
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 35 卷 第 2 號 1998年 5月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 2, May 1998

규칙파중 수면 근처에 고정된 상자형 방파제의 특성에 관한 연구

송무석*, 김도영*, 이현엽**, 조일형***

An Experimental and Numerical Study on the Characteristics of Pontoon Type Breakwater Fixed Near Free Surface in Regular Wave

by

M. Song*, D.Y. Kim*, H.Y. Lee** and I.H. Cho***

요 약

부유식 방파제의 특성을 파악하기 위하여 수면 근처에 고정된 상자형 방파제 경우의 방파성능을 실험하고 수치계산과 비교하였다. 상자의 폭과 흘수를 변화시키고 파의 주기와 경사도(wave steepness)를 변화시킴으로써 비교적 다양한 변수변화에 따른 영향을 확인하고자 하였다. 투과계수와 방파제에 작용하는 힘을 실험으로부터 측정하고 선형포텐셜이론에 의해 계산된 결과와 비교함으로써 방파제가 수면근처에 고정된 경우 투과계수와 파력에 대한 흘수 및 파장의 영향을 논하였다. 배열의 경우 폰툰사이의 간격이 투과계수와 파력에 미치는 효과를 논하였고, 전반적으로 계산이 실험의 결과를 효과적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In order to understand the characteristics of floating breakwaters we planned series of experimental and numerical investigations and completed the first stage which is the experiment with fixed pontoons near the free surface. As controlling parameters the draft and breadth of pontoon were varied and the wave frequency and steepness were also varied. Wave transmission and forces exerted on the breakwater were experimentally investigated and compared with the results computed based on linear potential theory. Discussions made are on the effect of draft and wave length on the wave transmission and force in fixed pontoon case.

접수일자 : 1997년 1월 6일, 재접수일자 : 1998년 3월 2일

* 정회원, 홍익대학교 조선해양공학과

** 정회원, 충남대학교 선박해양공학과

*** 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

The predicted and measured results show quantitatively good agreement both in forces and transmission coefficient. The effect of separation distance between two pontoons on the wave transmission and force in array case is also examined.

1. 서론

육지면적의 부족과 육상자원의 고갈문제가 심각하게 대두되고 있는 현 시점에서, 해양개발은 이를 해결할 수 있는 가장 현실적인 방법으로 인정되고 있다. 이를 위하여 설치되는 해양시설의 기능성과 안전성을 효율적으로 극대화하기 위하여 일반적으로 주위에 방파제를 설치하는 것을 생각할 수 있다. 하지만 흔히 사용되어오던 착저식 방파제는 설치에 많은 시간과 경비가 소요되고 환경 및 생태계에 원치 않는 변화를 줄 수 있으며 설치 예정지의 수심, 지질 그리고 육지로부터의 거리 등의 여건에 많은 제약을 받는 단점이 있다 (Tsinker[1995]). 이를 해결하기 위하여 특정한 계류시스템에 의지하는 부유식 방파제의 도입이 최근 여러 나라에서 적극적으로 고려되고 있는데 (Grinyer[1995], Mani[1991], Nekado et al.[1980], Sugawara et al.[1984]), 이들 부유식 방파제는 고정식의 문제점을 상당히 해소할 수 있는 반면 아직까지 완전히 이해되고 해결되지 못한 부정적인 면도 가지고 있다. 즉, 방파제의 성능을 방파능력과 안전성으로 평가한다고 볼 때에, 부유식 방파제는 파장에 따라 달라지긴 하지만 파의 부분적인 투과를 허용할 수밖에 없고 계류계의 손상 발생시 부유체의 표류 및 돌발적인 거동으로 예측하기 어려운 피해가 야기될 수 있다(Tsinker[1995]). 이렇게 볼 때 부유식 방파제가 부유식 특히 이동이 가능한 해상플랜트의 부속 장치로 목적인 작업의 능력과 안전성을 극대화하는데 결정적인 도움을 줄 수 있는 장비로 자리잡을 수 있기 위하여는 해양 환경에 따른 부유식 방파제의 방파성능과 계류계의 손상시 예측되는 운동학적 문제에 대한 충분한 이해가 필요하다.

이에 본 연구는 안전성과 방파성능의 극대화가 보장되는 부유식 쇄파장치의 기본설계에 사용될 수 있는 기초적인 정보를 얻고자 고정된 상자형

부유식 방파제를 중심으로 규칙파중의 방파성능을 살펴보았다. 2차원 조파수조에서 구속 조건하에서 방파제에 미치는 유체력과 방파성능을 실험하였고 수치해석의 결과와 비교하여 수치모사 가능성을 검토하였다.

2. 상자형 부유식 방파제 특성 이론계산

부유체의 크기가 파장에 비해서 작을 경우에는 모리슨방정식의 경우에서 처럼 점성력을 고려해야 한다. 파장이 L 직경이 D 인 원통형구조물인 경우 $D/L < 0.2$ 인 범위에서는 산란효과가 크지 않으며, 파랑하중은 모리슨방정식으로 계산할 수 있다. 그러나 $D/L > 0.2$ 인 경우 산란효과가 크게 나타나서 관성력이 점성력보다 지배적인 범위로 부유체에 작용하는 파랑하중을 정확히 추정하기 위해서는 산란포텐셜(diffraction potential)을 계산하여 산란파에 대한 효과를 고려해야한다 (Sorensen [1993]). 본 연구에서 대상으로 하는 상자형 부유식방파제는 원통형구조물과 같이 산란효과가 중요한 범위가 명확히 알려져 있지 않다. 그러나 일반적인 부유식방파제의 크기는 파장과 부유체의 폭의 비가 1 - 8사이에 분포될 것으로 추정되기 때문에 산란효과가 크게 나타날 것으로 생각되어 점성의 효과는 무시하였다. 본 논문에서는 선형포텐셜이론을 이용하여 산란포텐셜을 구하고 방파성능 및 유체력을 계산하였다. 산란문제의 해를 구하기 위하여 경계요소법(boundary element method)을 사용하였으며, 그린함수(Green function)로는 라플라스방정식(Laplace equation)만 만족하는 함수를 기본해로 사용하여 각 경계면에서 경계조건을 만족하는 포텐셜을 구하였다. 또한 계산의 효율을 높이기 위하여 유체를 내부영역과 외부영역으로 나누어 정합면에서 연결시키는 방법을 사용하였다 (Liu et al.[1982], Song et al.[1996]).

2.1 산란문제

유체는 비점성, 비압축성이라 가정하고 비회전성 유동을 가정하면 속도포텐셜을 도입할 수 있다. 입사파는 주파수 ω 인 규칙파로 가정한다. 입사파의 파고가 충분히 작으면 선형이론을 사용할 수 있다. 좌표계는 직교좌표계를 사용하고 z 방향은 수직상방을 양의 방향으로 선택한다. 속도포텐셜은 다음과 같이 복소함수로 표현하기로 한다.

$$\Phi(x, z, t) = \text{Re}\{\phi(x, z)e^{-i\omega t}\} \quad (1)$$

속도포텐셜은 유체영역 내부에서 라플라스 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

또 경계면에서는 다음과 같은 경계조건들을 만족해야한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \omega^2 \frac{\phi}{g} = 0 \quad \text{on } z=0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on the body} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on the bottom} \quad (5)$$

여기서 법선벡터는 유체장 밖으로 향하는 방향을 양의 방향으로 생각한다.

속도포텐셜은 입사파와 산란파에 의한 포텐셜의 합으로 생각할 수 있다.

$$\phi = \phi_I + \phi_L \quad (6)$$

선형파이론에 의하면 입사파의 속도포텐셜은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\phi_I = -\frac{igA}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{ikx} \quad (7)$$

$$\text{여기서 } \omega^2 = gk \tanh kh \quad (8)$$

또한 속도포텐셜은 다음과 같은 방사조건을 만족하여야한다.

$$\lim_{k \rightarrow \pm\infty} \left(\frac{\partial}{\partial x} \mp ik \right) (\phi - \phi_I) = 0 \quad (9)$$

2.2 경계요소법

앞절에서 식 (2)-(5), 그리고 식 (9)로 정의된 경계치문제의 해를 구하기 위하여 경계요소법을 사용하기로 한다. 여기서 그린함수로 다음과 같은 2차원 소오스(source)를 사용하기로 한다.

$$G = -\frac{1}{2\pi} \ln \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (10)$$

여기서 (x_i, y_i) 는 소오스의 위치이다. 이 함수는 경계조건은 만족하지 않고, 라플라스방정식만을 만족하기 때문에 그린함수를 물체의 경계면 뿐만 아니라 모든 경계면에 분포시켜야한다. 그린정리를 이용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\sigma_i \phi_i = \int_{\Gamma} \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (11)$$

여기서 σ_i 는 경계면에서 이루는 각도이고, ϕ_i 는 그린함수가 위치한 곳에서의 포텐셜의 값 그리고 Γ 는 경계면으로 구성된 곡선을 나타낸다. 경계면을 여러 개의 선분으로 분할하고 각 선분 내에서 속도포텐셜과 속도가 일정하다고 가정하면 다음과 같이 이산화 할 수 있다.

$$\sigma_i \phi_i + \sum_{j=1}^N \phi_j \int_{\Gamma} \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma} G d\Gamma \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \quad (12)$$

이식에 경계조건을 적용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \sum^F (H_{ij} - \frac{\omega^2}{g} G_{ij}) \phi_j + \sum^S H_{ij} \phi_j + \sum^B H_{ij} \phi_j \quad (13) \\ + \sum^X H_{ij} \phi_j + \sum^Y H_{ij} \phi_j = \sum^X G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} + \sum^Y G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \end{aligned}$$

여기서

$$G_{ij} = \int_{\Gamma} G d\Gamma \quad (14)$$

$$\widehat{H}_{ij} = \int_{\Gamma} \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad (15)$$

$$H_{ij} = \begin{cases} \widehat{H}_{ij} & i \neq j \\ \widehat{H}_{ij} + \sigma_i & i = j \end{cases} \quad (16)$$

식(13)에서 F 는 자유표면, S 는 물체, B 는 바닥 X^- 와 X^+ 는 각각 방사조건이 적용되는 좌우의 경계면을 나타낸다. 식(13)에서 아래의 방사조건을 이용하면 ϕ_i 에 대한 대수방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik\phi \quad \text{at } x^+ \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -ik(\phi - \phi_I) + \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{at } x^- \quad (18)$$

2.3 정합조건

방사조건을 적용하는 곳은 이론적으로는 무한대지만 실제 계산에서는 유한히 떨어진 지점에서 적용하게 된다. 방사조건 적용 위치가 수치계산에 영향을 미치지 않기 위해서 적용 위치를 물체에서 되도록 멀리 떨어진 곳을 택해야 한다. 그러나 이

렇게 되면 수치계산영역이 크게되어 계산효율이 크게 떨어질 수 있다. 본 연구에서는 효율적인 수치계산을 위하여 유체영역을 내부영역과 외부영역을 나누고, 이 두 영역에서의 해를 정합면에서 정합시키는 방법을 사용하기로 한다.

유체외부영역에서 식(2)~식(5)와 식(9)를 만족하는 해의 형태를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi^\pm = A_0^\pm e^{\pm ikx} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (19)$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} A_n^\pm e^{\mp k_n x} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} + \begin{pmatrix} 0 \\ \phi_I \end{pmatrix} \begin{matrix} x > x^+ \\ x < x^- \end{matrix}$$

여기서 k 와 k_n 은 다음관계식을 만족한다.

$$\omega^2 = gk \tanh kh, \quad \omega^2 = gk_n \tan k_n h \quad (20)$$

A_0^\pm 와 A_n^\pm 는 미정계수로 정합조건을 이용하여 결정한다.

식(19)를 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \phi^\pm &= A_0^\pm W_0^\pm + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^\pm W_m^\pm + \begin{pmatrix} 0 \\ \phi_I \end{pmatrix} \begin{matrix} x > x^+ \\ x < x^- \end{matrix} \\ &= \{W_0^\pm W_1^\pm W_2^\pm \dots\} \{A_0^\pm A_1^\pm \dots\}^T + \begin{pmatrix} 0 \\ \phi_I \end{pmatrix} \\ &= \{C^\pm\} \{A^\pm\}^T + \begin{pmatrix} 0 \\ \phi_I \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

정합조건으로 $x = x^\pm$ 에서 다음 두 조건을 사용하기로 한다.

$$\phi = \phi^\pm \quad (22)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \pm \frac{\partial \phi^\pm}{\partial x} \quad (23)$$

미정계수 숫자는 무한히 많으나, 실제 계산에서는 미지수의 수와 요소수가 같아야 방정식을 풀 수 있기 때문에 정합에 사용하는 미지계수의 갯수는 정합면에 위치한 요소수 만큼 택한다. 정합면에서의 n개의 요소를 택하면 속도포텐셜을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\{\phi^\pm\} = [C^\pm]\{A^\pm\}^T + \begin{pmatrix} 0 \\ \{\phi_I\} \end{pmatrix} \begin{matrix} x > x^+ \\ x < x^- \end{matrix} \quad (24)$$

식(24)를 식(22), (23)에 대입하면 $x = x^+$ 에서 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\{\phi\} = [C^+]\{A^+\}^T \quad (25)$$

$$\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} = [D^+]\{A^+\}^T \quad (26)$$

식(25)와 식(26)을 이용하면 다음과 같은 정합조건을 얻을 수 있다.

$$\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} = [D^+][C^+]^{-1}\{\phi\} \text{ at } x = x^+ \quad (27)$$

비슷하게 $x = x^-$ 에서는 다음과 같이 된다.

$$\{\phi\} = [C^-]\{A^-\}^T + \{\phi_I\} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} &= -[D^-]\{A^-\}^T - \left\{ \frac{\partial \phi_I}{\partial x} \right\} \\ &= -[D^-][C^-]^{-1}\{\phi - \phi_I\} - \left\{ \frac{\partial \phi_I}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

식(28)와 (29)를 이용하면 다음과 같은 정합조건을 얻는다.

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} &= -[D^-][C^-]^{-1}\{\phi - \phi_I\} - \left\{ \frac{\partial \phi_I}{\partial x} \right\} \\ \text{at } x &= x^- \end{aligned} \quad (30)$$

식(27)과 식(30)을 이용하여 식(13)의 우변을 정리하면 최종적으로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &\sum^F (H_{ij} - \frac{\omega^2}{g} G_{ij}) \phi_j + \sum^S H_{ij} \phi_j + \sum^B H_{ij} \phi_j \\ &+ \sum^{X^+} (H_{ij} - G_{ij}[D^+][C^+]^{-1}) \phi_j \\ &+ \sum^{X^-} (H_{ij} + G_{ij}[D^-][C^-]^{-1}) \phi_j \\ &= \sum^{X^-} G_{ij} \left\{ [D^-][C^-]^{-1} \phi_j - \frac{\partial \phi_{Ij}}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

식(31)에서 ϕ_j 에 대한 대수방정식을 풀면 경계치 문제의 해를 얻는다.

2.4 힘과 투과계수

산란포텐셜을 구하면 힘과 투과계수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\vec{F} = - \int_{s_0} \rho \Phi_i \vec{n} ds \quad (32)$$

$$= \text{Re} \left\{ i\omega \int_{s_0} \phi e^{-i\omega t} \vec{n} ds \right\} = \text{Re} \{ \vec{f} e^{-i\omega t} \}$$

$$f_x = i\omega \rho \int_s \phi(x, z) n_x ds \quad (33)$$

$$f_z = i\omega \rho \int_s \phi(x, z) n_z ds \quad (34)$$

물체로부터 멀리 떨어져서 국부항의 영향이 사라진 지점에서의 투과계수는 다음과 같이 주어진다.

$$C_T = \frac{H_T}{H_I} = \frac{\omega |A_o|}{gA} \quad (35)$$

여기서 A 는 입사파의 진폭이다.

2.4 수치계산

경계요소의 크기를 변화시키면서 계산을 수행하여 수렴도를 확인한 결과 대부분의 계산에 다음과 같은 요소수를 사용하였다. 부유체의 바닥과 좌우 흘수면에 각 20개 씩 물체의 표면에 총 60개의 경계요소를 분포하였으며, 흘수의 시작과 끝 부근에 요소를 상대적으로 많이 분포하였다. 각 자유표면에는 60개씩의 경계요소를 사용하였다. 정합조건이 적용되는 좌우의 정합면에서는 5개의 요소를 사용하였고, 바닥에는 10개의 요소를 사용하였다. 자유표면의 길이는 부유체의 폭 정도의 크기를 사용하면 정합경계면의 위치에 따른 오차의 영향은 거의 나타나지 않았다.

수치계산한 결과를 검증하기 위하여 Liu와 Abbaspour[1982]의 산란문제와 결과를 비교하였다. 사용한 부유체는 폭 h , 흘수 $0.5h$ 수심 h 인 직사각형 단면체이고 이에 걸리는 수평, 수직방향의 힘과 모우먼트 그리고 투과계수를 계산하였다. 본 계산 결과는 이들의 결과와 잘 일치하였다.

3. 상자형 부유식 방파제의 특성 실험

각종 구조물과 해양과의 관련을 실험적으로 연구하기 위하여 여러 가지 규모의 조파수조를 사용한다. 일반적으로 조파수조는 상대적으로 좁은 폭과 길이가 충분히 긴 형태로 한쪽 끝에 특정형식의 조파기(wavemaker)가 장착되고 그 반대편에는 전달되는 파의 에너지 흡수를 위해 소파장치가 설치된 구조로 되어있다. 본 연구에 사용된 홍익대학교 선형시험수조실의 조파수조는 길이 20m, 폭 0.5m 그리고 수심을 0.45m 내외로 조정하여 사용할 수 있는 장비이며 플랩 형식의 조파기와 비치 형식의 소파장치를 이용하고 있다. 가이드 레일을 따라 움직이는 소형 전동 대차가 설치되어 있어 계측장비의 이동 등에 쓰일 수 있으며 피스톤 형식의 불규칙파용 조파장치도 설치되어 있으나 이번 연구에서는 사용하지 않았다. Fig. 1은 조파수

조와 실험에 사용된 장비들의 배열을 보여주고 있다.

파고의 계측을 위하여 Churchill사의 용량식 파고계와 증폭장치를 (3 set) 사용하였다. 시간에 따라 변하는 파고 신호는 Tektronix 2630 digital data acquisition system을 이용하여 60-80초 동안 채널당 4096개의 샘플을 취하여 저장하였다. 수평 및 수직방향 힘의 계측은 스트레인 형식의 자체 개발된 검력계를 이용하여 하였다.

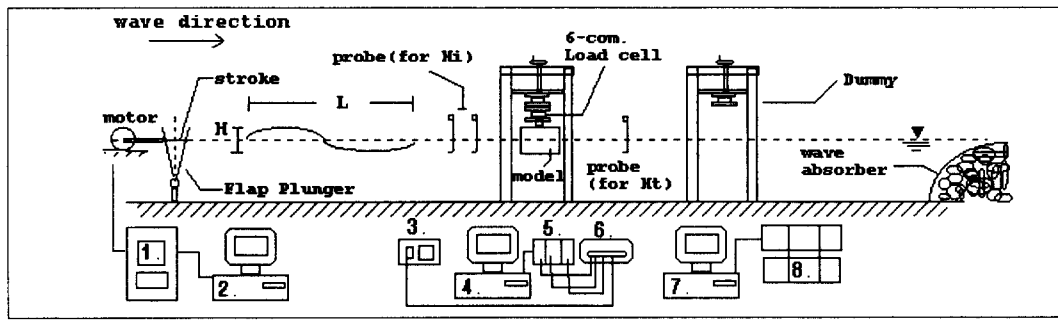
상기한 장비를 이용하여 원하는 크기의 모델을 취부장치에 고정된 검력계 혹은 수직운동용 가이드에 부착시킨 후 원하는 주기와 파고를 갖는 파를 입사시킨다. 조파기의 작동과 더불어 3개의 파고계 신호와 검력계로부터의 파력신호를 기록하였다. 파고계는 입사파용으로 2개, 투과파용으로 1개를 사용하였다.

장시간 (대체로 조파기를 작동시킨 후 70여초 이후) 후에는 2차원 설정이 흐트러지고 조파기와 모델 사이는 갖가지 성분의 반사파들의 중첩으로 실험을 계속하는 것이 의미가 없게 된다. 투과파 역시 많은 경우에서 여러 성분의 파가 중첩된 형태로 얻어지는데 결과 정리를 위한 시간의 선택에 주의하면 큰 문제는 없었다.

4. 결과 및 토론

실험된 상자형 방파제의 크기는 폭(B)이 0.1, 0.2, 0.4, 0.8m 이고 흘수(d)는 수직이동이 용이하도록 제작된 취부장치의 이동으로 변화를 주었다. 계산은 실험에서 구현된 조건에 대해 수행하였으나 실험에서 시도되지 못한 변수의 변화에 따른 영향도 함께 살펴보았다.

원하는 크기의 모델을 취부장치에 설치된 검력계에 부착하고 모델 전후에 파고계를 설치하여 입사파와 투과파의 파고 및 파력을 계측하였다. 특정 폭과 흘수의 모델에 대하여 파장과 파고의 변화를 주며 실험을 실시하고 연차적으로 다른 폭과 흘수에 대한 실험을 수행함으로써 체계적인 연구가 되도록 하였다.



1. Wave generator
2. Personal Computer for wave generator
3. Function generator for arbitrary signal generation
4. Data acquisition system for wave data
5. 3 channel Amp for wave data acquisition
6. Tektronics 2630 (wave data converter)
7. Data acquisition system for wave force and moment
8. 6 channel Amp for wave force and moment data acquisition

Fig. 1 Wave tank and experiment setup

4.1 1개의 고정식 부유체를 사용한 경우

파장 L 과 방파제 폭 B 의 비의 함수로 투과계수 (transmission coefficient)를 정리하여 Fig. 2에 계산결과와 함께 보였다. Fig. 2에 보인 바와 같이 파장이 커질수록 파의 투과가 증가함을 확인할 수 있는데 L/B 가 대략 4.0 이상일 경우 50% 이상의 파가 투과하고 있다. 전체적으로 계산된 결과가 실험결과와 잘 일치하고 있으나 파장이 증가하면서 차이를 보이고 있다. 이는 계산에서 고려되지 않은 파의 에너지를 소산시키는 요소가 실제에는 존재함을 의미하는데 특히 장파의 경우 그 경향이 두드러진 것으로 보아 점성효과로 판단된다. L/B 가 2.0 이하의 경우에도 계산이 실험값과 차이를 보이는데 이는 파장을 극단적으로 줄임으로써 야기된 실험실의 파의 비선형성으로 선형계산과 차이를 주는 것으로 생각된다. 하지만 L/B 가 2.0 이하의 경우는 실제 방파제의 설계를 생각할 때에 큰 의미가 없는 영역이다.

대응되는 파력을 정리하여 Fig.3과 Fig.4에 보였다. 무차원화를 위하여 힘의 진폭을 $(0.5\rho g B A_i L_p)$ 로 나누었다. 여기서 A_i 는 입사 파의 진폭 그리고 L_p 는 모델의 길이, 즉 수조의

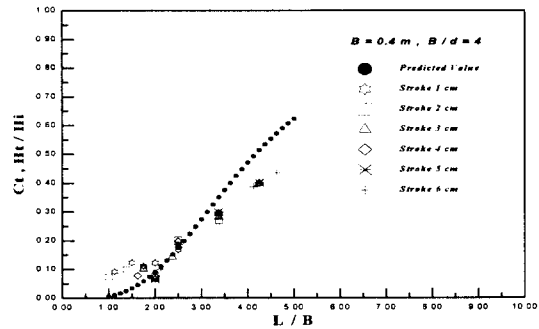


Fig. 2 Predicted and measured transmission coefficient with stroke variation. $B=0.4m, B/d=4$.

폭이다. 수평방향과 수직방향의 힘이 그림에 보여지는 바와 같이 계산과 실험이 잘 일치하고 있으나 전술한 이유로 L/B 가 작은 영역에서 약간의 차이를 보이고 있다. 수평방향 힘은 그림에 보인 경우 $L/B=3.5$ 근처에서 최대가 되는 반면 수직방향 힘은 파장이 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 그림에 표시된 stroke의 차이는 파의 경사도의 차이를 의미하는데, 결과적으로 본 연구에 사용된 경사도 변화는 투과정도와 유체력에 큰 영향을 주고있지 않음을 알 수 있다. 참고로 파경사도는 파 주기와 스트로크의 크기에 따라 달라지지만 스트

로크가 크고 고주파의 경우 (5cm, 1.6Hz) 0.09 에서 그 반대의 경우 (1cm, 0.9Hz) 0.01 까지 달라질 수 있다.

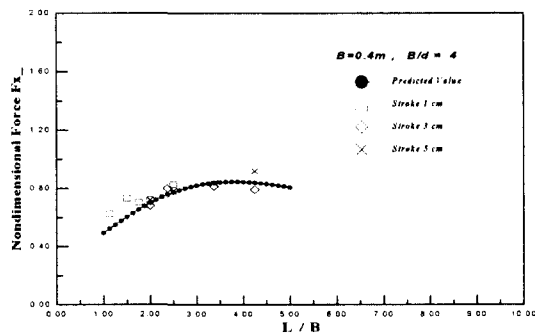


Fig. 3 Predicted and measured x-direction wave force in dimensionless form. $B=0.4m$, $B/d=4$. $F_x = F_x / 0.5 \rho g B A_i L_p$

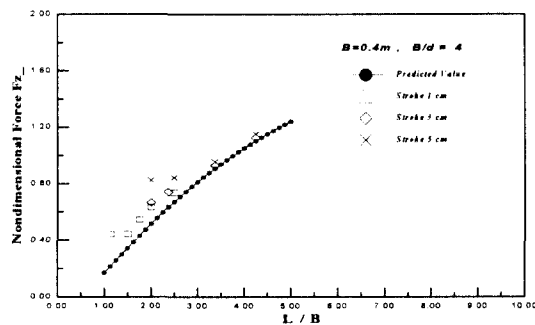


Fig. 4 Predicted and measured z-direction wave force in dimensionless form. $B=0.4m$, $B/d=4$. $F_z = F_z / 0.5 \rho g B A_i L_p$

Fig.5 - Fig.7에는 $B=0.2m$, $B/d=2$ 의 경우의 투과계수, 수평 그리고 수직방향힘을 나타낸다. 50% 이상의 파의 통과를 보이는 L/B 값과 파의 수평방향 힘이 최대가 되는 L/B 값이 전의 경우와 다를 뿐, 전반적인 경향은 $B/d=4$ 인 경우와 기본적으로 같음을 알 수 있다.

전반적으로 계산된 결과가 실험값과 잘 일치함을 확인하였으므로 계산결과를 바탕으로 흘수변화의 영향을 자세히 살펴보고자 폭을 0.2m로 고정시키고 흘수의 변화에 따른 투과계수를 Fig.8에 보

였다. 쉽게 예측할 수 있듯이 흘수를 증가시키면 방파의 효과가 증대됨을 볼 수 있다. Fig.9에는 폭 대신에 흘수를 사용하여 무차원화된 수평방향 힘을 보였다. 그림에서 명확히 나타나듯이 최대의 힘이 예상되는 L/B 값이 흘수의 함수이고 흘수가 커질수록 이 값이 커짐을 알 수 있다. 이는 특정 파장에서 모델의 폭이 정해진 경우에 방파 효과를 높이고자 흘수를 키우는 것이 계류력 등의 힘의 관점에서는 나쁜 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 예로써, Fig.9에서 $L/B=4.5$ 로 주어진 경우에 투과계수를 0.6에서 0.45로 떨어뜨리고자 흘수를 늘려서 B/d 를 8에서 4로 변화를 주는 것은 Fig.9에서 볼 수 있듯이 수평방향 힘이 최대가 되어 계류력이 문제가 될 수도 있다. 오히려 $B/d=2$ 의 경우가 상대적으로 작은 수평방향 힘을 보일 뿐 아니라 당연히 투과계수도 훨씬 작은 값을 나타내고 있음을 주목할 만 하고 결과적으로 예로 든 흘수의 증가는 현명하지 못한 선택이 될 수 있다. 수직방향의 힘은 Fig.10에서 보듯이 흘수가 커질수록 단순히 감소하는 것을 볼 수 있다. 힘의 무차원화에 흘수를 사용함으로써 경향이 증폭되긴 하였지만 흘수가 커질수록 바닥에서의 가속장에 기인하는 힘 성분이 상대적으로 줄어들어 기인하는 결과이다.

Fig.11에는 모델 크기의 영향을 보였다. B/d 가 4.0으로 고정되어 있으므로 B 를 증가시키는 모델의 크기가 커짐을 의미한다. 세 개의 곡선이 낮은 L/B 에서 함께 시작되어 특정 L/B 에서 하나씩 떨어져 나감을 볼 수 있다. 본 연구에서 사용된 수조의 깊이가 0.45m인 점을 상기하면 폭이 0.4m의 곡선이 벗어나기 시작하는 L/B 값이 (2.0 근처) 유한수심으로 들어가는 영역임을 확인할 수 있고, 다시 폭이 0.2m 인 곡선이 벗어나는 L/B 값 역시 유한수심 영역임을 알 수 있다. 파장이 극단적으로 커지는 경우 세 개의 곡선이 다시 모이는데 이는 천수역에서 모델의 크기가 큰 영향을 주지 못함을 보여준다. 무한 수심의 영역에서 투과계수는 무차원화된 파장의 함수로 모델의 크기와 무관하나 유한 수심의 영역에 들어서면 수심에 대한 척도가 달라지므로 투과계수는 모델의 크기에 영향

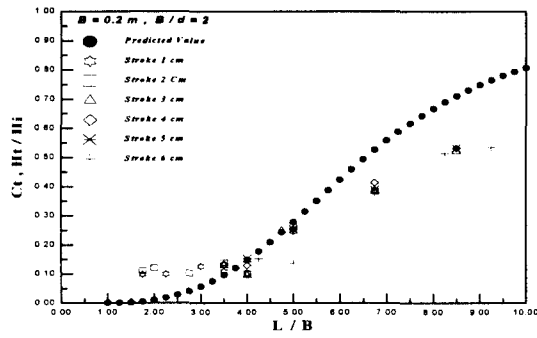


Fig. 5 Predicted and measured transmission coefficient with stroke variation. $B=0.2m$, $B/d=2$.

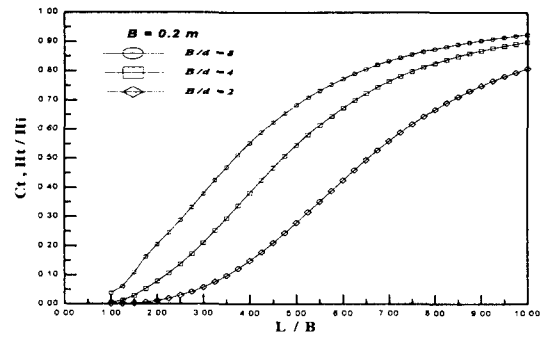


Fig. 8 Comparison of transmission coefficient with draft variation for $B=0.2m$.

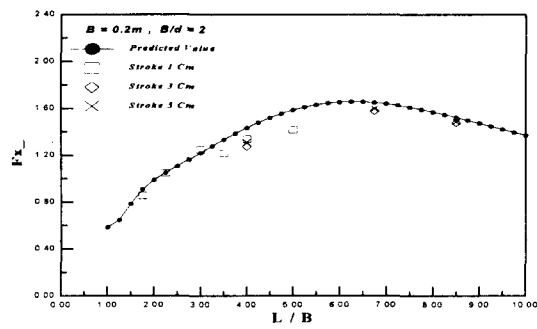


Fig. 6 Predicted and measured x-direction wave force in dimensionless form. $B=0.2m$, $B/d=2$.

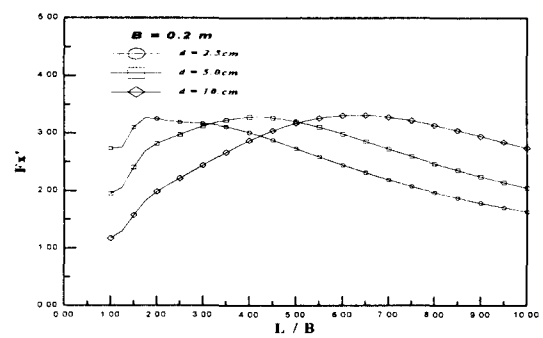


Fig. 9 Comparison of x-direction wave force with draft variation for $B=0.2m$. $F_x' = F_x/0.5 \rho g d A_i$

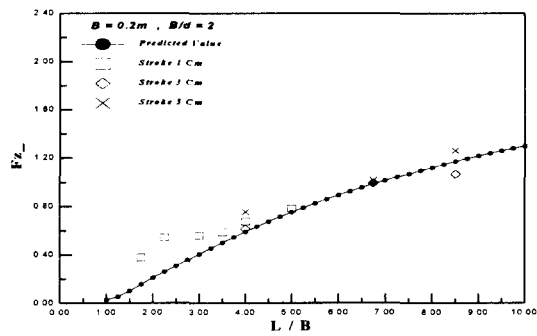


Fig. 7 Predicted and measured z-direction wave force in dimensionless form. $B=0.2m$, $B/d=2$.

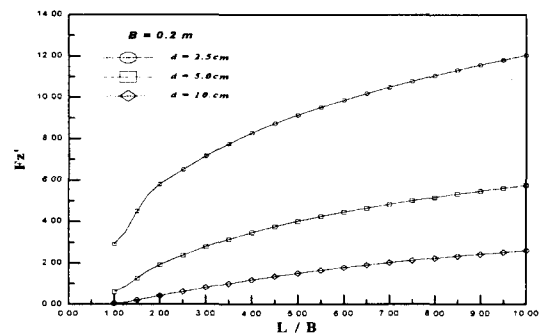


Fig. 10 Comparison of z-direction wave force with draft variation for $B=0.2m$. $F_z' = F_z/0.5 \rho g d A_i$

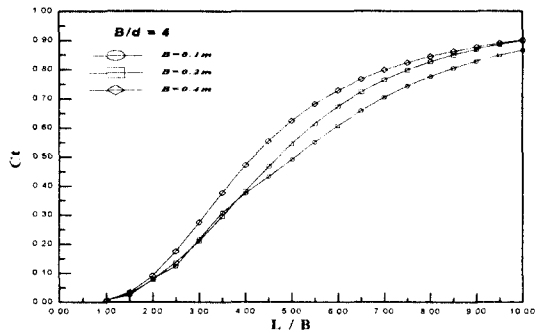


Fig. 11 Comparison of transmission coefficient with breadth variation for $B/d=4$.

을 받게 된다. 그림에 보이듯이 투과계수는 수심이 일정한 경우 크기가 작은 모델의 경우가 상대적으로 낮은 값을 주고 있다.

4.2 2개의 부유체를 사용한 경우

부유식 방파제의 특성상 어느 정도 파의 투과는 피할 수 없고 방파제의 폭이 고정되어 있는 경우에는 장파쪽으로 갈수록 투과계수가 커지는 것을 허용할 수밖에 없다. 그러나 방파제를 한 개 이상 사용하여 방파제간의 간섭효과를 이용한다면 보다 효율적인 방파를 할 수 있는 가능성이 있다 (Kinoshita et al.[1981]). 이에 배열을 사용하는 것 중 가장 간단한 경우로 동일한 크기의 부유식방파제 2개를 일정한 거리를 두고 설치하는 경우를 살펴보았다. 방파제에 걸리는 힘의 계측은 앞에 위치한 모델에서만 이루어졌다.

방파제 사이의 간격(s)은 $s/B=0.50, 0.75, 1.0$ 그리고 1.5 인 4가지를 선택하였다. Fig.12에는 폭 $0.2m, B/d=4.0$ 인 인 경우에 L/B 의 변화에 따른 투과계수의 변화를 나타내었다. 이론계산에 의한 투과계수는 L/B 가 비교적 작은 영역에서는 매우 작은 값을 유지하다가 특정 L/B 에서 빠르게 증가하기 시작하며 투과계수의 최대치가 1.0 을 가진 후 감소하다가 다시 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 간격이 작은 경우 ($s/B=0.50$) 투과계수는 상대적으로 짧은 파장에서 증가하기 시작하나 장파쪽에서는 간격이 큰 경우보다 오히려 낮은 투과계수

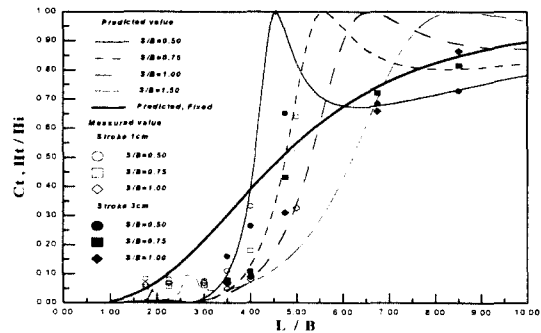


Fig. 12 Transmission coefficient vs L/B with separation distance variation. $B=0.2m, B/d=4$.

를 보이고 있다. 하나의 방파제에 대한 결과(굵은 실선)와 비교하여 살펴보면 배열의 사용이 상당한 크기의 L/B 영역까지 투과계수의 크기를 억제시킬 수 있다는 점과 이 영역을 넘어서며 오히려 과도한 파의 투과를 유발시킴을 알 수 있다. 특정 L/B 에서 투과계수의 증가는 방파제간에 갇힌 파와의 상호작용으로 추측되나 좀더 세밀한 조사가 필요하다고 판단된다. 실험에서는 계산에서 나타난 투과계수의 최대치 1.0 을 보여주지 못하고 있으나 이것을 제외하고는 계산에서 예측된 결과를 잘 검증해주고 있다. $B/d=2.0$ 인 경우에는 전반적인 경향은 전의 그림과 같으나 투과계수가 $B/d=4.0$ 인 경우와 비교하여 약간 작게 나타났다. 이상에서 배열을 사용하고 방파제간의 거리를 적절히 유지할 경우 특정 L/B 값 이하에서 투과계수를 상당히 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig.13은 입사파의 전방에 위치한 방파제에 걸리는 수평방향의 힘을 보여준다 ($B/d=4.0$). 수평방향의 힘은 L/B 가 커짐에 따라 증가하여 최대값을 보인 후 감소하는 경향이다. 이러한 경향은 간격이 커질수록 최대 힘이 더 큰 L/B 에서 발생하고 절대값 자체는 작아지는 변화를 보인다. 최대의 힘이 걸리는 L/B 값은 대체로 투과계수가 급격하게 증가하는 영역과 비슷하다. 하나의 방파제를 사용한 경우와 비교하여 보면 (Fig.3) 수평힘이 최대가 되는 L/B 값이 존재한다는 점이 유사하나 최대값 근처에서 변화가 상대적으로 심한 차이가 있

다. 실험값이 분산되는 스트로크 3cm와 1cm가 만나는 영역은 ($4 < L/B < 5$) 파경사도의 차이에 따라 힘이 달라지고 특히 선형의 계산과는 차이를 보임을 나타내고 있다.

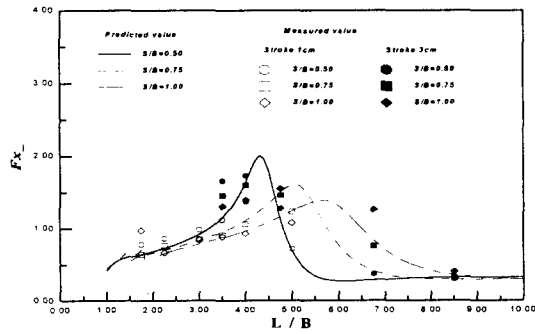


Fig. 13 Comparison of predicted and measured x-direction force on fore body with separation distance variation. $B=0.2m$, $B/d=4$.

Fig. 14는 입사파의 전방에 위치한 방파제에 걸리는 수직방향의 힘의 크기를 보여준다 ($B/d=4.0$). 이론계산 결과는 L/B 가 증가하면서 국부최대치를 가지며 이어서 국부최소치를 가진 후 급격히 증가하여 최대치를 보인 후 완만하게 변하는 것을 보여준다. 이는 파장의 증가에 따라 수직방향 힘이 증가하던 하나의 방파제의 경우와 비교하여 전혀 다른 특성으로, 수평힘이 최대가 되는 (또한 투과계수가 최대가 되는) 근처에서 수직방향의 힘이 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한 큰 차이는 없으나 L/B 가 작은 경우에는 s/B 가 작은 경우가, L/B 가 클 때는 s/B 가 클수록 수직방향의 힘은 작은 것을 볼 수 있다. 실험 결과는 역시 계산의 경향과 같고 스트로크가 큰 경우 단파쪽에서 전술한 이유들로 계산 보다 큰 값을 주고 있다.

Fig. 15는 $B/d=4.0$ 일 경우 앞파(Body2) 뒤에 (Body1) 위치한 방파제에 걸리는 수평방향의 힘의 이론계산 값을 함께 보여준다. 힘이 최대가 되는 파장은 앞파 뒤에서 약간의 차이가 있지만 전반적으로 유사한 형태의 힘을 받고있고 단파쪽에서는 앞쪽의 방파제가 거의 모든 파력을 경험하며 많은 부분의 파를 반사시킴을 유추할 수 있다. 반면 상

대적으로 긴 파의 경우 오히려 뒤쪽의 방파제에 많은 파력이 걸리는 것을 볼 수 있으나, L/B 가 매우 커지면 두 방파제가 받는 수평력의 차이는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 방파제간의 간격이 커질수록 최대치의 크기는 줄어들고 최대의 힘이 발생하는 파장은 길어짐을 알 수 있는데, 유의할 점은 앞파 뒤에 동시에 최대의 힘이 걸리는 L/B 영역에서 투과계수가 1.0까지 뛰어 오른다는 것이다 (Fig. 12와 비교).

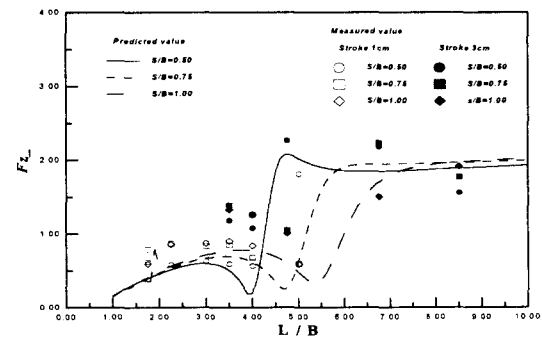


Fig. 14 Comparison of predicted and measured z-direction force on fore body with separation distance variation. $B=0.2m$, $B/d=4$.

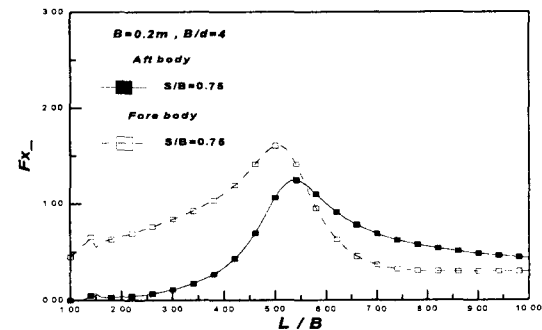


Fig. 15 Comparison of x-direction wave force acting on Body1 and Body2 for $B=0.2m$, $B/d=4.0$.

Fig.16은 $B/d=4.0$ 일 때 방파제에 걸리는 수직방향의 힘을 보여준다. 수평방향의 힘과는 달리 후방에 위치한 방파제에 걸리는 힘이 전방에 위치한 방파제에 걸리는 힘의 특성과는 다른 것을 볼 수

있다. 앞쪽에 걸리는 힘의 경향과는 달리 뒤쪽의에서 최소값이 존재하지 않고 있는데 이는 오히려 수평방향의 힘과 형태가 유사하다 하겠고, 일부 중간 크기의 파장영역을 제외하면 항상 더 큰 수직방향 힘이 앞쪽에 작용하고 있다. B/d가 다른 경우에도 같은 경향임을 확인할 수 있었다.

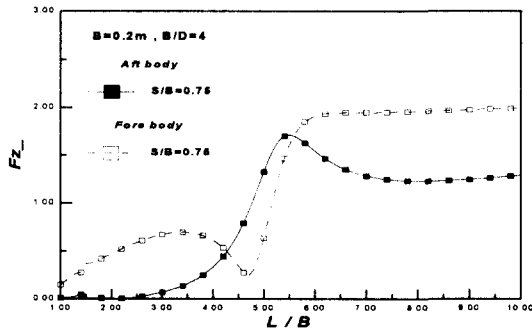


Fig. 16 Comparison of z-direction wave force acting on Body1 and Body2 for B=0.2m, B/d=4.0.

5. 결론

부유식 방파제는 해양환경에 최소의 영향을 주고 대수심인 해역에 설치할 수 있으며 경제성이 있어서 해양공간의 이용이 늘어남에 따라 부유식 방파제의 사용이 늘어날 것으로 전망된다. 이에 효율적인 부유식 방파제의 설계에 필요한 특성 파악을 위하여 기본적인 상자형의 모델을 설정하고 2차원 조파수조에서의 실험 및 계산을 수행하고 방파제가 구축된 경우 방파성능 및 부유체에 걸리는 파랑력을 살펴보았다.

수평, 수직력의 경우 모두 L/B가 5정도까지는 실험값과 계산치가 잘 일치하는 경향을 볼 수 있었다. 따라서 L/B가 5까지는 산란효과가 매우 중요한 역할을 하는 것으로 생각할 수 있다.

부유체를 고정시킨 경우 홀수증가에 따라 방파효과가 일반적으로 증대되지만, 대체로 파장과 방파제 폭의 비(L/B) 4~6 정도까지는 투과계수가 0.5 이하로 얻어질 수 있음이 확인되었다. 또한 수

직 방향의 힘은 파장 증가에 따라 단순 증가하지만 수평방향의 힘은 특정 L/B에서 최대가 되어 방파효율 증대를 위한 홀수의 증가가 수평 방향 힘의 증가를 유발할 수 있다.

두 개의 방파제를 배열할 경우 방파효과는 방파제간의 거리에 따라 달라지는데 거리가 커질수록 방파효과가 있는 파장이 길어짐을 확인하였고 방파제에 걸리는 파력은 투과계수가 최대가 되는 영역을 전후로 많은 변화를 보인다.

선형이론을 사용한 계산은 전반적으로 실험의 경향을 모사하였다. 따라서 부유식방파제의 특성 파악 및 기본 설계에 선형이론을 사용하여 유익한 정보를 파악 할 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원의 지원을 받아 수행된 위탁과제의 결과의 일부이며 동 기관의 지원에 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Grim, O., "Die Schwingungen von Schwimmenden, Zwei-dimensionalen Korpern," HSVA Report 1171, 1959.
- [2] Grinyer, A.W., "Fixed and floating breakwaters for small craft harbours: experience at Town Quay Southampton, Haslar Marina, Portsmouth and Parkstone Yacht Haven, Poole", 3rd Int. Conf. Planning Design and Operation Marina III, 1995.
- [3] Kinoshita, Takeshi & Saijo, Ken-Ichi, "On the Multi Body Type Floating Breakwater", J. SNAJ, Vol.149, pp.54-64, 1981.
- [4] Liu, P. & Abbaspour, M., "An integral equation method for the diffraction of oblique waves by an infinite cylinder", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol.18, 1982.
- [5] Mani, J.S, " Design of Y-frame Floating Breakwater ", J. Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, Vol.117, No.2, pp.105-119, 1991.

- [6] Nekado, Yukiharu & Kokumai, Akihisa, "A Study on Air Controlled Floating Breakwater", J. KSNJ, 177, pp.1-9, 1980.
- [7] Sarpkaya, T., Isaacson, M., "*Mechanics of wave forces on offshore structures*," Van Nostrand Reinhold, 1981
- [8] Song, M., Kim, D., Kim, Y. & Lee, H., "A study of the characteristics of floating breakwaters", Proc. Hull Form'96, Inchon, Korea, 1996.
- [9] Sorensen, *Basic Wave Mechanics for Coastal and Ocean Engineering*, Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons, Inc. 1993
- [10] Sugawara, Tadao & Yoshimura, Tadashi, "Development of PC Hybrid Floating Breakwater" , Mitsui Technical Review Tokyo, Mitsui Heavy Industries, Ltd., n 124, Feb 1984.
- [11] Tsinker, G.P., *Maine Structures Engineering: Specialized Applications*, Chapman & Hall, NY, 1995.