

# Hybrid 적분방정식을 사용한 Flap-Harbour 복합체 과 에너지 흡수효율 추정

홍도천\* · 김현주\*\*  
\*충남대학교, \*\*KRISO

## Prediction of Wave Energy Absorption Efficiency of a Flap-Harbour Device by a Hybrid Integral Equation

DO-CHUN HONG\* AND HYEON-JU KIM\*\*

\*Center for Advanced Transportation Vehicles, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

\*\*Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI, P.O. BOX 23 Yusong, Taejeon 305-600, Korea

**KEY WORDS:** Flap-harbour wave energy absorber 회전판-하버 파 에너지 흡수장치, Hybrid integral equation 혼성 적분방정식, Rankine-Kelvin Green function 랭킨 및 켈빈형 그린함수, Transmission coefficients 투과파 계수, Reflection coefficients 반사파 계수, Multi-body radiation-diffraction waves 다중 부유체에 의한 방사파 및 산란파

**ABSTRACT:** Wave energy absorption by a flap equipped with a harbor in a water of finite depth is studied. The wave potential is calculated by a hybrid integral equation consisting of Green integral equations associated with Rankine and Kelvin Green functions. The absorbed wave energy is calculated by both the near-field and far-field methods. The present methods can be used for the design of a flap-harbor wave energy absorber since the numerical results by the two methods are in good agreement.

### 1. 서 론

후부에 하버(harbor)가 설치된 회전판(flap)의 횡요 감쇠장치에 의하여 유한수심에서 파 에너지를 흡수하는 장치의 효율에 대하여 이론전개 및 수치실험을 하였다. Flap-harbor 복합체는 고정식 해양구조물이며 세장체인 지지시스템에 의하여 해저면에 고정된 상태이며 이때 세장체 자체에 작용하는 유체력은 본 연구에서 제외되었다. 파 에너지 흡수장치는 형식상 가동물체형과 진동수주형이 있다. Flap-type 흡수장치는 가동물체형이며 harbor는 계류식 진동수주형 흡수장치의 효율증가장치로 사용되어왔다. 본 복합체의 harbor는 고정구조물이고 여기에 flap이 설치되어 가동물체인 flap의 회전운동을 통하여 파 에너지를 흡수한다. 본 flap-harbor 복합체는 flap 후부에 harbor를 설치하여 진동수주형 흡수장치에서와 마찬가지로 harbor 내부파를 고려하여 flap의 흡수효율의 최대화를 기하는 것이다. Flap-harbor 복합체에서 flap만이 회전운동을 하므로 flap에 의한 방사파는 harbor에 외력으로 작용한다. 따라서 flap의 주파수 영역 운동방정식에 flap-harbor 간의 상호작용을 고려해야 한다. 파 에너지는 flap의 횡요 감쇠장치에 의하여 흡수되며 이 감쇠장치는 회전운동의 스프링과 함께 flap운동에 영향을 준다. 따라서 이 감쇠계수와 스프링계수를 가동물체형 장치의 최적화이론을 사용하여 파 에너지흡수가 최대가 되도록 한다(Guevel and Hong, 1983). 한편 복합체에 작용하는 힘 및 모멘트는 지지시스템에 작용하는 외력 및 전도 모멘트(overtuning

moment)의 주요 인자이므로 이들도 구하였다.

### 2. Hybrid Green 적분방정식

유체는 비점성, 유동은 비회전성이고 선형파 이론을 사용하면, 수심이 균일한 해역에서 양의  $x$  방향으로 진행하는 입사파의 포텐셜은 다음식으로 주어진다.

$$\Phi_0 = Re\{ \Psi_0 e^{-i\omega t} \} \quad (1)$$

$$\Psi_0 = -\frac{a_0 \omega}{m_0} \frac{\cosh m_0(y+h)}{\sinh m_0 h} e^{im_0 x} \quad (1a)$$

$$m_0 h \tanh m_0 h = K_0, \quad K_0 = \frac{\omega^2 h}{g} \quad (2)$$

위에서  $\Psi_0$ 는 복소수로 표시된 입사파의 속도 포텐셜,  $a_0$ 는 입사파의 진폭,  $g$ 는 중력 가속도,  $h$ 는 수심,  $\omega$ 는 원 진동수이며  $m_0$ 는 유한수심에서의 파수(wavenumber)이다. 이러한 입사파 에너지를 흡수하여 이를 마력의 단위 폭당 시간평균  $P_{inp}$ 으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{inp} = \frac{1}{2} \rho g C_g a_0^2 \quad (3)$$

입사파중에 위치한 복합체에 의하여 전체 파는 입사파, flap의 운동에 의한 방사파 및 복합체에 의한 산란파 포텐셜  $\Phi_0$ ,

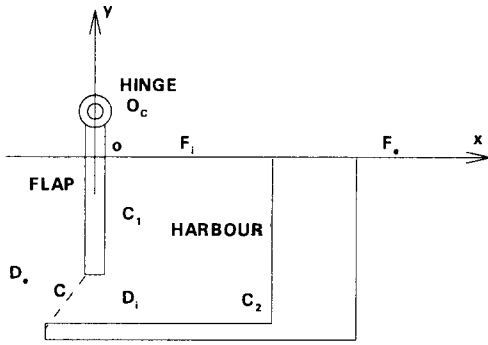


Fig. 1 Flap-harbor wave absorber

$\Phi_R$  및  $\Phi_D$ 의 합으로 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, t) &= \Phi_0 + \Phi_R + \Phi_D \\ &= \text{Re}\{(\Psi_0 + \Psi_R + \Psi_D)e^{-i\omega t}\} \end{aligned} \quad (4)$$

$\Psi$ 는 다음의 자유표면 경계조건을 만족시킨다.

$$-k_0 \Psi + \frac{\partial \Psi}{\partial y} = 0 \quad \text{on } y=0 \quad (5)$$

Fig. 1에 보인바와 같이 복합체의 flap 및 harbor의 접수면을 각각  $C_1$  및  $C_2$ 라 하면 산란파 포텐셜  $\Psi_D$ 은 물체의 접수면이 2개인 점만 감안하면 1개 물체인 경우와 동일하게 1개의 경계치 문제의 해로 구해진다.

무차원 산란파 포텐셜  $\phi_4 = \Psi_D / (a_0 \omega h)$ 의  $C_1$  및  $C_2$  상 경계조건은

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_4}{\partial n} &= \frac{e^{iM_n X}}{\sinh M_0} [i n_x \cosh M_0 (Y+1) \\ &+ n_y \sinh M_0 (Y+1)] \quad \text{on } C_1 \cup C_2 \end{aligned} \quad (6)$$

위에서  $n_x, n_y$ 는 각각 접수면에서 유체영역을 향한 단위 법선벡터  $\vec{n}$ 의  $x, y$ 성분이고  $X=x/h, Y=y/h$ 이며  $M_0 = m_0 h$ 는 무차원 파수이다.

한편 방사파 포텐셜  $\Psi_R$ 을 구하는 문제는 flap이 운동하고 harbor는 정지상태인 multi-body radiation-diffraction waves에 관련된 경계치 문제이다(홍과 김, 1999).  $\Psi_R$ 은 flap의 횡요 복소진폭  $\theta$ 를 무차원화한 복소 진폭  $A_3$ 와 관련 무차원 단위 포텐셜  $\phi_3$ 의 곱으로 표시된다.

$$\Psi_R = -i a_0 \omega h A_3 \phi_3 \quad (7)$$

$$A_3 = \frac{\theta h}{a_0} \quad (8)$$

$\phi_3$ 의  $C_1$  및  $C_2$  상 경계조건은

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial n} = \left( \vec{e}_3 \times \frac{\vec{O}_c P}{h} \right) \cdot \vec{n} \quad \text{on } C_1 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial n} = 0, \quad \text{on } C_2 \quad (10)$$

Flap-harbor 복합체와 같은 경우에는 harbour 내부유동을 정확히 계산해야하므로 다음과 같은 hybrid Green 적분방정식을 사용한다(홍 등 1992). Fig. 1에 보인바와 같이  $D_i$ 를 내부영역,  $D_e$ 를 외부영역이라 하고 내부영역  $D_i$ 에 걸쳐 포텐셜  $\phi_k^i (k=3,4)$  및 Rankine-type Green함수  $G_o$ 에 Green정리를 적용하면 다음과 같은 Green적분방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\phi_k^i(P)}{2} - \int_{C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup F_i} \phi_k^i(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} dL \\ = - \int_{C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup F_i} \frac{\partial \phi_k^i(M)}{\partial n_M} G_o(P, M) dL, \end{aligned} \quad (11)$$

$P$  on  $C_1^i \cup C_2^i \cup F_i$

위에서  $F_i$ 는 harbor내부의 자유표면이고  $G_o$ 는 Rankine-type Green함수로서 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} G_o(P, M) &= \frac{1}{2\pi} \text{Re}\{\log[(X_P - X_M) \\ &+ i(Y_P - Y_M)]\} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 자유표면 경계조건 (5)를  $F_i$ 에 적용하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\phi_k^i(P)}{2} - \int_{C_1 \cup C_2} \phi_k^i(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} dL \\ - \int_{F_i} [\phi_k^i(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} \\ - k_o \phi_k^i(M) G_o(P, M)] dL \\ - \int_C \phi_k^i(M) \frac{\partial G_o(P, M)}{\partial n_M} dL \\ + \int_C \frac{\partial \phi_k^i(M)}{\partial n_M} G_o(P, M) dL \\ = - \int_{C_1 \cup C_2} \frac{\partial \phi_k^i(M)}{\partial n_M} G_o(P, M) dL, \end{aligned} \quad (13)$$

$P$  on  $C_1^i \cup C_2^i \cup F_i$

위에서  $C_1^i$  및  $C_2^i$ 는 각각  $D_i$ 에 속한  $C_1$  및  $C_2$ 를 가리킨다.

한편 외부영역  $D_e$ 에 걸쳐 포텐셜  $\phi_k^e (k=3,4)$  및 Kelvin-type Green함수  $G$ 에 Green정리를 적용하여 정리하면 다음 식을 얻는다(Wehausen and Laitone, 1960).

$$\begin{aligned} \frac{\phi_k^e(P)}{2} + \int_{C_1^e \cup C_2^e} \phi_k^e(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dL \\ + \int_C \phi_k^e(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dL \\ - \int_C \frac{\partial \phi_k^e(M)}{\partial n_M} G(P, M) dL \\ = \int_{C_1^e \cup C_2^e} \frac{\partial \phi_k^e(M)}{\partial n_M} G(P, M) dL, \end{aligned} \quad (14)$$

$P$  on  $C_1^e \cup C_2^e$

위에서  $C_1^e$  및  $C_2^e$ 는 각각  $D_e$ 에 속한  $C_1$  및  $C_2$ 를 가

리키며  $G$ 는 Kelvin-type Green함수로서 다음 식으로 표시된다.

$$G(P, M) = G^*(P, M) + i G^{**}(P, M) \quad (15)$$

$$G^*(P, M) = C_0(M) \cosh M_0 (Y_P + 1) \times \sin M_0 |X_P - X_M| + \sum_{k=1}^{\infty} C_k(M) \cos M_k (Y_P + 1) e^{-M_k |X_P - X_M|} \quad (16)$$

$$G^*(P, M) = -C_0(M) \cosh M_0 (Y_P + 1) \times \cos M_0 |X_P - X_M| \quad (16a)$$

$$C_0(M) = \frac{1}{M_0} \frac{M_0^2 - K_0^2}{M_0^2 - K_0^2 + K_0} \times \cosh M_0 (Y_M + 1) \quad (16b)$$

$$C_k(M) = -\frac{1}{M_k} \frac{M_k^2 + K_0^2}{M_k^2 + K_0^2 - K_0} \times \cosh M_k (Y_M + 1) \quad (16c)$$

$$M_k \tan M_k = -K_0 \quad (16d)$$

내부영역  $D_i$  와 외부영역  $D_e$ 의 공통 경계면인 하버 유입구  $C$ 에서의 정합조건은 다음과 같다.

$$\psi_k^i(P) = \psi_k^e(P) \quad P \text{ on } C \quad (17a)$$

$$\frac{\partial \psi_k^i(P)}{\partial n_P} = \frac{\partial \psi_k^e(P)}{\partial n_P} \quad P \text{ on } C \quad (17b)$$

적분 방정식 (13), (14)을 정합조건 (17a), (17b)와 연립하여 panel method로 이산화하면 내, 외부영역이 연성된 선형 대수 방정식으로 변환되어 풀린다.

한편 flap의 무차원 복소 횡요진폭  $A_3$ 는 다음과 같은 주파수 영역 운동방정식의 해로 얻어진다.

$$\left\{ \frac{M_s}{\rho h^2} I_{33} + [CM_{33} + i(CA_{33} + B_{33})] - \frac{R_{33}}{K_0} - K_{33}' \right\} \cdot A_3 = -CF_3 \quad (18)$$

위에서  $M_s$ 은 flap의 2차원 질량이고  $I_{33}$ ,  $R_{33}$ ,  $CA_{33}$  및  $CM_{33}$ 는 각각 flap의 관성, 부유체 복원력, 조파 감쇠 및 부가 질량계수이고  $CF_3$ 는 flap에 작용하는 파 기진모멘트 계수이다. 또  $K_{33}$  및  $B_{33}$ 는 각각 flap의 회전축에 작용하는 spring 및 감쇠 계수이다.

### 3. 반사계수 및 투과계수

입사파와 복합체에 의하여 발생된 교란파의 합에의하여 무한원방  $x = -\infty$  및  $x = +\infty$ 에서 무차원 복소진폭이 반사계수  $R^T$  및 투과계수  $T^T$ 로 표시된다.

$$R^T = -R_4 + iA_3 R_3 \quad (19)$$

$$T^T = -i - T_4 + iA_3 T_3 \quad (20)$$

위에서

$$R_k = \frac{K_0^2}{(M_0^2 - K_0^2 + K_0)} H_k(\pi), \quad k=3, 4 \quad (21)$$

$$T_k = \frac{K_0^2}{(M_0^2 - K_0^2 + K_0)} H_k(0), \quad k=3, 4 \quad (22)$$

$$H_4(\beta) = - \int_{C_1 \cup C_2} (\sigma_4 - \Psi_4 \frac{\partial}{\partial n}) \frac{\cosh M_0 (Y+1)}{\sinh M_0} e^{-iM_0 X \cos \beta} dL \quad (23)$$

$$H_3(\beta) = - \int_{C_1 \cup C_2} (\sigma_3 - \Psi_3 \frac{\partial}{\partial n}) \frac{\cosh M_0 (Y+1)}{\sinh M_0} e^{-iM_0 X \cos \beta} dL \quad (24)$$

그리고

$$\sigma_k(M) = \frac{\partial \psi_k(M)}{\partial n_M}, \quad k=3, 4 \quad (25)$$

에너지 보존법칙에 입각하여 단위 폭당 파 에너지에 대하여 복합체에 의하여 흡수된 마력의 시간평균  $P_m^f$ 가 far-field에서 다음 식으로 표시됨을 알 수 있다.

$$P_m^f = \frac{1}{2} \rho g C_g a_0^2 [1 - |R^{T^1}|^2 - |T^{T^1}|^2] \quad (26)$$

이를 입사파 마력 (3)식으로 나누면 복합체에 의한 far-field 에너지 흡수 통상 효율이 다음과 같이 표시된다.

$$Eff^f = 1 - |R^{T^1}|^2 - |T^{T^1}|^2 \quad (27)$$

한편 flap의 회전운동 감쇠장치에 의하여 흡수되는 near-field에서 구한 마력의 시간평균  $P_m^n$ 은 다음과 같다.

$$P_m^n = \frac{1}{2} \rho a_0^2 \omega^3 h^2 B_{33} \left(\frac{r_b}{h}\right)^2 |A_3|^2 \quad (28)$$

이를 입사파 마력으로 나누면 near-field 에너지 흡수 통상 효율이 다음과 같이 표시된다.

$$Eff^n = \frac{\omega^2 h}{g} \frac{\omega h}{C_g} B_{33} \left(\frac{r_b}{h}\right)^2 |A_3|^2 \quad (29)$$

### 4. 복합체에 의한 파 에너지 흡수 최적화

복합체의 flap만 회전운동을 하므로 에너지흡수를 최대화하는 flap의 최적 횡요 운동진폭  $A_3^o$ 를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$A_3^o = \frac{i}{2} CF_3 / CA_{33} \quad (30)$$

이때 최적 감쇠 및 spring 계수는 다음과 같다.

$$B_{33}^o = CA_{33} / \left(\frac{r_b}{h}\right)^2 \quad (31a)$$

$$K_{33}^o = \left( \frac{M_f}{\rho h^2} C I_{33} + C M_{33} - \frac{1}{K_0} R_{33} \right) / \left( \frac{\gamma_k}{h} \right)^2 \quad (31b)$$

여기에서 구한 횡요의 최적 운동진폭  $A_3^o$  및 (31a)식으로 표시된 최적 감쇠계수  $B_{33}^o$ 를 (26) 및 (28)식에 각각 대입하면 far-field 및 near-field에서 구한 최대마력  $P_{\max}^f$  및  $P_{\max}^n$ 가 다음과 같이 구해진다.

$$P_{\max}^f = \frac{1}{2} \rho g C_g a_0^2 [1 - |R^o|^2 - |T^o|^2] \quad (32)$$

$$P_{\max}^n = \frac{1}{2} \rho a_0^2 \omega^3 h^2 C A_{33} |A_3^o|^2 \quad (33)$$

위에서

$$R^o = -R_4 + i A_3^o R_3 \quad (34)$$

$$T^o = -i - T_4 + i A_3^o T_3 \quad (35)$$

한편 far-field 및 near-field에서 구한 최대마력  $P_{\max}^f$  및  $P_{\max}^n$ 를 각각 입사파 마력으로 나누면 far-field 및 near-field에너지 흡수 최대효율  $Eff_{\max}^f$  및  $Eff_{\max}^n$ 이 구해진다.

## 5. Flap-harbour 복합체에 작용하는 파 하중

회전판에 작용하는 변동압력은

$$P_d^f = \rho [i\omega(\Psi_0 + \Psi_D + \Psi_R) - g a_0 A_3 (X_M - X_c)] \quad (36)$$

그리고 하-버에 작용하는 변동압력은 다음과 같다.

$$P_d^h = \rho i\omega(\Psi_0 + \Psi_D + \Psi_R^f) \quad (37)$$

위에서  $\Psi_R^f$ 는 하-버에 작용하는 회전판의 운동에 기인한 방사와 압력이다. 복합체 전체에 작용하는 유체 변동압력에 기인한 힘  $\vec{F}_f$  및  $\vec{M}_f$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\vec{F}_f = - \int_{C_1} [P_d^f \vec{n} - \rho g y \theta \vec{e}_3 \times \vec{n}] dl - \int_{C_1} P_d^h \vec{n} dl \quad (38)$$

$$\vec{M}_f = - \int_{C_1} \{ P_d^f \overline{O_m \vec{M}} \times \vec{n} - \rho g y [(\vec{n} \cdot \theta \vec{e}_3) \overline{O_m \vec{M}} - (\overline{O_m \vec{M}} \cdot \theta \vec{e}_3) \vec{n}] \} dl - \int_{C_1} P_d^h \overline{O_m \vec{M}} \times \vec{n} dl \quad (39)$$

여기서 (38)식 우변 첫째 적분기호 안의 둘째 항은 복합체의 회전운동과 정압  $-\rho g y(M)$ 와의 결합에 의하여 발생한 변동하중으로서 작용방향이 복합체표면에 접선방향이므로 법선방

향 압력으로는 작용하지 않으나 힘의 한 성분으로 고려하여야 한다. 같은 이유로 (39) 우변 첫째 적분기호 안의 둘째 항도 모멘트의 한 성분으로서 고려하여야 한다. (39)식에서  $\overline{O_m \vec{M}}$ 은 moment arm으로서 모멘트 계산의 기준점  $O_m(x_m, y_m)$ 은 임의이며 이를 기준하여 전도 모멘트가 계산된다.

한편 회전판의 관성 및 회전판에 작용하는 중력에 의하여 다음과 같은 힘 및 모멘트가 발생한다.

$$\vec{F}_I = \omega^2 \theta M_s [(y_G - y_c) \vec{e}_1 - (x_G - x_c) \vec{e}_2] \quad (40)$$

$$\vec{M}_I = -\omega^2 \theta M_s \vec{e}_3 [I_{33} - (x_m - x_c)(x_G - x_c) - (y_m - y_c)(y_G - y_c)] \quad (41)$$

$$\vec{M}_G = -g \theta M_s \vec{e}_3 (y_m - y_G) \quad (42)$$

위에서  $x_c, y_c$  및  $x_G, y_G$ 는 각각 회전판의 횡요중심  $O_c$  및 무게중심의  $x$  값,  $y$  값이다. 따라서 복합체에 작용하는 모든 외력에 기인한 힘 및 전도 모멘트(overturning moment)는 다음과 같다.

$$\vec{F}_{ext} = \vec{F}_f + \vec{F}_I \quad (43)$$

$$\vec{M}_{ext} = \vec{M}_f + \vec{M}_I + \vec{M}_G \quad (44)$$

## 6. 수치실험 및 토의

수치모델은 Fig. 1에 그려진 바와 같은 복합체로서 형상에 대한 최적화는 고려하지 않았다. 수심  $h = 1.4$  m인 경우이고 주요수치는 다음과 같다.

-Flap

물체의 밀도  $\rho_s = 7000$  Kg-mass/m<sup>3</sup>

flap의 길이  $a = 0.6$  m

두께  $b = 0.005$  m

흡수  $c = 0.48$  m

회전중심  $x_c = 0$  m,  $y_c = 0.12$  m

부심  $x_B = 0$  m,  $y_B = -0.24$  m

중심  $x_G = 0$  m,  $y_G = -0.24$  m

회전중심을 기준한 관성반경  $R_r \approx 0.386$  m

-Harbor

flap과 harbor간의 수평거리  $cl = 0.9$  m

harbor의 흡수  $ht = 0.5$  m

harbor 유입구의 높이  $gh = 0.015$  m

harbor 바닥의 수평길이  $hl = 1.17$  m

harbor 바닥판의 두께  $ht = 0.005$  m

harbor 수직벽의 두께  $hv = 0.15$  m

계산은 무차원 값  $K_o = \frac{\omega^2 h}{g}$  가 0.25에서 4.0 까지 0.25간격으로 수행되었으며 이를  $M_0$ 에 대하여 나타냈다.

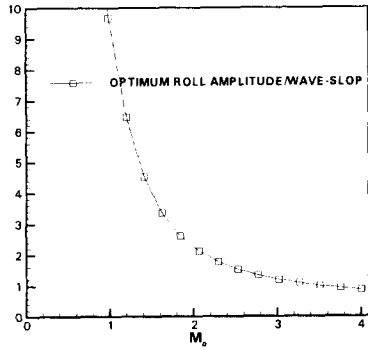


Fig. 2 Optimum roll amplitude

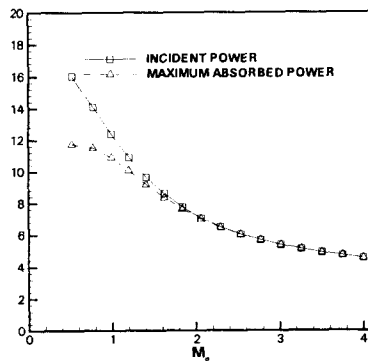


Fig. 3 Incident wave power vs. absorbed wave power

Fig. 2에 입사파의 기울기로 무차원화 된 최적 횡요 진폭  $A_3^o / M_0$ , Fig. 3에 입사파 마력 및 최대 흡수마력을 도시하였다. 최적 횡요 진폭 및 최대 흡수마력은 매 주파수마다 flap의 횡요에 대한 최적 감쇠계수 및 spring계수가 자동적으로 시스템에 주어질 때의 값이다. Fig. 4에 far-field 및 near-field 에너지 흡수 최대효율을 도시하였다. 이에 의하면 최대효율은  $M_0 = 1.4$  에서 95%를 상회하여  $M_0 = 2.5$  를 지나면서 100%에 이른다. 한편 Fig. 3에 보인 바와 같이 입사파의 마력은 파장이 클수록 즉  $M_0$ 가 작을수록 증가하므로 최대효율이 발생하는  $M_0$  값에서 흡수마력의 최대값이 발생하지는 않는다. 그러나 Fig. 2에 보인 바와 같이  $M_0 < 1$ 인 구간에서는 입사파 마력은 커지나  $A_3^o$ 가 비현실적으로 증가하므로 실현은 불가능하고  $M_0 > 1.5$ 에서의 효율이 실현 가능한 최대효율이다.

한편 감쇠계수 및 복원력계수의 자동제어가 곤란한 경우에는 적절한  $M_0$  값에서의 최적 감쇠계수 및 복원력계수를 선택하여 이를 모든  $M_0$  값에 적용하는 것이 차선의 방법이다. 본 수치실험에서는  $M_0 = 1.62$ 에서의 최적 감쇠 및 복원력계수를 선택하였다.

$$K_{33} = 5.78888 \cdot 10^{-3} \quad B_{33} = 8.416793 \cdot 10^{-3}$$

위와 같이 감쇠계수 및 spring계수를 고정시키고 횡요 진폭 및

흡수효율을 계산하여 각각 Fig. 5 및 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 5에 보인 바와 같이  $M_0 > 2$ 인 구간에서  $(A_3^o / M_0) < 2$ 이므로 실현이 가능하다. 본 수치모델은 감쇠계수 및 spring계수를 고정시켰음에도  $2 < M_0 < 3$ 인 구간에서 파 에너지 흡수효율이 90%이상이므로 경제적인 것으로 판단된다.

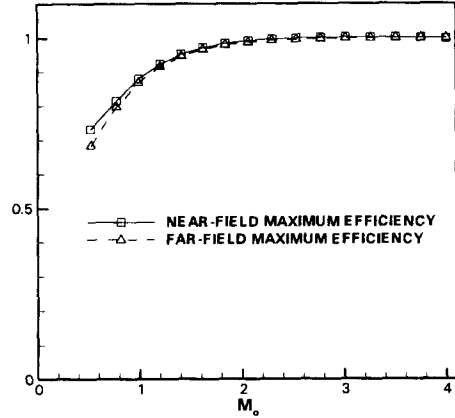


Fig. 4 Maximum wave power absorbing efficiencies of the flap-harbour device

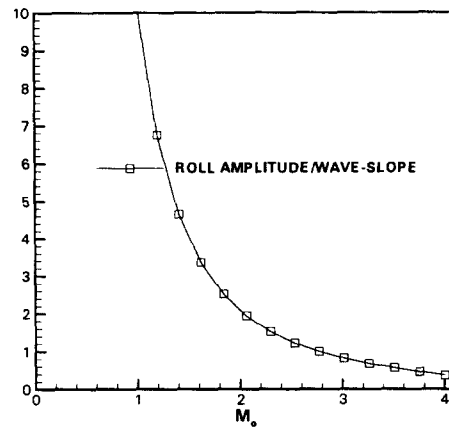


Fig. 5 Roll amplitude with fixed damping and spring coefficients

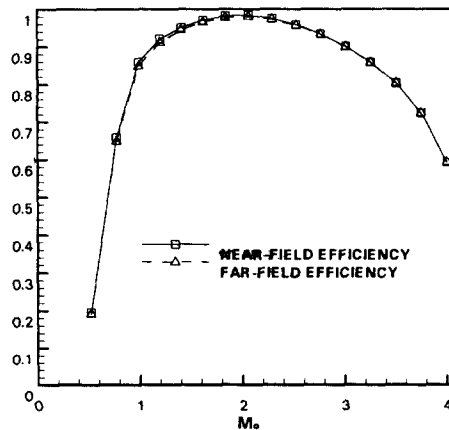


Fig. 6 Wave power absorbing efficiencies with fixed damping and spring coefficients

한편 감쇠계수 및 spring계수를 고정시킨 경우에 대한 반사 계수 및 투과계수를 Fig. 7에 보였다.  $M_0 > 2$  인 구간에서 투과 계수를 0.15이하로 대폭 감소시킬 수 있으므로 본 복합체가 소 파제의 용도에도 적합한 것으로 보인다.

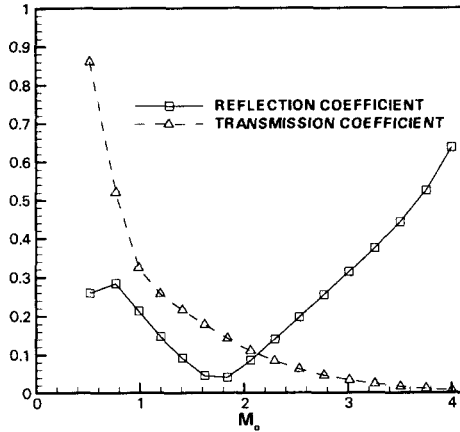


Fig. 7 Reflection and transmission coefficients with fixed damping and spring coefficients

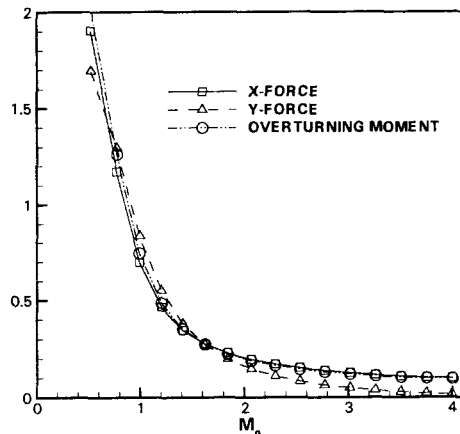


Fig. 8 Resultant forces and overturning moment on the flap-harbor device with fixed damping and spring coefficients

Fig. 8에 감쇠계수 및 spring계수를 고정시킨 경우 복합체에 작용하는 외력 및 전도 모멘트를 보였다.

여기서 전도 모멘트는 flap 하부의 해저면을 기준하여 계산된 값이다.

한편 Fig. 4 및 Fig. 6에 보인 바와 같이 far-field 및 near-field 에너지 흡수 효율 값들이 거의 일치함을 보이고 있으므로 본 논문에서 소개된 방법의 신뢰성이 높음을 알 수 있다.

### 7. 결 론

선형파 이론을 사용할 경우 flap-harbor 복합체에 최적 감쇠 및 spring계수를 적용하여 유한수심 파 에너지를 이론상 100% 가까이 흡수할 수 있음을 보였다. 감쇠 및 spring계수를 특정 주파수의 최적계수에 고정시킨 경우에도 넓은 주파수 영역에 걸쳐서 95% 이상의 파 에너지 흡수효율을 달성할 수 있다. 한편 투과파 진폭도 입사파의 15% 이하로 충분히 작아지므로 본 복합체가 고성능 소파제의 역할도 할 수 있다. 이러한 감쇠 및 spring계수가 과다하게 클 경우에는 복합체 형상에 대한 최적화를 하는 것이 좋을 것이다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 기관고유사업중 KRISO에서 수행된 해역 환경개선 핵심장치 성능평가 모형시험(III) 연구과제의 일부이다.

### 참 고 문 헌

홍도천, 김현주(1999). "유한수심 파 중에 계류된 2개의 2차원 부유체에 의한 파 에너지 흡수에 대한 연구", 한국해양공학회 춘계학술대회논문집.  
 홍도천, 현범수, 홍사영(1992). "부유식 OWC챔버의 파랑중 거동특성연구", 한국해양공학회지, 제6권 제1호.  
 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.  
 Wehausen, J. V. and Laitone, E. V.(1960). "Surface Waves", Encyclopedia of Physics, Vol. 9, pp 446~778.

2000년 1월 11일 원고 접수  
 2000년 3월 20일 수정본 채택