

국내 및 국외 처오름 높이 산정식 비교

Comparison of Wave Runup Formula Used in Domestic and Foreign Countries

오상호¹, 권오순²
 Sang-Ho Oh¹, O-Soon Kwon²

1. 서 론

파랑의 처오름 높이와 월파량은 해안제방이나 호안 등의 마루높이를 결정하는 데 중요하다. 최근에는 호안 및 제방 배후시설의 중요도에 따른 안전성 확보 측면에서 처오름 높이 자체보다는 허용월파량을 설계 시의 더 주요한 고려사항으로 취급하는 것이 일반적이지만, 적절한 처오름 높이의 산정은 마루높이 결정을 위한 월파량 산정 시 기본적으로 고려되는 요소로서 여전히 중요한 설계인자의 하나이다.

국내의 경우 설계 실무에서 처오름 높이 산정 시에는 대개 항만 및 어항 설계기준 (2005)에 제시된 식을 이용하고 있다. 그러나 처오름 높이 산정식은 입사파의 특성, 제체의 형상 및 해저지형 등의 영향을 완벽하게 반영하고 있지는 못하다. 따라서 제체 형상 또는 바닥 지형이 복잡한 경우에 처오름 높이를 엄밀하게 산정할 필요가 있을 경우에는 수리모형실험을 시행하여 추정하는 것이 일반적이다.

한편, 미국, 유럽, 일본 등의 설계지침서에 제시되어 있는 처오름 높이 산정식은 서로 조금씩 다르며, 우리나라 항만 및 어항 설계기준 (2005)에 제시되어 있는 식과도 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 점에 착안하여 본 논문에서는 우리나라와 미국, 유럽, 일본에서 사용되고 있는 처오름 높이 산정식을 비교하고 그 주요한 차이점을 고찰해 보았다. 처오름 높이 산정에 관련된 해외 설계지침서로는 미국의 경우 CEM(Coastal Engineering Manual, 이하 CEM이라 칭함) (2002), 유럽의 경우 EurOtop (2007), 일본의 경우 港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)를 연구의 참고문헌으로 활용하였다.

2. 처오름 높이 산정식

2.1 한국

항만 및 어항 설계기준(2005)에 따르면 처오름 높이는 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} R/H_0' &= (R/H_0')_s, & \text{for } d_s/H_0' > 3 \\ R/H_0' &= (R/H_0')_s rK, & \text{for } d_s/H_0' < 3 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 R 은 처오름 높이, H_0' 은 환산심해파고, $(R/H_0')_s$ 은 매끈하고 불투과성인 경사면에서의 상대 처오름 높이, r 은 조도(roughness) 조정계수, K 는 축척 조정계수를 각각 나타낸다. $(R/H_0')_s$ 및 K 의 값은 d_s/H_0' 의 값에 따라서 여러 개의 그림으로 제시되어 있으며, r 의 값은 표로 제시되어 있다. Figure 1에는 $d_s/H_0'=2.0$ 일 때의 처오름 높이 산정 그림을 예로써 제시하였다.

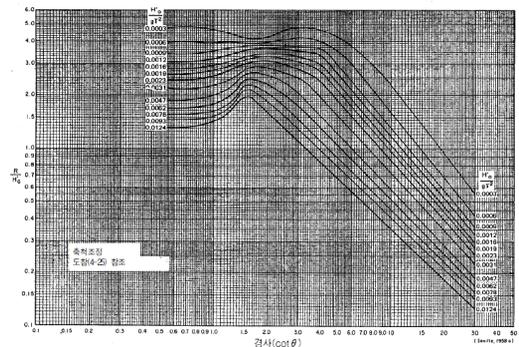


Fig. 1. Values of $(R/H_0')_s$ when $d_s/H_0'=2.0$

2.2 미국

불투과성이고 매끄러운 사면에서의 처오름 높이

1 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 선임연구원

2 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원

는 Battjes(1974)가 제안한 다음 식으로 산정한다.

$$R_{u\%}/H_s = (A\xi_p + C)\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta \quad (2)$$

여기서 $R_{u\%}$ 는 입사파 $i\%$ 에 의해서 초과되는 처오름 높이를 나타내며, ξ_p 는 이리바렌(Iribarren) 수 또는 쇄파상사 파라미터(surf similarity parameter)로서 다음과 같이 정의된다.

$$\xi_p = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{2\pi H_s/gT_p^2}} \quad (3)$$

식 (2)에서 계수 A 와 C 의 값은 Table 1에 제시된 것처럼 $R_{u\%}$ 에 따라서 다르게 주어지며, γ_r 은 조도(roughness) 조정계수, γ_b 는 복단면(berm) 설치에 따른 조정계수, γ_h 는 천수(shallow water) 조정계수, γ_β 는 경사입사파에 대한 조정계수이다.

Table 1. Values of A and C in Eq.(2)

$R_{u\%}$	Range of ξ_p	A	C
$R_{2\%}$	$\xi_p \leq 2.5$	1.60	0
	$2.5 < \xi_p < 9$	-0.20	4.5
R_s	$\xi_p \leq 2.0$	1.35	0
	$2.0 < \xi_p < 9$	-0.15	3.0

한편, 불투과성 사석 경사면에서의 처오름 높이를 산정에는 Delft Hydraulics (1989)에 제시된 다음 식을 이용한다.

$$R_{u\%}/H_s = a\xi_m, \quad \text{for } 1.0 < \xi_m \leq 1.5 \quad (4)$$

$$R_{u\%}/H_s = b\xi_m^c, \quad \text{for } \xi_m > 1.5$$

여기서 ξ_m 의 값은 식(5)에 보인 것처럼 평균주기 T_m 의 함수로 표현되며, 계수 a, b, c 의 값은 Table 2에 제시된 바와 주어진다.

$$\xi_m = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{2\pi H_s/gT_m^2}} \quad (5)$$

Table 2. Values of the parameters in Eqs.(4) & (6)

$R_{u\%}$	$R_{0.1\%}$	$R_{2\%}$	$R_{1/10}$	$R_{1/3}$	\bar{R}
a	1.12	0.96	0.77	0.72	0.47
b	1.34	1.17	0.94	0.88	0.60
c	0.55	0.46	0.42	0.41	0.34
d	2.58	1.97	1.45	1.35	0.82

한편, 투과성 사면인 경우에는 처오름 높이를 산정하는 식(6)과 같이 표현된다.

$$R_{u\%}/H_s = a\xi_m, \quad \text{for } 1.0 < \xi_m \leq 1.5 \quad (6)$$

$$R_{u\%}/H_s = b\xi_m^c, \quad \text{for } 1.5 < \xi_m \leq (d/b)^{1/c}$$

$$R_{u\%}/H_s = d, \quad \text{for } (d/b)^{1/c} < \xi_m \leq 7.5$$

2.3 유럽

EurOtop(2007)에 의하면 제방 및 호안에서의 처오름 높이를 $R_{2\%}$ 는 다음 식에 의해서 산정한다.

$$R_{2\%}/H_{m0} = 1.65\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta\xi_{m0} \quad (7)$$

여기서 H_{m0} 는 파랑 스펙트럼의 영차(zeroth) 모멘트로부터 계산되는 유의파고($H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$)이며, γ_b 는 복단면(berm) 설치에 따른 조정계수, γ_f 는 조도(roughness) 조정계수, γ_β 는 경사입사파에 대한 조정계수를 각각 의미한다. 또한 ξ_{m0} 의 값은 식(8)에 의해 계산되며,

$$\xi_{m0} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{2\pi H_{m0}/gT_{m0}^2}} \quad (8)$$

여기서 T_{m0} 는 파랑 스펙트럼의 영차 및 -1차 모멘트의 관계 $T_{m0} = (m_{-1}/m_0)$ 에 의해 계산된다.

한편, 식(7)에 의해 계산되는 $R_{2\%}/H_s$ 의 값이 아래 식(9)의 값보다 클 경우 처오름 높이는 식(9)에 의한 계산값으로 산정한다.

$$R_{2\%}/H_{m0} = 1.00\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta(4.0 - 1.5/\sqrt{\xi_{m0}}) \quad (9)$$

2.4 일본

港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)에 의하면 경사가 일정한 사면에서의 처오름 높이를 Mase(1989)가 제안한 다음 식으로 평가한다.

$$R_x/H_0' = p\xi_0^q \quad (10)$$

여기서, 계수 p 와 q 는 Table 3에 제시된 값을 사용하며, ξ_0 의 값은 식(11)에 보인 것처럼 심해파와 관련된 함수로 표현된다.

$$\xi_0 = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{2\pi H_0'/gT_0^2}} \quad (11)$$

또한 식(10)의 적용은 다음 두 가지 조건을 만족하는

범위 내로만 한정한다.

$$1/30 \leq \tan \alpha \leq 1/5 \quad (12)$$

$$H_0/L_0 \geq 0.007 \quad (13)$$

Table 3. Values of a and b in Eq.(10)

R_x	R_{\max}	$R_{2\%}$	$R_{1/10}$	$R_{1/3}$	\bar{R}
p	2.32	1.86	1.70	1.38	0.88
q	0.77	0.71	0.71	0.70	0.69

한편, 사석 사면에서의 처오름 높이는 미국의 경우와 마찬가지로 식(4)를 이용하여 산정한다. 다만 투과성 사면인 경우에는 식(6)의 세 번째 식만을 사용하여 다음과 같이 산정할 것을 제안하고 있다.

$$R_{u\%}/H_s = d \quad (14)$$

여기서 d 의 값은 Table 2에 제시된 값과 같다.

3. 처오름 높이 산정식 상호비교

3.1 각국 처오름 높이 산정방법의 특징

2절에서 설명한 국내 및 국외 처오름 높이 산정식을 비교해보면 우리나라 항만 및 어항 설계기준(2005)에서 제시하고 있는 처오름 높이 산정방법은 다른 나라에서 적용되고 있는 처오름 높이 산정방법과 두 가지 점에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

첫 번째로 수식에 의해서가 아니라 상대수심 d_s/H_0' 별로 주어지는 그림에 의해서 매끈하고 불투과성인 사면에서의 처오름 높이 (R/H_0')_s를 산정하고 있다. 반면에 미국, 유럽, 일본의 경우에는 처오름 높이 산정에 이리바렌(Iribarren) 수의 함수로 표현되는 경험식을 이용하고 있다. 두 번째로는 국외 설계기준의 경우에는 통계적 개념을 도입하여 입사파의 몇 %에 의해서 초과되는 지에 따라서 처오름 높이를 다르게 하고 있는 반면에, 국내의 경우 처오름 높이를 산정에 이러한 확률적 개념이 포함되어 있지 않다.

한편, 미국(CEM), 유럽(EurOtop), 일본(港湾の施設の技術上の基準・同解説) 간에도 처오름 높이 산정식에 약간의 차이점이 존재한다. 미국과 일본의 경우에는 불투과성이고 매끄러운 사면에서의 처오름 높이와 사석으로 구성된 투과성 사면에서의 처오름 높이를 각각 별도의 식으로 계산하고 있는 반면에 유럽의 경우에는 식(7)만을 사용하고 있으며, 투과성의 효과는 식(7)의 조도 조정계수(γ_f)에 포함시켜서 고려하

고 있다.

또 다른 차이점은 미국 및 유럽의 경우 처오름 높이를 산정시에 입사파의 파고로 경사면 시작점(toe)에서의 파고(H_s 또는 H_{m0})를 사용하고 있는 반면에, 일본의 경우 경사가 일정한 사면에서의 처오름 높이를 계산은 환산심해파고(H_0')에 근거하고 있다는 점이다. 또한 일본과 미국의 경우에는 $R_{2\%}$ 를 비롯하여 R_{\max} , R_s ($R_{1/3}$)등 다양한 %에 대하여 처오름 높이의 산정식을 제시하고 있는 반면, 유럽의 경우에는 $R_{2\%}$ 에 대한 산정식만을 제시하고 있고 나머지 %에 대해서는 미국 및 일본과 동일하게 식(4)의 결과를 적용할 것을 권고하고 있는 점도 다르다.

3.2 처오름 높이 산정식 비교

2절에서 설명한 미국, 유럽, 일본의 처오름 높이 산정식은 각각 고유한 이론적 배경 또는 방대한 실험 결과로부터 도출된 결과이므로 일률적으로 비교하는 것은 어렵다. 그러나 이 논문에서는 몇 가지 가정 또는 단순화에 근거하여 비교가 가능한 범위 내에서 각국의 처오름 높이 산정식을 상호 비교해 보았다.

사면경사가 일정하고 불투과성인 사면에서의 처오름 높이 산정식 비교는 다음과 같은 과정을 통해 이루어졌다. CEM의 식(2)를 EurOtop의 식(7) 및 (8)과 비교하기 위해서는 ξ_p 와 ξ_{m0} 의 관계를 정의할 필요가 있다. 이를 위해서 침두주기와 유의주기의 관계를 $T_p = 1.1 T_{m0}$ 로 가정하였다. 이를 식(3)에 적용하면 $\xi_p = 0.91 \xi_{m0}$ 의 관계식을 얻으며, 이를 식(2)에 적용하면 식(2)를 ξ_{m0} 의 식으로 표현할 수 있다. 또한 복단면은 설치되지 않고 파는 사면에 직각으로 입사한다고 가정한다.

한편, 일본의 경우 처오름 높이를 산정에 환산심해파고(H_0')를 이용하고 있기 때문에 CEM 및 EurOtop의 결과와 직접 비교하는 것은 원천적으로 불가능하다. 그러나 만약 심해파가 제방 또는 호안에 접근하면서 천수, 굴절, 회절 등이 발생하지 않는다고 가정한다면 $H_0' = H_s$ 라고 가정할 수 있다. 이러한 가정을 바탕으로 세 가지 설계기준에 의한 처오름 높이를 $R_{2\%}$ 에 대한 산정식을 ξ_{m0} 의 함수로 나타내보면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 알 수 있는 것처럼 ξ_{m0} 의 값이 대략 2보다 작은 범위에서는 세 가지 식에 의한 처오름 높이 산정 결과가 매우 유사한 것을 알 수 있다. 반면에 ξ_{m0} 의 값이 이보다 큰 범위에서는 차이를 보이는데, CEM에 의한 식은 ξ_{m0} 의 값에 따라서 선형 감소하는 추세를 나타내는 반면 EurOtop에 의한 식은 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 CEM에 의한 식은 $\xi_{m0} = 2.5$ 를 경계로 식의 형태가 달라지는 반면에

EurOtop에 의한 식은 $\xi_{m0} \approx 1.7$ 을 경계로 산정식을 다르게 적용하게 된다. 한편, 일본 설계기준에 의한 방법은 $0.4 < \xi_{m0} < 2.4$ 의 범위에서만 적용이 가능하며, 이 범위를 벗어난 경우에 대해서는 처오름 높이 산정식을 제시하고 있지 않다.

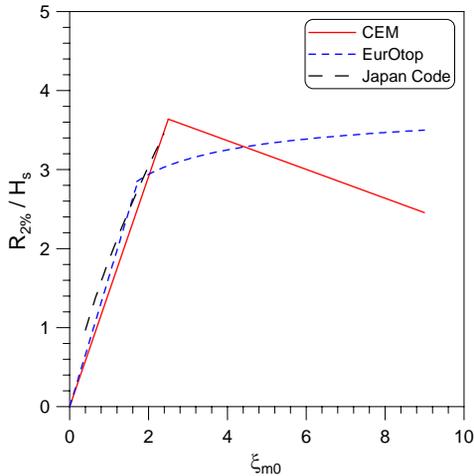


Fig. 2. Comparison of $R_{2\%}/H_s$ by the three design codes.

Fig. 3에는 마찬가지로 방법으로 처오름 높이 R_s ($R_{1/3}$)에 대한 미국 및 일본의 산정식을 ξ_{m0} 의 함수로 표현하였다. 유럽의 경우 위에서 기술한대로 $R_{2\%}$ 의 값만을 제시하고 있기 때문에 함께 비교하지 못하였다.

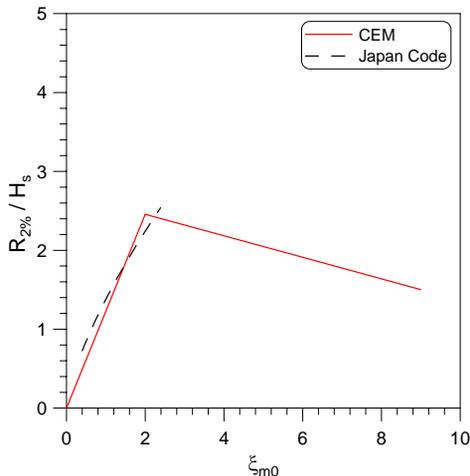


Fig. 3. Comparison of $R_{1/3}/H_s$ by the two design codes.

4. 결 론

이 연구에서는 우리나라를 비롯하여 미국, 유럽 및 일본에서 적용되고 있는 처오름 높이 산정식을 상호 비교하고 각각의 특징 및 공통점과 차이점을 서로 비교 및 검토하였다.

3.2절에서 설명한 바와 같이 몇 가지 가정 및 단순화에 근거하여 사면경사가 일정하고 불투과성인 사면에 대한 처오름 높이 산정식을 서로 비교해 본 결과, CEM, EurOtop 및 港湾の施設の技術上の基準・同解説의 식은 각각 서로 다른 형태를 가지고 있음에도 불구하고, 쇄파 발생 영역인 $\xi_{m0} < 2 \sim 3$ 의 범위에서는 세 가지 산정식에 의한 결과가 매우 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 사석 사면에서의 임의의 초과확률에 대한 처오름 높이 산정에는 세 가지 설계도서가 모두 식 (4)를 사용하고 있음을 확인하였다.

이 논문에서는 우리나라 설계 기준의 경우 처오름 높이 산정식을 제시하고 있지 않기 때문에 국외의 설계 기준과 함께 비교하지 못하였지만, 바닥 및 제체의 형상, 입사파의 조건 등이 구체적으로 결정된다면 처오름 높이 산정 결과를 비교해 보는 것이 가능할 것이다. 실무에서 보조적 수단으로 미국, 유럽, 일본의 설계 기준에 의한 처오름 높이 산정을 시행해 보아 국내 설계 기준에 의한 결과와 상호 비교해 본다면 의미있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 내용은 한국해양연구원 기본연구사업인 “친환경 인공섬 조성 핵심기술 개발”의 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.
- Battjes, J.A. (1974). *Computation of set-up, longshore currents, run-up, and overtopping due to wind-generated waves*. Report 74-2, Delft University of Technology.
- Delft Hydraulics (1989). *Slopes of loose materials: wave run-Up on statistically stable rock slopes under wave attack*, Delft Hydraulics Laboratory.
- Mase, H. (1989). Random Wave Runup Height on Gentle Slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 115(5), 649-661.
- The EurOtop Team (2007). *EurOtop - Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*.
- US Army Corps Engineers (2002). *Coastal Engineering Manual*.
- 日本港湾協会(2007). 港湾の施設の技術上の基準・同解説