

# 낙차공의 에너지 감세 효과 검토

김진홍\* · 우효섭\*\*

## 1. 서론

하상안정을 목적으로 설치되는 낙차공은 하류단 형상을 계단형을 취함으로써 에너지 감세를 도모할 수 있다. 일반적으로 낙차공을 월류하는 흐름은 낙하 흐름과 표면 흐름으로 구분된다. 낙하 흐름은 유량이 비교적 작을 때 발생된다. 이 흐름은 상부계단 끝단 부근에서 한계류를 발생시키면서 이어서 사류를 형성시키고 하부계단의 중간지점에 낙하된다. 이 흐름은 하부계단의 중간지점 하류 부에서 도수를 발생시키면서 상류로 변환되어 에너지를 감세시키고 도수 발생지점 부근에서 폭기에 따른 산소전달을 가져오며, 계단 끝단 부근에서 다시 한계류를 발생시키는 반복현상을 나타낸다.

표면흐름은 유량이 많거나 급경사일 경우 발생되며, 상부계단에서 자유표면이 명확하게 나타난다. 일반적으로 표면류 흐름의 진행에 따라 난류 경계층이 나타나며, 이 경계층이 수표면에 도달되는 지점에서 공기유입과 산소전달이 발생된다.

본 연구에서는 계단형 낙차공의 월류 흐름에 따른 에너지 감세의 기본 이론을 검토하고, 수리실험을 통해 이를 비교, 검토하는 것으로 하였다.

## 2. 낙차공의 흐름 및 에너지 감세 효과

계단형 낙차공을 월류하는 흐름은 계단형 보의 월류흐름과 동일하며, 일반적으로 유량 및 계단 형상에 따라 아래 그림과 같이 도수를 동반한 자유낙하 흐름(nappe flow), 수평상 계단에서의 표면 흐름(skimming flow) 및 급경사 계단에서의 표면 흐름으로 구분된다 (Chanson, 1998).

Nappe flow는 계단 끝단(trailing edge)에는 흐름의 자유낙하(free-falling) nappe이 형성되고 계단 안쪽에는 air pocket가 생기며 이 때 자유낙하 흐름은 사류를 형성한다. 사류 흐름은 nappe가 계단에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 상류 흐름으로 바뀌게 된다.

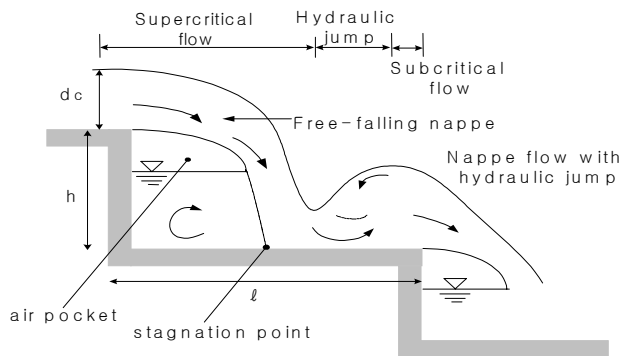


그림 1. 도수를 동반한 자유낙하 흐름

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

\*\*우효섭 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 031-9100-554(E-mail:hswoo@kict.re.kr)

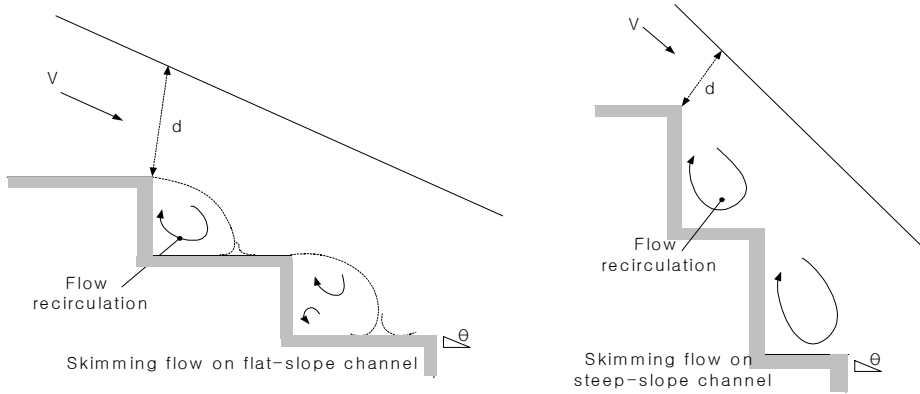


그림 2. 수평상 계단에서의 표면 흐름 및 급경사 계단에서의 표면 흐름

Skimming flow의 경우 계단 끝단에는 nappe flow와 달리 흐름의 분리현상으로 인해 와류가 발생된다. 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동이 발생되며 도수 현상은 나타나지 않는다.

Nappe flow에서의 에너지 감세는 주로 자유낙하, 낙하에 의한 충격 및 연이은 도수에 의해 발생되며 에너지 감세식은 다음과 같이 표시된다 (Fratino and Piccini, 2000).

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{H_{\text{res}}}{H_{\max}} = 1 - \frac{\lambda + 0.5\lambda^{-2}}{\frac{H_{\text{drop}}}{k} + 1.5} \quad \lambda = \frac{\sqrt{2}}{1.06 + \sqrt{h/k + 1.5}}$$

(1)

여기서,  $H_{\max}$ 은 최대수두,  $H_{\text{res}}$ 은 낙차공 하류부의 총수두,  $H_{\text{drop}}$ 은 낙차공의 높이,  $k$ 는 월류 한계수심 및  $h$ 는 계단의 높이(낙차고)를 나타낸다. 일반적으로 에너지감세는 낙차고에 비례하고 월류수심에 반비례하며, 계단 경사와는 큰 관련성은 없는 것으로 알려져 있다 (Fratino and Piccini, 2000).

Skimming flow에서 에너지 감세는 주로 계단 안쪽에 형성되는 와류(vortex)와 수표면의 진동에 의해 발생되며, 에너지 감세식은 다음과 같이 표시된다 (Fratino and Piccini, 2000).

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{[\frac{f}{8\sin\alpha}]^{1/3}\cos\alpha + 0.5[\frac{f}{8\sin\alpha}]^{-2/3}}{\frac{H_{\text{drop}}}{k} + 1.5}, \quad \frac{f = 8g\sin\alpha d^2 R}{q^2 \cdot 4} \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 낙차공 계단의 경사,  $d$ 는 낙차공 상부의 흐름을 등류로 가정하였을 때의 수심,  $R$ 은 경심,  $q$ 는 단위폭당 유량,  $f$ 는 마찰계수로서 월류흐름의 폭기상태를 나타낸다.

에너지감세는 nappe flow의 경우와 마찬가지로 낙차고에 비례하고 월류수심에 반비례하며, 계단 경사와는 큰 관련성은 없는 것으로 알려져 있다 (Fratino and Piccini, 2000).

### 3. 수리실험

에너지감세에 대한 수리실험은 실내 개수로에서 수행되었다. 개수로의 규모는 길이 12m, 폭 0.4m, 높이 0.8m이고, 낙차공 모델 제작하여 실험수로 내부에 설치하였다. 본 실험에서는 유량별로 1:2, 1:1.7, 1:1.5 1:1.2, 1:0.7의 총 5개의 경사에 대해 실험을 실시하였다. Skimming flow가 발생될 것이라 예상되었던 1:0.7 경사의 경우 경사에 비해 개수로 실험실 여건상 계단 수가 5개 밖에 되지 않아 skimming flow 재현에 실패하여 실험 조건에서 제외하였다.

아래 그림은 개수로 실험장치를 나타내고 있다. 유속은 2차원 전기유속계(Model 801 EM Flow Meter)를 이용하였으며, 기포혼입 상태를 조사하기 위해 개수로 실험장치의 측면에서 사진촬영을 실시하였다. 이때 개수로 실험장치의 측면유리를 통해 사진촬영시 반사가 될 수 있으므로 반대 편에 흑색종이를 붙이는 것이 바람직하다.

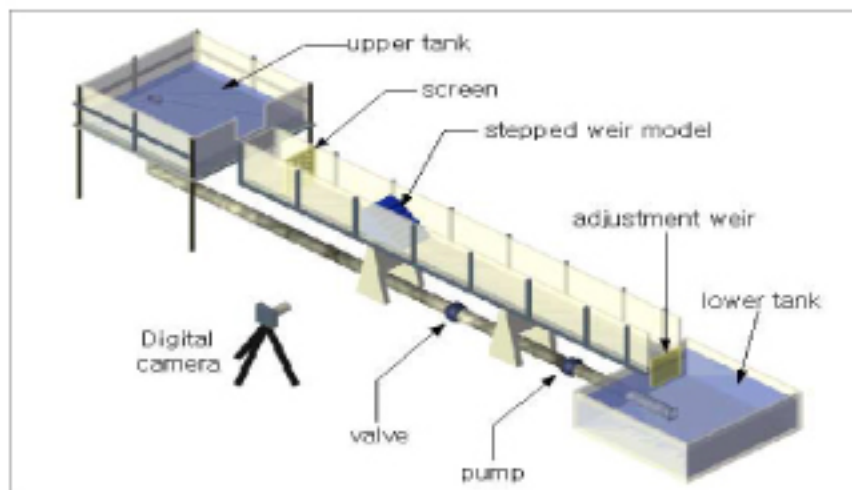
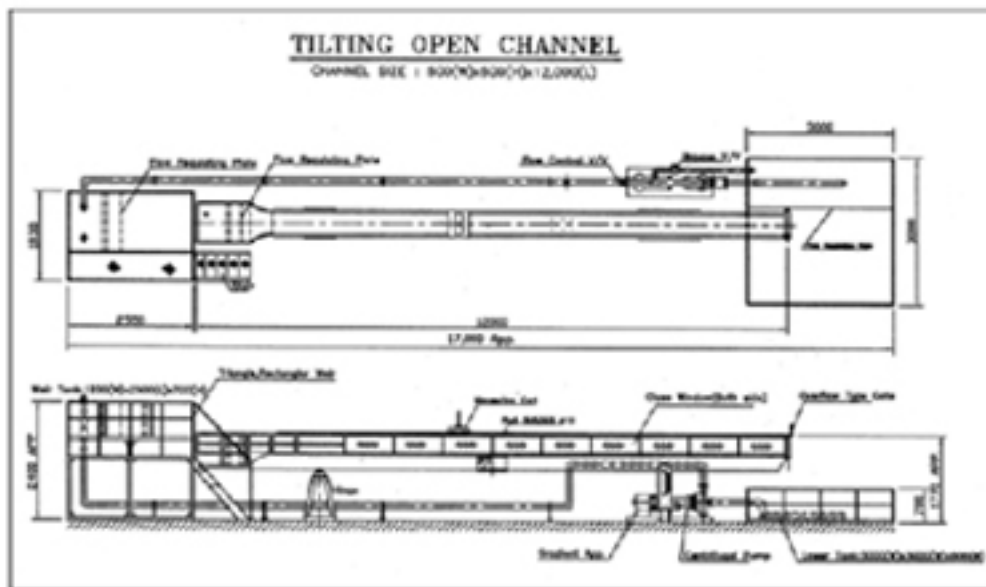


그림 3. 실험 장치

#### 4. 실험 결과

낙차공을 율류하는 흐름은 유량 및 계단 형상에 따라 표면류(skimming flow)와 낙하류(nappe flow)로 구분된다 (Chanson, 1993). 낙하류의 경우 계단 끝단(trailing edge)에서 흐름의 자유낙하(free-falling) nappe이 형성되었다. 계단 안쪽에는 공기 주머니가 생기며 이 때 자유낙하 흐름은 사류를 형성하였고, 사류 흐름은 nappe가 계단에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 상류 흐름으로 바뀌는 현상을 나타내었다.

표면류의 경우 계단 끝단에는 낙하류와 달리 흐름의 분리현상(flow separation)으로 인해 와류(vortex)가 발생되었으며, 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동이 발생되었으나 도수 현상은 발생되지 않았다.

유량이 작은 경우 계단 전 구간에 걸쳐 낙하류가 발생하고, 유량 증가에 따라 낙하류와 표면류가 공존하며, 이 경우 계단 상부에서 표면류가, 하부에서는 낙하류가 발생하였다.

표면류에서 와류의 형상을 보면, 와류는 계단 안쪽에서 흐름의 분리에 의해 2~3개정도 발생하였으며 완전

한 와류가 형성되기 전에는 시계방향의 큰 와류 및 반시계 방향의 작은 와류가 나타나다가 결국에는 완전한 개의 큰 와류로 형성되었다.

그림 4는 낙하류에서의 에너지감세에 대한 이론식과 실험치의 결과를 나타내고 있다.

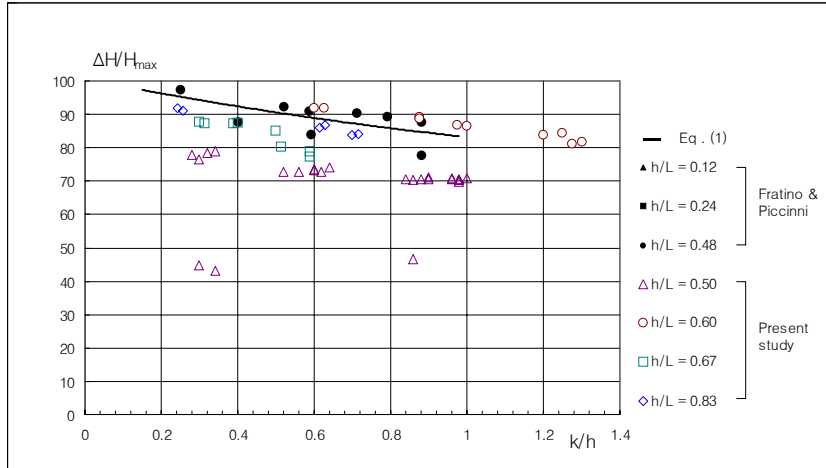


그림 4. 낙하류에서의 에너지감세 효과

실험결과 에너지감세는 낙차고에 비례하고 월류수심에 반비례하며, 계단 경사와는 큰 관련성은 없는 것으로 나타난다. 실험결과는 이론치에 근접하나 이론치보다 약간 하향치를 나타내고 있다. 또한 본 실험의 결과는 Fratino와 Piccinini의 실험결과와 비슷하나, 계단경사 0.50의 경우 낮게 나타나는 경향을 보였다. 이는 도수 발생의 시간 간격이 다른 경우에 비해 길기 때문인 것으로 판단되나, 추후 실험자료를 보완하여 원인을 규명하여야 할 것이다.

그림 5는 표면류에서의 에너지 감세에 대한 이론치와 실험치를 비교한 것이다.

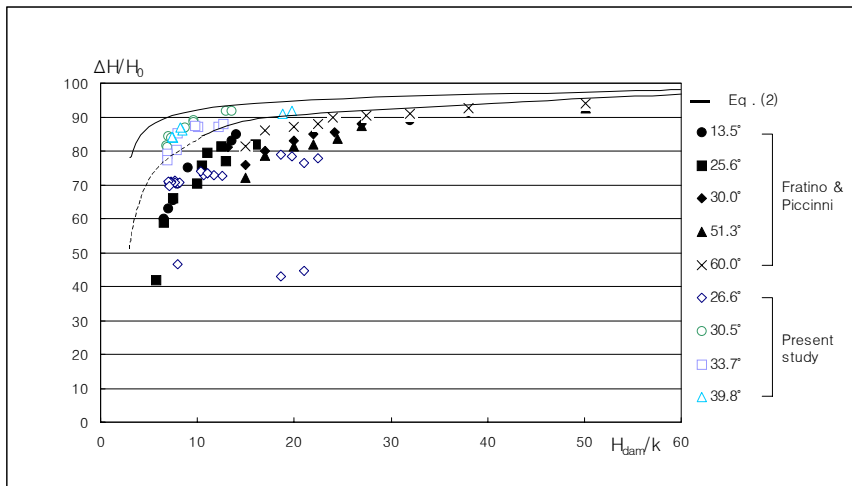


그림 5. 표면류에서의 에너지감세 효과

그림 5에서 이론식은  $\alpha = 6^\circ, 60^\circ$ 의 두가지 경우이며 실험치는 이론식의  $\alpha = 6^\circ$ 에 근접하고 있다. 에너지감세는 낙차고에 비례하고 월류수심에 반비례하며 계단 경사와는 큰 관련성은 없는데, 이는 낙하류의 경우와 유사하다.

실험결과는 이론치에 근접하나 약간 하향치를 나타내는 경향이 있다. 또한 본 실험의 결과는 계단 경사

26.6°인 경우 일부 결과치를 제외하고 Fratino와 Piccinini의 실험결과와 비슷하게 나타나고 있는데, 이는 도수 발생의 시간 간격이 원인인 것으로 판단된다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 계단형 낙차공의 월류 흐름에 따른 에너지 감세의 기본 이론을 검토하고, 수리실험을 통해 이를 비교, 검토하였다.

낙차공을 월류하는 흐름은 유량 및 계단 형상에 따라 표면류와 낙하류로 구분되었다. 유량이 작을 경우 계단 전 구간에 걸쳐 낙하류가 발생하고, 유량 증가에 따라 낙하류와 표면류가 공존하며, 이 경우 계단 상부에서 표면류가, 하부에서는 낙하류가 발생하였다.

낙하류의 경우 계단 끝단에서 흐름의 자유낙하 nappe이 형성되었다. 계단 안쪽에는 공기 주머니가 생기며 이 때 자유낙하 흐름은 사류를 형성하였고, 사류 흐름은 nappe가 계단에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 상류 흐름으로 바뀌는 현상을 나타내었다.

표면류의 경우 계단 끝단에는 낙하류와 달리 흐름의 분리현상으로 인해 와류가 발생되었으며, 흐름이 계단과 계단을 스쳐가듯이 흐르는 과정에서 수표면의 진동이 발생되었으나 도수 현상은 발생되지 않았다.

에너지감세는 낙하류와 표면류 모두 낙차고에 비례하고 월류수심에 반비례하며, 계단 경사와는 큰 관련성은 없는 것으로 나타났다. 본 실험의 결과는 Fratino와 Piccinini의 실험결과와 비슷하나, 계단경사 0.50의 경우 낮게 나타나는 경향을 보였다. 이는 도수 발생의 시간 간격이 다른 경우에 비해 길기 때문인 것으로 판단되나, 추후 실험자료를 보완하여 원인을 규명하여야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 환경기술개발 사업 '하천생태 기능복원을 위한 핵심기술 개발' 연구용역 결과의 일부로서, 지원해 주신 환경부에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 유대영, 김성태, 우효섭(2001). "보의 형태에 따른 제폭기 효율 비교", 한국수자원학회학술발표회논문집, Vol.2, pp.807-812.
2. Chanson, H.(1993). "Self-aerated flows on chute and spillways", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.119, No.2, pp.220-243.
3. Chanson, H(1998). "Reviews of studies on channel flows", Workshop on Flow Characteristics around Hydraulic Structures and River Environment, pp.2-6.
4. Fratino, F. and Piccini, A.F.(2000). "Dissipation efficiency of stepped spillway", Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, pp.103-110.
5. 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.
6. Henry, T.(1985), "Air-water flow in hydraulic structures", A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph, 41, pp.251~285.