學 術

地形變化로 인한 波浪變形特性의 計算方法

李 正 圭 〈漢陽大學校 敎受·工博〉

波浪變形의 概要

海岸구조물(maritime structures)과 海濱變形에 가장 큰 영향을 주는 요소중의 하나가 波浪(wave)이다.

일반적으로 파랑은 주로 바람에 의해서 發生되며 발생된 波浪은 수심이 깊은 곳에서 얕은 海岸으로 전파해 오면서 波浪의 특성, 즉, 波高, 波長, 波速 등은 屈折, 回折, 淺水 및 反射의 영향을 받아 변하게 되며 海流와 상호작용하게 되면 파랑의 변화는 복잡하게 된다.

또한 파랑은 파의 진행방향으로 전파해 가면서 해저마찰 등의 영향을 받아 에너지를 잃게 되고, 파랑이 과도한 에너지를 포함하고 있을 때는 쇄파(wave breaking)을 일으켜 에너지의 일부는 消散되고 새로운 파랑이 형성되어 전파해 나간다.

또한 바다의파랑 현상은 불규칙파(irregular waves)이기 때문에 에너지 분포면에서나 파랑의 변형에서 규칙파와는 상당히 다른 특성이 나타날 수 있다. 이와 같이 波浪은 대단히 많은 물리적 변수가 관련된 복잡한 현상이기 때문에 이론적으로 간단히 해석할 수 있는 問題는 결코 아니다.

그러나 해안구조물의 적정배치 및 해안환경의 훼손방지를 위한 가능한 대책을 강구하기 위해서는 波浪의 특성과 분포를 가능한 한 정확히 규명하는 것이 필요하다.

파랑에 대한 연구는 과거에는 주로 수리실험과 현장관측에 의존하여 왔으나 70년대 이후 부터는 대형 콤퓨터의 이용이 가능해

짐에 따라 수치모형을 이용한 연구가 활발해졌다. 콤퓨터의 출현은 수치 모형에서 수작업으로는 도저히 불가능한 계산과정을 가능하게 하였으며 콤퓨터는 이제 많은 공학적 문제의 해결에 대단히 중요한 위치를 차지하게 되었다.

최근에는 파랑의 변형을 해석하는데 굴절, 회절, 천수, 반사 및 해류와의 합성을 동시에 고려할 수 있는 모형이 개발되었다.

지금까지 개발된 數値模型들은 해저지형의 변화와 이론식에 따라 몇가지 類型으로 분류될 수 있으며 개개의 모형은 장단점과 서로 다른 적용해역(적용범위)을 가지고 있으므로 本 稿에서는 이에 대하여 간략히 살펴 보고자 한다.

모든 수리현상은 質量, 運動量 및 에너지 保存式으로 표현될 수 있으며 모든 파랑의 數値모형은 이 세가지 기본식들 중 한두가지의 組合으로 유도되며, 數式의 전개 및 單純化 과정에 따라 파랑변형모형을 크게 파향선모형과 2차원 수심적분모형으로 나눌 수 있다.

波向線 모형

파랑의 굴절 및 천수효과만을 고려한 파향선법은 파랑해석의 가장 고전적인 방법으로 Arthur (1946)가 수심이 변하는 곳에서 빛의 굴절 이론인 FERMAT의 이론이 Snell법칙에 따른다는 것을 응용하여 파랑해석에 처음사용하였고, Munk와 Arthur(1952)가 파향선 간격을 구하는 방법을 제시하였으며, Dobson(1967) 등이 수치 해법으로 파향선을 추적하였다. 파향선법의 기본식은 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{C}\left(\sin\theta\,\frac{\partial C}{\partial x} - \cos\theta\,\frac{\partial C}{\partial y}\right)$$

여기서, s는 파향선을 따른 거리, θ는 파향선과 x축이 이루는 角이고, C는 파속으로 파랑운동의 수심확산특성을 나타내는 分散式(dispersion relation)으로부터 얻어진다. 파향선법의 해석은 수심으로 부터 파속을 구하고, 식(1)을 이용하여 곡률을 계산하여 새운 점을 찾는다. 이점에서 다시 곡률을 계산하여 전점에서의 값과 비교하여 수렴할 때까지 반복계산을 시행한 후 다음 파향선을 추적해 나간다. 이러한 과정을 대상해역에서 반복 적용하면 파향선도를 작성할 수 있다.

파고 H는 두 개의 파향선 사이에서 에너지는 보존된다는 이론에서 계산할 수 있다. 즉,

$$H = Ho \cdot Ks \cdot Kr$$

여기서, Ho는 심해파고, Ks는 천수계수, Kr는 굴절계수이다. 해양연구소(1987)에서는 Dobson (1967)이 제시한 방법으로 Kr을 구하여 굴절도 작성과 파고계산을 행하였다. 그러나 파향선 추적법은 파향선이 지나가는 곳에서만 波浪특성을 구할 수 밖에 없어 대상영역 전체에 대하여 계산할 수가 없다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 김 철(1987) 등은 Keller의 점근근사법(asymptotic approximation)을 도입하여 고정격자 점에서 파향 및 파고를 계산하였다.

파향선법은 해저지형이 불규칙한 해역에서는 굴절계수가 심해경계면의 파향과 파의 주기에 매우 민감하므로 파향선 간격의 최적치를 구하는데 문제가 있고, 특히 波交点(caustic) 부근에서 파고가 發散하므로 解를 구할 수 없다는 단점이 있다.

이를 해결하기 위하여 Bouws (1982)와 Southgate(1984)의 統計的概念에 근거를 두고 파교점에서 解를 구하는 모형과 背後地 회절을 방파제 끝단에서 파향선으로 투입하는 방법을 도입한 Larsen(1978)과 Southgate (1985)의 모형 등이 있으나 근본적인 물리적 현상을 나타내는 데는 부족하였다.

그러나 최근에 Yoo와 O'Connor (1986)와 Yoo(1988)는 회절현상이 포함될 때 波數벡터의 변형된 확산식을 파수 保存式에 도입하여 주기평균모형에서도 회절현상이 재현할 수 있는 개선된 파향선모형을 발표하였다.

이 모형은 기본식을 수심적분한 후 주기에 대하여 평균한 것이므로 주기 평균모형이라고도 하는데, 회절현상을 고려할 수 있도록 개선된 파수보존식과 수심적분하여 주기평균된 에너지 보존식이 기본식을 이루고 있어, 쌍곡형 편미분 방정식이므로 효율적인 수치해법을 적용할 수 있다.

파향선 모형은 계산효율면에서 기존의 굴절 회절모형보다 훨씬 우수하다고 알려져 있기 때문에 파랑과 흐름이 복합되고 대상해역이 광범위할 때는 이러한 효율적인 계산 모형을 사용하는 것이 긴요하다고 생각된다.

수심적분 모형

자연상태의 파랑은 그 자체가 아주 불규칙한 현상일 뿐 아니라 쇄파, 에너지손실, 바닥지형의 영향을 받는 대단히 복잡한 물리적인 과정이 관련되어 있기 때문에 이런 모든 과정의 영향이 고려된 파랑현상을 수학적으로 모형화하는 것은 거의 불가능하기 때문에 관심의 대상에 따라 적절한 가정하에 단순화 과정을 거쳐서 실용적인 수학적 모형이 만들어진다. 일차원 모형에서는 어느정도 비선형 효과를 포함하는 解를 구할 수 있으나 2차와 3차의 모형에서는 수학적으로 선형단순조화 파랑이론(linear simple harmonic wave theory)에 한정하여 모형화하는 경우가 종종있다(Berkhoff, 1976).

2차원 수심적분 모형으로 널리 알려진 것은 소위 Boussinesq모형으로 파랑의 굴절, 회절, 반사 등의 영향을 고려할 뿐 아니라 파랑의 비선형효과도 포함하고 있어서 불규칙한 연안지역에 아주 유용한 모형이다(peregrine, 1967). 그러나 이 모형은 입자의 유속이 해저면으로 부터의 거리에 비례한다고 한 가정때문에 모형의 적용대상이 수심과 파랑의 비가 0.05이하인 淺海域에서만 높은 정밀도를 기대할 수 있다.

심해에서 천해까지 전수역에 적용할 수 있는 수심적분 모형의 기본식이 개발된 것은 1972년 Berkhoff에 의해서였다. 그의 이론은 해저면 경사가 완만하여 이에 대한 2차 이상의 항을 무시할 수 있다는 가정하에 유도되었기 때문에 완경사방정식(mild-slope equation)이라고 부른다. 또한 그의 기본식은 비회전 선형조화 파랑에 한정되어 있으며 마찰이나 쇄파로 인한 에너질 손실과 해류와의 상호작용은 고려되어 있지 않다. 유도된 기본 방적식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla\phi) + \omega^2 \frac{C_g}{C} \phi = 0$$

여기서, ϕ =속도포텐셜, C = ω/k, C_g (군속도) = nC, $\omega^2 = gk \tanh(kh)$이고, n = 1/2 (1 + $2kh/\sinh(2kh)$)이다.

이 수심적분 모형은 심해에서 천해까지 전수역에 적용할 수 있고, 굴절, 회절 및 반사를 고려할 수 있으며 기본식의 형태가 타원형이므로 수치해법상으로 경계치 문제가 되어 음해법(implicit scheme)으로 풀어야 하기 때문에 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

1972년에 Ito와 Tanimoto가 질량 보존식과 운동량 보존식을 직접 수심적분하여 유도한 한 쌍의 1차 방정식은 양해법(explicit scheme)이나 교호음해법(A.D.I. method)을 사용할 수 있어 Berkhoff의 수심적분 모형보다 수치계산의 효율은 대단히 높은데, 식을 유도할 때 해저경사의 영향과 2차원 傳導效果를 무시하였기 때문에 波浪의 群速度와 位相速度의 差가 큰 곳에서는 정밀도가 떨어지는 단점이 있다.

Nishimura(1983)는 질량보존식과 운동량 보존식 대신에 에너지 보존식을 적분하여 全海域에 적용할 수 있는 쌍곡형 모형을 개발하였다. 비정상 완경사 방정식이라고 부르는 이 모형은 오차의 정도가 타원형 모형과 같고 수치 해석은 초기치 문제로 풀 수 있으므로 경계치 문제로 푸는 것보다 계산효율이 높다.

Copeland(1985)는 에너지 보존법칙에 근거하여 완경사 방정식을 시간함수 형태로 주어서 한 쌍의 1차 방정식을 유도했다.

$$\nabla Q + \frac{C_g}{C} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + CC_g \nabla \eta = 0$$

여기서, Q는 물입자의 속도를 수심에 대해 연직으로 적분한 선유량이고, η는 수면높이이다. 식(4)와 (5)를 수치해석하는 방법은 임의 반사율 경계와 도입경계를 이용하여 양해법으로 풀 수 있다. 이 모형은 굴절, 회절 및 반사의 효과를 고려할 수 있고 초기치 문제이기 때문에 楕圓形 모형보다 수치해석의 효율이 매우 높다.

파랑은 전파해 갈 때 해류와 접하게 되면 해류의 영향을 받아 그 특성이 변한다. 해류와의 합성효과를 고려할 수 있는 Booij(1981)가 개발한 모형은 수치해석상 실제문제에 적용하기에 어려운 점이 있었다.

다음에 타원형 방정식으로 부터 유도한 Dong(1989)의 모형과 쌍곡형 방정식을 이동좌표계로 변환시켜 얻은 Yoo와 O'Connor(1988)의 모형이 있는데 다음식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \left(1 + \frac{K_i U_i}{\sigma^0}\right) \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x_i} (n R_i) = 0$$

$$\frac{\partial R_i}{\partial t} + \left(1 + \frac{K_i U_i}{\sigma^0}\right) c^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} = 0$$

여기서, tensor 기호로써 $i=1,2$ 이고, $\zeta=\eta/\sigma^0$, K는 波數(wave number), U는 流速, $R=\eta/K$, σ^0는 相對角速度(Doppler-shifted frequency)이다. 수치해법으로는 leap-frog 양해법이 사용되었다. 윗 식은 屈折, 回折, 反射 및 海流와의 合成을 고려할 수 있는 것으로 이론적 타당성을 가진다(유동훈, 1988).

진화모형(evolution model)

이상에서 거론한 수심적분모형은 굴절, 회절, 반사 및 해류와의 합성효과 등을 고려할 수 있는 장점이 있으나, 수심적분식의 수치해석을 위해서는 格子網을 一波長內에 최소한의 격자점이 필요하다는 약점이 있어 광범위한 지역에 적용하기에는 문제점이 많다.

파랑운동은 주기를 따라 반복운동하므로 正弦曲線式으로 表示하여 수심적분식에 대입한 수 各變數의 振幅만을 추출하여 진화모형을 만든다. 이러한 진화모형은 수심적분모형을 단순화해서 만든것으로서, 타원형 수심적분으로부터 抛物形모형을 만든 Kirby(1984)와 Radder(1979), Liu(1983)의 모형이 있고, 타원형에서 타원형으로 만든 Ebersole(1986)의 모형이 있으며, 쌍곡형 수심적분모형으로부터 쌍곡형모형을 만든 Madsen(1987)의 모형이 있다.

포물형모형은 좌표축을 主波向에 맞춘후 수식을 단순화하였기 때문에 다른 방향으로의 에너지 전파는 무시되어 防波堤 背後地로의 회절은 해석하기 곤란하며, 진행파만을 고려하였기 때문에 반사의 영향이 큰 곳에서는 적용할 수가 없다. 1984년에 Liu와 Tsay가 개발한 모형의 기본방정식을 근간으로하여, 자유수면항으로 유도한 완경사방정식을 해저경사가 비교적 완만하여 수심변화에 의한 반사파의 영향을 무시할 수 있고, 측방향의 파고변화가 진행방향의 파고변화보다 훨씬 빠르다는 가정하에 유도된 선형 포물형방정식은 다음과 같다.

$$2i\bar{k}\frac{\partial \Lambda}{\partial x} + \frac{1}{CC_g}\frac{\partial}{\partial y}\left[CC_g \frac{\partial \Lambda}{\partial y}\right] + \left[i\frac{1}{CC_g}\left[\frac{\partial(\bar{k}CC_g)}{\partial x}\right] + (k^2-\bar{k}^2)\right]\Lambda = 0 \quad (8)$$

여기서, Λ는 진폭이고, $\bar{k}$는 y 방향으로 수심을 평균한 x의 함수로된 평균수심 ($\bar{h}$)의 波數로서 각 격자점에서의 파수 k와 마찬가지로 分散式(dispersion equation)으로 구한다.

위의 방정식은 이정규와 이종인(1990)에서도 사용된 것으로, 수치해법은 陰解法이 사용되나 three diagonal matrix를 푸는 문제가 되고, 기본식이 시간에 무관하고 반복과정이 필요없으므로 계산효율이 매우 높아 반사파의 영향이 현저하지 않는 곳에서는 대단히 效率的인 방법이다.

1983년에 Liu가 개발한 모형은 海流와의 합성을 고려할 수 있는 것이나 수치해석상의 문제점으로 융통성 있게 실제문제에 적용하기에는 부족하다. 약간의 수정을 거쳐 약한 반사효과를 고려할 수 있는 또 다른 포물형모형이 Liu에 의해 1983년에 개발되었으나, 反射波가 강한 지역에서는 적용이 불가능하다.

포물형모형은 배후지 회절뿐 아니라 주방향이 여러개인 경우에 적용이 거의 불가능하여 이를 보완하기위한 방법으로 좌표축을 파향에 고정시키지 않고 타원형 수심적분식을 단순화 시켜 보다 적용범위가 넓은 타원형모형을 Ebersole이 개발했다. 기본식 중 하나가 쌍곡형이고 다른하나는 타원형인데 두식 모두 陽解法으로 반복과정을 거치지 않고 해를 구할 수 있어, 계산효율도 포물형모형과 거의 같다. 실제 파향방향이 다양한 매우 복잡한 河口에 적용한 예가 있다.

쌍곡형 수심적분식으로부터 각 변수의 振幅만을 추출하여 雙曲形進化模形을 Madsen이 1987년에 개발하였다. 전자의 두 모형과 달리 시간에 따라 변하는 수식으로 되어 있기 때문에 계산효율이 다소 떨어지기는 하나 波交点 및 배후지에서의 회절도 재현할 수 있고, 반사파의 영향도 포함할 수 있으며, 시간의 증분을 계산과정에서 최적화 시킬 수 있다. 수심적분모형에서와 같이 이동좌표를 도입하여 해류와의 합성효과를 고려할 수 있으며, 交互陰解法이나 양해법으로 해를 구할 수 있다.

비선형항이 포함된 進化模形으로는 Kirby(1986)가 그의 선형모형에 2차 Stokes파의 비선형항을 포함시킨 것이 있다. 그러나 Stokes파 이론은 해안공학의 주요 관심사인 천해역에서는 적용할 수가 없다. Liu, et, al.(1985)

는 비선형천해파의 거동을 잘 나타내 주는 Boussinesq식을 도입하였으며, 천해에서 수심변화에 의한 크노이드파의 변형을 성공적으로 계산한 바 있으나, 흐름의 영향은 고려되지 않았다. 윤성범(1988)은 비선형 천해파 굴절·회절모형에 흐름의 영향을 포함하여 발전시켰으나, 반사파의 영향을 고려할 수 없는 모형이다.

결 언

위에서 살펴본 수치모형을 특성에 따라 간단히 분류해 놓으면 표 1.과 같다. 표 1.에서 알 수 있는 바와 같이 각 모형은 재현현상과 적용수심 및 해역이 다르다. 따라서 수치모형을 적용할 때는 대상 해역의 크기, 경제성, 정밀도, 고려해야할 현상 및 파랑의 특성에 따라 적절한 모형을 선정하여야 한다. 수치모형의 결과는 그것만으로 완전한 것이 아니기 때문에 항상 現場 實測値 또는 水理模形實驗의 결과와 비교 검토한 후에 이용하는 것이 바람직하다.

한편 기본식의 유도과정에서 전제된 가정으로부터 벗어나는 실제현상을 좀 더 정확하게 재현하기 위해서는 유도된 식들에 약간의 수정을 가한 후에 적용이 가능하리라 생각된다. 즉, 해저면 마찰, 底質移動(bottom motion). 碎波 등으로 인한 2次 變形過程은 각 모형의 기본식을 약간 수정하거나 附加項을 보태서 재현할 수 있으므로 모형의 기본구조를 변경할 필요는 없다.

또한 海波는 대부분 파랑스펙트럼 또는 여러개의 분조(harmonic constituent)로서 표현되어야 하는 各亂波(random wave)인 경우가 대부분이므로 不規則波의 복잡한 형태에 의한 영향을 고려 해야 한다. 수심적분모형을 이용할 때는 불규칙파를 여러개의 분조로 표현하여 수치해석하지만, 주기평균모형을 이용할 때는 불규칙파를 파랑스펙트럼으로 표현하여 수치해석 하는 것이 편리하다(유동훈, 1988). 불규칙파의 응용에 대해서는 문헌(Goda, 1985)를 참조하기 바란다.

표 1. 파랑해석을 위한 수치모형의 특징

모 형 명	기본식의 형태	계 산 방 법	재현현상: 굴 절	회 절	반 사	해류합성	적용수심	적 용 범 위
파향선모형	고전적 파향선식	시행오차법	○	×	×	×	전수심	넓은해역
	수정된 파향선식	양해법	○	○	×	○	"	
수심적분모형	타원형 방정식	음해법, 유한요소법	○	○	○	×	"	좁은해역
	쌍곡형 방정식	양해법, 교호음해법	○	○	○	○	"	
	Boussinesq 식	교호음해법	○	○	○	○	천 해	
진화모형	포물형 방정식	교호음해법	○	Δ	×	○	전수심	중간규모해역
	타원형 방정식	양해법	○	○	×	×	"	
	쌍곡형 방정식	양해법, 교호음해법	○	○	○	○	"	

Δ는 배후지의 회절을 고려할 수 없음을 표시