보의 형태에 따른 재폭기 효율 비교

유대영[1], 김성태[2], 우효섭[3]

1. 서론

우리나라에는 전국에 걸쳐 많은 수의 취수용 보가 있으며 기타 다른 용도의 보를 포함하여 거의 모든 하천에 보가 설치되어 있다고 추정된다. 물이 보를 월류할 때 물과 공기의 접촉면이 증가되고 이에 따라 공기 중의 산소가 높은 효율로 물에 전달된다. 이러한 과정으로 보는 하천의 용존산소 농도를 증가시킨다고 알려져 있으나 아직 국내에서는 그에 관한 구체적 실험 연구가 부족하였다. 기존의 보에 비해 더 높은 재폭기 효율을 가진 보의 구조를 개발하면 전국 하천의 수질 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

보를 포함한 수리 구조물에 의한 재폭기 효과에 관한 연구는 Avery와 Novak (1978), Nakasone (1987) 등을 비롯한 여러 연구자에 의해 수행되었으며 Wilhelms 등 (1993)은 여러 연구자들이 제안한 수리 구조물에서의 재폭기 예측식을 비교, 검토한 바가 있다. Labyrinth 보에 대한 연구는 Hay와 Taylor (1970)에 의해 수리학적 특성이 제시된 이후로 Tsang (1987), Wormleaton과 Soufiani (1998) 그리고 Wormleaton과 Tsang (2000) 등이 다른 형태의 보에 비해 높은 효율의 재폭기 효과를 나타낸다고 발표하였다.

본 연구의 목적은 직선 보, labyrinth 보, Ogee spillway형 보에 대한 재폭기 특성을 모형실험을 통해 구명하는 것이다. 실험은 문헌 연구를 바탕으로 재폭기에 영향을 주는 여러 변수들을 변화시키며 수행되었으며, 실험 결과 자료를 이용하여 각기 다른 보에서의 재폭기 효율에 관한 비교, 분석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

물속에서 산소전달과 분산(dispersion)은 분자확산(molecular diffusion)과 난류 혼합(turbulent mixing) 과정의 지배를 받으며, 수표면에서 물과 공기 사이에 부분압의 차이가 요구된다. 지금까지 기체전달 기작을 설명하기 위하여 많은 이론들이 제안되어 왔지만, 그 중 가장 간단하고 많이 쓰이는 것은 Lewis와 Whitman (1924)에 의해 발표된 이중막 이론(two-film theory)이다. 이중막 이론은 기체-액체의 경계면에 두 개의 막이 존재한다는 물리학적 모델에 근거를 두고 있다. 하나는 액체이고 다른 하나는 기체인 두 개의 막은 액체층과 기체층 사이로 가스분자가 지나갈 때 저항을 일으키게 한다. 기체상태로부터 액체상태로 기체분자가 이동할 때 용해도가 작은

1) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
2) 환경관리공단 유역관리처 대리
3) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 부장, 연구위원

기체는 액체막으로부터, 용해도가 큰 기체는 기체막으로부터 주된 저항을 받게 된다. 산소의 경우는 용존성이 작아 액체층의 저항이 기체층의 저항보다 크고 따라서 액체층에서의 저항이 산소전달과정을 통제하게 된다.

기체와 액체 경계면을 통한 가스 분자들의 물질전달속도(mass transfer rate, dm/dt)는 경계면에서의 농도차에 비례하는 것으로 알려져 있다. 이것을 식으로 표현하면

$$r_m = \frac{dm}{dt} = K_g A(C_s - C) \tag{1}$$

여기서, r_m은 물질전달속도, K_g는 기체의 확산계수, A는 기체가 확산되어 나가는 면적, C_s, C는 각각 포화 DO 농도와 시간 t에서의 DO 농도이다.

실제 조건에서는 노출조건과 관련된 비례상수인 K_La를 이용하여 농도의 변화율을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_c = \frac{dC}{dt} = K_{La}(C_s - C) \tag{2}$$

여기서, r_c는 농도의 변화율, K_La는 총괄 물질전달계수이다. 식(2)을 보의 경우에 적용시키면

$$\frac{C_s - C_u}{C_s - C_d} = e^{-(K_La)t} = r \tag{3}$$

이 되며, 여기서 C_u와 C_d는 각각 보의 상·하류 용존산소농도이고 r은 부족비(deficit ratio)로서 보에서 산소섭취(oxygen uptake)를 정량화하기 위하여 사용된다. 그러나 많은 경우에 보의 폭기 거동은 산소전달효율(oxygen transfer efficiency; E)를 이용하여 더 편리하게 나타내어진다.

$$E = 1 - \frac{1}{r} = \frac{(C_d - C_u)}{(C_s - C_u)} \tag{4}$$

보에서의 재폭기는 온도에 의하여 큰 영향을 받으므로 재폭기 효율의 비교 평가는 참고 온도(reference temperature)에서 이루어진다. 본 연구에서는 산소전달효율을 20 ℃를 참고 온도로 하여 보정되었다. 본 연구에서 사용된 Gulliver 등 (1990)의 온도보정식은 다음과 같다.

$$\frac{\ln(1 - E_T)}{\ln(1 - E_{20})} = 1.0 + \alpha (T - 20) + \beta (T - 20)^2 \tag{5}$$

여기서, E_T와 E_{20}은 각각 온도 T와 20 ℃에서의 산소전달효율이고, α와 β는 상수로서 각각 α = 0.02103 ℃$^{-1}$, β = 8.621 × 10^{-5} ℃$^{-2}$ 이다.

3. 실험 과정

실험이 수행된 보의 종류는 다음과 같다.

1. labyrinth 보 - 중심각 150°
2. labyrinth 보 - 중심각 120°
3. labyrinth 보 - 중심각 90°
4. labyrinth 보 - 중심각 60°
5. labyrinth 보 - 중심각 30°
6. 직선 보
7. Ogee spillway 형 보
8. 상단에 자갈을 부착한 labyrinth 보 - 중심각 30°
9. 상단에 자갈을 부착한 직선 보

그림 1. 중심각 30° labyrinth 보 실험 사진(유량 39.6 l/s)

중심각 30° 인 labyrinth 보와 Ogee spillway 형 보의 실험 사진을 그림 1과 2에 도시하였다.

실험은 길이 20 m, 폭 59 cm의 개수로에 보를 설치한 후 수행되었으며 DO의 측정은 보의 상·하류에서 물을 채취하여 YSI model 58 Dissolved Oxygen Meter와 YSI 5905 probe를 사용하여 이루어졌다. 보의 높이는 모든 보의 경우에서 50 cm이었으며 자갈을 붙인 경우에는 50 cm의 높이에서 자갈의 높이만큼 높이가 증가하였다. 각 보의 실험은 유량 39.6, 19.0, 3.8 *l*/sec 와 하류단 수심 35, 25, 15 cm의 조건에서 동일하게 이루어졌다. 실험에서 사용된 유량조건은 단위폭 당 유량으로 환산하면 각각 0.067, 0.032, 0.006 $m^3/s/m$에 해당한다.

직선 보와 중심각 30° 의 labyrinth 보에 자갈을 부착한 경우에는 자갈의 높이와 간격을 비교적 균일하게 각각 3 ~ 4, 4 ~ 5 cm 정도로 유지하였다. 자갈은 부착한 직선형 보의 실험 사진을 그림 3에 제시하였다.

실험이 수행된 수온은 약 12 ~ 5 ℃의 범위이었고 매 실험마다 DO 뿐만 아니라 수온을 측정하여 포화 DO 농도를 계산하였다. 실험에서는 초기 DO 농도를 저하시키기 위해 아황산나트륨(Na_2SO_3) 용액을 수조 내의 물에 첨가하였다. 각 실험 조건에서 3 ~ 4 회 실험을 반복 수행하였고 각각의 경우에서 산소전달효율을 구하여 그 평균값을 취하였다.

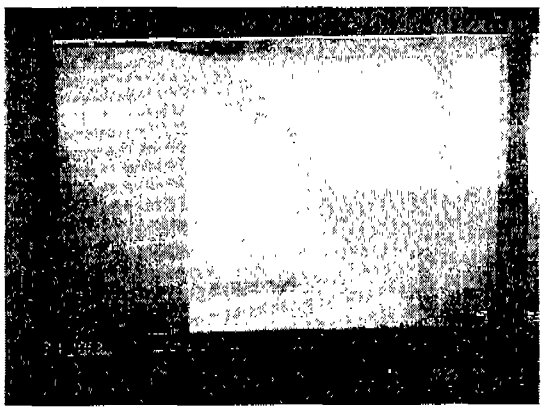

그림 2. Ogee Spillway 형 보 실험 사진 (유량 39.6 l/s)

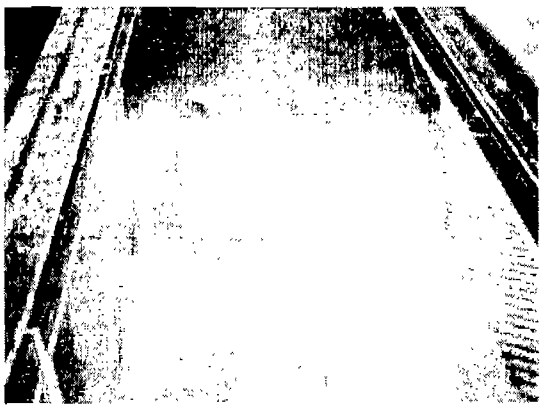

그림 3. 상부에 자갈을 부착한 직선 보 실험 사진 (유량 39.6 l/s)

4. 실험 결과

실험이 수행된 각 보의 유량과 하류단 수심 조건에 따른 산소전달효율, E를 표 1에 정리하였다. 실험이 수행된 물의 온도가 각 실험마다 상이하였기 때문에 산소전달효율은 식(5)로 제시된 보정식을 사용하여 20 ℃의 값으로 나타내었다. 표 1의 산소전달효율로부터 확인할 수 있듯이 각 보의 종류에 있어서 유량이 클수록 산소전달효율이 크게 나타났으며 하류단 수심이 작을수록, 즉 낙차가 클수록 산소전달효율의 증가함을 알 수 있다.

보의 종류에 따른 산소전달효율의 비교를 위하여 유량이 가장 큰 조건인 39.6 l/s의 경우의 각 보의 종류와 하류단 수위에 따른 산소전달효율을 그림 4에 비교하였다. 전체적인 경향은 Ogee 형 보가 가장 효율이 작고 그 다음이 직선형 보이고 labyrinth 보는 중심각이 작아질수록 효율이 증가하였다. Ogee 형 보는 월류수가 보의 면과 접촉하여 흐르는 형태로 흐름이 이루어지게 되어 실험에 사용된 다른 종류의 보와 비교할 때 공기와 접촉하는 면이 상대적으로 작으며 또한 월류수가 보를 월류하여 하류의 수체로 진입할 때 매끄러운 흐름을 형성하여 연행하는 공기의 양이 작기 때문에 가장 작은 산소전달효율을 나타내는 것으로 판단된다. 직선형 보와 labyrinth 보의 경우 산소가 용해되는 과정은 같으나 공기와 접촉하는 면적이 labyrinth 보의 중심각이 작아질수록 증가하기 때문에 산소전달효율이 증가되는 것으로 판단된다. 실험 결과로부터 다소의 편차는 있으나 중심각의 증가에 따른 효율의 증가는 뚜렷하게 확인된다.

보의 상단에 자갈을 붙인 경우는 월류수의 흐름이 보 상단에서 부착된 자갈로 인해 분리되어 공기와의 접촉면적이 증가하고 또한 공기의 연행이 증가하는 효과가 발생한다. 따라서 중심각이 30° 인 labyrinth 보의 상단에 자갈을 붙인 경우가 가장 큰 산소전달효율을 나타내고 자갈을 붙인 직선형 보 역시 자갈이 없는 직선 보와 비교하여 상당한 효율의 증가를 나타낸다.

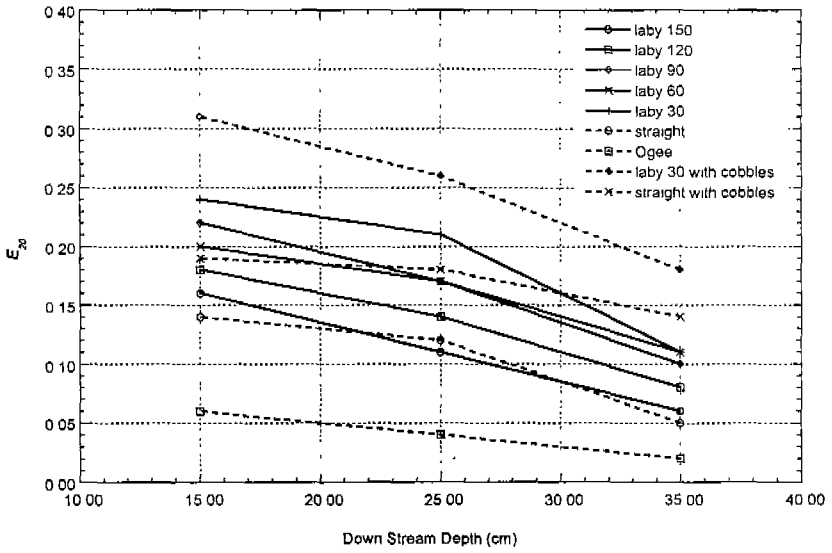

그림 4. 유량 39.6 l/s인 경우의 각 보의 종류와 하류단 수위에 따른 산소전달효율

표 1. 보의 종류와 유량, 하류단 수심에 따른 산소전달효율

보 종류	유량 (l/s)	하류단 수위 (cm)	E_{20}
labytinth 보 중심각 150°	3.8	35	0.04
		25	0.09
		15	0.13
	19.0	35	0.02
		25	0.06
		15	0.11
	39.6	35	0.06
		25	0.11
		15	0.16
labytinth 보 중심각 120°	3.8	35	0.04
		25	0.07
		15	0.13
	19.0	35	0.04
		25	0.09
		15	0.14
	39.6	35	0.08
		25	0.14
		15	0.18
labytinth 보 중심각 90°	3.8	35	0.10
		25	0.18
		15	0.17
	19.0	35	0.03
		25	0.09
		15	0.13
	39.6	35	0.10
		25	0.17
		15	0.22
labytinth 보 중심각 60°	3.8	35	0.07
		25	0.13
		15	0.19
	19.0	35	0.05
		25	0.13
		15	0.17
	39.6	35	0.11
		25	0.17
		15	0.20
labytinth 보 중심각 30°	3.8	35	0.02
		25	0.12
		15	0.18
	19.0	35	0.08
		25	0.18
		15	0.23
	39.6	35	0.11
		25	0.21
		15	0.24

보 종류	유량 (l/s)	하류단 수위 (cm)	E_{20}
직선 보	3.8	35	0.00
		25	0.05
		15	0.08
	19.0	35	0.07
		25	0.09
		15	0.13
	39.6	35	0.05
		25	0.12
		15	0.14
Ogee형 보	3.8	35	0.00
		25	0.00
		15	0.02
	19.0	35	0.04
		25	0.04
		15	0.19
	39.6	35	0.02
		25	0.04
		15	0.06
보 상단에 자갈붙인 labytinth 보 중심각 30°	3.8	35	0.06
		25	0.16
		15	0.22
	19.0	35	0.16
		25	0.24
		15	0.29
	39.6	35	0.18
		25	0.26
		15	0.31
보 상단에 자갈붙인 직선 보	3.8	35	0.08
		25	0.15
		15	0.20
	19.0	35	0.13
		25	0.19
		15	0.23
	39.6	35	0.14
		25	0.18
		15	0.19

5. 결 론

본 실험적 연구에서는 직선 보, labyrinth 보, Ogee spillway형 보에 대한 재폭기 특성 및 효율을 측정, 분석하였다. 모형 실험은 문헌 연구를 바탕으로 재폭기에 영향을 주는 여러 변수들을 변화시키며 수행되어 그 영향을 측정하였으며, 실험 결과 자료를 이용하여 각기 다른 보에서의 재폭기 효율에 관한 비교·분석을 수행하였다. 보의 폭기 거동은 산소전달효율을 이용하여 비교되었다. 실험은 길이 20 m, 폭 59 cm의 개수로에 높이 50 cm의 모형 보를 설치하여 수행되었다. labyrinth 보는 중심각이 각기 다른 6가지 종류에 대해서 실험을 수행하였고, 보의 상단에 자갈을 부착하여 조도를 증가시킨 형태의 보에 대한 실험도 수행되었다.

실험 결과를 분석한 결과, 같은 유량 조건에서 labyrinth 보가 다른 형태의 보에 비해 더 높은 산소전달효율을 나타내었으며, labyrinth 보 중에서는 중심각이 작을수록 높은 산소전달효율 결과가 나타났는데 그 이유는 월류수 윤변의 증가와 월류수의 충돌 효과에 기인한다고 판단된다. 상단에 자갈을 부착시켜 조도를 증가시킨 보의 경우 상당한 산소전달효율을 증가를 얻을 수 있었는데 이는 월류수의 흐름이 보 상단의 요철로 인해 분리되어 공기와의 접촉면에 증가했기 때문이라고 판단된다. 또한 동일한 조건인 경우 단위 폭 당 유량이 커질수록, 하류단 수위가 작을수록 재폭기 효율이 커지는 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Avery, S. T., and Novak, P. (1978). "Oxygen Transfer at Hydraulic Structures." *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of ASCE*, 104(HY11), 1521-1540.
2. Gulliver, J. S., Thene, J. R., and Rindels, A. J. (1990). "Indexing Gas Transfer in Self-Aerated Flows." *Journal of Environmental Engineering*, 116(3), 503-523.
3. Hay, N., and Taylor, G. (1970). "Performance and Design of Labyrinth Weirs." *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of ASCE*, 96(HY11), 2337-2357.
4. Lewis, W. K., and Whitman, W. G. (1924). "Principles of Gas Absorption." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 16(12), 1215-1220.
5. Nakasone, H. (1987). "Study of Aeration at Weir and Cascades." *Journal of Environmental Engineering*, 113(1), 64-81.
6. Tsang, C. C. (1987). "Hydraulic and Aeration Performance of Labyrinth Weirs," Ph.D Thesis, University of London, London, UK.
7. Wilhelms, S. C., Gulliver, J. S., and Parkhill, K. (1993). "Reaeration at Low-Head Hydraulic Structures." *Technical Report W-93-2*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
8. Wormleaton, P. R., and Soufiani, E. (1998). "Aeration Performance of Triangular Planform Labyrinth Weirs." *Journal of Environmental Engineering*, 124(8), 709-719.
9. Wormleaton, P. R., and Tsang, C. C. (2000). "Aeration Performance of Rectangular Planform Labyrinth Weirs." *Journal of Environmental Engineering*, 126(5), 456-465.