

하천 보의 형태에 따른 공기 유입의 수리학적 검토 Hydraulic Analysis of Air Entrainment by Weir Types

김진홍* / 심명필** / 최계운*** / 오종민****

Kim, Jin-Hong/ Shim, Myung-Pil/ Choi, Gye-Woon/ Oh, Jong-Min

Abstract

This paper presents the hydraulic analysis of the air entrainment by the weir types. For the weir types, the stepped weir, the labyrinth weir and the gate underflow weir were selected, and the oxygen transfer efficiency was estimated by the site investigation and the hydraulic model tests. The most effective type for the oxygen transfer was stepped weir. The more steps the stepped weir had, the higher efficiency it revealed. Oxygen transfer was proportional to the flow velocity, the Froude number, and the flow discharge in order. Hydraulic model tests showed that a nappe flow occurred at small flow rates. The concurrent condition of a nappe flow and a skimming flow occurred as flow rate increases, nappe flow at the upper part and skimming flow at the lower part. In the region of nappe flow, air inception occurred from the step edges due to flow separation, and air entrainment was made through a free-falling nappe, an air pocket, a nappe impact and a subsequent hydraulic jump. In the region of skimming flow, air entrainment occurred by the variation of water surface over the steps, but it was relatively small compared with nappe flow.

Keyword : air entrainment, stepped weir, labyrinth weir, gate underflow weir, nappe flow, skimming flow

요 지

본 연구에서는 보 월류시 공기 유입을 수리학적인 방법으로 분석하였다. 이를 위해 하천에 설치된 보의 형태로써 계단형 보와 래버린스 보 및 배사문 보를 선정하여 현지측정과 수리실험을 통해 산소전달 효율을 검토하였다. 산소전달 효율은 계단형 보가 크며, 배사문 보는 산소전달 효율이 그리 크지 않았다. 산소전달은 흐름의 유속, Froude 수, 유량 순으로 상관 관계를 나타내었으며 특히 흐름의 유속과 산소전달 효율에서 높은 관계를 나타내었

* 중앙대학교 토목공학과 부교수

Asso. Prof., Dept. of Civil Engrg., Chung Ang Univ., Anseong, Gyeonggi-do 456-756, Korea
(E-mail : jinhkim@cau.ac.kr)

** 인하대학교 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea

*** 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수

Prof., Dept. of Civil & Environ. System Engrg., Univ. of Incheon, Incheon 402-749, Korea

**** 경희대학교 환경응용화학대학 환경학과, 환경연구센터, 교수

Prof., Center for Environ. Studies and Dept. of Environ. Science and Engrg., Kyunghee Univ., Gyeonggi do, 449-701, Korea

다. 수리실험 결과 계단형 보의 월류 흐름은 유량이 작을 경우 계단 전 구간에 걸쳐 잠입류가 발생하고, 유량 증가에 따라 잠입류와 표면류가 공존하며 이 경우 계단 상부에서 표면류 및 계단 하부에서 잠입류가 발생하였다. 잠입류의 경우 계단 끝단에서 흐름 분리에 의해 공기 유입이 시작되고, 자유낙하 nappe과 계단 안쪽의 공기 주머니 및 nappe impact와 이후의 도수 현상으로 많은 공기 유입이 발생되었다.

표면류의 경우 계단 끝단에서 공기 유입이 시작되고, 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동에 의해 많은 공기가 유입되었지만 공기 유입은 잠입류의 경우에 비해 상대적으로 작았다.

핵심용어 : 공기 유입, 계단형 보, 래버리스 보, 배사문 보, 잠입류, 표면류

1. 서론

하천에 설치된 보는 흐름의 정체를 유발시켜 수질악화가 발생된다. 따라서 보를 월류할 때 공기 유입에 의한 용존산소를 증가시킴으로써 수질개선을 유도할 수 있는 방안을 고려하는 것이 바람직하다.

보는 하천의 수위 조절 및 취수라는 목적에서 설치되었지만 흐름이 보를 월류할 때 공기가 물 속으로 전달되는 유입 효과를 갖게 되며 이 과정에서 공기 중의 산소가 물에 용해되어 용존산소가 증가한다. 용존산소가 풍부하면 생산자인 부착조류나 식물성 플랑크톤 등이 많이 번식하게 되며 이들을 먹이로 하는 수생곤충이나 어류들(1차소비자)도 많이 서식하게 되고, 같은 방식으로 2차 소비자 및 3차, 4차 소비자들도 많이 서식하게 된다. 따라서 용존산소는 하천 수질개선과 함께 생태계 서식에 중요한 역할을 하며, 용존산소를 생성케 하는 공기의 유입이 보 월류시 어떠한 흐름 특성 하에서 어떤 과정을 거쳐 이루어지는 지를 규명할 필요가 있다.

보에서 공기의 수중 유입은 수표면 또는 수체 내에서의 난류 혼합 및 수체에 포획된 기포로 인한 물-공기 경계면 면적의 증가 등에 의해 주로 영향을 받는다(ASCE, 1991). 또한 보에서의 공기 유입은 유량이나 유속 등의 수리적 조건에 영향을 받지만, 보의 종류에 따라서 차이를 보인다. 보의 종류에 따른 공기 유입은 여러 연구자들에 의해 수행되었다(Gulliver 등, 1998). 월류 보에서의 공기 유입은 월류된 물이 자유제트가 되어 낙하할 때 포획된 기포에 의해 발생하며, 여수로형 보의 경우 보의 표면을 따라 경계층이 형성되고 흐름 방향에 따라 경계층이 발달되며 경계층이 수표면에 도달될 때 공기 유입이 시작된다. 보 월류부에서 흐름의 표면은 매끈하고 잔잔하지만 바닥에서는 난류가 생성되고 경계층이 발달된다. 발달된 경계층은 흐름 방향으로 두께가 커지면서 수표면에 도달되고 이 지점에서 많은 공기가 유입되면서 흐름은 백색(white waters)을 띄게

된다(Chanson, 1996). 수중턱의 경우 감세지에서 난류 분사의 수표면 및 수중턱 하류에서의 연이은 도수(subsequent hydraulic jump)에 의해 많은 공기 유입이 이루어진다(Urban 등, 2001). 따라서 공기 유입 효과가 높은 형태의 보를 설치하면 주어진 수리 조건에서 공기 유입효과가 낮은 보에 비해 더 많은 산소전달을 유발시켜 용존산소가 증가된다.

본 연구의 목적은 보 설치에 따른 수질 악화를 개선시키기 위한 방안으로서 공기 유입을 수리학적인 방법으로 규명하는 데 있다. 공기 유입 조건을 유량과 유속에 국한하였던 종래의 거시적 입장에서 벗어나 공기 유입의 주요 원인이 되는 조직적인 와류구조를 살피는 미시적 입장에서 수리학적으로 규명함으로써, 어떤 수리적 조건 아래에서 와류구조가 잘 발달되어 공기 유입이 이루어지는지 밝히고자 하였다.

이를 위해 하천에 설치된 보의 형태에 따른 흐름의 공기 유입을 현지 측정을 통해 검토하였다. 보의 형태로서 계단형 보와 래버리스 보 및 배사문 보의 세 종류를 선정하여, 보의 상·하류에서 용존산소량을 측정함으로써 보의 형태 및 수리량에 따른 공기 유입 능력에 대해 조사하였으며 공기 유입에 효율적인 보의 형태를 선정하였다.

선정된 보의 형태를 실험실에서 적정 규모로 재현시켜 수리실험을 통해 보 월류시 어떠한 흐름 특성 하에서 어떤 과정을 거쳐 공기유입이 이루어지는지 수리학적으로 규명하였다.

2. 산소전달 효율

수질개선 효과를 판단하는 척도의 하나로서 공기 유입에 따른 용존산소(dissolved oxygen, DO) 농도 증가를 고려할 수 있으며, 각 지점별 용존산소 농도 증가 효율을 나타내기 위해서 산소전달효율(oxygen transfer efficiency : E)이 사용된다(Chanson, 1996).

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

여기서 C_s , C_u , C_d 는 각각 용존산소의 포화농도 및 보의 상, 하류에서의 용존산소 농도이다. r 는 부족비(deficit ratio)로서 보 상, 하류의 포화 용존산소 농도에 대하여 부족한 용존산소의 비율로 정의되는 값으로서 1부터 무한대까지의 값을 가지며 그 값이 클수록 산소전달 효율 즉 공기 유입 효율이 크다는 것을 의미한다. 산소전달 효율은 0에서 1까지의 값을 가지며 전혀 공기 유입이 일어나지 않으면 0이고, 보를 월류한 이후 포화농도가 되면 1의 값을 가지게 된다.

산소전달 효율은 수온에 따라 달라지므로 일반적으로 20℃를 기준 수온으로 하여 보정한 무차원화된 산소전달 효율(E_{20})을 사용한다. 여러 경험식들이 온도에 대한 산소전달 효율의 의존성을 보정하기 위하여 제안되었는데, 이 중 Gulliver 등(1990)은 유체밀도, 점성 및 표면장력 등을 이용하여 반경험적인 접근방법을 이용하여 다음과 같은 형태의 온도 보정식을 제안하였다.

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

여기서 E_T 와 E_{20} 은 각각 온도 T 와 20℃에서의 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.

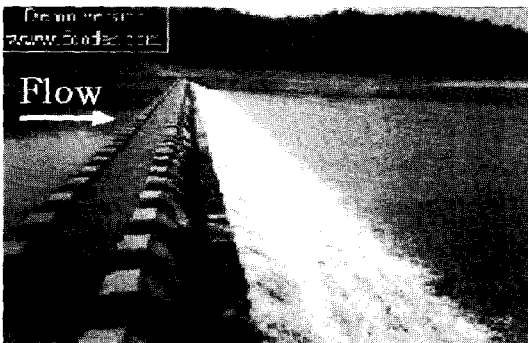
3. 현지 대상 보의 선정 및 측정

조사 대상 보로서 경기도 성남시 탄천의 계단형 보 3개소, 경기도 부천시 굴포천의 래버린스 보 1개소, 전라남도 곡성군 동산리와 침곡리 및 구례군 광평리에 위치한 섬진강의 배사문 보 3개소를 선정하였다. 탄천의 계단형 보 3개소는 각각 계단형 4단, 계단형 2단, 계단형 1단이다. 계단형 보는 보 하류단 형태를 계단형으로 취함으로써 흐름의 월류시 많은 양의 공기가 유입되어 수질개선의 효과가 있으리라 판단되어 이들 구조물을 선정하였으며, 래버린스 보는 폭기에 의한 효율이 좋은 것으로 알려져 있어(Henry, 1985; Wormleaton과 Tsang, 2000) 선정하였다. 섬진강 배사문 보의 경우 동산리 보와 광평리 보의 보의 한 구간에 배사문이 설치되어 있으며, 침곡리 보의 전구간에 걸쳐 배사문이 설치되어 있다. 이들 배사문 보 하류에서 도수에 의한 공기 유입이 발생되어 수질개선 효과를 분석하기 위해 선정하였다.

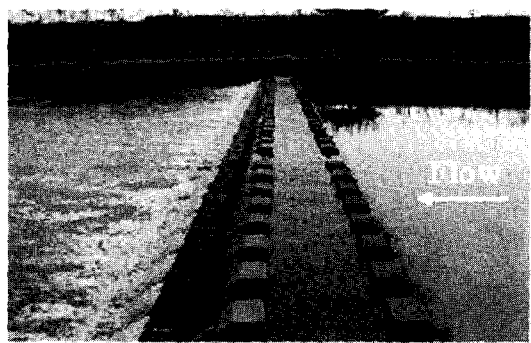
그림 1은 각각 선정된 보 형태를 나타내고 있다.

산소전달 효율을 계산하기 위해 각각의 보에 대하여 그림 2와 같이 보의 상류와 하류 지점의 좌우안과 중앙부에서 용존산소를 측정하였다. 여기서 A는 하천의 우안, B는 중앙부, C는 좌안이며, A와 C의 경우 하천 양안으로부터 1m 정도 떨어져서 측정하였다. 용존산소는 YSI-550 DO Meter를 이용하였으며, 수온은 YSI-550 DO Meter에서 직접 측정이 가능하다. 유속은 2차원 유향유속계를 이용하여 측정하였다.

산소전달 효율과 수리특성 변수와의 상관 관계를 구하기 위해 보의 폭을 측정하고 월류 수심과 유속을 측정하여 단위 폭당 월류 유량과 Froude수를 구하였다.



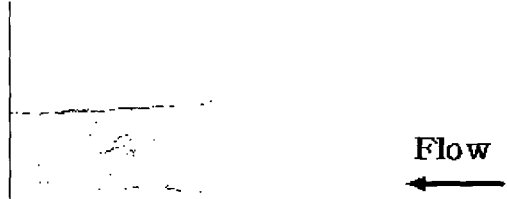
(a) 계단형 4단보



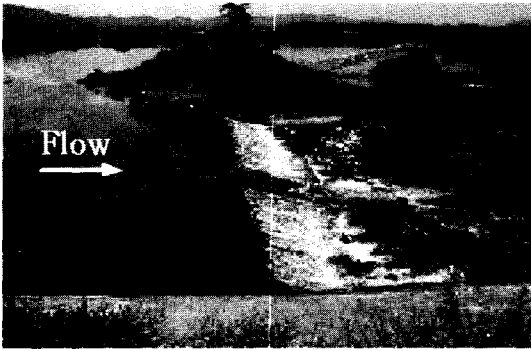
(b) 계단형 2단보



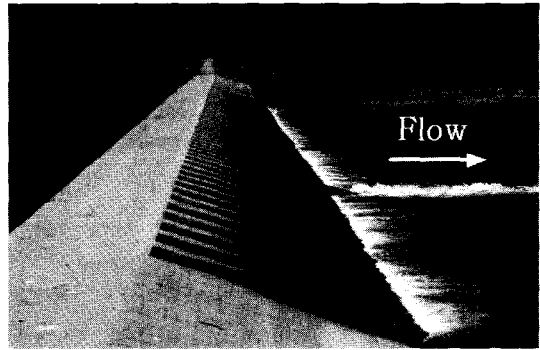
(c) 계단형 1단보



(d) 래버린스 보



(e) 배사문 보(일부 구간)



(f) 배사문 보(전구간)

그림 1. 각 형태의 고정보

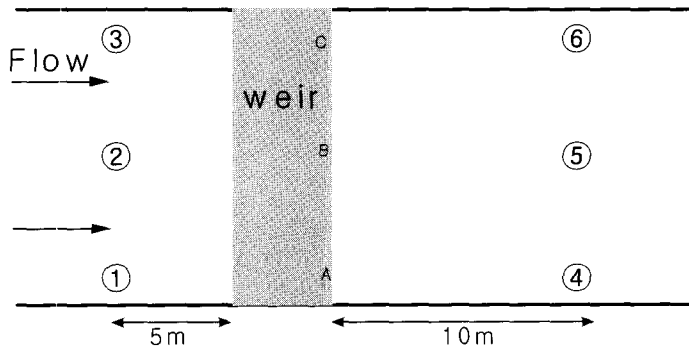


그림 2. 계단형 보와 배사문 보의 측정지점

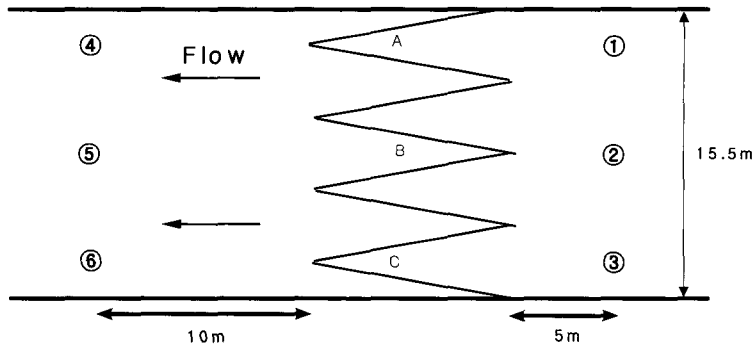


그림 3. 래버린스 보의 측정 지점

4. 현지 측정 결과

계단형 4단 보를 No.1, 계단형 2단 보를 No.2, 계단형 1단 보를 No.3, 그리고 래버린스 보를 No.4, 섬진강의 배사문 보를 각각 No.5, 6, 7로 하여 각 보의 형상에 따른 산소전달 효과를 조사하였다.

그림 4는 각 형태별 보의 수리 변수에 따른 산소전달 효율을 나타내고 있다.

상기 그림을 보면 산소전달 효율은 계단형 보와 래버린스 보가 효율적이며, 배사문 보는 산소전달 효율이 그리 크지 않음을 알 수 있다. 이는 계단형 보와 래버린스 보의 월류 흐름으로 인해 보의 trailing edge에서 많은 공기 유입이 발생되고, 또한 월류 흐름은 하류부의 흐름에 nappe impact를 발생시켜 수표면의 강한 난류 혼합 및 이로 인한 산소전달이 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 특히 계단형 보의 경우 E20이 평균 0.20으로

서 산소전달 효율이 크며, 계단수가 많을수록 상대적으로 효율이 높다는 것을 알 수 있다. 이는 흐름이 각 계단을 월류하면서 많은 공기 유입 및 하류부의 nappe impact와 연이은 도수 발생으로 인해 공기 중의 많은 산소가 유입되기 때문이다. 배사문 보의 경우 배사문 하류에서 도수 발생으로 공기 유입이 발생되기는 하지만 계단형 보나 래버린스 보의 경우처럼 월류 흐름에 의한 trailing edge에서의 공기 유입 및 nappe impact가 발생하지 않기 때문에 산소전달 효율은 상대적으로 작다.

공기 유입 이론의 입장에서 보았을 때 용존산소 증가의 수치가 폭기 효과를 비교적 잘 나타낸다고 할 수 있으며, 따라서 상기 결과를 통해 계단형 보에서의 공기 유입 현상에 의해 수질개선 효과를 파악할 수 있다.

각 보의 형태별로 수리 변수에 따른 산소전달 효율을 나타내면 그림 5~13과 같다.

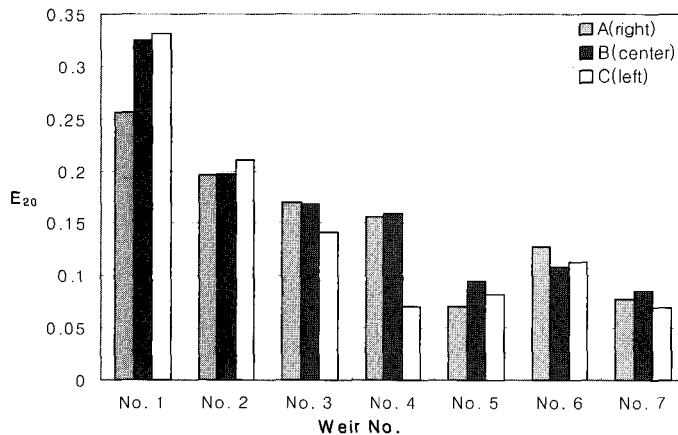


그림 4. 각 보의 형태에 따른 산소전달 효율

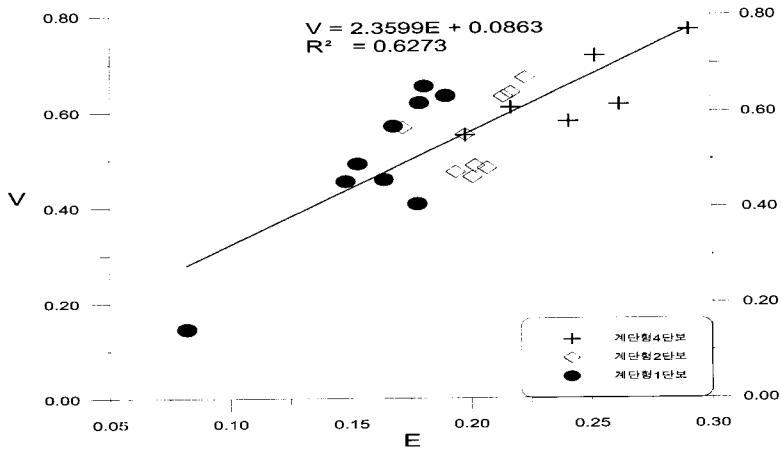


그림 5. 계단형 보의 산소전달 효율과 유속과의 관계

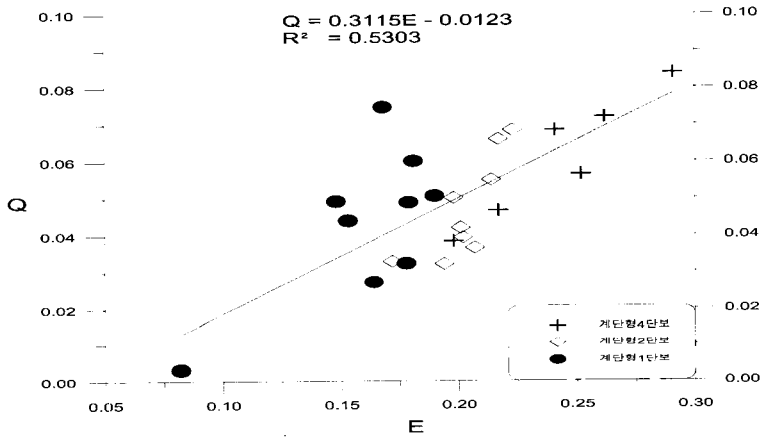


그림 6. 계단형 보의 산소전달 효율과 유량과의 관계

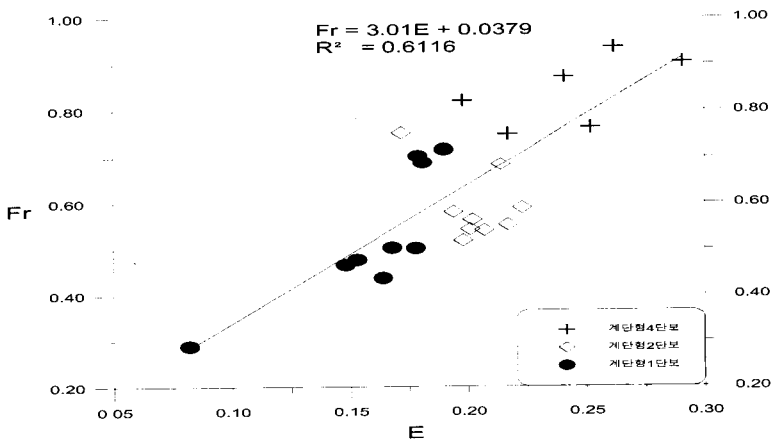


그림 7. 계단형 보의 산소전달 효율과 Froude 수와의 관계

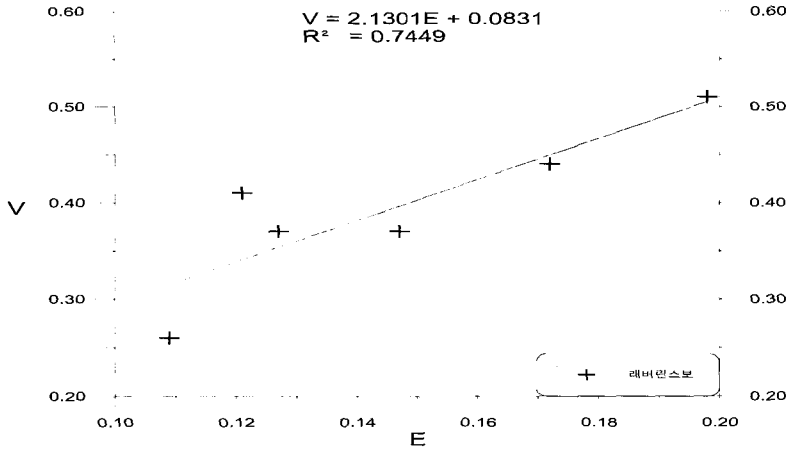


그림 8. 레버린스 보의 산소전달 효율과 유속과의 관계

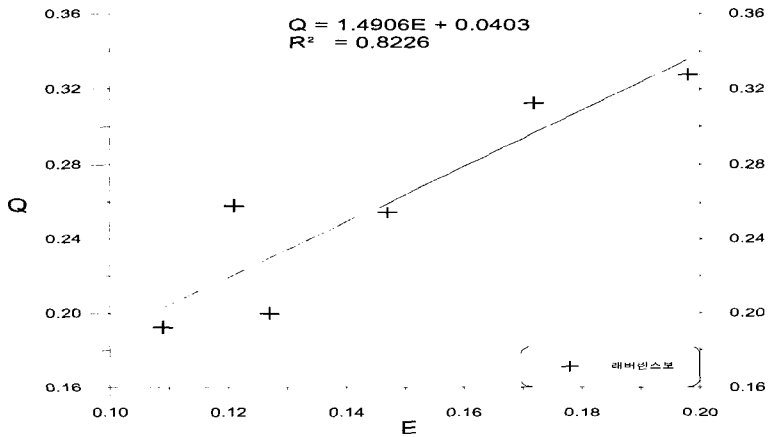


그림 9. 레버린스 보의 산소전달 효율과 유량과의 관계

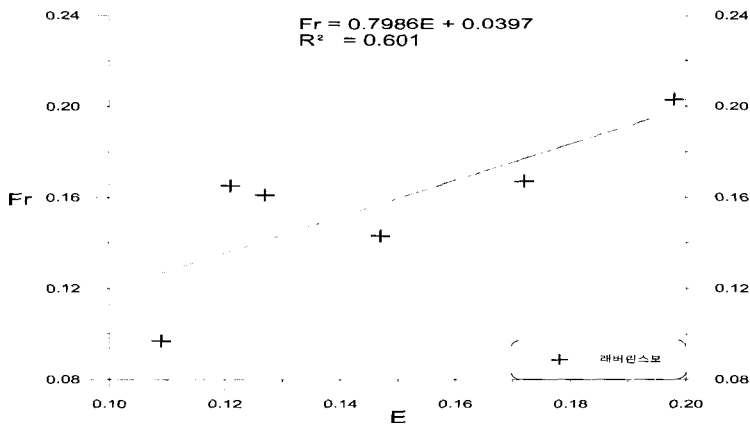


그림 10. 레버린스 보의 산소전달 효율과 Froude 수와의 관계

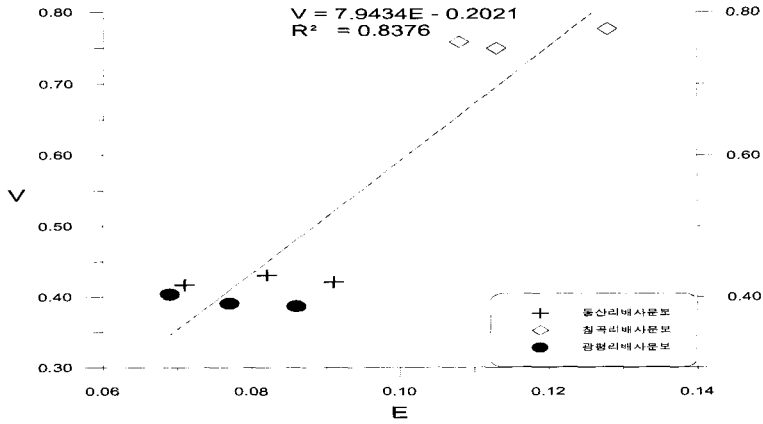


그림 11. 배수분 보의 산소전달 효율과 유속과의 관계

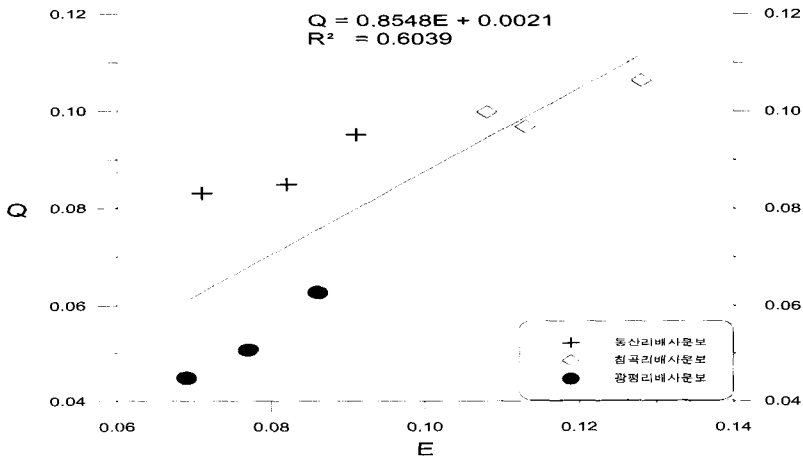


그림 12. 배수분 보의 산소전달 효율과 유량과의 관계

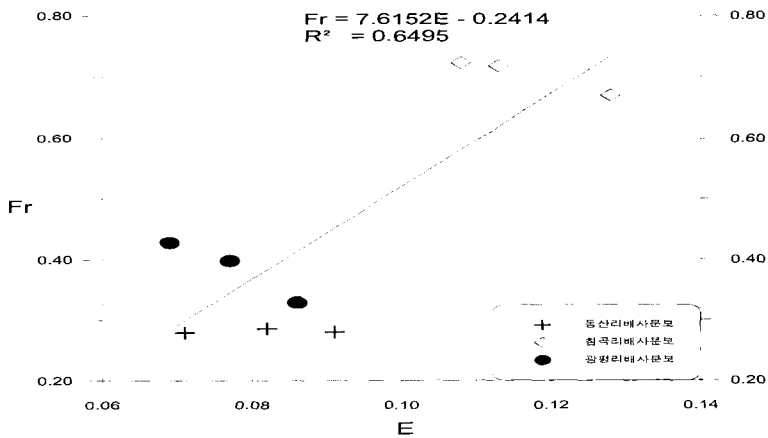


그림 13. 배수분 보의 산소전달 효율과 Froude 수와의 관계

5. 수리 실험

상기 그림을 보면 산소전달 효율은 흐름의 유속 및 유량과 Froude 수의 증가에 따라 대체적으로 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이들의 비례 관계는 산소전달 효율과 흐름의 유속, Froude 수, 유량 순으로 상관 관계를 나타내고 있으며 특히 흐름의 유속과 산소전달 효율에서 높은 관계를 나타내는데, 이는 유속의 증가에 따른 수표면의 활발한 진동, 난류의 발생, 및 도수로 인해 많은 공기 유입 현상이 수반되기 때문이다.

산소전달 효율과 유량과는 상대적으로 작은 상관 관계를 나타내는데 이는 수심의 영향 때문인 것으로 판단된다. 즉, 산소전달 효율은 수심과 상관 관계가 작음에 비해 유량은 수심에 비례하기 때문이다. 현지 측정 결과 산소전달 효율은 수심이 작을수록 약간 높게 나타났으나, 높은 상관 관계는 보이지 않았다. 이는 다른 조건이 모두 동일하며 수심만이 증가하는 경우에는 수중으로 전달되는 산소의 양은 일정한데 비해 물의 부피는 증가하므로 용존산소의 증가량은 감소하기 때문이다. Froude 수는 수심의 제곱근에 반비례하며 따라서 이 같은 결과 때문에 산소전달 효율은 유량보다는 Froude 수와 높은 관계를 나타내었다.

래버린스 보의 경우 산소전달 효율은 계단형 보나 배사문 보와 달리 유속보다는 유량과 높은 상관 관계를 나타내는데 이는 보의 형태 때문인 것으로 판단된다. 즉, 래버린스 보는 계단형 보나 배사문 보가 일직선 형태임에 비해 W 형태로서(Wormleaton과 Tsang, 2000), 이 경우 흐름은 보의 중앙으로 집중되면서 흐름이 서로 합쳐지는 과정에서 흐름의 활발한 진동과 난류 혼합(turbulent mixing)이 이루어지고 이로 인해 많은 공기 유입이 발생되기 때문이다.

배사문 보의 경우 계단형 보나 래버린스 보에 비하여 산소전달 효율이 많이 떨어지는 것을 알 수 있는데 이는 전형에서 언급한 바와 같이 월류 흐름에 의한 trailing edge에서의 공기 유입이나 nappe impact가 발생하지 않기 때문이다. 배사문 보 3개소 중 보의 전구간에 걸쳐 배수문이 설치되어 있는 침곡리 배사문 보의 경우 다른 2개소의 배사문 보보다 산소전달 효율이 높은 것으로 나타났다.

상기 결과를 통해 보의 월류 흐름에 의해 공기 유입 및 수질개선 효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 계단형 보와 래버린스 보가 비교적 수질개선 효과가 크며, 특히 계단형 보의 경우 수질개선 효과가 보다 크고 계단의 수가 많을수록 공기 유입에 의한 수질개선 효과가 증가됨을 알 수 있다.

상기 언급한 바와 같이 수질개선에 효율적인 보는 계단형 보임을 알았다. 따라서 계단형 보가 어떤 과정을 통해 공기 유입 현상이 발생되고 수질개선을 일으키는 지 수리학적으로 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 계단형 보의 수리실험을 통해 흐름 특성 및 공기 유입 과정을 검토하였다. 공기 유입의 주요 원인이 되는 조직적인 와류구조를 살펴보는 미시적 입장에서 수리학적인 규명을 통해 어떤 수리적 조건 아래에서 와류구조가 잘 발달되어 공기 유입이 이루어지는지 밝히는 것으로 하였다.

현지에서 측정된 자료를 바탕으로 실험실에서 계단형 보를 적정 축척으로 재현시켜 보를 유통하는 흐름 특성을 조사하였다. 계단형 보의 규모는 현지 하천 여건에 따라 결정되므로 일정 크기는 없다. 따라서 본 연구에서는 하천에 설치된 여러 계단형 보를 비교하고, 실내 실험실의 규모를 고려하여 축척 $s=1/10$ 로 결정하였다.

수리실험은 실내 개수로 실험실에서 수행되었다. 개수로 실험장치는 길이 12m, 폭 0.4m, 높이 0.4m이고, 모형의 크기는 폭 0.4m, 길이 0.54m, 높이 0.312m 경사 30°이다. 아래 그림은 개수로 실험장치 및 계단형 보의 모형을 나타내고 있다.

본 실험의 조사항목 및 측정 방법은 다음과 같다. 용존산소의 경우 계단형 보의 상·하류에서 YSI-550 DO Meter를 이용하여 수로에서 측정하였다. 실험실 수로의 흐름은 반복 순환되므로 흐름 내의 용존산소 농도는 일반 하천의 용존산소 농도에 비해 상대적으로 높으며 산소전달 효율은 일반 하천에 비해 낮아질 수 있다. 따라서 산소전달 효율 측정의 신뢰도를 향상시키기 위하여 아황산나트륨(Na_2SO_3) 용액을 개수로 내의 물에 첨가하여 초기 용존산소 농도를 저하시킴으로써 실험의 모든 경우에 초기 용존산소 농도의 포화 용존산소에 대한 부족비를 20% 이상으로 유지하였다(유대영 등, 2001).

수온은 YSI-550 DO Meter에서 직접 측정이 가능하며, 월류 수심은 개수로 측벽에 부착된 투명 플라스틱 scale로 측정하되, 측정의 정확도를 높이기 위해 point gauge도 병행 이용하였다. 유속은 2차원 유행유속계를 이용하여 측정하였다.

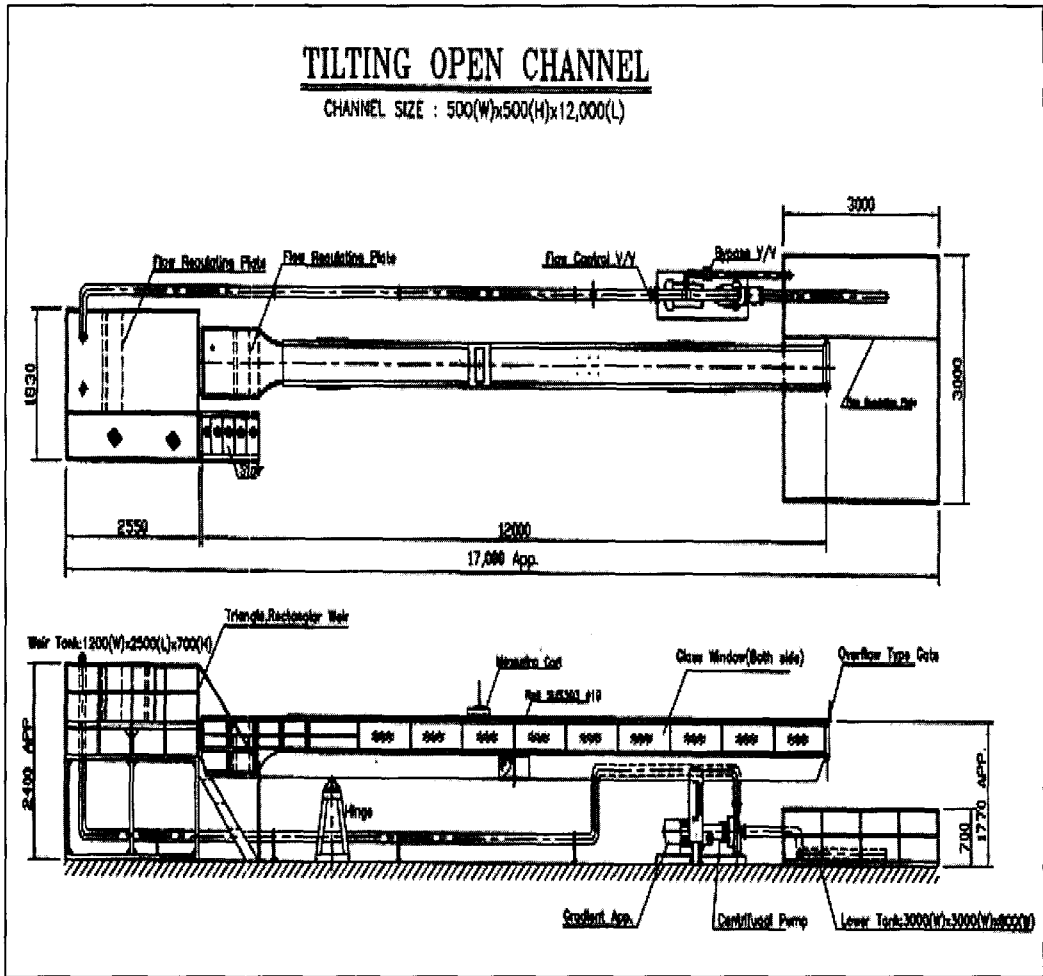


그림 14. 개수로 실험장치

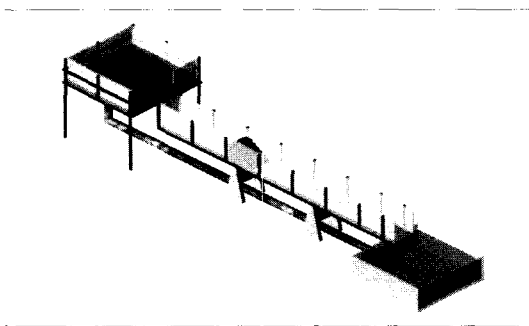


그림 15. 개수로 실험장치(입체도)

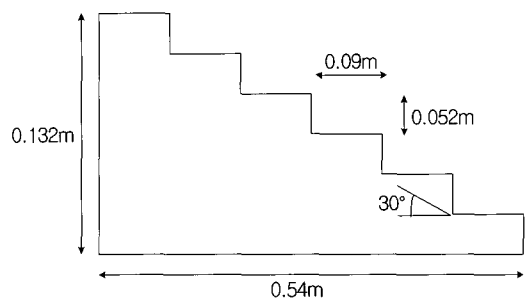


그림 16. 계단형 보의 모형

6. 수리실험 결과

계단형 보를 월류하는 흐름은 일반적으로 유속, 수심 및 계단 형상에 따라 잠입류와 표면류로 구분된다 (Toombes와 Chanson, 2000). 잠입류는 계단 끝단 (trailing edge)에는 흐름의 자유낙하 nappe이 형성되고 계단 안쪽에는 공기주머니가 생기며 이 때 자유낙하 흐름은 사류를 형성한다. 사류 흐름은 nappe가 계단에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 상류 흐름으로 바뀌게 된다. 표면류의 경우 계단 끝단에는 잠입류와 달리 흐름의 분리현상(flow separation)으로 인해 와류(vortex)가 발생된다. 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동이 발생되며 도수 현상은 나타나지 않는다.

본 연구의 경우 계단 경사를 30°로 하여 유량별 흐름을 분석하였다. 그림 17과 18은 각각 유량에 따른 잠입류와 표면류의 모습을 나타내고 있다. 여기서 No. 1~5는 실험 횟수를 나타낸다. 실험 결과 유량이 작을 경우 계단 전 구간에 걸쳐 잠입류가 발생하고, 유량 증가에 따라 잠입류와 표면류가 공존하며 이 경우 계단 상부에서 표면류가, 하부에서는 잠입류가 발생하는 모습을 나타내었다. 이 같은 공존 흐름은 특히 표면류에서 잠입류로 바뀌는 천이흐름 구간이 시간에 따라 변하는 불안정한 모습을 나타내었다. 천이흐름 구간에서는 표면류와 잠입류가 번갈아 나타나거나, 경우에 따라서는 표면류와 잠입류의 중간 상태를 나타내기도 하였다. 본 연구의 주 내용이 계단형 보에서의 공기 유입이기 때문에 잠입류와 표면류의 발생 조건이나 천이흐름에 대한 언급은 내용의 범위에서 제외시켰다.

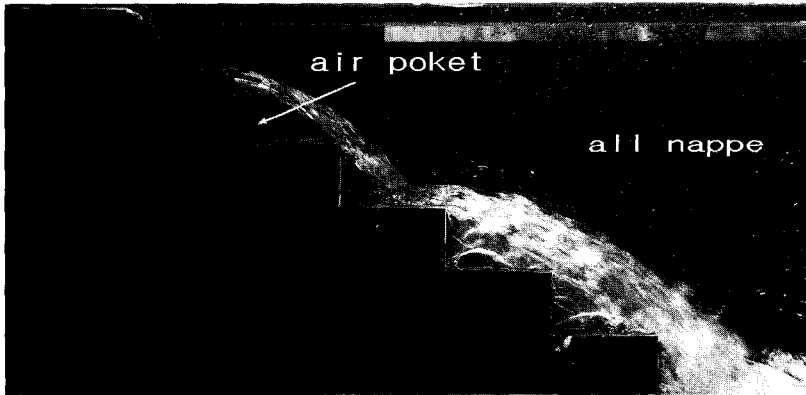


그림 17. 전구간에서의 nappe flow

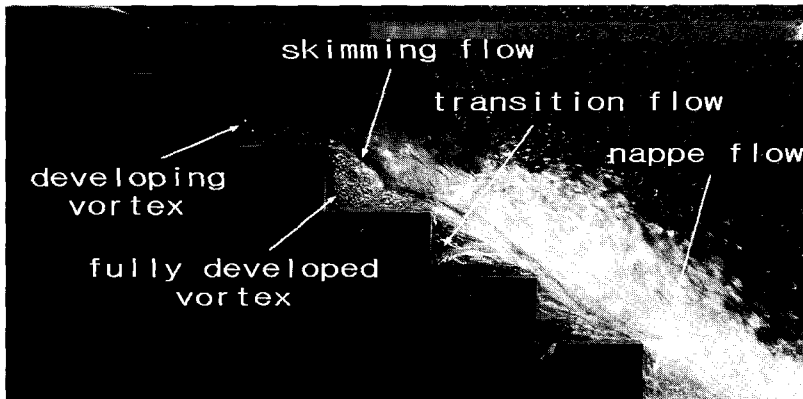


그림 18. Skimming flow와 nappe flow의 공존상태

그림 17과 18을 보면 잠입류의 경우 계단 끝단에는 흐름이 분리되면서 자유낙하 nappe이 형성되고 계단 안쪽에는 공기주머니가 생기는데, 이 같은 현상으로 계단 끝단에서 공기 유입이 시작되고(air inception) 자유낙하 nappe에서 많은 공기가 유입된다. 자유낙하 흐름은 계단 하부에 부딪히고(nappe impact) 이후의 도수 현상에서 더욱 많은 공기 유입이 발생되고 있음을 알 수 있다. 공기주머니는 자유낙하 nappe와 nappe impact에 공기를 공급함으로써 공기 유입의 촉매 역할을 하고 있다.

표면류의 경우 계단 끝단에서 공기가 유입되고, 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동에 의해 많은 공기가 유입되고 있다. 그러나 공기 유입은 잠입류의 경우에 비해 상대적으로 작다.

표면류에서 와류는 계단 하부로 내려갈수록 발달되며, 이후 잠입류로 바뀌는 과정을 거치게 된다. 표면류에서 와류의 형상을 자세히 관찰하면 그림 19 및 20과 같다.

그림 19는 와류가 발달 중인 과정에 놓여있는 상태로서 그림 18의 표면류 영역의 계단 상단부에 해당된다. 와류는 계단 안쪽에서 흐름의 분리에 의해 2~3개정도 발생되는데, 완전한 와류가 형성되기 전에는 시계 방향의 큰 와류 및 반시계 방향의 작은 와류가 나타난다. 이들 와류는 시간에 따라 없어지기도 하고 다시 생겨나는 불안정한 모습을 보이고 있다. 계단 끝단에는 흐름의 분리에 의해 공기가 유입되는 모습도 나타난다. 그러나 공기 유입은 그다지 활발하지 않다.

불안정한 와류는 그림 20과 같이 완전한 한 개의 큰

와류가 형성되면서 안정된 상태로 된다. 이는 그림 18의 표면류 영역의 계단 하단부에 해당된다. 계단 끝단에는 흐름의 분리에 의해 공기가 유입되고 있으며, 불안정한 와류 상태에 비해 공기 유입은 비교적 활발히 발생되고 있다. 전반적으로 볼 때 표면류 영역에서의 공기 유입은 잠입류의 경우에 비해 상대적으로 작다.

그림 21과 22는 각각 흐름의 유속과 Froude수에 대한 산소전달 효율(E_{20})과의 관계를 나타내고 있다.

상기 결과를 검토하면 산소전달 효율은 잠입류의 경우 Fr수 및 유속에 반비례하며 표면류의 경우 비례하고 있는데, 이는 공기 주머니의 영향으로 판단된다. 즉, 잠입류의 경우 공기 주머니가 형성되면서 많은 공기 유입 효과가 발생되다가, 천이 흐름에서 공기 주머니의 영역이 줄어들다가 표면류로 바뀌면서 공기 주머니가 없어지기 때문이다. 표면류 흐름에서 산소전달 효율은 Fr수 및 유속에 비례하고 있는데, 이는 그림 19와 20에서 언급하였듯이 불안정한 와류와 안정된 와류에서의 공기 유입 영향으로 판단된다.

공기 유입에 의한 산소전달 효율은 잠입류에서 E_{20} 이 0.30 이상으로 표면류보다 큰데 이는 앞서 언급한 바와 같이 계단 안쪽에 공기 주머니와 자유낙하 nappe이 형성되기 때문이다. 공기 유입은 계단 끝단에서 시작되고 자유낙하 nappe에서 많은 공기가 유입되며, nappe가 계단 바닥에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 공기가 더욱 많이 유입되고 있기 때문이다.

전반적으로 보면 계단형 보의 경우 E_{20} 이 0.20 이상으로 비교적 공기 유입 효과가 뛰어나다고 할 수 있다.

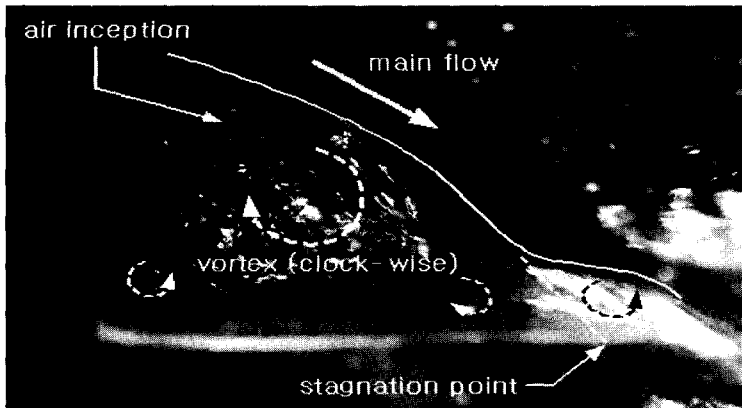


그림 19. 발달 중인 vortex

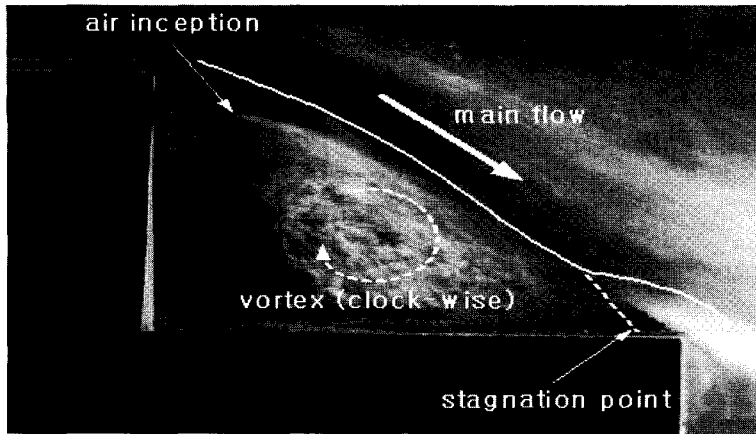


그림 20. 완전히 발달된 vortex

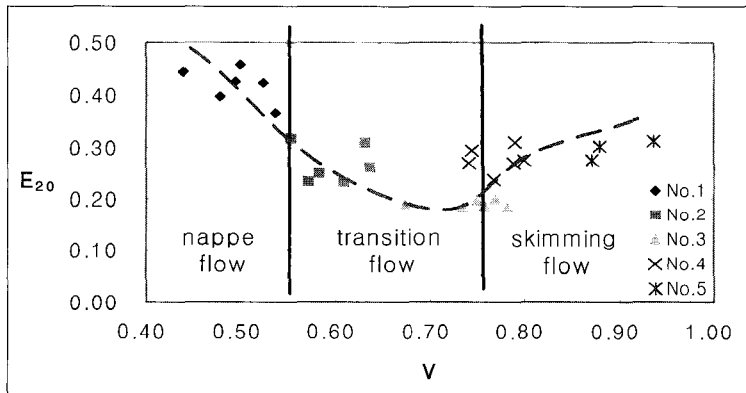


그림 21. 흐름의 유속과 산소전달 효율과의 관계

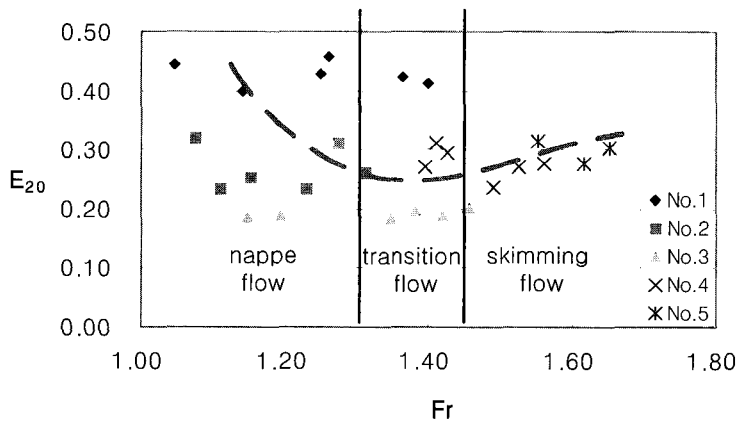


그림 22. Froude수와 산소전달 효율과의 관계

7. 결 론

본 연구에서는 보 설치에 따른 수질 악화를 개선시키기 위한 방안으로서의 공기 유입을 수리학적인 방법으로 분석하는 데 있다. 이를 위해 하천에 설치된 보의 형태로서 계단형 보와 레버린스 보 및 배사문 보의 세 종류를 선정하여, 보의 상·하류에서 용존산소량을 측정함으로써 보의 형태 및 수리량에 따른 공기 유입 능력에 대해 조사하였으며 수질개선에 효율적인 보의 형태를 선정하였다. 선정된 보의 형태를 실험실 수리실험을 통해 보 월류시 어떠한 흐름 특성 하에서 어떤 과정을 거쳐 공기유입이 이루어지는지 수리학적으로 규명하였다. 연구 결과 다음과 같은 사항을 얻을 수 있었다.

- (1) 산소전달 효율은 계단형 보와 레버린스 보가 효율적이며, 배사문 보는 산소전달 효율이 그다지 크지 않았다. 특히 계단형 보의 경우 E20이 평균 0.20 이상으로 산소전달 효율이 크며, 계단수가 많을수록 상대적으로 효율이 높았다.
- (2) 산소전달 효율은 흐름의 유속, Froude 수, 유량 순으로 상관 관계를 나타내었으며 특히 흐름의 유속과 산소전달 효율에서 높은 관계를 나타내었다.
- (3) 계단형 보의 월류 흐름은 수리실험 결과 유량이 작을 경우 계단 전 구간에 걸쳐 잠입류가 발생하고, 유량 증가에 따라 잠입류와 표면류가 공존하며 이 경우 계단 상부에서 표면류 및 계단 하부에서는 잠입류가 발생하였다.
- (4) 잠입류의 경우 계단 끝단에는 흐름이 분리되면서 자유낙하 nappe이 형성되고 계단 안쪽에는 공기 주머니가 생기는데, 이 같은 현상으로 계단 끝단에서 공기 유입이 시작되고 자유낙하 nappe에서 많은 공기가 유입되며, nappe impact와 이후의 도수 현상으로 더욱 많은 공기 유입이 발생되었다.
- (5) 표면류의 경우 계단 끝단에서 공기 유입이 시작되고, 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동에 의해 많은 공기가 유입되지만 공기 유입은 잠입류의 경우에 비해 상대적으로 작았다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 중앙대학교의 학술연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 유대영, 김성태, 우효섭(2001). “보의 형태에 따른 재폭기 효율 비교.” *한국수자원학회 학술발표회 논문집*, Vol.2, pp.807-812.
- ASCE Task Committee on Gas Transfer at Hydraulic Structures(1991). “Gas transfer at hydraulic structures.” *Proceedings of 2nd international symposium on gas transfer at water surface*, Reston, VA pp.460-493.
- Chanson, H.(1996). *Air bubble entrainment in free-surface turbulent flows*. Academic Press, pp.154-155.
- Gulliver, J.S., Thene, J.R., and Rindels, A.J.(1990). “Indexing gas transfer in self-aerated flows.” *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 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*, ASCE, Vol.124, No.7, pp.664-665.
- Henry, T.(1985). *Air-water flow in hydraulic structures*. A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph, 41, pp.251-285.
- Toombes, L., and Chanson, H.(2000). “Air-water flow and gas transfer at aeration cascades.” *Proceedings of the international workshop on hydraulics of stepped spillways*, Zurich, Switzerland, pp.77-84.
- Urban, A.K., Hettiarachchi, S.L., Miller, K.F., Kincaid, G.P., and Gulliver, J.S.(2001). “Field experiments of gas transfer at gated sills.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.127, No.10, pp.848-859.
- Wormleaton, P.R., and Tsang, C.C.(2000). “Aeration performance of rectangular platform labyrinth weirs.” *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.119, No.2, pp.220-243.

(논문번호:03-75/접수:2003.09.19/심사완료:2003.10.23)