한국해양공학회 2003년도 추계학술대회 논문집 PP.187~191

2D-BBDB형 파 에너지 흡수장치에 작용하는 음의 시간평균 파 표류력 해석

홍도천*,홍사영,**,홍석원**,김현주**
*충남대 첨단수송체연구소
**한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Reverse Drift Force of a Floating 2D-BBDB Wave Energy Absorber

DO-CHUN HONG*, SA-YOUNG HONG**, SEOK-WON HONG** and HYEON-JU KIM**
*Center for Advanced Transportation Vehicules, Chungnam National University
**Ocean Development System Laboratory, KRISO, KORDI

KEY WORDS: Reverse Time-Mean Drift Force(음의 시간평균 파 표류력), BBDB(Backward-Bent Duct Buoy), OWC(Oscillating Water Column 진동수주), Matched Green integral equation(정합 그린 적분방정식), Wave energy absorption(파 에너지 흡수), Floating body motion in waves(파 중 부유체 운동),

ABSTRACT: *The motion and time-mean drift force of a 2-D floating* BBDB *in waves are studied with and without taking account of fluctuating air pressure in the air chamber. It has been found numerically that the drift force of the BBDB is in the reverse direction of propagation of the incident waves over specific frequency ranges as found by McCormick through his experimental work. The drift force is calculated by Pinkster's near-field method. Since Maruo's far-field method for the drift force is always positive, Maruo's formula is only approximate and should be replaced by the correct near-field method.*

1. 서 론

진동수주(OWC)에 의한 입사파 에너지흡수의 원리는 파 중에 계류된 부유체 내부에 위치한 OWC 상부 공기 챔버에 덕트를 설치하여 이를 통과하는 왕복기류로 터빈을 가동시키는 것이다. BBDB방식은 부유체의 상하동요뿐 아니라 횡요 및 좌우동요에 기인한 내부 상대유동을 발생시키는 것이며 운동응답에 기여하는 부유체-챔버 복합구조물의 관성력, 부력에 기인한 복원력 및 계류력등이 중요하다. 왕복유동은 Fig.1과 같은 ㄴ자형 덕트 내부에서 행하여진다. 덕트를 띄워주는 부력체(Buoyancy module)는 상자형 구조물로서 이 하부에 덕트가 설치된다. 그림에서와 같이 좌단부에 파력흡수를 위한 OWC챔버가 위치하며 좌단으로 파가 입사하도록 한다. 파 에너지 흡수성능추정을 위해서 공기실 압력에 의한 챔버 내부 자유표면 교란을 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)으로 다룬 "진동수주에 의한 파 에너지 흡수 이론" (Falco and Sarmento, 1980; Evans, 1982; Falnes and McIver, 1985)과 압력강하면에 의한 파 에너지 흡수이론(Guevel and Hong, 1983)을 기본으로 한 3차원 계산기법이 발표된 바 있다 (Hong et al., 2003). 이로부터 2차원 계산기법을 도출하여 본 논문에 사용하였다.

제1저자 홍도천 연락처: 대전시 유성구 궁동 220
042-868-7588 dchong@cnu.ac.kr

OWC가 설치된 부유식 구조물의 파중 3자유도 운동응답은 접수면에 작용하는 압력의 적분에 의하여 구해지는 부가질량계수, 파 감쇠계수, 파 기진력 계수에 더하여 OWC 공기 챔버 내부의 변동 기압이 내부면에 작용하는데 따른 힘 및 모오멘트도 고려하여 구하여졌다. 유체압력 및 기체압력은 모두 압력강하 파라메터 ν가 고려된 값이다.

한편 ν=0일 때는 통상적인 2차원 부유체 운동 해석기법이 된다. 이 때 부유체의 계류를 위한 시간평균 파 표류력을 계산한 결과 특정 주파수 영역에서 음의 값 (Reverse drift force)을 갖는 것이 확인되었다.

2. 문제의 정식화

이론적 배경으로는 잘 알려진 선형파중 계류된 부유체에 의한 방사-산란파이론을 사용하였다. 유체는 비 점성, 비 압축성이고 자유표면 F와 부유체의 접수면 S 그리고 무한수심 사이의 구간 V를 점하며 여기에 중력이 작용하고 있다. y=0 면을 정수면과 일치시킨 오른손 직각좌표계 (x, y)에서 원점 0가 평균위치에 있는 BBDB의 내부자유표면에 있고 y축은 연직상방을 가리킨다. 포텐셜 유동이며 미소진폭 a_0, 원 진동수 ω를 가지며 속도포텐셜 ϕ_0로 정의되는 입사파(Airy wave)가 무한원방에서

온다.

$$\phi_0 = Re\{\psi_0 e^{-i\omega t}\}, \qquad \psi_0 = -\frac{a_0 g}{\omega} e^{k_0(x-iy)} \tag{1}$$

부유체는 입사파에 의하여 기진되어 원 진동수 ω로 미소진폭 단순조화운동을 한다. S 및 거기서 V를 향한 법선 벡터 양자를 평균위치에서 각각 S_0, $\vec{n_0}$ 라하고 S_0와 평면 $y=0$ 가 만나는 점을 평균위치에 있는 부유체의 흘수선 W라 한다. 한편 부유체의 6자유도운동에 의한 S상의 1점 M의 운동변위는 그 평균위치 M_0와 순간위치 M_1간의 거리를 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{D}(M_0) = \overrightarrow{M_0M_1} = \vec{a} + \vec{\theta} \times \overrightarrow{OM_0} \tag{2}$$

$$\vec{a} = a_1\vec{e}_1 + a_2\vec{e}_2, \qquad \vec{\theta} = a_3\vec{e}_3 \tag{3}$$

산란파 ϕ_7 및 방사파 ϕ_R을 구하는 것이 문제이며 비정상 유동의 전체 포텐셜 Ψ는 이들의 합이다.

$$\Psi = \phi_0 + \phi_7 + \phi_R \tag{4}$$

$$\phi_R = -i\omega\sum_{k=1}^{3} a_k\phi_k \tag{5}$$

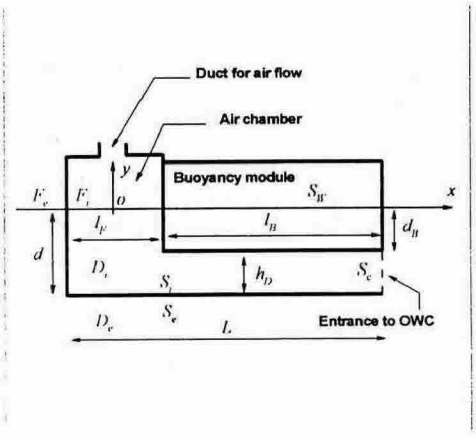

Fig.1 BBDB configuration

여기서 산란파 및 방사파 포텐셜은 각각 파력흡수용 챔버 내부의 자유표면 변동압력면(free surface oscillating pressure patch)에 기인한 속도포텐셜을 포함하여야 한다. 외부 대기압을 0이라 하고 덕트를 통과하는 수직 상방향 기류의 유속을 U_d라 할 때 챔버내부 기압 p_C와 U_d사이에 다음 관계식을 가정한다.

$$0 - p_C = -\gamma \times U_d \tag{6}$$

여기서 γ는 압력강하 파라메터로서 실험에 의하여 결정될 수 있다. U_d는 다음 식으로 표시된다.

$$U_d = \frac{1}{A_d}\int_{F_i}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial y} + i\omega\vec{D}\cdot\vec{e_2}\right)ds \tag{7}$$

위에서 A_d는 F_i의 단면적이고 $\vec{D}$는 평균위치가 F_i와 일치하는 평면의 운동변위이다.
이로부터 다음의 선형 자유표면조건이 도출된다.

$$-k_0\Psi + \frac{\partial\Psi}{\partial y} = \begin{cases} 0 & on \quad F_e \\ \alpha U_d & on \quad F_i \end{cases} \tag{8}$$

여기서 $\alpha = \frac{i\omega\gamma}{\rho g}$는 무차원 압력강하 파라메터이다.
이외의 경계조건은 잘 알려져 있는 산란-방사파 문제와 동일하다.

$$\frac{\partial\phi_k}{\partial n_0} = N_k \text{ for } k=1,2,3,4 \text{ on } S_0 \tag{9}$$

$$N_k = \vec{e}_k\cdot\vec{n}_0 \text{ for } k=1,2 \tag{10}$$

$$N_3 = (\vec{e_3}\times\overrightarrow{OM})\cdot\vec{n}_0, \quad N_4 = -\frac{\partial\phi_0}{\partial n_0} \tag{11}$$

S_c를 경계로 내부영역 D_i와 외부영역 D_e에 각각 Green정리를 적용하면 ϕ_k에 관한 다음 Green적분방정식을 얻는다(홍도천과 김현주, 2000).

$$\frac{\phi_k(P)}{2} - \int_{S_i\cup S_c\cup F_i}\phi_k(M)\frac{\partial G_o(P,M)}{\partial n_M}ds = -\int_{S_i\cup S_c\cup F_i}\frac{\partial\phi_k(M)}{\partial n_M}G_o(P,M)\,ds, \quad P \text{ on } S_i\cup S_c\cup F_i \tag{12}$$

$$\frac{\phi_k(P)}{2} + \int_{S_e\cup S_c}\phi_k(M)\frac{\partial K(P,M)}{\partial n_M}ds = \int_{S_e\cup S_c}\frac{\partial\phi_k(M)}{\partial n_M}K(P,M)\,ds, \quad P \text{ on } S_e\cup S_c \tag{13}$$

위에서 G_0 및 K는 각각 Rankine 및 Kelvin Green 함수이다.
경계면 S_c에서의 정합조건은 다음과 같다.

$$\phi_k(P^-) = \phi_k(P^+), \quad \frac{\partial\phi_k(P^-)}{\partial n_P} = \frac{\partial\phi_k(P^+)}{\partial n_P} \tag{14}$$

적분 방정식 (12),(13)을 경계조건 및 정합조건과 연립하여 이산화

하면 내, 외부영역이 연성된 선형대수방정식으로 변환되어 풀릴 수 있다(Hong et al., 2003). (12)식에 (8)식을 대입하면 압력강하 파라메터 ν가 좌변에 위치하여 ν별로 방정식을 풀어야 한다. 그러나 참고문헌(Hong et al., 2003)에서와 같이 ν를 우변에 보내는 계산기법이 있으므로 ν값의 변화에 따른 parametric study를 용이하게 할 수 있다. 이 방법이 기존에 발표된 방법(홍도천, 2002)**에 비하여 보다 안정적인 계산기법으로 판단된다. 한편 BBDB가 넓은 수선면을 가지므로 (13) 식에 도입된 Kelvin Green 함수로 인한 특이파수 현상을 제거하려면 (13) 식을 over-determined 형태의 improved Green integral equation으로 바꾸어 풀어야한다(Hong and Lee, 1999). 그렇지 않을 경우 OWC의 공진 및 BBDB의 운동응답 공진에 특이파수 공진현상이 더하여져 해석이 불가능하게 된다.

4. 운동방정식 및 파 표류력

접수면에 작용하는 변동 수압은 선형 비정상 포텐셜유동에 베르누이 방정식을 적용하여 구한다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \omega Re\{i\Psi e^{-i\omega t}\} \tag{15}$$

이로부터 입사파 및 압력강하 파라메터 ν가 고려된, 산란파 포텐셜에 기인한 기진력, 방사파 포텐셜에 기인한 부가질량 및 파 감쇠력 등이 구하여진다. 또한 챔버상부의 변동 기압이 챔버 내부면에 작용하는 힘 및 모오멘트는 다음과 같다.

$$\overrightarrow{F^C} = -\int_{S_F} p_C(\overrightarrow{n_0} + \overrightarrow{\theta} \times \overrightarrow{n_0})\, ds \tag{16}$$

위에서 S_F는 챔버상부 수평면이다. 통상적인 부유구조물에 작용하는 힘 및 모오멘트의 평형조건식에 OWC 챔버에 기인한 외력을 더하여 정리하면 다음과 같은 주파수 영역 운동방정식을 얻는다.

$$\sum_{k=1}^{3}[-\omega^2 m I_{jk} - \rho L^2 \omega^2 (M_{jk} + iB_{jk} + N^C_{jk}) + \rho g L R_{jk}]a_j = \rho a_0 \omega^2 L^2 (E_j + E^C_j), j = 1,2,3 \tag{17}$$

파 중에 계류된 부유 구조물에 작용하는 수평방향 시간평균 표류력은 다음과 같은 near-field formula의 파 주기에 대한 시간평균으로 구하여 진다(Pinkster and van Oortmerssen, 1977). 본 저자에 의하여 반구에 대한 3차원 표류력 계산이 수행되어 Pinkster의 계산값과 거의 동일한 결과를 얻은 바 있다 (홍도천외, 1987).

$$\overrightarrow{F_d} = -\frac{\rho g}{2}\int_W \zeta_R^2 \overrightarrow{n_0} dl + \rho \int_{S_0}[\frac{1}{2}v^2 + \overrightarrow{A}\cdot\nabla(\frac{\partial \Phi}{\partial t})]\overrightarrow{n_0}\, ds + \overrightarrow{\theta} \times \overrightarrow{F_{inertia}} \tag{18}$$

여기서 자유표면의 높이는 다음 식으로 계산된다.

$$\zeta_R = \frac{i\omega}{g}\Psi - \overrightarrow{D}\cdot\overrightarrow{e_2} + \frac{i\alpha}{\omega}U_d \tag{19}$$

위 식 우변의 마지막 항이 압력강하 효과를 나타내며 내부 자유표면에만 적용된다.

5. 수 치 실 험

Fig. 1과 같은 BBDB형상을 가진 본 수치모델의 주요제원은 다음과 같다.

Table 1 Principal dimensions of BBDB model

OWC	Length	Draft
	$L = 36.5\ m$	$d = 8.65\ m$
내부자유수면 길이 $l_F = 4.55\ m$		
부력체 길이 $l_B = 31.85\ m$		
회전중심 $x_O = 18\,m$, $y_O = 0\,m$		
부심 $x_B = 18\,m$, $y_B = -2.16\,m$		
무게중심 $x_G = 18\,m$, $y_G = 0\,m$		
회전중심을 기준한 횡요 관성반경 $R_r \simeq 16\ m$		

압력강하 파라메터 ν 는 0, 50, 100, 150, 300 *kg-mass/(m sec.)* 의 5개 값을 주었다.

파는 $x = -\infty$ 에서 입사되며 따라서 파진행방향은 +이다.

Fig. 2-4에 BBDB의 운동응답 진폭비 $A_1 = |a_1/a_0|$, $A_2 = |a_2/a_0|$ 및 $A_3 = |a_3/(a_0 k_0)|$ 가 표시되었다. 3개의 그림 모두에서 $\omega \simeq 0.45$ 부근의 첫째 극대값은 OWC의 공진에 기인한 것이다. 그밖의 극대값들은 sway-heave-roll 연성효과 등이 더해져 복잡하게 얽힌 BBDB의 운동을 보여준다. ν 값이 증가함에 따른 변화도 보여주고 있다.

Fig. 5에 $(a_0\omega)$로 무차원화 된 덕트 통과 기류속도 $V_d = |U_d|/(a_0\omega)$가 표시되었다. 이론적인 파 에너지 흡수량은 U_d의 제곱에 비례한다. U_d는 ν의 함수이므로 파 에너지 흡수효율의 최적화를 ν값의 변화에 따른 parametric study를 통하여 도모할 수 있다.

Fig. 6에 BBDB의 수평방향 시간평균 표류력 계수 $F_X = \overrightarrow{F_d}\cdot\overrightarrow{e_1}/(\rho g a_0^2)$가 표시되었다. Near-field 값이 $0.55 < \omega < 0.725$ 구간에서 파 진행방향과 반대인 음의 값 (reverse drift force,)임에 반하여 Maruo formula (Maruo, 1960)에 의한 far-field 값은 항상 양의 값 (파 진행방향과같은 방향)을 보여주고 있다. 이는 후자에서 유체모멘텀의 시간변화율의 시간평균을 무시한 결과로서 Maruo formula의 결정적인 결함이라 판단된다.

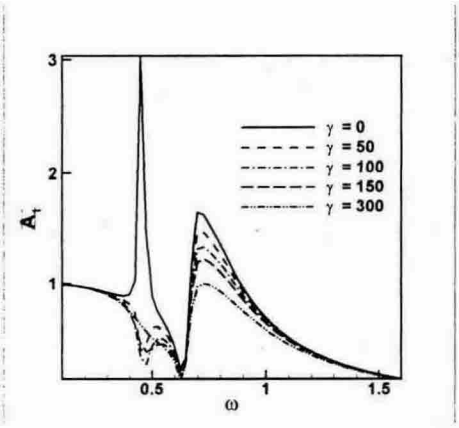

Fig. 2 Sway amplitude ratio

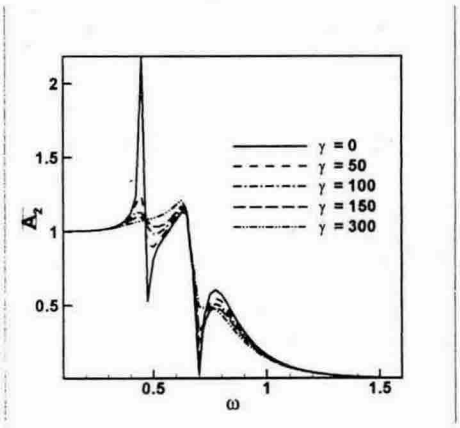

Fig. 3 Heave amplitude ratio

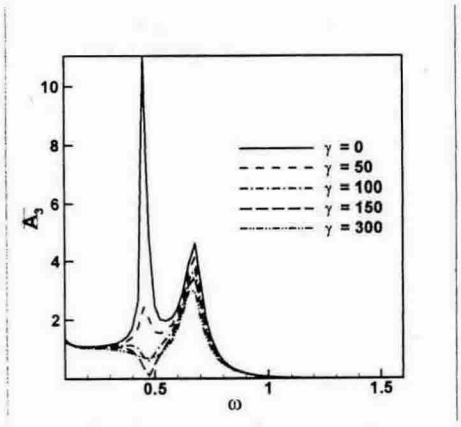

Fig. 4 Roll amplitude ratio

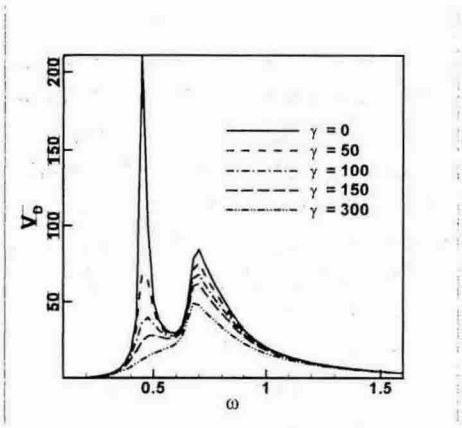

Fig. 5 Dimensionless air flow in the duct

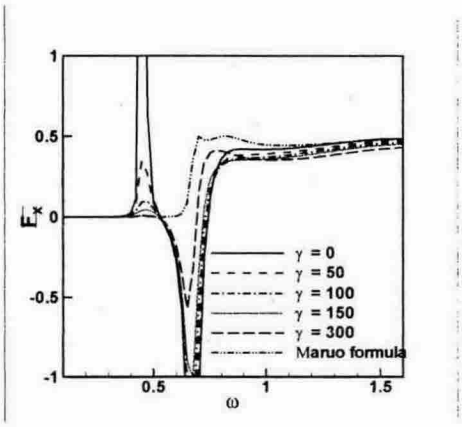

Fig. 6 Drift force coefficients

이러한 결함은 3차원 부유체에 관한 논문(홍도천, 2002)*에서 엄밀한 해석에 의하여 이미 지적된 바 있다. 그러나 그 논문 및 2차원 해석 (홍도천, 1996)에서 half-immersed ellipsoids 및 타원형 주상체 등에서 reverse drift force가 수치적으로 발생되었다고 발표한 것은 좌표계 변환을 잘못 적용한 것에 기인한 것이다. Pinkster의 near-field formula를 정확히 적용하면 단순한 부유체 형상에서는 reverse drift force를 무시할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 본 논문에서 다룬 BBDB의 시간평균 표류력은 Pinkster의 near-field formula에 의하여 특정 주파수 구간에서 매우 큰 reverse drift force를 보이며 이는 실제 실험에서 점성 및 비선형 효과를 고려한다 하여도 실현될 것으로 생각된다. 이미 실험적으로 부유식 해양구조물의 reverse drift force에 관한 여러 사례가 공식, 비공식적으로 보고된 바 있으며 부유체 운동분야에서는 negative drift로 알려져 있다. 본 수치모형과 유사한 BBDB에 대하여는 Masuda (1993)에 의하여 보고되었고 상대적으로 긴 BBDB ($l_F / l_b < 0.1$) 에 대한 McCormick (1992)의 실험에서 reverse drift의 발생이 공식적으로 발표된 바 있다. 이 실험은 2차원 유한수심 수조에서 수행되었고 특정 주파수 영역에서 BBDB가 입사파와 반대 방향으로 진행 (McCormick에 의하여 forward drift 또는 positive drift라 명명됨)하는 현상이 발생하였다.

6. 결 론

선형파 이론에 근거한 부유체 운동해석기법에 자유표면 변동압력면 이론을 도입하여 부유식 BBDB의 파중 운동, 덕트내 왕복기류속도 및 표류력을 계산하였다. 본 논문의 방법은 OWC 파력발전장치 및 소파제 형상설계에 유용하게 쓰일 수 있다. 또한 anti-rolling device, SES 등에도 효과적으로 적용 될 수 있다.

한편 ν=0일 때는 챔버상부가 개방된 2차원 부유체 운동해석기법이 되며 기존의 산란-방사파 이론이 그대로 적용된다. 이 때 부유체의 계류를 위한 시간평균 파 표류력을 Pinkster의 near-field formula로 계산한 결과 특정 주파수 영역에서 음의 값 (reverse drift force)을 갖는 것이 확인되었다. 이는 소위 Maruo formula에 위배되는 것이나 reverse drift force가 존재한다는 McCormick의 실험적 증명에 더하여 이를 선형 포텐셜 이론에 근거한 수치계산에 의하여 보인 것이다. 따라서 Maruo formula는 불완전한 것이라 판단된다.

BBDB와 같은 복잡한 형상의 부유체 및 기타의 다양한 해양구조물은 물론이고 단순형상의 부유체에 관하여도 계류시스템 설계를 위한 시간평균 파 표류력의 계산에는 접수면에서의 포텐셜 값은 물론이고 상대파고 및 유동속도 등의 계산을 정확히 하여 Pinkster의 near-field formula를 사용하여야 할 것이며 실험에 의한 확인도 중요하다.

후 기

본 논문은 해양수산부가 지원하는 한·인도 해양에너지 개발 공동연구 과제 III, 초대형 부유식 해상구조물 기술 개발과제의 방파제 기본성능연구 및 부소파제의 소파성능 해석 연구사업결과의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

Evans, D. V.(1982), "Wave-power absorption by systems of oscillating surface pressure distributions", J. of Fluid Mech. Vol 114 pp. 481-499

Falcão, A. F. de O. and Sarmento, A. J. N. A.(1980), "Wave generation by a periodic surface pressure and its application in wave-energy extraction", 15th Int. Cong. Theo. Appl. Mech., Toronto

Falnes, J. and McIver, P.(1985), "Surface wave interactions with systems of oscillating bodies and pressure distributions", Applied Ocean Research, Vol. 7, No. 4

Guevel, P. and Hong, D. C.(1983), "Quelques problèmes d'hydrodynamique navale envisagés sous l'angle de la théorie de la récupération de l'énergie des vagues", Bulletin de l'ATMA, Vol.83, Paris

Hong, D.-C. and Lee, C.-S.(1999), "A B-Spline Higher Order Panel Method Applied to the Radiation Wave Problem for a 2-D Body Oscillating on the Free Surface", Journal of Ship and Ocean Technology, Vol.3, No. 4, pp1-14

Hong, D.C., Hong, S.Y. and Hong, S.W.(2003), Numerical Study of the Motions and Drift Force of a Floating OWC Device. Ocean Engineering(under publication)

Maruo, H., (1960). The Drift of a Body Floating on Waves. J. Ship Research 4, 1-10

Masuda, Y., Xianguang L. and Xiangfan G., (1993). "High Performance of Cylinder Float BBDB and its Use in European Seas". Proc. 1993 European Wave Energy Symp., Edinburgh, pp. 323-337

McCormick, M.E. and Sheehan, W.E., (1992). "Positive Drift of Backward-Bent Duct Barge". J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering (ASCE) 118-1, 106-111

Pinkster, J. A. and van Oortmerssen, G.(1977),"Computation of the first and second order wave forces on oscillating bodies in regular waves, Proc. 2nd Int. Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, U.C. Berkeley

홍도천, 홍사영, 이상무(1987) ,"대형 해양구조물에 작용하는 파랑하중에 관하여", 한국해양공학회지, 제1권 제1호, 1987

홍도천(1996), "On the Negative Drift Force Acting on a Freely Floating Surface-Piercing Cylinder", 한국해양공학회지, 제10권 제3호 pp 74-82

홍도천, 김현주(2000), "Hybrid적분방정식을 사용한 Flap - Harbour 복합체 파 에너지 흡수효율추정", 한국해양공학회지 제14권 2호 pp. 1-6

홍도천(2002)*, 부유식 해양구조물에 작용하는 시간평균 파 표류력에 관한 고찰, 한국해양공학회지, 제16권 제3호 pp 8-18

홍도천(2002)**, 부유식 OWC 챔버의 파중 운동해석, 한국해양공학회지, 제16권 제3호(2002) pp 19-27