

비선형분산파랑모형을 이용한 항주파의 발생과 전파에 관한 수치예측모형 개발

신승호* · 정대득**

*일본 항만공학기술연구소 해양·수공부 외국인특별연구원, **목포해양대학교 해상운송시스템공학과 교수

Numerical Prediction of Ship Induced Wave and its Propagation Using Nonlinear Dispersive Wave Model

Seung-Ho Shin* · Dae-Deug Jeong**

*Dr. Engg., Department of Marine environment and Engineering, Port and Airport Research Institute, 239-0826, Japan

**Ph. D., Professor, Department of Maritime transportation system, Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 선박의 항행에 의해 발생하는 항주파의 특성은 선박의 속도와 수심 조건에 따라 크게 달라진다. 연안 항로에서 발생된 항주파는 주변 해안으로 전파됨에 따라 항만 내의 정은 수역을 교란하여 정박 중인 소형선박, 수영객 등에 돌발적이고도 심각한 위험을 가져다 줄뿐만 아니라 해안의 침식, 호안의 결파 등의 피해를 주기도 한다. 지금까지 항주파에 관한 연구의 관심사는 일정 수심 조건에 대해 조파저항이나 조선에 미치는 영향을 분석하는 등 주로 조선공학도의 관점에서 검토가 대상이 되어 왔으며, 가변 수심을 가진 실제 해역에 있어서의 항주파 발생과 전파에 기인한 주변 해역의 영향은 그다지 검토되지 못하였다. 최근 고속선 등의 발달로 인해 천해역에서의 항주파로 인한 인공 해역의 피해가 더욱 우려되고 있는 추세이다. 따라서 실제 수역에서의 항주파의 발달과 그 전파과정은 조사할 필요가 있는 것이다. 본 연구에서는 연안 해역의 얇고 복잡한 수로와 다양한 선속 조건에 대한 항주파의 발생 및 전파를 예측하기 위하여 고정 좌표계에서 Boussinesq 방정식을 토대로 항주파 수치예측 모형을 구축하였다. 제안된 모형은 수리모형실험 결과와의 비교를 통하여 검증하였으며, 또한 실제 수로를 토대로 한 가변 수심역에 개발된 모형을 적용하여 수심 변화 고려의 중요성을 확인하였다.

핵심용어 : 항주파, Boussinesq 방정식, 가변 수심, 고정좌표계, 세장선체이론, 굴절, 회절, 반사, 천수효과

Abstract : The characteristics of ship induced waves caused by navigation become widely different from both ship's speed and water depth condition. The ship induced waves specially generated in coastwise routes frequently give rise to call unforeseen danger for swimmers and small boats as well as shoreline erosion or sea wall destruction in coastal zones. The main concern of ship induced wave study until now is either how to reduce ship resistance or how to manoeuvre the ship safely under a constant water depth in the view point of shipbuilding engineers. Moreover, due to the trends for appearance of the high speed ships at the shallow coastal water, we are confronted with the danger of damages from those ship induced waves. Therefore, it is necessary to examine the development of ship induced waves and the influence of their deformation effects according to its propagation ray. In present study, in order to predict the development of the ship induced waves and their propagation under the conditions of complicate and variable shallow water depth with varying ship's speed, we constructed a computer model using Boussinesq equation with a fixed coordinate system and verified the model results by comparison with experimental results. Additionally, the model was applied under the variable water depth based on actual passage and we then confirmed the importance of the variable water depth consideration.

Key words : Ship induced wave, Boussinesq equation, Variable water depth, Fixed coordinate system, Slender body ship theory, Wave refraction, Diffraction, Reflection, Shoaling effect

1. 서 론

선박의 항행으로 인해 발생하는 파문(波紋)으로서 항적파(航跡波)라고도 불리는 항주파(航走波)는, 선박이 클수록 선속이 빠를수록 파고가 커지는 특징을 가지고 있다. 항주파에 관한 연구는 지금까지 조파저항(造波抵抗)이나 조선(操船)에의 영향 등 주로 조선공학적인 측면에서의 검토가 대부분이었으

며 그에 따라 일정 수심의 조건 하에서 많은 실험적 혹은 이론적인 연구가 행해져 왔다.

최근 연안 항해에 있어서 낮은 저항, 향상된 안전성 그리고 높은 운항 효율을 얻기 위한 고속선(High Speed Craft, HSC)의 개발이 급속히 진행되고 있으며, 이와 같은 고속선은 비교적 낮은 흘수를 유지함으로써 연안 항로 및 피난항과 같은 제한된 수심조건에 있어서의 운항을 가능하게 한다. 그러나

* 대표저자 : 신승호(중신회원), shinsh@pari.go.jp, +81-46-844-5045

** 중신회원, ddjeong@mmu.ac.kr, 061)240-7053

선박의 유체 동역학적인 관점으로 보면, 이러한 선박은 대개 수심을 기준으로 한 임계 속도 부근으로부터 초임계 속도의 범위에 이르기까지 고속으로 운항하여 연안 해역에 돌발적이 고도 높은 수면 변동을 야기하게 된다.

일반적으로 개방 해역에서의 항주파는, 발생 지점으로부터 주위로 전파되어갈수록 점차 에너지가 감쇠되고 결국 소멸되어 그다지 문제로 되지 않지만 항만 내나 연안 해역의 항로 등과 같이 수로의 폭이 좁거나 해안으로 접근함에 따라 수심이 알아지는 통상의 경우는, 발생된 항주파가 해안 측으로 전파되면서 굴절, 친수변형 및 반사, 회절 등의 변형을 일으키 오려려 파고가 증폭되어가는 현상도 발생할 수 있다.

연안에서의 항주파에 기인한 피해에 관해서는 제방의 결괴 및 해안선의 침식, 연안 습지에서의 해양 생물군에 대한 잠재적 충격 등이 있고, 항행 중 혹은 정박 중인 소형선박이나 해수욕객 등에 있어서는 항주파 특유의 돌발성으로 인해 더욱 위험이 가중되고 있다고 보고하고 있다(MarCom WG 41, 2002). 실제 수로에서 이와 같은 항주파가 문제시 되는 경우, 관련 대책을 수립하여 항 내의 안전을 도모하기 위해서는 항주파의 발생 및 전파에 따른 변형을 정밀도 높게 예측하고 분석할 필요가 있다.

일정 수심 및 단순한 경계조건에 있어서 항주파의 예측 및 분석은 종래부터 이론적 연구나 수리모형 실험을 통해 주로 행해져 왔으나, 복잡한 수심과 경계를 가진 실제 해역을 대상으로 할 경우는 이론적인 연구만으로는 충분하지 못하며 또한 수로의 조건을 잘 재현한 수리모형을 제작하여 항주파 실험을 행하기란 더더욱 막대한 수고와 노력이 필요하게 된다. 따라서 이를 대신하여 정밀도 높은 수치 모형을 수립하고 모의실험을 수행하고자 하는 노력은 경제적으로나 공학적으로도 큰 의의를 가진다고 할 수 있다.

조선공학 분야에서 단일 수심에서 단순한 개방해역 조건을 전제로 적용해 온 기존의 항주파 수치 모형(예를 들면, potential flow 모형)과는 달리 항주파의 자체의 발생뿐만 아니라 전파도 포함된 복합적인 해석을 위한 시도는 과거 몇몇의 관련 연구자에 의해 진행되어 왔다. Kofoed-Hansen(1996) 및 Kirk(1998)은 spectral wind-wave 모형을 제안하여 항주파를 계산하고 있으나, 반사 등이 고려되지 못한 개방해역 조건을 전제함으로써 협수로 통항 및 안벽에서의 파고 검토에는 어려움이 있었으며, Raven(2000)은 wake 모형과 파 변형 모형을 결합한 형태의 모형을 제안하고, Chen and Sharma(1995)는 단순화된 KP 방정식(Kadomtsev-Petviashvili equation)에 세장선체(slender ship)이론을 도입하여 파의 변형이 포함된 항주파 계산을 시도하여 좋은 일치를 보였다. 그러나 이들 모형은 선박을 중심으로 하는 이동 좌표계를 도입하여 해석함으로써 실 수역, 가변 수심 등에 대한 적용에는 여전히 난점이 존재하였다.

한편, 항주파의 전파와 그로 인한 파의 변형이 중요한 요소로 부각되는 해역이 천해(淺海)의 항로 및 수로임을 감안하여, 약비선형이긴 하지만 천해역에서 파랑의 굴절, 회절, 반사 및

천수효과 등 복합적인 제반 파랑 변형 현상을 높은 정밀도로 예측할 수 있는 Boussinesq 계열의 방정식을 토대로 항주파를 계산한 예도 최근 나타나고 있다. (Tanimoto, 2000)은 세장선체 이론의 간략화를 통해 Boussinesq 모형 내에 항주파 모형을 직접 도입함으로써 폭이 좁은 하천에서의 항주파를 모의하고 있다. (Doom, 2002)은 선박 주위의 유동장을 해석하는 기존의 3D potential flow 모형(RAPID model)과 파랑 변형 계산을 위한 Boussinesq-type 모형(TRITON model)을 결합한 coupling 모형을 제안하고 있으나, 계산 영역이 선박 인근 및 외부로 분할됨으로써, 발생된 항주파가 일정 거리를 전파한 후에 파랑 변형 모형으로 일방적인 파 전달(한 방향만으로)을 수행하게 되므로, 이로 인하여 좁은 수역에서의 항행 등과 같이 발생한 항주파가 수로에서 반사되어 다시 항주파 발생 영역으로 재차 도달하게 되는 경우는 두 모형의 접속경계 주위에서 파랑의 연속성이 만족되지 않아 적용에 제한이 따르리라 사료된다.

본 연구에서는 실제 연안 해역에서의 복잡한 수로 조건이나 선속의 조건에 대한 항주파를 예측하기 위해 고정 좌표계에서 비선형분산파동모형을 토대로 한 항주파 수치예측 모형을 구축하였다. 모형은 수리모형실험 결과와의 비교로 타당성을 검증하였으며, 추가로 실제 수로에서의 항주파를 모의함으로써 제안된 모형의 적용성을 검토하였다.

2. 항주파의 형상과 특성

항주파의 물리적인 메커니즘에 대한 분석은 Kelvin(1887)에 의해 처음 시도되었으며 그 형상은 Kelvin wash로 일컬어지는 썩기 형상으로 규정되고 있다(Fig. 1(a)). 심해 조건에서 항행 중인 선박이 일으키는 Kelvin wash의 패턴은 선박의 항주중심선으로부터 $90^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 의 각도로 전파되는 발산파(diverging wave)와 $35^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 로 전파되는 횡파(transverse wave)로 구분되어지고, 첨두를 잇는 선 상(cusp locus)의 약간 내측에서 서로 만나 이점에서 파고가 최대가 되는 특징이 있다. Kelvin wash의 특성에 있어서 가장 중요한 인자는 length Froude number(Fr_L)로 주어지는 선박의 수선 길이(waterline length, L_s)에 대한 선속(V_s)의 비로서 식 (1)과 같은 관계로 정의되며 심해 조건에 한하여 성립된다. 이때 심해(deep water)라는 용어는 파의 위상속도가 해저면의 영향을 받지 않음을 의미한다.

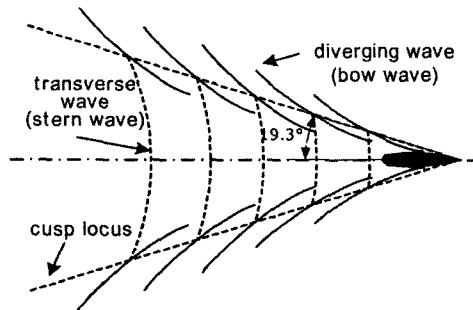
$$Fr_L = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} \quad (1)$$

항주파의 파장 및 주기는 발산파와 횡파가 서로 다르며 횡파가 상대적으로 길다. 발산파의 주기 및 파장은, 발산파의 진행방향에 대한 선박의 속도 성분이 발산파의 파속과 같다는 조건에 의해 구해지며, 횡파의 경우는 횡파의 파속이 선박의 전진속도와 같다는 조건에 의해 구해진다(運輸省港灣局, 1999).

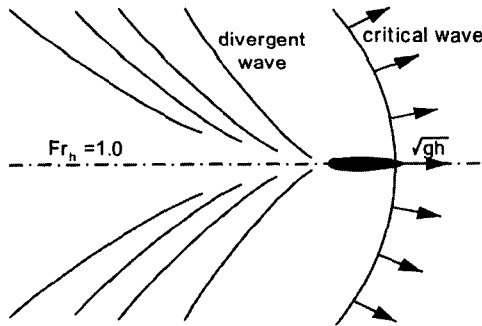
일반적인 수면파와 마찬가지로 항주파도 파장에 비해 수심이 얇아지면 수심의 영향을 받아 성질이 변하게 된다. Iavelock(1908)은 천해 조건에서의 항주파를 조사하면서 식 2)와 같은 depth Froude number(Fr_h)를 도입하여 수심 h)과 선속의 함수로서 제한된 수심에서의 항주파 형상을 논의하였다.

$$Fr_h = \frac{V_s}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

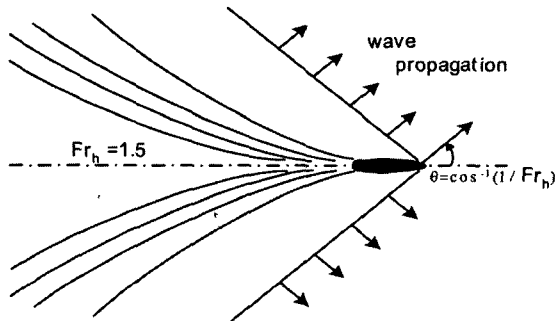
주어진 수심 조건에 대한 천해파의 최대 전파속도(\sqrt{gh})와 선속(V_s)이 동일한 즉 $Fr_h=1.0$ 의 선속을 임계속도라 한다. 임계속도 부근에서는 항주파의 형상이 급변할 뿐만 아니라 조파저항도 극단적으로 커지며, 선박 후미의 횡파는 거



(a) steady state Kelvin wash pattern in deep water



(b) critical wash pattern in constant water depth



(c) supercritical wash pattern in constant water depth

Fig. 1 Ship-induced wave patterns in open boundary condition(referred to MarCom WG 41(2002))의 사라지고 전면에는 수직한 임계파(critical wave)가 발달한

다(Fig. 1(b)). 이러한 임계파의 형상은 거리의 함수로서 시간에 따라 변화하여 정상상태에 이르지 않는다(MarCom WG 41, 2002).

일정 수심에서 Fr_h 가 더욱 커지면 첫 번째 파의 파봉은 직선으로 변하게 된다. Fig. 1(c)는 $Fr_h=1.5$ 의 경우에 대한 항주파를 도시한 것이다.

천해에서의 항주파의 형상 결정에 지배적인 역할을 하는 선박의 속도와 수심과의 관계를 Fr_h 를 기준으로 도시한 것이 Fig. 2이며, 일본항만설계기준(運輸省港灣局, 1999)에서는 수심의 효과를 무시할 수 있는, 이른바 심해 조건으로 간주될 수 있는 한계수심 조건으로 $Fr_h \leq 0.7$ 을 들고 있다.

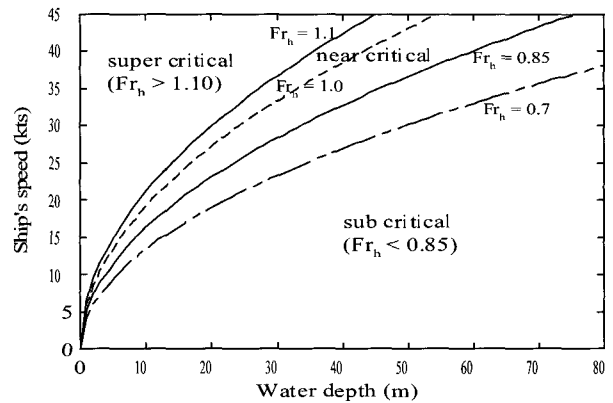


Fig. 2 Wake regime depending on ship speed and water depth

3. 항주파의 수치모형

가변 수심역에 해당하는 실제 수로를 선박이 항행함으로 인해 발생하는 항주파는 해당 위치에서의 수심과 선속의 비에 따라 심해파의 특성을 지니기도 하고 혹은 천해파로서의 특성을 가지기도 한다. 또한 수로에서 상대적으로 깊은 수심에 해당하는 항로에서 형성된 항주파인 경우에도 수로 내 얇은 수심이 형성되어 있는 주변으로 전파되어가며 점차 수심의 영향을 강하게 받게 되어 굴절, 천수변형 등을 일으키고 방파제 등의 구조물에 의한 회절 그리고 안벽에서의 반사 등에 의해 파고가 점차 증폭되는 경우도 종종 발생한다.

이와 같은 이유로 실제 수로를 대상으로 하는 항주파의 계산 모형은, 종래 조선공학적 관점에서 관심을 가져왔던 항주파 자체의 발생뿐만 아니라 가변 수심역에서의 전파에 따른 모든 파랑변형 요소가 정밀도 높게 계산되어야 하며 따라서 본 연구에서는 가변 수심역에 대해 정밀도 높은 파랑변형을 모의할 수 있는 비선형분산파동모형을 토대로 항주파 생성 모형을 부가시키기로 하였다.

3.1 비선형분산파동모형

장파이론은 파장 · 수심비($\mu \equiv kh$)가 작고, 중력 가속도에 비해 수립자의 연직 가속도가 작은 경우에 적용되는 수면파

이론으로서 일반적으로 선형장파이론, 비선형장파이론 그리고 비선형분산파이론으로 분류된다. 비선형분산파이론을 토대로 μ 와 파고·수심비($\delta \equiv A/h$)를 조합하여 파의 비선형 강도를 나타내는 Ursell 수($U_r = \delta/\mu^2$)의 크기를 $U_r \approx 1$ (즉 $\delta = \mu^2 < 1$)로 고려하고, 이를 섭동법으로 2차 근사($O(\mu^4)$)까지 유도한 것으로서 Boussinesq방정식이 있다.

1872년 Boussinesq에 의해 처음으로 유도된 일정 수심에 대한 Boussinesq방정식은 Peregrine(1967)에 의해 가변 수심에 대한 방정식으로 확장되어 평면 파랑장의 계산을 위해 현재까지 개발된 식 가운데에서 가장 정확하고 널리 이용되는 식으로 평가받고 있다.

한편, 가변 수심역에서의 Boussinesq방정식은 장파에서 천수파에 걸친 비선형분산파동의 시·공간적 발전을 높은 정밀도로 직접 추적할 수 있으나 장파 주위의 약 분산성에 대한 가정으로부터 상대수심 $0 < h/L < 0.06$ 범위의 천해역에 한하여 그 정밀도를 보장할 수 있었다. 이러한 적용 범위에 대한 제한을 극복하기 위해 Madsen.(1992)은 Pade 근사에 의해 분산항에 보정계수 B 를 도입함으로써 천해역과 심해역의 주파수 분산이 통일된 방정식을 제안하여 $0 < h/L < 0.3$ 의 심해역에 이르기까지 적용범위를 확장시켰다.

본 연구에서는 천해역에서의 적용성을 더욱 확장시키기 위해 Madsen.(1992)의 확장 Boussinesq방정식에 저면 마찰항 및 쇄파 모형을 부가하고 그 타당성을 확인한(申, 1999a; 申, 1999b) 식 (3)~(5)을 토대로 항주파 모형을 구축하기로 하였다.

$$\eta_t + p_x + q_y = 0 \tag{3}$$

$$p_t + \left(\frac{p^2}{D}\right)_x + \left(\frac{pq}{D}\right)_y + gD\eta_x - M_1 + F_1 + \varepsilon p = \left(B + \frac{1}{3}\right)h^2(p_{xxt} + q_{xyt}) + Bgh^3(\eta_{xxx} + \eta_{xyy}) + hh_x\left(\frac{1}{3}p_{xt} + \frac{1}{6}q_{yt} + 2Bgh\eta_{xx} + Bgh\eta_{yy}\right) + hh_y\left(\frac{1}{6}q_{xy} + Bgh\eta_{xy}\right) \tag{4}$$

$$q_t + \left(\frac{q^2}{D}\right)_y + \left(\frac{pq}{D}\right)_x + gD\eta_y - M_2 + F_2 + \varepsilon q = \left(B + \frac{1}{3}\right)h^2(q_{yyt} + p_{xyt}) + Bgh^3(\eta_{yyy} + \eta_{xxy}) + hh_y\left(\frac{1}{3}q_{yt} + \frac{1}{6}p_{xt} + 2Bgh\eta_{yy} + Bgh\eta_{xx}\right) + hh_x\left(\frac{1}{6}p_{yt} + Bgh\eta_{xy}\right) \tag{5}$$

여기서, p, q 는 x, y 방향의 선유량, h 는 수심, η 는 수면 변동량, $D = \eta + h$, ε 는 흡수경계 처리를 위한 파 에너지 흡수 계수를 나타내며, 분산항의 보정계수인 B 는 1/15를 취하였다.

쇄파에 의한 에너지 소산은 와동점성계수 ν 를 부여하는

것에 의해 고려하였고, 식 (4), (5)에서 M_1, M_2 으로 나타낸 운동량 혼합항은 식 (6)과 같이 표현되며

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \nu(p_{xx} + p_{yy}) \\ M_2 &= \nu(q_{xx} + q_{yy}) \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

와동점성계수 ν 는 片山(1993)의 제안을 따라 식 (7)과 같이 부여한다.

$$\left. \begin{aligned} \nu &= \frac{\alpha_D s g h_m}{\omega^2} \sqrt{\frac{g}{h_m} \cdot \frac{\hat{Q} - Q_r}{Q_s - Q_r}} \\ Q_s &= 0.4(0.57 + 5.3s)\sqrt{gh_m^3} \\ Q_r &= 0.135\sqrt{gh_m^3} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

여기서, h_m 은 평균수심, s 는 해저면 경사, ω 는 각주파수, α_D 는 계수, \hat{Q} 는 선유량 $Q (= \sqrt{p^2 + q^2})$ 의 진폭이다. 한편, 식 (4), (5)에서 F_1, F_2 로 표현한 저면 마찰항은 다음과 같이 표현한다.

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{f}{2D^2} p \sqrt{p^2 + q^2} \\ F_2 &= \frac{f}{2D^2} q \sqrt{p^2 + q^2} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

여기서, f 는 마찰계수이며 0.1로 취하였다.

3.2 항주파 생성 모형

선박의 항행에 의한 교란은 세장선체(slender body)를 가정하여 선상(線狀)의 source와 sink에 의해 근사하기로 한다 (Tuck, 1966; Chen, 1995; Tanimoto, 2000). 선박이 x 축 상을 속도 V_s 로 진행하는 것으로 하고, 선박의 물수 단면적 분포를 $S(x)$ 로 하면 각 단면에서 source의 강도는 질량보존의 법칙으로부터 $V_s dS/dx$ 로 나타난다. 또한 세장선체의 경우는 선체의 진행에 따라 해수가 거의 횡방향으로 분리되는 것으로부터 선체 부근의 영역에서는 선체가 배제시킨 단면적에 해당하는 양만큼의 선유량이 q_s 로서 횡방향으로 배출된다고 고려할 수 있다. 좌우 대칭인 선박에서는 양측으로 배출되는 해수의 양이 같으므로 결국 선체에 의한 교란은 선박의 항주 중심선 상(y_s)에서의 경계조건으로서 다음과 같이 부여된다.

$$q_s|_{y_s, y=0} = \pm \frac{1}{2} V_s \frac{dS}{dx} \tag{9}$$

식 (9)에 의한 교란은 근사적이긴 하지만 선수 부근에서 해수를 헤쳐 나가고 선미 부근에서 해수가 유입된다고 하는 물리적 현상이 표현되며, 이러한 선체의 경계를 이동시키면서 식 (3)~(5)의 방정식에 의해 파의 전파를 계산함에 따라 항주파의 수치 모의를 수행할 수 있다.

선박의 단면적 분포는 선종이나 단면의 설계에 따라 달라지

므로 일의적으로 정하긴 어렵지만, 본 연구에서는 선체의 길이와 중앙에서의 물수 단면적 $S(x)$ 만을 지배적인 파라미터로 간주하고 길이에 따른 단면적의 변화를 다음과 같은 포물선 함수 분포로 부여하였다.

$$S(x_s) = S_0 \left[1 - \left(\frac{2x_s}{L_s} \right)^2 \right] \quad (10)$$

여기서, x_s 는 선체 중앙으로부터의 거리이며, S_0 는 선체 중앙에서의 물수 단면적으로서 선체의 폭을 B_s , 흘수를 d 라 하고 중앙단면계수를 α 로 하면 다음과 같이 부여할 수 있다.

$$S_0 = \alpha B_s d \quad (11)$$

3.3 수치계산 기법 및 계산의 안정을 위한 조치

1) 수치계산 기법

지배방정식 (3)~(5)는 수위와 선유량을 서로 1/2 격자만큼 어긋나게 배치한 staggered mesh를 사용하여 차분화하였으며, 선유량 p, q 를 구할 때, time step을 1/2 Δt 씩 어긋나게 전·후반으로 나누고 전반의 time step $n\Delta t \rightarrow (n+1)\Delta t$ 에 있어서는 x 방향의 선유량 p 와 η 를, 후반의 time step $(n+1/2)\Delta t \rightarrow (n+3/2)\Delta t$ 에 있어서는 y 방향의 선유량 q 와 η 를 교호로 계산하는 ADI법(Alternating Directional Implicit Method)을 도입하였다. 차분방정식 및 각 경계조건의 처리에 관한 기법은 (申, 2000)에 상세히 기술되어 있다.

선박은 세장선체(slender body)의 가정을 토대로 선체의 길이 L_s 에 해당하는 선상(線狀)의 이동 경계로 처리되며, 때 time step에서 경계조건으로 식 (9)에 제시한 횡방향 선유량을 배출하게 된다. 공간적인 격자 간격은 발생하는 항주파의 파장에 대해 대략 1/10 정도의 해상도를 가지도록 배려하였으며, time step Δt 는 선박이 매 2 step에 하나의 격자를 진행하도록 $\Delta t = \Delta x / (2V_s)$ 로 설정하였다.

2) 계산의 안정을 위한 조치

본 연구에서와 같은 비선형계의 방정식은 경계 등에서의 미세한 조건 변화가 곧 수치적 불안정으로 이어지는 경우가 많다. 본 계산에 있어서도 비선형 방정식과 선유량을 발생하는 선체의 경계조건이라는 것과 실 해역을 대상으로 하는 계산에 있어서 선유량을 배출하는 선체 경계가 선박의 진행에 의해 계속 이동하게 됨에 따라 경계조건을 부여하는 곳에서 미소하지만 연속적인 수심 변화가 생긴다는 것이 수치적 불안정을 발생시키는 계기로 작용하였다.

일반적으로 비선형계 방정식에 있어서 이러한 종류의 수치적 불안정에 대한 엄밀한 분석은 거의 불가능하며 여기서는

경험적인 수치계산 기법을 도입하기로 하였다. 구체적으로는 수치적인 불안정을 극복하기 위해, x 혹은 y 방향의 선유량을 U 라 할 때 선체 경계를 중심으로 일정 범위에 대해 $\nu_s U_{xx}, \nu_s U_{yy}$ 형태의 극소한 인공 점성을 부가하여 계산의 불안정을 억제하도록 하였다. ν_s 는 식 (12)와 같은 형태로 설정하였으며,

$$\nu_s = C_0 \cdot \sqrt{gh_m} h_m / s \quad (12)$$

여기서, h_m 은 평균 수심, s 는 해저면 경사이다. 계수 C_0 는 수치계산이 불안정한 상태로 발전하지 않으면서 또한 점성 효과로 인한 파고 감쇠가 최소로 되도록 매 계산마다 시행착오(Trial and Error)법으로 결정하였다. 본 연구에서는 대략 0.001~0.003 범위의 값으로 안정된 계산을 수행할 수 있었으며 인공 점성을 부여한 범위는 선수위치로부터 후방으로 20 L_s 까지, 선체 중앙으로부터 좌·우 5 Δy 까지의 범위이다.

4. 수치실험과 검증

4.1 항주파의 발달

우선, 수심 0.125m, 수로 폭 4.88m인 좁고 긴 실험 수로에서 정지 수면으로부터 선박이 출발하여 항주파가 발달해가는 양상을 고찰하기로 한다. 이 경우 모형 선박의 선체 중앙 단면적 (S_0)은 0.01729m²로서, 반사 측벽을 가진 수로 단면적 (S_w)과의 비로 정의되는 블록계수(blockage coefficient) $C_b (= S_0/S_w)$ 는 0.028에 해당한다. 선박의 속도는 Fr_h 가 0.8, 1.0, 1.2에 해당하는 0.885m/s, 1.1068m/s, 1.328m/s에 대해 검토하였고, 일정 수심에서 양 측벽에서 반사가 일어나지 않도록 측벽을 흡수 경계로 처리한 경우도 따로 계산하여 각각 Fig. 1(a), (b), (c)의 항주파 형상이 모두 재현됨을 확인하였다. 이하에서는 $Fr_h=1.0$ 인 임계속도에 대한 항주파의 발달에 관하여 기술한다.

Fig. 3은 $C_b = 0.028$ 의 좁은 수로에서 정지수면으로부터 선박의 출발과 동시에 계산을 개시하여 1, 5, 10, 20, 30, 40sec 시각에 이른 항주파 형상을 나타낸 것이며, 각 시간별로 선박의 중심으로부터 전후 10m 범위(1sec의 경우는 전후 5m 범위)의 계산 결과를 제시하고 있다. 선박의 진행과 함께 교란이 퍼져 나가 측면에 달하게 되고 선박의 후방에서 반사파와 중첩되어가는 양상이 잘 나타나 있다. 또한 선박의 전면에서는 2차원화 되어 가는 파가 점차 발달되어 soliton을 형성하고 그 수가 늘어나고 있는 양상도 확인된다. 항주 시간(혹은 항주 거리)에 따라 제1파가 발달하면서 soliton으로 형성되어가는 이 같은 수위 변화는 좁은 수로에서 형성되는 항주파의 중요한 특성이며, (Ertekin, 1985)의 실험에서 지적된 바가 있는데 본

연구에서 제시한 모형에서도 잘 모의되고 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 4는 선박의 제원, 선속, 수심 등에 있어서는 Fig. 3 과 동일한 조건이지만, 양 측벽을 흡수 경계로 처리하여 계산 함으로써 측벽의 영향을 완전히 배제한 조건에서 항주파를 모 의한 결과이다. 선박의 출발로부터 초기 5sec까지의 항주파는 선박의 전·후면 모두에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않고 있지만, Fig. 3에서 제시된 바와 같이 발달된 항주파가 측벽에서 반사되어 그 영향이 후면에 나타난 10sec 이후의 경우에 있어서는 차이가 현저하다. 특히 선박의 전면에서는 고립파가 형 성되고 있으나 파고는 상대적으로 작게 나타나며, 좁은 수로 의 경우에서와 같은 현저한 2차원화 및 soliton은 형성되지 않 음을 알 수 있다.

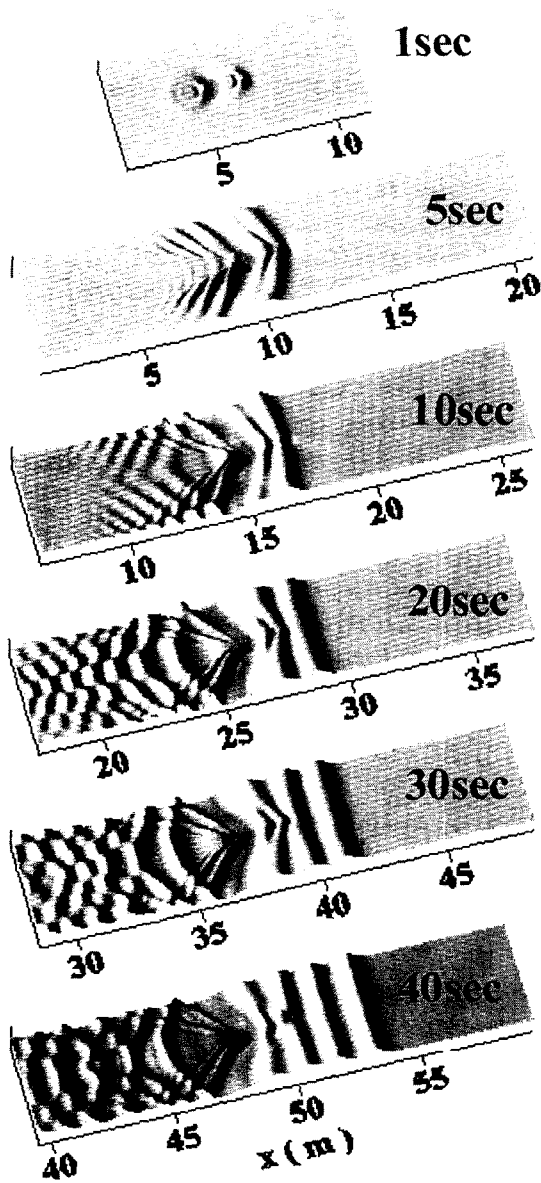


Fig. 3 Ship induced wave evaluation at the critical speed in narrow channel($C_b=0.028$, constant depth)

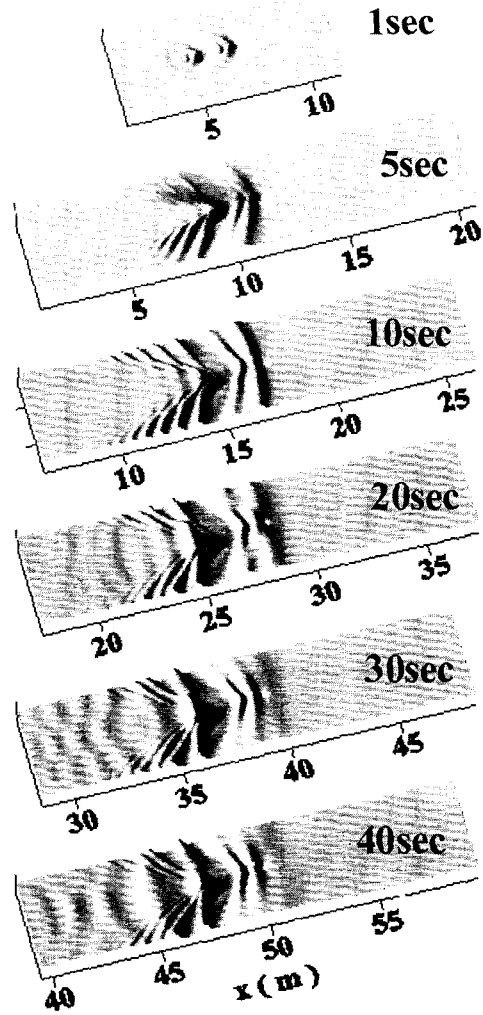
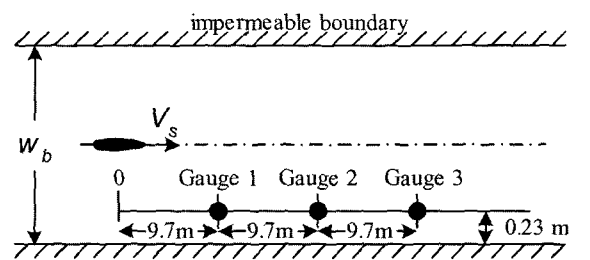
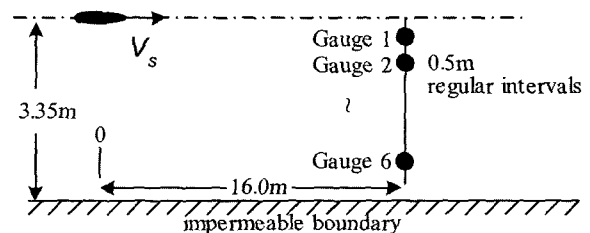


Fig. 4 Ship induced wave evaluation at the critical speed in absorption boundary (constant depth)



(a) Experimental condition of Ertekin et al.(1985)



(b) Experimental condition of Tanimoto et al.(2000)

Fig. 5 Ship wake experiments and the position of wave gauges

4.2 실험결과와의 비교를 통한 모형의 검증

모형의 검증을 위해 Fig. 5(a)에 제시한 (Ertekin, 1985)의 예항 실험 조건 및 Fig. 5(b)의 (Tanimoto, 2000)의 실험 조건을 토대로 계산을 수행하여 항주파의 시간파형, 선박의 전면에서 발생하는 soliton 및 항주선을 중심으로 한 횡방향의 최대파고에 대하여 실험치와 비교하였다.

1) 시간파형의 비교

Fig. 6은 수심 0.125m, 수로 폭(w_b) 2.44m이며 $Fr_h = 1.0$ 인 경우인 (Ertekin, 1985)의 실험결과와 동일 조건에서 계산을 수행하고 그 결과를 비교한 것이다.

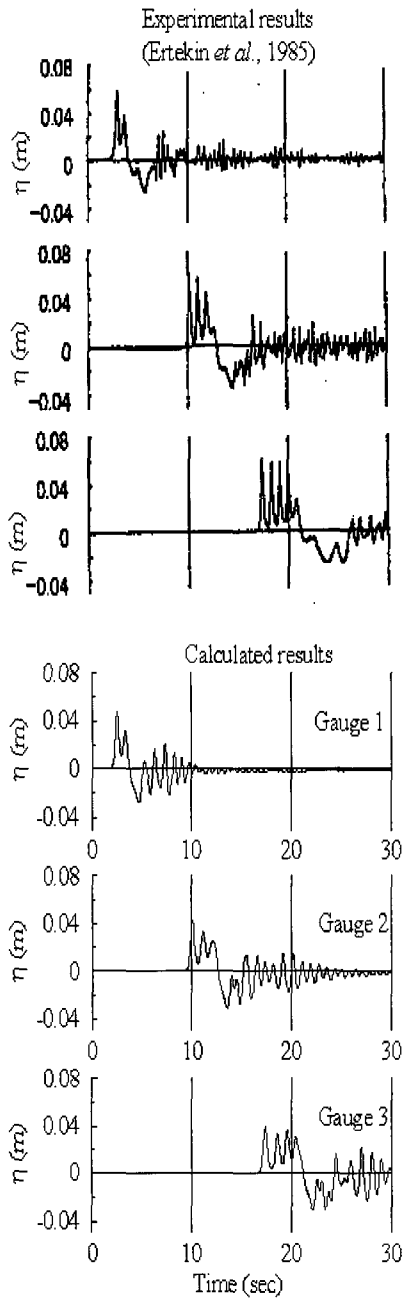


Fig. 6 Comparison between time profile of ship waves

실험에 있어서는 Fig. 5(a)에 나타낸 바와 같이 수로의 측면에서 0.23m 떨어진 측정선 상의 3점(선박의 출발 위치로부터 9.7m 간격의 Gauge 1~3)에 파고계를 설치하여 이 점들에 대한 수위의 시간 변동치를 검토하였다. 이때 모형 선박의 물수 중앙 단면적은 $0.01729m^2$ 로서 블록계수는 $C_b = 0.0567$ 에 해당한다. 실험 결과로부터 Gauge 1에서 Gauge 3으로의 이동 즉 항주 거리가 증가함에 따라 soliton의 개수가 늘어나는 것을 알 수 있으며 계산 결과에서도 항주 거리에 따라 동일 개수의 soliton이 재현되고 있음을 알 수 있다. 선박이 파고계를 통과한 후의 파형에서는 약간의 차이가 나타나고 있지만, 전반적으로는 좋은 일치율을 보인다고 판단된다.

2) Soliton의 비교

좁은 수로에서 특히 발달하게 되는 soliton의 높이(H_s)에 대한 정량적인 비교는 Fig. 5(a)의 실험조건에 따라 수심을 0.1m로 고정하고 $Fr_h = 0.6 \sim 1.2$ 의 조건에 대해, 수로의 폭(w_b)을 1.22m, 2.44m, 4.88m 즉 $C_b = 0.0235, 0.0470, 0.0941$ 로 변화시키면서 검토하였다. 이때, 비교하는 위치는 Fig. 5(a)의 Gauge 3 파고계의 값이며, soliton의 높이는 제1파의 높이(최고 수위)이다.

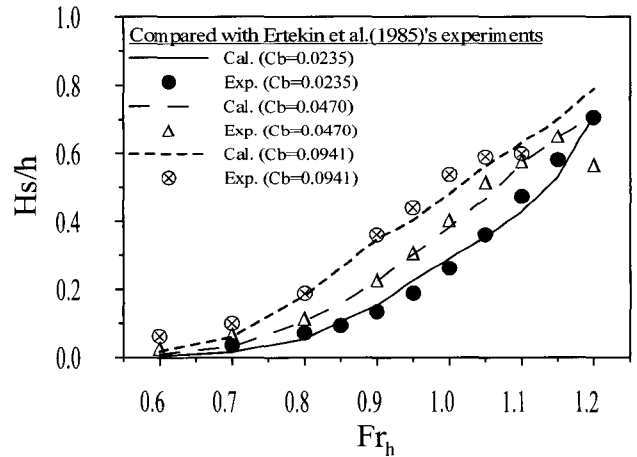


Fig. 7 Height of solitons against the depth Froude number

Fig. 7은 soliton의 높이를 수심 h 로 무차원화하여 비교한 것이다. 실험치에 비해 계산치가 약간 작게 평가되는 경향이 있지만, 전반적으로 양호한 일치율을 보인다. 단, $Fr_h = 1.1$ 이상의 조건에서 $C_b = 0.0941$ 의 경우와, 1.2의 조건에서 $C_b = 0.0470$ 의 경우 등에서 나타난 실험치의 갑작스런 저하는 높은 파가 형성된 상황에서 파봉이 부서진 결과로 추측되며, 본 모형의 계산에 있어서는 이러한 현상을 고려하지 않으므로 높은 값이 그대로 나타난 것이다. 실험 및 계산의 결과로부터 soliton의 높이는 수로의 폭이 좁아질수록, Fr_h 가 커질수록 증가함을 알 수 있다.

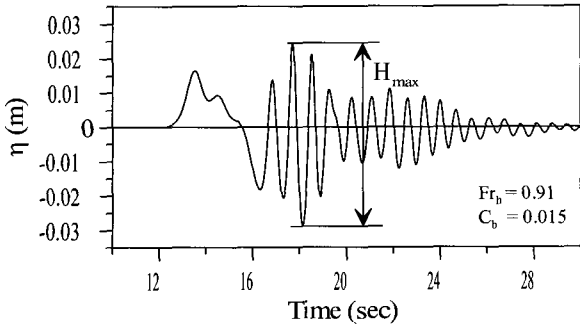


Fig. 8 Time series of ship induced wave profile and definition of the maximum wave height

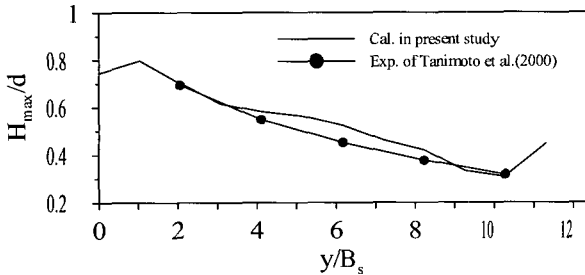


Fig. 9 Comparison of the maximum wave height

3) 항주선으로부터의 거리에 따른 최대파고의 비교

항주선으로부터의 거리에 따른 최대파고의 변화를 검토하기 위하여 Fig. 5(b)에 제시한 Tanimoto.(2000)의 실험조건에 대해 수치계산을 행하였다. 수심은 0.146m이며 $C_b = 0.015$, $Fr_h = 0.91$ 이고, 모형선은 길이(L_s) 1.367m, 폭(B_s) 0.243m, 흘수(d) 0.098m의 조건이다.

Fig. 8은 항주파의 최대파고(H_{max})를 정의하기 위한 것으로써, 항주 중심선으로부터 2m 떨어진 Gauge 4 위치(Fig. 5(b))에서 나타난 항주파의 계산 결과를 제시한 것이며, 계산된 항주파의 파형 기록으로부터 zero up cross법으로 파를 분할하여 개개의 파고를 구하고 그 크기가 최대인 것을 최대파고로 정의하였다.

Fig. 9는 항주선으로부터의 횡방향 거리에 따른 최대파고에 대해 실험치와 계산치를 비교한 결과로서, 가로축은 항주 중심선으로부터의 거리를 선폭으로, 세로축은 최대파고를 모형선의 흘수로 무차원화한 것이다. 모든 구간에 있어서 두 값이 정확히 일치되지는 않지만 만족할 만 정도라 판단된다. 단, 거리가 $y/B_s \approx 11$ 이상이 되는 곳에서는 계산치에 갑작스런 증가가 보이고 있는데 이는 측벽에 의한 반사파의 영향이 계산된 결과로 사료된다.

5. 가변 수심역에서의 항주파 모의

본 연구에서 제시한 모형의 가변 수심역에 대한 적용성을

검토하기 위해 실제 수로에서 항주파의 전파를 모의하고 해안 측 안벽에서의 수위 변동을 추출하여 수심 변화로 인한 파의 증폭 효과를 확인하였다.

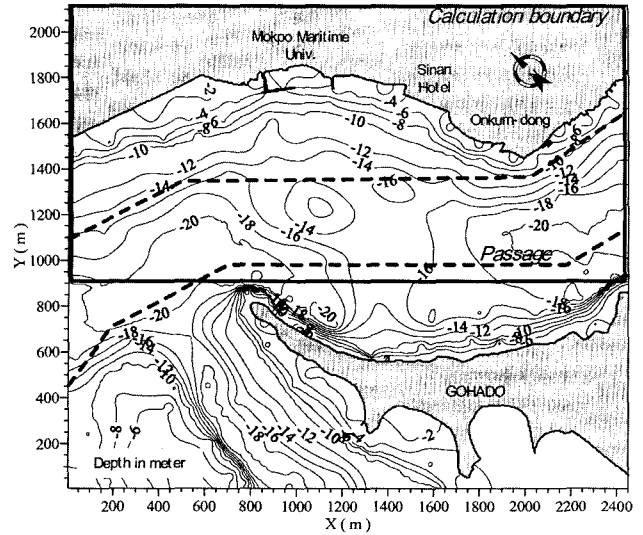


Fig. 10 Study area and calculation boundary

Table 1 Situation in navigation through Mokpo passage (00:00~12:00, Sept. 20, 2003)

No.	정행봉과 (2003/9/20, 00:00~12:00)				선박제원					
	시각	속도 (kts)	정행이격거리 / 평균수심(m)	통항 방식	Fr_h	선 종	톤수 (G/T)	L_s (m)	B_s (m)	d (m)
1	00:45	8.1	830 / 17	입항	0.32	-	54	26.1	5.2	2.6
2	00:58	16.3	650 / 12	입항	0.77	일반화물선	2,680	101.5	20.0	10.7
3	01:11	10.4	640 / 12	입항	0.49	벌크선	941	63.1	12.2	6.0
4	05:09	6.4	660 / 12	출항	0.30	모래운반선	95	23.5	7.4	2.0
5	06:15	6.7	210 / 11	-	0.33	어선	5	10.0	2.6	1.0
6	06:17	10.6	610 / 12	-	0.50	모래운반선	481	54.1	12.0	5.4
7	06:22	11.4	230 / 12	-	0.54	어선	5	10.0	2.6	1.0
8	06:48	10.2	700 / 15	출항	0.43	어선	5	10.0	2.6	1.0
9	07:43	12.0	440 / 14	출항	0.53	모래운반선	658	68.8	14	4.5
10	08:30	8.5	400 / 14	입항	0.37	어선	5	10.0	2.6	1.0
11	09:29	10.4	440 / 14	입항	0.46	어선	5	10.0	2.6	1.0
12	10:07	7.1	108 / 8	입항	0.41	어선	5	10.0	2.6	1.0
13	10:30	13.3	620 / 12	출항	0.63	화객선	208	45.2	8.4	2.5
14	11:34	31.0	630 / 12	입항	1.47	고속선	321	38.0	10.1	4.8

5.1 대상수로의 개요

가변 수심에서의 항주파 변형을 고찰하기 위해 대상으로 한 수로는 Fig. 10에 제시한 목포항 입구의 약 2.5 km 직선 수로 구간이다. 이 수로는 배후에 높이 227m의 유달산이 있어 북풍을 막고 전면에는 영암반도와 고하도가 남쪽으로부터의 풍파를 충분히 차폐하고 있어 통상 기상 및 해상에 기인하는 파랑의 위협을 거의 받지 않는 정온 수역이 확보되고 있는 곳이지만, 본 수로를 항주하는 선박에 의해 발생하는 항주파의 영향으로 그림에서 표시한 목포해양대학교 전면 안벽에서는 정박

중인 실습선의 승하선 시에 종종 위협적인 수면의 교란을 감지하고 있는 실정이다.

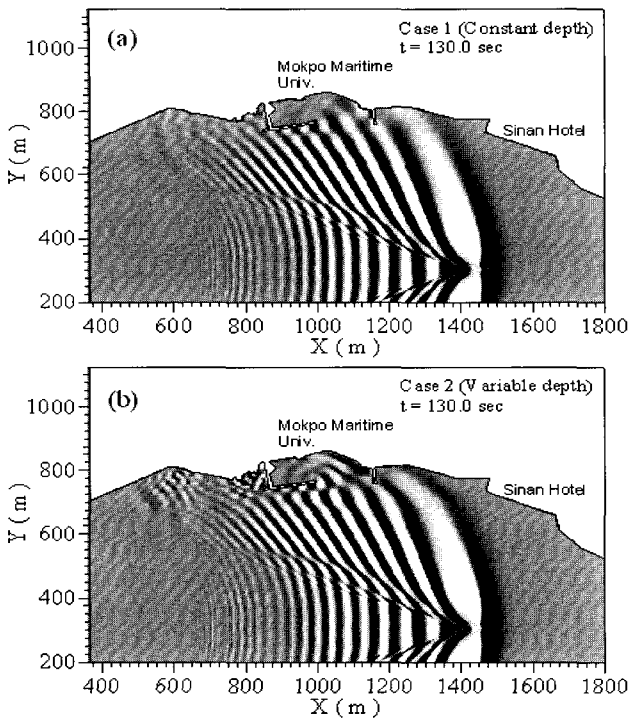


Fig. 11 Comparison of ship induced wave propagations in field

한편, 목포항을 기종점으로 출입항하는 선박은 Table 1에 나타낸 바와 같이 어선을 비롯한 모래 운반선, 화물선, 화객선 및 고속선 등으로 선종이 다양하며, 목포해양대학교 전면 안벽을 정형 통과하는 이격거리와 각 선박의 항주속도 및 수심과의 관계로부터 다양한 패턴의 항주파가 발생되어 대상 지점으로 전파하게 될 것임을 유추할 수 있다.

수로의 폭은 목포항 입구 측의 약 800m로부터 목포해양대학교 전면 안벽의 정형 위치에서 1200m로 넓어져 900m 정도로 다시 좁아지고 있다. 수심은 폭 350m인 항로의 경우 10~20m정도의 분포를 가지고 있고, 이로부터 목포해양대학교 전면 안벽에 이르기까지는 점진적으로 알아지고 있다. 또한 안벽 주변에는 방파제 등도 존재하여, 안벽의 전면까지 전파되는 항주파는 굴절, 천수변형뿐만 아니라 반사, 회절 등이 복합된 변형을 일으키게 되리라 사료된다.

5.2 항주파 수치 모의와 가변 수심의 영향

항주파 계산에 있어서 가변 수심의 영향을 확인하기 위해서는 항로를 항주하는 소형 선박에 의해 발생한 항주파가 안벽 부근에서 어떠한 형태로 증폭될 것인가를 검토할 필요가 있다.

본 계산에서는 목포해양대학교 전면 부두에서의 교란을 토대로 비교하는 것으로 하고 Fig. 10에서 제시한 대상 수로에 대해 일정 수심 및 가변 수심의 조건에서 각각 수치 모의를 수행하였다.

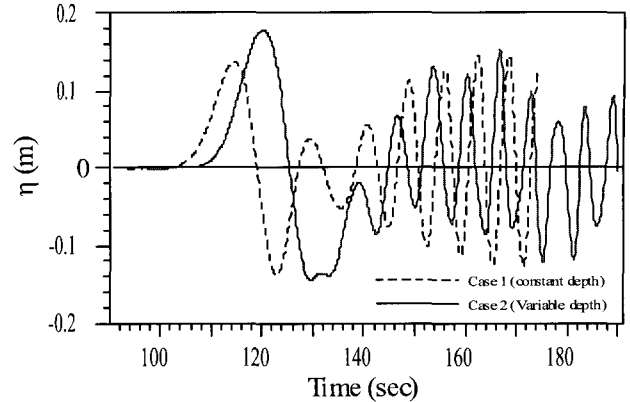


Fig. 12 Comparison of surface elevations in target point

계산 범위는 대상 안벽 전면으로부터 항로를 포함한 수직 거리(y 방향) 950m 전면 수역까지로 하고(Fig. 10 계산 범위 참조) 공간격자 간격($\Delta x = \Delta y$)은 2m로 설정하였으며, 계산의 안정을 위한 수치 점성(ν_s , 3.3절 참조)은 0.003을 부여하였다.

항주파를 일으키는 선박은 길이 40.5m, 선폭 6.13m, 흘수 2.15m의 소형선을 대상으로 하여 선속 16.3 kts로 부여하였으며 목포해양대학교 전면 안벽으로부터 500m 떨어진 항로 상을 직선으로 항주(목포항으로 입항하는 경우)하는 것으로 하였다.

가변 수심의 영향을 명확히 검토하기 위해 동일 선박, 동일 선속의 조건 하에서, 주어진 선속 조건에서 임계속도가 되는 수심을 전 수심역에 일정하게 부여하여 계산하고(Case 1), 다음으로 선박의 항주선 상에서만 임계속도에 해당하는 수심을 일정하게 부여하고 그 외의 지점은 실제 수심을 도입한 조건을 계산(Case 2)하여 비교 검토하는 것으로 하였다.

Fig. 11은 $x = 360m$, $y = 300m$ 의 위치에서 선박이 출발($t = 0sec$)하여 $x = 1128m$, $y = 300m$ 의 위치에서 목포해양대학교 전면 안벽(target point)을 정형으로 통과($t = 90.05012sec$)한 후, $x = 1454m$, $y = 300m$ 의 위치에 이른 $t = 130sec$ 에 있어서의 수면 형상을 나타낸 것으로서 (a)는 일정 수심, (b)는 가변 수심의 경우에 대해 동일 시각의 결과를 비교한 것이다. Fig. 11(a)의 일정 수심의 경우, 발생한 항주파가 안벽에 이르기까지 변형 없이 진행되어 방파제로 인한 반사 및 회절이 나타나고 있는 반면, Fig. 11(b)에 나타난 가변 수심의 경우는 일정 수심에서 보이는 반사와 회절뿐만 아니라 수심 변화의 영향으로 인한 굴절 및 천수 효과가 부가되어 보다 복잡한 변형이 나타나고 있음을 알 수 있고 이로 인해 대상으로 하는 전면 안벽에서는 교란이 더욱 증폭되고 있음을 알 수 있다.

가변 수심을 고려함으로써 인한 전면 안벽($x = 1128m$, $y =$

792m)에서의 교란 증폭 효과에 대한 정량적인 비교는 Fig. 12에 나타내었다. 항주파의 도달 시간을 비교해 보면 임계속도로 항주하는 선박에 의해 발생된 제1파(critical wave)의 경우, 일정 수심에 있어서는 약 117sec에서 전면 안벽에 도달하고 있는 것에 비해, 가변 수심에 있어서는 이보다 늦게 도달하고 있고, 파고는 가변 수심의 경우가 오히려 증폭되어 있음을 알 수 있다. 이는 발생된 항주파가 안벽으로 전파되면서, 감소되는 수심의 영향으로 파속이 늦어지고 파고가 증대되는 굴절 및 천수효과가 반영되고 있음을 의미하는 것이다. 제1파 이후의 수면 변동은 입사되는 항주파와 방파제 내부에서의 반사파가 중첩되어 형성되고 있다고 사료되는데 이때는 일정 수심의 경우가 약간 높게 나타나 있다. 이처럼 안벽에서의 파고의 증폭 효과는 수심의 변화에 민감히 반응하고 있음을 알 수 있고 따라서 항주파의 발생 및 전파로 인한 변형을 예측하여 해역의 안전성을 검토하고자 할 때 가변 수심은 반드시 고려해야 되어야 할 사항임을 확인할 수 있다.

6. 결 론

실제 연안 해역에서의 복잡한 수로 조건이나 선속의 조건에 대한 항주파 계산을 위해 고정 좌표계에서 비선형분산파동모형을 토대로 항주파 모형을 구축하였다. 구축된 모형은 수리 모형실험 결과와의 비교로 검증하였으며 수면 변동, 좁은 수로의 경우에 대한 soliton의 발생 및 최대 파고의 예측 등에 있어서 좋은 일치를 나타내었다. 추가로 실제 수로에서의 항주파를 모의하고 선박의 항주로 인한 수면의 교란 및 대상 지점에서의 수면 변동을 정량적으로 검토함으로써 종래의 수치 모형에서 명확히 제시하지 못했던 가변 수심에 대한 적용성을 확인하였다.

제안된 본 모형은 실제 수로에서 선박이 직선으로 항주할 경우를 상정하여 개발한 것으로서 수로 혹은 항 내의 정온도 분석에 유용하리라 사료되지만, 곡선 항주로 인한 항주파 발생 메커니즘을 추가 도입하여 보다 다양한 조건에서의 항주파가 예측 가능하도록 개량할 필요가 있다.

이후, 모형의 개량과 함께 현지 관측을 통해 항주파에 의해야기되는 계류 선박의 동요에 대한 분석을 진행해 나갈 예정이다.

후 기

본 연구를 진행함에 있어 한국해양대학교 토목환경시스템 공학부 대학원생 이학승, 이우철, 황호동군으로부터 실 해역 수심파일의 제작에 도움을 받았습니다. 여기에 부기하여 감사의 마음을 전합니다.

참 고 문 헌

- [1] 運輸省港灣局監修 (1999), “港灣の施設の技術上の基準・同解説(上・下)”, (社)日本港灣協會, pp. 132-138.
- [2] 片山裕之・佐藤慎司 (1993), “Boussinesq方程式を用いた不規則波の浅水・碎波変形の計算法”, 海岸工学論文集 第40卷, 日本土木學會, pp. 16-20.
- [3] 中 承鎬・高田榮治・入江 功・村上啓介 (1999a), “非線形分散波動モデルの予測精度評価と線形波浪モデルとの接続”, 海洋開発論文集 第15卷, 日本土木學會, pp. 345-350.
- [4] 中 承鎬・高田榮治・入江 功・吉田明德 (1999b), “Boussinesqモデルを用いた沖合の構造物による波浪・海浜流の数値計算の適用性”, 海岸工学論文集 第46卷, 日本土木學會, pp. 206-210.
- [5] 中 承鎬・入江 功 (2000), “非線形分散波動理論を用いた波浪・海浜流の計算法とその適用性の検討”, 九州大學工学集報 第73卷 第4号, pp. 319-327.
- [6] Chen, X. N. and S. D. Sharma (1995), “A Slender ship moving at a near-critical speed in a shallow channel”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 291, pp. 263-285.
- [7] Doorn, N., J. Groeneweg, O. Weiler and M. Borsboom (2002), “Numerical Modeling of Ship-Induced Wave Propagation”, Proc. of the 28th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 689-701.
- [8] Ertekin, R. C., W. C. Webster and J. V. Wehausen (1985), “Ship-generated solitons”, Proc. of the 15th Symposium. Nav. Hydrodyn. Hamburg, pp. 347-364.
- [9] Havelock, T. H. (1908), “The Propagation of Groups of Waves in Dispersive Media with Application to Waves on Produced by a Travelling Disturbance”, Proc. Royal Society Series A, LXXXI, pp. 398-430.
- [10] Kirk, M. M. (1998), “Investigation of High Speed Craft on Routes near to Land or enclosed Estuaries”, Research Project 420, Maritime & Coast Guard Agency.
- [11] Kofoed-Hansen, H. (1996), “Technical Investigation of Wake Wash from Fast Ferries - Summary & Conclusions”, 5012, Danish Hydraulic Institute, Hørsholm, Denmark.
- [12] Kelvin W. T. (1887), “On ship waves”, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers.
- [13] Madsen, P. A. and O. R. Sørensen (1992), “A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 2”, Coastal Engineering, Vol. 18, pp. 183-204.

- [14] MarCom Working Group 41 (2002), "Guidelines for managing wake wash from High Speed Vessel", Draft report PIANC MarCom WG 41, Revised 2, International Navigation Association.
- [15] Peregrine, D. H. (1967), "Long waves on a beach", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 27, pp. 815-827.
- [16] Raven, H. C. (2000), "Numerical Wash Prediction Using a Free-surface Panel Code, Hydrodynamics of High Speed Craft Wake Wash & Motion Control", The Royal Institution of Naval Architects, London, pp. 1-12.
- [17] Tanimoto, K., H. Kobayashi and V. T. Ca (2000), "Ship Waves in a Shallow and Narrow Channel", *Proc. of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1141-1154.
- [18] Tuck, E. O. (1966), "Shallow-water flow past slender bodies", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 26, pp. 81-95.

원고접수일 : 2003년 9월 30일

원고채택일 : 2003년 12월 8일