

# 해안지형변동 예측방법과 표사량의 정식화

김 규 한 (관동대학교 건설환경시스템공학부 부교수)

## 1. 머릿말

항만건설, 매립 뿐만 아니라 기타 여러 목적의 구조물을 해안역에 건설할 경우에는 구조물 건설 이후에 발생할 제영향을 사전에 예측하여 건설계획 및 시공에 반영하여야 한다. 특히, 해수유동상황 및 오염물질 확산 문제는 기본적인 검토 항목으로 취급되어 왔으나, 최근에는 국내에서도 지형변동문제까지 중요한 검토항목으로 다루어지기 시작했다. 외국에서는 환경영향평가사에도 반드시 지형변동에 의한 인접해안의 영향, 특히 표사의 매몰 및 소실 문제가 중요항목으로 취급되어, 그 예측이 충분히 검토되지 않으면 공사착공의 동의가 이루어지지 않는 경우가 많다.

이처럼 해빈변형예측의 중요성이 차츰 인식되어 가고는 있으나, 구조물건설 이후 몇년간의 예측을 필요로 하고, 그 예측대상범위는 어느 정도 필요한지는 문제점 중의 하나라 할 수 있다. 이 질문에 대한 적절한 답은 아직 구체적으로 없다고 해도 과언이 아니다. 따라서, 역으로 과거의 환경영향평가에서 주로 수행되었던 기간을 참고로 하여 답을 한다면, 예측 대상기간은 수년(5~10년)이라 할 수 있다. 그러나 이 문제에 대해서는 요즘 거론되는 해면상승 문제도 매우 중요한 요소로서, 5~10년으로 충분하나라는 데에는 의문이 존재하기도 한다.

한편 예측대상범위는 그 구조물의 크기에 따라 크게 좌우되지만, 해안선의 표사범위 즉, 인접매립지로부터 인접한 항만의 방파제까지라는 식의 현장의 지형상황을 보고 판단하지 않으면 안된다.

본고에서는 이와 같은 해빈변형(해안지형변동)에

측방법의 개요를 소개하고, 해빈변형예측모형 중 무엇보다 중요한 위치를 차지하고 있는 표사량의 정식화기법과 문제점에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 해빈변형예측모형의 구성

해빈변형예측을 위한 수치 시뮬레이션의 흐름도는 그림. 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림으로 부터 알 수 있듯이 해빈 변형을 예측하기 위해서는 대상범위의 결정, 파의 변형, 해빈류(특히, 동해안일 경우)계산이 수행되어야 한다.

### (1) 대상파랑의 결정

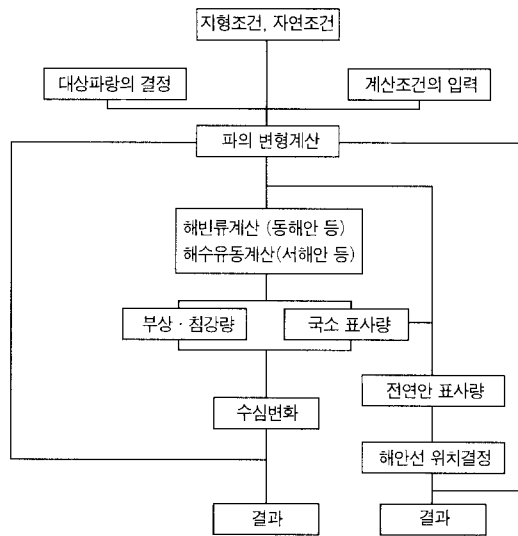


그림. 1 해빈변형 수치시뮬레이션 모형의 구성 및 흐름도

일반적인 해안구조물의 설계에서는, 최대외력을 사용하여 계산하면 되지만, 해빈변형은 통상파랑에 의해서도 변형되기 때문에 최대파랑만의 계산으로 충분하다고는 말하기 어렵다. 그러나 지배적인 변형을 일으키는 것은 태풍에 수반한 강력한 고파랑이기 때문에 년간의 태풍파랑통계(파랑통계가 없을 경우에는 바람자료로부터 파의 자료를 hindcasting 한다.)로부터 유력파(약 50cm이상)를 선택하여 그 파를 방향별로 분류하여 에너지 플릭스의 보존법칙으로부터 대표파의 파고 및 주기를 결정할 경우가 많다.

### (2) 파랑변형의 계산

파랑변형계산방법은 최근 급속한 발전을 거듭하여 영역이 거대하지 않는 한 아주 짧은 시간에 계산할 수 있게 되었다. 대상지역의 상황 및 문제의 성격에 따라 적합한 모형을 적용 사용할 수 있다. 각종 계산방법의 특징을 요약하면 표. 1 과 같다. 실질적으로는 표.1 중에서 에너지평형방정식 또는 비정상완경사방정식 및 수치파동해석법에 의해 주로 계산을 수행한다.

### (3) 해빈변형의 계산

해빈변형의 예측도 해안선의 변동만을 대상으로 할 경우와 해빈단면의 변형을 예측할 경우로 나뉘게 된다. 전자는 해안종단표사에 의한 해빈단면형상의 변화가 무시 될 정도의 긴 시간 Scale의 경우이며, 연안 표사이동에 의해 발생하는 해수의 단면적 변화량  $\Delta A$  와 해안선의 변동량  $\Delta l$ 의 사이에 비례관계가 성립한다는 가정에 기반하여, 표사의 연속방정식 및 전연안 표사량식을 사용하여 수치계산을 진행해 가는 방법이다. 이것이 소위 One-line theory라고 일컫는 해안선 변형 모형이다. 이 방법은 비교적 간단하여 많은 이들에 의해 자주 사용되고 있으나, 구조물 주변의 해빈변형예측에는 무리가 있어, 해빈변형 자체에만 타당성이 존재한다.

한편, 해역의 수심변화 즉 지형변동을 구하기 위해서는 수심의 변화  $\Delta h$  를 국소표사량의 변화로부터 해석하는 수심변화 예측모형과 복수의 등심선간의 해안종단표사를 고려하여 각각의 등수심의 위치를 변수로 하여 푸는 해법인 Multi-line theory에 의한 다해

표. 1 평면 파랑변형 수치모형의 적용범위 (해안파동, 1994)

계산 방법	전수 변형	굴절	회절	반사	쇄파 모델	임의 수심	흐름의 영향	불규칙성	유한진폭성	계산 영역			비고
										광역	중역	협역	
파향선법	◎	◎	×			◎	○	○	△	○	○	○	파속에 유한진폭성을 포함시킴
에너지평형방정식	◎	◎	▽	△	○	◎	○	◎	×	○	○	○	
Helmholtz 방정식	○	○	◎	◎	×	◎	×	○	×			○	영역별로 일정경사수심
Takayama 방법			◎	◎	×	◎	×	◎	×		○	○	일정경사수심
완경사 방정식	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	○	△			○	
비정상 완경사 방정식	◎	◎	◎	◎	○	◎	○		×			○	쇄파모형, 경계조건 처리가 용이
수치파동 해석법	○	◎	◎	◎		◎			×			○	
비정상 완경사 불규칙 파동방정식	◎	◎	◎	◎	○	◎		◎	×			○	
포물선형 파동방정식	◎	◎	◎	△	○	◎	○	○	△		○	○	
비선형 장파방정식	◎	◎	◎	◎	○	×		◎	◎			○	연직가속도가 무시되는 천해역으로 한정
Boussinesq 방정식	◎	◎	◎	◎	○	○	○	◎	◎			○	원방정식은 천해역으로

안선 변형모형이 있다.

어느 경우나 전연안 표사량, 국소표사량, 부상·침강 표사량을 명확히 해 주지 않으면 안된다. 또한 국소표사량의 추정방법의 차이에 따라 Power Model, Flux Model로 나뉘게 된다.

그러나, 항만구조물이 복잡하게 존재할 경우에는 Multi-line theory보다는 이류확산방정식을 토대로 표사농도를 계산하여 부상·침강량을 고려하는 수심변화모형이 우수하다. 특히, 항내 매물이 문제시되는 어항의 건설시 및 유지보수, 준설시에는 이상과 같은 수심변화 예측모형을 이용한 항내 매물 예측수치 모형실험이 필수적이라 할 수 있다.

### 3. 표사량의 정식화

앞서 살펴본 「해빈변형의 예측」은 표사연구의 최종적인 목적이라는 것은 말할 나위도 없는 사실이다. 최근 계산기의 고속화에 수반하여, 수심변화와 표사 이동량을 연결시켜줄 표사이동의 연속방정식에 적당한 방법으로 평가된 표사량을 사용함으로써 직접 수치적으로 계산하여 해석하는 방법이 사용되고 있다. 최근의 표사이동에 관계된 연구의 가장 큰 목표는 이같은 해빈변형예측의 정도를 여하히 향상시킬수 있을까 하는 것이다. 이를 위해서는 첫째, 수심변화에 직접 관계되는 표사이동량의 추정정도를 높이는 방법과 둘째, 수심변화와 표사이동량과의 관계를 보다 현실적인 방법으로 정식화 시키는 것이 생각될 수 있다.

첫번째 방법에 대해서는 이미 다수의 표사이동모형이 제안 되어 있고, 현재 수행되고 있는 연구도 거의 대부분이 이러한 모형의 frame work중에서 이루어지고 있으며, 소위평형상태에 대한 표사량의 정량화에 관한 연구라 할 수 있다.

두번째 방법은 비평형 표사이동에 의해 유발되는 수심변화 예측에도 대응할 수 있도록 보다 일반적인 형태의 표사이동 연속방정식을 기초로 한것이다.

다음은 두방법을 구분하여 개략적 특성을 살펴보기로 한다.

#### 1) 표사량을 정량화하기 위한 모델 및 표사량의

#### 정식화

##### a. Stochastic모델

Stochastic모델은 Einstein(1950)에 의해서 처음으로 연구 되어진 것으로, 저질사의 정지상태로부터 이동상태로의 천이확률인 Pick-up rate와 확률변수로서의 이동거리인 Step length를 이용하여 확률적으로 정식화한 모델이다. 즉, 표사량을 정지상태로부터 이동상태로의 천이확률과 이동거리의 곱으로 표현한다. 그러나, 이 모델에서의 Pick-up rate 혹은 Step length 등을 파동에 의한 소류표사이동에 대해서 정확히 측정하는 것은 거의 불가능하고, 부유사에서는 도약거리를 정의할 수 없으므로 소류사의 상태에 대해서만 유효하다는 문제점이 존재한다.

##### b. Power 모델

유체는 저부마찰에 의해서 일산하는 에너지의 일부가 저질을 운송하는 에너지로서 사용된다고 하는 생각에서 Bagnald에 의해서 제안된 것으로 단위면적당 움직인 저질의 수와 수송속도로 수송량의 정량화를 나타낸 모델이다.

이 모델은 소류사 뿐만 아니라 부유사 수송량에의 추정에도 적용가능하고, 비교적 간단하다는 이점 때문에 이 모델에 근거하여 표사량의 정식화를 이론 제안자들이 많다. 단, 여기서 사용한 전단력은 Over all shear stress이고, 그 입자에 직접 작용하는 유효 전단력에 대해서는 토론의 여지가 있다.

##### c. Flux 모델

이 모델은 표사량 자체를 Flux로서 표현하는 방법으로, 이동속도와 표사농도를 이용하여 수송량을 구하였다. 표사량의 표현에 있어서는 다른 모델보다 보편성을 지니고 있고, 부유상태의 이동이 탁월한 경우에 적용하기 편리하다는 장점이 있다. 그러나, 소류사를 포함하여 표사농도 C 및 이동속도 US를 평가하는 것은 쉽지 않다는 문제점도 있다.

##### d. Kinematic 모델

앞서 살펴본 두 모형 모두 실측결과에 기반하여 경

험적인 상수가 포함되어 있기 때문에 최근에는 표사의 역학적인 이동기구로부터 표사의 수송량을 구하고자 하는 소위 Kinematic 모델의 연구가 가속화되고 있다. 대표적인 모델로는 해저지반층을 유효점성계수 개념을 적용한 단층 모델로 해석하고, 경계층 방정식을 풀다는 Euler적인 방법에 의해 소류사의 이동속도 및 이동층 두께를 해석하는 Sawaragi 모델(1984)을 들 수 있다.

또한 Nadaoka 등(1989)은 파랑장에서의 Sheet flow현상을 Sawaragi 등(1984)의 모델과 마찬가지로 단층 모델로 해석하여, 저질입자의 상방향확산과 침강을 모델에 도입시켜 계산을 수행하였다. 기초방정식으로는 단층유체로 치환시킨 형태의 Navier stokes방정식을 사용하고, 유효점성계수  $\mu_e$ 에 대해서는 수정 Eulers방정식을 사용하였다. 또한, Reynolds 응력에는 혼합거리 이론을 적용시켰다. 그러나 저질 입경  $d$  를 최소 Scale로 하여 난류혼합에 관련한 길이 Scale을 추가한 혼합Scale을 적용하여 구해진 확산계수를 사용하는 소위 경사 확산형모델을 도입하고 있으므로 Sheet flow층 하연의 고농도 영역에 대한 적용에 의문이 있다. 또한 여기에서 사용되는 혼합거리가 가속 또는 감속위상에서의 난류구조의 차이를 표현할 수 있을지도 의문점 중의 하나라 할 수 있다.

이외에도 표사이동의 대부분이 1/10~1/100의 해빈경사를 지닌 천해역에서 발생하기 때문에, 해빈사면경사가 Net표사량의 생성원인중의 하나라는 생각에서 해빈경사의 영향을 표사량이론에 도입하고자 하는 연구가 Yamashita(1986) 등에 의해 행해졌다.으나, 사립자의 운동기구의 해석을 토대로 하지 않았다는 문제점이 존재한다.

Kawada(1989)는 Yamashita(1986)의 연구가 사립자의 운동기구의 해석을 토대로 하지 않았다는 문제점에 착목하여 Saltation 모델을 사용하여 저질 입자의 운동방정식에 사면경사의 영향을 나타내는 항을 도입함으로써 표사량을 정식화 시키고자 하였다.

제안된 운동방정식을 재정리해 보면 다음과 같다.

$$\frac{dw}{dt} = \left[ \pm \frac{1}{2} C_D \frac{\pi d^3}{4} W^2 - \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \frac{\pi d^3}{6} g \cos \beta \right] /$$

$$\left( \frac{\sigma}{\rho} + \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

윗식에서 우변 항은 항력을 나타내며, 항은 중력항을 의미한다고 볼 수 있다. 그러나 이 식에서도 양력항은 고려되지 못했다는 아쉬움이 존재한다.

속도경사에 의한 양력항과 사립자의 회전운동 즉 Magnus효과에 기인한 양력은 사립자의 운동특성에서 무시될 수 없는 항이 될수도 있다고 사료된다.

이상의 모델들 중에서 부류상태의 수송이 탁월한 경우에는 압도적으로 Flux 모델이 우위에 있으며, 소류상태/부류상태의 양쪽이 혼재할 경우에는 Power 모델이 유효하다고 할 수 있다.

## (2) 일반적 표사이동연속방정식에 의한 수심변화예측

비평형 상태의 표사이동에 의한 수심변화도 고려한 표사이동 연속방정식은 다음 식(2)처럼 나타낼수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + \Delta Q \quad (2)$$

여기서,  $\gamma = 1 \dots u_* / w_f < 1$

$\gamma = 1 \dots u_* / w_f < 1$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + U_s \frac{\partial C}{\partial x} + V_s \frac{\partial C}{\partial y} &= \epsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \\ + \epsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - w_f \frac{\partial C}{\partial z} + \Delta Q/d \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $\Delta Q$ 는 해저로부터 부사표사량과 해저면으로의 침강표사량의 차이, 즉 부유사의 비평형성으로 부터 발생하는 항으로서, 일반적으로는 (3)과 같은 부유사 농도에 대한 이류확산방정식을 이용하여 해석이 가능하다. 또한 C는 부류사농도, ( $U_s$ ,  $V_s$ )는 부류사이동속도,  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$ 는 각각  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 방향의 확산계수,  $d$ 는 전수심이며,  $u^*$ ,  $w_f$ 는 저부마찰속도 및 부류사의 침강속도이다.

윗식(1)을 풀 경우 필요로 되는 양은 다음과 같다.

- a) 물질이동속도
- b) 확산계수
- c) 경계조건으로서의 기준점농도 혹은 침강/부상 flux

부류상태의 수송이 탁월한 저농도의 상태에서 a)와 b)는 소위, B.B.O.방정식을 해석함에 따라 구해진다. 소류 혹은 sheet flow상태의 고농도의 수송에 대해서는 유점점성의 개념에 기초한 단층 혹은 고체액체혼상류(2상류)모델에 의한 해석이 필요로 된다. c)의 경계조건은 식(1)을 토대로 완전한 부류상태로 수송되는 물질의 농도를 예측할 경우에 필요로 되는 것이고, 농도(Pick-up rate) 또는 flux  $4q$ 로 주어질수 있다.

#### 4. 맺음말

수치시물레이션을 이용한 해안지형변동 예측방법의 개요 및 표사량의 정식화에 대해 소개함과 동시에 그 문제점도 살펴보았다.

표사량의 정식화 문제는 해빈변형에 대한 시물레이션 결과를 좌우하는 핵심적 요소라 할 수 있다. 해빈변형 예측결과의 정도를 향상시키기 위해서는 수치해석기법에 대한 논의보다는 이와같은 표사량의 정식화에 대한 보다 활발한 연구가 필요할 것이다. ●

#### 〈참고 문헌〉

<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 일본토목학회 해안공학위원회(1994), 해안과동, 일본토목학회(일본)</li> <li>2. T. Sawarag(1995), 워터프론트개발과 수환경창조, 기보당출판(일본)</li> <li>3. 김규한(1998), 항만공사에 있어서 모형실험의 중요성과 그 적용실태, 해양수산부 항만건설기술세미나</li> <li>4. Nadaoka(1988), 비평형성 및 3차원성을 고려한 간이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>부류사 계산법, 제 35 회 해안공학 강연회 논문집, 일본토목학회(일본)</li> <li>5. Madsen, O. S.(1976), Qualitative description of sediment transport by waves, Proc.15th ICCE, ASCE.</li> <li>6. 김규한(1990), 표사이동메카니즘에 관한 고찰, 오사카대학 세미나자료</li> </ul>
--	---