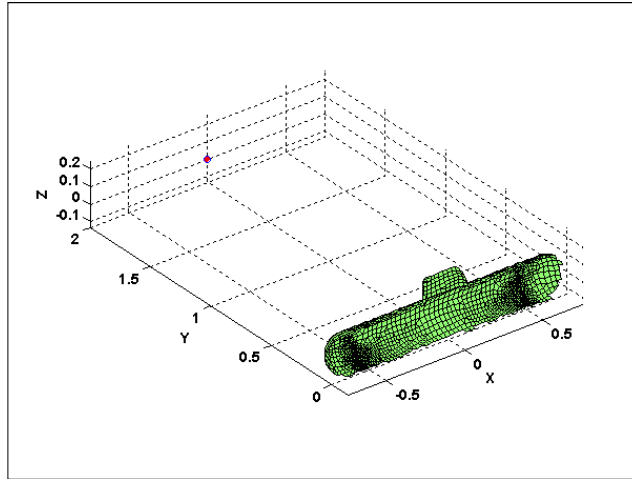


Fig. 3.6 후면제거법에 의한 음영지역 제거

후면제거법 만으로 모든 음영지역을 판별할 수는 없다. 예를 들어 Fig. 3.7에서 처럼 앞쪽의 물체에 의해 뒤쪽 물체가 보이지 않는 경우도 음영지역에 해당한다. 이러한 음영지역은 영상공간법을 사용하여 판별이 가능하나 해석량이 방대해지고 이로 인해 해석속도가 느려진다는 단점이 있다. 본 논문에서 해석하고자 하는 잠수함 또는 축소표적의 경우 Fig. 3.7과 같은 상황은 미미하여 표적강도에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 후면제거법만으로도 충분한 정확도가 확보된다. 그러므로 해석속도를 위해 후면제거법만을 사용하는 것이 타당하다.

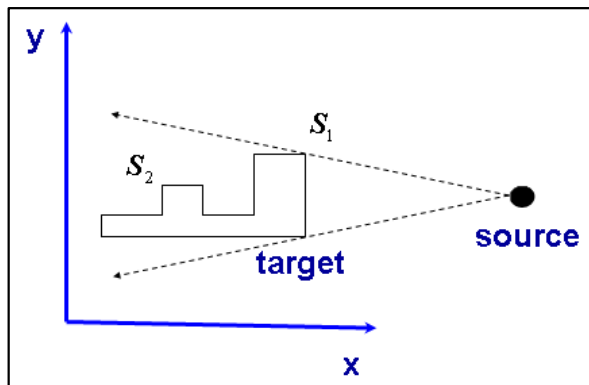


Fig. 3.7 예외적인 음영지역

3.2.3. 격자 재생성 기법(re-meshing method)

모든 수치해석기법에서 격자 요소의 생성 규칙은 매우 민감하고 중요한 문제이다. 이는 격자 요소의 형태와 크기에 따라 해석결과가 달라지고 수렴성이 달라지기 때문에 격자 요소 생성에는 수치해석기법 별로 일정한 규칙을 필요로 한다.

Kirchhoff approximation의 경우 동일 격자 요소 내에서의 위상은 같아야 한다. 이는 연속성을 가진 적분식인 식(2.8)에서 이산성을 가지는 식(2.11)로의 전환시 필요한 조건이다.

Fig. 3.8을 보면 동일 격자 요소 내의 위상차가 $\pi = \frac{1}{2}\lambda$ 일 경우 상호간섭으로 인해 파장이 상쇄된다. 이는 표적강도의 수렴성 파괴(fluctuation)로 이어져 해석치의 신뢰성을 저해한다.

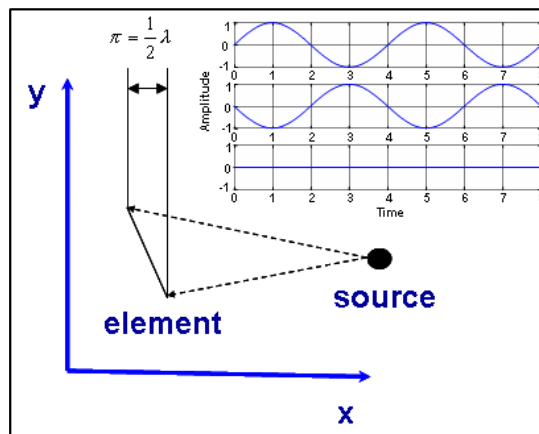


Fig. 3.8 동일 격자 요소 내의 위상차

이산계에서 실제로 동일 격자 요소 내의 위상차가 같을 수는 없다. 그렇기 때문에 어느 정도의 한계치를 두고 격자 생성 규칙을 규정하여야 한다. 일반적으로 수중 음향학에서는 $\frac{1}{8}\lambda$ 또는 $\frac{1}{16}\lambda$ 의 조건을 많이 사용하지만, 본 논문에서는 해석의 정확도와 해석시간을 고려 $\frac{1}{4}\lambda$ 조건을 사용하여 격자를 생성하였다. 이에 관한 타당성은 4.1절에서 검증하였다.

현재 대부분의 전처리 프로그램들이 처리속도를 빠르게 하고 곡면 표현오차를 줄이기 위해 비선형 격자 분할기법을 사용하고 있다. 그렇기 때문에 격자 요소의 정확한 크기 유지가 어렵고 이로 인해 해석결과의 부정확성이 발생할 수 있다. 이에 대한 해결방법으로 본 논문에서는 격자 재생성기법(re-meshing method)을 사용하

였다.

식(3.6)과 Fig. 3.9는 격자 재생성의 조건에 관한 조건식과 모식도로 하나의 격자 요소와 인접 격자 요소간의 차이로 재생성 여부를 판단한다.

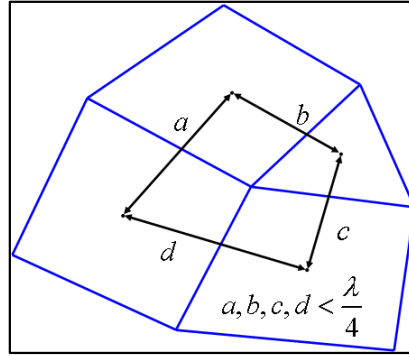


Fig. 3.9 격자 재생성 조건

$$\|\vec{a}-\vec{b}\| = \sqrt{(a_x-b_x)^2+(a_y-b_y)^2+(a_z-b_z)^2} \leq \frac{\lambda}{4} \text{ or } \frac{\lambda}{8} \quad (3.6)$$

격자 요소의 크기가 비교적 균일하다고 가정할 때 동일 격자 요소 내의 위상차는 Fig. 3.9에서 처럼 인접 격자 요소의 기하학적 중심사이의 위상차와 근사적으로 같아진다. 동일 격자 요소 내에서 위상차를 계산할 때 2개의 격자 요소를 계산하기 위해서는 2번의 연산이 필요하지만 인접 격자 요소의 위상차를 계산하면 1번의 계산으로 2개의 격자 요소를 계산할 수 있어 해석속도 면에서 유리하다.

격자 요소가 식(3.6)을 만족하지 못하는 경우 격자 재생성이 필요하다. 본 논문에서는 Fig. 3.10의 이분법(bisection method)을 사용하여 격자를 재생성 한다.

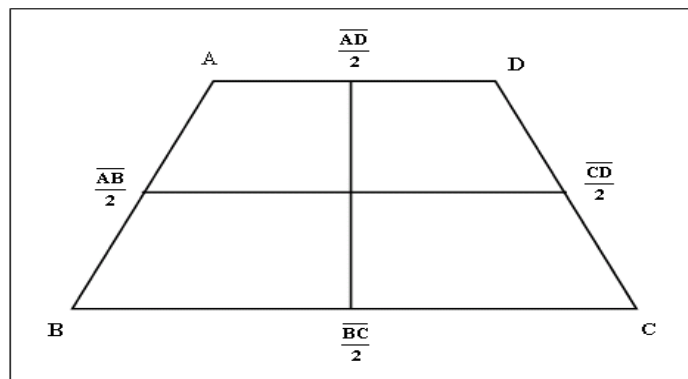


Fig. 3.10 격자 재생성-이분법(bisection method)

이분법은 2차원 격자 분할법으로 격자 요소내의 각 변의 중점을 계산하여 새로운 격자 요소를 생성하는 기법이다. 보간법(interpolation)에 의한 3차원 격자 분할법이 좀더 엄밀한 해석 결과를 도출하지만 전처리 프로그램에서 충분한 크기로 격자가 생성되어 있는 상태에서는 해석결과가 2차원 격자 분할법과 차이가 없으며 해석 속도면에서 오히려 이분법이 유리하다.

4. 단위표적 이론해 검증

4.1. 구형 단위표적

4.1.1. 구형 단위표적의 이론해

구형 단위표적에 관한 이론해는 Fig. 4.1의 거울면반사 이론에 의해 유도된다.

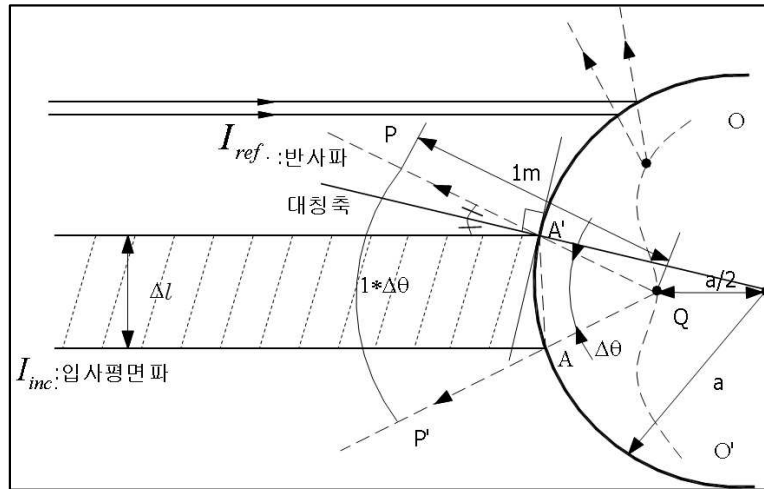


Fig. 4.1 구형 단위표적의 거울면반사 이론

Fig. 4.1에서 표적과 입사평면파의 접촉면을 길이가 Δl 인 $\overline{AA'}$ 를 직경으로 하는 원판으로 가정할 때 인텐시티는 단위면적당 파워로 정의되기 때문에 입사평면파의 파워(power)는 면적을 곱하여 식(4.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\overline{AA'}) = \frac{I_{inc} \pi (\Delta l)^2}{4} \quad (4.1)$$

입사평면파는 표적에서 반사되어 표적의 음향반사중심을 기준으로 구형확산을 한다. 반사파가 등방성(isotropic)이고 균질(homogeneous)하다면 단위거리 1m에서의 부채꼴면의 파워는 입사한 원판의 파워와 같다. 여기서 $\Delta\theta$ 를 미소하다고 가정했을 때 부채꼴 호 $\overline{PP'}$ 는 근사적으로 직선으로 가정할 수 있다. 그러므로 부채꼴면은 길이가 $1 * \Delta\theta$ 인 $\overline{PP'}$ 직경으로 하는 원판이 되고 이 원판의 파워는 식(4.2)와 같다.

$$R(\overline{PP'}) = \frac{I_{ref.} \pi (1 * \Delta \Theta)^2}{4} \quad (4.2)$$

입사파의 파워와 단위거리 1m에서의 반사파의 파워는 같아야하므로 식(4.1)과 식(4.2)를 같다고 놓고 정리하면, 식(4.3)이 된다.

$$\frac{I_{inc.} \pi (\Delta l)^2}{4} = \frac{I_{ref.} \pi (1 * \Delta \Theta)^2}{4}, \quad \frac{I_{ref.}}{I_{inc.}} = \left(\frac{\Delta l}{\Delta \Theta} \right)^2 \quad (4.3)$$

거울면반사에서 입사와 반사는 구의 법선축을 중심으로 대칭이 되며, 법선축의 연장선은 구의 원점과 만난다. 그러므로 기하학적으로 음향중심은 반경의 절반인 곳에 위치하게 된다. $\Delta \Theta$ 가 미소하다면 식(4.4)와 같이 되고 식(4.4)와 표적강도의 정의를 이용하면 식(4.3)은 식(4.5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{AA'} = \Delta l = \frac{a}{2} \Delta \Theta, \quad \frac{\Delta l}{\Delta \Theta} = \frac{a}{2} \quad (4.4)$$

$$TS = 10 \log \left. \frac{I_{ref.}}{I_{inc.}} \right|_{r=1} = 10 \log \frac{a^2}{4} \quad (4.5)$$

식(4.5)는 기하광학 영역에서의 구형 단위표적 표적강도 이론해로 이외에도 Rayleigh 영역과 물리광학 영역에서의 다음과 같은 표적강도 이론해가 존재한다[6].

$$\text{Rayleigh region: } TS = 10 \log \left(1082 \frac{a^6}{\lambda^4} \right) \quad (4.6)$$

$$\text{Physical optics region: } TS = 10 \log \left\{ \frac{a^2}{4} \left(1 - \frac{\sin 2ka}{ka} + \frac{\sin(ka)^2}{k^2 a^2} \right) \right\} \quad (4.7)$$

$$\text{Geometric region: } TS = 10 \log \left(\frac{a^2}{4} \right) \quad (4.8)$$

이 식에서 a 는 반경, k 는 파수, λ 는 파장을 의미한다. 식(4.7)은 물리광학 영역의 이론해로 ka 값이 무한대가 되면 괄호안의 분수항들이 0이되어 식(4.8)의 기하

광학 영역의 이론해와 같아진다.

각각의 식들을 이용하여 영역별 이론해를 도시하면 Fig. 4.2와 같다. 공진영역 이상에서는 식(4.7)의 결과는 식(4.8)의 결과에 수렴하지만 공진영역 이하에서는 식(4.7)은 식(4.6)과 다른 결과를 보인다. 이는 물리광학영역까지만 거울면반사 이론이 유효하기 때문이다. Kirchhoff approximation은 거울면반사 특성을 고려한 해석기법이기 때문에 Rayleigh영역은 검증에서 고려하지 않는다. 그러므로 식(4.7)을 사용하여 구형 단위표적을 검증한다.

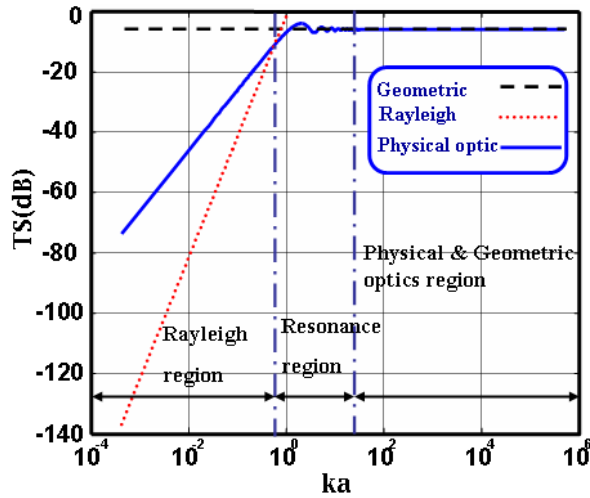


Fig. 4.2 음향산란 영역별 표적강도

4.1.2. 구형 단위표적 이론해 검증

식(4.7)에서도 알 수 있듯이 물리광학영역에서의 표적강도는 주파수의 함수이다. 그러므로 구형 단위표적은 주파수별 검증이 이루어져야 한다.

검증에 사용된 모델은 Fig. 4.3과 같으며, 검증 환경조건은 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 구형 단위표적의 이론해 검증 환경조건

| 구형 단위표적 | |
|-------------|-----------------------|
| 직경 | 8cm |
| 내부상태 | 공기 |
| 음향 매질(음속) | 청수(1481m/sec) |
| 음원의 송·수신 위치 | 구형 단위표적의 기하학적 중심에서 1m |

음향전파시 매질의 임피던스(impedance)차이는 매질의 경계면에서 음파의 투과와 반사 정도를 결정짓는다. 반사계수(reflection coefficient)는 매질 경계에서의 반사 척도를 나타내는 계수로 임피던스의 차이에 의해 결정되며, 임피던스가 상대적으로 큰 매질에서 음파가 입사되는 경우 soft boundary라 하며, 반사계수는 -1이 되고, 임피던스 상대적으로 작은 매질에서 음파가 입사되는 경우 rigid boundary라 하며, 반사계수는 1이 된다.

1과 -1의 반사계수는 모두 전반사(perfect reflection)를 의미하고, 음의 부호는 위상의 역전을 의미한다. 그러므로 두 경우 위상의 차이만 있고 표적강도의 크기는 동일하기 때문에 표적강도의 계산에서는 같은 의미를 가진다[7].

물에서 공기로 음파가 입사하는 경우 soft boundary가 되고 반사계수는 -1이 된다. 단위표적의 내부가 공기로 채워져 있을 경우도 역시 soft boundary에 해당되며, 반사계수는 -1이 된다. 식(4.7)은 강체로 가정되어 유도된 식이며, 강체일 경우 rigid boundary가 되고 반사계수가 1이 된다. 내부가 강체이거나 공기이거나 부호의 차이로 인한 위상차이만 있을 뿐 표적강도의 입장에서는 동일한 의미를 가진다.

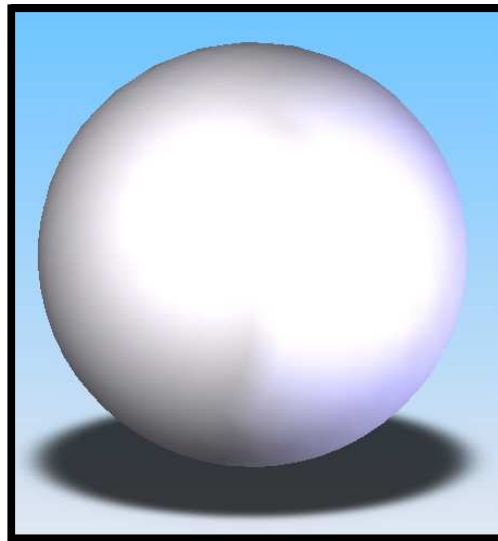


Fig. 4.3 구형 단위표적 모델

구형 단위표적 검증에서 음원의 송·수신 위치는 구형 단위표적의 기하학적 중심에서 1m거리 즉, 기하학적 확산손실이 0dB인 지점에 위치한다.

구형 단위표적의 격자 요소는 삼각형(triangle)과 사각형(rectangular)의 혼합된 격자 요소를 사용하였다. 사각형 격자 요소의 경우 삼각형 격자 요소에 비해 격자 요소수를 줄일 수 있다는 장점이 있으나 곡률표현의 한계가 있다. 반면 삼각형 격자 요소는 곡률표현에는 적합하지만 격자 요소수가 증가된다는 단점이 있다. 그렇기

때문에 단일 격자 요소를 사용하는 것보다는 두 격자 요소를 적절히 혼합하여 사용하는 것이 더욱 효율적이다.

검증에 사용된 주파수와 격자 요소의 크기 그리고 개수는 Table 4.2과 같다. 주파수는 ka 값이 물리광학영역 이상일 조건을 충분히 만족 하도록 100kHz와 200kHz의 두가지 조건으로 사용하였다. 100kHz일 때 ka 값은 34이고 200kHz일 때 ka 값은 68으로 두 경우 모두 물리광학영역 이상일 조건을 만족한다. 격자 요소의 크기는 $\frac{1}{4}\lambda$ 조건을 만족하도록 결정하였다.

Table 4.2 구형 단위표적의 격자 요소생성 조건

| 주파수 (Mesh) | 격자 요소 크기 ($1/4 \lambda$, mm) | 격자 요소 개수 |
|------------|--------------------------------|----------|
| 100kHz | 3.7 | 1916 |
| 200kHz | 1.875 | 6412 |

Fig. 4.4는 구형 단위표적을 $\frac{1}{4}\lambda$ 조건으로 100kHz와 200kHz를 만족하도록 격자 요소를 생성한 그림이다.

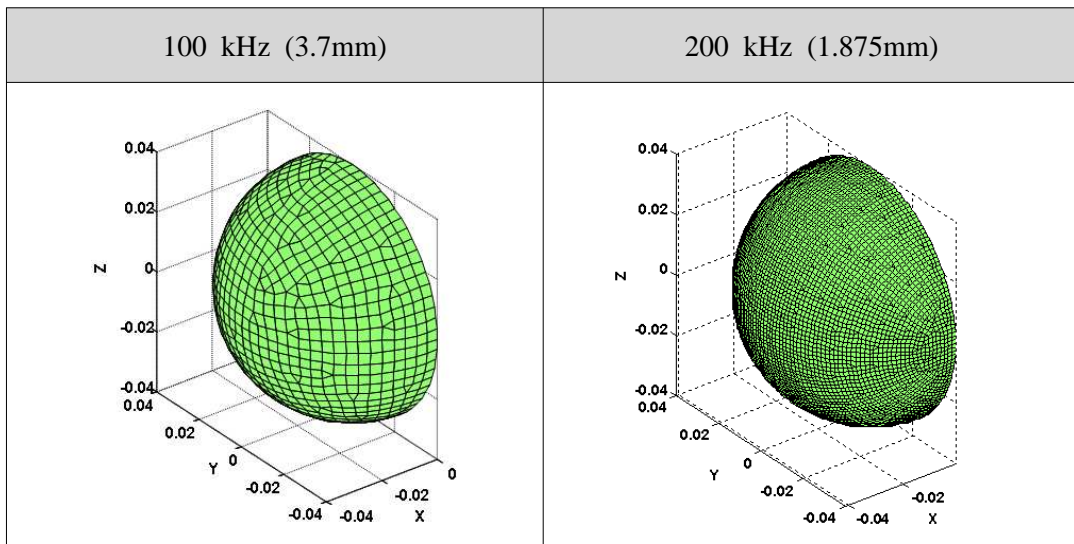


Fig. 4.4 구형 단위표적의 표면 격자

3.2.3절의 격자 재생성 기법을 검증하기 위하여 격자 재생성 기법을 사용한 경

우와 그렇지 않은 경우를 비교하였다. Fig. 4.5가 그 결과로 100 kHz일때는 200 kHz에서 200 kHz일때는 400 kHz에서 수렴성이 파괴된다. 이는 전처리 프로그램에서 $\frac{1}{4}\lambda$ 로 격자 요소생성 했기 때문에 주파수가 2배가 되는 즉, $\frac{1}{2}\lambda$ 가 되는 주파수에서 수렴성이 파괴되는 것이다.

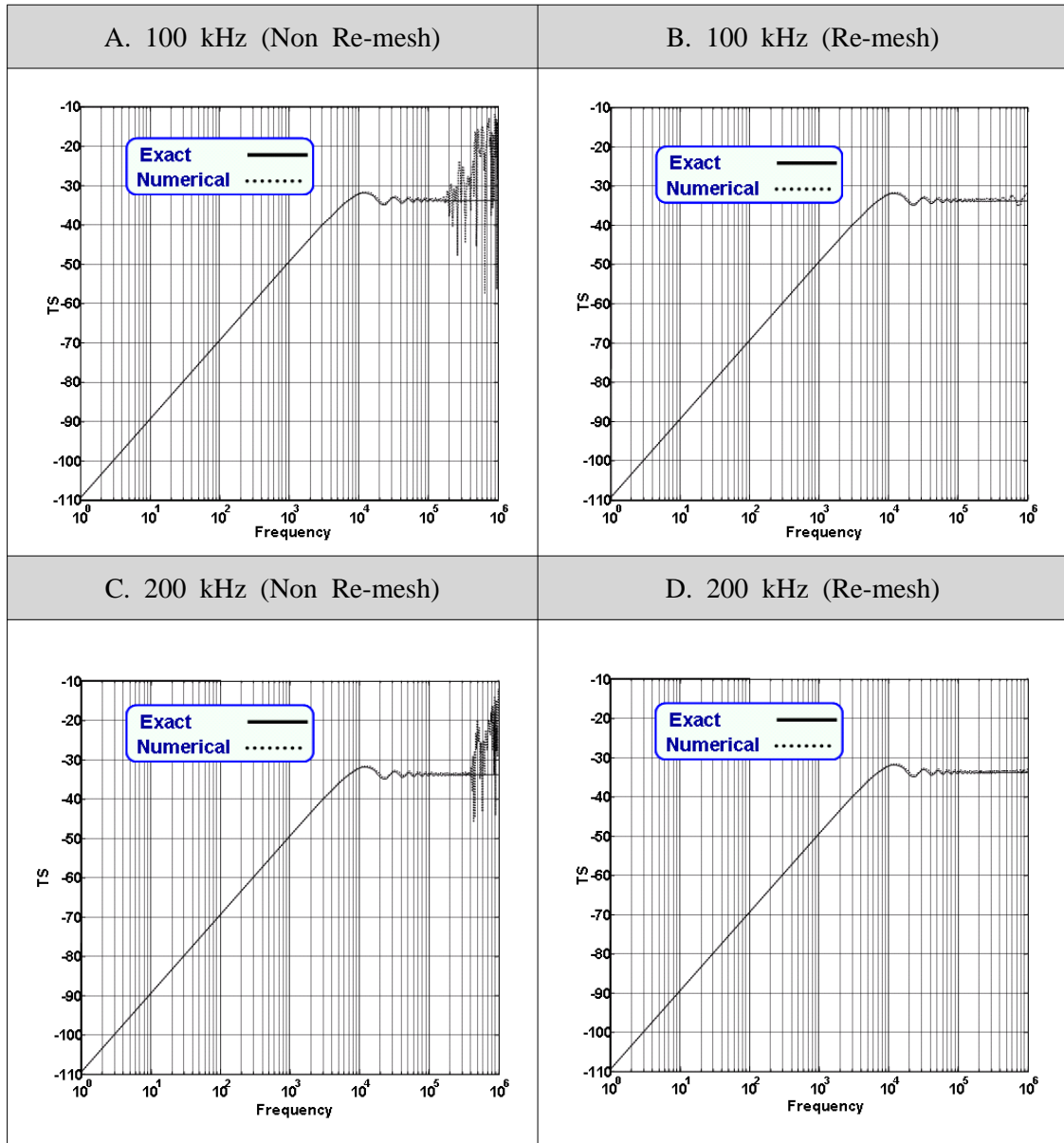


Fig. 4.5 주파수별 신뢰성 검증 결과, Re-mesh알고리즘 유.무별 결과 비교

100 kHz와 200 kHz 모두 증가되는 주파수에 따라 격자를 지속적으로 채성하였을 때 주파수의 증가에도 수렴성이 파괴되지 않는 것을 Fig. 4.5의 B와 D에서 확인

할 수 있다.

Fig. 4.5의 B와 D를 비교해 보면 B에서 500kHz부터 표적강도의 미소한 파괴 현상이 나타난다. 이는 전처리 프로그램에서의 성긴 격자 생성으로 인한 곡률 손실 문제로 격자 생성 초기에 곡률손실이 클 경우 2차원 격자 재생성 기법인 이분법으로는 이를 보상할 수 없다.

4.2. 원통형 단위표적

4.2.1. 원통형 단위표적의 이론해

음향의 전파는 근거리음장(near-field)에서는 구형전파를 하다가 일정거리를 넘게 되면 구형파의 반경이 커져 표적의 입장에서 평면파로 근사된다. 평면파가 형성되는 시점부터 원거리음장(far-field)이 형성되는데, 근거리음장과 원거리음장의 경계는 음원의 주파수와 표적의 크기에 의해 달라진다. 표적강도는 입사파를 원거리음장조건인 평면파로 가정하기 때문에 근거리음장과 원거리음장의 경계를 알아야 한다.

근거리음장과 원거리음장의 경계식은 Fig. 4.6을 이용하여 식(4.12)와 식(4.13)으로 유도된다.

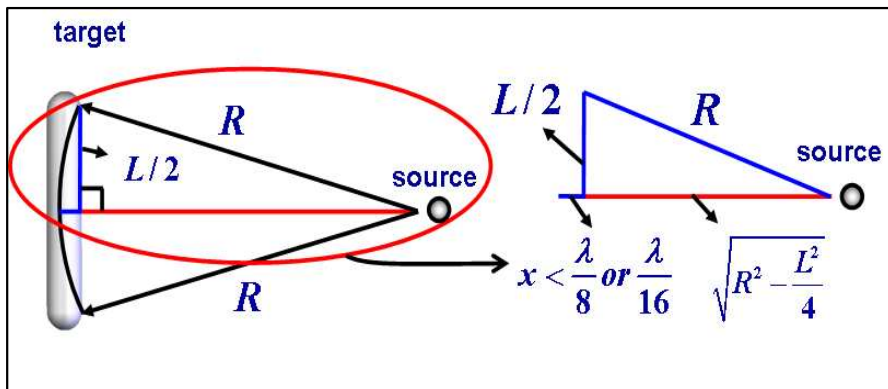


Fig. 4.6 근거리음장과 원거리음장의 경계

음원과 표적의 거리를 R , 표적의 길이를 L 이라고 했을 때 음원과 표적의 중심 즉, $\frac{L}{2}$ 이 되는 지점까지의 거리는 식(4.9)와 같다.

$$\sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} \quad (4.9)$$

Fig. 4.6에서 x 가 0에 근접할수록 구형파는 평면파에 근접한다. 그러나 x 가 완전히 0의 값을 가질 수는 없으며, 일반적으로 수중음향학에서는 $\frac{\lambda}{8}$ 조건을 사용한다. 이 조건을 사용하면 근거리음장과 원거리음장의 경계는 식(4.10)과 같은 방정식이 되고 방정식의 해는 식(4.11)과 같다.

$$R - \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} - \frac{\lambda}{8} = 0 \quad (4.10)$$

$$R = \frac{L^2 + \lambda^2}{\lambda} \quad (4.11)$$

여기서 음원이 고주파수이고 표적의 크기가 크다면 λ^2 항은 0에 근사하여 식(4.12)와 같이 일반적으로 알려진 음장 경계조건식이 된다.

$$\frac{L^2 + \lambda^2}{\lambda} \approx \frac{L^2}{\lambda} \leq R \quad (4.12)$$

좀더 엄밀한 조건인 $\frac{\lambda}{16}$ 를 사용한다면 음장 경계조건식은 식(4.13)이 된다.

$$\frac{2L^2 + \lambda^2}{\lambda} \approx \frac{2L^2}{\lambda} \leq R \quad (4.13)$$

본 논문에서는 음장 경계조건식은 $\frac{\lambda}{16}$ 조건인 식(4.13)을 사용한다. 이의 타당성은 4.2.2절에서 논의한다.

원통형 단위표적의 물리광학영역 표적강도 이론해는 식(4.14)와 식(4.17)이다. 식(4.14)는 근거리음장에서의 표적강도 이론해로 식(4.15)의 유효길이 L_e 를 고려하여야 한다. 식(4.16)는 각각 물리광학영역 조건과 근거리음장 조건식이다.

$$TS = 10 \log \left\{ \left(\frac{aL_e^2}{2\lambda} \right) \cos(\Theta) \right\} \quad (4.14)$$

$$L_e = \sqrt{[r \cdot \sin(\Theta)]^2 + \frac{\lambda r}{2}} - |r \cdot \sin(\Theta)| \quad (4.15)$$

$$ka \gg 1, \quad r < \frac{2L^2}{\lambda} \quad (4.16)$$

식(4.17)은 원거리음장에서의 표적강도 이론해이며, 식(4.19)는 각각 물리광학영역 조건과 원거리음장 조건식이다.

$$TS = 10 \log \left\{ \frac{aL^2}{2\lambda} \left(\frac{\sin\beta}{\beta} \right) \cos(\Theta) \right\} \quad (4.17)$$

$$\beta = kL \cdot \sin\Theta \quad (4.18)$$

$$ka \gg 1, \quad r > \frac{2L^2}{\lambda} \quad (4.19)$$

4.2.2. 원통형 단위표적의 이론해 검증

원통형 단위표적의 검증에 사용된 모델은 Fig. 4.7과 같으며, 검증 환경조건은 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 원통형 단위표적의 이론해 검증 환경조건

| 원통형 단위표적 | |
|---------------|---|
| 직경 & 길이 | 2cm & 40cm |
| 끝단(end-cap)형태 | 양 끝단이 열린 형태 |
| 음향 매질(음속) | 청수(1481m/sec) |
| 음원의 송·수신 위치 | 근거리음장: 기하학적 중심에서 1m 원거리음장: 기하학적 중심에서 50m |

이론해가 원통형 단위표적의 끝단(end-cap)은 고려하지 않기 때문에 검증에 사용된 모델은 Fig. 4.7과 같이 양 끝단이 열린 형태로 모델링 되었고, 음원의 주파수는 200kHz를 사용하였다. 음원의 주파수와 표적의 크기에 의해 ka 값은 340으로 계산

되며, 물리광학영역 이상에 속한다.

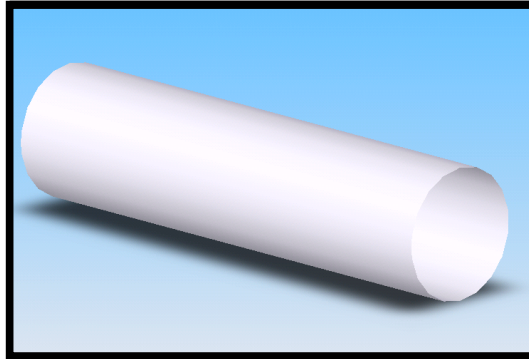


Fig. 4.7 원통형 단위표적 모델

구형 단위표적의 경우 원거리음장과 근거리음장에서의 표적강도는 차이가 없다. 이는 Fig. 4.8서도 알 수 있듯이 구형표적이 가지는 곡률로 인해 음원에서 구형 단위표적의 기하학적 중심으로 입사하는 음파의외에는 표적강도에 영향을 미치지 못하기 때문이다. 그러나 원통형 단위표적의 경우 표적강도가 길이 방향으로 입사각에 영향을 받기 때문에 원거리음장과 근거리음장에서의 표적강도는 달라진다.

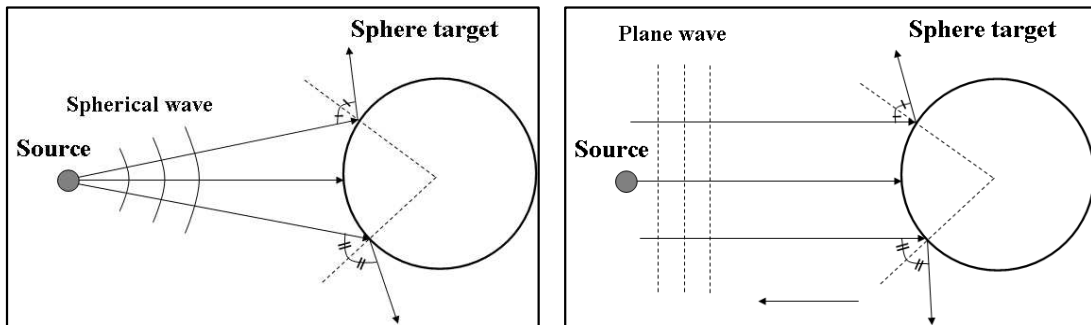


Fig. 4.8 구형 단위표적 원거리음장과 근거리음장에서의 반사 메커니즘

4.2.1절에서 원거리음장과 근거리음장의 음장 경계조건식은 식(4.12)과 식(4.13)과 같이 유도 되었다. 식(4.12)는 일반적으로 사용되는 음장 경계조건식이고 식(4.13)은 본 논문에서 제안한 음장 경계조건식이다. UAL_TS를 사용하여 Fig. 4.7의 원통형 단위표적을 산란체 측면(broadside)에서 거리를 증가시키며 표적강도를 계산한 결과가 Fig. 4.9와 같다.

모델링된 원통형 단위표적의 근거리음장과 원거리음장의 경계는 식(4.12)의 경우 21.6m로 계산되고 식(4.13)의 경우 43.2m로 계산된다. Fig. 4.9에서도 알 수 있듯이 21.6m보다는 43.2m가 좀더 엄밀한 원거리음장 조건이라 할 수 있다. 원통형 단

위표적의 검증에는 음원의 송·수신 위치를 음장 경계조건을 충분히 만족하도록 단 위표적의 기하학적 중심으로부터 50m에 위치시킨다.

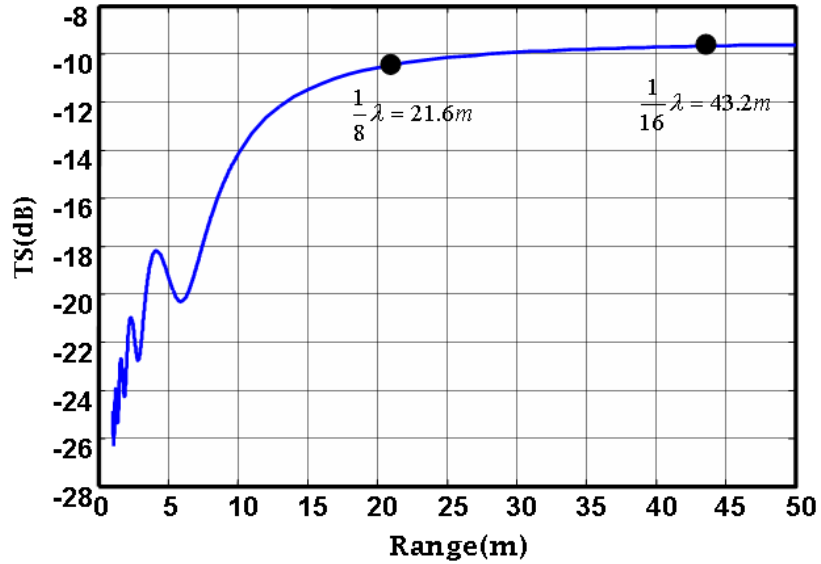


Fig. 4.9 원통형 단위표적의 거리별 표적강도(측면: 0°)

원통형 단위표적은 구형 단위표적과는 달리 주파수를 200kHz로 고정하고 각도를 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 까지 근거리음장 조건에서는 1° 씩 원거리음장 조건에서 0.1° 씩 변화시키며 표적강도를 검증하였다.

Fig. 4.10은 식(4.14)를 이용하여 근거리음장에서 검증한 결과이다. 이론해석과 수치해석이 전체적인 경향과 값에서 유사한 결과를 보인다.

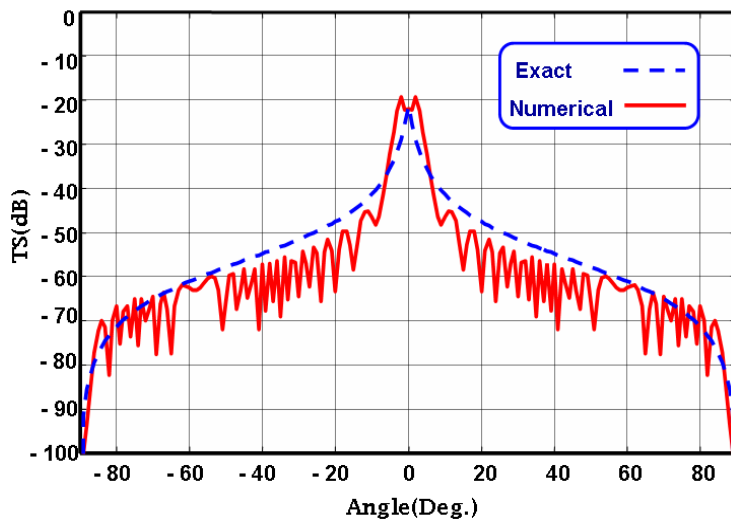


Fig. 4.10 원통형 단위표적의 근거리음장 검증

Fig. 4.11은 원거리음장 조건에서 검증한 결과이다. 검증 결과 수치해석과 이론해가 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다.

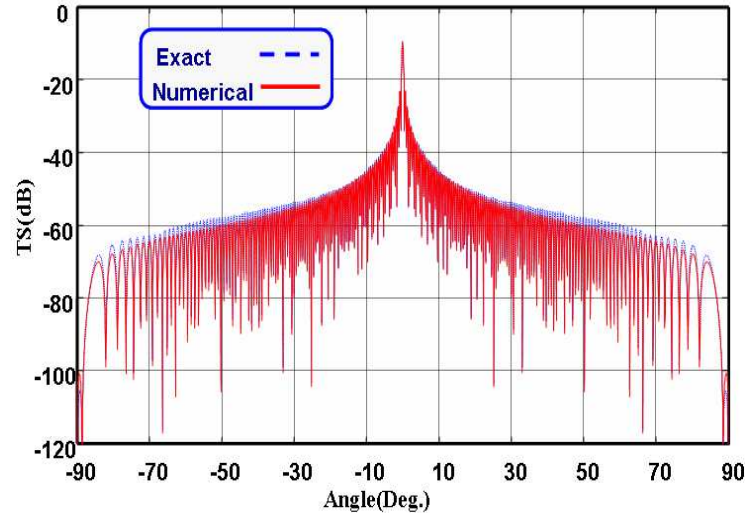


Fig. 4.11 원통형 단위표적의 원거리음장 검증

5. 축소표적 실험 검증

5.1. 축소표적 실험 환경 및 축소표적 제원

5.1.1. 축소표적 실험 계측장비의 구성

축소표적의 표적강도 실험 계측장비는 신호발생부와 센서부 그리고 센서부를 구동하고 수신 신호를 처리하는 신호처리부로 구성된다.

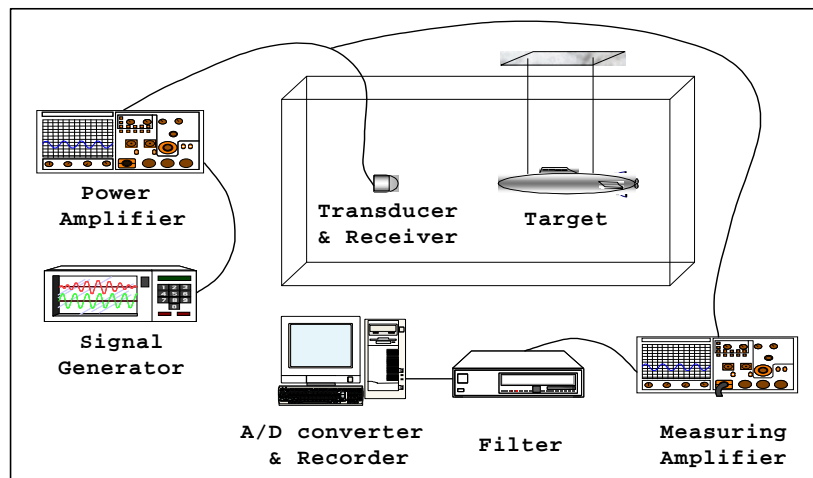


Fig. 5.1 축소표적의 표적강도 실험 계측 모식도

Fig. 5.1에서와 같이 신호발생부는 신호발생기(signal generator), 센서부는 송·수신이 모두 가능한 음향변환자(transducer)로 구성된다. 신호처리부는 송신신호를 원하는 파워로 방사할 수 있도록 이득을 주는 전력증폭기(power amplifier)와 수신된 신호에 이득을 주는 측정증폭기(measuring amplifier), 여파기(filter) 및 A/D 변환기 그리고 보조기억장치로 구성된다. 각 장비의 세부사항은 다음과 같다.

- 1) 신호발생부: 신호발생기는 짧은 CW버스트(burst) 파를 일정 PRI(Ping Repetition Interval)로 출력 가능한 HP 33120A 함수발생기/임의 파형 발생기를 사용하였다.
- 2) 센서부: 센서부는 주파수가 420kHz이고 4개의 수신센서와 1개의 송신 센서로 구성된다. 4개의 수신센서 신호를 증폭하고 원거리 전송이 가능하도록 하는 전치 증폭기 4개와 송신센서의 임피던스를 매칭하는 매칭 트랜스포머로 구성되어 있다.

3) 신호처리부: 신호처리부는 전력증폭기와 센서로부터 수신되는 신호를 증폭하고 저역여파기 및 고역여파기를 이용하여 필요한 주파수 대역만을 선택할 수 있는 4개 채널의 측정증폭기로 구성되어 있다. 특히 A/D 변환기는 A/D 과정을 실시간 모니터링 가능하고 해상도 12 bits를 가지는 인터페이스 카드를 사용하였다.

4) 신호발생부: 센서부 그리고 신호처리부의 전체 시스템은 그림 2.2.2와 같이 구성된다. 그림에서 보는 바와 같이 신호발생부는 신호발생기의 출력을 증폭하여 센서부의 송신 트랜스듀서를 구동하게 되고, 신호처리부는 센서부의 신호를 증폭하여 고역여파기 및 저역여파기를 사용하여 필요한 주파수 대역만을 신호 분석기에 인가하게 된다.

신호처리 시스템의 구성도는 Fig. 5.2와 같고 축소표적 실험에 사용된 실제 신호처리 시스템은 Fig. 5.3과 같다.

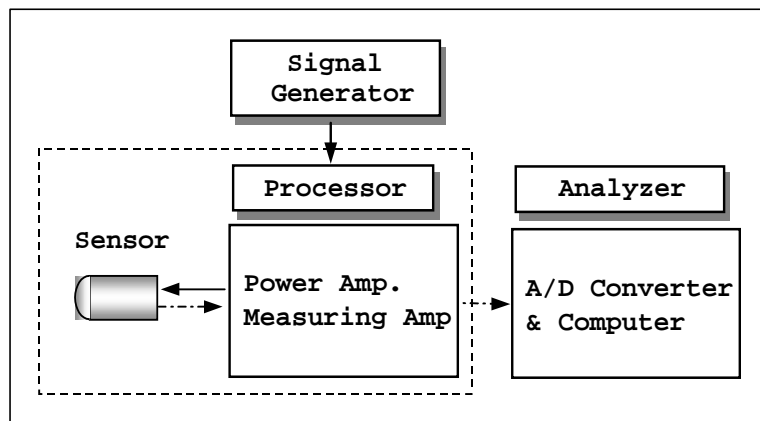


Fig. 5.2 신호처리 시스템의 구성도

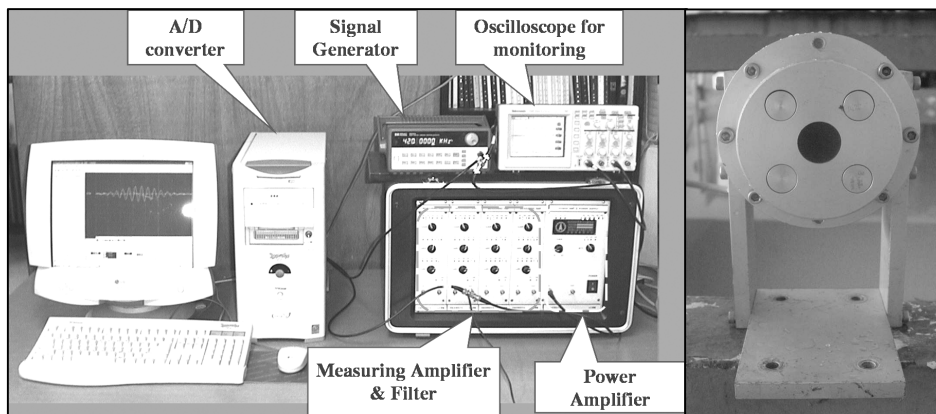


Fig. 5.3 계측에 사용된 신호처리 시스템

5.1.2. 표적 반향음과 잔향음의 구별 조건

표적에서 반향되어 음향변환자로 바로 수신된 신호외의 모든 신호를 잔향음으로 정의한다. 이러한 잔향음은 음향수조내에 음향변환자와 표적의 배치지점을 결정하고 신호획득 구간과 송신 펄스 길이를 결정하는 중요한 변수로 작용한다. 표적 반향음과 잔향음 구별 조건은 음향수조와 음향변환자 및 표적의 기하학적 정보를 통하여 계산되어 진다.

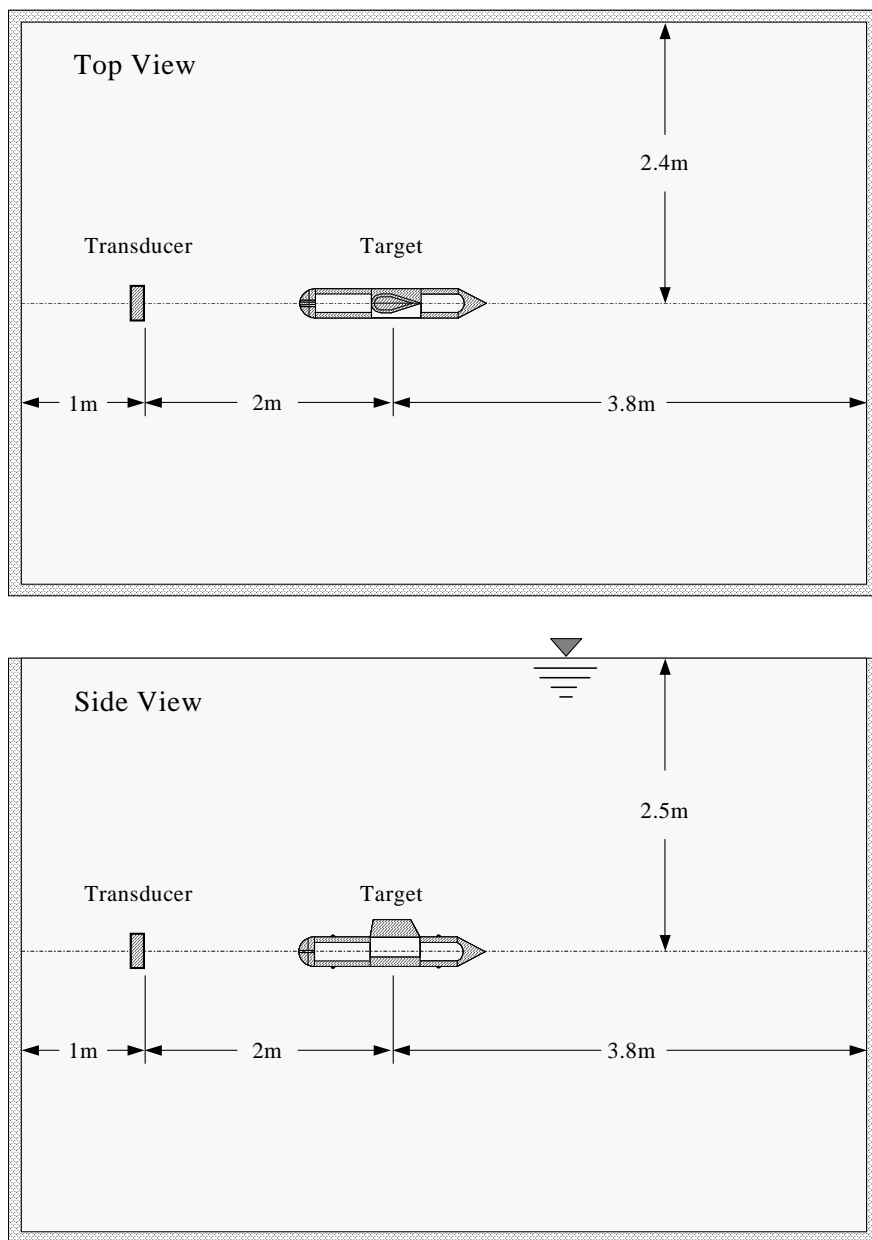


Fig. 5.4 축소표적 실험 수평 및 수직 단면 배치도

축소표적의 표적강도 실험을 위한 음향수조는 장방형으로 폭 6.8m, 길이 4.8m, 깊이 5m이다. Fig. 5.4는 음향수조내의 음향변환자와 표적의 수평 및 수직 단면 배치도를 나타낸 것이다. 표적 반향음과 잔향음의 구별은 그림에 도시된 기하학적 좌표(수평: 좌·우 2.4m)를 통하여 구한다.

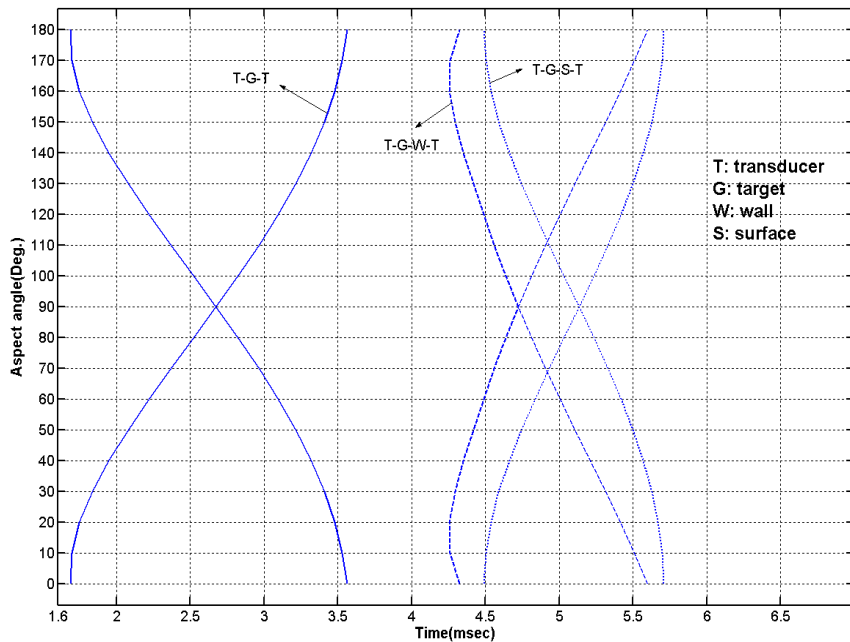


Fig. 5.5 표적 반향음과 잔향음의 구별

Fig. 5.5는 Fig. 5.4의 음향수조 전체좌표(global coordinate)와 음향변환자의 전체좌표, 표적의 국부좌표(local coordinate)로 표적 반향음과 잔향음의 예측 도달 시간을 계산한 결과이다. 표적의 국부좌표는 선수와 선미의 형상을 3D모델링 하여 요소망 생성을 통하여 추출하였고 이를 다시 오일러변환(euler transform)을 통하여 자세각별 전체좌표로 변환하였다. 표적의 자세각별 전체좌표와 음향수조의 전체좌표 그리고 음향변환자의 전체좌표간의 유기적인 거리계산을 통하여 표적의 자세각별 반향음과 잔향음의 도달시간을 계산하였다. 여기서 잔향음 계산에 선수와 선미의 좌표만을 고려한 것은 전 자세각에서 가장 빠르거나 또는 가장 느리게 수신되는 부분이 선수와 선미부분이기 때문이다.

표적 반향음이 여타의 잔향음과 구별되어 존재할 수 있는 시간범위는 1.6ms에서 4.2ms이며 이 시간범위에서 펄스의 길이를 결정하여야 하며, 실험에서는 0.012, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5ms를 사용하여 실험 하였고, 검증에는 펄스 길이 0.6ms로 측정된 데이터를 사용하였다.

5.1.3. 표적 자세각의 정의

표적 자세각의 정의는 Fig. 5.6과 같다. 음향변환자가 표적을 바라보는 관점에서 표적이 선상에 놓인 상태가 자세각 0° 이다. 표적은 0° 에서 180° 까지 반시계 방향으로 10° 간격씩 회전한다.

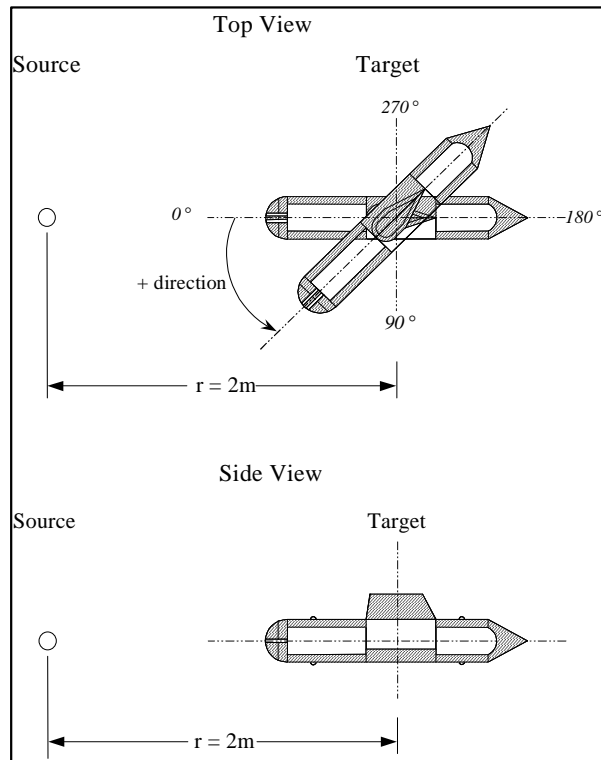


Fig. 5.6 표적 자세각의 정의

5.1.4. 축소표적의 제원

실험에 사용된 축소표적들은 잠수함 형태로 Fig. 5.7과 같은 기하학적 제원을 가진다. KTGT1은 함교(sail)가 없는 순수 원통형 축소표적으로 선수와 선미의 반구부분이 절단된 형태이다. KTGT2는 KTGT1에 수직형 함교를 탑재한 형태이고, KTGT3은 KTGT1에 경사형 함교를 탑재한 형태이다.

세 가지 축소표적 모두 재질은 스테인리스강으로 내부가 공기로 채워져 있기 때문에 반사계수가 -1인 전반사 축소표적이다. k_a 값은 2673으로 물리광학영역 이상 일 조건을 충분히 만족한다.

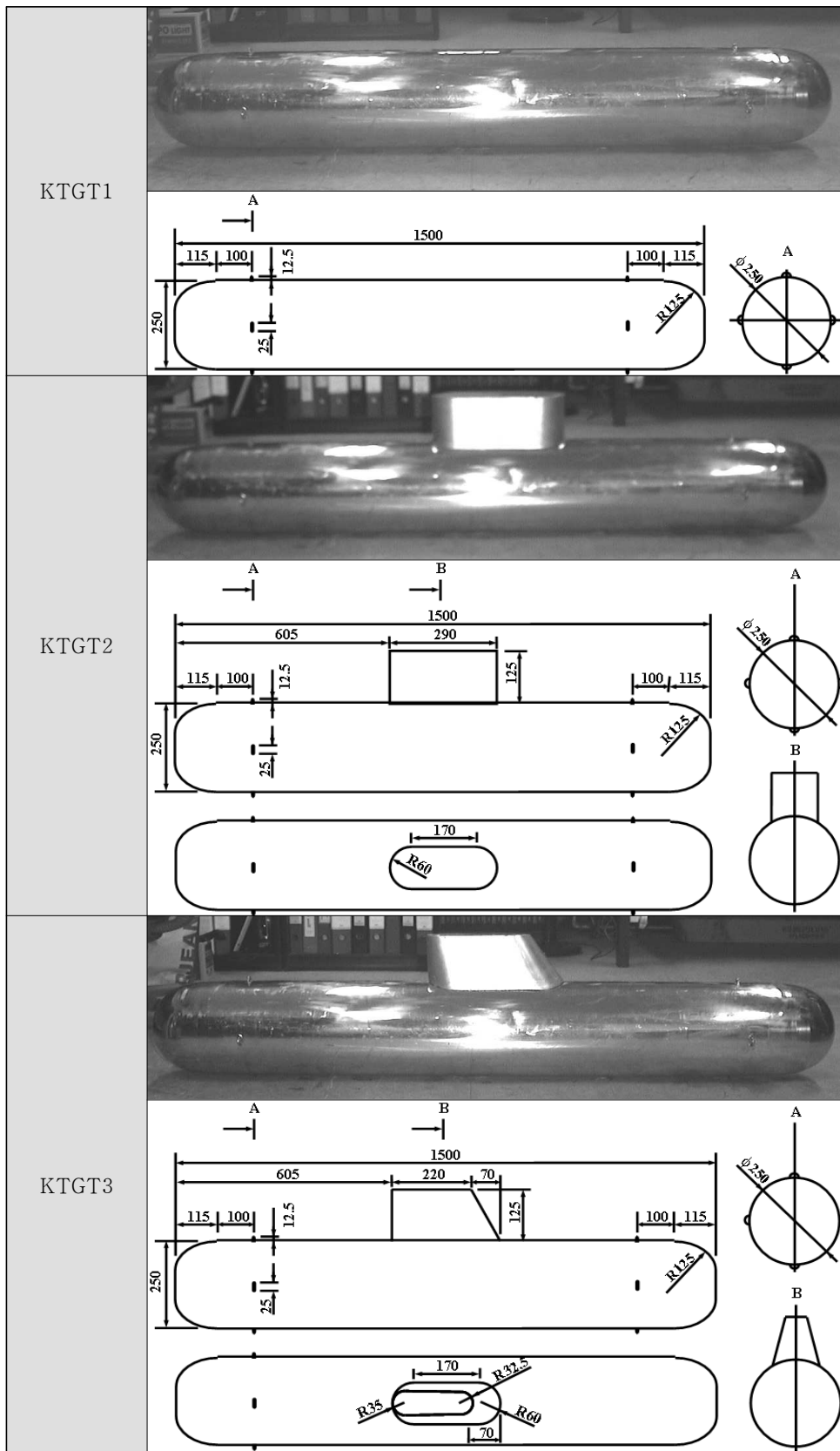


Fig. 5.7 축소표적의 기하학적 제원

5.2. 축소표적의 근거리음장 조건 표적강도 실험검증

식(4.13)을 통해 실험에 사용된 축소표적의 음장 경계조건은 1276m로 계산된다. 표적강도는 원거리 음장 조건에서 정의되기 때문에 축소표적의 표적강도 실험에서도 음원의 송·수신 위치를 1276m이상에 위치시켜야 한다. 그러나 실제로 음향수조 실험에서 이러한 환경조건은 구현이 불가능하다.

음향수조 실험에서 원거리음장 조건을 만족하기 위해서는 저주파수의 음원을 사용하거나 축소율이 높은 축소표적을 사용하면 된다. 그러나 국내 기술로는 이러한 음원과 축소표적의 제작이 용이하지 못할뿐더러 물리광학영역 이상일 조건과 실제 수중합과의 상사법칙까지 고려한다면 음향수조에서 원거리음장 조건을 구현하기란 매우 어렵기 때문에 축소표적의 표적강도 실험은 근거리음장 조건에서 수행되었고, UAL-TS의 실험검증 역시 근거리음장 조건에서 검증 하였다.

Fig. 4.9에서 확인하였듯이 근거리음장에서의 표적강도는 일정한 수렴치를 가지지 못하고 변화가 심하게 일어난다. 그러므로 근거리음장 조건에서 해석결과의 신뢰성이 입증된다면 보다 안정적인 원거리음장 조건에서도 신뢰성이 입증된다할 수 있을 것이다.

Fig. 5.8은 근거리음장 조건의 축소표적 표적강도 실험 검증 결과로 다음과 같은 특징을 파악 할 수 있다.

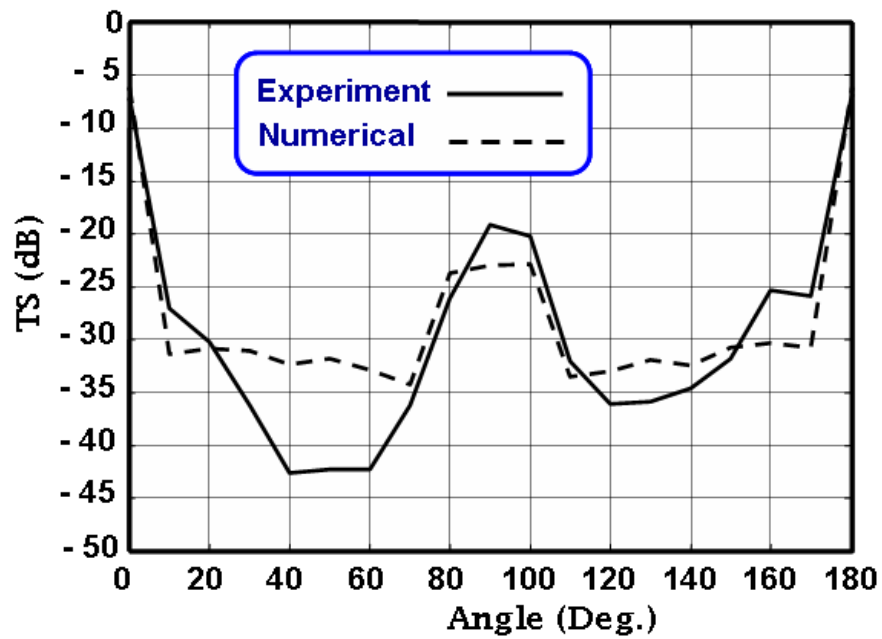
첫째 선수·선미($0^\circ, 180^\circ$)의 표적강도는 정확히 일치하는 반면 그 외의 각도에서는 오차가 발생한다. 실험에 사용된 축소표적은 선수와 선미가 절단된 형태로 절단면이 필렛(fillet)되어 있어 정확한 직경을 측정할 수 없다. 그렇기 때문에 선수와 선미의 산란강도가 일치한 것은 우연의 일치로 검증의 기준이 될 수 없으며, 선측면(90°)을 기준으로 검증하는 것이 타당하다. 40° 부근에서 표적강도가 큰 차이를 보이는데, 이는 4.2.2절에서 설명하였듯이 로그 스케일로 인한 결과로 실험에서 필연적으로 발생하는 측정오차를 감안할 때 선형스케일로 환산한 오차는 오차 범위 내의 값으로 인정된다.

둘째 Fig. 5.8의 (b)에서 선수와 선미의 표적강도가 큰 차이를 보인다. 축소표적은 축대칭형태이므로 산란강도 역시 대칭성을 보여야 한다. 그러나 (b)와 같이 선수와 선미가 차이를 보이는 이유는 측정시 발생한 자세각의 차이로 인해 발생한 오차로 추정된다.

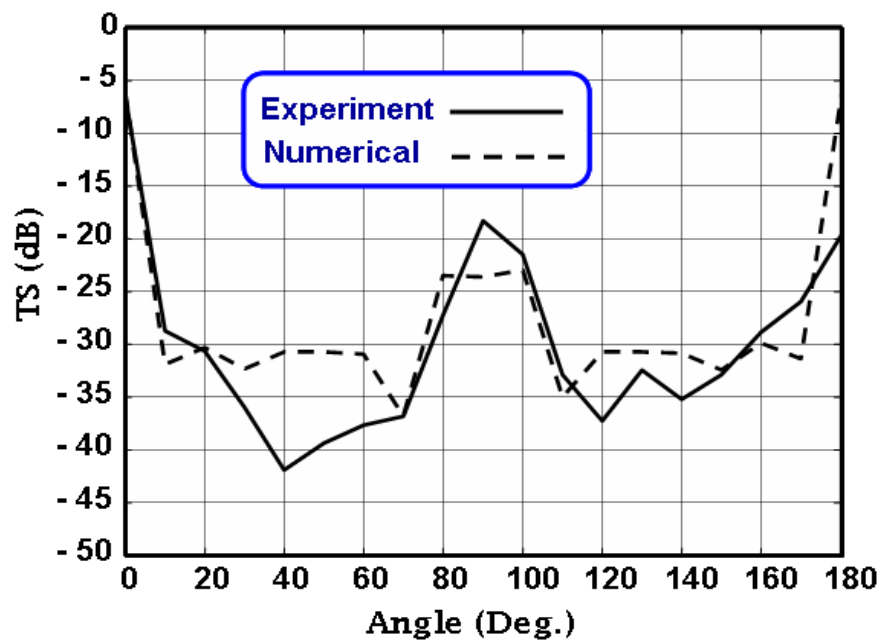
셋째 선수와 선미가 반구 형태인 일반적인 축소표적은 선측면(90°)이 선수·선미($0^\circ, 180^\circ$)에 비해 음원을 향하는 면적이 넓기 때문에 선측면의 표적강도가 더 크다[1]. 그러나 실험에 사용된 축소표적의 경우 선수와 선미가 절단된 형태이고, 실험

이 근거리음장 조건에서 수행되었기 때문에 선측면에 비해 오히려 선수와 선미의 표적강도가 더 크게 나타난다.

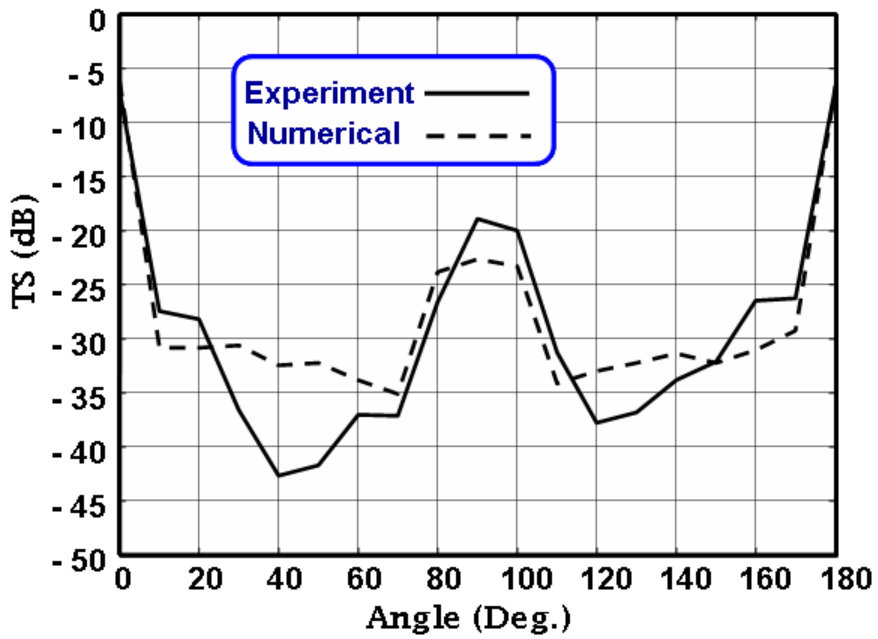
전체적으로 표적강도의 크기와 추세면에서 실험과 수치해석이 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다.



(a) KTG1



(b) KTG2

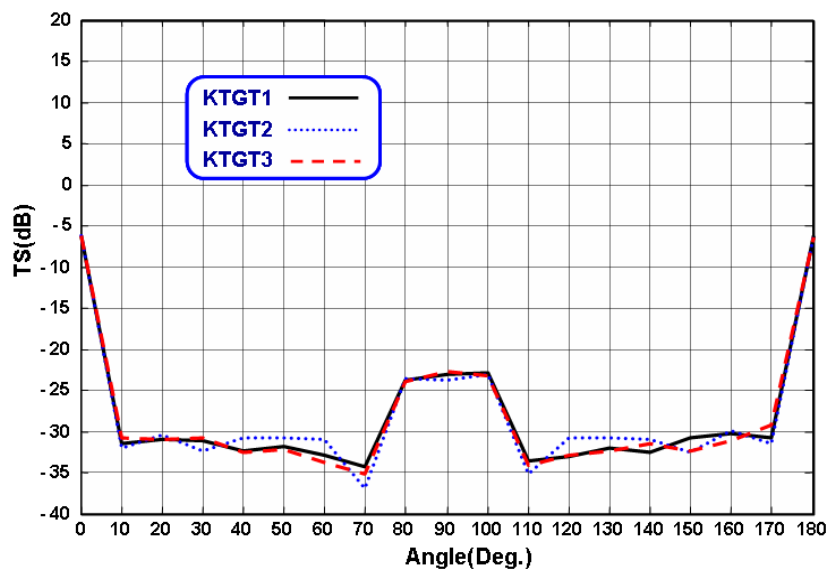


(c) KTGT3

Fig. 5.8 축소표적의 근거리음장 조건 표적강도 실험검증 결과

5.3. 축소표적의 원거리음장 조건 표적강도 수치해석

근거리음장의 표적강도 수치해석 결과는 Fig. 5.9와 같다. 3가지 축소표적들의 함교의 유·무와 경사의 유·무가 다름에도 불구하고 그림에서도 알 수 있듯이 표적강도는 거의 차이가 나지 않는다.



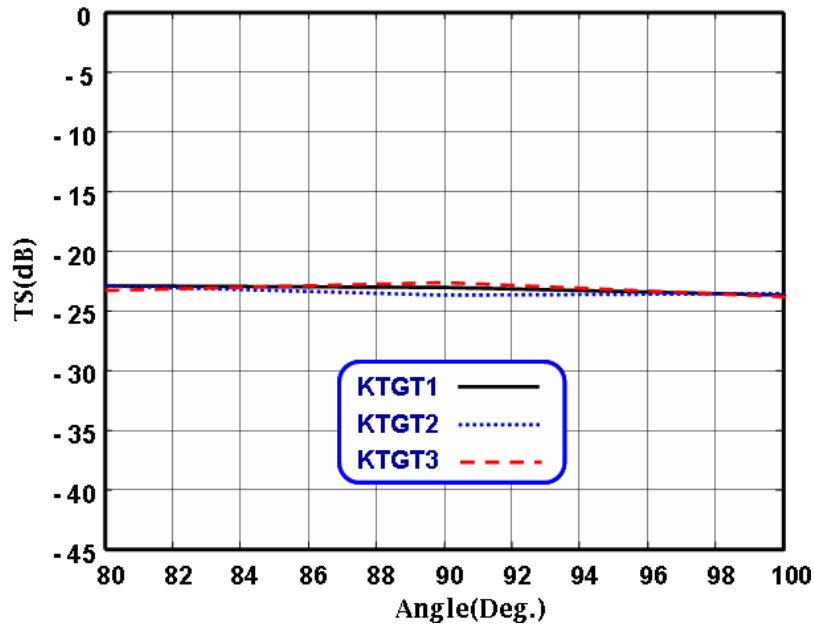


Fig. 5.9 근거리음장에서의 축소표적 표적강도 수치해석

일반적으로 함교가 있는 표적이 그렇지 않은 표적에 비해 그리고 수직인 함교가 경사진 함교에 비해 표적강도가 커야 한다. 그러나 결과에서 알 수 있듯이 근거리음장 조건에서는 함교의 유·무와 함교 경사의 유·무에 따른 표적강도 차이가 매우 미약하게 나타난다.

이러한 결과가 나타나는 이유는 Fig. 5.10으로 설명된다. 근거리음장 조건에서는 (a)처럼 음파가 구형확산을 하기 때문에 선체 측면에 수직입사 하는 음파를 제외한 대부분의 음파가 반사되어 손실되고 이로 인해 표적강도의 차이가 미약하게 나타난다. 그러나 Fig. 5.10의 (b)처럼 평면파가 입사한다면 함교에서 반사된 음파들은 음원을 향하게 되고 축소표적들간의 표적강도도 차이가 날것이다.

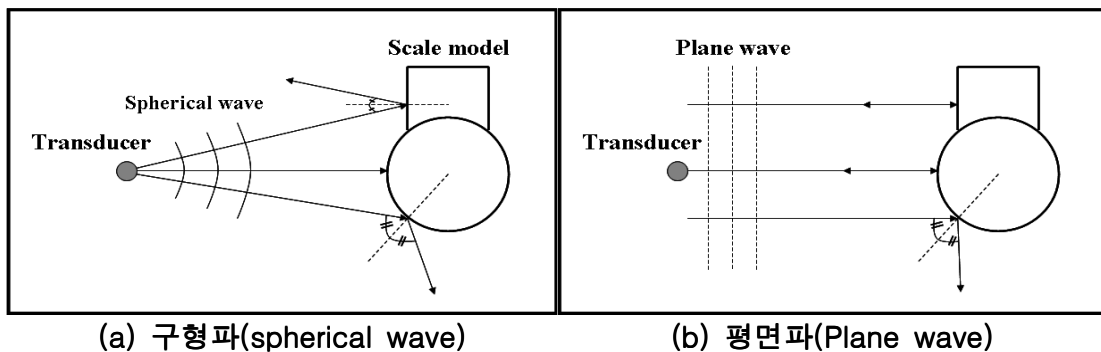


Fig. 5.9 구형파와 평면파의 음향반사 특성

Fig. 5.10은 음원과 수신기를 원거리 음장조건을 만족하는 2000m에 위치시켜 수치해석한 결이다. 원거리음장 조건에서 음파는 Fig. 5.9의 (b)처럼 평면파 형태로 진행하기 때문에 Fig. 5.10의 에서 함교의 유·무와 함교경사의 유·무에 따른 표적강도의 명확한 차이를 확인할 수 있다.

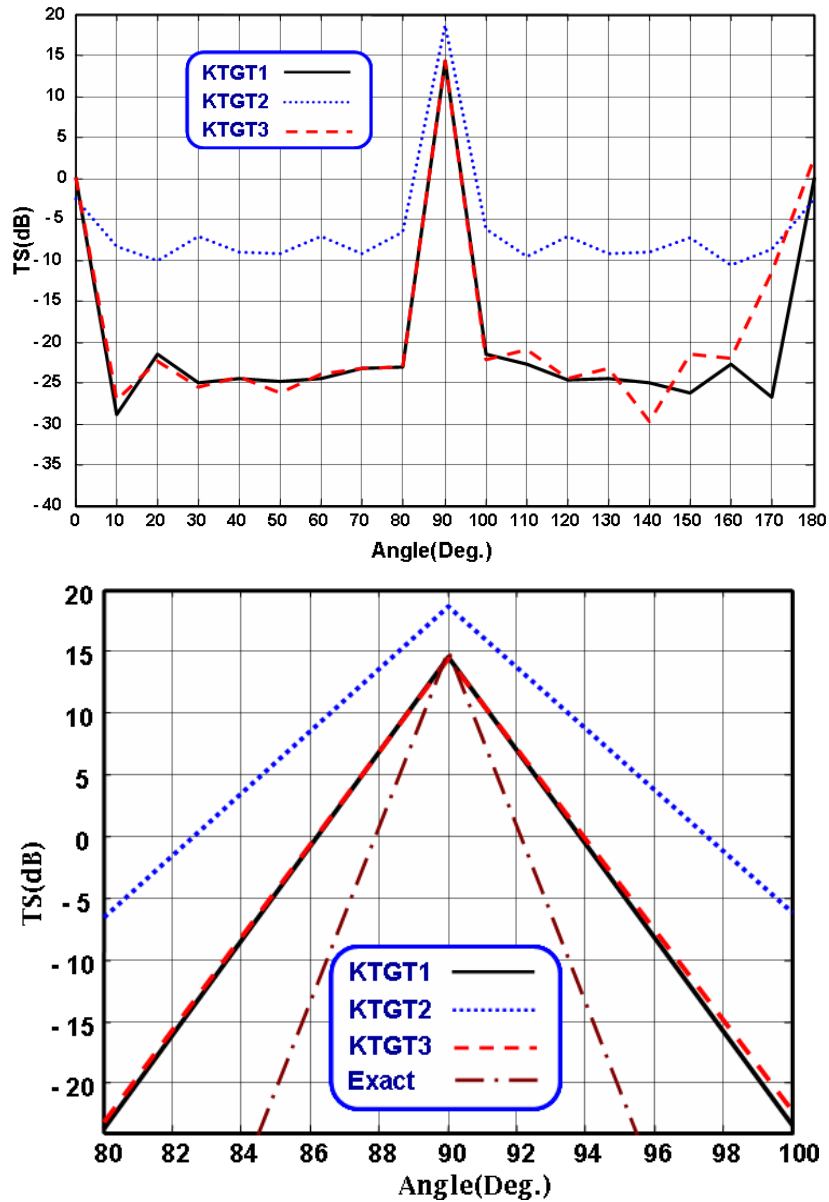


Fig. 5.10 원거리음장에서의 축소표적 표적강도 수치해석

Fig. 5.10을 살펴보면 함교의 형태가 수직인 축소표적의 표적강도가 가장 크게 나타나며, 함교가 경사졌을 경우 음향 스텔스(acoustic stealth)효과로 인해 함교가 없는 표적과 유사한 크기의 표적강도를 보인다. 이러한 결과는 실제 수중함 함교의

음향 설계시 스텔스효과를 고려한 함교경사각 결정에 응용될 수 있다.

Fig. 5.10의 일점쇄선은 식(4.17)을 이용하여 구한 원통형 음향산란체의 이론해 표적강도로 측면에서 함교가 없는 실험산란체인 KTGT1과 유사한 크기를 보이는데, 이는 KTGT1이 원통형 몸체 전·후부에 반구가 추가된 형태이지만 음향스텔스 효과로 인해 측면에서의 전·후부 반구는 표적강도에 기여도가 낮기 때문이다.

6. 결 론

본 논문에서는 능동 수중물체 탐지 분야의 표적강도 해석에 관하여 Kirchhoff approximation을 이용하여 수치해석 프로그램을 개발하였고, 개발된 프로그램을 이론 해석과 실험해석을 통하여 신뢰성을 검증하였으며, 근거리음장과 원거리음장에서의 표적강도 해석에 관하여 고찰하였다.

프로그램의 검증 결과 개발된 프로그램은 이론해석과는 정확한 일치를 보였으며, 축소 표적 실험과도 실험에서의 측정오차와 컴퓨터의 수치 계산 오차를 고려할 때 비교적 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 단 실험의 경우 실험환경 조건상 원거리음장 조건의 구현이 불가능하여 근거리음장 조건에서만 수행되었다. 하지만 근거리음장에 비해 평면파가 형성되어 일정값으로 수렴되는 원거리음장은 안정적이기 때문에 근거리음장에서 신뢰성이 검증된다면 원거리음장에서도 충분한 신뢰성을 가짐을 유추할 수 있다.

표적강도는 원거리음장의 평면파 조건에서 정의되므로 실험해석 또한 원거리음장조건에서 수행되어야 하지만 실험환경 조건상 원거리음장 조건의 구현이 매우 난해하다. 본 논문에서는 수치해석을 통해 실험에서 구현하기 어려운 원거리음장 조건을 구현하고 이를 통해 실제 수중함의 음향설계 및 해석의 응용성을 확인 할 수 있었다.

수중물체의 내부가 물로 채워진 경우 특정 각에서 내부 투과파가 존재하며, 이로 인해 내부 재방사가 일어나 표적강도에 영향을 미치게 된다. 그러므로 완전한 수중물체의 표적강도에 대한 수치해석이 이루어지기 위해서는 내부 재방사 특성이 고려되어야만 한다. 내부 재방사 특성은 Kirchhoff approximation 자체만으로는 구현하기 어렵고, 다른 수치해석 기법과 연성을 하여야 하며, 이는 추후 연구되어야 할 부분이다.

참 고 문 헌

- [1] Urick R. J., 1983, *Principles of Underwater Sound-3rd ed.*, McGraw-Hill Book Company.
- [2] Nelson D. E., 1975, *A Statistical Scattering Model for Time-Spread SONAR Targets*, Ph. D. Dissertation, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Rochester, New York, U.S.A.
- [3] Medwin and Clay, 1998, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press.
- [4] Schneider H. G., Berg R., Gilroy L., Karasalo I., MacGillivray I., TerMorshuizen M., Volker A., 2003, "Acoustic Scattering by a Submarine: Results from a Benchmark Target Strength Simulation Workshop", ICSV10, Stockholm, pp. 2475-2482.
- [5] Delores M. E., 1997, *Engineering Problem Solving with Matlab*", Prentice-Hall.
- [6] Kerr D. E., 1988, *Propagation of Short Radio Waves*, Peninsula Publishing.
- [7] Burdic W. S., 1991, *Underwater Acoustic System Analysis-2nd ed.*, Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey

감사의 글

2005년 하나의 결실을 이루었습니다. 결실의 끝에 서보니 끝이라는 생각보다는 이제 다시 시작이라는 생각.....시작과 끝은 맞닿아 있다는 말을 절감합니다. 감사하고 또 감사해도 부족함이 없을 고마운 분들이 있었기에 이렇게 결실을 이룰 수 있었던 것 같습니다.

학부와 대학원 과정의 짧지 않은 시간 못난 제자를 이끌어주신 김재수 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 그리고 부족한 논문을 바로잡아주신 국방과학연구소의 최상문 박사님, 모교의 최경식 교수님께도 깊은 감사드리고 학부과정 2년을 돌봐주신 강신영 교수님께도 감사드립니다.

대학원 생활의 지표가 되어주신 신기철 선배님, 또 다른 길을 보여주신 성낙진 선배님, 같이 논문준비를 하며 많은 도움을 주신 김우식 선배님, 힘든 길을 같이 걸어오며 많은 도움을 주신 권도영 선배님께 감사드립니다. 그리고 언제나 힘과 위로가 되어준 친구 남익, 용준, 성빈, 영웅에게 고맙다는 말을 전합니다.

대학원 식구들 모두에게도 고맙고 특히 실험실 식구 정홍, 진수, 도진, 정해에게도 고맙다는 말을 전합니다.

끝으로 지금 까지 못난 아들을 사랑으로 응원해주신 부모님과 언제나 성원해주신 누나에게 감사하며, 오랜 시간 곁에서 위로와 용기를 북돋워준 사랑하는 혜진이 에게도 감사의 말을 전합니다.

새로운 시작을 준비하며
2005. 2 최영호