

조류속에 따른 사석규격 결정공식에 관한 연구

A Study on the Formulae of Tidal Current—Stone Size for the Closure of Tidal Basins

徐 榮 濟*
Suh, Young-jea

Abstract

In this study, formulae related tidal current-stone diameter and weight have been analyzed based on the real sea dike construction situation. Three formulae which denoted Shields, Isbash and Netherlands's simple method have been compared by the various tidal current condition at the closing of sea dike. Isbash and Netherland's simple formulae consist of only the velocity of tidal current while Shields formula considered not only the velocity but also the depth of flow the sea dike closure. Consequently Shields formula was represented more correct results through the comparison of real experimental field data in the Si-hwa tideland reclamation project.

I. 서 론

방조제를 축조하여 내수면을 개발하고 간척지를 조성하는 대단위간척사업에서 방조제의 최종 끝막이공사는 우리나라 서해안의 경우 시간적으로 변하는 조석의 조건에 따라 그 성공여부가 결정되는 만큼 자연과의 숨막히는 한판 싸움의 결승전이라 할 수 있다. 방조제의 끝물막이에 이용되는 사석의 크기는 상기 결승전의 성패여부를 판가름 하는데 매우 중요한 요소가 된다. 즉 방조제 계획노선의 기초바닥에 안착된 사석과 육지부에서의 전진사석 선단부에 걸린 돌은 조석의 흐름에 의한 소류력 및 전단응력, 그리고 부력 및 사석의 표면력에 작용하는 점착력 등의 영향으로 인

하여 이동하지 않고 안정할 수 있는가 하는 검토는 매우 중요하다.

방조제의 끝물막이 공사진행에 따라 개방구간이 줄어들므로 조류 흐름은 내·외 수위차에 의하여 한계류를 초과하여 급변류로 변하고 이에 대항하기 위한 사석의 초기운동은 조류속뿐만 아니라 방조제 계획노선의 방향 및 사석의 형상과 조류방향에 따른 와류운동의 영향이 대단히 크므로 이와같은 수리현상에 대한 보다 정밀한 분석을 실시하여야 한다.

본 연구는 시화방조제의 끝물막이 공사를 통하여 현장에서 관측된 조류속과 실지 공사에 이용된 사석의 크기 및 중량관계를 기초로 하여 현재까지 우리나라에서 설계에 이용되고 있는 이론

* 농어촌진흥공사, 조사설계처

키워드 : 수리, 수공, 유사량, 조류속, 사석, 방조제

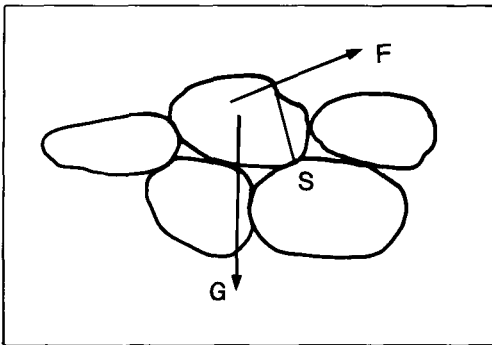
공식들을 검토, 조명함으로써 향후 방조제 설계시 기초자료로 활용되기 위함이다.

II. 이론적인 배경

유속의 빠르기에 견딜 수 있는 사석의 크기 및 중량공식은 하천의 유사량 산정공식과 그 기원은 같다. 가장 오래된 이론적인 공식은 1753년 Brahm가 사석의 중량을 유속의 6승으로 나타내었고 Dubuar(1779, 1786)²⁾는 유사입자의 초기운동 몇가지 실험을 통하여 수로바닥의 전단응력과 관계가 있다고 발표하였다. 가장 오래된 사석 직경과 유속과의 관계식은 다음과 같다.

$$U_{bed, cri} = (4-5) \cdot \sqrt{D} \quad (1)$$

여기서 D는 사석의 직경(m), U=유속(m/sec)을 나타내며 특히 하상에서의 이 식은 임의의 수로에서 하상바닥의 한계유속과 바닥에 안착된 돌의 직경과의 함수를 자승근으로 나타낸 최초의 방정식을 말해준다. 또 White(1940)는 하상에 있어서 자갈입자의 평형에 관하여 입자가 교란되는 힘을 <Fig. 1>과 같이 나타내었다. 이 그림에서 힘 F는 바닥의 전단응력(τ_0)과 입자의 표면적(D^2)에 비례한다고 하였다. 즉 상기 하상바닥에서의 전단응력 이론에서 사석의 안정력은 (2)식과 같이 $(\rho_s - \rho_w)gD^3$ 와 비례함을 알 수 있다. 따라서 사석과 사석간의 회전점 S를 기준으로 힘의 평형을 나타내면 다음식과 같다.



<Fig. 1> Initial movement of stone

$$\alpha_1 \cdot \tau_0 \cdot D \geq \alpha_2 \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot D \quad (2)$$

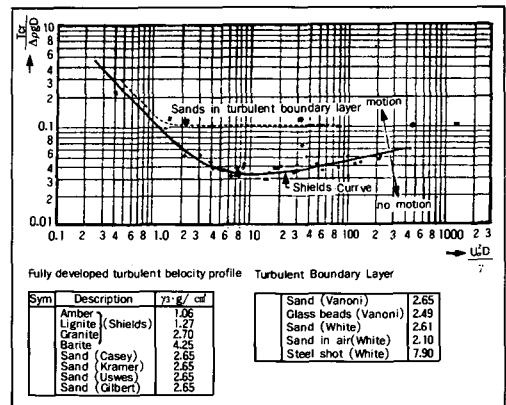
또는

$$\tau_0 \geq \Psi \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot gD \quad (3)$$

상기식에서 ρ_s =사석의 비중, ρ_w =물의 비중, g =중력가속도, τ_0 =하상의 전단응력, α_1, α_2, Ψ =바닥의 흐름상태, 사석형상, 사석과 사석간의 안식각등에 따른 각각의 계수 및 상수이다. (3)식에서 하상 바닥부근의 흐름조건은 바닥저층을 이루고 있는 입자크기와 전단유속에 따른 레이놀드수($U^* D / \nu = Re^*$)와 비례함을 알 수 있다. 그러므로 지금까지 발표된 모든 실험식들은 (3)식을 바탕으로 하여 다음 (4)식과 같이 유속과 하상물질의 소류력과의 함수로 표현하였다. 여기서 *는 모형실험의 실험치를 나타낸다.

$$\Psi_{cr} = U^*_{cr} / \Delta gD = f(Re^*) \quad (4)$$

식(4)에서 Ψ_{cr} 은 실험을 통하여 유도된 Shields의 무차원의 계수이며 Δ 는 물과 하상물질과의 상대 밀도, ν =동점성 계수이다. 많은 학자들에 의해서 (3)식을 기초로 하여 (4)식에 대한 실험치를 발표하게 되었고, 특히 1936년 Shields는 실험과 함께 다른학자들의 결과치를 조직적으로 분석하여 별도의 그 유명한 Shields곡선을 유도하게 된 것이다 <Fig. 2>. 물의 유속과 하상물질과의 관계는 결국



<Fig. 2> Shields diagram : dimensionless critical shear stress vs. shear Reynolds number

유사이동의 기본식으로 (5)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho_w)gD} = \frac{U_{cr}^{*2}}{\Delta g D} = f \frac{(U_{cr}^* D)}{v} = f(Re^*) \quad (5)$$

Ⅲ. 적용공식

1. 화란의 방조제 축조시 사용된 간이공식(Netherlands 공식)

가. 개요

J.M. Van Westen(1984)²⁾는 화란의 서쪽 방조제 축조시(Closure of flow gaps in the harbour moles at Zierikzee) 끝물막이 공사에서 모래 또는 흙주머니가 사용된 사례를 중심으로 다음과 같은 공식을 유도하였다. 이 공식은 단순히 접근유속과 공사에 사용된 재료의 상대밀도의 함수로 구성되어 있으며 수중에서 안착된 모래주머니의 중량이 흐름에 충분히 견딜수 있도록 설계를 하였다. 이 식은 점축식으로는 고려되지 않았고 단지 해상에서 투하된 것으로 가정하여 농지개량사업 설계기준(해면간척편)에서 바닥다짐공에 대한 설계재료의 결정을 위하여 이미 활용되었다. 단지 상기식에서 단위환산을 위하여 접근유속계수 α 를 약간 변형(0.2와 0.5)시켜 적용하였으며, 본 연구에서는 그 원식을 이용하여 끝막이 공사에 따른 사석의 크기를 계산하는데 참고식으로 검토하였다.

$$\Delta \cdot D_n > \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

여기서 Δ =상대밀도($\rho_s - \rho_w$) / ρ_w , V =유속, g =중력가속도, D_n =사석의 공칭직경, α 는 접근유속의 계수로서 일반적으로 1.1을 적용하고 난류현상이 심할 경우 1.4까지 적용한다. 따라서 상기(6)식을 이용하여 유속에 따른 사석의 직경을 계산할 경우 접근유속계수 $\alpha=1.1$ 은 상고 및 점공용으로 흐름이 다소 정상류일때, 그리고 $\alpha=1.4$ 는 점축식으로 사석전진할 경우 흐름이 다소 불안정한 선

단부에서의 사석크기의 결정에 이용하였다. 또 사석의 중량은 (6)식에서 계산된 사석의 가상직경을 이용하여 아래(7)식으로 계산할 수 있다.

$$D_n = \left(\frac{W}{\rho_s}\right)^{1/3} \quad (7)$$

여기서 W =사석의 형상을 정육각형으로 가정하여 나타낸 식이며, 여러가지 크기의 규모별 사석을 이용할 경우 전체 사석의 약 50%가 계산중량을 초과하여야 한다. 상기식을 이용하여 유속에 따른 사석의 직경과 중량을 계산하여 정리하면 <Table 1>과 같다.

나. 검토결과

<Table 1>에서 보는바와 같이 조류속의 증가에 따른 계산 결과치를 보면 $\alpha=1.1$ 일 경우 유속 7m/sec를 넘어서면 사석의 규모가 매우 커지므로 재료확보에 큰 어려움이 있고, 또 $\alpha=1.4$ 를 적용할 경우는 유속이 6m/sec를 한계로 그 이상은 현장에서의 적용이 사실상 불가능함을 나타낸다. 따라서 방조제의 최종 끝막이 공사에서는 이론유속이 6m를 초과하는 경우는 사석공법보다 케이슨과 같은 특별한 시공방법의 검토가 요망된다.

<Table 1> Velocity-stone diameter & weight (Netherlands formula)

Velocity m/ sec	Diameter(D), m		T(Weight), ton		Remark
	$\alpha=1.1$	$\alpha=1.4$	$\alpha=1.1$	$\alpha=1.4$	
1	0.04	0.05	0.0002	0.0003	α =Coefficient of Velocity
2	0.14	0.18	0.0073	0.015	
3	0.32	0.41	0.0868	0.183	
4	0.57	0.72	0.491	0.989	
5	0.89	1.13	1.865	3.824	
6	1.27	1.62	5.428	11.27	
7	1.74	2.21	13.96	28.60	
8	2.27	2.88	31.00	33.1	
9	2.87	3.65	62.65	128.9	
10	3.54	4.51	117.6	243.10	

2. Isbash 공식

가. 개요

ASCE(1975)¹¹⁾에 의하면 하구에서 조석의 영향이 미치는 수로의 사면보호는 크게 나누어 두가지 목적이 있다고 하였다. 첫째는 제방의 침식을 방지하기 위한 것이며 둘째는 하폭의 유지를 위한 유사 퇴적방지용이 그것이다. 즉 제방의 침식을 방지하기 위하여는 유속에 저항할 수 있는 호안용의 피복사석에 대한 규모결정이 중요하다. Isbash는 아래와 같은 실험조건을 전제로 실험공식을 제시하였다.

- 사석의 크기는 유속의 함수로 나타낸다.
- 사용되는 유속값은 제방으로부터 10ft(3.0m) 떨어진 곳의 유속을 이용한다.
- 사석크기 결정을 위하여 제시된 공식은 여러 가지 경우에 따라 다르며 산출된 결과값의 폭이 크다.
- Isbash가 제시한 공식은 흐르는 물에 있어서 제방을 안정하게 보호할 수 있도록 제시된 것이며 이 공식은 제방의 사면 기울기와 밀접한 관계가 있다.

상기가정을 전제로 Isbash가 제안한 최초의 공식은 아래와 같다.

$$W = \frac{4.1 \times 10^5 \times G_s \times V^6}{(G_s - 1)^3 \times \cos^3 \theta} \quad (8)$$

Isbash 공식도 결국은 1753년 Brahm스가 사석의 중량을 유속의 6승으로 나타낸 것과 같이 유도된 식이며 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 적용하는 것이 좋다. 그리고 사면의 기울기(θ)도 30° 이하의 범위내에서 적용하고 그 이상이 될 경우는 특별히 메트레스나 기타 사면보호용 재료를 첨가하여 사용하여야 한다.

나. Isbash 공식의 적용

CERC(1977)³⁾의 Shore Protection Manual에

의하면 수로의 호안을 위하여 사용할 피복석의 사석중량은 유속에 충분히 견딜 수 있도록 하는 것이 중요하다고 하였다. 안정된 사석중량의 산정공식을 유도하기 위하여 Isbash는 유속과 사석의 직경과의 함수식을 다음과 같이 유도하였다.

$$V = y(2g)^{1/2} \left(\frac{W_r - W_w}{W_w} \right)^{1/2} (\cos \theta - \sin \theta)^{1/2} D^{1/2} \quad (9)$$

여기서 V=유속, y=피복석의 노출상태에 따른 계수로서 노출된 경우는 0.86 또는 흙에 묻힌 경우는 1.2, W_r=사석의 단위중량, W_w=물의 단위중량, θ=수로측벽의 기울기, g=중력가속도이다. 따라서 상기 (9)식을 사석의 형태를 원형으로 가정하여 중량결정을 위한 유속의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$W = \frac{\pi \times W_r \times V^6}{6 \times y^6 \times (2g)^3 \times \left\{ \frac{W_r - W_w}{W_w} \right\}^3 \times (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (10)$$

상기 식을 농지개량사업설계기준(해면간척편)⁵⁾과 항만시설설계기준서(해운항만청)⁶⁾에 나타난 공식으로 변환하면 다음과 같다.

$$W = \frac{\pi \times W_r \times V^6}{48 \times y^6 \times g^3 (G_s - 1)^3 \times (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (11)$$

여기서 G_s=(W_r/W_w)이다. 그리고 새로이 출간된 CERC(1984)⁴⁾에 따라 상기(11)식의 삼각함수가 다소 변형된 신공식을 적용하면 (12)식과 같다.

$$W = \frac{\pi \times W_r \times V^6}{6y^6 \times (2g)^3 \times \left\{ \frac{W_r - W_w}{W_w} \right\}^3 \times \{1 - \sin^2 \theta - \sin^2 \phi\}^{3/2}} \quad (12)$$

상기식에서 φ는 사석의 안식각으로 일반적으로 40°로 계산한다. 따라서 θ=0로 할 경우는 (11)식과 (12)식의 계산 결과치는 같으나 θ≤30°의 범위에서 주어질 경우 그 결과치가 달라질 수 있다.

Isbash공식을 이용하여 유속변화에 따른 사석의 중량을 계산하고 사석의 중량에 따른 사석의

직경을 (7)식으로부터 다음(13)식을 유도하여 계산할 수 있다. 그리고 상기식을 이용하여 계산한 결과는 <Table 2>에서 정리하였다.

$$D = \{(6 \times W) / (W_r \times \pi)\}^{1/3} \quad (13)$$

<Table 2> Velocity—stone diameter & weight (Isbash)

Vel. (m/sec)	Old fomula				New formula			
	$\theta=0^\circ$		$\theta=30^\circ$		$\theta=0^\circ$		$\theta=30^\circ$	
	D(m)	T(ton)	D(m)	T(ton)	D(m)	T(ton)	D(m)	T(ton)
1	0.04	0.0001	0.07	0.0004	0.04	0.0001	0.12	0.0023
2	0.07	0.0073	0.28	0.029	0.17	0.0073	0.48	0.149
3	0.39	0.083	0.62	0.33	0.39	0.083	1.07	1.69
4	0.70	0.47	1.11	1.89	0.70	0.47	1.90	9.58
5	1.09	1.79	1.73	7.21	1.09	1.79	2.97	36.5
6	1.57	5.33	2.49	21.48	1.57	5.33	4.28	108.69
7	2.13	13.45	3.39	54.19	2.13	13.45	5.83	274.28
8	2.78	29.97	4.43	120.76	2.78	29.97	7.61	611.16
9	3.52	60.75	5.61	244.77	3.52	60.75	9.63	1238.83
10	4.35	114.30	6.92	460.54	4.35	114.4	11.89	2332.88

상기에서 언급된 Isbash공식의 계산결과는 사석의 단위중량을 2,650kg/m³, 물의 단위중량을 1,025kg/m³, Isbash의 계수는 사석이 노출된 경우만 고려하여 y=0.86을 적용하여 계산한 것이다. 실제 현장에서 적용할때는 사면의 각도 $\theta=0^\circ$ 일 경우 그 결과치는 해상작업을 통하여 방조제의 상고 및 점고시의 설계자료로 이용할 수 있고 $\theta=30^\circ$ 의 결과치는 육상에서 덤프로 점축식으로 전진할때의 사석크기로 이용할 수 있다.

3. Shields 공식

가. 개요

유속에 크기에 따른 사석의 직경 및 중량계산을 위하여 상기에서 언급된 두가지 공식의 구성요소는 유속 하나만의 함수로 전단면의 평균유속이 일정하다고 가정하여 유도된 것이다. 그러나 실제로 방조제를 축조하기 위한 끝물막이 상황에서는 개방된 한 구간에서도 유속은 조랑이 통과하는 통수

단면의 형상과 수심에 따라 그 크기가 매우 다양하게 나타남으로 수심별 유속분포의 형태를 고려할 필요성이 있다. 이와같은 경우는 수심별 유속의 변화조건을 고려할 수 있는 Shields공식이 적합함을 새만금지구의 기술자문 회의시 화란 용역단이 추천한 바가 있다.

나. Shields 공식의 적용

시화방조제의 최종 연결 끝막이 구간은 상고 및 점고상태에 따라 수심이 다르며 시간에 따라 조위가 변화함으로 여러가지의 수리조건을 상상할 수 있다. 따라서 최대유속은 대조시 EL.=5.0m를 가정하고 일정수심에 대한 계산조건을 설정하여 Shields공식을 적용하였다. 먼저 바닥보호를 위한 상고 및 점고용의 사석규모를 결정하기 위해서는 앞서 유도된 (5)식으로부터 (14)식을 이용할 수 있다. (NEDECO, 1991)²⁾.

$$\Delta \times D_n = \frac{r(k \times u)^2}{c^2 \times \phi} \quad (14)$$

여기서 r=안정계수(1.2), k=난류계수(1.1), u=유속, D_n=사석의 공칭직경(Nominal diameter)이다. c=Chezy의 조도계수로서 수심 및 사석직경에 따라 (18)식 및 (19)식으로 계산할 수 있다. 또 ϕ 는 사석이 유속의 크기에 따라 이동이 시작되는 한계소류력을 나타내는 계수로서 (15)식으로 나타낼 수 있으며 Shields의 곡선도에서 나타낸 0.04를 이용하였다.

$$\phi_{cr} = \frac{U_{cr}}{\Delta g D} = f \frac{(U_{cr}^* D)}{v} = f(Re^*) \quad (15)$$

그리고 육상에서 15t 덤프를 이용하여 점축식으로 전진할 경우는 상기(15)식에 방조제 선단부의 기울기 보정계수(Slope Correction Factor), (16)식을 고려하여 (17)식으로 나타낼 수 있다.

$$K_s = \{\cos\theta(1 - (\tan\theta / \tan\phi)^2)\}^{1/2} \quad (16)$$

$$\Delta \times D_n = \frac{r(k \times u)^2}{C^2 \times \phi \times K_s^2} \quad (17)$$

여기서 θ =방조제 선단부의 사면경사(30°), ϕ =사석의 안식각(40°)이다. 또 Chezy의 조도계수 C는 $C < 25-30$, 또는 $h/D_n < 4.0-7.5$ 의 범위에서는 매우 민감하게 변화하므로 Strickler의 조도계수 산정 방법인 (19)식의 사용을 추천하고 있다.

$$C(\text{Chezy}) = 18 \log(6h/D_n) \quad (18)$$

$$C(\text{Strickler}) = 25(h/2D_n)^{0.166} \quad (19)$$

상기 두식을 이용하여 $D_n=1.0\text{m}$ 로 가정하고 계산 수심 $h=11.0\text{m}$ (EL. = -6.0~+5.0m)에 대한 조도계수를 계산하면 다음과 같다.

$$h=11.0\text{m} \quad C(\text{Chezy}) = 18 \log(6 \times 11 / 1.0) = 32.8$$

$$C(\text{Stric.}) = 25(18 / 2.0)^{0.166} = 33.2$$

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

$$h = (11 / 2) = 5.5\text{m}$$

$$C(\text{Chezy}) = 18 \log(6 \times 5.5 / 1.0) = 27.3$$

$$C(\text{Stric.}) = 25(5.5 / 2.0)^{0.166} = 29.57$$

시화방조제의 최종 연결 끝막이를 위하여 상고 및 점고와 점축에 이용할 사석규모 결정은 <Table 3>에 계산하여 정리하였다. 이 결과는 시화지구의

<Table 3> Velocity-stone diameter & weight (Shields)

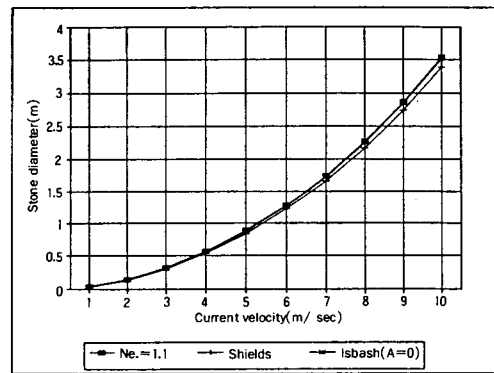
Items	Bottom Protection		Dump Forward	
	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)
1.0	0.034	0.0001	0.050	0.0004
2.0	0.135	0.0066	0.208	0.0240
3.0	0.305	0.075	0.469	0.273
4.0	0.541	0.421	0.834	1.536
5.0	0.846	1.605	1.303	5.861
6.0	1.218	4.791	1.876	17.50
7.0	1.658	12.08	2.554	44.13
8.0	2.166	26.92	3.335	98.33
9.0	2.741	54.58	4.221	199.4
10.0	3.384	102.7	5.212	375.1

실제 현장조건에 따라 최종 물막이 구간의 수심을 고려하여 계산된 것이므로 수심별 조건이 다를 경우 다시 계산하여야 한다.

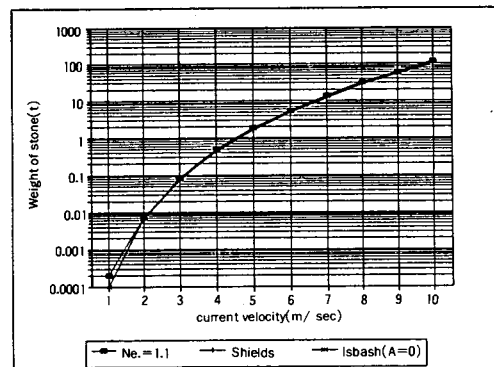
<Table 3>에서 Bottom protection의 경우는 상고 및 점고 시공시의 사석규격에 대하여 (14)식을 이용하여 계산한 결과이며 Dump forward의 경우는 (16)식을 이용하여 점축시공을 위한 사석의 규격이다.

IV. 적용공식의 검토

이상으로 화란에서 간단하게 유도된 유속-사석 규모 결정공식과 Isbash 및 Shields공식을 이용하여 여러가지 조건별로 계산하였다. <Table 4>는



<Fig. 3> Velocity-stone diameter(Bottom protection)



<Fig. 4> Velocity-stone weight(Bottom Protection)

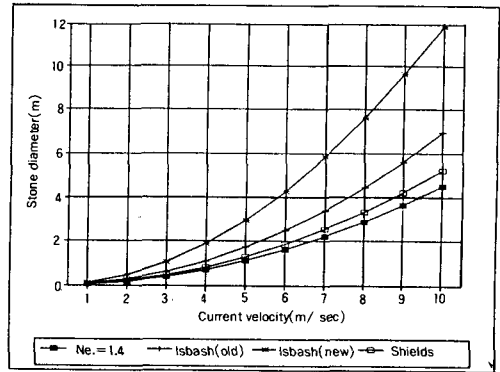
우선 3가지 공식에서 점고 및 바닥보호공(상고)의 사석규모 결정을 위한 것으로 방조제 선단부의 사면각도를 Isbash와 Shields 공식에서 무시하고 계산한 결과치이다. 그리고 또 화란의 간이 공식에서도 접근유속의 계수를 일반적인 경우의 값($\alpha=1.1$)을 점고용으로 이용한 것이다. <Fig. 3>과 <Fig. 4>는 상기 결과치를 유속-사석직경 및 사석중량을 프롯트 한것으로서 $N=1.1$ 은 화란의 간이 공식에 대한 결과치이다. 그 결과 일정수심에서의 평균유속별 사석중량은 3가지 공식에서 모두 비슷하게 나타났다. 그러나 Shields 공식의 경우 수심이 달라질 경우 그 결과가 달라짐은 후술하는 현장의 실험조건별 응용에서 알 수 있다.

<Table 4> Velocity-stone diameter & weight (Bottom protection)

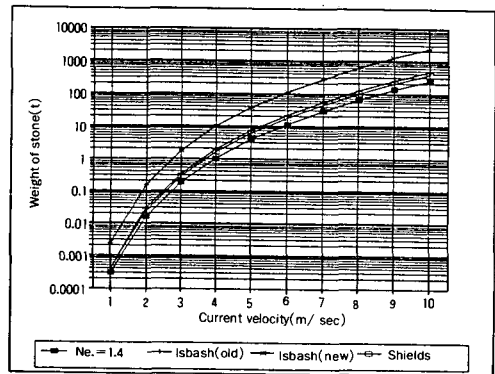
Formula	Netherlands		Isbash		Shields	
	Vel.	Dn(m)	T(ton)	D(m)	T(ton)	Dn(m)
1.0	0.04	0.0002	0.04	0.0001	0.034	0.0001
2.0	0.14	0.0073	0.07	0.0073	0.135	0.0066
3.0	0.32	0.0868	0.39	0.083	0.305	0.075
4.0	0.57	0.491	0.70	0.47	0.541	0.421
5.0	0.89	1.868	1.09	1.79	0.846	1.605
6.0	1.27	5.428	1.57	5.33	1.218	4.791
7.0	1.74	13.96	2.13	13.45	1.658	12.08
8.0	2.27	31.00	2.78	29.97	2.166	26.92
9.0	2.87	62.65	3.52	60.75	2.741	54.58
10.0	3.54	117.6	4.35	114.4	3.384	102.7

-Vel.=(velocity)m/ sec, Dn(m)=Diameter, T(ton)=Weight of Stone

그리고 <Table 5>는 상기 3가지 공식에서 전진 사석의 선단부에서 발생하는 난류현상을 고려하거나 또는 전진부위의 사면경사를 고려한 것으로서 육상에서 덤프로 사석전진할 경우의 사석규모를 결정하기 위한 계산 결과치이다. 즉 Isbash나 Shields 공식에서 사석선단부의 사면경사를 고려하였고 화란의 간이 공식에서도 $\alpha=1.4$ 를 적용한 결과이다. 또 Isbash 공식은 구공식과 신공식의 계산치가 달라 그 결과를 함께 나타내었다. <Fig. 5>와 <Fig. 6>은 상기 결과치를 유속별로 각각 프롯



<Fig. 5> Velocity-stone diameter(Dump forward)



<Fig. 6> Velocity-stone weight(Dump forward)

<Table 5> Velocity-stone diameter & weight (Dump forward)

Items	Netherlands		Isbash(old)		Isbash(new)		Shields	
	Vel.	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)
1.0	0.05	0.0003	0.07	0.0004	0.120	0.0023	0.050	0.0004
2.0	0.18	0.015	0.28	0.029	0.480	0.1490	0.208	0.024
3.0	0.41	0.183	0.62	0.33	1.07	1.69	0.469	0.273
4.0	0.72	0.989	1.11	1.89	1.90	9.58	0.834	1.536
5.0	1.13	3.824	1.73	7.21	2.97	36.5	1.303	5.861
6.0	1.62	11.27	2.49	21.48	4.28	108.69	1.876	17.50
7.0	2.21	28.60	3.39	54.19	5.83	274.28	2.554	44.13
8.0	2.88	63.30	4.43	120.76	7.61	611.16	3.335	98.33
9.0	3.65	128.9	5.61	244.77	9.63	1238.8	4.221	199.4
10.0	4.51	243.10	6.92	460.54	11.89	2332.88	5.212	375.1

트한 것으로서 이 결과에서도 Isbash의 계산값이 과다하게 산정되어 최종 끝막이 발생가능 유속이

4.5m/sec를 초과 할시는 Isbash공식의 사용에 주의가 요망된다.

그리고 전체적으로 화란의 간이공식과 Shields공식의 결과치가 상당히 근접함을 보여주고 있다. 따라서 앞으로 방조제 끝물막이 공사시 이용되는 사석의 직경 및 중량결정을 위한 공식은 최대유속의 5m/sec를 초과할시는 Isbash공식으로 산출된 값을 신중히 검토하여 사용하여야 할 것이며 될 수 있는 한 수심에 따른 그리고 조도계수의 영향을 고려한 Shields공식의 사용을 추천한다.

V. 현장실험 조건의 응용

상기에서 검토된 계산 조건중 화란공식과 Isbash공식의 경우는 단지 유속의 함수로서 최종 끝물막이 구간의 수심에 관계없이 사석의 직경과 중량을 계산할 수 있다.

그러나 Shields공식의 경우는 조도계수가 수심의 함수로 계산조건에 반영되므로 상기에서 검토된 각 공식간의 결과치만 단순 비교하는것은 다소 모순이 있다. Shields공식의 경우 상기계산 조건중 전체수심을 점고의 상단표고 E.L.= -6.0m와 최대만조위 E.L.= +5.0m로 두고 11m로 계산하였다. 그러나 시화지구의 경우 최종 끝막이를 완료

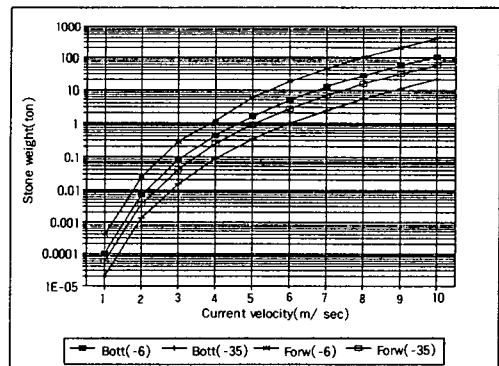
하면서 기초지반의 평균 세굴심도가 약 35m에 달하였으므로 현지조건을 감안한 계산 결과치가 필요하였다. <Table 6>은 Shields공식을 이용하여 당초 계획수심과 공사중 발생된 상황을 비교하여 나타낸 것이다. 상기표에서 실지로 최종 끝막이 계획에서(수심=-6m) 유속 6~7m/sec일 경우 예상되는 점고용 사석의 실제중량은 5~13ton 임에도 당초 설계재료가 2~3ton의 돌망태 및 All Size로 시공되었으므로 필요 충분조건이 되지 못하며 지반세굴이 발생하고 난 다음의 실제 시공실적의 경우는(수심=-35m) 발생유속 7~8m/sec에서 필요한 사석중량이(점고를 포함한 점축용) 5~15ton임으로 시공에 이용된 3x5ton 돌망태가 충분히 견딜 수 있었음이 증명되었다.

VI. 결론

이상으로 조류속의 따른 사석직경 및 중량결정에 관한 공식을 시화지구의 시공사례를 실적으로 하여 검토하였다. Isbash공식에 의한 조류속-사석중량의 계산결과는 조류속의 빠르기에 대한 수심의 함수가 고려되지 않은 관계로 계산 결과의 정밀도가 떨어질 뿐 아니라 수심이 깊을 경우 결과치가 과다하게 산정되므로 실지로 현장에서 계산된 규격사석으로 시공하기는 불가능하다(Ref. Fig. 7). 따라서 끝물막이의 이론유속에 대한 사석중량 결정은 현장조건에 해당되는 수심의 함수를 고려할 수 있는 Shields공식을 적용함으로써 발생유속에

<Table 6> Comparison of shields results for depth condition

Case	Planning Depth = EL. -6.0m				Real Depth = EL. -35.0m			
	Bottom Protec.		Dump Forward		Bottom Protec.		Dump Forward	
Vel.	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)	Dn(m)	T(ton)
1.0	0.034	0.0001	0.050	0.0004	0.0198	0.00002	0.0278	0.00006
2.0	0.135	0.0066	0.208	0.024	0.079	0.0013	0.1112	0.0036
3.0	0.305	0.075	0.469	0.273	0.178	0.015	0.2502	0.0415
4.0	0.541	0.421	0.834	1.153	0.316	0.084	0.445	0.233
5.0	0.846	1.605	1.303	5.861	0.494	0.320	0.695	0.889
6.0	1.218	4.791	1.876	17.501	0.712	0.956	1.001	2.660
7.0	1.658	12.08	2.554	44.131	0.969	2.411	1.360	6.700
8.0	2.166	26.92	3.335	98.332	1.270	5.370	1.780	14.92
9.0	2.741	54.58	4.221	199.40	1.602	10.890	2.250	30.25
10.0	3.384	102.7	5.212	375.10	1.978	20.490	2.780	56.93



<Fig. 7> Comparison of shields results for different depth condition

대한 규격사석을 크기별로 준비할 수 있을 것이다. 이와같은 타당한 논리가 시화지구의 끝막이 기간 중 세굴 전에는 5×5ton 돌망태도 유속에 대항하지 못한점에서 입증되며 또 수심이 -35m정도 세굴후의 상태에서는 5ton 돌망태보다 작은 규격의 사석도 살아 남아 끝막이를 성공함으로써 Shields 공식의 정확도를 증명하였고 아울러 Isbash공식은 수심의 변화에 관계없이 어느 조건에서나 사석의 중량이 과다하게 산정되므로 시공할때는 결국 이론적인 규격사석의 확보가 곤란하여 모든 규격의 사석을 이용하게 됨으로 방조제의 최종 끝물막이에 어려움이 따르게 된다.

참고문헌

1. 농수산부, 1991. 농지개량사업설계기준 해면간척편, p.369.
2. 해운항만청, 1993. 항만시설물설계기준서, pp. 183-185.
3. ASCE, 1975. Manuals and Reports on Engineering Practice No.54, Sediment Engineering, pp.531-534.
4. Delft University Press, 1984. The Closure of Tidal Basin, P.369, pp.650-652
5. NEDECO, 1991. Saemankeum Comprehensive Tideland Reclamation Project, Technical Report No. 6, 7, 9.
6. U.S.Army Coastal Engineering Research Center, 1977. Shore Protection Manual, Vol. II, pp.7-213-215.
7. U.S.Army Coastal Engineering Research Center, 1984. Shore Protection Manual, Vol. II, pp.7-249-263.

약 력

서 영 제



- 1977. 영남대학교 공과대학 토목과 졸업
- 1983. 건국대학교 대학원 수공학 석사
- 1984. 화란 Delft대학부설 국제수문학회 수문학 석사과정 Diploma 취득
- 1991. 일본 경도대학 농학박사 (수문학, 수공학전공)
- 1995. 수자원개발 기술사
- 현재 KCID 비구조 홍수관리분과위원
한국수자원학회 편집위원