

파랑의 처오름 높이 산정

윤 성 범*

1. 서 론

국내의 급속한 경제성장과 산업활동의 양적증가로 국토의 확장, 신도시 공간의 창출, 임해공업단지의 조성, 신항만건설과 해안위락시설 등의 사업이 활발히 진행되고 있다. 간척·매립을 통한 농·공단지의 조성, 항만개발, 화력 및 원자력발전소 건설과 해안위락시설개발 등의 사업을 진행하는데 있어, 파랑의 처오름 높이는 부지고와 해안제방, 호안 등의 천단고를 결정하는 중요한 기초자료이다.

해안구조물의 사면이 급경사이고 주된 입사파가 단파일 경우, 쇄파 등으로 해석이 매우 복잡하여 파의 처오름 높이를 산정하는 해석해가 없으며 수치실험도 거의 불가능하다. 그러므로 입사파의 파고, 파형경사, 구조물의 형상 및 사면의 조도 등 여러가지 요소를 고려하여 실험에 의해 추정하여야 한다. 그러나 수치실험에 의한 처오름 높이의 산정은 막대한 비용과 시간을 요하므로 실무에서는 미육군공병단(U.S. Army Corps)의 해안공학연구소(Coastal Engineering Research Center)에서 광범위한 실험을 통해 제시한 방법(Shore Protection Manual, SPM, pp. 7.16~7.43, 1984)을 따르는 것이 일반적이다.

따라서 본 고에서는 파랑의 처오름 높이의 산정에 대해 일반적인 방법론과 실무에서 범하기 쉬운 오류에 대해 기술하고 간단한 계산예를 통해 실무자의 이해를 돕고자 한다.

2. 파랑의 처오름 높이 산정

해안구조물 설계를 위한 심해파가 결정되면 파랑의 제원(주기, 파고 등)과 대상해역의 수심분포를 이용하여 구조물 주변 파랑의 분포를 계산하며, 이때 이용되는 계산모형은 크게 포물형모형(parabolic type model)과 쌍곡형모형(hyperbolic type model)으로 대별된다. 포물형모형은 파랑의 천수, 굴절, 회절만을 고려하는 모형으로 구조물에서의 입사파만을 대상으로 하는 반면, 쌍곡형모형은 반사파의 효과도 고려할 수 있는 모형이다.

해운항만청의 항만시설물 설계기준서(1993) 및 미육군공병단 해안공학연구소의 SPM(1984)에 의하면, 부지고와 호안천단고 결정을 위한 파랑의 처오름 높이 계산시에는 심해로부터 구조물위치까지 천수, 굴절, 회절을 고려하고 쇄파와 반사를 무시한 구조물에서의 순수한 입사파의 파고를 수치모형 등에 의해 구한 다음, 이를 역추정하여 환산심해파고 즉 무굴절심해파고(unrefracted deepwater wave height)를 구하고, 이 환산심해파고를 이용하여 처오름 높이를 결정한다. 이 처오름 높이를 구하는 경험식에 사용된 실험치에는 쇄파와 반사의 영향이 이미 고려되어 있다. 따라서 수치모형에 의해 구조물 전면에서의 입사파고를 계산할 경우 쇄파 및 반사의 영향은 고려하지 않아야 한다.

쌍곡형모형으로 벽면에서의 반사와 쇄파현상을 고려하여 구조물 위치에서의 파고를 계산하게 되

* 한양대학교 토목·환경공학과 조교수

면, 계산된 파고의 1/2이 처오름 높이에 해당된다. 그러나 이 방법에 의한 처오름 높이는 구조물 전면 경사, 조도 등의 영향이 무시된 결과로서 매우 부정확한 값을 준다. 쌍곡형모형에 의한 파고를 굳이 SPM에서 제시한 처오름 높이 계산과정에 이용하기 위해서는, 쇄파를 무시하고 반사만을 고려하여 파고분포를 구하고, 벽면으로부터 바다쪽으로 1파장 이내의 파고를 평균하여 반사파를 제거할 수도 있으나, 파가 호안에 직각으로 입사하지 않으면 큰 오차를 수반하게 되며, 쇄파가 포함되어 있을 때는 더욱 오차가 증대된다.

결론적으로 처오름 높이 산정을 위해서는 입사파만을 고려하고 쇄파와 반사를 무시하는 포물형모형을 사용하여야 한다. 그러나 대상해역내에 방파제 등을 이용하여 항만 등을 건설하는 경우, 항만 내에서의 처오름높이 계산을 위한 파고 계산에서는 포물형모형이 사용될 수 없으므로 쌍곡형모형을 이용한 후 입사파를 분리하는 방법에 의존할 수 밖에 없는 실정이다.

따라서 본 고에서는 무쇄파 포물형모형에 의해 계산된 결과를 이용하여 SPM에 제시된 계산과정에 따라 파랑의 처오름 높이를 산정하고, 반사와 쇄파를 고려한 쌍곡형모형에 의한 계산결과와 비교한다. 계산은 파랑이 해안구조물에 직각으로 입사하는 경우를 선정하여 두 모형 모두 1차원으로 수행하였으며, 사용된 지배방정식은 각각 다음과 같다.

포물형모형의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} - i(k - k_0)A + \frac{1}{2kCC_r} \frac{\partial(kCC_r)}{\partial x} A + f_d A = 0 \quad (1)$$

여기서, A는 파의 진폭, k는 파수, k₀는 기준수심에서의 파수(reference wave number), C는 파의 전파속도, C_r는 군파속도이며, f_d는 에너지 감쇠계수이다.

그리고 쌍곡형모형의 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{C}{C_r} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + CC_r \frac{\partial \xi}{\partial x} + 2Cf_d P = 0 \quad (3)$$

여기서, ξ는 수면변위, P는 선유량이다.

포물형 및 쌍곡형모형에 사용된 에너지 감쇠계수 f_d는 다음식으로 산정된다.

$$f_d = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{C_l}{C_r} \frac{F^{1/2}}{\rho^{1/2} h^{3/2}} \left(\frac{2C_k - 1}{C} \right)^{3/2} - \frac{C_b \beta_0}{2C_k} \left(\frac{C_r}{C} \frac{E}{\rho g h^2} M_{rs}^2 \right)^{1/2} \frac{E^{1/2}}{\rho^{1/2} h^{3/2}} \left(\frac{2C_k - 1}{C} \right)^{1/2} \quad (4)$$

여기서, E는 파의 에너지, C_l는 바닥마찰계수, h는 수심, β₀와 M_{rs}²는 상수로 각각 1.8과 0.9 × 10⁻²의 값을 가지며, ρ는 해수밀도이다. C_b는 쇄파가 발생할 경우 1이며, 쇄파가 없는 경우는 0이다. 식(4)에서 우변 제1항은 바닥마찰에 의한 에너지 감쇠를, 제2항은 쇄파에 의한 에너지 감쇠를 각각 의미한다. 따라서 무쇄파 포물형모형을 사용할 경우에는 식(4)의 우변 2항에 있는 C_b를 0으로 놓고 계산하면 된다.

쌍곡형모형의 계산결과로부터 구조물에서 바다쪽으로 1파장 이내의 파고를 평균하여 입사파를 취한 후 이를 이용하여 SPM에 제시된 도표로 처오름 높이를 산정할 수도 있으나, 본 고에서는 단지 쇄파와 반사를 고려한 후의 파고를 파의 최대 처오름 높이라 하고 포물형모형에 의한 계산결과와 비교하고자 한다.

포물형모형을 이용하는 방법은 구조물 전면부에서 쇄파를 고려하지 않고 천수, 굴절 및 회절만을 고려한 파고로부터 환산심해파고 즉 무굴절심해파고 H₀'을 구한 다음, 구조물 벽면의 경사, 수심 등에 따라 주어지는 처오름 높이도(runup diagram)로부터 [그림 2, 3 참조] 처오름 높이를 구하고, 이를 다시 축소실험효과(scale effect, k) [그림 4 참조]와 구조물벽면의 피복상태에 따른 에너지 감쇠효과(γ) [항만시설물 설계기준서(1993) 참조]를 고려하여 보정해 준다. 이 방법은 간략하면서도 실무에 적용할 수 있을 정도의 신뢰성을 가지므로 대규모 수리모형실험이 곤란한

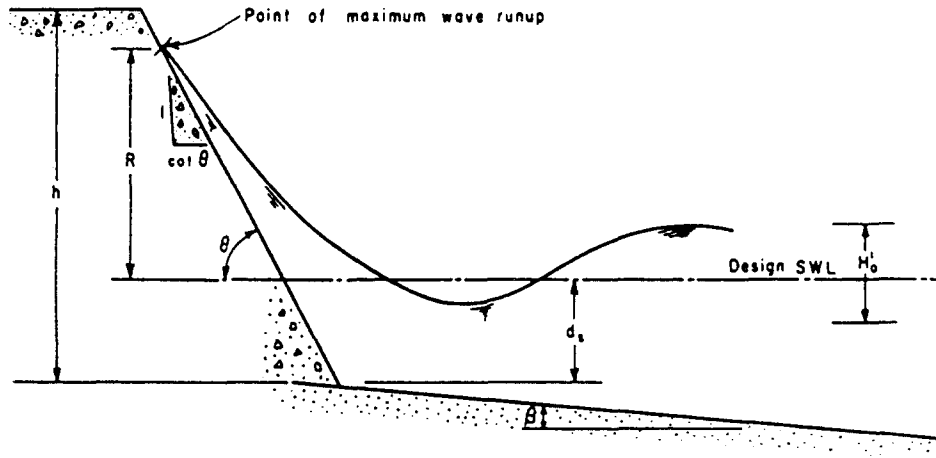


그림 1. 파랑의 처오름에 대한 개념도

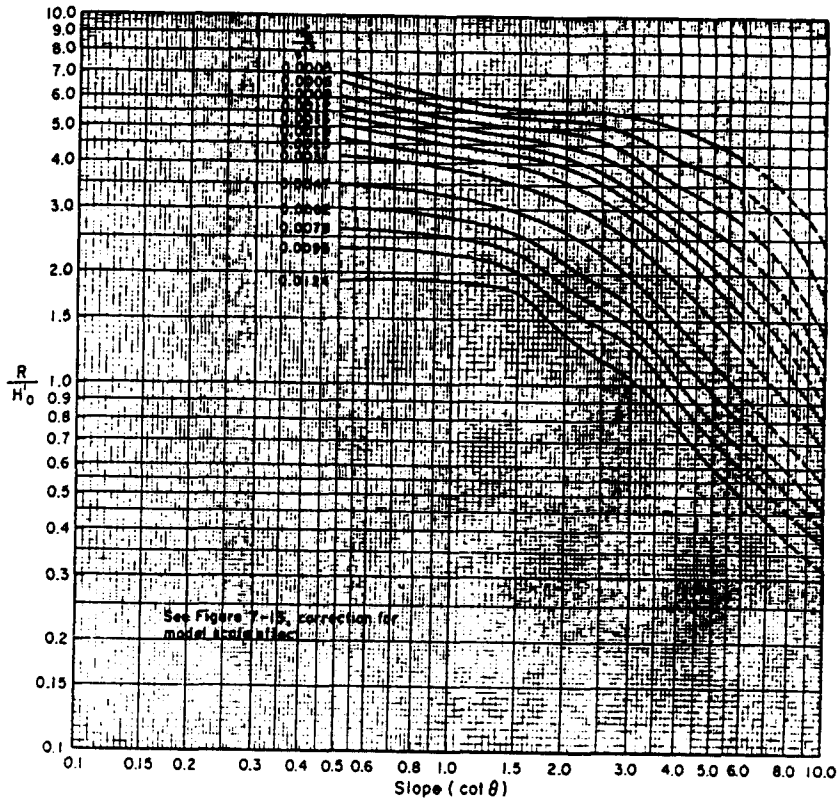


그림 2. 무차원 처오름 높이와 무차원 구조물 전면부 수심의 관련도 ($d_s/H_0' = 0.80$)

경우 흔히 적용된다.

구조물 전면수심 d_s 에서의 무차원 파고 H 로부터 무굴절 심해파고 H_0' 의 산정은 다음의 천수계수

산정식에 따른다.

$$H_0' = H \sqrt{\frac{C_R}{C_{R0}}} \quad (5)$$

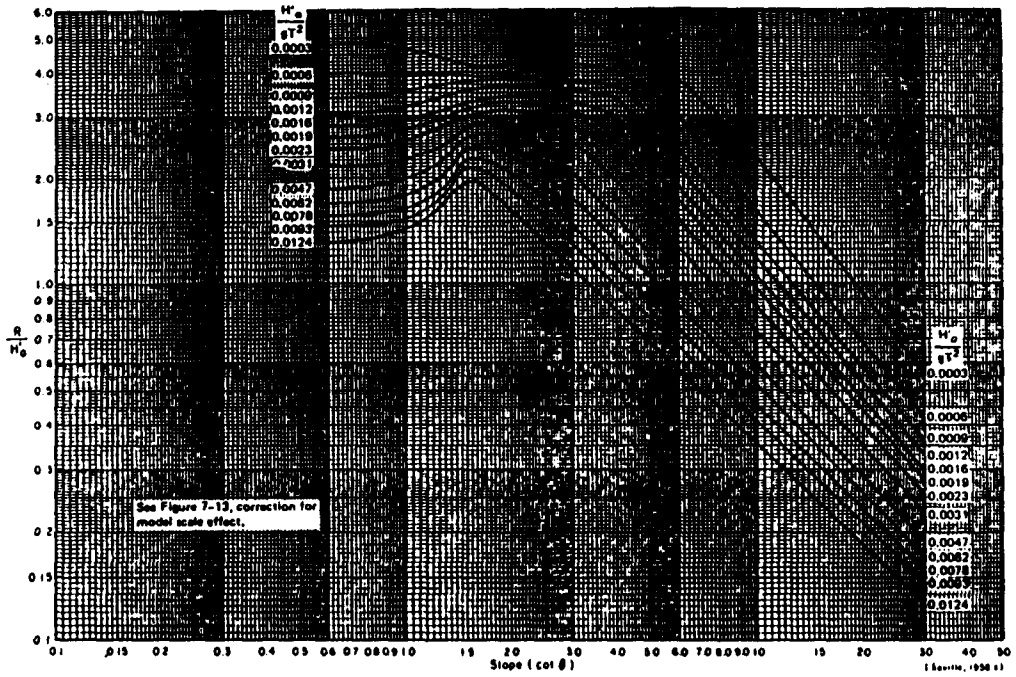


그림 3. 무차원 처오름 높이와 무차원 구조물 전면부 수심의 관련도 ($d_s/H_0' = 2.0$)

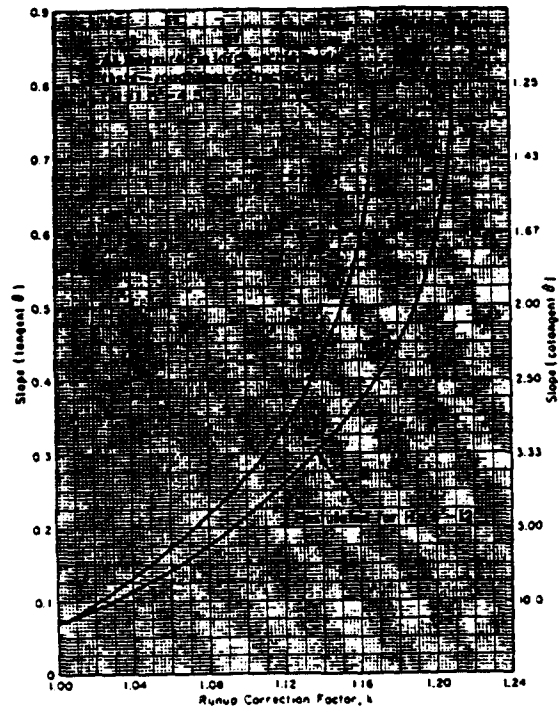


그림 4. 축소실험효과도

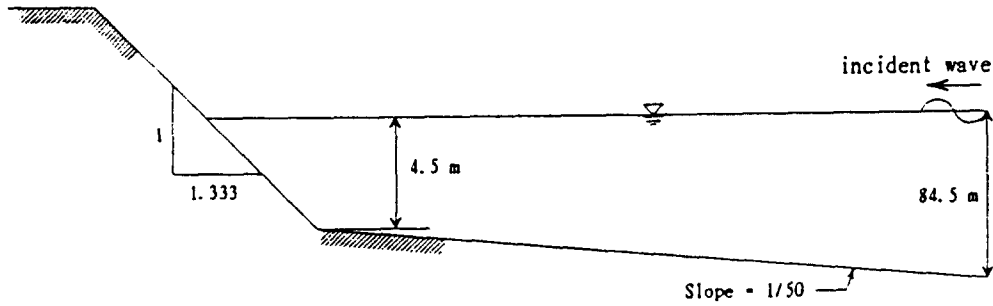


그림 5. 계산에 이용된 1차원 수로의 개념도

입사파 : 파고(H) 6m, 주기(T) 10초,
 바닥경사(S)=1/50, 구조물 벽면경사의 역수(cot θ)=1.333,
 바닥마찰계수(C_f)=0.01, 구조물 전면부 수심(d_s)=4.5m

여기서, C_r는 구조물 전면에서의 균파속도, C_{g0}는 심해파의 균파속도, H는 구조물 전면에서의 무쇄파 파고를 각각 표시한다. 이를 이용하여 무차원 구조물 수심(d_s/H₀'), 구조물 벽면경사의 역수(cot θ), 심해파의 파형경사(H₀'/(gT²))를 구한 다음, 처오름 높이도에서 무차원 처오름 높이(R/H₀')를 찾는다. 여기서 구한 처오름 높이 R [m]은 호안 경사면이 매끈한 경우에 대한 값이므로, TTP와 같은 호안피복 상태를 고려하고, 또한 축소실험효과(scale effect)를 보정해 주면 최종적인 처오름 높이 R을 구할 수 있다.

3. 파랑의 처오름 높이 계산에

앞에서 설명한 처오름 높이 산정방법에 따라 간단한 예를 들어 독자의 이해를 돕고자 하며, 파랑의 쇄파와 반사를 고려한 쌍곡형모형에 의한 계산도 동시에 수행하여 무쇄파 포물형모형에 의한 처오름 높이 결과와 비교하고자 한다. 계산에 사용된 제원은 다음과 같다[그림 5 참조].

상기 입사조건으로 쇄파, 반사, 바닥마찰을 고려한 쌍곡형모형의 계산 결과는 구조물 전면부에서 파고가 6.57m이므로 처오름 높이에 해당하는 최고 수면높이는 파고의 1/2을 취하면 평균해면상 3.29m이며, 이때 구조물에서의 반사는 완전반사조건을 사용하였다.

그리고 바닥마찰을 고려한 무쇄파 포물형모형으

로 계산한 구조물 전면부에서의 파고(H)는 6.07m이며, 계산된 파고를 식(5)를 이용하여 환산심해파고(H₀')를 계산하면 5.316m이다. 이 값으로 SPM에 수록된 실험도표와 계산방법에 따라 파랑의 처오름 높이를 계산할 수 있으며, 아래에 간략히 계산과정을 소개한다.

먼저 주어진 조건으로 심해파의 파형경사와 무차원 구조물 전면부 수심을 계산한다.

$$\frac{H_0'}{gT^2} (\text{심해파의 파형경사}) =$$

$$\frac{5.316}{9.806 \times 10^2} = 0.0054$$

$$\frac{d_s}{H_0'} (\text{무차원 구조물 전면부 수심}) =$$

$$\frac{4.5}{5.316} = 0.847$$

상기 값을 이용하여 SPM의 처오름 높이도(그림 2, 3)로부터 무차원 처오름 높이를 찾는다.

$$\text{그림 2}(d_s/H_0' \approx 0.8 \text{ 일 경우}) : \frac{R}{H_0'} = 2.85$$

$$\text{그림 3}(d_s/H_0' \approx 2.0 \text{ 일 경우}) : \frac{R}{H_0'} = 2.25$$

무차원 구조물 전면부 수심(d_s/H₀')이 0.847이기 때문에 그림 2와 3에서 찾은 값을 선형보간하여 무차원 처오름 높이를 구한다.

표 1. 처오름 높이 산정 계산예

H_{max} (m)	H_o'	d_s (m)	$\frac{d_s}{H_o'}$	$\cot \theta$	$\frac{H_o'}{gT^2}$	$\frac{R}{H_o'}$	축소실험 효과	조도 효과	최종 R/H_o'	최종 R(m)
6.07	5.316	4.5	0.847	1.333	0.0054	2.82	1.168	0.45	1.482	7.88

$d_s/H_o' = 0.847$ 일 경우 : $\frac{R}{H_o'} = 2.82$

여기서 구한 처오름 높이 R은 해안구조물의 경사면이 매끈한 경우이므로 TTP와 같은 피복상태를 고려하여 축소실험효과(scale effect)와 조도효과(roughness effect)를 고려하여 주면 일정경사를 가진 처오름 높이를 구할 수 있다.

축소실험효과(그림 4 참조) : $k=1.168$
조도효과 : $\gamma=0.45$

따라서 최종적인 처오름 높이는 다음과 같다.

$$R = 2.82 \times H_o' \times k \times \gamma$$

$$= 2.82 \times 5.316 \times 1.168 \times 0.45$$

$$= 7.88m$$

이상의 계산결과를 표 1에 요약하였다.

무쇄파 포물형모형의 계산결과로 SPM에 수록된 방법을 따라 계산한 처오름 높이는 7.88m이며, 이에는 파랑이 심해로부터 구조물에 이르기까지 진행하는 동안 쇄파와 반사 등의 영향이 모두 포함되어 있다. 쌍곡형모형을 이용한 구조물 전면부에서의 처오름 높이는 3.29m로서 두 계산결과가 큰 차이를 보이고 있다. 이는 쌍곡형모형에서 구조물 벽면의 경사가 고려되지 않아 처오름 높이가 과소 산정되기 때문이다. 쌍곡형모형을 이용하는 다른 방법 즉 구조물 전면부에서 외해쪽으로 파고를 1파장

평균하여 이를 입사파고로 설정한 후 SPM의 실험도표를 이용하면 파랑이 구조물에 직각으로 입사하므로 포물형모형을 이용한 계산결과와 근사할 것이나 본 고에서는 생략하였다.

4. 결론

이상으로 해안구조물 설계에 필요한 파랑의 처오름 높이 산정방법에 대해 간략하게 알아 보았으며, 해안구조물 전면부의 경사가 일정하고 파랑이 직각으로 입사하는 경우에 대해서 처오름 높이의 계산과정을 기술하였다. 결론적으로 항만시설물 설계기준서(1993) 또는 SPM(1984)의 처오름 높이 계산절차에 요구되는 파고는 쇄파와 반사를 무시하고 입사파만을 다루는 포물형모형에 의해 계산되어야 한다. 또한 부지고 선정을 위해서는 설계파보다 파고가 작은 파랑의 경우가 더 큰 처오름 높이를 줄 수 있으며, 구조물에 대한 파랑의 입사방향에 따라 달라지므로 이들에 대해 고려하여야 한다. 항만시설물 설계기준서에 수록된 내용은 다소 빈약하며, SPM에 수록된 설명 또한 미비점이 있어 실무자에게 도움을 줄 의도로 본 고를 작성하였다.

참 고 문 헌

해운항만청, 항만시설물 설계기준서, 1993
U.S. Army Corps of Engineers, Shore Protection Manual, 1984