수리 및 3차원 수치모형을 이용한 경사형 수제주변 흐름해석

Flow Analysis around inclined Crest Groyne for 3-D Numerical Simulation

여홍구*, 강준구**, 김성중***

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

요 지

국내에서의 수제는 하안 및 제방의 보호, 유로제어 및 주운 등의 목적에 의해 설치되기 보다는 수제로 인해 발생되는 수제역(recirculation zone)의 다양한 흐름이 수중생물의 다양한 서식처 및 홍수 시 어류의 피난처 제공한다는 환경적인 목적이 지배적이다. 따라서 홍수시 하천의 통수능 감소영향이 상대적으로 작고 국부세굴에 대해 안정적인 경사형 수제에 대한 관심이 크며 몇몇 곳에서는 시공되어 졌다. 하지만 경사수제에 대한 설계기법은 현재 미미한 상태이며 선행되어져야할 구조물 주변의 흐름해석에 관한 연구도 미미하다. 이에 본 연구에서는 3차원 수치모형을 적용하여 주수로와 수제역의 흐름해석을 수행하였다. 연구내용은 수리모형변화와 수치모형실험을 병행하여 수행하여 수치모형결과를 검증하였으며 그 결과를 적용하여 경사형 수제주변의 흐름을 해석하였다. 수치모형은 Flow 3D모형을 이용하여 경사형 수제조건에 따른 흐름해석을 수행하였고 수리모형실험은 수치모형과 동일한 2가지 조건에 대해 수행하여 수치모형결과와 비교 분석 하였다.

본 연구의 목적은 경사형 수제설치로 변화되는 수제역 흐름을 3D 수치해석으로 분석하여 수제역의 환경적 효과(수중생물의 서식처 등)에 대한 기초자료를 제공하는 것이다. 연구결과, 수치모형실험은 수리모형결과와 일치하였으며 경사형 수제특성에 따라 수심별 흐름변화를 분석할 수 있었으며 기존 불투과 및 투과수제와 다른 결과를 도출하였다.

핵심용어 : 경사형수제, 수제역(recirculation zone), 3D 수치모형, 수리실험

1. 서 론

경사수제는 수위에 따라 흐름수축의 정도가 달라지기 때문에 수위에 따른 흐름변화에 적절하게 대처할 수 있을 뿐만 아니라 수제 돌출에 따른 통수능 저하와 이에 따른 수위상승 및 월류 위험이 있는 좁은 수로의 경우, 혹은 보호되어야 할 제방의 높이가 큰 경우에 유리하다. 또한 하천 만곡부 흐름과 급격한 수위상승과 같은 변화에 잘 대처할 수 있으며 (FHWA, 1984) 직벽 수제나 말뚝형 수제에 비해 경관이 뛰어나고 친수성이 뛰어나 많은 연구자들이 불투과 수제 공법으로 경사수제를 추천하고 있다(Franco, 1966; Achson, 1968; Jenson et al., 1979; Richardson and Simons, 1979). 불투과수제의 경우 수위가 수제 선단을 초과하여 월류가 발생하면 수제를 타고 넘는 강한 흐름이 수로제방을 따라 수제 직하류에 형성된다. 또한 수제선단에서의 흐름회절 및 돌출된 수제 끝단에서 흐름집중이 발생하여 수

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원부 선임연구원 · E-mail : yeo917@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원부 선임연구원 · E-mail : jgkang02@kict.re.kr

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원부 연구원 · E-mail : jinx9482@kict.re.kr

제 사이의 제방침식 및 수제부의 국부세굴을 가속화할 수 있다. 따라서 불투과 수제는 수위에 따른 악영향을 최소화될 수 있도록 최악의 홍수위조건이라 하더라도 최소한 0.5 m 이상 월류하지 않도록 설계하거나(FHWA, 1985), 경사수제를 적용하는 것이 유리하다.

현재 경사 수제는 급격한 유량증가 및 수위 상승에 따른 수제 주변 흐름특성에 대한 연구가 미미하고 수제길이 및 높이의 결정, 이에 따른 수제선단 경사 등과 같은 주요 설계 기준이 제시되어 있지 않은 실정이다. 또한 경사수제 설치에 따른 흐름변화 및 특성이 일반적인 불투과성 직벽 수제 또는 투과수제와는 다르기 때문에 수제 끝단 및 주변에서 발생하는 유사의 세굴 및 퇴적 등의 하상변동이 다르게 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 향후 경사수제 설치에 대한 설계기준 마련을 위해 경사수제의 주요 특성인 수위변화와 수제경사에 따른 수제주변 흐름특성 및 본류역에 미치는 영향을 수리 및 수치실험을 통해 파악하였다

2 모형실험

2.1 수치모형실험 (Flow-3D)

본 논문에서 사용된 수치모델링 프로그램은 FLOW SCIENCE, Inc에서 개발된 유체역학프로그램(CFD)인 FLOW-3D를 이용하여 수치모의를 수행하였다. 모형은 연속방정식과 운동량방정식을 지배방정식으로 사용되고 있으며 본 연구에 사용된 난류모형은 K-ε 모형, RNG(Renormalized Group Theory)모형이다. 모형에서 사용된 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식이며 다음과 같다.

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

V_f : 유체의 요소체적, ρ : 유체의 밀도, u, v, w : 각 방향의 유속, A_x, A_y, A_z : 각방향의 요소면적 운동량방정식은 다음의 Navier-Stokes방정식으로 아래 식과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f}\left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + G_x + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f}\left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + G_y + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f}\left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + G_z + F_z \quad (4)$$

2.2 수리모형실험

경사수제 주변의 흐름특성에 대한 수리실험은 2 m(B)×40 m(L)×1 m(H)의 직선 수로에서 수행되었다. 실험에 적용된 수제는 그림 12(a)에서 보는 바와 같이 수제의 높이(h_g)가 0.15 m이며 길이(l) 0.6 m인 경사각 15°의 경사수제이며, 45° 각도의 제방에 설치하였다. 경사수제의 형태는 그림12(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 평판형과 수제의 좌우측면이 경사진 측면경사형의 두 가지 경우에 대해 수행하였으며, 수위변화에 따른 흐름특성을 파악하기 위해 수제에 대한 수심의 변화를 경사수제의 높이와 수심에 대한 비(d/h_g)로 정의하고, 표 4에서 보는 바와 같이 d/h_g=0.6~1.19의 범위로 변화시켜 실험조건을 설정하였다.

수제 주변 흐름장은 LSPIV(large scale particle image velocimetry)기법을 이용하여 측정하였으며, 측정결과로부터 수제하류의 재순환영역(recirculation area)의 범위를 분석하고 수제부 및 수제의 영향을 받는 본류역 수제 하류부의 수로폭 방향 유속분포를 비교하여 경사수제 설치에 따른 수제 주변 흐름장의 특성을 파악하였다.

표 4. 실험조건

	수심 d (m)	수제길이 L'(m)	수심/수제높이	유량 Q(cms)	평균유속 V(m/s)	Fr	투과율 P_{tr}
측면 경사형	0.090	0.400	0.60	0.050	0.352	0.37	30.0
	0.110	0.351	0.73	0.050	0.281	0.27	36.7
	0.111	0.349	0.74	0.074	0.411	0.39	37.0
	0.117	0.334	0.78	0.083	0.434	0.41	39.0
	0.118	0.332	0.79	0.095	0.492	0.46	39.3
	0.130	0.304	0.87	0.110	0.510	0.45	43.3
	0.135	0.292	0.90	0.126	0.559	0.49	45.0
	0.142	0.276	0.95	0.130	0.544	0.46	47.3
	0.146	0.266	0.97	0.140	0.567	0.47	48.7

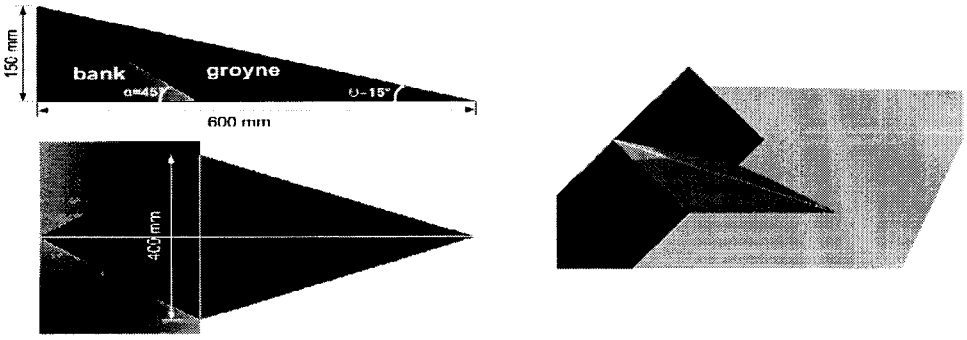

그림 1. 경사수제의 형태

3. 수치모형과 수리모형실험 결과

재순환영역의 특성은 수제설치에 따른 수제 하류 제방보호의 한계를 정의하는 중요한 인자로써 이는 수제길이 및 투과율에 따라 달라진다. 그러나 경사수제는 일반적인 직벽 수제와는 그 특성이 다르기 때문에 경사수제의 재순환영역 특성을 파악할 수 있다면 수제의 길이 및 경사를 결정하는데 지표가 될 수 있다. 본 연구에서는 재순환영역의 특성을 나타내는 지표로써, 본류역에 미치는 영향을 나타내는 재순환 영역의 폭 S_h, 제방보호 한계를 나타내는 길이 S_L 그리고 재순환 영역의 유속분포 결과를 검토하였다.

3.1 수치모형실험결과

수치모형에서는 수위에 다른 경사수제에 흐름특성을 비교하였다. 특히 실험결과분석은 수제 하류부 수제역에 대한 것으로 수위변화에 따라 비교하였다. 수치실험 조건은 수위에 대해 구분하였는데 수제높이에 대해 1.0, 0.8 과 0.6 세가지 조건이다. 그림 2-3은 수치실험결과를 나타낸 것으로 각 실험조건에 따른 수심별 유속분포를 나타낸 것이다. 수위조건에 따라 수제역(재순화영역)의 흐름현상이 변화함을 알 수 있다. 수제역의 흐름은 수심비 1.0에서는 수제주변 흐름이 월류수제 형태와 유사하며 수제역에서 역류흐름이 발생하지 않았다. 수심비 0.8과 0.6에서의 수제주변흐름은 표면흐름의 경우 돌출수제와 비슷한 흐름현상을 보이나 재순환 영역의 규모는 작았다. 표면에서의 재순환영역 흐름에서는 제방부근에서 역류흐름이 발생하였다. 하지만 바닥면의 흐름은 제방경사의 영향으로 인해 역류현상은 미미하였다.

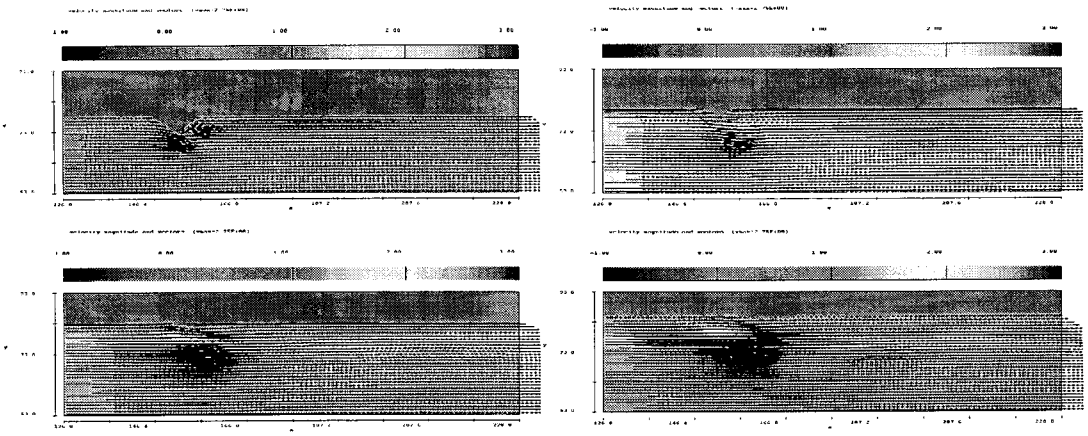

그림 2 수심에 따른 수제주변 흐름(수심비=1(수심/수제높이)

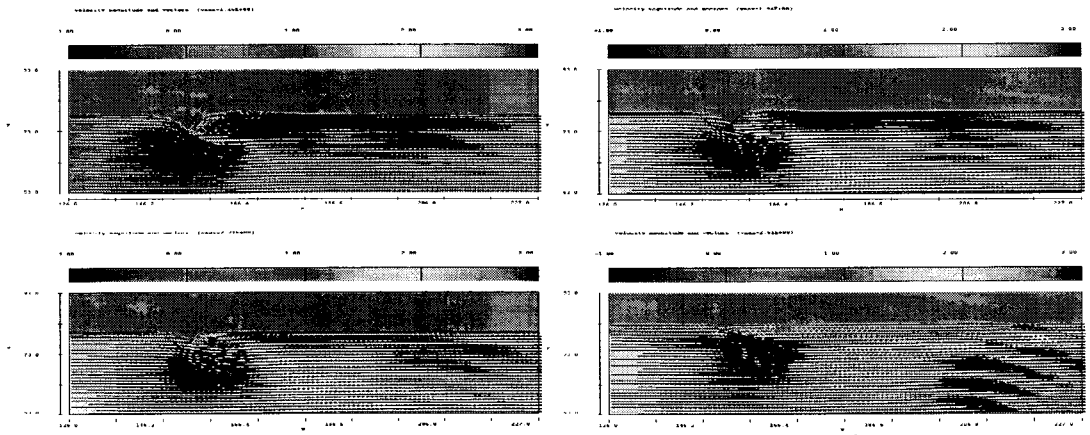

그림 3 수심에 따른 수제주변 흐름(수심비=0.8(수심/수제높이)

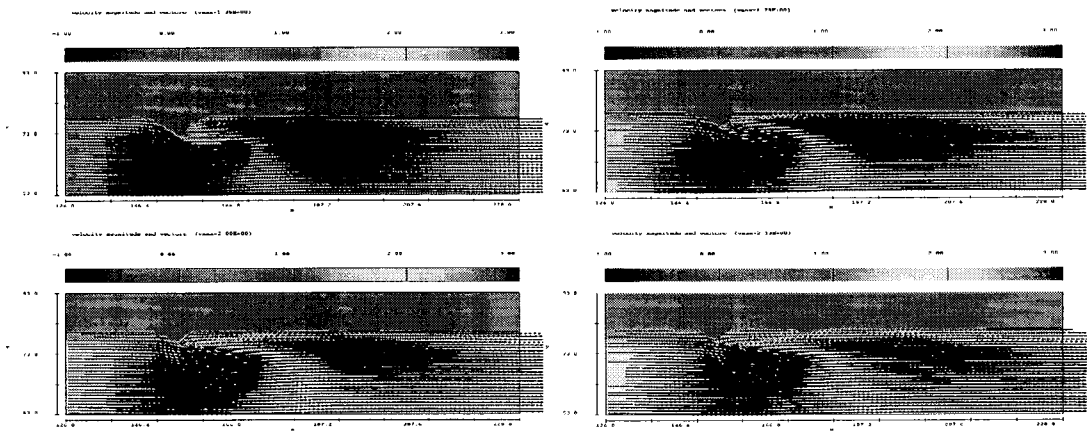

그림 4 수심에 따른 수제주변 흐름(수심비=0.6(수심/수제높이)

3.2 수리모형실험결과

수리모형의 실험결과는 그림 5와 6에서 보는 바와 같으며 재순환영역의 길이는 수위가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 재순환 영역의 유속분포 특성은 그림 6에서 보는 바와 같이 최대 역류속은 재순환영역의 0.4~0.7 S_L에서 발생하는 것으로 나타났으며 측면경사형은 평균유속의 0.3 배, 평판형은 0.45 배가 발생하는 것으로 나타났다.

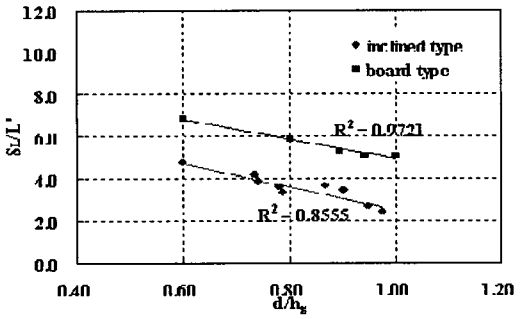

그림 5. d/hg에 따른 S_L의 변화

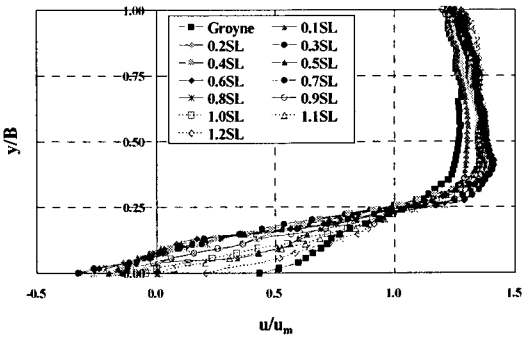

그림 6 재순환 영역의 유속분포

4. 결 론

본 연구에서는 경사수제에 대해 수리모형과 수치모형실험을 수행하였으며 이를 통해 수제주변의 흐름특성을 분석하였다.

수치모형에서는 수심비에 따른 재순환영역의 특성을 살펴보았으며 수리모형실험에서는 재순화영역의 길이와 수제역의 유속분포를 비교하였다.

수치모형결과 경사수제의 수제주변 흐름은 수심비에 따라 다르게 모의되었는데 이는 수제모양에 따른 영향과 표면에 돌출된 수제에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다. 수심비 1.0에서는 수제주변 흐름이 월류수제 형태와 유사하며 수제역에서 역류흐름이 발생하지 않았으며 수심비 0.8과 0.6에서의 수제주변흐름은 표면흐름의 경우 수표면에 수제영향으로 역류흐른과 재순환 영역이 뚜렷하였다.

수리모형의 실험결과 재순환영역의 길이는 수위가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며 최대 역류속은 재순환영역의 0.4~0.7 S_L에서 발생하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. FHWA, (1984). Selection and Design of Flow Control and Stream Bank Stabilization Structure. US. DOT, FHWA, Rep. No. FHWA/RD 83/099, Washington, D.C.

2. 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., 829-846.

3. Acheson,A.R.(1968). River Control and Drainge in New Zealand, Ministry of Work, New Zealand.

4. Jansen, P. Ph. (ed.), 1979. Principles of River Engineering, Pitman, London, England.

5. Richardson, E. V. and Simons, D. B., 1973. "Spurs and Guide Banks", Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.

6. FHWA, 1985. Design of Spur-type Streambank Stabilization Structures. U.S. DOT, FHWA, Rep. No. FHWA/RD 84/101, McLean, VA.