
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷 第 2 號 1996年 5月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 33, No. 2, May 1996

단순화 모델에 의한 2차원 갑판침입수의 수치 시뮬레이션

김용직*, 김인철*

Numerical Simulation of Two-Dimensional Shipping Water by Using a Simplified Model

by

Yong J. Kim* and In C. Kim*

요 약

본 논문에서는 갑판침입수의 유동특성을 단순화된 2차원 모델을 이용하여 고찰하였다. 기본방정식으로 천수와 모델에 기초한 보존형의 비선형 쌍곡선방정식이 도출되었고, 이를 계산하기 위한 시간영역 수치해법으로 predictor-corrector법과 2종 상류차분법을 채용한 유한차분법을 개발·적용하였다. 보아를 수반하는 몇가지 단순한 경우들에 대한 계산결과를 해석해와 비교하였으며, 본 수치해법이 갑판침입수의 유동해석에 유용한 방법임을 보였다.

갑판침입수의 유동 시뮬레이션 예들에서, 갑판침입수는 확산파의 형태로 갑판상에 유입되며 갑판상의 구조물에 부딪힌 후 보아형태로 발달해 감이 보여지고 있다. 또한, 침입수 유동에 영향을 줄 수 있는 중요요소로서 갑판의 기울기, 상방향 가속도등이 다루어 졌고, 이들이 갑판 침입수의 유동에 상당한 영향을 미침을 확인하였다.

Abstract

Hydrodynamic characteristics of shipping water on deck are investigated by using a simplified two-dimensional model. Formulation of the shipping water on deck leads to a nonlinear hyperbolic system of equations based on the shallow-water wave theory. Time-domain solution of these equations are obtained numerically using a finite difference method which adopts predictor-corrector method for time-marching and 2nd upwind differencing method for convection term calculation.

To confirm the validity of the present numerical method, we calculated some shallow-water wave problems accompanying a bore and compared the obtained results with the analytic

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 10.)

접수일자 : 1995년 11월 7일, 재접수일자 : 1996년 4월 23일

* 정회원, 부산수산대학교 공과대학 선박공학과

solutions. We found good agreements between them.

Through the calculation results of shipping water on deck, we show that the shipping water flows into the deck as a rarefying wave and grows into a bore after colliding with a deck structure. Also we examined the effects of acceleration and slope of deck and found that they have significant influences on the flow of shipping water.

1. 서 언

거친 해상에서의 과도한 선체운동은 슬래밍현상 뿐아니라 필연적으로 선수갑판의 침수현상을 수반하게 된다. 이때 선수갑판에 유입된 침입수는 높은 속도로 갑판상 구조물에 부딪혀 충격으로 인한 손상을 일으킬 수도 있고, 선박의 운동응답에도 상당한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 갑판침수현상을 적절한 방법으로 해석하고 그 영향을 밝히는 것은 선박의 과도운동을 다루는데 있어 또 하나의 중요한 과제라고 할 수 있다.

갑판침수에 대한 그간의 연구들은 유동현상의 근본적인 해석보다는 대개 그 발생여부및 확률, 발생시 초기 수면높이등에 관한 연구들이며, Ochi [1], Takezawa et al.[2], O'Dea et al.[3], Lloyd et al.[4], Takagi et al.[5], 홍등[6], 배등[7]의 연구가 있다. 침입수의 유동해석을 다룬 연구로는 Dillingham[8]의 연구와 Mizoguchi[9]의 연구가 있는데, Dillingham은 선수갑판 침수가 아니라 보다 완전한 횡운동에 의한 선측갑판 침수문제를 다루었고, Mizoguchi는 선수갑판 침수문제를 특성곡선법(method of characteristics)으로 다루었으나 유입과정만을 계산하여 보아(bore)등이 발생할 수 있는 갑판침수 전과정을 다루지는 못하였다.

본 논문에서는 선수갑판 침수문제를 단순화된 2차원 모델로 설정하고 이를 수치계산하여 침입수의 유동에 영향을 미치는 여러 요소들의 영향을 고찰하였다. 갑판침입수는 구조물에 부딪히면 반사되어 보아 - 수력도약(hydraulic jump)과 역학적인 특성은 동일하며 일반적으로 수력도약은 발생위치가 이동하지 않을 때를 지칭하므로 여기에서는 보아라고 부르기로 함 - 를 형성할 뿐아니라, 빈 갑판(dry deck)상태로부터 매우 높은 수심상태까지 그 수심이 매우 급격하고 폭넓게 변화한

다. 본 연구에서는 이를 다루기 위한 기본 방정식으로 보존형의 천수파(shallow-water wave)모델을 도출하였다. 이의 수치 시뮬레이션에는 특성곡선법(method of characteristics), 유한차분법(finite difference method)등이 사용될 수 있는데, 특성곡선법은 보아 발생시와 미 발생시의 계산법을 달리 해야 하는 등 단점이 있으므로, 본 연구에서는 유한차분법에 기초한 수치해법을 개발하였다. 유한차분법으로는 공기역학분야의 충격파(shock wave)를 다루기 위한 여러 유한차분법을 참고하여 본 연구에서는 predictor-corrector법과 2중 상류차분법(2nd upwind differencing method)을 채용한 수치해법을 개발·적용하였다. 해석해(analytic solution)가 존재하는 몇가지 단순한 경우들에 대해 해석해와의 비교가 이루어 졌으며, 본 수치해법이 갑판침입수의 유동해석에 적절한 수단임을 보였다. 양단의 경계조건으로 고체벽경계조건, 개방경계조건등이 사용되었고, 또한 낙하경계조건을 도출하여 그 영향을 검토하였다. 침입수 유동에 영향을 줄 수 있는 중요요소로서 갑판의 기울기, 상방향 가속도등이 다루어 졌고, 이들이 갑판 침입수의 유동에 상당한 영향을 미침을 확인하였다.

2. 해석방법

2.1 기본방정식

우선 선수갑판이 정지상태에 있고 기울어 지지 않은 상태에 대하여, 갑판위 수심이 파장에 비해 매우 작다고 가정하면 잘 알려진 천수파 이론을 적용할 수 있다. 질량보존법칙과 운동량보존법칙, 자유표면 경계조건, 바닥 경계조건으로부터 유도되는 천수파 방정식은 다음과 같다[10].

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

여기에서 x 와 t 는 각각 수평방향 좌표와 시간을 나타내며, g 는 중력 가속도이다. h 는 각 위치에서의 갑판위 수심을 나타내며, u 는 x 방향의 유속이다. 식(1)은 엄밀한 질량보존법칙을 나타내고 식(2)는 천수파중의 압력이 유체정압력(hydrostatic pressure)으로 근사될 수 있다는 가정하에 얻어진 수평방향 운동량 보존법칙을 나타낸다. 이 모델에서 u 는 수심 h 에 걸쳐 균일하다. 위 방정식들은 비선형 쌍곡선방정식(nonlinear hyperbolic equation)이라 할 수 있으며, 보아와 같은 불연속적인 해를 갖을 수 있다.

식(2)를 갑판이 미소각 α_{dk} 만큼 경사되어 있고, 상방향으로 가속도 a_v , 수평방향으로 가속도 a_h 를 갖는 경우에 대해 확장하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -(g+a_v) \frac{\partial h}{\partial x} + (g+a_v)\alpha_{dk} + a_h \quad (3)$$

식(1)과 식(3)을 이용하여 수치계산을 하면, 식(3)이 보존형(conservative form)이 아니기 때문에 이에 따른 오차가 발생하고, 이 오차가 누적되면 수치계산을 불안정하게 만들기도 한다. 식(1)에 u 를 곱하고 식(3)에 h 를 곱하여 양변을 각각 더하면 다음과 같은 보존형방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot uh)}{\partial x} = -\frac{1}{2} (g+a_v) \frac{\partial h^2}{\partial x} + h(g+a_v)\alpha_{dk} + h a_h \quad (4)$$

본 논문의 수치계산은 식(1)과 식(4)의 보존형 방정식을 이용하였다. 초기조건과 적절한 경계조건이 주어지면 위 식들로부터 시간에 따른 해를 순차적으로 구해 나갈 수 있다.

2.2 수치해법

수치계산을 위한 유한차분법으로 공기역학분야의 충격파 계산에 사용되어지는 몇가지 방법들이 검토되었고, 이로부터 갑판침입수의 유동계산에 적합한 다음의 predictor-corrector 법과 2종 상류차분법을 채용한 수치해법이 개발되었다. Predictor 단계에서의 값들은 다음과 같이 계산된다.

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \Delta t \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_i^n \quad (5)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_i^n &= \left[-\frac{\partial(uh)}{\partial x} \right]_i^n \\ &= -\frac{1}{2\Delta x} \left[(u_f^n - |u_f^n|) h_{i-1}^n + (u_f^n + |u_f^n| - u_b^n + |u_b^n|) h_i^n - (u_b^n + |u_b^n|) h_{i-1}^n \right] \end{aligned} \quad (5-a)$$

$$u_f^n = \frac{1}{2} (u_i^n + u_{i+1}^n) \quad (5-b)$$

$$u_b^n = \frac{1}{2} (u_{i-1}^n + u_i^n) \quad (5-c)$$

$$(uh)_i^{n+1} = (uh)_i^n + \Delta t \left[\frac{\partial(uh)}{\partial t} \right]_i^n \quad (6)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial(uh)}{\partial t} \right]_i^n &= \left[-\frac{\partial(u \cdot uh)}{\partial x} \right]_i^n \\ &\quad - \frac{1}{2} (g+a_v)_i^n \left[\frac{\partial h^2}{\partial x} \right]_i^n \\ &\quad + h_i^n (g+a_v)_i^n (\alpha_{dk})_i^n + h_i^n (a_h)_i^n \end{aligned} \quad (6-a)$$

$$\left[-\frac{\partial(u \cdot uh)}{\partial x} \right]_i^n = -\frac{1}{2\Delta x} \cdot \\ \left[(u_j^n - |u_j^n|)(uh)_{i+1}^n + (u_j^n + |u_j^n| - u_b^n + |u_b^n|)(uh)_i^n - (u_b^n + |u_b^n|)(uh)_{i-1}^n \right] \quad (6-b)$$

$$\left[\frac{\partial h^2}{\partial x} \right]_i^n = \frac{1}{2\Delta x} \left[(h_{i+1}^n)^2 - (h_{i-1}^n)^2 \right] \quad (6-c)$$

윗 식들에서, 아래첨자 i 는 i 번째 절점을 나타내며, 윗첨자 n 은 n 번째 시간스텝을 나타낸다. 시간스텝의 $\overline{\quad}$ 는 predictor 단계의 값을 뜻한다. Δx 는 절점간 거리이고, Δt 는 시간증분이다. Corrector 단계의 값은 반복계산없이 다음과 같이 계산된다.

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_i^n + \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_i^{\overline{n+1}} \right\} \quad (7)$$

$$(uh)_i^{n+1} = (uh)_i^n + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\frac{\partial(uh)}{\partial t} \right]_i^n + \left[\frac{\partial(uh)}{\partial t} \right]_i^{\overline{n+1}} \right\} \quad (8)$$

여기에서 우변 괄호안의 마지막 항들은 각각 $n+1$ 스텝에서 predictor 값에 의한 변화율을 뜻한다. 본 수치해법의 국부절단오차(local truncation error)는 $O(\Delta x, \Delta t^2)$ 이지만 식(5-a)와 식(6-b)에서와 같이 2중 상류차분법을 쓰고 있으므로, 변수 h 와 (uh) 의 변화가 크지 않으면, $O(\Delta x^2, \Delta t^2)$ 의 오차를 기대할 수 있다. 식(6-c)의 차분은 오차가 $O(\Delta x^2)$ 인 중앙차분법을 쓰고 있으며, 이 항의 계산에 상류차분법을 쓰지 않는

것은 파가 상류방향으로도 전파되게 하기 위함이다[11].

경계조건으로는 상황에 따라 몇가지 조건들이 사용되었다. 편의상 갑판경계를 $i=0$ 인 절점으로 나타내고, $i \geq 1$ 인 절점들이 유체영역안에 있는 것으로 하며, 시간스텝을 나타내는 윗첨자는 생략한다. 경계에서의 h 와 u 가 주어지는 경우는 이 값들을 사용하였고, 고체벽경계조건(rigid wall condition)은 가상의 $i=-1$ 인 절점을 유체영역 밖에 도입하여 다음과 같이 적용하였다.

$$h_{-1} = h_1 \quad (9)$$

$$(uh)_{-1} = -(uh)_1 \quad (10)$$

경계에서 파를 자연스럽게 통과시키고자 하는 개방경계조건(open boundary condition)은 다음과 같이 주었다.

$$h_0 = 2h_1 - h_2 \quad (11)$$

$$(uh)_0 = 2(uh)_1 - (uh)_2 \quad (12)$$

이는 내부의 해를 선형외삽(linear extrapolation)한 것에 해당된다.

침입수가 갑판밖으로 배수될 때의 경계조건은 위 개방경계조건과 다를 수 있으므로 다음과 같이 낙하경계조건(drop boundary condition)을 도출하여 적용하였다. 경계로부터 상류쪽 좌표 x_{up} 인 곳에서의 갑판위 수심을 h_{up} , 유속을 u_{up} 이라 하고 이 곳에서는 정수압이 작용한다고 가정한다. 유속을 구하기 위해 단순한 정상유동으로 가정하고, 경계 바로 밖의 점 x_0^- 에서 대기압이 작용한다고 가정하면, x_0^- 에서의 유속 u_0^- 는 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같다.

$$u_0^-(\eta) = \sqrt{2(g+a_r)\eta + u_{up}^2} \quad (13)$$

여기에서, η 는 x_{up} 에서의 수면높이 h_{up} 으로부터 아래방향으로 켄 유출수 내부 각점까지의 수직 거리이다.

유출수의 두께가 h_{up} 보다 다음과 같이 Δh 만큼 낮아 졌다고 할 때,

$$\begin{aligned} \Delta h &= h_{up} - h_0^- \approx h_{up} - h_0 \\ &= h_{up} - (2h_1 - h_2) \end{aligned} \tag{14}$$

점 x_0^- 에서의 유출유량 Q 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= \int_{\Delta h}^{h_{up}} u_0^-(\eta) d\eta \tag{15} \\ &= \frac{2}{3} \sqrt{2(g+a_v)} \left[\left(h_{up} + \frac{u_{up}^2}{2(g+a_v)} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\Delta h + \frac{u_{up}^2}{2(g+a_v)} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \end{aligned}$$

따라서, 경계 x_0 에서의 수심 h_0 와 $(uh)_0$ 는 근사적으로 각각 다음과 같이 준다.

$$h_0 = 2h_1 - h_2 \tag{16}$$

$$(uh)_0 = Q \tag{17}$$

상류 기준점 x_{up} 은 유출수의 두께등을 고려하여 선택된다.

3. 계산에 및 고찰

3.1 해석해와의 비교

수치해법의 타당성을 확인하기 위하여 해석해가 존재하는 몇가지 단순한 경우들에 대해 수치계산을 수행하고 해석해[10]와 비교하였다. Fig.1에는 균일 속도로 전진하는 보아에 대한 결과가 보여지고 있다. 보아 앞의 수심은 0.5m 이고 유속은

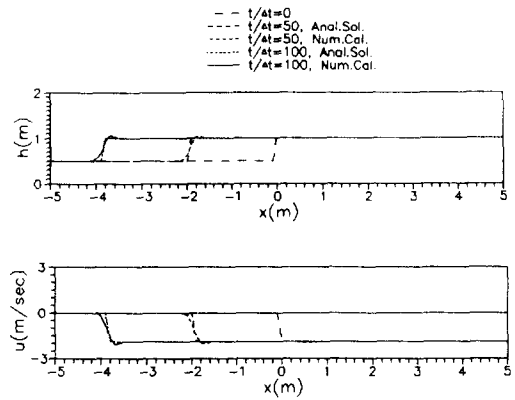


Fig.1 Comparison with analytic solution - translating bore ($\Delta x=0.1m, \Delta t=0.01sec$)

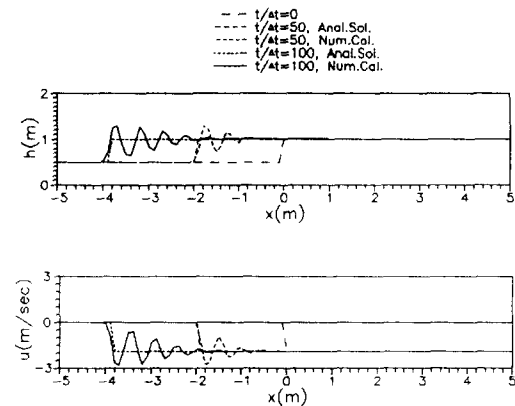


Fig.2 Comparison with analytic solution - translating bore ($\Delta x=0.1m, \Delta t=0.01sec, w/o\ corrector$)

0이다. 보아의 높이는 1.0m 이고, 이때 해석해에 의한 보아의 이동속도는 -3.83536m/sec 이며 보아 내의 유속은 -1.91768m/sec 이다. 본 수치해법에 의한 결과가 다소 불연속성을 완만하게 하는 경향이 있으나, 보아의 이동속도 및 유속변화를 잘 추정하고 있음을 볼 수 있다. 참고로 Fig.2에는 corrector 과정없이 Euler 방법으로 시간 적분이 이루어 졌을 때의 결과를 보이고 있다. 보아 선단에 큰 overshoot가 나타나고 후방에 수면의 진동 현상이 나타남을 볼 수 있다. 따라서 predictor-corrector 법을 도입함으로써 이와 같은 overshoot

현상이 억제되고 안정된 보아 형상이 얻어짐을 알 수 있다.

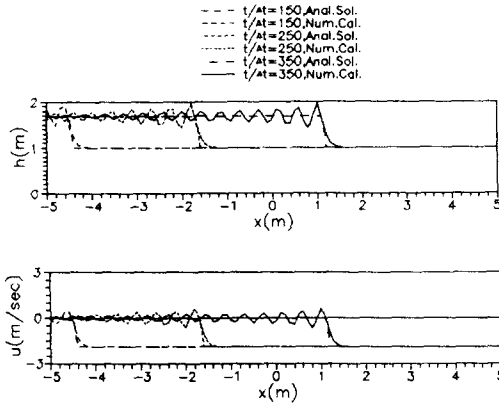


Fig.3 Comparison with analytic solution - reflected bore ($\Delta x = 0.1m$, $\Delta t = 0.01$ sec. w/o Lax method)

Fig.3에는 Fig.1의 보아가 좌측끝 $x=-5m$ 에 위치한 고체벽에 부딪혀서 반사되는 경우의 결과가 보여지고 있다. 이 계산에서 predictor-corrector 과정을 적용하였음에도 불구하고 overshoot 현상이 나타나고 있다. 이는 보아 선단과 고체벽 사이에 갇힌 유체의 유속이 매우 작고 상류차분법이 유속이 작은 유체정체부에서는 수치감쇠를 거의 갖지 못하기 때문인데, 참고로 1종 상류차분법(시간적분은 Euler 방법 사용시)의 수치감쇠계수 α_e 는 다음과 같다[11].

$$\alpha_e = \frac{1}{2} u \Delta x \left(1 - \frac{u \Delta t}{\Delta x} \right) \quad (18)$$

이 문제점을 해소하기 위해 벽에 부딪혀 반사된 후의 계산에는 다음과 같은 변형된 Lax법을 몇 스텝의 계산마다 삽입하였다.

$$h_i^{n+1} = \frac{1}{2} (h_{i-1}^n + h_{i+1}^n) + \Delta t \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_i^n \quad (19)$$

$$(uh)_i^{n+1} = \frac{1}{2} [(uh)_{i-1}^n + (uh)_{i+1}^n] + \Delta t \left[\frac{\partial (uh)}{\partial t} \right]_i^n \quad (20)$$

$$h_i^{n+1} = \frac{1}{2} (h_{i-1}^n + h_{i+1}^n) + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_i^n + \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_i^{n+1} \right\} \quad (21)$$

$$(uh)_i^{n+1} = \frac{1}{2} [(uh)_{i-1}^n + (uh)_{i+1}^n] + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\frac{\partial (uh)}{\partial t} \right]_i^n + \left[\frac{\partial (uh)}{\partial t} \right]_i^{n+1} \right\} \quad (22)$$

이 변형된 Lax법은 유속이 작은 구간에서도 수치감쇠를 가지므로 overshoot 등의 문제점을 해소할 수 있는데, 참고로 중앙차분법과 Euler적분법을 사용할 때의 Lax법은 다음과 같은 수치감쇠계수를 갖는다[11].

$$\alpha_e = \frac{\Delta x^2}{2 \Delta t} \left[1 - \left(\frac{u \Delta t}{\Delta x} \right)^2 \right] \quad (23)$$

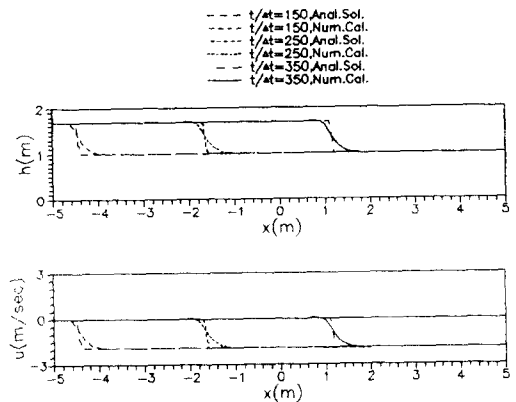


Fig.4 Comparison with analytic solution - reflected bore ($\Delta x = 0.1m$, $\Delta t = 0.01sec$)

Fig.4에는 매 5스텝마다 Lax법을 적용했을 때의 계산 결과가 보여지고 있다. 해석해에서 반사된 보아의 높이는 1.68614m 이고, 보아 선단의 전진 속도는 2.79488m/sec 이며, 보아 선단과 고체벽 사이에서의 유속은 0이다. Lax법을 도입함으로써 보아 선단에서의 불연속성이 좀더 완만해 지는 경향이 보이지만, 보아의 전진속도와 유속등이 만족스럽게 계산된다고 할 수 있다. 이후의 다른 계산 예들에서도 벽에 반사된 후의 계산에는 위 변형 Lax법을 간간히 삽입하였다.

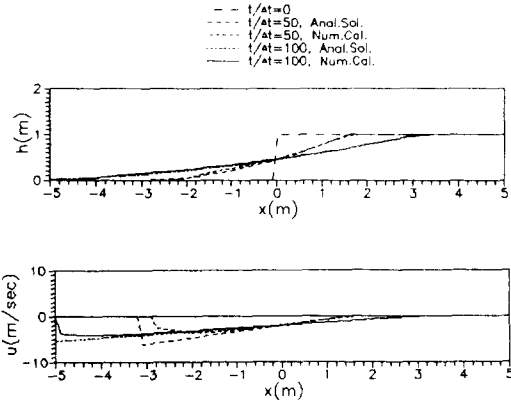


Fig.5 Comparison with analytic solution - rarefying wave ($\Delta x = 0.1m, \Delta t = 0.01sec$)

Fig.5에는 단순 댐 붕괴문제의 계산예가 보여지고 있다. 수면변형이 해석해와 대체로 잘 일치함을 볼 수 있고 수류두께(수심)가 매우 얇은 선단 부근에서 유속이 해석해보다 작게 계산됨을 볼 수 있는데, 이는 이 부분의 유체두께가 매우 얇음(해석해에서는 수면이 바닥에 접하는 포물선임)에 기인한다고 할 수 있다. Fig.6에는 댐 붕괴후 확산된 파가 $x=-5m$ 에 위치한 벽에 부딪혀 반사된 후의 계산결과가 보여지고 있다. 이 경우에는 해석해가 존재하지 않는다. 벽에 부딪힌 수류가 점진적으로 보아의 형태로 발달해 가는 것을 알 수 있다. 이 계산에서 우측 경계에는 식(11)과 식(12)의 개방경계조건을 적용하였으며, 파의 반사없이 완만한 계산이 이루어짐을 볼 수 있다.

Fig.7에는 댐붕괴전에 댐 앞쪽에 유체가 있는

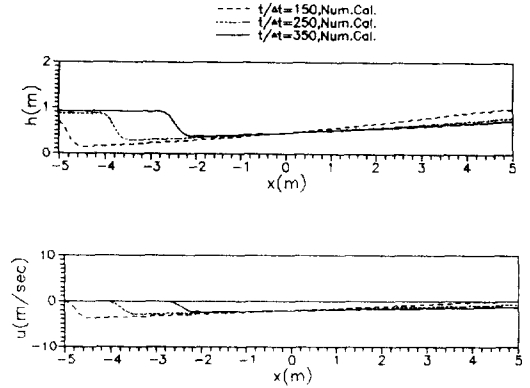


Fig.6 Reflection of rarefying wave ($\Delta x = 0.1m, \Delta t = 0.01sec$)

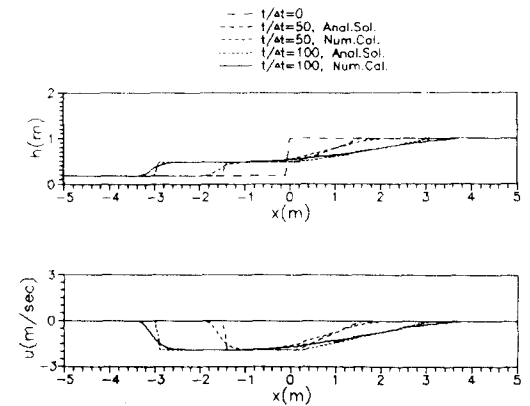


Fig.7 Comparison with analytic solution - translating bore and rarefying wave ($\Delta x = 0.1m, \Delta t = 0.01sec$)

경우의 계산결과가 보여지고 있다. 이 경우 댐에서 방출된 유체의 선단에는 보아가 형성되며 후단에는 확산파(rarefying wave)가 형성된다. 댐 앞쪽의 수심은 0.176m 로 주었으며, 이때 해석해에 의한 보아의 높이는 0.48474m 이고 유속은 -1.90255m /sec 이며, 보아 선단의 전진속도는 -2.98714m/sec 이다. 수치계산된 보아의 움직임과 후방의 확산파가 해석해와 잘 일치함을 확인할 수 있다. Fig.8에는 Fig.7에서의 보아가 벽에 부딪혀 반사된 후의 결과가 보여지고 있다. 해석해에서 반사된 보아의 높이는 0.97350m 이며, 보아 선단

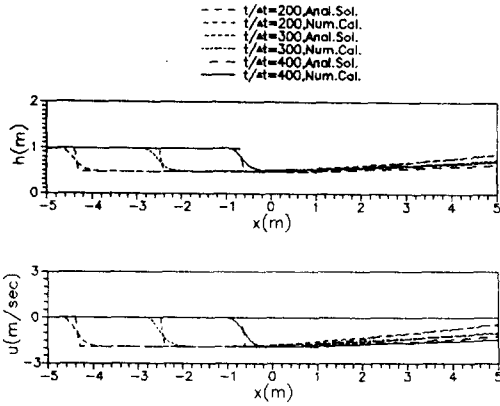


Fig. 8 Comparison with analytic solution - reflected bore and rarefying wave ($\Delta x = 0.1m, \Delta t = 0.01sec$)

의 전진속도는 $1.88688m/sec$ 이고, 유속은 0이다. 우측의 경계에는 개방경계조건을 적용하였으며, 수치계산 결과가 해석해와 잘 일치함을 볼 수 있다.

모든 계산에서 수치 안정성 조건은 다음의 Courant 조건을 적용하였고,

$$(|u| + \sqrt{gh})\Delta t < \Delta x \quad (24)$$

실제 수치계산에서 대체로 이 조건에 의해 안정성이 얻어짐을 확인하였다. 또한 질량보존에 대한 검사가 행해졌고, 위 계산예들에서 오차는 최대 0.1% 미만이었다.

3.2 단순화된 갑판침수 시뮬레이션

갑판침수시 선수에서의 수면은 매우 짧은 순간에 최대 높이까지 상승하며 이후에는 완만한 하강을 보인다고 할 수 있다[9]. 또한 유입 유속에는 선속, 입사파에 의한 유속, 선수외판의 기울기와 수직 상대속도에 의한 유속등이 관계되지만 이중 가장 큰 성분은 선속이며 후자의 두 성분들은 대체로 서로 상쇄하는 관계에 있다. 따라서 여기에서는 선수에서의 유입속도 u_{in} 을 외부수면이 갑판보다 높을 때(계산에서 $t \leq 2sec$)는 선속 u_s

로 가정하여 다음과 같이 일정속도로 주었고,

$$u_{in} = \begin{cases} u_s & , 0sec \leq t \leq 2sec \\ 0 & , 2sec < t \end{cases} \quad (25)$$

유입과정에서의 선수 수면높이 h_{in} 은 다음과 같이 단순화하여 주었다.

$$h_{in} = \begin{cases} h_{amp} * \cos\left(\frac{\pi}{4} * t\right) & , 0sec \leq t \leq 2sec \\ 0 & , 2sec < t \end{cases} \quad (26)$$

이때 수치계산에서의 단위시간당 유입유량은 식 (5-b)에 의해 $\frac{1}{2}(u_{N-1} + u_N) * h_N$ 으로 계산(아래첨자 N 은 끝 절점번호임)되므로 식(25)와 식(26)에 의한 유입유량 $u_{in} * h_{in}$ 과는 다르게 된다. 이러한 유입유량에서의 오차를 방지하기 위해 식 (5-b)에 의해 u_N^n 을 계산할 때 끝점에서의 유속 u_N 은 다음식으로 주었다.

$$u_N = 2u_{in} - u_{N-1} \quad (27)$$

물론, h_N 은 h_{in} 으로 $(uh)_N$ 은 $u_{in} * h_{in}$ 으로 준다.

Fig.9에는 $h_{amp} = 2m, u_s = -5m/sec$ 일때 초기 유입과정의 계산결과가 보여지고 있다. 우측 경계에서 유체가 유입되고 있으며, 좌측 경계에는 고체벽경계조건을 적용하였다. Fig.10에는 같은 조건에서 벽에 부딪혀 반사된 후의 계산결과가 보여지고 있다. 침입수가 벽에 부딪힌 후 높은 보아 형태로 발전하여 다시 우측 경계로 진행해 감을 볼 수 있다. 이 과정에서 유체유입이 중단된 후 ($t/\Delta t > 200$) 우측 일부 구간 ($x = 4 \sim 5m$)에서 거의 빈 갑판상태도 나타나고 있다. 보아가 우측 경계에 이르러 배수가 시작된 후(수치계산에서

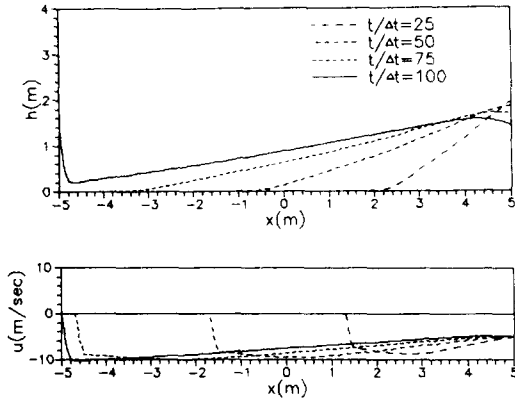


Fig.9 Simulation of shipping water - inflow ($\alpha_{dk}=0^\circ$, $a_v=0$, $a_h=0$, $h_{amp}=2m$, $u_s=-5m/sec$, $\Delta x=0.1m$, $\Delta t=0.01sec$)

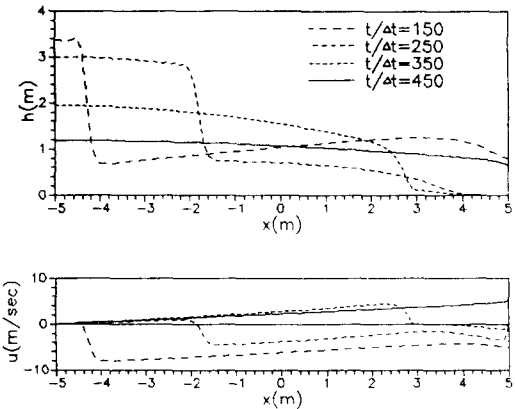


Fig.10 Simulation of shipping water - reflected flow (the same as in Fig.9)

$u_{N-1} > 0$ 일 때)에는 식(16)와 식(17)의 낙하경계 조건을 적용하였다. Fig.11에는 낙하경계조건 적용시 기준점 x_{up} 의 위치에 따른 $t/\Delta t = 500$ 에서의 계산결과들이 보여지고 있다. 개방경계조건 대신 낙하경계조건을 적용함으로써 경계부근의 수면높이는 낮아지고 유속은 빨라짐을 볼 수 있고, x_{up} 이 작을수록 이러한 경향은 커짐을 볼 수 있다. 그러나 이는 경계부근의 매우 작은 구간에서만 그 영향이 나타나므로 전체 유량의 관점에서는

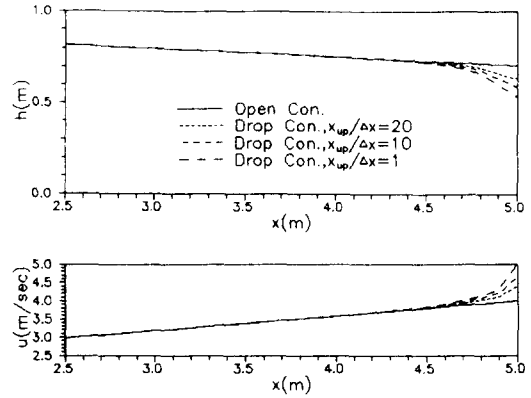


Fig.11 Effect of drop boundary condition ($t/\Delta t = 500$, the same as in Fig.9)

그 영향이 크지 않다고 할 수 있다. 따라서, 수심에 비해 갑판이 매우 좁고 배수 유속이 매우 느린 경우외에는 갑판끝에서의 유체 낙하의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

Fig.12와 Fig.13에는 앞의 경우보다 완화된 갑판침입수의 예로서 $h_{amp} = 1m$ 일때의 결과가 보여지고 있다. $h_{amp} = 2m$ 인 경우와 비교하여 전체적으로 유입과정과 배수과정이 모두 느리며, 보아의 높이도 낮음을 볼 수 있다. 갑판경사의 영향을 밝히기 위해 갑판경사가 -10° 와 10° 인 경우에 대한 계산도 수행되었다. Fig.14와 Fig.15에는 갑판 경사각 $\alpha_{dk} = -10^\circ$ (후방으로 10° 경사)인 경우의 계산결과들이 보여지고 있다. h_{amp} 는 $2m$ 로 주었다. 갑판이 선미쪽으로 경사되었으므로 전체적으로 유입속도가 빠르고 보아의 높이도 높으며, 배수과정은 비교적 느리다고 할 수 있다. Fig.16과 Fig.17에는 반대로 $\alpha_{dk} = 10^\circ$ 인 경우의 계산결과가 보여지고 있다. 상대적으로 유입과정이 느리고 완만하며, 배수과정은 빠름을 볼 수 있다. 이러한 갑판경사가 주는 두드러진 차이는 갑판침입수의 유동에서 선박의 종동요나 갑판 캠버(camber)등에 의한 경사각의 영향이 중요하다는 것을 말해 준다.

선체운동에 의한 가속도가 침입수 유동에 주는

영향을 고찰하기 위한 계산도 수행되었다. Fig.18과 Fig.19에는 수직가속도 a_v 가 상방향으로 1.0g인 경우($g+a_v$ 는 2.0g)의 계산결과가 보여지고 있고, Fig.20과 Fig.21에는 -0.5g인 경우($g+a_v$ 는 0.5g)의 계산결과가 보여지고 있다. 수평가속도 a_h 는 모든 계산에서 0으로 하였다. Fig.18과 Fig.19에 보여진 $a_v=1.0g$ 인 경우는 $\Delta x=0.1m$ 로 할 경우 식(24)의 Courant 조건을 만족시키지 못하여 수치 불안정성이 나타나므로 $\Delta x=0.2m$ 로 계산하였다. 가속도가 다른 이 둘 경우의 계산결과를 비교하여 보면, $a_v=1.0g$ 인 경우가 유입 과정 및 배수 과정이 모두 빠르고 유속도 큼을 볼 수 있다. 벽에 반사된 후의 보아의 높이에서도 현저한 차이가 있어, $a_v=-0.5g$ 인 경우 보아의 높이가 상대적으로 높다. 이러한 가속도에 의한 현저한 차이로부터 침입수의 유동 현상에 있어 선체운동에 의한 가속도의 영향도 매우 중요함을 알 수 있다.

4. 결론

보아 발생 및 급격한 갑판위 수심변화를 수반하는 갑판침입수 유동해석에 적합한 수치해법이 개발되었고, 몇가지 단순한 경우들에 대한 해석해와의 비교를 통하여 개발된 수치해법의 타당성이 검토되었다. 침입수 유동에 중요한 영향을 미칠 수 있는 갑판 기울기 및 수직 가속도 등의 영향도 고찰되었으며, 얻어진 주요결과들은 다음과 같다.

1) Predictor-corrector법과 2종 상류차분법을 채용한 본 수치해법은 갑판침입수의 유동해석에 유용하다. 이 수치해법은 보아 선단에서의 불연속성을 다소 완화하는 경향이 있으나, 특성곡선법과 비교하여 보아의 발생여부를 구분할 필요가 없는 장점이 있다.

2) 상류차분법만을 쓸 때 유체 정체부에서 수치

감쇠가 매우 작고 이로 인해 보아 후방에서의 진동현상이 나타날 수 있는데, 이는 변형 Lax법을 간간히 삽입함으로써 해소할 수 있다.

3) 본 수치해법은 보아를 수반하는 천수와 유동 해석에 있어 대체로 해석해와 잘 일치하는 결과를 준다.

4) 갑판끝 경계에서의 낙하경계조건이 도출되었고, 이 낙하경계조건은 개방경계조건과 비교하여 경계부근에서 수면의 하강과 유속의 증가를 초래하나 전체유량의 관점에서 그 영향은 크지 않다.

5) 갑판의 기울기와 선체 가속도는 갑판침입수 유동에 상당한 영향을 미치므로, 갑판침입수 유동 해석에 있어 이들의 영향은 반드시 고려해야 할 중요요소이다.

본 수치해법은 용이하게 3차원으로 확장될 수 있으며, 향후 3차원 실선의 갑판침수 해석 및 이를 고려한 선체 과대운동 추정에 대한 연구가 요구된다

후 기

본 논문은 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호:KOSEF 931-1000-001-2)으로 수행된 연구결과와의 일부임을 밝히며, 동 재단에 감사의 뜻을 표한다.

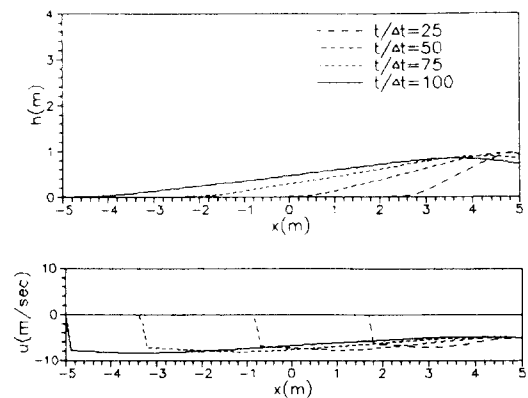


Fig.12 Simulation of shipping water-inflow (the same as in Fig.9 except $h_{amp} = 1m$)

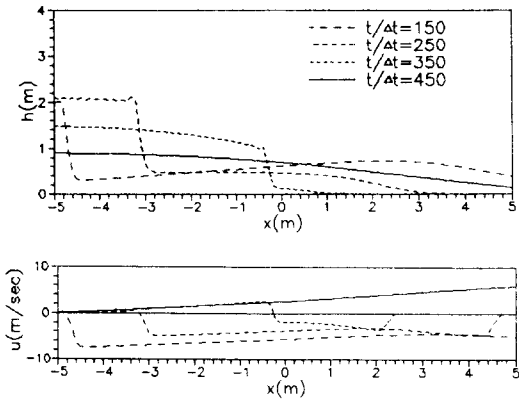


Fig.13 Simulation of shipping water-reflected flow (the same as in Fig.12)

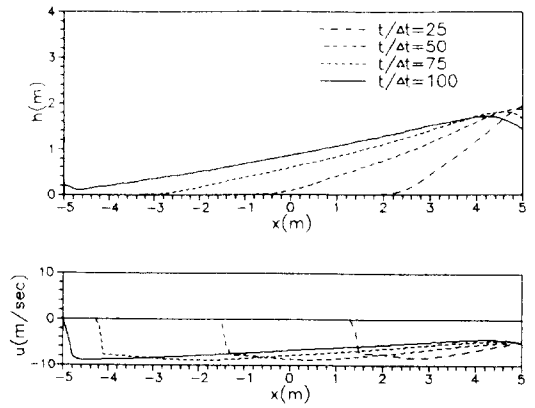


Fig.16 Simulation of shipping water - inflow (the same as in Fig.9 except $\alpha_{dk} = 10^\circ$)

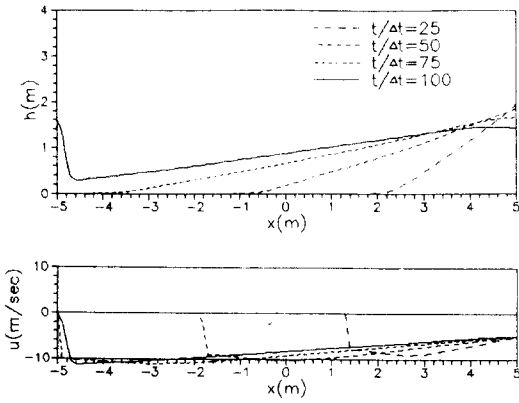


Fig.14 Simulation of shipping water-inflow (the same as in Fig.9 except $\alpha_{dk} = -10^\circ$)

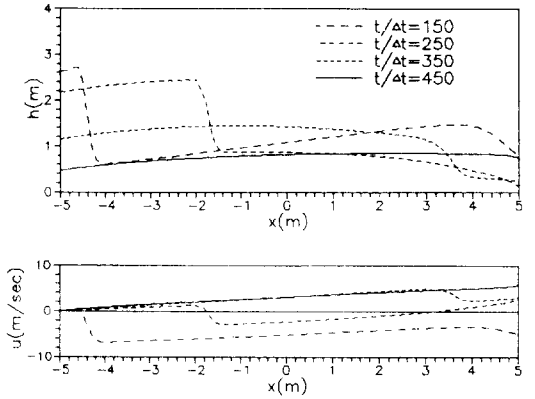


Fig.17 Simulation of shipping water - reflected flow (the same as in Fig.16)

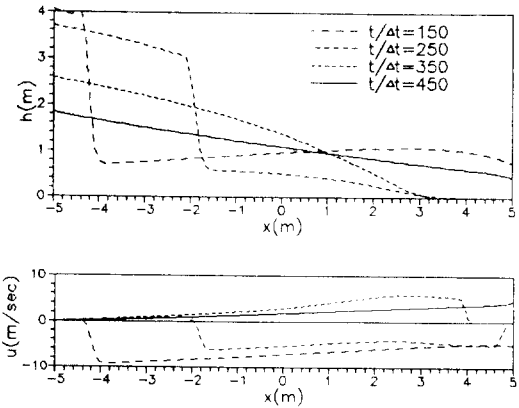


Fig.15 Simulation of shipping water - reflected flow (the same as in Fig.14)

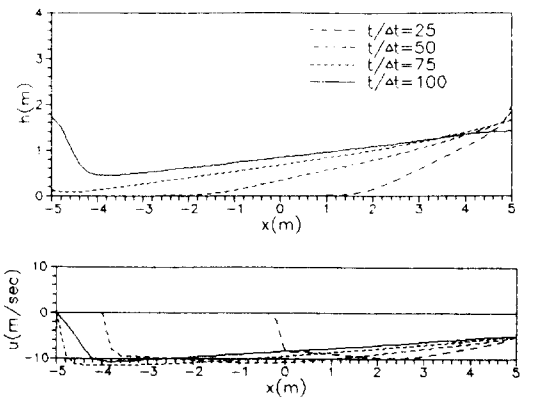


Fig.18 Simulation of shipping water - inflow (the same as in Fig.9 except $\alpha_v = g$ and $\Delta x = 0.2m$)

참고 문헌

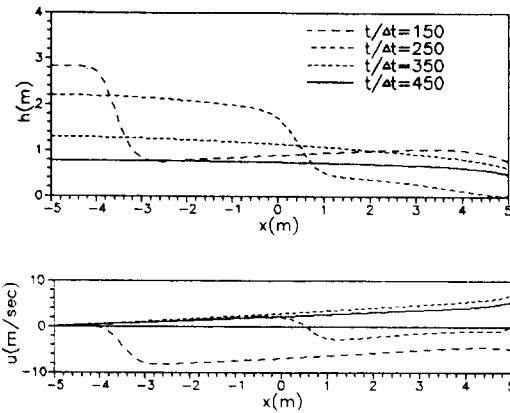


Fig.19 Simulation of shipping water - reflected flow(the same as in Fig.18)

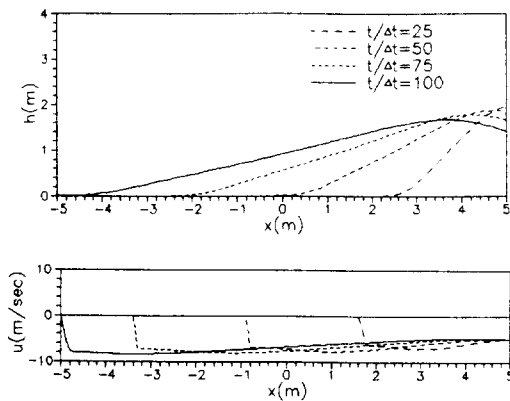


Fig.20 Simulation of shipping water - inflow (the same as in Fig.9 except $a_v = -0.5g$)

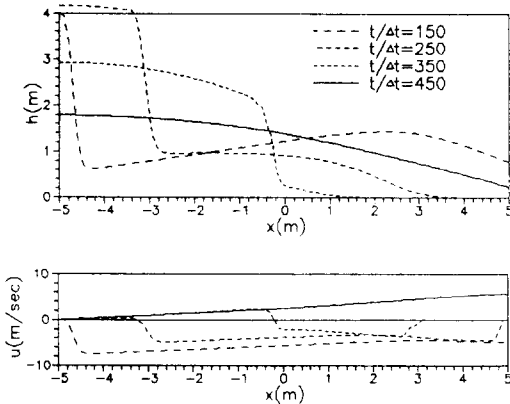


Fig.21 Simulation of shipping water - reflected flow (the same as in Fig.20)

- [1] M.K. Ochi, "Extreme Behavior of a Ship in Rough Seas - Slamming and Shipping of Green Water", SNAME Trans., Vol.72, 1964.
- [2] S.Takezawa, K.Kobayashi and K.Sawada, "On the Deck Wetness and Impulsive Water Pressure Acting on the Deck in Head Seas", J.SNAJ, Vol.142, 1977.
- [3] J.F.O'Dea and D.A.Walden, "The Effect of Bow Shape and Nonlinearities on the Prediction of Large Amplitude Motions and Deckwetness", Proc. 15th Symp. Naval Hydrodyn., Hamburg, 1984.
- [4] A.R.J.M.Lloyd, J.O.Salsich and J.J.Zselezcky, "The Effect of Bow Shape on Deck Wetness in Head Seas", T.RINA, Vol.128, 1986.
- [5] K.Takagi and A.Niimi, "A Theoretical Approach to Bow Deck Wetness of a High-Speed Ship", JSR, Vol.34, No.3, 1990.
- [6] 홍사영, 이판목, 공도식, "컨테이너선의 불규칙파 중 갑판침수에 관한 실험적 고찰", 대한조선학회지, 제27권, 제2호, 1990.
- [7] 배광준, 홍도천, 홍석원, 염덕준, 박인규, "S-175 컨테이너 모형선의 갑판침수현상에 대한 공동 조사연구", 대한조선학회지, 제29권, 제1호, 1992.
- [8] J.Dillingham, "Motion Studies of a Vessel with Water on Deck", Marine Tech., Vol.18, No.1, 1981
- [9] S. Mizoguchi, "Analysis of Shipping Water with the Experiments and the Numerical Calculations", J.SNAJ, Vol.163, 1988
- [10] J.J.Stoker, *Water Waves*, Interscience Publishers, INC., New York, 1957
- [11] P.J.Roache, *Computational Fluid Dynamics*, Hermosa Publishers, 1982