항내정온도 추정을 위한 개방경계조건의 설정

이 정 규 / 한양대학교 교수
이 종 인 / 한양대학교 박사과정수료

서 론

항만이 가진 두가지 중요한 기능은 선박의 안전한 정박과 승객 및 화물을 운반할 때 해상과 육상교통을 원활하게 연계시켜주는 장소를 제공하는 것이다. 다시 말하면 기상이 좋지 않거나 항만 운영상의 문제로 선박이 박지내에 정박해야 될 경우에는 항내의 정온도를 유지하여 선박이 안전하게 정박할 수 있어야 되고, 승객이 승·하선하거나 화물을 싣거나 내릴 때는 선박이 부두에 접안하여 하역작업을 하는데 지장을 주지 않도록 항내정온도가 유지되어야 한다. 항내의 정온도는 항입구에서 침입해 들어오는 파랑과 만의 형상 및 항만시설물의 배치와 밀접한 관계가 있다.

박지의 정온도에 관련된 항만시설물 설계기준은 "박지는 평상 이용시 또는 대피 이용시에 있어서 충분히 정온을 유지하여야 한다. 정박 또는 접안용 박지에 있어서 접안시설 전면수역(全面水域)은 연간을 통하여 95~97.5% 이상의 정박 또는 접안일수를 가능케 하는 정온도가 확보되어야 한다. 단, 연간의 이용빈도가 적고 이용의 한계조건을 정하는 데에는 적용하지 않는다"로 정해져 있다.

항내의 정온도는 대상선박의 종류와 하역특성에 따라 적절히 정해지는데 일반적으로 접안시설 전면박지(全面泊地)의 하역한계파고는 다음 표와 같다.

항만의 개구부를 통해 입사된 파랑은 항내의 수심 및 경계 등의 영향으로 굴절, 회절 및 반사 등을 겪게 되며, 입사파의 진동수가 항만의 고유진동수 중의 하나와 일치하게

〈표 1〉 하역 한계파고

선 형 (船型)	하역한계파고 ($H_{1/3}$)
소형선	0.3m
중·대형선	0.5m
초대형선	0.7~1.5m

주) 소형선이란 주로 선류장을 이용하는 대략 500 총톤급 미만의 선박이고, 초대형선이란 주로 대형 돌핀 등을 이용하는 약 50,000 총톤급 이상의 선박을 말한다.

되면 공진현상이 발생하여 파랑이 크게 증폭될 수 있다. 따라서 항만의 고유기능을 극대화하기 위해서는 항내정온도 유지가 중요하며, 이를 위해서는 항만설계시 항만의 고유진동수와 출현빈도가 많은 항만 입사파랑의 진동수가 상이하게 설계를 하는 것이 바람직하다.

파랑의 항내 침입, 변형을 해석하는 방법으로는 일반적으로 해석적인 방법과 수치해법인 유한요소법과 유한차분법을 이용한 수치모형으로 구분된다. 해석적인 방법은 항만의 형태가 비교적 단순한 경우에만 적용이 가능하다. 그리고 같은 지배방정식을 사용할 경우에 대하여 유한요소법과 유한차분법을 비교해 보면, 유한요소법은 항만의 형태나 경계조건 등에 큰 제약을 받지 않고 적용이 가능하지만 대상항만이 크거나 단주기파의 경우를 해석할 때에는 계산시간이 많이 소요되고 대상영역을 유한요소로 분할하여 수치모형을 수립하는데 다소 복잡한 단점이 있다. 유한차분법은 비교적 계산시간이 짧고 수치모형을 구성하기가 유한요소법보다 비교적 용이하나 불규칙한 경계면의 처리에 어려운 점이 있다.

연안개발을 위해 건설되는 해안구조물은 벽면의 경사가 급하므로 입사파를 일부 또는 거의 전부를 반사시킨다. 특히, 항만과 같이 구조물의 배치가 복잡하고, 정온도 유지를 위해 내부면적이 크고 항입구의 개방폭이 좁은 경우, 내부에서 복잡한 다중반사현상이 발생하므로 반사파를 무시하는 포물형근사식은 적용할 수 없다. 이 경우에는 반사파의 영향을 고려할 수 있는 천수방정식형태의 쌍곡형방정식을 주로 사용한다.

본 고에서는 유한차분기법을 이용한 항만정온도 해석 수치모형의 수립에 필요한 개방경계조건(open boundary condition)에 대하여 기존 연구결과의 미비점을 보완한 흡수층기법을 소개하고자 하며, 개방경계에서의 방사조건의 처리를 용이하게 하기 위하여 영역내 조파기법을 소개 하였다. 본 모형의 검증을 위한 지배방정식은 반사파의 영향을 고려할 수 있는 쌍곡형방정식을 선정하였다.

쌍곡형방정식, 영역내 조파 및 흡수층

본 고에서 논하고자 하는 개방경계조건의 검증은 다음과 같은 1차원 쌍곡형방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{C}{C_g}\frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

$$\frac{P}{\partial t} + CC_g\frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$$

여기서, ζ는 수면변위량, C는 파의 전파속도(phase speed), C_g는 군파속도(group velocity), P는 x방향의 선유량성분, t는 시간이다.

항만 등과 같이 구조물이 복잡하게 배치되어 있는 경우, 다중반사로 인해 반사파의 거동이 매우 불규칙하여 반사파 처리를 위한 완전한 경계조건의 설정이 매우 어렵다. 반사파 처리가 완전하지 못하면 구조물에 의해 반사된 파가 개방경계에서 재반사되어 영역내부를 교란시키고, 심한 경우 수치적인 공진(numerical resonance)을 일으켜 정도 높은 예측을 할 수 없게 된다. 이러한 기존의 여러 방법의 단점을 보완하기 위해 본 고에서는 영역내 조파(internal wavegeneration)기법과 흡수층(sponge layer)기법을 도입하여 개방경계에서의 재반사를 방지하는 기법에 대해 간략히 기술하고자 한다.

영역내 조파기법은 입사파를 개방경계에 입력시키지 않고 영역내에서 조파선을 따라 수면변위 또는 유량을 가감하여 2개의 반대방향으로 전파하는 파를 발생시키는 기법으로, 조파선을 통과하는 다른 파에는 전혀 영향을 미치지 않으므로 영역내부의 구조물에 의해 반사된 파는 조파판을 지나 외해쪽으로 방사(radiation)된다. 따라서 개

방경계에서 파랑을 입사시킬 때 발생하는 반사파의 산정 등과 같은 문제점을 영역내 조파기법을 이용함으로써 쉽게 해소된다. 영역내부에 평행한 조파선을 따라 진폭 A, 입사각 α의 파를 발생시키고자 할 때,

$$\zeta=2\zeta^{I}\frac{C\Delta t}{\Delta x}\sin\theta,\ \theta=\alpha+\frac{\pi}{2},$$
$$\zeta^{I}=A\sin(k_y y-wt)$$

로 정의되는 수면차 ζ'를 수면변위 ζ에 더해 주면 원하는 입사파(incident wave)와 영상파(mirror image waves)를 얻을 수 있다. 여기서, y는 조파선을 이루는 축이며, k_y는 y방향 파수(wave number) 성분, w는 각진동수(angular frequency)이다.

영역의 외해쪽 개방경계에 가상적인 흡수층을 설치하면 영역내 조파에 의한 영상파와 조파선을 통과한 반사파를 효율적으로 소멸시켜 영역내부로의 재반사를 방지하므로 개방경계를 따라 파의 진행방향을 알아야 하는 기존의 방사조건(radiation condition)보다 우수한 방법이다. 또한 흡수층은 층내부로 들어온 파를 소모시키므로 외해경계를 따라 설치하면 영역내부에서 발생된 반사파와 영역내 조파에 의한 영상파의 재반사를 방지해 준다. 파에너지의 소모과정은 매 시간단계에서 구해진 ζ, P에 다음식으로 정해지는 일정한 소모율 μ를 곱해줌으로써 이루어 진다 (Larsen and Dancy, 1983).

$$\mu(\bar{x})=\exp[-(2^{-x/\bar{\Delta x}}-2^{-x_s/\Delta x})\mathrm{Ina}],\quad 0\le\bar{x}\le x_s$$

$$\mu(\bar{x})=1,\quad \bar{x}>x_s$$

여기서, x_s는 흡수층의 구간, $\bar{x}$는 흡수층 내부점의 위치, Δx는 격자간격, a는 상수로서 $x_s=10\Delta x$일 경우 a=5, $x_s=5\Delta x$일 경우 a=2이다.

그러나 Larsen 등에 의해 제안된 흡수층은 항상 $10\Delta x$를 사용하기 때문에 많은 오차 즉, 흡수층에서의 재반사를 동반하게 된다. 외해에서 입사하는 파랑의 변형을 수치해석을 통해 정도 높은 해를 구하기 위해서는 한 파장당 10~20개 이상의 절점으로 분할하여야 한다. 따라서 한 파장을 20개의 격자로 분할할 경우, $10\Delta x$의 흡수층을 설치하게 되면 흡수층의 구간은 입사파의 반파장에 해당하게 되며, 더 많은 격자로 분할하게 되면 파장에 비해 흡수층의 구간은 점점 줄어들게 된다. 이로 인해 파랑을 완전히 소멸시켜야 하는 흡수층에서는 많은 양의 파랑의 반사가 발생하여 영역내로 다시 들어가게 된다. 본 고에서는 이러한 문제점을 해소하기 위해 Larsen등의 제안식을 일부 수정하여 소모율 μ를 다음과 같이 산정하였다.

$$\mu(\bar{x})=\exp[-(b^{-\bar{x}/\Delta x})1n5],\quad 0\le\bar{x}\le x_s$$

$$\mu(\bar{x})=1,\quad \bar{x}>x_s$$

여기서, $\gamma_s=10/t_s$, $b=[1+\gamma_s+\exp(-1/\gamma_s]$이며, t_s는 흡수층을 설치한 격자의 수를 의미한다. Larsen 등의 연구에서는 흡수층의 구간이 $10\Delta x$로 고정되어 있지만 본 고에서 제안된 식은 흡수층의 구간을 자유롭게 변경시킬 수 있고, 흡수층구간에 따른 소요율이 다르게 산정된다. 이러한 소모율 μ를 가진 흡수층을 개방경계에 설치한 후 1차원 쌍곡형방정식을 이용하여 흡수층의 반사율을 산정하고자 한다.

수치실험 및 분석

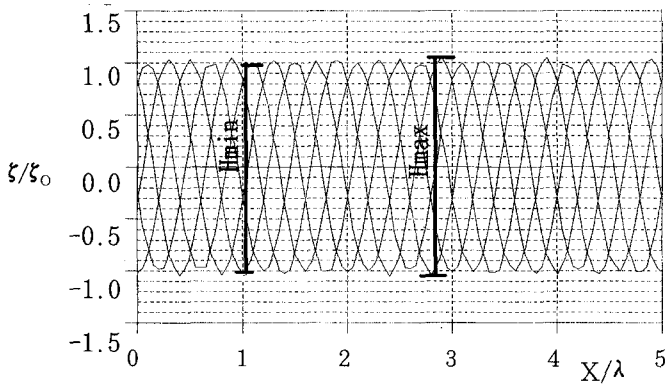
본 고의 흡수층에 대한 반사율(R) 산정은 수심(h) 10m, 수로길이가 42파장(λ)인 1차원 수로에서 진폭이 1m인 파랑을 입사파로 설정하고 주기(wave period)에 따른 흡수층의 반사율을 산정하였다. 그리고 반사율 R의 산정은 다음식을 사용하였다(그림 1 참조).

$$R = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \times 100(\%)$$

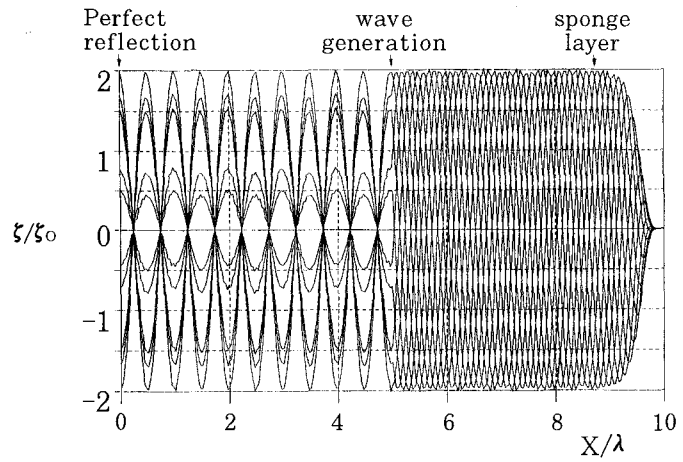
여기서, H_{max}와 H_{min}은 검증수로에서 발생하는 최대 및 최소 파고이다. 즉, 〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 어느 순간(snap shot)의 수면변위중 발생하는 최대 및 최소파고를 의미하는 것으로서 본 고에서 산정하는 반사율 R은 발생 가능한 최대 오차를 의미하는 것이다.

〈그림 2〉는 좌측경계에 완전반사조건을, 우측경계에 개방경계조건(흡수층 설치)을 설정하고 본 고에서 사용한 영역내 조파를 검증한 것으로서 좌측경계에서 반사된 파는 조파선에서의 입사파랑에 어떠한 영향도 미치지 않고 지나간 후 개방경계조건에 의해 외해로 방사됨을 알 수 있다.

〈그림 3〉은 흡수층의 설치 격자수와 입사파의 주기에 따른 입사파랑의 반사율을 도시한 것으로서, 총 길이가 42파장인 1차원 수로를 설치하고 양단 경계에 흡수층을 설치하였다. 그리고 입사파는 좌측경계에서 8파장 위치에 조파선을 설치하여 입력하였으며, 그림상의 k는 입사파랑의 파수이다. 〈그림3〉(a)는 Larsen 등의 흡수층기법(t_s=10)을 이용하여 반사율을 산정한 결과를 도시한 것으로 상당량의 파랑이 반사됨을 알 수 있다. 〈그림 3〉(b)~(d)는 본 고에서 제안한 흡수층기법(t_s=20~40)을 이용하여 흡수층의 구간과 입사파 파장의 비를 달리하여 계산한 결과이며, Larsen 등의 기법에 비해 흡수층의 구간이 증가할수록 매우 적은 양이 반사됨을 볼 수 있다. 그러나 한 파장을 10개의 격자로 나누었을 경우에는 어떤 경우에도 상당량의 반사파가 존재한다. 한 파장을 40개 이상의 격자로 나누었을 경우에도 많은 양의 반사파가 존재하는데 이는 본 고에서 제안한 흡수층을 검증하는데 있어 Courant수를 0.7로 고정하여 사용하였기 때문에 격자간격이 작아지면 시간간격 Δt 또한 작아지며, 이로 인해 회절에 의한 반사파가 존재하게 되기 때문이다. 물론 흡수층의 구간을 더욱더 두껍게 하여 파랑에너지를 서서히 소모시키면 반사파는 더욱 줄어들 수 있으나 개방경계면에 흡수층을 설치함을 고려할 때 계산영역이 커지게 되어 계산시간이 증가하게 된다. 본 고에서 계산한 결과에 따르면 흡



〈그림 1〉 반사율 산정 개념도

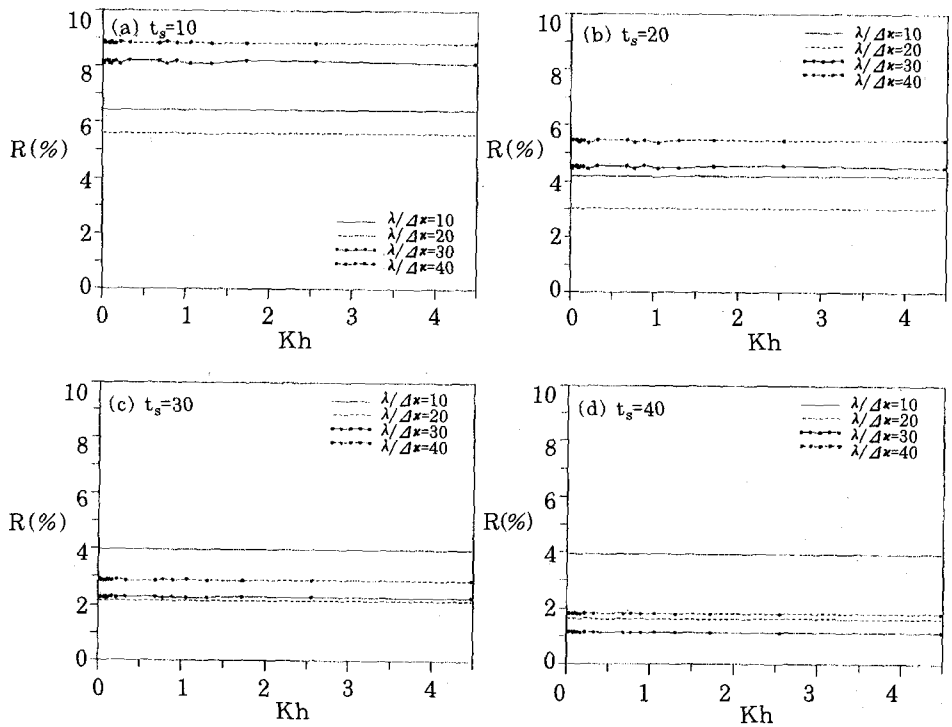


〈그림 2〉 영역내조파 및 흡수층의 1차원 검증

수층을 40개의 격자에 걸쳐 설치하고 한 파장을 20개 이상의 격자로 나누었을 경우 2%이내의 오차를 보였으며, 30개의 격자로 나누었을 경우가 1% 정도의 오차를 보이고 있고 더 많은 격자로 나누면 너무 작은 시간간격으로 인해 파랑이 회절되어 오히려 반사율이 증가함을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 오차란 발생가능한 최대 반사율을 의미한다.

요 약

본 고에서는 입사된 파랑이 구조물 등으로 인해 반사되어 반사파가 입사경계로 돌아올 경우 이를 제거하기 위해 설정하여야 하는 개방경계조건에 대해 고찰하였다. Larsen 등의 연구와 이를 수정한 기법을 1차원 수로에 적용하여 반사율을 산정함으로써 흡수층기법을 개방경계 조건으로 사용하는 가능성에 대해 검토하였다. 본 고에서 제안한 흡수층이 Larsen 등의 기법보다 우수함을 보였으며, 흡수층의 구간은 입사파랑의 파장과 같을 경우 반사율이 가장 작게 나타났다. 항만 등과 같이 구조물이 복잡하게 배치되어 있는 경우에는 입사파랑이 이들 구조물로 인해 다중반사된다. 수치공간이 발생하지 않기 위해서는 이러한 다중반사파가 외해경계에서 재반사되지 않게 하는 것이 무엇 보다도 중요하다. 본 흡수층기법은 다른 개방경계기법보다 수치모형에 적용하기 쉬울 뿐만 아니라 그 효율성 또한 우수하다. 따라서 본 기법을 항만정온도 예측 등과 같은 수치모형에 개방경계조건으로 설정한 후 실제 문제에 적용할 경우 큰 오차 없이 예측할 수 있으리라 사료된다. 추후 연구과제로는 이러한 흡수층을 이용하여 부분반사효과를 고려하는 것이며, 이 기법을 사용하게 되면 파랑의 전쟁방향을 알 필요가 없는 장점이 있다.



〈그림 3〉 흡수층구간에 따른 반사율