

필터 블록을 이용한 하천용수 취수시스템의 유량특성에 관한 실험적 연구

김형석* · 박문형** · 김 원***

Kim, Hyung Suk*, Park, Moonhyeong**, Kim, Won***

Experimental Study on the Characteristics of Flowrate for the Intake System using the Filter Block

ABSTRACT

The river water intake system composed of the filter block, without installation of weirs in a channel, was proposed. To apply it to rivers, analysis of hydraulic characteristics is needed. In this study, the hydraulic experiment on the characteristics of flowrate passing through the river water intake system was carried out. The filter block was produced using riprap and stainless steel bead at the channel bottom. The experiment was carried out under various flow conditions and the flowrate passing through the intake system was measured. As the water depth approaching the intake system became deeper, the flowrate diverting to the intake system increased. As the Froude number increased, the flowrate diverting to the intake system decreased. The same trend was shown regardless of the characteristics of a filter block in the intake system. A constant discharge coefficient was shown regardless of the Froude number but it changed according to the size of a riprap and a stainless steel bead in the filter block. It was found that the discharge coefficient increases with the 0.6 power of the material size.

Key words : Intake system, Filter block, Hydraulic experiment, Discharge coefficient

초 록

하도 내 보를 설치하지 않고 용수를 취수할 수 있는 필터 블록으로 구성된 하천용수 취수시스템이 제안되었다. 이를 하천에 적용하기 위해 수리학적 특성에 관한 분석이 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 필터 블록으로 구성된 하천용수 취수시스템을 통과하는 유량특성에 대한 수리 실험을 수행하였다. 실험수로 바닥에 사석 및 구슬을 이용하여 필터 블록을 구현하였고 다양한 유량조건에서 실험을 수행하여 취수시스템으로 통과하는 유량을 측정하였다. 취수시스템으로 접근하는 수심이 증가할수록 취수시스템으로 전환되는 유량이 증가하는 것으로 나타났고 Froude 수가 증가하면 전환되는 유량이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 취수시스템의 필터 블록 특성과 관계없이 동일하게 나타났다. 유량계수는 Froude 수에 관계없이 일정한 값을 나타냈지만 필터 블록의 사석 및 구슬의 입경에 따라 변화하였고 필터 블록 재료의 입경에 0.6승으로 증가함을 보였다.

검색어 : 취수시스템, 필터 블록, 수리실험, 유량계수

* 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원 · 하천연구소 박사후연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · hskim0824@kict.re.kr)

** 종신회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 하천연구소 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · moon@kict.re.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 하천연구소 선임연구위원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · wonkim@kict.re.kr)

Received September 25, 2015/ revised November 2, 2015/ accepted November 10, 2015

1. 서론

하천에 흐르는 물을 용수로 활용하기 위한 수위 확보의 목적으로 하천을 가로지르는 보를 설치한다. 국내에는 2009년 기준으로 국가하천과 지방하천에 각각 274개소와 16,459개소의 보가 설치되어 있으며 대부분 용수확보의 용도로 이용되고 있다(MLTMA, 2009). 그렇지만 하천을 횡단하여 설치하는 보는 하천의 상·하류 물리적, 생물학적 연속성을 차단하며, 보 상류부의 흐름정체로 인한 수질 악화 등의 역기능도 있다. 또한 수변 생물서식처에 영향을 미쳐 하천 수생태계를 변화시킨다(Woo et al., 2004). 이러한 문제를 해결하기 위해 국외에서는 기능이 다한 하천횡단구조물을 철거하여 하천의 연속성을 확보하고 하천생태계를 복원하려는 시도(KICT, 2008)가 꾸준히 증가하고 있다. 국내에서도 이 문제를 극복하기 위해 지자체 등에서 기능이 상실된 보를 물리적으로 철거하여 하천생태통로를 복원하고 있다(Choi et al., 2009).

보 철거는 생태환경적인 단절이 발생하는 문제를 해결할 수 있지만 용수공급 기능이 상실되는 문제점을 야기한다. 따라서 하천 상·하류의 생태환경적인 단절을 해소하고 농업용수 등의 목적으로 취수가 가능한 보의 대체 구조물이 필요하다. 최근 Ji(2014)는 하도 내에 보를 설치하지 않고 용수를 취수하는 동시에 생태환경적인 단절을 방지할 수 있는 취수 시스템을 제안하였다(Fig. 1). 이 시스템은 하천에 하상저수조를 설치하고 저수조 상면을 사석을 이용하여 하천 바닥과 동일한 높이까지 포설하며 사석 필터부를 통하여 물이 하상저수조로 공급되도록 한다. 사석 필터로 구성되어 있기 때문에 하상 저수조 안으로 유사의 유입을 방지할 수 있고 또한 오염원 필터로서의 역할도 할 수 있다.

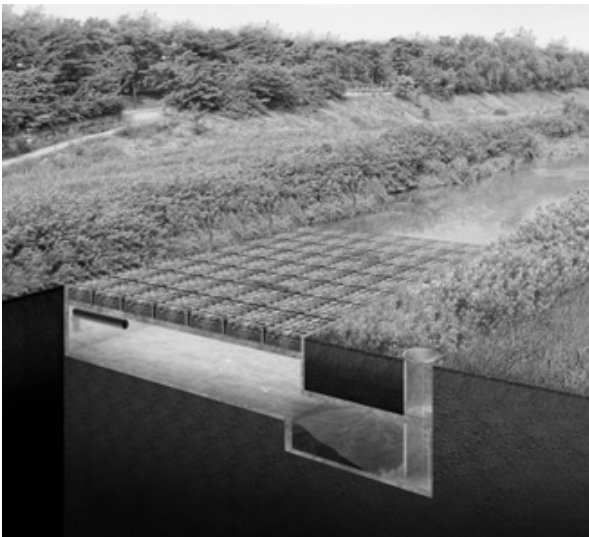


Fig. 1. Design of the Intake System Composed of the Filter Block (Ji, 2014)

국외에서는 이와 비슷한 하천용수 취수시스템을 불규칙한 하상 구조 및 급경사 산지하천에 적용하여 물을 취수한 사례가 있다(Bouvard, 1992). 일반적으로 하상에 저수조를 설치하고 상면은 유공이 있는 구조물로 제작하여 유수가 저수조로 유입되도록 하였다. 주로 유공은 흐름방향 및 횡 방향 슬릿형태로 구성되었다. 하지만 유사 또는 쓰레기 등에 의한 막힘을 방지하기 위해 흐름방향 슬릿 형태를 많이 채택하였다(Righetti and Lanzoni, 2008). 흐름방향 슬릿의 간격은 설치되는 지역의 입도분포 또는 저수조로 유입되는 유량조건에 따라 변화하였다. 이에 따라 많은 연구자들이 필요한 유량을 최소한의 유공면으로 유입되도록 설계하기 위해 수리학적 거동 및 유량특성을 이론 및 실험적 접근방법을 이용하여 검토하였다(Abbsa Kamanbedast and Shafai Bejestan, 2008; Bouvard, 1953; Brunella et al., 2003; Mostkow, 1957; Righetti and Lanzoni, 2008). 그 결과 유량특성은 유공면의 형태에 크게 영향을 받았다(Bouvard, 1953; Righetti and Lanzoni, 2008). 흐름방향 슬릿 형태의 유공면인 경우 하천의 유수가 하상저수조로 전환되는 흐름은 국부 흐름에너지에 영향을 받는 반면 횡방향 슬릿 형태 및 원형 형태의 유공면인 경우 하상저수조로 유입되는 유량은 국부 수심에 따라 변화한다.

Ract-Madoux et al. (1955)은 프랑스 알프스 사보이 지역에 상면이 흐름방향 슬릿 형태로 구성된 하천용수 취수시스템을 설치하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 내렸다. 하천용수 취수시스템의 설계는 유량과 유사량에 크게 영향을 받는다. 또한 상류에서 유입되는 유사에 의해 취수시스템 유공면의 막힘을 방지하기 위해 유공면의 경사가 20%이상 되어야 하며 슬릿의 간격은 0.1 m이하가 적합하다고 하였다. Venkataraman (1977)은 폭 0.3 m의 개수로에서 수리실험을 수행하고 취수시스템의 유량계수는 Froude 수에 영향을 받지 않지만 수심이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 흐름이 상류조건인 경우 취수시스템 상면을 따라 에너지 수두의 차이가 작게 나타났지만 사류조건인 경우 에너지 수두차가 크게 발생하였다. Righetti and Lanzoni (2008)는 개수로에 흐름방향 슬릿으로 구성된 취수시스템을 설치하고 수리실험을 수행하였다. 취수시스템으로 유입되는 유량, 수위 및 유속을 측정하였다. 취수시스템을 통과하는 유속 벡터를 분석한 결과 유입각이 유량계수와 밀접한 관련이 있고 이를 이용하여 제안한 관계식의 결과는 수리실험으로 얻은 취수시스템으로 유입되는 유량과 잘 일치하였다.

이와 같이 하천용수 취수시스템 주변의 수리학적 거동 및 유량특성을 분석하기 위해 대부분 슬릿 형태의 유공면으로 구성된 취수시스템을 대상으로 연구가 수행되어 왔다. 이러한 슬릿 유공면 형태의 취수시스템은 공사비 측면에서 비경제적이며 대부분 급경사로 이루어진 산지하천에서 적용되었기 때문에 국내 하천에 적용하기에는 매우 제한적이다. 앞서 Ji (2014)가 제안한 하천용수 취수시스템

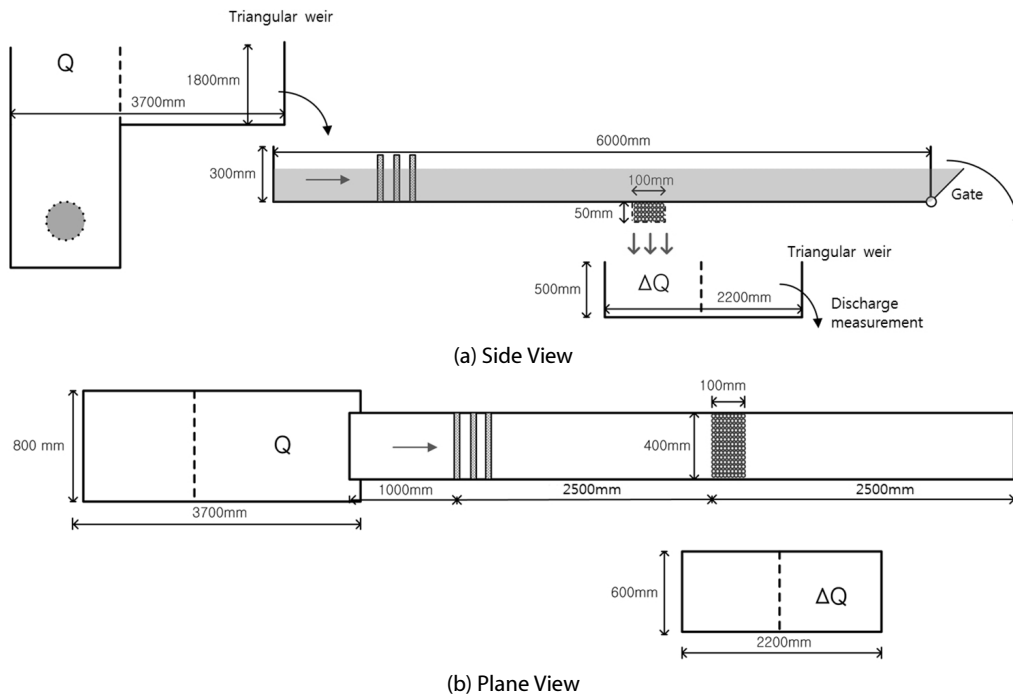
은 기존의 방법과 다르게 사석을 이용하여 생태 단절된 하천의 기능을 회복할 수 있고 용수공급이 가능할 뿐만 아니라 하천용수 정화기능을 할 수 있어 깨끗한 용수를 확보할 수 있다. 하지만 사석으로 구성된 취수시스템의 수리학적 거동이나 유량특성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Ji(2014)가 제안한 방법을 국내 하천에 적용하기 위하여 필수적으로 선행되어야 하는 연구 중 하천용수 취수시스템의 사석 필터 블록으로 유입되는 유량특성을 수리실험을 이용하여 파악하고자 한다. 이러한 연구 결과는 하천용수 취수시스템을 설계하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수리실험 장치 및 실험조건

본 연구에서는 필터 블록으로 구성된 하천용수 취수시스템의 흐름 및 유량특성을 파악하기 위해 길이 6.0 m 폭 0.4 m의 직선

개수로에서 수리실험을 수행하였다(Fig. 2). 개수로 상단에는 유량을 조절할 수 있는 삼각 위어가 설치되어 있으며 하류단에는 수위를 조절할 수 있는 수위조절 수문이 설치되어 있다. 개수로 상류부에는 위어로부터 공급되는 유량에 의해 발생하는 진동을 최소화하기 위해 유공판을 설치하였다. 상류 끝단에서 3.5 m 떨어진 지점에 길이 0.1 m 구간의 필터 블록을 설치하였으며 필터 블록은 원형구슬 및 사석으로 구성되었다(Fig. 2). 필터 블록 설치를 위해 거치대를 제작하였으며 거치대의 바닥면은 원형구슬 및 사석의 유출을 방지하기 위해 철망으로 하였다. 거치대의 깊이(T)는 0.05 m로 제작하였고 필터 블록층은 수로바닥 높이와 일치시켰다. 취수시스템으로 빠지는 유량을 측정하기 위해 필터 블록 아래에 유량측정수조를 설치하여 물을 받고 삼각위어를 이용하여 유량을 측정하였다(Fig. 2). 유량 측정 시 저수조에 들어오는 유량이 안정화될 때까지 기다린 후 유량측정을 실시하였다.

본 실험에서는 필터 블록으로 이루어진 용수 취수시스템의 취수



(c) Experimental Facilities

Fig. 2. Experimental Flume

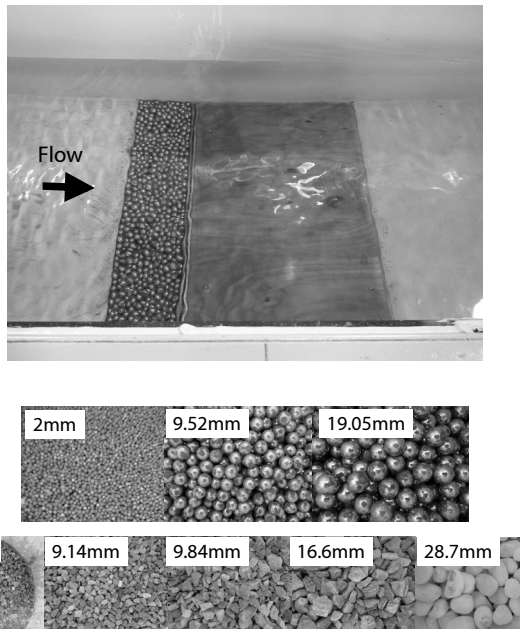


Fig. 3. Experimental Situation and Materials in the Filter Block

능력을 파악하기 위해 다양한 수리조건 및 필터 블록 조건을 검토하였다. 이를 위해 0.025, 0.05, 0.075 m²/s 3가지 단위폭당 유량을 사용하였다. 각 유량조건에 대하여 하류단 수위를 조절하여 0.1~0.225 m의 접근수심(h_o)을 형성하여 실험을 수행하였다. 접근수심 측정을 위해 흐름이 정상상태에 도달한 이후 취수시스템 상류 지점에서 포인트 게이지를 이용하여 수위를 측정하였다. 일정한 유량으로 설정한 후 해당하는 접근수심이 형성되면 필터 블록으로 통과하는 유량을 측정하였다.

취수시스템으로 공급되는 유량은 필터 블록의 공극률 또는 구슬 및 사석의 크기에 따라 변화한다. 이에 대한 영향을 조사하기 위해 원형구슬을 사용한 경우에는 입경(D_m) 2.0, 9.52, 19.05 mm 3가지를 적용하였으며 사석을 사용하는 경우에는 입경이 6.9, 9.14, 9.84, 16.6, 28.7 mm 5가지를 적용하여 실험을 수행하였다(Fig. 3). 사석의 입경은 각각의 입경을 등가지름 환산공식을 이용하여 선정하였고 해당하는 사석만을 선별, 수집하여 실험에 사용하였다(Fig. 3). 자세한 실험조건은 Table 1과 같다. Run1~9는 원형

Table 1. Experimental Cases

Run	D_m (mm)	porosity	h_o (m)	Fr	H (m)	q (m ² /s)	Δq (m ² /s)	$\Delta q/q$
Run1	2.0	0.4	0.1	0.25	0.103	0.025	0.003	0.11
			0.125	0.18	0.127		0.003	0.13
			0.15	0.13	0.151		0.004	0.14
			0.175	0.10	0.176		0.004	0.15
			0.2	0.09	0.201		0.004	0.16
			0.225	0.07	0.226		0.005	0.18
Run2	2.0	0.4	0.1	0.49	0.113	0.05	0.003	0.055
			0.125	0.38	0.133		0.003	0.06
			0.15	0.27	0.156		0.003	0.065
			0.175	0.23	0.179		0.004	0.075
			0.2	0.19	0.203		0.004	0.08
			0.225	0.15	0.228		0.005	0.09
Run3	2.0	0.4	0.1	-	-	0.075	-	-
			0.125	-	-		-	-
			0.15	0.45	0.163		0.004	0.047
			0.175	0.34	0.184		0.004	0.050
			0.2	0.28	0.207		0.004	0.053
			0.225	0.24	0.231		0.005	0.060
Run4	9.52	0.406	0.1	0.25	0.103	0.025	0.012	0.49
			0.125	0.18	0.127		0.014	0.57
			0.15	0.13	0.151		0.015	0.6
			0.175	0.10	0.176		0.017	0.66
			0.2	0.09	0.201		0.017	0.66
			0.225	0.07	0.226		0.018	0.73
Run5	9.52	0.406	0.1	0.49	0.113	0.05	0.013	0.255
			0.125	0.38	0.133		0.014	0.285
			0.15	0.27	0.156		0.015	0.295
			0.175	0.23	0.179		0.017	0.33
			0.2	0.19	0.203		0.017	0.33
			0.225	0.15	0.228		0.018	0.365

Table 1. Experimental Cases (Continue)

Run	D_m (mm)	porosity	h_o (m)	Fr	H (m)	q (m ² /s)	Δq (m ² /s)	$\Delta q/q$
Run6	9.52	0.406	0.1	-	-	0.075	-	-
			0.125	-	-		-	-
			0.15	0.45	0.163		0.015	0.200
			0.175	0.34	0.184		0.017	0.220
			0.2	0.28	0.207		0.017	0.223
			0.225	0.24	0.231		0.019	0.250
Run7	19.05	0.41	0.1	0.25	0.103	0.025	0.014	0.55
			0.125	0.19	0.127		0.015	0.59
			0.15	0.11	0.151		0.016	0.64
			0.175	0.09	0.176		0.017	0.69
			0.2	0.09	0.201		0.018	0.73
			0.225	0.07	0.226		0.019	0.76
Run8	19.05	0.41	0.1	0.49	0.113	0.05	0.015	0.3
			0.125	0.37	0.133		0.015	0.305
			0.15	0.28	0.156		0.016	0.325
			0.175	0.22	0.179		0.018	0.35
			0.2	0.18	0.203		0.018	0.365
			0.225	0.15	0.228		0.020	0.39
Run9	19.05	0.41	0.1	-	-	0.075	-	-
			0.125	-	-		-	-
			0.15	0.42	0.163		0.017	0.220
			0.175	0.34	0.184		0.018	0.233
			0.2	0.29	0.207		0.018	0.243
			0.225	0.24	0.231		0.020	0.26
Run10	6.9	0.409	0.1	0.25	0.103	0.025	0.008	0.32
			0.125	0.17	0.127		0.009	0.35
			0.15	0.13	0.151		0.009	0.37
			0.175	0.1	0.176		0.010	0.4
			0.2	0.09	0.201		0.011	0.42
			0.225	0.07	0.226		0.011	0.44
Run11	6.9	0.409	0.1	0.5	0.113	0.05	0.008	0.15
			0.125	0.39	0.133		0.008	0.155
			0.15	0.29	0.156		0.008	0.165
			0.175	0.24	0.179		0.009	0.18
			0.2	0.18	0.203		0.010	0.19
			0.225	0.15	0.228		0.010	0.2
Run12	6.9	0.409	0.1	-	-	0.075	-	-
			0.125	-	-		-	-
			0.15	0.42	0.163		0.008	0.1
			0.175	0.37	0.184		0.008	0.11
			0.2	0.31	0.207		0.009	0.12
			0.225	0.27	0.231		0.009	0.12
Run13	9.14	0.34	0.1	0.25	0.103	0.025	0.009	0.37
			0.125	0.19	0.127		0.010	0.4
			0.15	0.11	0.151		0.011	0.44
			0.175	0.09	0.176		0.012	0.46
			0.2	0.09	0.201		0.012	0.49
			0.225	0.07	0.226		0.013	0.51
Run14	9.14	0.34	0.1	0.49	0.113	0.05	0.009	0.185
			0.125	0.37	0.133		0.010	0.2
			0.15	0.28	0.156		0.011	0.215
			0.175	0.22	0.179		0.011	0.225
			0.2	0.18	0.203		0.012	0.24
			0.225	0.15	0.228		0.013	0.25

Table 1. Experimental Cases (Continue)

Run	D_m (mm)	porosity	h_o (m)	Fr	H (m)	q (m ² /s)	Δq (m ² /s)	$\Delta q/q$
Run15	9.14	0.34	0.1	-	-	0.075	-	-
			0.125	-	-		-	-
			0.15	0.42	0.163		0.011	0.140
			0.175	0.34	0.184		0.011	0.147
			0.2	0.29	0.207		0.012	0.153
			0.225	0.24	0.231		0.012	0.163
Run16	9.84	0.446	0.1	0.25	0.103	0.025	0.011	0.45
			0.125	0.19	0.127		0.012	0.49
			0.15	0.11	0.151		0.013	0.52
			0.175	0.09	0.176		0.014	0.56
			0.2	0.09	0.201		0.015	0.6
			0.225	0.07	0.226		0.016	0.63
Run17	9.84	0.446	0.1	0.49	0.113	0.05	0.011	0.225
			0.125	0.37	0.133		0.012	0.245
			0.15	0.28	0.156		0.013	0.26
			0.175	0.22	0.179		0.014	0.28
			0.2	0.18	0.203		0.015	0.295
			0.225	0.15	0.228		0.016	0.315
Run18	9.84	0.446	0.1	-	-	0.075	-	-
			0.125	-	-		-	-
			0.15	0.42	0.163		0.013	0.173
			0.175	0.34	0.184		0.014	0.187
			0.2	0.29	0.207		0.015	0.197
			0.225	0.24	0.231		0.015	0.203
Run19	16.60	0.452	0.1	0.25	0.103	0.025	0.016	0.65
			0.125	0.19	0.127		0.018	0.71
			0.15	0.11	0.151		0.019	0.76
			0.175	0.09	0.176		0.020	0.8
			0.2	0.09	0.201		0.021	0.85
			0.225	0.07	0.226		0.022	0.88
Run20	16.60	0.452	0.1	0.49	0.113	0.05	0.016	0.325
			0.125	0.37	0.133		0.018	0.35
			0.15	0.28	0.156		0.019	0.38
			0.175	0.22	0.179		0.020	0.4
			0.2	0.18	0.203		0.021	0.415
			0.225	0.15	0.228		0.022	0.44
Run21	16.60	0.452	0.1	-	-	0.075	-	-
			0.125	-	-		-	-
			0.15	0.42	0.163		0.019	0.253
			0.175	0.34	0.184		0.020	0.263
			0.2	0.29	0.207		0.021	0.277
			0.225	0.24	0.231		0.022	0.293
Run22	28.7	0.368	0.1	0.31	0.103	0.025	0.019	0.76
			0.125	0.19	0.127		0.020	0.8
			0.15	0.12	0.151		0.022	0.87
			0.175	0.1	0.176		0.023	0.92
			0.2	0.09	0.201		0.024	0.97
			0.225	-	-		-	-
Run23	28.7	0.368	0.1	0.5	0.113	0.05	0.019	0.38
			0.125	0.39	0.133		0.021	0.41
			0.15	0.3	0.156		0.022	0.435
			0.175	0.22	0.179		0.023	0.46
			0.2	0.18	0.203		0.024	0.485
			0.225	0.16	0.228		0.025	0.505

Table 1. Experimental Cases (Continue)

Run	D_m (mm)	porosity	h_o (m)	Fr	H (m)	q (m^2/s)	Δq (m^2/s)	$\Delta q/q$
Run24	Run24-1	28.7	0.368	0.1	-	-	-	-
	Run24-2			0.125	-	-	-	-
	Run24-3			0.15	0.41	0.163	0.022	0.29
	Run24-4			0.175	0.33	0.184	0.023	0.31
	Run24-5			0.2	0.14	0.207	0.024	0.32
	Run24-6			0.225	0.15	0.231	0.025	0.34

구슬을 이용한 실험조건이며 Run10~24는 사석을 이용한 실험조건을 나타낸다. Run1~9는 일정한 형상과 크기의 구슬을 사용하였으므로 공극률이 약 0.4~0.41로 거의 일정하게 나타났다. 반면 Run10~24는 사석의 입자형태 및 쌓임형태가 다르므로 공극률이 0.34~0.452로 산정되었다. 각각의 재료에 대한 공극률은 실험 전 메스실린더를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 유량특성

개수로에서 필터 블록으로 구성된 용수 취수시스템으로 유입되는 유량은 상류유량조건, 접근유속 및 수심조건등 다양한 수리조건에 따라 변화한다. Fig. 4는 취수시스템으로 접근하는 수심(h_o)변화에 따른 취수시스템으로 전환되는 유량비($\Delta q/q$)를 도시하였다. 여기서 접근수심은 취수시스템 깊이(T)로 무차원화 되었으며 무차원 수심(h_o/T) 2.0~4.5사이에서 실험이 수행되었다. q (m^2/s)는 상류에서 공급되는 단위폭당 유량이며 Δq (m^2/s)는 취수시스템으로 유입되는 단위폭당 유량이다.

Fig. 4를 보면 접근수심이 증가함에 따라 취수시스템으로 전환되는 유량비가 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 취수시스템 필터 블록의 재질과 상류유량에 관계없이 취수시스템으로 유입되는 유량비가 접근수심에 따라 증가하였다. 그러나 상류 유입유량 증가는 취수시스템으로 유입되는 유량비에 영향을 미쳤다. 유량비는 상류유량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 취수시스템의 필터 블록이 2 mm 쇠구슬로 제작된 경우(Run1~3)에는 취수시스템으로 유입되는 유량비($\Delta q/q$)가 0.043~0.18로 매우 작게 나타났으며 상류유량에 따른 유량비 변화의 차이도 크게 나타나지 않았다. 필터 블록에 9.52 mm 쇠구슬을 사용한 경우(Run4~6)에는 2 mm 쇠구슬을 사용한 경우보다 취수시스템으로 유입되는 유량비가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 상류유량 변화에 따라 유량비의 차이가 Run1~3의 결과와 달리 뚜렷이 나타났다. 필터 블록을 19.05 mm 쇠구슬을 사용한 경우(Run7~9)에는 Run4~6에서 나타난 유량비와 유사하게 발생함을 보였다. 그러므로 일정한 공극률($r_o=0.4\sim0.41$)로 구성된 필터 블록을 통하여 취수시스템으로 유입되는 유량비는 필터 블록 재료의 크기가 아주 작은 경우($D_m=2$ mm)를 제외하고 상류유량에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

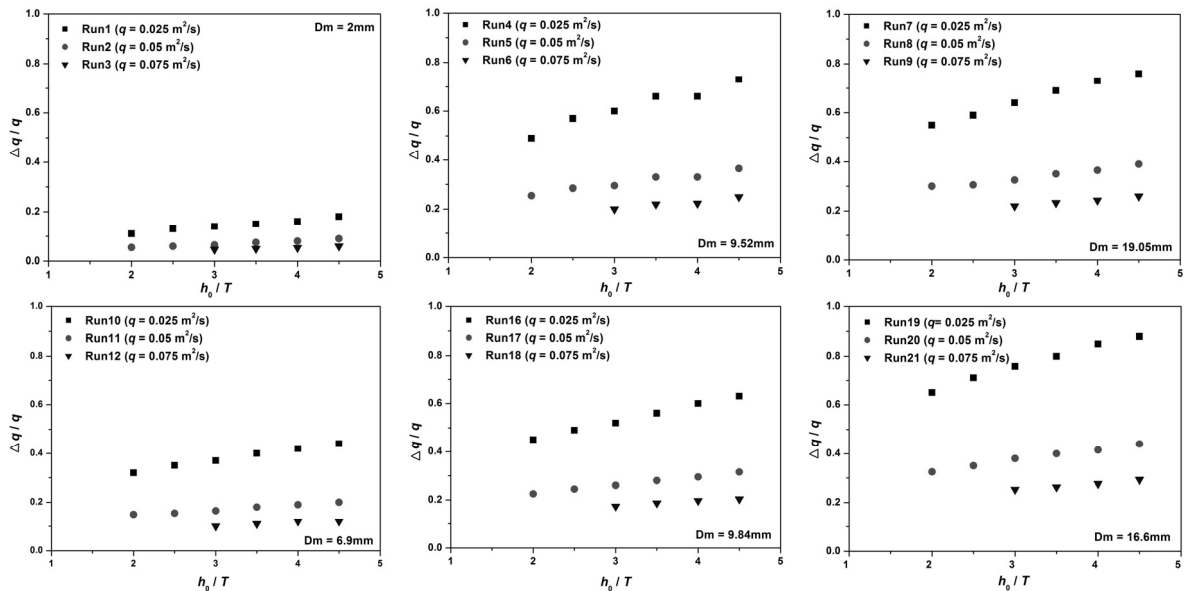


Fig. 4. Discharge Ratio According to The Approach Flow Depth

자연하천에서는 일정한 형상 및 크기로 구성된 필터 블록보다는 사석을 이용하는 것이 더 현실적이다. 이에 입경 6.9~28.7 mm의 사석을 이용하여 수리실험을 수행하였다. 실험결과는 쇄구슬을 이용한 실험결과와 동일한 경향을 나타냈다. 취수시스템으로 유입되는 유량비는 접근수심이 증가함에 따라 증가하였고 상류유량이 증가하면 필터 블록으로 전환되는 유량비가 감소하는 특성을 보였다.

Fig. 5는 Froude 수의 변화에 따른 취수시스템으로 전환되는 유량비($\Delta q/q$)를 도시하였다. 수리실험은 Froude 수가 1.0이하인 상류조건에서 수행되었으며 Froude 수의 계산은 접근평균유속(u_0)과 접근수심(h_0)을 사용하였다. 유량비는 취수시스템 필터 블록의 재질과 관계없이 Froude 수가 증가하면서 감소하는 경향을 보인다. 필터 블록이 쇄구슬 2 mm로 구성된 경우(Run1~3)에는 취수시스템으로 전환되는 유량비는 Froude 수에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며 유량비는 0.05~0.18범위로 미미한 변화를 보였다. 구슬의 입경이 커지면서 Froude 수의 변화에 따라 취수시스템으로 전환되는 유량비가 증가하였다. 구슬 입경이 9.25 mm(Run4~6)와 19.05 mm(Run7~9)인 경우에는 Froude 수 0.25까지 유량비가 급격히 줄어들었으나 Froude 수가 0.25보다 커지면 거의 일정한 값을 나타냈다.

취수시스템 필터 블록이 사석으로 구성된 경우에도 유사한 경향을 보인다. 작은 입경의 사석(6.9 mm)으로 필터 블록이 이루어진 경우(Run10~12)에는 쇄구슬을 사용한 경우와 동일하게 Froude 수에 따라 큰 변화를 보이지 않았다. 한편 사석의 입경이 증가하면서 Froude 수에 따른 변화가 더욱 크게 나타났다. 특히 사석의 입경이 16.6 mm인 경우(Run19~21)에는 취수시스템으로 전환되는 유량비가 최대 0.87에서 최소 0.25로 Froude 수에 크게 영향을 받는

것으로 판단된다. 종합해보면 취수시스템 필터 블록을 구성하는 재료의 입경이 매우 작은 경우에는 취수시스템으로 전환되는 유량비가 Froude 수에 의한 영향이 미미하게 발생한다. 하지만 재료의 입경이 증가하면 취수시스템으로 유입되는 유량비는 Froude 수와 밀접한 관련을 보이며 Froude 수가 증가하면 유량비가 감소하는 것을 확인하였다.

3.2 유량계수 산정

이전의 취수시스템은 흐름 및 횡 방향 슬릿형태로 제작되어 적용되어 왔다(Righetti and Lanzoni, 2008). 여러 연구자들이 슬릿형태로 구성된 취수시스템으로 전환되는 유량을 산정하는 관계식을 개발하고자 하였다. 일반적으로 단위폭당 취수시스템으로 공급되는 유량을 산정하는 관계식은 다음과 같다. 이 관계식은 직선 개수로와 같이 횡 방향으로 흐름이 일정한 경우 유효하다.

$$\frac{dq}{dx} = C_q r_0 \sqrt{2gY} \quad (1)$$

여기서 dq 는 취수시스템의 길이(dx)를 따라 유입되는 단위폭당 유량(m^2/s), r_0 는 공극률, C_q 는 유량계수, g 는 중력가속도(m/s^2), Y 는 수두(m) 이다. Nosedá(1956)는 취수시스템으로 공급되는 유량을 산정하기 위해 수두(Y)를 취수시스템에서 발생하는 국부수심(h)을 적용하여 산정하였고, Mostkow(1957)와 Righetti and Lanzoni(2008)는 수두(Y)를 취수시스템으로 접근하는 전수두(H)를 적용하여 취수시스템으로 유입되는 유량을 산정하였다. 특히, Mostkow(1957)는 취수시스템을 따라 발생하는 에너지손실이 무

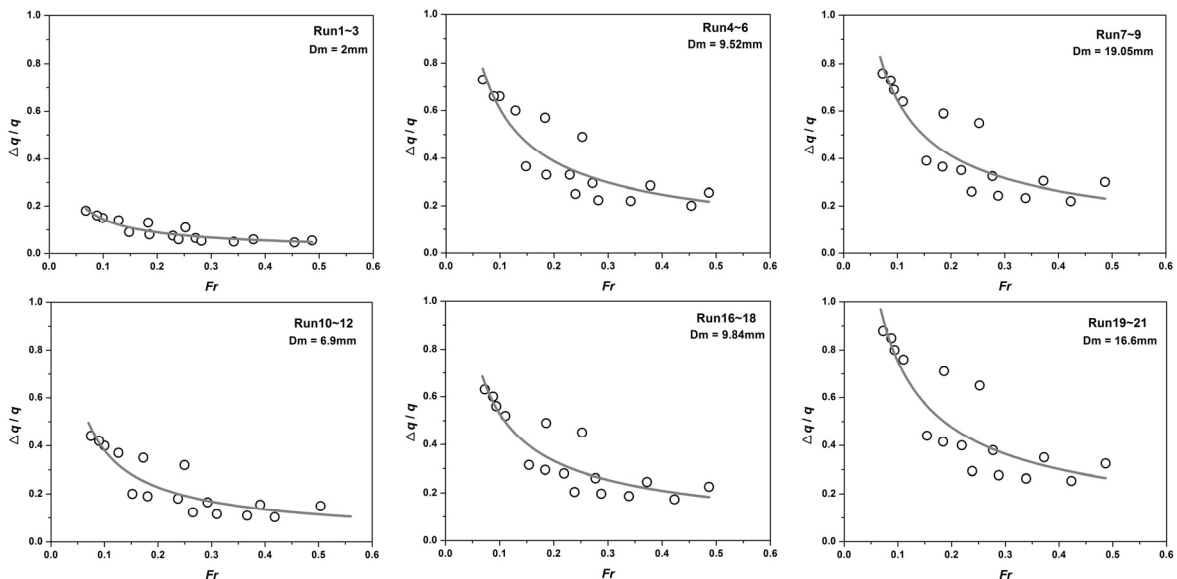


Fig. 5. Discharge Ratio Versus The Froude Number

시할 수 있을 정도로 작다고 하면 취수시스템에 작용하는 에너지가 일정하기 때문에 취수시스템으로 접근하는 전수두를 사용하는 것이 적절하다고 하였다. 본 연구에서는 Mostkow (1957)와 같이 취수시스템에 접근하는 전수두를 적용하여 취수시스템으로 유입되는 단위폭당 유량을 산정하였다. 완만한 경사($\cos\theta=1$)에서 수로바닥을 기준으로 취수시스템에 접근하는 전수두는 다음과 같이 계산되며 계산결과는 Table 1에 정리되어 있다.

$$H = h_0 + \frac{V^2}{2g} = h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} \quad (2)$$

취수시스템으로 접근하는 전수두(H)를 이용하여 필터 블록으로 구성된 취수시스템으로 유입되는 단위폭당 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta q = C_q r_0 x \sqrt{2gH} \quad (3)$$

여러 논문에서 슬릿형태 취수시스템의 유량계수(C_q)에 관한 연구가 수행되었고 수리특성, 취수시스템 길이, 경사, 슬릿의 간격, 재질 등에 영향을 받는다고 하였다. 본 연구의 수리실험은 취수시스템의 경사가 수평인 조건이기 때문에 경사에 의한 영향은 무시할 수 있다. 그러므로 수리특성, 취수시스템 필터 블록의 공극률 및 재료의 특성이 유량계수를 결정하는 중요한 변수가 될 수 있으므로 이에 따른 변화를 분석하였다. 여기서 유량계수는 Eq. (3)으로부터 변형된 다음의 관계식을 이용하였다.

$$C_q = \frac{\Delta q}{r_0 x \sqrt{2gH}} \quad (4)$$

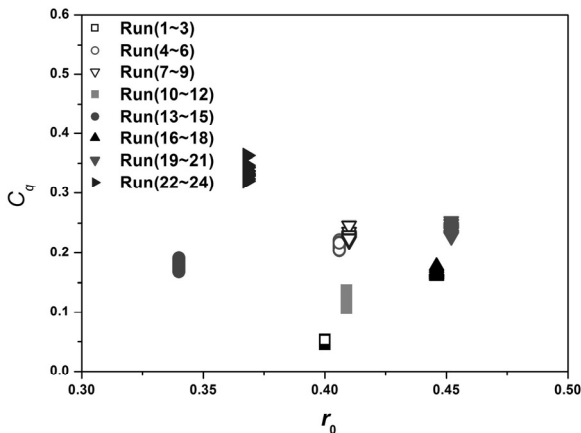
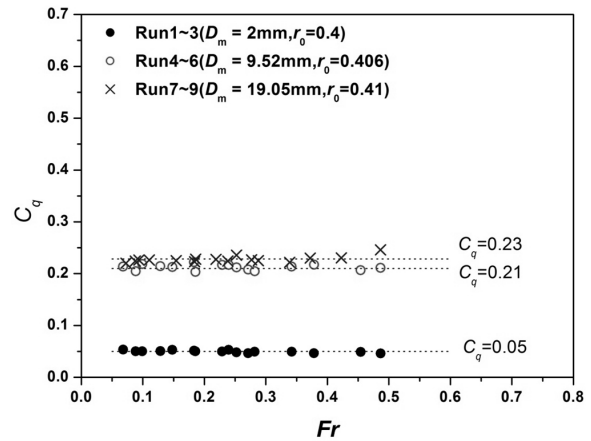


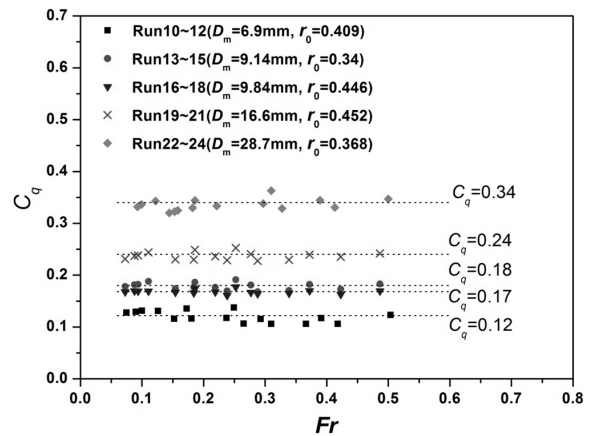
Fig. 6. Discharge Coefficient Versus Porosity of The Filter Block

Fig. 6은 취수시스템 필터 블록의 공극률 변화에 따른 유량계수를 도시하였으며 사석과 구슬을 이용한 결과를 함께 제시하였다. 구슬을 이용한 경우에는 공극률이 0.4-0.41로 거의 유사하게 나타났다. 구슬의 입경이 9.52 mm와 19.05 mm는 유량계수가 거의 유사한 값을 보였으나 구슬의 입경이 2.0 mm인 경우에는 유량계수가 급격히 감소하는 양상을 보였다. 사석을 이용한 경우에는 필터 블록의 공극률이 0.34-0.452범위에서 유량계수는 0.1에서 0.37로 나타났다. 결과적으로 보면 유량계수는 취수시스템 필터 블록의 공극률과 상관성이 크지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 Froude 수에 따른 유량계수 변화를 도시하였다. 여기서 위쪽의 그래프(Fig. 7(a))는 쇠구슬을 이용한 실험결과(Run1~9)이며 아래쪽(Fig. 7(b))은 사석을 이용한 실험결과(Run10~24)를 나타낸다. 그림에서 점선은 각 실험의 평균값을 나타내며 그 값을 같이 도시하였다. 쇠구슬을 이용한 실험결과에서 유량계수는 Froude 수에 따라 변화하지 않고 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다. 구슬의 입경이 2.0 mm인 경우(Run1~3)에는 유량계수가 0.05



(a)



(b)

Fig. 7. Discharge Coefficient According to The Froude Number. (a) Stainless Steel Bead Case, (b) Riprap Case

로 나타났고 9.52 mm (Run4-6)와 19.05 mm (Run7-9)경우에는 각각 0.21과 0.23으로 일정한 값을 보였다. 취수시스템 필터 블록이 사석으로 구성된 경우에도 Froude 수에 따라 일정한 값을 갖는 동일한 경향이 보이며 유량계수는 0.12~0.34인 것으로 나타났다. 이러한 경향은 앞서 설명된 Froude 수와 필터 블록을 통하여 취수시스템으로 유입되는 유량비($\Delta q/q$)와 상당히 다른 결과를 보였다. 유량비는 Froude 수가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으나 유량계수는 Froude 수와 무관한 경향을 보였다.

또한, 앞서 설명한 바와 같이 유량계수는 취수시스템 필터 블록의 공극률과 상관성이 크지 않음을 확인하였다. 반면 필터 블록 재료의 입경과 밀접한 관계있는 것으로 보인다. 구슬 또는 사석의 입경이 증가하면 유량계수가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보아 필터 블록 재료의 입경이 유량계수와 밀접한 관련이 있는 변수인 것으로 판단할 수 있다.

분석결과 취수시스템 필터 블록의 유량계수는 수리특성 또는 공극률보다 필터 블록 재료의 입경과 관련이 있는 것으로 나타났다. Fig. 8은 필터 블록 재료의 입경에 따른 유량계수의 변화를 도시하였다. 유량계수는 필터 블록의 재료 및 재질과 상관없이 입경이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 추세 분석을 실시하였고 유량계수가 필터 블록 재료의 입경만의 함수라고 가정하여 실험치에 근접하도록 경험식을 추정하였다.

$$C_q = 2.8(D_m)^{0.6} \quad (5)$$

수리실험을 통하여 유량계수가 필터 블록 재료의 입경에 따라 변화하는 것으로 나타났다. 유량계수는 필터 블록 재료 입경의 0.6승으로 증가하는 것으로 나타났으며 경험식(Eq. 5)에서 결정계수(R^2)가 0.91의 값을 나타냄으로써 실험 결과에 대한 경험식이 높은 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 8에는

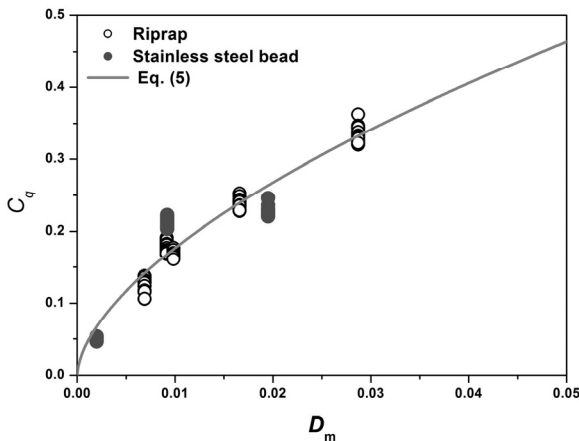


Fig. 8. Discharge Coefficient According to Particle Diameters

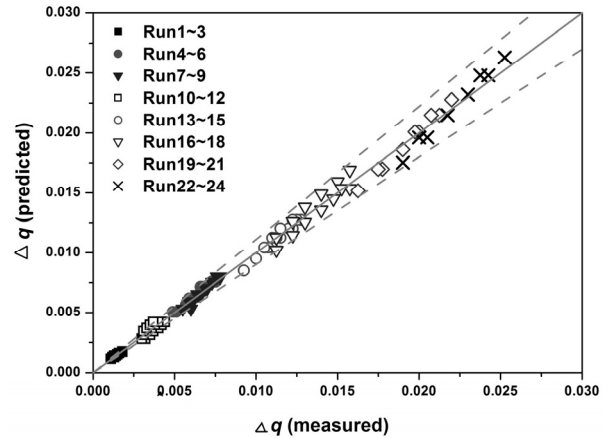


Fig. 9. Comparison between Measured and Predicted Diverted Discharges in The Intake System Composed of The Filter Block

쇠구슬을 이용한 실험결과 및 사석을 사용한 실험결과가 포함되어 있으며 사석의 경우 입경은 같지만 다양한 형상을 가지고 있다. 그럼에도 취수시스템 필터 블록에 사용된 재료의 형상에 관계없이 하나의 추세 선을 따라 변화하는 것으로 나타났다. 이는 유량계수가 필터 블록에 사용되는 재료의 형상과 상관성이 크지 않음을 의미한다.

본 연구의 수리실험 결과를 보면 유량계수는 수리특성에 영향을 받지 않는 반면 필터 블록을 구성하는 재료의 입경에 지배적인 것으로 나타났다. 이 결과를 통해 얻은 유량계수 경험식(Eq. 5)을 Eq. (3)에 적용시키면 취수시스템 필터 블록으로 전환되는 단위폭당 유량을 얻을 수 있다. Fig. 9는 수리실험으로 측정된 취수시스템으로 전환된 단위폭당 유량과 Eq. (3)에 경험식(Eq. 5)을 적용하여 얻은 단위폭당 유량을 비교하였다. 그림에서 점선은 $\pm 10\%$ 의 오차를 나타낸다. 측정된 유량과 Eq. (3)에 유량계수 산정을 위한 경험식(Eq. 5)을 적용한 결과를 비교하면 $\pm 10\%$ 내에서 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4. 결론

하천 횡단구조물로 단절된 하천의 연속성 및 하천 생태를 회복하고 하천용수를 취수할 수 있는 필터 블록을 이용한 하천용수 취수시스템이 제안되었다. 본 연구에서는 필터 블록으로 구성된 하천용수 취수시스템으로 전환되는 유량특성을 분석하였으며 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 필터 블록으로 구성된 취수시스템으로 전환되는 유량비는 필터 블록의 특성과 관계없이 접근수심에 따라 증가하였다. 그러나 상류유량이 증가하면 취수시스템으로 전환되는 유량비가 감소하였다. 취수시스템으로 유입되는 유량비는 필터 블록 재료의 입경이 작은 경우에는 Froude 수의 영향이 미미했지만 재료의 입경이

증가하면 유량비가 Froude 수에 더욱 영향을 받는다. Froude 수가 증가하면 유량비는 감소하였다.

둘째, 취수시스템 필터 블록의 유량계수는 공극률과의 관계로 정의하기에는 무리가 있다. 유량계수는 Froude 수의 변화에 따라 일정한 값을 보였으며 필터 블록 재료의 입경과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 따라서 필터 블록의 유량계수는 구슬 및 사석의 입경에 주된 영향을 받기 때문에 필터 블록 재료의 입경만에 함수로 추정할 수 있다.

셋째, 필터 블록 재료의 입경 만에 함수로 추정된 유량계수 경험식을 취수시스템으로 전환되는 유량 관계식에 적용하면 필터 블록으로 구성된 취수시스템으로 유입되는 유량을 적절히 산정할 수 있음을 보였다. 추정된 경험식과 관계식은 하천용수 취수시스템으로 전환되는 유량을 산정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

향후연구로는 추정된 유량계수에 사용된 재료의 입경이 다소 제한적이므로 유량계수를 실무에 적용하기 위해서는 좀 더 다양한 입경을 검토해야 할 것이다. 그리고 본 연구에서는 취수시스템의 기울기가 없으며 길이가 일정한 조건에서 실험이 수행되었다. 그러나 취수시스템의 길이가 길어지거나 기울기가 변화하면 흐름방향으로 수면기울기가 발생하여 취수시스템으로 유입되는 유량이 변화할 것이다. 이러한 조건에서는 취수시스템의 길이 및 기울기가 유량계수에 영향을 미치므로 이에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이다. 또한 실제 하천에서는 유사와 관련된 문제가 발생할 수 있다. 이전에 연구들을 보면 취수시스템으로 유입되는 유사를 방지하기 위해 취수시스템의 기울기를 증가시키거나 공극을 아주 작게 하는 방법으로 유사유입을 최소화하였다. 그러나 유사 또는 이물질들이 취수시스템 내부로 유입되는 것을 완전히 차단하는 것은 불가능하기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 ‘친수가치 제고를 위한 홍수터관리 기술 개발(2015-0177-1-1)’의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Abbsa Kamanbedast, A. and Shafai Bejestan, M. (2008). "Effects of slope and area opening on the discharge ratio in bottom intake structures." *Journal of Applied Sciences*. Vol. 8, No. 14, pp. 2631-2635.
- Bouvard, M. (1953). "Debit d'une grille par en dessous (Discharge passing through a bottom grid)." *Houille Blanche*, Vol. 3, pp. 290-291 (in French).
- Bouvard, M. (1992). *Mobile barrages and intakes on sediment transporting rivers*. IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Brunella, S. Hager, W. H. and Minor, H. E. (2003). "Hydraulics of bottom rack intake." *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 129, No. 1, pp. 2-10.
- Choi, S. U., Lee, H. E., Yoon, B. and Woo, H. (2009). "Change in stream morphology after Gongneung weir 2 removal." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 42, No. 5, pp. 425-432 (in Korean).
- Ji, U. (2014). "Development of imagination for creative ideas." *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*, pp. 213-236 (in Korean).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2008). *The stream eco-corridor restoration and water quality improvement by weir removal with its function lost* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). (2009). *Current status of river-crossing structures and fishway in Korea* (in Korean).
- Mostkow, M. (1957). "Sur le calcul des grilles de prise d'eau (Theoretical study of bottom type water intake)." *Houille Blanche*, Vol. 4, pp. 570-580 (in French).
- Nosedo, G. (1956). "Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo." *Energia Elettrica*, Vol. 6, pp. 565-581 (in Italian).
- Ract-Madoux, X., Bouvard, M., Molbert, J. and Zumstein, J. (1955). "Quelques realisations recentes de prises en-dessous a haute altitude en Savoie." *La Houille Blanche*, Vol. 6, No. 10, pp. 852-878 (in French).
- Righetti, M. and Lanzoni, S. (2008). "Experimental study of the flow field over bottom in take racks." *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 134, No. 1, pp. 15-22.
- Venkaragaman, P. (1977). "Discharge characteristics of an idealized bottom intake." *Journal of The Institution of Engineers*, 58, pp. 99-104.
- Woo, H., Yoon, B. and Cho, K. H. (2004). "The stream eco-corridor restoration and disaster prevention by weir removal with its function lost." *Magazine of Korean Water Resources Association*, Vol. 37, No. 6, pp. 99-109 (in Korean).