

항만설계와 해안수리 해석의 최신경향 (下)

유 동 훈 / 아주대학교 교수

4. 淺海域에서 波濤의 變異

바람 또는 지각변동 등에 의하여 생성된 파도가 그 파장의 절반정도되는 천해역에 들어오면서 전파양상에 변화를 보이기 시작한다 (참조 그림 1). 우선 에너지손실이 작은 지역에서 수심의 감소에 따른 군속도(group velocity)의 감소로 파고가 높아지는 천수현상(shoaling)이 나타나며, 동시에 파도는 깊은 수심에서 더 빨리 전파되는 특성에 따라 굴절되어 (refraction) 파봉선(wave crest line)이 점

차적으로 등고선과 나란히 형성되는 경향을 갖게 된다. 파도의 굴절은 조류, 밀도류 등의 주변해류(ambient currents)와의 간섭으로도 나타나며, 이때 주변해류의 평면변화율이 크면 파도의 잉여응력(excess momentum fluxes or radiation stresses)과의 교호작용으로 파고가 급격히 높아진다. 이러한 현상은 특히 조류의 변화가 극심한 만입구에서 발견되는데 영국의 Southampton Water, 국내의 가로림만 등 여러 곳에서 관측되고 연구된 바 있다. 굴절된 파가 서로 중첩하면 파

에너지가 급격히 증가하는데 이와 동시에 증가된 에너지는 주위의 저에너지 지역으로 확산한다. 이러한 중첩파군을 Wave Caustics라 하며 주위로의 에너지 확산현상을 구조물 배후지역으로의 외부 회절현상(external diffraction)과 구분지어 내부 회절현상(internal diffraction)으로 분류한다.

방파제 전면에 도달된 파는 그 에너지의 일부 또는 거의 전부가 반사되며 남은 파에너지는 방파제 사면을 따라 올라가(wave run-up) 일부는 월파될 수 있다. 방파제 또는

해안선 가까이에서 파도가 쇄파 소멸될 때 동시에 잉여에너지의 공간차가 발생하여 연안류를 생성하는데 (식 (2)의 마지막항 참조), 이는 퇴적물의 이동에 심대한 영향을 미칠 뿐만아니라 연안류 자체가 장주기 파를 형성하여 부진동현상을 가져올 수 있다. 이와 같이 부진동현상을 일으키는 장주기파는 불규칙파인 경우 각 성분파의 비선형 간섭효과 (wave-wave interaction)에

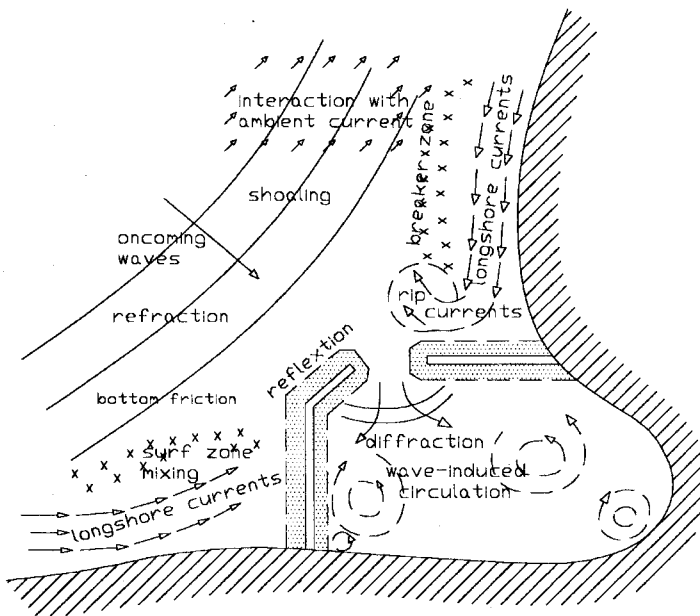
의하여 나타날 수도 있다. 그러나 그 생성 원인이 불분명한 장주기파가 직접 외해로부터 침입해오는 경우도 많이 있어 주의를 요한다.

천해역에서 파에너지의 손실은 여러 요인에 기인하는데 그중 해저면과의 마찰손실 (frictional dissipation)은 대부분의 해안지역에서 큰 비중을 차지한다. 이밖에 층이 두꺼운 사질토에서는 수립자의 침투에 의한 삼투현상

(percolation), 연흔이 발달된 해저면상에서는 수립자의 불규칙한 각란현상(bottom scattering), 쉘트질 해저면상에서는 토사의 이동현상(bottom motion) 등에 따른 손실메카니즘이 뚜렷하게 나타난다. 해저면과의 마찰손실은 토사이동에 미치는 직접적인 영향뿐만아니라 쇄파에 의한 연안류 생성메카니즘에서 평형력(balancing force)으로서의 중요성도 크므로 정량적으로 정확히 분석할 필요가 있다. 이때 파와 해류의 합성류에 의한 마찰력 산정이 요구되며 동시에 파운동에 의하여 쉽게 생성되는 사린(ripple)의 형상과 크기를 고려하여야 한다.

방파제를 설치하였을 때 조석에 의한 환경수리의 변화는 장기적이고 점증적인데 반하여 파도에 의한 변화는 대개 단기에 충격적인 양상으로 일어난다. 또한 방파제의 구조적인 안정에 직접적으로 영향을 미치는 결정적인 요소는 파력이므로 방파제 설치지점에서의 파조건 산정은 가장 중요한 설계과정 중의 하나가 될 것이다. 파도의 조건을 산정하는 모형은 두가지로 대별하여 하나는 심해파의 조건을 산정하는 풍파예측모형(wind-

〈그림 4〉 항만주위에서 천해파의 변이



wave forecasting models)이며 다른 하나는 천해파의 변이를 추정하는 천해파 변이에측모형(nearshore wave transformation models)이다 (참조 그림 1). 전자는 전절에서 설명한 바와 같이 2차원 평면 수조 상에 바람조건을 재현하기 어렵기 때문에 수조모형실험으로는 거의 불가능하며, 후자는 수조와 수치 두 방법 모두 가능하나 서로 상반되는 장단점이 있다.

풍파예측 수치모형은 이차원평면상에 바람자료가 주어지면 같은 평면상의 일정 격자에 풍파의 파고, 주기 등을 산정하는데 유의파(significant waves)의 파고와 주기를 직접 구하는 단순한 것과 불규칙파를 스펙트럼형태로 제시하여주는 보다 복잡한 것 등 다양하다. 단순한 것도 세분하여 바람이 어느 일정 기간동안 같은 방향 같은 속도로 계속 불어오고 있다는 단순 가정하에 계산하는 방법과 Miles와 Phillips의 파생성원리와 파에너지보존식을 유한차분화하여 계산하는 보다 세련된 방법이 있다.

최근에 파의 생성메카니즘에 대한 이해가 넓어졌고 많은 관측 자료에 근거하여 스펙트럼형태식 즉 JONSWAP

또는 Pierson-Moskowitz Spectrum 등의 형태식 개발이 있었으며, 이의 이용으로 보다 정교한 풍파예측모형 개발이 이루어졌다. 국내 해안에서의 파스펙트럼도 이와 유사한 형태를 갖는 것으로 판명되었는데 발달이 진행중인 파는 JONSWAP 스펙트럼형태를 가지며, 충분히 발달된 파는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼형태를 갖는 것으로 알려져 있다. 북해(North Sea) 연안의 스펙트럼파를 조사 연구한 연구진은 스펙트럼형태를 다섯가지의 계수로 표현하였으며, 이 다섯가지의 계수에 관한 이론식을 유한차분법으로 풀어 풍파스펙트럼을 구하였다.

풍파예측모형에서 너울(swell) 성분은 특성곡선(characteristic lines) 형태의 파선(wave rays)을 구하여 포함할 수도 있으며, 최근에는 천해역에서의 변이조건을 함께 고려하여 풍파를 예측하려는 노력도 기울였다. 우리나라 서해안에서와 같이 조석간만의 차가 크고 수심이 얕은 해역에서의 풍파예측에는 천해역에서의 변이조건을 충분히 고려하여야만 만족할 만한 모형결과를 얻을 수 있으나 아직 이러한 방법은 실

험단계에 있으며 계산용량의 과다로 실제 적용에는 많은 문제점이 있으리라 여겨진다.

대부분의 해안공학자에게 심해파조건 산정을 위한 정교한 수치모형의 도입은 드문 경우이며, 보다 많은 관심사항은 주로 통계학적으로 주어진 심해파가 어떠한 양상으로 천해역으로 전파하며 해안구조물을 만나 어떻게 반사 회절할 것인가 하는 의문점들일 것이다. 수조모형실험은 대부분 실제 현장에서 나타나는 거의 모든 파변이 현상을 포함할 수 있으므로 축소효과에 따른 몇가지 사항만 주의하면 이상의 의문점에 적절한 해를 줄 수 있으리라 본다. 어떠한 지형조건하에서도 굴절, 회절, 천수, 반사 등의 諸 변이 현상을 분리 해석할 필요없이 동시에 포함하여 재현할 수 있으며, 특히 불규칙파 또는 스펙트럼파의 전파에서 각 성분파의 간섭에 의하여 나타날 수 있는 장파의 생성과정, 단순파에 의해서도 나타날 수 있는 연안류의 생성과정 등을 단일 수조에서 규명할 수 있는 장점을 지니고 있다. 그러나 축척의 축소에 따라 여러 에너지손실효과 그중 특히 해저면마찰과 삼투현상은 실제와 많은 차이를 갖게되므로

해의 정량분석에 문제점이 따를 수 있다. 특히 파에 의한 연안류의 강도는 마찰역에 크게 좌우되는데 수조실험에서 중력비(Froude Number의 일치)와 점성력비(Reynolds Number의 일치)를 동시에 만족시키기는 어렵기 때문에 이때 얻어지는 연안류의 크기는 실제의 크기와 상당히 다를 수 있다. 더욱이 대부분의 2-DH 평면수조모형에서 피할 수 없는 축척의 왜곡으로 주요 변이현상인 굴절과 회절도 실제와 차이를 보일 수 있다.

최근 컴퓨터기술의 급진적인 발달과 더불어 이를 이용한 수치모형에 대한 관심은 거의 모든 공학분야에 고조되

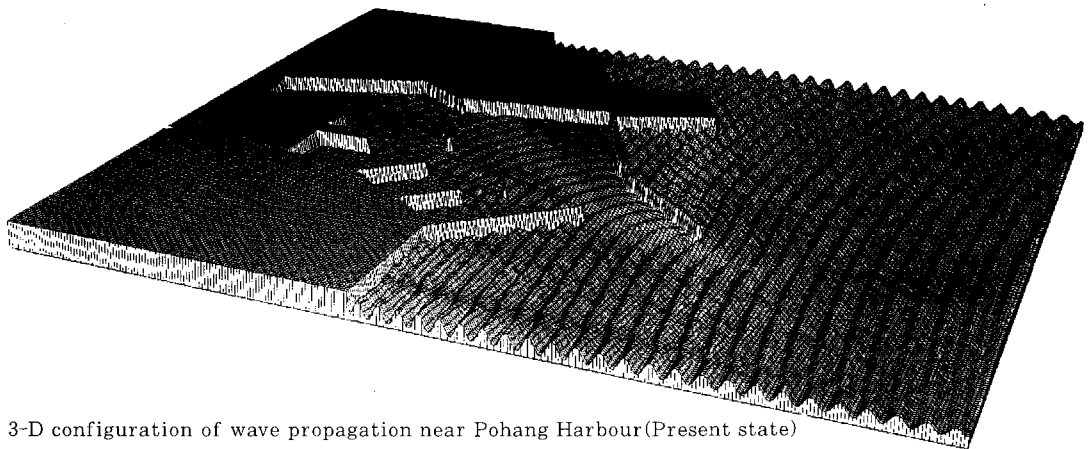
었으며 해안공학 특히 천해파 수리학도 예외는 아니다.

장단점이 다른 여러 종류의 수치모형 개발을 위하여 새로운 수치해법이 도입되었을 뿐만 아니라 이론식의 전개과정을 달리하여 여러 형의 지배방정식들을 창안하였다. 수조모형과 비교하여 수치모형은 축소효과에 따른 현상의 왜곡을 완전히 배제할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 적절한 경험식만 도입하면 어떠한 손실효과도 포함하여 해석할 수 있으며 입력자료의 치환으로 연구대상해역을 손쉽게 바꿀 수 있는 등의 이점이 있다. 그러나 수치모형에도 몇가지 단점이 있는데 그중 하나는

여러 종류의 수치모형이 개발되어 있다는 사실 자체이며 이들 대부분의 모형이 각기 존재가치가 있다는 점이다. 즉 각 모형간에 장단점이 있어 연구대상해역과 연구될 문제점의 경향에 따라 여러 수치모형중 대개 두가지 이상을 선택하여야 한다. 따라서 적합한 수치모형의 선정을 위하여는 여러 모형에 대한 충분한 이해가 전제되어야 한다.

수치모형은 기본식의 단순화과정에 따라 두 종류로 대별할 수 있는데, 수심적분식을 사용하는 1단계모형과 주요 변수로서 주기 평균치 또는 대표치를 사용하는 2단계모형이 그것들이다. 최근 여

〈그림 5〉 1단계 波變異 數值模型에 의한 計算例: 3차원 透視圖



3-D configuration of wave propagation near Pohang Harbour(Present state)

러 종류의 1단계 수치모형이 개발되어 있는데 그중 해류와의 간섭효과까지를 표현할 수 있는 대표적인 모형으로서 쌍곡형 1단계모형이 있으며, 이 중 수류에 따라 움직이는 이동좌표를 이용하여 기존식을 수정한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left(1 + \frac{K_i U_i}{\sigma}\right) \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x_i} (n q_i) = 0 \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \left(1 + \frac{K_i U_i}{\sigma}\right) C^2 \frac{\partial \eta}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

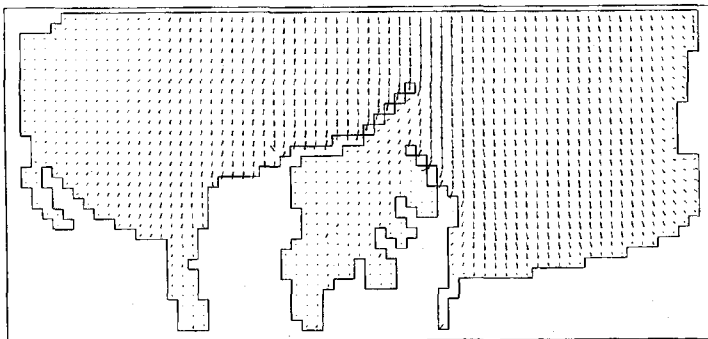
여기서 $\eta = \xi / \sigma$, ξ 는 파해수위 (ξ 의 주기평균은 ζ 가 됨), σ 는 이동좌표상에서 관측된 주파수, q_i 는 단위류량의 각 성분을 σ 로 나눈 값, Cq 는 q 에 관한 손실계수, K_i 는 파수벡터, C 는 파속(wave celerity)이다. 상기 식들로부터 η 와 q_i 를 계산한 후 파고, 파향 등은 이들의 누적치로서 구한다.

지배방정식 (13)과 (14)를 양해법으로 푸는 수치모형의 계산 예가 그림 5에 도시되어 있다. 이는 방파제 주위에 적용된 예로서 파도의 전파양상을 3차원 투시도로 나타내어 해안시설 관계자의 이해에 큰 도움을 줄 것으로 사료된다.

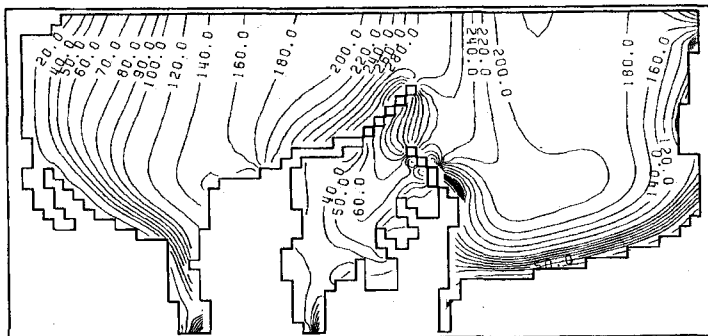
1단계모형의 지배방정식은 식 (13)과 (14)와 같이 간단히 표기되고 있지만 파의 굴절, 회절, 반사 등 거의 모든 파변이 메카니즘을 포함하고 있어 정확한 파고분포를 구하려면 이의 이용이 필수적이

<그림 6> 2단계 波變異 數值模型에 의한 計算例: 波高 및 波向 分布圖

Wave Flux Vector



Hs WAVE HEIGHTS in centimeter



다. 그러나 1단계모형은 반사 효과를 포함한 거의 모든 파변이 특성을 고려할 수 있는 장점이 있으나 계산격자 크기를 1 파장내에 다섯개 내지 열개 이상 취해야하므로 연구 대상해역의 크기에 제한을 받는다. 이에 반하여 2단계모형은 계산격자 크기의 선택에 있어 파장의 길이에 제한을 받지 않으므로 계산효율을 높일 수 있다.

2단계 파수치모형은 모형의 개발과정에 따라 다시 두 종류로 나누어진다. 기본식으로부터 파의 진폭만을 추출하여 지배방정식을 구하는 진화모형(evolution models)이 있으며, 다른 종류는 수심적분된 기본식을 다시 파주기당 평균하여 지배방정식을 얻는 평균모형(period-averaged models)이 있다. 초기의 평균모형은 굴절과 천수 효과만을 고려할 수 있었으나, 최근 회절 영향까지를 고려하는 모형이 개발되어 수치해석 결과에 신뢰를 더하여 준다. 따라서 진화모형과 평균모형은 서로 장단점이 비슷하며, 그중 쌍곡형 2단계 평균모형의 지배방정식을 보면 다음과 같다.

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{1}{2a} \frac{\partial}{\partial x_i} (U_i + nC_i) a^2$$

$$+ \frac{S_{ij}}{\rho g a} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + C_a a^2 = 0 \dots (15)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial K_i}{\partial t} + (U_j + K_j M) \frac{\partial K_i}{\partial x_j} \\ & + K_j \frac{\partial U_j}{\partial x_j} + \frac{\sigma(2n-1)\partial d}{2d} \frac{\partial d}{\partial x_i} \\ & + \frac{M}{2a} \left(\frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial x_i} \frac{\partial^2 a}{\partial x_j^2} - \frac{\partial^3 a}{\partial x_i \partial x_j^2} \right) \\ & = 0 \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

여기서 a는 파의 진폭, K_i 는 파수벡터, $M=nC/K$, C_a 는 a에 관한 손실계수이며 nC 는 파의 군속도가 된다. 식 (16)의 마지막항은 파의 회절 영향을 나타내는 것으로서 연안구조물의 배후지로의 회절 뿐만아니라 파의 중첩으로 집중되는 파에너지를 효과적으로 분산시켜 파고분포를 정확히 묘사해 준다. 지배방정식 (15)와 (16)을 유한차분법으로 풀어 해를 구하는 수치모형의 계산예가 그림 6에 예시되어 있다. 2단계모형은 파의 평균치인 파고와 파수벡터를 변수로 사용하기 때문에 계산격자 선택에 있어 파장 길이의 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 광범위한 지역을 효율적으로 재현할 수 있는 이점이 있다. 그러나 반사 효과를 정확히 재현하는데는

미흡하므로 반사효과가 크다고 예상되는 지역은 1단계모형으로 따로 분리하여 수치해석할 필요가 있다.

5. 沿岸流와 土砂移動

연안류의 분포특성을 정량적으로 분석하기 위하여는 파조건을 정확히 해석할 수 있는 수치모형 - 식 (13)-(14)로 대표되는 1단계 모형 또는 식 (15)-(16)으로 대표되는 2단계 모형 - 과 함께 식 (1) (2)와 동형의 - 특히 식 (2)에서 마지막 세항을 포함한 - 지배방정식을 이용하는데, 마찰계수, 확산계수, 쇄파조건 등을 정확히 산정할 수 있는 모형들이 추가적으로 요구된다. 파도에 의한 연안류 생성 및 분포에 있어 해저면 마찰력은 가장 큰 영향을 미치는 요인 중의 하나이며 특히 토사이동에 미치는 물리요인 중 가장 중요하므로 이의 정확한 산정은 매우 중요하다. 이때 파도와 연안류가 합성된 흐름의 마찰력을 계산하여야 하는 어려움이 따른다. 수류 특히 난류에 의한 마찰력은 보통 이차 방정식으로 계산하는데 파와 해유가 합성되었을 경우 해저면 가까이에서의 흐름현

상이 상당히 복잡한 양상을 띄게 되므로 해석에 많은 어려움이 있다.

그러나 최근 이에 대한 연구도 매우 활발하여 여러 수치모형이 개발되었다. 그중 Mixing length theory를 이용한 Bijker의 방법은 이론적인 근거가 확실할 뿐만 아니라 계산이 용이하여 특히 해안기술자들에게 많은 관심을 불러왔으며 이의 결점을 보완하고 계산효율을 더욱 높이고자 하는 연구가 계속되어 왔다.

연안류 분포계산에 있어 확산계수의 정확한 산정은 마찰력 계산 다음으로 중요한 요인이므로 이에 더한 연구도 다각도로 시도되어 왔으며, 최근 난류에너지보존식($\kappa-\epsilon$ equations)을 이용한 방법은 많은 주목을 받고 있다. 쇄파 에너지를 Source항으로 취하여 난류에너지보존식의 주 변수치를 구한 후 이로부터 확산계수를 산정하는데 이 방법은 사용되는 경험계수들의 값을 조건에 관계없이 일정하게 지정하여 줄 수 있으므로 수치모형의 예측성을 보장할 수 있으리라 본다.

해안구조물의 구조설계에 있어 쇄파의 크기와 형태는 가장 중요한 물리인자중의 하나이며 또한 연안류의 분포산

정에도 이의 정확한 판별이 요구된다. 쇄파의 형태는 쇄파점에서의 해저경사와 파형경사와의 비로 취한 Iribarren Number로 결정할 수 있음을 많은 실험결과로서 밝힌바 있으며, 쇄파고의 산정은 심해역과 천해역 어디에도 적용할 수 있는 Miche의 쇄파조건식을 보통 사용하는데 그 일반식은 다음과 같다.

$$H_b = 0.14 L_b \tanh(sKd) \dots (17)$$

여기서 H_b 는 쇄파고, L_b 은

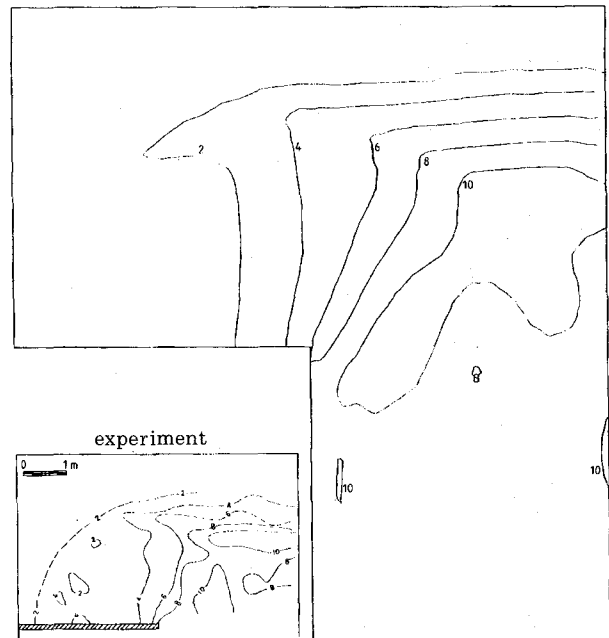
파장, K 는 파수이며 계수 s 는 해저경사 영향을 나타내는 계수로서 Local Iribarren 수와의 관계로 다음과 같이 일변화하였다.

$$s = 0.8 + \tanh(1.06I_b) \dots (18)$$

$$I_b = m / (H_b/L_b)^{1/2} \dots (19)$$

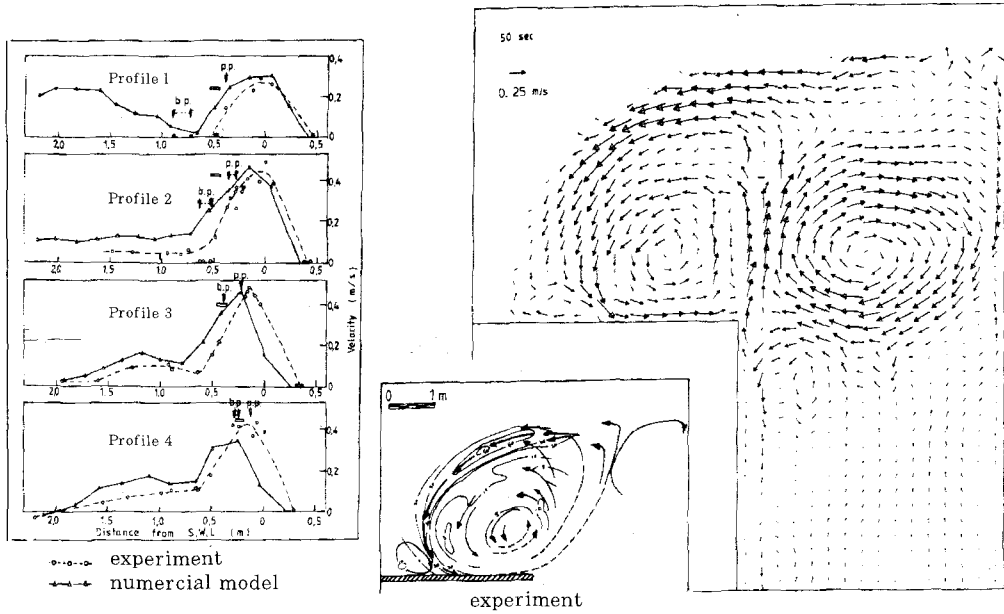
I_b 는 Local Iribarren 수라 불리우며 m 은 해저경사이다. 식 (15)와 (16)으로 계산된 파고는 최종적으로 쇄파조건식 (17)로서 검토하여 쇄파대

〈그림 7〉 (a) 數値模型에 의한 방파제 주위 波高와 沿岸流 計算例



WAVE HEIGHT IN CM

〈그림 7〉 (b)



를 결정하며, 이에 근거하여 연안류를 산정하기 위한 파의 잉여 응력 (radiation stresses) S_{ij} 를 산정한다. 방파제 주변에서의 연안류 흐름 양상을 재현한 계산예가 그림 7에 도시되어 있으며, 방조제 전면에서 크게 나타날 것으로 예상되는 연안류도 유사한 방법으로 구할 수 있다.

연안류 수치모형으로 파도에 의한 평균해수위의 상승 (wave set-up) 높이는 자동적으로 계산되나 파도에 의한 쳐올림 (wave run-up) 높이는 월파 방지의 정도에 따라 부가적으로 산정되어야 한다.

방파제 사면이 완만한 경우 쇄파된 파는 최종 岸線에서 마지막으로 남은 파력을 쏘으면서 사면을 따라 쳐올라가 상당량이 방파제 위로 월파될 수 있으며 이로 인하여 구조적인 문제점을 야기시킬 수 있다. 더우기 방파제 배후사면은 일반적으로 파의 직접적인 내습을 고려치 않고 피복석을 선정하기 때문에 월파력은 구조적인 안정에도 커다란 문제점을 초래할 수 있다. 쳐올림 높이의 산정은 주로 실험에 근거한 경험식에 의하는데 파고, 주기, 사면의 기울기, 피복석의 종류 등의 함수

이다. 일반적으로 피복석이 크고 거칠수록 쳐올림 높이가 작아지나 그 정도가 단순 비례적으로 나타나지는 않기 때문에 각 피복석 종류별로 다른 산정식이 만들어져 사용되고 있다.

방조제는 토사이동로를 가로 막아 토사를 매몰시키는 역할을 함과 동시에 인근 해안선의 침식을 촉진시킬 수도 있다. 매립지의 효율적인 이용뿐만아니라 경제성을 유지하기 위하여 매몰량에 대한 예측은 사전에 정확히 이루어져야 하며 환경보호 측면에서 인근 해안선 침식구역을 예측

하고 이에 대한 대책이 강구되어야 할 것이다. 또한 영국에서 조사한 바에 의하면 방파제 및 해안에 설치된 안벽 파괴의 40% 가까이는 방파제 전면 기초부에서의 토사세굴에 기인하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 토사의 이동 문제는 방파제 또는 방조제의 기능적인 면뿐아니라 구조적인 안정문제에도 직접적으로 연관된다.

토사의 세굴, 이동, 퇴적 등의 제 과정은 수리학의 여러 문제중 가장 복잡하며 특히 일방향 흐름과 파도와와의 합성에 의한 토사이동은 매우 복잡하여 아직 정량적인 분석에 많은 어려움이 따르고 있다. 그러나 최근에 이 문제 연구에도 대형 수조의 이용으로 토사를 포함한 거의 모든 수리 조건을 실제와 가깝게 재현하여 상당히 많은 발전을 이룩하고 있다. 축적의 축소에 따라 수조에서의 토사를 너무 작게 만들면 쉘트질의 토사로 변하여 세굴 및 침전 특성이 전혀 달라진다. 따라서 토사이동량 산출을 위한 경험식의 산출을 위하여 대형 수조의 이용은 절대적으로 필요하다. 그러나 깊이 5m 이상이나 되는 대형수조를 2차원 평면으로 만들기에는 너무

엄청난 시설비와 유지비가 들기 때문에 실제의 문제 해결을 위하여는 수치모형의 이용이 바람직하다. 합성류에 의한 토사이동량 산정식도 일방향 흐름 산정식과 유사한 형태를 취하나 파조건에 따른 수정이 필요하다. 반사조건, 쇄파조건, 합성에 의한 토사세굴능의 증진 등을 고려한 경험식이 제시되어 있으며 이러한 경험식들과 다음과 같은 기본 질량보존식을 이용하여 매몰량과 세굴량을 정량적으로 산정할 수 있다.

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} = 0 \dots (20)$$

여기서 b 는 해저면의 높이, Q_i 는 토사이동량, λ 는 퇴적도의 공극률이다. 문제는 주어진 조건하에서 표사이동량 Q_i 를 얼마나 정확히 산정하느냐에 달려있는데, 이를 위하여는 합성류에 의한 마찰력의 정확한 계산이 전제되어야 한다. 방파제 주위에서의 토사이동은 대부분의 경우 파와 해류가 동시에 작용하므로 상당히 복잡한 현상으로 나타난다. 더우기 파조건은 쇄파되었을 경우와 그렇지 않을 경우 전혀 다른 양상으로 나타나기 때문에 달리 고려하여줄 필요가 있다. 쇄파대 밖에서

의 토사이동은 소류사(bed load) 이동양식과 부류사(suspended load) 이동양식 모두 큰 비중을 차지하나 쇄파대(surf zone) 내에서는 쇄파에너지가 토사의 확산에 미치는 영향이 과다하여 이 지역에서의 토사이동은 주로 부류사 이동양식에 따른다. 파도의 형상은 실제 대부분의 경우 파정(wave crest) 부분의 곡선은 날카롭고 파곡(wave trough) 부분의 곡선은 완만하여 파정 부분에서의 즉 전진방향의 입자유속이 파곡 부분에서의 즉 후진방향의 입자유속보다 크다. 이러한 경향은 천해역에 접근하여 더욱 촉진되며, 따라서 최초로 토사세굴(sediment erosion)이 일어나는 지점에서는 파정시 세굴이 일어나 파곡시 후진방향으로 토사가 이동된다. 파도가 천해로 더 접근하면 세굴은 파곡시에도 일어나 이후부터 토사의 이동은 파의 전진방향으로 이루어진다. 그 밖에 토사이동은 연안사주(longshore bar)와 모래결(砂澗)의 생성 발달과 어우러져 보다 복잡한 양상으로 나타나며 해류와 합성되었을 때 최초 세굴지점이 변하는 등 토사이동양상은 더욱 복잡하게 변모한다. 합성류에 의한

토사이동량을 산정할 때 이렇게 복잡한 양상으로 나타나는 모든 현상을 고려하는 것은 매우 지난한 문제이며, 성공하더라도 실제 적용에의 의의는 크지 않을 수 있다. 따라서 파와 해류의 합성류에 의한 토사이동량 산정도 하천에서의 토사이동량 산정과 같이 단순화를 기할 필요가 있을 것이다.

6. 끝맺음말

항만설계 및 항만시설공사를 효율적으로 시행하기 위하여는 해안수리의 제 요인에 대한 충분한 이해와 이에 정확한 정량분석이 전제되어야 하는데 본고는 해안수리 제 요인에 대한 일반론을 다루고 이에 해석을 위한 최신 기법과 연구 결과들을 간추려 소개하였다. 여러 해석 기법이 제시되어 있는데 각 기법의 적절한 선택은 다각도로 검토되어야 하며 각 항목별로 그 중 나은 검토 방법이 있겠으나 모든 방법은 장점과 함께 단점을 내포하기 때문에 가능하면 중복적인 검토가 이루어지는 것이 바람직하겠다. 특히 수치모형 또는 수조모형 등 모든 모형실험은 실제 현

상을 그대로 재현할 수 없는 약점이 있으므로 현장 관측자료의 획득은 거의 모든 경우 필수적이라 하겠다.

해안수리의 제 변형을 예측하는 기법으로 과거에는 주로 수조모형실험에 의하여 현상을 규명하여 왔으나, 수조의 물리적 한계와 축척의 축소와 왜곡에 따른 문제점 때문에 이용에 한계를 느껴왔다. 바람에 의한 풍송류와 파도의 생성 발달 등의 재현에는 거의 불가능한 것으로 판단되며, 파도에 의한 연안류의 재현에도 정성적인 분석은 가능하나 정량적인 분석에는 미흡하며, 토사이동현상의 재현에는 정성적인 분석조차 불확실할 것으로 사료된다. 그러나 조류와 파도전파 양상을 재현하는데 있어서 축척의 축소효과에 따른 변형은 중력비를 일치시킴으로써 조정하여 실제 현상과 아주 근접하게 재현할 수 있다. 더우기 수조모형실험에서는 제 수리요인을 확실히 조절하여 발생시키고 나타나는 현상을 시간적 공간적으로 충분하고도 정확하게 관측할 수 있으므로, 수조모형실험의 관측결과는 수치모형의 검증에 요긴하게 쓰인다.

수퍼컴퓨터의 개발에 따라 수치모형 적용범위의 물리적

한계는 거의 무한에 가까우며 축척의 축소나 왜곡도 필요치 않으므로 각각의 현상을 수식으로 표현 가능하다면 어떠한 현상도 실제와 거의 근접하게 재현 가능하다. 해안수리를 해석하는 수치모형은 크게 두 종류로 대별할 수 있는데 그 하나는 조류, 풍송류, 연안류 등을 해석하는 해류 수치모형이며 다른 하나는 파도전파 수치모형이다. 해류수치모형은 발생요인에 따라 약간의 수정이 필요하나 그 주요 골격은 동일하다. 단지 발생 원인에 따라 대상 해역의 범위를 달리하게 되는데 풍송류인 경우 대상해역의 범위는 1000 km² 내외가 되며 조류는 100 km² 내외, 연안류는 10 km² 내외가 되어, 대상 해역을 크게 잡아야 하는 풍송류와 조류의 재현에는 대개의 경우 극좌표를 사용하여야 한다. 파도전파 수치모형도 크게 두 종류로 대별하여 1단계와 2단계 수치모형이 있는데 연구 범위 1km² 내외의 작은 해역은 반사효과까지를 포함하여 현상을 규명할 수 있는 1단계 모형의 적용이 바람직하며, 연구 범위 10 - 100 km² 내외는 반사효과를 무시하고 효율이 증진된 2단계모형의 적용이 바람직하다. \triangleleft