

내부고립파의 생성과 전파에 관한 수치해석

윤동민*, 윤범상†*

울산대학교 조선해양공학부*

Numerical Analysis of Generation and Propagation of Interfacial Soliton

Dongmin Yun* and Bumsang Yoon†*

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan*

Abstract

This paper describes the generation and propagation of internal solitary wave in a two-layer fluid system by numerical analysis. Characteristics of interfacial soliton such as wave type, wave height, wave celerity are investigated numerically with respect to an extent of initial disturbance, fluid thicknesses of the two fluids and etc. The difference between the internal wave propagation on sloping beach and flat bottom was also examined. Laboratory experiments were conducted in the wave flume and compared with the results of numerical computation for verification.

※Keywords: Internal wave(내부파), Two-layer fluids(이층유체), Vorticity-stream function method (와도유량함수법)

1. 서 론

해양 내부파(internal wave)는 바닷물의 밀도 차에 의해 생성된 해양에서 두 층의 경계면(interface)에서 진행되는 파를 말한다.

해양 내부파는 세계 여러 곳에서 현장관찰 또는 SAR(Synthetic Aperture Radar)을 탑재한 위성사진을 통해서 관측되고 있다. Apel et al.(1976)은

New York Bight에서, Osborne and Burch(1980)는 태국 연안 Andaman Sea, Liu et al.(1998)은 China Sea에서 내부파의 관찰을 보고하였다. 또한 파장이 수 km에 이르는 내부파가 지브롤터 해협(Alpers and Violette 1992)에서 관측되기도 하였다.

최근에는 우리나라에서도 내부파의 관측을 시도한 바 있다. Kim et al.(2001)은 동해 연안에서 내부파를 관측하였고, Kim and Won(1999)은 제주도 동북쪽에서 내부파군을 관측하였다. 또한, Kim and Choi(2003)은 서해중부 연안에서 발생하는 내부파의 특성을 조사하였다.

접수일: 2010년 2월 5일, 승인일: 2010년 4월 22일

† 교신저자: bsyoon@ulsan.ac.kr, 052-259-2160

무엇보다도 내부파는 수면파와 달리, 수면위에서 관찰이 잘 안되며 파고 또한 매우 클 수 있을 뿐 아니라, 예기치 않은 사고를 유발할 수 있다는데 그 중요성이 강조된다.

내부파의 영향으로는, 잔잔한 수면 위를 전진하는 선박에 작용하는 갑작스런 저항 증가, 잠수함의 전복 뿐 아니라, 노르웨이 해안에서는 성층해역이 발달하여 사수현상(dead water phenomena)이 자주 발생하는 것으로 잘 알려져 있다. 그 외에, Osborne et al.(1978)이 조사한 내부파가 드릴십(drill ship)을 만날 때 무어링 라인(mooring line)의 장력 변화도 중요한 영향 중 하나이다.

이렇듯 앞으로는 해양구조물에 대한 내부파의 영향이라는 환경적 요인이 새로운 화두로 떠오를 것으로 보인다. 본 연구에서는 특히 2008년 5월 4일에 총북 보령 죽도 방파제에서 원인 불명의 급작스런 해수범람에 의해 9명이 사망하고 13명이 실종된 사건에 대해 내부파에 그 원인이 있을 것이라 예상하고, 이 사건의 원인 규명에 대한 고찰이 본 연구의 주요한 동기가 되었다.

본 논문에서는 2차원 수조의 이층 유체 경계면에서 내부파의 생성과 전파에 있어서 이의 수학 모델링과 함께 초기조건 및 경계조건이 내부파의 파형에 미치는 영향 등을 조사하였다. 특히, 해저형상이 파도특성에 중요한 인자로 작용하는 해양연안에서의 내부파의 진행 특성에 주안점을 두었다.

수치적 재현을 위해서 Valentine and Sipicic (2002)이 제안한 Boussinesq 가정을 적용한 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 또한 내부파의 생성에 대한 정식화모델을 수치 계산을 통하여 구현하고 이를 바탕으로 내부파의 진행 특성을 연구하였다. 수치 모델링 결과는 실제 2차원 수조에서 초기조건을 같게 하여 직접 수행한 내부파 생성 실험 결과와 비교, 확인하였다. 계산 결과는 실험에서의 관측치를 정성적으로, 정량적으로 잘 나타내었다. 층의 두께에 따른 내부 고립파(interfacial soliton)의 변위 방향, 경사면에서의 역전현상 등에 대해서도 분석하였으며, 수치계산결과 초기조건에 관계없이 두꺼운 층을 갖는 방향으로 내부파가 형성되며, 내부파의 파고와 전진속도가

상호 의존적이라는 사실, 층의 두께가 역전되는 해안가에서는 내부파의 방향도 역전되어 궁극적으로 수면 밖으로 돌출될 가능성을 발견하는 등 매우 흥미로운 결과를 알 수 있었다.

2. 수학 모델과 정식화

2.1 지배 방정식(governing equations)

내부파의 전파 모델링을 위하여 와도-유량함수 방법(vorticity-stream function method)으로 지배 방정식을 정리하였으며 (Valentine and Sipicic 2002), 계산영역 내의 유체는 2차원, 점성, 그리고 비압축성 유동을 가정하였다.

계산의 편의와 일반성을 도모하기 위하여 모든 변수를 무차원화 하였다. 무차원 변위, 유속, 시간은 다음과 같이 정의한다. 여기서 차원을 가지는 변수를 상첨자(')를 써서 표기하기로 한다.

$$x = x'/d, \quad z = z'/d, \quad u = u'/C_0, \quad w = w'/C_0 t = t' C_0/d.$$

여기서 u' , w' 은 각각 x 방향, z 방향 유속, d 는 물의 전체 깊이, 그리고 내부파의 특성속도 C_0 는 아래에 정의한다.

와도(vorticity)를 포함한 2차원유동에 대한 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\psi_{xx} + \psi_{zz} = \zeta \quad (1)$$

Boussinesq 가정을 적용한 운동방정식은,

$$\zeta_t + \psi_z \zeta_x - \psi_x \zeta_z = -\theta_x / F_d^2 + (\zeta_{xx} + \zeta_{zz}) / Re \quad (2)$$

두 층에서의 밀도경사(pycnocline)를 위해서는 이류확산방정식(convection-diffusion equation)이 적용된다.

$$\theta_t + \psi_z \theta_x - \psi_x \theta_z = (\theta_{xx} + \theta_{zz}) / (ScRe) \quad (3)$$

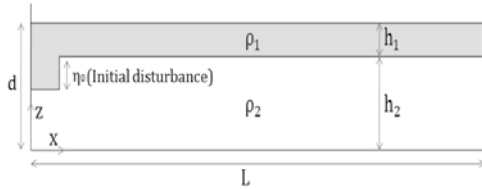


Fig. 1 Fluid domain with two fluids

$\theta = (\rho(x, z, t) - \rho_2) / (\rho_1 - \rho_2)$ 는 두 유체의 무차원 밀도차비(dimensionless density-difference ratio), ζ 는 와도, ψ 는 유량함수(stream function)를 나타낸다. 두 층에서 ρ_1, ρ_2 는 각각 가벼운 위쪽 유체 층과 무거운 아래 유체 층의 밀도이고 ($\rho_1 < \rho_2$), h_1, h_2 는 각각 위, 아래 유체층의 두께를 나타낸다.

$C_0 = \sqrt{g|\gamma_0|h_1h_2/d}$ 는 특성 속도(characteristic speed)이며, $\gamma_0 = (\rho_1 - \rho_2) / \rho_2$ 이다. 식 (2)와 식 (3)에서 무차원 매개변수는 Froude 수 ($F_d = C_0 / \sqrt{g|\gamma_0|/d} = \sqrt{h_1h_2/d}$), Reynolds 수 ($Re = C_0/\nu$), 그리고 Schmidt 수($Sc = \nu/D$)이다. 이때, ν, D 는 각각 동점성계수(kinematic viscosity)와 확산계수(diffusion coefficient)를 각각 나타낸다.

2.2 경계 및 초기 조건(boundary & Initial conditions)

앞 절에서 구한 3개의 지배방정식 식 (1), 식 (2), 식 (3)의 해를 구하기 위해 유체영역을 둘러싸는 경계면에 다음과 같은 경계조건을 적용한다. 좌우의 벽면에는 비미끄럼(no-slip), 비투과성(no-penetration), 그리고 밀도절연(density insulation) 조건을 적용하였다. 즉,

$$u = w = 0, \psi_{zz} = 0, \theta_x = 0 \tag{4}$$

바닥 경계조건으로는 유속과 와도에 대해서는 벽경계면과 같은 비미끄럼, 비투과성을 적용하였고, θ 는 정의에 의하여 다음과 같다.

$$u = w = 0, \psi_{xx} = 0, \theta = 0 \tag{5}$$

자유표면에는 자유미끄럼벽(pure-slip rigid-lid)

조건과 θ 의 정의를 적용하였다.

$$\psi_{zz} = 0, w = 0, \zeta = 0, \theta = 1 \tag{6}$$

위의 자유표면경계조건(6)은 내부파의 수치모사를 위해 실용적으로는 충분하다고 알려져 있으나 (Wu, T.Y. and Mei, C.C.), 물깊이가 낮은 해안가 가까운 곳에서 내부파가 수면위로 돌출되는 것을 모사하는 데에는 매우 적합하지 않음은 물론이다. 이를 위한 새로운 자유수면조건 등에 대해서는 추후의 과제로 남기로 한다. 유체 영역의 초기 조건은 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이, Kao et al.(1985)이 제안한 “붕괴 메커니즘(collapse mechanism)”에 준하여 경계면의 높이 차(η_0)에 의하여 내부파가 생성될 수 있도록 하였다.

3. 내부파 생성 및 전파 실험

우선 내부파의 생성 및 전파의 특성을 실험을 통해 살펴보았다. 내부파 실험 장치는 Fig. 2와 같이 제작하였다. 길이 2.4m, 높이 0.25m, 폭 0.1m의 수조이며, 실험 수심은 0.1m로 하였다. 제작된 실험 장치는 Fig. 1의 조건과 같은 유체 영역을 나타낼 수 있도록 하였다. 수조에서 왼쪽의 밀도가 낮은 유체 영역과 오른쪽의 밀도가 높은 유체 영역은 수문으로 분리하였으며, 수문은 공기압축기의 레버를 이용하여 개폐가 용이하며, 수문 개폐는 순간적으로 일어나, 그 속도가 일정하도록 하였다.

위층은 담수, 아래층은 소금물로 하였으며, 두 층 사이의 경계면은 담수 층에 물감염색을 하여 구분하였다. 담수와 소금물의 밀도 비는 1:1.04의 조건으로 실험을 하였다.

내부파의 생성을 위하여 수조를 수문으로 닫아 두 부분으로 분리한 상태에서, 물의 깊이는 같되 경계층의 높이 차를 두었다. 이후, 수문을 열어 내부파가 생성되는 과정을 확인하였다.

Fig. 3은 하강 형(depression-type) 내부파의 실험 모습을 보여주는 사진이다. 또한, Fig. 4는 상승 형(elevation-type)의 내부파가 생성된 모습이다.

본 연구의 실험 결과를 수치모델링을 통한 계산 결과와 비교하였으며, 자세한 내용은 위 두 형태의 내부파에 대한 정의와 함께 아래에 소개한다.



Fig. 2 Internal wave apparatus with removable gate

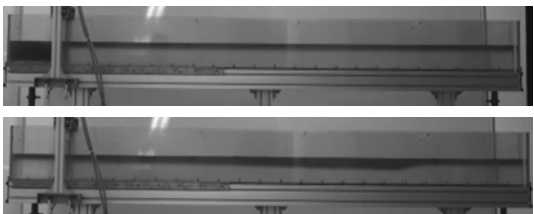


Fig. 3 Propagation of depression-type internal wave in the experiment

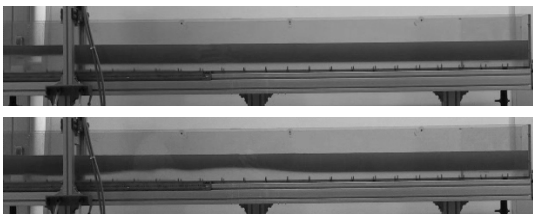


Fig. 4 Propagation of elevation-type internal wave in the experiment

4. 수치 계산 및 결과

수치 계산법은 기본적으로 FTCS (forward time central space) scheme 을 사용하였으며, 대류항 (convection term)에 대해서는 2차풍상차분법(2nd order up-wind scheme)을 사용하였다.

Fig. 5는 수치 계산을 위해 작성한 프로그램의 순서도이다.

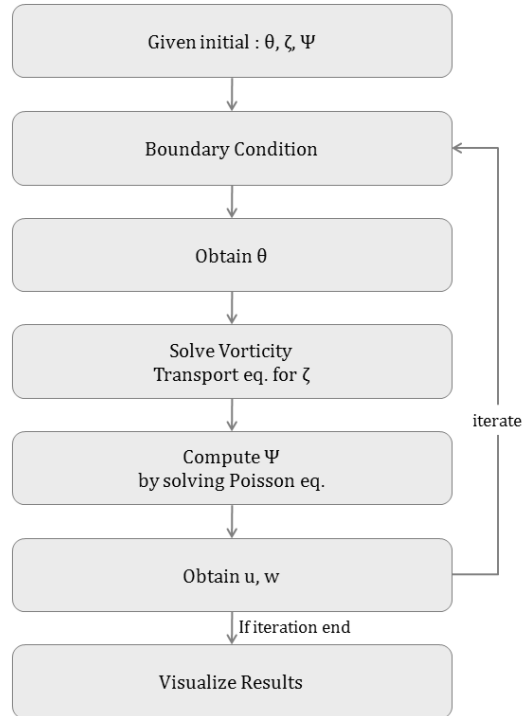


Fig. 5 Flow chart of numerical calculation

4.1 내부파의 생성과 전파 메커니즘

수치계산의 예로서 $\eta_0 = 0.6d$, $h_1 = 0.2d$, $h_2 = 0.8d$, $L/d = 24$, $Re = 10000$, $Sc = 833$ 으로 가정한 계산을 수행하였다. 수치 계산의 결과로써 내부파가 생성되고 전파되어 나가는 일련의 과정을 Fig. 6에 보인다.

경계면의 높이 차에 의하여 전복 운동(overturning motion)이 발생하면서 내부파가 생성되는 것을 확인할 수 있다.

내부파가 전파 되는 과정은 내부파가 전진하는 방향 앞쪽에서는 중력(gravity force)이 작용하여 경계면이 아래쪽으로 내려가고, 뒤쪽에서는 부력(buoyancy force)이 작용하여 경계면이 위쪽으로 올라가면서 진행을 하게 된다.

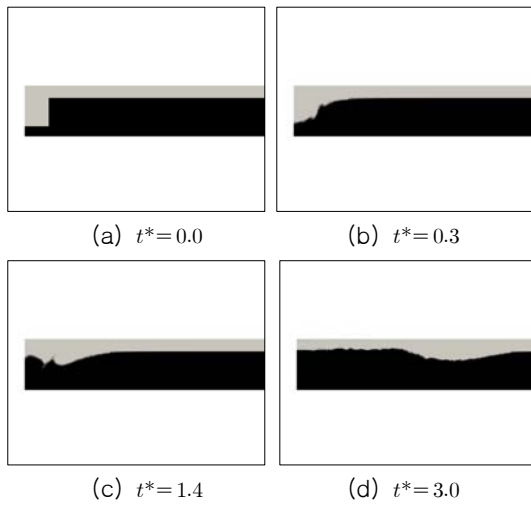


Fig. 6 Images indicating a clockwise overturning motion leading to the generation of a depression-type internal solitary wave

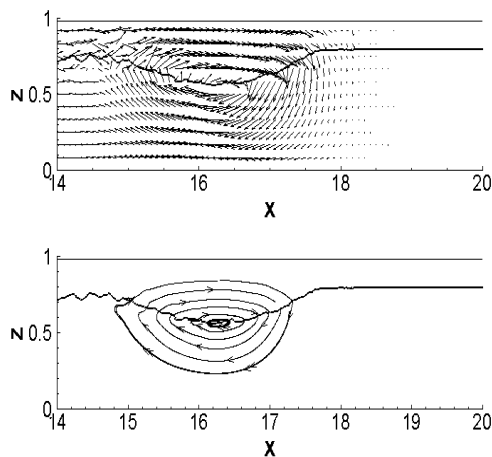


Fig. 7 Velocity fields and Streamlines indicating mechanism of internal wave propagation ($t^* = 13.0$)

이를 좀 더 자세히 확인하기 위하여, 다음의 Fig. 7에 어느 한 순간의 경계면과 함께 속도 장 (velocity field)과 유선(stream lines)을 표시하였다. 그림에서 굵은 실선으로 나타난 경계층이 위,

아래층의 밀도를 구분하는 척도이며, 내부파의 파형을 잘 보여주고 있다. x축 양의 방향으로 파가 진행할 때를 나타낸 것이며, 파의 앞쪽과 뒤쪽에서 각각 중력과 부력이 작용되고 있음을 유속방향과 유선의 흐름으로 알 수 있다.

초기조건을 Fig. 8과 같이 Valentine의 계산 경우(2002)와 같게 하였을 때, 내부파의 파고점 (peak point)이 있는 지점에서 z축으로의 속도분포를 보면(Fig. 9) 양 결과가 정확히 일치한다. z가 0.8 이상인 부분은 가벼운 물 층이며, 0.6 이하인 부분은 무거운 물 층이다. 약 0.7을 기준으로 하여 0.6~0.8에서는 속도 분포가 양과 음으로 혼재하여, 위쪽은 양의 방향, 아래쪽은 음의 방향으로의 속도 성분이 분포된다.

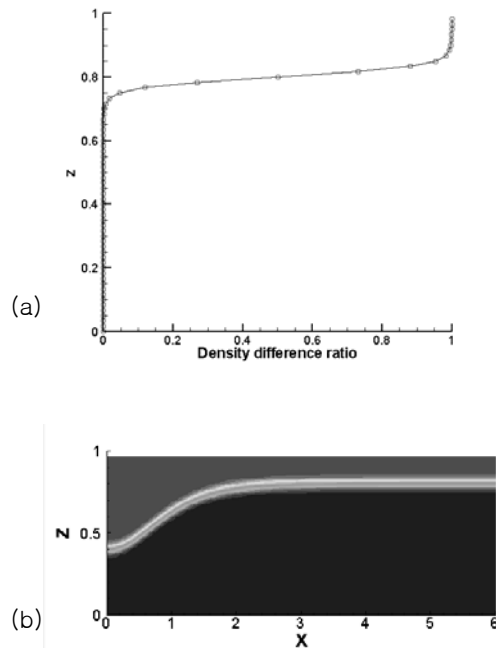


Fig. 8 Equivalent initial condition to Valentine's: (a) the left side of a rectangular basin illustrating the initial variation of the reference density-difference ratio (b) the density-difference ratio as a function of depth illustrating the shape of the pycnocline density structure

Fig. 9에서 알 수 있듯이 z 방향속도분포의 적분 값(물질이동)이 0 이며, 내부경계층을 기준으로 계단 형태를 가진다.

즉, 내부파의 전파 역시 수면파와 마찬가지로 1차적으로는 파형의 전파이며, 내부고립파에 의한 2차적인 물질이동은 수면파와 마찬가지로 무시할 정도임을 알 수 있다.

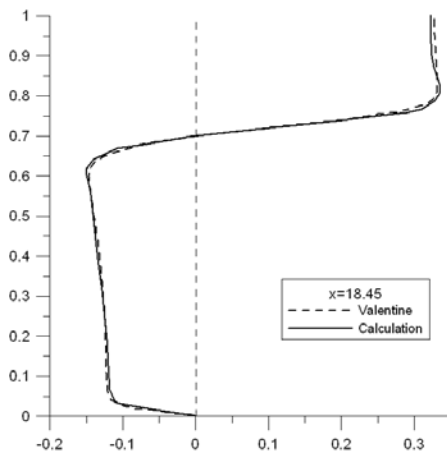


Fig. 9 Velocity profile at the horizontal location of the peak of the leading solitary wave ($x=18.45$)

4.2 내부파의 형상 비교

수치 계산을 통한 내부파의 형상이 실험 결과와 비교하여 잘 일치하는지를 비교해 보았다. 계산 조건은 $h_1 = 0.2d$, $h_2 = 0.8d$, $L/d = 24$, $Re = 10000$, $Sc = 833$, $\eta_0 = 0.6d$ 으로 하였다.

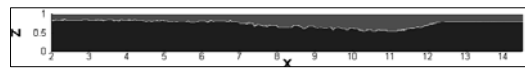
다음의 Fig. 10에서 $t=8.5$ 일 때의 내부파 형상을 실험 결과(a)와 수치 계산 결과(b)에서 확인하였으며, (c)에서는 실험과 계산의 두 결과를 함께 비교하였다. 실험, 계산 공히 내부파의 앞부분이 뒷부분에 비해 더욱 급격한 형상변화를 보이고 있다. 파정의 뒷부분에서 실험과 계산결과의 차이는 두 유체사이의 분자 및 난류확산치의 추정차이에 특히 기인하는 것으로 생각되며, 이를 제외하면, 두 결과는 정성적, 정량적으로 매우 만족할만한 일치도를 보인다고 할 수 있다.

또한, 실험결과에는 나타나지 않으나, 수치 계

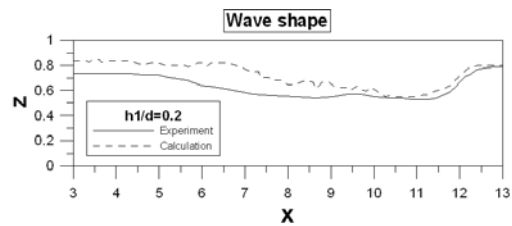
산에서는 파형에 매우 작은 진동이 포함되어 있어 Kelvin-Helmholtz instability가 아닌, VOF(volume of fluid)를 이용한 경계면의 표현방식에 기인하는 것으로 파악되며, grid수를 더욱 증가함으로써 해결될 것으로 기대된다.



(a) Experiment



(b) Numerical calculation



(c) Wave shape comparison between Experiment and Numerical calculation

Fig. 10 Comparison of wave shape ($t=8.5$)

4.3 내부파의 전파 속도

수치 계산을 통하여 내부파의 변위와 전파속도를 결정하는 요인에 대하여 알아보았다.

계산조건은 4.2에서와 같이 $h_1 = 0.2d$, $h_2 = 0.8d$, $L/d = 24$, $Re = 10000$, $Sc = 833$ 로 하고, 경계층간의 높이 차 η_0 (initial disturbance)에 변화를 주면서 생성된 내부파의 변위(amplitude)와 속도(speed) 변화를 측정하였고, 이를 토대로 변위와 속도 사이의 관계를 알아보았다.

Fig. 11은 η_0 와 파도변위 사이의 관계를 나타낸다. 초기의 η_0 가 클수록 생성된 내부파의 변위가 커짐을 알 수 있다. 내부파 변위의 증가는 초기 높이차의 증가에 따라 증가하며, 어느 정도 이후에는 비선형적 증가 양태를 보인다. 이 경우 역

시 실험결과와 매우 만족스런 일치도를 보인다.

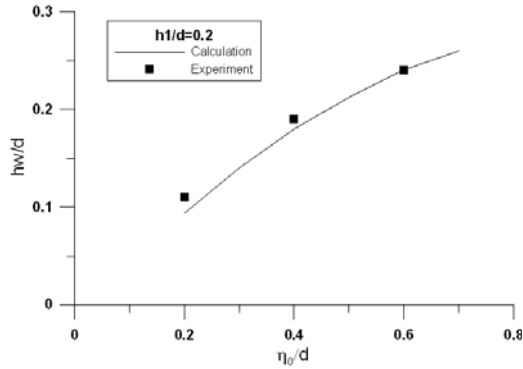


Fig. 11 Comparison of wave amplitudes for various initial disturbances

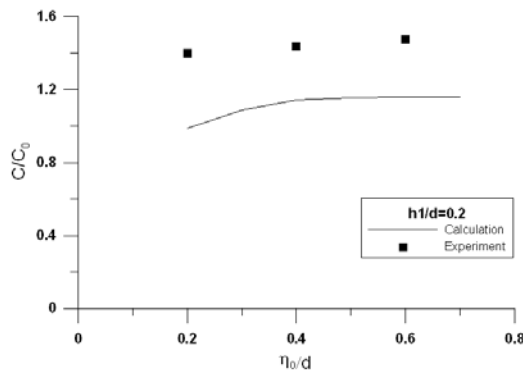


Fig. 12 Comparison of wave speed for various initial disturbances

Fig. 12는 η_0 와 파도전진속도 사이의 관계를 나타낸다. 초기의 η_0 가 클수록 생성된 내부파의 속도가 증가하나, 그 정도는 매우 작다. 계산치와 실험치의 차이는 계산에서 사용한 점성계수 ν 와 확산계수 D 의 정확성에 기인하는 것으로 추정되나, 내부파의 전파 속도 역시 초기 높이차가 어느 수준으로 증가하면 일정치로 수렴하는 점을 알 수 있다.

위의 결과로부터, 내부파의 전진속도는 수면파와 마찬가지로, 파도변위에는 거의 의존하지 않으며, 두 유체층의 두께 비($h_1:h_2$)가 더욱 중요한 요소로서 파악된다.

4.4 내부파의 변위 방향

앞에서 기술하였듯이, 내부파는 변위의 방향에 있어서 두 가지로 분류할 수 있다. 아래로 볼록한 형태인 하강 형과 위로 볼록한 형태인 상승 형이 그것이다.

이는 내부파를 일으키는 초기변위 차의 방향(내부파 생성조건)과는 무관하며, 밀도 차에 의해 분리된 두 유체층간의 두께와 매우 밀접한 연관이 있다. 하강 형은 아래층이 두꺼울 때($h_1 < h_2$) 나타나고, 상승 형은 위층이 두꺼울 때($h_1 > h_2$) 나타난다. 즉, 내부고립파는 두 유체 중, 두께가 두꺼운 유체 층 방향으로 생긴다는 사실을 확인하기 위하여, 서로 다른 내부파 생성 조건을 주어, 4가지의 내부파 전파 과정을 살펴보았다. 주어진 초기 조건을 다음의 Table 1과 같이 하였다. 4가지 타입의 수치 계산을 통한 결과를 Fig. 13에 비교 하였다. 계산조건은 $L/d=24$, $Re=10000$, $Sc=833$ 로 하였다.

Fig. 13의 (a)와 (b)에 각각 하강 형과 상승 형 내부파를 보인다. 또한 전파과정에서 나타나는 성질로 안정 모드(stable mode)와 불안정 모드(unstable mode) 두 종류가 있다. Fig. 13에서 (a)와 (b)는 안정 모드이며, (c)와 (d)는 불안정 모드이다. 안정 모드에서는 초기의 내부파의 형태를 그대로 가지고 가는 것을 말하며, 불안정 모드에서는 초기의 상승 형 또는 하강 형의 내부파가 역전된 형태의 내부파로 되는 것을 말한다.

Table 1 4-types of internal wave pattern

	Thicknesses of two fluid layers	Direction of initial disturbance	Mode
1	$h_1 < h_2$	Downward	Stable mode
2	$h_1 > h_2$	Upward	Stable mode
3	$h_1 > h_2$	Downward	Unstable mode
4	$h_1 < h_2$	Upward	Unstable mode

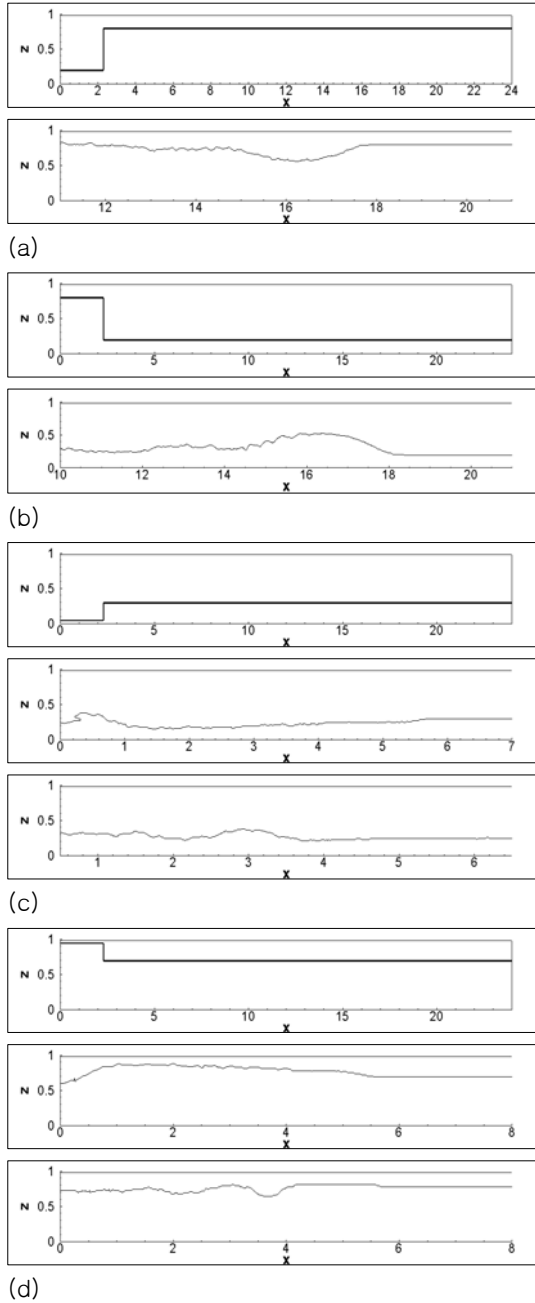


Fig. 13 Stable and unstable modes of internal waves: (a) stable depression-type; (b) stable elevation-type; (c) unstable depression-type inverted into elevation-type; (d) unstable elevation-type inverted into depression-type

앞에서 언급했듯이, 초기조건에 관계없이 내부파의 변위 방향을 결정하는 중요한 요인은 두 층간의 두께 비(ratio)임을 말해준다. 즉, 내부파의 변위는 보다 두꺼운 층이 있는 방향으로 결정된다. 이로 미루어 볼 때, 해안으로 진행하는 내부파의 변위가 바뀌는 것은 두 층간의 두께 비가 달라지면서 내부파가 불안정 모드에 놓이기 때문임을 예측할 수 있다. 이 4가지 타입의 내부파는 Chen et al.(2007)에서 실험된 바가 있으며, 본 논문에서는 생략하고 있으나, 직접 수행한 실험에서도 이와 같은 결과를 명쾌히 확인할 수 있었다.

4.5 경사면에서의 내부파

여기서는 앞의 4.4절에서의 결과를 경사면에 적용하여, 경사면에서 진행하는 내부파의 파형이 시간에 따라 어떻게 변화하는지 알아보았다.

초기의 파형 생성 조건은 Table 1의 1번인 안정형 모드의 하강 형 내부파 조건을 적용하였다.

계산 조건은 앞서와 같이 $\eta_0 = 0.6d$, $h_1 = 0.2d$, $h_2 = 0.8d$, $L/d = 24$, $Re = 10000$, $Sc = 833$ 로 하였으며, 경사면의 기울기는 3.8°의 완만한 경사로 하였다. 수치 계산 결과인 Fig. 14를 보면, 내부파가 경

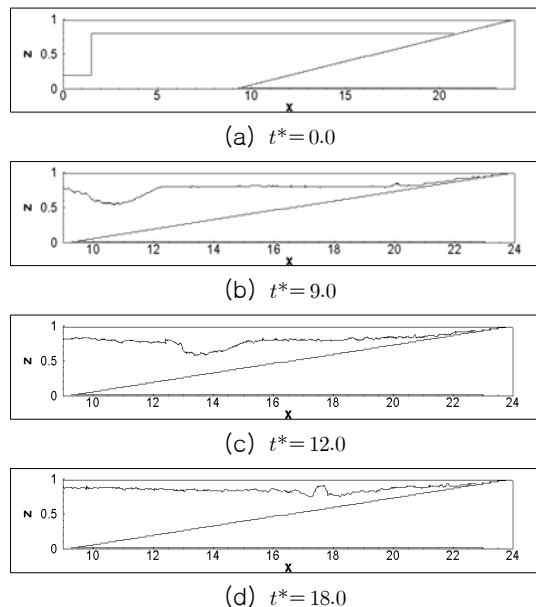


Fig. 14 Inversion process of the shoaling internal wave

사면으로 진행할 때, 두 층의 두께 비가 경사면 이전에는 아래층이 더 두껍다($h_1 < h_2$). 하지만 경사면을 따라가면서 수심 변화에 따라 두께 비가 변하게 되는데, 위층이 더 두꺼워지면서($h_1 > h_2$) 내부파는 불안정 모드에 놓이게 된다.

이로써 초기에는 하강 형의 내부파가 경사면을 지나면서 상승 형으로 역전되는 현상이 나타난다는 것을 알 수 있었으며, 이는 경사면에서 상승 형으로 변한 내부파의 에너지가 충분히 크거나 비선형성이 커지면, 수면 밖으로 돌출될 가능성이 있음을 시사한다.

5. 결 론

내부파가 해양 연안에서 보이는 유동 특성을 2차원문제에 국한하여 실험과 수치계산을 통하여 확인하였다.

내부파의 생성 및 전파 과정을 수치계산을 통하여 가시화하고, 그 형상을 비교하였다. 내부파의 변위 크기와 전파속도를 결정하는 요인에 대하여 분석하였다. 그 결과, 내부파의 속도는 변위의 크기에 따라 빨라지나, 일정 수준 이상이 되면 두 층 간의 두께 비에 의해 결정되는 것을 확인하였다.

내부파의 4가지 타입을 평평한 바닥조건에서 확인하고, 내부파의 변위를 결정하는 중요한 요인이 두 층간의 두께 비임을 파악하였다. 경사면에서 진행하는 내부파는 두 층간의 두께 비가 달라지면서 불안정 모드에 놓이게 되어 하강 형에서 상승 형으로 바뀌게 되는 것도 확인하였다.

경사면에서 상승 형으로 바뀐 내부파가 지형적 요건 등으로 비선형성이 증가하면서 자유수면 밖으로까지 돌출 할 가능성을 밝혀내는 것이 추후 과제가 될 것이며, 이는 자유표면의 경계조건과 수치 계산법의 향상으로 해결될 수 있을 것이다.

나아가 내부파에 의한 압력변화 등에 따라 발생하는 해양구조물 또는 잠수체의 거동 또한 흥미로운 과제가 될 것이며 이는 추후의 연구 과제로 남긴다.

후 기

본 논문은 울산대학교 조선해양공학부 세계일류 화사업(SOTOP) 연구비의 지원으로 행해졌음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- Kim, T.L. and Won, J.S. 1999, "Observation of Internal Waves at Northern Region of Jeju Island Using SAR", The Korean Society of Oceanography, 'Sea', Vol. 4, No. 1, pp. 18-24.
- Kim, T.L. and Choi, H.Y. 2003, "The Characteristics of Internal Waves Observed by SAR and In-situ Measurement Data Near Ocheong-do in the Yellow Sea", The Korean Society of Oceanography, 'Sea', Vol. 8, No. 2, pp. 132-137.
- Alpers, A. and P.E. La Violette, 1992, "Tide generated nonlinear wave packets in the strait of Gibraltar observed by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1 satellite," Proceedings of the First ERS-1 Symposium - Space at the service of our environment, 753-758 pp.
- Apel, J.R., et al., 1976 "A Study of Oceanic Internal Waves Using Satellite Imagery and Ship Data," Remote Sensing of Environment, Vol. 5, pp. 125-135.
- Chen, C.Y., et al., 2007, "Generation of Internal Solitary Wave by Gravity Collapse," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 1-7.
- Kao, T.W., Pan, F.S., and Renouard, D., 1985, "Internal Solitons on the Pycnocline: Generation, Propagation, Shoaling and Breaking Over a Slope," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 159, pp. 19-53.
- Kim, H.R., Ahn, S. and Kim, K., 2001, "Observations of Highly Nonlinear Internal Solitons Generated by Near-inertial Internal Waves off the East Coast of Korea," Geophysical Research Letters, Vol. 28, pp 3191-3194.

- Liu, A.K., Chang Y.S., Hsu, M.K. and Liang, N.K., 1998, "Evolution of Nonlinear Internal Waves in the East and South China Seas," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, pp 7995–8008.
- Osborne, A.R. and Burch, T.L., 1980, "Internal Solitons in Adaman Sea," *Science*, Vol. 208, No. 4443, pp 451–460.
- Osborne, A.R., Burch, T.L., and Scarlet, R.I., 1978, "The Influence of Internal Waves on Deep-Water Drilling," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 30, pp. 1497–1504.
- Valentine, D.T., Sipcic, R., 2002, "Nonlinear Internal Solitary Wave on a Pycnocline," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 124, pp. 120–124.
- Wu, T.Y. and Mei, C.C., 1966, "Two-Dimensional Gravity Waves in a Stratified Ocean," *Journal of Mathematics and Mechanics*, Vol. 10, pp. 482–486



< 윤 동 민 > < 윤 범 상 >