

쇄파대의 파

권혁민 (한국해양연구소 연안 항만공학연구센터 연수연구원)

바다의 파는 파고가 증대하여 어떠한 한계를 넘게 되면 파형이 불안정하게 되어 쇄파가 일어난다. 심해역에 있어서 바람에 의해 발생 발달한 파의 파형 경사가 커지면 쇄파가 일어나지만 여기서는 특히 천해역에 있어서 수심의 감소와 함께 일어나는 쇄파를 대상으로 한다. 쇄파가 일어나는 지점을 쇄파점이라고 하며 쇄파점 부근에 있어서 파는 매우 급하게 변형한다. 진행하는 파는 수심이 더욱 얕아짐에 따라 쇄파의 상태를 계속하면서汀線에 다다른다. 또는 bar 지형과 같이 수심이 깊어지거나 step 지형과 같이 일정 수심의 경우는 쇄파가 더 이상 일어나지 않는 안정파에도 달한다. 쇄파점에서부터 정선에 이르는 영역을 쇄파대라고 하며 심해로부터 수송된 파동 에너지를 잃어 주로 쇄파에 의한 난류의 에너지로 변환된다. 이러한 일련의 과정은 해빈류의 발생, 저질의 이동, 확산현상에 대하여 매우 중요한 역할을 한다. 즉, 쇄파대에 있어서 파의 변형 및 유속장의 파악은 구조물의 설계 및 표사예측등을 위해 필수 불가결한 사항이다. 本稿에서는 쇄파의 형식, 쇄파한계, 쇄파후의 파의 변형등을 거론했다.

1. 쇄파의 형식

해안에서 파가 깨지는 경우, 입사파의 조건과 해저경사에 의해 쇄파형식이 서로 다르다. 이러한 형식은 아래에 표현하는 것과 같이 3가지 형태로 분류할 수 있다(Iversen, 1952 ; 速水, 1955 ; Wiegell, 1964 ; Galvin, 1972). 본 분류에 의한 한글 용어는 아직 정해지지 않았으나 저자가 임의로 용어를 달아보았다.

1-1. 부서지는 쇄파(spilling breaker)

비교적 해저경사가 완만한 경우, 파형경사가 큰 파가 깨지는 경우에 볼 수 있는 쇄파형식이다. 그림 1의 (a)에 도식적으로 보인 것과 같이 파봉의 전후에서 거의 비대칭을 유지한 채로 수심의 감소와 더불어 파봉이 솟구쳐 파봉으로부터 파의 전면을 향하여 진행하면서 부서져 간다.

1-2. 말리는 쇄파(plunging breaker)

비교적 해저경사가 급한 사면 상에서 자주 볼 수 있는 쇄파형식으로 파의 전면과 후면이 매우 비대칭적으로 된다. 이의 과정은 그림 1의 (b)와 같이 먼저 파의 전면이 서고 파봉이 위에서 덮는 듯이 되어 깨지는

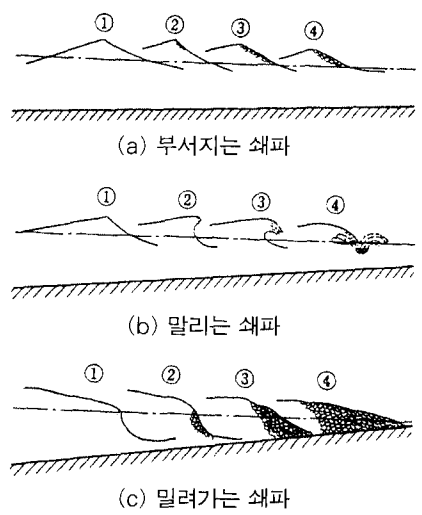


그림 1 쇄파의 형식(佐藤 合田, 1972)

순간에는 말린 것과 같은 파형으로 돼 말리는 쇄파라고 할 수 있다. 부서지는 쇄파에 비하여 파의 깨어짐이 격렬하게 일어나고 파봉이 앞으로 넘어져 들어가는 점(plunging point)에 있어서는 다량의 해저 모래가 감겨 올라올 수 있다. 또한 쇄파직후의 유속장에 수평 roller라고 불리는 강한 순환(木 岩田, 1975)이 형성된다.

1-3. 밀려가는 쇄파(surging breaker)

급경사 해안에 파형경사가 매우 작은 파가 쳐올라가는 경우에 볼 수 있는 쇄파형식이다. 말리는 쇄파와 같이 파봉의 전후에서 비대칭으로 된다. 그러나, 말린다고 하기보다는 앞의 파의 되돌이 흐름에 의해 파봉의 아래를 쭉 올리면서 깨지는 것 같이 보인다(그림 1의 (c)).

그림 2는 심해파형경사, H_0 / L_0 와 해저경사 $\tan \beta$ 에 의해 쇄파형식을 분류한 것이다. 또한, 표1은 위에 설명한 3가지의 쇄파형식이 천이할 때의 각종 매개변수의 값을 보인 것이다. 특히, $\xi = \tan \beta / (H/L)^{1/2}$ 은 쇄파 매개변수라고 불리며 반사율을 결정하는데도 사용된다(Battjes, 1974).

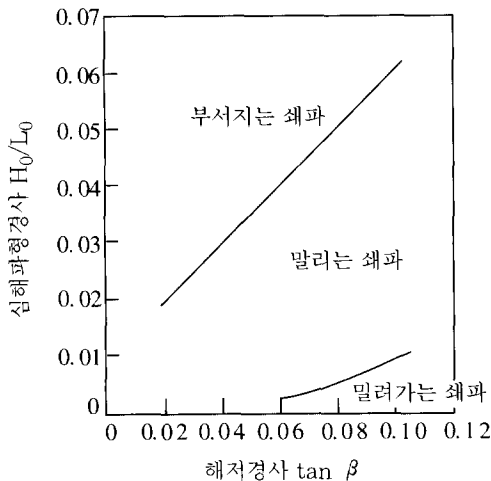


그림 2 쇄파형식의 구분 (수리공식집, (日本) 토목학회편, 1985)

표1 쇄파형식의 분류의 기준(Galvin, 1972 ; Battjes, 1974)

매개변수	부서지는 쇄파 말리는 쇄파 밀려가는 쇄파	
$B_0 = (H_0/L_0)/(\tan \beta)^2$	0.09	4.8
$B_B = (H_B/L_0)/(\tan \beta)$	0.00048	0.011
$B_B = (a_0/L_0)/(\tan \beta)^2$	0.0048	0.14
$\xi_0 = \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0} (=1/\sqrt{B_0})$	3.3	0.46
$\xi_B = \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0}$	2.0	0.4

H_0 : 심해파고, H_B : 쇄파파고, a_s :汀線에서의 진폭,

$\tan \beta$: 해저경사, H_0 : 심해파장

2. 쇄파한계

쇄파조건은 2가지로 대별할 수 있다. 첫째는 심해파의 조건과는 무관하게 쇄파점에 있어서 파의 제원, 즉 주기, 쇄파수심, 쇄파파고 사이의 관계에서 주는 것이다. 다른 하나는 심해파의 조건에서 주는 것이다. 다음에는 이것들에 대하여 현재까지 실험적으로 얻어진 연구 성과에 관하여 설명하겠다.

쇄파한계에 있는 파의 특성을 보여주는 식으로서, Miche(1951) 및 Hamada(1951)는 각각 독립적으로 이론적인 고찰을 통하여 식(1)을 유도했다.

$$\frac{H_b}{L_b} = 0.142 \tanh(2\pi h_b/L_b) \tag{1}$$

여기서, h_b , L_b , H_b 는 각각 쇄파점에 있어서 수심, 파장, 파고이다. 식(1)에는 해저경사의 영향이 포함되어 있지 않지만 해저경사에 따라 쇄파의 특성은 변한다. 따라서 해저경사의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 많은 실험이 실시되었다.

合田(Goda, 1970)는 기존의 많은 연구자들에 의해 얻어진 실험 자료를 체계적으로 정리하여 쇄파한계를 나타내는 실험 곡선 및 심해파 파형경사와 쇄파파고 또는 쇄파수심과의 관계를 제시하였다. 또한, 合田(Goda, 1973)는 실험 곡선의 근사식으로서 식(2)를 제안했다.

$$\frac{H_b}{L_b} = A \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h_b}{L_0} \right\} (1 + 15(\tan \beta)^{4/3}) \right] \tag{2}$$

여기서, $\tan \beta$ 는 海底勾配, $A=0.17$ 이며 원래의 관측

치와 실험 곡선과 오차는 10%이내이다.

이외에 Miche에 의한 쇄파 한계식(1)에 해저경사의 영향을 도입한 Ostendorf·Madsen(1979)의 식과 대형 수조로부터 얻은 실험 자료만을 대상으로 한 Sunamura(1983)의 식 등이 있다.

3. 쇄파후의 파의 변형

먼저, 일정사면 상에서의 쇄파를 생각해 보자. 쇄파가 시작되면 파고는 급격하게 감쇠하고 이후 파고 수심비가 거의 일정하게 된다. 쇄파점에 있어서 파봉은 솟아오른 듯이 예리해지고 쇄파가 진행됨에 따라 점점 완만해진다. 한편, bar 지형의 경우와 같이 파 진행 방향에 대하여 수심이 다시 깊어지거나 Step 지형과 같이 일정 수심일 경우 파는 쇄파를 시작하여 더 이상 깨지지 않는 안정파의 형태로 존재한다.

여기서는 불규칙파에 관한 연구의 성과를 위주로 설명하겠다. 쇄파가 발생하면 이의 영향으로 부차적인 파봉이 생기는 경우가 많다. 權(1997b)의 연구에 의하면 쇄파대내의 파에너지가 고주파수대로 이동하는 경향이 강하고, 파분리 등의 영향으로 파수가 증가한다. 따라서 zero-crossing에 의한 해석을 할 경우 주기는 감소한다. 단, 파에너지는 여전히 유의파 주변의 것이 타 주파수에 비하여 상대적으로 큰 에너지를 가지고 있다. 따라서, 쇄파대내의 주기가 짧아졌다는 해석이 타당할 지는 판단하기 매우 어려운 실정이다. 이러한 복잡한 현상을 포함한 쇄파대내에서의 파고의 예측은 구조물의 설계, 흐름의 발생, 표사이동 등 연안역의 개발 및 유지 보호의 차원에서 필수 불가결한 사항이다. 이하에서 현재까지 시도되어 온 여러 가지 쇄파대내의 파고 및 파형의 예측 기법들을 거론해 보도록 하겠다. 특히 쇄파에 의한 에너지의 감쇠를 표현하는 방법과 이를 계산하는 방법을 설명하겠다.

현재, 쇄파를 표현하고 있는 모형들은 크게 파형 자체를 추적하는 모형과 파고만을 예측하려는 모형으로 대별할 수 있다. 쇄파대내의 시간에 따라 변하는 파형을 예측하려는 모형은 아직 만족할 만한 결과를 얻고 있지 못하다. 단, 시간에 따라 변하는 파형을 파고로

환산했을 경우는 어느정도 타당한 결과를 얻고 있다. 그러나, 이는 파고만을 대상으로 하는 모형에 비하여 많은 계산 시간이 필요하다. 쇄파대내의 파고 정보만을 얻고자 할 경우는 에너지 평균 수송 방정식으로 푸는 것이 경제적이다.

1970년에 발표된 Collins의 연구를 시작으로 연안역에 있어서 불규칙 파랑의 쇄파에 의한 파고 변화에 대하여 지금까지 약 27년간 실제에 가까운 모형을 개발하기 위하여 현장에서의 관측, 실험, 수치해석 등을 해왔다. 그러나, 아직 쇄파에 관한 역학 이론이 확립되어 있지 않으므로 가능한 쇄파 현상을 많이 고려하는 방향으로 모형이 구성되어 왔다. 여기서는 쇄파를 고려한 파랑 변형에 관한 연구들을 상정하여 쇄파를 표현하는 방법, 이의 계산방법, 그리고 적용성에 대하여 설명하겠다.

3-1. 에너지 감쇠를 표현하는 방법에 따른 분류

불규칙파의 파랑변형 산정 모형은 지금까지 많은 연구자들에 의해 제안되어 왔다. 지금까지 개발된 쇄파변형 모형은 쇄파 감쇠형을 표현하는 방법에 따라 구별이 가능하며 크게 확률모형, 매개변수 모형, 그리고 이들을 동시에 사용한 혼합 모형이 있다.

3-1-1. 확률 모형

이 모형은 입사파 조건 및 쇄파대의 파고 분포를 既知의 분포에 주어 이를 파의 변형과 함께 수정하면서 계산을 행하는 것이다. 말하자면 파고 분포 수정법이다. 주로 Rayleigh분포를 적당히 변화시키는 방법이다(Collins 1970 ; Battjes 1972 ; Kuo·Kuo 1974 ; Kuo·Kuo 1975 ; 畠田 1975). 이 모형들은 쇄파대내의 파고 분포가 Rayleigh분포를 따른다는 가정을 하고 있으나 많은 실험과 현장 자료는 이를 뒷받침하고 있지 않다. 쇄파변형 모형 구축의 초창기인 1970년대에는 대개 실험실의 경우 규칙파로부터 불규칙파 시스템으로 전환하는 시기였으므로 쇄파대내의 확률 분포 특성을 확인하지 못했다고 할 수 있다. 또는 Rayleigh분포를 벗어나고 있다는 사실을 알고 있어서도 쇄파대내의 파고 분포 특성을 일반화하는 것이 매

우 어렵다고 할 수 있다. 이는 파동 역학 분야에서 실험 데이터가 얼마나 수치 모형에 영향력을 끼칠 수 있는지는 하나의 중요한 예라고 할 수 있다. 최근 우리나라에서 안(1997)은 쇄파대내의 비정규 확률 과정의 파고에 적용할 수 있는 확률 밀도 함수를 최대엔트로피법(maximum entropy method)을 적용하여 구했다. 이 연구는 쇄파대내의 파고분포를 일반화하려는 시도로서 앞으로 많은 주목을 받을 것으로 생각된다.

쇄파모형을 구축함에 있어서 중요한 것은 쇄파한계를 어떻게 표시하는가에 있다. 이 중에서 습田(1975)의 모형은 식(2)와 같은 쇄파 지표를 사용했다. 식(2)에 있어서 $A=0.18$ 로 구한 쇄파파고 이상의 파는 전부 깨지며, $A=0.12$ 로 구한 파고 이하의 파고는 깨지지 않는다고 하여 쇄파하는 확률이 $A=0.12$ 로부터 $A=0.18$ 까지 선형적인 변화를 한다고 가정하고 있다. 쇄파 모형을 구축함에 있어서 또다른 중요한 문제는 쇄파 한계식이 대부분 실험식이므로 이를 만족시킬 수 있는 비선형 파를 계산해야 한다는 것이다. 이에 습田(1975)의 모형에서는 천수 계수로서 首藤(Shuto, 1974)에 의해 구해진 비선형 장파의 값을 사용하고 있다. 더욱이 습田은 파고 변화 계산 모형에서는 최초로 surf beat를 고려하고 있다. 습田의 모형은 쇄파를 시작한 불규칙 파군은 큰파가 작은 파로 이동한다는 기본적인 생각으로부터 출발했다. 권(1997)의 쇄파에 의한 실험적 연구에도 제시하고 있는 것처럼 쇄파를 시작하면 파는 분리 등을 일으키며 고주파수대로 이동한다. 고주파수대의 파는 에너지가 유의 파 주변의 것보다 작음을 알 수 있어 결국은 파고가 작은 것이 많이 생성됨을 의미한다. 습田의 쇄파한계식(2)는 원래 규칙파로부터 얻은 식이며 실험치와의 차가 10%($A=0.17$ 의 경우)정도 있음을 염두해 두어야 한다. 불규칙파 모형의 경우는 계수 조절을 해야겠지만 쇄파대내의 파고예측은 대개가 10%의 오차 범위에서 만족한다고 할 수 있다.

高山(Takayama, 1991) 등은 에너지 감쇠항을 포함한 에너지 평균 방정식을 기초식으로 하여 에너지의 주파수와 파향분포를 미지수로 하는 모형을 발표

했다. 에너지 수송 방정식에 의한 에너지 감쇠항을 간단하게 표현하면 식(3)과 같이 된다.

$$\frac{\partial(EC_g)}{\partial x} = -\delta(x) \quad (3)$$

여기서, E 는 단위면적당의 에너지이며 C_g 는 군속도이다. $\delta(x)$ 는 쇄파에 의한 에너지束의 감쇠를 나타내는 함수이다.

에너지 감쇠항은 각 지점에서 습田(Goda, 1975)의 쇄파조건식(2)에 있어서 $A=0.17$ 값을 가지고 이의 조건의 파고보다 큰 파고는 전부 쇄파한다고 생각하여 평가했다. 식(4)는 쇄파 한계파를 결정하는 식으로서 해저면 경사에 따라 조금 변형된 식을 사용했다.

$$H_b = AL_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi \bar{d}}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right] \right\} (\theta \geq 0) \quad (4)$$

$$H_b = AL_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi \bar{d}}{L_0} \right] \right\} (\theta < 0)$$

여기서, 수심 \bar{d} 는 평면상의 주변에 있는 4격자 점에서의 평균값이다.

$$\bar{d} = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) / 4 \quad (5)$$

에너지 감쇠를 나타내는 항으로서 Thornton · Guza(1983)와 같이 쇄파대내의 파고분포를 식(6)과 같은 Rayleigh 분포로 가정했다.

$$P_E(H_s^*) = \frac{\pi^2}{8} a^4 H_s^* \exp \left[-\frac{\pi}{4} (a H_s^*) \right] \quad (6)$$

여기서,

$$H_s^* = H/H_{1/3}, \quad a = H_{1/3}/\bar{H} \quad (7)$$

여기서, \bar{H} 는 평균 파고이다.

그리고, 에너지 감쇠항은 계산 대상 격자에 들어올 때 격자 내에서 잃어버린 에너지를 전체의 비율로서 생각할 수 있어 파속(C)를 포함하여 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta' = \delta' C / \sqrt{\delta x \delta y} \quad (8)$$

여기서,

$$\delta' = \frac{\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} P_E(H_s^*) dH_s^* - \int_0^{H_{b0}/H_{1/3}} P_E(H_s^*) dH_s^*}{\int_0^{H_{b0}/H_{1/3}} P_E(H_s^*) dH_s^*} \quad (9)$$

$$= 1 - \frac{1 + \frac{\pi}{4} \left(\alpha \frac{H_{b0}}{H_{1/3}} \right)^2 \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left(\alpha \frac{H_{b0}}{H_{1/3}} \right)^2 \right\}}{\frac{\pi}{4} \left(\alpha \frac{H_{bi}}{H_{1/3}} \right)^2 \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left(\alpha \frac{H_{bi}}{H_{1/3}} \right)^2 \right\}}$$

여기서, δ' 는 격자내의 쇄파하는 파의 비율, 계산격자로부터 나오는 파고(H_{b0})와 들어가는 파(H_{bi})는 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} H_{b0} &= H_b + dH_b/2 \\ H_{bi} &= H_b - dH_b/2 \end{aligned} \quad (10)$$

위의 식(10)에서 α 는 유의파고와 평균파고의 비이며, Rayleigh분포를 가정했을 때 1.597이 된다.

3-1-2. 매개변수형 모형

에너지 감쇠를 표현하는 또 다른 방법으로 매개변수형 모형을 들 수 있는데, 이는 에너지 수송 방정식에서 표현하면 앞의 식(3)과 같이 된다. 각 매개변수형 모형들은 식(3)에 있어서 우변의 감쇠항을 어떻게 표현하는가에 따라 구별이 가능하며, Bore係, 안정파고係, 渦動粘性係數係, Surface roller係 모형 등을 들 수 있다.

(a) Bore係 모형

Bore 모형은 수로에서 발생하는 도수(hydraulic jump)를 동반한 에너지 감쇠 관계를 準用한 것이며, 감쇠항은 식(10)과 같다.

$$\delta' = \frac{1}{4} \rho g (d_2 - d_1)^3 \left\{ \frac{g(d_1 + d_2)}{2d_1 d_2} \right\}^{1/2} \quad (11)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, d_1 은 Bore의

상류 측의 수심, d_2 는 Bore의 하류 측의 수심이다.

Battjes · Janssen(1978)은 식(11)을 불규칙파에 적용하기 위해 식(12)과 같은 근사관계를 이용했다.

$$\begin{aligned} d_2 - d_1 &\approx H \\ \left\{ \frac{g(d_2 + d_1)}{2d_1 d_2} \right\} &\approx \left(\frac{g}{d} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)을 식(11)에 대입하여 단위면적당의 평균 에너지 소산율을 바꿔쓰면,

$$\begin{aligned} \delta' &\approx \frac{1}{4} \rho g H^3 \left(\frac{g}{d} \right)^{1/2} \\ \delta &= \frac{\delta'}{L} = \frac{f \delta'}{(gd)^{1/2}} \approx \frac{1}{4} f \rho g \frac{H^3}{d} \end{aligned} \quad (13)$$

이것을 불규칙파에 적용하기 위하여 쇄파하는 확률을 생각하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\delta = \alpha_b \bar{f} \rho g p_b \frac{H^2 m}{4} \quad (14)$$

여기서, p_b 는 쇄파확률, H_m 은 수심에 의해 결정되는 쇄파한계파고, \bar{f} 는 평균주파수, E 는 파의 에너지로 공간적으로 평균한 값이다. 그의 모형에서는 $\alpha_b = 1$ 의 값으로 좋은 결과를 얻고 있었다.

Thronton · Guza(1983)도 에너지 감쇠항을 Bore 모형을 가지고 평가했다. 현지 관측치를 조사한 결과를 가중 함수로서 Rayleigh분포에 곱하여 불규칙파의 쇄파변형을 계산했다. 그 과정을 식으로 표시하면 다음과 같다.

먼저, 쇄파대내의 파고를 Rayleigh분포로 가정한다.

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp \left\{ -\left(\frac{H}{H_{rms}} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

다음에 쇄파확률은 파고의 확률밀도 $p(H)$ 에 어떤 가중함수 $\bar{W}(H)$ 를 곱해서 식(16)와 같이 주었다.

$$p_b(H) = \bar{W}(H) p(H) \quad (16)$$

가중함수는 다음과 같이 가정했다.

$$\overline{W}(H) = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma d_0} \right)^n \left(1 - \exp \left(- \frac{H}{\gamma d_0} \right) \right) \leq 1 \quad (17)$$

여기서, γ 는 수심(d_0)과 파고(H_{rms})의 비이다.

Thornton · Guza는 식(17)을 쇄파대내의 현지 관측 자료와 비교하여 가장 근사한 값으로 $n=4$ 를 사용했다. 또한 현장 자료에 기초하여 쇄파대내의 파고는 수심에 제한됨을 표시하여 식(18)과 같은 관계를 설정하였다.

$$H_{rms} \cong 0.42 d_0 \quad (18)$$

그리고 식(18)을 이용하여 Bore모형의 식(3)에 의한 에너지 감쇠항 δ 를 식(19)과 같이 표현했다.

$$\delta = \frac{B^2}{4} \rho g \frac{\bar{f}}{d_0} \int_0^\infty H^3 p_b(H) dH \quad (19)$$

여기서, B 는 경험적인 값으로 1.5를 제안했다. 즉, 이 모형은 현장에서부터 얻은 쇄파대의 파고 데이터를 분석하여 확률밀도 p_b 를 구한 것이다.

Mase등(1986)은 파별 계산법을 사용하여 일정 사면에 대하여 불규칙파의 쇄파변형을 해석했다. 심해 파고의 확률 분포로써 Weibull분포를 가정하여 이를 각각의 파로 나누어서 계산했다. 쇄파조건으로는 습田(Goda, 1975)에 의한 식(3)에서 $A=0.16$ 을 가지고, 쇄파대내의 변형에는 평균수위의 변화와 surf beat의 영향을 고려하여 Bore모형으로 계산했다. 에너지 감쇠항에 관해서는 기본적으로는 Battjes · Janssen(1978)의 모형과 같으나 Bore에 의한 상하류의 수심 차에 대하여 보정계수 β 를 식(19)와 같이 설정하여 해저경사 $\tan \theta$ 의 영향을 모형에 고려하였다.

$$\begin{aligned} d_2 - d_1 &= \beta H \\ \beta &= H/\gamma d \\ \gamma &= 0.7 + 5 \tan \theta \quad (0.01 \leq \tan \theta \leq 0.1) \end{aligned} \quad (20)$$

그리고, 식(11)에 식(20)을 대입하여 Battjes · Janssen(1978)의 모형과 같이 단위면적당의 평균 에너지 소산율을 고쳐쓰면 식(20)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{B'}{4\gamma^3} \rho H^2 (gd)^{1/2} \left(\frac{H}{d} \right)^4 \\ \delta &= \frac{\delta'}{L} = \frac{\delta'}{cT} = \frac{B}{4\gamma^3} \frac{\rho g H^2}{T} \left(\frac{H}{d} \right)^4 \end{aligned} \quad (21)$$

(b) 안정파고係 모형

안정파고의 개념을 도입한 Dally 등(1985)의 모형은 에너지 수송 방정식에 기초하여 쇄파에 의한 에너지 소산이 입사파의 에너지束과 안정파의 에너지束과의 차에 비례한다고 생각한 것이다.

$$\delta = \frac{K}{d} [C_g(E - E_s)] \quad (22)$$

여기서 K 는 에너지束 감쇠계수, d 는 수심, E 는 선형 파 에너지, E_s 는 안정파의 에너지이다.

$$E_s = \frac{\rho g}{8} (\Gamma d)^2 \quad (23)$$

여기서, Γ 는 안정파의 파고와 수심의 비이다.

식(22)과 식(21)의 변수 K 와 Γ 는 Horikawa · Kuo(1966)의 규칙파의 실험 데이터로부터 $K=0.2$ 와 $\Gamma=0.35$ 의 결과를 얻었다. 그러나, Dally 등(1985)는 이 데이터를 더욱 검토하여 여러 사면 형태에 가장 근사한 값으로 식(24)과 같은 관계를 제안했다.

$$K = 0.15, \quad \Gamma = 0.4 \quad (24)$$

Dally 등(1985)의 모형은 실험 자료 및 현장 데이터 그리고 규칙파 및 불규칙파 모형까지 폭넓게 검토되어 이의 타당성이 확인되었다(Ebersole 1987 ; Dally 1990, 1992 ; Larson and Kraus 1992 ; Kamphuis 1994 ; Larson 1995). 최초 규칙파에 적용이 되었던 식(21)과 식(22)는 후에 Dally 등(1986)에 의해 불규칙파 모형에도 적용이 되었다. Dally 등(1986)은 파고 분포를 몇 개의 요소로 분해

하여 주기와 결합분포(Longuet-Higgins, 1983)를 사용하여 파고의 대표치와 출현율을 주어 계산했다. 입사파 조건으로서의 이 방법은 원래 Mase 등(1982)에 의해 최초로 스펙트럼을 합성하는 방법으로 발전되었다.

한편, Kweon · Goda(1996)는 Step 지형의 단면을 이용하여 불규칙파에 의한 각 대표파고의 안정파고를 정식화했다. 특히, Kweon · Goda는 안정파고 수심만의 함수가 아니라 주기도 영향을 받음을 Horikawa · Kuo(1966)의 자료를 재해석함으로써 발견하였다. Kweon · Goda는 식(22)과 식(23)을 이용하여 각 대표파고를 직접 계산할 수 있는 매우 빠른 모형을 개발했다. 특히 불규칙파의 쇄파가 어떤 공간을 두고 일어남을 표현하기 위하여 식(22)의 $K_d (=K)$ 를 점변(漸, gradually varied)하도록 설정했다. 본 모형은 소형 및 대형 수조의 실험 자료, 현장 자료, 기존의 모형과 비교를 통하여 그 타당성을 입증했다. 또한, 權(1997a)은 위의 일방향 불규칙파에 의해 정식화된 안정파고와 쇄파감쇠속도계수(K_d)의 점변성을 기본 매개변수로 설정하여 불규칙파에 의한 다방향 쇄파 모형을 구축했다.

(c) 渦動粘性係 모형

水口 · 松田(Mizuguchi, Mazuda, 1980)는 각각의 파에 대하여 水口(Mizuguchi, 1978) 등의 규칙파 모형이 적용가능하다는 가정하에 쇄파에 의한 불규칙파의 파고변화를 계산했다. 水口 등의 모형은 식(3)에 보인 에너지 감쇠항인 우변으로 표시하면 식(25)와 같이 된다.

$$\delta(x) = (\rho g H^2 / 8) 4k^2 \nu_{eB} \left\{ \frac{1}{\gamma_B} \left(\frac{H}{D} - \gamma_R \right) \right\}^{1/2} \quad (25)$$

여기서,

$$\nu_{eB} = \frac{5 g \tan \theta_B}{8 k_B \sigma \sqrt{1 - \frac{\gamma_R}{\gamma_B} (1 + 3\gamma_B^2 / 2)}} \quad (26)$$

여기서, H 는 파고, D 는 평균수심, γ 는 파고와 수심의 비, k 는 파수, σ 는 각 주파수, $\tan \theta$ 는 해저 경사, ν_e 는 渦動粘性係數이다. 또 첨자 B 및 R 는 각각 쇄파점 및 안정파고역에서의 값이다.

이 모형에서는 안정파 위치에서의 안정파고와 수심의 비(γ_R)를 약 0.5로 하고 있다. 단, Kweon · Goda(1996)에 의해 안정파고는 수심만의 함수가 아니고 주기의 영향도 받고 있음이 명백해 졌다. 水口 등의 모형에 채용된 안정파고의 개념은 후에 여러 연구에 채택되어 Dally 등(1985)에 영향을 주었다. 水口 등이 최초로 쇄파모형에 안정파 개념을 도입하였으나, 안정파고의 물리적 근거를 설명하지 못했다. 반면, Dally 등(1985)이 최초로 안정파의 개념을 쇄파 모델에 도입하였고, 안정파고를 에너지 감쇠의 주요한 매개변수로 도입했다고 할 수 있다.

여기서는 언급을 하지 못했으나 Heitner Housner(1970)의 논문도 검토해야 한다.

(d) Surface roller 係 모형

Surface roller의 개념은 Coint와 Tulin(1986)이 심해에서의 surface roller와 파 사이의 에너지 收支의 해석에 처음 도입되었다. 이후 Deigaard(1989)는

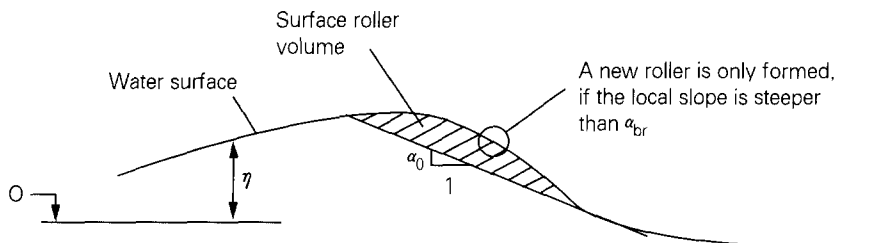


그림 3. Surface roller의 형상을 결정하는 원리

천해에 있어서 에너지 투입장에서 roller를 통한 에너지의 전달을 자세히 묘사했다. 그림 3은 surface roller의 형상을 결정하는 원리를 보인 것이다.

그림 3에서 surface roller의 체적은 임의의 파형과의 접촉각 α_{br} 을 넘을 경우 surface roller가 발생한다는 가정으로 매 시간마다 판별을 한다. 후에 Schaffer 등(1993)은 일종의 안정과 개념을 도입하여 초기치 $\alpha = \alpha_{br}$ 로부터 $\alpha = \alpha_{b0}$ 까지 파형과의 접촉각이 식(27)과 같이 감소한다는 가정을 도입했다.

$$\tan \alpha = \tan \alpha_0 + (\tan \alpha_{br} - \tan \alpha_0) \exp \left[- \ln \left(2 \frac{t - t_{rb}}{t^*} \right) \right] \quad (27)$$

여기서, t^* 는 roller가 발달한 시간 scale, t 는 시간, t_{rb} 는 roller가 시작하는 시간이다.

Svendsen(1984b)은 roller의 생성이 질량과 운동량의 평형에 중요한 영향을 준다고 지적했다. 그러나, roller의 크기, 형상, 그리고 쇄파대내에서 공간의 함수로서의 내부흐름 특성을 파악하지는 못했다. 결국은 Svendsen(1984a), Deigaard 등(1991)이 평균 수위 상승 및 해안선에 대하여 직각 방향의 해빈류를 계산하기 위해 모형 내에 roller개념을 포함시켜 자료와 비교하여 검토했다. Surface roller의 개념은 이후 여러 연구자들에 의해 사용되었으나(Dally · Brown, 1995 등) 각 연구에서 roller의 형상을 결정하는 방법은 서로 다르다.

3-2. 계산의 방법에 따른 분류

확률 모형과 매개변수 모형은 다시 계산의 방법에 따라 파별계산법과 대표파고법으로 분류할 수 있다. 파별계산법은 쇄파대내에서 특정한 파고 분포를 먼저 가정하는 것이 아니라 파고와 주기와의 결합 분포를 사용하거나 스펙트럼 합성에 의한 방법을 사용하는 경우이다. 이 모형의 부류에 해당하는 것으로서 水口 · 松田(1980), Mase · Iwagaki(1982), Dally et. al.(1986), Dally(1990, 1992), Larson(1995) 등을 들 수 있다. 파별계산법은 불규칙파가 독립적인 규

칙파의 연속이라고 前提하여 계산하는 경우이다. 이 방법은 쇄파대의 파고 분포를 일반화하는 것이 어렵다는 점과 규칙파를 이용한 모형의 성과를 파별 계산으로 비교적 간단히 적용을 할 수 있다는 2가지의 이유에서 생긴 방법이라고 생각된다.

한편, 파별해석법과 다른 대표파고법에 관한 연구로서 畠田(1975), Battjes Janssen(1978), Thronton Guza(1983), Battjes Stive(1985), Larson(1995), Kweon Goda(1995) 등을 들 수 있다.

이 방법은 파별 해석법에 비하여 계산 시간이 적다는 장점이 있어, 대량의 계산 시간을 요하는 모형에 유효하다. 단, 畠田(1975)의 모형은 최대 파고까지 계산이 가능하나 다른 모형들은 유의파고($H_{1/3}$)나 자승평균평방근파고(H_{rms})까지 계산이 가능하다.

또 한가지는 surface roller개념과 같이 시간 파형의 쇄파를 직접 표현하는 경우도 있다.

4. 적용성

쇄파대내의 파랑 예측을 위한 모형은 실제의 해역에서 잘 나타나는 일정사면 뿐만 아니라 step 형 및 bar지형 등 복합지형에도 적용이 가능해야 한다. 이러한 관점에서 3절에 설명한 모형을 대상으로 분류해보자. 확률모형인 畠田(1975)의 모형은 일정사면에 적용이 가능하며, 복합지형에는 적용이 불가능하다. 이에 비하여 안정파계 모형 및 水口 · 松田(Mizuguchi, Mazuda, 1980)의 동점성계 모형들은 복합단면에 적용이 가능성이 확인되었다. Surface roller개념을 도입한 파랑 변형모형의 복합단면의 적용성에 관해서는 기본적으로 적용이 가능하나 아직 확실한 검토가 이뤄지고 있지 않다. 향후 이의 검토가 요망된다.

5. 결론

해안공학 분야에서 가장 중요한 현상으로서 불규칙파에 의한 쇄파현상을 들 수 있다. 사람들이 바다와

접촉하면서 가장 인상적인 것은 흰 포말을 만들어가는 쇄파의 과정일 것이다. 그러나, 이러한 아름다운 광경이 공학적인 의미에서 보면 극히 이해하기 어려운 현상이다. 지금까지 이 현상을 이해하기 위하여 많은 실험, 현장의 관측, 그리고 수치 실험이 이루어졌지만 아직도 많은 과제를 남겨두고 있다. 따라서 현재까지의 쇄파대의 파랑장 예측은 경험적 방법에 의존하고 있는 실정이다. 앞으로 많은 연구가 더욱더 이루어져 해안공학에서 중요한 현상인 쇄파의 규명이 이

루어지길 기대한다. 本稿에서는 저자가 쇄파모형을 구축함에 있어서 참고로 한 여러 모형을 정리하였다. 부족한 부분이 많은줄 알지만, 쇄파를 입문하는 연구자들에게 참고가 되었으면 한다.

끝으로 저자가 本稿를 완성함에 있어서 여러 가지 지적을 아끼시지 않은 한국해양연구소 연안 항만공학 연구센터의 이 창훈 박사, 박 우선 박사, 오 병철님들께 감사를 드립니다. ●

〈참고문헌〉

- 權 赫珉, 1997a : 방향 스펙트럼 波浪에 대한 3차원 碎波變形 모형, 대한토목학회지, 투고중.
- 權 赫珉, 1997b : 쇄파대내의 불규칙 파랑의 일반적인 특성, 한국해안 해양공학회발표집, pp. 25-30.
- 權 赫珉 合田良實 崔漢圭, 1995 : 복합단면에 있어서 파랑의 쇄파변형특성, 한국해안 해양공학회지, 제7권 제2호, pp.135-140.
- 權 赫珉 合田良實 崔漢圭, 1996 : 복합단면에 있어서 불규칙파의 쇄파변형 모델의 개발, 한국해안 해양공학회지, 제8권 제1호, pp.87-94.
- 안 경모, 1997 : 淺海에서의 波高의 확률분포함수, 대한토목학회 학술발표회, pp. 411-414.
- Battjes, J. A., 1974 : Surf similarity, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1050-1061.
- Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen, 1978 : Energy loss and setup due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. Coastl Eng., ASCE, pp. 569-587.
- Coint, R. and M. P. Tulin, 1986 : Near-surface turbulence in a grid-stirred tank, Jour. Fluid Mech., Vol. 183, pp. 235-263.
- Collins, J. J., 1970 : Probability of breaking wave characteristics, Proc. 12th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 399-412.
- Dally, W. R., 1990 : Random breaking waves : a closed form solution for planar beaches, Coastal Engineering, Vol. 14(3), pp. 233-263.
- Dally, W. R., 1992 : Random breaking waves : field verification of a wave-by-wave algorithms for engineering application, Proc. 23th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 369-389.
- Dally, W. R. and C. A. Brown, 1995 : A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore current, Jour. Geophysical Res., Vol. 100, No. C12, pp. 24873-24883.
- Dally, W. R., R. G. Dean, R. A. Dalrmp, 1985 : Wave height variation across beaches of arbitrary profile, Jour. Geophysical Res., Vol. 90, No. C6, pp. 11917-11927.
- Dally, W. R., R. G. Dean, R. A. Dalrmp, 1986 : Transformation of random breaking waves on surf beat, Proc. 20th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 109-123.
- Deigaard, R., 1989 : Mathmetical modelling of waves in the surf zone. Progress Report, No. 69, Inst. of Hydrodynamic Engineering, ISVA, Techn. Univ. Denmark, pp. 47-60.
- Deigaard, R., P. Justesen, and J. Freds e, 1991 : Modeling of undertow by a one-equation turbulence model, Coastal Eng., Vol. 15, pp. 431-458.
- Galvin, C. J., 1972 : Breaker type classification on three laboratory beaches, Jour. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 3651-3659.
- Hamada, T., 1951 : Breakers and beach erosion, Rep. Transportation Tech. Res. Inst., Ministry of Transportation, No. 1, p. 165.
- Heitner, K. L. and Housner, G. W., 1970 : Numerical model for tsunami runup, Jour. Wtrwy.

- Port. Coast. Oc. Engrg., ASCE, Vol 96, pp. 701-719.
- Horikawa, K. and C. T. Kuo, 1966 : A study of wave transformation inside surf zone, Proc. Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 217-233.
- Iversen, H. W., 1952 : Waves and breakers in shoaling water, Proc. 3rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 1-2.
- Kamphius, J. W., 1994 : Wave height from deep water through breaking zone, Jour. Wtrwy. Port. Coast. Oc. Engrg., ASCE, Vol 120, No. 4, pp. 347-367.
- Kuo, N. C. and S. T. Kuo, 1975 : Effect of wave breaking on statistical distribution of wave heights, Proc. Civ. Engrg. in the Oceans 3, ASCE, New York, N. Y., pp. 1211-1231.
- Kweon, H-M and Y. Goda, 1996 : A Parametric Model for Random Wave Deformation by Breaking on Arbitrary Beach Profiles, Proc. 25rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 261~274.
- Larson, M. and N. C. Kraus, 1992 : Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, Jour. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., ASCE, Vol. 117, No. 4, pp. 326-347.
- Larson, M., 1995 : Model for decay of random waves in surf zone, Jour. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., ASCE, pp. 1-12.
- Longuet-Higgins, M. A., 1983 : On the joint distribution of wave periods and amplitudes in random wave field, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 389, pp. 241-258.
- Mase, H. and Y. Iwagaki, 1982 : Wave height distribution and wave grouping in surf zone, Proc. 18th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 58-76.
- Mase, H. and N. Kobayashi, 1991 : Transformation of random breaking waves and its empirical numerical model considering surf beat, Proc. Coastal sediments' 91, pp. 25-27.
- Miche, R., 1951 : Le pouvoir r l chussant des ouvrages maritime expos s l' action de la houle, Annales Ponts et Chaussées, 121e Année, pp. 285-319.
- Mizuguchi, M., 1980 : An heuristic model of wave height distribution in surf zone, Proc. 17th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 278-289.
- Ostendorf, D. W. and Madsen O. S., 1979 : An analysis of longshore currents and associated sediment transport in the surf zone, MIT Rep., Sea Grant, pp. 79-13.
- Sch ffer, H. A., P. A. Madsen and R. Deigaard, 1993 : A boussinesq model for waves breaking in shallow water, Jour. Coastal Engineering, pp. 185-202.
- Sunamura, T., 1983 : Determination of breaker height and depth in the field, Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, No. 8, pp. 53-54.
- Svendsen, I. A., 1984a : Wave heights and set-up in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 303-329.
- Svendsen, I. A., 1984b : Mass flux and undertow in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 347-365.
- Thronton E. B., R. T. Guza , 1982 : Energy saturation and phase speeds measured on a natural beach, Jour. Geophysical Res., Vol. 87, pp. 9499-9508.
- Thronton E. B., R. T. Guza , 1983 : Transformation of wave height distribution, Jour. Geophysical Res. Vol. 87, pp. 9499-9508.
- Wiegel, R. L., 1964 : Oceanographical Engineering, Prentice Hall, New Jersey, p. 175.
- 高山知司 神山豊 菊池治, 1977 :
リーフ上の波の變形に關する研究, 港灣技研資料, No. 278, pp. 3-32.
- 高山知司 池田直太 平石哲也, 1991 :
碎波および反射を考慮した波浪變形計算,
港灣技術研究所報告, 第30巻 第1, pp. 21-67.
- 佐藤昭二 合田良實, 1972 : 海岸 港灣, 易 土木講座 17,
章國社, p. 372.
- 水口 優 岡和男 堀川清司, 1978 :
碎波後の波高變化についての一考察,
第25回海岸工學講演會論文集, pp. 221-230.
- 水口 優 松田伸次, 1980 :
現地不規則波浪の線形變形について,
第27回海岸工學講演會論文集, pp. 134-138.
- 首藤伸夫, 1974 : 非線形長波の變形,

第21回海岸工學講演會論文集, pp. 57-63.
木亨 岩田好一郎, 1975 :
周波數特性からみた碎波後の波の變形に關する一考察,
第22回海岸工學講演會論文集, pp. 81-86.
速水頌一郎, 1955 : 碎波の機構(I I),
第2回海岸工學講演會論文集, (日本)土木學會, pp.
13-15.

合田良實, 1970 : 碎波指標の整理について,
(日本)土木學會論文報告集, No. 180, pp. 39-49.
合田良實, 1973 : 不規則波の碎波指標について,
第20回海岸工學講演會論文集, (日本)土木學會, pp.
571-577
合田良實, 1975 : 淺海域の波浪における碎波變形,
港灣技術研究所報告, 第14卷, 第3號, pp. 571-577.

한자
속의
말

배수지진(背水之陣)

물을 등지고 진을 친다.

강이나 늪지대를 뒤에 두고 진(陣)을 쳐 후퇴할 수 없는
절박한 입장에서 결전(決戰)하는 것으로 만일 실패하게
되면 재기할 수 없다는 각오로써 임한다는 뜻임.