

수중음향 환경하에서 축소모형표적의 상사법칙에 관한 연구

신 영 대(1), 김 제 수(2)

Similarity Laws for the Scale Model in Underwater Acoustic Environment

*Young-Dae Shin, Jea-Soo Kim***Abstract**

수중에서 물체에 의한 수중음향의 산란은 구조물의 경계조건에 따라 물리적으로 매우 복잡한 현상이며 수학적 또는 수치적인 방법으로 전반적인 현상에 대한 해석 또는 예측이 거의 불가능하므로 실험적인 방법이 많이 사용되고 있다. 따라서, 본 논문에서는, 축소모형을 사용한 음향수조에서의 실험을 위해 수중에서의 운동방정식으로 부터 축소 모형표적에 대한 상사법칙을 유도하여, 축소 모형표적 제작이론을 정립하며, 이의 검증을 위한 수치실험을 실시하였다.

상사법칙을 유도하기 위해서는 막대, 평판에 대한 운동방정식을 무차원화하여 그로부터, 각각의 부재형상에 대한 상사법칙이론을 유도하였다. 상사법칙은 재질 및 형상에 대한 선정의 기준을 제시하는데, 알루미늄, 동판, 아크릴에 대하여 상사조건을 만족하는 재질로는 알루미늄이 가장 적합한 것으로 나타났다. 내부 보강재 등에 대한 수치실험을 위해 유한차분법을 사용하였다. 음원분사법은 Alterman과 Karall의 방법을 사용하였고, 흡수 경계조건을 사용하여 내부 보강재가 있는 경우와 없는 경우에 대한 수치실험을 한 결과 형상에 따른 전달현상에 상당한 유사성이 유지되었다.

Since the acoustic scattering phenomenon from an underwater structure is very complicated, experimental methods are often used to understand the scattered echoes. In this thesis, the similarity laws for the scaled underwater target are studied based on the equations of motion, and tested by numerical experiment.

In order to derived the similarity laws, the equations of motion for the bar, plate are non dimensionalized, and the important non-dimensional numbers are identified. Among various materials, aluminum turns out to be most suitable for the scaled target which simulates the submerged steel structure. The similarity laws are tested for the different geometry such as stiffened plates through FDM (Finite Difference Method). The results of numerical experiments show that the similarity laws based on the equations of motion for the simple shapes are reasonable for the cases tested.

1) 한국해양대학교 해양공학과 석사과정 수중음향 전공
2) 한국해양대학교 해양공학과 교수

1. 서 론

수중표적의 고속화, 저표적 강도 추세에 따른 정확한 표적탐지를 위해 필요한 능동 탐지 알고리즘(active detection algorithm)의 설계/개발에 필수적인 표적산란 잔향신호(target-scattered echo signal)의 특성을 가진 능동 표적신호 합성모델(target signal simulation model)의 개발과 이를 이용한 표적상태 추정(target motion analysis)등에 기본적으로 요구되는 표적의 구조적 특성을 반영하는 표적 신호정보 획득 필요성이 대두되고 있다. 수중에서 물체에 의한 수중음향의 산란에 대하여 간단한 형상의 표적에 대해서는 해석적인 해를 구하기도 하지만, 실제 표적의 경우에는 경계조건과 그에 따른 물리적인 현상이 복잡하여 해석적 또는 수치적인 방법으로 전반적인 현상에 대한 해석/예측이 거의 불가능하므로, 실험적인 방법을 많이 사용하고 있다. 실험적인 방법중 축소 모형표적 실험은 실험환경을 조절하여 해상실험에 필수적으로 수반되는 불확실성을 제거할 수 있기 때문에 표적신호의 물리적인 현상 연구에 널리 이용되고 있다.

축소 모형표적 실험을 위해서는 실 표적과 축소 모형표적의 음장에 대한 상관관계를 파악하고, 그 음장의 유사성을 유지하기 위해 필요한 조건을 알아야 한다.

본 연구의 목적은 수중음향 환경(underwater acoustic environment)하에서 실 표적과 음장의 유사성을 가지는 축소 모형표적 제작을 위해 상사법칙을 수중에서의 운동방정식에 적용하는데 있으며, 또한 이의 검증을 위한 수치실험을 실시하였다.

수치실험 결과에 의한 실 표적과 축소 모형표적 신호와의 상관관계 분석을 통하여 축소 모의표적 제작 및 이에의한 표적정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

축소 모의표적에 의해 얻어진 표적 신호정보는 효율적인 음향탐지체계 개발을 위한 off-line simulation 및 on-line simulation(HILS, Hardware In the Loop Simulation)에서 표적신호 발생장치로 이용될 수 있으며, 체계적인 해상실험의 계획수립 및 실험결과 해석, TMA(Target Motion Analysis), 표적분류(target classification), 소나체계(sonar system)의 개발 및 성능평가, 음탐사 훈련등 많은 실무 분야에 활용이 가능하다.

2. 수중음향 환경하에서 막대 및 평판의 상사법칙

축소 모형표적 제작시 실 표적 신호특성을 정확하게 묘사하기 위해서 형태의 단순한 축소가 아닌 상사법칙에 의한 축소모형 제작이론 정립이 선행되어야 하므로 운동방정식에 의한 상사법칙 유도방법을 이용하여 음향매질내의 파동방정식(wave equation)의 상사조건을 유도하였으며, 간단한 형태의 구조물, 즉 막대(beam)와 판(plate)의 경우에 음향매질내에서의 상사조건을 유도하였다.

음향매질 내의 음압(acoustic pressure)에 대한 3차원 파동방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 P(\overline{R}_j) - \left(\frac{1}{c_0^2}\right) \frac{\partial^2 P(\overline{R}_j, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

매질의 발산면(radiating surface)에서의 음압은 다음 조건을 만족한다.

$$\left. \frac{\partial P(\overline{R}_j)}{\partial n} \right|_s = -\rho_0 \frac{\partial^2 W(\overline{R}_0)}{\partial t^2} = \rho_0 \omega^2 W(\overline{R}_0) \quad (2)$$

방정식 내의 변수를 다음과 같은 무차원 변수로 바꾸어 줄 수 있다.

$$\nabla^{*2} = L^2 \nabla^2, \quad t^* = \omega t, \quad W^* = \frac{W}{L}, \quad n^* = \frac{n}{L}, \quad P^* = \frac{P}{P}$$

여기에서, L:방사면(radiating surface)의 길이, P:압력, \overline{P} :constant reference value, W : radial displacement component, n:normal displacement component,

R_0 : acoustic source point, R_j : position vector

무차원 변수를 대입하면, 식(1)은 다음과 같이 되며,

$$\overline{P} \left[\nabla^{*2} P^* - \left(\frac{1}{c_0^2}\right) \omega^2 L^2 \frac{\partial^2 P^*}{\partial t^{*2}} \right] = 0 \quad (3)$$

식(2)는 다음과 같다.

$$\frac{\partial P^*}{\partial n^*} = \frac{\rho_0 \omega^2 L^2}{P} W^* \quad (4)$$

그러므로, 축소 모형의 조건은 표1과 같다.

음향모델(acoustic model)에서는 위 두 조건이 반드시 만족되어야 하며,식(9)는 동일한 음향매질에서 길이와 주파수가 반비례함을 나타내고, 식(10)은 식(9)의 조건이 만족될 경우 음압이 일정함을 나타낸다.

균질 단면적(uniform cross section) A를 가지는 길고 얇은 막대가 x축상에 중심선을 기질 때 탄성매질 막대의 종방향 진동(longitudinal vibration of elastic bar)의 운동방정식[2]은 다음과 같으며, 상사조건은 표1과 같다.

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + \frac{q_l'(x, t)L}{EA} \quad (5)$$

q_l' : 막대 끝에 가해지는 정계조건인 선형적인 힘(linear load: | N/m|)

식(11)의 조건을 보면 주파수는 음속($c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$)과 관련이 있음을 알 수 있다. 즉, 식(9)의 조건이 만족된다면, 구조물 내의 음속은 일정해야 함을 알 수 있다.

균질단면적(uniform cross section) A를 가지는 가늘고 긴 막대가 x축상에 중심선이 있는 경우 탄성매질 막대의 횡방향 진동(flexural vibration of elastic bar)의 운동방정식은 다음과 같으며, 상사조건은 표1과 같다[3].

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \frac{q_n'(x, t)}{EI} \quad (6)$$

여기에서, F : 빔의 끝단에 가해지는 집중 하중, I : area moment of inertia

식(14)의 조건을 보면 주파수는 재질($\frac{E}{\rho}$) 및 2차반경(radius of gyration : $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$)과 관련이 있음을 알 수 있으며, 식(9)와 식(11)의 조건이 만족된다면 $\frac{r}{L} = const$ 임을 알 수 있다.

얇은 탄성 매질 판(thin elastic plate)의 종방향 진동(Longitudinal Vibration)시 파동 방정식은 실제적으로 막대의 종방향진동의 경우와 같다. 그러나, 판의 경우 체적요소(volume element)의 수평방향 수축이 제한되므로, Young's modulus E는 Poisson's ratio factor인 $(1 - \nu^2)$ 로 나누어 주어야 한다.

식(5)는 아래와 같이 쓸 수 있다 [4].

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho(1 - \nu^2)}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{q_t \cdot b(1 - \nu^2)}{E \cdot h \cdot b} \tag{7}$$

여기서, h : 판의 두께, b : 판의 넓이

여기서, q_t 는 접선 방향의 힘(tangential load : $|N/m^2|$)으로 판의 표면에 작용하는 힘이며, q_t' 는 판의 자유경계면에 작용하는 선형적인 힘(linear load: $|N/m|$)이다.

균일한 두께 h를 가지는 탄성 매질 판(elastic plate)의 경우 횡방향 진동(Flexural Vibration)시 운동 방정식은 다음과 같으며, 상사조건은 표1과 같다[4].

		음향 매질	막대	판
종방향진동	구조조건	$\frac{\omega L}{c_0}$ (9)	$\frac{\rho \omega^2 L^2}{E}$ (11)	$\frac{\rho \omega^2 L^2 (1 - \nu^2)}{E}$ (17)
	경계조건	$\frac{\rho_0 \omega^2 L^2}{p}$ (10)	$\frac{q_t L}{EA}$ (12) $\frac{F}{EA}$ (13)	$\frac{q_t L (1 - \nu^2)}{Eh}$ (18) $\frac{q_t (1 - \nu^2)}{Eh}$ (19)
횡방향진동	구조조건	/	$\frac{\rho A \omega^2 L^4}{EI}$ (14)	$\frac{\rho \omega^2 L^4 (1 - \nu^2)}{Eh^2}$ (20)
	연계조건	/	/	$\frac{\rho_0 C_0^2 L^3 (1 - \nu^2)}{Eh^3}$ (21)
	경계조건	/	$\frac{q_n L^3}{EI}$ (15) $\frac{FL^2}{EI}$ (16)	$\frac{q_n L^3 (1 - \nu^2)}{Eh^3}$ (22) ν (23)

표 1 막대와 판의 상사조건

$$\nabla^4 W + \frac{\rho \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2)}{Eh^2} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = - \frac{q_n \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2)}{Eh^3} \quad (8)$$

m : 단위길이당 모멘트, τ : 단위길이당 전단력(shear force)

3. 축소모형의 상사법칙 적용 방법론

상사법칙 적용을 위해 모형제작 및 실험시 가능한 실험환경을 아래와 같이 구분하였다.

1. 동일한 음향매질과 동일한 모형구조물 재질
2. 동일한 음향매질과 다른 모형구조물 재질
3. 다른 음향매질과 동일한 모형구조물 재질
4. 다른 음향매질과 다른 모형구조물 재질

위의 경우를 각각 고려해 보았을 때, 먼저 동일한 모형구조물 재질과 동일한 음향매질에서의 실험이 최적의 조건이라할 수 있지만, 기허학적 상사조건이 정확히 적용되어야 하므로 상사조건에 부합되지 않는 경우의 발생 가능성이 나대하다. 그리고 다른 음향매질에서의 실험은 물 대신 알코올을 쓰는 경우 등으로 현실과 동떨어지므로 제외하는 것이 적절하다. 이러한 경우를 모두 고려하여 음향매질이 다른 경우는 제외하고, 동일한 음향매질에서 동일한 재질과 다른 재질의 모형구조물에 대한 모형제작에 관하여 살펴보겠다.

동일한 음향매질내에서 동일한 재질의 구조물로 실험을 실시 할 경우 ρ, E, ν 등의 특성이 같아지며, 동일한 음향매질내에서 다른재질의 구조물로 실험을 실시할 경우 두께와 길이가 비례해야 하는 제한요소에서 벗어날 수 있으며, 이 경우 음향매질의 ρ_0, c_0 가 일정함을 알 수 있다.

막대의 경우 길이를 축소한 막대의 축소모형 제작시 상사조건을 살펴보면, 주파수와 길이가 반비례함을 알 수 있으며, 식(14)를 살펴보면 2차 반경(radius of gyration)이 길이와 비례함을 알 수 있다. 식(11)은 동일재질의 모형과 다른경우로 모형으로 선정된 재질은 질 표적과 종방향 음속(longitudinal sound velocity)이 같아야 한다. 식(13)과 식(16)에서 보면 힘 F 는 재질의 탄성에 상관이되며, 식(6)은 음압이 변하지 않아야 함을 알 수 있다.

판의 경우는 주요한 음원인 횡방향 진동의 경우만 살펴보겠다. 길이를 축소한 판의 축소모형 제작시 상사조건을 살펴보면, 막대의 경우와 동일한 주파수, 힘, 음압을 가짐을 알 수 있다. 또한 식(20)에 의해 길이와 두께가 비례함을 알 수 있다.

4. 축소 모형 표적

앞서 다루었던 음향매질내에서의 파동방정식과 막대/판의 상사조건에 의한 축소모형의 상사법칙 적용 방법론을 임의로 선정한 재질에 적용하여 종/횡 방향 상사조건중 구조조건 및 경계조건을 만족할 수 있는 규격을 정하였다.

상사조건 적용에 앞서 수조실험에 적합한 축소 모형표적에대한 조건 정립이 선행되어야 하겠다. 먼저 표적제작의 용이성으로서 다루기 쉬운 크기 즉, 제작 및 가공이 용이한 크기여야하며, 재질역시 가공하기 쉬운 재질이어야 한다. 또한, 실험과정에서 표적이 물리적으로 변형되는 사태를 방지하기 위해서 표적이 구조적으로 충분한 강도를 지녀야 한다.

동일한 재질과 동일한 음향매질에서 실험을 실시 할 경우 밀도(ρ), 탄성계수(E), Poisson's ratio(ν)가 같아짐을 감안하여 살펴보면,

예를 들어 $\frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{50}$ 축척인 막대의 경우

$$\frac{h_m}{h_p} = \frac{1}{50}, \quad \frac{W_m}{W_p} = \frac{1}{50}, \quad \frac{\omega_m}{\omega_p} = 50, \quad \frac{\dot{W}_m}{\dot{W}_p} = 1, \quad \frac{\ddot{W}_m}{\ddot{W}_p} = 50, \quad \frac{F_m}{F_p} = \frac{1}{250}$$

위 내용으로 미루어 보면 상사조건을 엄격히 적용하여 동일한 음향매질내에 동일한 재질의 축소모형 구조물로 실험을 실시하였을 경우 동일한 신호특성을 얻을 수 있음을 알 수 있으나, 길이에 비례하여 두께도 축소해야 하는 점을 고려해야 한다. 제작 및 실험을 위한 구조물의 최소 두께가 제한되어 있을 경우 구조물 제작 자체가 곤란한 경우가 발생하게 되는데 이러한 점은 동일한 음향재질내에 다른 재질의 구조물을 사용하여 해결할 수 있다.

동일한 음향매질내에서 다른재질의 구조물로 실험을 실시할 경우 두께와 길이가 비례해야 하는 제한 요소에서 벗어날 수 있으며, 이 경우 음향 매질의 ρ_0 와 c_0 가 일정함을 알 수 있다.

먼저, 길이의 비가 50 ($\frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{50}$) 일 경우 음향매질(acoustic medium)조건에 의

해 $\frac{\omega_m}{\omega_p} = 50$ 이며, 음압의 비율 $\frac{P_m}{P_p} = 1$ 이되며, 실 표적의 재질을 강(steel)으로 하고, 모형 표적의 재질을 아크릴과 알루미늄, 구리의 세 가지를 사용하여 상사조건에 따른 계산치를 구하면 표2과 같다.

구분		상사조건	재질	계산치
박	총방향진동	$\frac{(\omega L)_m^2}{(\omega L)_p^2} \left(\frac{\rho_m}{\rho_p} \right) \left(\frac{E_p}{E_m} \right) = 1$	알루미늄	0.9631
			아크릴	6.1503
			구리	1.8031
	경계조건	$\frac{F_m}{F_p} = \left(\frac{E_m}{E_p} \right) \left(\frac{A_m}{A_p} \right)$	알루미늄	1.4564×10^{-4}
			아크릴	9.9077×10^{-6}
			구리	2.5026×10^{-4}
대	구조조건	$\frac{h_m}{h_p} = \sqrt{\left(\frac{\rho_m}{\rho_p} \right) \left(\frac{E_p}{E_m} \right) \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^2}$	알루미늄	1/50.9501
			아크릴	1/20.1615
			구리	1/37.2357
	경계조건	$\frac{F_m}{F_p} = \left(\frac{E_m}{E_p} \right) \left(\frac{h_m}{h_p} \right)^2$	알루미늄	1/7129.62
			아크릴	1/16410.93
			구리	1/2216.12
관	총방향진동	$\frac{\rho_m}{\rho_p} \frac{(w^2 L^2)_m}{(w^2 L^2)_p} \frac{(1-\nu_m^2)}{(1-\nu_p^2)} \frac{E_p}{E_m} = 1$	알루미늄	0.9312
			아크릴	5.7098
			구리	1.7591
	경계조건	$\frac{q'_{tm}}{q'_{tp}} = \left(\frac{E_m}{E_p} \right) \left(\frac{h_m}{h_p} \right) \frac{(1-\nu_p^2)}{(1-\nu_m^2)}$	알루미늄	1/132.78
			아크릴	1/187.41
			구리	1/76.09
회방향진동	구조조건	$\frac{h_m}{h_p} = \sqrt{\left(\frac{\rho_m}{\rho_p} \right) \left(\frac{E_p}{E_m} \right) \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^2 \frac{(1-\nu_m^2)}{(1-\nu_p^2)}}$	알루미늄	1/51.82
			아크릴	1/20.93
			구리	1/37.70
	경계조건	$\frac{q_{nm}}{q_{np}} = \left(\frac{E_m}{E_p} \right) \left(\frac{L_p}{L_m} \right)^3 \left(\frac{h_m}{h_p} \right)^3 \frac{(1-\nu_p^2)}{(1-\nu_m^2)}$	알루미늄	1/2.956
			아크릴	1/2.749
			구리	1/0.652
연계조건	$\left(\frac{E_p}{E_m} \right) \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^3 \left(\frac{h_p}{h_m} \right)^3 \frac{(1-\nu_m^2)}{(1-\nu_p^2)} = 1$	알루미늄	2.9554	
		아크릴	2.7472	
		구리	0.6523	

표 2 상사조건 종합

5. 축소 모형표적 수치실험

관으로 이루어진 축소모형 복합구조물의 수치실험을 통해 음향매질에서의 상사법칙 적용 가능성을 확인하며 무차원 변수중 현상을 지배하는 주요 인자의 상사조건을 확인하기 위하여 대형 및 소형표적을 또 소형표적은 재질을 달리하여 실험을 실시함으로써 등

일한 음향매질에서 동일한 재질의 구조물과 다른재질의 구조물의 상사법칙 이론을 확인하는데 그 목적이 있으며, 간단한 형태의 축소 모형표적 신호특성과 상사법칙 확인 및 좀더 복잡한 축소모형 표적 제작을 위한 사전실험이라 할 수 있다.

5.1 유한차분법(FDM)에 의한 파동방정식의 해석

파의 전달, 반사, 회절 등을 해석하기 위한 많은 방법중의 하나인 유한차분법은 주로 지진파를 연구하는 방법으로 많이 이용되어 왔으나, 최근 들어 음향분야에도 도입되어 수중에서의 음파 전달 경로나 전달손실을 연구하는데 사용되고 있다[5,6,7].

유한차분법은 일반적인 탄성과 방정식을 탄성영역에서 선형이라는 가정을 제외하고는 물리적인 현상에 대한 근사나 가정이 없는 상태에서 파동방정식을 해석하므로 해석적인 해와 비교하여 비교적 정확한 해를 구할 수 있으며, 탄성체와 유체에 존재하는 파에 대한 다양한 정보와 상대적인 크기를 비교할 수 있으며, 이들 사이에서 존재 가능한 파인 단일경로파(direct wave), 일차반사파(primary reflected wave), 다중반사파(multiple reflected wave), 회절파(diffracted wave) 등을 관찰하므로써 물리현상을 쉽게 파악할 수 있다. 여기서 사용한 차분법은 Kelly[5]에 사용된 방법으로 2차원 불균질 탄성 매질에서의 파동현상을 묘사할 수 있도록 고안된 것이며, 시간 및 공간적으로 중앙차분법을 적용하고 파동의 물리량으로서 변위 만을 다룬다.

매질의 특성변수인 Lamé의 탄성계수 λ, μ 가 공간적으로 변화되는 불균질 탄성매질에 관한 2차원 직각좌표계에 대해 편미분방정식의 형태로 표현하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 x, z 는 각각 2차원 직각 좌표계에서 직교하는 두 좌표축을 나타내며, u, w 는 각각 두 좌표축 방향으로의 변위를 나타낸다. 이 식은 Kelly[5]에서 사용되어 있고

이 차분식에 대한 안정성해석(stability analysis)은 균질매질에서의 안정조건(homogeneous stability condition)조건에서 가장 보수적인 경우를 취하여 수치시뮬레이션 수행한 기존의 논문들을 근거로 하여 식(10)의 균질안정조건(homogeneous stability condition)을 사용하였으며, 경계조건은 흡수경계를 사용하였다.[5,6].

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{\alpha_{\max}^2 + \beta_{\max}^2}} \quad (10)$$

5.2 유한 차분법에 의한 수치 실험

수치실험은 축소모형 표적 신호특성을 확인하고, 음향매질에서 상사법칙의 적용 가능

성을 확인하기 위한 실험으로 좌표계는 그림1과 같다. 구조물의 종류는 표3과 같으며, 음향매질(물)과 진공사이에 구조물을 설치한 후 음원을 구조물에서 1/2과장 위치에 설치하며, 수신기는 음원으로 부터 2과장에 위치하여 음향매질내 음파의 전파현상과 구조물에 의한 신호특성의 변화를 확인한다.

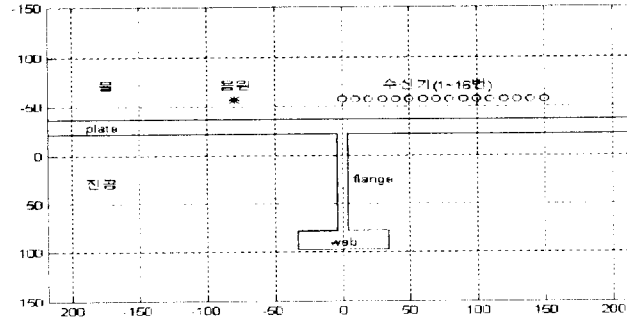


그림 1 수치실험 좌표계

재 질	재 질 구분	plate두께	Flange두께	Web두께
steel	plate	3cm	15×3.75cm	
		16개	80×20개	
	ribbed plate	3cm	15×3.75cm	18.75×1.5cm
		16개	80×20개	100×8개
similarity scale aluminum	plate	2.89cm	14.77×3.62cm	
		15개	77×19개	
	ribbed plate	2.89cm	14.77×3.62cm	18.09×1.45cm
		15개	77×19개	97×8개

표 3 수치실험용 구조물

5.2.1 구조물 형상에 의한 신호특성

보강재가 있는 판과 없는 판에서의 신호특성을 알루미늄의 경우에 비교해보면 아래와 같이 acoustic mode는 유사하게 전파되지만 멀리 떨어진 수신기(5번)에서는 종파(처음에 전파된 신호)와 acoustic mode사이의 신호(철판의 flexure mode에 의해 발생)에서 차이를 보이며, 1번과 5번 수신기에서 모두 acoustic mode이후의 신호가 보강재에 의한 영향을 받아 상이해짐을 알 수 있다.

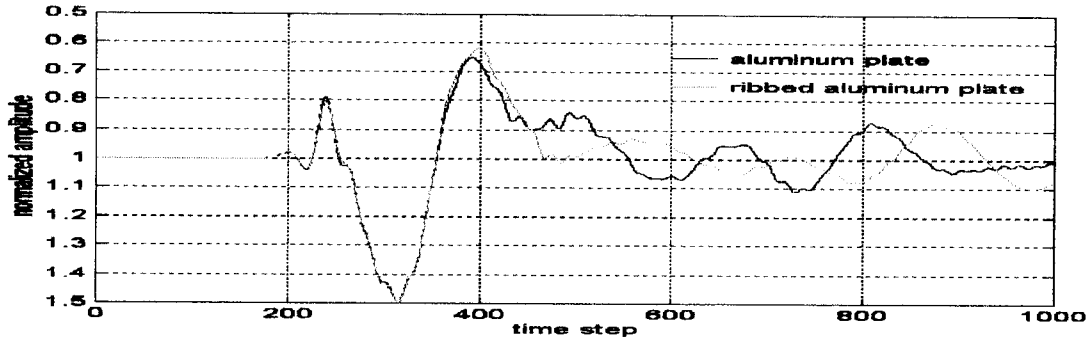


그림 2 보강재 유무에 따른 1번 수신기에서의 신호

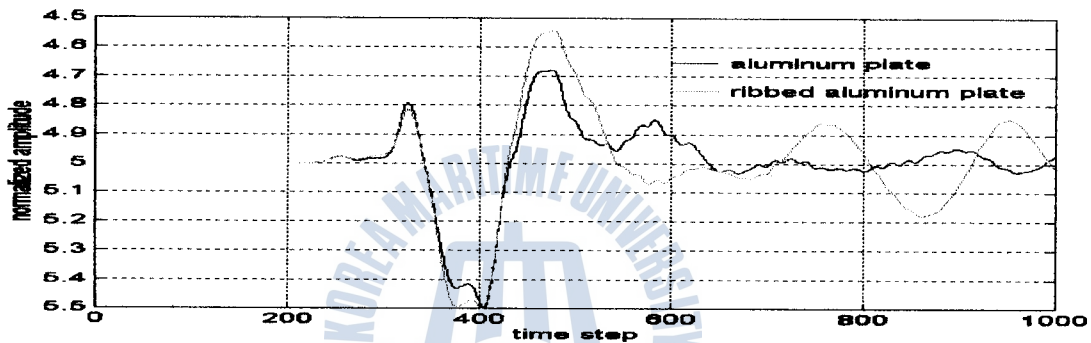


그림 3 보강재 유무에 따른 5번 수신기에서의 신호

5.2.2 철판과 알루미늄 판의 비교

그림4, 5, 6은 철판과 알루미늄판의 비교이며, 그림7, 8, 9는 보강재를 댄 철판과 알루미늄판의 비교이다. 두 신호를 비교해 보았을 때 유사한 신호특성을 가짐을 알 수 있으며, 각각의 신호 즉, 종파와 횡파 그리고 acoustic mode에 관해서 좀더 세밀한 분석이 필요하다. 철판과 알루미늄판의 비교 결과 알루미늄은 구조물의 형상이 변경되더라도 유사한 신호특성을 가짐을 확인할 수 있었으며, 알루미늄 모형표적 구조실험을 통한 신호특성 확인이 필요하다.

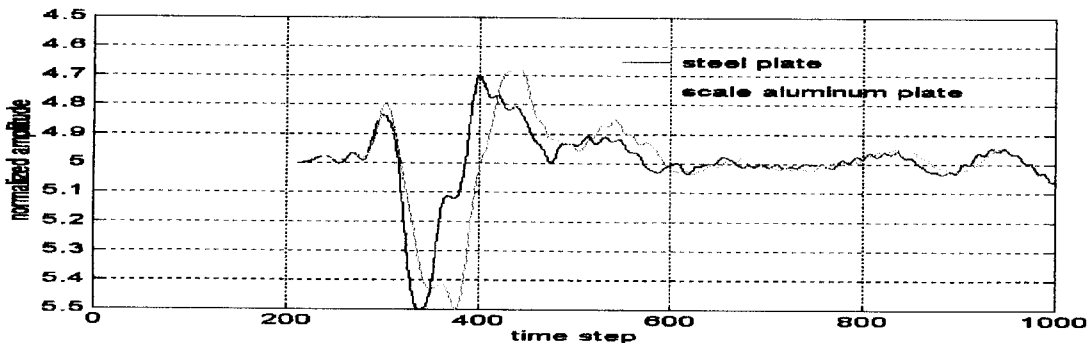


그림 4 재질에 따른 신호특성(5번 수신기)

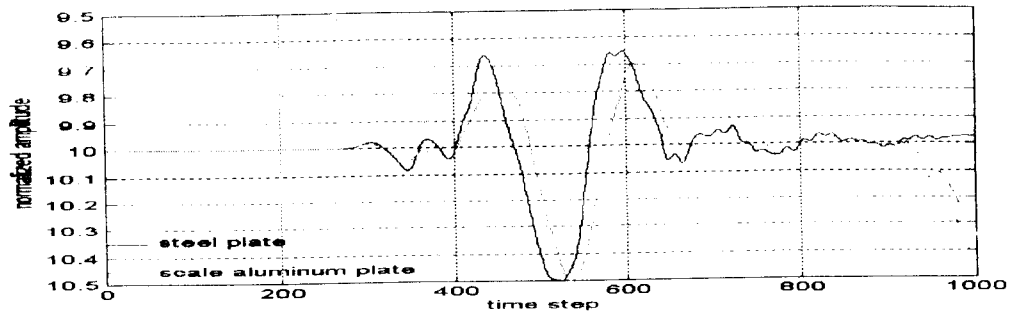


그림 5 재질에 따른 신호특성(10번 수신기)

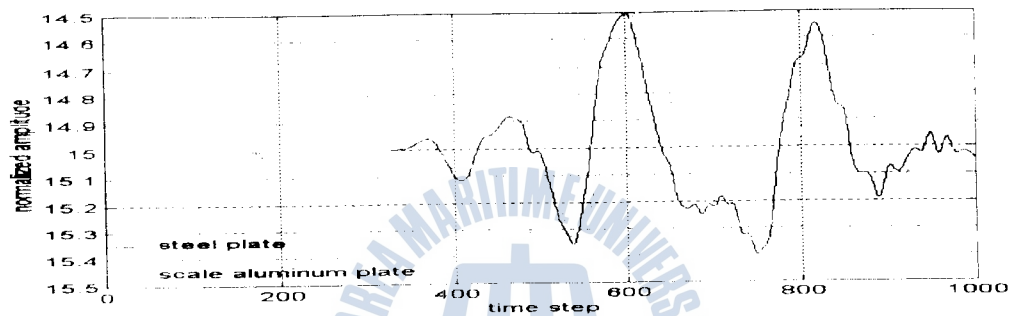


그림 6 재질에 따른 신호특성(15번 수신기)

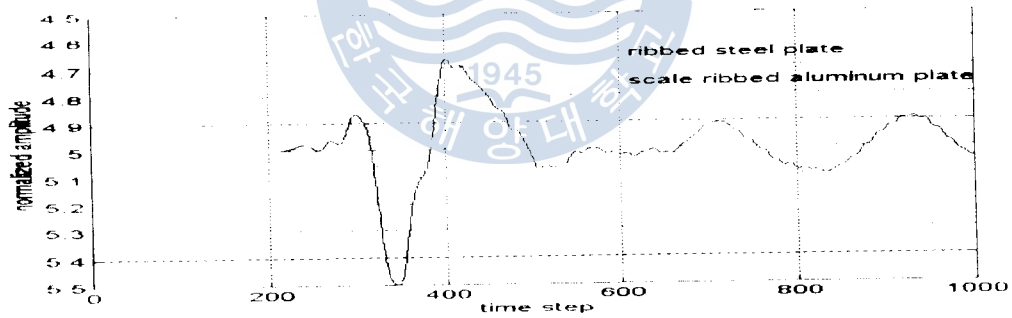


그림 7 재질에 따른 신호특성(5번 수신기)

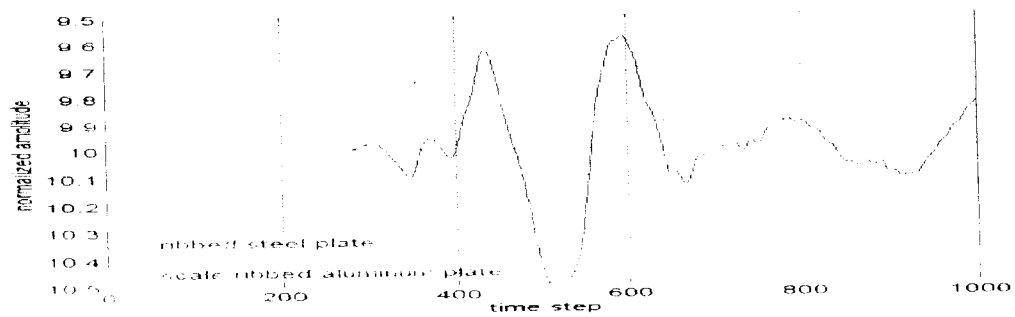


그림 8 재질에 따른 신호특성(10번 수신기)

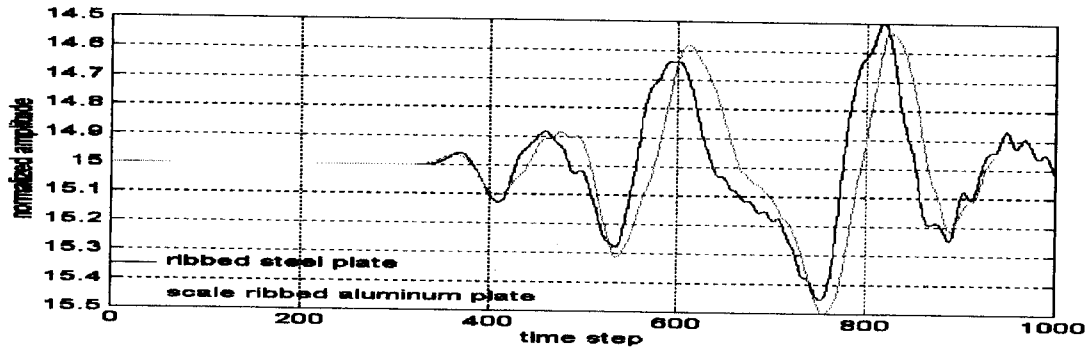


그림 9 재질에 따른 신호특성(15번 수신기)

5.3 수치실험에 대한 결론

축소 모형표적 신호특성과 음향매질에서 상사법칙의 적용 가능성을 확인하기 위해 철판과 알루미늄판에 대해서 수치실험을 실시하여, 음향매질내 음파의 전파현상과 구조물에 의한 신호특성의 변화를 확인하였다.

구조물 형상에 의한 신호특성을 확인하기 위해 보강재가 있는 판과 없는 판에서의 신호특성을 알루미늄의 경우에 비교해본 결과 acoustic mode는 유사하게 전파되지만 종파와 acoustic mode사이의 신호 즉, 횡파에 의해 차이가 발생함을 알 수 있었고 acoustic mode이후의 신호가 보강재에 의한 영향을 받아 상이해짐을 알 수 있다.

철판과 상사법칙에 의해 크기를 조정된 알루미늄판의 신호 특성을 비교해 보았을 때 유사한 신호 특성을 가짐을 확인할 수 있었으며, 분산(dispersion)현상 발생에 따라 정확한 신호특성 확인이 곤란하였는바 모형표적 수조실험에 의한 검증이 요구된다.

6. 결 론

6.1 요 약

수중음향 환경을 만족하는 축소 모형표적 제작을 위해 동일한 음향매질내서 같은 재질의 모형구조물과 다른재질의 모형구조물에 대하여 운동방정식을 통한 변수간의 상관관계를 검토해 본 결과 같은 재질의 경우는 기하학적 상사법칙에 따른 비율 적용만으로 가능하였으나, 엄격한 기하학적 비율 적용이 곤란한 경우는 다른재질을 사용하여 특정 변수의 비율을 조정된 모형 표적 제작 이론을 전개 할 수 있었으며, 축소 모형표적의 상사법칙 유도 결과 상사법칙을 만족하는 축소 모형표적의 최적 재질로 알루미늄을 선정할

수 있었다. 또한 수치실험을 통한 상사법칙을 검증해본 결과 철판과 알루미늄의 경우 유사한 신호특성을 가짐을 확인할 수 있다.

6.2 결 론

상사법칙 이론 유도 결과 종 방향 파의 구조조건은 재질이 상이해짐에 따라 아크릴이나 구리의 경우 만족이 되지 않았지만 알루미늄의 경우는 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 횡방향파의 경우는 두께를 조절해 줌으로써 모든 재질에서 상사법칙을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

수치실험을 통해서 compressional, flexural, acoustic mode의 3가지로 신호모드를 분리할 수 있었으며, 구조물 형상에 의한 신호특성의 차이는 flexural mode에서 발생함을 확인할 수 있었으며, steel과 aluminum의 신호특성을 비교해본 결과 유사한 신호특성을 가짐을 확인하여 가공이 쉬운 재질이라는 장점을 포함 현 단계까지의 결론은 축소 모의 표적 재질로 Aluminum을 최적의 재질로 선정할 수 있다.

6.3 향후 연구 방향

좀더 다양한 방법의 수치모델을 통한 상사법칙의 추가 검증이 필요하며, 실험적 검증을 통해 실제적으로 발생하는 현상을 확인하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다.(부록.1 : 축소 모형표적의 구조실험 방법론)

좀더 복잡한 형상에 대해서 중요한 wave mode 분리 및 simulation을 위한 상사법칙 연구가 이루어져야 하겠으며, 또한 실 표적신호와 축소형 표적 신호와의 상관관계 분석이 계속적으로 실시되어야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] Alterman, Z. and Karal, F. C. Jr., 1968, Propagation of Elastic Waves in Layered Media by Finite Difference Method, Vol. 58, No.1, pp.367-398, Bulletin of the Seismological Society of America.
- [2] Pompoli, R., Sound Radiation Prediction by Scale Models, University of Southampton.
- [3] Spiegel, M. R., Fourier Analysis, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill, Book Company.
- [4] Leissa, A., Vibration of Plates, Ohio State University.
- [5] Kelly, K. R., Ward, R. W., Alford, R. M., Treitel, S., Synthetic Seismograms: A Finite-Difference Approach, Geophysics, Vol.41, pp2-27, 1976.
- [6] Levander, A. R., Use of The Telegraphy Equation to Improve Absorbing Boundary Efficiency for Fourth-Order Acoustic Wave Finite Difference Schemes, Bull. Seismo. Soc. Am., 75, pp1847-1852., 1985.
- [7] Clyton, R., Engquist, B., Absorbing Boundary Conditions for Acoustic and Elastic Wave Equations, Bull. Seismo. Soc. Am., 67, pp1529-1540., 1977.

