

Riprap Weir 효과 분석을 위한 2차원 수치해석 모형의 적용

김상호^{1*}

¹상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과

Application of 2 Dimensional Numerical Model for Analysis of Riprap Weir Effect

Sang-Ho Kim^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Sangji University

요약 하천 만곡부에서는 높은 에너지의 편향적 흐름으로 인하여 제방침식 및 유사이송으로 하도변동을 야기하고 있는데 이러한 현상들은 제방의 불안정을 초래하고 인접 도로와 토지, 하천변 구조물에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 본 연구에서는 제방 침식과 하도변동을 방지할 수 있는 Riprap Weir를 S자 만곡수로에 설치하고, 만곡부에서의 수리학적 흐름특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 이차원 CCHE2D 모형을 이용하여 실험하도를 구축하고 Riprap Weir의 유무에 따른 수리특성 분석을 실시하였다. 이를 통해 Riprap Weir의 설치간격에 따른 만곡부 내측과 외측에서의 수리특성과 보 인근의 흐름특성을 분석하였다.

Abstract At the bends of a river, the deflected flow of high energy erodes the embankment and transports sediment, ultimately changing the river's course. Such phenomena lead to instability of the embankment and may cause serious problems for nearby roads, land, or riverside structures. This study intends to analyze the characteristics of hydraulic flow at S-shaped bends after the installation of Riprap Weirs designed to prevent changes in a river's course and embankment erosion. An experimental channel was constructed by a two-dimensional CCHE2D model, and analyzed the characteristics of hydraulic flow with and without the Riprap Weirs. Also, the characteristics of hydraulic flow at the inner and outer sides of river bends and at points near reservoirs were analyzed, depending on the intervals between the Riprap Weirs.

Key Words : CCHE2D Model, Meandering Channel, Riprap Weir

1. 서론

이상기후의 영향으로 예측하지 못한 많은 양의 호우가 빈번히 발생하며, 그로 인한 상습적인 홍수피해가 발생하고 있다. 엄청난 양의 폭우로 인한 홍수는 주택이 침수되고 산사태 및 도로가 유실되는 등의 많은 인명과 재산 피해를 유발하게 된다. 우리나라와 같이 산악지역이 많아 하천 유역의 경사가 급한 지역에서 홍수가 발생하면 수위가 급격히 상승하고 흐름의 운동량 증가는 제

방과괴의 원인이 될 수 있으며, 특히 하천의 직선구간보다 만곡부에서 더욱 위험성이 높아진다. 산지가 많은 우리나라에서는 사행하천이 많이 발달하였으며, 이러한 사행하천의 만곡부 외측에서는 높은 에너지의 흐름으로 인하여 제방침식과 유사이동 등의 문제를 일으킨다. 하천제방 파괴에 대한 주요 원인은 월류 및 침식에 의한 파괴이며, 이 중 침식은 체체를 불안정하게 만들며 계속 진행될 경우 제방의 파괴를 야기하게 된다. 만곡부에서의 수리특성으로는 원심력과 이차류 등이 발생할 수 있

이 논문은 2012년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것이며, 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Sang-Ho Kim(Sangji Univ.)

Tel: +82-33-730-0476 email: kimsh@sangji.ac.kr

Received January 12, 2015

Revised (1st February 6, 2015, 2nd February 11, 2015)

Accepted February 12, 2015

으며, 이러한 흐름특성은 수위상승 및 유속증가로 인하여 체제의 안정성을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 만곡부에서 발생할 수 있는 제방의 위험요소를 저감시킬 수 있는 피해저감대책을 마련할 필요가 있다.

하천 제방보호를 위한 여러 가지 공법들과 수공구조물들에 대한 중요성이 높아지는 가운데 수제는 이를 대표하는 수공구조물이라 할 수 있다. 또한 생태하천에 대한 중요성이 대두되면서 콘크리트와 같은 인공구조물 보다는 자연재료를 이용한 구조물에 관심이 높아지고 있다. 수제는 유속증가로 인한 제방침식을 방지할 수 있으며, 유사이송에 대한 문제점도 개선할 수 있다. 국내에서는 강준구 등(2005)이 수제선단의 흐름변화와 수제하류부의 재순환영역에 대한 고정상 실험을 실시하여 실험식을 제안하였으며[1], 직선 실험수로에서 수제 간격에 따른 흐름특성 분석을 위해 강준구 등(2006)은 수리모형실험을 실시하였으며, 박효길 등(2008)은 이차원 수리해석모형을 적용하였다[2, 3]. 국외에서는 Richardson and Simons(1974), Copeland(1983) 등이 수제의 설치 간격에 따른 수제의 길이와 각도에 관한 연구를 수행하였으며[4, 5], FHWA(1985)에서는 개개의 수제에 의해 보호되는 수로제방의 길이를 흐름 확장각에 의해 제시하였다[6]. 하지만 만곡수로에서 수제설치에 따른 흐름변화에 대한 수리 및 수치해석 연구는 매우 미진한 실정이다.

본 연구에서는 S자 모형의 만곡수로에 대해 제방침식과 하도변동을 방지할 수 있는 Riprap Weir를 설치하였을 경우 만곡부의 수리특성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 Riprap Weir 설치 전과 후의 실험 하도를 수치해석 모형을 이용하여 구축하였으며, 다양한

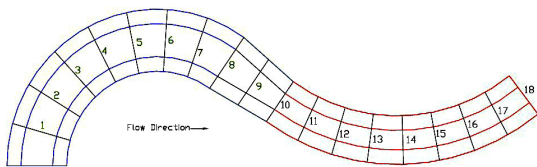
유량조건과 Riprap Weir 설치 간격에 따른 수리특성을 실측자료와 비교 검토하였으며, 이를 통해 Riprap Weir의 간격에 따른 수리특성의 변화를 살펴보고자 하였다.

2. 실험하도와 수치모형

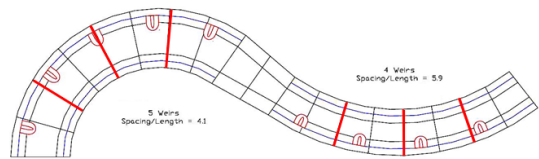
2.1 실험하도 제원

Riprap Weir에 대한 설치효과를 살펴보기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같은 Heintz[7] 연구의 S자형 만곡 하도와 실험자료를 이용하였다. 만곡하도에 대한 제원은 Table 1에서 제시하였으며, 하도의 단면은 1:3 경사의 사다리꼴 단면이며, 하도경사는 약 0.09%로 형성하였다. 조도계수는 실험하도의 경우 0.018, Riprap Weir의 경우 0.045를 적용하였다. 표에서 Upstream과 Downstream은 상부 만곡부에서 하부 만곡부까지 매끄럽게 흐름을 전달하기 위하여 각각의 만곡부를 분리시키는 천이부분을 중심으로 상류와 하류 구간을 의미하고 있다.

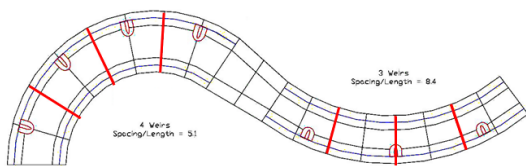
Table 2는 만곡하도의 상류와 하류구간에 설치된 Riprap Weir의 간격비를 나타내고 있는데, 간격비는 보 사이의 거리를 보의 길이(L_w)로 나눈 값을 의미한다. Fig. 2~4는 Riprap Weir를 여러 가지 간격으로 설치한 실험하도를 나타내고 있으며, 하도에 표시한 지점은 모의결과를 실측자료와 비교하기 위한 검증지점을 나타내고 있다. Table 3과 Fig. 5는 보에 대한 세부 제원을 나타내고 있으며, Fig. 6은 만곡 실험하도에 Riprap Weir를 설치한 사진과 Riprap weir 간격별로 구축된 하도망을 나타내고 있다. 만곡하도에 대한 실험하도는 콜로라



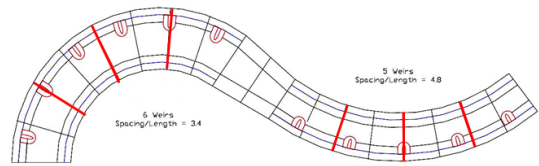
[Fig. 1] Model Layout in Plan View (Type #0)



[Fig. 2] Riprap Weir Test (Type #1)



[Fig. 3] Riprap Weir Test (Type #2)



[Fig. 4] Riprap Weir Test (Type #3)

도 주립대학의 공학연구센터(ERC) 내 수리실험실에서 Heintz[7] 연구를 위해 Fig. 6(a)와 같이 구축되었으며, Fig. 1의 각 축선별로 7개의 계측지점에 대해 피에조메터를 설치하여 수심과 수위를 측정하였고, 음파도플러 유속계(ADV: Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 유속을 측정하였다.

[Table 1] Geometry Characteristics of S-Curved Channel

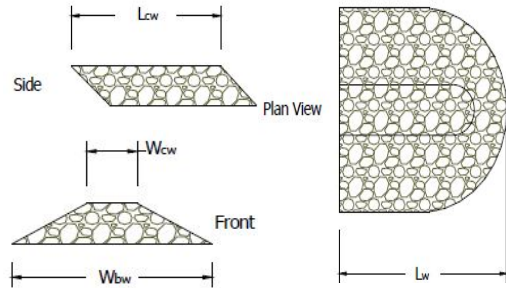
Reach	Top Width	Radius of Curvature	Bend Angle	Relative Curvature	Channel Length
	(m)	(m)	(°)	r/b	(m)
Upstream	5.9	11.81	125	2.02	25.8
Downstream	4.6	20.06	73	4.39	25.5

[Table 2] Weir Spacing Ratios(Ratio / # of Weirs)

Type #	Upstream	Downstream
1	4.1 / 5	5.9 / 4
2	5.1 / 4	8.4 / 3
3	3.4 / 6	4.7 / 5

[Table 3] Weir Dimensions

	Upstream	Downstream
L _{cw}	1.24 m	0.91 m
L _w	1.49 m	1.16 m
W _{cw}	0.30 m	0.30 m
W _{wb}	1.22 m	1.22 m
L _r =L _w /T _W	0.267	0.267



[Fig. 5] Bendway Weir Schematic

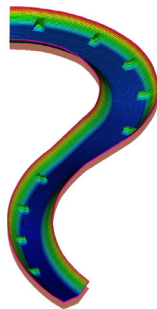
2.2 수치모형

본 연구에서 선정한 2차원 수치해석 모형인 CCHE2D 모형은 미국 미시시피 공과대학의 NCCHE(National Center for Computational Hydro-science and Engineering)에서 개수로의 비정상 난류흐름과 유사모의를 위해 개발된 수치해석 모형이며, 모의구간의 지형에 대한 하도망을 구현하는 CCHE2D Mesh Generator 프로그램과 구축한 하도망에 계산을 위한 입력조건과 모의결과를 보여주는 CCHE-GUI 프로그램으로 구성되어 있다. CCHE2D 모형은 수심평균값을 이용한 2차원 동수역학적 유사이송모형으로서 천이류에 대한 지배방정식을 풀기 위해 Efficient Element Method(EEM)를 사용하였으며, 비정상 흐름의 이동경계조건을 다루기 위해 마른영역 기법을 사용하였다.

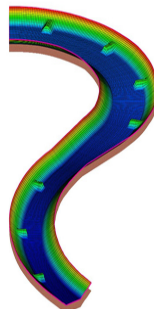
CCHE2D모형은 운동량 방정식과 연속방정식을 지배방정식으로 하고 있다. Navier Stokes방정식에 변동속도성분(fluctuation)과 평균속도성분으로 나누어 대입하면 레이놀즈방정식으로 표현할 수 있고, 3차원 레이놀즈



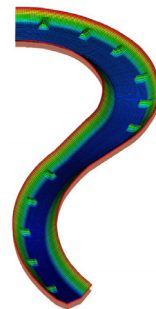
(a) Real Type



(b) Mesh Type #1



(c) Mesh Type #2



(d) Mesh Type #3

[Fig. 6] Construction of Riprap Weir

방정식을 연직으로 수심적분을 취하면 수심 적분된 2차원 난류흐름에 대한 운동량 방정식을 사용한다. 유사모의는 수심적분된 2차원 이송-확산방정식을 사용하며 하상변동은 유사연속방정식을 적용한다[8].

3. 모형의 적용

3.1 실험하도의 검증

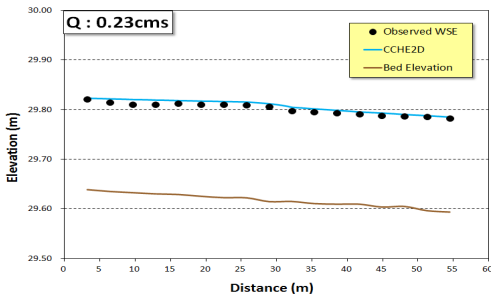
Riprap Weir가 설치된 만곡하도에 대한 2차원 수치 해석 모형인 CCHE2D 모형의 적용성을 살펴보기 위해 Riprap Weir가 설치되기 전의 하도망(Fig. 1)과 설치 후에 대한 하도망(Fig. 2~4)에 대한 수치 모의결과를 실측자료와 비교하였다. 이를 위해 적용된 유량은 0.23, 0.34, 0.45, 0.57 m³/sec와 같은 4가지 유량이 적용되었으며, Fig. 7과 8은 Riprap Weir가 설치되기 전의 하도에 대한 수치해석 결과 중 유량이 0.23과 0.57 m³/sec인 경우 전체 대상구간의 횡방향 평균 수위와 유속을 Fig. 1의 각 측선에서의 실측자료와 비교한 결과를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 상류 만곡부와 하류 만곡부의 가운데 위치한 천이구간을 중심으로 상·하류 만곡

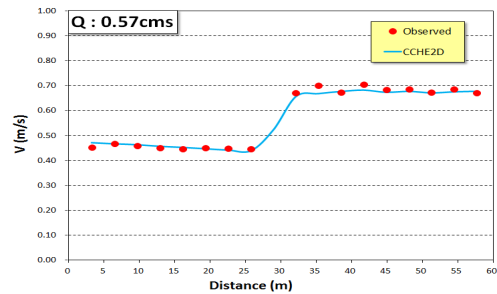
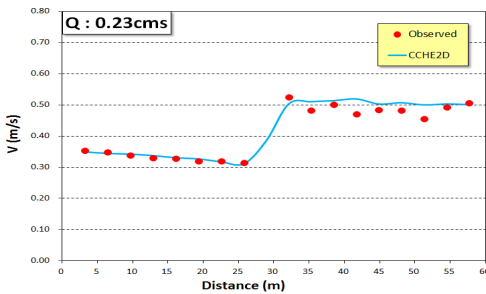
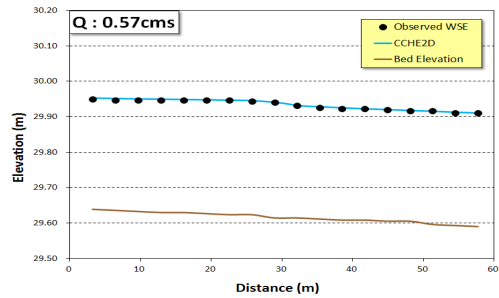
부에서의 수위와 유속 차이가 발생하고 있었으며, 하류 만곡부에서 수위가 조금 더 낮고 유속이 빠른 것으로 나타났다. 수위와 유속에 대한 모의결과는 그림에서 보는 바와 같이 실측자료와 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 9~14는 만곡하도에 보가 설치되기 전인 Type #0과 보의 설치간격에 따른 Type #1~#3에 대한 주요 횡단면 #2, 4, 6, 12, 14, 16에서의 수위와 유속에 대한 모의결과를 유량 0.23과 0.45 m³/sec인 경우에 대해 실측자료와 비교하여 나타내고 있는데, 모의조건에 따라 일부 실측자료가 누락되었지만, 전반적으로 모의결과가 실측자료와 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히, Riprap Weir가 설치된 만곡부의 외측부에서 유속이 급감한 것을 확인할 수 있으며, 이에 대한 모의결과도 실측자료와 비교적 잘 일치하고 있었다.

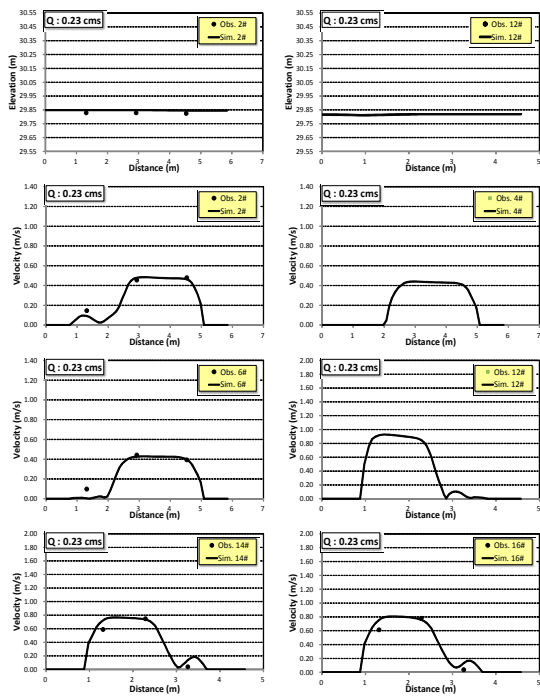
Fig. 15는 만곡부에 설치된 Riprap Weir로 인한 보 인근의 흐름특성을 분석하기 위한 관측지점을 나타내고 있으며, Fig. 16은 만곡수로의 흐름방향을 기준으로 보 상류측 관측점(Up), 보 하류측 관측점(Down) 그리고 보의 선단부 관측점(Tip)에서 해석된 유속을 관측자료와 함께 나타낸 그림이다.



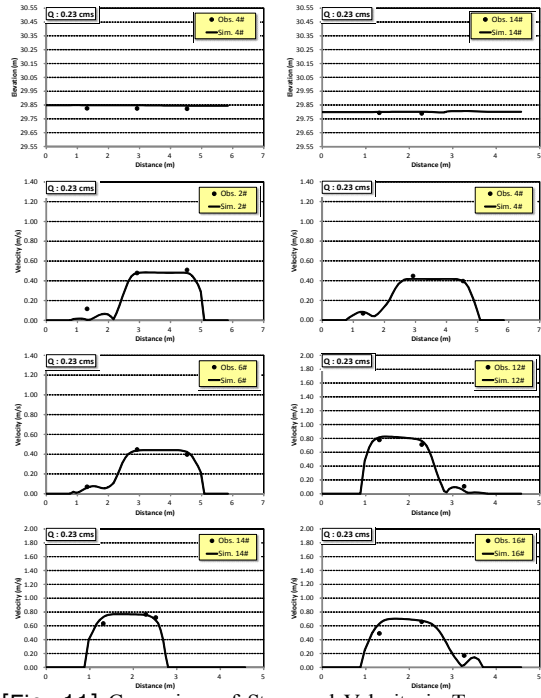
[Fig. 7] Comparison of Stage in Longitudinal Direction(Type #0)



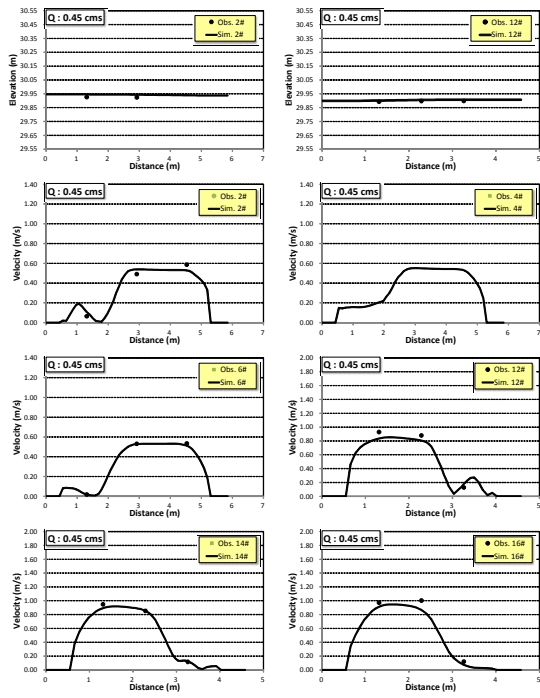
[Fig. 8] Comparison of Velocity in Longitudinal Direction(Type #0)



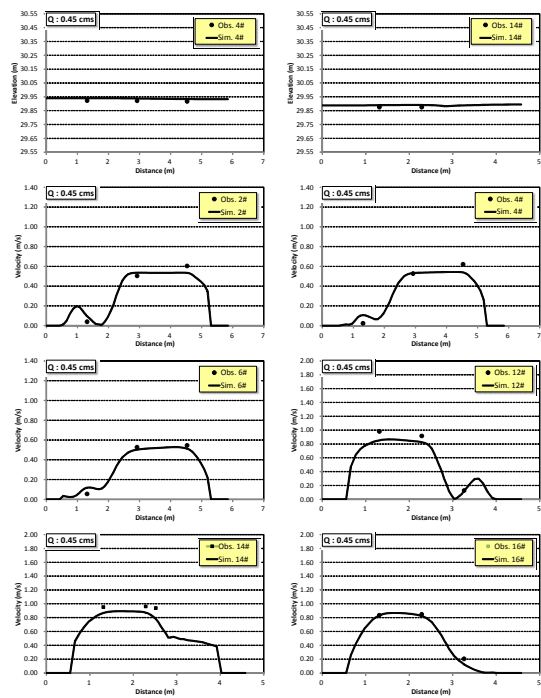
[Fig. 9] Comparison of Stage and Velocity in Transverse Direction for $Q = 0.23$ cms of Type #1



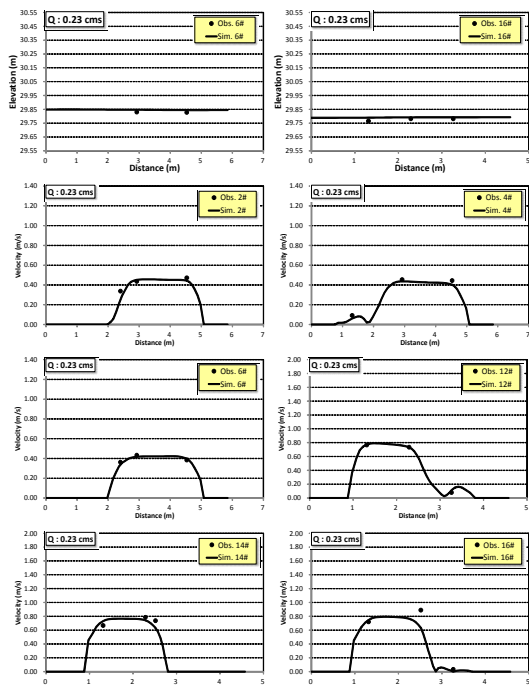
[Fig. 11] Comparison of Stage and Velocity in Transverse Direction for $Q = 0.23$ cms of Type #2



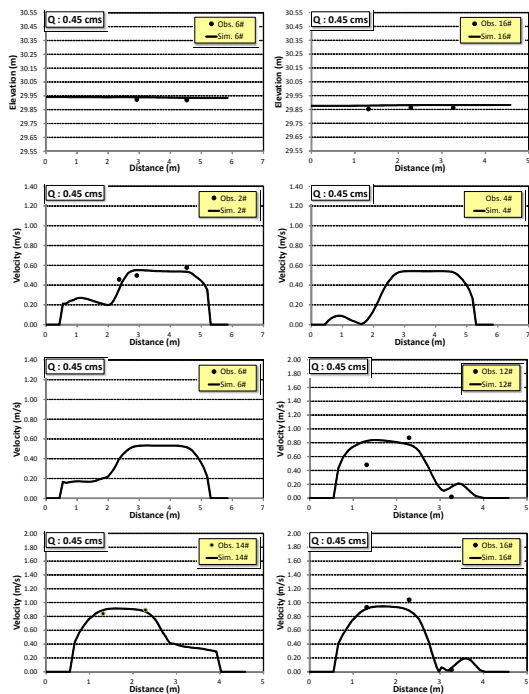
[Fig. 10] Comparison of Stage and Velocity in Transverse Direction for $Q = 0.45$ cms of Type #1



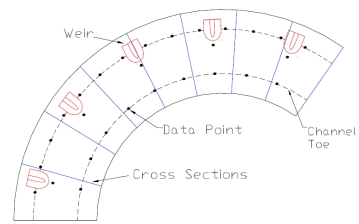
[Fig. 12] Comparison of Stage and Velocity in Transverse Direction for $Q = 0.45$ cms of Type #2



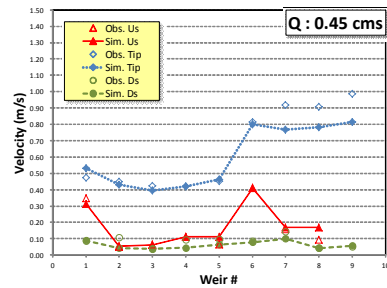
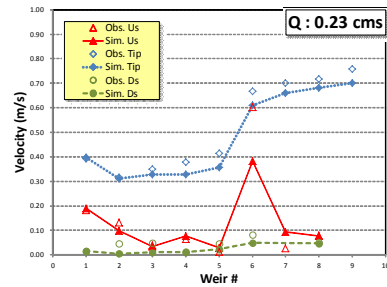
[Fig. 13] Comparison of Stage and Velocity in Transverse Direction for $Q = 0.23$ cms of Type #3



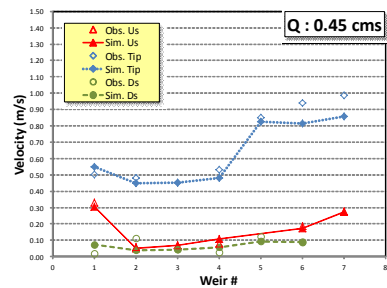
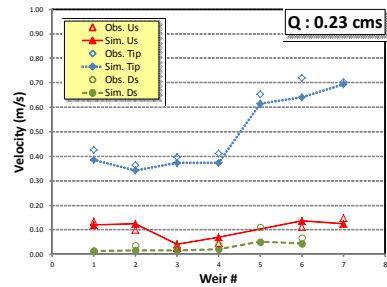
[Fig. 14] Comparison of Stage and Velocity in Transverse Direction for $Q = 0.45$ cms of Type #3



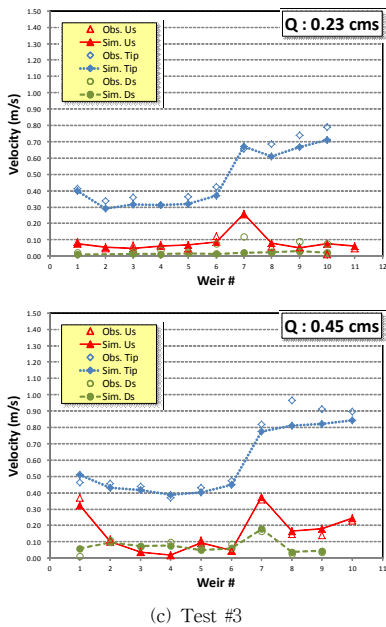
[Fig. 15] Data Points around Riprap Weirs



(a) Test #1



(b) Test #2



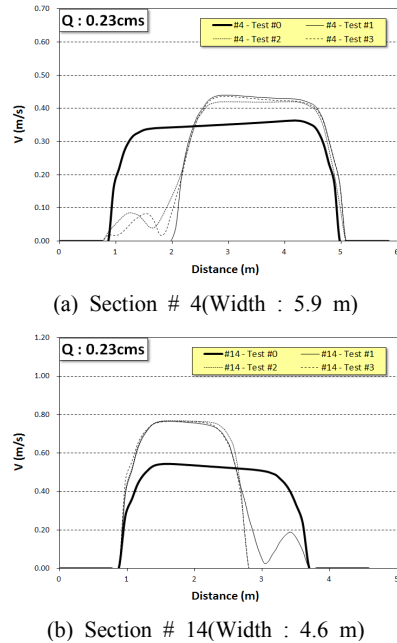
(c) Test #3
[Fig. 16] Comparison of Velocity around Weirs

모의 결과 만곡수로의 중심부와 가까운 위치인 선단부 지점에서는 빠른 유속이 발생하고 있었으며, 보의 상류 지점과 하류 지점에서는 보의 흐름 방해로 인해 매우 낮은 유속이 형성되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 2차원 모형을 이용한 보 인근 지점에서의 수치모의 결과는 전반적으로 실측자료와 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.

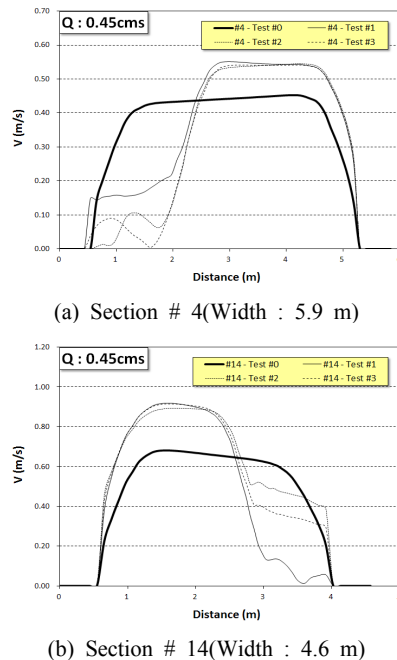
3.2 하도흐름 변화 분석

Riprap Weir 설치에 따른 만곡하도에서의 흐름변화를 살펴보기 위해 만곡하도에 Riprap Weir를 설치하기 전 하도흐름과 Riprap Weir 설치 간격별 하도흐름에 대한 변화를 살펴보았다. Fig. 17~18은 상류단에서의 유량이 0.23 m³/s와 0.45 m³/s일 경우 상류 만곡부와 하류 만곡부의 만곡 중심부에 해당하는 #4와 #14 횡단면에 대한 유속을 모의 조건별로 비교한 그림이다. 그림 (a)의 지점 #4는 상류 만곡부의 중심부에 위치한 횡단면의 유속을 나타내고 있는데, 보가 만곡부의 외측인 좌측 경사면에 설치됨에 따라 그림의 좌안측 유속이 보 설치로 인해 급격히 감소하였으며, 중심부와 우안측에서는 보로 인해 흐름이 만곡부의 내측으로 몰림에 따라 수위가 더 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 (b)의 지점 #14는 하류 만곡부의 중심부에 위치한 단면으로 보가 외측인 우측 경사면에 설치됨에 따라 우안측 유속이 급격히 감소

하였으며, 만곡부의 중심부에서 좌안측에 해당하는 유속이 더 증가한 것을 확인할 수 있다.

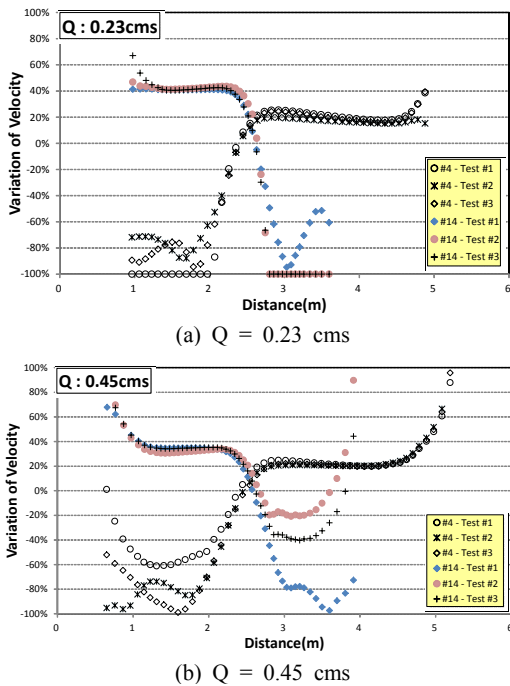


(a) Section # 4(Width : 5.9 m)
(b) Section # 14(Width : 4.6 m)
[Fig. 17] Comparison of Velocity at Transverse Sections for Discharge 0.23 m³/s



(a) Section # 4(Width : 5.9 m)
(b) Section # 14(Width : 4.6 m)
[Fig. 18] Comparison of Velocity at Transverse Sections for Discharge 0.45 m³/s

이와 같은 Riprap Weir의 간격에 따른 유속변화량을 자세히 살펴보기 위해 보가 설치되기 전의 만곡하도에서의 유속을 기준으로 만곡수로의 중심부에 위치한 #4와 #14 단면의 유속을 대상으로 보의 설치 간격에 따른 유속의 변화율을 Fig. 19에 도시하였다. 그림에 대한 분석은 주수로부의 중심부와 양안 끝단에 대해 검토하였는데, 상·하류 구간에 대한 수로의 중심부는 상류구간은 2.92 m, 하류구간은 2.28 m이며, 주수로부의 좌안과 우안 끝단은 상류구간은 1.35 m/4.49 m, 하류구간은 1.37 m/3.21 m 지점이다.



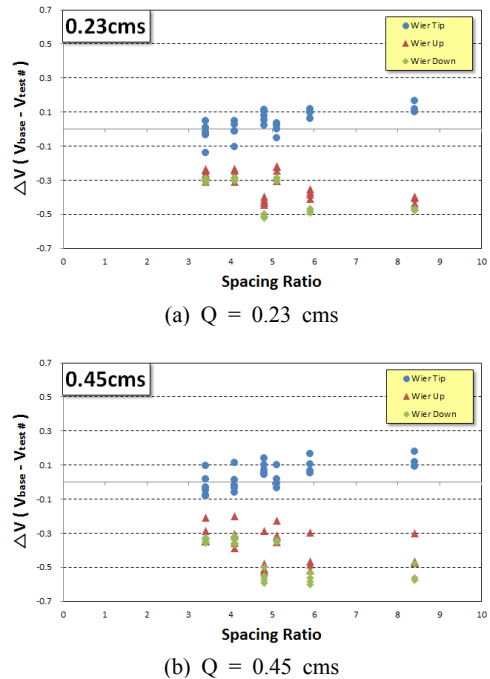
[Fig. 19] Variation of Velocity for Test Cases with Test #0

실험하도의 유량이 0.23 m³/s일 때 하도의 중심부에서는 유속은 약 19.6 ~ 43.1 % 증가하였다. 보가 설치된 외측부에서는 상류와 하류구간에서 각각 76.4 %와 79.3 %까지 유속이 감소하였으며, 내측부에서는 상류구간에서는 15.2 ~ 17.9 %, 하류구간에서는 41.0 ~ 41.3 % 증가하여 상류구간보다 하류구간에서 유속의 증가폭이 더 큰 것으로 나타났다.

유량이 0.45 m³/s일 경우 하도의 중앙부분에서는 유속이 약 20.4 ~ 32.8 % 증가하였으며, 보가 설치된 외측부에서는 상류구간에서 60.8 ~ 92.7 %, 하류구간에서

19.7 ~ 78.5 %로 유속감소 범위가 비교적 크게 나타나고 있었다. 내측부에서는 상류구간에서 19.6 ~ 20.4 %, 하류구간에서는 30.5 ~ 34.7 % 증가하여 상류구간보다 하류구간에서 유속의 증가폭이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 20은 Riprap Weir 주변의 유속변화를 살펴보기 위해 보가 설치되기 전의 하도 흐름을 기준으로 설치 간격에 따른 유속의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 하도를 흐르는 유량규모에 상관없이 보의 선단부에서는 보의 간격이 클수록 유속이 작아지는 것으로 나타났으며, 보의 직상류와 직하류에서는 보의 간격이 클수록 유속이 증가하는 것으로 나타났다.



[Fig. 20] Variation of Velocity for Test Cases around Weirs

4. 결론

만곡수로에 대한 제방의 불안정을 야기하는 만곡부 외측의 빠른 유속을 저감시키기 위한 대책으로 만곡부 외측에 Riprap Weir의 설치를 통한 효과를 알아보고자 2차원 CCHE2D 모형을 이용하였다. Riprap Weir는 S자형 만곡수로에 여러 가지 간격으로 구성하여 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 만곡수로에 대한 2차원 수치해석 모형인 CCHE2D 모형의 적용을 위해 Riprap Weir 설치 전과 후로 구분하여 하도망을 구성하고, 모의결과를 실험자료와 비교하여 수치모형에 대한 검증은 실시하였다.
2. 만곡부 외측에 Riprap Weir 설치로 인해 하도의 중앙부에서는 유량이 0.23 m³/s일 때 유속이 약 19.6 ~ 43.1 %, 유량이 0.45 m³/s일 때 약 20.4 ~ 32.8 % 증가하는 것으로 나타났다.
3. 만곡부 외측부에서는 Riprap Weir의 설치로 인해 유속이 감소하였는데, 유량이 0.23 m³/s일 때 상하류구간에서 약 76.4 % 이상 감소하였으며, 유량이 0.45 m³/s일 때 19.7 ~ 92.7 % 범위로 감소하는 것으로 나타났다.
4. 만곡부 내측부에서는 유량이 0.23 m³/s일 때 유속이 약 15.2 ~ 41.3 %, 유량이 0.45 m³/s일 때 약 19.6 ~ 34.7 % 증가하는 것으로 나타났다.
5. Riprap Weir의 선단부에서는 보의 간격이 클수록 유속이 감소하였으며, 보의 직상하류 단면에서는 보의 간격이 클수록 유속이 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 만곡하도가 많은 우리나라 하천에 Riprap Weir 설치를 통해 하천 재해를 예방하고, 최적의 Riprap Weir 설계기준과 만곡부의 제방 및 하도 안정화에 대한 대책 마련에 기여하고자 한다.

Banks. Open File Report, Colorado State University Engineering, Research Center, Fort Collins, Colorado, February, 1974.

- [5] R. R. Copeland, Bank Protection Techniques Using Spur Dikes. Miscellaneous paper HL83-1, U. S. Army Engineer, Waterways Experiment Station, 1983.
- [6] FHWA, Design of Spur-type Streambank Stabilization Structures. U.S. DOT, FHWA, Rep. No. FHWA/RD 84/101, McLean, VA., 1985.
- [7] M. L. Heintz, "Investigation of Bendway Weir Spacing", Ph.D. Thesis, Colorado State University, 2002.
- [8] Korea Water Resource Association, "14th hydraulic workshop hand book." Korea Water Resources Association (in Korean), 2005.

김 상 호(Sang-Ho Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 경북대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 경북대학교 일반대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1999년 11월 ~ 2001년 8월 : 한국건설기술연구원 선임연구원
- 2001년 9월 ~ 현재 : 상지대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>

하천수리학, 수질모델링

References

- [1] J. G. Kang, H. K. Yeo, S. J. Kim, "An Experimental Study on Tip Velocity and Downstream Recirculation Zone of Single Groyne Conditions", J. of Korea Water Resources Association, pp. 143-153, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2005.38.2.143>
- [2] J. G. Kang, H. K. Yeo, Y. S. Roh, "An Experimental Study on a Characteristics of Flow around Groynes for Groyne Spacing", J. of Korea Society of Civil Engineering, pp. 271-278, 2006.
- [3] H. G. Park, S. F. An, H. K. Jee, S. T. Lee, "Characteristics of Two-Dimensional Flow for Optimal Interval of Groynes by Using Hydrodynamic Model", Proceeding of Korea Society of Civil Engineering, pp. 1689-1693, 2008.
- [4] E. V. Richardson and D. B. Simons, Spurs and Guide