

## 해안개발관련 수치모형의 현황조사

연 구 진 : 박 인 보

(국민대학교 교수)

이 창 훈

(한국해양연구소 연안공학부)

정 신 택

(원광대학교 교수)

조 흥 연

(한국해양연구소 연안·항만공학연구센터)

박 우 선

(연안항만공학연구센터 항만공학연구실)



## 1. 파랑변형모형의 고찰

### 1.1. 머리말

해안지역으로 전파되는 파랑의 변형을 예측하는 것은 그 지역을 이용하고 개발·보전하는 해안공학자에게는 아주 중요한 것이다. 파랑을 야기시키는 근원에 따라 살펴보면, 바람에 의하여 발생하는 풍파의 에너지가 가장 크고 이 파의 주기는 1초에서 30초 사이가 대부분이다. 또한, 달과 해의 인력으로 발생하는 조석파의 에너지가 그 다음으로 크고 이 파의 주기는 12시간, 24시간이 대부분이다. 해저지진으로 발생하는 쪼나미의 에너지는 그 다음으로 크고 이 파의 주기는 1분 이상의 장주기이다. 이 외에 배가 이동함에 따라 발생하는 항주파의 에너지는 작고 이 파의 주기는 1초 안팎이다. 파랑을 수심에 따라 살펴보면, 상대수심인  $h/L$  ( $h$ :수심,  $L$ :파장)이  $1/2$  보다 큰 경우 심해파(deep water wave)라고 하고, 상대수심이  $1/2$ 에서  $1/20$  사이인 경우 중간수심파(intermediate-depth water wave)라고 하고, 상대수심이  $1/20$  보다 작은 경우 천해파(shallow water wave)라고 한다.

파랑은 생성된 지점으로부터 멀리 전파되는 동안 장주기파는 단주기파에 비해 더 빨리 전파하는 분산성(dispersion)에 의하여 파랑이 확산된다. 또한, 단주기파는 점성과 파랑간의 비선형성으로 인하여 그 에너지가 감소한다. 파랑의 변형에는 수심이 알아짐에 따라 파고가 증가하는 파의 천수(shoaling), 파의 방향이 수심이 얕은 쪽으로 꺾이는 파의 굴절(refraction), 파의 에너지가 높은 곳에서 낮은 곳으로 퍼져나가는 파의 회절(diffraction), 파가 수심의 변화에 따라 위상의 변화가 생기고 되돌아가는 파의 반사(reflection), 수심이 아주 얕아서 그 에너지가 한계상태에 이르러 부서지면서(breaking) 발생하는 에너지감쇠, 바닥의 마찰이나 투수에 의한 에너지감쇠, 파랑과 해류가 공존하는 경우 파고, 파향, 파속의 변화 등 여러 가지가 있다. 수심의 영향을 받는 파랑의 변형인 천수, 굴절, 에너지감쇠는 심해에서는 거의 발생하지 않고, 수심이 얕을수록 더 크게 발생한다.

본 연구에서 파랑의 변형을 예측하는 수학적인 모형 가운데 현재까지 개발된 것에 관해서 알아보고자 한다. 특히, 해안공학자의 입장에서 실용적인 모형에 대해서 상세히 알아보겠다. 따라서, 그 모형은 수평면상으로 2차원이고 수심이 변하는 경우에도 적용가능하다.

### 1.2. 파랑변형모형

파랑의 변형 가운데 에너지가 보존되면서 변형하는 천수, 굴절, 회절, 반사를 예측하는 수학적 모형으로서 현재까지 개발된 것으로서 크게 두가지 유형으로 나눌 수 있는데, 첫 번째

로 과정경사인  $ka$  ( $k$ :파수,  $a$ :진폭)를 비선형의 매개변수로 하여 섭동법을 사용하여 유도되는 Stokes 파랑식이 있고, 두 번째로 상대파고인  $a/h$ 를 비선형의 매개변수로 하고 상대수심인  $kh$ 를 분산성의 매개변수로 하여 섭동법을 사용하여 유도되는 천수방정식(shallow water equation)이 있다. 파랑의 변형 가운데 천수, 굴절 만을 예측하고 회절, 반사를 예측하지 못하는 수학적 모형으로서 에너지이송방정식이 있다. 에너지감쇠 현상은 따로 독립적으로 발생하지 않고 에너지가 보존되면서 파랑이 변형하는 현상들과 함께 발생한다. 따라서, 에너지감쇠 현상은 Stokes 파랑식, 천수방정식, 에너지이송방정식에 에너지감쇠 항을 부가하여 예측할 수 있다. 에너지가 보존되면서 파랑이 변하는 현상을 예측하는 Stokes 파랑식과 천수방정식을 유형 및 수학적 꼴 별로 그림 1에 도시하였다. 그림 1에서 화살표는 어떤 모형식이 화살표가 지적하는 모형식으로 단순화될 수 있음을 나타낸다.

### 1.2.1. Stokes 파랑식

Stokes 파랑식은 심해나 중간수심해역에서 파랑의 변형을 비교적 정확히 예측할 수 있는식이다. 지배방정식은 비압축성 유체 · 비회전류의 연속방정식인 Laplace 방정식이고 수면상의 비선형 경계조건과 바닥 경계조건을 사용하고 수심적분하여 유도되는 식이다. 식을 유도하는 과정에서 수심의 변화가 완만하다고 가정하여 수심경사의 제곱의 항( $O(\nabla h)^2$ )과 곡률의 항( $O(\nabla^2 h)$ )을 무시하여 구한 식을 완경사방정식(mild-slope equation)이라고 부른다. Berkhoff(1972)는 Galerkin-eigenfunction 방법을 사용하여 선형 완경사방정식을 개발하였다. 선형 완경사방정식은 심해에서부터 천해까지 전 영역에서 파랑의 선형 분산성(linear dispersion relation)을 정확히 예측할 수 있고, 다른 비선형의 식에 비하여 수치적으로 적용하기 쉽다. 따라서, 해안공학자들은 Berkhoff의 타원형 식 이외에도 쌍곡선형과 포물선형으로 개발된 식들을 실제로 많이 사용하고 있다. 단지, 선형 완경사방정식은 선형의 식이기 때문에 얇은 수심에서 파고가 파장이나 수심에 비하여 상당히 큰 경우 파랑의 변형을 예측하는데 그 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

Booij(1983)는 완경사방정식이 어느 정도의 수심경사까지 정확히 예측할 수 있는지를 알아보기 위하여 수심이 서로 다른 두 개의 수평면을 다른 평면으로 연결하여 그 기울어진 면의 길이를 달리함에 따라 완경사방정식이 예측하는 파랑의 반사율과 Laplace 방정식을 유한요소법으로 해를 구하여 예측하는 파랑의 반사율을 비교하였다. 비교 결과, 바닥의 기울기가 1:3 까지는 완경사방정식을 사용하여도 충분히 정확함을 발견하였다. 최근, 완경사방정식을 유도할 때 수심경사의 제곱의 항과 수심의 곡률의 항을 그대로 보존하여 유도되는 식은 수심의 변화가 심한 해역에서도 파랑의 변형을 잘 예측할 수 있음이 밝혀졌다(Massel, 1993; Chamberlain과 Porter, 1995; Suh 등, 1997; Lee와 Park, 1997).

Berkhoff(1972)가 개발한 완경사방정식은 규칙파의 경우에 유도된 타원형의 식이다. 이 식과 같은 정확도를 유지하면서 시간에 따라 파랑이 전파되는 현상을 재현할 수 있는 쌍곡선형 완경사방정식이 개발되었다(Nishimura 등, 1983; Copeland, 1985). 한편, 주파수폭이 좁은 불규칙파가 전파할 때 파군이 군속도로 전파하는 현상을 재현할 수 있는 쌍곡선형 완경사방

정식이 개발되었다(Smith와 Sprinks, 1975; Radder와 Dingemans, 1985; Kubo 등, 1992; Lee, 1994). 불규칙파의 변형을 예측하고자 할 경우, 전체 입사파의 스펙트럼을 주파수폭이 좁은 몇 개의 스펙트럼 군으로 나눈 뒤에 각 스펙트럼 군 별로 불규칙파를 해석할 수 있는 모형을 사용하여 해를 구하고 이를 중첩하는 방법이 각각의 주파수 별로 해를 구하고 이를 중첩하는 것보다 계산시간 상으로 더 경제적이라는 주장이 있다(Lee와 Pyun, 1995; Suh 등, 1997).

Booij(1981)는 Berkhoff(1972)의 식에 실험적으로 도출한 비선형 분산식을 이용하여 비선형 효과를 가미하였고, Kirby와 Dalrymple(1986)은 Stokes 파랑식의 비선형 분산식과 천수방정식의 비선형 분산식을 조합하여 비선형 효과를 고려하였다. 한편, Kirby와 Dalrymple(1983)은 선형의 완경사방정식에 파의 방향이 미리 지정한 방향과 큰 차이가 없을 때 적용가능한 3차의 비선형 항을 부가하여 비선형 포물선형 식을 개발하였다. Kirby 등(1992)은 Radder와 Dingemans(1985)의 식에 이 비선형 항을 부가하여 비선형 쌍곡선형 식을 개발하였다. 최근 Nadaoka 등(1994)은 Galerkin 방법을 사용하여 심해에서부터 천해까지 전 수심에서 선형 분산식을 만족시키는 비선형 완경사방정식을 개발하였다.

Ebersole(1985)은 Berkhoff(1972)의 식으로부터 도출될 수 있는 eikonal 식과 에너지전송식과 또한 파수의 비회전성을 이용하여 심해에서의 파고, 파향, 주기가 주어졌을 때 천해로 전파함에 따라 근사적으로 해를 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 해석할 영역이 넓어도 계산시간이 작은 장점이 있으나, 반사파를 고려할 수 없고 회절효과가 큰 경우 파랑변형을 정확히 예측하지 못하는 단점이 있다.

### 1.2.2. 천수방정식

천수방정식으로서 두 개의 매개변수가  $O(a/h) \cong O(kh)^2$ 의 관계를 만족시킬 때 개발된 Boussinesq 식은 수심이 일정한 경우에 Boussinesq(1877)가 처음 개발하였고 수심의 변화가 있는 경우에 Peregrine(1967)이 개발하였다. 이 식은 현재까지 개발된 식 가운데 가장 정확하고 널리 사용되고 있다. 이 식을 유도하는 과정에서 급수전개기법을 사용하여 파의 압력 또는 속도의 수직방향의 효과를 고려하였고 섭동법을 써서  $O(a/h, (kh)^2)$ 까지 정확히 해석할 수 있는 비선형의 식을 개발하였다. 이 식은 수심적분한 연속방정식과 운동량방정식으로 구성되어 있고 파랑의 약한 비선형성(weakly nonlinear)과 약한 분산성(weakly dispersive)이 고려되어 있다. 따라서, 조석파나 쓰나미의 변형을 예측하거나 쇄파현상을 규명하는 경우와 같이 수심이 얕고 파고가 큰 영역에 Boussinesq 식을 사용하면 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 반면, 이 식은 수심이 깊을수록 그 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

Boussinesq 식에 약한 분산성을 나타내는 항을 무시하면 Airy의 천수방정식이 된다. 수평면상으로 1차원으로 전파하는 진행파의 경우 Boussinesq 식으로부터 Korteweg-de Vries (KdV) 식(Korteweg와 de Vries, 1895)을 얻을 수 있다. 이 식에서 불변형의 파랑인 크노이딜파(cnoidal wave)가 재현되는데 이 파는 주기가 무한히 클 때 고립파(solitary wave)가 되

고 파고가 무한이 작을 때 선형의 정현파(sinusoidal wave)가 된다. 진행파가 수평면상 2차원에서 한 방향으로 집중적으로 전파하고 그 주기가 유한한 경우에 유도되는 Kadomtsev-Petviashvili (KP) 식(Kadomtsev와 Petviashvili, 1970)이 있다.

최근에, Boussinesq 식이 깊은 수심에서 정확도가 떨어지는 문제점을 최소화하려는 시도가 있었다. 첫 번째로 기존의 Boussinesq 식 가운데 운동량방정식에 보정항을 가미하여 도출되는 분산식이 선형 분산식에 더 가까워지도록 하는 것이 있고(Madsen과 Sorensen, 1992), 두 번째로 Boussinesq 식에서 수심평균한 속도를 쓰지 않고 임의의 수심에서의 속도를 사용하여 도출되는 분산식이 선형 분산식에 더 가까워지도록 하는 것이 있다(Nwogu, 1993). 세 번째로 Isobe(1994)는 변수분리법을 사용하고 수직분포함수로서 다항함수를 사용하여 비선형 완경사방정식을 개발하였다. 그러나, 이러한 식들도 중간수심해과 심해에서는 완경사방정식보다 정확도가 떨어지는 실정이다.

### 1.2.3. 에너지이송방정식

에너지이송방정식은 파랑의 위상에 대한 정보는 무시한 채 파랑의 에너지 스펙트럼이 수심의 변화에 따라 굴절하면서 파향선의 방향이 바뀌고 굴절 및 천수 효과로 스펙트럼의 크기가 달라지는 현상을 예측하는 모형식이다. 따라서, 이 모형식은 파랑의 회절과 반사 현상을 예측할 수 없는 한계가 있다. 이 식은 Karlsson(1969)이 처음 개발하였고, 바람으로부터 파랑의 에너지가 생성되고 또한 소멸되는 현상을 예측하는 WAM(WAVe Model) 모형 가운데 소위 제3세대 WAM 파랑모형에서 많이 연구되고 있다(Cavaleri 등, 1989).

### 1.2.4. 쇄파

파랑이 아주 얕은 수심까지 전파되는 동안 그 에너지는 증가하고 급기야 불안정한 상태에 이르리 쇄파가 발생하고 많은 에너지가 손실되는 데 이러한 역동적인 현상을 규명하기에는 아직도 요원하다. 쇄파에서 에너지가 감쇠하는 현상을 예측하는 방법으로서 하천에서 해류가 사류에서 상류로 변할 때 발생하는 도수(hydraulic jump) 현상에서의 에너지손실과 연계하여 구하는 법이 시도되었다(Battjes와 Janssen, 1978; Lee와 Kirby, 1994). 또한, 에너지감쇠율이 그 지점의 에너지와 쇄파가 더 이상 일어나지 않는 안정된 상태에서의 에너지의 차에 비례한다고 가정하여 에너지의 감쇠현상을 예측하는 방법이 시도되었다(Dally 등, 1985). 또 다른 방법으로서 와류에서의 혼합길이(mixing length)나 와류길이(eddy length)를 이용하여 쇄파에서의 에너지감쇠율을 와류점성계수로 나타내었다(Heitner와 Housner, 1970; Karambas 등, 1990; Karambas와 Koutitas, 1992). 또 다른 방법으로서 쇄파에서 발생하는 과다한 운동량의 효과를 고려한 surface roller의 개념을 도입하여 에너지의 감쇠현상을 예측하였다(Schäffer 등, 1993).

### 1.2.5. 바닥의 마찰 · 투수

바닥의 마찰이나 투수층에서의 투수에 의한 에너지감쇠의 정도는 심해에서는 미미하지만

천해에서는 무시할 수 없을 정도로 커진다. Dalrymple 등(1984)은 투수층, 점토로 이루어진 바닥, 기타 여러 가지 경우에 선형 완경사방정식에 적용될 수 있는 에너지감쇠계수를 제시하였다. 천수방정식에서는 바닥의 마찰계수로서 하천공학에서 사용되는 Manning 계수나 Chezy 계수를 주로 쓴다.

#### 1.2.6. 파랑 · 해류의 공존

파랑과 해류가 공존하는 경우는 크게 두가지 경우가 있다. 첫 번째는 파랑과 파랑간의 상호작용으로 잉여응력(radiation stress)이 발생하고 이것의 공간적인 불균형으로 해류가 발생하고 평균수면이 변하게 된다(Longuet-Higgins와 Stewart, 1962). 이 해류는 비선형식에 이미 고려되어 있고, 선형식을 사용할 경우 잉여응력의 공간적인 변화율을 선형식의 해로부터 구하여 평균수면을 다르게 줄 수 있다. 두 번째는 바람으로 발생한 파에 대비되는 조석파나 하구에서 파에 대비되는 하천의 흐름과 같이 파랑과는 무관하게 형성된 해류가 있다. 이 흐름은 파고, 과향, 과속이 변하는 Doppler shift 현상을 야기시킨다. 이러한 현상을 예측하는 모형으로서 Stokes 파랑식에서는 Kirby(1984)가 Smith와 Sprinks(1975)의 식과 Radder와 Dingemans(1985)의 식을 확장한 식이 있고, Lee(1998)가 Suh 등(1997)의 식을 확장한 식이 있다. 한편, Chae와 Jeong(1992)은 Kirby(1984)의 식에 Ebersole(1985)의 방법을 사용하여 계산상의 편의를 도모하였다. 또한, 천수방정식에서는 Yoon과 Liu(1989)가 Peregrine(1967)의 Boussinesq 식을 확장한 식이 있다.

### 1.3. 쌍곡선형 · 타원형 · 포물선형 모형식과 초기 · 경계치 문제

#### 1.3.1. 쌍곡선형 모형식

쌍곡선형 식은 잔잔한 상태에서 시작하여 조파선에서 파가 생성되고 이 효과가 전 영역에 미치는 정상상태에 이르렀을 때 해를 구한다. 매 시간마다 경계조건이 주어져야 하는데, 파의 에너지를 창출하기 위해서 임의의 조파경계조건이 필요하고, 육지와 만나는 경계에는 임의의 반사율을 가미하여야 하고, 공간적인 계산영역의 경계에는 이에 도달하는 파의 에너지가 영역 밖으로 빠져 나갈 수 있어야 할 것이다.

현재까지 개발된 조파경계에는 첫 번째로 계산영역의 경계나 영역 내에 임의로 값을 지정하거나(Dirichlet boundary condition) 그 값의 변화율을 지정하는 (Neumann boundary condition) 외부조파 경계조건이 있고, 두 번째로 계산영역 내에 임의의 값을 더해주는 내부조파 경계조건(Larsen과 Dancy, 1983; Madsen과 Larsen, 1987; 윤성범 등, 1996; 이창훈, 1997; 이창훈, 1998)이 있다. 외부조파기법을 사용할 경우 그 경계에 도달한 파가 그대로 통과하지 못하고 부딪쳐서 수치적으로 문제가 발생할 가능성이 있다. 반면, 내부조파기법을 사용할 경우 이 경계에 도달한 파는 그대로 통과하고, 또한 조파경계에서는 원하는 파의 에너지가 만들어져 해안공학자에게 유용하다. 단지 이 기법은 Peregrine(1967)의 식, Copeland(1985)의 식, Radder와 Dingemans(1985)의 식, Suh 등(1997)의 식, Kirby(1984)의

식, Lee(1998)의 식에만 적용되어 현재까지 보편적으로 쓰이지 못한 실정이다.

Abbott 등(1984)은 Peregrine(1967)의 식을 ADI (alternating direction implicit) 방법을 사용하여 차분하였다. Copeland(1985)는 그의 식을 staggered 격자망을 구성하고 leap-frog 방법을 사용하여 차분하였다. Kirby 등(1992)은 Radder와 Dingemans(1985)의 식을 predictor-corrector 방법을 사용하여 시간적으로 차분하였다. Kubo 등(1992)은 그들의 식을 ADI 방법을 사용하여 차분하였다.

### 1.3.2. 타원형 모형식

규칙파의 경우 시간의 변화율이 있는 항을 변형하여 쌍곡선형 식을 타원형 식으로 바꿀 수 있다. 타원형 식을 이용하여 해를 구할 경우 쌍곡선형 모형과 마찬가지로 경계조건을 지정하여야 한다. 이 과정에서 행렬이 형성되어 해를 구하는데 있어서 대체로 쌍곡선형 식으로 해를 구하는 것보다 더 많은 자료를 저장하여야 하고 계산시간이 더 오래 걸리는 단점이 있다.

Chen과 Mei(1974)는 Berkhoff(1972)의 식을 유한요소법을 사용하여 항내에서의 파랑의 변형을 해석하였다. 이 방법은 경계면이 복잡한 경우에도 정확히 해석 할 수 있지만 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있다. Panchang 등(1991)은 preconditioned conjugate gradient 방법을 사용하여 Berkhoff(1972)의 식을 풀었는데 이 방법은 유한요소법에 비하여 복잡한 경계면을 정확히 해석 할 수 없지만 계산시간이 적게 드는 장점이 있다.

### 1.3.3. 포물선형 모형식

파의 방향이 미리 지정한 방향과 큰 차이가 없을 때 타원형 식을 포물선형 식으로 근사시킬 수 있다. 포물선형 식을 사용한 해는 상류경계에서 임의의 파고와 과향이 주어지고, 측면경계에서 파를 관통시키거나 임의의 크기로 반사시키고, 하류로 나아가면서 해를 구하는 방법을 쓴다. 포물선형 식에 의한 해법은 자료의 저장량과 계산시간이 아주 작아 타원형 식이나 쌍곡선형 식의 해법에 비해 더 경제적인 장점이 있는 반면, 반사되어오는 파랑의 변형을 해석 할 수 없고 파의 방향이 미리 지정한 방향과 큰 차이가 날 때 많은 오차가 발생하는 단점이 있다.

측면경계에서의 파를 완전반사시키는 것은 쉬우나 임의의 크기로 반사시키는 것과 그대로 통과시키는 방법은 아직도 연구되고 있는 실정이다. Kirby(1986a)는 측면으로 들어오는 파를 평면파로 가정하여 입사파의 방향을 바로 상류지점에서 예측하고 측면경계에 그 방향으로 전파하는 방사경계조건을 사용하여 측면경계로 파를 관통시키는 방법을 시도하였다. 그러나, 여러방향으로부터 전파되는 파의 경우 이 방법을 쓸 수 없다. Dalrymple과 Martin(1992)은 Laplace 변환 기법을 사용하여 단순한 포물선형 식과 Pade 근사화 기법에 의한 포물선형 식의 경우에 파가 측면경계를 완벽하게 관통할 수 있는 기법을 개발하였다. 그러나, 이 방법은 측면경계의 수심이 일정하여야 하는 제약조건이 있고 다른 포물선형 식에는 적용할 수 없는 단점이 있다.

Radder(1979)는 행렬 분리(splitting-matrix) 기법을 사용하여 Berkhoff(1972)의 식을 단순한 포물선형 식으로 근사화하였다. 파의 방향이 지정된 방향과 멀어짐에 따른 포물선형 식의 오차가 커지는 문제점을 줄이기 위하여 Booij(1981)는 Pade 근사화 기법을 사용하였고, Kirby(1986b)는 분수식 근사화(rational approximation) 기법과 minimax 근사화 기법을 사용하였다. 포물선형 식은 거의 대부분 Crank-Nicolson 방법으로 차분하여 해를 구하고 있다.

한편, Dalrymple 등(1989)은 Fourier 변환 기법을 사용하여 편미분방정식인 선형 완경사방정식을 상미분방정식으로 바꾸어 해를 구하였고 Suh 등(1990)은 비선형 완경사방정식을 마찬가지 방법으로 해를 구하였다. Fourier 변환 기법을 사용한 해법은 파의 방향이 미리 지정한 방향과 차이가 있어도 오차가 생기지 않는 장점이 있지만 반사파를 고려할 수 없고 계산영역이 사각형이어야 하는 단점이 있다. Fourier 변환 기법에 의한 상미분방정식은 Runge-Kutta 방법을 사용하여 적분하였다.

#### 1.4. 맷음말

본 연구에서 파랑의 변형을 예측하는 모형과 그 해법에 대하여 알아보았다. 해안공학적인 관점에서 어느 경우에 어떤 모형을 사용하는 것이 타당한가를 알아보는 것은 아주 중요하다. 수심이 얕지 않은 경우 완경사방정식을 사용하는 것이 좋겠고 수심의 변화가 심한 경우에는 바닥의 기울기의 제곱과 곡률의 효과가 고려된 모형을 사용하는 것이 좋겠다. 다방향 불규칙파가 항내로 전파되는 경우, 반사효과 뿐만 아니라 불규칙파의 거동도 고려하여야 하기 때문에 Smith와 Sprinks의 모형, Radder와 Dingemans의 모형, Kubo 등의 모형, Lee의 모형을 사용하는 것이 좋겠다. 만약, 수심이 얕은 경우 Boussinesq 식을 사용하는 것이 좋겠다. 수심이 아주 얕아 쇄파가 발생하는 곳에서는 Boussinesq 식에 에너지감쇠 효과를 추가하여야 할 것이다. 반사효과가 적고 파가 대부분 일정한 방향으로 전파되는 경우 포물선형 식을 쓰는 것이 경제적이다. Boussinesq 식과 같은 비선형식을 차분하여 해를 구할 때 그 식의 비선형성으로 인하여 그 해가 수치적으로 불안정한 경우가 발생하기도 한다. 따라서, 현재까지도 해안공학자에게 Boussinesq 식이 보편적으로 사용되지 못하는 실정이다.

최근에 해안공학자들이 한창 연구하고 있는 주제는 심해에서부터 천해까지 적용될 수 있는 비선형 파랑식의 개발이다. 이에 대한 접근은 크게 두가지로 나눌 수 있는데 첫 번째는 Stokes 파랑식에서 천해에서의 비선형 효과를 고려한 모형이 있고(Nadaoka 등, 1994), 두 번째는 Boussinesq 식에서 심해까지도 선형의 분산성을 만족시킬려는 모형이 있다(Madsen과 Sorensen, 1992; Nwogu, 1993; Isobe, 1994). 첫 번째 유형의 모형식에서는 각 주파수 별로 위상속도와 군속도를 미리 알아서 실제 계산시 계수로 써야 하기 때문에 실시간 monitoring이 불가능하다. 이는 Stokes 파랑식의 한계이기도 하다. 그리고, 두 번째 유형의 모형식은 여전히 Stokes 파랑식에 비하여 선형의 분산성을 완전히 만족시키지 못하는 한계가 있다. 즉, 현재까지 여전히 이 주제에 대한 연구는 여러 해안공학자들에게 완전히 해결하지 못한 숙제로 남아 있다.

## 1.5 참고문헌

1. 윤성범, 이종인, 이정규, 채장원. (1996). “항내 수면교란 수치예측모형의 경계처리기법.” *대한토목학회논문집*, 16(2-1), 53-62.
2. 이창훈. (1997). “시간의존 완경사방정식에서의 내부조파기법.” *대한토목학회논문집*, 17(2-4), 359-366.
3. 이창훈. (1998). “해류의 영향을 받는 해역에서 시간의존 파랑식의 내부조파.” *대한토목학회논문집* (제재 가).
4. Abbott, M.B., McCowan, A.D. and Warren, I.R. (1984). “Accuracy of short-wave numerical models.” *J. Hydraulic Eng.*, 110, 1287-1301.
5. Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M. (1978). “Energy loss and set-up due to breaking in random waves.” *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.*, Hamburg, 568-587.
6. Berkhoff, J.C.W. (1972). “Computation of combined refraction-diffraction.” *Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng.*, Vancouver, 471-490.
7. Booij, N. (1981). *Gravity Waves on Water with Non-Uniform Depth and Current*, Ph.D. Dissertation, Delft Univ. of Technology.
8. Booij, N. (1983). “A note on the accuracy of the mild-slope equation.” *Coastal Eng.*, 7, 191-203.
9. Boussinesq, J. (1877). “Essai sur la théorie des eaux courantes.” *Mém. Prés. Acad. Sci. Paris. (Ser. 2)*, 23, 1-680.
10. Cavalieri, L., Bertotti, L. and Lionello, P. (1989). “Shallow water application of the third-generation WAM wave model.” *J. Geophy. Res.*, 94(C6), 8111-8124.
11. Chae, J.W. and Jeong, S.T. (1992). “Current-depth refraction and diffraction model for irregular water waves.” *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng.*, Venice, 129-141.
12. Chamberlain, P.G. and Porter, D. (1995). “The modified mild-slope equation.” *J. Fluid Mech.*, 291, 393-407.
13. Chen, H.S. and Mei, C.C. (1974). “Oscillations and wave forces in a man-made harbor in the open sea.” *Proc. 10th Symp. Naval Hydrodyn.*, Office of Naval Res., 573-596.
14. Copeland, G.J.M. (1985). “A practical alternative to the mild-slope wave equation.” *Coastal Eng.*, 9, 125-149.
15. Dally, W.R., Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1985). “Wave height variation across beaches of arbitrary profile.” *J. Geophy. Res.*, 90, 11917-11927.
16. Dalrymple, R.A., Kirby, J.T. and Hwang, P.A. (1984). “Wave diffraction due to areas of energy dissipation.” *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 110, 67-79.
17. Dalrymple, R.A. and Martin, P.A. (1992). “Perfect boundary conditions for parabolic

- water-wave models." *Proc. Royal Society of London A.*, 437, 41–54.
18. Dalrymple, R.A., Suh, K.D., Kirby, J.T. and Chae, J.W. (1989). "Models for very wide-angle water waves and wave diffraction. Part 2. Irregular bathymetry." *J. Fluid Mech.*, 201, 299–322.
  19. Ebersole, B.A. (1985). "Refraction-diffraction model for linear water waves." *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 111, 939–953.
  20. Heitner, K.L. and Housner, G.W. (1970). "Numerical model for tsunami runup." *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 96, 701–719.
  21. Isobe, M. (1994). "Time-dependent mild-slope equations for random waves." *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng.*, Kobe, 285–299.
  22. Kadomtsev, B.B. and Petviashvili, V.I. (1970). "On the stability of solitary waves in weakly dispersing media." *Sov. Phys. Dokl.*, 15, 539–541.
  23. Karambas, Th.V. and Koutitas, C. (1992). "A breaking wave propagation model based on the Boussinesq equations." *Coastal Eng.*, 18, 1–19.
  24. Karambas, Th.V., Krestenitis, Y. and Koutitas, C. (1990). "A numerical solution of Boussinesq equations in the inshore zone." *Hydrosoft*, 3, 34–37.
  25. Karlsson, T. (1969). "Refraction of continuous ocean wave spectra." *J. Waterways and Harbors Division, Proc. ASCE*, 95, 437–448.
  26. Kirby, J.T. (1984). "A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography." *J. Geophy. Res.*, 89(C1), 745–747.
  27. Kirby, J.T. (1986a). "Open lateral boundary condition for application in the parabolic equation method." *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 112, 460–465.
  28. Kirby, J.T. (1986b). "Rational approximations in the parabolic equation method for water waves." *Coastal Eng.*, 10, 355–378.
  29. Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (1983). "A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography." *J. Fluid Mech.*, 136, 453–466.
  30. Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (1986). "An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models." *Coastal Eng.*, 9, 545–561.
  31. Kirby, J.T., Lee, C. and Rasmussen, C. (1992). "Time-dependent solutions of the mild-slope wave equation." *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng.*, Venice, 391–404.
  32. Korteweg, D.J. and de Vries, G. (1895). "On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal and on a new type of long stationary waves." *Philos. Mag.*, 39, 422–443.
  33. Kubo, Y., Kotake, Y., Isobe, M. and Watanabe, A. (1992). "Time-dependent mild slope equation for random waves." *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng.*, Venice,

419–431.

34. Larsen, J. and Dancy, H. (1983). "Open boundaries in short wave simulations – a new approach." *Coastal Eng.*, 7, 285–297.
35. Lee, C. (1994). *A Study of Time-Dependent Mild-Slope Equations*, Ph.D. Dissertation, Univ. of Delaware.
36. Lee, C. (1998). "Time-dependent equations for linear surface wave-current interaction over rapidly varying topography." *KSCE J. Civil Eng.* (in press).
37. Lee, C. and Kirby, J.T. (1994). "A time-dependent mild-slope equation model for breaking waves." *Int. Symp.: Waves – Physical and Numerical Modelling*, Vancouver, 614–623.
38. Lee, C. and Park, W.S. (1996). "Extended Copeland-type wave equations for rapidly varying topography." *J. Korean Society of Civil Engrs.*, 17(2–2), 157–164.
39. Lee, C. and Pyun, C.K. (1995). "Wave group behavior for time-dependent mild-slope equations." *J. Korean Society of Civil Engrs.*, 15, 1659–1668.
40. Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1962). "Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to 'surf beats'." *J. Fluid Mech.*, 13, 481–504.
41. Madsen, P.A. and Larsen, J. (1987). "An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation." *Coastal Eng.*, 11, 329–351.
42. Madsen, P.A. and Sorensen, O.R. (1992). "A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly varying bathymetry." *Coastal Eng.*, 18, 183–204.
43. Massel, S.R. (1993). "Extended refraction-diffraction equation for surface waves." *Coastal Eng.*, 19, 97–126.
44. Nadaoka, K., Beji, S. and Nakagawa, Y. (1994). "A fully-dispersive nonlinear wave model and its numerical solutions." *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng.*, Kobe, 427–441.
45. Nishimura, H., Maruyama, K. and Hirakuchi, H. (1983). "Wave field analysis by finite difference method." *Proc. 30th Japanese Conf. Coastal Eng.*, 123–127 (in Japanese).
46. Nwogu, O. (1993). "Alternative form of Boussinesq equation for nearshore wave propagation." *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 119, 618–638.
47. Panchang, V.G., Pearce, B.R., Wei, G. and Cushman-Roisin, B. (1991). "Solution of the mild-slope wave problem by iteration." *Applied Ocean Res.*, 13, 187–199.
48. Peregrine, D.H. (1967). "Long waves on a beach." *J. Fluid Mech.*, 27, 815–827.
49. Radner, A.C. (1979). "On the parabolic equation method for water-wave propagation." *J. Fluid Mech.*, 95, 159–176.
50. Radner, A.C. and Dingemans, M.W. (1985). "Canonical equations for almost periodic,

- weakly nonlinear gravity waves." *Wave Motion*, 7, 473-485.
- 51. Schäffer, H.A. Madsen, P.A. and Deigaard, R. (1993). "A Boussinesq model for waves breaking in shallow water." *Coastal Eng.*, 20, 185-202.
  - 52. Smith, R. and Sprinks, T. (1975). "Scattering of surface waves by a conical island." *J. Fluid Mech.*, 72, 373-384.
  - 53. Suh, K.D., Dalrymple, R.A. and Kirby, J.T. (1990). "An angular spectrum model for propagation of Stokes waves." *J. Fluid Mech.*, 221, 205-232.
  - 54. Suh, K.D., Lee, C. and Park, W.S. (1997). "Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography." *Coastal Eng.*, 32, 92-118.
  - 55. Yoon, S.B. and Liu, P.L.-F. (1989). "Interaction of currents and weakly nonlinear water waves in a shallow water." *J. Fluid Mech.*, 205, 397-419.

## 부록. 파랑변형모형식

### A.1. Stokes의 파랑식

#### A.1.1. 타원형 식

##### A.1.1.1. 선형식

Berkhoff (1972) :

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + k^2 CC_g \eta = 0$$

여기서,  $\eta$ 는 수면변위이고,  $C$ 와  $C_g$ 는 각각 파의 위상속도와 군속도이고,  $k$ 는 파수이고,  $\nabla$ 은 수평미분연산자이다.

Massel (1993) :

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \tilde{\phi}) + k^2 CC_g \tilde{\phi} - \omega^2 \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \tilde{\phi} = 0$$

여기서,  $\omega$ 는 각주파수이고,  $h$ 는 수심이고,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 수심과 주기의 함수이다(Suh 등, 1997).

#### A.1.2. 쌍곡선형 식

##### A.1.2.1. 선형식

Smith와 Sprinks (1975) :

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + (\omega^2 - k^2 CC_g) \eta = 0$$

Nishimura 등 (1983), Copeland (1985) :

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

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

여기서,

$$\mathbf{Q} = \frac{CC_g}{g} \nabla \tilde{\phi},$$

$\tilde{\phi}$ 는 평균수면상에서의 속도포텐셜  $\phi(x, y, z=0)$ 이고  $g$ 는 중력가속도이다.

Radder와 Dingemans (1985) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \frac{CC_g}{g} \nabla \tilde{\phi} \right) - \frac{\omega^2 - k^2 CC_g}{g} \tilde{\phi} = 0$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} + g\eta = 0$$

Kubo 등 (1992) :

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + k^2 CC_g \hat{\eta} + i \nabla \cdot \left( \frac{\partial}{\partial \omega} (CC_g) \nabla \frac{\partial \hat{\eta}}{\partial t} \right) + i \frac{\partial}{\partial \omega} (k^2 CC_g) \frac{\partial \hat{\eta}}{\partial t} = 0$$

여기서,

$$\hat{\eta} = \eta e^{i \bar{\omega} t}$$

Lee (1994) :

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + (\omega^2 - k^2 CC_g) \eta + \alpha \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + 2i\omega \frac{\partial \eta}{\partial t} - \omega^2 \eta \right) = 0$$

그리고,

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + k^2 CC_g \hat{\eta} + i \nabla \cdot \left( \frac{\partial}{\partial \omega} (CC_g) \nabla \frac{\partial \hat{\eta}}{\partial t} \right) + i \frac{\partial}{\partial \omega} (k^2 CC_g) \frac{\partial \hat{\eta}}{\partial t} + (\alpha - 1) \frac{\partial^2 \hat{\eta}}{\partial t^2} = 0$$

여기서,

$$\alpha = -\frac{1}{C_g^2} \{ C_g (C - C_g) - \omega \omega'' \}$$

Suh 등 (1997) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \frac{CC_g}{g} \nabla \tilde{\phi} \right) - \frac{\omega^2 - k^2 CC_g}{g} \tilde{\phi} + \frac{\omega^2}{g} \{ R_1 (\nabla h)^2 + R_2 (\nabla^2 h) \} \tilde{\phi} = 0$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} + g\eta = 0$$

그리고,

$$\frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \tilde{\phi}) + (\omega^2 - k^2 CC_g) \tilde{\phi} + \omega^2 \{ R_1 (\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h \} \tilde{\phi} = 0$$

Lee와 Park (1997) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\frac{C_g}{C} - R_1 (\nabla h)^2 - R_2 \nabla^2 h} \nabla \cdot \mathbf{Q} = 0$$

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

#### A.1.2.2. 비선형식

Kirby 등 (1992) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \frac{CC_g}{g} \nabla \tilde{\phi} \right) - \frac{\omega^2 - k^2 CC_g + k^4 C^2 D |\eta|^2}{g} \tilde{\phi} = 0$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} + g\eta = 0$$

여기서,

$$D = \frac{\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh}{8 \sinh^4 kh}$$

Nadaoka 등 (1994) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \sum_{m=1}^N \nabla \cdot \left\{ \frac{\sinh k_m(h+\eta)}{k_m \cosh k_m h} \mathbf{U}_m \right\} &= 0 \\ \sum_{m=1}^N a_{mn} \frac{\partial \mathbf{U}_m}{\partial t} + b_n \nabla \{ g\eta + \frac{1}{2}(q_s^2 + w_s^2) \} \\ = \sum_{m=1}^N \{ c_{nm} \nabla \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{U}_m) + d_{nm} \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{U}_m) \}, \quad (n=1, 2, \dots, N) \end{aligned}$$

여기서, 입자속도의 수평성분인  $\mathbf{q}$  는

$$\mathbf{q} = \sum_{m=1}^N \frac{\cosh k_m(h+z)}{\cosh k_m h} \mathbf{U}_m$$

입자속도의 수직성분은  $w$  이고,  $a_{nm} = a_{mn}$ ,  $b_n$ ,  $c_{nm} = c_{mn}$ ,  $d_{nm}$  은 수심과 주기의 합수이고(Nadaoka 등, 1994), 아랫첨자  $s$  는 수면을 나타낸다.

#### A.1.2.3. 파랑 · 해류 공존시 선형식

Kirby (1984) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \eta) + \nabla \cdot \left( \frac{CC_g}{g} \nabla \tilde{\phi} \right) - \frac{\sigma^2 - k^2 CC_g}{g} \tilde{\phi} = 0$$

$$\frac{D\tilde{\phi}}{Dt} + g\eta = 0$$

그리고,

$$\frac{D^2\tilde{\phi}}{Dt^2} + (\nabla \cdot \mathbf{U}) \frac{D\tilde{\phi}}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \tilde{\phi}) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \tilde{\phi} = 0$$

여기서,

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla$$

$$\sigma = \omega - \mathbf{k} \cdot \mathbf{U}$$

$\mathbf{U}$  는 해류의 속도이다.

Lee (1998) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \eta) + \nabla \cdot \left( \frac{CC_g}{g} \nabla \tilde{\phi} \right) - \frac{\sigma^2 - k^2 CC_g}{g} \tilde{\phi} + \frac{\sigma^2}{g} \{ R_1 (\nabla h)^2 + R_2 (\nabla^2 h) \} \tilde{\phi} = 0$$

$$\frac{D \tilde{\phi}}{Dt} + g\eta = 0$$

그리고,

$$\frac{D^2 \tilde{\phi}}{Dt^2} + (\nabla \cdot \mathbf{U}) \frac{D \tilde{\phi}}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \tilde{\phi}) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \tilde{\phi} + \sigma^2 \{ R_1 (\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h \} \tilde{\phi} = 0$$

여기서,  $R_1$  과  $R_2$  는 수심, 주기, 해류의 속도의 함수이다(Lee, 1998).

### A.1.3. 포물선형 식

#### A.1.3.1. 선형식

Radder (1979) :

$$2ikCC_g \frac{\partial A}{\partial x} + 2k(k - k_0)CC_g A + i \frac{\partial}{\partial x} (kCC_g) + \frac{\partial}{\partial y} (CC_g \frac{\partial A}{\partial y}) = 0$$

여기서, 진폭  $A$  와 지정된 파수  $k_0$  는 속도포텐셜  $\phi$  와 다음 관계에 있다.

$$\phi = -\frac{ig}{\omega} A e^{i(k_0 x - \omega t)}$$

Booij (1981) : (수심이 일정한 경우)

$$2ik \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{i}{2k} \frac{\partial^3 A}{\partial x \partial y^2} = 0$$

### A.1.3.2. 비선형식

**Kirby와 Dalrymple (1983) :**

$$2ikCC_s \frac{\partial A}{\partial x} + 2k(k - k_0)CC_s A + i \frac{\partial}{\partial x}(kCC_s) + \frac{\partial}{\partial y}(CC_s \frac{\partial A}{\partial y}) - k^4 C^2 D |A|^2 A = 0$$

## A.2. 천수방정식

### A.2.1. 쌍곡선형 비선형식

**Peregrine (1967) :**

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}(h + \eta)] = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + g \nabla \eta = \frac{1}{2}(h + \eta) \frac{\partial}{\partial t} \{ \nabla [\nabla \cdot (\mathbf{u}(h + \eta))] \} - \frac{1}{6}(h + \eta)^2 \frac{\partial}{\partial t} [\nabla (\nabla \cdot \mathbf{u})]$$

여기서,

$$\mathbf{u} = \frac{1}{h + \eta} \int_{-h}^{\eta} \nabla \phi dz$$

**Madsen과 Sorensen (1992) :**

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{h + \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{h + \eta} \right) + g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} = \Psi_1$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{h + \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{h + \eta} \right) + g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} = \Psi_2$$

여기서,  $P$  와  $Q$  는 각각  $\int_{-h}^h \nabla \phi dz$  의  $x, y$  성분이고,

$$\begin{aligned}\Psi_1 = & (B + \frac{1}{3})h^2(\frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t}) + Bgh^3(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2}) \\ & + h\frac{\partial h}{\partial x}(\frac{1}{3}\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6}\frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + 2Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2}) \\ & + h\frac{\partial h}{\partial y}(\frac{1}{6}\frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} + Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Psi_2 = & (B + \frac{1}{3})h^2(\frac{\partial^3 Q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t}) + Bgh^3(\frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y}) \\ & + h\frac{\partial h}{\partial y}(\frac{1}{3}\frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + \frac{1}{6}\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + 2Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} + Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}) \\ & + h\frac{\partial h}{\partial x}(\frac{1}{6}\frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} + Bgh\frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y})\end{aligned}$$

$$B = \frac{1}{15}$$

Nwogu (1993) :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \{ \mathbf{u}_a (h + \eta) \} + \nabla \cdot [ (\frac{z_a^2}{2} - \frac{h^2}{6}) h \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_a) + (z_a + \frac{h}{2}) h \nabla \{ \nabla \cdot (h \mathbf{u}_a) \}] = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_a}{\partial t} + (\mathbf{u}_a \cdot \nabla) \mathbf{u}_a + g \nabla \eta + \frac{z_a^2}{2} \nabla (\nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_a}{\partial t}) + z_a \nabla [\nabla \cdot (h \frac{\partial \mathbf{u}_a}{\partial t})] = 0$$

여기서,  $\mathbf{u}_a$  는 임의의 위치  $z = z_a$  에서의 수평방향의 입자속도이다.

#### A.2.2. 파랑 · 해류 공존시 비선형식

Yoon과 Liu (1989) :

$$\frac{\partial \eta_w}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \eta_c + \eta_w) \mathbf{u}_w + \eta_w \mathbf{u}_c - \langle \eta \mathbf{u}_w \rangle] = 0$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \mathbf{u}_w}{\partial t} + (\mathbf{u}_c \cdot \nabla) \mathbf{u}_w + (\mathbf{u}_w \cdot \nabla) \mathbf{u}_c + (\mathbf{u}_w \cdot \nabla) \mathbf{u}_w - \langle (\mathbf{u}_w \cdot \nabla) \mathbf{u}_w \rangle \nabla \eta_w \\
&= \frac{1}{2} h \nabla [ \nabla \cdot (h \frac{\partial \mathbf{u}_w}{\partial t}) ] - \frac{1}{6} h^2 \nabla ( \nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_w}{\partial t} ) - \frac{1}{3} h^2 \nabla [ ( \mathbf{u}_c \cdot \nabla) (\nabla \cdot \mathbf{u}_w) ]
\end{aligned}$$

여기서, 아랫첨자  $c$ 와  $w$ 는 각각 해류와 파랑을 나타내고,  $\langle \rangle$ 은 파랑의 진동으로 인한 Eulerian 질량전송속도를 나타낸다.

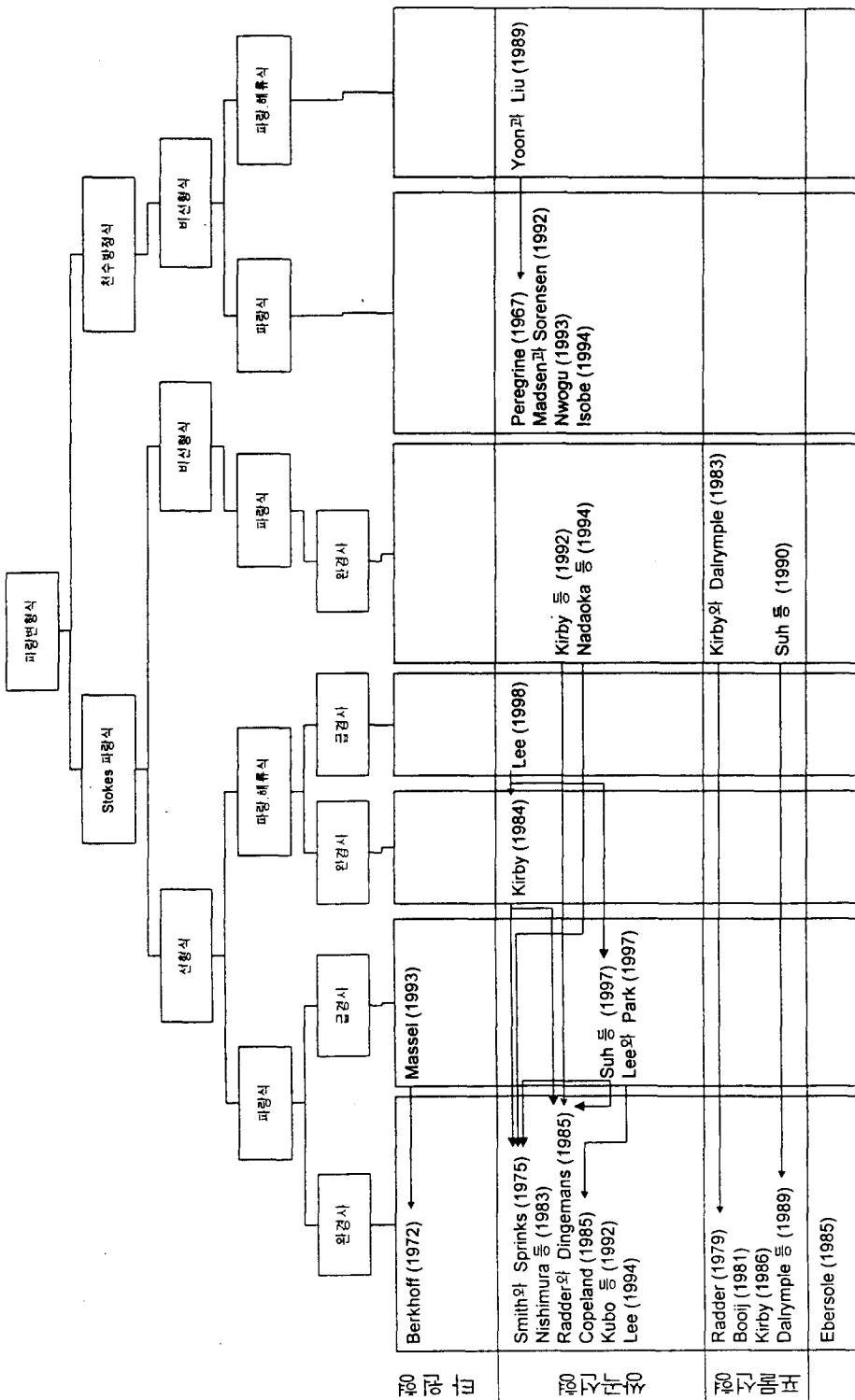


그림 1.1 파랑연통식의 분류 (에너지 보존의 측면에서)

## 2. 완경사 파랑방정식을 이용한 파랑변형 수치모형의 비교

### 2.1. 머리말

深海에서 發達된 파가 淺海로 전파해 갈 때 불규칙한 해저 지형 및 흐름에 의해 파가 변화된다. 이러한 波浪의 屈折·廻折 및 淺水 現象 등에 의한 波浪變形을豫測하기 위하여 여러 가지 형태의 數值模型이 현재까지 수립·개발되어 왔으며, 또한 이러한 수치모형의 檢證을 위하여 수행된 소규모의 水理 模型 實驗 結果들이 보고되고 있다.

흐름의 영향을 무시하고, 파랑의 굴절 및 천수효과만을 고려한 수치모형의 경우 초기에는 과향선법 또는 유한차분법 등을 이용하였다. 이 때 까지는 구조물 주위 및 수중천퇴에서 발생하는 회절현상에 대해서는 따로 분리하여 고려해야 하는 번거로움이 있었다. 그러나 다음과 같은 완경사방정식(Berkhoff, 1972)<sup>1)</sup>이 유도된 이후, 굴·회절을 동시에 고려할 수 있게 되어 대부분의 파랑변형연구에 사용되고 있다.

$$\nabla \cdot (CCg \nabla \phi) + \omega^2 \frac{Cg}{C} \phi = 0 \quad (2.1)$$

식(2.1)은 이상유체의 지배방정식과 경계조건을 수심 적분하여 만든 2차원 식으로, 해저면 경사가 완만하다는 가정 하에 유도되었다. 그러나 완경사의 가정은 실제로 그렇게 엄격한 편은 아니며, 이 식은 보통의 조건에 대해 공학적인 측면에서는 충분한 정도로 굴절, 회절, 반사 및 천수변형 효과를 고려할 수 있다.

파랑의 변형현상을 포함한 모든 水理現象은 질량, 운동량 및 에너지 보존식으로 표현할 수 있다. 이 3가지 식들 중 한 두 가지의 조합으로 파랑방정식을 도출하며, 수식의 전개 및 단순화 과정에 따라 여러 종류의 모형이 유도된다. 파랑변형 해석모형은 대별하여 Boussinesq 식(Peregrine, 1967)<sup>2)</sup>과 완경사방정식(Berkhoff, 1972)<sup>1)</sup>을 지배방정식으로 사용하는 두 종류가 있다. Boussinesq 식은 천해영역에서 비선형성을 해석할 수 있는 장점이 있으며, 최근에는 심해에도 적용 가능한 모형개발에 많은 관심을 보이고 있다. 그러나 완경사 파동방정식을 지배방정식으로 사용하는 경우 심해에 적용가능하며 식의 형태도 간단하기 때문에 여러 종류의 수치기법을 사용하여 근사해를 구하고 있다. 본 연구에서는 이러한 완경사 파동방정식으로부터 개발된 모형들을 개발 단계 및 기본방정식의 형태에 따라 분류하고, 각 모형이 적용될 수 있는 경우 및 적용범위, 그리고 각 수치모형의 장·단점을 비교하였다.

## 2.2 시간의존 완경사방정식의 유도

비압축성 비회전류의 운동은 다음과 같이 Laplace식으로 나타낼 수 있다. 이 때 방정식의 좌표계 및 변수는 Fig. 2.1과 같다.

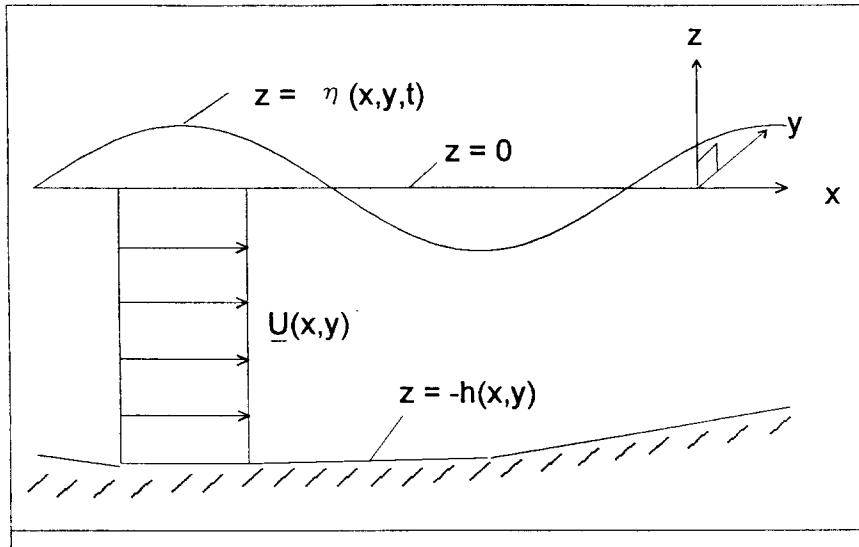


Fig.2.1 Definition sketch of fluid domain.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.1)$$

단,  $u = \frac{\partial \phi}{\partial x}$ ,  $v = \frac{\partial \phi}{\partial y}$ ,  $w = \frac{\partial \phi}{\partial z}$  이다.

자유수면과 해저면을 각각 다음과 같은 식(2.3)으로 정의하면,

$$z = \eta(x, y, t), \quad z = -h(x, y) \quad (2.3)$$

자유수면식  $F(x, y, z, t)$  는 식(2.4)로 표현할 수 있다.

$$F(x, y, z, t) = \eta(x, y, t) - z = 0 \quad (2.4)$$

운동학적 자유수면 경계조건(KFSBC),  $\frac{DF}{Dt} = 0$ 에 식(2.4)를 대입하면 식(2.5)와 같이 된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0 \quad \text{on } z = \eta \quad (2.5)$$

또, 이 식을 속도포텐셜,  $\phi$ 를 이용하여 표시하면

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = \eta \quad (2.6)$$

가 되며, 동역학적 자유수면 경계조건(DFSBC)은 Bernoulli정리로 부터

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} q^2 + g\eta = C(t) \quad \text{on } z = \eta \quad (2.7)$$

으로 표시된다. 여기서,  $q^2 = u^2 + v^2 + w^2$ 관계가 있다.

윗 식들은 비선형항을 포함하고 있으므로 이들을 간략화하기 위하여 파고가 파장에 비하여 작고, 파형경사 ( $\varepsilon$ )가 작다고 가정하면,  $\eta$ 와  $\phi$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= \varepsilon \eta_1 + \varepsilon^2 \eta_2 + \dots \\ \phi &= U_x x + U_y y + \varepsilon \phi_1 + \varepsilon^2 \phi_2 + \dots \end{aligned} \quad (2.8)$$

윗 식에서  $U_x, U_y$ 는 파랑운동에 공존하는 흐름(Ambient current)의 수평방향 성분으로, 연직방향으로 일정한 대규모 흐름(Large scale current,  $O(\varepsilon^0)$ )이라 가정한다.

식(2.8)을 식(2.2), (2.6)에 대입하여 정리하면 각각 다음과 같다.

$$\varepsilon \nabla^2 \phi_1 + \varepsilon^2 \nabla^2 \phi_2 + \dots = 0 \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} &\varepsilon \left( \frac{\partial \eta_1}{\partial t} + U_x \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + U_y \frac{\partial \eta_1}{\partial y} - \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right) \\ &+ \varepsilon^2 \left( \frac{\partial \eta_2}{\partial t} + U_x \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \dots \right) + \dots = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

또,  $q^2 = U_x^2 + U_y^2 + \varepsilon \left( 2U_x \frac{\partial \phi_1}{\partial x} + 2U_y \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right) + \varepsilon^2 \left( \left\{ \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right\}^2 + \dots \right) + \dots$  이므로 식

(2.7)은 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} (U_x^2 + U_y^2) + \varepsilon \left( \frac{\partial \phi_1}{\partial t} + U_x \frac{\partial \phi_1}{\partial x} + U_y \frac{\partial \phi_1}{\partial y} + g\eta_1 \right) \\ &+ \varepsilon^2 \left( \frac{\partial \phi_2}{\partial t} + \dots \right) + \dots = C(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

식(2.9)-(2.11)에서  $\varepsilon^2$ 이상 항은 무시하고,  $\varepsilon \eta_1$ 을  $\eta$ ,  $\varepsilon \phi_1$ 을  $\phi$ 로 다시 정의하면 이 식들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + U_x \frac{\partial \eta}{\partial x} + U_y \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{on } z = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + U_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + U_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + g\eta = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (2.14)$$

식(2.14)는 식(2.11)에서  $\frac{1}{2}(U_x^2 + U_y^2)$ 과  $C(t)$ 를 동일치로 하여 소거한 것이다.

식(2.13)과 (2.14)를 합하면

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + U_x \frac{\partial}{\partial x} + U_y \frac{\partial}{\partial y} \right) \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + U_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + U_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (2.15)$$

로 표시된다.

Luke(1967)<sup>3)</sup>와 Whitham(1974)<sup>4)</sup>은 파동운동에 대하여 변분원리(Variational principle)를 적용하여 Lagrangian,  $L_w$ 를 유도한 바 있다. 동일한 방법으로 파랑-흐름 상호작용에 대한 Lagrangian,  $L$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

먼저 Laplace식(2.12)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int \int \int_V \delta \phi \cdot \nabla^2 \phi \, dV = 0$$

여기서,  $V$ 는 단위 수평면적과, 수심  $z=0, z=-h$  사이의 체적이다. Green정리에 의하면, 윗식은

$$\int \int_S \delta \phi \cdot \mathbf{n} \cdot \nabla \phi \, ds - \int \int \int_V (\nabla \phi) \cdot (\nabla \delta \phi) \, dV = 0 \quad (2.16)$$

로 표현되며, 식(2.15)를 식(2.16)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식(2.17)을 얻는다.

$$\delta \int \int L \, dx \, dy = 0 \quad (2.17)$$

단,  $L = \frac{1}{2g} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \phi \right)^2 |_{z=0} - \frac{1}{2} \int_{-h}^0 (\nabla \phi)^2 dz$  이다.

속도 포텐셜  $\phi$ 를

$$\phi(x, y, z, t) = f(z) \Phi(x, y, t), \quad f(z) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad (2.18)$$

라고 하면, Lagrangian  $L$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$L = \frac{1}{2g} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \Phi \right)^2 - \frac{1}{2} \Phi^2 \int_{-h}^0 \left( \frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 dz - \frac{1}{2} (\nabla \Phi)^2 \int_{-h}^0 f^2 dz$$

윗식에

$$g \int_{-h}^0 f^2 dz = CCg, \quad g \int_{-h}^0 \left( \frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 dz = \sigma^2 - k^2 CCg$$

의 관계식을 대입하면 식(2.19)를 얻는다. 여기서  $\sigma$ 는 상대 각속도이다.

$$L = \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \Phi \right)^2 - CCg (\nabla \Phi)^2 - (\sigma^2 - k^2 CCg) \Phi^2 \right\} \quad (2.19)$$

한편, Lagrangian에 대한 Euler 공식은

$$\frac{\partial L}{\partial \Phi} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \dot{\Phi}} - \nabla \cdot \frac{\partial L}{\partial \nabla \Phi} = 0 \text{이므로, 여기에 식(2.19)를 대입하여 정리하면 다음과 같은}$$

관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \right) \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \Phi \right) - \nabla \cdot (CCg \nabla \Phi) \\ + (\sigma^2 - k^2 CCg) \Phi = 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

이 식을 정리하면 다음과 같이 시간의존 쌍곡선형 완경사방정식이 된다.

$$\frac{D^2 \Phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot \underline{U}) \frac{D\Phi}{Dt} - \nabla \cdot (CCg \nabla \Phi) + (\sigma^2 - k^2 CCg) \Phi = 0 \quad (2.21)$$

윗식에서, 전미분은  $\frac{D}{Dt} = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \right)$ 이며, 분산관계식은  $\sigma^2 = (\omega - \underline{k} \cdot \underline{U})^2$

$= gk \tanh kh$ 로 된다.

흐름의 영향을 고려한 시간 의존 완경사방정식은 Booij(1981)<sup>9</sup>가 변분원리를 이용하여 처음 유도하였으나, Lagrangian 유도과정에 약간의 오류가 포함되어 있다. 이후 Kirby(1984)<sup>10</sup>는 식(2.21)과 동일한 형태를 유도하였으며, 이(1994)<sup>11</sup>는 수심 적분된 에너지 보존식으로부터 동일한 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

## 2.3 파랑변형 수치모형의 종류

### 2.3.1 시간의존 완경사방정식

흐름의 영향을 고려한 식(2.21)을 지배방정식으로 직접 이용한 수치모형은 아직 없으나, 흐름의 영향을 무시한 수치모형들은 다음과 같다. 식(2.21)에서 흐름의 영향을 무시한 경우, 즉  $\underline{U} = (0, 0)$ 을 대입하면 다음과 같이 변형된다. 이 식은 Smith and Sprinks(1975)<sup>8</sup>가 Green의 제2정리를 이용하여 최초 유도한 식이다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CCg \nabla \Phi) + (\omega^2 - k^2 CCg) \Phi = 0 \quad (2.22)$$

또한, 비회전류에 대한 Hamilton의 변분원리를 이용하면

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \nabla \cdot \left( \frac{CCg}{g} \nabla \Phi \right) + \frac{(\omega^2 - k^2 CCg)}{g} \Phi = 0 \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = - g\eta \quad (2.24)$$

로 표현되는 식을 얻을 수 있으며, 이를 식에서  $\eta$ 를 제거하면 식(2.22)가 된다. Kirby 등 (1992)<sup>9)</sup>은 식(2.22)는 시간 및 공간적으로 중앙차분한 기법을, 식(2.23), (2.24)는 4차의 Adams-Basforth-Moulton법을 사용하여 수치모형을 수립하였다. 이들 모형들을 Berkhoff 등 (1982)<sup>10)</sup>의 수리모형실험결과와 비교한 결과 서로 잘 일치하나, 식(2.23)에 Stokes과 이론을 이용한 비선형항을 추가함으로써 모형의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

Kubo 등(1992)<sup>11)</sup>은 식(2.22)와 다른 형태의 시간의존 완경사방정식(2.25)를 유도하였다.

$$\nabla \cdot (CCg \nabla \Phi) + \omega^2 \frac{Cg}{C} \Phi + i \nabla \cdot \left( \frac{\partial}{\partial \omega} (CCg) \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) + i \frac{\partial}{\partial \omega} (k^2 CCg) \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (2.25)$$

이식은 Berkhoff(1972)가 처음 유도한 완경사방정식(2.1)에서  $CCg$  및  $k^2 CCg$ 를  $\Delta\omega$ 에 대해 Taylor전개한 뒤, Narrow band 스펙트럼에서  $\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -i\Delta\omega \Phi$  관계식을 대입한 것으로, 식 (2.1)에 시간의존 항들을 더한 형태의 식이다.

Lee(1994)<sup>12)</sup>, Lee 등(1994)<sup>13)</sup>은 분산관계식과 에너지 수송의 관점에서 식(2.22) 및 식(2.25)를 이론적으로 비교하였다. 즉, 분산관계식과의 관점에서는 식(2.22)를 기본방정식으로 이용한 수치모형의 경우는 천해역에서, 식(2.25)를 기본방정식으로 사용한 경우는 심해역 및 중간수심 해역에서 상대적으로 정확하고 에너지 수송의 관점에서 보면 식(2.25)를 이용한 모형이 더 정확하지만 높은 주파수 영역에서 해가 발산하는 단점이 있다. 또 식(2.22)에 3개의 항을, 식(2.25)에 1개의 항을 포함시킨 새로운 형태의 지배방정식들을 유도한 뒤, 후자의 경우가 더 정밀한 결과를 얻을 수 있음을 증명하였다. 후자의 경우 기본방정식의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( CCg \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + k^2 CCg \Phi + i \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial}{\partial \omega} (CCg) \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} \right) + i \frac{\partial}{\partial \omega} (k^2 CCg) \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \beta_3 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.26)$$

단,  $\beta_3 = \frac{1}{Cg^2} \{-\omega\omega'' + Cg(C-2Cg)\}$  이다.

### 2.3.2 정상상태의 완경사방정식

#### 2.3.2.1 타원형모형

파랑이 정상상태인 경우 포텐셜  $\Phi$ 는

$$\Phi = Re(\tilde{\Phi} \exp(-i\omega t)) \quad (2.27)$$

로 표현되므로, 이 식(2.27)을 식(2.21)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻는다(정, 1990)<sup>14)</sup>.

$$-\frac{i\omega}{\nabla} \{2\mathbf{U} \cdot \nabla \tilde{\phi} + \tilde{\phi}(\nabla \cdot \mathbf{U})\} + \left(\frac{\mathbf{U} \cdot \nabla}{\sigma^2 - \omega^2 - k^2 CCg}\right) \tilde{\phi} = 0 \quad (2.28)$$

윗식은 타원형 편미분방정식으로 파랑이 정상상태인 경우 항상 이용할 수 있다.  $\mathbf{U} = (0, 0)$  일 때 식(2.28)은 Berkhoff(1972)<sup>1)</sup>가 유도한 완경사방정식(2.1)이 되며, 수심이 일정한 경우에는 Helmholtz방정식이 된다.

식(2.1)의 근사해를 구하는 방법은 크게 유한요소법과 유한차분법으로 분류할 수 있다. 유한요소법을 사용하는 경우 경계면 처리, 입력자료의 비균질성 처리, 구조물 처리, 그리고 비선형학 처리 등에 있어서 탁월한 이점이 있다. 이를 방법은 외해역을 처리하는 방법에 따라 4종류로 분류할 수 있다. 즉, 물체로부터 유한한 거리에 직접 또는 수정된 방사경계조건에 기초한 Dampers를 사용하는 방법(Bai, 1972<sup>15)</sup>; Huang 등, 1985<sup>16)</sup>), 외해면에는 해석적 고유함수의 급수해로 내부면은 유한요소법으로 모형화한 뒤 접합조건을 도입하여 문제를 해결하는 방법(Chen, 1986<sup>17)</sup>), 외부영역을 Green 정리를 이용한 경계적분공식을 사용하는 방법(Zienkiewicz 등, 1977<sup>18)</sup>), 그리고 무한요소를 사용하는 방법(Bettes and Zienkiewicz, 1977<sup>19)</sup>; 박, 1991<sup>20)</sup>; Park 등, 1994<sup>21)</sup>) 등이 있다. Berkhoff(1972)<sup>1)</sup>는 장애물 표면에 특이점을 분포시켜서 유한요소법으로 파랑장을 계산하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 항만 부진동, 구조물 근처의 회절문제에 대해 정확한 해를 제공하나, 계산시간과 컴퓨터 용량이 과도하게 소요되어 넓은 지역의 파랑변형 모델링에는 부적합하다. Chen과 Mei(1974)<sup>22)</sup>, Mei와 Chen(1975)<sup>23)</sup>은 완경사방정식으로부터 천해역에만 적용 가능한 지배방정식을 유도한 뒤 유한요소법을 이용하여 해를 구하였다. 이 방법은 임의 형태의 항만 부진동 해석에 효과적으로 이용하였다. 이 후 Behrendt(1985)<sup>24)</sup>, Chen(1986)<sup>17)</sup> 등은 해저면 마찰을 고려한 완경사방정식을 유도하여 부분 반사 경계조건을 고려한 수치모형을 개발하였다. 이들 모형들은 연립 방정식을 풀 때, 컴퓨터 기억 용량이나 계산시간 단축 등을 위하여 다양한 기법을 사용하고 있다. 그러나 계산 영역이 커짐에 따라 유한요소법에 의해 형성되는 연립방정식의 剛性行列의 크기는 미지수 개수의 제곱에 비례하여 커지는 것은 물론, 해를 가우스 소거법을 이용하여 구하는 경우 미지수 개수의 세제곱에 해당하는 곱셈을 행하는 등 효율성에 문제가 생긴다. 이러한 이유 때문에 유한차분법을 이용한 해석방법도 많이 사용되고 있다.

식(2.1), (2.28)의 해를 유한차분법으로 구하는 경우, 다양한 형태로 식을 변형시켜 지배방정식으로 사용한다.

식(2.28)의 포텐셜을 극좌표,  $\tilde{\phi} = -ig\frac{a}{\sigma} e^{iS}$ 로 표현하여 대입하면 실수부와 허수부로 부

터 다음 식들을 얻을 수 있다. 여기서,  $a(x, y)$ 는 진폭,  $S(x, y)$ 는 위상(Phase)이다.

$$\text{이송방정식 (Transport equation); } \nabla \cdot \left\{ \frac{\mathbf{U}}{\sigma^2} \left( \omega - \mathbf{U} \cdot \nabla S \right) + CCg \frac{a^2}{\sigma^2} \nabla S \right\} = 0 \quad (2.29)$$

아이코널 방정식(*Eikonal equation*) :

$$CCg \frac{a}{\sigma} (\nabla S)^2 - (\underline{U} \cdot \nabla S - \omega)^2 \frac{a}{\sigma} + (\sigma^2 - k^2 CCg) \frac{a}{\sigma} \\ - \nabla \cdot \left( CCg \nabla \frac{a}{\sigma} \right) + (\nabla \cdot \underline{U}) \left( \underline{U} \cdot \nabla \frac{a}{\sigma} \right) + \underline{U} \cdot \nabla \left( \underline{U} \cdot \nabla \frac{a}{\sigma} \right) = 0 \quad (2.30)$$

식(2.29), (2.30)에는 3개의 미지수, 즉 진폭( $a$ ), 파수벡터( $\nabla S$ ), 그리고 파향( $\theta$ )이 포함되어 있으므로 해를 구하기 위해서는 1개의 식이 더 필요하다. 일반적으로 도함수의 회전(Curl)은零이 되므로 다음 식과 같이 표현되며 이 식은 파수벡터의 비회전성을 나타낸다.

$$\nabla \times (\nabla S) = \underline{J} \quad (2.31)$$

식(2.29), (2.30), 그리고 (2.31)을 기본방정식으로 사용하여, 수심 및 흐름에 의한 파랑변형을 계산하는 경우, 넓은 해역에 대해서 매우 효과적으로 적용할 수 있다. 즉, 격자간격의 선정이 자유롭고 계산시간이 매우 짧은 장점이 있다. 그러나 평활화 현상이 나타나고 수심변화가 급격한 경우 수렴하지 않으며, 반사효과를 고려할 수 없다는 단점이 있다(정, 1990)<sup>14)</sup>. 식(2.29) 및 (2.30)에  $\underline{U} = (0, 0)$ 을 대입하면 Ebersole(1985)<sup>25)</sup>이 유도한 식과 동일한 형태가 된다. 또, 식(2.29)에  $k = \nabla S$ ,  $\sigma = \omega - \underline{U} \cdot \nabla S$ 를 대입하면, 다음과 같이 된다.

$$\nabla \cdot \left\{ \frac{a^2}{\sigma} (\underline{U} + \underline{Cg}) \right\}$$

이 식은 정상상태에서 Wave action이 보존되는 것을 보여주고 있다.

타원형 편미분방정식(2.1)은 직접 차분하는 것보다 Helmholtz 식으로 변환하는 것이 곱셈의 수가 적어져 계산속도를 향상시킬 수 있다. 즉,  $\hat{\phi} = \tilde{\phi} \sqrt{CCg}$ ,  $x^2 = k^2 - \frac{\nabla^2 \sqrt{CCg}}{CCg}$

로 하면 식(2.1)은 다음과 같이 된다.

$$\nabla^2 \hat{\phi} + x^2 \hat{\phi} = 0 \quad (2.32)$$

이 식을 이용한 유한차분모형은 Panchang 등(1991)<sup>26)</sup>이 처음 개발하여, 국내에서는 윤(1993)<sup>27)</sup>, 서승남(1994)<sup>28)</sup>, 그리고 서승남 등(1994)<sup>29)</sup>이 여러 가지 형태로 발전시켰다. 이 방법은 유한차분에 의해 구성된 연립방정식의 해를 가우스 소거법과 같은 직접 계산법을 사용하지 않고 반복법을 이용하여 구하는 방법으로 수렴속도를 증가하는 여러 종류의 PCGM(Preconditioned Conjugate Gradient Method) 기법들이 도입되었는데, 그 이유는 연립방정식의 행렬 성분이 대부분 零인 Sparse matrix이기 때문이다. 이 방법은 구조물에 의한 반사파를 고려할 수 있으며, 개방 경계조건과 비선형성을 고려하는 것도 용이하다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 반복해법이 갖는 약점인 수렴속도 및 정밀도를 높이기 위한 추가 노력이 요구된다.

### 2.3.2.2 포물형모형

환경사방정식에서 회절효과를 무시하는 경우, 파향선법을 이용한 결과와 동일하게 된다. 그 중간 단계로서 파랑전파방향의 회절은 무시하고 직각방향의 회절을 고려하는 경우 포물

형 모형이 된다. 식(2.28)과 (2.33)을 변형하여 진폭 A에 관한 식으로 정리하면 포물형 근사식을 얻을 수 있다(정, 1990)<sup>14)</sup>.

이와 유사한 모형은 Radder(1979)<sup>30</sup>, Booij(1981)<sup>31</sup>, Kirby(1986a<sup>31</sup>, b<sup>32</sup>), 그리고 서(1990)<sup>33</sup> 등에 의하여 여러 종류가 개발되어 있으나, 파랑의 진행방향에 대하여 진폭변화가 완만한 경우에 한하여 사용할 수 있으며, 각 모형들은 파랑의 주진행방향과 x축과 이루는 각의 차이에 따라 精密度의 변화가 발생할 뿐이며, Booij(1981)모형만이 흐름에 의한 굴절의 영향을 고려하고 있다. 이들 모형은 수심변화가 급격한 지형에 사용가능하고 계산시간도 비교적 적게 걸리는 반면, 불규칙한 육지 경계 및 방파제 배후 등과 같이 회절현상이 우세한 곳에서는 파고가 현저히 감소하여 적용할 수 없는 단점이 있다. 이런 약점을 보완하기 위하여 주진행방향과 x축이 이루는 각이 56.5 °(Booij, 1981), 70.0 °(Kirby, 1986b)까지 적용가능한 광각 포물형 모형을 개발하였다. 그러나 방파제 배후 인접한 곳에서는 여전히 오차가 포함되어 있다.

이런 약점을 보완하기 위하여 Tsay and Liu(1982)<sup>34</sup>, Isobe(1986)<sup>35</sup>, 그리고 Kirby(1988)<sup>36</sup> 등은 직교 좌표계를 사용하지 않고, 파랑의 주진행방향을 따라 계산 격자를 결정하는 다른 형태의 포물형 근사식을 개발하였다.

### 2.3.2.3 角스펙트럼모형(Angular spectrum model)

角스펙트럼모형은 포물형모형의 단점을 보완한 것으로, 파랑의 주진행방향과 x축이 이루는 각이 90 °인 경우에도 적용가능하다. 角스펙트럼은 직선을 따라 파랑장을 Fourier 변환한 것으로, 파랑의 각 성분은 일정 방향으로 진행하는 평면파의 복소진폭을 의미한다 (Suh, 1990)<sup>37</sup>. 수심 변화, 비성형성을 고려한 여러 종류의 角스펙트럼모형이 개발되어 있으나, 시작 열( $x=0$ )에서 파랑장을 방향별로 Fourier 변환하여 각 성분파의 수심변화에 의한 변형을 산정한 후, 최종적으로 y방향으로 역Fourier 변환하여 실제 파랑장을 계산한다. 선형모형의 경우 포물형모형보다 계산속도가 빠르고 정도가 높으나, 비선형모형의 경우에는 다른 유한 차분 수치모형보다 계산시간이 많이 소요된다. 실제 현장에 이 모형을 적용하는 경우, 대상 해역이 사각형이어야 하고, 측방향 경계가 넓어야 높은 정밀도를 유지할 수 있는 단점이 있다.

### 2.3.2.4 쌍곡형모형

한편 완경사방정식이 소개된 1972년에 Ito와 Tanimoto(1972)<sup>38</sup>는 질량보존식과 에너지보존식으로부터 1쌍의 선형방정식을 유도하여 파랑변형을 계산하였다. 이 방법은 유한차분법을 사용하는 수치해석법으로 매 시간단계마다 수위와 유량을 결정하는 방법으로서 Maruyama와 Kajima(1985)<sup>39</sup>, 그리고 Copeland(1985)<sup>40</sup> 등에 의해 계속 연구되었다. 이 방법은 물리적인 제약으로 나타나는 사전 가정은 없지만, CFL 조건으로 인한 작은 시간간격 및 많은 배열의 필요 등으로 인하여 대용량의 컴퓨터가 필요하고 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 또한 개방경계조건 설정에 많은 어려움이 있다.

한편 이와 박(1997)<sup>41)</sup>은 수심변화가 심한 경우에 적용 가능한 Copeland형 파랑식을 유도하였다. 이 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CCg \nabla \Phi) + (\omega^2 - k^2 CCg) \Phi \\ + \omega^2 \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \Phi = 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

여기서

$$R_1 = \frac{1}{\cosh^2 kh} (W_1 I_1 + W_2 I_2 + W_3 I_3 + W_4 I_4 + W_5 I_5 + W_6)$$

$$R_2 = \frac{1}{\cosh^2 kh} (U_1 I_1 + U_2 I_2 + U_3 I_3)$$

이며,  $W_i$ ,  $U_i$ ,  $I_i$ 는 이와 박(1997)에 수록되어 있다. 이 식은 기존의 방정식에 해저면 경사의 제곱에 비례하는 항과 해저면 곡률에 비례하는 항이 추가되어 있다. 식(2.33)을 지배방정식으로 하여 개발한 유한차분 수치모형을 이용하는 경우 수심변화가 심한 해역에서도 높은 정밀도를 유지할 수 있다.

## 2.4. 결론 및 토의

심해에서 발달된 풍파가 수심과 흐름이 변하는 연안역을 전파해 갈 때 회절 및 굴절 현상에 의한 파랑변형을 재현할 수 있는 이론식을 변분원리를 이용하여 유도하였다. 이는 완경사방정식이라 부르는 쌍곡형 편미분방정식으로 여러 가지 다른 방법을 이용하여도 동일한 결과를 얻을 수 있다<sup>6,7)</sup>.

이러한 완경사방정식의 해를 구하기 위한 근사해법으로, 유한차분법과 유한요소법을 사용하는 수치모형들이 많이 수립되어 사용되고 있다. 그러나 이를 수치모형들은 각각 장·단점들을 지니고 있기 때문에 실 해역에 적용하기 위해서는 세심한 배려가 필요하다.

유한요소법을 사용하는 경우, 경계면 처리, 구조물과 파랑장과 결합, 비선형항 처리 등에 있어서 많은 장점이 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 아직 만족스럽지 않은 선형대수식의 직접해법은 많은 개선책이 요구된다. 직접해법의 단점을 보완하기 위한 반복해법도 가우스법, PCGM 등 많은 연구를 경주하고 있으나, 수렴 속도 및 精度에는 아직 미비한 점이 있다.

이에 비하여 유한차분 수치모형은, 유한요소법에 비하여 처리 속도가 빠르기 때문에 다양한 형태로 변형되어 사용되고 있다. 이 방법을 사용하여 개발된 수치모형들은 기분석한 바와 같이 각 현장 조건, 수심변화 및 경제성 등을 고려하여 최적 모형을 선정하는 것이 중요하다.

## 2.5 참고문헌

1. Berkhoff, J.C.W. 1972. Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, 471-490.
2. Peregrine, D.H. 1967. Long waves on a beach. J. Fluid Mech., 27: 815-827.
3. Luke, J.C. 1967. A variational principle for fluid with a free surface. J. of Fluid Mech., 27, 395-397.
4. Whitham, G.B. 1974. Linear and nonlinear waves. Wiley-interscience.
5. Booij, N., 1981, Gravity waves on water with non-uniform depth and current, Rep. 81-1, Dept. Civil Engrg., Delft Univer. of Technology.
6. Kirby, J.T., 1984. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography. J. of Geophy. Res., 89(C1), 745-747.
7. 이정열. 1994. 흐름의 영향을 고려한 타원형 완경사 방정식. 한국해안·해양공학회지. 6(1) : 81-87.
8. Smith, R. and T. Sprinks. 1975. Scattering of surface waves by a conical island. J. of Fluid Mech., 72(2), 154--164.
9. Kirby, J.T., C. Lee, and C. Rasmussen. 1992. Time-dependent solutions of the mild-slope wave equation. Proc. 23th Conf. Coast. Engrg., ASCE, 391-404.
10. Berkhoff, J.C.W., N. Booij and A.C. Radder. 1982. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves. Coastal Engrg., 6 : 255-279.
11. Kubo, Y., Y. Isobe, and A. Watanabe. 1992. Time-dependent mild slope equation for random waves. Proc. 23th Conf. Coast. Engrg., ASCE, 419-431.
12. Lee, C.H. 1994. A Study of Time-Dependent Mild-Slope Equations. Ph.D. Dissertation, Univer. of Delaware.
13. Lee, C.H. and J.T. Kirby. 1994. Analytical comparison of time-dependent mild-slope equations. J. of Korean Society of Coast. and Oc. Engineers, 6(4), 389-396.
14. 정신택. 1990. 흐름이 존재하는 완경사해역에서의 파랑변형. 박사학위논문. 서울대학교.
15. Bai, K.J. 1972. A variational method in potential flows with a free surface. Report No. NA72-2, College of Engrg., Univer. of California, Berkeley.
16. Huang, M.-C., J.W. Leonard, and R.T. Hudspeth. 1985. Wave interference effects by finite element method. J. Wtrway., Port Coast. and Oc. Engrg., 111(1), 1-17.
17. Chen, H.S. 1986. Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering. Applied Ocean Res., 8(2), 99-104.
18. Zienkiewicz, O.C., D.W. Kelly, and P. Bettes. 1977. The coupling of the finite element method and boundary solution procedures. Intern. J. for Numer. Methods in Engrg.,

- 11, 355-375.
19. Bettes, P. and O.C. Zienkiewicz. 1977. Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements. Intern. J. for Numer. Methods in Engrg., 11, 1271-1290.
  20. 박우선. 1991. 파랑하중에 대한 Tension Leg Platform의 신뢰도 해석. 한국 과학기술원 박사학위 논문.
  21. Park, W.S., I.S. Chun, and W.M. Jeong. 1994. Infinite element for the analysis of harbor resonances. J. of Korean Society of Coast. and Oc. Engineers, 6(2), 139-149.
  22. Chen, H.S. and C.C. Mei. 1974. Oscillations and wave forces in an offshore harbor. Ralph M. Parsons Lab., Rep. No. 190. M.I.T.
  23. Mei, C.C. and H.S. Chen. 1975. 'Hybrid-element method for water wave. Proceed. of Sympo. on Modeling Tech.
  24. Behrendat, L. 1985. A finite element method for water wave diffraction including boundary absorption and bottom friction. Insti. of hydrodynamics and hydraulic Engrg. Techn. Univ. of Denmark.
  25. Ebersole, B.A., 1985. Refraction-diffraction model for linear water waves. J. Wtrway., Port Coast. and Oc. Engrg., 111(6), 939-953.
  26. Panchang, V.G., Pearce, B.R., Wei, G., and Cushman-Roisin, B., 1991. Solution of the mild-slope wave problem by iteration. Applied Ocean Res., 13(4), 187-199.
  27. 윤종태. 1993. CGM을 이용한 완경사방정식의 수치해석. 한국해안·해양공학회지. 5(2) : 84-90.
  28. 서승남. 1994. 완경사 방정식에 대한 PCGM 연산방식 비교. 한국해안·해양공학회지. 6(2) : 186-195.
  29. 서승남, 연영진. 1994. 완경사 방정식에 대한 PCGM 수치모형. 한국해안·해양공학회지. 6(2) : 164-173.
  30. Radder, A.C. 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation. J. of Fluid Mech., 95(1), 159-176.
  31. Kirby, J.T., 1986a. Higher-order approximations on the parabolic method for water waves. J. of Geophy. Res., 91(C1), 933-952.
  32. Kirby, J.T., 1986b. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. Coastal Engrg., 10 : 355-378.
  33. 서승남. 1990. 포물형 근사식에 의한 천해파 산정모델. 한국해안·해양공학회지. 2(3) : 134-142.
  34. Tsay, T.-K. and P.L.-F. Liu, 1982. Numerical solution of water-wave refraction and diffraction problems in parabolic approximation. J. of Geophy. Res., 87(C10), 7932-7940.

35. Isobe, M., 1986. A parabolic refraction-diffraction equation in the ray-front coordinate system. Proc. 20th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, 306-317.
36. Kirby, J.T., 1988. Parabolic wave computations in non-orthogonal coordinate systems. J. Wtrway., Port Coast. and Oc. Engrg., 114(6), 673-685.
37. Suh, K.G. 1990. Recent development of angular spectrum models for water wave propagation. J. of Korean Society of Coast. and Oc. Engineers, 2(4), 193-189.
38. Ito, Y. and K. Tanimoto. 1972. A method of numerical analysis of wave propagation application to wave diffraction and refraction. Proc. 13th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, 503-522.
39. Maruyama, K. and R. Kajima, 1985. Two-dimensional wave calculation method based on unsteady mild slope equations, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan, Rep., No. 384041.
40. Copeland, G.J.M. 1985. A practical alternative to the "mild-slope" wave equation. Coastal Engrg., Netherlands. 125-149.
41. 이창훈, 박우선. 1997. 수심변화가 심한 경우에 적용가능한 Copeland형 파랑식. 대한토목학회논문집. 17(II-2) : 157-164.

### 3. 오염물질 이동예측 모형의 구조 및 부모형

(Structure and Submodels of the Pollutants Transport Model)

#### 3.1 오염물질

물의 특성은 물리적, 화학적, 생물학적 인자(수질을 판단하는 항목)로 구별 할 수 있다 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985).

물리적 특성항목은 탁도(turbidity, water clarity), 빛 투과도(light penetration, transparency; 투명도), 고형물질(부유고형물 또는 용존 고형물), 냄새, 온도, 색 등이 해당된다.

화학적 특성인자는 오염물질 확산모형에서 모의되는 항목과 밀접한 관련이 있는 것으로, 무기물질(inorganic matter), 유기물질(organic matter), 기체 등으로 구별된다. 여기서, 무기물질은 이온(major ionic species and/or minor ionic species), 非이온(nonionic species), 인간에 의하여 부하되는 중금속 및 영양염류, pH, 산 및 염기, 전도도(염도), 경도 등이며, 유기물질은 자연 유기합성물(natural organic compounds), 용존산소(dissolved oxygen) 등이며, 기체는 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> 등이 있다. 특히, 인간에 의하여 부하되는 화학물질인 중금속 및 영양염류 항목이 오염물질 예측모형의 중요한 수질항목이 된다. 따라서, 오염물질 운송예측모형은 영양염류 항목 및 관련 수질항목의 반응을 고려하여 구성·작용하는 경우가 대부분이며, 수온, 염도, 중금속 항목, pH, 부유 또는 용존고형물 등의 항목에 중점을 두어 별도로 모의 또는 연계모의를 하는 경우도 많이 있다.

한편, 생물학적 특성인자는 동·식물 플랑크톤(phytoplankton, zooplankton), 수중동·식물(aquatic plant and animal) 등이 있으며, 적조 및 생태계 모의에서 고려하는 항목이다.

#### 3.2 오염물질 이동예측 모형의 구분

운송방정식(또는 질량보존방정식)으로 표현되는 오염물질 이동예측 모형은 모의대상이 되는 수체(water body, water mass)의 차원에 따라 0-D(점; 체적평균), 1-D(선; 하천선, 수심 방향 연직선), 2-D(면; 평면,연직), 3-D(Quasi-3D, Fully-3D)으로 구별할 수 있으며, 시간적인 규모에 따라 장기(연 또는 계절단위)·중기·단기(시간 또는 일단위) 모형으로 구분할 수 있다. 일반적으로, 장기수질모형은 정상상태의 수질모형에 해당되며, 단기수질모형은 비정상(동적)상태의 수질모형에 해당하는 경우가 많다. 한편, 수체 및 모의현상에 따른 분류하는 경우에는 하천, 호소, 하구, 만, 해안, 해양 또는 인공설비에 저장된 수체가 대상이 되는

경우가 있으며; 성층화, 부영양화, 빈산소 또는 무산소화, 적조, 방류구 확산(담수확산) 등의 현상이 대상이 되는 경우도 있다. 모의 수질항목에 따라서 분류를 하는 경우에는, 온도(수온), 염도, BOD(COD), DO, Nutrients(N, P, C 순환체계 등), 독극물, 유해화학물, 중금속, 방사능 물질, 동·식물플랑크톤 등의 항목이 고려대상이 된다. 본 보고서에서 언급하는 오염물질 이동모형은 부영양화 현상과 관련된 평면 2차원 수질모형에 해당한다고 할 수 있다.

그러나, 오염물질 이동예측모형은 적용영역, 모의항목, 연구목적에 따라 다양화 될 수 있다. 따라서, 오염물질 이동예측모형 및 관련 부모형에 대한 명확한 구분 및 규정이 선행되어야 하며, 규정된 모형의 구조 및 특성파악, 입력자료 산정방법 등을 제시하는 것이 중요하다. 이에, 오염물질 이동예측 모형과 관련되어 사용되고 있는 副模型(submodel) 및 類似模型을 모형 적용영역의 시·공간적인 규모, 모의수질항목 등을 중심으로 구분하였다(한국해양연구소, 1996).

- **해수유동모형(Tidal circulation model, Tide model, Flow model etc.)** - 시, 일(창조 및 낙조), 월(대조 및 소조) 단위 시간규모의 조석에 의한 해수의 순환을 모의하는 모형으로, 연안수질 예측모형 및 운송방정식 형태로 표현되는 각종 모형의 수리학적 입력자료를 제공한다. 광역해수유동 모형은 공간의 규모가 연안해역의 규모보다 큰 경우의 모형이며, 해류(ocean current)를 모의하는 모형은 해양순환모형(Ocean circulation model)으로 규정한다. 대표적인 모형으로는 Heaps Model(평면 2차원 조석모형으로 조간대 모의 가능), POM(Princeton Ocean Model; 범용적인 3차원 해수유동모형) 등이 있다.
- **취송류 모형(Wind-driven current model)** - 해수유동모형에 외력으로 바람이 추가된 모형으로, 조석과 바람의 상호작용이 고려된 모형이다.
- **확산모형(Diffusion model)** - 에너지 및 보존성 물질의 이송 및 확산(또는 분산)을 예측하는 모형으로, 하천 등에서는 이송확산모형(advection-diffusion model)이라는 용어가 사용되나, 일반적으로 해역에서는 이송이라는 용어를 생략하는 경우가 빈번하다. 이 확산모형은 온도확산모형, 염도확산모형, 임의의 보존성 물질의 확산모형 등으로 세분되고, 또한 적용영역의 공간적 규모 및 시간적 규모에 따라 장·단기 모형으로 세분화된다. 독립적으로 모의하는 임의의 비보존성 물질(예, COD, SS 항목 등)의 단기간(조석주기 규모)의 농도분포 모의도 확산모형에 포함되며, 광범위한 영역을 포함하는 물질운송모형에 사용되는 일반적인 용어이다. 우리나라 연안해역의 COD 또는 SS 확산모의에 사용되는 DIFF(한국해양연구소) 모형, DIMOS 모형 등이 있다.
- **온배수 모형(Thermal discharge model)** - 온도 확산모형의 일종으로, 발전소 냉각수로 사용되어 온도가 상승된 따뜻한(또는 뜨거운) 물을 해역에 방류할 경우의 주변해역의 온도상승(에너지확산)을 모의하는 모형으로, 시간규모는 조석규모이다. 우리나라에서는

원자력발전소 및 임해지역에 위치한 화력발전소 등에서 배출되는 온배수 확산을 모의하는 경우에 사용되며, 대상해역의 흐름장 계산을 포함한다.

- 수질모형(Water quality model) - 일반적인 수질항목간 상호작용을 모의할 수 있는 모형으로, 지배방정식은 이송·확산방정식에 모의하고자 하는 수질항목의 반응항 및 용출·소멸항이 추가되어 있다. 월, 계절 또는 연단위 시간규모의 모의로 가장 기본적인 수질모형은 하천의 경우 BOD(COD)-DO 모형, 호소 및 저수지의 경우 燐 모형이며, 최근에는 질소 및 인항목, 엽록소(藻類, 식물플랑크톤, 유기탄소 등의 항목으로도 표현)항목이 추가되어 부영양화를 모의하는 모형으로 향상되었다. 질소 및 인의 구분 방법 및 유기물, 무기물의 구분방법, 藻類(algae)의 모의방법, 동물플랑크톤의 영향을 포함하는 방법 등에 따라 세부적인 반응모식도가 차이가 있으나, 모두 수질모형의 범주에 포함된다. 부영양화 모형(Eutrophication model)이라는 용어도 사용되며, 특히 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 상호작용을 모의하는 경우는 생태학적 모형(Ecological model)으로 구분하는 경우도 있다.

수질모형은 매우 다양하며, 범용적인 대표적 모형으로는 QUAL, WASP 모형 등이 있으나, 다차원 수질모의에 사용하는 모형은 해당지역에 적합하게 개발된 모형이다. 특히, 폐쇄성 연안해역은 시·공 규모의 확장으로 다차원 수질모형의 적용이 불가피하다. 기개발된 수질모형 중 다차원 모형의 현장 적용사례를 검토하면 WASP 계열모형(Ambrose, et al., 1988)이 사용된 예가 있으나, 수질변동의 지역적인 특수성 및 오염양상을 반영하기 위한 작업의 일환으로 기본적인 모의 수질항목에 대하여 상용 또는 연구수행 목적으로 개발하여 사용하고 있는 실정이다.

미국의 대표적인 폐쇄성 내만인 Chesapeake Bay에서는 CE-QUAL-ICM(Cerco, 1994)이 개발·적용되었다. 한편, 일본에서는 각각 독자적으로 수질모형을 개발하여 적용되고 있으며 대표적인 수질모형으로는 EUTROP 등이 있으며, 東京灣, 伊勢灣, 大板灣 등의 해역의 적용하였다. 또한, Danish Hydraulic Institute 개발모형인 MIKE-21 부모형인 WQ 및 EU 부모형도 있다.

국내에서는 호소 및 해역의 수질모형 적용사례는 다차원 모형의 적용으로 제한하면, 조홍연 등(1994)이 필당호 수질모델링 과업을 WASP4 모형 및 자체개발한 평면 2차원 수질모형을 통하여 수행하였으며, 최우정, 김종구(1994) 등이 EUTROP 수질모형을 진해·마산만에 적용하여 각각 DO, 식물플랑크톤의 3차원적 거동을 분석한 바 있다. 또한, 청초호의 수질모델링에 WASP4 모형을 적용한 사례도 있다. 대부분의 해역의 수질모형은 오염물질의 방류구 확산에 대한 모형으로 COD 및 SS 항목에 대하여 조석에 대한 최대 확산 범위의 예측 등에 국한되어 있다. 그러나 해역의 수질기준 항목에 총인, 총질소 항목이 추가되어 있으며, 오염은 장기적인 관점에서 모의할 필요가 있으므로 해역의 부영양화를 예측할 수 있는 모형의 개발 및 적용이 지속적으로 수행되어야 한다.

- 단기간[동적]수질모형(Short term[dynamic] water quality model) - 오염물질 유출 사고 발생시 신속하게 실시간(realtime)으로 오염물질의 이동 및 확산 양상을 예측하는 모형으로, 危害한 오염물질의 유출로 인한 방제 및 경고(warning)를 위한 모형으로 활용된다. 하천에서는 취수중단, 바다에서는 양식장의 대피 등의 대처방안을 제시하는 모형으로 특정 물질에 국한된 확산 모형으로 구분된다. 즉, 하천에서는 유해화학물질(예, 폐놀, 암모니아, 기름 등) 이송모형, 연안해역 및 해양에서는 선박좌초 사고 등에 의하여 유출된 유류의 확산모형(Oil spill model) 및 오염물질(분뇨, 준설토, 방사능물질 등)을 해양에 투기하는 경우의 확산모형(Ocean pollutants disposal model)이다. 해양투기모형은 투기물질의 지속적인 영향 및 해저퇴적물에 미치는 영향을 모의하는 경우는 장기간의 수질모형에 해당한다고 할 수 있다.
- 생태계 모형(Ecological model, Ecosystem model) - 생물(주로 플랑크톤)의 개체수, 세포수(cell number) 또는 생물량을 표현하는 유기체 탄소의 양을 모의하는 모형이며, 가장 기본적인 모형으로 화학적인 관점에서의 동·식물플랑크톤의 상호작용에 관한 모형을 예로 들 수 있다. 일반적인 모형은 보다 높은 영양 단계의 생물(대상해역의 식물, 어류, 저서생물 등) 개체수의 변천 추이를 모의하는 모형으로 규정한다. 대표적인 모형으로는 WQRRS(Smith, 1978) 모형이 있으나, 실질적으로 모형의 적용을 위한 자료의 부족 및 자료수집의 어려움으로 적용된 사례가 거의 없다. 따라서, 생태계 모형은 통계학적 추정 및 간단한 포식자·피식자모형(Predator-Prey model)으로 구성되어 사용되고 있는 실정으로 파악된다. 자료의 부족 및 지역적인 특수성, 機構把握의 難解로 범용적인 모형의 개발이 활발하게 진행되지 못하고 있다.
- 적조(예측)모형(Red tide model, Algal bloom model) - 부영양화 예측모형과 생태계 모형이 결합된 모형으로 시간규모는 수질모형과 확산모형의 중간범위인 일별 모의정도로 유류오염 확산모형과 시·공 규모는 유사하다. 적조발생 기작이 명확하게 해명되지 않은 현 시점에서 활발하게 연구가 수행되고 있으나, 주로 인근 어장 및 양식장 피해를 저감하기 위한 경고체계구축 및 적조방제를 위한 기법연구가 수행되고 있으며, 범용모형은 없다. 특정 식물플랑크톤 種(species)에 대한 開花(bloom)모형 등이 제시되고 있으나, 적용 및 실질적인 활용은 부진한 실정이다.
- 중금속 및 유해화학물질[독극물] 모의모형(Heavy metal and chemical toxicants model) - 모의항목이 일반 수질항목이 아닌 중금속 및 유해화학물질[독극물]인 경우로 상호작용에 의한 모의보다는 한 항목의 세부적인 반응과정 및 운명(fate)을 모의하는 모형이다. 또는, 장기간에 걸쳐 퇴적된 화학물질의 용출효과를 모의하기 위하여 퇴적층(sediment)과 水柱(water column)의 상호작용을 고려한 모형 등을 포함한다. 이 모형의 모의항목은 주로 PCB, DDT, Ni, Cd, Zn, Cu 등이며, 시간규모상 수년에 걸친 장기적인

모의에 해당한다.

- **비점오염원 모형(Non-point sources model)** - 모의대상 지역의 입력자료를 산정하는 모형으로, 강우 - 유출모형, 토사유실모형, 오염물질 유출모형으로 구성되어 있다. 대상유역의 토지이용(land use)도 및 강우와 밀접하게 관련된 비점오염원 모형은 일시적으로 다량 유입되는 오염물질량을 계산하는 모형으로, 강우시의 단기간 모의 및 장기모의가 가능하다. 비점오염원 모형도 SWRRB, NPS, SWMM 등의 모형이 GIS 활용차원에서 적용이 활발하게 수행되고 있다.

### 3.3. 오염물질 이동예측 모형(평면 2차원 부영양화 예측모형)의 구조

#### 3.3.1 모형의 지배방정식 및 반응모식도

##### 가. 모형의 지배방정식

수질항목의 상호작용을 모의하기 위한 지배방정식은 이송-확산-반응(ADR) 방정식으로, 기본적인 형태는 운송방정식(Transport equation)으로 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial(HC_i)}{\partial t} + \frac{\partial(UHC_i)}{\partial x} + \frac{\partial(VHC_i)}{\partial y} = D_i + HR_i + ES_i + IS_i \quad (3.1)$$

여기서,  $H$ 는 수심(m);  $U, V$ 는 각각  $x, y$  방향의 수심평균 유속(m/sec);  $C_i$ 는 모의수질항목( $i$ )의 농도(mg/l, 이하 ppm);  $D, R, ES, IS$ 는 각각 확산항, 반응항, 외부오염물질 유입·유출항, 내부 오염물질 유입·유출항이며 모의수질항목의 특성 및 지역에 따라 각각 다르게 구성되는 항이다.

##### 나. 모의수질 항목의 선정

부영양화 모형의 모의수질항목은 COD(또는 BOD), DO, SS, 대장균군수, 영양염류(암모니아성 질소, 질산성질소, 아질산성질소, 유기질소, 인산염인, 유기인), 식물플랑크톤(염록소), 동물플랑크톤 등의 항목이며, SS, 대장균군수 등은 수질항목간 상호작용이 없는 독립적 수행항목으로 구성하였으며, COD 항목도 경우에 따라 독립적으로 모의할 수 있도록 구성하였다. 한편, 질산성질소와 아질산성질소는 하나의 항목으로 취급하여 처리하고, 식물플랑크톤 항목은 탄소량으로 표현하는 방법을 선택하였다.

부영양화 모형은 물질순환모형 또는 영양염류 순환모형(nutrients cycle model)이다. 수질 모형에 관련된 주 영양염류(major nutrients)는 C, N, P, Si(규소)이다. 규소는 조류 주요 종의 하나인 규조류(diatom)의 성장에만 영향을 미치는 중요한 항목으로, 규조류의 각질형성에 기여하고 있다. 또한 철(Fe), 망간(Mn), 황(S), 아연(Zn), 구리(Cu), 코발트(Co), 몰리브덴(Mo) 등의 미량영양염류(micro - nutrients) 및 비타민이 수중생태계의 변화과정에 중요한 역할을 수행하고 있으나, 미량만이 필요하며, 보통 유기물(organism)이 생화학적으로 요구하는 충분한 양이 수중에 존재하기 때문에 수질모델링에서는 일반적으로 고려하지 않는다.

한편, 영양염류를 섭취하는 생물상(biota) 관련 항목으로는 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 수중식물, 수중동물(어류), 저면 생물 등이 있으나 본 모형에서는 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 만을 고려하여 모형을 구성하였다. 또한, 중요한 수질항목인 용존산소, 해역의 오염도 지표로 사용되는 COD 항목, SS, 대장균군수 등을 본 모형에 추가하였다. SS, 대장균군수, COD 항목은 독립적으로 수행할 수 있으며, 임의의 1차 감소항 및 상수항으로 표현하여 모의할 수 있다.

영양염류는 수중환경(aquatic environment)에서 용존성 무기 영양염류(dissolved inorganic nutrients), 용존성 유기 영양염류(dissolved organic nutrients), 입자성 유기 영양염류(particulate organic[detrital] nutrients), 저면 퇴적물에 포함된 유기물(sediment nutrients), 생물학적 영양염류(biotic nutrients; algae, aquatic plants, zooplankton, fish, benthic organisms) 등 다양한 형태로 존재한다(Bowie, et al., 1985). 이러한 형태 중 藻類의 성장에 필요한 영양염류는 용존 CO<sub>2</sub>, 암모니아, 질산염 및 아질산염, 인산염, 용존 규산염 등의 용존성 무기 영양염류만 해당된다. 그러나, 입자성 물질이 용존성 물질로 변화되고, 용존성 무기물질이 생물에 의하여 흡수되는 과정을 모의하기 위해서는 무기 영양염류뿐 아니라 유기 영양염류의 형태도 모의항목에 포함시켜야 한다.

<Table 3.1> Classification of the water quality constituents

	Organic Type	Inorganic Type
Biota	Phytoplankton	Does not exist
	Zooplankton	
	Aquatic plants(not considered)	
	Aquatic animals(not considered)	
	Benthic organisms	
Abiota	Detritus(detrital nutrients)	Inorganic nutrients
	- Particulate organic matter	- Particulate inorganic matter
	- Dissolved organic matter	- Dissolved inorganic matter
	Sediment nutrients	Dissolved inorganic N Dissolved inorganic P

### 3.3.2 수질항목의 반응항 및 용출·소멸항

#### 가. COD(또는 BOD)-DO 模型

DO 모형은 模擬水質 항목의 反應過程에서 산소 생산 및 소비에 관련된 항을 포함하여 구성하였다. DO 모형과 관련된 주요 反應은 대기중의 산소가 용존되는 재폭기(reaeration)과정, 질산화(nitrification)과정, 유기물의 분해와 관련되어 산소가 소비되는 脫酸素(deoxygenation)과정, 조류의 광합성 및 호흡과정에 의한 산소의 생산 및 소비과정, 水底生物群에 의한 산소소비과정 등으로, 모형의 구성식은 (3.2)와 같다.

$$\frac{d[DO]}{dt} = k_a([DO_{sat}] - [DO]) - k_d[COD] - \frac{SOD}{H} + R_{oc}(G_a[A] - k_R[A]) - R_{NO}k_n[NH_3 - N] \quad (3.2)$$

여기서, [DO]는 용존산소(DO) 농도(mg/l; 이하 특별한 경우를 제외한 모든 수질항목의 단위로 사용), [COD]는 화학적 산소요구량(COD) 농도, [A]는 조류의 농도, [NH<sub>3</sub>-N]는 암모니아성 질소의 농도, DO<sub>sat</sub>는 포화용존산소의 농도, k<sub>a</sub>는 재폭기계수(1/day; 이하 모든 반응계수의 단위로 사용), k<sub>d</sub>는 탈산소계수, SOD는 저면퇴적물에 의한 산소소비량(g/m<sup>2</sup>-day, RU), R<sub>oc</sub>는 탄소에 대한 산소의 중량비, R<sub>NO</sub>는 산소에 대한 질소의 중량비(질산화과정에서 소비되는 산소의 양에 대한 질소량의 비), G<sub>a</sub>는 조류의 성장률, k<sub>R</sub>는 조류의 호흡률, k<sub>n</sub>은 질산화율이다.

재폭기는 대기와 접촉하는 수체와 대기사이의 산소교환과정으로, 天然水의 용존산소농도는 대기에서 수체로의 純 산소전달이 이루어진다. 그러나, 일사량 및 일조시간이 충분한 경

우 표충에서 식물플랑크톤에 의한 광합성이 활발하여 過飽和(supersaturation)의 용존산소 수준으로 산소를 발생할 때 純傳達은 대기로 전달된다. 수심이 깊은 호수의 경우에는 바람에 의한 표충유체의 교란으로 인하여 산소전달이 이루어지므로 바람에 의한 표면산소 전달 계수로 모형화하고 있으나, 흐름이 빠르고 얕은 하천의 경우 및 평면 2차원 수질모형의 경우에는 수심평균된 재폭기계수로 모형화하고, 재폭기계수는 흐름의 함수로서 계산할 수 있다. DO 항목의 모형화에 관련된 계수 중 포화 용존산소의 농도, 재폭기 계수, 탄소에 대한 산소의 생성 및 소비비율 등을 아래에 제시되는 계산식 또는 反應式을 통하여 얻을 수 있다.

재폭기 계수는 수심이 깊은 경우(0.61 m 이상), O'Connor - Dobbins가 제안한 공식을 사용하여 계산할 수 있으며, 수심이 얕은 경우(0.61 m 이하)에는 Owens 등(1964)이 제안한 공식을 이용하여 계산할 수 있다. 또한, 수심이 깊은 경우 유속이 약 1.0 m/sec를 넘어서는 빠른 흐름인 경우에는 Churchill 등이 제안한 공식을 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 모형의 추정매개변수로 모형의 보정과정에서 추정한 값을 사용하였다. 3개의 영역으로 분리된 흐름 조건에 대하여 재폭기계수를 산정하는 식(Ambrose et al., 1988 재인용)은 (3.3) - (3.5)와 같으며,  $u$ ,  $h$ 는 각각 ft/sec, ft의 단위를 가진 유속, 수심이다(Bowie et al., 1985).

$$\text{O'Connor - Dobbins 공식} : k_a = \frac{12.9u^{0.5}}{h^{1.5}} \quad (3.3)$$

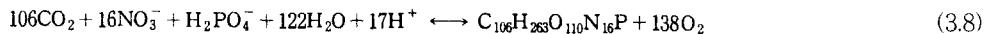
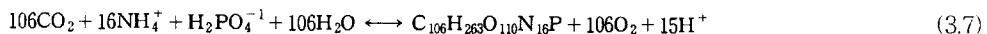
$$\text{Owens et al.(1964) 공식} : k_a = \frac{21.7u^{0.67}}{h^{1.85}} \quad (3.4)$$

$$\text{Churchill(1962) 공식} : k_a = \frac{11.6u^{0.969}}{h^{1.673}} \quad (3.5)$$

또한, 포화용존산소의 농도는 온도와 염도의 함수로써 표현할 수 있으며, 계산식은 APHA(1992)에서 제시한 식 (3.6)을 사용하여 계산하였다 (참고 :淡水의 경우에는 염도를 무시( $\approx 0.0$ )할 수 있으므로, Chlorinity 항을 무시하여 계산). 포화용존산소 계산식에 사용된 Chlorinity는 염도와 비례관계(Salinity = 1.80655 · Chlorinity)에 있으며, 사용된 온도 T는 절대온도로  $273.15 + (\text{섭씨온도}^{\circ}\text{C})$ 로 계산된다. 본 포화용존 산소농도 계산식을 사용할 수 있는 적합한 온도의 범위는  $0.0^{\circ}\text{C}$  -  $40.0^{\circ}\text{C}$ 이다.

$$\begin{aligned} \ln DO_{\text{sat}} = & -139.34411 + (1.575701 \times 10^5 / T) - (6.642308 \times 10^7 / T^2) \\ & + (1.243800 \times 10^{10} / T^3) - (8.621949 \times 10^{11} / T^4) \\ & - \text{Chlorinity} [(3.1929 \times 10^{-1}) - (1.9428 \times 10/T) + (3.8673 \times 10^3 / T^2)] \end{aligned} \quad (3.6)$$

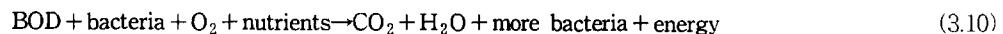
그리고, 식물플랑크톤인 藻類의 광합성 및 호흡과정의 反應式(Stumm and Morgan, 1981; Morel and Hering, 1993)을 통하여 탄소 단위질량에 대한 산소의 양을 정량화학적(stoichiometric)으로 계산할 수 있다. 광합성 및 호흡의 反應式은 식 (3.7), (3.8)과 같이 표현할 수 있으며, 水體內에서 이산화탄소 및 무기질소, 무기인 등을 영양염류로 하는 통한 세포증식 및 감소과정에 해당한다. 따라서, 세포(원형질, protoplasm) 구성성분의 비를 통하여 단위 탄소 질량에 대한 질소 및 인의 비율을 역시 정량적으로 계산할 수 있으며, 본 연구에서 모형화된 계수 중  $R_{OC}$ ,  $R_{NC}$ ,  $R_{PC}$ 는 각각 1.33 ~ 1.74, 0.176, 0.024에 해당하는 값이다.



원소기호 ( $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$ )는 식물플랑크톤 세포의 구성식(Redfield 공식; Morrel and Hering, 1993 재인용)으로, 광합성 및 호흡과정을 통하여 조류세포의 증식 및 감소과정을 표현할 수 있다. 또한, 탄소의 단위질량에 대한 산소생산량은 조류의 영양염류 흡입과정에서 암모니아성 질소, 질산성 질소의 선호도(암모나아성 질소의 선호계수)에 따라 1.59 - 1.94 범위를 가지므로, 식 (3.9)를 이용하여 단위 탄소량에 대한 산소의 생산 및 소비량의 비율을 계산할 수 도 있다(USAEWES, 1990).

$$R_{OC} = 1.59 + (1.94 - 1.35) \frac{[\text{NO}_3-\text{N}]}{[\text{NO}_3-\text{N}] + [\text{NH}_3-\text{N}]} \quad (3.9)$$

BOD는 유기물(Organic Matter)의 물질교대(신진대사), 환원된 질소 및  $\text{Fe}^{2+}$  등 환원된 광물을 산화하기 위하여 수중미생물(microbe)이 소비[有用化, utilization]하는 용존산소의 양이다(식 (3.10) 참조). 따라서, 모형에 따라서는 용존산소의 모의과정에 철과 당간항목을 포함하여 모형을 구성하는 경우도 있으나, 일반적으로 전통적인 방법, 즉 분해계수(탈산소계수)를 이용하여 간단하게 표현하는 방법이 이용되고 있다.



$$\frac{d[\text{BOD}]}{dt} = -[k_d + k_s(1-f_p)][\text{BOD}] + \frac{L_{\text{BOD}}}{H} + D_a R_{oc}[A] \quad (3.11)$$

여기서, [BOD]는 BOD 농도, [A]는 조류의 농도,  $k_d$ 는 탈산소계수[분해계수],  $k_s$ 는 입자성

유기물의 침전률,  $D_a$ 는 조류의 소멸률,  $R_{OC}$ 는 탄소에 대한 산소의 종량비,  $f_p$ 는 전체(용존성 +입자성) 유기물에 대한 입자성 유기물의 비율(0 - 1),  $L_{BOD}$ 는 외부오염원에 의한 BOD 오염부하율( $\text{g}/\text{m}^2\text{-day}$ , RU; Release Unit)이다.

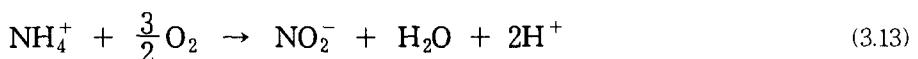
BOD의反應項은 최종 BOD(Ultimate BOD) 값으로 구성되는 반면, 통상 제시되는 BOD 값은  $\text{BOD}_5$  값이므로, 식 (3.12)를 사용하여 최종 BOD 값으로 변환하여 사용하여야 하며 (USAEWES, 1990), COD 항목으로 간주하여 모의하는 경우 값의 변환없이 직접 사용할 수 있다.

$$\text{CBOD}_U = \frac{\text{BOD}_5}{1 - \exp(-5.0K)} \quad (3.12)$$

여기서,  $K$ 는 실험실 BOD 감소율( $1/\text{day}$ )(통상적인 값은 0.23)이다.

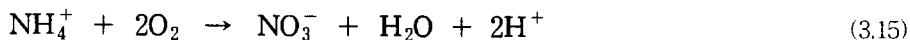
#### 나. 질소收支(nitrogen budget) 모형

질소는 영양염류로서의 역할, 질산화(nitrification) 과정에 의한 산소소비 및 BOD (또는 COD)농도의 변화뿐 아니라, 암모니아성 질소가 고농도일 경우 수중생태계를 파괴할 수 있는 毒素로 작용하기 때문에 수질모형에서 모의해야 하는 중요한 항목이다. 질소순환요소 수질항목의 反應項을 구성하기 위해서는 주요 窒素항목의 反應式을 파악하는 것이 중요하다. 질소 항목은 氮 항목과는 달리 주요 反應過程이 反應式으로 적절하게 표현될 수 있으며, 主要反應은 질산화과정으로 1, 2단계의 변화과정을 거치게 된다. 1단계는 Nitrosomonas 박테리아에 의한 암모니아성 질소의 아질산성 질소로의 산화과정[식 (3.13) 참조]이며, 2단계는 Nitrobacter 박테리아에 의한 아질산성 질소의 질산성 질소로의 산화과정[식 (3.14) 참조]이다. 이 두 단계의 反應은 산소를 소비한다는 측면에서 용존산소의 모형화에 포함되는 反應過程이다. 정량화학적인 측면에서 계산하면, 질소의 단위질량당 소비되는 산소의 양은 1단계에서 3.43(또는 48/14)g, 2단계에서 1.14(또는 16/14)g의 산소가 소비된다.



일반적으로,  $\text{NO}_2^-$  (nitrite N, 아질산성 질소, 亞醋酸),  $\text{NO}_3^-$  (nitrate N, 질산성 질소, 醋酸)는 아질산성 질소가 질산성 질소로 빠르게 전환되기 때문에 하나의 항목으로 통합하여

취급할 수 있으며(Thomann and Mueller, 1987), 이 경우 질산화과정에서 소비되는 산소의 양은 질소의 단위질량당 4.57(또는 64/14)g 이 된다. 이 값 4.57은 BOD - DO 모형에서 記述, 모형화되는 DO 항목의 反應式 중  $R_{NO}$ 에 해당하는 값으로, 수질모형의 수행과정에서 사용하였다. 1, 2단계의 질산화과정의 반응식을 하나로 합하면 식 (3.15)와 같으며, 통합된 반응식을 이용하여 반응항을 구성하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다.



한편, 암모니아성질소는 암모니아가스( $\text{NH}_3$ ) 및 암모늄이온 ( $\text{NH}_4^+$ )의 형태로 존재하며, 두 항목의 형태변화는 수소이온농도(pH)의 변화에 따라 수질항목의 反應速度에 비하여 매우 빠르게 형태변환(식 (3.16) 참조)하기 때문에 代表항목인  $[\text{NH}_3-\text{N}]$ 으로 취급하여 모형을 구성하였다. 중성 pH에서는 대부분  $[\text{NH}_4^+]$ 의 형태를 지니고 있으며, 알카리도(alkalinity)가 증가(pH 증가)할 수록  $[\text{NH}_3]$ 의 함량이 증가한다.

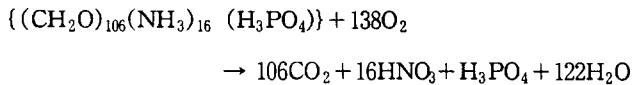


또한, 자연계 질소순환과정에서의 주 입력(용출), 출력(소멸)인 질소고정(N fixation)과 탈질산화(denitrification)과정은 대기와 수체의 相互反應을 나타내는 중요한 反應이다. 탈질산화 반응은 혐기성 상태에서 일어나는 반응으로, 아래 제시된 호기성, 혐기성 상태에서의 반응을 상호비교하여 나타낸 내용을 참고한다.

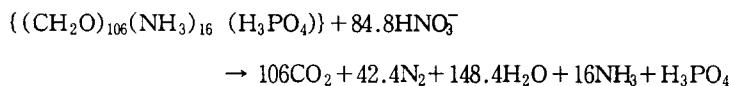
#### ● 호기성 및 혐기성 상태에서의 반응

- 해수중에 용존산소가 비교적 풍부한 경우, 산소를 소비한다.

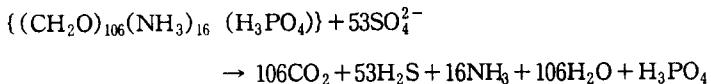
식물성플랑크톤의 잔해 (algal protoplasm; 원형질-조류세포) Cells



- 무산소상태(anoxia)인 경우에는 질산염( $\text{NO}_3-\text{N}$ )이 유기물의 산화제로 작용하여 탈질소반응(denitrification)을 한다.



- 질산염을 산화제로 탈질소반응이 계속되어 질산염이 아주 낮은 농도로 떨어지면, 황산( $\text{SO}_4^{2-}$ )이 유기물의 분해에 사용된다.



한편, 청록조류 등에 의한 질소고정은 조류성장이 질소에 의하여 제한을 받지 않고 암모니아와 질산성 질소에 의하여 충족될 수 없는 모든 질소요구를 질소고정이 형성한다는 가정 하에서 구성된다(Bowie et al., 1985). 그러나, 암모니아성 질소 및 질산성 질소가 임계농도 이하인 경우에는 질소고정이 발생하지 않는다. 위의反應 및 유기물의 유입을 고려한 질소 순환과 관련된 항목의 반응형 구성식은 (3.17) - (3.19)와 같다. 그러나, 탈질산화과정은 혼기성 상태(anaerobic condition)에서 발생하는 과정으로, 모형구성에서 생략하는 경우도 있다.

$$\frac{d[\text{Org.N}]}{dt} = -k_{nm}[\text{Org.N}] + D_a R_{NC} F_{ON}[A] - \frac{v_{ON}}{H} [\text{Org.N}] + \frac{L_{ON}}{H} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{NH}_3 - \text{N}]}{dt} &= k_{nm}[\text{Org.N}] - k_n[\text{NH}_3 - \text{N}] \\ &\quad - G_a P_A R_{NC}[A] + D_a R_{NC}(1 - F_{ON})[A] + \frac{L_{AN}}{H} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{NO}_3 - \text{N}]}{dt} &= k_n[\text{NH}_3 - \text{N}] + G_a(1 - P_A)R_{NC}[A] \\ &\quad - k_{dn}[\text{NO}_3 - \text{N}] + \frac{L_{NN}}{H} \end{aligned} \quad (3.19)$$

여기서,  $[\text{Org.N}]$ 는 유기질소의 농도,  $[\text{NH}_3 - \text{N}]$ 는 암모늄이온과 암모니아성질소의 농도,  $[\text{NO}_3 - \text{N}]$ 는 질산성질소와 아질산성질소의 농도,  $[A]$ 는 조류의 농도,  $G_a$ 는 조류의 성장률,  $D_a$ 는 조류의 소멸률,  $k_{nm}$ 는 유기질소의 가수분해(또는 무기질소화)율,  $k_n$ 는 질산화율,  $k_{dn}$ 는 탈질산화율,  $L_{ON}$ 은 유기질소의 외부유입율 및 저면퇴적물로부터의 용출율(RU),  $L_{AN}$ 은 암모니아성질소의 외부유입율 및 저면퇴적물로부터의 용출율(RU),  $L_{NN}$ 은 질산성질소의 외부유입율 및 저면퇴적물로부터의 용출율(RU),  $P_A$ 는 암모니아성질소의 선호계수,  $R_{NC}$ 는 질소에 대한 탄소의 비율,  $v_{ON}$ 은 입자성 유기질소의 침강속도(m/day),  $F_{ON}$ 은 질소순환과정 중 영양염류가 유기질소로 회귀되는 비율이다.

#### 다. 磷收支(phosphorus budget) 모형

인은 호수 및 폐쇄성 내만, 흐름이 정체된 해역의 富營養化 예측 및 富營養化 정도의 指

標 및 조류성장과 관련된 중요한 영양염류로서 호소수질모형에서 전통적으로 모형화되고, 염록소 항목과 함께 관측되어온 수질항목이다(Henderson-Sellers, 1984). 특히, 환경공학에서 중요하게 취급하는 인의 유일한 무기화합물(inorganic compounds)은 인산염 인(phosphates) 또는 보통 폴리인산염, 축약된(condensed) 인산염으로 여겨지는, 분자적으로 탈수된 형태의 인산염이다(Sawyer and McCarty, 1978). 인산염은 약 2%정도(건조중량 기준)의 인을 함유하는 원형질의 성장에 필요한 영양염류로, 공급정도에 따라 광합성 水生生物의 성장을 촉진·제한하는 요소가 될 수 있다. 일반적으로, 수중생태계에 중요한 인화합물은 분자구조에 따라 Orthophosphate, 폴리인산염, 메타인산염, 유기 인산염으로 분류되며, 폴리인산염과 메타인산염을 축약된 인산염이라고 한다(Snoeyink and Jenkins, 1980).

또한, 주요 수질觀測 항목에 포함되는 총 인은 보다 세분화하여 구분할 수도 있으나, 통상적으로 무기인[주로 인산염인으로 구성되며 조류 성장과 관련된 영양염류임]과 유기인으로 대별되며, 각각의 항목은 용존 인과 입자형(particulate) 인으로 분류할 수 있다. 수중생태계의 인 항목을 보다 상세하게 분류(Henserson-Sellers, 1984)할 수 있으나, 본 연구에서 模擬하는 인 계열은 조류의 성장과 관련된 영양염류를 중심으로 2가지 형태의 항목으로, 인산염 인은  $H_2PO_4^-$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$  등의 여러가지 이온형태로 존재하고 있으나 각 항목의 변환 형태는 수소이온농도의 변화에 따라 즉시(수질항목간의 反應速度에 비하여) 형태변환을 하기 때문에 인산염인의 모든 항목을 하나의 항목으로 대표하여 모형을 구성하였다. 본 연구에서 모의하는 인 수지 항목은 인산염 인  $[PO_4^{3-}]$ ,  $[Org.P]$ 의 두 항목이다.

인을 포함하는 유기물 및 유기인 등, 인 항목의 순환 모식도로부터 구성되는 인 수지 수질항목의 구성식은 (3.20), (3.21)과 같다.

$$\frac{d[Org.P]}{dt} = -k_{pm}[Org.P] + D_a R_{PC} F_{OP}[A] - \frac{V_{OP}}{H}[Org.P] + \frac{L_{OP}}{H} \quad (3.20)$$

$$\frac{d[PO_4 - P]}{dt} = k_{pm}[Org.P] - G_a R_{PC}[A] + D_a R_{PC}(1 - F_{OP})[A] + \frac{L_{PP}}{H} \quad (3.21)$$

여기서,  $[Org.P]$ 는 유기 인의 농도,  $[PO_4 - P]$ 는 무기인(인산염 인)의 농도,  $[A]$ 는 조류의 농도,  $G_a$ 는 조류의 성장률,  $D_a$ 는 조류의 사멸률,  $k_{pm}$ 는 유기인의 가수분해(또는 무기인

화)을,  $R_{PC}$ 는 인에 대한 탄소의 비율,  $L_{OP}$ 는 유기인의 외부유입을 및 저면퇴적물로부터의 용출률(RU),  $L_{PP}$ 는 인산염[무기]인의 외부유입을 및 저면퇴적물로부터의 용출률(RU),  $v_{OP}$ 는 입자성 유기인의 침강속도(m/day),  $F_{OP}$ 는 인순환 과정 중 영양염류가 유기 인으로 회귀되는 비율이다.

#### 라. 藻類(식물플랑크톤) 모형

수질모형에서 조류를 模擬하기 위한 접근 방식은 모든 식물플랑크톤의 모든 種을 하나의 항목으로 통합하여 엽록소 a(chlorophyll - a) 및 총 조류로 표현하는 방식과 모든 조류를 대상 유역에서의 몇개의 우점종으로, 즉 녹조류, 규조류, 청녹조류 등의 그룹으로分割하여 각 종을 각각 模擬하는 접근 방식이 있다(Bowie et al., 1985). 후자의 접근방식은 흐름의 영향이 적은 호수 및 저수지 모형에서 장기간의 模擬에 의한 富營養化 예측에 적용되는 방식으로, 여러 종류의 조류에 대한 계절적 변동이 중요한 지점에서 적용하는 방식이다. 반면, 전자의 방식은 DO, SS, 濁度(turbidity) 등의 일반적 수질항목에 대한 조류의 영향이 주관적인 지역 즉, 하천 및 흐름의 영향이 중요한 지점에서의 단기간의 模擬에 적용되는 접근방식이다. 조류의 농도를 엽록소 a의 농도로 표현하는 이유는 식물플랑크톤의 광합성 色素(pigment) 중 엽록소가 제일 중요하고 풍부한 色素(기타 색소는 카로티노이드 色素, 피코빌린 色素 등이 있음)이며, 엽록소는 엽록소 a, b, c, d, e 및 엽록소 650, 엽록소 660으로 구분되지만, 산소의 생산과 관련된 광합성을 하는 모든 유기물이 엽록소 a를 포함하고 있기 때문이다(Devlin and Barker, 1971; Chap.3), 또한 엽록소 a의 양으로 조류의 양을 간단한 비례식(엽록소 a 양에 대한 탄소량의 비)을 통하여 간단하게 모형화할 수 있기 때문이다(Brown & Barnwell, 1987).

조류의 種을 고려한 생태학적 모형(ecological model)을 구성하기 위해서는 Predator-Prey 모형(PPM)을 구성하는 것이 바람직하지만, 보통 가용자료의 미비, 종 출현의 지속적인 장기 관측자료 부족 및 모델링의 효율성을 고려하여, 조류를 單一수질항목으로 표현하는 접근방식이 지배적이다.

#### ● 식물플랑크톤의 현존량(standing crops) 표현방법

식물플랑크톤은 해역의 부영양화를 파악하는 가장 중요한 지표이며, 부영양화 모형의 중심이 되는 항목이다. 식물플랑크톤의 측정단위는 단위부피당 세포수(cells/L), 엽록소(chlorophyll-a)량, 탄소량(mgC/L) 등이 사용되고 있으나, 대부분의 경우 세포수 단위로 제시되어 있으므로 엽록소 및 탄소량으로 표현되는 기존 수질모형 수정하거나 또는 원하는 단위로의 환산과정이 필요하다. 부영양화 모형에서는 탄소량을 사용하는 모형으로 구성하였으므로 측정자료인 식물플랑크톤 자료를 탄소량으로 환산하여 사용하며, 동물플랑크톤의 경우

도 탄소량으로 환산된 자료를 사용한다.

엽록소량로 측정된 경우의 단위환산 방법은 탄소량에 대한 엽록소량의 중량비(Carbon to Chlorophyll *a* ratio)를 환산계수로 이용하여 간단하게 환산할 수 있으나, 이 값이 10~100 정도에 해당하는 범위를 가지며, 주변 환경(일사량, 수온, 광도 등) 및 영양분에 따라 변화하기 때문에 특정값을 사용하는 경우 단위환산의 정확도가 감소할 수 있다. 일반적으로, 30~60정도의 값을 사용하고 있으나, 대상해역의 관측자료가 있는 경우는 관측자료를 이용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

식물플랑크톤은 동등한 영양염류의 양으로도 모형화할 수 있다. 즉, 일반적인 觀測항목인 엽록소 *a* 농도( $\text{mg}/\text{m}^3$ )와 조류의 농도( $\text{mg}/\text{l}$ )는 다음과 같은 관계식이 성립된다(Brown and Barnwell, 1987).

$$[\text{엽록소 } a] = R_{CC} [\text{탄소의 양으로 표현되는 조류}] = R_{CC}[A]$$

여기서, [A]는 조류의 농도, [엽록소 *a*]는 엽록소 *a*의 농도( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), [탄소의 양으로 표현되는 조류]는 조류의 농도로 [A]와 같으며,  $R_{CC}$ 는 탄소량에 대한 엽록소 *a*량의 비율로 10~100의 범위를 가지는 값으로 여름철에 작은 값을 가지고, 봄·가을철에 큰 값을 가지는 것으로 보고되고 있다(Ambrose et al., 1988). 이와 같은 관계식을 사용하는 이유는 본 연구에서 구성되는 모형에서 조류의 농도를 탄소의 양으로 표현하기 때문이며, 따라서 觀測항목인 엽록소 *a*의 농도는 탄소의 양으로 표현되는 조류의 농도로 변환하여야 한다. C, N, P 또는 엽록소 *a*로 표현되는 乾燥重量 또는 정량화학비를 사용하여 다른 단위( $\text{mgN/l}$ ,  $\text{mgP/l}$ )로 변환 할 수 있으나, 부영양화 모형에서는  $\text{mgC/l}$ 를 사용하였다.

한편, 세포수로 측정된 경우, 탄소량으로 환산하는 방법은 보다 복잡하다. 우선 식물플랑크톤을 종별로 구별하고, 종별 플랑크톤의 체적을 계산하고, 계산식 플랑크톤의 체적을 이용하여 Strathmann(1967)가 제시한 경험식을 이용하여 환산하는 방법이다.

- 규조류(diatom)의 경우

$$\log C = -0.422 + 0.758 \log V$$

- 비규조류(non-diatom)의 경우

$$\log C = -0.460 + 0.886 \log V$$

여기서, C는 단위세포에 함유된 탄소량( $\text{pgC}/\text{cell}$ ), V는 식물플랑크톤의 체적( $\mu\text{m}^3$ )이다.

부영양화 모형에서는, 세포수로 측정된 자료를 탄소량으로 환산하는 방법이 이용되고 있

으며, 플랑크톤의 체적은 심재형(1994; 한국동식물 도감, 교육부) 및 김학균 등(1993)에 제시되어 있는 자료를 이용하여 추정할 수 있다.

藻類모형의反應過程은 일반적으로 다음과 같은 식 (3.22)로 표현될 수 있다(Bowie et al., 1985).

$$\frac{d[A]}{dt} = (G_a - k_r - e_x - s - m)[A] - g \quad (3.22)$$

여기서,  $[A]$ 는 조류의 농도,  $G_a$ 는 조류의 성장률,  $k_r$ 는 조류의 호흡률,  $e_x$ 는 조류의 不活化(excretion)率,  $s$ 는 조류의 침전률,  $m$ 은 조류의 사멸률 및 분해율,  $g$ 는 동물플랑크톤에 의한 조류 포획량( $\text{mg C/l-day}$ )으로  $k_G \cdot \text{ZOO} \cdot [A]$  식으로 표현(Bowie et al., 1985)할 수 있으며,  $k_G$ 는 동물플랑크톤의 조류 포획율, ZOO는 동물플랑크톤의 개체수이다. 동물플랑크톤의 개체수를 탄소량으로 표현하기 위해서는 적절한 변환식을 이용하면 된다.

모형의 간편성을 위하여, 호흡률, 不活化率, 사멸률, 포획율을 통합하여 소멸률  $D_a$ 로 표현하고, 침전율  $s$ 는 조류의 침강속도와 수심의 함수로 표현하여 식 (3.23)과 같이 최종적으로 모형反應式을 구성하였다. 구성식 (3.23)은 범용 수질모형인 QUAL2E 및 WASP4 모형 구성식의 형태와 동일하다.

$$\frac{d[A]}{dt} = \left( G_a - D_a - \frac{v_A}{H} \right) [A] \quad (3.23)$$

여기서,  $[A]$ 는 조류의 농도,  $G_a$ 는 조류의 성장률,  $D_a$ 는 조류의 소멸률,  $v_A$ 는 조류의 침강속도( $\text{m/day}$ )이다.

### 조류의 성장률

조류의 성장률 계수  $G_a$ 는 온도에 의한 성장제한인자, 빛에 의한 성장제한인자, 영양염류에 의한 성장제한인자간의 곱으로 계산하며, 식 (3.24)와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$G_a = G_{\max}(T) \cdot F(L) \cdot F(N) \quad (3.24)$$

여기서,  $G_{\max}(T)$ 는 온도  $T^{\circ}\text{C}$ 에서의 조류의 최대(포화) 성장률,  $F(L)$ 는 빛에 의한 조류 성장 제한인자,  $F(N)$ 는 영양염류에 의한 조류성장 제한인자이다. 조류성장에 의한 빛 제한함수는 Michalis-Menten 형태의 식, Smith 식, Steele 식(Bowie et al., 1985) 등이 제안되어져 왔으나, 본 연구에서는 광저해(photo - inhibition) 효과를 고려할 수 있으며 일반적으로 널리 사용되고 있는 Steele 식 (3.25), (3.26)을 사용하기로 한다. 여기서,  $f(L)$ 은 하루 중 한 시점에서의 수심  $z$ 에서의 조류성장에 대한 온도제한함수이다.

$$f(L) = \frac{I(z)}{I_s} \exp\left(1 - \frac{I(z)}{I_s}\right) \quad (3.25)$$

여기서,  $I_s$ 는 조류성장 최적 광도(포화광도)(langleys/day),  $I(z)$ 는 수심  $z$ 에서의 광도(langleyes/day)로 Beer-Lambert 법칙에 의하여  $I_0 e^{(-\gamma z)}$ 로 표현되며,  $I_0$ 는 수표면에서의 광도(langleyes/day),  $\gamma$ 는 광소멸계수(light extinction coefficient, 1/m)이다.

$$F(L) = \frac{e F_{\text{DAY}}}{\gamma H} \left[ \exp\left(-\frac{I_0}{I_s} \exp(-\gamma H)\right) - \exp\left(-\frac{I_0}{I_s}\right) \right] \quad (3.26)$$

반면, 영양염류에 의한 조류성장 제한함수는 각각의 영양염류에 대한 제한인자를 계산하며, 最小法則(Leibig's Law : 조류의 성장을 제한하는 영양염류는 최소량으로 공급되는 영양염류; Reid and Wood, 1976)에 따라 다음과 같이 표현된다. 본 연구에서는 영양염류로 무기질소(inorganic N; ammonia, nitrate and nitrite N)와 무기인(inorganic P; phosphate P)을 고려하였으며, 제한함수는 식 (3.27)로 표현된다.

$$F(N) = \min\left(\frac{[\text{DIP}]}{K_{mP} + [\text{DIP}]}, \frac{[\text{DIN}]}{K_{mN} + [\text{DIN}]}\right) \quad (3.27)$$

여기서, [DIP]는 용존무기인 또는 溶存反應性磷의 농도, [DIN]은 용존 무기 질소의 농도로 암모니아성 질소, 질산성 질소 및 아질산성 질소의 농도를 합한 값이며,  $K_{mP}$ 는 인의 반포화상수(mg/l),  $K_{mN}$ 는 질소의 반포화상수(mg/l)이다.

광소멸계수  $\gamma$ 는 염록소  $a$  및 탁도, 부유물질 등의 함수로 표현될 수 있으므로, 부영양화 모형은 Riley 공식 (3.28)을 이용하여 광소멸계수를 계산하였다. Riley 공식의 상수항( $\gamma_0$ , 내

정값 0.4)은 지역에 따라 다른 값을 가지므로 타 지역에 적용하기 위해서는 그 지역에 해당하는 값을 사용하여야 한다.

$$\gamma = \gamma_0 + 0.0088[\text{chl.a}] + 0.054[\text{chl.a}]^{2/3} \text{(Riley 공식)} \quad (3.28)$$

### 조류의 소멸률, 침전율

조류의 소멸률  $D_a$  및 침강속도  $v_A$ 의 계산방법은 다음 식 (3.29)-(3.31)을 이용하여 계산 할 수 있다.

$$D_a = k_R \theta_R^{(T-20)} + e_x + m + k_G \cdot \text{Zoo}(x, t) \quad (3.29)$$

$$v_A = v_A(20^\circ\text{C}) f_A(T) \quad (3.30)$$

$$f_A(T) = \frac{157.5}{0.069T^2 - 5.3T + 177.6} \text{ (Bowie et al., 1985)} \quad (3.31)$$

동물플랑크톤 및 水生植物(aquatic plants), 어류 등의 상위 1, 2차소비자를 포함한 먹이사슬 또는 먹이망(food-chain, food-web)을 모형화할 경우 생태학적 모형이 구성된다. 부영양화 모형에서는 생태학적 모형의 구성은 간략화하였다.

### 3.4. 오염물질 이동예측모형의 적용방법

오염물질 이동예측 모형을 이용하여 모의하고자 하는 수질항목의 농도를 예측하기 위해서는 대상해역으로 유입되는 오염부하량의 추정, 수질항목간 반응계수, 외부환경과 관련된 환경인자, 모형의 구조적 매개변수, 대상해역의 흐름양상을 표현하는 수리학적 입력자료 등의 적절한 계산 및 추정이 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그리고, 이와 더불어 중요한 것은 수립된 모형의 보정 및 검증절차이다. 상당히 많은 연구에서 생략되고 있는 모형의 보정 및 검증은 입력자료 및 보정·검증자료의 부재에 기인하고 있지만, 생략할 수 없는 필수적인 과정이다. 따라서, 이러한 과정을 거치지 않고 모형을 실제 현장에 적용하여 오염물질의 이동을 예측하는 것은 많은 불확실성을 내포하고 있으며, 잘못된 결과를 도출할 수 도 있음을 반드시 감안하여야 한다.

### 3.5 참고문헌

1. 김종구, 1994. 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 부산수산대학교 공학박사 학위논문.
2. 김학균 등, 1993. 한국연안의 적조생물, 국립수산진흥원
3. 심재형, 1994. 해양식물 플랑크톤, 한국동식물도감, 제34권 식물편, 교육부.
4. 조홍연, 1996. 호수수질모형의 현황과 개발방향, 한국수자원학회지, 학술기사, 제29권, 제5호, pp.51-56.
5. 조홍연, 이길성, 1995. 직교곡선격자를 이용한 수질모형의 개발과 적용, 대한토목학회논문집, 제15권, 제5호, pp.1311-1322.
6. 조홍연, 전경수, 이길성, 1993. WASP4 모형에 의한 수질모델링, 한국해안·해양공학회지, 제5권, 제3호, pp.221-231.
7. 최우정, 박정길, 이석모, 1994. 진해만의 빈산소수파 형성에 관한 연구, 한국수산학회지, 제27권, 제4호, pp.413-433.
8. 한국해양연구소, 1995. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구, 제1차년도 보고서, 과학기술처.
9. 한국해양연구소, 1996. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구, 제2·3차년도 보고서, 과학기술처.
10. Ambrose Jr., et al., 1988. WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, User's Manual and Programmers Guide, EPA.
11. APHA, AWWA, 1992. Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater(18th Ed.), Part. 4000.
12. Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P.W.H. and Gherini, S.A., 1985. Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling(2nd Ed.), Tetra Tech, EPA/600/3-85/007.
13. Brown, L.C. and Barnwell, T.O., 1987. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and User Manual, EPA.
14. Cerco, C.F. and Cole, T., 1993. Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay, J. of Environmental Eng., Vol.119, No.6, pp.1006-1025.
15. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C., Imberger, J. and Brooks, N.H., 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press.
16. Henderson - Sellers, B., 1984. Engineering Limnology, Pitman Advanced Pub. Program.
17. Morel, F.M.M. and Herring, J.G., 1993. Principles and Applications of Aquatic Chemistry, John-Wiley & Sons, Chap. 4.
18. Orlob, G.T.(Editor), 1983. Mathematical Modeling of Water Quality : Streams, Lakes,

- and Reservoirs, Int'l Series on Applied System Analysis, 12, John Wiley & Sons.
19. Strathmann, R.R., 1967. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. Limnology and Oceanography, Vol.12, ASLO, pp.411-418.
20. Tchobanoglous, G. and Schroeder, E.D., 1985. Water Quality : Characteristics · Modeling · Modification, Addison - Wesley.
21. Thomann, R.V. and Mueller, J.A., 1987. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper & Row.
22. USAWES, 1990. CE-QUAL-RIV1 : A Dynamic One-Dimensional Water Quality Model for Streams, User's Manual, US Army Corps of Engineers.

## 4. 해안구조물 설계

### 4.1 해안구조물의 종류

국토가 좁고 천연자원이 부족한 우리 나라는 일찍이 해양공간의 이용과 해양자원 개발의 필요성이 대두되어왔다. 특히 삼면이 바다에 연해있는 우리 나라가 이러한 목적을 달성하기 위해서는 구조물 설계에 필요한 지식을 습득하고, 정밀하게 시공하는 것이 필요하다.

우리 나라는 수십년 동안 이미 서·남해안을 중심으로 해안 간척 및 매립 사업을 수행하여 주거단지, 농업용지 및 공장부지 등으로 활용하고 있으며 현재도 영종도 신공항, 새만금 지역 등 대규모의 간척사업이 수행중이다. 그러나 이에 따른 연안 수산자원의 감소, 항만시설의 매몰 등 환경에 악영향을 미치는 문제점이 발생하여 이러한 매립사업은 한계를 드러내고 있는 실정이다. 이러한 환경관련 문제점을 최소화하면서 연안역을 효율적으로 이용하기 위한 방안으로 해수교환이 가능한 구조물을 생각할 수 있다.

구조물은 크게 부유식과 고정식으로 분류할 수 있으며, 특히 부유식은 환경친화적인 용도의 구조물로 적합하다. 해안구조물에는 여러 가지 정의가 되어 있지만, 파랑이나 조류 등의 해상조건의 영향을 받는 구조물을 대상으로 하며, 연안, 먼바다, 해양에 건설되는 구조물을 총칭하는 것으로 한다. 해양에 구축되는 구조물을 분류하면, 기능성 및 이동성에 의해 분리할 수 있다. 기능성을 중심으로 분류하면, 해양구조물로서 점으로 가능한 것(Sea-berth, 해중 전망탑, 바지, 저유탱크), 선으로 가능한 것(해상가교, 침매터널, 방파제, 마라나 등), 면으로 가능한 것(해상공항, 해상플랜트, 폐기물 처리시설)의 3가지 형태로 된다. 이동성의 유무로는 이동식(부유식 등), 고정식으로 나눌 수 있다. 이 중 특히 신형식 방파제의 개발동향 및 발전방향은 다음과 같다.

### 4.2 신형식 방파제의 개발동향 및 발전방향

최근 산업의 고도화에 따른 해상 물동량의 증가로 인하여 연안개발의 필요성이 급속히 증대되고 있으며, 국민 생활수준의 향상으로 친수공간의 개발에 대한 욕구가 날로 커지고 있다 따라서, 대규모의 신항만 건설과 기존 항만의 효율적인 유지관리의 필요성이 강조되고 있으며, 항내의 수질환경개선 및 국민의 휴식공간의 정비와 개발이 요구되고 있다 항내외 선박의 출입, 하역작업, 계류 등의 해상활동을 효율적으로 수행하고 국민 휴식공간으로서의 수변공간을 외해의 심한 파랑조건으로부터 보호하기 위해서는 무엇보다도 먼저 성능이 우수한 방파제의 건설이 요구된다. 防波堤의 건설환경이 점차 대수심, 고파랑, 연약지반으로 읊어가고, 수질환경의 중요성이 날로 증가하고, 주변환경과의 조화가 강조되고 있어 새로운 구조형식의 방파제 개발이 필요하게 되었다.

신형식 방파제의 개발에 대한 의욕은 구미제국보다 일본이 보다 높으며 시공사례도 많다. 태풍, 지진 등의 열악한 자연환경에 노출되어 있는 일본은 일찍이 재해방지기술을 개발하기 시작하여 많은 노하우(Know-How)를 축적하기에 이르렀다. 이 축적된 기술을 바탕으로 20여년전부터 연안역을 산업공간, 주거 및 국민의 휴식공간으로 조성하기 시작하여, 현재 성공적으로 개발을 지속하고 있다. 신형 방파제에 대한 연구도 활발히 진행되어 수많은 종류의 방파제가 제안되어 있으며<sup>(1)</sup>, 실제에 적용된 사례도 적지 않다. 일본 연안개발기술연구센타(CDIT)에서는 1994년까지 개발된 신형식 방파제를 취합하여 설계에 참조할 수 있는 보고서를 출간하였다<sup>(2)</sup>.

현재까지 시공된 방파제를 기능면에서 분류하면 크게 다음의 네 가지로 나누어 볼 수 있다

#### 4.2.1 에너지 감쇠형

기존의 케이슨 구조를 개량하여 항외측에 유공벽과 유수실을 갖도록 설계하여 외해파랑이 입사할 때 유공벽에서 난류를 발생시켜 에너지를 감쇠시키는 형태의 방파제로, 연직 유공벽을 갖는 경우는 많은 시공 사례가 있으며, 유공벽을 원호로 처리하여 보다 미관과 안정도를 증가시킨 곡면 슬리트(Slit) 케이슨제<sup>(3, 4)</sup>도 시공되었다

#### 4.2.2 환경보존형

불투파식 방파제에 의해서 야기되는 항내수질악화의 문제를 해결할 목적으로 개발된 형식으로 크게 착저식과 부유식으로 나누어 생각할 수 있다. 착저식으로는 항내외측의 물이 원활히 드나들 수 있도록 구멍을 설치한 형태로 이중원통케이슨제<sup>(5)</sup>, 반원형 케이슨제<sup>(6)</sup>, 측면에 개구부가 있는 직립소파케이슨제<sup>(7)</sup> 등을 들 수 있다. 부유식으로는 가장 기본적인 상자형 외에도 뗏목형, 타이어 연결형 등 많은 형식이 개발되어 있다<sup>(8, 9)</sup>. 일반적으로 이러한 부유식 방파제는 주기가 비교적 긴 파랑에는 저항하지 못하고 주로 4초에서 6초의 비교적 주기가 짧은 통상파랑조건에서만

성능을 잘 발휘할 수 있어 비교적 정온한 수역의 2차 파랑의 차단 수단으로 사용되고 있다. 이 두 가지 형식 외에 해저면에 유연성이 큰 재질로 Flexible Mound를 구성하여 파랑을 제어하는 형식도 제안되어 있다<sup>(10)</sup>.

#### 4.2.3 열악환경대처형

연안역의 개발영역이 점차 넓어지고 심해로 확대되어 감에 따라 연약지반 또는 대수심의 고파랑 해상조건에 적용할 목적으로 개발된 형식이다. 연약지반용으로는 단면이 역T 또는  $\pi$ 형인 연약지반 착저식 방파제<sup>(2)</sup>, TTP 등의 소파블럭과 L형 블록을 이용한 L형 소파방파제<sup>(2)</sup>가 있으며, 대수심용으로는 후면 전달율은 크지만 안정성이 높은 Multi-Cellular 케이슨제<sup>(11)</sup>와 쓰나미를 차단할 목적으로 개발된 하부태형상부슬리트케이슨제<sup>(12, 13)</sup>를 들 수 있다.

#### 4.2.4 에너지 추출형

파랑 에너지를 전기적 에너지로 변환할 목적으로 개발된 형식으로 크게 부체의 진동을 이용하는 방법과 수면변동에 따른 공기압축을 이용하는 방법이 있다. 전자는 파랑에 의한

부유체의 연직운동을 이용하는 것이고<sup>(14)</sup>, 후자는 케이슨 전면에 상부가 밀폐된 유수실을 설치하여 파랑의 수면변동에 의해 야기되는 공기의 압축을 이용하는 것이다<sup>(15, 16)</sup>. 발전 외에 부수적으로 파랑에너지의 감쇠도 기대할 수 있다.

이러한 신형 방파제의 개발은 정부의 주도하에 정부 연구기관(운수성 항만기술연구소)과 민간 기업체의 유기적인 협조하에 이루어지고 있다. 즉, 정부의 연구기관에서는 주로 이론개발과 수리모형실험을 통한 성능 및 안정성 확보방안 등의 기본적인 연구를 수행하며, 민간 기업체에서는 신 건설재료개발, 시공 기법 등에 대한 연구를 수행하고 있다.

우리 나라의 신형 방파제 개발에 대한 연구는 거의 전무하다고 해도 과언이 아니다. 기존의 방파제 대부분은 단순히 항만의 수역시설과 계류시설을 외해의 심한 파랑으로부터 방어하기 위한 목적으로 건설되었다. 1970년 동해안의 북평항에 유공식 방파제를 설치한 적이 있으나 곧 파괴되어 통상의 케이슨 구조로 개조되었다<sup>(17)</sup>. 그 후 부산 인공섬 외곽방파제의 한 대상안으로 방파제 상부를 친수공간으로 활용하고 케이슨 구조 전면을 유공벽으로 처리한 방파제가 고려된 적이 있었으나<sup>(18)</sup>, 현재 인공섬 건설계획 자체가 보류상태에 있어 유공방파제의 시공가능성은 아주 작은 편이라 할 수 있다. 최근에 수행되고 있는 보다 새로운 연구로는 한국해양연구소에서 시도되고 있는 환경보존형 방파제의 개발을 들 수 있다<sup>(19)</sup>. 이는 케이슨에 원호형 수로를 설치하고, 또 이와 항내를 연결하는 도수로를 설치함으로써 통상 파랑조건에서 원호 수로내의 공진을 유도하여 도수로를 통하여 항내로 외해의 신선한 해수가 지속적으로 공급되도록 고안되어 있다. 이외에 해양목장 등에 활용이 기대되는 부유식 소파제에 대한 연구가 수리실험과 수치실험을 통하여 수행되고 있다<sup>(19, 20)</sup>.

우리 나라의 동·남·서해의 연안역은 각각 독특한 특징을 지니고 있다. 동해안은 조차는 작으나 수심이 깊고 파랑이 높은 반면, 서해안은 수심이 낮고 파랑은 그다지 높지 않으나 조차가 아주 크고 연약지반으로 구성되어 있으며, 남해안은 그 중간적인 특성을 지니고 있다. 이러한 특성을 감안해 볼 때 우리나라의 신형식 방파제 개발방향은 크게 1)대수심 고파랑 조건에 적합한 구조, 2)조차가 크고 연약지반에 적합한 구조, 3)항내 수질개선 성능을 가진 구조의 개발로 나누어 볼 수 있다. 이중 가장 시급한 것은 세 번째에 언급한 수질개선에 관련된 사항이다. 해양결찰청의 조사에 의하면 우리나라 동해안 및 남해안(특히 동해안)에 있는 대부분의 항만 및 어항의 수질은 공업용수로 사용하기에도 부적합한 3급수 이하로 오염정도가 심한 것으로 보고되고 있다<sup>(21)</sup>. 이러한 항내 오염문제는 비단 우리나라 만의 문제는 아니고 전 세계적인 공통의 문제로 시급히 해결되어야 한다. 따라서, 현재로서는 항내 수질개선 기능을 갖춘 다목적 방파제의 개발에 대한 필요성이 가장 높다고 할 수 있다. 또, 이들 각 구조형식은 경제성과 안정성이 확보되어야 함은 물론이고, 친수성과 주변환경과의 조화를 고려하여 개발되어야 한다. 제안된 구조형식은 이론적인 연구와 성능 및 특성 파악을 위한 수리모형실험 연구가 병행되어야 하며, 많은 장비와 막대한 연구비가 소요되는 실해역 실험도 수행되어야 한다. 따라서, 정부의 확고한 의지하에 관련 민간 기업체의 적극적인 지원이 요구된다.

### 4.3 海岸構造物에 作用하는 荷重<sup>(22)</sup>

해양구조물에 작용하는 하중으로는 풍압력, 파력, 유수력, 지지력, 정수압, 선박의 접안력, 계류력, 해빙의 충돌력 등을 고려할 수 있다. 이러한 하중중 가장 중요한 것은 풍압력과 파력이나, 구조양식이나 기능, 설치장소 등의 조건에 따라서는 기타의 하중이 더 중요한 경우도 있다.

#### 4.3.1 바람에 의한 荷重

일반적으로 흐름에 장애물이 존재하면, 흐름은 그 물체에 의하여 배후에 소용돌이가 생기며, 흐름의 속도가 작아지게 된다. 그 결과 베르누이 정리에 의하여 물체는 동압에 해당하는 만큼의 풍압력을 받게 된다. 일반적으로 풍압력의 합력을 흐름방향성분과, 그것에 직각인 방향의 성분으로 나누어 표시한다. 전자는 항력, 후자는 양력이라 일컫는다.

풍속은 지표면 또는 수면위 10m의 높이에 있어서 10분간의 평균풍속을 나타낸다. 지표면 부근의 풍속의 연직분포는, 지형, 표면조도 및 대기의 안정성 등의 영향을 받는다.

#### 4.3.2 흐름에 의한 荷重

해안구조물을 설계할 때에 고려하는 흐름으로는 해류, 조류 및 바람에 의한 취송류가 있다. 해류는 계절적으로 약간의 변동이 있지만, 장기간에 걸쳐서는 거의 일정한 방향과 속도를 갖는다. 해류의 속도는 거의 2m/sec로 알려져 있다. 조류는 조석에 따른 물입자의 수평왕복운동에 기인하는 것으로 반일주조가 우세한 해역에서는 약 6시간마다 유향이 반전된다. 외해에 있어서 조류의 유속은 작지만, 해협이나 수로면에서는 5.2m/sec에 달하는 경우도 있다. 바람에 의한 취송류의 유속은 풍속, 취송시간, 수심 등에 관계한다. 취송류의 유속의 산정식은 수리공식집 등에 나타나고 있지만, 풍속이 13.8m/sec~17.1m/sec의 바람이 24시간 계속해서 부는 경우에도 0.55m/sec 정도이다. 흐름에 의한 하중은 외해에서는 지배적인 하중으로 되는 일은 없다. 그러나, 해협이나 수로 등에 건설되는 구조물에 있어서는 중요하고, 특히 시공시에 있어서는 충분히 배려를 하여야 한다. 또한 흐름에 동반되어 생기는 표사나 세굴이 구조물의 양식이나 설치장소의 조건에 의해서도 문제가 되는 경우도 발생할 수 있다.

흐름에 의해 구조물에 작용하는 하중은 바람의 경우와 똑같이 유향방향의 항력과 이것에 직각인 방향의 양력으로 나눌 수 있으며 관계식은 다음과 같다.

$$dF_D = \frac{\rho_w}{2} C_D V^2 dA_n \quad (4.1)$$

$$dF_L = \frac{\rho_w}{2} C_L V^2 dA_n \quad (4.2)$$

여기서,  $dF_D$ ,  $dF_L$ : 구조물 또는 부재에 작용하는 단위길이당의 항력 및 양력,  $\rho_w$ : 해수의 밀도(약 1.03 t/m<sup>3</sup>),  $C_D$ : 항력계수,  $C_L$ : 양력계수,  $V$ : 유속,  $dA_n$ : 구조물 또는 부재의

유향방향으로의 단위길이당의 투영면적이다.

해양의 흐름은 엄밀하게는 정상류는 아니지만, 유향 및 유속의 시간적 변동이 매우 완만하기 때문에 정상류로서 취급해도 된다. 그러나 가늘고 긴 부재에서는 소용돌이의 발생주기와 부재 자신의 고유주기와의 관계로 큰 진동을 일으키는 경우가 있기 때문에 주의를 요한다. 항력계수 및 양력계수는 각 구조물의 형상에 따라 여러 종류의 값들이 제안되어 있다.

#### 4.3.3 파에 의한 荷重

파의 크기는 파장파와 파고에 의하여 나타낸다. 파장은 파봉에서 연이은 파봉까지의 수평거리이며, 파고는 파봉과 파곡파의 연직거리를 의미한다. 또 파봉이 와서 다음 파봉이 올 때까지의 시간간격을 파의 주기라 하며, 파형이 진행하는 속도를 파속이라 한다. 파고와 파장의 비를 파형경사라 한다.

실제의 파는 파고 및 주기가 다른 파가 연속하는 불규칙한 파이다. 그러나, 불규칙파의 파고 및 주기가 다른 규칙파의 합성파로 생각할 수 있다. 또 불규칙파의 대표파로서, 일정한 파고와 주기를 가지는 파고 간주할 수가 있다. 이와 같이 불규칙한 파를 규칙파로서 취급하면 문제를 간단히 할 수 있고, 또 파의 성질을 이해하는 데 대단히 편리하다. 이외에도 파는 수심, 이론적인 해석방법 등에 따라 여러 종류로 분류할 수 있다.

주상 구조물에 작용하는 파력은, 항력과 관성력의 합으로서 다음과 같은 Morison식으로 계산할 수 있다.

$$dF = \frac{\omega_o}{2g} C_D u |u| dA_n + \frac{\omega_o}{g} C_M \frac{du}{dt} dV \quad (4.3)$$

여기서,  $dF$ : 부재의 단위길이당 파력,  $\omega_o$ : 해수의 단위중량(약  $1.03 \text{ tf}/\text{m}^3$ ),  $g$ : 중력가속도( $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ ),  $C_D$ ,  $C_M$ : 항력계수 및 관성력계수,  $u$ ,  $du/dt$ : 물입자의 운동속도 및 가속도,  $dA_n$ : 부재의 유향방향으로의 단위길이당의 투영면적,  $dV$ : 부재의 단위길이당의 체적이다. 이 식은 Morison이 직원주에 작용하는 파력을 미소진폭파이론을 이용하여 구한 것이지만, 현재는 일반의 단면형상을 가진 주상구조물에 대해서도 이용할 수 있다. 식(4.3)의 처음 항은 항력으로 불린다. 항력은 흐름에 의한 하중의 경우와 같이 부재표면의 마찰저항이나 부재 배후에 생기는 후류에 의한 압력차에 기인하는 힘으로 물입자 속도의 제곱에 비례한다. 두 번째 항은 관성력으로 불려지고, 흐름의 속도가 변화할 때에 부재주위의 물입자가 국소적으로 가속 혹은 감속되는 것에 의해 생기는 힘이다.  $C_D$  및  $C_M$ 은 그 비례상수이다.

대형 구조물에 작용하는 파력은 관성력이 탁월하다. 이 경우에는 MacCamy와 Fuchs가 제안한 회절이론을 이용하여 파력을 구하고 있다.

방파제와 같은 직립벽에 작용하는 파력은 작용하는 파의 형태에 의하여 중복파력, 쇄파력, 쇄파후의 파에 의한 파력 등으로 분류되지만, 그 변화는 연속적인 것으로 고려할 수 있다.

#### 4.3.4 지진시의 荷重

일반적으로 지진동은 바람이나 파에 의하여 변동의 주기가 짧고, 또 그 진폭이 작다. 보통

우리가 경험하는 지진동의 탁월주기는 거의 0.3~1.0초이다. 또 진폭은 직하형 지진이 아닌 한 20~30cm정도이다. 구조물의 고유진동 주기가 지진동의 탁월주기에 비교적 가까운 경우에는 구조물은 공진형상을 일으키는 일이 있기 때문에 기본적으로는 동적인 검토를 하여 지진시의 하중을 구하여야 한다.

#### 4.3.5 기타의 荷重

이외에도 구조물에 작용하는 정수압 및 부력, 부유예항시의 하중, 선박하중, 빙압력, 자중 및 상재 하중 등을 해안 구조물 설계시에 고려하여야 한다.

### 4.4 방파 구조물의 설계

파랑의 침입으로부터 해안 시설물이나 항만을 보호하기 위하여 설치되는 방파제는 過小設計에 의한 파괴와 過大設計에 의한 자원 낭비의 우려가 항상 존재하고 있다. 방파제의 설계는 일반 구조물의 설계와는 달리 外力의 산출에 많은 불확실성이 내포되고 있기 때문에 설계절차가 고정되어 있는 것이 아니며 설계에 필요한 이론이 실험결과 및 경험식 등과 함께 계속적으로 변하고 있다. 방파제 파괴의 가장 큰 원인은 暴風波의 작용때문이므로 이의 限界波高나 週期 등을 파악하는 것이 중요하지만 기존의 관측자료가 없거나 방파제의 설치해역의 수심이 깊고 吹送距離가 긴 경우, 最大值 추정에 상당한 어려움이 있다. 이러한 불확실성을 줄이기 위하여 현재까지도 새로운 이론이 개발되어 설계에 반영되고 있으나 완전하게 검증된 것은 없는 실정이다. 따라서, 자세한 설계방법은 생략하고 여기서는 일반적으로 적용이 가능한 방파제의 設計節次를 다음과 같은 4가지로 제안한다(오영민, 1994<sup>(23)</sup>; Clifford, 1984<sup>(24)</sup>).

- (1) 제한된 자료에서 필요한 정보를 파악하고 개념을 정립하는豫備設計段階
- (2) 자료수집과 기초적인 설계 및 공사에 따른 손익계산을 하는適正性調查段階
- (3) 상세한 자료를 수집하고 설계단면에 대하여 水理模型實驗을 통한 설계의 적합성을 파악하여 설계도를 작성하는 詳細設計段階
- (4) 시공후 방파제의 유지 관리와 모니터링 방안을 제시하는 施工과 管理段階

#### a)豫備設計段階

방파제 설계에 가장 기초적인 단계로 방파제 설치 해역의 파랑, 조석, 바람자료 등을 수집한다. 파랑자료는 가급적 많이 수집하여야 설계파고 산정시 불확실성을 경감시킬 수 있으며 潮汐는 수심의 변화를 발생시켜 같은 파랑에 대해서도 파고가 달라지므로 방파제의 安定解析에 무척 중요하다. 또한, 바람자료는 수치모델에 의한 설계파 계산에 필요하며 흐름자료는 선박의 항해를 위한 방파제의 배치와 파랑과의 相互作用에 의한 파고 및 주기의 增減에 영향을 미치므로 중요하다. 이러한 자료들을 사전에 수집하여 설계의 개념을 수립하는 단계가 여기에 해당한다.

### b)適正性 調査 段階

이 단계에서는 방파제의 건설에 따른 경제적·기술적 타당성 검토와 설계파랑 조건이나 건설방법에 대한 분석이 완료되어야 하며 이를 위해서는 최근의 연구동향을 파악해서 반영해야 한다. 예를 들면 設計波浪의 산정에 있어서 과거에는 파고만을 고려한 決定論的 方法을 사용하였으나 현재는 방파제의 안정에 영향을 미치는 週期, 波向, 波群 등을 고려한 確率論的 方法(Mol 等, 1984)<sup>(25)</sup>이 일반적이다. 또한, 사석 방파제의 被覆層(Armour layer)의 안정해석을 위하여 널리 사용되는 Hudson 공식도 規則波를 대상으로 하여 수립된 식인데 不規則波를 사용한 실험에 의하면 상당한 차이가 있는 것으로 알려졌다(Meer, 1985<sup>(26)</sup>; Meer 와 Pilarczyk, 1987<sup>(27)</sup>).

이러한 연구동향의 분석이 끝나면 방파제의 형태를 검토해야 하는데 앞에서 언급한 여러 종류 중에서 현지 여건과 설치 목적에 가장 적합한 것을 선택해야 한다. 여기서는 이종 현재 가장 널리 쓰이고 있는 捨石 防波堤와 混成 防波堤에 대해서 적정성 여부를 조사하고자 한다.

사석 방파제는 공사 도중에 보통의 파랑조건에서도 파괴 가능성이 높다는 단점이 있으나 주위에서 쉽게 사석의 확보가 가능하면 가장 경제적인 구조물이다. 이 방파제에서 가장 중요한 부분은 波力を 減衰시켜 주는 표면의 被覆層이므로 여기에 사용할 큰 암석을 확보하는 것이 중요하다. 그러나 이를 주위에서 구하기가 어려우면 콘크리트 異形블럭의 사용을 검토해야 하는데 수많은 이형블럭 중에서 어떤 것이 어느 경우에 좋다는 일반적인 지침은 없으므로 설계자가 여건에 따라서 결정해야 한다. 다음으로 被覆層의 바로 아래에 있는 底層(Underlayer)과 방파제의 중심이 되는 核(Core)은 被覆層에 비해 중요도는 덜 하지만 기초가 되는 부분이므로 파랑에 의해 파괴되지 않도록 재료의 크기나 透水率을 적절히 결정해야 한다. 차량의 진입과 越波를 방지하기 위하여 頂上에 설치되는 Cap 콘크리트에 작용하는 파압은 직립제와 마찬가지로 적용하는데 전면에 被覆層이 있어도 파랑의 작용에 의하여 뒤로 밀려서 노출될 가능성이 크므로 없는 것으로 계산하는 것이 안전측이다.

흔성 방파제는 地盤의 沈下에 의한 피해가 심각하므로 먼저 방파제를 설치할 지반의 상태를 조사해야 하며 케이슨을 제작할 수 있는 장소가 가까운 곳에 있는지를 파악해야 한다. 왜냐하면 대부분의 경우 케이슨은 배로 끌어서 현장에 설치하는데 제조장소가 현장과 너무 멀면 운반 도중에 海象狀態가 나빠질 경우 流失될 가능성이 크기 때문이다. 한편, 이 방파제는 사석 방파제에 비하여 파암에 취약하므로 정확한 파암해석이 필요한데 단순한 형상의 케이슨에 작용하는 파암은 현재 어느 정도 파악이 가능하나 형상이 특이하거나 해역의 조건이 특수한 경우에는 아직도 불확실한 부분이 있다. 일반적으로 최대 파력은 高潮位時 重複波壓이나 低潮位時 碎波壓에서 발생하는 것으로 알려졌기 때문에 어느 쪽이 심각한지를 검토해서 적용하여야 한다.

방파제의 선정이 끝나면 방파제의 설치로 인하여 발생할 수 있는 주변의 환경변화를 고려해야 한다. 방파제의 설치로 바닥에서 발생할 수 있는 浸蝕이나 堆積 현상은 방파제의 안정에 영향을 미치며, 주위의 흐름을 방해하여 전혀 예상치 못한 漂沙에 의한 항만의 埋沒이

나 海濱의 浸蝕과 같은 심각한 문제가 발생하므로 이를 방지할 수 있도록 방파제의 위치와 배열 및 길이 등을 결정해야 한다.

c) 詳細設計 段階

방파제의 形式이나 건설방법이 결정되면 지반에 대한 자세한 정보와 海象・氣候資料의 추가적인 수집을 통하여 설계변수의 조정이 필요하며, 수치모델을 이용하여 주어진 의해 파랑조건으로부터 淺水, 屈折, 흐름과의 相互作用, 바닥마찰 및 碎波에 의한 에너지 손실을 고려한 방파제 전면에서의 설계파를 산정하고 방파제에 의한 환경영향을 평가한 후 최종적인 방파제의 모양을 결정한다. 모양이 결정되면 水理模型實驗을 통하여 안정성을 확인하는 것이 필요하다. 수리모형실험에는 2차원 斷面實驗과 3차원 平面實驗이 있는데, 前者는 파고를 증가시키면서 방파제 단면의 안정성을 검토하는 실험이고 後者는 건설중의 안정성 검토나 항내의 파고분포 및 파랑의 斜角 入射에 의한 영향 등을 평가하는 실험이다.

水理模型實驗에 의하여 피해가 확인되면 설계를 변경해야 하는데 被覆石의 경우 어느 정도 움직인 것을 심각한 피해로 해석할 것인지에 대한 기준이 명확하지 않고, 케이슨의 경우 滑動量에 따라 무게를 결정해야 하는데 어느 무게에서 미끌리기 시작했는지를 판단하는 것이 어려운 문제이다. 따라서, 이러한 경우는 주관적인 판단이 많이 좌우하는데 被覆石의 피해를 해석하기 위하여 Kristinsson과 Eliasson(1978)<sup>(28)</sup>, Paape와 Lighteringen(1980)<sup>(29)</sup>은 제자리를 벗어난 被覆石의 비율을 이용하여 5% 이상이면 심각한 상태이며 핵이 노출되면 파괴된 것으로 간주하는 등 독자적인 기준을 제시하였으나 채택 여부는 설계자의 판단에 의한다. 또한, 滑動基準은 같은 파랑조건 하에서 케이슨의 무게를 줄여가면서 실험을 할 때 급격히 움직이기 시작하는 무게(滑動限界 重量)를 선정하는 것인데 실험마다 약간의 偏差가 있으므로 많은 실험을 통하여 최적치를 선정해야 한다(高橋, 1989<sup>(30)</sup>; Takahashi 等, 1990<sup>(31)</sup>; 釜山直轄市, 1992<sup>(18)</sup>).

d) 施工과 管理 段階

공사가 시작되면 설계자는 작업이 설계사양에 맞게 진행되고 있는지 점검하고 건설중 발생할 수 있는 방파제의 沈下나 移動 등 방파제의 거동을 항시 모니터링하여 문제가 발생하면 즉시 원래의 설계대로 작업이 이루어질 수 있도록 조치를 취하여야 한다.

## 4.5 맷는 말

지금까지 海岸構造物의 종류, 신형식 방파제의 개발동향, 해안구조물 설계시 고려해야 할 하중조건, 그리고 海岸構造物中 가장 중요한 防波構造物의 設計에 대하여 약술하였다.

항만, 호안 및 방파제 등의 해안구조물 건설사업은 막대한 초기 재정적 투자와 유지 관리비가 소요된다. 따라서 공학적인 면에서 주변지역의 해상여건을 고려한 구조물의 적정규모와 배치를 결정할 수 있는 설계조건을 제시함으로써 경제적인 해안개발사업이 가능하게 된다. 이러한 측면에서 해안구조물 설계시 중요시되는 설계환경요소인 파랑, 흐름, 퇴적물 이동 등에 대한 최근 이론을 적용하고, 관측 및 실험자료를 이용하여 기존현상을 재현함은

물론, 연안역 개발후의 환경에 미치는 악영향을 최소화할 수 있도록 최적의 구조물을 설계, 시공, 관리하는 것이 필요하다.

그러나, 일본의 기술수준은 상당히 진보되어 있으나(日本港灣協會, 1989)<sup>(32)</sup>, 국내의 기술 수준은 미약하여 일본의 기술정보를 많이 이용하고 있으며, 국내에서 발간된 관련 서적은 항만해양구조물의 설계(박상길, 1996)<sup>(33)</sup>나, 항만시설물 설계 기준서(海運港灣廳, 1993)<sup>(34)</sup> 등이 있다.

## 4.6 참고문헌

1. 高橋重雄, “新型式防波堤の開発,” 第5回技術講習會テキスト, (社)寒地港湾技術研究センター-, pp. 11-34, 1992.
2. 沿岸開発技術研究センター-, 新型式防波堤マニュアル, 1994.
3. 谷本勝利, 原中祐人, 富田英治, 和泉田芳和, 鈴村謙司, “曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究,” 港研報告, Vol. 19, No. 4, 1980.
4. 谷本勝利, 吉本靖俊, “斜の入射波に対する曲面スリットケーソンの反射および部材波力特性に関する実験的研究,” 港研資料, No. 493, 1984.
5. 谷本勝利, 片岡眞二, 原中祐人, 鈴木慎也, 下迫健一郎, 宮岐啓司, “大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その4):二重圓筒ケーソン(海底設置型)の水理特性と施設計,” 港研資料, No. 600, 1987.
6. 笹博, 新留雄二, 角 浩美, 藤本孝浩, “半圓形防波堤實證實驗について,” 土木學會西部地部研究發表會, 土木學會, 1994.
7. 高降二, 木村弘, “Crenelated breakwaterの傳達波,” 第19回 海岸工學講演會論文集, pp. 205-210, 1972.
8. Hales, L., “Floating breakwaters: State-of-the-art literature review,” Technical report No. 81-1, CERC, 1981.
9. 國制海洋科學技術協會, “浮防波堤: 現状と課題,” 1987.
10. Uda, T. and Murai, Y., “Development of a self - sustained permeable offshore breakwater,” Techno-Ocean '88, Vol. I, pp. 146-153, 1988.
11. 谷本勝利, 原中祐人, 富田英治, 村永努, 鈴村謙司, “マルチセルラーケーソンの水理特性に関する実験的研究,” 港研報告, Vol. 20, No. 2, 1981.
12. 大堀晃一, 小谷拓, 久米秀俊, “釜石港口防波堤の設計に関する技術検討,” 第10回 土木學會 海洋開發シンポジウム論文集, 土木學會, 1985.
13. 森好生, 戀塚博, 笹山博, 野上富治, “釜石港口防波堤 大型台形ケーソンの設計,” 第14回 土木學會海洋開發シンポジウム論文集, 土木學會, 1989.
14. 韓國電力公社, “海洋エネルギー 利用 複合システム 開發에 關한 研究,” KRC-89-G-T10, 1989.
15. 合田良實, 中田博昭, 村田利治, 大根田秀明, 麗籠雅純, 高橋中雄, “西田港における防波堤利用の 波力發電現地實證實驗,” 第3回波浪エネルギー利用シンポジウム ,1991.
16. 高橋中雄, 安達崇, 中田博昭, 大根田秀明, 加藤久雄, 麗籠雅純, “波力發電ケーソン防波堤の現地實證實驗における觀測データの解析結果,” 港研報告 Vol. 31, No. 2, 1992.
17. Lee, D-S. and Hong, K-P., “Korean experience on composite breakwaters,” Proc. of Int. Workshop on Wave Barriers in Deepwaters, pp. 172-183, 1994.
18. 釜山直轄市, “海上新都市 外廊防波堤 基本設計用役報告書: 水理模型實驗-II(断面安定性實驗),” 報告書 第“7卷中 5卷, 1992.

19. 韓國海洋研究所, “港灣水質改善을 위한 防波施設의 開發研究(III),” BSPN00232-767-2, 科學技術處, 1994.
20. 韓國海洋研究所, “海洋構造物의 波力吸收를 위한 新素材 開發研究(III),” BSPG00125-387-2, 科學技術處, 1991.
21. 海洋警察廳, 試驗研究報(第1卷-第6卷), 1985-1990.
22. 歐美書館, 海洋構造物의 設計와 施工, 김남형 · 김정태 공역, 1995.
23. 오영민, 混成 防波堤에 作用하는 重複波壓, 서울대학교 토목공학과 수공학연구실, 1994.
24. Clifford, J. E., "The design process", Breakwaters-Design and Construction, edited by Lacey, P., Price, W. P., Tickell R. G., and Stickland, I. W., Thomas Telford Ltd., London, 1984, pp. 53-64, 1984.
25. Mol, A., Lighteringen, H., and Paape, A., "Risk analysis in breakwater design", Breakwaters-Design and Construction, edited by Lacey, P., Price, W. P., Tickell R. G., and Stickland, I. W., Thomas Telford Ltd., London, pp. 133-138, 1994.
26. Meer, J. W., "Stability of rubble mound revetments and breakwaters under random wave attack", Developments in Breakwaters, edited by Lacey, P., and Ackers, P., Thomas Telford Ltd., London, pp. 141-154, 1985.
27. Meer, J. W., and Pilarczyk, K. W., Stability of breakwater armour layers : Deterministic and probabilistic design, Delft Hydr. Lab., Pub. No.378, 1987.
28. Kristinsson, B. and Eliasson, J., "Stability measurements on rubble mound breakwater", Coastal Eng., Vol.2, No.1, pp. 85-91, 1978.
29. Paape, A., and Lighteringen, H., Model investigation as a part of the design of rubble mound breakwaters, Delft Hydr. Lab., Pub. No. 246, 1980.
30. 高橋重雄, “混成防波堤の水工的諸問題”, 港灣技術研究所講演會, pp. 63-100, 1989.
31. Takahashi, S., Tanimoto, K., and Shimosako, K., Wave and block forces on a caisson covered with wave dissipating blocks, Rep. of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.1, 1990, pp. 53-75(in Japanese).
32. 日本港灣協會, 港灣の施設の技術上の基準・同解説, 1989.
33. 平文閣, 港灣海洋構造物의 設計, 박상길 편저, 1996.
34. 항만설계기준, 해운항만청, 1993.