

복합 실린더에 작용하는 파력 및 조류력에 관한 연구

박 광 동* · 조 요 재**

A Study of Wave and Current Forces on Cylinders

Kwang-Dong Park · Hyo-Jae Jo

ABSTRACT

In this paper, the wave and current forces on cylinders are investigated by theoretical and experimental methods. The models used are one-cylinder, four-cylinder and semi-submersible types. The theoretical investigations are carried out based on both Morison equation and three dimensional source distribution method to calculate exciting forces from waves and currents.

The experimental investigations are conducted in the two-dimensional irregular wave tank in Korea Maritime University. In these tests, the models have been exposed to both regular and irregular waves with and without currents. As the wave frequency increases, the first-order wave forces increase for one-cylinder model but decrease for four-cylinder and semi-submersible models. For the four cylinder model, when the regular waves travel against currents, there has been some difference between theoretical and experimental results at the wave frequency of 10.5 rad/sec. The reason is that interaction between wave and current is very significant at the frequency. And the forces exerted on the models are larger for incoming wave traveling against current than for incoming wave traveling with current

* 한국해양대학교 조선공학과 대학원

** 한국해양대학교 조교

1. 서론

본 논문에서는 바람에 의한 영향은 고려하지 않고 파와 조류가 공존시에 구조물에 작용하는 힘을 측정하는데 그 목적을 두었다. 먼저, 이론계산은 관성력과 항력으로 중첩되어 있는 Morison 방정식과 임의의 형상 부체의 회절(diffraction)문제 및 산란(radiation)문제를 풀 수 있는 3차원 특이점분포법을 적용하였다.

실험은 실린더 1개, 실린더 4개 그리고 반잠수식 구조물의 모형에 대해서 수행하였다. 파의 주기는 수심이 0.8m일 경우에 심해조건에 알맞게 설정하였고 파고는 그러한 주기에 대해서 정상적인 파형을 유지 할 수 있는 값을 설정하였다. 조류는 파의 진행방향과 반대 방향으로 흐르게 하였고 실험 모형들은 길이 25m인 수조에 중간에 고정되게 하고 힘을 측정 할 수 있는 계측기인 로드 셀(load cell)에 설치하였다. 그리고 불규칙파는 ISSC 스펙트럼을 이용하여 유의파고가 0.06m, 유의주기가 0.8sec인 경우로 생성시켰다.

실험 값과 이론 값은 다음 세 가지 경우를 비교 검토하였다. 첫 번째는 First-Order 파력에 대해서 조사한 결과 파장에 비해 구조물의 직경이 작은 경우에도 회절이론이 잘 일치하였고 실린더가 1개인 경우에는 주파수가 증가함에 따라 파력도 증가하고 실린더 4개와 반잠수식 모형인 경우에는 구조물간의 간섭에 의해서 감소한다. 두 번째는 파와 조류의 공존시에 외력 값은 정방향 조류보다 역방향 조류시 더 크게 나타난다. 세 번째는 불규칙파와 조류가 공존시에 유효외력 값은 역방향 조류시에는 크게 나타나고 정방향 조류시에는 작게 나타난다.

각 장에 대한 개요는 다음과 같다.

제2장에서는 미소진폭파와 조류가 공존시에 구조물에 작용하는 힘을 계산하기 위해서 이론식을 전개하였다. 이론식은 Morison 방정식과 3차원 특이점분포법에 대해서 기술하였다. 제3장에서는 불규칙파와 조류가 공존시에 힘 스펙트럼을 계산하는 이론식을 전개하였다. 제4장에서는 이론식에 의해서 계산한 값과 실험에 의해서 측정된 값을 서로 비교, 검토하였다. 제5장에서는 논문에서 얻은 결론을 서술하였다.

2. 규칙파와 조류중 구조물에 미치는 힘

본 장에서는 규칙파와 조류중에 무한수심에 설치된 해양구조물의 파랑 강제력, 조류력 그리고 파와 조류가 공존시에 구조물에 미치는 힘을 계산하였다.

2.1 파력의 기본해석

해양구조물에 대한 파력은 두 가지 다른 방법[10]에 의해 계산되어진다.

- Morison 방정식
- 회절이론

2.2 3차원 특이점분포법에 의한 파랑강제력

3차원 특이점분포법[12]은 3차원 임의의 형상부체의 회절문제 및 산란문제를 푸는 실용적으로 기법으로서 물체표면을 유한개의 panel로 분할하고, 물체표면에 분포시킨 특이점의 세기, 또는 속도포텐셜을 미지수로 한 이산화 적분방정식을 수치적으로 푸는 것이다.

2.2.1 기본가정 및 좌표계

기본가정은 다음과 같다.

- 1) 유체는 비 점성, 비 압축성이고, 표면장력은 무시한다.
- 2) 유체의 운동은 비 회전으로 속도포텐셜이 존재한다.
- 3) 구조물은 강체이고, 그 운동은 미소하다고 한다.
- 4) 구조물 및 파는 주기운동을 하는 것으로 하고 주파수영역에서 해석한다.

2.2.2 기초방정식과 경계조건

<기초방정식>

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\frac{P}{\rho} = -i\omega\phi - gz \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

<경계조건>

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - k\phi = 0 \quad \text{on } S_F \quad (3)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \nabla \phi = 0 \quad \text{on } S_B \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi^D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi^I}{\partial n} \quad \text{on } S_H \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_j^R}{\partial n} = n_j, \quad j = 1 \sim 6 \quad \text{on } S_H \quad (6)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi}{\partial R} - ik\phi \right) \quad \text{on } S_R \quad (7)$$

2.2.3 Green 함수와 적분방정식

물체의 형상이 복잡한 경우에는 상기의 경계치 문제를 해석적으로 구할 수 없기 때문에 이것을 Green 함수[13]와 Green 정리를 이용하여 적분방정식으로 변환한 후에 수치적으로 푸는 것에 의해 해를 구한다. 여기서, Green 함수 $G(P, Q)$ 는 유체영역내에 pulsating 소오스를 두었을 때 속도포텐셜을 말한다. 즉, $1/r$ 의 특이성을 가지고, $r=0$ 의 경우의 특이점을 제외하여, 물체표면이외의 경계조건과 기초방정식인 3차원 Laplace 방정식을 만족하는 함수를 말한다.

이때 Green 함수는 조화함수로 되어 다음과 같이 표현된다.

$$G_o(P, Q, t) = \text{Re}[G(P, Q)e^{i\omega t}] \quad (8)$$

그리고 Green 함수는 특이점을 제외한곳에서는 다음의 방정식과 경계조건 및 방사 조건을 만족하는 함수로서 정의된다.

$$\nabla^2 G = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (9)$$

$$\frac{\partial G}{\partial z} - kG = 0 \quad \text{on } S_F \quad (10)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \nabla G = 0 \quad \text{on } S_B \quad (11)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial G}{\partial R} - ikG \right) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (12)$$

이때, Green 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.[14]

$$G = G_c + iG_s \quad (13)$$

여기서,

$$G_c = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \pi k e^{k(z+\zeta)} [H_0(kR) + Y_0(kR)] + 2k e^{k(z+\zeta)} \int_0^{(z+\zeta)} \frac{e^{-ks}}{\sqrt{s^2 + R^2}} ds$$

$$G_s = 2\pi k e^{k(z+\zeta)} J_0(kR)$$

단,

$$R = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$H_0(kR)$: 0차의 제1종 Hankel function

$Y_0(kR)$: 0차의 제2종 Bessel function

$J_0(kR)$: 0차의 제1종 Bessel function

2.2.4 파랑강제력

파랑중에 물체가 고정되어 있을 때 j방향에 작용하는 파랑강제력을 F_j 라고 하면 다음과 같다.

$$F_j = \int \int_{S_{II}} P n_j dS \quad j=1\sim 6 \quad (14)$$

여기서, 압력 P는 식(2)에서 동압력만 고려하고 속도포텐셜에 평면 입사파의 속도포텐셜 ϕ^I 와 평면 입사파에 의한 회절포텐셜 ϕ^D 를 대입하고, n_j 는 식(6)에 의해서 표현하면 식(14)은 다음과 같다.

$$F_j = - \int \int_{S_{II}} i\omega\rho(\phi^I + \phi^D) \frac{\partial \phi_j^R}{\partial n} dS \quad j=1\sim 6 \quad (15)$$

또한, Haskind[15]에 의하면 파랑강제력은 회절포텐셜 ϕ^D 가 구해져 있지 않아도, 즉 회절문제를 풀지 않아도 산란포텐셜 $\phi_j^R(j=1\sim 6)$ 이 구해져 있으면 계산 할 수 있다.

2.3 Morison 방정식

2.3.1 파랑중에 Morison 방정식

좌표계는 Fig. 2-1에서 보듯이 파 진행 방향을 x 방향으로 하고 연직 상 방향을 z 방향으로 하였다.

Morison 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[16]

파력 = 관성력(유체입자의 가속도에 기인하는 항)
+ 항력(유체입자의 속도에 기인하는 항)

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A u |u| + \rho C_M \Delta \dot{u} \quad (16)$$

여기서,

A : 투영면적

Δ : 배수용적

u : 물체의 중심에서의 유체 입자의 수평 방향 속도

\dot{u} : 물체의 중심에서의 유체 입자의 수평 방향 가속도

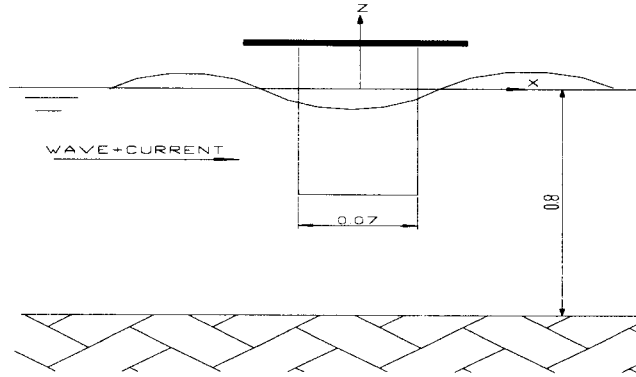


Fig. 2-1 Definition Sketch for Wave Forces on Small Diameter Cylinder.

2.3.2 파와 조류중에 Morison 방정식

파와 조류가 동시에 존재할 때 KC number는 다음과 같이 정의된다.

$$KC = \frac{(u_m + U)T}{D} \quad (17)$$

여기서, U는 조류의 속도이다.

파와 조류가 공존할 때 고정 구조물에 작용하는 Morison 방정식은 다음과 같다.

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_D A (u \pm U) |u \pm U| + \rho C_M \nabla \dot{u} \quad (18)$$

2.3.3 복수실린더에 대한 Morison 방정식

$$F = \frac{C_D \rho D}{2} \int_{-z}^0 \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 e^{2kz} \cos(kx - \omega t) |\cos(kx - \omega t)| dz \\ + \frac{\pi D^2 \rho C_M}{4} \int_{-z}^0 2\pi^2 \frac{H}{T^2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) dz \quad (19)$$

$$F = \frac{C_D \rho D}{4k} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 (1 - e^{2kz}) \cos(kx - \omega t) |\cos(kx - \omega t)| \\ + \frac{C_M \rho \pi^3 D^2 H}{2T^2 k} (1 - e^{kz}) \sin(kx - \omega t) \quad (20)$$

위의 식에서 보듯이 총 힘은 위상에 따라 변함을 알 수 있다. 1개 이상의 원주를 고려할 때는 같은 시간에서 계산한 파 입자의 속도, 가속도를 사용하여야 하는 점에 주의하여야 한다.[17]

2.4 조류력

여기서, 2.2절에서는 특이점분포법을 이용해서 파만 있을 경우에 힘을 계산하였고 파와 조류가 공존시에는 조류의 영향을 고려하지 않았기 때문에 본 절에서는 각 구조물에 대해서 조류력을 계산하여 2.2절에서 계산한 파력과 합하여 조류의 영향을 고려하고자 한다.

조류력을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$F_C = \frac{1}{2} \rho \sum_i C_{Di} A_i |U_C| U_C \quad (21)$$

여기서, C_{Di} : 구성부재의 항력계수

ρ : 유체의 밀도

A_i : 구성부재의 투영면적

U_C : 조류 속도

3. 불규칙파와 조류중의 구조물에 작용하는 힘

본 장에서는 ISSC 스펙트럼을 이용해서 불규칙파형을 표현하는 방법과 불규칙파중의 구조물에 작용하는 힘의 스펙트럼을 구하는 식을 제시하였다.

3.1 불규칙파에 대한 스펙트럼

3.1.1 불규칙파형 표시

3차원 불규칙파는 서로 다른 방향으로 다른 주파수로 진행되는 정현파의 선형의 합으로 표현하면 다음과 같다.

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} \cos [k_x x \cos \theta_j + k_y y \sin \theta_j - \omega_i t + \varepsilon_{ij}] \quad (22)$$

여기서,

M : 방향 갯수

N : 주파수 갯수

$$A_{ij} = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) \Delta \omega \Delta \theta}$$

$$\omega_i = i \times \Delta \omega$$

$$k_i = \omega_i^2 / g$$

본 논문에서는 한 방향만 고려했으므로 M은 1이고, 주파수 증분 $\Delta \omega$ 는 0.12251이며 ϵ_{ij} 는 위상이 지연됨을 나타내고 0과 2π 사이에서 random한 값을 갖는다. 불규칙파의 스펙트럼은 심해역에서 사용 할 수 있는 ISSC 스펙트럼을 사용했다.

$$S(\omega) = 0.1107 H_s^2 \frac{\omega^4}{\omega^5} e^{-0.4427(\bar{\omega}/\omega)^4} \quad (23)$$

Fig. 3-2는 윗식을 이용하여 불규칙파형을 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. Fig. 3-2는 위치는 고정되고 시간에 따라서 변하는 파형을 나타낸다.

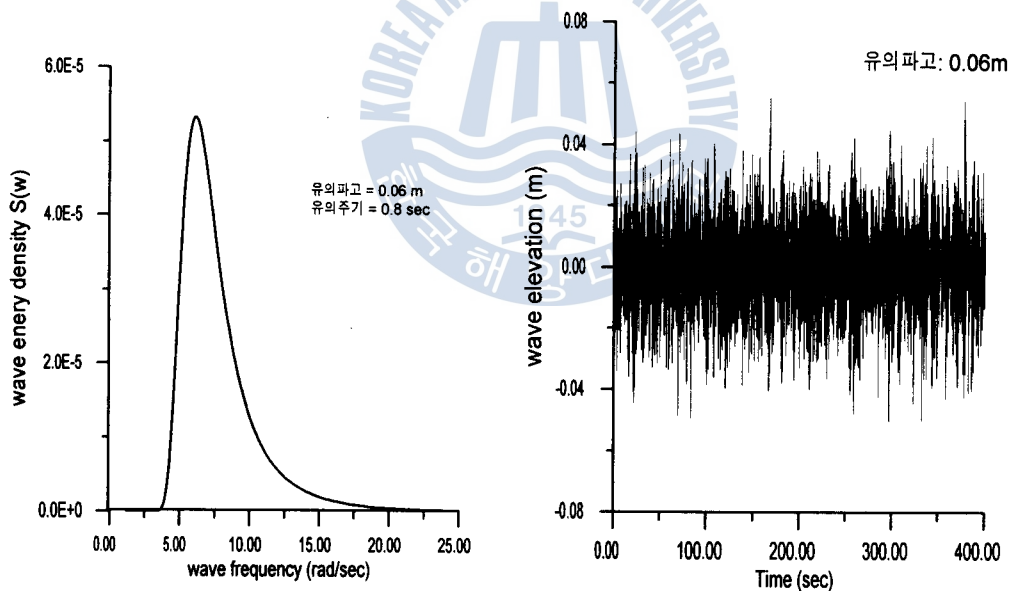


Fig. 3-1 ISSC Spectrum.

Fig. 3-2 Irregular Wave Time History

3.2.3 스펙트럼에 의한 입, 출력 관계식

입력 $Q(t)$ 의 스펙트럼은 식(3.6)에 의해서 다음과 같다.

$$S_{QQ}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{QQ}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (24)$$

출력 $q(t)$ 의 스펙트럼은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S_{qq}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{qq}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{QQ}(\tau + \tau_1 - \tau_2) h(\tau_1) h(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \right\} e^{-i\omega\tau} d\tau \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1) e^{i\omega\tau_1} d\tau_1 \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_2) e^{-i\omega\tau_2} \times \\
 &\quad \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{QQ}(\tau + \tau_1 - \tau_2) e^{-i\omega(\tau + \tau_1 - \tau_2)} d(\tau + \tau_1 - \tau_2) \right\} \\
 &= H^*(\omega) \times H(\omega) \times S_{QQ}(\omega) \\
 &= |H(\omega)|^2 S_{QQ}(\omega) \tag{25}
 \end{aligned}$$

여기서, $H^*(\omega)$ 는 주파수 응답 함수 $H(\omega)$ 의 공액 복소수이다. 그리고 위식을 물리적으로 실현 가능한 관계식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\Phi_{qq}(\omega) = |H(\omega)|^2 \Phi_{QQ}(\omega) \tag{26}$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} \Phi_{qq}(\omega) = 2S_{qq}(\omega) \\ \Phi_{QQ}(\omega) = 2S_{QQ}(\omega) & \text{for } \omega \geq 0 \\ \Phi_{qq}(\omega) = \Phi_{QQ}(\omega) = 0 & \text{for } \omega < 0 \end{cases}$$

식(26)에서 외력스펙트럼은 주어진 ISSC 스펙트럼을 $\Phi_{QQ}(\omega)$ 에 대입하고 주파수 응답함수 $H(\omega)$ 는 제2장에서 계산한 특이점분포법에 의해서 파력계산에 단위진폭을 대입하여 계산한다.

4. 이론 및 실험 결과

본 장은 모형1, 2, 3을 이론식에서 계산한 값과 실험을 하여 측정된 값을 서로 비교 검토하였다. Fig.4-1~Fig.4-4에서 Morison 1과 Exp 1은 한주기에 낮은 파고일 경우이고 Morison 2와 Exp 2는 높은 파고일 경우이다. 또한, SDM은 특이점분포법(Source Distribution Method)에 약자이다.

Fig. 4-1을 살펴보면 횡축은 주파수의 값을 나타내고 종축은 First Order 파력값을 무차원화한 값을 나타낸다. 우선 본 논문에서 사용한 프로그램을 검증하기 위하여 파랑강제력을 계산하는 두 가지방법인 Haskind 관계식을 이용하는 방법과 회절포텐셜을

이용하는 방법을 서로 비교한 결과 잘 일치하였다. 그리고 1차 선형파력에 대해서 실험값과 이론값을 살펴보면 다음과 같다. 모형들이 파장에 비해 직경이 0.2보다 작은 경우이므로 Morison 방정식이 적합하지만 KC number가 2~6의 값을 갖기 때문에 실험값은 대체적으로 회절이론에 의해서 계산된 값과 잘 일치한다. 특히, 반잠수식 모델인 경우에 Surge 방향의 힘은 hull 부분을 파 진행방향과 일치하게 놓았기 때문에 Morison 방정식을 적용 할 수 없다. 그러므로 반잠수식 모델인 경우는 특히 회절이론이 잘 맞는다. 또한, 각 모델들에 대해서 외력을 살펴보면 다음과 같다. 실린더가 1개인 경우에 주파수가 증가함에 따라서 외력도 증가한다. 왜냐하면 파고가 같은 경우에는 주파수가 증가함에 따라서 파의 속도 및 가속도가 커지기 때문이다. 실린더 4개와 반잠수식 모델인 경우에 주파수가 증가함에 따라서 반대로 외력은 감소한다. 그 이유는 여러 개의 구조물이 있을 경우 외력은 구조물간의 간섭에 의해서 상쇄되기 때문이다.

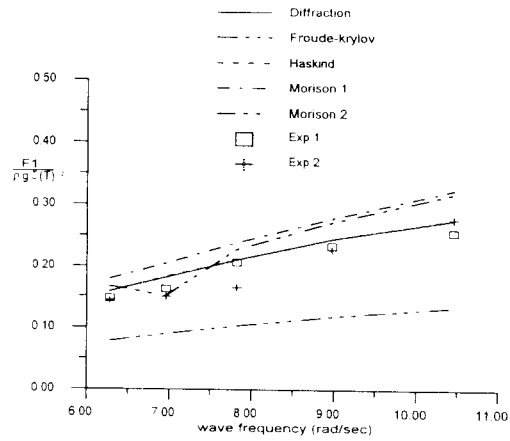
Fig. 4-2는 실린더 1개에 대해서 수평방향의 외력을 나타낸다. 파와 조류의 진행방향이 서로 일치 할 때 실험값은 이론값보다 작게 나타났다. 그 이유는 파와 조류의 진행방향이 서로 일치 할 때 서로간의 간섭에 의해서 파고가 낮아지기 때문이다. 반대로, 파와 조류의 진행방향이 서로 반대일 때 실험값은 이론값에 거의 일치한다. 이론상으로 서로간의 진행방향이 반대일 때 파고가 높아지기 때문에 실험값이 이론값보다 크게 나타나야한다. 그런데 실린더 1개인 경우에 이론값이 크게 계산되어졌다.

Fig. 4-3은 실린더 4개에 대해서 수평방향의 외력을 나타낸다. 파와 조류의 진행방향이 서로 반대일 때 주파수 10.5 rad/sec 근처에서 실험값은 감소하다가 증가하고 이론값은 감소한다. 그 이유는 이론식에서 파와 조류간의 간섭을 고려하지 못했기 때문이다. 차후에 특이점분포법의 이론식에 파와 조류를 포함하여 계산해 볼 필요가 있다.

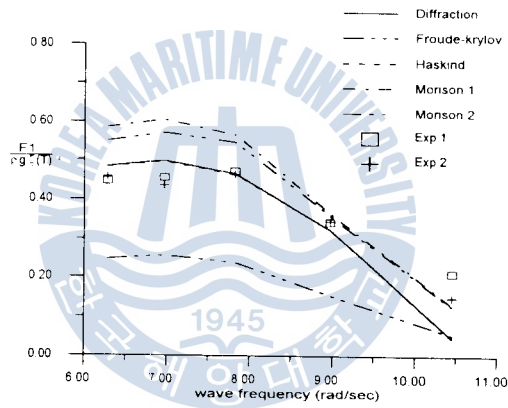
Fig. 4-4는 반잠수식 모델의 수평방향의 외력을 나타낸다. Morison 방정식은 실험식과 큰 차이를 보인다. 파와 조류의 진행방향이 서로 같을 때 주파수 6~8 rad/sec에서 실험값은 특이점분포법의 이론값보다 작게 나타난다.

Fig. 4-5는 불규칙파랑중에 각 모델들의 힘스펙트럼을 나타낸다. 이론값은 식(3.19)를 이용하여 계산하였다. 여기서, 이론식은 특이점분포법을 이용하였다. 실험값은 실린더가 1개인 경우의 이론값보다는 반잠수식 모델의 경우에 이론값에 잘 일치한다. 그러므로 특이점분포법은 구조물의 형상이 복잡할 경우에 잘 일치한다.

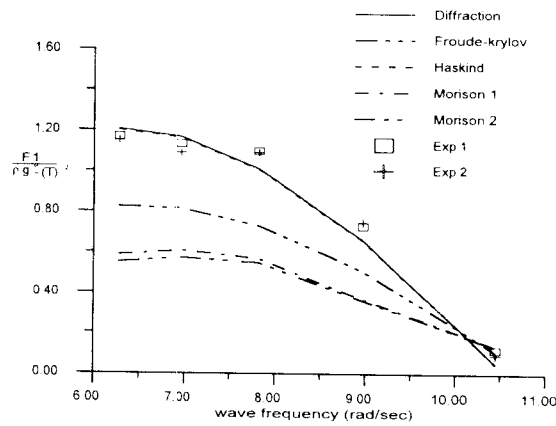
Fig. 4-6은 불규칙파와 조류중에 각 모델들의 힘스펙트럼을 나타내고 여기서의 값들은 실험값만을 나타낸다. 힘의 밀도값은 불규칙파와 조류의 진행방향이 서로 반대일 때 가장 크게 나타내고 그 다음이 불규칙파만 있을 경우이고 불규칙파와 조류의 진행방향이 서로 일치할 때 가장 작게 나타난다. 이와 같은 현상은 불규칙파와 조류의 서로간의 간섭에 의해서 나타난다.



(a) One Cylinder

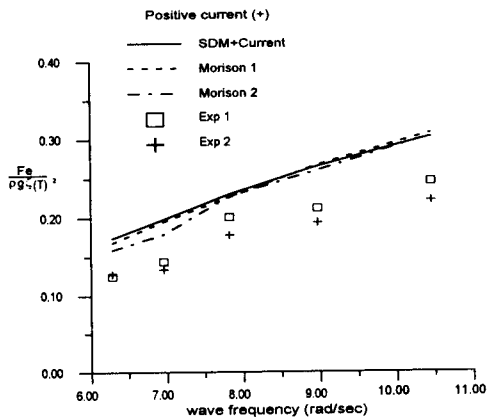


(b) Four Cylinder

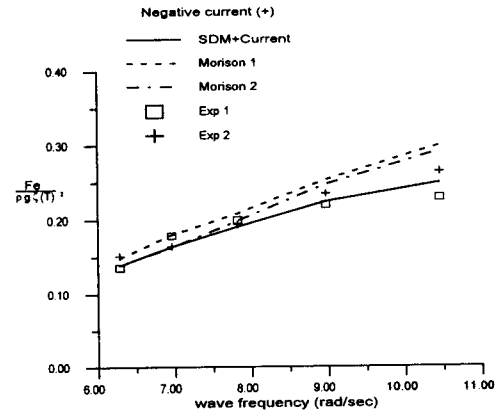


(c) Semi-Submersible Model

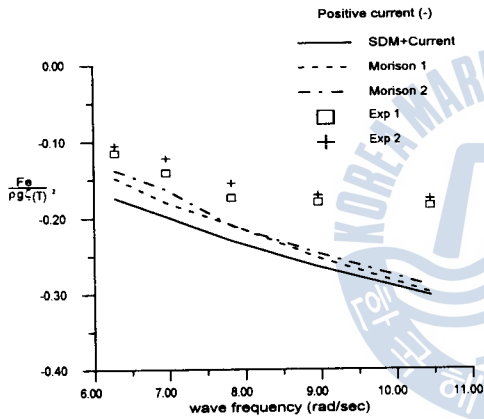
Fig. 4-1 First-Order Wave Forces on Models.(Without Current)



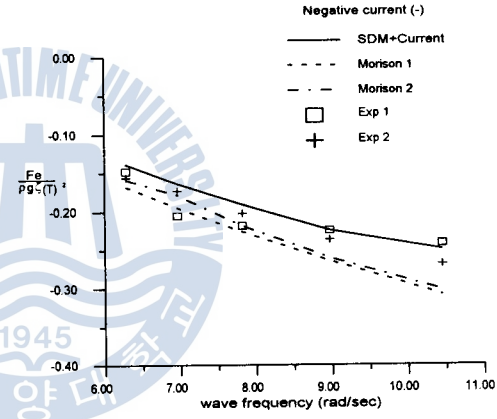
(a) Positive Current (+)



(b) Negative Current (+)

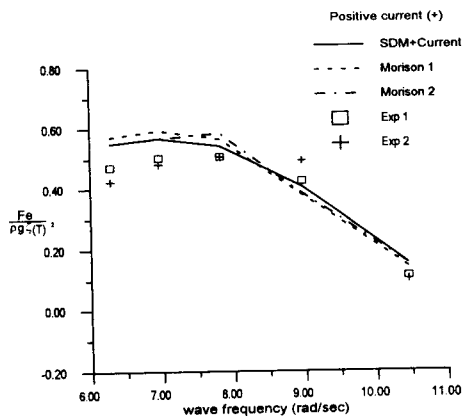


(c) Positive Current (-)

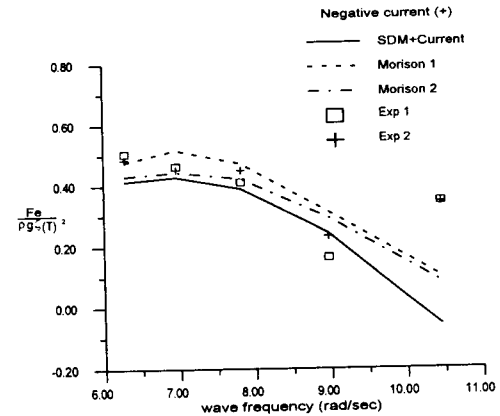


(d) Negative Current (-)

Fig. 4-2 Horizontal Exciting Force for One Cylinder



(a) Positive Current (+)



(b) Negative Current (+)

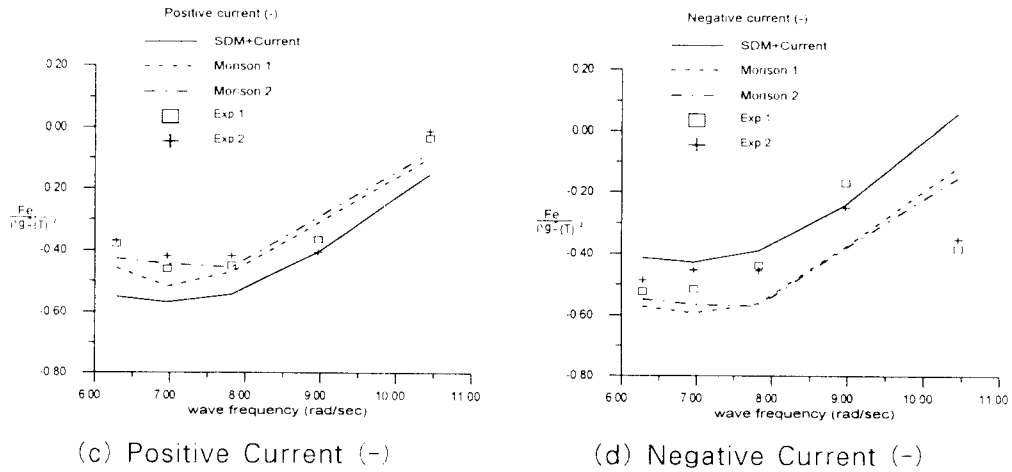


Fig. 4-3 Horizontal Exciting Force for Four Cylinder

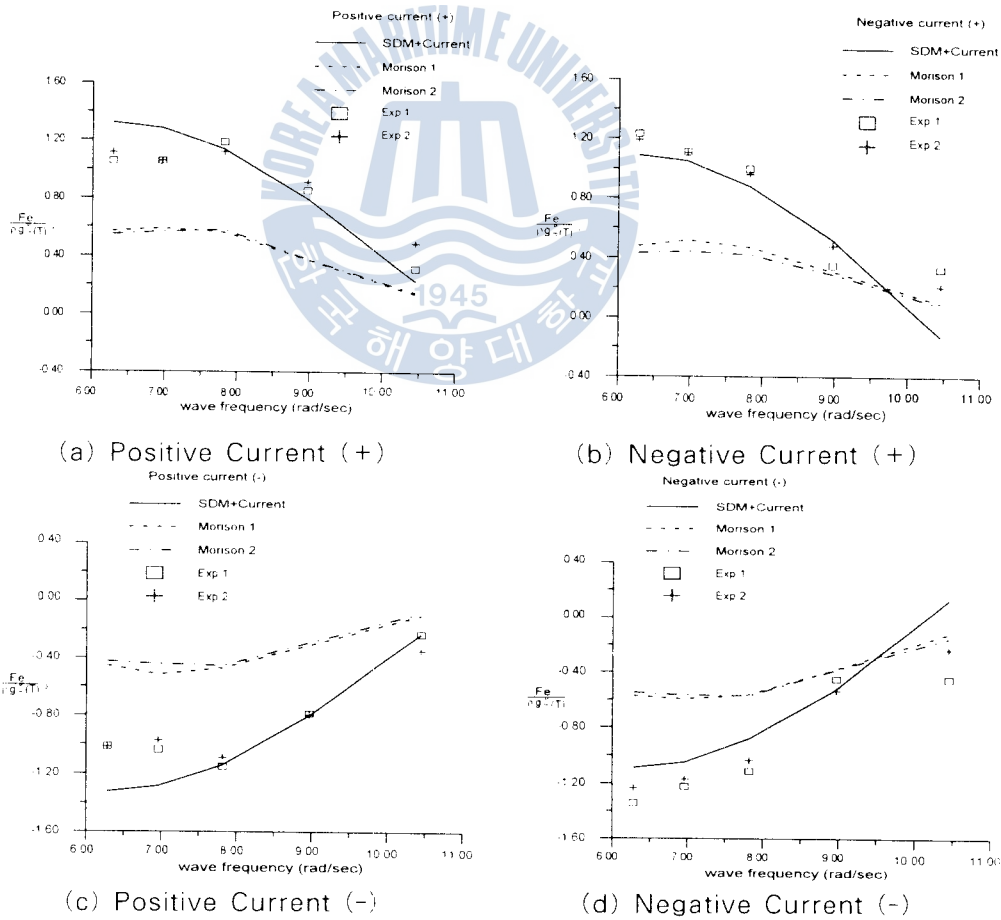


Fig. 4-4 Horizontal Exciting Force for Semi-Submersible Model

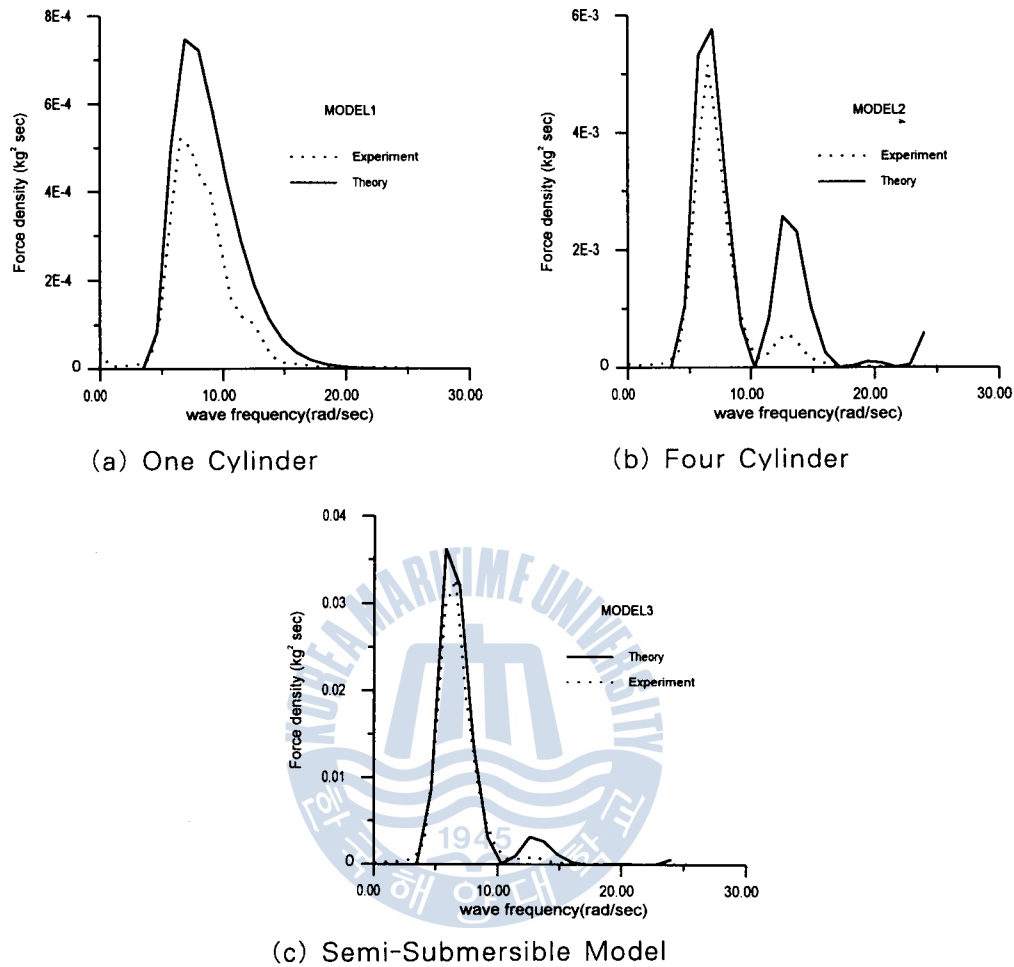


Fig. 4-5 Horizontal Force Spectrum for Models (Without Current)

5. 결 론

본 논문에서는 파와 조류가 공존시 상호간에 어떠한 영향을 주는가를 파악했다. 저자가 직접 2차원 불규칙파 수조탱크에서 실험한 데이터와 이론값을 비교, 검토하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 규칙파랑중 First-order 파력에 대한 실험값은 파장에 비해 구조물의 직경이 0.2보다 작은 경우에도 회절이론에 잘 일치한다.
- 2) 규칙파랑중 First-order 파력은 주파수가 증가함에 따라서 실린더 1개인 경우에는 증가하고 실린더 4개와 반잠수식 모델인 경우에는 구조물간의 간섭에 의해서 감소한다.

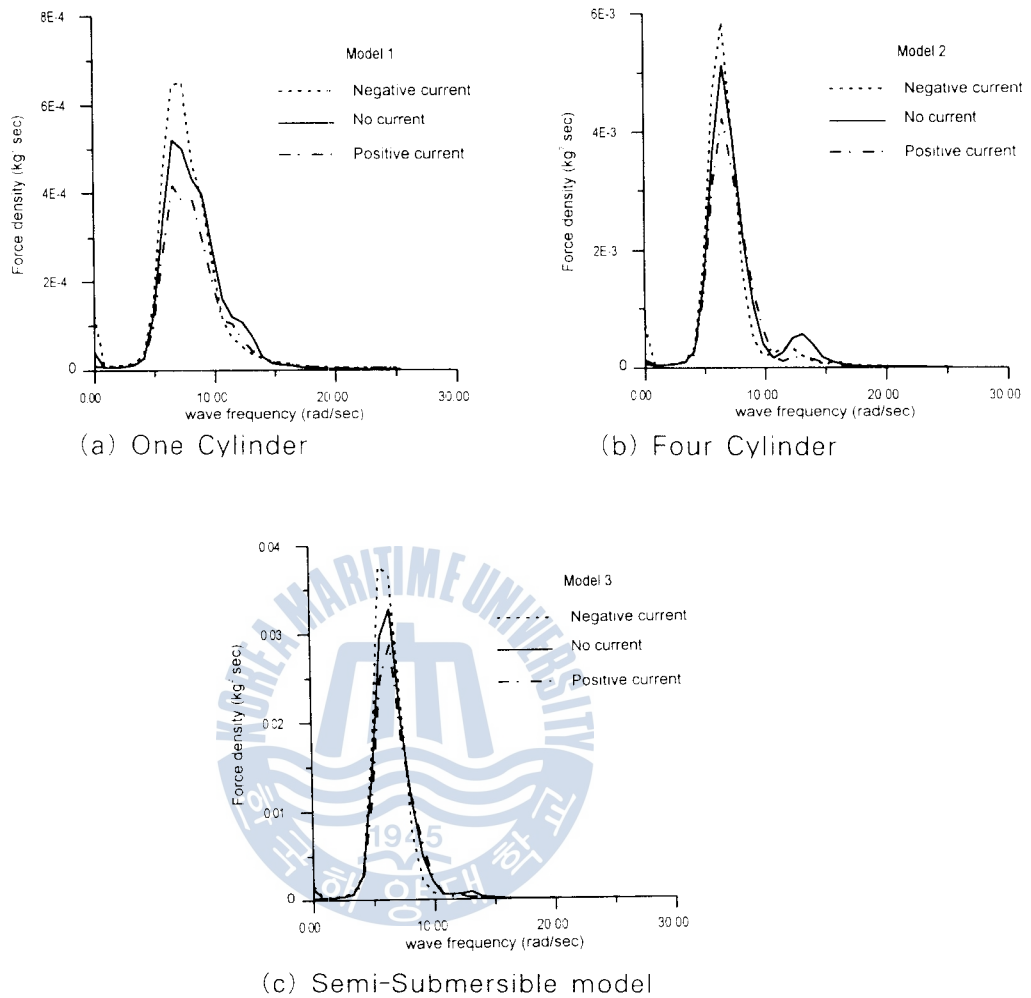


Fig. 4-6 Horizontal Force Spectrum for Models (wave-current)

- 3) 규칙파와 역방향의 조류가 공존시 실린더가 4개인 경우에는 주파수가 10.5(rad/sec) 근처에서 이론값과 실험값은 잘 일치하지 않았다. 왜냐하면 이 근처에서 파와 조류의 간섭이 크기 때문이다.
- 4) 불규칙파와 조류의 공존시 이론식은 3차원 특이점분포법을 사용한 결과 이론식과 실험값은 실린더가 1개인 경우보다 구조물이 복잡한 반잠수식 모델인 경우에 잘 일치하였다.

본 논문에서는 파와 조류가 공존할 때 회절이론에 의한 파력과 조류력을 선형 중첩하였기 때문에 서로간의 간섭을 고려하지 못했다. 그러므로 향후에는 회절이론에 파와 조류간의 간섭을 고려해서 개발하는 것이 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] 小山健夫, 藤野正隆 and 前田久明 共著, “선체와 해양 구조물의 운동학”, 연경 출판사, chapter 3, 1990.
- [2] Sarpkaya T., “Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures”, VNR, page 242-252, 1981.
- [3] Pegregrine D.H., “Interaction of Water Waves and Currents”, Advances in Applied Mechanics Academic Press, New York, Vol 16, page 9-117, 1976.
- [4] Mei C.C., “The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves”, John Wiley & Sons, page 89-108, 1983.
- [5] Zaman M.H. and Togashi H., “Modeling Horizontally Two Dimensional Wave-Current Coexistence Field over Uneven Topography”, Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering, Vol 3, page 838-845, 1997.
- [6] Buchmann B., Skourup J. and Cheung K.F., “Runup on a Structure Due to Waves and Current”, Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering, Vol 3, page 48-55, 1997.
- [7] Grue J., “Time-Periodic Wave Loading on a Submerged Circular Cylinder in a Current”, Journal of Ship Research, Vol 30, No3, page 153-158, 1986
- [8] Zhao R. and Faltinsen O.M., “Interaction between Waves and Current on a Two-Dimensional Body in the Free Surface”, Accepted for Publication in Applied Ocean Research, Vol 10, NO.2, page 87-99, 1988.
- [9] Kim D.J. and Kim M.H., “Wave-Current-Body Interaction by a Time-Domain High-Order Boundary Element Method”, Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering, Vol 3, page 107-115, 1997.
- [10] Chakrabarti S.K., “Hydrodynamics of Offshore Structures”, Computational Mechanics Publications, page 168-231, 1987.
- [11] Patel M.H., “Dynamics of Offshore Structures”, Butterworths, London, page 188-190, 1989
- [12] 이 창호, “불규칙과중의 인장계류식 해양구조물의 비선형 응답해석”, 부경대학교 공학박사 학위 논문, page 208-224, 1998.
- [13] Greenberg M. D., “Application of Green’s Functions in Science and Engineering”, Prentice-Hall, page 51-92, 1971.
- [14] “선박유체역학노트(3)”, 일본조선학회지 제536호, 1974