

## 해양구조물의 동요해석을 위한 Hybrid적분방정식법의 요소분할 개선에 관한 연구

### A Study on the improvement of element division of hybrid integral method for analyzing of the offshore structures

이 상 엽\*  
Sang-Yeob Lee\*

#### <Abstract>

Recently, It is proceeding the project of offshore structures in the many century. A hybrid boundary-integral method is developed for computing wave forces on floating bodies. In this method, using the cylindric boundary for deviding elements, it is convenient to analysis but is difficult to apply to the rectangular or slender bodies. Thus, in this paper, I propose the new method by using the fictitious vertical cylinder of arbitrary cross-section and shows results of the numerical analysis for testing.

**Key words :** *Offshore structures, Floating bodies, Hybrid boundary-integral mothod, Wave forces, Fictitious vertical cylinder of arbitrary cross-section*

#### 1. 서론

최근 워터프론트 및 해양건축물의 개발에 관한 계획이 선진각국을 비롯하여 우리나라에서도 진행되고 있다. 이러한 시설들에 작용하는 파랑외력은 해저지형과 구조물 또는 구조물 상호간의 간섭효과를 포함하는 유체력을 고려해야 한다. 유체력이나 부체운동(浮體運動)에 미치는 지형의 영향을 3차원적으로 취급한 연구로서는 무한직선연안벽에 대한 Oortmersen<sup>1)</sup>, 清川<sup>2)</sup>의 연구결과가 있다. 이들의 해석법은 주변경계의 불투과조건을 경상법(鏡像法)을 이용해서 처리하는 방법으로, 취급할 수 있는 경계

의 형상에 제한적인 결점이 있다. 또한 유한길이의 방파제에 둘러싸인 부체에 대해서는 永田<sup>3)</sup>의 연구가 있다. 이것은 Green의 공식에 의해 3차원영역분할법에 의해 해석하는 것으로, 분할영역마다 경계조건 및 접속조건을 만족하는 연립방정식을 세워야하므로 다수의 미정계수를 포함하는 연립방정식을 해석해야한다.

부체(浮體)의 동요를 해석하는 수치해석법으로서 최근 주목받는 Hybrid적분방정식법이 있다.<sup>4)</sup> 이것은 유체영역을, 부체를 포함하는 가상의 경계면으로 분할하고, 내부영역에 대해서는 Green의 공식을 직접 이산화해서 구해지는 수치해(경계요소해)를, 외부영역에 대해서는 방사

\* 정회원, 영남대학교 건축공학과 겸임조교수, 工博  
나고야대학대학원 졸업(일본)  
706-040 대구시 수성구 황금동 771-4 (053)764-4750

Adjunct Prof. of Architecture, Yeungnam University,  
Dr.Eng.  
Tel (053) 764-4750



조건을 만족하는 해석해를 사용해서 두 영역의 경계에서 접속하는 방법이다. 이 방법은 고전적인 적분방정식에 비해 많은 장점을 갖고 있으며, 가상경계면상에서 해를 접속하는 방법에 따라 여러 가지 정식화가 가능하지만, 일반적으로 외부영역해가 쉽게 구해지는 가상원통면을 사용하는 경우가 많다. 그러나 해석대상의 부체가 장방형 또는 세장체가 되면 자유표면 및 저면의 요소분할 수가 불필요하게 많아지는 것과 또한 부체에 인접하여 임의형상의 방파제나 연안이 존재할 경우 대응시키기 어려운 결점을 갖고 있다.

그리하여, 이러한 결점을 보완하는 방법으로써 임의형상의 가상기둥면에 의한 해석법을 제안한다.

본 논문에서는 이 방법의 정식화를 하고, 타당성을 검증하기 위해 수치해석예를 나타낸다.

## 2. 동요(動搖)해석의 기초이론

부체(浮體)의 정상동요문제(定常動搖問題)의 기초이론에 대해서는 많은 문헌에 소개되어 있지만 여기서는 본 논문의 해석에 사용되었던 이론을 참고문헌 4)에서 인용한다.

### 2.1 경계치문제

Fig.1과 같은 유체영역을 직교좌표  $oxyz$ 로 정의하여,  $oxy$ 면을 평균자유표면에 일치시키고  $oz$ 축의 정(正)방향을 연직의 상향(上向)으로 한다. 또한 원통좌표계  $or\theta z$ 를 식(1)과 같이 정의한다.

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta \quad (1)$$

물체의 운동 및 입사파는 미소(微小)한 것으로 가정하여 선형중첩의 원리가 성립하는 것으로 한다.

물체의 운동은 6개의 강체모드 즉 Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw를 중첩함으로써 표현할 수 있다. 물체의 각 모드에 대한 주기적 운동은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$X_q(t) = \text{Re}\{x_q e^{-i\omega t}\}, \quad q=1,2,\dots,6 \quad (2)$$

여기서  $\omega$ 는 진동수,  $t$ 는 시간,  $x_q$ 는  $q$ 모드의 운동복소진폭을 나타내며, 지표  $q=1,2,\dots,6$ 은 각각 Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw에 대응하고 있다.

유체가 비회전성의 이상유체라고 가정하면

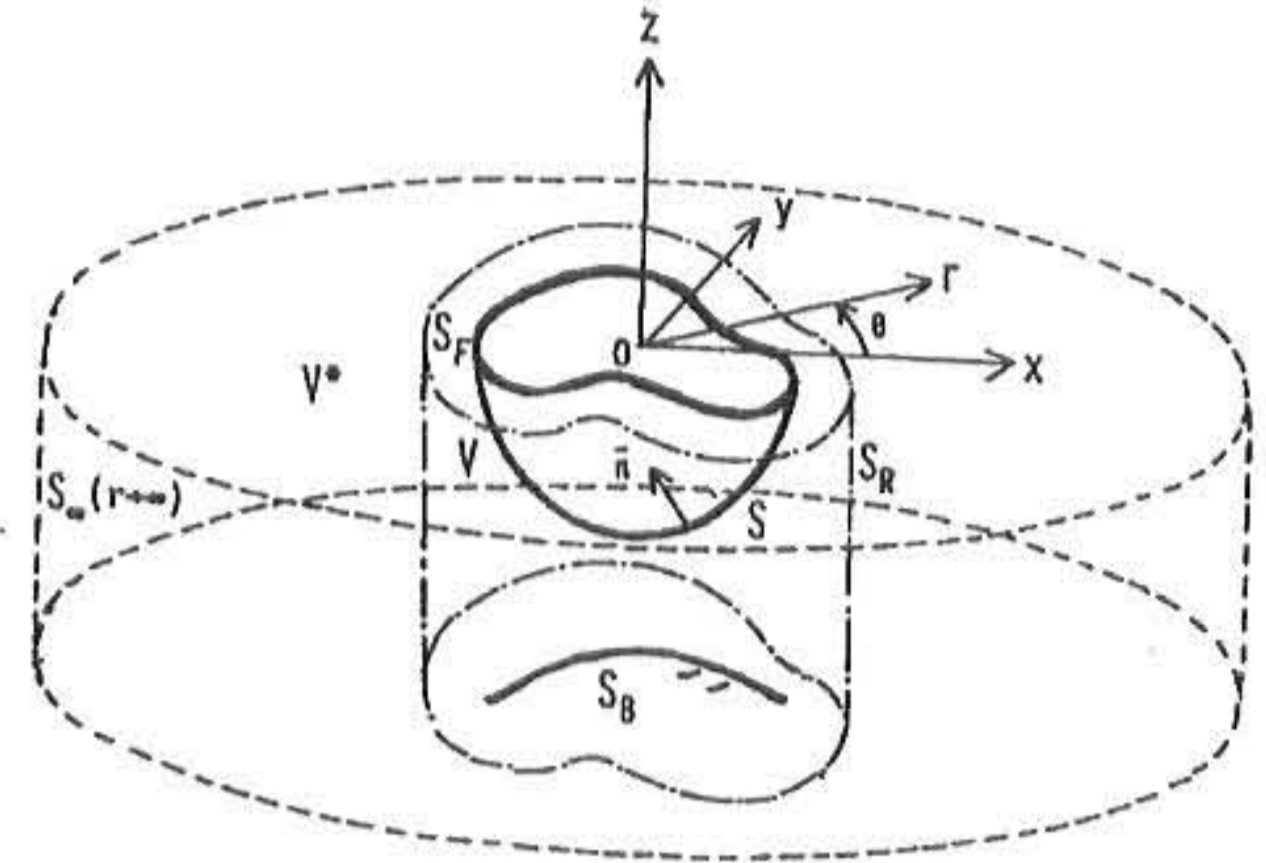


Fig.1 Fluid boundaries and a fictitious vertical cylinder of arbitrary cross-section

속도퍼텐셜은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \text{Re}\{\phi e^{i\omega t}\} \\ &= \text{Re}\left\{\left(\phi_0 + \phi_7 + i\omega \sum_{q=1}^6 x_q \phi_q\right) e^{i\omega t}\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\phi_0$ 는 입사파퍼텐셜,  $\phi_7$ 은 회절파퍼텐셜을,  $\phi_q$ 는 물체의  $q$ 모드의 단위진폭운동에 의한 발산파퍼텐셜이다.

진폭  $A$ , 파수  $k$ 의 평면진행파에서 입사파퍼텐셜은 다음 식으로 표현된다.

$$\phi_0 = -\frac{igA}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{ik(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} \quad (4)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도를 나타내고 파수  $k$ 와 진동수  $\omega$ 사이에는 다음 관계식이 성립한다.

$$\frac{\omega^2}{g} \equiv \nu = k \tanh kh \quad (5)$$

회절파퍼텐셜 및 발산파퍼텐셜은 다음의 연속방정식 및 경계조건을 만족해야한다.



$$\nabla^2 \phi_q = 0 \quad \text{유체내에서} \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \phi_q}{\partial n} = 0 \quad \text{저면상에서} \quad (6b)$$

$$\frac{\partial \phi_q}{\partial z} - \nu \phi_q = 0 \quad \text{자유표면상에서} \quad (6c)$$

$$\frac{\partial \phi_q}{\partial n} = h_q \quad \text{물체표면상에서} \quad (6d)$$

$$\lim_{kr \rightarrow 0} (kr)^{1/2} \left( \frac{\partial \phi_q}{\partial r} - ik \phi_q \right) = 0 \quad \text{무한원방에서} \quad (6e)$$

여기서  $\partial/\partial n$ 은 경계면에 있어서 유체영역에 대한 외향단위법선  $n$ 의 미분을 나타낸다.  $h_q$ 는 각 퍼텐셜에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} h_1 &= n_x, \quad h_2 = n_y, \quad h_3 = n_z \\ h_4 &= (y - y_G)n_z - (z - z_G)n_y \\ h_5 &= (z - z_G)n_x - (x - x_G)n_z \\ h_6 &= (x - x_G)n_y - (y - y_G)n_x \\ h_7 &= -\partial \phi_0 / \partial n \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $n_x, n_y, n_z$ 는  $n$ 의  $x, y, z$ 방향여현을,  $(x_G, y_G, z_G)$ 는 회전중심의 좌표를 나타낸다.

## 2.2 적분방정식

Fig.1에 나타낸 것처럼 유체영역을 임의형상의 가상기둥면  $S_R$ 로써 두 개의 영역으로 분할한다. 이 가상기둥면은 물체 및 불규칙한 저면을 포함하는 충분히 큰 것으로 한다.

내부유체영역  $V$ 에 대해서 Green공식을 적용하면 다음식으로 정리된다.

$$C_P \phi(P) = \int \int_{\partial V} \left\{ \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) - \phi(Q) \frac{\partial}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) \right\} ds(Q) \quad (8)$$

여기서,  $P$ 는  $V$ 를 둘러싼  $\partial V$ 위의 기준점을,  $Q$ 는  $\partial V$ 위의 적분점을,  $ds(Q)$ 는  $\partial V$ 위의 면적요소를,  $R_{PQ}$ 는 2점  $P, Q$ 사이의 거리를,  $C_P$ 는  $P$ 점에 대해서  $V$ 와 이루는 입체내각을 나타낸다. 식(8)에 식(6b-d)의 경계조건을 이용하면 다음의 경계적분방정식이 구해진다.

$$\begin{aligned} C_P \phi(P) &+ \int \int_{S \cup S_B} \phi(Q) \frac{\partial}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) ds(Q) \\ &+ \int \int_{S_F} \phi(Q) \left[ \frac{\partial}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) - \frac{\omega^2}{g} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) \right] ds(Q) \quad (9) \\ &+ \int \int_{S_n} \left[ \phi(Q) \frac{\partial}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) - \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) \right] ds(Q) \\ &= \int \int_S \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) ds(Q) \end{aligned}$$

여기서,  $S, S_B, S_F$ 는 각각  $S_R$ 로 둘러싸인 물체표면, 저면 및 자유표면을,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다.

외부영역  $V^*$ 에 대해서는 방사조건, 자유표면 및 저면의 경계조건을 만족하는 Green함수  $G(P, Q)$ 를 사용하여 Green공식을 적용하면, 다음과 같은 적분방정식이 구해진다.

$$C_P \phi(P) - \int \int_{S_n} \left\{ \phi(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) - \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n} G(P, Q) \right\} ds(Q) = 0 \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} G(P, Q) &= 2\pi i C_0 H_0^{(1)}(kR_{PQ}) \cosh k(Z_P + h) \cosh k(\xi + h) \\ &+ 4 \sum_{m=1}^{\infty} C_m K_0(k_m R_{PQ}) \cos k_m(Z_P + h) \cos(\xi + h) \end{aligned} \quad (11a)$$

$$C_0 = \frac{k^2 - \nu^2}{(k^2 - \nu^2)h + \nu}, \quad C_m = \frac{k_m^2 + \nu^2}{(k_m^2 + \nu^2)h - \nu} \quad (11b)$$

이고,  $H_0^{(1)}$ 은 0차의 제1종 Hankel함수,  $K_0$ 는 0차의 제2종 변형Bessel함수를 나타내며,  $k, k_m$ 은 다음의 고유방정식의 정(+의) 실근(實根)으로 식(5) 및 다음 식과 같은 관계를 갖는다.

$$k_m \tan k_m h + \nu = 0 \quad (12)$$

## 2.3 가상경계면에서의 해의 접속

가상기둥면  $S_R$ 위의 퍼텐셜을 수심방향의 고유함수로 전개하면 다음과 같다.

$$\phi(Q) = \sum_{m=0}^{\infty} \phi_m(Q) \cdot Z_m(\xi) \quad (13)$$



여기서,  $\phi^*$ 는 외부영역의 퍼텐셜을 나타내며

$$Z_m(\xi) = \begin{pmatrix} \cosh k(\xi+h), & m=0 \\ \cos k_m(\xi+h), & m \geq 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

식(13)을 수심방향에 대해 해석적으로 실행하면, 식(9)의  $S_R$ 상의 적분항은 다음과 같이 선적분식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int \int_{S_R} \left\{ \phi(Q) \frac{\partial}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) - \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{PQ}} \right) \right\} ds(Q) \\ = \sum_{m=0}^{\infty} \int_{C_R} \left\{ \phi_m(Q^*) \frac{\partial}{\partial n_Q} f_m(P^*, Q^*) \right. \\ \left. - \frac{\partial \phi_m(Q^*)}{\partial n_Q} f_m(P^*, Q^*) \right\} dc(Q^*) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,

$$f_m(P^*, Q^*) = \int_{-h}^0 \frac{1}{R_{P^*Q^*}} Z_m(\xi) d\xi \quad (16)$$

를 나타내며,  $C_R$ 은 가상기둥면과 자유표면의 교선을,  $P^*, Q^*$ 는 각각  $P, Q$ 를 자유표면상에 투영한 점을 나타낸다.

또한, 외부영역에 대해서는 식(13)을 이용한 Green함수의 수심방향의 적분을 실행하면 식(10)은 다음과 같은 적분방정식으로 치환할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_P \phi(P^*) - \int_{C_R} \left[ \phi(Q^*) \frac{\partial}{\partial n_{Q_m}} (P^*, Q^*) \right. \\ \left. - \frac{\partial \phi}{\partial n_Q} (Q^*) g_m(P^*, Q^*) \right] dc(Q^*) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,

$$g_m(P^*, Q^*) = \begin{pmatrix} \pi i H_0^{(1)}(k r_{P^*Q^*}) & m=0 \\ 2K_0(k_m r_{P^*Q^*}) & m \geq 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$r_{P^*Q^*}$ 는  $P^*$ 와  $Q^*$ 의 거리를 나타낸다.

내부영역의 적분방정식(9)에서 가상기둥면의 적분항을 식(15)로 변환한 식과 외부영역의 적분방정식(17)을 연립으로 풀면 퍼텐셜이 구해진다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 적분방정식의 이산화

적분방정식(9)와 식(17)은 경계요소법의 일반적인 방법으로 이산화 할 수 있다.

경계면  $S, S_B, S_F$ 를 각각  $N_1, N_2, N_3$ 개의 8절점  $P_j^{(l)}$  ( $j=1,2,\dots,8$ )를 갖는 2차원 Isoparametric 요소  $\Delta S_l$  ( $l=1,2,\dots,N_1+N_2+N_3$ )로 분할한다. 요소내의 임의점  $Q$ 에 있어서 퍼텐셜을 보간함수  $M_j(Q)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\phi(Q) = \sum_{j=1}^8 M_j(Q) \phi(P_j^{(l)}) \quad (19)$$

또한, 곡선  $C_R$ 을  $n_R$ 개의 3절점  $P_j^{(l)}$  ( $j=1,2,3$ )를 갖는 곡선요소  $\Delta C_l$  ( $l=1,2,\dots,n_R$ )로 분할한다. 요소내의 임의점  $Q^*$ 에 있어서 퍼텐셜을 보간함수  $M_j(Q^*)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\phi_m(Q^*) = \sum_{j=1}^3 M_j(Q^*) \phi_m(P_j^{(l)}) \quad (20)$$

내부유체영역의 적분방정식(9)는 식(19)를 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_i \phi(P_i) + \sum_{l=1}^{N_1} \sum_{j=1}^8 A_{ij}^{(l)} \phi(P_j^{(l)}) \\ + \sum_{l=N_2+1}^{N_1+N_2} \sum_{j=1}^8 \left( A_{ij}^{(l)} - \frac{\omega^2}{g} B_{ij}^{(l)} \right) \phi(P_j^{(l)}) \\ + \sum_{m=0}^M \sum_{l=1}^{n_R} \sum_{j=1}^3 \left\{ A_{ijm}^{(l)} \phi_m(P_j^{(l)}) - B_{ijm}^{(l)} \frac{\partial \phi_m}{\partial n} (P_j^{(l)}) \right\} \\ = \sum_{l=1}^{N_1} \sum_{j=1}^8 B_{ij}^{(l)} h(P_j^{(l)}) \quad (1 \leq i \leq N_1) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,

$$A_{ij}^{(l)} = \int \int_{\Delta S_l} \frac{\partial}{\partial n_Q} \left( \frac{1}{R_{P_i Q}} \right) M_j(Q) ds(Q) \quad (22a)$$

$$B_{ij}^{(l)} = \int \int_{\Delta S_l} \left( \frac{1}{R_{P_i Q}} \right) M_j(Q) ds(Q) \quad (22b)$$

$$A_{ijm}^{(l)} = \int_{\Delta C_l} \frac{\partial}{\partial n_{Q^*}} f_m(P_i, Q^*) m_j(Q^*) dc(Q^*) \quad (22c)$$

$$B_{ijm}^{(l)} = \int_{\Delta C_l} f_m(P_i, Q^*) m_j(Q^*) dc(Q^*) \quad (22d)$$

$$N_2 = N_1 + N_2, \quad N_3 = N_2 + N_3$$

외부영역의 적분방정식(17)은 (20)을 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$C_i \phi_m(P_i) - \sum_{j=1}^{n_g} \sum_{l=1}^3 \{ a_{ij}^{(l)} \phi_m(P_j^{(l)}) - b_{ijm}^{(l)} \frac{\partial \phi_m}{\partial n}(P_j^{(l)}) \} = 0 \quad (23)$$

(1 ≤ i ≤ n\_j, 0 ≤ m ≤ M)

여기서,

$$a_{ijm}^{(l)} = \int_{\Delta C_i} \frac{\partial}{\partial n} g_m(P_i, Q^*) m_j(Q^*) dc(Q^*) \quad (24a)$$

$$b_{ijm}^{(l)} = \int_{\Delta C_i} f_m(P_i, Q^*) m_j(Q^*) dc(Q^*) \quad (24b)$$

### 3.2 급수전개식

식(16)의 적분을 수행하는데 있어서 해석적으로 평가하여 계산효율의 향상을 꾀하기 위하여 4개의 급수전개식으로 표현하여,

<m=0인 경우>

$$f_0(P, Q^*) = \int_{-h}^0 \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-\zeta)^2}} \cosh k(\zeta+h) d\zeta \quad (25)$$

$$r^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 \quad (26)$$

식(25)에서  $t = z - \zeta$ 로 두고, 쌍곡선여현함수를 지수함수로 나타내면 다음 식으로 변환된다.

$$f_0(P, Q^*) = \frac{1}{2} [I^+ \{k(z+h)\} + I^- \{k(z+h)\} + e^{kh} I^+ (k|z|) + e^{-kh} I^- (k|z|)] \quad (27)$$

여기서  $I^\pm$ 는 Lipschitz의 적분공식을 이용하여 변환하면

$$I^\pm(Y) = e^{\mp Y} \{ H_0(X) \pm Y_0(X) \} - \int_0^\infty \frac{e^{-\mu Y}}{\mu \mp 1} J_0(\mu X) d\mu \quad (28)$$

여기서  $H_0(X)$ 는 0차의 struve함수를,  $J_0(X)$  및  $Y_0(X)$ 는 0차의 제1종, 제2종 Bessel함수를 나타낸다.

<m ≥ 0인 경우>

$$f_m(P, Q^*) = \int_{-h}^0 \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-\zeta)^2}} \cos k_m(\zeta+h) d\zeta \quad (29)$$

식(29)도 식(25)와 같은 방법으로 변환하면

$$f_m(P, Q^*) = \frac{1}{2} [I_m^+ \{k_m(z+h)\} + I_m^- \{k_m(z+h)\} + e^{ik_m h} I_m^+ (k_m|z|) + e^{-ik_m h} I_m^- (k_m|z|)] \quad (30)$$

여기서  $I_m^\pm$ 는 식(28)과 같은 방법으로

$$I_m^\pm(Y_m) = e^{\mp iY_m} [K_0(X_m) \pm \frac{\pi}{2} i \{ I_0(X_m) - L_0(X_m) \}] - \int_0^\infty \frac{e^{-\mu Y_m}}{\mu \mp i} J_0(\mu X_m) d\mu \quad (31)$$

여기서  $I_0(X_m)$  및  $K_0(X_m)$ 는 각각 0차의 제1종 및 제2종 변형Bessel함수를,  $L_0(X_m)$ 은 0차의 변형struve함수를 나타낸다.

식(28)과 (31)은  $X_m$ 과  $Y_m$ ( $m \geq 0$ )의 값에 따라 각각 4개의 경우로 나뉘며, 다음과 같은 급수전개식으로 구해진다.

(1) X와 Y의 값이 둘다 작은 경우

$$I^\pm(Y) = e^{\mp Y} \left\{ J_0(X) \log \left( \frac{Y + \sqrt{X^2 + Y^2}}{X} \right) \pm \frac{\pi}{2} H_0(X) \left( \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{X} - 1 \right) + \sqrt{X^2 + Y^2} \sum_{l=0}^\infty \sum_{n=1}^\infty C_{l,n}^\pm X^{2l} Y^n \right\} \quad (32)$$

여기서,

$$C_{0,n}^+ = \frac{1}{(n+1)(n+1)!}, \quad C_{l,n}^+ = -\left( \frac{n+2}{n+1} \right) C_{l-1,n+2}^+ \\ C_{0,n}^- = \frac{(-1)^{n+1}}{(n+1)(n+1)!}, \quad C_{l,n}^- = -\left( \frac{n+2}{n+1} \right) C_{l-1,n+2}^- \quad (33)$$

(2) X/Y의 값이 작은 경우

$$I^\pm(Y) = e^{-Y} \left[ -\frac{\pi}{2} \{ Y_0(X) + H_0(X) \} + J_0(X) E_1(Y) - \sum_{n=1}^\infty \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \left( \frac{x}{2} \right)^{2n} \sum_{l=0}^{2n-1} \frac{l!}{Y^{l+1}} \right] \quad (34a)$$



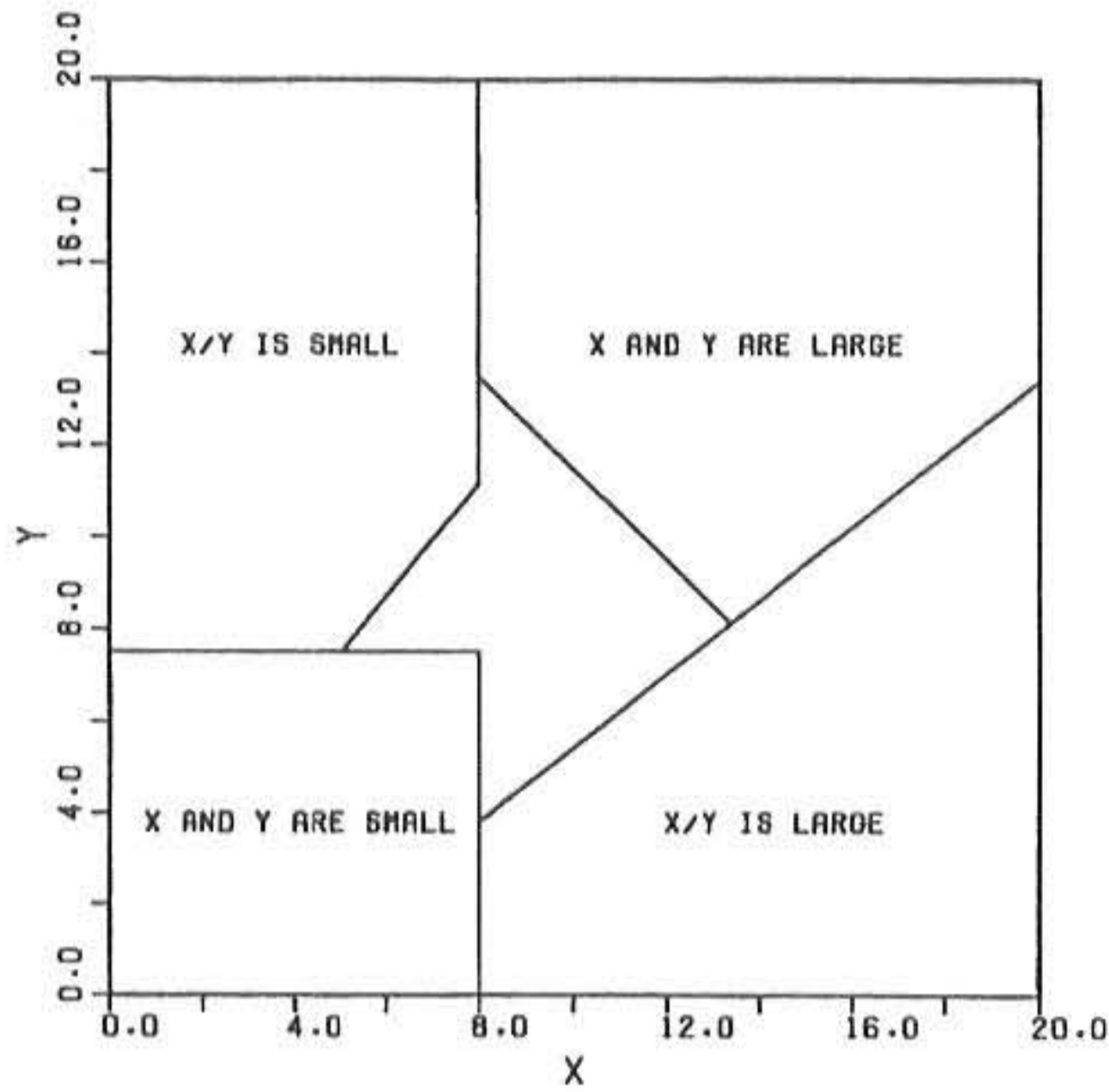


Fig.2 The convergent range of  $I^+, I^-$

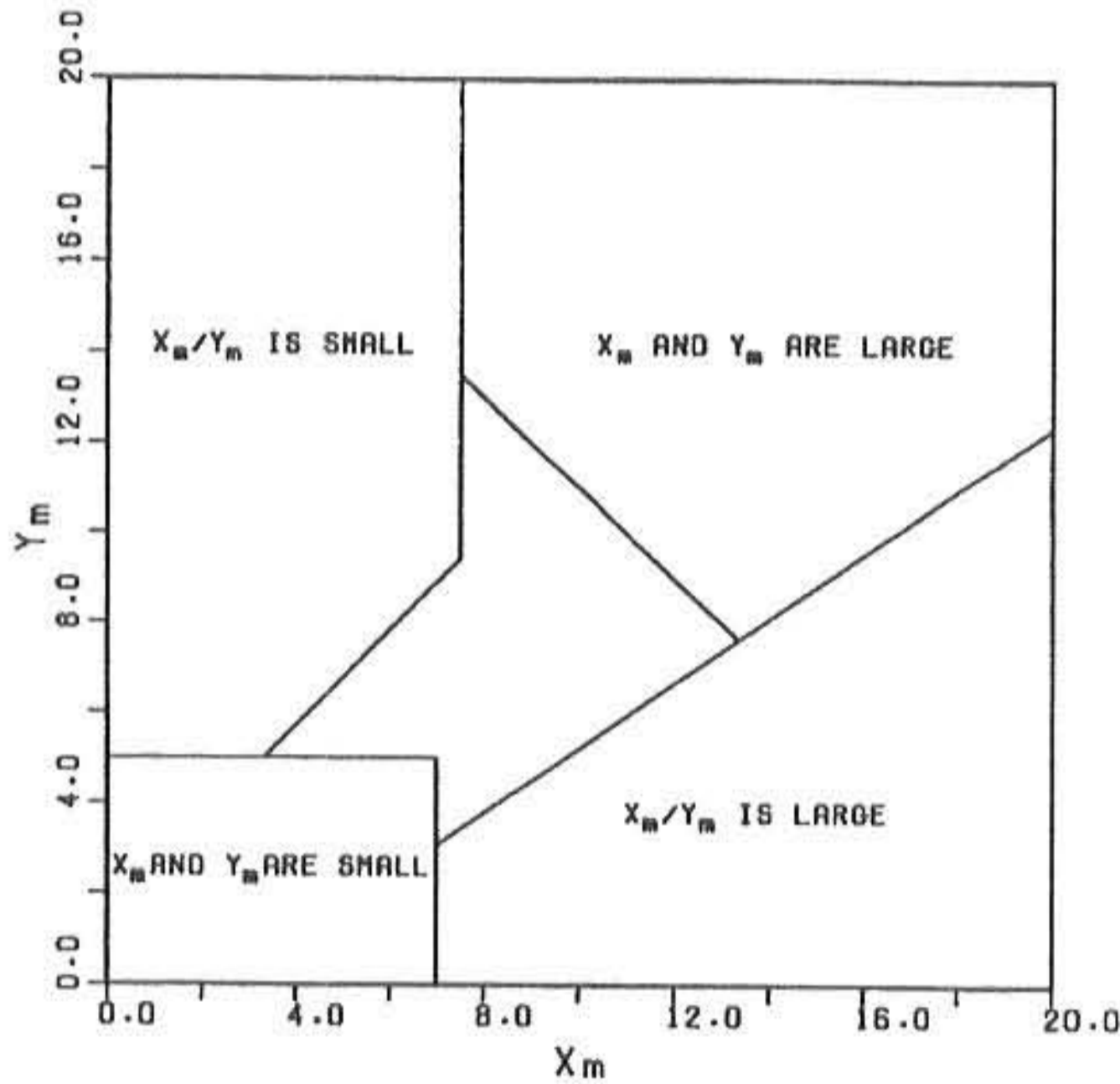


Fig.3 The convergent range of  $I_m^+, I_m^-$

$$\Gamma(Y) = e^Y \left[ \frac{\pi}{2} \{H_0(X) - Y_0(X)\} - J_0(X) E_1(Y) \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \left(\frac{x}{2}\right)^{2n} \sum_{l=0}^{2n-1} (-1)^{l+1} \frac{l!}{Y^{l+1}} \quad (34b)$$

여기서,  $E_1(Y)$ 는 지수적분함수를 나타낸다.

(3) X/Y의 값이 큰 경우

$$I^\pm(Y) = \pm \frac{1}{X} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot (2n)} \frac{(-1)^n}{X^{2n}} J_{2n}^\pm \quad (35)$$

여기서,

$$\begin{aligned} J_0^\pm &= 1 - e^{\mp Y} \\ J_{2n}^\pm &= Y^{2n} \mp 2nY^{2n-1} + 2n(2n-1)J_{2n-2}^\pm \end{aligned} \quad (36)$$

(4) X와 Y의 값이 둘다 큰 경우

$$\begin{aligned} I^+(Y) &\sim \frac{\pi}{2} e^{-Y} \{H_0(X) - Y_0(X)\} \\ &\sum_{n=0}^{\infty} \frac{n!}{(\sqrt{X^2 + Y^2})^{n+1}} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l}{2!} \frac{(n+l)!}{(l!)^2 (n-l)!} \\ &\cdot \left(1 - \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)^l \end{aligned} \quad (37a)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(Y) &\sim \frac{\pi}{2} e^Y \{H_0(X) - Y_0(X)\} \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} n!}{(\sqrt{X^2 + Y^2})^{n+1}} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l}{2!} \frac{(n+l)!}{(l!)^2 (n-l)!} \\ &\cdot \left(1 - \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)^l \end{aligned} \quad (37b)$$

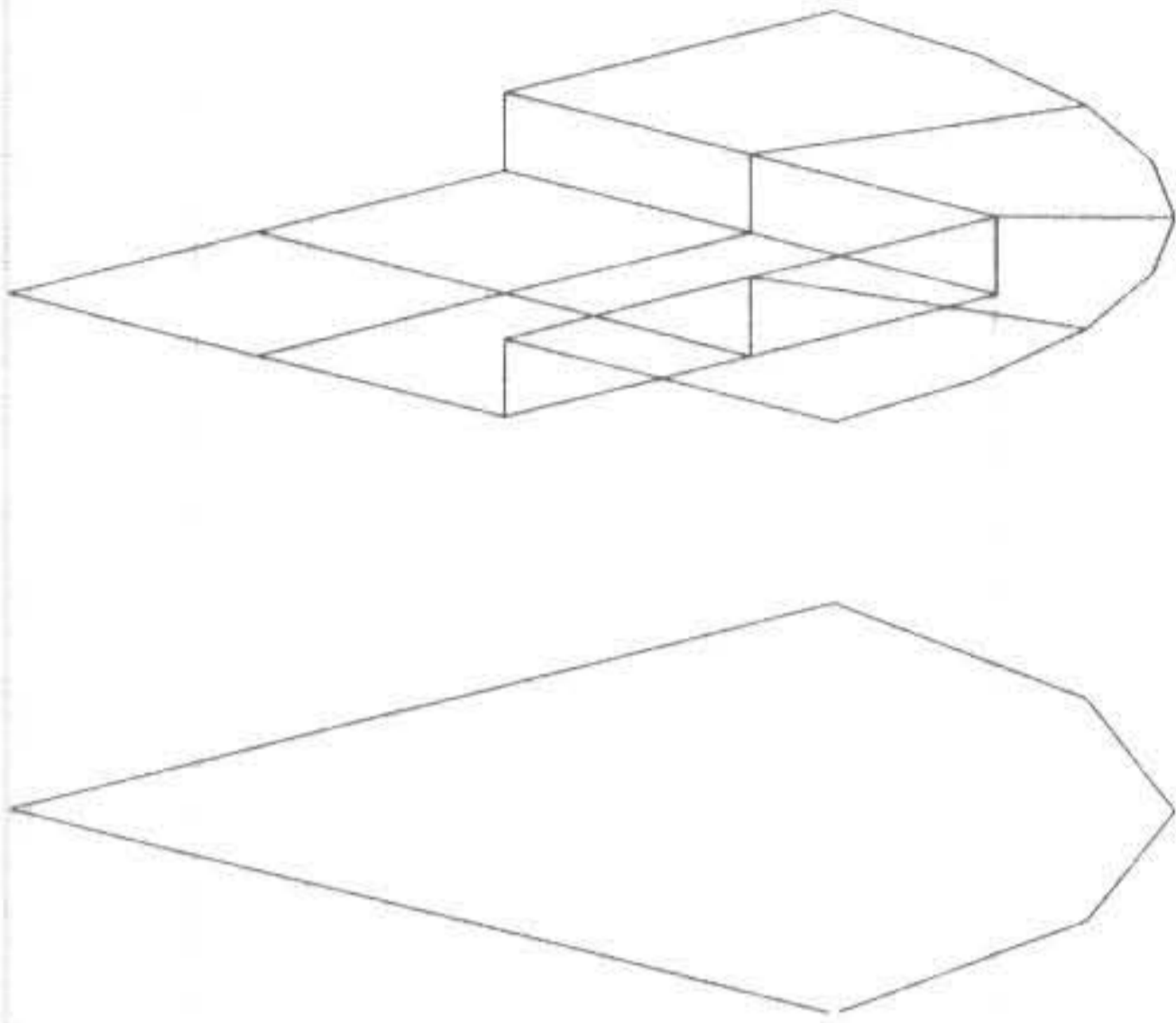
$I_m^\pm$  ( $m > -1$ )에 대해서도  $I^\pm$ 와 같은 방법으로 4개의 급수전개식이 구해진다.

### 3.3 급수전개식의 수렴범위

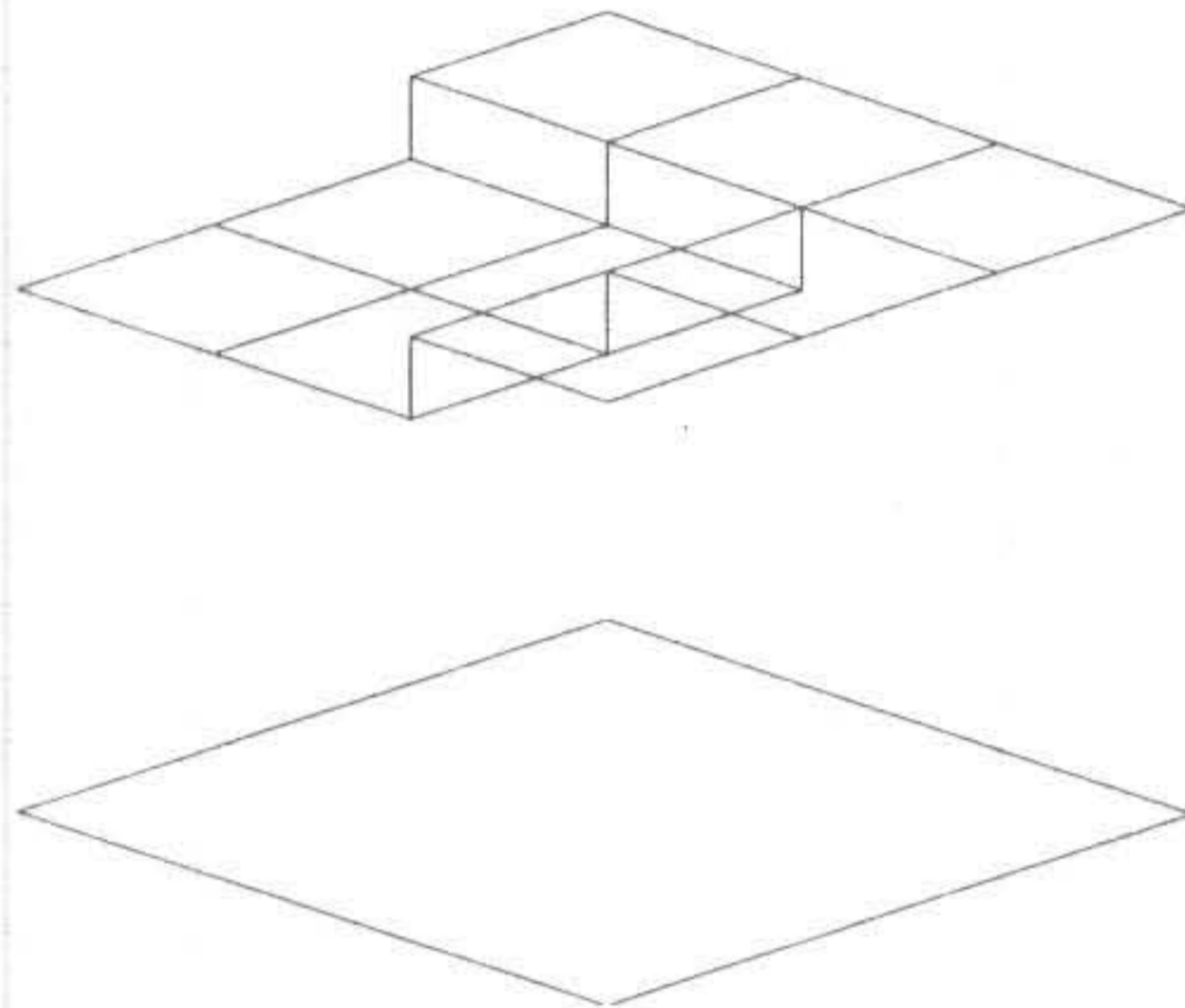
급수전개식의 수렴범위를 Fig.2, 3에서 나타내었다. 수렴하지 않는 범위에 대해서는 각각 수치적분에 의해 해를 구할 수 있다.

### 4. 수치해석에

수치해석예의 대상인 형상은 장방형의 Barge로써 해석시의 가상경계면은 기존의 원통형경계를 사용한 예와 본 논문에서 제시한 임의의 가상기둥면경계를 사용한 예로 한다. 요소분할은 모두 2축대칭이므로 1/4요소로 분할하며 영향계수행렬  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ 의 계산에서 요소상의 면



(a) Cylinder boundary



(b) Rectangular boundary

Fig.4 Boundary element idealisations of the rectangular barge

적분에는 가우스의 16점공식을,  $a_{ijm}^{(h)}$ ,  $b_{ijm}^{(h)}$ 의 표시식에 포함된 선적분의 계산시에는 가우스의 4점공식을 이용했다.

Fig. 4는 폭:길이:몰수깊이의 비가 1:1:0.45인 장방향Barge에 대해 1/4요소분할도를 나타낸다. (a)는 가상원통면을 사용한 Hybrid형적분방정식법이고, (b)는 임의의 가상기둥면을 사용한 Hybrid형적분방정식법이다.

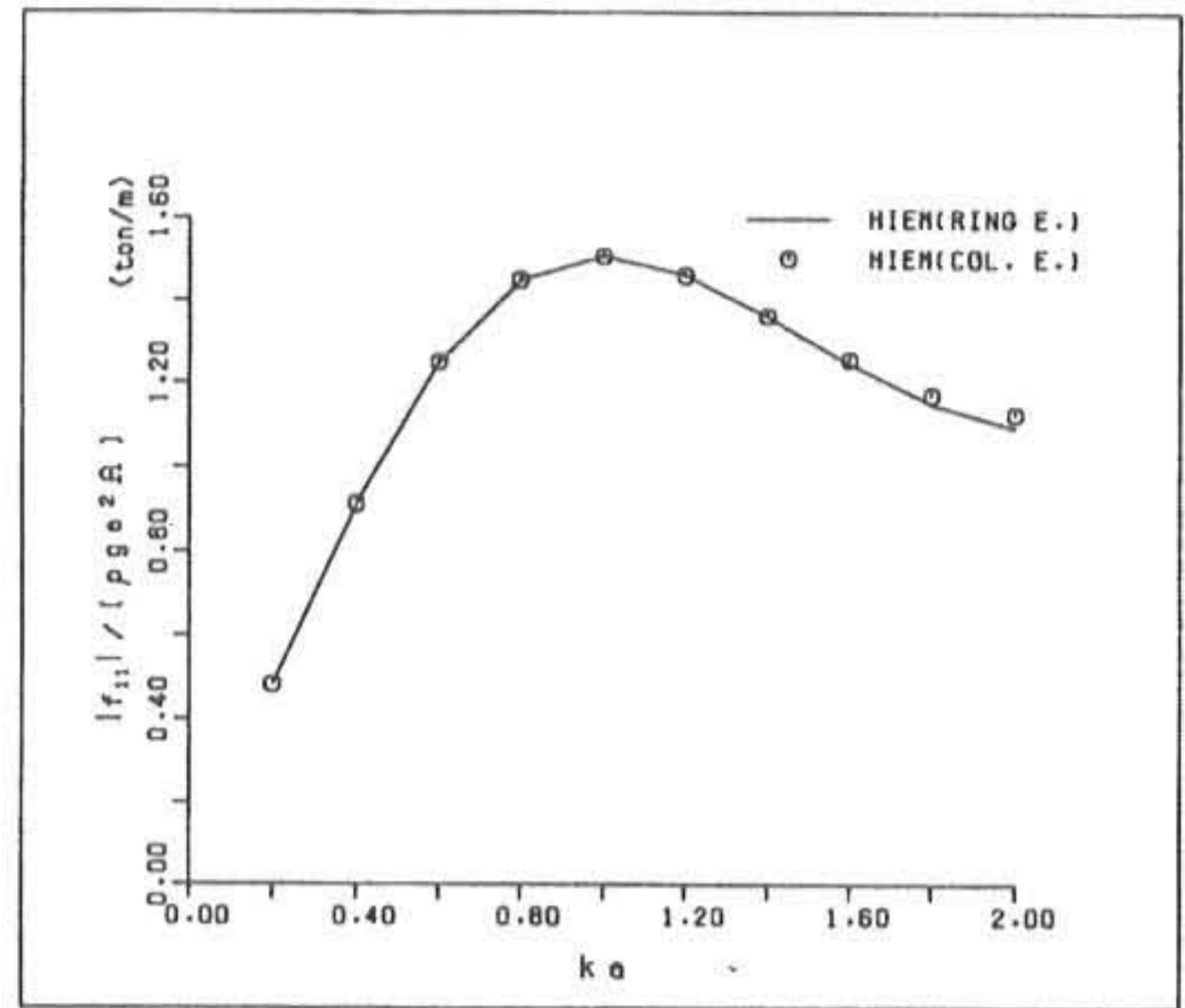


Fig.5 Surge wave exciting force

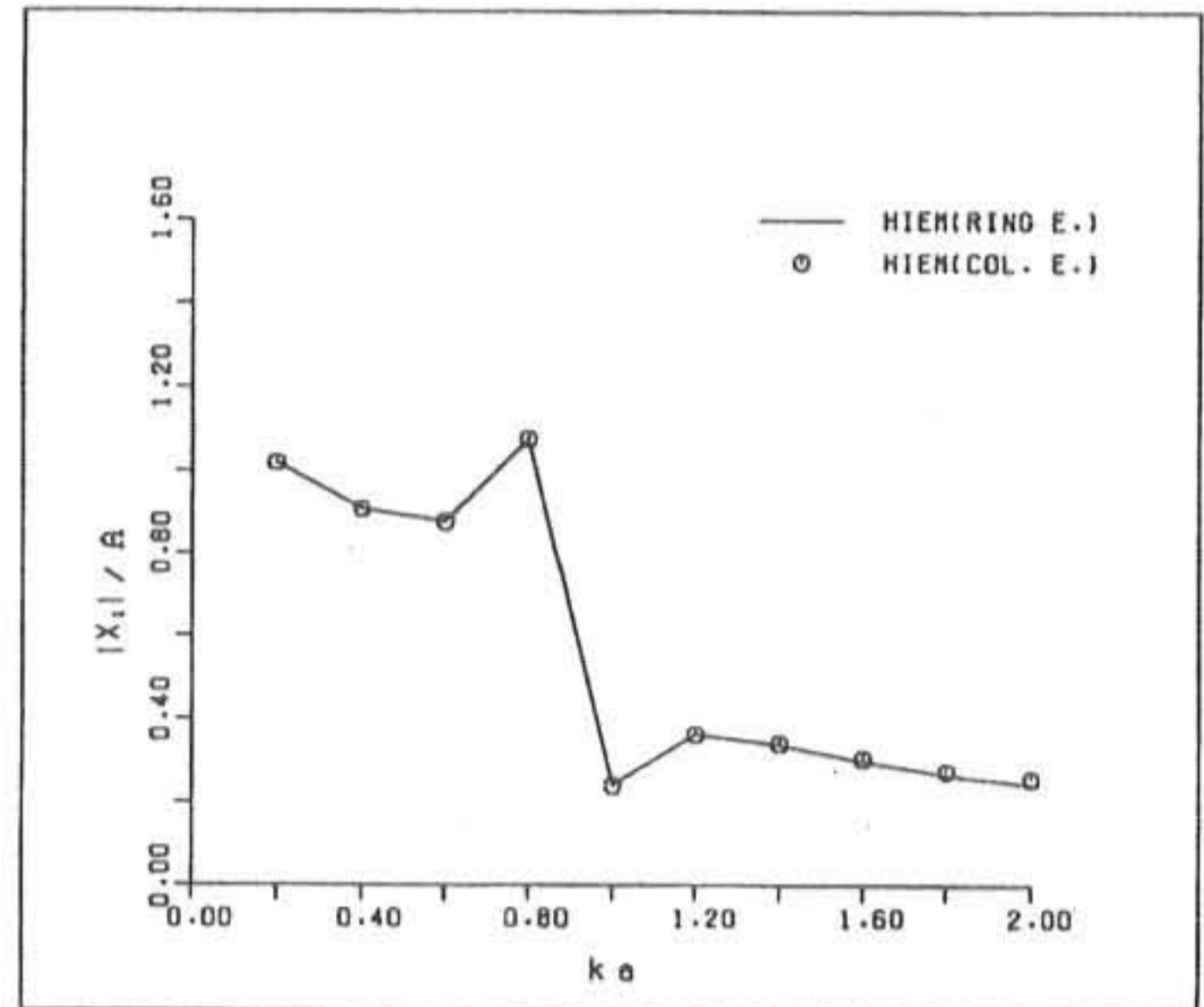


Fig.6 Heave wave exciting force

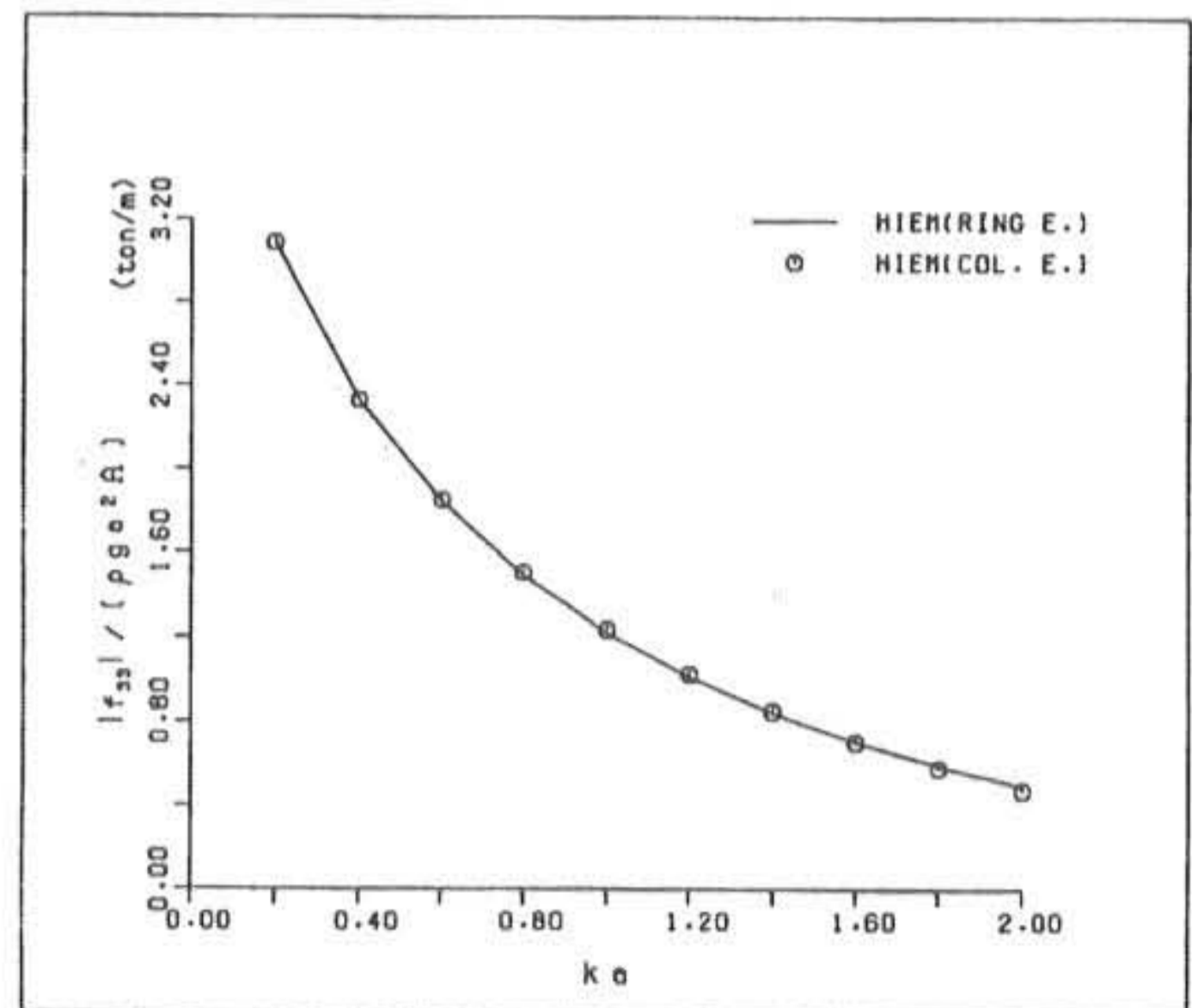


Fig.7 Pitch wave exciting force



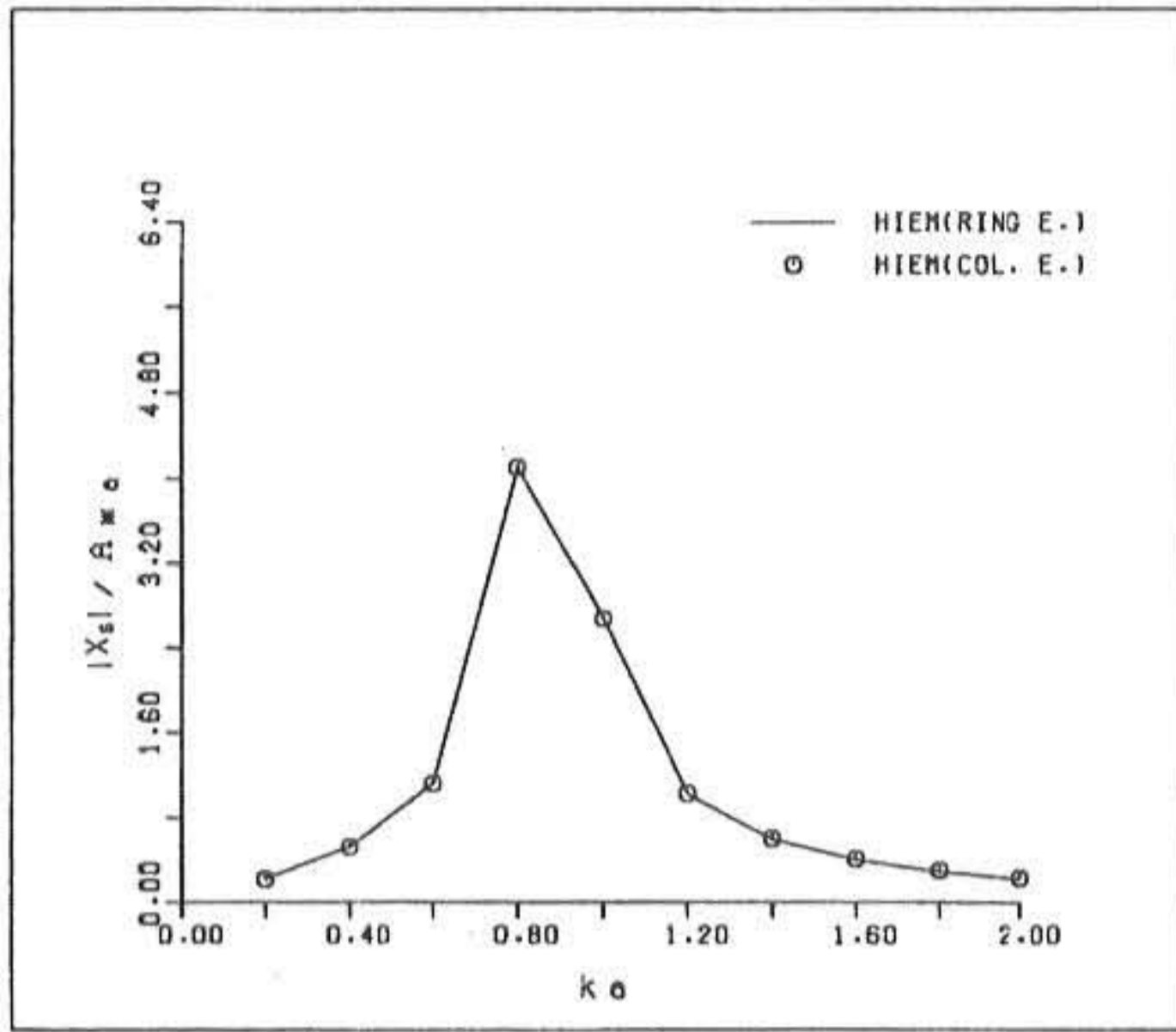


Fig.8. Surge response of motion

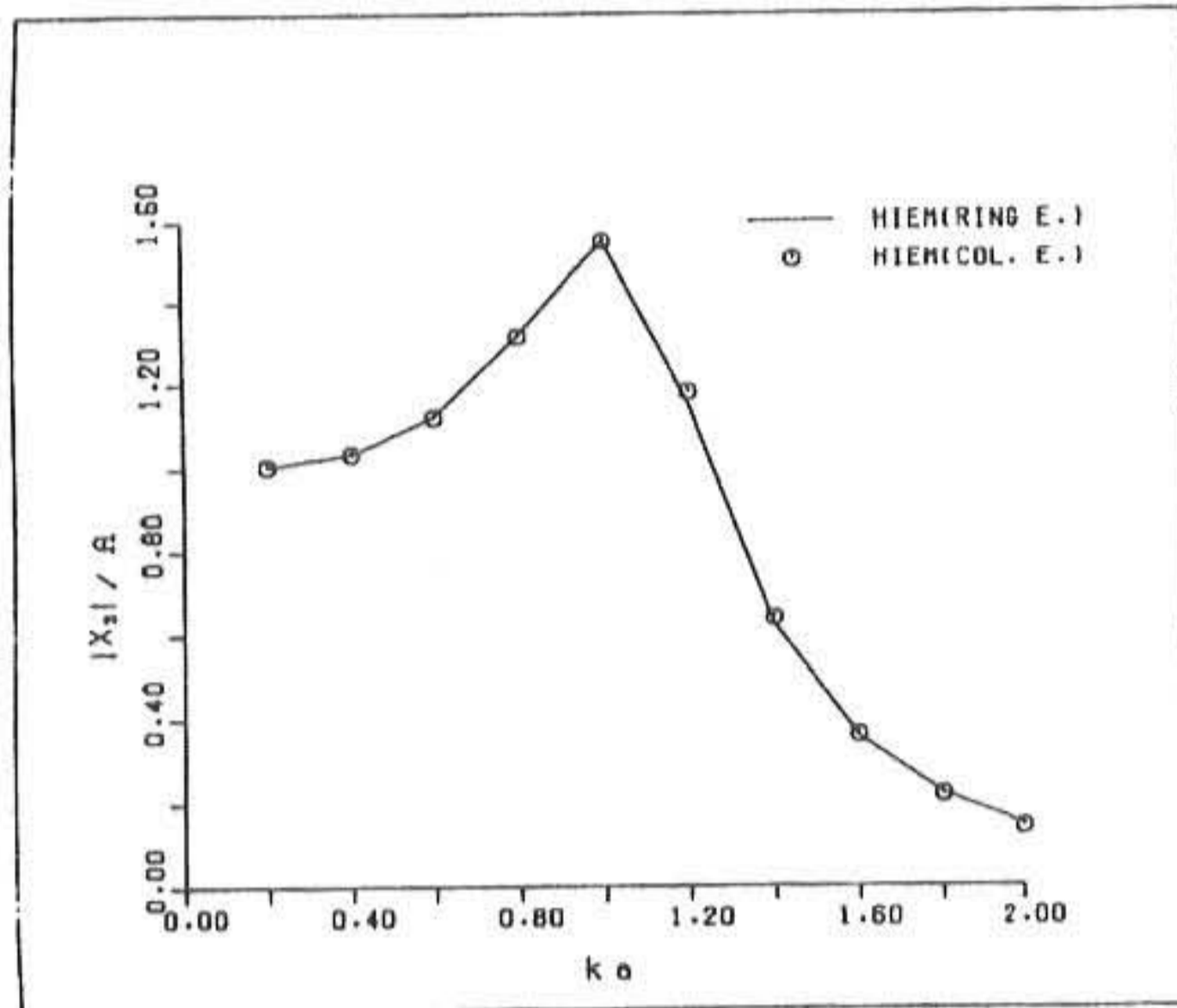


Fig.9 Heave response of motion

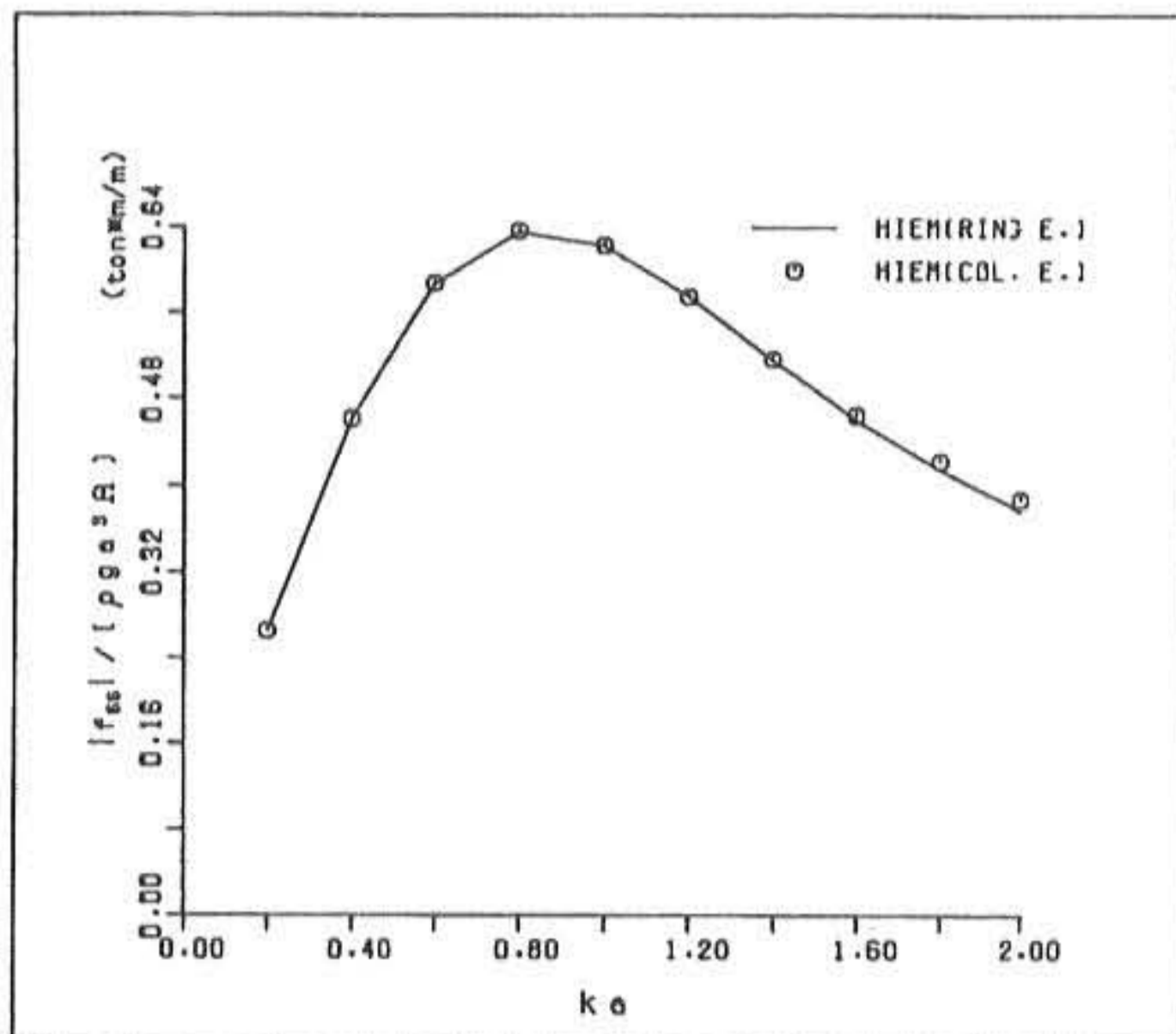


Fig.10 Pitch response of motion

Fig.5-10는 Surge, Heave, Pitch에 대한 파랑 유체력 및 운동진폭의 결과를 나타낸다. 그림중에서 실선은 가상원통면을 사용한 해석결과이고, 점은 임의의 가상기둥면을 사용한 해석결과이며, 계산치의 일치도는 매우 양호한 편이다. 해석은 나고야대학 대형계산기센터의 FACOM(후지쓰)을 사용하였으며, 계산에 소요된 cpu사용시간은 가상원통면이 16초인데 비해, 임의의 가상기둥면이 2분21초로 비교적 큰 차이를 보였다.

### 5. 결론

파랑중의 3차원임의형부체의 정상동요를 임의의 가상기둥면을 사용한 Hybrid적분방정식법에 의해 계산하는 방법을 정식화하고, 수치계산에 의해 타당성을 검증하였다. 해석결과, 본 연구에서 제안하는 방법이 비록 짧은 시간이지만, 해석시간이 긴 단점을 나타내었으나, 요소분할의 측면에서 원통좌표를 사용한 기존의 분할방법보다 좌표의 입력이 간편하고, 불필요한 자유표면의 요소수를 줄일 수 있으므로 매우 효율적이다. 또한, 기존의 해석결과와도 잘 일치함을 알 수 있었다. 향후 본해석법에서 나타난 단점은 해석수법을 달리함으로써 개선될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- 1) Oortmerssen, G, Van; The motions of a moored ship in waves, N.S.M.B Publication No.510, 1976.
- 2) 清川哲志, 平山彰彦; 岸壁前面の浮体動搖解析における3次元性の影響, 第33回海講論文集, pp.546-550, 1986.
- 3) 永田修一, 中川有紀, 卷幡敏秋; 3次元領域分割法による浮体運動の計算, 海岸工學論文集, 第37卷, 1990.
- 4) 松井徹哉, 加藤賢治; ハイブリッド型積分方程式法による浮体の定常動搖問題の數値解析, 日本建築學會構造系論文報告集, 第393号, 1988.

(1999년 5월12일 접수, 1999년 10월10일 채택)