조류속에 따른 사석직경및 중량공식 검토

(Formulars Review of Tidal Current - Stone Diameter & Weight for Closure of Tidal Basins)

徐 榮 濟

1. 서론

방조제를 축조하여 내수면을 개발하고 간척지를 조성하는 대단위간척사업에서 방조제의 최종 끝막이공사는 시간적으로 변하는 조석의 조건에 따라 그 성공여부가 결정되는 만큼 자연과의 숨막히는 한판 싸움결정전이라 할 수 있다. 최종끝막이에 이용되는 사석의 크기는 상기 싸움판의 성패여부를 판가름 하는데 매우 중요한 요소가 된다. 즉 방조제 계획노선의 기초바닥에 안착된 사석과 1차 전진사석의 선단부에 걸린 돌은 조류흐름에 의한 소류력및 전단응력, 그리고 부력과 사석의 표면력에 작용하는 점착력등의 방해로 인하여 이동하지 않고 안정할 수 있는가 하는 검토는 매우 중요하다. 따라서 사석의 안정과 이동이 방조제 개방구간의 유속 하나만의 함수에 국한되지 않고 국부적으로 발생하는 와류현상등에 의한 영향도 많이 받으나 본 연구는 시화방조제의 최종 끝막이 공사를 통하여 현장에서 관측된 조류속과 실지 공사에 이용된 사석의 크기및 중량관계를 기초로 하여 현재 시공 현장에서 이용하고 있는 제반공식들을 검토, 재조명함으로서 향후 방조제 설계시 기초자료로 활용되기 위함이다.

2. 화란의 방조제 축조시 사용된 간이공식(Netherlands 공식)

화란의 Delft University에서 발간된 The Closure of tidal Basins[2]에 의하면 화란의 방조제 축조시 최종 끝막이공사에서 모래 또는 옮주머니가 사용된 사례가 있었다. 이 공식은 단순히 접근유속과 상대밀도의 함수로 구성되어 있으며 수중에서 안착된 주머니의 중량이 흐름에 충분히 견딜 수 있도록 설계를 하였다. 이 식은 점축식으로는 고려되지 않았고 단지 해상에서 선박을 이용하여 투하된 것으로 가정하여 농수산부에서 발간된 농지개량사업설계기준(해면간척)편[7]에 방조제의 바닥다짐공 설계를 위하여 이미 인용되었다. 단지 상기 인용공식에서는 단위환산을 위하여 접근유속계수 α를 약간 변형(0.28와 0.5)시켜 적용하였으며 여기서는 그 원식을 이용하여 끝막이 공사에 따른 사석의 크기를 계산하는데 참고식으로 검토하였다.

농어촌진흥공사 시화사업단

$$\Delta D_n > \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

여기서 $\Delta=(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$, V=유속, g=중력가속도, D_n=사석의 가상직경, ρ_s=사석의 단위중량, ρ_w=물의 단위중량이다. 또 α 는 접근유속의 계수로서 일반적으로 1.1을 적용하고 난류현상이 심할경우 1.4까지 적용한다. 따라서 상기(1)식을 이용하여 유속에 따른 사석의 직경을 계산 할 경우 접근유속계수 α=1.1은 방조제 노선의 상고및 접고사석의 계산용으로 흐름이 다소 정상류일때, 그리고 α=1.4는 점축식으로 사석전진할 경우 흐름이 다소 불안정한 선단부의 사석 크기결정에 이용하였다. 또 사석의 중량은 (1)식에서 계산된 사석의 가상직경을 이용하여 아래(2)식으로 계산할 수 있다.

$$D_n = (W / \rho_s)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 W=사석의 중량으로 형상을 정육각형으로 가정한 것으로서 여러형태의 사석크기를 이용할 경우 전체사석의 50%가 상기 계산중량을 초과하여야 한다.

3. Isbash공식

참고문헌[1]에 의하면 하구에서 조석의 영향이 미치는 수로의 사면보호는 크게 나누어 두가지 목적이 있다고 하였다. 첫째는 제방의 침식을 방지하기 위한 것이며 둘째는 하폭의 유지를 위하여 퇴적방지용이 그것이다. 즉 제방의 침식을 방지하기 위하여 유속에 저항할 수 있는 호안용의 피복사석에 대한 규모결정이 중요하며 조석의 영향이 있는 수로에서는 퇴적방지와 하폭유지를 위해서도 사석을 이용한 사면피복이 필요하다. Isbash는 아래와 같은 실험조건에 전제로 실험공식을 제시하였다.

- 사석의 크기는 유속의 함수로 나타낸다.
- 사용되는 유속값은 제방으로부터 10ft(3.0m) 떨어진 곳의 유속을 이용한다.
- Isbash가 제시한 공식은 흐르는 물에 있어서 제방을 안정하게 보호할 수 있도록 제시된 것이며 이 공식은 제방의 사면기울기와 밀접한 관계가 있다.

$$W = \frac{4.1 \times 10^{-5} \times G_s \times V^6}{(G_s - 1)^3 \times \cos^3 \theta} \quad (3)$$

여기서 W=사석중량(pounds), G_s=사석의 비중, V=유속, θ=수평에 대한 사면기울기이다. 이 공식은 수심이 40ft(12m)이상이 되면 적용이 곤란하고 30ft(약 9.0m)이하의 범위내에서 이용하는 것이 좋다고 하였고 사면의 기울기(θ)도 30° 이하의 범위내로 한정되어 있고 그 이상이 될 경우는 특별히 메트레스나 기타 사면보호용 재료를 첨가하여야 한다. 참고문헌[4][5]에 의하면 안정된 사석중량을 유도하기 위하여 Isbash는 유속과 사석의 직경과의 함수식을 다음과 같이 유도하였다.

$$V = y(2g)^{1/2} \left(\frac{W_r - W_w}{W_w} \right)^{1/2} (\cos\theta - \sin\theta)^{1/2} D^{1/2} \quad (4)$$

여기서 V=유속, y는 피복석의 시공상태에 따른 계수로서 노출된 경우는 0.86 또는 흙에 묻힌 경우는 1.2, W_r=사석의 단위중량, W_w=물의 단위중량, g=중력가속도이다. 따라서 상기 (4)식과 사석의 형상을 원형으로 가정하여 사석의 중량결정을 위한 유속의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$W = \frac{\pi \times W_r \times V^6}{6 \times y^6 \times (2g)^3 \times [(W_r - W_w)/W_w]^3 \times (\cos\theta - \sin\theta)^3} \quad (5)$$

상기식을 농지개량사업설계기준(해면간척편)[7]과 항만설계기준(건설부)[6]에 나타난 공식으로 변환하여 나타내면 다음과 같다.

$$W = \frac{\pi \times W_r \times V^6}{48 \times y^6 \times g^3 \times (G_s - 1)^3 \times (\cos\theta - \sin\theta)^3} \quad (6)$$

여기서 $G_s=(W_r/W_w)$이다. Isbash공식을 이용하여 유속변화에 따른 사석의 중량을 먼저 계산하고 사석중량에 따른 사석의 직경을 (2)식과 같이 정육면체로 가정하여 검토하였다. 상기에서 언급된 Isbash공식은 사석과 해수의 단위중량을 2650kg/m^{3}과 1025kg/m^3, Isbash의 계수는 사석이 노출된 경우만 고려하여 y=0.86을 적용한 것이다. 실제 현장에서 적용할때는 사면의 각도가 θ=0 일 경우는 해상작업을 통하여 방조제 축조시 바닥보호를 위한 상고용 사석과 점고용의 설계자료로 이용할 수 있고 θ=30° 의 결과치는 육상에서 덤프로 접축식으로 전진할때의 사석크기로 이용할 수 있다.

4. Shields공식

사석의 크기를 계산하기 위하여 상기에서 언급된 두가지 공식의 구성요소는 유속 하나만의 함수로 전단면에서 수심별 평균유속이 일정하다고 가정하여 유도된 것이다. 그러나 실제로 한 단면에서의 유속은 조량이 통과하는 통수단면의 형상과 수심에 따라 그 크기가 매우 다양하게 나타남으로 수심별 유속분포가 고려된 Shields공식을 새만금지구의 화란 용역단[3]이 추천하였다. 시화방조제의 최종연결 끝막이 구간은 상고 및 점고상태에 따라 수심이 다르며 시간에 따라 조위가 변화함으로 여러가지의 수리조건을 상상할 수 있다. 따라서 최대유속은 대조시 EL.=(+)5.0M의 수위에서 일어난다고 가정하고 일정수심에 대한 계산조건을 설정하여 Shields공식을 검토하였다. 먼저 바닥보호를 위한 상고및 점고용의 사석규모를 결정하기 위해서는 (7)식을 이용할 수 있다.

$$\Delta D_n = \frac{r\,(k \times u)^2}{c \times \phi} \quad (7)$$

여기서 r=안정계수(1.2), k=난류계수(1.1), u=유속, D_n=사석의 가상직경이다. c=Chezy의 조도계수로서 수심 및 사석직경에 따라 (11)식 및 (12)식으로 계산할 수 있다. 또 ϕ는 사석이 유속의 크기에 따라 이동이 시작되는 한계소류력을 나타내는 계수로서 (8)식으로 나타낼 수 있으며 Reynolds수와 전단응력에 대한 Shields' Diagram에서 0.04를 이용하였다.

$$\phi_{cr} = \frac{U^2_{cr}}{\Delta \cdot g \cdot D} = f\frac{(U^*_{cr} \cdot D)}{\nu} = f(Re^*) \quad (8)$$

그리고 육상에서 15t 덤프를 이용하여 접축식으로 전진할 경우는 상기(7)식에 방조제 선단부의 형상계수, K_s(Slope Correction Factor)를 고려한 (9)식을 적용할 수 있다.

$$\Delta D_n = \frac{r\,(k \times u)^2}{c \times \phi \times K_s^2} \quad (9)$$

$$K_s = [\cos\theta\,(1 - (\tan\theta/\tan\phi)^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (10)$$

여기서 θ=방조제 선단부의 사면경사(30°), ϕ=사석의 안식각(40°)이다. 또 Chezy의 조도계수 c는 c<25-30, 또는 h/D_n<4.0-7.5의 범위에서는 매우 민감하게 변화함으로 Strickler의 조도계수 산정방법인 (12)식을 추천하고 있다.

$$c(Chezy) = 18\log(6h/D_n) \quad (11)$$
$$c(Strickler) = 25\,(h/2D_n)^{0.166} \quad (12)$$

상기 두식을 이용하여 D_n=1.0m로 가정하고 계산수심 h=11.0m(EL.=-6.0 - +5.0m), 에 대한 조도계수를 계산하면 다음과 같다.

h=11.0m　　c = 18 log(6 x 11/1.0) = 32.8

　　c = 25 $(18/2.0)^{0.166}$ = 33.2

그리고 또 육상에서 접축식으로 사석전진할 경우는 수심의 1/2(h)되는 지점이 가장 위험하다고 가정하여 계산한다.

h=(11/2)=5.5m　　c = 18 log(6 x 5.5/1.0) = 27.3

　　c = 25 $(5.5/2.0)^{0.166}$ = 29.57

Shields공식에 대한 검토도 상기 Isbash공식의 조건과 같이 사석과 물의 단위중량을 동일하게 적용하였다.

5. 분석결과

이상으로 화란에서 간단하게 유도된 유속-사석규모 결정공식과 Isbash및 Shields공식을 이용하여 여러가지 조건별로 계산하였다. 표-1는 우선 3가지 공식에서 접고및 바닥보호공(상고)의 사석규모 결정을 위한 것으로 방조제 선단부의 사면각도를 Isbash와 Shields공식에서 무시하고 계산한 결과치이다. 그리고 또 화란의 간이공식에서도 접근유속의 계수를 일반적인 경우의 값(α=1.1)을 접고용으로 이용한 것이다. 그림-1과 그림-2는 상기결과치를 유속-사석직경 및 사석중량을 프롯트 한것으로서 N=1.1은 화란의 간이공식에 대한 결과치이며 Isbash(A=0)는 사면각도를 제로로 둔 것이다. 그리고 표-2는 상기 3가지 공식에서 전진사석의 선단부에서 발생하는 난류현상을 고려하거나 또는 전진부위의 사면경사를 고려한 것으로서 육상에서 덤프로 사석전진할 경우의 사석규모를 결정하기 위한 계산 결과치이다. 즉 Isbash나 Shields공식에서 사석선단부의 사면경사(각도=30도)를 고려하였고 화란의

간이공식에서도 α=1.4를 적용한 결과이다. 그림-3과 그림-4는 상기결과치를 유속별로 각각 프롯트한 것으로서 Isbash의 계산값이 유속 5.0m/sec를 기준으로 그 이상의 범위에서는 다소 과다하게 산정되어 최종 끌막이 발생가능 유속이 4 - 5m/sec를 초과 할시는 Isbash 공식의 사용에 주의가 요망된다. 그리고 전체적으로 화란의 간이공식의 값이 가장 적게 산정되었다. 따라서 앞으로 방조제 끌막이 공사시 이용되는 사석의 직경및 중량결정을 위한 공식은 최대유속이 5m/sec를 초과할시는 Isbash공식으로 산출된 값을 신중히 검토하여 사용하여야 할 것이며 될 수 있는 한 수심에 따른 그리고 조도계수의 영향을 고려한 Shields 공식의 사용을 추천한다.

참고문헌

[1] ASCE, Manuals and Reports on Engineering Practice No.54, Sediment Engineering, pp.531-534, (1975).

[2] Delft University Press, The Closure of Tidal Basin, P.650-652, (1984).

[3] NEDECO, Saemankeum Comprehensive Tideland Reclamation Project, Technical Report No.6,7,9,(1991).

[4] U.S.Army Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, Vol.II, pp.7-213-215, (1977).

[5] U.S.Army Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, Vol.II, pp.7-249-263, (1984).

[6] 건설부, 항만설계기준, pp.85-86.

[7] 농수산부, 농지개량사업설계기준 해면간척편, p.369, (1991).

표-1 유속-사석직경-중량 (접고및 상고용)

공식	화란		Isbash		Shields	
유속	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)
1.0	0.04	0.0002	0.03	0.0001	0.034	0.0001
2.0	0.14	0.0073	0.14	0.0073	0.135	0.0066
3.0	0.32	0.0868	0.32	0.083	0.305	0.075
4.0	0.57	0.491	0.56	0.47	0.541	0.421
5.0	0.89	1.868	0.88	1.79	0.846	1.605
6.0	1.27	5.428	1.26	5.33	1.218	4.791
7.0	1.74	13.96	1.72	13.45	1.658	12.08
8.0	2.27	31.00	2.25	29.97	2.166	26.92
9.0	2.87	62.65	2.84	60.75	2.741	54.58
10.0	3.54	117.6	3.50	114.4	3.384	102.7

표-2 유속-사석직경-중량 (접축용)

공식	화란		Isbash		Shields	
유속	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)
1.0	0.05	0.0003	0.07	0.0004	0.050	0.0004
2.0	0.18	0.015	0.28	0.029	0.208	0.024
3.0	0.41	0.183	0.62	0.33	0.469	0.273
4.0	0.72	0.989	1.11	1.89	0.834	1.536
5.0	1.13	3.824	1.73	7.21	1.303	5.861
6.0	1.62	11.27	2.49	21.48	1.876	17.50
7.0	2.21	28.60	3.39	54.19	2.554	44.13
8.0	2.88	63.30	4.43	120.76	3.335	98.33
9.0	3.65	128.9	5.61	244.77	4.221	199.4
10.0	4.51	243.10	6.92	460.54	5.212	375.1

- 유속=m/sec

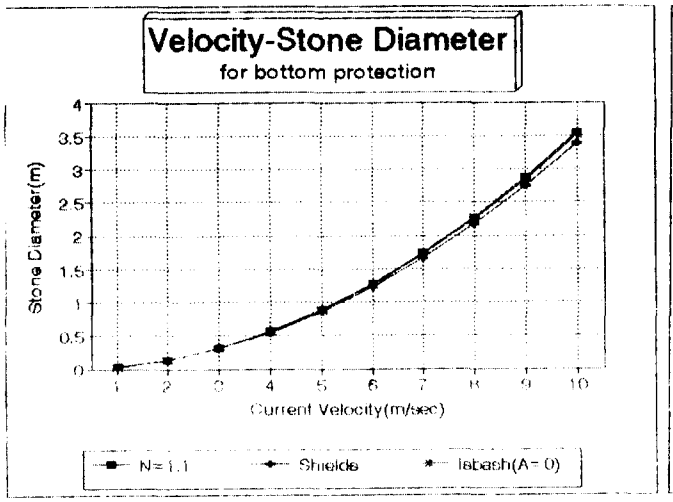

그림-1 유속-사석직경 관계도(상고및 접고용)

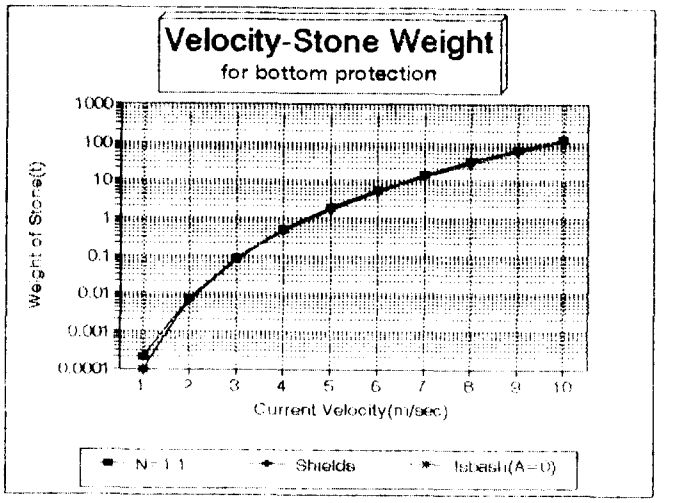

그림-2 유속-사석중량 관계도(상고및 접고용)

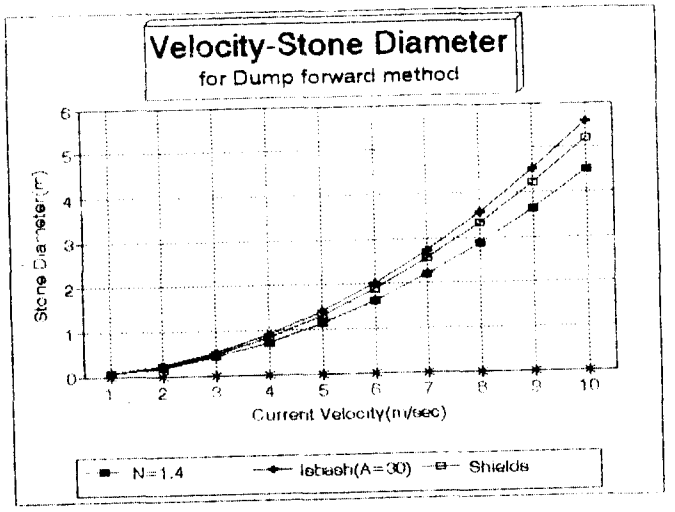

그림-3 유속-사석직경 관계도(접축용)

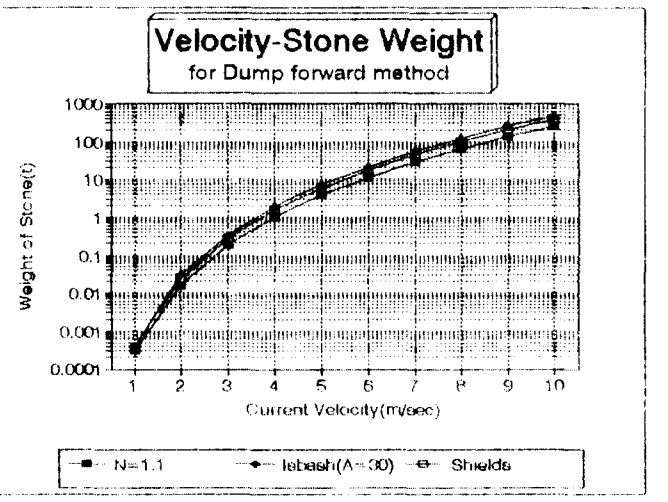

그림-4 유속-사석중량 관계도(접축용)