

# 계단형 낙차공 하류 흐름변화에 대한 실험연구

## Experimental Study on Flow Change at Downstream of Stepped Drop Structure

여홍구\* / 강준구\*\* / 최남정\*\*\* / 김성중\*\*\*\*

Hong Koo Yeo, Joon Gu Kang, Nam Jeong Choi, Sung Jung Kim

### 요 지

본 연구에서는 환경사 계단형 낙차공에서 하류수심 변화에 따른 도수 형태의 변화와 WTF 흐름 특성에 대한 분석을 수행하였다. 일정한 유량에서 하류수위를 증가시키면 도수 형태가 달라지는데 특히 계단 끝단에서 완전도수, 잠김도수(B점프), downward curved jet, upward curved jet, wave type flow(WTF)가 차례로 나타났다. 잠김도수에서는 표면 롤러 현상이 관찰되었고 curved jet에서는 큰 유속 감세 없이 파가 하류까지 전달되었다. WTF에서는 사류흐름이 바닥 recirculation 구역의 영향으로 변형되면서 wave 형태의 도수를 발생시켰다. 하류수위를 점점 증가시키면 도수의 발생 위치가 계단 위쪽으로 이동하며 잠김도수와 WTF가 번갈아가며 발생하였다. 하류수위가 높아질수록 도수의 규모는 작아졌으며 표면 롤러도 미약해지는 경향을 보였다. 세 가지 유량조건에 따른 WTF의 규모를 비교한 결과 유량이 증가할수록 WTF의 크기가 증가하였으며 무차원화한 WTF의 형상은 거의 비슷한 것으로 나타났다.

계단형 낙차공은 기존낙차공에서 발생하는 도수와 달리 WTF가 발생되므로 이에 대한 분석이 필요하다. WTF가 발생하는 구간의 수위는 하류수위보다 높아지기 때문에 하천 설계 시 하천 접합부의 조건(구수부지설치, 제방설치 등)에 따라 wave의 높이가 설계의 중요 인자로 고려되어야 할 것이다. WTF는 지금까지의 계단형 낙차공 설계 시 고려되지 못한 부분으로서 차후에 계단형 구조물 또는 계단식 변형 구조물 설계 시 주요 자료로 활용 될 것이다.

**핵심용어:** 계단형 낙차공, wave type flow

### 1. 서 론

낙차공은 하천의 급경사 부분에 하상세굴 및 침식 방지 목적으로 설치하는 하천 구조물로서 일반적으로 콘크리트 구조물로 설계된다. 낙차공의 종류는 필요한 목적에 따라 다양한데 그 중 계단형 낙차공은 에너지 감쇄와 수질정화 측면에서 유용한 형태이다. 계단형상의 구조물은 급경사수로, 댐, 보와 낙차공에서 발생하는 사류의 에너지감쇄에 효과적이며(Chanson 2001, Yasuda 등 2001) 자유낙하 및 도수에 의해 폭기된 흐름은 수중 용존산소의 증대로 수질정화에도 도움이 된다. 따라서 계단형 구조물은 자연형 하천을 설계함에 있어 중요구조물로 제시되어 왔다. 하지만 실무에 적용하기 위한 계단형상 구조물(여수로, 낙차공 등)에 대한 설계가이드라인은 매우 한정적

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 책임연구원 E-mail : yeo917@kict.re.kr

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 선임연구원 E-mail : jgkang02@kict.re.kr

\*\*\* 비회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원 E-mail : njchoi@kict.re.kr

\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원 E-mail : jinx9482@kict.re.kr

이다.(Rovert M. Boes and Willi H. Hager) 또한 계단형 낙차공에 관한 기존 연구는 대부분 경사가 급한 여수로 형태에 대해 이루어졌다. 계단형 낙차공의 경우 급경사와 완경사를 정확히 구분하기는 어렵지만 경사의 차이에 따라 낙차공 하류의 흐름에 차이가 있다. 기존 낙차공(급경사, RCW 등)은 구조물이 대부분 급경사로 설계되어 구조물에서 강한 사류가 발생되고 이로 인해 구조물 하류에서 하류부 수위 조건에 따라 도수가 발생한다. 도수구간에서는 강한 표면 roller가 발생하는데 하류수위가 증가하면서 사류구간은 줄어들고 잠김도수가 발생한다. 이후로 도수구간의 roller는 점차적으로 감소하게 된다. 계단형 낙차공에서는 흐름이 월류하면서 자유낙하 흐름(nappe flow)과 표면 흐름(skimming flow)이 나타나며 끝단 부근에서는 하류 수위 조건에 따라 다양한 도수 형상을 보여준다. 계단형 낙차공의 경우 잠김도수가 발생한 후 기존 낙차공과 다른 형상의 흐름이 발생하는데 Rajaratnam 등(Rajaratnam 1977, Hager 1986, Ohtsu 1987, Kawagoshi 1990)은 이 흐름을 wave type flow(WTF)라 명하였다. WTF는 계단의 단차에 의해 바닥면에서 형성되는 recirculation에 의해 구조물 경사부에서 흐름이 낙차공 끝단에서 강한 수위상승을 발생시킨다. 이러한 wave type 흐름은 하류수위가 높아짐에 따라 낙차공 경사부에서도 발생하였다.

본 연구에서는 하류 수위 변화에 따라 계단형 낙차공의 하류부에서 어떠한 흐름변화가 나타나는지에 대하여 연구하였으며, 특히 계단형 낙차공에서 관찰할 수 있는 WTF의 특성을 검토하였다.

## 2. wave type flow의 흐름특성

계단형 낙차공에서의 흐름은 크게 자유낙하 흐름(nappe flow)과 표면 흐름(skimming flow)으로 나눌 수 있다. 자유낙하 흐름은 유량이 비교적 작거나 단차가 큰 경우에 잘 나타나며, 표면 흐름은 유량이 비교적 크거나 급경사에서 잘 나타난다. 자유낙하 흐름이나 표면 흐름 등으로 낙차공 상부에서 사류가 발생하면 하류 수위에 따라 다양한 도수가 발생한다. 계단형 낙차공의 경우 wave type flow(WTF)라고 불리는 특이한 흐름이 관찰된다. Rajaratnam 등(Rajaratnam 1977, Hager 1986, Ohtsu 1987, Kawagoshi 1990)의 여러 학자들이 WTF에 대하여 연구한바 있다. WTF는 계단의 단차에 의해 바닥면에서 형성되는 recirculation에 의해 구조물 경사부에서 흐름이 낙차공 끝단에서 강한 수위상승을 발생시킨다. 이와 같은 현상은 경사형 낙차공 하류에서의 현상과는 다르며 일반적으로 낙차공 하류부에 sill이 설치되었을 때 저면에 발생하는 ground roller로 인한 수면형의 상승과 흡사하다. 바닥 sill에 의한 수면형의 상승과 WTF의 예를 그림 1.에 나타내었다.



(a) 바닥 sill에 의한 수면형의 상승  
(Ohtzu et al. 1996)



(b) 계단 끝에서의 수면형의 상승

그림 1. 바닥 sill과 계단으로 인한 수면형 상승 비교

WTF는 완전 도수(classical jump)나 계단 끝에 발생하는 잠김도수(B점프, Moore and Morgan 1959)보다 특정 단면에서의 최고 유속의 감소율이 크며 이는 표면 제트의 곡선형상 때문인 것으로 분석하였다. 표면 제트가 위로 구부러지는 현상은 급격한 단차에 의한 back pressure 때문인 것으로 나타났다. 크기가 서로 다른 WTF일지라도  $x$ ,  $y$  방향으로 각각 wave의 정점의 계단 끝

에서부터의 거리, wave의 최고 높이로 무차원화 시키면 그 형상이 거의 비슷하였다. 또한 표면 제트가 하류 수표면에 풍덩 빠지면서 하상을 치고 진행할 때 최대 전단 응력은 잠김도수에 비하여 훨씬 작은 것으로 나타났다.

### 3. 수리모형실험

실험은 길이 20 m, 폭 0.6 m, 높이 0.8 m의 가변경사 직사각형 수로에서 수행하였다. 바닥은 철제이며 좌우 측벽은 강화 유리로 제작되어 실험 중 수면 형상이나 공기 방울의 거동 등을 육안으로 관찰하기에 용이하도록 하였다. 유속 측정은 3차원 전자기 유속계(VM1001RS, KENEK)와 1차원 유속계(VO1000, KENEK)를 이용하였으며 수위는 수위측정계(PH-355, KENEK)와 50 cm 자를 이용하였다. 계단형 낙차공에서의 흐름 및 도수 관측은 디지털 카메라를 이용하여 기록하였다. 환경사 계단형 낙차공 모형은 그림 2.에서와 같이 1 : 6의 경사를 가진 5단 낙차공으로서 각 단은 폭 0.3 m, 단차 0.04 m로 제작되었다. 유량은 0.019, 0.034, 0.049 m<sup>3</sup>/sec로 변화시켰고, 하류 수위는 0.149 m에서 0.323 m로 변화시켜 총 14가지 조건으로 실험을 수행하였다.



그림 2. 실험수로 전경

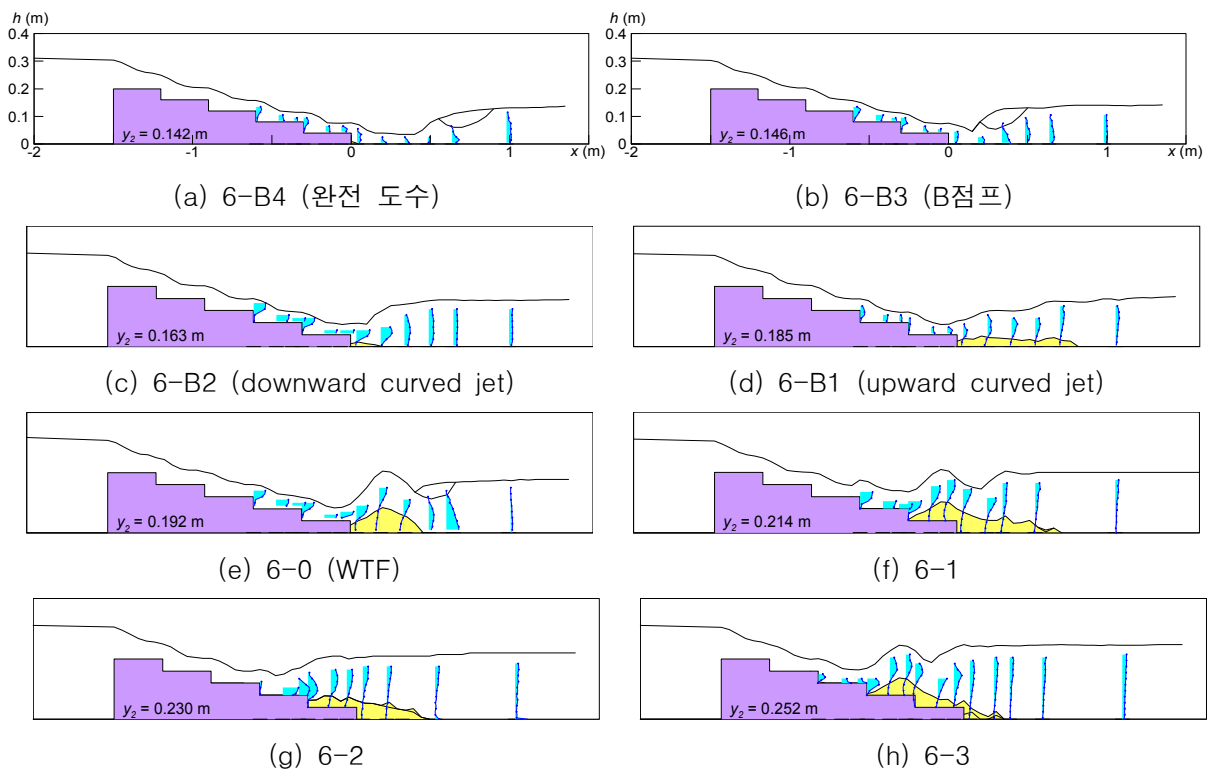


그림 3. 하류수위 변화에 따른 수면형과 유속분포의 변화 ( $Q=0.034$  cms,  $y_2 =$  하류수위)

### 4. 실험결과

유량이 0.034 m<sup>3</sup>/sec일 때 환경사 계단형 낙차공 하류에서 완전 도수를 발생시키고 하류 수위를 점점 높여가면서 도수의 형태와 발생 위치 변화, 유속과 수위변화 등의 흐름 특성을 관측하였

다. 하류수위 0.142 m의 조건에서 계단형 낙차공 끝단으로부터 0.5 m 정도 하류 지점에서 완전 도수가 발생하였다.(그림 3. (a)) 하류수위 0.146 m에는 단 위에서 발달한 사류가 단 끝에서 또는 단을 내려오자마자 도수를 일으키는 형태를 보여주었으며, 이는 급격한 낙차에서의 도수 형태를 분류한 Moore and Morgan(1959)이 정의한 B점프에 해당된다.(그림 3. (b)) 하류수위 0.163 m에서는 단 위에서 발달한 사류가 단 끝에서 아래쪽으로 구부러지는 제트로 연결되면서 도수를 일으키는 downward curved jet이 관찰되었다.(그림 3. (c)) 수심을 조금 높여 하류 0.185 m에서는 단 위의 사류가 단 끝에서 위쪽으로 살짝 들리는 제트로 연결되면서 도수를 일으키는 upward curved jet을 발생시켰다.(그림 3. (d)) curved jet 흐름은 도수 형태가 안정적이지 않고 멀리까지 전파되는 파상 형태의 흐름을 보여주었으며 최고 유속의 감세가 크지 않았다. 하류수위 0.192 m에서는 낙차공 끝단에서 WTF가 나타났다.(그림 3. (e)) 계단 끝에서 사류가 밀려 올라가면서 흐름이 파도 형태의 제트로 변형되면서 하류 수면으로 미끄러져 들어가는 WTF의 형상이 잘 나타났다. 그림 4.의 유속분포를 살펴보면 WTF의 경우 낙차공 하류에서 최고 유속의 분포가 수표면 쪽으로 발달하는데 이는 흐름이 바닥의 recirculation 구역의 영향으로 밀려 올라가기 때문이다. 흐름방향으로 음의 유속값을 보이는 구역의 경계를 선으로 표시하였는데, 바닥 부근과 수표면 부근의 음의 유속 주머니가 각각 바닥의 recirculation 구역과 표면의 롤러 구역의 규모를 알 수 있게 해주었다.

WTF의 발생 조건보다 하류수위  $y_2$ 를 더 올리면 도수의 발생 위치가 계단 위쪽으로 이동해 가는데 잠김도수와 WTF가 각 단에서 번갈아가며 발생하였다.(그림 3. (f)-(h)) 하류수위가 높아질수록 도수의 규모는 작아졌으며 표면 롤러도 미약해지는 양상을 보였다. 본 연구에서 수행한 수리실험은 환경사 계단형 낙차공에서 수행하였으므로 Froude 수가 2.03에서 2.34로 약한 사류를 형성하였다. 사류의 Froude 수가 상대적으로 작은 경우에는 도수가 강하게 발생하지 않기 때문에 표면 롤러가 잘 나타나지 않는 경향이 있다

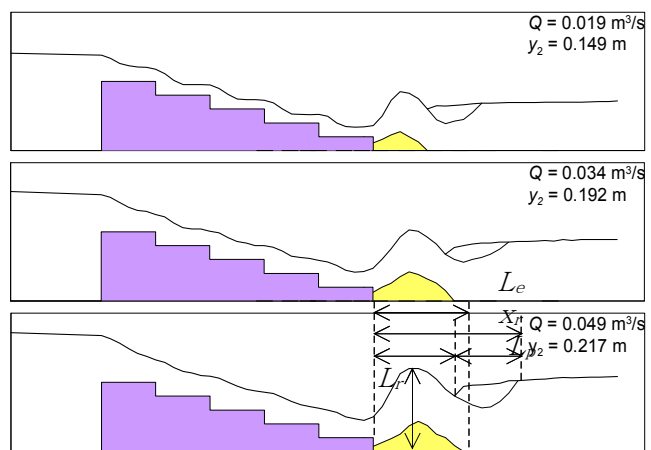
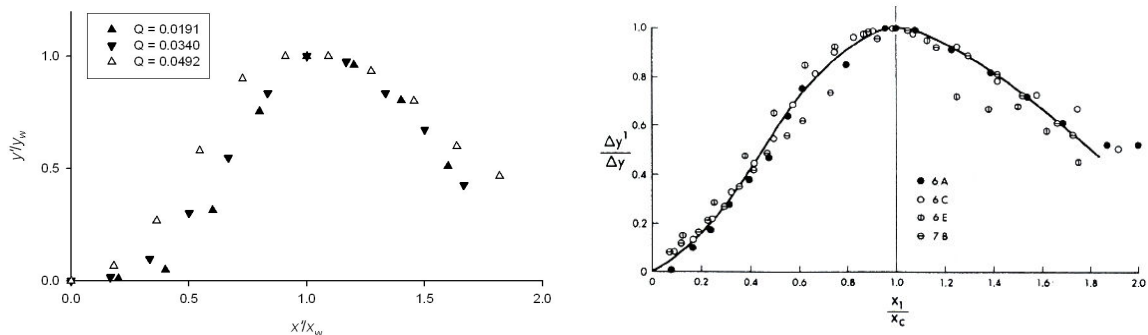


그림 4. 유량 변화에 따른 WTF의 규모

(Chow 1973). 본 실험에서도 하류수위가 높은 경우에는 표면 롤러 부근의 역유속 구간이 잘 관찰되지 않았다. 표면 롤러 구간이 형성되는 경우의 유속분포를 살펴보면 최고 유속은 바닥 쪽으로 발달하는 특징이 있었다. 그림 4.는 세 가지 유량조건에 따른 WTF의 규모를 비교한 것이다. 유량이 0.019 m<sup>3</sup>/s에서 0.034, 0.049 m<sup>3</sup>/s로 증가하면서 WTF의 규모가 커지는 것을 알 수 있었다. 유량이 증가할수록 wave 높이( $h_w$ )가 커지고 단 끝에서 plunging point까지의 거리( $L_p$ ), wave 후면에 발달하는 표면 롤러의 길이( $L_r$ ), 바닥 recirculation 구역의 길이( $L_e$ )가 증가하였다. 세 가지 실험 조건에서 wave의 높이는 하류수심보다 높았으며 적게는 1 cm에서 많게는 5 cm까지 차이가 났다. 계단형 낙차공 구조물에서 WTF로 인한 수위 상승은 설계 시 고려되어야 할 것이다. 따라서 추후에 다양한 단차와 유량 조건에 대하여 실험을 수행하면서 WTF의 wave 높이에 대한 정량적인 기준을 제시할 필요가 있다. 그림 5. (a)에는 WTF의 wave 규모를 무차원화하여 나타내었다.  $x'$ 은 단 위에서의 사류발생 지점으로부터의 하류방향 거리로 wave 정점까지의 거리  $x_w$ 로 무차원화하고, 사류수심으로부터의 수직방향 거리  $y'$ 은 사류수심으로부터의 wave 정점의 높이  $y_w$ 로 무차원화하였다. 이렇게 무차원화한 wave의 형상을 비교해본 결과, 서로 다른 실험조

건에서 발생시킨 WTF의 형상이 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 그림 4. (b)는 Rajaratnam& Ortiz(1977)의 연구결과로서 본 연구의 wave 형상이 이에 잘 들어맞는 것으로 보인다.



(a) 실험결과

(b) Rajaratnam&Ortiz(1977)

그림 5. wave의 단면 형상

## 5. 결론

본 연구에서는 완경사 계단형 낙차공에서 하류수심 변화에 따른 도수 형태의 변화와 WTF 흐름 특성에 대한 분석을 수행하였다. 고정된 유량에서 하류수위를 증가시키면서 완전도수, 잠김도수(B점프), downward curved jet, upward curved jet, WTF가 차례로 관측하였다. WTF에서는 흐름이 파도 형태로 구부러지면서 하류수위보다 높은 wave를 발생시켰다. WTF가 발생하는 구간의 최대수위는 하류수위가 높게 측정되었다. 하류수위가 높아질수록 도수의 발생 위치가 계단 위쪽으로 이동해 가면서 잠김도수와 WTF가 번갈아가며 발생하였고 도수의 규모는 작아졌으며 표면 물러도 미약해지는 경향을 보였다. 세 가지 유량조건에 따른 WTF의 규모를 비교한 결과 유량이 증가할수록 WTF의 크기가 증가하였으며 무차원화한 WTF의 형상은 거의 비슷한 것으로 나타났다.

향후 계단형 낙차공은 기존낙차공(급경사, RCW 등)에서 발생하는 도수와 달리 WTF라는 독특한 흐름이 발생되므로 하상에 미치는 전단응력 등에 대한 추가적인 흐름분석이 필요할 것이다.

## 참고 문헌

1. 김진홍(2004). 에너지 감세에 효율적인 계단형 낙차공 개발(Development of Stepped Drop Structure Effective for Energy Dissipation), 방재연구논문집, 제 6권, 제 2호, pp. 131-143.
2. 김진홍, 우효섭(2004). 낙차공의 에너지 감세 효과 검토, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 1-5.
3. Chow, V. T.(1973). Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill.
4. Hager, W. H. and Bretz, N. V.(1986). Hydraulic Jumps at Positive and Negative Steps, J. of Hydraulic Research, Vol. 24, No. 4, p. 237-253.
5. Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Hashiba, H.(1996). Incipient Jump Conditions for Flows over a Vertical Sill, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 8. pp. 465-469.
6. Rajaratnam, N. and Ortiz, N. V.(1977). Hydraulic Jumps and Waves at Abrupt Drops, J. of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 103, No. HY4, pp. 381-394.