

## 파도작용에 의한 기동물깊이계산공식들의 비교

김형식, 문남철

기동물깊이는 해안대의 바다쪽 경계, 잠수구조물과 설비들의 매물한계를 결정하는 기본파라미터로서 해안대에 분포된 자원의 개발과 환경보호, 해안대의 퇴적환경해석에서 중요한 의의를 가진다.

선행연구[1-3]에서는 퇴적물의 기동에 대한 극한평형리론에 따라 파도가 작용할 때 기동물깊이를 계산하는 여러가지 방법들을 제기하였다. 그런데 계산공식들의 형태가 각이하고 실험도표를 리용하는것으로 하여 계산공식들의 물리적의미와 적용특성을 비교하기가 힘들고 계산과정이 복잡하다.

본문에서는 선행한 계산공식들을 비교하고 계산이 간단하도록 아크쌍곡시누스형태로 표준화하고 파도요소와 퇴적물립도에 따르는 계산값들의 차이를 평가하였다.

### 1. 기동물깊이계산식들의 표준화

적은 량의 퇴적물의 이동이 오래동안 지속되는 경우에는 퇴적물의 수송과 퇴적에서 무시할수 없으므로 퇴적물의 기동은 보통 국부기동단계를 기준으로 하여 결정한다.[1] 국부기동상태에서 파도작용파라미터는 퇴적물립자에 대한 힘평형방정식에 기초하여 다음과 같이 계산한다.

$$M = \frac{\rho u_m^2}{(\rho_s - \rho)gd}$$

여기서  $\rho_s$ 와  $\rho$ 는 각각 퇴적물과 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $u_m$ 은 파도작용밑에서 바닥물흐름의 최대속도,  $d$ 는 퇴적물립도이다.

파도작용파라미터  $M$ 이 기동파도작용파라미터  $M_c$ 보다 크면 퇴적물의 기동이 일어난다.

우리는 널리 리용되는 4개의 기동물깊이계산식들을 아크쌍곡시누스형태로 표준화하였다.

코마르방법[1]에서는  $d = 0.5\text{mm}$ 를 충흐름과 막흐름의 경계립도로 보고 다음과 같은 기동파도작용파라미터를 제기하였다.

$$M_c = \begin{cases} 0.21(2a_m/d)^{1/2}, & (d < 0.5\text{mm}) \\ 0.46\pi(2a_m/d)^{1/4}, & (d \geq 0.5\text{mm}) \end{cases}$$

여기서  $a_m$ 은 바닥경계층에서 질점의 운동자리길반경으로서 파고  $H$ , 파장  $L$ , 파주기  $T$ , 파수  $k = 2\pi/L$ , 물깊이  $h$ 가 주어졌을 때 다음의 식

$$u_m = \pi H / [T \operatorname{sh}(kh)], \quad a_m = u_m T / (2\pi) = H / [2\operatorname{sh}(kh)]$$

를 리용하여 계산할수 있다.

퇴적물립자가 기동상태에 있을 때 파도작용파라미터와 기동파도작용파라미터가 같다고 보고 물깊이  $h$ 를 기동물깊이  $h_c$ 로 바꾼 다음  $\pi=3.14$ ,  $g=9.8\text{m/s}^2$ ,  $\rho_s=2\,650\text{kg/m}^3$ ,  $\rho=1\,000\text{kg/m}^3$ 를 대입하고 정돈하면 다음과 같은 기동물깊이계산식을 얻을수 있다.

$$h_c = \begin{cases} \frac{L}{2\pi} \text{arcsch}\left(2.04 \frac{H}{d^{1/3} T^{4/3}}\right), & (d \leq 0.5\text{mm}) \\ \frac{L}{2\pi} \text{arcsch}\left(1.18 \frac{H}{d^{3/7} T^{8/7}}\right), & (d > 0.5\text{mm}) \end{cases} \quad (1)$$

마드슨방법에서는 쉴즈실험도표와 결합한 기동물깊이계산식을 제기하였다. 쉴즈실험도표의 가로축은 파도작용조건에서의 쉴즈결수  $\psi = \frac{\tau_m}{(\rho_s - \rho)gd} = \frac{f_w \rho u_m^2}{2(\rho_s - \rho)gd}$ 이고 세로축은 퇴적물파라미터  $s = d \sqrt{(\rho_s / \rho - 1)gd} / (4\nu)$ 이다. 여기서  $f_w$ 는 파도마찰결수,  $\nu$ 는 물의 동력학적점성결수이다.

계산한  $\psi$ 가 기동파도작용파라미터  $\psi_c$ 보다 클 때 퇴적물립자는 기동한다.  $\psi_c = 0.05$ 라고 하면 다음과 같은 기동물깊이계산식이 얻어진다.

$$h_c = \frac{L}{2\pi} \text{arcsch}\left(0.22 \frac{H}{d^{1/2} T}\right) \quad (2)$$

호리가와방법[2]에서는 먼 바다의 파도요소  $H_0$ ,  $L_0$ 과 해안대의 파도요소  $k=2\pi/L$ ,  $H$ 를 리용하여 다음과 같은 관계식을 제기하였다.

$$H_0 / L_0 = \alpha (d / L_0)^n \text{sh}(kh_c) (H_0 / H)$$

국부기동단계에서의 결수  $\alpha$ 와 지수  $n$ 은 각각 0.565, 1/3이다. 기동물깊이에 해당하는 해안대의 바다쪽 경계에서 파도요소들은 먼 바다에서와 차이가 없으므로  $H=H_0$ ,  $L=L_0$ 이라고 보고 기동물깊이계산식을 유도하면 다음과 같다.

$$h_c = \frac{L}{2\pi} \text{arcsch}\left(1.77 \frac{H}{d^{1/3} L^{2/3}}\right) \quad (3)$$

류가구방법[3]에서는 퇴적물립자들의 점성과 삼투현상을 고려하여 다음과 같은 기동물깊이계산식을 제기하였다.

$$h_c = \frac{L}{4\pi} \text{arcsch}\left[\frac{\pi g H^2}{M^2 L [(\rho_s - \rho)gd / \rho + \beta \varepsilon_k / d]}\right]$$

여기서 파라미터들의 단위는 cm, g로 표시되어있다.  $M$ 과  $\beta$ 는 경험결수,  $\varepsilon_k$ 는 현이질확산결수로서 각각  $M=0.85(L/d)^{1/3}$ ,  $\beta=0.039$ ,  $\varepsilon_k = \varepsilon / \rho = 2.56\text{cm}^3/\text{s}^2$ 이다. 앞에서와 같은 방법으로 기동물깊이계산식을 정리하면 다음과 같다.

$$h_c = \frac{L}{4\pi} \text{arcsch}\left[899 \frac{H^2}{(1\,617d^{1/3} + 0.1d^{-5/3})L^{5/3}}\right] \quad (4)$$

식 (1)–(4)의 아크쌍곡시누스항에 포함된 파라미터들과 그것들의 지수들을 종합하면 표 1과 같다.

표 1. 아크쌍곡시누스항의 파라미터들과 그것들의 지수

계산식	립도 $d$	파고 $H$	파주기 $T$	파장 $L$
(1)	1/3, 3/7	1	4/3, 8/7	—
(2)	1/2	1	1	—
(3)	1/3	1	—	2/3
(4)	1/3, -5/3	2	—	5/3

표 1에서 보는바와 같이 모든 식들에 립도와 파고가 있으며 식 (1)과 (2)에는 파주기가, 식 (3)과 (4)에는 파장이 포함되어있는데 일반적으로 파장이 클수록 파주기가 길어진다. 그러므로 계산공식들의 물리적의미에서는 큰 차이가 없다고 볼수 있다. 그리고 식 (4)에서 립도의 지수가 다른 식들과 크게 차이난다.

이로부터 계산한 기동물깊이는 파고가 높을수록, 립도가 작을수록, 파주기가 짧을수록 커진다. 파장의 영향은 립도와 파고에 따라 달라지지만 일반적으로 파장이 길수록 기동물깊이는 증가한다. 그리고 파장이 길수록 기동물깊이에 미치는 립도의 영향이 커지고 파고의 영향은 약해진다.

식 (4)를 리용하여 기동물깊이를 계산하면 다른 식들과 달리 퇴적물들의 립도가 매우 작은 구간에 놓일 때 립도가 작을수록 기동물깊이값이 커지는것이 아니라 반대로 작아지는데 이것은 퇴적물립자들의 점성과 관계된다.

## 2. 파도요소와 립도에 따르는 기동물깊이변화

연구지역에서 년중 최대가능한 파고는 6m정도이다. 16년간 바람방향과 바람속도자료를 리용하여 결정한 연구지역의 년평균최대파고와 파장, 파주기는 각각 3.3, 75.6m, 6.71s이다.

우리는 연구지역의 년평균파고빈도률자료[1]로부터 가능한 9가지 파고를 설정하였다. 그리고 관측결과에 기초하여 여기에 각각 바람파도에 해당하는 짧은 파장 및 짧은 파주기, 멀기에 해당하는 긴 파장 및 긴 파주기를 배합하여 모두 18개의 가상적인 파도요소들을 설정하였다. 연구지역 해안대에 분포되어있는 결층퇴적물의 가능한 립도구간은 0.008—4mm이다.

$d=0.125\text{mm}$  일 때 4개의 계산식들을 리용하여 계산한 기동물깊이는 표 2와 같다.

표 2. 파도요소에 따르는 기동물깊이

No.	파도요소			기동물깊이/m				No.	파도요소			기동물깊이/m			
	$H/\text{m}$	$L/\text{m}$	$T/\text{s}$	식 (1)	식 (2)	식 (3)	식 (4)		$H/\text{m}$	$L/\text{m}$	$T/\text{s}$	식 (1)	식 (2)	식 (3)	식 (4)
1	0.5	4	2.0	1.69	1.78	1.47	1.77	10	2.5	31	6.0	14.36	14.57	13.92	13.25
2	0.5	6	3.0	2.29	2.16	1.83	2.33	11	3.0	20	5.5	10.78	10.35	9.83	10.31
3	1.0	6	3.0	2.95	2.82	2.48	3.00	12	3.0	40	6.0	18.61	19.96	19.12	16.91
4	1.0	12	4.0	5.01	4.92	4.41	4.89	13	3.5	20	6.0	14.78	14.66	14.07	10.80
5	1.5	9	4.0	4.62	4.27	3.89	4.60	14	3.5	55	7.0	33.13	27.00	26.29	22.27
6	1.5	18	5.0	7.91	7.69	7.14	7.53	15	4.0	35	6.0	18.39	19.07	18.34	17.03
7	2.0	13	5.0	6.76	6.15	5.75	6.60	16	4.0	62	7.5	28.79	30.85	30.27	25.44
8	2.0	25	6.0	9.13	10.33	10.86	10.51	17	4.5	39	7.0	20.77	20.71	20.20	19.16
9	2.5	16	5.0	8.54	8.14	7.64	8.26	18	4.5	76	7.5	35.08	39.24	38.54	30.55

표 2에서 보는바와 같이 파고  $H < 1.5\text{m}$  일 때 계산값들이 크게 차이하지 않는다.

퇴적물의 립도가  $d = 0.125\text{mm}$  일 때 최대파고에서 파장에 따르는 기동물깊이를 계산한 결과는 표 3과 같다.

표 3. 최대파도때 파장에 따르는 기동물깊이

$L/\text{m}$	기동물깊이/m			
	식 (1)	식 (2)	식 (3)	식 (4)
20	11.08	9.81	9.50	10.61
30	15.33	14.71	14.26	14.29
40	19.21	19.62	19.01	17.52
50	22.83	24.53	23.77	20.41
60	26.24	29.43	28.52	23.03
70	29.47	34.34	33.28	25.43
80	32.57	39.24	38.03	27.64

$H=3.3\text{m}$ ,  $T=6.71\text{s}$ ,  $d=0.125\text{mm}$

표 3에서 보는바와 같이 파장이 작은 구간 ( $L = 20 \sim 30\text{m}$ )에서는 4개 식들을 리용하여 계산한 기동물깊이값들이 크게 차이하지 않는다. 그리고 파장이  $40\text{m}$ 이상일 때 식 (4)를 리용하여 계산한 기동물깊이값이 가장 작다.

일반적으로 기동물깊이는 같은 파도조건에서도 퇴적물의 립도에 따라 달라진다. 퇴적물의 점성을 고려하지 않으면 퇴적물의 립도가 클수록 기동물깊이는 작아진다. 최대파도조건에서 립도에 따르는 기동물깊이를 계산한 결과는 표 4와 같다.

표 4. 최대파도때 립도에 따르는 기동물깊이

$d/\text{mm}$	기동물깊이/m				$d/\text{mm}$	기동물깊이/m			
	식 (1)	식 (2)	식 (3)	식 (4)		식 (1)	식 (2)	식 (3)	식 (4)
0.008	42.26	48.16	52.57	18.15	0.25	28.45	34.29	31.76	25.46
0.016	39.47	45.37	48.36	23.64	0.5	25.72	31.52	27.63	24.11
0.032	36.68	42.57	44.18	26.82	1	23.01	34.42	23.55	22.72
0.063	33.95	39.84	40.07	27.43	2	20.38	30.86	19.59	21.33
0.125	31.21	37.08	35.94	26.69	4	17.80	27.32	15.83	19.93

$H=3.3\text{m}$ ,  $L=75.6\text{m}$ ,  $T=6.71\text{s}$

표 4에서 보는바와 같이 퇴적물의 립도가 작아짐에 따라 계산값들사이에 차이가 커진다. 그리고  $d = 0.5 \sim 4\text{mm}$  인 굵은 립군인 경우 식 (1), (3), (4)를 리용하여 계산한 기동물깊이값들은 비슷하다. 그런데 식 (4)를 리용하여 계산한 기동물깊이값은  $0.008 \sim 0.063\text{mm}$ 까지는 커지다가 그 이상의 립도에서는 다시 작아지는것이 특징이다.

동조선만 해안대 결층퇴적물의 평균립도는 지역과 물깊이에 따라 각이한데 퇴적물의 립도가  $d = 0.016 \sim 0.25\text{mm}$  인 구간에서 변한다고 보고 계산한 기동물깊이의 변화구간은  $25 \sim 49\text{m}$ 이다.

## 맺 는 말

1) 4개의 기동물깊이계산식들을 표준화한데 의하면 계산공식들은 물리적의미에서 볼 때 큰 차이가 없다.

2) 파도세기가 약할수록, 립도가 클수록 4개의 식을 리용하여 계산한 기동물깊이값들이 크게 차이하지 않는다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김룡홍 등; 해안동력지질학, 김일성종합대학출판사, 127, 주체100(2011).
- [2] Kiyoshi Horikawa; Nearshore Dynamics and Coastal Processes, University of Tokyo Press, 118 ~127, 1988.
- [3] 严恺 等; 海沿工程, 海洋出版社, 208, 2012.

주체105(2016)년 1월 5일 원고접수

## **Contrast of the Formulas to Calculate Starting Depth by the Wave**

*Kim Hyong Sik, Mun Nam Chol*

We compared the previous formulas calculating starting depth, standardized them into the form of archyperbolic sine for simple calculation, and estimated difference between the calculating values according to the wave elements and sediment grain-size.

As standardizing 4 formulas calculating starting depth, the formulas are not remarkably different in physical mean.

As decreasing the wave intensity and increasing a grain-size, the starting depth values calculated by 4 formulas are not remarkably different.

Key words: wave, starting depth