

재폭기 효율 증가를 위한 래버린스 보에 관한 연구 A Study on the Labyrinth Weir for Improvement of Reaeration

유 대 영* / 김 성 태** / 우 효 섭***

Yu, Daeyoung / Kim, Sung Tae / Woo, Hyoseop

Abstract

In order to develop the weir with high reaeration efficiency, the reaeration experiments at linear weir, ogee spillway type weir, and labyrinth weirs were conducted and the results were compared. The effect of roughened crest was also analyzed. It was found from the experiments that the oxygen transfer efficiency at the ogee spillway type weir was the lowest and that at the linear weir was second lowest among the weirs used in the experiments. It was also revealed that the reaeration efficiencies of the labyrinth weirs increase as the included angles become smaller. The roughened crest which causes the disintegration of overflow was found to increase the reaeration efficiency significantly. On the basis of the results of the experiments, the pilot construction of the labyrinth weir with included angle of 30 degree was made. The labyrinth weir was made up by assembling the frame and then filling the ripraps into the frame. The ripraps were exposed at the crest to split the overflow. The average value of oxygen transfer efficiency observed at the pilot weir was 0.18. It is expected that the results from the experimental study and the field data of the pilot weir would serve for the improvement of water quality by the weirs with high reaeration efficiency.

keywords : weir, reaeration, labyrinth weir, oxygen transfer efficiency

요 지

재폭기 효율이 향상된 보를 개발하기 위하여 직선형 보, 여수로형 보, 래버린스 보의 재폭기 실험을 통해 산소 전달효율을 측정하여 결과를 비교하였고, 또한 제정의 조도를 증가시켜 그 효과를 분석하였다. 실험 결과에 의하면 여수로 형 보에서의 산소전달효율이 가장 작으며 그 다음으로 직선 보였으며 래버린스 보의 경우 중심각이 감소할 수록 산소전달효율이 증가하는 것으로 나타났다. 모든 경우에 있어서 낙차와 유량이 증가할수록 산소전달효율이 증

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
Senior Researcher, Water Resources and Environmental Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Goyang, Gyonggi-do, 411-712, Korea
(Email: sdiver@chollian.net)

** 환경관리공단 유역관리처 대리
Assistant Manager, Watershed Management Department, Environmental Management Corporation, #26-4, Hasanwon-dong, Bundang-gu, Sungnam, Gyonggi-do, 463-430, Korea

*** 한국건설기술연구원 연구위원
Senior Research Fellow, Water Resources and Environmental Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Goyang, Gyonggi-do, 411-712, Korea

가하는 것으로 나타났으며 조약돌을 부착하여 제정의 조도를 증가시켜 월류 흐름의 분리를 발생시킨 경우 재폭기가 상당히 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 실험 결과로부터 중심각 30도인 래버린스 보를 현장에 설치하여 재폭기를 관측하였다. 현장에 설치된 래버린스 보는 틀을 조립하여 그 내부에 사석을 채워 건설되었으며 제정에는 사석이 노출되어 흐름의 분리를 유발하였다. 래버린스 보의 현장 시험 시공 조건에서 평균 약 0.18의 산소전달효율 결과를 얻을 수 있었다. 본 실험 연구와 현장 설치 후 측정 결과는 재폭기 효율이 높은 보를 통한 하천 수질 개선에 사용될 수 있을 것이라 예상된다.

핵심용어 : 보, 재폭기, 래버린스 보, 산소전달효율

1. 서론

하천에 설치되는 보는 하천의 수위 조절이라는 원래 목적 이외에 물이 보를 월류할 때 공기가 물 속으로 전달되는 재폭기 효과를 갖게 되며 이 과정에서 공기 중의 산소가 물에 용해되어 용존산소가 증가한다. 보를 포함한 수리구조물에서 공기의 수중으로의 전달은 수표면 또는 수체 내에서의 난류 혼합, 수체에 포획된 기포로 인한 물-공기 계면 면적의 증가, 수리 구조물 하류에서의 정수압 등에 의해 주로 영향을 받는다(ASCE, 1991).

다양한 종류의 보에 의한 산소 전달 과정과 재폭기 예측식에 관한 연구는 여러 연구자에 의해 수행되었다(Gulliver 등, 1998). 보에서의 재폭기 효율은 유량, 낙차 등의 수리적 조건과 관계가 있지만 또한 보의 종류에 따라서는 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 재폭기 효율이 높은 종류의 보를 설치하면 주어진 수리 조건에서 재폭기 효율이 낮은 보에 비해 더 많은 산소 전달을 유발시켜 용존산소를 더 증가시킬 수 있다.

래버린스 보(labyrinth weir)는 평면형이 직선으로 이루어지지 않은 형태의 보를 뜻한다. 일반적으로 래버린스 보는 여러 개의 삼각형 또는 사각형이 연결된 형태의 평면형을 이루며 따라서 제정(堤頂)의 길이가 일반적인 보의 비해 증가되는 특징을 갖는다. 삼각형 래

버린스 보의 개요를 그림 1에 도시하였다. 래버린스 보는 직선형 보에 비해 같은 수두에서 월류량이 크며 이러한 수리적 특성으로 인해 댐의 여수로에 주로 적용되었다. Hay와 Taylor(1970)의 연구에 의하면 래버린스 보의 월류 능력은 같은 수두 조건에서 직선형 보에 비해 제정 길이 증가량에 비례하여 커지며 이러한 월류 능력의 향상은 특히 상류 수두가 작은 경우에 두드러진다. 래버린스 보의 수리적 특징에 대한 연구는 Cassidy 등(1985)과 Tullis 등(1995) 등에 의해 계속되었으며 세계적으로 많은 수의 여수로에 래버린스 보가 적용되어져 있다.

래버린스 보는 이러한 수리적 특성 이외에 높은 재폭기 효율을 보이는 특징을 가지고 있다. 래버린스 보의 높은 재폭기 효율은 제정 길이의 증가와 월류수의 흐름이 서로 충돌하면서 발생하는 흐름의 분리(disintegration), 보 하류의 난류 증가로 인한 기포의 체류시간 증가 등에 기인한다. Tsang(1987)은 실험 연구를 통하여 래버린스 보의 재폭기 과정을 구명하였고, Wormleaton과 Soufiani(1998)과 Wormleaton과 Tsang(2000)은 각각 삼각형과 사각형 평면형의 래버린스 보의 재폭기 효율에 관한 연구 결과를 발표하였다.

보의 재폭기 효율을 증가시키는 다른 방법으로 제정의 조도를 증가시키는 방법이 있다. Watson 등(1998)은 상단에 조약돌(cobble)을 집착시키는 방법으로 조도

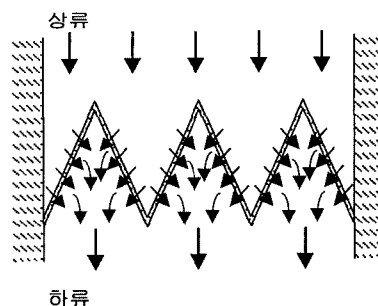


그림 1. 래버린스 보의 개요도

를 증가시킨 보의 재폭기 실험을 통해 같은 조건에서 조약돌로 인해 조도가 증가된 보(rough weir)에서의 재폭기 효율이 매끈한 보(smooth weir)의 재폭기 효율에 비해 증가한다는 결과를 발표하였다.

국내의 보의 재폭기에 관한 연구로는 김태원(1997)에 의한 폭기 효율 추정식 개발에 관한 연구가 있으며 래버린스 보에 대해서는 조원철 등(1988)에 의해 래버린스 보의 수리 특성에 관한 연구가 다루어진 바 있다.

본 연구의 목적은 재폭기 효율이 기존의 보에 비해 향상된 보를 개발하는 것이다. 실험 연구를 통하여 직선형 보, 여수로형 보, 래버린스 보 등에서의 재폭기 효율을 측정하여 결과를 비교하였고, 또한 제정의 조도를 증가시켜 그 효과를 분석하였다. 실험 결과를 바탕으로 재폭기 효율이 다른 보에 비해 월등히 향상된 래버린스 보를 선정하여 하천에 시험 설치하여 현장에서의 용존 산소 증가량을 측정하여 래버린스 보의 재폭기 효과를 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 보에서의 재폭기 과정

물 속에서 공기전달과 분산은 분자확산과 난류 혼합 과정에 의해 지배를 받으며 물과 공기의 경계면에서 부분압 차이가 요구된다. 지금까지 공기전달 과정을 설명하기 위하여 많은 이론들이 제안되어 왔지만, 그 중 가장 간단하고 많이 쓰이는 이론은 Lewis와 Whitman(1924)에 의해 발표된 이중막 이론(two-film theory)이다. 이 외에도 침투모형과 표면갱신모형 등은 더욱 이론적이며 관련된 물리적 현상을 더 많이 고려하고 있으나 이중막 이론이 가장 많이 쓰이는 이유는 복잡한 이론에 의한 결과와 상당히 유사한 결과를 나타내기 때문이다.

이중막 이론은 기체-액체의 경계면에 두 개의 막이 존재한다는 물리적 모형에 근거를 두고 있다. 하나는 액체이고 다른 하나는 기체인 두 개의 막은 액체층과 기체층 사이로 기체 분자가 지나갈 때 저항을 일으킨다. 기체상태에서 액체상태로 기체분자가 이동할 때 용해도가 작은 기체는 액체막으로부터, 용해도가 큰 기체는 기체막으로부터 주된 저항을 받고 중간정도의 용해도를 가진 기체는 두 개의 막으로부터 저항을 받게 된다. 산소의 경우는 용존성이 작아 액체층의 저항이 기체층의 저항보다 크다. 이러한 현상이 산소전달과정을 통제하게 된다.

일반적으로 공기가 수중으로 전달되는 과정은 식 (1)로 나타내어질 수 있다.

$$r_c = \frac{dC}{dt} = K_g \frac{A}{V} (C_s - C) = K_{La} (C_s - C) \quad (1)$$

이때 r_c 는 농도의 시간 변화율, C 는 시간 t 에서 공기의 농도, K_g 는 공기의 전달계수, A 는 공기가 전달되는 나가는 면적, V 는 물의 부피, C_s 는 공기의 포화 농도이며, K_{La} 는 총괄물질전달계수이다. 즉 공기가 수중으로 용해되는 속도는 공기의 전달계수, 기체의 표면적, 그리고 물의 부피로 나타내어지는 총괄물질전달계수와 포화 농도, 그리고 포화 농도와 실제 농도의 차이인 공기 농도의 부족량에 비례한다고 할 수 있다.

이러한 일반적인 과정을 보를 월류하는 물에서 발생하는 산소 전달과정에 적용하면 식 (1)을 보 상·하류에 대해서 적분하여 구한 식 (2)로서 표현할 수 있다.

$$\frac{C_s - C_u}{C_s - C_d} = e^{K_{La} t} = r \quad (2)$$

여기서 C_u 와 C_d 는 각각 보의 상·하류의 용존산소 농도이며, r 은 보에서 산소 전달률을 정량화하기 위하여 사용되는 부족비(deficit ratio)이다. 즉 부족비는 보의 상·하류의 포화 용존산소에 대하여 부족한 용존산소의 비율로 정의되는 값으로서 1부터 무한대까지의 값을 가지며 그 값이 클수록 보에서의 산소전달효율 즉 재폭기 효율이 크다는 뜻이다. 또한 보에서의 재폭기 거동은 산소전달효율(oxygen transfer efficiency; E)로 좀 더 편리하게 나타내어지는데 산소전달효율의 정의는 식(3)과 같다.

$$E = \frac{C_d - C_u}{C_s - C_u} = 1 - \frac{1}{r} \quad (3)$$

산소전달효율은 0에서 1까지의 값을 가지며 보를 월류할 때 전혀 재폭기가 일어나지 않으면 0이고, 보를 월류한 이후 포화 농도가 되면 1의 값을 가지게 된다.

식 (2)로부터 보에서의 산소전달효율은 산소의 전달계수, 공기와 물의 접촉면적, 접촉 시간이 증가함에 따라 향상됨을 알 수 있다. 이 중 공기와 물의 접촉 면적은 보를 월류하는 물이 보의 하류로 공기를 포획하면서 발생하는 기포의 표면적에 의해 지배적으로 결정되며 공기와 물의 접촉 시간은 기포가 보의 하류 수중에 체류하는 시간에 의해 결정된다.

보를 월류한 흐름에서 산소의 전달계수, 기포의 표면

적 및 체류시간을 결정하기는 거의 불가능하므로 보에서 산소 전달에 대한 기존의 예측식은 실험 및 현장 자료로부터 낙차, 단위 폭 당 유량, 하류 수심 등을 변수로 한 회귀식을 유도하여 제안되었다. 여러 연구자에 의해 제안된 재폭기 예측식 중에서 Avery와 Novak(1978), Nakasone(1987) 그리고 Thene(1988)에 의해 제안된 예측식이 자유 월류 보에서의 재폭기를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 보고된 바 있다(Gulliver 등, 1998).

보에서의 산소전달효율에 영향을 미치는 인자는 낙차, 단위 폭 당 유량, 하류 수심, 수온, 수질 등이다. 이중 수온에 의한 영향에 대해서는 참조 수온(reference temperature)에서의 산소전달효율을 계산하여 정량화한다. 일반적으로 참조 수온으로 20°C가 사용되며 다른 온도에서 측정된 산소전달효율은 보정식을 사용하여 참조 수온에서의 산소전달효율로 수정된다. 본 연구에서는 Gulliver 등(1990)에 의해 식 (4)로 제안된 온도 보정식이 사용되었다.

$$\frac{\ln(1-E_T)}{\ln(1-E_{20})} = 1.0 + \alpha(T-20) + \beta(T-20)^2 \quad (4)$$

여기서 E_T, E_{20} 는 각각 T °C와 20 °C에서의 산소 전달효율을 뜻하며, T 는 섭씨로 표현되는 수온이며, $\alpha = 0.02103$ °C⁻¹, $\beta = 8.621 \times 10^{-5}$ °C⁻²이다.

2.2 래버린스 보에서의 재폭기

래버린스 보의 큰 특징은 보의 정부(頂部) 길이가 증가한다는 점이다. 이 특징으로 인해 동일한 폭의 수로에 설치된 직선 보에 비해 동일한 수두 조건에서 더 큰 유량을 월류시킨다. 또한 제정 길이의 증가는 단위 제정 길이 당 월류 유량이 직선 보에 비해 감소하게 된다. 직선 보에 비해 증가된 월류량은 유량이 작은 경우에 더 크며 유량이 증가할수록 직선 보와 래버린스 보의 월류량의 차이는 작아지는데 그 원인은 유량이 증가하여 보에서 수두가 증가할수록 월류 흐름의 윤변이 점차로 짧아지기 때문이다(Hay와 Taylor, 1970). 즉 유량이 큰 경우의 월류 흐름은 래버린스 보의 정부의 형상을 그대로 따르지 않고 중첩되어 월류 흐름의 유효 윤변은 래버린스 보의 정부 길이 보다 짧게 된다. 또한 래버린스 보를 월류한 물의 흐름은 하천의 흐름 방향과 평행하지 않고 서로 충돌하게되어 보 하류의 흐름이 직선 보에 비해 복잡하고 난류가 증가된다.

래버린스 보의 직선 보에 비해 높은 재폭기 효과는 직선 보의 경우에 비해 월류수가 하류로 입수할 때 하류의 물과 접촉면이 증가함에 따라 포획되는 공기량이 증가하는데 기인한다. 따라서 제정 길이가 증가할수록 기포의 형태로 수중으로 포획되는 공기량이 증가하며 그로 인하여 재폭기 효율도 증가한다.

Tsang(1987)에 의하면 월류수의 형태가 매끄러운 제트(smooth jet), 거친 제트(rough jet), 진동 제트(oscillating jet) 그리고 분리된 물방울(discrete droplet)으로 변화되면서 포획하는 공기량이 증가되어 재폭기 효율이 증가된다는 연구 결과를 발표하였다. 래버린스 보의 경우에는 보를 월류하는 흐름이 서로 마주 보는 방향을 향하게되어 월류수가 하류로 나하하기 전에 일부는 서로 충돌하게되어 물방울로 분리되어 포획하는 공기량이 증가하게된다. 그러나 중심각이 넓을수록, 그리고 래버린스 보의 크기가 클수록 전체 월류량에 대한 충돌하여 물방울이 형성되는 유량의 비는 작아진다.

기포의 형태로 수중으로 포획된 공기와 물간의 산소 전달은 기포의 체류 시간에 영향을 받는다. Avery와 Novak(1978) 그리고 Nakasone(1987)에 의해 제안된 최적 하류 수심은 수중의 기포가 보 하류에서 수심으로 인한 체류시간의 제한을 받지 않는 조건을 나타낸 것으로 기포와 물간의 접촉시간의 조건을 나타낸다. 래버린스 보 하류의 흐름장은 직선 보의 경우에 비하여 교란이 심하여 기포의 수중 체류 시간을 증가시켜 재폭기 효율을 향상시킨다.

Wormleaton과 Soufiani(1998)는 실험을 통한 삼각형 래버린스 보에서의 재폭기 거동에 관한 연구를 수행하여 식 (5)와 (6)의 재폭기 예측식을 유도하였다.

$$E_{20} = 1 - \left[1 + 1.48h^{1.35}Q^{-0.131} \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{0.34} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$E_{20} = 1 - \left[1 + 1.86h Q^{[(0.195 \cos \theta + 0.335)h - 0.52]} \right]^{-1} \quad (6)$$

이 두 식에서 E_{20} 은 참조 온도 20°C에서의 산소전달효율, h 는 낙차고(m), Q 는 유량(l/s), 그리고 θ 는 래버린스 보의 중심각이다. 이들의 실험은 제정 길이를 0.160 m로 일정하게 유지하고 중심각은 30, 45, 60, 90, 120° 변화시키며 수행되었는데 사용된 유량의 범위는 약 1.0~4.0 l/s이며 낙차는 0.7~1.5m 였다.

식 (5)와 (6)으로 제시된 Wormleaton과 Soufiani (1998)의 삼각형 래버린스 보의 산소전달효율 예측식은 직선 보의 예측식과 비교할 때 보의 중심각을 고려한 점이 주목할만하다. 그러나 이 예측식에서 사용된 유량은 단위 폭 당 유량이 아닌 실험에 사용된 유량이 직접 사용되어 일반적인 경우에 적용할 수 없는 단점이 있다.

사각형 래버린스 보의 재폭기에 관한 연구는 Wormleaton과 Tsang(2000)에 의해 이루어졌는데 그들이 제안한 사각형 래버린스 보에서의 산소전달효율 예측식은 식 (7)과 같다.

$$E_{20} = 1 - [1 + 1.138k^{1.059} q^{-0.096}]^{-1} \quad (7)$$

여기서 q 는 단위 폭 당 유량(m^2/s)이다. 이들의 실험 연구에서 보가 설치된 수로의 폭은 0.24~0.40 m이었으며 제정 길이는 수로 폭에 비해 1.6~3.0배 증가하였으며, 유량과 낙차의 범위는 각각 1.0~4.0 l/s, 0.5~1.4 m였다.

2.3 제정 조도가 재폭기에 미치는 영향

본 연구에서 제정의 조도 증가는 월류 흐름에 저항만을 증가시키는 정도가 아닌 흐름 자체가 나뉘어지는 정도의 규모를 뜻한다. Avery와 Novak(1978)은 제정에 n 개의 절구(缺口, notch)가 있어 월류 흐름이 분리되는 경우 프루드 수는 $4\sqrt{n}$ 배 증가하며 따라서 재폭기 효율도 증가한다고 발표하였다. 또한 Nakasone (1987)은 월류 흐름이 분리되는 경우 분리된 흐름의 폭이 전체 흐름 폭의 0.25배 이하인 경우 재폭기 증가율은 최대가 되며 분리된 흐름의 폭은 1 m 미만이어야 재폭기 효율의 증가가 있다고 주장하였다.

Watson 등(1998)은 보의 정부에 조약돌을 부착하여 조도를 증가시킨 보에서의 재폭기 거동에 관한 실험을 수행하여 부착된 조약돌로 인해 정부의 조도가 증가된 보에서의 부족비가 일반 보에서의 부족비에 비해 상당히 증가한다고 발표하였다. Watson 등(1998)의 연구에서는 Avery와 Novak(1978)의 부족비 예측식을 수정하여 조약돌을 부착하여 정부의 조도를 증가시킨 보의 부족비 예측식을 유도하였으나 그들의 예측식에서는 부착된 조약돌의 특성이나 조도가 증가되어 발생하는 월류 흐름의 변화에 대해서는 고려되지 않았다.

3. 실험 연구

3.1 실험 조건

다양한 크기의 중심각을 가진 래버린스 보와 직선 보, 여수로형 보 그리고 정부에 조약돌을 부착하여 조도를 증가시킨 조건의 직선 보와 래버린스 보의 재폭기 거동을 비교하기 위하여 수리 실험을 수행하였다. 수리 모형 실험은 일반적으로 원형에 대한 프루드 상사와 레이놀즈 상사를 만족시키는 모형을 제작하여 실험을 수행하고 그 결과를 분석하여 원형의 조건에서의 결과를 고찰하는 과정으로 진행되나 재폭기 실험의 경우에는 수리적 상사를 적용하는 경우에도 재폭기 거동에 중요한 영향을 미치는 기포의 크기는 제어할 수 없다. 따라서 재폭기 실험에서는 원형과 모형의 프루드 상사법칙은 의미를 갖지 못하며 실험 조건 자체가 원형이 된다 (Urban 등, 2001).

실험은 한국건설기술연구원의 길이 20 m, 폭 0.59 m의 개수로에서 수행되었다. 용존산소 농도는 재폭기가 발생하는 보의 상·하류에서 물을 취수하여 YSI 58 DO meter와 YSI 5905 probe를 이용하여 현장에서 측정하였다. 물의 취수 위치는 상류 방향의 경우 개수로 폭의 1~2 배 거리 상류 지점이었으며, 하류 방향으로는 보를 월류한 물의 기포가 모두 사라진 이후 지점을 선택하였는데 대부분의 실험 조건에서 보에서부터 하류로 개수로 폭의 1~2 배 거리 이내의 범위이었다.

산소전달효율 측정의 신뢰도를 향상시키기 위하여 아황산나트륨 Na_2SO_3 용액을 개수로 내의 물에 첨가하여 초기 용존산소 농도를 저하시켰다. 실험의 모든 경우에 식 (8)로 정의되는 초기 용존산소 농도의 포화 용존산소에 대한 부족비를 20 %이상으로 유지하였다.

$$D_i (\%) = \frac{C_s - C_u}{C_s} \times 100 \quad (8)$$

각 실험 조건에서 3~4 회 반복하여 실험을 수행하여 각각의 경우의 산소전달효율을 구하여 참조 온도에서의 산소전달효율 값으로 환산한 후 그 평균값을 취하였다.

실험에 사용된 보의 종류는 총 9가지로 표 1과 같다. 보의 높이는 모두 0.50 m이며 아크릴로 제작되었다. 보의 폭은 모두 개수로의 폭과 같이 0.59 m이었으며 래버린스 보의 경우 중심각에 따라 제정 길이가 변화하였는데 각 보의 제정 길이는 표 1에 제시하였다. 여수로형 보의 Ogee spillway의 형태로 제정 부분은 포물

표 1. 실험에 사용된 보의 종류

보의 종류	기호	정부 길이(L_{nb} , m)
직선 보	LNW	0.590
정부에 조약돌 부착 직선 보	LNW-C	0.590
여수로형 보	OGW	0.590
래버린스 보 중심각 150°	LBW150	0.611
래버린스 보 중심각 120°	LBW120	0.681
래버린스 보 중심각 90°	LBW90	0.834
래버린스 보 중심각 60°	LBW60	1.180
래버린스 보 중심각 30°	LBW30	2.280
정부에 조약돌 부착 래버린스 보 중심각 30°	LBW30-C	2.280

표 2. 직선 보와 중심각 30° 래버린스 보에 부착된 조약돌의 평균 제원

보의 종류	부착된 조약돌의 평균 제원(m)		
	제정에서 높이	폭	간격
직선형 보 LNW-C	0.043	0.050	0.044
중심각 30° 래버린스 보 LBW30-C	0.034	0.050	0.049

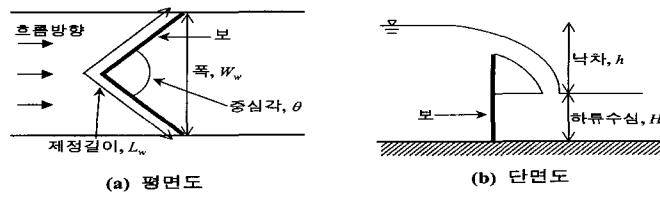


그림 2. 래버린스 보 실험 모형의 개요도와 기호

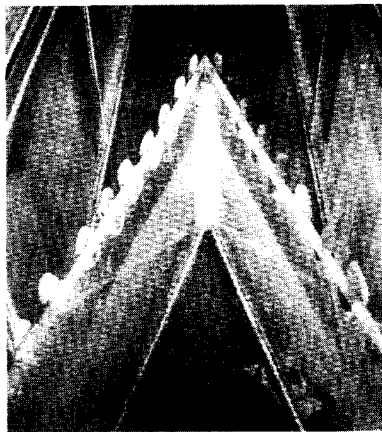


그림 3. 정부에 조약돌을 부착한 중심각 30°의 래버린스 보 모형

표 3. 실험 조건과 산소전달효율

No.	보의 종류	q (m ² /s)	h (m)	H (m)	E_{20}
1	LNW	0.006	0.371	0.150	0.079
2	LNW	0.006	0.271	0.250	0.047
3	LNW	0.032	0.416	0.150	0.125
4	LNW	0.032	0.316	0.250	0.093
5	LNW	0.032	0.216	0.350	0.032
6	LNW	0.067	0.455	0.150	0.143
7	LNW	0.067	0.355	0.250	0.117
8	LNW	0.067	0.255	0.350	0.057
9	LNW-C	0.006	0.378	0.150	0.163
10	LNW-C	0.006	0.278	0.250	0.115
11	LNW-C	0.006	0.178	0.350	0.065
12	LNW-C	0.032	0.420	0.150	0.230
13	LNW-C	0.032	0.320	0.250	0.190
14	LNW-C	0.032	0.220	0.350	0.145
15	LNW-C	0.067	0.461	0.150	0.201
16	LNW-C	0.067	0.361	0.250	0.195
17	LNW-C	0.067	0.261	0.350	0.142
18	OGW	0.006	0.371	0.150	0.029
19	OGW	0.006	0.271	0.250	0.000
20	OGW	0.032	0.311	0.250	0.042
21	OGW	0.032	0.211	0.350	0.045
22	OGW	0.067	0.443	0.150	0.083
23	OGW	0.067	0.343	0.250	0.055
24	OGW	0.067	0.244	0.350	0.049
25	LBW150	0.006	0.369	0.150	0.104
26	LBW150	0.006	0.269	0.250	0.085
27	LBW150	0.006	0.169	0.350	0.024
28	LBW150	0.032	0.410	0.150	0.133
29	LBW150	0.032	0.310	0.250	0.079
30	LBW150	0.032	0.211	0.350	0.036
31	LBW150	0.067	0.453	0.150	0.156
32	LBW150	0.067	0.353	0.250	0.121
33	LBW150	0.067	0.253	0.350	0.075
34	LBW120	0.006	0.370	0.150	0.072
35	LBW120	0.006	0.270	0.250	0.050
36	LBW120	0.006	0.171	0.350	0.061
37	LBW120	0.032	0.413	0.150	0.155
38	LBW120	0.032	0.313	0.250	0.110
39	LBW120	0.032	0.213	0.350	0.043
40	LBW120	0.067	0.451	0.150	0.227
41	LBW120	0.067	0.401	0.200	0.192
42	LBW120	0.067	0.351	0.250	0.159
43	LBW120	0.067	0.301	0.300	0.141
44	LBW120	0.067	0.251	0.350	0.080
45	LBW90	0.016	0.384	0.150	0.133
46	LBW90	0.016	0.334	0.200	0.092
47	LBW90	0.016	0.284	0.250	0.088
48	LBW90	0.016	0.233	0.300	0.034
49	LBW90	0.016	0.183	0.350	0.022
50	LBW90	0.027	0.395	0.150	0.127

표 3. 계속

No.	보의 종류	q (m ² /s)	h (m)	H (m)	E_{20}
51	LBW90	0.027	0.345	0.200	0.096
52	LBW90	0.027	0.295	0.250	0.097
53	LBW90	0.027	0.245	0.300	0.061
54	LBW90	0.027	0.196	0.350	0.052
55	LBW90	0.040	0.412	0.150	0.157
56	LBW90	0.040	0.362	0.200	0.136
57	LBW90	0.040	0.312	0.250	0.116
58	LBW90	0.040	0.262	0.300	0.087
59	LBW90	0.040	0.212	0.350	0.045
60	LBW90	0.055	0.426	0.150	0.153
61	LBW90	0.055	0.376	0.200	0.159
62	LBW90	0.055	0.326	0.250	0.140
63	LBW90	0.055	0.276	0.300	0.111
64	LBW90	0.055	0.226	0.350	0.050
65	LBW90	0.067	0.439	0.150	0.217
66	LBW90	0.067	0.389	0.200	0.168
67	LBW90	0.067	0.339	0.250	0.174
68	LBW90	0.067	0.289	0.300	0.139
69	LBW90	0.067	0.239	0.350	0.112
70	LBW60	0.006	0.363	0.150	0.180
71	LBW60	0.006	0.263	0.250	0.130
72	LBW60	0.006	0.163	0.350	0.053
73	LBW60	0.032	0.393	0.150	0.175
74	LBW60	0.032	0.293	0.250	0.135
75	LBW60	0.032	0.193	0.350	0.054
76	LBW60	0.067	0.417	0.150	0.201
77	LBW60	0.067	0.317	0.250	0.168
78	LBW60	0.067	0.217	0.350	0.110
79	LBW30	0.006	0.359	0.150	0.201
80	LBW30	0.006	0.259	0.250	0.149
81	LBW30	0.006	0.159	0.350	0.069
82	LBW30	0.032	0.376	0.150	0.231
83	LBW30	0.032	0.276	0.250	0.181
84	LBW30	0.032	0.176	0.350	0.076
85	LBW30	0.067	0.393	0.150	0.237
86	LBW30	0.067	0.293	0.250	0.207
87	LBW30	0.067	0.193	0.350	0.114
88	LBW30-C	0.006	0.361	0.150	0.224
89	LBW30-C	0.006	0.261	0.250	0.162
90	LBW30-C	0.006	0.161	0.350	0.088
91	LBW30-C	0.032	0.383	0.150	0.286
92	LBW30-C	0.032	0.283	0.250	0.235
93	LBW30-C	0.032	0.183	0.350	0.146
94	LBW30-C	0.067	0.400	0.150	0.313
95	LBW30-C	0.067	0.300	0.250	0.257
96	LBW30-C	0.067	0.201	0.350	0.169

선 형태이며 하류 쪽은 원호의 형태를 갖도록 제작하였다. 정부에 조약돌을 부착하여 실험한 보는 중심각이 30° 인 래비린스 보와 직선 보이며 각 경우에서 부착된 조약돌의 평균 재원을 표 2에 정리하였다. 실험의 장치의 개요도와 기호를 그림 2에, 정부에 조약돌을 부착한 중심각 30° 의 래비린스 보의 사진은 그림 3에 제시하였다.

실험에서 사용된 유량 조건은 3.8, 19.0, 39.6 l/s로서 각각의 단위 폭 당 유량은 0.006, 0.032, 0.067 m²/s이며 LBW90의 경우에는 유량 조건을 추가하여 실험을 수행하였다. 하류 수심(H) 조건은 주로 0.15,

0.25, 0.35 m가 적용되었으며 몇몇 실험은 추가된 하류 수심 조건에서 수행되었다. 낙차(h)는 하류 수심과 보 높이의 차이와 제정 위로 상승한 수두의 합으로 결정되었다. 각 실험 조건과 실험 결과로부터 구한 20°C에서의 산소전달효율(E₂₀)을 표 3에 정리하였다.

3.2 실험 결과 및 분석

실험 결과로부터 구한 산소전달효율을 각 보 종류별로 구분하여 그림 4에 도시하였다. 각 경우에 있어 낙차 증가에 따른 산소전달효율의 증가는 뚜렷하게 나타났다. 유량 변화에 따른 산소전달효율의 거동은 대체적

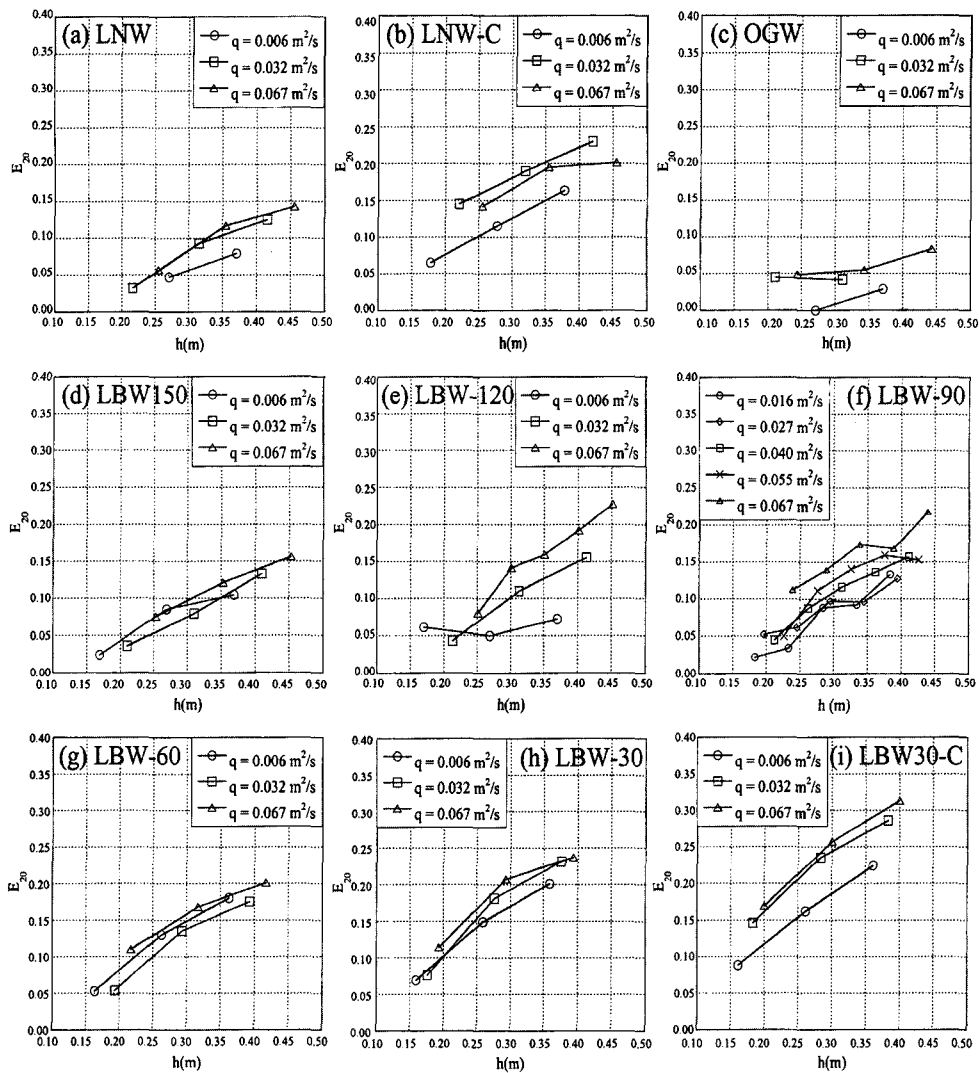


그림 4. 보의 제폭기 실험 결과

으로 유량이 증가함에 따라 증가하는 양상을 나타냈으나 낙차에 의한 변화만큼 뚜렷하지는 않았다. 단위 폭 당 유량이 약 2배 차이 나는 $0.032 \text{ m}^2/\text{s}$ 와 $0.067 \text{ m}^2/\text{s}$ 경우의 산소전달효율의 차이는 대부분 크지 않았으나 약 10 배의 유량 차이인 $0.006 \text{ m}^2/\text{s}$ 와 $0.067 \text{ m}^2/\text{s}$ 에서의 차이는 대부분의 경우에 확인할 수 있었다. 낙차와 유량에 따른 거동 결과로부터 산소전달효율은 유량보다는 낙차에 대해 더 큰 영향을 받는 점을 확인할 수 있다.

직선 보인 LNW(그림 4(a))와 여수로형 보인 OGW(그림 4(c))의 산소전달효율은 레버린스 보의 경우에 비해 전체적으로 작은 값을 나타냈으며 특히 OGW는 다른 모든 조건에 비해 가장 작은 산소전달효율 결과를 보였다. 이는 여수로형 보에서는 월류수가 하류로 유입할 때 공기와 닿는 면이 다른 종류의 보의 반에 지나지 않고 또한 유입할 때의 유속이 작아 하류로 포획되는 공기량이 작기 때문에 발생하는 결과로 판단된다.

레버린스 보의 산소전달효율은 중심각이 작아질수록 점차 커지는 경향을 나타냈다. 중심각이 150° 로 제정 길이가 직선 보와 큰 차이가 없는 LBW150(그림 4(d)) 경우에는 전체적으로 직선 보와 동일한 산소전달효율 거동을 나타내었다. 중심각 60° , 30° 로서 제정 길이가 직선 보에 비해 각각 2.0, 3.9배 증가한 LBW60(그림 4(g))과 LBW30(그림 4(h))은 모두 직선 보에 비해 상당히 증가한 산소전달효율을 나타내었으며 또한 두 보간의 차이 역시 확인할 수 있었다. 그림 4(c)에서

그림 4(h)까지의 레버린스 보의 중심각 변화에 따른 산소전달효율 거동 비교로부터 중심각이 작을수록 더 큰 산소전달효율을 얻을 수 있는 점을 확인할 수 있다.

제정에 조약돌을 부착하여 조도를 증가시켜 월류 흐름의 분리를 발생시킨 LNW-C와 LBW30-C의 산소전달효율을 그림 4(b)와 (i)에 도시하였다. 제정의 조도 이외의 다른 조건이 모두 동일한 LNW와 LBW-30과 비교할 때 LNW-C와 LBW30-C 두 경우에서 모두 뚜렷한 산소전달효율의 증가가 나타났다. LBW30-C는 LBW30과 비교할 때 약 33%의 산소전달효율의 증가가 나타났으며, LNW-C의 경우에는 LNW의 산소전달효율 값이 작았기 때문에 약 130%의 증가가 나타났다. 이 결과로부터 월류 흐름의 분리로 인한 재폭기 효율의 증가 효과를 확인할 수 있었다.

각 보의 종류에 따른 산소전달효율을 비교하기 위하여 대부분의 보의 종류에서 가장 큰 산소전달효율 결과가 나타난 단위 폭 당 유량이 $0.067 \text{ m}^2/\text{s}$ 인 조건에서의 낙차에 따른 산소전달효율을 보의 종류에 따라 구분하여 그림 5에 도시하였다. 그림 5의 비교로부터 OGW의 산소전달효율이 다른 보에 비해 가장 작고, 그 다음이 LNW이며, 레버린스 보는 중심각이 작아질수록 산소전달효율이 커짐을 확인할 수 있다. LBW150은 LNW와 거의 동일한 산소전달효율 결과가 나타났으며 LBW120, LBW90, LBW60에서의 산소전달효율은 서로 뚜렷한 차이가 없었다. LBW30은 중심각이 큰 레버린스 보에 비해 상당히 큰 산소전달효율의 증가를 보였으며 조약돌을 부착하여 월류 흐름의 분리를 발생시킨

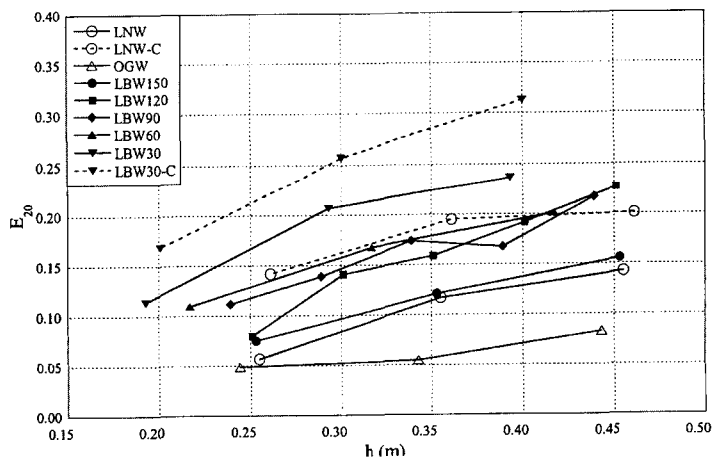


그림 5. 보의 종류에 따른 산소전달효율의 비교 ($q = 0.067 \text{ m}^2/\text{s}$)

LNW-C와 LBW30-C의 경우 모두 같은 조건의 매끈한 정부를 가진 보에 비해 상당한 산소전달효율의 증가를 나타냈다. 특히 LBW30-C는 래버린스 보의 효과와 더불어 정부 조도의 증가 효과로 인해 실험에 사용된 보 중에서 가장 큰 산소전달효율을 보였다.

4. 래버린스 보의 현장 시험 설치 및 측정 결과

실험 연구를 통해 제정의 조도로 인해 월류 흐름이 분리되는 작은 중심각의 래버린스 보에서 높은 재폭기 효율을 얻을 수 있다는 점을 확인하였다. 도출된 결과를 바탕으로 래버린스 보의 현장에서의 적용성 및 재폭기 거동의 확인을 위하여 래버린스 보를 실제 하천에 시험 설치하여 재폭기 거동을 관찰하였다.

래버린스 보의 시험 설치가 이루어진 곳은 인천광역시 부평구에 위치한 굴포천으로 평상시 유량의 변화가 적고 용존산소 농도가 비교적 낮아 재폭기 거동을 지속적으로 관찰하기에 좋은 조건을 가진 곳이다. 래버린스 보가 설치된 지점의 하폭은 약 12m이었으며, 보는 합성수지 재질로 이루어진 각재를 조립하여 보의 형상을 만들고 하상을 약 0.40m 굴착하여 위치시킨 후 내부에 방수재와 직경 0.20~0.50m의 사석을 채워 보를 완성하였다. 제정은 사석으로 이루어져 월류 흐름의 분리가 일어날 수 있게 하였고 보의 양쪽 끝단은 호안에 삽입

시켜 안정성을 확보하였다. 설치된 래버린스 보는 삼각형 형태로 보의 내부 각도는 30°, 정부 폭은 1 m이며, 삼각형 주기가 3.5회 반복되어 12m의 하폭 전체에 걸쳐 설치되었다. 설치된 래버린스 보의 사진을 그림 6에 도시하였다.

보에서의 낙차는 약 0.7m이며 보 하류 수심은 0.65~0.50 m 범위로 조사되었다. 보가 설치된 지점의 유량은 3회 측정된 결과 각각 1.695, 1.654, 1.634 m³/s로 나타났으며 이에 해당하는 단위 폭 당 유량은 각각 0.141, 0.138, 0.136 m²/s로서 큰 차이가 없었다. 용존산소 농도 측정은 보의 5 m 상류지점, 보의 직하류, 보의 10, 30, 50 m 하류 지점의 양안에서 YSI 550 DO meter를 사용하여 이루어졌다. 용존산소의 측정이 이루어진 수심방향의 위치는 환경부에 의해 고시된 시료 채취 위치에 따라 수표면에서부터 수심의 1/3 깊이의 지점에서 이루어졌다(동화기술, 1995). 용존산소 측정 시수는 측정도 동시에 이루어졌다. 각 측정 지점에서 호안에서 하천 중심부로 약 3 m 지점의 수질을 측정하였는데 양안에서의 용존산소 농도의 차이는 무시할 수 있는 정도이었다. 또한 측정 구간인 50 m 하류까지 거리에 따른 용존산소 농도의 변화는 크게 나타나지 않았다(한국건설기술연구원, 2002). 현장에서 측정된 유량 및 평균 용존산소 농도와 산소전달효율을 표 4에 제시하였다.

표 4. 현장 설치된 래버린스 보에서의 유량 및 용존산소 측정 결과와 산소전달효율

No.	유량 (m ³ /s)	단위 폭 당 유량 (m ² /s)	수온 (°C)	상류 DO (mg/l)	하류 DO (mg/l)	E ₂₀
1	-	-	11.4	3.50	4.50	0.16
2	-	-	8.8	4.90	5.80	0.17
3	-	-	7.8	4.45	5.63	0.20
4	-	-	8.9	4.60	5.74	0.20
5	-	-	9.9	4.05	5.30	0.21
6	-	-	11.0	2.95	4.30	0.20
7	-	-	10.8	4.75	5.78	0.20
8	-	-	10.5	4.00	4.93	0.15
9	-	-	9.5	4.25	5.28	0.18
10	1.695	0.141	9.6	4.10	5.19	0.19
11	-	-	10.5	3.25	4.41	0.18
12	-	-	10.3	3.65	4.49	0.14
13	-	-	12.0	2.70	3.88	0.17
14	-	-	11.9	2.35	3.39	0.15
15	-	-	13.6	1.45	2.75	0.17
16	1.654	0.138	14.8	1.15	2.54	0.17
17	1.634	0.136	15.6	1.50	2.84	0.17
평균	1.661	0.138				0.177

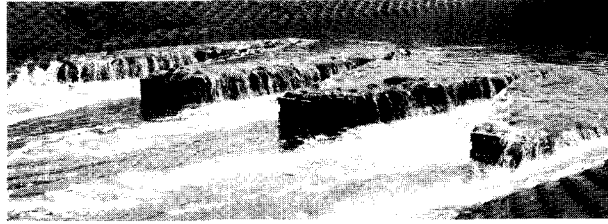


그림 6. 현장 설치된 래버린스 보

표 4에 나타난 바와 같이 현장 설치된 래버린스 보의 산소전달효율은 0.14~0.21의 범위로서 평균 약 0.18로 나타났다. 증가된 용존산소 농도의 값은 0.8~1.4 mg/l의 범위로서 현저한 양의 증가량을 나타내었고 이는 하천 수질 향상에 기여한다고 판단된다.

실험 결과와 현장 자료를 비교할 때, 현장에서의 산소전달효율은 실험 결과로부터 예상되는 값에 미치지 못하였다. 중심각 30°이며 정부에 조약들을 부착한 래버린스 보의 실험 결과는 유량이 0.067m²/s 인 경우 낙차 약 0.2~0.4m의 조건에서 산소전달효율이 0.18~0.31 범위이었는데 비해 낙차가 약 0.7m이며 단위 폭 당 유량이 약 0.166m²/s인 현장의 산소전달효율은 평균 0.18로서 낙차 및 유량을 고려할 때 실험 결과에 비해 감소된 결과를 가져왔다. 수질과 유량의 영향을 이에 대한 원인으로 추정할 수 있다. 래버린스 보가 설치된 하천의 수질은 상당히 악화되어있는 상태로써 계면 활성물질을 포함한 여러 오염물질이 수중에 존재한다. 이러한 물질이 재폭기에 어떤 영향을 미치는지는 분명하게 밝혀진 바는 없으나 Gameson 등(1958) 그리고 Water Pollution Research Laboratory(1973) 등이 재폭기 예측식을 제안하면서 오염이 심할수록 재폭기가 감소하는 영향을 나타내는 수질 상수를 사용한 바가 있다. 따라서 오염이 심한 물일수록 재폭기가 감소한다고 추정할 수 있다. 그리고 현장에 설치된 보에서는 큰 유량으로 인해 보의 정부에서 흐름의 분리가 충분히 이루어지지 않아 실험 조건만큼의 분리 효과가 발생하지 못했다. 또한 설치된 보는 실험 조건 보다 규모가 증가하여 동일한 중심각 조건에서도 래버린스 보 마무간의 간격이 넓어 월류 흐름의 충돌 효과가 감소한 점도 산소전달효율의 감소와 관련이 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

재폭기 효율이 향상된 보를 개발하기 위하여 실험을 통하여 직선형 보, 여수로형 보, 래버린스 보 등에서의

재폭기 효율을 측정하여 결과를 비교하였고, 또한 직선형 보와 래버린스 보의 경우 제정의 조도를 증가시켜 그 효과를 분석하였다. 실험은 낙차 0.16~0.46m, 단위 폭 당 유량 0.006~0.067m²/s 범위에서 수행되었다. 실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 여수로 형 보에서의 산소전달효율이 가장 작으며 그 다음으로 직선 보였으며 래버린스 보의 경우 중심각이 감소할수록 산소전달효율이 증가하는 경향이 나타났다.

둘째, 모든 경우에 있어서 낙차와 유량이 증가할수록 산소전달효율이 증가하는 것으로 나타났으며

셋째, 조약들을 부착하여 제정의 조도를 증가시켜 월류 흐름의 분리를 발생시킨 경우 재폭기가 상당히 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

실험 결과를 바탕으로 높은 재폭기 효율이 예상되는 중심각 30°의 래버린스 보를 현장에 설치하여 재폭기를 관측하였다. 현장에 설치된 래버린스 보는 튕을 조립하여 그 내부에 사석을 채워 건설되었으며 제정에는 사석이 노출되어 흐름의 분리를 유발하였다. 낙차 약 0.7m, 단위 폭 당 유량 약 0.136~0.141m²/s 범위인 현장 조건에서 평균 약 0.18의 산소전달효율 결과를 얻을 수 있었다. 이는 용존산소 농도의 절대값 0.8~1.4mg/l의 증가를 뜻하는 값으로 래버린스 보를 통한 수질의 향상을 도모할 수 있다고 판단된다.

본 실험 연구와 현장 설치 후 측정 결과는 재폭기 효율이 높은 보를 통한 하천 수질 개선에 사용될 수 있을 것이라 예상된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 선도기술개발사업(G 7)의 '국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발' 연구 과제의 일부로 수행되었다. 본 연구 중 실험을 수행하는데 도움을 준 하천 실험실 김창원/김규호 그룹장, 윤병모 팀장 및 직원들께 사의를 표하며, 현장 관측을 도와준 한국

건설기술연구원 박정환, 권보애씨에게 감사의 뜻을 전한다.

참 고 문 헌

- 김태원 (1997). 수리구조물에서 용존산소 부족비율 추정식의 개발, 석사학위논문, 서울대학교.
- 동화기술(1995). 수질오염·폐기물 공정시험방법, 동화기술
- 조원철, 이원환, 최대훈 (1988). “댐 월류량 증대를 위한 LABYRINTH 웨어의 수리특성에 관한 실험적 연구.” 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 57.
- 한국건설기술연구원 (2002). 국내 여건에 맞는 자연형 하천 공법의 개발.
- ASCE Task Committee on Gas Transfer at Hydraulic Structures. (1991). “Gas Transfer at Hydraulic Structures.” *Air-Water Mass Transfer, Proceedings of 2nd International Symposium on Gas Transfer at Water Surface*, Reston, VA, pp. 460-493.
- Avery, S. T., and Novak, P. (1978). “Oxygen Transfer at Hydraulic Structures.” *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of ASCE*, Vol. 104, No. HY11, pp. 1521-1540.
- Cassidy, J. J., Gardner, C. A., and Peacock, R. T. (1985). “Boardman Labyrinth-Crest Spillway.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, No. 3, pp. 398-416.
- Gameson, A. L. H., Vandyke, K. G., and Ogden, C. G. (1958). “The Effects of Temperature on Aeration at Weirs.” *Water and Water Engrg.*, Vol. 63, No., pp. 489-492.
- Gulliver, J. S., Thene, J. R., and Rindels, A. J. (1990). “Indexing Gas Transfer in Self-Aerated Flows.” *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 503-523.
- Gulliver, J. S., Wilhelms, S. C., and Parkhill, K. L. (1998). “Predictive Capabilities in Oxygen Transfer at Hydraulic Structures.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 7, pp. 664-671.
- Hay, N., and Taylor, G. (1970). “Performance and Design of Labyrinth Weirs.” *Journal of Hydraulics Division, Proceedings of ASCE*, Vol. 96, No. HY11, pp. 2337-2357.
- Nakasone, H. (1987). “Study of Aeration at Weir and Cascades.” *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 113, No. 1, pp. 64-81.
- Thene, J. R. (1988). *Gas Transfer at Weirs using the Hydrocarbon Gas Tracer Method with Headspace Analysis*, MS thesis, University of Minneapolis, Minneapolis, Minn.
- Tsang, C. C. (1987). *Hydraulic and Aeration Performance of Labyrinth Weirs*, Ph.D Thesis, University of London, London, UK.
- Tullis, J. P., Amanian, N., and Waldron, D. (1995). “Design of Labyrinth Splliways.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp. 247-255.
- Urban, A. K., Hettiarachchi, S. L., Miller, K. F., Kincaid, G. P., and Gulliver, J. S. (2001). “Field Experiments to Determine Gas Transfer at Gated Sills.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 10, pp. 848-859.
- Water Pollution Research Laboratory. (1973). *Notes on aeration at weirs*, No. 61, Department of Environment.
- Watson, C. C., Walters, R. W., and Hogan, S. A. (1998). “Aeration Performance of Low Drop Weirs.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 65-71.
- Wormleaton, P. R., and Soufiani, E. (1998). “Aeration Performance of Triangular Planform Labyrinth Weirs.” *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, No. 8, pp. 709-719.
- Wormleaton, P. R., and Tsang, C. C. (2000). “Aeration Performance of Rectangular Planform Labyrinth Weirs.” *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 456-465.

(논문번호:02-21:접수:2002.4.15/심사완료:2002.08.23)