

여울에서의 산소전달 효과에 관한 수리실험

○ 이상수* · 김진홍** · 심명필***

1. 서론

본 연구에서는 하천 어류 서식에 중요한 역할이 되고 있는 하천의 여울의 수리특성을 현지에서 측정된 자료를 바탕으로 실험실에서 여울의 형태와 수리조건 등을 적정 축척으로 재현시켜 측정하였다. 개수로 실험실에서 실제 하천 여울의 형태를 재현하여 수리특성을 조사 측정하고 기포발생과 수리특성과의 관계를 제시하였다. 또한 여울을 통한 흐름의 공기 혼입 현상에 대해 분석하며, 여울 상·하류에서 실시한 용존산소 농도 변화를 측정함으로써 폭기효과 및 이에 따른 산소전달효과에 대해 분석하였다.

2. 실험 방법

실내 수리 실험은 개수로 실험실에서 수행되었다. 개수로 실험장치의 크기는 길이 12m, 폭 0.4m, 높이 0.4m이고, 효과적인 실험을 위하여 실제 하천에서의 여울과 비슷한 조건의 인공 여울을 설치하였다. 실험실 여울의 크기는 폭 0.4m, 길이 3.5m, 경사 1/14로 하였다.

본 실험에서는 6개의 유량에 대한 실험을 총4회 실시하였다. 실험실에서 재현한 여울 상·하류의 DO와 유속, 수온을 측정하였으며, 유량은 개수로 실험장치에서 디지털로 표시가 된다. 그림 1은 개수로 실험장치에 형성한 인공여울의 측정지점을 표시한 것이고, 그림 2는 본 연구의 실험에 이용된 개수로 실험장치의 흐름 상태이다.

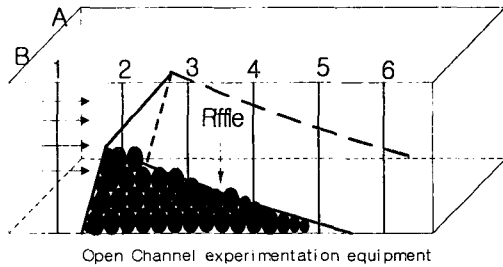


그림 1 인공여울과 여울에서의 측정지점



그림 2 개수로 실험장치 흐름 상태

개수로 실험장치를 이용하여 그림 1에서 보는바와 같이 각 측정지점에서 측정한 DO의 결과는 다음의 표 1과 같다. DO 농도의 변화 모습을 알아보기 위하여 측정지점별 DO 농도의 추이를 다음의 그림 3 ~ 그림 6에 나타내었다. 그림의 범례에서 색이 채워진 것은 여울의 좌안(A)이고, 채워지지 않은 것은 여울의 우안(B)이다. 총 6회의 서로 다른 유량에서의 측정결과이며 1회에서 6회로 갈수록 유량은 증가한다. 따라서 여울의 상류에서 하류로 갈수록 폭기현상에 의해서 용존산소농도(DO)가 증가됨을 알 수 있다.

*정회원 · 중앙대학교 토목공학과 석사졸업 · 031-670-4663 · (E-mail:sangsuda@post.cau.ac.kr)

**정회원 · 중앙대학교 토목공학과 부교수 · 031-670-3355 · (E-mail:jinhkim@cau.ac.kr)

***정회원 · 인하대학교 토목공학과 교수 · 032-860-7566 · (shim@inha.ac.kr)

표 1 유량에 따른 측정지점의 DO농도 변화

유량 (m ³ /s)	측정 지점	DO (mg/l)		DO (mg/l)		DO (mg/l)		DO (mg/l)	
		A	B	A	B	A	B	A	B
0.111	1	5.55	5.55	6.66	6.55	6.68	6.55	6.56	6.40
	2	5.86	5.92	6.79	6.74	6.75	6.74	6.75	6.69
	3	5.99	5.95	6.85	6.81	6.76	6.81	6.77	6.75
	4	6.00	5.92	6.88	6.79	6.79	6.79	6.76	6.77
	5	5.95	5.99	6.91	6.82	6.81	6.82	6.80	6.79
	6	5.94	5.89	6.94	6.80	6.76	6.80	6.79	6.81
0.0126	1	5.45	5.26	6.53	6.49	6.51	6.49	6.49	6.22
	2	5.75	5.76	6.55	6.65	6.64	6.65	6.70	6.61
	3	5.84	5.79	6.55	6.67	6.63	6.67	6.72	6.67
	4	5.94	5.82	6.62	6.68	6.65	6.68	6.71	6.71
	5	5.87	5.94	6.84	6.71	6.67	6.71	6.72	6.74
	6	5.93	5.84	6.86	6.72	6.68	6.72	6.73	6.76
0.0140	1	5.33	5.33	6.19	6.48	6.51	6.48	6.31	6.39
	2	5.66	5.67	6.35	6.69	6.68	6.69	6.60	6.70
	3	5.70	5.76	6.39	6.74	6.57	6.74	6.64	6.73
	4	5.74	5.71	6.45	6.76	6.63	6.76	6.68	6.77
	5	5.71	5.75	6.48	6.81	6.68	6.81	6.71	6.79
	6	5.74	5.72	6.55	6.82	6.77	6.82	6.72	6.82
0.0154	1	5.37	5.34	6.50	6.50	6.42	6.50	6.56	6.35
	2	5.58	5.56	6.75	6.80	6.71	6.80	6.84	6.80
	3	5.64	5.67	6.84	6.82	6.75	6.82	6.86	6.86
	4	5.74	5.61	6.86	6.83	6.80	6.83	6.87	6.90
	5	5.73	5.71	6.91	6.88	6.80	6.88	6.90	6.94
	6	5.75	5.74	6.95	6.88	6.82	6.88	6.91	6.99
0.0168	1	5.15	5.19	6.40	6.56	6.54	6.56	6.32	6.32
	2	5.58	5.60	6.80	6.85	6.84	6.85	6.69	6.74
	3	5.59	5.62	6.77	6.89	6.86	6.89	6.74	6.81
	4	5.63	5.57	6.91	6.91	6.88	6.91	6.78	6.83
	5	5.57	5.58	6.95	6.95	6.90	6.95	6.80	6.89
	6	5.54	5.56	6.98	7.07	6.94	7.07	6.84	6.91
0.0182	1	4.84	4.86	6.42	6.47	6.42	6.47	6.43	6.34
	2	5.22	5.26	6.52	6.76	6.74	6.76	6.81	6.78
	3	5.43	5.49	6.60	6.77	6.74	6.77	6.86	6.84
	4	5.44	5.46	6.73	6.82	6.80	6.82	6.94	6.90
	5	5.51	5.43	6.85	6.94	6.89	6.94	6.95	6.94
	6	5.44	5.46	6.96	6.95	6.89	6.95	6.96	6.97

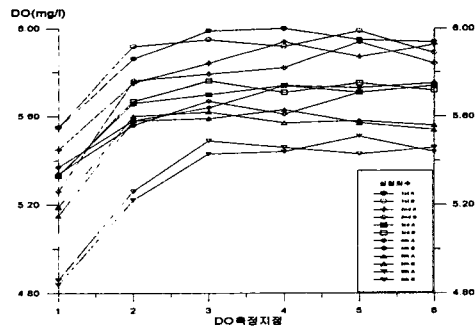


그림 3 측정지점별 DO농도변화(1차실험)

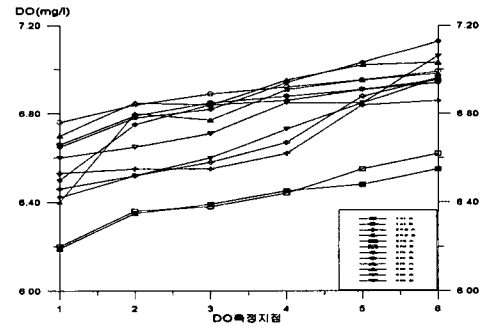


그림 4 측정지점별 DO농도변화(2차실험)

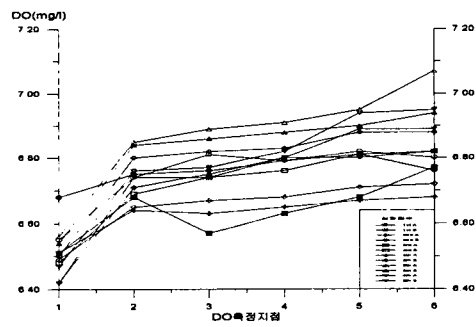


그림 5 측정지점별 DO농도변화(3차실험)

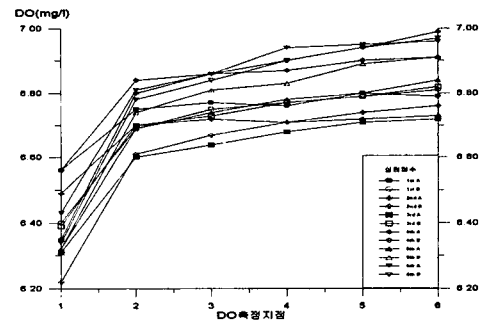


그림 6 측정지점별 DO농도변화(4차실험)



그림 7 여울에서의 기포혼입 모습

그림 7은 여울의 기포혼입 모습이다. 그림 7을 보면 기포발생은 하상입자의 굽은 후면(trailing edge)에서 주로 이루어지며, 굽은 입경 직하류의 수심이 증가하면서 유속이 급격히 감소할수록 기포유입의 조직적 와류구조가 발달되는 되는 것을 알 수 있다. 또한 기포발생은 흐름방향으로 입경과 입경사이의 간극이 커지면서 pool이 형성되는 지점에서 활발히 발생하며, 이때 수심은 상승하고 유속은 급격히 감소하면서 조직적인 와류구조가 형성되는 것을 알 수 있다. 발생한 기포는 흐름방향과 더불어 성장하다가 위 방향으로 이동하면서 수면 근처에서 깨어진다. 기포가 깨어짐으로서 수중에는 많은 용존산소가 저장되고 이는 하천생태계 특히 어류의 서식에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3. 수리 실험 결과

실험회수별 개수로실험실 여울의 DO농도 증가 효율을 나타내기 위해서 본 연구에서는 20℃를 참고온도로 하여 보정한 무차원화된 산소전달효율(E_{20})을 측정된 DO농도 자료로부터 계산하였다. 산소전달효율(E_{20})을 구하는 식은 다음과 같다(Gulliver 등, 1990).

$$E = 1 - \frac{1}{r} = \frac{(C_d - C_u)}{(C_s - C_u)} \quad (\text{식 1})$$

$$\frac{\ln(1 - E_T)}{\ln(1 - E_{20})} = 1 + \alpha(T - 20) + \beta(T - 20)^2 \quad (\text{식 2})$$

여기서 C_s , C_u , C_d 는 각각 DO 포화농도, 보의 상·하류 용존산소농도로 정의된다. E_T 와 E_{20} 은 각각 온도 T 와 20℃에서 산소전달효율이고, α 와 β 는 상수로서 각각 $\alpha = 0.02103 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = 8.621 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ 이다. 식 1과 식 2에 따라 그림 1에서 보는 바와 같이 여울의 상류지점을 1로 시작하여 하류 방향으로 6지점까지 설정하고 좌안을 A, 우안을 B로 하여 구한 지점별 수리량에 따른 산소전달효율(E_{20})을 표 2에 나타내었다.

표 2 각 실험에서 수리량에 따른 산소전달효율

실험회수	E_{20}			V (m/s)	Q (m^3/s)	Fr	h(m)
	A	B	평균				
1차	0.088	0.076	0.082	0.400	0.0111	0.497	0.072
	0.107	0.124	0.116	0.458	0.0126	0.565	0.071
	0.087	0.091	0.089	0.487	0.0140	0.587	0.074
	0.084	0.088	0.086	0.509	0.0154	0.627	0.070
	0.086	0.083	0.085	0.530	0.0168	0.609	0.083
	0.125	0.125	0.125	0.564	0.0182	0.638	0.082
2차	0.073	0.062	0.068	0.456	0.0108	0.607	0.066
	0.085	0.125	0.105	0.411	0.0122	0.486	0.072
	0.085	0.099	0.092	0.472	0.0138	0.576	0.075
	0.114	0.094	0.104	0.473	0.0156	0.533	0.081
	0.143	0.087	0.115	0.518	0.0167	0.592	0.081
	0.134	0.119	0.127	0.592	0.0181	0.696	0.088
3차	0.021	0.065	0.043	0.481	0.0110	0.654	0.060
	0.045	0.060	0.053	0.473	0.0125	0.604	0.072
	0.067	0.087	0.077	0.509	0.0139	0.642	0.074
	0.101	0.098	0.100	0.515	0.0156	0.607	0.079
	0.101	0.129	0.115	0.531	0.0168	0.613	0.083
	0.116	0.119	0.118	0.523	0.0185	0.562	0.089
4차	0.060	0.103	0.082	0.438	0.0110	0.567	0.066
	0.063	0.133	0.098	0.467	0.0125	0.592	0.072
	0.102	0.108	0.105	0.497	0.0139	0.613	0.075
	0.089	0.155	0.122	0.509	0.0156	0.597	0.081
	0.125	0.142	0.134	0.542	0.0168	0.631	0.081
	0.134	0.156	0.145	0.528	0.0185	0.572	0.088

표 2를 근거로 정량적인 비교·검토를 하기 위해 측정치 중 오차발생분의 일부자료를 제외한 결과치를 산정하여, 각각의 수리량에 따른 산소전달효율(E_{20})과의 관계를 그림으로 나타내면 그림 7~그림 10과 같다.

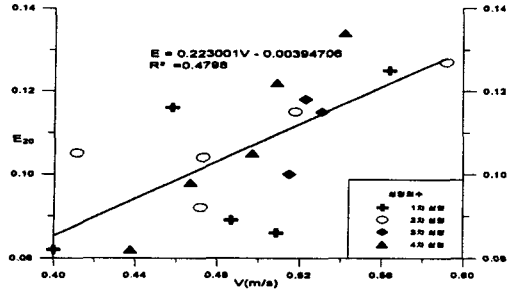


그림 7 산소전달효율과 유속과의 관계

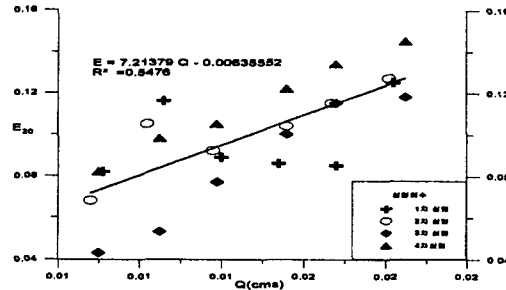


그림 8 산소전달효율과 유량과의 관계

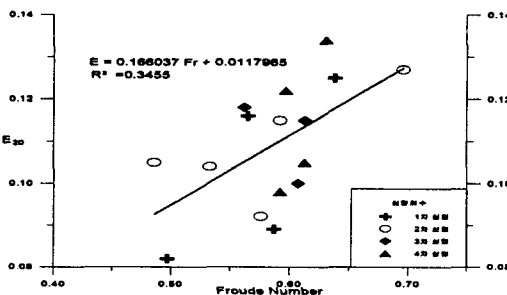


그림 9 산소전달효율과 Fr수와의 관계

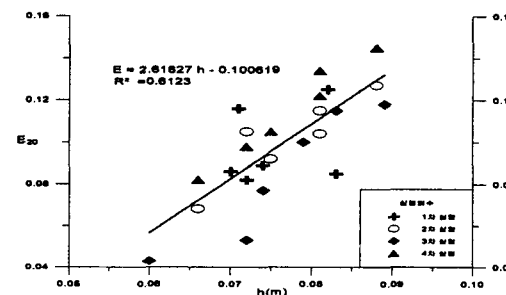


그림 10 산소전달효율과 월류수심과의 관계

위의 그림 7~그림 10의 실험결과에 의하면 유속, 유량, Fr 수, 월류 수심이 증가함에 따라 산소전달효율도 증가하는 추세를 나타낸다. 여울의 상·하류를 비교했을 때 상류에서 하류로 갈수록 폭기에 의해 공기가 혼입되어 수중에 용존산소가 증가됨으로써 산소전달효율이 증가하는 것을 알 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 수리실험을 통해 하천여울에서의 기포발생으로 인한 효과를 산소전달효율과의 정량적인 관계로부터 분석하여 기포가 발생되는 하천여울에서의 흐름 특성을 연구하고, 공기유입 과정분석에 의한 하천정화작용을 이론적으로 분석하였다.

실험결과 유속, 유량, Fr수, 월류 수심이 증가함에 따라 산소전달효율도 증가하는 추세를 나타낸다. 또한 여울의 상, 하류를 비교했을 때 상류에서 여울을 지나 하류로 갈수록 폭기에 의해 수중의 용존산소농도가 증가됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21C 프론티어 연구개발사업 '수자원의 지속적 확보기술개발' 연구용역 결과의 일부로서 지원해 주신 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김진홍, 이홍식 (1999). "기포여울 흐름특성의 현지조사", 대한토목학회논문집.
2. 김태원 (1996). "수리구조물에서 용존산소 부족비율 추정식의 개발", 서울대학교 석사학위 논문.
3. 환경부 (2002). "국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발", 한국건설기술연구원, pp.111-150.