

계단형 보 하류 흐름특성과 Wave Type Flow에 관한 실험연구

Experimental Study on Flow Characteristic and Wave Type Flow at Downstream of Stepped Weir

강 준 구* / 여 홍 구** / 이 금 찬*** / 최 남 정****
Kang, Joon Gu / Yeo, Hong Koo / Lee, Keum Chan / Choi, Nam Jeong

Abstract

Stepped weir of this study was suggested a type of natural type structures. Unique flow, such as Wave type flow, at downstream of mild slope stepped occurs. WTF(Wave type flow) is different with hydraulic jump occurred at Round crest weir. WTF is phenomenon to rise the water level by recirculation area occurred by step height at downstream of mild slope stepped. Wave height of WTF condition is higher than tailwater level and maximum velocity of WTF condition occurs in area of water surface. In this results, WTF presents to be important factor for design of join area of weir with levee. This study got and analyzed hydraulic condition occurred of WTF, scales of WTF and velocity profiles on flow patterns using experiments. WTF was not consider to stepped weir design and this results can be important data for design of stepped weir and structures.

Keywords : Stepped weir, wave type flow, Recirculation area, Wave height

요 지

본 연구의 계단형 보는 자연형 횡단 구조물의 한 형태로 제안되고 있다. 계단형 보 하류에서의 흐름은 기존 보(Round Crest Weir)에서 발생하는 도수와 달리 WTF(Wave Type Flow)라는 독특한 흐름이 발생한다. WTF는 계단형 보 하류에서 단차로 인해 발생하는 재순환영역(recirculation area)이 일정조건에서 발달하여 수면을 상승시키는 현상이다. WTF 조건에서의 파고는 하류수위(tailwater level) 보다 높아지고 WTF 구간에서의 최대유속발생이 수면에 가까운 곳에서 발생한다. 이와 같은 결과는 WTF 현상이 설계 시 접합부에 영향을 줄 수 있는 중요 인자임을 나타내는 것이다. 본 연구는 수리실험을 통해 WTF이 발생하는 수리조건과 WTF의 규모를 파악하였고 계단형 하류 흐름조건에 따른 유속분포를 분석하였다. 본 연구의 결과는 계단형 보 설계 시 고려되지 못한 부분으로서 차후에 계단형 구조물 또는 계단식 변형 구조물 설계 시 주요 자료로 활용 될 것이다.

핵심용어 : 계단형 보, wave type flow, 재순환영역, 파고

* 교신저자, 한국건설기술연구원 하천, 해안항만연구실 선임연구원
Corresponding Author, Senior Researcher, River, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Construction Technology
(e-mail: jgkang02@kict.re.kr)
** 한국건설기술연구원 하천, 해안항만연구실 책임연구원
Researcher Fellow, River, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Construction Technology
*** 한국건설기술연구원 하천, 해안항만연구실 연구원
Researcher, River, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Construction Technology
**** 한국건설기술연구원 하천, 해안항만연구실 연구원
Researcher, River, Coastal and Harbor Research Division, Korea Institute of Construction Technology

1. 서론

보는 하천에서 가장 많이 설치되어 있는 하천구조물중 하나로 각종 용수의 취수, 주운 등을 위하여 수위를 높이고 조수의 역류를 방지하기위하여 하천의 횡단방향으로 설치하여 제방의 기능을 갖지 않는 시설이다(하천설계기준, 2005). 일반적으로 보는 본체, 물받이(apron), 그리고 바닥보호공 등으로 구성되며 이에 대한 설계기준은 하천설계기준(2005)에 제시되어 있다. 그러나 태풍 루사나 매미 등 과거 홍수에 의한 피해사례를 살펴보면 하류부 하상세굴, 부적절한 물받이 및 바닥보호공이 주요한 파괴원인 중 하나로 확인되었다. 보의 종류는 필요한 목적에 따라 다양하게 제안될 수 있다. 한국의 설계기준에서 보의 형태는 일반적으로 시공되어지는 고정보의 형태인 RCW(Round Crest Weir)와 수위조절이 가능한 가동보로 구분되어 있다. 최근 들어 환경적인 요구가 증가하면서 보의 형태도 다양하게 제안되고 있는데 그 중 대표적인 형태가 계단형 보이다. 계단형 보는 단의 효과로 인한 에너지 감쇄가 크며 폭기된 흐름이 수중 용존산소를 증대 시켜 수질정화 측면에서 유용한 형태이다. 기존의 계단형상의 구조물은 보 형태보다는 급경사수로인 댐 여수로에서 사류구간의 에너지감쇄와 수질정화 효과를 목적으로(Chanson 2001, Yasuda 등 2001) 주로 제안되었다. 계단형 보은 최근 기준보를 개량하는 사업에 주로 사용되고 있다(Fig. 1). 따라서 계단형 구조물은 자연형 하천을 설계함에 있어 중요구조물로 제시되어 왔다. 하지만 실무에 적용하기 위한 계단형상 구조물(여수로, 보 등)에 대한 설계가이드라인은 매우 한정적이다. 또한 계단형 보에 관한 기존 연구는 대부분 경사가 급한 여수로 형태에 대해 이루어졌다. 계단형 보의 경우 급경사와 완경사를 정확히 구분하기는 어렵지만 경사의 차이에 따라 구조물 하류의 흐름에 차이가 있다.

보 주변의 흐름은 상류부, 경사부와 구조물 하류부의 흐름으로 구분될 수 있다. 특히 구조물 하류부의 흐름



Fig. 1. Stepped Weir in Field

은 하류부 수위조건에 영향을 받는다. 보 설계의 경우 수리학적 주요설계인자는 구조물 하류부에 발생하는 사류부, 도수흐름과 하상의 인자인 세굴로 크게 구분할 수 있다. 기존 보(급경사, RCW 등)는 구조물이 대부분 급경사로 설계되어 구조물에서 강한 사류가 발생되고 이로 인해 구조물 하류에서 하류부 수위 조건에 따라 다양한 형태의 도수가 발생한다. 일반적으로 구조물하류의 흐름은 하류수위에 따라 도수의 발생위치, 도수길이 및 도수형상이 변화한다. 하류수위가 낮을 경우 구조물 하류 흐름은 구조물 하류에서 강한 사류가 발생하고 하류수위가 증가하면서 사류구간은 줄어들어 결국은 잠김도수로 형성된다.

하지만 계단형 보의 경우 단위에서 수평사류 흐름이 발생하는 경사에서는 구조물 하류부 흐름이 기존 RCW와 다른 흐름이 형성된다. 수평사류 흐름이 발생하는 경사에서의 계단형 보의 하류부 흐름은 하류수위가 증가함에 따라 사류구간이 줄어들면서 잠김도수 현상은 동일하나 잠김도수가 발생한 후 기존 보와 다른 wave type의 수면상승 흐름이 발생한다. 일반적으로 보 하류에서의 wave type의 수면상승은 보하류부에 설치하는 보호구조물인 sill이 설치되었을 경우 발생하는 것이 일반적이다(Fig. 2). Rajaratnam *et al.* (Rajaratnam 1977, Hager 1986, Ohtsu 1987, Kawagoshi 1990)은 이와 같은 흐름을 WTF(Wave Type Flow)라 명칭 하였다. WTF는 sill로 인해 바닥층에 흐름이 역류되면서 바닥면에 재순환영역(recirculation zone)이 발생하고 재순환영역의 흐름은 구조물 경사부에서의 흐름을 보 끝단에서 강한 수위상승하면서 발생한다. 계단형 보에서의 파형태(wave type) 수면상승은 sill 등의 구조물의 영향은 아니지만 기존 연구자들이 제시한 WTF와 일치되는 형태를 가지고 있다. 계단형 보에서의 WTF는 계단의 단차에 의한 바닥면의 재순환영역 흐름이 구조물 단위에서 수평적인 사류흐름을 상승시켜 발생시킨다. WTF의 수면부의 흐름은 강한 유속이 형성되며 수면의 높이는 하류단의 수위보다 높게 발생되어 구조물 설계 시 접합부 파괴의 영향을 줄 수 있다. 또한 바닥면에 발생하는 재순환영역은 강한 역류흐름이 발생되어 바닥세굴의 영향을 줄 수 있다.

본 연구는 WTF 흐름으로 인한 구조물 접합부와 하상에 영향을 평가하기 위해 WTF구간의 유속분포를 분석하였다. 또한 계단형 보에서 관찰할 수 있는 WTF에 대해 발생조건, 수면형과 규모에 대해 분석하였다. 본 연구의 목적은 계단형 보에서 발생하는 특이 흐름의 특성 분석을 통해 계단형 보 설계 시 고려해야할 점을 제안하고 기초자료를 제시하는데 있다.



Fig. 2. Wave Type Flow around Sill (Ohtzu *et al.* 1996)



Fig. 3. Experimental Channel

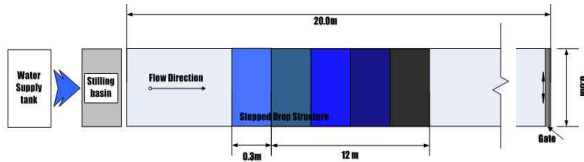


Fig. 4. Range of Experimental Channel

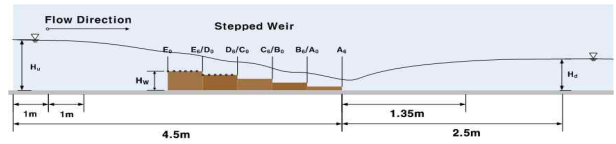


Fig. 5. Model Setup for Experiment

2. 실험준비

실험은 길이 20 m, 폭 0.6 m, 높이 0.8 m의 가변경사 직사각형 수로에서 수행하였다(Figs. 3~4). 바닥은 철제이며 좌우 측벽은 강화 유리로 제작되어 실험 중 수면 형상이나 공기방울의 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 포인트게이지를 이용하였다. 계단형 보에서의 흐름 및 도수현상 관측은 디지털 카메라를 이용하여 기록하였다. 계단형 보 모형은 1:7.5의 경사를 가진 5단 보로서 각 단은 길이 0.3 m, 단차 0.04 m로 제작하여 실험을 수행하였다(Fig. 5). 본 연구에서의 실험방향은 구조물 하류부 도수형태에 따른 흐름특성을 분석하기

위한 실험과 WTF이 발생하는 조건을 파악하기 위한 실험으로 구분하였다. 구조물 하류부 도수형태에 따른 흐름특성을 분석하기 위한 실험은 유량을 일정하게 유지하면서 하류부 수위를 12가지로 조절하여 실험하였고 (Table 1), 계단형 보 하류단의 다양한 흐름현상은 유속과 수위를 중심으로 분석하였다. 수위측정위치는 유입부 3 지점, 보 구역 25 지점, 보 하류 구역 18지점, 하류부 1지점, 총 47개 지점에서 측정하였으며, 보 구역과 보 하류 구역에서는 5 cm 간격으로 수위를 측정하였다 (Fig. 5). 유속은 수위측정과 동일한 간격으로 측선을 선택하여 측정하였다. 유속은 각 측정점의 수면으로부터 수심 방향으로 1 cm 간격으로 측정하였다. WTF이 발생하는 조건을 파악하기 위한 실험은 10case의 상류유량에 대한 하류수위를 변화시켜 WTF가 발생하는 영역을 파악하였고 WTF의 규모를 측정하였다(Table 2).

Table 1. Experimental Cases

case	Width	Discharge	Slope	Weir Height	Upstream Stage	Downstream Stage
	b	Q		h	H_u	H_d
	m	m^3/s		m	m	m
1	0.6	0.034	1:7.5	0.2	0.310	0.142
2					0.313	0.147
3					0.311	0.163
4					0.308	0.183
5					0.320	0.192
6					0.309	0.214
7					0.310	0.230
8					0.310	0.252
9					0.311	0.267
10					0.311	0.281
11					0.312	0.302
12					0.310	0.323

Table 2. Experimental Cases for WTF Range

case ($Q, m^3/s$)	Upstream Stage	Downstream Stage	case ($Q, m^3/s$)	Upstream Stage	Downstream Stage
	H_u	H_d		H_u	H_d
	m	m		m	m
0.0008	0.216	0.064-0.068	0.0650	0.381	0.247-0.253
0.0051	0.240	0.095-0.103	0.0812	0.404	0.275-0.280
0.0191	0.286	0.149-0.155	0.0999	0.430	0.300-0.305
0.0340	0.328	0.192-0.198	0.1192	0.457	0.332-0.335
0.0492	0.352	0.217-0.223	0.1470	0.487	0.390-0.395

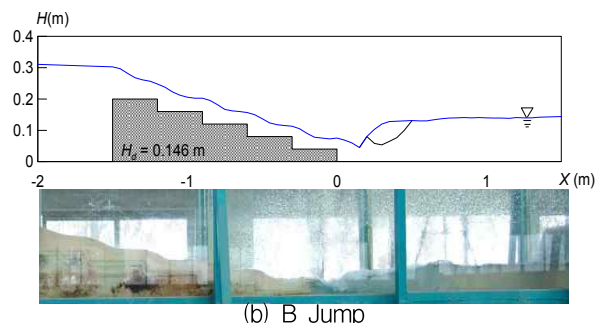
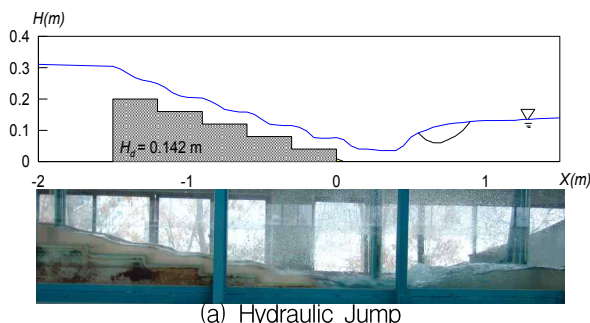
3. 실험분석

3.1 구조물 하류부 도수형태에 따른 흐름특성을 분석

수리실험은 계단형 구조물 하류부 흐름특성을 파악하기 위한 실험은 하류수위 변화에 따른 도수형태와 완전도수, Upward curved jet와 WTF의 유속분포를 분석하였다. 계단형 보 하류부의 도수형태는 완전도수→B점프→Downward curved jet→Upward curved jet→WTF→단위에서의 Upward curved jet→단위에서의 WTF로 변화하였다. 완전도수는 구조물 하류에서 제트가 발생하여 사류구간이 형성된 후 도수가 발생하는 것으로 본 실험에서는 하류수심과 보 높이비 0.71 조건에서 계단형 보 끝단으로부터 0.5 m 정도 하류 지점에서 완전 도수가 발생하였다(Fig. 6(a)). B점프는 Moore and Morgan (1959)에 의해 정의된 것으로 단 위에서 발달한 사류가 단 끝에서 또는 단을 내려오자마자 도수를 일으키는 형태를 의미하며 하류수심과 보 높이비 0.74에서 나타났다(Fig. 6(b)). Downward curved jet는 단 위에서 발달한 사류가 단 끝에서 아래쪽으로 구부러지는 제트로 연결되면서 도수를 일으키는 현상으로 하류

수심과 보 높이비 0.82에서 발생하였다(Fig. 6(c)). Upward curved jet는 단 위의 사류가 단 끝에서 위쪽으로 살짝 솟구치는 제트로 연결되면서 도수를 일으키는 현상으로 하류수심과 보 높이비 0.92에서 발생했으며 Fig. 6(d)에 나타났다. WTF는 계단형 보에서 발생하는 특이 흐름형태로 구조물 하상에서 발생한 재순환 흐름이 구조물에서의 제트를 밀어 올려 흐름이 파도 형태의 제트로 수면형을 형성하는 것으로 하류수심과 보 높이비 0.96에서 발생하였다(Fig. 6(e)). WTF의 발생 조건보다 하류수위를 더 올리면 도수의 발생 위치가 계단 위쪽으로 이동해 가는데 Upward curved jet와 WTF가 각 단에서 번갈아가며 발생하였다. WTF의 Wave의 규모는 하류수위가 높아질수록 규모는 작아졌으며 표면 물러도 미약해지는 양상을 보였다.

계단형 보와 보의 일반 형태인 RCW의 흐름차이는 Upward curved jet가 발생한 후 WTF가 발생하는 것이다. 특히 하류수위가 증가하면서 계단형 보 단위에서도 Upward curved jet와 WTF가 반복적으로 발생하는 것이다. WTF 발생시 수면높이는 하류단 수위보다 높게 형성되는데 이와 같은 결과는 하류단 수위를 고려한 호안설계 시 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 계단형 보 단에서의 Wave의 형성은 구조물 주변에 안정성에도 영향을 줄 것으로 판단된다.



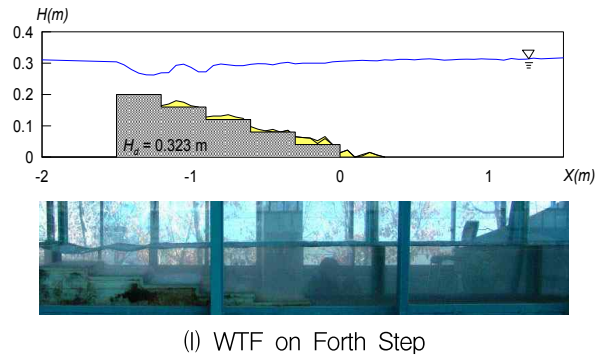
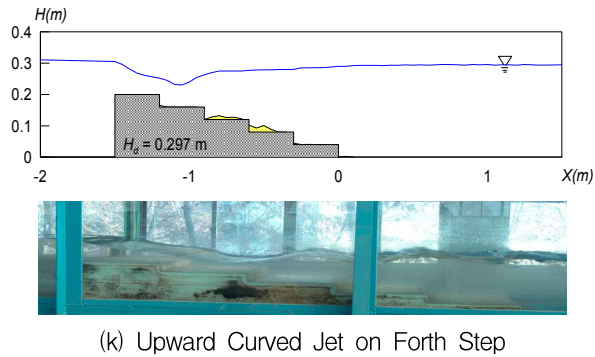
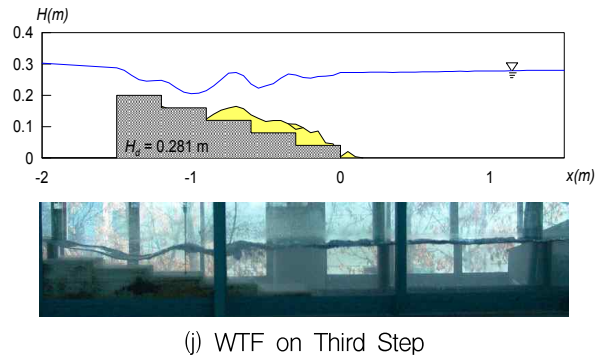
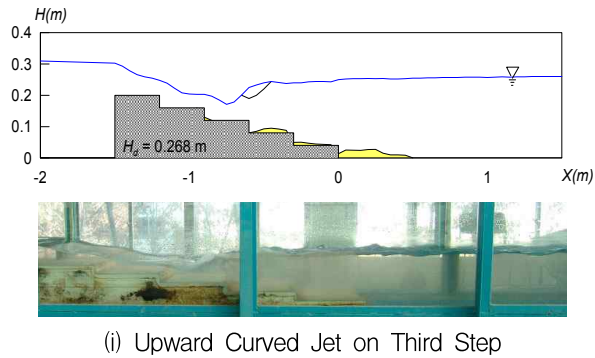
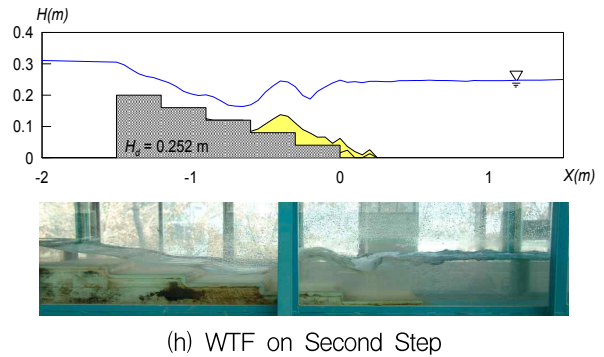
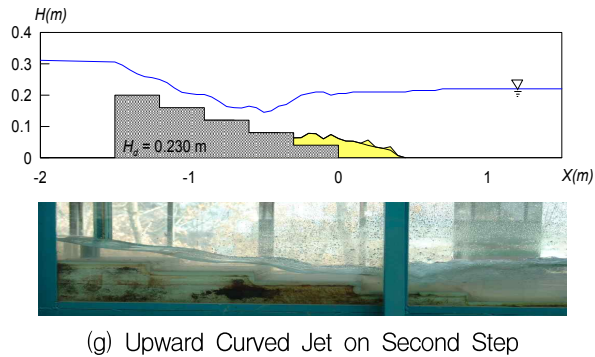
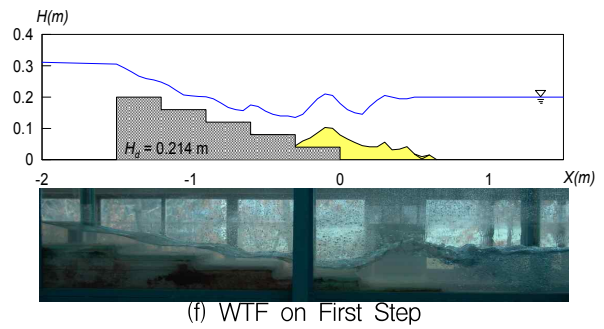
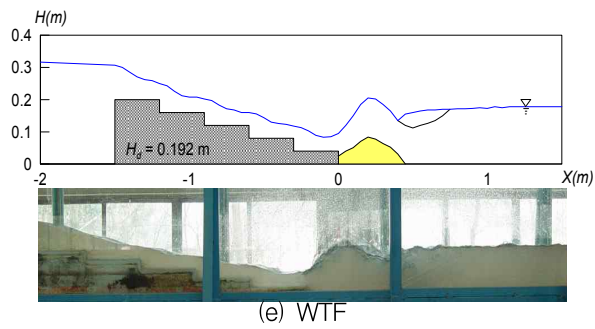
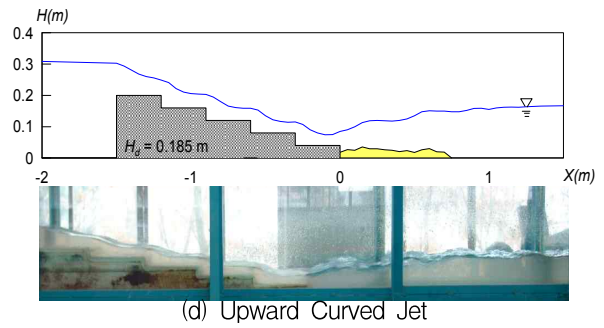
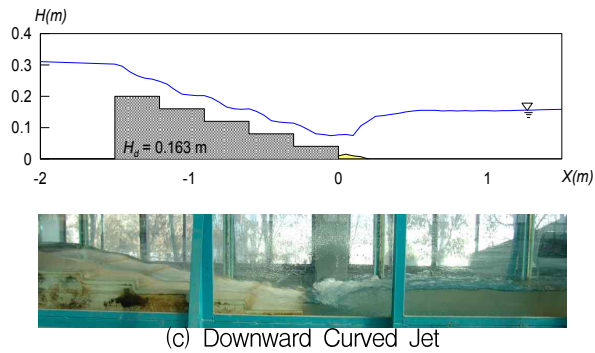


Fig. 6. Water Surface Changes on Stepped Weir

Fig. 7은 완전도수, Downward curved jet 와 WTF 조건에서의 수면형과 유속분포를 계단구간에서 보 하류까지 나타낸 것이다. 유속분포를 살펴보면 Downward curved jet의 경우 최대유속은 수심의 중간부 이하에서 발생하나 WTF의 경우 보 하류에서 최대유속은 수표면 쪽으로 발생하는 것으로 관측되었다. WTF의 경우 최대유속이 수면부에서 발생하는 것은 단차로 인해 발생하는 바닥 재순환영역에서 역류속이 발달해 흐름을 밀러 올라가기 때문이다. 흐름방향으로 음의 유속값을 보이는 구역의 경계를 선으로 표시하였는데, Downward curved jet와 WTF조건에 대해 바닥의 재순환영역이 변화함을 알 수 있다.

Figs. 8~10은 완전도수, Downward curved jet 와 WTF 조건에서의 보 하류부 유속(u)을 한계유속으로 무차원하여 나타낸 것이다. 흐름조건에 따른 최대유속 발생위치는 완전도수의 경우 보하류부 바닥층, Downward curved jet의 경우 수심 중심부 그리고 WTF의 경우 수면가까이서 발생하는 것으로 분석되었다. 3가지 흐름조건에서 구조물 하류구간의 최대유속

값은 수심에 따른 위치의 차이는 있으나 한계유속에 약 2.3배로 동일하게 측정되었다. 하상바닥에 영향을 주는 바닥층 유속의 경우 완전도수의 경우 한계유속에 약 2배, Downward curved jet의 경우 약 -0.25배 그리고 WTF의 경우 약 -0.7배로 측정되었다. 이와 같은 결과는 완전도수의 경우 하상세굴이 미치는 영향이 가장 크고 WTF조건에서의 하상에 미치는 영향이 Downward curved jet 조건보다 큰 것으로 측정되었다. 일반적으로 완전도수에서 하상세굴에 영향이 크고 하류수위가 증가할수록 영향이 줄어들는데, 계단형 보의 경우 Downward curved jet의 하류수위가 높은 조건에서 발생하는 WTF에서 하상세굴의 영향이 커지는 현상을 나타낸다. 또한 WTF의 경우 최대유속이 수면부에서 발생하는데 이는 구조물에서 발생한 사류흐름이 수면으로 상승하는 것으로 상대적으로 바닥보다 보호가 되지 않는 집합부 파괴의 원인이 될 수 있다. 따라서 계단형 보 설계 시 대상지역의 수리조건을 검토하여 WTF가 발생하는 흐름조건에 대한 분석이 필요하다.

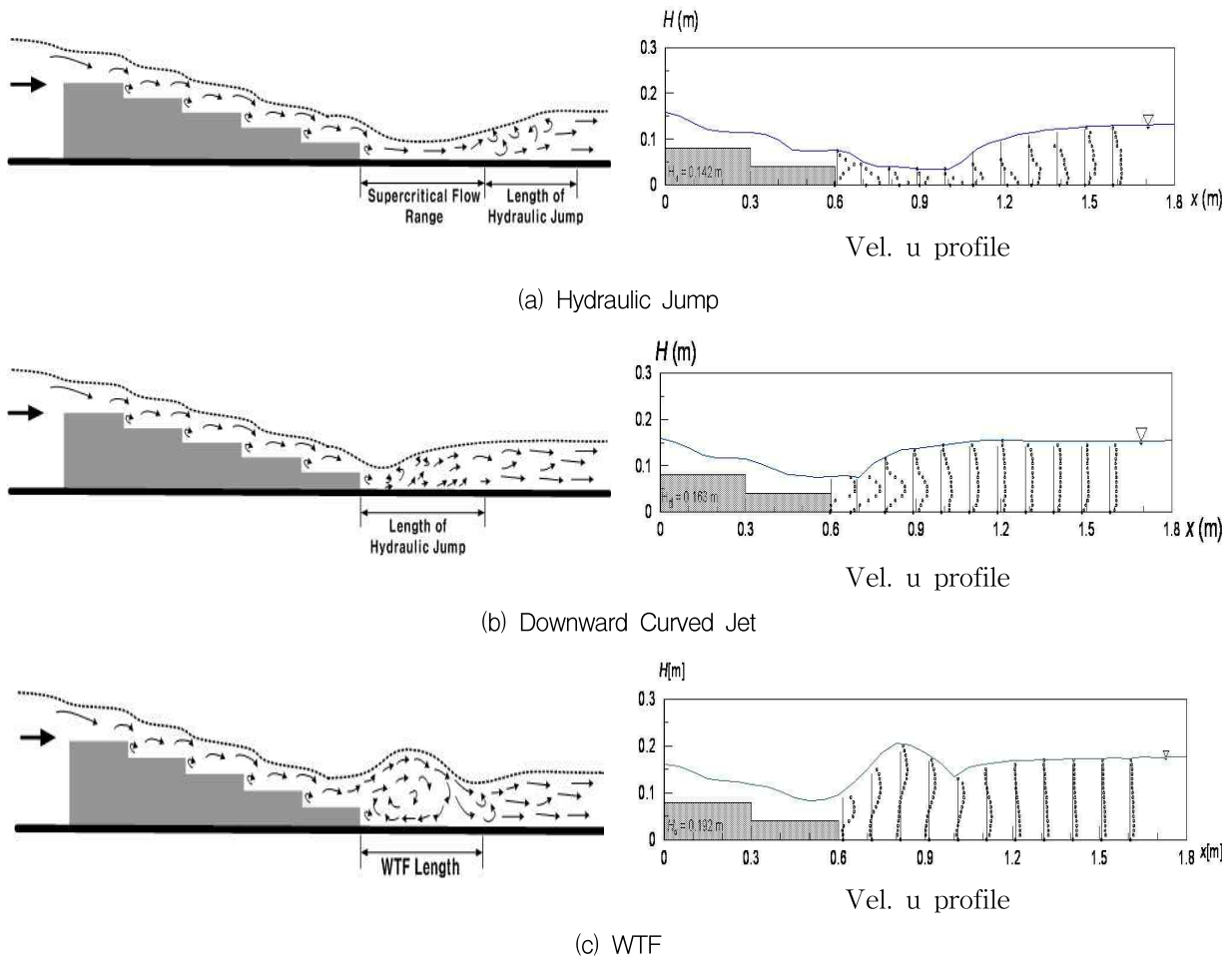


Fig. 7 Velocity Profile on Hydraulic Jump, Downward Curved Jet and WTF

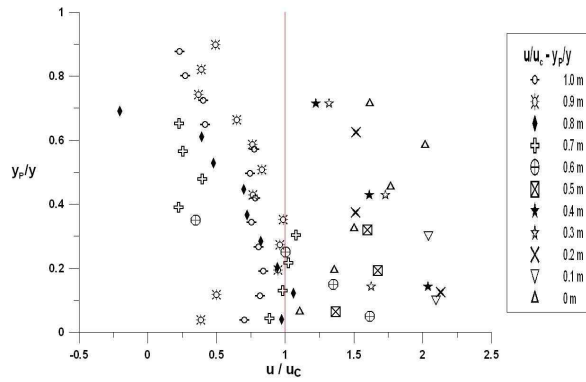


Fig. 8. Dimensionless Velocity Profile of Hydraulic Jump

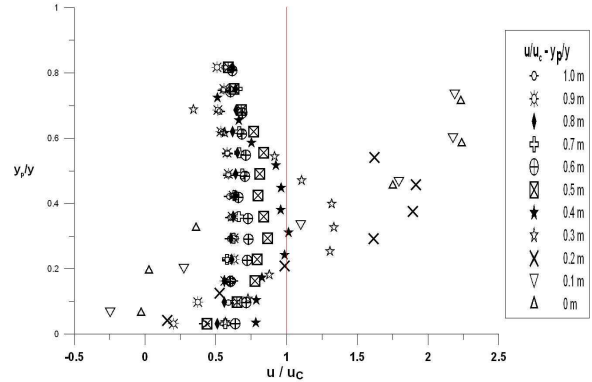


Fig. 9. Dimensionless Velocity Profile of Downward Curved Jet

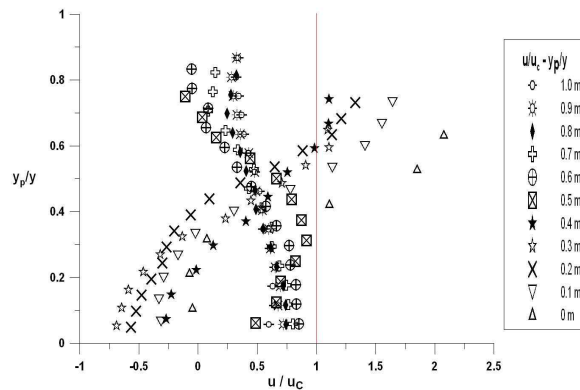


Fig. 10. Dimensionless Velocity Profile of Wave Type Flow

Table 3. Experimental Results on Wave Type Flow Condition

case (Q, m ³ /s)	Upstream Stage	Downstream Stage	wave height		jump length	length of bottom separation
			center	side wall		
	H _u	H _d	H _{wtf}		L _j	L _e
m	m	m		m	m	
0.0008	0.216	0.064-0.068	-	-	-	-
0.0051	0.240	0.095-0.103	0.090	0.085	0.180	0.275
0.0191	0.286	0.149-0.155	0.170	0.150	0.313	0.332
0.0340	0.328	0.192-0.198	0.205	0.190	0.382	0.442
0.0492	0.352	0.217-0.223	0.270	0.230	0.460	0.490
0.0650	0.381	0.247-0.253	0.280	0.235	0.600	0.900
0.0812	0.404	0.275-0.280	0.313	0.275	0.685	1.016
0.0999	0.430	0.300-0.305	0.315	0.295	0.800	1.250
0.1192	0.457	0.332-0.335	0.375	0.325	0.900	1.500
0.1470	0.487	0.390-0.395	0.410	0.380	1.120	1.650

3.2 WTF 발생조건과 규모분석

WTF는 흐름해석에서 알 수 있듯이 기존 보와는 다

른 흐름으로 이에 대한 분석을 수행하였다. Table 3은 다양한 유량조건에 대해 보 하류에서 WTF가 발생하는 상,하류 조건과 WTF 규모를 파악하기 위해 수행된 실험

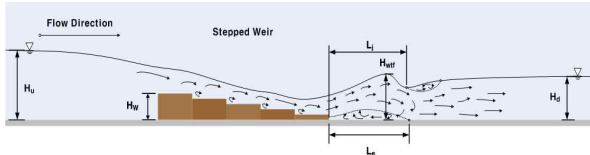


Fig. 11. Characteristics and Definitions on Wave Type Flow

험조건과 결과를 나타낸 것이다. 유량조건은 10가지에 대해 수행하였으며 유량이 증가할수록 WTF의 규모는 커지는 것으로 측정되었다. WTF의 규모를 파악하기 위해 주요변수로 수면과의 높이(H_{wtf}), 수면과의 길이(L_j), 수면과의 후면에 발달하는 표면 롤러의 길이(L_r)와 하상 재순환영역(recirculation zone)의 길이(L_e)로 구분하여 분석하였다. Fig. 11은 계단형 보 하류에서 발생하는 WTF의 규모를 파악하기 위한 개념도를 나타낸 것이다.

본 실험에서는 우선 WTF가 발생하는 상·하류 수위 조건을 검토하였다. WTF 발생인자는 상류수위, 하류수위, 계단형 보에서의 한계수위와 보높이를 선정하여 분석하였다. Fig. 12는 계단형 보 하류에서 WTF가 발생하는 조건을 나타낸 것이다. WTF발생은 하류수위에 민

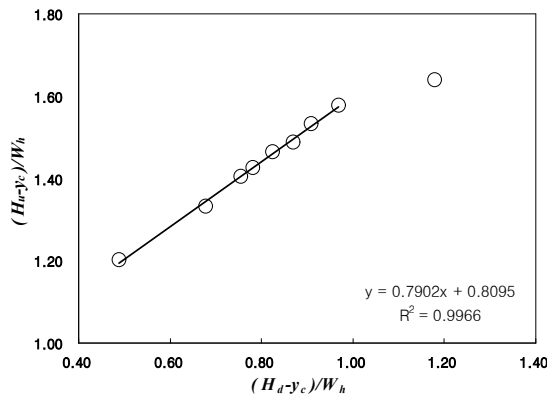


Fig. 12. Condition of WTF Occurrence on Upstream and Downstream Stage

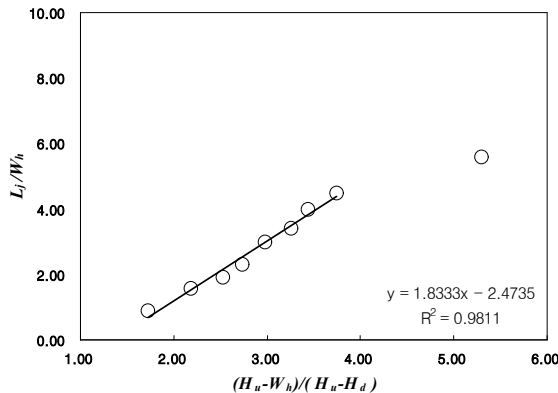


Fig. 14. Comparison of Stage Condition and Wave Length

감하게 반응하며 순간적으로 발생하는 것으로 관측되었다. WTF발생조건은 상류수위가 증가할수록 하류수위도 증가하는 것으로 측정되었는데 증가 경향은 선형적으로 변화하는 것으로 나타났다. 측정자료 중 상하류조건에 대해 증가율 경향이 다른 한 축점은 하류수위가 보높이와 한계수심을 합한 값보다 큰 경우로 WTF 발생조건에 차이가 있는 것으로 나타났다. Fig. 13은 WTF 발생 시 상하류 수위에 대한 높이를 나타낸 것이다. WTF의 높이는 일반적으로 하류수위보다 높게 형성되는 것으로 관측되었다. 또한 전술된 흐름분석에서 WTF 조건에서는 강한유속이 수면에 가까운 지점에서 발생하므로 WTF의 높이에 따라 강한 흐름이 발생하는 지점을 판단할 수 있다. 특히 보의 경우 접합부의 율류와 강한흐름은 침식의 원인이 되므로 WTF의 높이는 매우 중요한 인자이다. WTF 높이는 상류수위, 하류수위와 보높이를 인자로 적용하여 분석하였다. WTF높이 변화는 상류수위가 증가할수록 선형적으로 증가되는 것으로 분석되었다. 하류수위가 보높이와 한계수심을 합한 값보다 클 경우 WTF 높이도 차이가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 WTF의 길이의 변화를 나타낸 것이다.

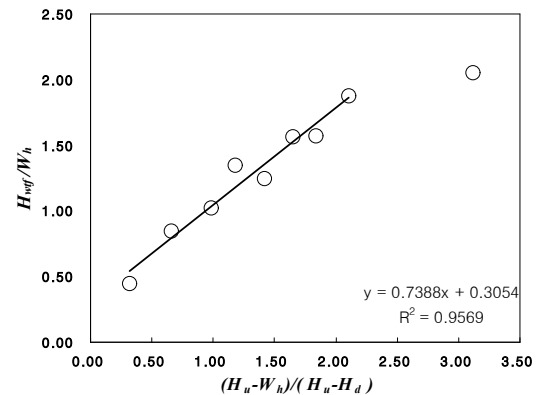


Fig. 13. Comparison of Stage Condition and Wave Height

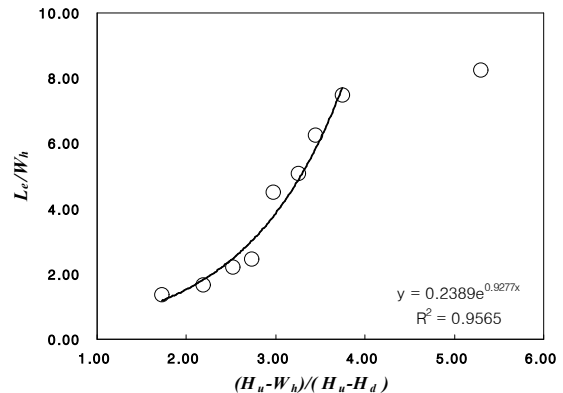


Fig. 15. Comparison of Stage Condition and Recirculation Length

WTF의 길이는 WTF 발생 규모를 파악하기 위한 것으로 수면부의 강하유속의 범위를 파악하기 위한 인자라 할 수 있다. WTF 길이의 인자는 WTF 높이와 동일한 상류수위, 하류수위와 보높이를 적용하여 분석하였으며 WTF 길이는 상류수위가 커질수록 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 15는 WTF형성 시 바닥의 재순환영역 길이를 나타낸 것으로 영역을 평가하기 위한 것이다. 바닥의 재순환영역은 강한 역류흐름이 발생하는 영역으로 하상세굴의 중요요인이며 세굴의 규모를 판단할 수 있는 인자라 할 수 있다. 바닥 재순환영역 길이는 상류수위가 커질수록 증가율이 증가하였으나 일정 조건에서는 증가율이 현격히 떨어지는 것으로 분석되었다. 특이점은 하류수위가 보높이과 한계수심을 합한 값보다 큰 경우로 측정되었다.

4. 결 론

본 연구는 계단형 보에서 하류수위 변화에 따른 도수 형태의 변화와 WTF 흐름 특성에 대한 분석을 수행하였다.

계단형 보 하류부의 도수형태는 완전도수→B점프→Downward curved jet→Upward curved jet→WTF→단위에서의 Upward curved jet→단위에서의 WTF로 변화하였다. WTF 발생 시 파의 높이는 하류수위보다 높게 관측되었다.

계단형 보 하류부 최대유속의 발생위치는 완전도수, downward curved jet와 WTF 조건에 대대 차이가 있으며 최대유속 값은 한계유속에 약 2.3배로 동일하게 측정되었다. 이는 흐름조건에 따라 강한 제트의 영향을 받는 위치가 다르므로 이에 대한 분석이 중요하다. 특히 WTF 조건에서는 구조물에서 발생한 제트가 수면으로 상승되므로 접합부 파괴의 원인이 될 수 있다. 하상 바닥의 경우 하류수위가 상승하면 세굴의 영향이 감소되는 것이 일반적이나 계단형 보의 경우 Downward curved jet의 경우 보다 WTF 조건이 세굴에 영향이 큰 것으로 측정되었다.

WTF 발생조건은 상류수위, 하류수위, 계단형 보에서의 한계수위와 보높이를 인자로 선정하여 분석하였고 상하류수위가 증가하면서 선형적으로 상승하는 것으로 나타났다. 특이점은 하류수위가 보높이과 한계수심을 합한 값보다 큰 경우이다. WTF의 높이는 일반적으로 하류수위보다 높게 형성되는 것으로 관측되었다. WTF 형성 시 바닥의 재순환영역은 강한 역류흐름이 발생하는 영역으로 하상세굴의 중요요인이 될 것이다. 바닥 재순환영역 길이는 상하류수위가 커질수록 일정한 경향을 나타내며 증가하였다.

본 결과에서 WTF는 파고가 하류수위보다 높으며 최대유속이 수면부근에서 발생되므로 보 접합부(고수부지 설치, 제방설치 등) 침식에 영향을 줄 것으로 판단된다. WTF는 지금까지의 계단형 보 설계 시 고려되지 못한 부분으로서 차후에 수면형 상승에 대한 정밀한 실험연구를 수행한다면 계단형 구조물 또는 계단식 변형 구조물 설계 시 주요 자료로서 활용될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 한국수자원학회 (2005). **하천설계기준·해설**. pp. 411-431.
- Chanson, H. (2001). "Teaching Hydraulic Design in an Australian Undergraduate Civil Engineering Curriculum", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 12. pp. 1002-1008.
- Hager, W. H. and Bretz, N. V. (1986). "Hydraulic Jumps at Positive and Negative Steps." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 237-253.
- Kawagoshi, N., and Hager, W. H. (1990). "Wave type flow at abrupt drops 1. Flow geometry." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 461-480.
- Moore W.L. and Morgan C.W. (1959). "Closure on 'The hydraulic jump at an abrupt drop' by themselves." *Journal of the Hydraulics Division*, Proc. ASCE, Vol. 85, No. HY2, pp. 87-91.
- Ohtsu, I., and Yasuda, Y., (1987). "Hydraulic Jumps at Positive and Negative Steps." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 407-413.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Hashiba, H. (1996). "Incipient Jump Conditions for Flows over a Vertical Sill." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 8. pp. 465-469.
- Ohtsu, I. and Yasuda, Y., Gotoh, H., (2001). "Hydraulic condition for undular-jump formations." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 2, pp. 203-209.
- Rajaratnam, N. and Ortiz, N. V. (1977). "Hydraulic Jumps and Waves at Abrupt Drops." *Journal of the Hydraulics Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 103, No. HY4, pp. 381-394.

논문번호: 09-067	접수: 2009.06.17
수정일자: 2009.09.07/11.07	심사완료: 2009.11.07