수리모형실험을 이용한 경사형 낙차공의 만곡부 흐름특성분석

Analysis of Curved-Channel Characteristics on Sloping Drop Structure Using Hydraulic Model Experiments

박무종* · 우재영** · 이정호*** · 송영석****

Park, Moojong · Woo Jaeyoung · Lee, Jounggho · Song, Youngseok

Abstract

Hydraulic Structure are inevitably set up and operated in the river that flow characteristics are complex. When designing the water surface elevation and velocity by using 1-D Hydraulic Model, it will not be able to reflect the characteristics of Lateral Eddy and Superelevation due to centrifugal force. This study compared with result of 1-D Hydraulic Model and Hydraulic Model Experiments, Through the model experiment of Sloping Drop Structure installed on Curved-Channel. Hydraulic Model was constructed to baekseok bridge and Shinchun Bridge about 210 m interval located in Uijeongbu, Gyeonggi-do. Result of Hydraulic Modeling observed data and 1-D Hydraulic Modeling date are compared to design flood 100 year and 20 year. Result of experiments are depth observed data 35~48% low then 1-D Hydraulic Modeling date and velocity observed data 135~167% large then 1-D Hydraulic Modeling date. Research results expect to basic information for Curved-Channel Characteristics on Sloping Drop Structure.

Key words : Hydraulic model experiments, Sloping drop structure, Flow characteristics for curved-channel, HEC-RAS, Law of froude similarity

요 지

하천 내에 불가피하게 설치 운영되는 수공구조물은 흐름특성이 복잡하여 단순히 1차원 수리모델에 의한 유속이나 수위를 이용하여 설계하는 경우에는 원심력에 의한 횡방향 특성이나 편수위를 반영할 수 없다. 본 연구에서는 만곡부에 설치된 경사형 낙차공에 대한 수리모형 실험을 통해서 낙차공의 수리특성을 파악하고 이를 수치모형과 1차원 설계에 의한 결과와 비교하였다. 경기도 의정부에 위치한 백석천의 신천교-백천교 210 m 구간에 대한 모형을 제작하고 100년 빈도와 20년 빈도 홍수량에 대하여 수리모형의 관측값과 1차원 모델인 HEC-RAS에 의한 계산값을 비교분석하였다. 실험결과 경사형 낙차공 구간에서 수심 관측 값은 계산 값보다 35~48% 작았으며, 유속 관측 값은 계산 값보다 135~167% 빠른 유속으로 원심력에 의해 좌안보다 우안이 수심이 높고, 유속은 크게 나타났다. 이러한 연구결과는 만곡부 하천에 수공구조물을 설치하는 경우 수리특성을 파악할 수 있는 기초정보로 유용하게 활용될 것이며 좌우안의 편수위 및 유속의 분석을 2차원이나 3차원 모형과 추가적으로 비교한다면 보다 유효한 결과가 도출될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 수리모형실험, 경사형 낙차공, 만곡부 흐름특성, HEC-RAS, Froud 상사법칙

1. 서 론

최근 기상이변으로 인한 이상홍수 및 국지성 호우의 잦은 발생으로 하천의 안전성이 대두되고 있다. 하천의 흐름은 직선보다는 만곡흐름이 보편적인 형태로 하천의 안전성을 판단

하는 요인으로는 하상경사, 유사이동, 하천형태, 하도 및 하안의 구조, 하안의 식생 등이 있다. 이 중 하상경사와 하천형태는 하천의 안전성을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 급경사 하천의 안전성과 평수위 발생에 의한 제방 월류 및 파괴에 대한 침수피해 대책방안이 제시되어야 한다. 급경사의

*정회원. 한서대학교 토목공학과 교수(E-mail: mjpark@hanseo.ac.kr)
 Member. Professor, Departemnt of civil Engineering, Hanseo University

**한서대학교 토목공학과 석사과정
 Master's course, Candidate, Department of Civil Engineering, Hanseo University

***교신저자. 정회원. 한밭대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-42-821-1106, Fax: +82-42-821-1612, E-mail: leejh@hanbat.ac.kr)
 Corresponding Author, Professor, Departemnt of civil & environmental Engineering, Hanbat University

****정회원. 한서대학교 토목공학과 박사과정
 Member. Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Hanseo University

하천을 완만하게 유지하는 수리구조물인 낙차공(drop structure)은 하천 치수목적의 하천정비 구조물로서 하천의 경사를 완화시키는 대표적인 하천횡단 구조물이다. 기존의 낙차공은 낙하형이나 계단식으로 설계가 진행되어 큰낙차로 인해 발생하는 수중생물의 단절이 문제점으로 제시되었다. 그러나 하천환경을 고려한 공법이 요구되면서 기존의 문제점을 보완한 경사형 낙차공을 설치하여 수중생물의 이동통로를 유지하고 주변 환경까지 고려할 필요성이 있다.

국내의 낙차공에 대한 연구로 Lee et al. (2003)은 계단식 계비온 낙차공을 통과하는 흐름현상과 에너지 소산효과를 기존의 감세지에 의한 방법과 비교하였으며, Chan et al. (2003)은 경사형 낙차공의 경사조건과 하상재료의 입경에 따라 발생하는 에너지 효율, 구조물 하류부 도수현상에 대한 낙차공에서의 흐름특성을 수리모형실험을 통해 분석하였다. Jung et al. (2008)은 낙차공 및 보 하류부에 설치되어 있는 에이프런 구조물을 대체하고 세굴 방지 및 서식처 형성 등 환경적 기능강화를 도모할 수 있는 대체 구조물을 제시하기 위한 실험을 하였다. Kim et al. (2010)은 낙차공 하류부에 사석보호공을 설치할 때 세굴심의 시간적 변화와 세굴 제어를 위해 사석 보호공을 포설할 경우 침하형상을 실험을 통해 침하량 산정식을 제안하였다. Yeo (2011)은 경사형낙차공의 형상변화에 따른 하류부 세굴심과 세굴길이 예측공식을 수리모형실험을 통해 제시하였다. 만곡부 흐름에 대한 연구로 Song et al. (1994)과 Jung et al. (2000)는 만곡부 특성 및 단면형상에 흐름특성을 RMA-2모형에 적용하여 각도에 따른 최대유속선과 위험도가 높은 곡률비를 제시하였다. Shim et al. (2004)는 2002년에 하천만곡부에서 피해가 발생한 지역을 대상으로 만곡부의 피해관련 인자에 대하여 하상경사, 사행대, 곡률비의 포락곡선을 제시하였다. Park and Lim (2007)은 실제홍수사상에 대하여 급경사 만곡부 하도의 수리특성을 RMA-2모형을 통해 분석하여 상류보다는 하류에서 수위가 크게 발생된다고 제시하였다. Ahn et al. (2012)은 RMA-2와 Flow-3D를 이용하여 만곡부에서의 흐름특성 및 편수위를 비교 검토하였다. 국외의 연구로 Rice et al. (1998)등은 경사진 수로위에 느슨하게 놓여진 사석실험을 통해 Manning과 Darcy-Weibach의 조도계수와의 관계를 실험데이터와 결합하여 새로운 식을 제안하였으며, Pagliara et al. (2006)은 경사블록을 이용하여 3가지 경사를 가지는 수로실험을 통해 입경에 따른 축척효과를 상대소실과 수심비의 항목으로 비교하였다. Schokiltsh (1932)은 낙하형 낙차공의 조건에서의 실내 실험을 수행하여 경험식을 도출하였다. Bormann and Julien (1991)은 경사형 낙차공하류부에서 발생하는 세굴심 평가식을 제안하였다. 이때 평가식의 적용범위는 단위폭당 유량 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 계산을 통해 도출되는 최대세굴심의 한계는 1.4 m 이다. 기존의 연구는 주로 낙차공 하류부의 세굴량이나 세굴방지에 대한 보호공에 관련된 연구가 진행되었으며 만곡하천에서는 2차원 및 3차원 모형을 이용한 만곡부의 흐름특성만이 연구되었다. 그러나 하천의 흐름은 직류하천보다는 만곡하천이 대부분으로 이치수 목적의 구조물이 항상 직류하천에만 설치될 수 없는 실정이며 직류하천보다 만

곡부에 설치된 구조물의 영향에 따른 피해가 더 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 경사형 낙차공의 흐름특성을 수리모형실험을 통해 파악하고 1차원 수치모델링과 비교함으로써 수치모형에 의한 차이를 정량적으로 분석하고자 한다.

2. 이론적배경

2.1 Froud 상사법칙

중력에 의해서 흐름이 발생하는 개수로 흐름에서는 중력과 관성력의 비로 표시되는 Froude 상사가 만족되어야 한다. 즉, 원형과 모형에서의 Froude 상사가 동일하여야 하며 다음과 같이 표시된다.

$$Fr_r = \frac{Fr_p}{Fr_m} = \frac{U_r}{\sqrt{g_r L_r}} = \frac{U}{\sqrt{L_r}} = 1 \quad (1)$$

여기서, Fr_r : Froude 수, Fr_p : 원형의 Froude 수, Fr_m : 모형의 Froude 수, U_r : 유속비, L_r : 길이비

Froude 상사에 의해 축척을 결정할 경우에는 모형의 물리적 성질, 모형의 제작가능성, 비용, 공급 가능한 실험유량 등을 고려하여 결정하게 된다. 축척이 너무 작을 경우에는 일명 축척효과(scale effects)에 의해 모형과 원형의 상사관계가 성립하지 않을 수 있으므로 적절한 규모의 축척을 결정하는 것이 중요하다.

2.2 HEC-RAS

HEC-RAS 모형은 미 육군 공병단에서 개발한 1차원 수리해석모형으로, 2001년 기존의 HEC-2 모형을 보완하여 개발되었으며, 현재 홍수범람이나 침수해석을 위하여 국내외적으로 많이 사용되고 있다. HEC-RAS 모형은 상류, 사류, 한계류가 혼합하는 구간에서 계산이 가능하고 단일하천, 수지상하천, Loop형 하천 및 합류점 해석 시 에너지 방정식과 운동량 방정식을 이용하여 해석이 가능하며, 다양한 강우 조건에 대한 홍수위 산정이 용이하도록 개발되었다. HEC-RAS 모형은 자연하천이나 인공하천에서의 정상류(steady flow) 상태의 점변류 수면곡선의 계산을 위해서 개발되었다. 하지만 이외에도 비정상류(unsteady flow), 이동하는 침전물 운반 계산, 교량의 세굴 계산을 할 수 있을뿐만 아니라 수공구조물의 영향을 수면곡선에 반영할 수 있으며, 하천의 홍수터 잠식과 제방의 영향을 평가하는데도 유용하게 사용된다. 수면곡선의 계산은 에너지 방정식이 기본이 된다. 여기서 이용하는 방법이 표준축차법으로 미지의 단면과 그 다음 단면사이의 값을 에너지 방정식에 의해서 반복적으로 계산하게 된다. 여기서 최초의 단면의 값은 그 다음 단면의 값을 산출해 내는데 사용된다(USACE, 2010).

3. 수리모형실험

3.1 대상구간 및 모형

본 연구의 대상유역인 백석천은 중랑천 제 1지류의 지방하천으로 백석천 중상류에 위치한 신천교부터 백석교까지 총

(a) Test bed

(b) Experimental Flume

Fig. 1. Hydraulic Model Experiments

210 m(No. 49~No.59)구간에 대하여 연구를 진행하였다(Fig. 1(a)). 실제하천의 횡단면형과 하도설계계획 자료는 중랑천수계 하천정비기본계획(2009)을 이용하였다. 대상하천의 평균하폭은 40m의 사다리꼴 단면이며 경사형 낙차공 구간의 경사는 0.031, 곡률반경 4.6으로 구조물이 위치한 만곡하천이다. 수리모형은 수리실험의 목적 및 대상 영역의 수리적 특성, 실험 조건 및 경제적 여건 등을 고려하여 모형의 축척을 결정되어야 한다. 본 실험은 하천내 구조물이 설치되는 조건으로 왜곡축척을 이용한 모형을 제작해서는 안되며 수위측정의 정밀도를 고려하여 모형에서 최대한 수심을 확보하여야 한다. 본 실험에서는 원형과 모형의 Froude 수를 같게 하는 Froude 상사법칙을 적용하였다. 수리모형은 수평축척 1/30, 연직축척 1/30, 왜곡도 1을 가지는 정상모형으로 제작하였으며 Froude 상사법칙에 의한 수리량의 축척 환산비는 다음 Table 1과 같다. Froud 상사법칙을 적용하여 구축된 수리모형은 Fig. 1(b)와 같으며 백석천 실시설계측점 No.49번부터 No.59번까지의 수리모형수로의 총 길이는 7 m, 폭은 3 m이다. 재현된 수리모형의 하류단에는 수위조절용 수문을 설치하여 수위를 조절할 수 있도록 하였으며 수리모형실험에 이용되는

Table 1. Scale and Variable by Law of Froude Similarity

Variable	Scale	Length scale equation	Scale change
Length	L_r	L_r	1/30
Area	A_r	L_r^2	1/900
Time	T_r	$L_r^{1/2}$	1/5.48
Velocity	V_r	$L_r^{1/2}$	1/5.48
Acceleration	A_r	1	1
Discharge	Q_r	$L_r^{5/2}$	1/4,929
Froude	F_r	L_r^3	1/27,000
Manning's n	n_r	$L_r^{1/6}$	1/1.76

물은 순환방식은 저수조->양수펌프->고수조->유량공급장치-> 실험모형->귀환수로->저수조의 순서로 물이 순환되도록 설계하였다.

3.2 실험조건 및 방법

본 수리모형실험의 대상구간은 백석천에 위치한 신천교부터 백석교 만곡부에 설치된 경사형 낙차공의 흐름특성을 검

(a) observed point

(b) Velocity Meter (model 2000 flow-mate)

(c) Digital Point gage

Fig. 2. Monitoring Sites and Observed measurement

Table 2. Condition of Modeling Discharge and Water Surface Elevation

Scale	Frequency	Discharge (m ³ /s)		Starting water surface elevation (EL.m)
		Prototype	Model	
$L_H = 1/30$	100 year	275	0.056	43.92
$L_v = 1/30$	20year	230	0.047	43.45

토하고자 한다. 하천의 흐름방향을 기준으로 왼쪽이 좌안 오른쪽이 우안으로 구분하였으며 수위 및 유속 관측지점은 Fig. 2(a)와 같이 낙차공 상하류 구간은 횡단면별 4개 지점에 대하여 총 36개 지점을 측정하였다. 실험조건은 100년 빈도와 20년 빈도에 대하여 실시하였으며 유량조건과 기점수위는 Table 2와 같다. 유속측정은 1차원 유속계(Model 2000 Flow-mate)를 이용하였으며 수심측정은 디지털 포인트게이지를 사용하였다(Fig. 2(b), (c)).

4. 수리모형실험결과 및 분석

본 실험은 만곡부 하천에 설치된 경사형 낙차공에 빈도별 홍수량에 따른 하천구간 및 구조물주변의 흐름특성을 검토하

Table 3. Statistical indices used to evaluate the model accuracy

Statistical index	Equation	Desired value
Coefficient of determination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_0 - Q_f)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_0 - Q_{ave})^2}$	1
Absolute mean error	$AME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_f - Q_0 $	0
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Q_f - Q_0]^2}$	0

* Q_0 : Observations, Q_f : Simulations, Q_{ave} : Mean of observations, N : Total number of observations

고자 한다. 실험 적용 홍수량은 하천의 설계빈도인 100년 빈도에 대하여 실시하였으며 홍수량 변화에 따른 수리특성을 파악하기 위해 20년 빈도홍수량에 대해서도 실험을 수행하였다.

4.1 모형검증

제작된 수리모형의 검증을 위해 백석천 100년 빈도조건의 HEC-RAS 수위와 관측수위를 비교하고 통계학적 방법인 결정계수(R^2), 절대평균오차(AME), 평균제곱오차의 평방근(RMSE)을 통해 모형의 정확성을 검증하고자 한다(Table 3). 모형검증에서 1차원 모델링에서 분석되지 않는 경사형 낙차공이 위치한 측점 No.52부터 No.54구간은 검증단면에서 제외하였다.

Fig. 3은 HEC-RAS와 관측된 수위를 비교한 그래프로써 낙차공을 제외한 단면에서 유사하게 관측결과가 나타났으며 통계지표인 R^2 는 0.998, AME는 0.13, RMSE는 0.16으로 매우 높은 상관관계를 가지고 있어 구축된 수리모형이 적합하다고 판단된다.

4.1 100년빈도 홍수량의 흐름특성

100년 빈도 홍수량 275 m³/s과 기점수위 EL.43.92 m에 대하여 수리모형실험을 실시하였으며 만곡부에 설치된 경사형 낙차공의 수리특성을 1차원 HEC-RAS와 수리모형실험을 통해 비교검토 하였다(Table 4). 100년 빈도 홍수량조건에서 관측된 수위는 EL.43.0 m ~ EL.48.0 m, 유속은 -1.05 m/s ~ 8.5 m/s의 범위로 측정되었다(Fig. 4). Fig. 5는 HEC-RAS와 관측

Fig. 3. Verification Result of HEC-RAS and Observed

(a) Water Surface Elevation (EL.m)

(b) Velocity (m/s)

Fig. 4. Water Surface Elevation and Velocity for 100 year Frequency Flood by Experiment

Table 4. Observed data for 100 year Frequency Flood (unit : m, %)

No		Right bank	Right side of main channel	Left side of main channel	Left bank	Average ¹⁾	HEC-RAS ²⁾	1)/2)
Depth (m)	50	2.14	2.05	2.08	2.11	2.23	2.10	93.9
	51	2.14	2.07	2.09	2.15	2.10	2.30	91.8
	52	1.48	1.20	1.45	1.73	1.50	2.25	65.1
	53	1.32	1.07	1.29	1.54	1.30	2.46	53.0
	54	1.46	1.26	1.28	1.58	1.40	2.68	52.0
	55	2.80	2.67	2.93	3.13	2.90	2.79	103.3
	56	3.15	2.99	2.99	3.07	3.00	2.77	110.1
	57	3.29	2.97	2.92	2.90	3.00	2.79	108.3
	58	2.83	2.67	2.95	3.14	2.90	2.80	103.4
Velocity (m/s)	50	3.23	4.43	4.52	4.14	4.08	3.83	106.6
	51	3.60	5.34	4.82	3.60	4.34	4.10	105.9
	52	4.64	6.94	6.57	4.97	5.78	3.98	145.2
	53	5.13	7.47	7.77	5.93	6.58	3.85	170.8
	54	2.91	7.33	8.34	6.25	6.21	3.71	167.3
	55	-0.42	3.42	6.55	4.81	3.59	3.57	100.5
	56	-0.99	0.21	2.88	4.57	1.67	3.55	46.9
	57	-1.03	-0.08	3.27	4.95	1.78	3.52	50.5
	58	-0.86	0.51	3.79	5.83	2.32	3.50	66.2

* 1) Average observed data, 2) Water Surface Elevation

Fig. 5. Cross Sectional Depth for 100 year Frequency Flood

자료를 비교한 것으로 낙차공 상류 No.50 ~ 51과 하류 No.55 ~ 58에서의 수심관측치와 HEC-RAS의 수심은 3 ~ 10% 내외의 차이가 발생하였으며 낙차공 구간인 No.52 ~ 55에서는 약 35~48%의 수심저하가 발생하였다. 가장 큰 수심차가 발생한 단면은 낙차공이 종료되는 No.54으로 관측치가 HEC-RAS보다 48% 낮은 수심이 관측되었으며 만곡부 흐름특성으로 좌안이 우안보다 10% 높게 관측되었다. Fig. 6은 단

면별 유속특성을 비교한 것으로 No.50 ~ 51의 유속관측치와 HEC-RAS의 유속범위는 5%이내에서 유사하게 관측되었으나 낙차공 구간인 No.52 ~ 55에서는 관측치가 HEC-RAS보다 145 ~ 167%이상 빠른 유속이 측정되었다. 그리고 No.55 ~ 58에서는 -1.02 m/s ~ 6.55 m/s의 유속이 측정되어 빠른 유속과 배수위의 영향에 따른 우안에서 사수역이 발생하였다. 가장 큰 유속차이가 발생한 단면은 No.54으로 HEC-RAS의 유속

Fig. 6. Cross Sectional Velocity for 100 year Frequency Flood

보다 167% 빠른 유속이 관측되었으며 하도부분에서는 약 200%이상의 빠른 유속이 관측되었다. 또한 만곡부의 흐름특성으로 인해 우안보다 좌안의 유속이 약 2배 빠르게 관측되었다.

4.2 20년빈도 홍수량의 흐름특성

본 하천은 100년빈도로 계획되어있으나 비교측면에서 20년 빈도 홍수량에 의한 흐름특성을 분석하였다. 20년 빈도의 홍수량 230 m³/s와 기점수위 EL.43.45 m에 대하여 실험을 실시하였으며 관측된 단면별 수위는 EL.42.5 m~EL.47.5 m, 유속은 -0.9 m/s~9.1 m/s의 범위로 측정되었다(Fig. 7). Fig. 8은 HEC-RAS와 관측자료를 비교한 것으로 낙차공 상류 No. 50~51와 하류 No. 55~58에서의 수심관측치와 HEC-RAS의 수심은 6~10%내외의 차이가 발생하였으며 낙차공 구간인 No. 52~55에서는 28~40%의 수심저하가 발생하였다. 가장

큰 수심차가 발생한 단면은 No.54으로 관측치가 HEC-RAS보다 46.5% 낮은 수심이 관측되었으며 만곡부흐름특성으로 우안이 좌안보다 10% 높게 관측되었다. Fig. 9은 단면별 유속특성을 비교한 것으로 No. 50~51의 유속관측치와 HEC-RAS의 유속은 5%이내의 오차로 비슷하게 발생하였으나 낙차공 구간인 No. 52~55에서는 관측치가 HEC-RAS보다 135~152%이상 빠른 유속이 측정되었다. 그리고 No. 55~58에서는 -0.92 m/s~ 6.55 m/s의 유속이 측정되었다. 가장 큰 유속차이가 발생한 단면은 No.54으로 HEC-RAS의 유속보다 관측된 단면평균유속은 158% 빠른 유속이 관측되었으며 만곡부의 흐름특성으로 인해 좌안이 우안보다 1.9배 빠른 유속이 관측되었다.

4.3 고찰

본 연구대상유역은 만곡부에 위치한 경사형 낙차공으로 평

Fig. 8. Cross Sectional Depth for 20 year Frequency Flood

Fig. 9. Cross Sectional Velocity for 20 year Frequency Flood

균 하폭이 약 40 m인 사다리꼴 단면의 하천으로 유량의 변화에 따른 흐름특성을 비교하기 위해 100년과 20년 빈도 홍수량에 대하여 실험하였다. 실험결과 경사형 낙차공이 위치한 No.52부터 No.54 단면에서 관측된 수심은 HEC-RAS보다 46.5%~48.0% 작게 관측되었으며 유속은 HEC-RAS보다 158%~167% 크게 관측되었다. 그리고 만곡부의 흐름특성으로 인해 우안보다 좌안의 수심은 약 10%, 유속은 약 2배정도 크게 관측되었다. Fig. 10(a)는 1차원 모델인 HEC-RAS

와 관측데이터의 차이가 가장 큰 단면인 No.54의 수심 및 유속관계를 나타낸 그림이다. 연구결과 좌우안의 편수위로 인한 제방월류보다는 유속차이로 인한 제방붕괴의 위험성이 크게 관측되었다. 수심의 경우 좌안이 우안보다 10%정도 크게 관측되었지만 제방의 여유고를 고려한다면 제방월류에 대한 위험은 미미할 것으로 판단된다. 그러나 유속의 경우 좌안이 우안보다 약 2배 빠른 유속이 관측되어 좌안이 우안보다 강도 높은 제방설계가 계획되어야 한다. 또한 Fig. 10(b)과 같

(a) Compared with HEC-RAS and Observed data (b) Velocity at end of drop structure
Fig. 10. 100 year Frequency Flood of Depth and Velocity

이 낙차공 하류단면에서는 만곡부의 빠른유속과 배수위영향으로 인해 우안의 시수역이 발생하였다.

본 연구에서 제시한 연구결과는 만곡부에 위치한 경사형 낙차공의 흐름특성에 대한 연구로서 수리모형실험이 가지고 있는 제한적인 실험조건으로 다양한 변화에 따른 정량적인 산정식을 제시하기에는 어려움이 있다. 그러나 본 연구와 같은 만곡부에 위치한 수리구조물의 흐름특성의 기초정보로 사용될 것으로 기대된다.

5. 결 론

기존 연구된 낙차공 및 만곡하천에 대한 연구는 직류하천에 위치한 낙차공의 큰 낙차에서 발생하는 세굴량이나 세굴 보호공에 대한 실험과 만곡하천에서 발생하는 흐름특성을 2차원 및 3차원에 대해 연구하였다. 그러나 하천의 안전성을 위한 구조물은 하천환경을 고려한 새로운 구조물이 제시되고 있으며 구조물의 설치가 직류하천에서만 설치될 수 없는 실정으로 본 연구에서는 만곡부에 위치한 경사형 낙차공에 대한 영향을 연구하고자 한다.

본 연구에서는 1차원 모델인 HEC-RAS와 수리모형실험을 이용하여 만곡부에 위치한 경사형 낙차공의 수리특성분석을 비교·검토 하였다. 연구대상구간은 백석천에 위치한 신천교부터 백석천구간에 대하여 분석을 실시하였으며 계획홍수량 100년과 20년 빈도에 대하여 분석을 실시하였다.

1차원 모델인 HEC-RAS와 수리모형실험의 빈도별 비교결과는 단면별 수심과 유속을 이용하였다. 경사형 낙차공을 제외한 단면에서는 빈도별 1차원 HEC-RAS 수심과 수리모형실험 통해 관측된 수심결과는 3~10%의 차이가 발생하였다. 반면 만곡부의 위치한 경사형 낙차공 단면 No. 52부터 55에서는 HEC-RAS보다 28~48%의 수심저하가 발생하였으며 만곡부의 편수위로 좌안이 우안보다 높게 분석되었다. 경사형 낙차공 상류의 HEC-RAS와 수리모형실험의 측점별 유속은 5% 이내의 오차가 발생하였으며, 만곡부에 위치한 경사형 낙차공의 유속은 HEC-RAS보다 135~167%의 빠른 유속이 발생하였다. 또한 우안보다 좌안에서 약 2배의 빠른 유속이 관측되었으며, 낙차공 하류단면에서는 만곡부의 빠른유속과 배수위영향으로 인해 우안의 시수역이 발생하였다.

본 연구에서는 1차원 모델링에서 분석되지 않는 만곡부 흐름특성을 수리모형실험을 통해 비교분석하여 만곡부에 위치

한 구조물의 특성을 제시하고자 하였으며 좌우안의 편수위 및 유속의 분석을 2차원이나 3차원 모형과 추가적으로 비교한다면 보다 유효한 결과가 도출될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 한서대학교 교내연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Ahn, S.S., Jung, D.J., Lee, S.I., and Kim, W.S. (2012) Study on the Flow Characteristics at Natural Curved Channel by 2D and 3D Models, *Journal of the Environmental Sciences*, KENSS, Vol. 21, No. 4, pp.471-478.
- Bormann, N.E. and Julien, P.Y. (1991) Scour Downstream of Grade-Control Structures. ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 5, pp. 579-594.
- Chan, Y.L., Bae, S.J., and Hong, K.J. (2003) Steep Stream on Energy and Bishop for Gabion Drop Structure, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 3, No. 4, pp. 47-52.
- Jung, J. W., Jung, H. S., Lee, J. S. and Yoon, S. E. (2000) An Analysis of the Flow Characteristics in Curved Channels Using RMA-2 Model, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 20, No. 4-B, pp. 479-489.
- Jung, S.H., Kang, J.G., and Yeo, H.G. (2008) An Experimental Study on Investigation of Effect by Installation of Filtering Layer on Downstream of Drop Structure, *KSCE Conference&Civil Expo 2008*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2936-2939.
- Kim, H.J., Kim, C.W., and Woo, H.S. (2003) The Effect that Stream of River-Cross Structure for Ecological development its alternative, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 51, No. 3, pp. 42-58.
- Park, K.B. and Lim, K.S. (2007) Analysis of Two Dimensions Hydraulic Characteristic in Steep Meandering Channel, *Journal of the Environmental Sciences*, KENSS, Vol. 16, No. 9, pp. 1039-1049.
- Pagliara, S. and Chiavaccini, P. (2006) Energy Dissipation on Block Ramps, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 1, pp. 41-48.
- Rice, C.E., Kadavy, K.C., and Robinson, K.M. (1998) Roughness of loose rock riprap on Steep Slopes, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 179-185.
- Schokiltsh, A. (1932) Kolkbildung unter Überfallstrahlen, *Die Wasswirtschaft*, Vol. 24, pp. 341-343(in German).

Sim, K.O., Lee, J.H., Huh, K.H., and Kim, J.Y. (2004) Analysis of the Characteristics of Damaging Factors in Curved Channel - Focus on the Namdae Stream in GangNeung City-, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 4, No. 4, pp. 13-19.

Song, J.W., Park, Y. J. and Lee, Y. H. (1994) Characteristics of Channel Bend Reach and Shape of Cross-Section, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 14, No. 5, pp. 1191-1197.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2010) HEC-RAS River Analysis System User's Manual 4.1.

Yeo, C.G. (2011) The Prediction of Scouring in the Downstream of Inclined and Stepped Weirs, Ph.D. dissertation, Hongik University

© Received March 11, 2013

© Revised March 13, 2013

© Accepted May 22, 2013