불투과 횡수제에서 유속 분포의 측정

Measurements of velocity distributions between the impermeable spur dikes

황승용* · 김성중* · 류시완** · 여홍구***
Hwang, Seung-Yong · Kim, Sung Jung · Lyu, Siwan · Yeo, Hong Koo

요 지

수제는 하천에서의 흐름 방향과 유속을 제어하여 하안 또는 제방을 유수에 의한 침식작용으로부터 보호하기 위해 호안 또는 하안 전면부에 설치하는 구조물이다. 수제를 설치하는 목적은 하안 및 제방의 보호, 유로의 제어, 그리고 수환경의 개선 등을 들 수 있다. 국내에는 해방 이후 수제의 시공 사례가 거의 없었으나, 최근 들어 자연형 하천과 하천생태계 복원에 대한 관심이 점증하면서 수제에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 현재 국내에는 수제설계에 대한 실증적인 지침이 미비하고 국외의 기준을 검증 없이 소개하는 수준이어서 현장의 설계 단계에서 수제공의 채택을 망설이게 하는 원인이 되고 있다. 이 연구에서는 국내·외 수제의 현황과 기술 동향을 파악하여 수제의 기하학적 특성인 수제길이, 수제간격, 그리고 설치각도의 3가지 설계인자를 조합하여 실험을 실시하였다.

LSPIV 기법을 적용하여 측정한 유속자료를 분석한 결과 수제역 내 평균유속이 유입부 유속에 비해 40 % 이하로 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 유속성분을 통하여 수제역 내 와도 및 사분면 검토를 실시한 결과 수제역 내에서는 비교적 안정적인 수치를 보이고 있어 호안침식방지에 유리할 것으로 보인다. 수제의 길이가 하폭의 15% 이하인 경우 상향 또는 하향수제가, 20 % 이상인 경우 직각수제가 유리한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 수제, ADV, LSPIV

1. 서 론

수제는 하천에서의 흐름 방향과 유속을 제어하여 하안 또는 제방을 유수에 의한 침식작용으로부터 보호하기 위해 호안 또는 하안 전면부에 설치하는 구조물이다. 수제를 설치하는 목적은 하안 및 제방의 보호, 유로의 제어, 그리고 수환경의 개선 등을 들 수 있다. 수제의 종류는 구조상의 분류로서 투과수제, 불투과수제, 그리고 혼용수제로 구분한다. 배치상의 분류로서 횡수제와 평행수제로 나누고 횡수제의 경우 흐름 방향의 법선과 이루는 각도에 따라 상향수제, 직각수제, 그리고 하향수제로 나눌 수 있다.

국내에는 해방 이후 수제의 시공 사례가 거의 없었으나, 최근 들어 자연형 하천과 하천생태계 복원에 대한 관심이 점증하면서 수리학적 기능 외에, 다른 수공구조물들과 비교하여, 다양한 생태환경을 제공하고 하안 부근의 경관을 개선하는 기능을 가지는 수제에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 현재 국내에는 수제설계에 대한 지침이 거의 없는 상황이며, 하천설계기준(건교부, 2002)에도 일본과 유럽에서 제안된 경험적 공식을 인용하고 있다. 이 연구에서는 수제설계의 지침을 제공하고자 다양한 조건에 대해 불투과 횡수제의 설계인자(길이, 간격, 방향)에 따른 수제의 영향과 그 효과를 실험적으로 규명하고자 한다.

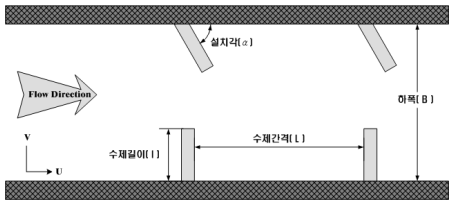


그림 1. 수제 개요도

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : syhwang@kict.re.kr, jinx9482@kict.re.kr
** 창원대학교 토목공학과 전임강사 · E-mail : minilite@changwon.ac.kr
*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : yeo917@kict.re.kr

2. 국내·외 연구동향

건설부 국립건설시험소(1987)는 남한강 본류와 달천의 합류점에서 제방안정공법의 하나로서 수제(횡수제와 평행수제)를 제시하여 고정상 및 이동상 실험을 수행하였다. 설치각도에 따른 차이는 크지 않으나 하향수제가 비교적 세굴이 적었고 상향수제의 하상변동이 비교적 크게 나타났다. 노영신 등(2001) 과 김진홍 등(2003)은 기존 치수위주로 건설되어진 수제에 대하여 하천의 생태환경을 고려한 수제의 형상 및 자연형 재료개발에 관하여 토의하였다.

국외의 경우, Copeland(1983)는 만곡부에서 호안 보호공으로서 불투과 횡수제의 효과를 평가하고 검증하고자, 횡수제의 설계와 관련된 매개변수인 간격-길이 비, 설치각도 등의 조건에 따른 하상 및 제방의 세굴양상을 살펴보았다. 한편, 호안에 대한 수제의 설치각도에 따른 영향 검토를 통하여 수제의 설치각도에 따른 흐름 및 세굴양상의 차이는 미미하며, 수제의 길이와 설치간격이 더 지배적인 설계인자로 작용함을 규명하였다. 그러나 수제 위로 유수가 월류하는 월류수제의 경우 하향수제는 흐름의 방향이 하안쪽으로 향하게 되므로 월류수제의 경우 하향수제 보다는 상향수제를 권장하고 있다(Nikitin, 1995).

미국 연방도로국(FHWA, 1985)은 모형 시험, 문헌 조사, 그리고 현장조사에 기초하여 수제에 관한 종합적인 연구를 수행한 결과 수제의 설계에서 수제 길이를 투과성과 관련지어, 투과율이 35 % 이하인 경우와 80 % 이상인 경우에 대해 각각 다르게 설정할 것을 권장하고 있다. 수제의 간격에 대해 Petersen(1986)은 직하류 수제의 위치에 따른 함수로 규정하고 대체로 수제 길이의 1.5 배에서 6 배, 주운과 홍수조절을 위해서는 1.5 배에서 2 배가 가장 적절하다고 주장하였다.

山本(1996)는 일본의 수제공에 관한 역사, 이론 그리고 전망 등을 상세히 다루었으며 수제의 설계 및 설치를 위한 분석을 위해 수제 설치구간에서 하도특성의 파악이 중요함을 지적하였다. Sukhodolov 등(2002)은 수제로 인한 흐름양상과 세굴, 퇴적 그리고 그로 인한 하천지형의 변동에 대해서 수리실험과 독일 Elbe 강에 설치된 횡수제에 대한 현장측정을 통하여 살펴보았다. 연구결과, 수제역 내에서의 흐름양상은 수제의 길이와 수제 간의 간격에 주로 의존됨을 관찰하였다.

3. 모형 실험

3.1 실험장비 및 시설

유속장의 측정을 위한 계측기로는 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter, Nortek AS)를 사용하였으며 샘플링 회수는 25 Hz이다. LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry) 적용을 위한 영상장비로는 Digital Video Camera(DTR-TRV900, Sony Co.)를 사용하였으며, 부유입자는 튀밥(popped rice), 분석도구로는 CACTUS 3.1(IIT Co.)을 이용하였다.

0.012~0.4 CMS를 공급할 수 있는 1.2 m 온나비 위어를 유량공급장치로 설치하였다. 실험수로는 그림 2와 3에서 보이는 바와 같이 직선수로(폭 2.0 m, 길이 15 m, 높이 0.65 m)와 곡선수로(폭 2.0 m, 길이 32.4 m, 높이 0.65 m)로 구성하였다. 가변곡률곡선(sine generated curve)을 통하여 제작된 곡선수로는 만곡정점에서의 최소곡률반경이 6.0 m와 4.0 m인 2개의 만곡부를 갖도록 제작하였다. 수제의 모형은 콘크리트로 제작하였으며 모서리를 둥글게 처리하여 형상에 따른 영향을 배제하였다.

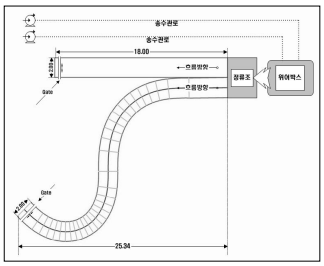


그림 2. 평면배치도

그림 3. 실험 수로 전경

3.2 실험 방법

수리실험을 위하여 표 1에 제시된 바와 같이 흐름에 대한 다양한 사항들을 고려하여 흐름조건을 선정하였다. 수리실험은 수로폭 대 수제의 길이(l/B)와 수제 길이에 대한 수제의 간격(L/l)을 인자로 하여 직선 및 만곡수로에서 각각 실험을 계획하였다. 현재 직선수로에서 고정상 실험을 완료하였으며, 추후 수제 설치방향을 고려한 만곡 및 이동상 실험을 수행할 예정이다. 고정상 직각수제에 대한 실험 경우들을 표 2에 정리하였다.

표 1. 수리실험 흐름 조건

고려사항	실험조건
등류 및 정상류 조건	Q = 0.120 CMS
Froude 수와 Reynolds 수 제한	H = 0.15 m
난류 및 상류(subcritical flow) 조건	U = 0.400 m/s
편경사(super elevation) 영향 배제	Fr = 0.33
폭-수심비 조건(B/H ≥ 12)	Re = 52,678 (T = 15.0°C)

표 2. 수리실험 경우(직각수제)

SF-series		간격(L/l)		
		2	4	6
길이 (l/B)	0.10	SF102	SF104	SF106
	0.15	SF152	SF154	SF156
	0.20	SF202	SF204	SF206
	0.25	SF252	SF254	SF256

ADV를 이용하여 중층(수심의 1/2 지점)의 유속을 측정하였으며(그림 4 참조), 표층유속은 그림 5와 같이 시간차를 두고 촬영된 두 개의 영상에서 입자들의 변위를 측정하여 각 입자들의 유속을 측정 대상역 전체의 순간 유속장으로 획득할 수 있는 LSPIV기법을 이용하여 측정하였다. ADV를 이용한 측정결과는 측정한 값을 평균하였으며, LSPIV기법에서 획득한 영상은 CACTUS 3.1을 이용하여 유속장으로 변환하였다.

그림 4. ADV를 이용한 측정

4. 실험 결과

수제역내 흐름 양상은 대체로 그림 5와 같고 하나의 수제역내에 본류의 흐름과 분리되는 소용돌이가 1개 이상 발생한다. 이러한 소용돌이는 수제역내 흐름을 완화시켜 호안이나 제방에 보호를 도모할 수 있다. 그림 6에 ADV를 이용하여 측정한 중층의 유속의 분포를 나타내었다. 상류측 수제 선단부에서 흐름분리가 관찰되었으며, 수제역 내에서는 상류측 수제쪽으로 치우친 소용돌이가 발생하고, 하류측 영역으로 부터 상류측 수제 선단부로 강한 흐름이 발생하여 본류역으로 유입되었다. 상류측 수제의 선단부에서 분리된 흐름은 맥동류를 형성하며 하류로 흘러감을 관찰하였다. 상류측 수제 선단부에서 발생한 후류의 영향으로 하류측 수제의 선단부에서 유입과 유출이 주기적으로 반복됨을 관찰할 수 있었다. 하류측 수제 선단부에서 유입된 흐름은 호안측으로 들어간 후 상류측 수제 선단부로 흘러가고 일부의 흐름은 수제역 내의 소용돌이로 유입되었다.

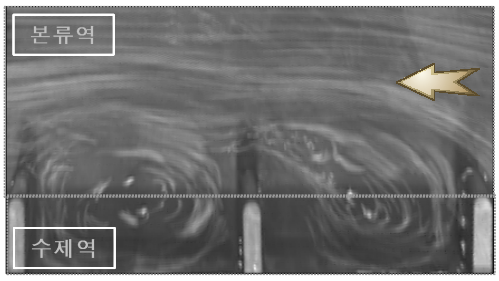


그림 5. 수제설치 구역내 흐름 양상

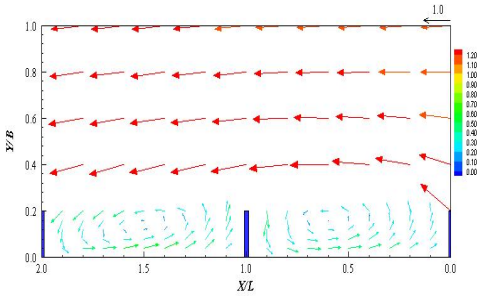
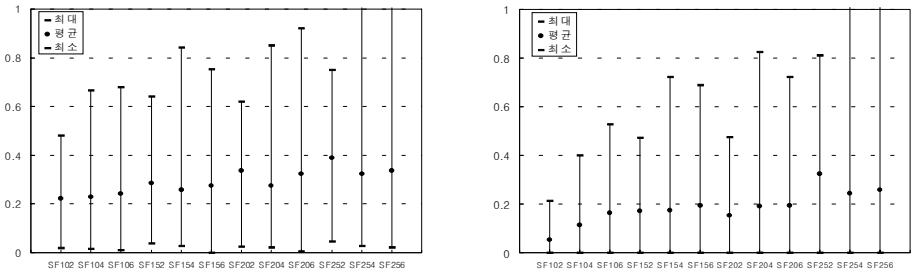


그림 6. 수제역내 유속벡터도(ADV)

본류역 단면평균유속은 수제설치구역으로 들어오기 전 유입부 단면평균유속에 비해 약 10 % 증가된 값을 보이며, 이는 강한 유속을 본류역으로 유도하고 동시에 수제역내 유속을 완화시키는 작용을 하게 된다. 그림 7은 수제역내 측정한 유속의 통계치를 나타낸 것이며, 제시된 값은 수제역내의 유속의 평균치를 수제설치구역으로 들어오기 전 유입부 단면평균유속으로 무차원화 한 값이다. 수제역내의 유속의 평균치는 중층의 경우 수제역

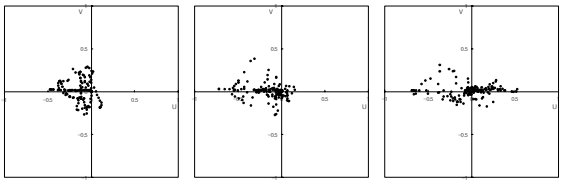
내 유속의 평균치가 유입부 유속의 약 40 % 이하로 떨어지고, 표층의 경우 약 30 % 이하로 감소됨을 알 수 있다. 수제의 길이와 간격에 따른 평균 유속의 변화는 크지 않은 것으로 보이나, 이는 수제역내에 형성된 소용돌이의 규모나 형상을 고려하지 않고 단순 평균함으로써 나타난 것이다. 또한 중층의 측정결과에서 수제의 길이가 $l/B=0.25$인 경우 수제 간격이 커지면서 유입부 유속을 상회하는 값이 나타나는 경우도 관찰되었으나 이는 수제역내 호안 쪽이 아닌 본류역 인접부에서 발생한 것으로 수제 설치의 목적에 위배되는 결과는 아니다.



(a) ADV (b) LSPIV

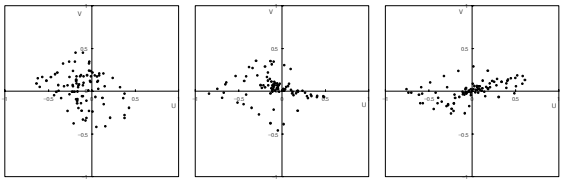
그림 7. 수제역내 유속의 통계치

수제역내의 흐름 양상을 살펴보기 위해 유속 벡터의 성분을 횡방향(V)과 종방향(U)으로 분해하여 사분면에 나타내는 사분면 분석(quadrant analysis)을 실시하였으며, 두 성분이 모두 양의 값인 경우 1사분면에 모두 음인 경우 3사분면에 표시된다. 수로폭에 대한 수제 길이의 비, $l/B=0.15$인 직각수제에 대한 중층(ADV)과 표층(LSPIV)에서 측정 결과를 각각 그림 8과 9에 나타내었다. 중층의 유속이 표층에 비해 크게 나타나며 수제의 간격이 커짐에 따라 횡방향 유속이 작아지고 종방향 유속이 커지는 경향을 보인다.



(a) SF152 (b) SF154 (c) SF156

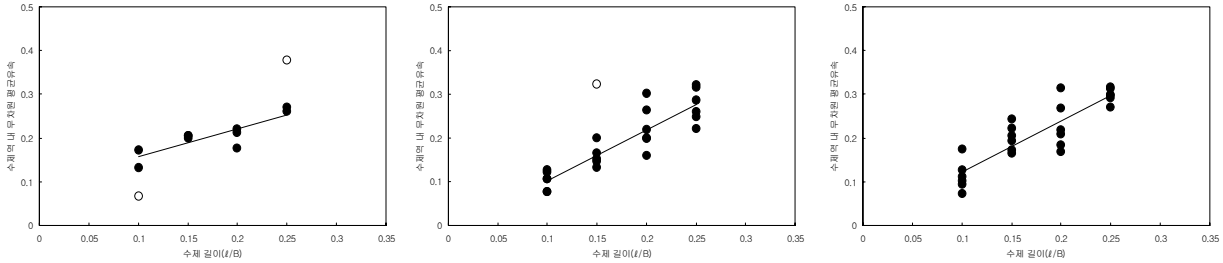
그림 8. 사분면 분석(ADV)



(a) SF152 (b) SF154 (c) SF156

그림 9. 사분면 분석(LSPIV)

수제의 길이에 따른 수제역 내 평균 유속의 변화를 살펴보기 위해 수제의 설치간격을 무시하고 설치각도에 따라 직각, 상향(60°와 75°), 그리고 하향(105°와 120°) 수제로 분류하였다(그림 10 참조). 그림에서 직선은 회귀분석을 통해 얻은 직선이며 외곽선으로 나타낸 점들은 이상치로 판단하여 회귀분석에 포함하지 않았다.



(a) 직각수제: 90° (b) 상향수제: 60°, 75° (c) 하향수제: 105°, 120°

그림 10. 수제 길이에 따른 평균 유속의 변화

직각수제의 경우 수제의 길이가 커짐에 따라 수제역 내 평균 유속이 완만하게 증가함을 알 수 있다. 이에 비해 상향 및 하향 수제의 경우 평균 유속의 변화 경향이 더 두드러지게 나타난다. 즉, 직각수제에 비해 상·하향 수제에서 수제의 길이가 짧은 경우 평균 유속이 더 작고, 길이가 긴 경우 평균 유속이 더 크다. 이는 수제역 내 평균 유속의 관점에서 수제의 길이가 하폭의 15 % 이하인 경우 상향 또는 하향 수제가 유리하고, 하폭의 20 % 이상인 경우 직각수제가 유리함을 나타낸다. 그러나 이러한 경향을 보다 명확하게 파악하기 위해서는 수제의 간격을 길이의 함수로 표현하여 보다 다양한 수제의 길이에 대한 검토가 요구된다.

5. 결론 및 향후 연구

수제의 설계인자인 방향, 길이, 그리고 간격에 따른 수제역내 유속분포를 파악하기 위한 실험을 계획하였고 그 중에서 길이와 간격에 따른 유속분포를 ADV와 LSPIV를 이용하여 각각 중층과 표층에 대해 측정하였다. 수제의 설치에 따라 본류역의 유속은 유입부의 유속에 비해 약 10 % 증가하였고 수제역내에서 평균유속은 중층의 경우 40 %, 표층의 경우 30 % 이내로 완화되었다. 수제역내에는 1개 이상의 소용돌이가 발생하며, 사분면 분석을 통하여 수제의 길이가 클수록 보다 원형에 가깝게 형성되고 수제의 간격이 길어짐에 따라 흐름 방향의 신장 또는 2개 이상의 소용돌이로 분리됨을 확인하였다.

설치각도 별 수제 길이에 따른 수제역 내 평균 유속의 변화를 살펴본 결과 직각수제에 비해 상향 및 하향 수제의 경우 평균 유속의 변화 경향이 더 두드러지게 나타남을 관찰하였다. 보다 다양한 경우에 대한 실험이 요구되나, 수제역 내 평균 유속의 관점에서 수제의 길이가 하폭의 15 % 이하인 경우 상향 또는 하향 수제가 유리하고, 하폭의 20 % 이상인 경우 직각수제가 유리한 것으로 나타났다.

수제에 대해 공식적이고 폭넓게 시험된 설계 기준이 존재하지 않는 실정에서 설계인자에 대한 적정 범위의 제시에 대한 현장의 요구는 절실한 실정이다. 따라서 실현 가능한 지표를 설정하고 그에 따라 설계인자에 대한 실질적인 평가와 설계인자 별 수제의 효과를 변별력 있게 평가할 수 있는 분석 방법의 개발이 요구된다.

참고문헌

1. 건교부, 2002, 하천설계기준.
2. 건설부 국립건설시험소, 1987, 하천만곡부 제방안정공법에 관한 조사실험보고서.
3. 김진홍 등, 2003, “자연형 수제의 공법 개발”, 한국수자원학회 학술발표논문집(Ⅰ), 한국수자원학회.
4. 노영신 등, 2001, “말뚝수제의 수리특성에 관한 연구”, 대한토목학회, 2001 학술발표회 논문집, 1-4.
5. 山本, 晃一, 1996, 日本の水制, 山海堂, 日本. (in Japanese)
6. Copeland, R. R., 1983, "Bank Protection Techniques Using Spur Dikes", Miscellaneous paper HL83-1, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
7. FHWA, 1985, Design of Spur-type Streambank Stabilization Structures, U.S. DOT, FHWA, Rep. No. FHWA/RD 84/101, McLean, VA.
8. 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. (in Japanese)
9. Petersen, M., 1986, River Engineering, Prentice Hall, N.J..
10. Sukhodolov, A., et al., 2002, "On the Correspondence Between Morphological and Hydrodynamical Patterns of Groyne Fields", Earth Surface Processes and Landforms, 27(3), 289-305.