



Effects of cobble shape on coefficient of drag force

Park, Sang Deog^{a*} · Yoon, Min Woo^a · Yoon, Young Ho^b

^aDepartment of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University

^bDepartment of Civil Engineering, Gangwon State University

Paper number: 17-039

Received: 6 May 2017; Revised: 15 May 2017; Accepted: 15 May 2017

Abstract

In mountainous rivers, the drag force acting on cobbles abundant in the riverbed surface is important in predicting behavior and response of the river. However there is little research for the drag coefficients of cobbles. This paper is to carry out the experiments for drag force of cobble and analyze the relation between the cobble shape and the drag coefficient. The effects of the shape factor on the drag coefficients C_D when the long axis or the short axis of the cobbles are parallel to the direction of flow velocity were analyzed. The coefficient of drag force increased with the nominal diameter Reynolds number Re_p . The drag coefficients are greater in short axis than long axis. The coefficient of determination of the relation between C_D and Re_p is greater in long axis than short axis. This means that the drag forces acting on the irregularly-shaped cobbles depend on the axis. A change of the drag force distribution has brought about the alternative swing of cobbles. For $Re_p > 12,000$, the amplitude of the swing has been increased sharply and especially was greater in short axis than long axis.

Keywords: Drag coefficient, Cobble, Drag force, Shape factor, River

항력계수에 미치는 호박돌 형상의 영향

박상덕^{a*} · 윤민우^a · 윤영호^b

^a강릉원주대학교 토목공학과, ^b강원도립대학교 재난안전토목과

요 지

산지하천 하상에서 흔히 발견되는 호박돌에 작용하는 항력은 하천의 거동과 반응을 예측하는 데 있어서 중요하나 이를 위한 항력계수 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 호박돌의 항력 실험을 통해서 호박돌 형상과 항력계수의 관계를 분석하였다. 호박돌의 장축과 단축이 흐름방향을 따를 때 항력계수에 미치는 형상계수의 영향을 분석하였다. 항력계수는 장축보다 단축에서 더 크며 호박돌의 등가직경 Reynolds 수가 증가하면 감소하였다. 항력계수와 등가직경 Reynolds 수의 관계에서 결정계수는 단축보다 장축에서 더 크다. 이는 호박돌 형상의 불규칙성에 따른 항력이 축에 따라 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 항력분포 변화는 호박돌의 교호진동을 초래하였다. 그 진폭은 Re_p 가 약 12,000에서 급격히 증가하였으며 장축보다 단축에서 더 큰 것으로 나타났다.

핵심용어: 항력계수, 호박돌, 항력, 형상계수, 하천

1. 서 론

하천의 동적 거동은 유수와 하도 사이에서 평형을 유지하려는 상호작용 과정을 나타낸다. 유수에 대한 하상 저항과 하

상에 대한 유수의 유사량은 그 매개수단이라 할 수 있다. 하상의 표면재료는 이러한 과정과 수단을 통해서 하천이 지니는 고유한 특성이다. 호박돌은 산지하천 하상에서 흔히 발견되는 하상재료이다. 호박돌에 작용하는 항력은 하천의 거동과 반응을 예측하는 데 있어서 중요하지만 이를 위한 연구는 미흡한 실정이다. 하천관리를 위한 하상변동 예측에서 유사량

*Corresponding Author. Tel: +82-33-640-2417
E-mail: sdpark@gwnu.ac.kr (S. D. Park)

은 중요한 매개변수이나 자갈 이하의 하상재료를 고려할 뿐 호박돌이상의 큰 재료는 고려하지 못하고 있다. 이는 하상재료가 큰 산지하천에서 호박돌이나 전석이 하천의 거동과 반응에 미치는 영향을 크게 주목하지 못하기 때문이다.

산지하천에서 자갈하상재료 분포는 홍수 시 특정규모 수류력에 의한 유사의 이송과 퇴적 과정을 반영하여 형성된 것이다. 준장갑화 하천에서 하상재료 이동에 관한 한계흐름 조건을 평가하는 것은 하도의 설계 및 관리를 위해 중요하다 (Shin et al., 2012). 하천관리를 위해서는 하천이 시간적 공간적으로 다양하고 복잡하다는 것을 이해할 필요가 있다. 현재 드러난 하천은 수문기후 변화, 지형 및 지질 과정의 시간, 유량 변동이 누적된 결과의 일부일 뿐이다. 미래 하천을 가능할 방향성이 하도에 잠재되어 있기 때문에 하천관리를 위해서 모래, 자갈, 호박돌, 전석 등과 같은 하상재료 변화를 주목할 필요가 있다. 하도 민감성에 대한 이해가 필요하다. 극한 호우 시에 산지하천 유역에서 많이 발생하는 토석류가 하천에 유입하면 하천의 극적인 변화가 발생할 수 있다. 특히 토석류의 선단에서 이동하는 호박돌이나 전석이 하천에 유입하면 하천의 준장갑화 하상을 교란시키는 주요 원인이 될 수 있다.

홍수 시 유수 중에서 호박돌이나 전석이 하상에 가하는 영향을 파악하기 위해서는 유수에 의한 항력이 필요하다. 구형 물체에 대한 항력과 항력계수를 이론해석, 실험, 수치해석의 방법으로 조사한 연구는 많다(Lecoq et al., 2004; O'Neill, 1969; Sweeney and Finlay, 2007). 구형 물체의 항력계수는 직경을 사용한 Reynolds 수 R_{ep} 가 $10^3 \sim 10^4$ 에서 약 0.4이나 2.3×10^5 부근에서 항력계수는 약 5배나 감소한다. 반면에서 정육면체의 항력계수는 $R_{ep} > 10^4$ 인 흐름에서 약 1.05이다. 즉, 유수에 의한 물체의 항력계수는 Reynolds 수, 물체의 형상과 표면조도 등에 좌우되는 것으로 알려져 있다(Munson et al., 2013; Lee, 2014; Loth, 2008). 그러나 산지하천에 흔한 호박돌과 같이 입자가 크고 불규칙한 형상에 대한 항력과 항력계수를 연구한 사례는 찾기 어렵다. 호박돌의 형태가 매우 다양하기 때문에 구와 같이 표준형상을 특정할 수 없으므로 호박돌의 형상을 고려한 항력계수에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구는 수리실험을 이용하여 항력을 조사하고 호박돌 형상이 항력계수에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 호박돌의 항력계수

2.1 호박돌

산지하천에서 자갈하상은 주로 자갈(gravel)과 호박돌

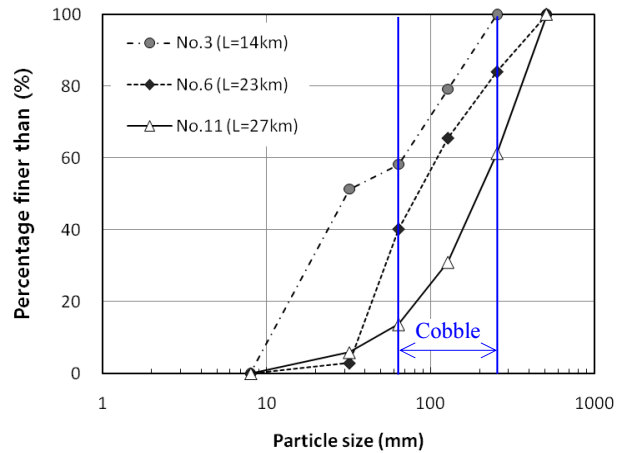


Fig. 1. Grain size distributions of bed materials in the Yangyangnamdea river (Shin et al., 2012)

(cobble)이 덮고 있고 입자의 크기는 일반적으로 상류에서 하류로 내려갈수록 작아진다. 양양남대천에서 볼 수 있듯이 (Fig. 1) 자갈하천 하상표면에서 직경 64~256 mm인 호박돌은 상류로 갈수록 증가한다. 호박돌은 산지하천에서 흔히 볼 수 있는 자연재료로서, 유수에 의한 이송과정에서 마모작용을 받아 그 표면이 작은 호박과 같이 둥글어 붙여진 명칭이다. 호박돌이란 용어가 하천, 지질, 건설 등의 분야에서 사용되고 있으나 영문 명칭이나 크기는 분야에 따라 차이가 있다. 본 연구에서 호박돌을 의미하는 cobble (Woo, 2001)은 자갈(Korean Association of Hydrological Sciences, 1991)이나 왕자갈(Changwonsa, 1977)이라고도 한다. 건설 분야에서 호박돌을 의미하는 boulder는 직경 200~300 mm인 둥글넓적한 돌이며 하천에서는 직경 256~4,000 mm 전석이다. 일본에서는 cobble을 옥석(玉石) 또는 대력(大礫)이라 하고 boulder는 거력(巨礫)이라 한다(Komura, 1982).

호박돌의 형상은 Eq. (1)과 같은 형상계수 S_p 로 나타낼 수 있다.

$$S_p = \frac{c}{\sqrt{ab}} \tag{1}$$

여기서 a, b, c 는 각각 호박돌에서 서로 직각인 장축, 중간축, 단축의 길이이다. 체적 \forall 와 동일한 구의 직경인 등가직경(nominal diameter) d_n 를 이용하면 호박돌의 대표적인 크기는 Eq. (2)로 나타낼 수 있다.

$$d_n = \sqrt[3]{6\forall/\pi} \tag{2}$$

2.2 항력계수

흐르는 물속에 놓인 물체에 작용하는 유수의 힘 중에서 흐름방향 성분을 항력이라 한다. 완전한 난류 흐름조건에서 항력은 유속의 제곱에 비례하며 항력계수는 Eq. (3)과 같다.

$$C_D = \frac{2F_D}{A\rho V^2} \quad (3)$$

여기서 C_D 는 항력계수, F_D 는 항력, A 는 물체를 흐름방향으로 투영한 면적, ρ 는 물의 밀도, V 는 물체에 접근하는 유수의 유속이다. C_D 는 물체의 형상과 Reynolds 수에 좌우되는 것으로 알려져 있다. Reynolds 수는 접근유속과 입자의 크기를 반영하여 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Re_p = \frac{Vd}{\nu} \quad (4)$$

여기서 Re_p 는 물체의 대표길이 d 를 사용한 Reynolds 수이고 ν 는 동점성계수이다. 구형 물체인 경우 d 는 직경을 의미하나 그 이외의 물체에 대해서는 물체의 형상을 대표할 수 있는 길이를 사용한다. 따라서 본 연구에서는 호박돌의 체적과 동일한 구의 직경을 의미하는 등가직경 d_n 을 대표길이로 한 Reynolds 수와 항력계수의 관계를 분석하였다.

3. 항력실험

3.1 실험장치 및 실험재료

호박돌에 작용하는 항력은 Fig. 2와 같이 내경이 404 mm 이고 길이가 700 mm인 투명 수직관으로 이루어진 원통형 물순환식 항력측정 장비를 이용하여 측정하였다. 이 장비는 수직 관수로의 외부를 직경 60 cm인 관으로 둘러싼 상부에서 대기압이 작용하는 수면과 수직관 유입 실험유량이 일정하게

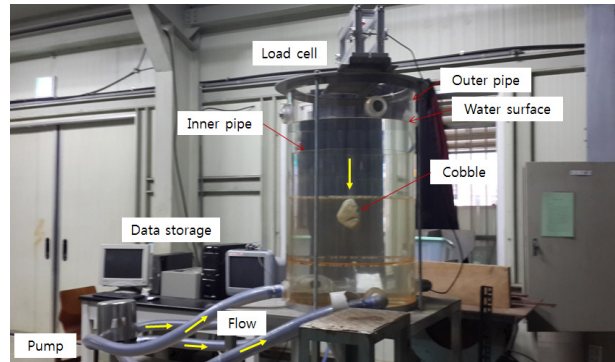


Fig. 2. Photograph of experimental equipment

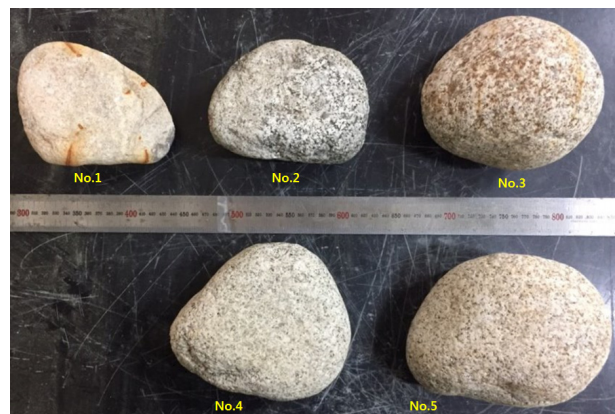


Fig. 3. Photograph of cobbles used in experiments

유지되며, 호박돌 시료가 매달린 하중 검측장치로 항력을 측정하여 저장장치에 자료를 저장한다. 시료가 위치한 단면은 수직관의 입구에서 27~45 cm 구간이며 실험 시 관입구거리는 8.1~11 m이고 경계층 두께는 약 17~20 mm이므로 접근유속은 등분포로 판단된다. 하중검측장치의 최대 측정 하중은 5 kg이며, 실험에 사용한 호박돌은 강릉시 소재 연곡천에서 채취한 자연재료이고 Fig. 3과 같다. 호박돌의 주요 특성은 Table 1과 같이 체적 460~1180 m³, 형상계수 0.508~0.756, 등가직경 95.8~131.1 mm이다. 여기서 a 는 호박돌의 가장 큰

Table 1. Cobbles used in experiments

Cobble no.	Cobble volume (cm ³)	Specific weight (g/cm ³)	Length of axis (mm)			S_p	Nominal diameter (mm)		
			a	b	c		d_n	d_{na}	d_{nc}
1	460	2.872	140	106	77	0.632	95.8	91.5	123.0
2	600	2.762	140	111	81	0.650	104.7	96.0	125.5
3	870	2.555	156	136	74	0.508	127.7	105.0	146.0
4	1,085	2.498	145	138	107	0.756	127.5	122.5	141.5
5	1,180	2.498	168	135	104	0.691	131.1	119.5	151.5

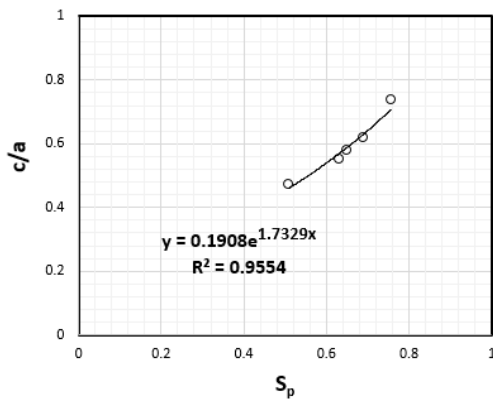


Fig. 4. $\frac{c}{a}$ versus S_p

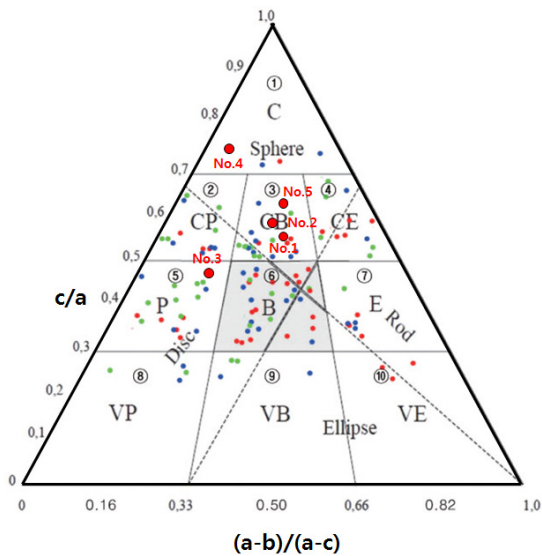


Fig. 5. Sneed-Folk's diagram for shapes of the cobbles used in experiments and the riverbed materials suggested by Yang et al. (2014)

축의 길이, b 는 중간 축, c 는 가장 짧은 축의 길이이며 이 축들은 서로 직교한다. 등가직경 d_{na} 와 d_{nc} 는 각각 호박들의 a 축 투영면 대표직경 $(b+c)/2$ 와 c 축 투영면 대표직경 $(a+b)/2$ 이다. 본 연구의 실험에 사용한 호박들의 형상계수 S_p 와 c/a 의 관계는 Fig. 4와 같다. 호박들의 입체형상을 파악하기 위해 Yang et al. (2014)이 연곡천 하상에서 채취한 자갈과 호박들을 위해 작성한 Sneed-Folk 10분도에 Fig. 5와 같이 나타냈다. 본 연구의 실험에 사용한 호박들은 대부분 구형에 가까운 형상(No.4/ (compact, C); No.1, No.2, No.5/(compact bladed, CB))이고, No.3번 호박들은 둥글납작하다(platy, P).

3.2 실험결과

항력실험은 정지 상태의 물속에서 실험용 호박들을 하중 검측장치에 연결하고, 실험유량을 235~1,425 l/min 범위에서 5단계로 증가시키며, 약 2분 동안 유량과 수온은 1초 간격으로, 하중은 0.2초 간격으로 측정하여 저장장치에 기록하였다. 호박들의 장축과 단축의 길이에 큰 차이가 있기 때문에 흐름방향과 호박들 축의 방향이 일치하는 지 여부에 따라 항력이 어떤 변화를 가지는 지를 파악하기 위하여 장축과 단축을 실험에서 고려하였다. Table 2에서 d_{nx} 는 흐름방향을 의미하는 x 축과 호박들의 장축 a 또는 단축 c 가 일치할 때 호박들을 축 방향으로 투영한 단면의 대표크기이다. 실험결과 최대 유속은 18.54 cm/s이고 흐름은 수직관의 직경을 사용한 Reynolds 수가 9,000~55,930인 난류였다. 이 최대 유속은 산지하천에서 홍수 시 평균유속의 약 5~20%에 해당한다. 호박들의 등가직경 Reynolds 수 R_{ep} 는 2,180~17,860이었으며 항력계수 C_D 는 0.72~2.65의 범위로 나타났다. 장축보다 단축이 흐름방향과 일치할 때 항력계수가 더 크고 R_{ep} 가 증가할수록 항력계수는 줄어드는 것으로 조사되었다. 호우 시 산지유역

Table 2. Experimental results

No.	Volume of Cobble (cm ³)	d_{nx} (mm)	T (°C)	V (cm/s)	F_D (g)	C_D	R_{ep}
1	460	91.5	8.48	3.14	0.8	2.424	2,183.3
			8.47	6.06	1.6	1.299	4,216.1
			8.60	8.98	2.9	1.072	6,272.9
			8.60	11.95	4.3	0.899	8,341.2
			8.70	14.81	6.1	0.830	10,368.3
		123.0	9.86	3.12	1.6	2.676	2,259.4
			9.86	6.07	5.1	2.269	4,395.5
			9.91	9.05	10.7	2.149	6,561.6
			9.91	11.91	17.3	2.013	8,630.9
			9.95	17.96	36.6	1.874	13,027.5

Table 2. Experimental results (Continue)

No.	Volume of Cobble (cm ³)	d_{nx} (mm)	T (°C)	V (cm/s)	F_D (g)	C_D	R_{ep}
2	600	96.0	9.20	3.18	0.6	1.613	2,465.1
			9.20	6.24	1.6	1.113	4,845.4
			9.23	8.95	3.3	1.116	6,954.9
			9.39	12.32	5.5	0.981	9,618.2
			9.39	17.64	10.4	0.906	13,768.9
		125.5	9.47	3.09	1.7	2.829	2,414.8
			9.48	6.14	5.7	2.400	4,802.6
			9.44	9.00	10.3	2.106	7,035.0
			9.49	12.03	17.6	1.927	9,419.5
			9.61	17.69	36.5	1.849	13,896.8
3	870	105.0	8.73	3.08	0.6	1.434	2,876.6
			8.73	6.03	1.9	1.183	5,635.4
			8.78	8.38	3.2	1.033	7,836.6
			8.78	11.93	5.6	0.891	11,161.6
			9.08	16.98	9.2	0.722	16,026.5
		146.0	9.08	18.54	11.3	0.745	17,493.4
			9.69	3.10	2.2	2.680	2,977.4
			9.70	6.07	7.8	2.488	5,834.1
			9.70	9.07	16.6	2.366	8,707.4
			9.70	11.90	27.7	2.292	11,427.1
4	1,085	122.5	10.57	3.12	1.1	1.883	3,063.5
			10.58	6.03	3.1	1.421	5,922.9
			10.60	9.01	5.2	1.067	8,856.7
			10.63	11.97	8.3	0.965	11,776.5
			10.73	17.94	14.7	0.760	17,701.6
		141.5	10.50	3.08	2.0	2.639	3,015.5
			10.50	6.00	6.2	2.146	5,886.8
			10.50	9.00	11.2	1.724	8,829.5
			10.50	11.92	18.7	1.641	11,691.9
			10.53	17.46	36.3	1.486	17,135.0
5	1,180	119.5	10.37	3.06	1.1	2.061	3,069.8
			10.37	6.07	2.8	1.329	6,099.1
			10.40	8.98	4.4	0.955	9,024.8
			10.41	11.91	7.4	0.912	11,978.9
			10.48	17.72	13.9	0.774	17,860.5
		151.5	10.21	3.12	2.1	2.343	3,123.8
			10.21	5.96	6.3	1.929	5,962.6
			10.21	9.03	12.8	1.710	9,026.5
			10.34	11.96	21.4	1.629	12,001.2
			10.40	17.74	42.5	1.469	17,839.0

에서 많이 발생하는 토석류에 동반하는 호박돌이나 전석이 하천에 유입하는 경우 하상을 교란시키고 소류사 이동조건에 영향을 줄 수 있다. 호박돌이 하천 흐름에 유입하면 유수에 의한 항력과 중력을 받기 때문에 하류로 이동하면서 하상에 도달하게 된다. 이때 호박돌이 이동하는 경로와 하상에 가하는 영향을 판단하기 위해서는 호박돌에 작용하는 항력이 필요하다. 호박돌의 형상이 불규칙하므로 호박돌에 접근하는 흐름 방향에 따라 항력이 다르게 된다. 따라서 본 연구에서는 호박돌의 장축과 단축이 각각 흐름방향과 일치할 때 항력을 조사하고 항력계수를 분석하였다.

4. 항력계수 특성

4.1 장축과 단축의 영향

Fig. 6은 호박돌의 장축 또는 단축이 흐름방향과 일치할 때 C_D 와 R_{ep} 의 관계를 나타낸 것이다. 장축보다 단축에 따른 항력계수가 더 크고, R_{ep} 의 증가에 따라 항력계수가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 단축의 항력계수가 장축보다 더 큰 이유는

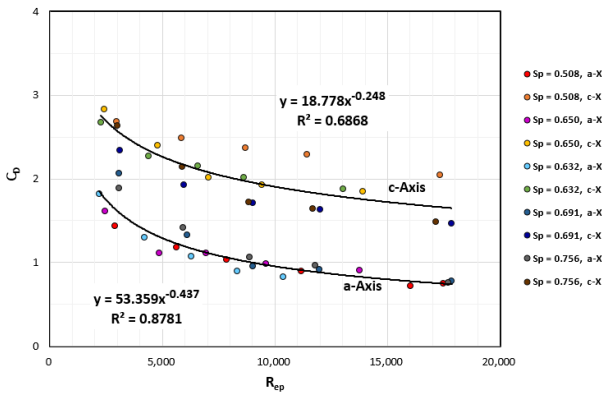


Fig. 6. Plots of C_D according to the axis length a and c equaled to flow direction versus the nominal diameter Reynolds number R_{ep}

Table 3. C_{Da}/C_{Dc} according to axis a and c of cobbles

Cobble no.	c/a	S_p	C_{Da}/C_{Dc}	
			$R_{ep}: 4,000$	$R_{ep}: 12,000$
3	0.474	0.508	2.001	2.583
1	0.550	0.632	1.711	2.746
2	0.579	0.650	1.879	2.014
5	0.619	0.691	1.287	1.795
4	0.738	0.756	1.437	1.724
Total cobbles			1.687	2.077

단축 방향으로 투영한 호박돌의 단면적이 더 크기 때문이다. R_{ep} 가 3,000~20,000일 때 단축의 항력계수가 장축에 비해 약 1.6~2.3배 증가하였다. Table 3에서도 알 수 있듯이 장단축비 c/a 가 증가하면 항력계수 증가율은 감소한다. 장단축비에 따라 형상계수가 증가하고 호박돌은 구형에 가까운 형상이 되기 때문에 항력계수 증가율이 감소한 것으로 판단된다. 이와 같은 호박돌의 흐름방향 축 변경에 따른 항력계수 증가율은 R_{ep} 가 크면 더 크다. 이는 호박돌에 작용하는 항력이 호박돌의 형상뿐만 아니라 유속의 크기와 방향에 매우 민감한 영향을 받는 것을 의미한다.

접근유속 방향이 장축 또는 단축과 같은 경우 Fig. 6에서 보면 C_D 와 R_{ep} 의 관계는 서로 비슷한 경향을 보이지만 그 결정계수는 단축보다 장축에서 더 크다. 형상계수별 항력계수 차이는 장축에 비해 단축에서 더 크게 나타났다. 이는 호박돌의 형상이 흐름 축별 항력에 더 민감한 영향을 미친 것이라 할 수 있다. 단축 방향은 장축보다 유수에 수직한 단면적이 더 크기 때문에 호박돌에 작용하는 항력도 크고, 동일한 접근유속에서 형상항력과 표면항력 분포에 호박돌의 비대칭성이 축에 따라 다르게 작용한 결과로 판단된다. 유속 증가에 따라 호박돌에 작용하는 항력분포의 비대칭성이 증가하면 흐름방향 항력에서 호박돌 축 직각방향 성분의 총합이 증가한다. 호박돌 축에 직각방향 합력이 자중을 반영한 특정 값을 초과하면 호박돌은 측면 변위를 일으키게 된다. 호박돌 주변 흐름은 이 변위에 대응해서 재편되고 항력분포 변동을 일으켜 기존 측면방향 항력성분이 감소하여 호박돌은 반대방향으로 이동한다. 이 같은 좌우측 방향 변위는 호박돌의 교호진동으로 발전하기 때문에 항력의 진동으로 나타난다. 실험에서 교호진동 현상을 관찰할 수 있었는데, R_{ep} 가 약 12,000 이상에서 호박돌의 좌우 진동 현상은 더욱 뚜렷이 관찰되었다. 이 진동은 장축의 경우 미미하였으나 단축에서는 최대 폭 약 5 cm까지도 확인할 수 있었다. Fig. 7은 No.4번 호박돌의 경우 실험유량과 항력을 실험시간에 따라 나타낸다. 항력의 최대 진동이 발생할 때 R_{ep} 는 17,000 이상이였다. 단축의 경우 진동은 시간이 경과함에 따라 진동폭이 증가하는 것을 알 수 있다. 호박돌의 교호진동은 후류의 변동성과와의 방출(vortex shedding)에도 원인이 있을 것으로 판단된다. 후류는 형상항력을 좌우하는데와 방출이 후류의 특성에 영향을 미치기 때문이다. 후류에서 와가 방출될 때 항력이 발생하고 후류 내 와의 분포가 변하기 때문에 호박돌의 진동에 영향을 미치는 것으로 생각된다. Achenbach (1974)의 실험에 의하면 유수 중에 있는 구형인 물체가 일으킨 후류는 R_{ep} 가 $6 \times 10^3 \sim 3 \times 10^5$ 일 때 강한 주기적 변동성을 보인다. 입체적으로 축대칭인 구형 물체와

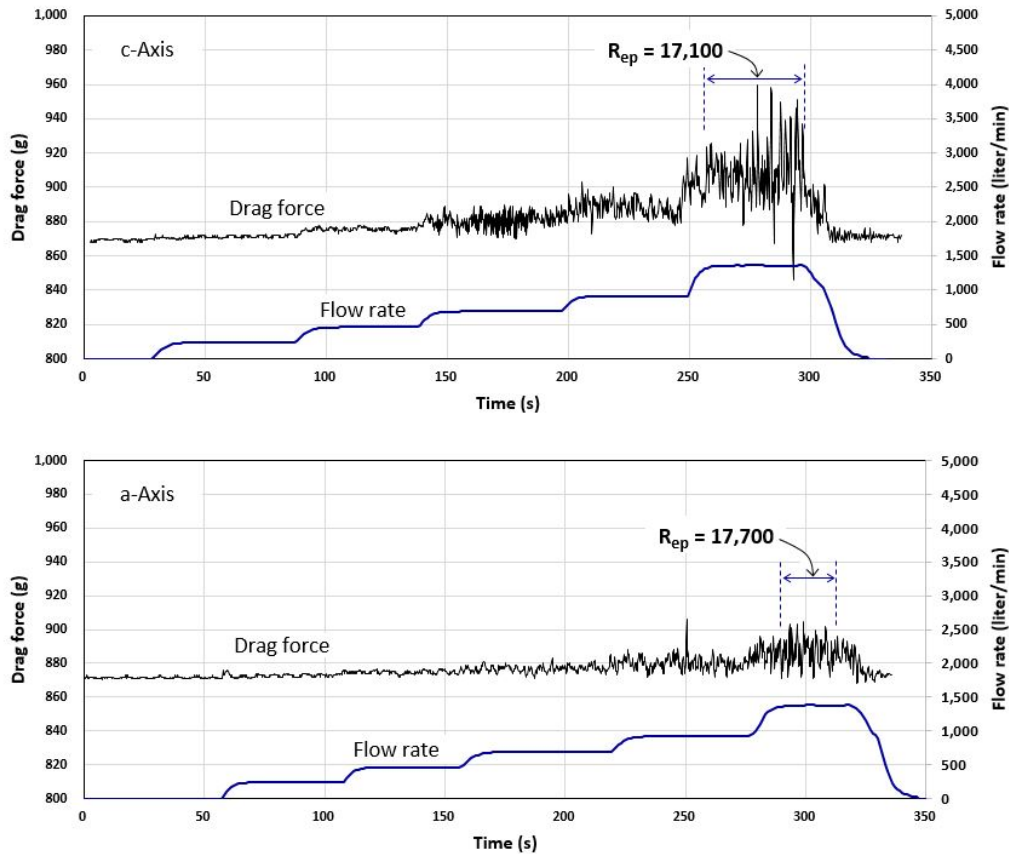


Fig. 7. Profile of the drag force and the experimental flow rate measured for cobble No. 4

달리 불규칙한 호박돌의 후류는 와의 분포와 방출이 교호진동에 더 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 본 연구는 호박돌의 형상계수와 항력계수의 관계로 한정하고 호박돌의 항력, 후류, 교호진동의 관계는 후속 연구에서 다룬다.

4.2 형상계수의 영향

대부분 산지하천은 모래에서 전석에 이르기까지 입경 변동이 매우 큰 하상재료로 되어 있다. 모래가 주 하상재료인 평지하천을 모래하천이라고 하면 산지하천은 자갈과 호박돌이 하상표면을 덮은 준장갑화 자갈하천이다. 입경이 작은 하상재료들은 홍수 시에 대부분 하류로 이송되고 하상표면에 남은 큰 입자들은 서로 맞물려 있는 경우가 많다. 이 하상의 한계소류력은 개별입자 한계소류력보다 현저히 크다. 하상표면 재료의 집단적 유지가 발현된 하상이 준장갑화 하상이다. 준장갑화 하상에서 돌출된 호박돌이나 작은 전석이 유수에 의하여 움직이면 그 주위 하상재료는 문턱효과에 따라 개별입자 한계소류력에서도 쉽게 이동할 것이다. 따라서 유수 중에서 호박돌에 작용하는 항력은 산지하천의 하상거동을 평가하는데 필요하다.

호박돌에 작용하는 항력이 자갈에 작용하는 항력과 어떤 차이가 있는지를 파악하기 위해서 미국 수자원위원회의 유사소위원회(U.S. Inter-Agency Committee on Water Resources, 1957)가 발표한 입경과 침강속도의 관계를 이용하였다. 이에 의하면 입경 4~8 mm이고 비중 2.65인 자갈의 종말속도는 주로 입경과 형상계수에 영향을 받는다. 또한 Raju and Matin (2013)은 변의 길이가 15.98~41.28 mm이고 등가직경이 15~35 mm인 직육면체 콘크리트 블록의 침강속도를 조사하였다. 그들은 정지 중의 물 속 1.3 m 낙하거리에서 항력계수를 조사하였으나 종말속도 여부를 언급하지 않았다. Fig. 8은 입자의 형상계수와 항력계수의 관계를 나타낸 것이며 본 연구의 호박돌과 기존 자갈 및 콘크리트 블록을 포함하고 있다. 호박돌의 장축에 대한 항력계수는 직경이 8 mm 자갈과 직육면체 콘크리트 블록의 항력계수와 비슷하다. 이들의 항력계수는 입경 4 mm 자갈에 비하면 작지만 형상계수가 크면 그 차이는 줄어든다. 자갈의 항력계수는 입자의 종말속도에 근거한 것이다. 본 연구에서 접근유속은 최고 접근유속 19 cm/s이므로 호박돌의 종말속도보다 현저히 작다. 호박돌의 항력계수는 장축의 경우 입경이 큰 자갈의 항력계수와 유사하고, 단축의

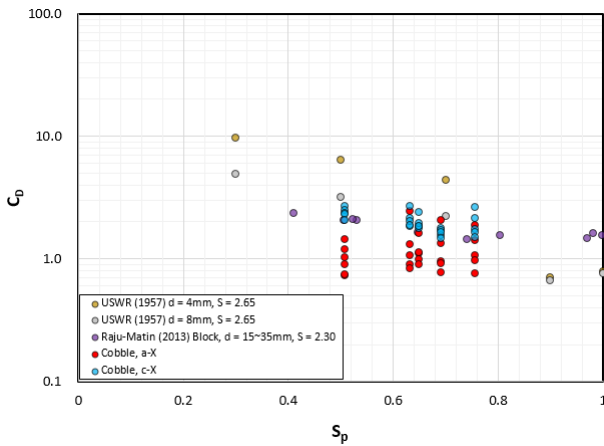


Fig. 8. Plot of C_D versus S_p

경우 입자의 형상계수가 작을수록 자갈의 항력계수와 차이가 확대된다.

4.3 Reynolds 수와 항력계수의 관계

호박들의 항력계수를 구, 평판, 열린 반구, 유선형 물체의 항력계수와 비교하기 위해서 기존 $C_D - R_{ep}$ 관계도(Lee, 2014)에 Fig. 9와 같이 나타냈다. 하상재료와 달리 다양한 형상의 인위적 형상의 물체가 받는 항력계수는 물체의 대표길이 Reynolds 수에 따라 다양한 관계를 나타낸다. Reynolds 수가

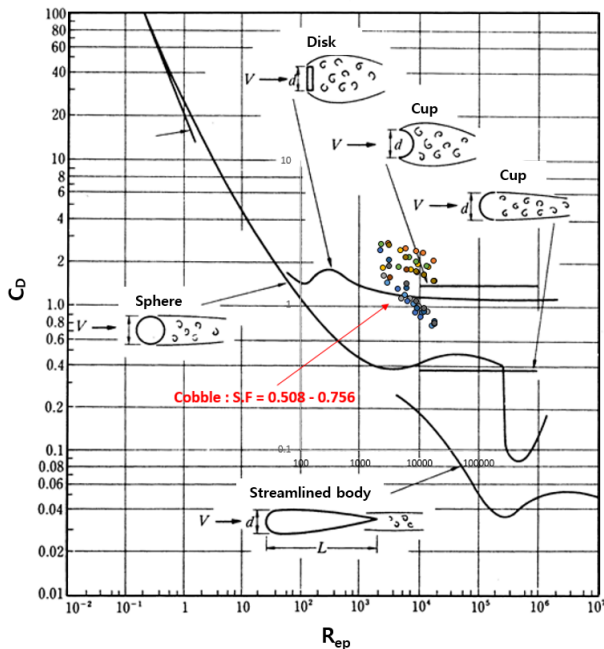


Fig. 9. Comparison of C_D for cobbles with sphere, disk, cups, and a streamlined body

10,000보다 크면 구를 기준으로 할 때 유선형 물체의 항력계수가 약 2~6배 작다. 흐름방향에 직각으로 세운 평판이나 흐름방향으로 열린 반구의 항력계수는 R_{ep} 의 영향을 거의 받지 않고 일정하나 구의 경우에 비하여 약 2~4배 크다. 이 비교는 호박들의 형상이 평판, 열린 반구, 닫힌 반구 등의 다양한 요소를 복합적으로 지닐 수 있다는 점에서 의의를 갖는다. 홍수 중에 하천에 유입된 호박돌이나 전석은 하상에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이들의 이동경로는 유수에 의한 항력, 자중, 형상 등 관련 인자가 다양하기 때문에 매우 복잡한 물리적 구조를 갖는 것으로 판단되며 지속적인 연구가 필요하다.

5. 결론

본 연구는 산지하천 하상표면에서 흔히 발견되는 호박들에 작용하는 항력계수에 입자의 형상이 미치는 영향을 수리실험으로 조사한 것이다. 호박들의 장축보다 단축이 흐름방향과 일치할 때 항력계수가 더 크며 R_{ep} 의 증가에 따라 항력계수는 감소하는 것으로 나타났다. 단축의 항력계수는 장축보다 약 1.6~2.2배 증가하였다. 장축에 대한 단축의 비가 증가하면 호박들은 구형에 가까운 형상이 되기 때문에 항력계수 증가율은 감소하였다. 호박들의 항력은 호박들의 형상, 접근유속의 크기와 방향에 민감한 영향을 받았다.

접근유속 방향이 장축 또는 단축과 같은 경우 C_D 와 R_{ep} 의 관계는 서로 비슷한 경향을 보이나 결정계수는 장축에서 더 크다. 이는 호박들의 형상이 흐름방향 변화에 따른 항력에 더 민감한 영향을 미친 것이라 할 수 있다. 유속의 증가에 따라 호박들에 작용하는 항력분포의 비대칭성이 증가하면 흐름방향 항력은 호박돌 축에 직각방향의 성분이 증가하고 그 크기가 호박들의 자중을 초과하면 호박돌에 측면 변위를 일으킨다. 이 변위에 대응해서 호박돌 주변 흐름은 재편되고 항력분포는 변동하여 기존 측면방향 항력성분이 감소하기 때문에 호박돌은 반대방향으로 이동한다. 이 같은 좌우측 방향 변위는 호박돌의 교호진동으로 발전하고 항력 진동으로 나타나며, 약 12,000의 R_{ep} 이상에서 호박돌이 좌우로 뚜렷이 큰 진동을 보였다. 이 진동은 장축보다 단축에서 더 크게 나타났다.

호박들의 항력계수는 장축의 경우 입경이 큰 자갈의 항력계수와 유사하였고, 단축의 경우 입자의 형상계수가 작을수록 자갈의 항력계수와 차이가 증가하였다. Reynolds 수 10^4 에서 항력계수는 구형 또는 반구형 물체보다 약 2~6배, 유선형 물체보다 약 4~15배 크나, 흐름방향에 직각으로 세운 원판이나 흐름의 반대방향으로 열린 반원 물체는 장축보다는 크고

단축보다는 작은 항력계수를 나타냈다. 홍수 시 하천 흐름에 유입한 호박돌은 하상에 도달하기까지 자중, 형상, 항력, 유속 분포 등과 같이 다양한 인자에 영향을 받는다. 따라서 하천의 유수 중 침강하는 호박돌의 이동경로는 매우 복잡한 물리적 구조를 갖는 것으로 판단되며 이에 대하여 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 핵심개인연구사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2015R1A2A2A01007100).

References

- Achenbach, E. (1974). "Vortex shedding from spheres." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 62, No. 2, pp. 209-221.
- Changwonsa (1977). *English-Korean science & engineering dictionary*. Chang Won Sa, pp. 203 (in Korean).
- Komura, S. (1982). *Sediment hydraulics 1*. Morikita Publishing Co., pp. 3 (in Japanese).
- Korean Association of Hydrological Sciences (1991). *Hydro-engineering glossary*. Geumogak, pp. 35 (in Korean).
- Lecoq, N., Anthore, R., Cichocki, B., Szymczak, P., and Feuillebois, F. (2004). "Drag force on a sphere moving towards a corrugated wall." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 513, pp. 247-264.
- Lee, W. H. (2014). *Hydraulics 4th ed.* Moonundang, pp. 265-267 (in Korean).
- Loth, E. (2008). "Drag of non-spherical solid particles of regular and irregular shape." *Powder Technology*, Vol. 182, pp. 342-353.
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., and Rothmayer, A. P. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics 7th ed.* John Wiley & Sons, Inc., pp. 512-530.
- O'Neill, M. E. (1968). "A sphere in contact with a plane wall in a slow linear shear flow." *Chemical Engineering Science*, Vol. 23, pp. 1293-1298.
- Raju, K. M. A. H., and Matin, M. A. (2013). "An experimental study on settling velocity of regular shaped elements for underwater erosion protection." *Journal of Civil Engineering (IEB)*, Vol. 41, No. 1, pp. 41-58.
- Shin, S. S., Park, S. D., Lee, S. K., and Ji, M. G. (2015). "Estimating critical stream power by the distribution of gravel-bed materials in the meandering river." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 2, pp. 151-163 (in Korean).
- U.S. Inter-Agency Committee on Water Resources (1957). *Some fundamentals of particle size analysis*. Report No. 12.
- Woo, H. S. (2001). *Fluvial hydraulics*. Cheongmoongak, pp. 362-377 (in Korean).
- Yang, J. J., Park, S. D., Shin, S. S., and Woo, T. Y. (2014). "Characteristics of bed material shape of gravel bed rivers in Youngdong area." *Journal of the Geomorphological Association*, Vol. 21, No. 1, pp. 33-49.