

단일 횡수제 조건에 따른 선단부 유속과 재순환 영역에 대한 실험 연구

An Experimental Study on Tip Velocity and Downstream Recirculation Zone of Single Groyne Conditions

강 준 구* / 여 홍 구** / 김 성 중***

Kang, Joon Gu / Yeo, Hong Koo / Kim, Sung Jung

Abstract

Recently, the concern of groynes that provide us with various ecological environment and improvement of scenery near river as well as hydraulic improvement has greatly increased for naturalized river and ecological river restoration. However there is no adequate design guidelines in Korea. Furthermore there is lack of research for installation of groynes in Korea. Thus, in this study, we have conducted hydraulic modeling test for kinds of groyne and changes of permeability and made a study of the analysis for installation factor of groyne.

Experimental conditions were the fixed bed model for flow pattern of groyne tip and separation length about changes of groyne length and permeability. The Experiments were conducted to measure velocity and drift angle at groyne tip. The main study has measured the groyne tip velocity for a factor of scour and drift angle for velocity increase at center of channel. We have suggested the equation about groyne tip velocity rate(tip velocity/ approach velocity) and area rate(groyne area/ flow area). And In recirculation zone of groyne downstream, To study the basic data of groyne about installation interval has analyzed the change of separation length and incidence angle. We have suggested the equation about separation length rate(separation length/ groyne length), changes of permeability and installation angle.

keywords : groyne, recirculation zone, separation length, tip velocity

요 지

최근 들어 자연형 하천과 하천생태계 복원에 대한 관심이 증대되면서 수리학적 기능 외에, 다양한 생태환경을 제공하고 하안 부근의 경관을 개선하는 기능을 가는 수제에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 현재 국내에는 수제설치에 대한 설계지침이 충분치 않을 뿐 만 아니라 국내 수행된 연구 자료가 매우 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 수제 설계인자 해석을 위한 수리모형실험을 수행하였다.

실험조건은 수제선단 흐름변화와 수제하류부 재순환영역에 대한 고정상실험으로 수제길이와 투과율을 조절하여 수행하였다. 주요 분석은 수제 선단에서는 중앙부 유속증가와 세굴의 영향인자인 유속과 편향각을 측정하여 수제 선단유속비와 면적비에 대한 실험식을 제안하였다. 또한 수제하류부 재순환 영역에서는 수제 설치의 주요요인인 수제 간격의 기초 자료를 해석하기 위해 흐름분리 길이와 입사각의 변화를 분석하였으며 투과율과 수제 설치각에 대한 실험식을 제안하였다.

핵심용어 : 수제, 재순환영역, 흐름분리 길이, 수제선단유속

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 (e-mail: jgkang02@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 (e-mail: yeo917@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 (e-mail: jinx9482@kict.re.kr)

1. 서론

수제는 하천에서의 흐름 방향과 유속을 제어하여 하안 또는 제방을 유수에 의한 침식작용으로부터 보호하기 위해 호안 또는 하안 전면에 설치하는 구조물이다. 수제를 설치하는 목적은 하안 및 제방의 보호, 유로의 제어, 그리고 수환경의 개선 등을 들 수 있다. 최근 들어 자연형 하천과 하천생태계 복원에 대한 관심이 증대되면서 수리학적 기능 외에, 다른 수공구조물들과 비교하여 다양한 생태환경을 제공하고 하안 부근의 경관을 개선하는 기능을 가지는 수제에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 현재 국내에는 수제설치에 대한 설계지침이 충분치 않을 뿐만 아니라 국내 수행된 연구 자료가 매우 부족한 실정이다. 특히 수제의 주요 영향인자가 하천의 형태, 수문현상, 수리특성 등의 국지적인 원인이 지배적 이므로 모든 영향을 고려한 해석은 매우 힘든 실정이다.

기존의 국외 연구를 살펴보면 대부분 모래 하상에서 수제 선단부 국부세굴에 대해 이루어졌으며 몇몇 연구에서만 수제 하류부 재순환 영역에 대해 이루어졌다. 특히 수제 하류부 재순환영역은 수제설치를 위한 기본 설계인자(수제길이, 수제간격, 만곡적용 등)결정에 매우 중요한 인자로서 수제 조건에 대한 분석이 필요한 실정이다.

최초의 연구는 Francis 등(1968)이 사각수로에서 수제 하류부 재순환 영역에 대해 실험이 수행되었으나 유속의 측정은 이루어지지 않았다. 흐름영역(flow field)의 정밀한 유속측정은 Rajaratnam 과 Nwachukwu (1983)이 두 가지의 다른 수제에서 수행하였으며 그들은 흐름영역을 수제주변에서 3차원으로 구분하여 측정하였는데 그 영역은 $-1 \leq x/b \leq 6$, $0 \leq y/b \leq 3$ 이다(x :는 수로의 길이, y : 제방에서의 수직간 거리, b : 수제의 길이). 그러나 수제의 종류가 두 가지로 수제종류에 대한 재순환 영역을 분석하지 못했다. Tingsanchali 와 Maheswaran(1990)은 수제 하류부 재순환 영역을 2차원 수심평균하여 수치해석을 수행하였으나 수제는 불

투과 수제에 대해서만 적용되었다. 최근의 연구는 Ettema 와 Muste(2004)에 의해 수행되었는데 길이 변화에 따른 불투과 수제하류 재순환 영역을 축척 영향(scale effects)에 따라 분석하였다. 이에 본 연구에서는 수제설치 간격에 기본 자료인 수제 하류부 재순환 영역과 최대세굴에 주요 인자인 수제선단 유속을 투과율, 접근유속과 수제길이를 변화시켜 다양한 수제조건에 대해 실험을 수행하였다. 또한 실험결과를 통해 수제하류부 재순환흐름 영역에 대한 실험식을 제안하고 입사각을 평가하여 수제 설치 간격의 기본 자료를 제시하고, 수제주변 세굴에 주요원인인 수제선단 유속에 대해 수제 투과율 변화에 따른 실험식으로 제안하고자 한다.

2. 주요변수 및 차원해석 실험식

하천에 구조물을 설치하기 위해서는 건설 후 변화되는 수리특성에 대한 파악이 매우 중요하다. 하지만 구조물 설계 시 흐름변화를 해석하기 위한 원인인자가 이론적 해석이 어려울 만큼 많으므로 정확한 해석 및 예측은 불가능하다. 따라서 일반적인 해석은 모든 원인 인자를 파악한 후 가정을 통해 주요 인자를 제한하고 차원해석과 수리실험을 통한 인자별 관계에 대해 실험식을 제안하는 것이다. 수제설치의 경우를 살펴보면, 원인인자는 접근유속(v_{app}), 수로폭(B), 수제길이(l), 수제 설치 각도(α), 수심(y_0), 하상경사(S_0), 수제형상계수(K_1), 수로 형상계수(K_2), 하상바닥 조고에 대한 계수(K_3), 수제투과계수(K_p)와 동점성계수(ν)이다.

본 연구에서는 수제주변의 최대 세굴의 원인이 되는 선단부 유속과 수제설치 간격의 기초 자료가 될 것으로 판단된 수제하류부 재순환영역을 파악하기 위해 수제의 주요 영향변수를 파악하였으며 차원해석을 통해 무차원화한 일반실험식을 제시하였다. Fig. 1은 수제 설치 시 흐름변화를 간략히 나타낸 것이다.

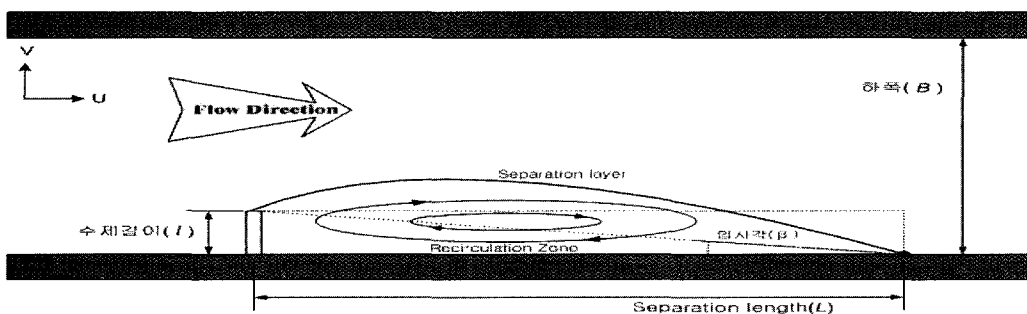


Fig. 1. Recirculation zone of groyne downstream

선단 유속(v_{tip})을 파악하기 위한 수제의 영향인자를 살펴보면 선단 유속에 대한 함수(식 1)를 수제의 모든 영향인자에 대한 나타내었다.

$$v_{tip} = f(v_{app}, B, l, \alpha, y_0, S_0, K_1, K_2, K_3, K_p, v) \quad (1)$$

식 (1)을 차원해석을 통해 수제선단 유속에 대한 무차원식으로 변환하여 나타낸 것이 식 (2)이다. 이 과정에서 Reynolds 수의 영향은 Reynolds 수가 큰 난류의 경우를 가정하여 무시하였고 하상경사는 실험조건에서 고려하지 않았다. 수제길이와 투수계수를 적용한 면적비[(수제면적)/(수로면적-수제면적)]에 대해 A^* 로 가정하여 식 (2)를 나타내었다. 실험수로가 직선, 수제형상이 단일수직수제, 하상바닥은 평평하게(flatbed channel) K_1, K_2, K_3 의 값을 1로 가정하고 v_{tip}/v_{app} 와 면적비의 함수로 나타낸 것이 식 (3)이다.

$$v_{tip}/v_{app} = f(K_1, K_2, K_3, A^*) \quad (2)$$

$$v_{tip}/v_{app} = f(A^*) \quad (3)$$

수제하류부 재순환영역에서 흐름분리길이(separation length)는 수제간격을 결정하기위한 기초 자료가 된다. 흐름분리길이에 대한 함수를 수제의 영향인자에 대해 식 (4)에 나타내었다.

$$L = f(v_{app}, B, l, \alpha, y_0, S_0, K_1, K_2, K_3, K_p, v) \quad (4)$$

식(4)을 앞서 제시한 가정과 차원해석을 통해 흐름분리길이와 수제길이에 대해 무차원식으로 변환하여 나타낸 것이 식 (5)이다. 여기서 Fr 은 Froude 수이다.

$$L/l = f(\alpha, Fr, K_p) \quad (5)$$

3. 단일수제 실험

3.1 실험장비 및 시설

수제 선단 유속 측정을 위한 계측기로는 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter, Nortek AS)를 사용하였으며 샘플링 회수는 25Hz이다. 재순환영역의 관측은 LSPIV기법을 적용하였는데 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)을 위한 영상장비로는 Digital Video Camera(DTR-TRV900, Sony Co.)를 사용하였으며, 부유입자는 튀밥(popped rice), 분석도구는 CACTUS 3.1(IIT Co.)을 이용하였다. 실험시설은 0.012 ~ 0.4 CMS를 공급할 수 있는 1.2 m 폭 위어를 유량공급장치로 설치하였으며, 실험수로는 Fig. 2와 3에 보이듯이 직선수로로 이루어져 있다. 직선수로의 규모는 폭 2.0 m, 길이 40 m(투시창 20 m), 높이 0.65 m이며 수제의 모형은 아크릴로 제작하였고, 불투과 수제를 제외한 투과 수제는 지름 2cm의 원통형관으로 투과율을 조정하도록 제작하였다.

3.2 실험 방법

모형실험은 직선수로에서 고정상실험으로 수행하였으며, 수로폭 대 수제의 길이가 0.10, 0.15, 0.20, 그리고 0.25 인 네 가지 경우를 상정하였다. 또한 수제의 투과율은 0%(불투과), 20%, 40%, 60%, 80% 로 나누어 수행하였다. ADV를 이용하여 수제 선단부 중층(수심의 60% 지점)의 유속을 측정하였으며(Fig. 4), 표층유속은 시간차를 두고 촬영된 두 개의 영상에서 입자들의 변위를 측정하여 각 입자들의 유속을 측정 대상역 전체의 순간 유속장으로 획득할 수 있는 LSPIV기법을 이용하여 측정하였다.

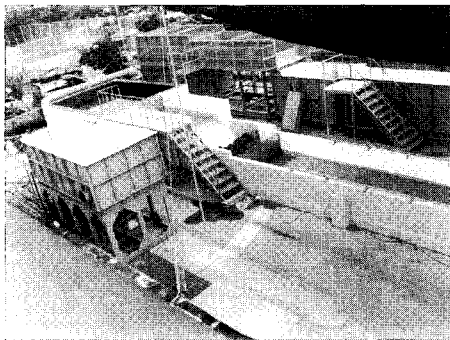


Fig. 2. Discharge supply

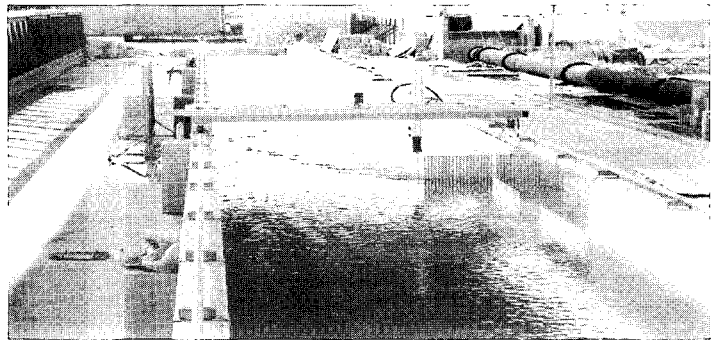


Fig. 3. Experimental channel



Fig. 4. Velocity measurement for ADV

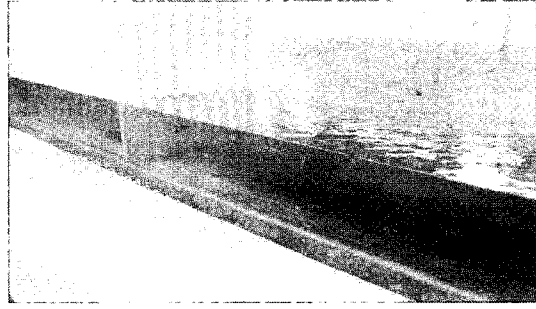


Fig. 5. Flow pattern measurement for dye

ADV를 이용한 측정결과와는 1분간 측정값을 시간 평균하였으며, LSPIV 기법에서 획득한 영상은 CACTUS 3.1을 이용하여 유속장으로 변환하였다.

3.3 LSPIV 기법

본 실험에서는 표층 유속장의 측정을 위하여 LSPIV 기법을 도입하였다. LSPIV 기법의 도입으로 LDV와 ADV같은 기존 감지기 기반의 측정기가 갖는 한계를 극복하여 대상 영역 전체의 순간 유속장을 획득할 수 있다. LSPIV 기법은 기존 PIV 기법과 기본원리는 동일하다. 즉, 시간차를 두고 촬영된 두 개의 영상을 비교하여, 영상 속의 입자들의 변위를 측정하고, 이를 이용하여 각 입자들의 유속을 측정하는 것이다(Fig. 6).

PIV 기법은 레이저의 조사를 통한 입자촬영 시스템 구성의 어려움과 고비용, 영상획득 장비 및 레이저 조사장비의 배치에 따른 공간적 제약 등의 제약으로 인하여 소규모 실내실험에 주로 이용된다. 이와 달리 LSPIV 기법은 간단한 장치구성과 영상 처리 및 분석을 위한 소프트웨어만으로 대규모의 실내실험이나 현장에 적용이 가능한 장점이 있다. LSPIV 기법은 비디오 카메라를 이용하여 대상영역을 촬영하고 이를 소프트웨어적으로 처리하는데 중점을 두는 방식으로, 기존의 PIV 기법에서 필수적인 레이저 조사와 카메라의 배치에 대한 제약이 없다(Fig. 7). LSPIV 기법의 단점은 레이저 조사 절차가 없어 수중의 2차원이나 3차원 유속장에 대한 정보를 획득하기 어렵다. 또한 경우에 따라 왜곡된

영상을 획득되는 경우가 많아 영상처리 전에 촬영영상의 보정작업을 수행한 후 상관관계 분석을 거쳐야 하므로 기존 PIV 기법에 비해 정확도가 저하되는 단점이 있다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 LSPIV 기법이 최근 주목받는 이유는 대규모 실험이나 현장조사에서 기존 장비와 인력의 활용에 비해 훨씬 적은 비용과 수고로 짧은 시간 내에 전체 유속장의 측정이 가능하기 때문이다.

최근 들어 LSPIV 기법은 수리모형실험이나 하천현장에 적용되고 있으며(Lloyd 등, 1995; Fujita 등, 1998; Muste 등, 2000), Fig. 8과 9는 실험적용 예를 나타낸 것이다. 본 실험의 목적이 수체의 설계인자에 따른 효과를 비교·검증하는 것이므로 LSPIV 기법을 도입한 표층 유속장의 측정은 기존의 측정 장비에 비해 보다 많은 양의 측정 자료를 획득할 수 있어 유리할 것으로 판단된다.

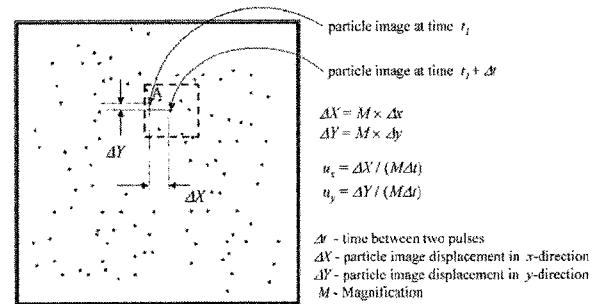


Fig. 6. Concept of PIV method

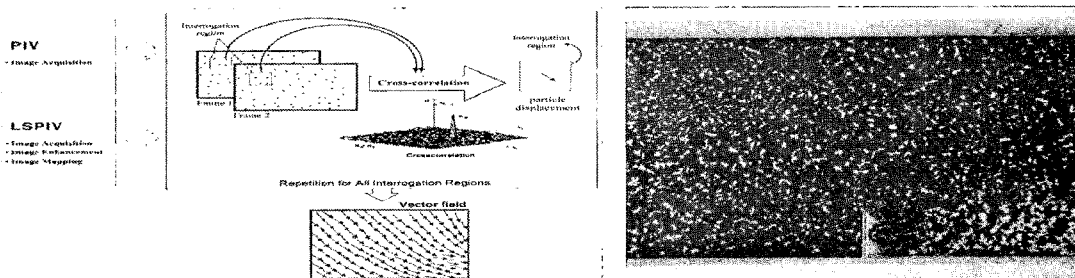


Fig. 7. Image processing for LSPIV method

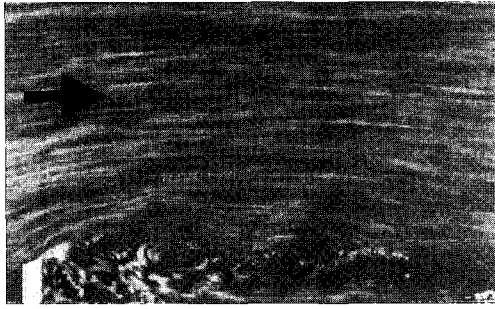


Fig. 8. Background reduction image of flow

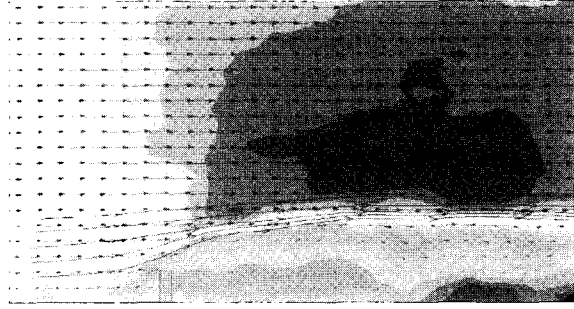


Fig. 9. Velocity vector field for LSPIV method

4. 실험 결과 및 분석

수제 설치로 인한 일반적인 흐름은 선단부에서 흐름 분리가 발생하는데, 수제 선단부에서 일정각을 이루면서 강한 흐름이 분류역(수로 중앙)으로 유입되고 수제 하류부에서 분리된 흐름이 맥동류를 형성하며 하류로 흘러간다. 본 실험에서는 길이와 투과율을 조정할 단일 수제를 설치하여 수제선단 유속과 수제하류부 수제역을 측정하여 재순환영역(recirculation zone)을 분석하였다.

실험에서 측정된 자료로는 ADV를 이용하여 접근유속 및 수제선단 유속을 측정하였으며, LSPIV를 이용하여 수제하류부 흐름형태 및 흐름분리 길이를 관측 또는 측정 하였다. 측정된 자료를 이용하여 분석변수를 나타낸 것이 Table 1이다. 수제선단 유속의 분석은 선단유속 (v_{tip})을 접근유속(v_{app})에 대해 무차원화 하여 비교하였고, 흐름분리길이비(L^*)는 흐름분리길이(L)를 수제길이(l)와 무차원화 하였다.

Table 1. Experimental result of single groynes

	수제길이 l (m)	수제설치각 α ($^\circ$)	투과율 P (%)	접근유속 v_{app} (m/s)	상류 수심 h_{app} (m)	선단유속 v_{tip} (m/s)	흐름분리 길이 L (m)	v_{tip}/v_{app}	L^* (L/l)	Fr	입사각 β ($^\circ$)
1	0.30	45	0	0.25	0.15	0.30	2.90	1.20	9.67	0.21	5.91
2	0.30	60	0	0.25	0.15	0.32	3.40	1.28	11.33	0.21	5.04
3	0.30	75	0	0.25	0.15	0.33	3.65	1.32	12.17	0.21	4.70
4	0.30	105	0	0.23	0.15	0.32	3.80	1.39	12.67	0.19	4.51
5	0.30	120	0	0.23	0.15	0.29	3.50	1.26	11.67	0.19	4.90
6	0.30	135	0	0.23	0.15	0.27	2.60	1.17	8.67	0.19	6.58
7	0.30	45	0	0.30	0.15	0.40	2.90	1.33	9.67	0.25	5.91
8	0.30	60	0	0.30	0.15	0.43	3.60	1.43	12.00	0.25	4.76
9	0.30	75	0	0.30	0.15	0.44	3.60	1.47	12.00	0.25	4.76
10	0.30	105	0	0.30	0.15	0.45	4.20	1.50	14.00	0.25	4.09
11	0.30	120	0	0.30	0.15	0.43	4.10	1.43	13.67	0.25	4.18
12	0.30	135	0	0.30	0.15	0.41	3.20	1.37	10.67	0.25	5.36
13	0.30	45	0	0.40	0.15	0.49	3.00	1.23	10.00	0.33	5.71
14	0.30	60	0	0.40	0.15	0.52	3.60	1.30	12.00	0.33	4.76
15	0.30	75	0	0.40	0.15	0.55	3.80	1.38	12.67	0.33	4.51
16	0.30	105	0	0.40	0.15	0.55	4.00	1.38	13.33	0.33	4.29
17	0.30	120	0	0.40	0.15	0.53	3.90	1.33	13.00	0.33	4.40
18	0.30	135	0	0.40	0.15	0.51	3.00	1.28	10.00	0.33	5.71
19	0.20	90	0	0.25	0.15	0.31	2.35	1.24	11.75	0.21	4.86
20	0.20	90	20	0.25	0.15	0.31	1.83	1.23	9.15	0.21	6.24
21	0.20	90	40	0.25	0.15	0.30	1.20	1.19	6.00	0.21	9.46
22	0.20	90	60	0.25	0.15	0.29	0.57	1.14	2.85	0.21	19.33
23	0.20	90	80	0.25	0.15	0.28	0.20	1.10	1.00	0.21	45.00
24	0.30	90	0	0.25	0.15	0.35	3.60	1.39	12.00	0.21	4.76
25	0.30	90	20	0.25	0.15	0.33	2.80	1.33	9.33	0.21	6.12
26	0.30	90	40	0.25	0.15	0.32		1.27		0.21	
27	0.30	90	60	0.25	0.15	0.30	0.95	1.19	3.15	0.21	17.61
28	0.30	90	80	0.25	0.15	0.28	0.48	1.13	1.59	0.21	32.17
29	0.40	90	0	0.25	0.15	0.39	4.90	1.55	12.25	0.21	4.67
30	0.40	90	20	0.25	0.15	0.34	3.70	1.36	9.25	0.21	6.17
31	0.40	90	40	0.25	0.15	0.32		1.28		0.21	
32	0.40	90	60	0.25	0.15	0.29	1.00	1.17	2.50	0.21	21.80
33	0.40	90	80	0.25	0.15	0.27	0.64	1.09	1.60	0.21	32.01

34	0.50	90	0	0.25	0.15	0.42	6.20	1.69	12.40	0.21	4.61
35	0.50	90	20	0.25	0.15	0.36	4.70	1.45	9.40	0.21	6.07
36	0.50	90	40	0.25	0.15	0.33		1.31		0.21	
37	0.50	90	60	0.25	0.15	0.29		1.17		0.21	
38	0.50	90	80	0.25	0.15	0.27		1.07		0.21	
39	0.20	90	0	0.30	0.15	0.35	2.29	1.16	11.47	0.25	4.98
40	0.20	90	20	0.30	0.15	0.35	1.85	1.15	9.25	0.25	6.17
41	0.20	90	40	0.30	0.15	0.33	1.26	1.10	6.30	0.25	9.02
42	0.20	90	60	0.30	0.15	0.32	0.61	1.06	3.05	0.25	18.15
43	0.20	90	80	0.30	0.15	0.31	0.20	1.03	1.00	0.25	45.00
44	0.30	90	0	0.30	0.15	0.39	3.51	1.31	11.70	0.25	4.89
45	0.30	90	20	0.30	0.15	0.36	2.70	1.21	9.00	0.25	6.34
46	0.30	90	40	0.30	0.15	0.35	1.67	1.17	5.58	0.25	10.16
47	0.30	90	60	0.30	0.15	0.33	0.97	1.10	3.23	0.25	17.20
48	0.30	90	80	0.30	0.15	0.32	0.46	1.05	1.53	0.25	33.17
49	0.40	90	0	0.30	0.15	0.43	4.90	1.42	12.25	0.25	4.67
50	0.40	90	20	0.30	0.15	0.39	3.60	1.30	9.00	0.25	6.34
51	0.40	90	40	0.30	0.15	0.36	1.79	1.21	4.48	0.25	12.58
52	0.40	90	60	0.30	0.15	0.33	1.52	1.11	3.81	0.25	14.71
53	0.40	90	80	0.30	0.15	0.31	0.72	1.04	1.80	0.25	29.05
54	0.50	90	0	0.30	0.15	0.47	6.00	1.57	12.00	0.25	4.76
55	0.50	90	20	0.30	0.15	0.42	4.80	1.41	9.60	0.25	5.95
56	0.50	90	40	0.30	0.15	0.38		1.25		0.25	
57	0.50	90	60	0.30	0.15	0.34		1.12		0.25	
58	0.50	90	80	0.30	0.15	0.31		1.04		0.25	
59	0.20	90	0	0.40	0.15	0.50	2.40	1.25	12.00	0.33	4.76
60	0.20	90	20	0.40	0.15	0.48	2.10	1.20	10.50	0.33	5.44
61	0.20	90	40	0.40	0.15	0.46		1.15		0.33	
62	0.20	90	60	0.40	0.15	0.46		1.15		0.33	
63	0.20	90	80	0.40	0.15	0.44		1.09		0.33	
64	0.30	90	0	0.40	0.15	0.56	3.60	1.39	12.00	0.33	4.76
65	0.30	90	20	0.40	0.15	0.51	2.90	1.27	9.67	0.33	5.90
66	0.30	90	40	0.40	0.15	0.48		1.20		0.33	
67	0.30	90	60	0.40	0.15	0.46		1.16		0.33	
68	0.30	90	80	0.40	0.15	0.45		1.12		0.33	
69	0.40	90	0	0.40	0.15	0.61	5.00	1.52	12.50	0.33	4.57
70	0.40	90	20	0.40	0.15	0.54	4.10	1.35	10.25	0.33	5.57
71	0.40	90	40	0.40	0.15	0.50		1.25		0.33	
72	0.40	90	60	0.40	0.15	0.48		1.20		0.33	
73	0.40	90	80	0.40	0.15	0.45		1.12		0.33	
74	0.50	90	0	0.40	0.15	0.66	6.25	1.64	12.50	0.33	4.57
75	0.50	90	20	0.40	0.15	0.58	5.00	1.45	10.00	0.33	5.71
76	0.50	90	40	0.40	0.15	0.52		1.29		0.33	
77	0.50	90	60	0.40	0.15	0.47		1.18		0.33	
78	0.50	90	80	0.40	0.15	0.44		1.09		0.33	
79	0.40	90	0	0.47	0.24	0.72	4.80	1.54	12.00	0.31	4.76
80	0.40	90	0	0.37	0.19	0.55	4.75	1.49	11.88	0.27	4.81
81	0.40	90	0	0.41	0.21	0.62	4.80	1.51	12.00	0.29	4.76
82	0.40	90	0	0.34	0.18	0.50	4.70	1.46	11.75	0.26	4.86
83	0.50	90	0	0.46	0.17	0.92	6.20	1.99	12.40	0.36	4.61
84	0.50	90	0	0.33	0.19	0.57	6.15	1.72	12.30	0.24	4.65
85	0.50	90	0	0.35	0.20	0.62	6.15	1.77	12.30	0.25	4.65
86	0.50	90	0	0.43	0.22	0.72	6.12	1.67	12.24	0.30	4.67
87	0.50	90	0	0.47	0.24	0.82	5.90	1.75	11.80	0.31	4.84

4.1 수제선단부 유속

수제선단부에서의 흐름은 수제로 인해 중앙으로 급격히 변화하면서 수로의 최강 유속부(접근수로의 중앙부)가 이동되고 유속이 증가된다. 수제 선단에서 발생되는 강한 와류는 수제 주변 국부세굴의 원인이 된다. 실험에서 고려한 사항은 수제길이와 투과율 변화에 따라 선단부에서 유속과 흐름변화각으로 실험유속은

0.25m/s, 0.3m/s과 0.4m/s를 적용하였다.

불투과 수제에서는 수제 설치로 인한 흐름변화가 뚜렷이 나타났으며 수제길이에 따른 수제선단 유속변화와 흐름변화각의 차이를 관측할 수 있었다. 측정된 흐름변화각은 수제길이가 증가하면서 30°에서 최대 40° 내외로 증가하는 것으로 측정되었고 유속은 접근유속에 대해 1.25배에서 최대 1.7배로 증가되는 것으로 측정되었다. 흐름변화각과 유속변화는 투과율 변화에 차이를 보

이고 있는데, 20% 투과 수제에서의 흐름변화는 불투과 수제와 동일한 경향이 나타나고 있으며, 흐름변화각은 20° ~ 30°내외, 유속증가는 수제길이에 대해 1.25에서 1.4배로 측정되었다. 하지만 60%와 80% 투과수제에서의 흐름변화는 단일 원형말뚝 주변의 와류형상과 일치된 경향을 나타내고 있으며, 흐름변화각은 5° ~ 10°내외, 선단유속의 증가는 접근유속과 비교해 1.1배로 측정되었고 수제길이에 따른 증가폭은 미미하였다. 이는 불투과 수제에서의 흐름변화가 수제 전체길이의 영향을 받는 반면 60% 이상 투과율 수제에서의 흐름변화는 개개의 말뚝에 의한 것으로 판단되며, 불투과 수제와

20% 투과 수제에서 나타난 최강유속부의 이동과 같은 현상은 발생하지 않는 것으로 사료된다. Fig. 10은 수제 선단 흐름변화각과 수제길이의 관계를 나타낸 것이며 Fig. 11은 수제선단 유속과 수제길이의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 12는 Wallingford(1997)에서 제안된 수제 선단 유속범위와 실험자료를 비교한 것으로 실험 측정값이 제안된 범위와 일치함을 보인다. 측정된 모든 자료에 대해 유속비와 투과율에 따른 면적비에 대한 관계를 Fig. 13에 나타냈으며 이를 통해 도출된 회귀식을 이용하여 표 2와 같이 수제선단 유속에 대한 실험식을 제안하였다.

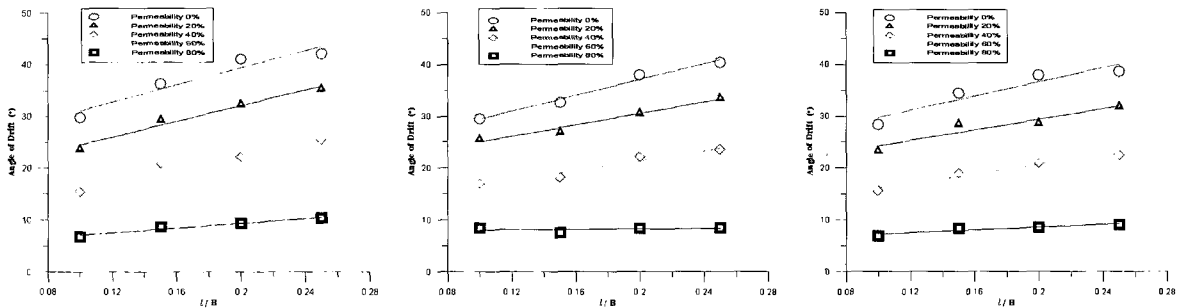


Fig. 10. Flow angle and groynes length variation with permeability (approach velocity: 0.25, 0.30, 0.40m/s)

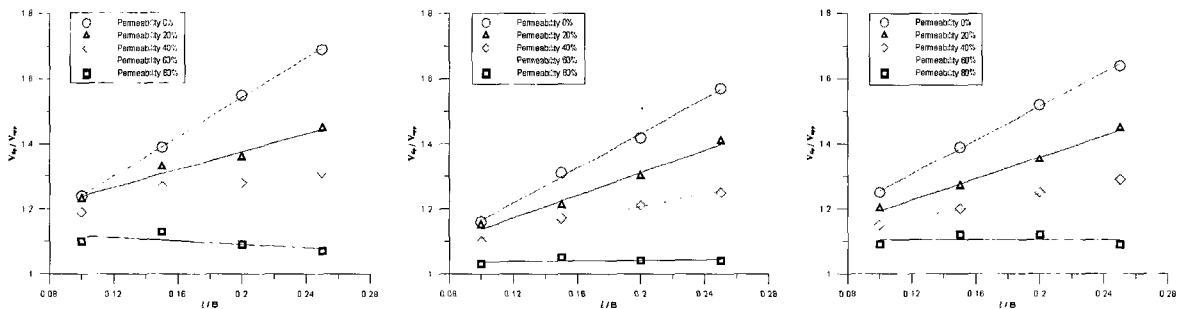


Fig. 11. Tip velocity and groynes length variation with permeability (approach velocity: 0.25, 0.30, 0.40m/s)

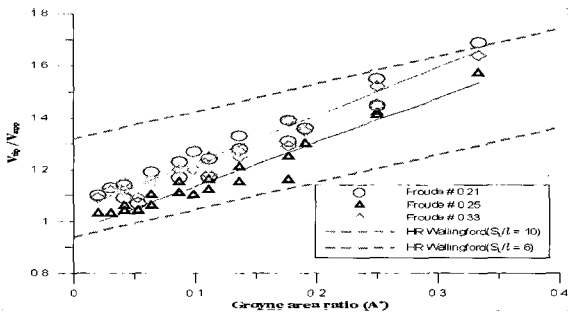


Fig. 12. Comparison Wallingford with experiment

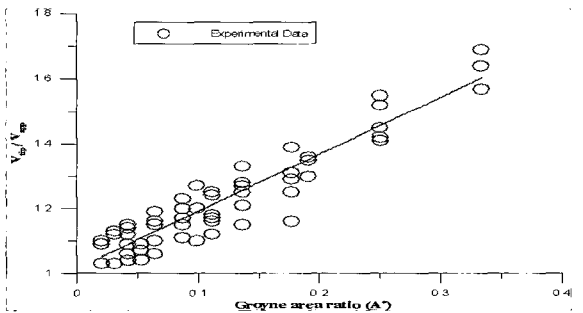


Fig. 13. Groynes tip velocity and area rate

Table 2. Experimental equation of tip velocity

Experiment Equation	
v_{tip} Experiment Equation	$v_{tip}/v_{app} = 1.76 \times A^* + 1.015$
	$A^* (\text{면적비}) = A_g / (A - A_g) (0.02 < A^* < 0.35)$

4.2 수제 입사각

수제가 설치되면 수제하류부 영역에서 수제방향(흐름의 역방향)으로 커다란 회전소용돌이가 발생하고 회전소용돌이 상·하류 영역에서 두개의 역방향 회전용돌이를 갖는 작은 소용돌이가 발생한다. 이 영역을 재순환 영역으로 정의하였다. 재순환영역 하류부의 소용돌이는 수로흐름의 일부와 혼합된 후 다시 본래의 흐름으로 되돌아가는데, 이 지점과 수제 설치지점의 거리를 흐름분리길이라 한다. 수제선단 입사각은 수제 선단과 흐름분리 길이를 직선으로 연결한 선과 흐름진행 방향(x축)이 이루는 각으로 정의하였다.

Fig. 14는 수제길이에 따라 투과율을 변화시켜 입사각을 측정된 자료를 나타낸 것으로 수제 설치간격 결정에 중요한 자료가 될 것으로 사료된다. 실험결과 입사각은 불투과 수제는 약 5°내외, 20% 투과 수제는 약 6°, 40% 투과 수제는 약 10°, 60% 투과 수제는 약 20°로 수제길이에 따른 변화가 크지 않았으나 80% 투과 수제에서는 수제길이가 길어지면서 45°에서 30°로 감소하는 경향이 관측되었다. Fig. 15는 수제선단 입사각과 수제길이비의 관계를 나타낸 것이다.

4.3 단일수제에서의 재순환영역 실험결과

수제설치 시 수제하류부에서는 흐름분리가 발생한 후 다시 원 흐름(수제역 소멸)으로 복원되는 구간이 형성된다. 본 실험의 경우 직선수로에서 수행한 것으로 (대부분 만곡부에 수제설치 고려) 측정된 흐름분리길이는 원 흐름으로 복원되는 최대 거리라 가정할 수 있으므로 수제설치 간격 결정에 중요자료가 될 것으로 판단된다. 실험에서는 우선 유속에 대해 흐름분리길이의 변화를 측정하여 분석하였는데 적용된 유속조건(0.25, 0.3,

0.4 m/s)에 대해 흐름분리길이의 차이가 미미하였다. Fig. 16은 각 투과율에서 수제길이와 흐름분리길이의 변화를 비교한 것으로 흐름분리길이는 수제길이가 길어짐에 따라 미미한 증가를 보이고 있으며 각 수제에서도 대부분 같은 경향이 관측되었다. 투과율에 따른 흐름분리길이비의 차이는 뚜렷이 나타났는데, 불투과 수제에서 약 12.5, 20% 투과 수제에서 약 10, 40% 투과 수제에서 5.7, 60% 투과 수제에서는 3 그리고 80% 투과 수제에서는 약 1.8 내외로 측정되었다(Fig. 17).

흐름분리길이비 실험식은 접근유속, 수제길이와 투과율 변화에 의한 흐름분리길이를 계산하는 식으로 흐름분리길이를 수제길이로 무차원화하여 Fr , 설치각계수 (K_α), 투과계수(K_p)를 주요변수로 하였다. 앞서 제시한 차원해석을 통한 함수식에 대해 일반식(식 6)을 나타내었고 취득한 자료를 적용하여 실험식을 제안하였다. 불투과수제에 대해 흐름분리길이비(L/l)와 Fr 의 회귀식(Fig. 18)을 구하여 상수값 a와 b를 정하였다.

$$L/l = a Fr^b K_\alpha K_p \quad (6)$$

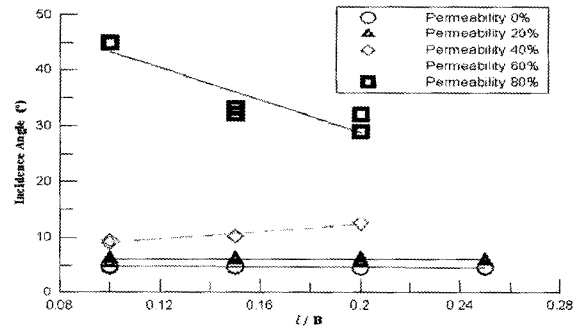


Fig. 15. Incidence angle and groynes length variation

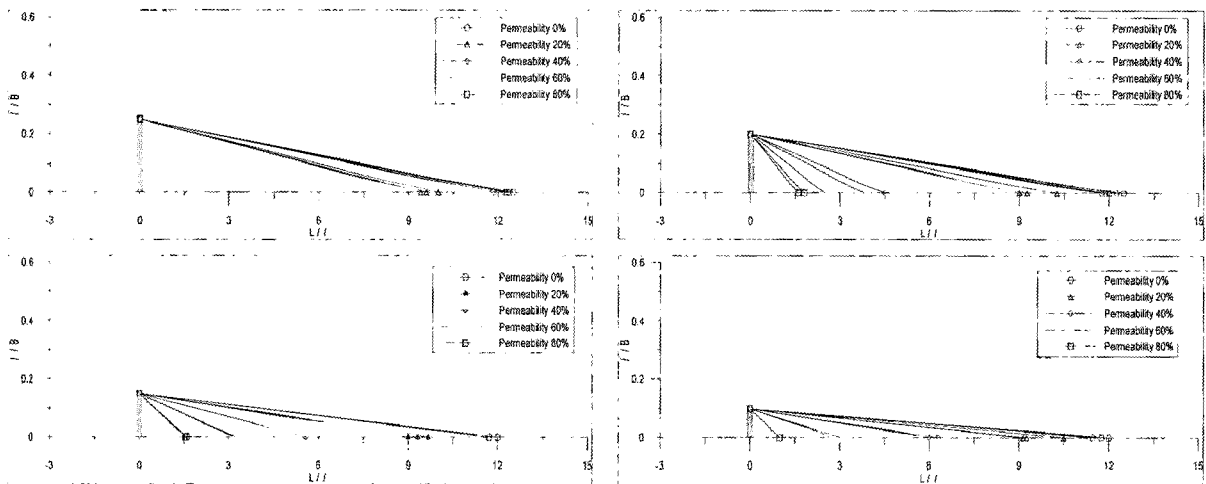


Fig. 14. Separation length of single groynes of permeability rate

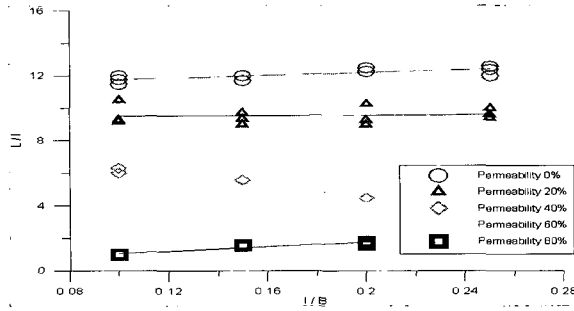


Fig. 16. Separation length and groyne length variation with permeability

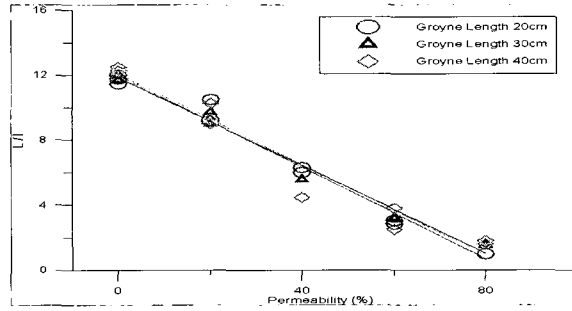


Fig. 17. Separation length and permeability variation with groyne length

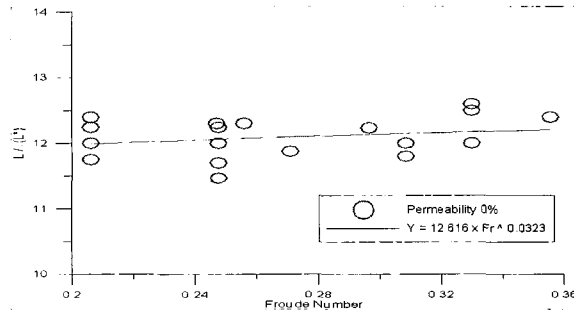


Fig. 18. Separation length and groyne length variation

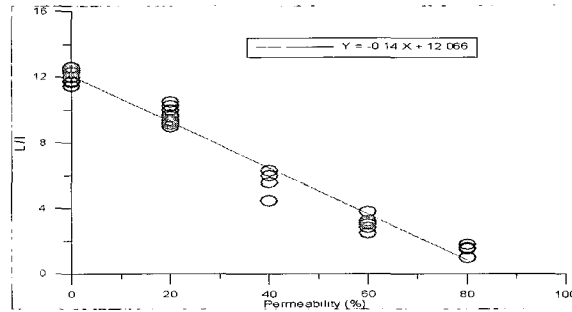


Fig. 19. Separation length and permeability variation

투과율계수는 Fig. 19에 나타난 흐름분리길이비와 투과율관계의 회귀식을 적용하였다. 또한 설치각 계수는 상향수제와 하향수제로 구분하여 제안하였는데 설치각 45° ~ 90°를 상향수제로, 90° ~ 135°를 하향수제로 구

분하였다. Fig. 20과 Fig. 21에 흐름분리길이비와 설치각 관계를 나타내었다. Table 2는 흐름분리길이비에 대한 실험식을 나타낸 것이다.

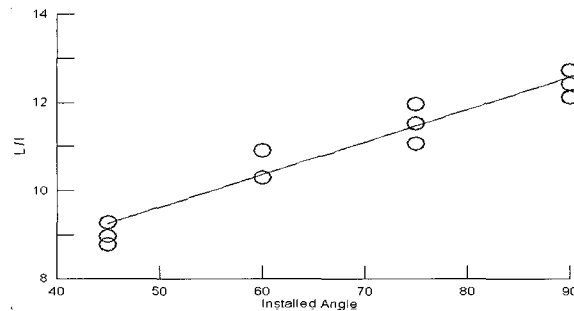


Fig. 20. Separation length and install angle of groyne

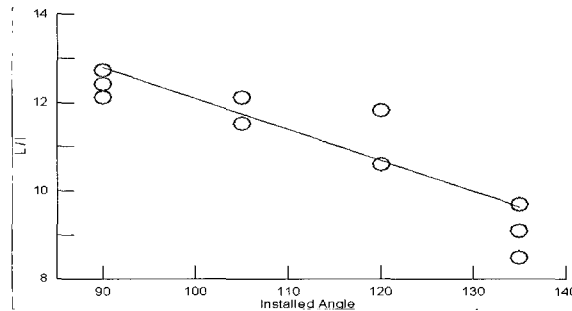


Fig. 21. Separation length and install angle of groyne

Table 2. Experiment equation of separation length

Experiment Equations	
$L^* = 12.616 \times K_\alpha \times K_p \times Fr^{0.0323}$ $(L^* = L/l)$	
$K_p = -0.0116 \times X + 1$ $K_p : \text{투과율 계수}$ $(0\% < X(\text{Permeability}) \leq 80\%)$	
$K_\alpha = 0.00587 \times X + 0.471 \text{ (상향수제: } 45^\circ \sim 90^\circ)$ $K_\alpha = 0.00556 \times X + 1.5 \text{ (하향수제: } 90^\circ \sim 135^\circ)$ $K_\alpha : \text{설치각 계수}$	

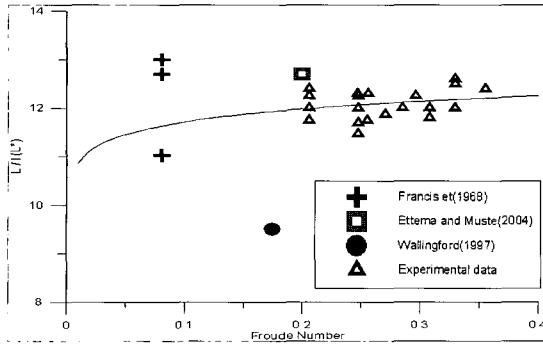


Fig. 22. Comparison experiment equation with preceding experiment data

Fig. 22는 본 연구에서 제안된 실험식과 실험 자료를 기존의 실험자료와 비교하여 나타낸 것이다. Wallingford (1997)의 값이 다소 적게 비교되었지만 Francis et (1968)과 Ettema and Muste(2004)의 실험값은 본 실험에서 제안된 식과 비교적 일치하는 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 불투과수제와 투과수제 선단 유속을 ADV 유속계를 이용하여 측정하였고 LSPIV 기법을 이용하여 수제하류 재순환 영역을 관측하였다. 실험분석은 수제로 인한 최대세굴의 원인인 수제선단 유속과 수제 하류부에서 형성되는 재순환 영역에 대해 수행하였다. 다음은 그에 대한 결과를 나타냈다.

1. 수제선단 유속은 투과율 변화에 따라 유속비 차이가 확연히 관측되었는데, 80% 투과 수제의 경우 1.1로 수제길이에 대해 변화가 가장 작았고 불투과 수제에서는 수제길이에 따라 1.25에서 최대 1.7로 증가되는 것으로 측정되었다. 이와 같은 결과를 투과율에 대한 수제선단 유속과 수제길이의 관계를 실험식으로 제안하였다.
2. 수제선단 입사각은 수제 선단과 흐름분리길이를 직선으로 연결한 선과 흐름진행 방향(x축)이 이루는 각이다. 실험결과 입사각은 불투과 수제는 약 5°내외, 20% 투과 수제는 약 6°, 40% 투과 수제는 약 10°, 60% 투과 수제는 약 20°로 수제길이에 따른 변화가 크지 않았으나 80% 투과 수제에서는 수제길이가 길어지면서 45°에서 30°로 감소하는 경향이 관측되었다.
3. 흐름분리길이는 수제설치 시 수제하류부에서는 흐름분리가 발생한 후 다시 원 흐름으로 복원되는 구간으로 수제의 설치 시 중요자료가 될 것으

로 판단된다. 투과율이 같은 수제에서의 흐름분리길이는 수제길이가 길어짐에 따라 증가하나, 수제길이(l)로 무차원화하여 비교하면 차이가 미미하다. 수제 투과율에 대한 흐름분리길이비 (L^*)는 불투과 수제에서 약 12.5, 20% 투과수제에서 약 10, 40% 투과수제에서 5.7, 60% 투과수제에서는 3 그리고 80% 투과 수제에서는 약 1.8 내외로 현저한 차이를 나타내고 있었다.

4. 흐름분리길이 실험식은 접근유속, 수제길이와 투과율 변화에 의한 흐름분리길이를 계산하는 식으로 흐름분리길이를 수제길이를 무차원화하여 Fr, 수제설치각계수, 투과계수를 주요변수로 하여 제안하였다. 기존 실험연구와 제안식 비교에서 Wallingford 값이 다소 적게 나타났으나 Francis et 과 Ettema and Muste의 값은 전체적으로 잘 표현된 것으로 판단된다. 본 제안식은 수로형상, 수제형상이 단일수직수제, 하상바닥 조도에 대한 제약이 있지만 수제설계에 대한 지침의 기초 자료가 될 것으로 판단된다.

향후 현재 수행 중인 수제군 및 세굴실험을 통해 영향인자의 효과를 분석하고, 입사각의 영향을 만족수로 등 여러 조건의 수로에 대한 실험이 추가되면 수제설계 시 간격결정에 중요한 자료가 될 것이고 설계지침도 마련될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- Francis, J.R., Pattanick, A., and Wearne, S. (1968). "Observations of flow patterns around some simplified groyne structures in channels" Technical Note No. 8, *Proc., Inst. of Civil Engineers*, London, England, Dec., pp. 829-846.
- Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B. (1983). "Flow near groyne-dike structures." *J. Hydr. Div.*, ASCE, 109(HY3), pp. 463-480
- Tingsanchali, T., and Maheswaran, S. (1990). "2D depth-averaged flow computation near groyne." *J. Hydr. Eng.*, 116(1), pp. 71-86
- Ettema, R., Muste, M. (2004). "Scale Effects in Flume Experiments on Flow around a Spur Dike in Flatbed channel." *J. Hydr. Eng.*, Vol. 130, pp. 635-646
- Lloyd, M.P., Ball, D.J., and Stansby, P.K. (1995). "Unsteady Surface-Velocimetry Field Measure-

- ment Using Particle Tracking Velocimetry," *Journal of Hydraulic Research*, 33(4), pp. 519-534.
- Fujita, I. Muste, M, and Kruger, A. (1998). "Large-Scale Particle Image Velocity for Flow Analysis in Hydraulic Applications," *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), pp. 397-414.
- Muste, M., Xiong, Z., Bradley, A., and Kruger, A. (2000). "Large-Scale Particle Image Velocimetry: a Reliable Tool for Physical Modeling," *Proceedings of ASCE 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*, Minneapolis, MN.
- Wallingford HR (1997). "Guidelines on the geometry of groynes for river training" Report SR 493
- 건설부 (2002). 하천시설기준.
- 山本, 晃一, (1996). 日本の水制, 山海堂, 日本.
- Nikitin, I., (1995). 水制の理論と計算, 福留脩文・山脇正俊 譯, 信山社イテック, 日本.
- (논문번호:04-100/접수:2004.11.05/심사완료:2005.01.26)