

# 계단형 보의 공기유입과 산소전달에 영향을 미치는 월류 흐름의 수리학적 영향 분석\*

김 진 홍\*\*

## Hydraulic Effects of Overflow Type on Air Entrainment and Oxygen Transfer at Stepped Weir\*

Jin-Hong Kim\*\*

**요약** : 도시 하천의 수위 유지를 목적으로 설치된 보의 흐름을 정체시킴으로써 수질악화의 주요 원인이 된다. 따라서 흐름의 보 월류시 공기유입 효율을 높여 용존산소를 증가시킴으로써 수질개선을 유도할 수 있는 방안을 고려하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 계단형 보의 월류흐름 특성에 따른 공기유입 과정과 산소전달 효과를 수리실험을 통해 검토하였다. 월류흐름은 유량, 계단높이에 따라 낙하류와 표면류로 구분되었다. 유량이 작거나 계단 높이가 클 경우 전 구간에 걸쳐 낙하류가 발생하고, 유량 증가 및 계단 높이가 작을수록 표면류가 나타나는 양상을 보였다. 낙하류의 경우 계단 끝단에서 흐름의 자유낙하 수맥이 형성되고, 계단 안쪽에는 공기주머니가 생기며 이 때 자유낙하 흐름은 사류를 형성하였다. 표면류의 경우 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동이 발생하였으며, 낙하류와는 달리 도수 현상은 발생되지 않았다. 낙하류에서의 공기 유입은 표면류의 경우보다 더욱 왕성하게 유입되었다. 낙하류 흐름에서는 유량이 증가할수록 산소전달 효과가 증가하였으며, 표면류 흐름으로 바뀌어 갈수록 산소전달 효과는 감소되는 것을 알 수 있는데, 이는 공기유입 효과 때문인 것으로서, 낙하류의 경우 계단 끝단, 자유 낙하, nappe impact 및 도수 현상에 의해 공기가 유입되며, 계단 안쪽에 형성된 공기주머니 역시 공기유입에 지대한 영향을 미치는데 반하여, 표면류의 경우 공기유입에 영향을 미치는 변수는 계단 끝단과 수표면 진동뿐이기 때문이다. 연구 결과 계단형 보의 도심하천의 폭기 및 산소전달에 효율적이며, 이를 통해 하천의 수질개선에 기여할 수 있음이 밝혀졌다.

**주제어** : 계단형 보, 공기유입, 산소전달, 낙하류, 표면류

**ABSTRACT** : Weir which is installed to raise the water level for water intake makes the deterioration of the water quality by the interception and storage of the river flow. Thus, it is necessary to improve the water quality by increasing oxygen transfer through air entrainment when the water flows the weir. The stepped weirs may be one typical example. This paper examines the air entrainment and the efficiency of oxygen transfer by the overflow characteristics of the stepped weir through the hydraulic experiments. Nappe flow occurs at low flow rates and for relatively large step height. Dominant flow features include an enclosed air pocket, a free-falling nappe impact and subsequent hydraulic jump on the downstream step. Air entrainment occurs from the step edge, but most air is entrained through a free-falling nappe impact and hydraulic jump. Air pocket also has an important

\* 본 논문은 2004년도 중앙대학교의 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

\*\* 중앙대학교 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chung-Ang University)

role in the air entrainment. As the flow velocity and Froude number increases, flow condition changes from a nappe flow to a skimming flow. At larger flow rates, skimming flow occurs with formation of recirculating vortices between the main flow and the step corners. Oxygen transfer becomes smaller in the region of skimming flow but becomes larger in the region of nappe flow since the air entrainment is made mainly through a free-falling nappe impact, a hydraulic jump and an air pocket. The stepped weir was found to be efficient for water treatment associated with substantial air entrainment and oxygen transfer.

**Key Words** : stepped weir, air entrainment, oxygen transfer, nappe flow, skimming flow

## I. 서론

도시 하천의 수위 유지를 목적으로 설치된 보의 흐름을 정체시킴으로써 수질악화의 주요 원인이 된다. 따라서 흐름의 보 월류시 공기유입 효율을 높여 용존산소를 증가시킴으로써 수질개선을 유도할 수 있는 방안을 고려하는 것이 바람직하다.

흐름은 보를 월류할 때 공기가 물속으로 전달되는 유입 및 폭기 효과를 갖게 되며 이 과정에서 공기 중의 산소가 물에 용해되어 용존산소가 증가한다. 보를 포함한 수리 구조물에서 공기의 수중으로의 유입은 수표면 또는 수체 내에서의 난류 혼합, 수체에 포획된 기포로 인한 물-공기 계면 면적의 증가 등에 의해 주로 영향을 받는다(ASCE Task Committee, 1991).

보에서의 공기 유입은 유량이나 유속 등의 수리적 조건에 영향을 받지만, 보의 종류에 따라서 차이를 보인다. 만약 공기유입 효율이 높은 형태의 보를 설치하면, 주어진 같은 수리조건에서 효율이 낮은 보에 비해 수질개선에 도움이 될 것이다. 많은 연구자들에 의해 다양한 보에서의 공기유입 효과를 검토한 사례는 Wilhelms et. al.(1993)과 Gulliver et. al.(1998)에 의해 정리되었다. 이들은 보의 형태로서 크게 자유월류 보, 여수로형 보 및

수중 턱으로 분류하고 여수로형 보를 수문이 있는 경우와 없는 경우로 구분하였다. Tsang(1987)은 실험 연구를 통하여 래버린스 보의 공기유입을 규명하였고, Wormleaton and Soufiani(1998)과 Wormleaton and Tsang(2000)은 각각 삼각형과 사각형의 래버린스 보의 공기유입 효율에 관한 연구결과를 발표함으로써, 보의 월류 길이가 증가되고 월류수의 흐름이 서로 충돌되면서 공기유입 효과가 직선형의 보에 비해 증가한다는 사실을 발표하였다.

국내에서는 김태원(1997)이 보에서의 공기유입 현상을 다루었으며, 조영준·권순국(1999)은 하천에서의 공기유입을 다루었지만 보를 대상으로 공기유입을 검토하지는 않았다. 래버린스 보에 대해서는 조원철 외(1988)이 월류량 증대 효율에 관한 수리 특성을 검토하였다. 김진홍 외(2003)는 하천 현지조사와 수리실험을 통해 보의 여러 형태에 따른 공기유입을 수리학적으로 검토하고, 계단형 보의 공기유입 효과가 제일 높음을 제시하였다. 그는 보의 형태로서 계단형 4단보, 계단형 2단보, 래버린스 보 및 배사문 보를 선정하고 보의 상·하류에서 용존산소량을 측정함으로써 단수가 많은 계단형 보의 공기유입의 높은 효과를 증명하였다.

계단형 보의 공기유입은 Toombes and Chanson (2000)에 의하여 검토된 바 있다. 계단형 보는 충분한 공기유입에 따른 강한 난류혼합으로 공기 중의 산소전달, 탈질 및 휘발성유기물 제거에 효율적임이 입증되었으며, 따라서 오염되고 부영양화된 하천에 설치되고 있다.

한편 계단형 보는 흐름의 에너지를 감세시키는데 효율적인 구조물로서 많은 연구자들이 월류흐름 특성과 관련지어 에너지 감세 효과를 검토하였다(Chanson, 1998; Fratino and Piccinini, 2000; Ohtsu and Yasuda, 1997). 그들에 의하면, 낙하류에서의 에너지 감세는 주로 자유 낙하, 낙하에 의한 충격 및 연이은 도수에 의해 발생되며, 표면류에서 에너지 감세는 주로 계단 안쪽에 형성되는 와류와 수표면의 진동에 의해 발생된다고 하였다.

상기 사항을 종합해 보면, 계단형 보는 충분한 공기 유입을 통한 폭기 및 산소전달 효과를 지니며, 에너지 감세에도 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한 공기 유입에 따른 산소 전달과 에너지 감세는 상관성을 갖게 될 것이라는 예측이 가능하다. 앞서 언급한 바와 같이, 에너지 감세 효과가 월류흐름 특성과 관련된다면, 공기 유입 또한 월류흐름 특성과 상관성을 갖게 될 것이다. 그러나 계단형 보의 월류흐름 특성에 따른 공기유입 과정을 검토한 예는 아직 없는 실정이다.

본 연구에서는 계단형 보의 월류흐름 특성에 따른 공기유입 과정과 산소전달 효과를 수리실험을 통해 검토하였다. 계단형 보의 형태를 적정 규모로 실험실에서 재현시켜, 수리실험을 통해 유량 변화와 계단 높이에 따라 달리 나타나는 각 흐름 특성을 조사하고, 흐름 특성별 공기유입 과정을 분석하며, 보의 상·하류에서 용존산소량을 측정함으로써 공기유입에 따른 산소전달 효과에 대해 조사하였다.

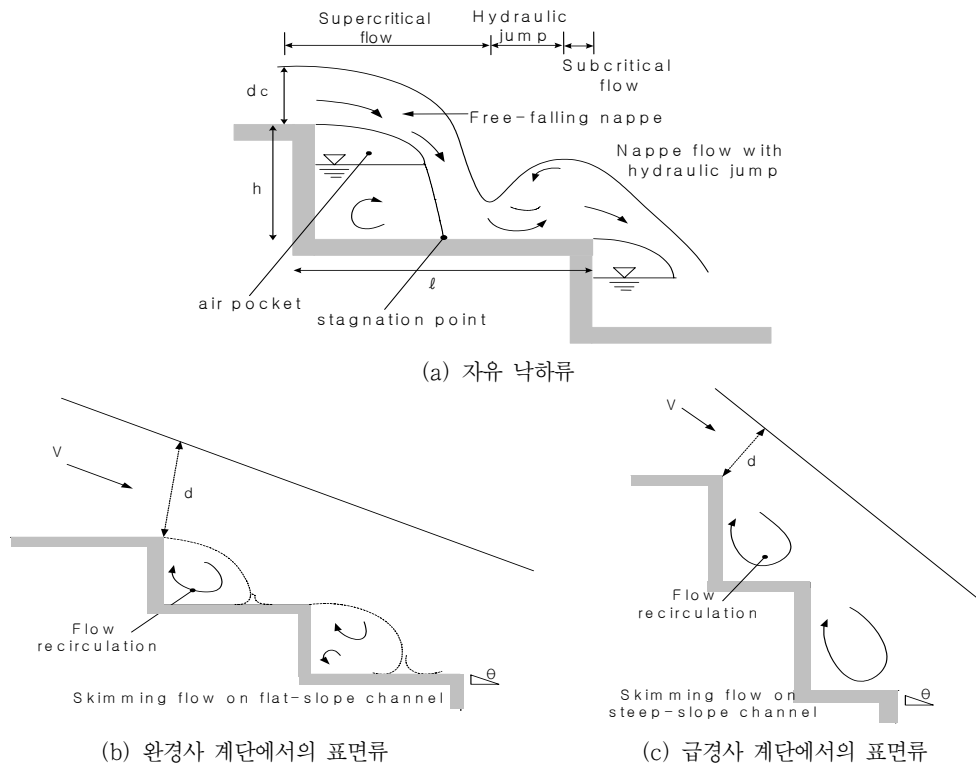
## II. 계단형 보의 월류 흐름, 공기 유입 및 산소 전달

일반적으로 계단형 보를 월류하는 흐름은 유량 및 계단 형상에 따라 아래 그림과 같이 도수를 동반한 자유 낙하류, 환경사 계단에서의 표면류 및 급경사 계단에서의 표면류로 구분된다(Chanson, 1993).

낙하류는 유량이 비교적 작거나 계단 경사가 완만할 때 발생된다. 흐름은 계단 끝단에서 자유 낙하 수맥이 형성되고 계단 안쪽에는 공기 영역이 형성되며, 이 때 자유낙하 흐름은 사류를 형성한다. 사류 흐름은 수맥이 계단에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 상류 흐름으로 바뀌게 된다. 이 흐름은 하부 계단에서 도수를 발생시키면서 상류로 변환되어 에너지를 감세시키고 도수 발생지점 부근에서 폭기에 따른 산소전달을 가져오며, 끝단 부근에서 다시 한계류를 거쳐 사류를 발생시키는 반복현상을 나타낸다.

표면류는 유량이 많거나 급경사일 경우 발생되며, 상부 계단에서 자유표면이 명확하게 나타난다. 표면류의 경우 계단 끝단에는 낙하류와 달리 흐름의 분리현상으로 인해 와류가 발생된다. 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동이 발생되며 도수 현상은 나타나지 않는다. 일반적으로 표면류 흐름의 진행에 따라 난류 경계층이 나타나며, 이 경계층이 수표면에 도달되는 지점에서 공기유입이 발생된다(Chanson, 1998).

천이류의 흐름은 낙하류에서 표면류로 바뀌는 과정에서 나타나며, 이들 흐름은 시간과 공간에 따라 변하는 불안정한 모습을 나타낸다. Fratino and Piccinini(2000)에 의하면 천이류의 영역은 흐름의 복잡한 현상 관계로 명확한 구분이 안 되며, 대략  $k/h=0.5\sim1.2$ 로 예측되고 있다. 여기서,  $k$ 는



〈그림 1〉 낙하류와 표면류 (Chanson, 1993)

계단형 보의 월류 수심,  $h$ 는 보의 계단 높이를 나타내며 이는 다시 실험 결과에서 언급될 것이다.

보에서 용존산소(Dissolved Oxygen, DO) 증가 효율을 나타내기 위해서 무차원화된 산소전달 효율( $E$ )이 사용된다.  $E$ 를 구하는 식은 다음과 같다(Gameson, 1957).

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

여기서  $C_s$ ,  $C_u$ ,  $C_d$ 는 각각 용존산소의 포화 농도 및 보의 상, 하류에서의 용존산소 농도로 정의된다.  $r$ 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 공기유입 효과가 크다는 뜻이다.

한편 산소전달 효율은 온도에 따라 달라지므로 일반적으로 20℃를 참고온도로 하여 보정한 무차원화된 산소전달효율( $E_{20}$ )을 사용한다.  $E_{20}$ 을 구하는 식은 다음과 같다(Gulliver et al., 1998).

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

$E_T$  와  $E_{20}$ 은 각각 온도  $T$ 와 20℃에서의 산소전달 효율이고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상수로서 각각  $\alpha = 0.02103 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\beta = 8.621 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ 이다.

산소전달 효율은 0에서 1까지의 값을 가지며 전혀 공기유입이 일어나지 않으면 0이고, 보를 월류한 이후 포화농도가 되면 1의 값을 가지게 된다.

### III. 수리실험 및 측정

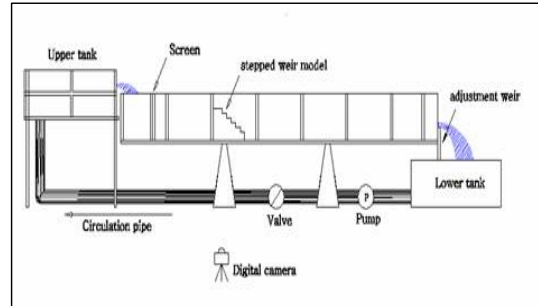
실내 수리실험은 개수로 실험실에서 수행되었다. 현지 하천에 설치된 계단형 보의 자료를 바탕으로 실험실에서 계단형 보의 형태와 수리 조건 등을 적정 축척으로 재현시켜 보를 월류하는 흐름의 특성을 조사하였다. 개수로 실험시설의 규모는 길이 12m, 폭 0.4m, 높이 0.4m이고, 계단형 보 모델은 길이 0.54m, 폭 0.4m, 높이 0.312m, 경사 30°이다. <그림 2>는 개수로 실험시설이며, 그림 3은 개수로 실험시설 내부에 설치한 보 모델을 나타낸다.

실험실에서 재현시킨 보 상, 하류의 용존산소와 월류 유속, 월류 수심을 측정하였다. 용존 산소의 측정 지점은 각각 보 상, 하류의 좌안, 우안 및 중앙부 지점으로서 측정치의 일관성을 갖기 위해 상류 2m와 하류 3m 지점에서 측정하였다. 그러나 개수로의 폭이 0.4m로서 비교적 작은 만큼 측정치의 큰 변동은 고려하지 않았다.

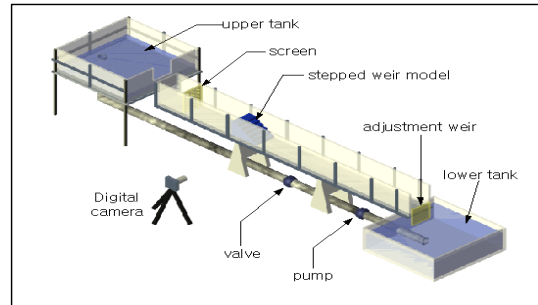
용존산소는 YSI-550 DO Meter를 이용하였으며, 실험실 수로의 흐름은 반복 순환되므로 흐름 내의 용존산소 농도는 일반 하천의 용존산소 농도에 비해 상대적으로 높으며 산소전달 효율은 일반 하천에 비해 낮아질 수 있다. 따라서 산소전달 효율 측정의 신뢰도를 향상시키기 위하여 아황산나트륨( $Na_2SO_3$ ) 용액을 개수로 내의 물에 첨가하여 초기 용존산소 농도를 저하시킴으로써 실험의 모든 경우에 초기 용존산소 농도의 포화 용존산소에 대한 부족비를 20% 이상으로 유지하였다.

유속은 2차원 유향 유속계(MI-ECM4), 수심은 개수로 측벽에 부착된 투명 플라스틱 scale로 측정하되, 측정의 정확도를 높이기 위해 point gauge도 병행 이용하였다. 산소전달 효율과 수리 특성과의 상관관계를 구하기 위해 보의 폭을 측정하고 월류 수심과 유속을 측정하여 단위 폭당 유량과

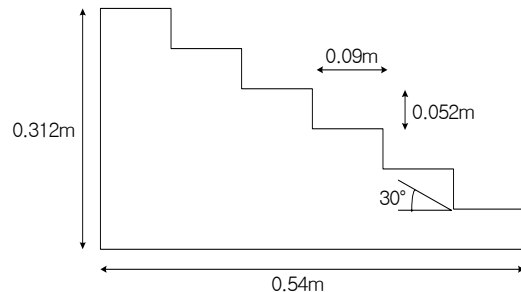
Froude수를 구하였다.



<그림 2> 개수로 실험시설(단면도)



<그림 3> 개수로 실험시설(입체도)



<그림 4> 보 모델 측면도

흐름 현상과 공기 유입을 명확히 나타내기 위해 디지털카메라로 촬영하고 암실에서 photoshop 후보정 작업을 실시하였다. 조정에서 흑백변환을 통해 칼라 사진일 때 보다 색을 단순화시켰으며, Auto Level과 Auto Contrast를 통해 검정, 회색 및 흰색의 음영을 조절하였다. 선명 효과를 줌으로써 노이즈를 약간 살려 거친 느낌의 물의 흐름을 표현하였고, 흐름의 움직임을 표현하기 위해

노출시간을 4초로 길게 조정하였다. 물의 흐름을 표현하되 선명한 물방울을 나타내기 위해 조리개 (f)수치를 8.0으로 높여 촬영하였으며, 초점 문제는 흐름이 있는 유체라는 점을 감안해 AF(자동초점)가 아닌 MF(수동초점)로 직접 조정하였다.

#### IV. 실험 결과

##### 1. 월류 흐름

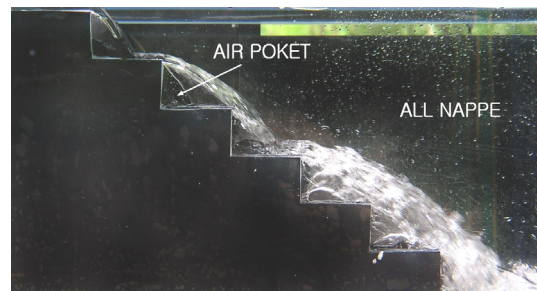
월류흐름은 유량, 월류수심 및 계단높이에 따라 낙하류와 표면류로 구분되었다. 유량이 작거나 계단 높이가 틀 경우 전 구간에 걸쳐 낙하류가 발생하고, 유량 증가 및 계단 높이가 작을수록 낙하류와 표면류가 공존하는 천이류의 모습을 보이다가, 표면류가 나타나는 양상을 보였다.

낙하류의 경우 <그림 5>에 나타나듯이 계단 끝단에서 흐름의 자유낙하 수맥이 형성되고, 계단 안쪽에는 공기주머니가 생기며 이 때 자유낙하 흐름은 사류를 형성하였다. 사류 흐름은 수맥이 계단 바닥에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 상류 흐름으로 바뀌었다. 도수는 계단을 내려가면서 크게 발생하는 곳과 작게 발생하는 구간이 생성되는데 이는 크게 발생한 도수 부분의 흐름은 다음 계단을 거치지 않고 그 아래의 다른 계단까지 바로 넘어가기도 하며, 큰 도수 이후의 바로 밑의 계단은 유량의 감소로 작은 도수가 발생되었다. 이와 관련하여 큰 도수가 발생하는 계단에서는 유량이 풍부하여 공기주머니의 크기가 작으며, 작은 도수가 발생하는 계단에서는 유량이 적어 공기주머니가 크게 나타났다.

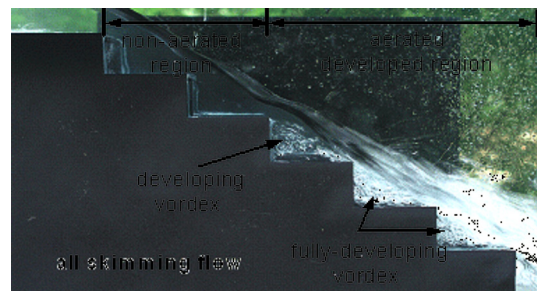
표면류의 경우 <그림 6>과 같이 계단 끝단에는 낙하류와 달리 흐름의 분리현상으로 인해 와류가 발생하였다. 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐

르는 과정에서 수표면의 진동이 발생하였으며, 낙하류와는 달리 도수 현상은 발생되지 않았다.

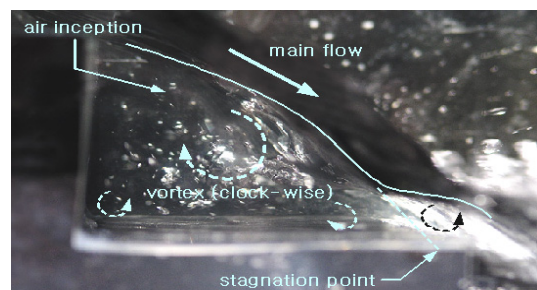
<그림 7>은 와류가 발달 중인 과정에 놓여있는 상태로서 <그림 6>의 표면류 영역의 계단 상단부에 해당된다. 와류는 계단 안쪽에서 흐름의 분리에 의해 2~3개정도 발생되는데, 완전한 와류가 형성되기 전에는 시계 방향의 큰 와류 및 반시계 방향의 작은 와류가 나타난다. 이들 와류는 시간에 따라 없어지기도 하고 다시 생겨나는 불안정한 모습을 보이고 있다. 계단 끝단에는 흐름의 분리에 의해 공기가 유입되는 모습도 나타난다. 그러나 공기 유입은 그다지 활발하지 않다.



<그림 5> 낙하류



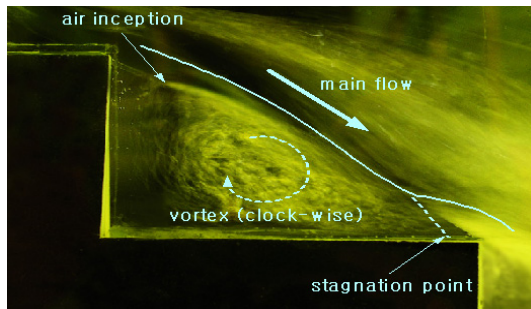
<그림 6> 표면류



<그림 7> 발달 중인 와류



불안정한 와류는 <그림 8>과 같이 완전한 한 개의 큰 와류가 형성되면서 안정된 상태로 된다. 이는 <그림 6>의 표면류 영역의 계단 하단부에 해당된다. 계단 끝단에는 흐름의 분리에 의해 공기가 유입되고 있으며, 불안정한 와류 상태에 비해 공기 유입은 비교적 활발히 발생되고 있다.



<그림 8> 완전히 발달된 와류

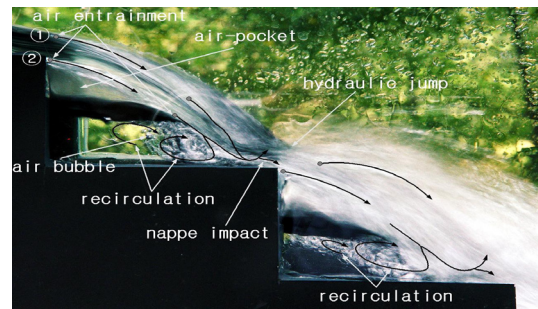
천이류에서의 흐름은 낙하류와 표면류가 공존하며, 이들 흐름은 시간과 공간에 따라 변하는 불안정한 모습을 나타내었다. 아래 그림은 계단 상부에서 표면류가, 하부에서는 낙하류가 발생하는 천이류의 모습을 나타내고 있다. 그러나 이들 흐름의 위치는 시간에 따라 변하기도 하였다.



<그림 9> 천이류 흐름

## 2. 흐름 특성에 따른 공기 유입의 생성 및 발달 경로

낙하류의 경우 공기유입 과정은 아래 그림에서 나타나듯이 두 가지 경로를 통해 발생하였다. 즉, <그림 10>의 ①에서 나타나듯이 흐름 상부 계단 끝단의 영향에 따른 상부 수면의 상향 치우침에 의한 공기 유입이 발생되고 있다. 또한 <그림 10>의 ②에서와 같이 계단 끝단의 각(step edge)에 의한 하부 흐름의 분리에 따른 공기 유입도 발생되고 있다.



<그림 10> 낙하류의 공기유입 생성 및 발달

전자의 경우, 공기 유입은 표면류보다 작지만, 둘째의 경우의 공기 유입은 표면류보다 크다. 이는 각 계단 사이의 안쪽 코너에서 공기 주머니가 형성되면서 흐름은 자유제트가 되고, 공기 주머니로부터 많은 양의 공기를 유입시켜 주기 때문이다.

공기 유입은 흐름이 계단 바닥을 부딪히고(nappe impact) 연이은 도수로 인해 더욱 증가된다. Gulliver et al.(1998)은 도수로 인한 공기 유입으로 발생한 기포가 수 mm 크기로 분할되는데 이 같은 기포로 발생하는 공기와 물의 접촉면적 증가가 산소전달의 중요한 요소가 된다고 하였다. 생성된 기포는 주 흐름 밑의 공기주머니 내부에서 소규모의 재순환 와류에 포함된다.

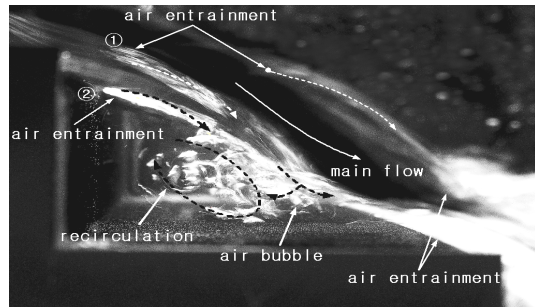
상, 하부 흐름에서 유입된 공기는 계단 상부에서는 혼합되지 않고 별도로 하부로 이동한다. 혼합되지 않는 공기는 하부 계단에서 도수에 의해 완전 혼합되면서, 공기유입은 흐름의 전단면에 걸쳐 왕성하게 유입된다.

표면류의 경우 공기 유입은 낙하류의 경우와 마찬가지로, <그림 11>에서 나타나듯이 두 가지 경로를 통해 발생하였다. 즉, <그림 11>의 ①에서 나타나듯이 계단 끝단에서 상부 수면의 상향 치우침에 의한 공기가 유입된다. 이때 자유수면의 진동에 의해 교란된 수면을 통해 공기가 수중으로 유입되며 작은 기포로 분리된다. 공기 유입은 또한 <그림 11>의 ②와 같이 계단 끝단의 각(step edge)에 의한 하부 흐름의 분리에 따라 발생된다. 이 같은 공기 유입은 흐름이 계단 바닥을 부딪히면서(jet impact) 증가된다. 그러나 jet impact에 의한 공기 유입은 낙하류에서의 nappe impact에 의한 공기 유입보다는 작다. 흐름이 계단 바닥에 부딪히면서 기포가 생성되고, 생성된 기포는 주 흐름 밑의 계단 안쪽 코너에서 재순환 와류로 변환된다.

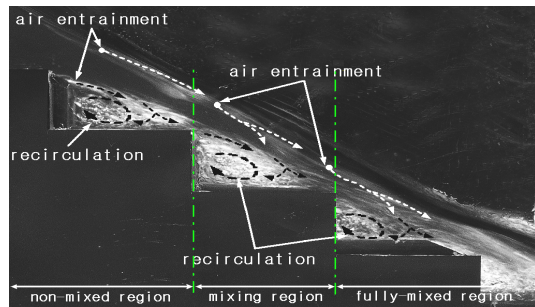
상, 하부 흐름에서 유입된 공기는 <그림 12>에서와 같이 계단 상부에서는 혼합되지 않고 각각 하류로 이동되며(non-mixed region), 혼합되지 않는 공기는 하부 계단으로 진입되면서 서서히 혼합되다(mixing region), 최종적으로 완전 혼합되면서 공기유입은 흐름의 전단면에 걸쳐 왕성하게 유입된다(fully-mixed region).

일반적으로 낙하류에서의 공기 유입은 표면류의 경우보다 더욱 왕성하게 유입되고 있다. 이는 낙하류에서 공기유입은 계단 끝단, 자유 낙하, nappe impact 및 도수 현상에 의해 유입되며, 계단 안쪽에 형성된 공기주머니 역시 공기유입에 지대한 영향을 미치는데 반하여, 표면류의 경우 공

기유입에 영향을 미치는 변수로서 계단 끝단 및 수표면 진동뿐이기 때문이다.



<그림 11> 표면류의 공기유입 생성 및 발달



<그림 12> 유입된 공기의 혼합 과정

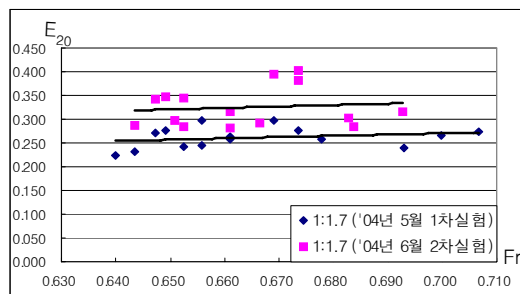
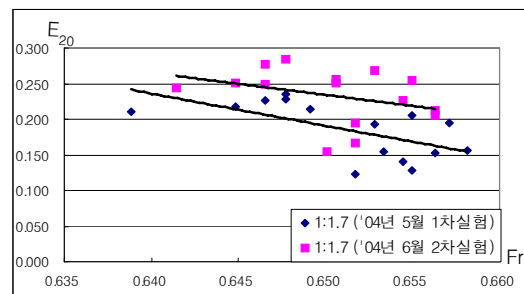
### 3. 공기 유입과 산소전달 효과

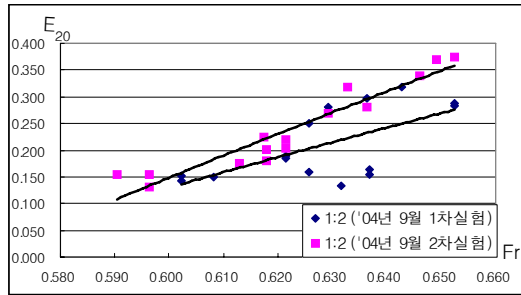
<표 1>은 흐름의 수리 특성과 산소전달 측정 결과이며, <그림 13~16>은 계단 경사가 각각 1:2.0과 1:1.7인 경우 낙하류와 표면류에 대한 Fr수와 산소전달 효율과의 관계를 나타내고 있다. 여기서,  $E_{20}$ 은 식 (2)에 제시된 산소전달 효율이며, Q는 유량, V는 보의 월류 유속, k는 월류 수심, h는 계단 높이를 나타낸다.



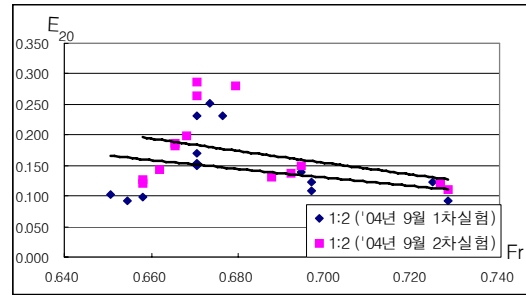
〈표 1〉 흐름의 수리 특성과 산소전달 측정 결과

Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$E_{20}$ (-)	V ( $\text{m/s}$ )	Fr (-)	k (m)	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$E_{20}$ (-)	V ( $\text{m/s}$ )	Fr (-)	k (m)
0.0028	0.218	0.322	0.693	0.022	0.0028	0.252	0.325	0.694	0.022
0.0028	0.244	0.328	0.707	0.022	0.0029	0.288	0.319	0.686	0.022
0.0029	0.208	0.325	0.700	0.022	0.0029	0.256	0.319	0.686	0.022
0.0034	0.244	0.331	0.656	0.026	0.0035	0.281	0.334	0.661	0.026
0.0035	0.257	0.334	0.661	0.026	0.0035	0.292	0.337	0.666	0.026
0.0035	0.264	0.334	0.661	0.026	0.0035	0.317	0.334	0.661	0.026
0.0042	0.259	0.362	0.678	0.029	0.0042	0.380	0.359	0.673	0.029
0.0042	0.276	0.359	0.673	0.029	0.0042	0.403	0.359	0.673	0.029
0.0041	0.298	0.357	0.669	0.029	0.0041	0.394	0.357	0.669	0.029
0.0049	0.272	0.368	0.647	0.033	0.0049	0.343	0.368	0.647	0.033
0.0048	0.231	0.366	0.644	0.033	0.0049	0.297	0.370	0.651	0.033
0.0048	0.223	0.364	0.640	0.033	0.0048	0.287	0.366	0.644	0.033
0.0056	0.296	0.390	0.656	0.036	0.0056	0.346	0.388	0.652	0.036
0.0056	0.242	0.388	0.652	0.036	0.0056	0.284	0.388	0.652	0.036
0.0056	0.277	0.386	0.649	0.036	0.0056	0.348	0.386	0.649	0.036
0.0063	0.229	0.401	0.648	0.039	0.0063	0.257	0.402	0.651	0.039
0.0062	0.218	0.399	0.645	0.039	0.0062	0.251	0.399	0.645	0.039
0.0063	0.235	0.401	0.648	0.039	0.0063	0.285	0.401	0.648	0.039
0.0070	0.214	0.417	0.649	0.042	0.0070	0.249	0.415	0.647	0.042
0.0069	0.211	0.410	0.639	0.042	0.0069	0.244	0.412	0.641	0.042
0.0070	0.227	0.415	0.647	0.042	0.0070	0.277	0.415	0.647	0.042
0.0084	0.206	0.445	0.655	0.047	0.0084	0.254	0.445	0.655	0.047
0.0083	0.193	0.443	0.653	0.047	0.0083	0.250	0.442	0.651	0.047
0.0084	0.194	0.446	0.657	0.047	0.0083	0.269	0.443	0.653	0.047
0.0098	0.156	0.470	0.658	0.052	0.0098	0.205	0.469	0.656	0.052
0.0098	0.152	0.469	0.656	0.052	0.0097	0.225	0.467	0.654	0.052
0.0097	0.140	0.467	0.654	0.052	0.0098	0.212	0.469	0.656	0.052
0.0111	0.123	0.487	0.652	0.057	0.0111	0.155	0.486	0.650	0.057
0.0112	0.128	0.490	0.655	0.057	0.0111	0.167	0.487	0.652	0.057
0.0111	0.154	0.489	0.653	0.057	0.0111	0.195	0.487	0.652	0.057

〈그림 13〉 Fr수와  $E_{20}$ 의 관계(낙하류, 경사:1.7)〈그림 14〉 Fr수와  $E_{20}$ 의 관계(표면류, 경사:1.7)



〈그림 15〉 Fr수와  $E_{20}$ 의 관계(낙하류, 경사:2.0)



〈그림 16〉 Fr수와  $E_{20}$ 의 관계(표면류, 경사:2.0)

Fr수는 다음 식으로 표현된다.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gk}} \quad (3)$$

V와 k는 이미 앞 절에서 언급되었고, g는 중력 가속도를 나타낸다.

상기 결과를 검토하면, 산소전달 효과는 낙하류의 경우 Fr수의 증가에 비례하며 표면류의 경우 반비례함을 알 수 있는데, 이는 공기 주머니와 도수의 영향으로 판단된다. 즉, 낙하류의 경우 공기 주머니와 도수가 형성되면서 많은 공기유입이 발생되다가, 천이영역에서 이들 영역이 줄어들며, 표면류로 바뀌면서 영역이 없어지기 때문이다.

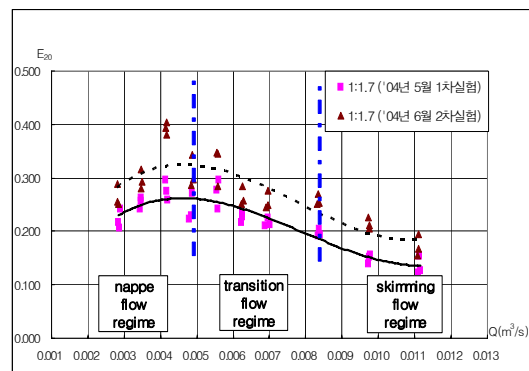
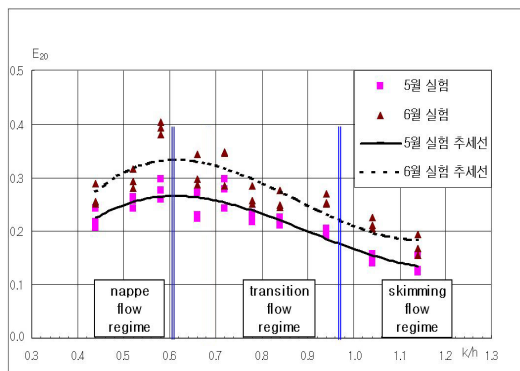
〈그림 17〉은 월류 흐름에 따른 공기유입과 산소전달 효과를 나타내고 있다. 실험은 5월과 6월

에 걸쳐 수회 실험한 결과이다.

월류 흐름은 k/h 및 유량이 작으면 낙하류, k/h 및 유량이 커짐에 따라 천이류를 거쳐 표면류를 나타내고 있음을 알 수 있다. 천이류의 영역은 흐름의 복잡한 현상관계로 명확한 구분이 안 되며, 본 연구의 경우 k/h=0.60~0.96정도로써 Fratino and Piccini(2000)가 제시한 영역 k/h=0.5~1.2 내에 들고 있다.

산소전달 효율은 대체적으로 5월에 비해 6월 실험 측정치가 높게 나타나고 있다. 이는 수온 20℃를 기준으로 산정된 값이지만, 기온과도 관련성이 있음을 시사하고 있다. 산소전달 효율과 기온과의 상관성은 추후 계속 연구할 필요가 있는 것으로 판단된다.

낙하류 흐름에서는 k/h 및 유량이 증가할수록



〈그림 17〉 월류 흐름에 따른 공기유입과 산소전달 효과

산소전달 효과가 증가하며, 낙하류와 표면류가 공존하는 천이류 및 표면류 흐름으로 바뀌어 갈수록 산소전달 효과는 감소되는 것을 알 수 있는데, 이는 상기 4장 2절에서 언급하였듯이 공기유입 효과 때문인 것으로 판단된다. 즉, 낙하류에서 공기유입은 계단 끝단, 자유 낙하, nappe impact 및 도수 현상에 의해 공기가 유입되며, 계단 안쪽에 형성된 공기주머니 역시 공기유입에 지대한 영향을 미치는데 반하여, 표면류의 경우 공기유입에 영향을 미치는 변수로서 계단 끝단과 수표면 진동뿐이기 때문이다.

## V. 결론

본 연구에서는 계단형 보의 월류흐름 특성에 따른 공기유입 과정과 산소전달 효과를 수리실험을 통해 검토하였다. 월류흐름은 유량, 월류수심 및 계단높이에 따라 낙하류와 표면류로 구분되었다. 유량이 작거나 계단 높이가 클 경우 전 구간에 걸쳐 낙하류가 발생하고, 유량 증가 및 계단 높이가 작을수록 낙하류와 표면류가 공존하는 천이류의 모습을 보이다가, 표면류가 나타나는 양상을 보였다.

낙하류의 월류흐름 특성은, 계단 끝단에서 흐름의 자유낙하 수맥이 형성되고 계단 안쪽에는 공기주머니가 생기며 이 때 자유낙하 흐름은 사류를 형성하였다. 사류 흐름은 수맥이 계단 바닥에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 상류 흐름으로 바뀌었다. 표면류의 흐름특성의 경우 계단 끝단에는 낙하류와 달리 흐름의 분리현상으로 인해 와류가 발생하였다. 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동이 발생하였으며, 낙하류와는 달리 도수 현상은 발생되지 않았다.

낙하류의 공기유입 과정은, 흐름 상부 계단 끝단의 영향에 따른 상부 수면의 상향 치우침과 계단 끝단의 각에 의한 하부 흐름 분리의 두가지 과정을 거쳐 발생되었다. 전자의 경우, 공기 유입은 표면류보다 작지만, 둘째의 경우의 공기 유입은 표면류보다 컸다. 공기 유입은 흐름이 계단 바닥을 부딪히고 연이은 도수로 인해 더욱 증가되었다.

표면류의 공기유입 과정은 낙하류의 경우와 마찬가지로, 계단 끝단에서 상부 수면의 상향 치우침 및 계단 끝단의 각에 의한 하부 흐름의 분리에 따라 발생되었다. 또한 자유수면의 진동에 의해 교란된 수면을 통해 공기가 수중으로 유입되며 작은 기포로 분리되었다.

산소 전달은 낙하류 흐름에서는 유량에 비례하여 증가하였으며, 낙하류와 표면류가 공존하는 천이류 및 표면류 흐름으로 바뀌어 갈수록 산소전달 효과는 감소되는 것을 알 수 있는데, 이는 공기유입 효과 때문인 것으로, 낙하류에서 공기유입은 계단 끝단, 자유 낙하, nappe impact 및 도수 현상에 의해 유입되며, 계단 안쪽에 형성된 공기주머니 역시 공기유입에 지대한 영향을 미치는데 반하여, 표면류의 경우 공기유입에 영향을 미치는 변수로서 계단 끝단과 수표면 진동뿐이기 때문이다.

본 연구를 통해 계단형 보의 도심하천의 폭기 및 산소전달에 효율적이며, 이를 통해 하천의 수질개선을 유도할 수 있음이 밝혀졌다.

추후 도심하천의 폭기 및 산소전달에 효율적인 계단형 보의 적정 설계를 위해서는 보의 여러 형태, 즉 다양한 경사와 계단 높이 및 월류 흐름을 가진 다수의 보를 상대로 현지 및 수리실험을 거쳐 계단형 보의 적정 형태 개발이 가능할 것이다. 본 연구에서는 보의 경사를 1:2.0과 1:1.7의 두 가지 경우로만 실험하였지만, 효율적인 계단형 보의 적정 형태를 개발하기 위해서 보의 다양한 형태를

대상으로 좀더 많은 실험이 요구된다.

이 같은 계단형 보의 적정 형태가 개발되면, 이는 기존에 설치된 고정보에 적용이 가능할 것이다. 즉, 기존 고정보의 하류 부분을 계단형으로 비교적 쉽게 변형시킴으로써 폭기 및 산소전달 효과를 이룰 수 있다.

## 참고문헌

- 김진홍 · 심명필 · 최계운 · 오종민, 2003, “하천 보의 형태에 따른 공기유입의 수리학적 검토”, 『한국수자원학회논문집』, 제36권 제6호, 971~984.
- 김태원, 1997, 『수리구조물에서 용존산소 부족비를 추정식의 개발』, 서울대학교 박사학위논문.
- 조영준 · 권순국, 1990, “Modified gas tracer를 이용한 하천 재폭기 계수의 산정”, 『한국농공학회지』, 제41권 제4호, 57~65.
- 조원철 · 이원환 · 최태훈, 1988, “댐 월류량 증대를 위한 Labrinth Weir의 수리특성에 관한 실험적 연구”, 『한국수자원학회 학술발표회 논문집』, 57.
- ASCE Task Committee on Gas Transfer at Hydraulic Structure, 1991, “Gas Transfer at Hydraulic Structure”, *Air-Water Mass Transfer, Proceedings of 2nd International Symposium on Gas Transfer at Water Surface*, Reston, VA, 460~493.
- Chanson, H., 1993, “Self-aerated flows on chute and spillways”, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 119(2): 220~243.
- \_\_\_\_\_, 1998, “Reviews of studies on channel flows”, *Workshop on Flow Characteristics around Hydraulic Structures and River Environment*, 2~6.
- Fratino, U. and Piccinni, A. F., 2000, “Dissipation efficiency of stepped spillways”, *Proceedings of the 9th International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, 103~110.
- Gameson, A. L. H., 1957, “Weir and the aeration of rivers”, *Journal of Institution of Water Engineering*, 11(5): 477~490.
- Gulliver, J. S., Thene, J. R. and Rindels, A. J., 1998, “Indexing gas transfer in self-aerated flows”, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 116(3): 503~523.
- Henry, T., 1985, *Air-water flow in hydraulic structures*, A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph, 41.
- Ohtsu I. O. and Yasuda Y., 1997, “Characteristics of Flow Conditions on Stepped Channels”, *Proceedings of 27th IAHR Biannual Congress*, San Francisco, USA, Theme D, 583~588.
- Thornton, C. I., Robeson, M. D., Bitner C. J. and Lipscomb C. M., 2002, *A-Jacks low drop grade control structure design*, Project Report, Engineering Research Center, Colorado State University, 25~87.
- Toombes, L. and Chanson, H., 2000, “Air-water flow and gas transfer at aeration cascades: A comparative study of smooth and stepped chutes”, *Proceedings of the 9th International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, 77~84.
- Tsang, C. C., 1987, *Hydraulic and Aeration Performance of Laybrinth Weirs*, Ph.D. Thesis, University of London, London, UK.
- 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.
- Wormleaton, P. R. and Soufiani, E., 1998, “Aeration Performance of Triangular Platform Laybrinth Weirs”, *Journal of Environmental Engineering*, 124(8): 709~719.
- Wormleaton, P. R. and Tang, C. C., 2000, “Aeration Performance of Rectangular Platform Laybrinth Weirs”, *Journal of Environmental Engineering*, 126(5): 456~465.

원 고 접 수 일 : 2007년 2월 22일  
1차심사완료일 : 2007년 3월 14일  
최종원고채택일 : 2007년 3월 22일