

# 수제길이와 투과율에 따른 수로흐름에 대한 실험적 연구

## Experimental Study on Groynes Length and Permeability Change in Flat-Bed Channel Flow

여홍구\*, 강준구\*\*, 김성중\*\*\*, 노영신\*\*\*\*

Yeo, Hong Koo / kang, Joon Gu / Kim, Sung Jung / Rho, Young Sin

### 요 지

본 연구에서는 수리실험을 통해 단일 돌출수제 설치에 따른 흐름중심선과 수제 하류부의 흐름분리영역의 특성을 파악하였다. 흐름중심선은 최대유속이 발생하는 유선을 의미하며, 수제 설치로 인한 수제 선단부 흐름분리 현상은 흐름 중심선의 형태를 변화시킨다. 이러한 주요 특성들은 수제길이 및 투과율과 밀접한 연관이 있으며, 제방의 침식방지 및 수로의 흐름제어라는 수제설치의 목적을 고려해 볼 때 매우 중요한 변수라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 수리실험을 통해 단일 돌출수제의 길이 및 투과율 변화에 따른 수제 주변의 흐름장을 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)를 이용하여 측정하고, 수제길이 및 투과율에 따른 흐름 중심선과 흐름분리 영역의 특성을 파악하였다. 실험결과, 흐름중앙선과 흐름분리영역의 폭은 Fr 수에 따라 큰 변화를 보이지 않으나 수제의 길이 및 투과율에 따라 변화하는 것으로 나타났으며, 이러한 변화 경향은 흐름중앙선과 흐름분리영역이 유사한 것으로 나타났다.

**핵심용어 : 수제, 흐름중심선, 흐름분리영역, LSPIV**

### 1. 서론

수제는 하천에서의 흐름 방향과 유속을 제어하여 하안 또는 제방을 유수에 의한 침식작용으로부터 보호하기 위해 호안 또는 하안 전면부에 설치하는 구조물이다. 이러한 수제의 설치에 따른 수제 주변 흐름은 크게 수제 하류부의 흐름분리에 의한 재순환이 발생하는 수제역과 수제의 돌출로 인해 흐름의 변화가 발생하는 본류영역으로 구분할 수 있다. 수제역의 재순환 영역은 그림 1에서 보는 바와 같이 흐름분리 영역의 길이  $S_L$  및 폭  $S_b$ 에 의해 정의되며, 재순환 영역에서 발생하는 와류는 저수호안 및 제방 침식의 원인이 된다. 흐름중심선은 수로 폭에 대해 최대유속이 발생하는 유선이며, 수제의 설치는 수로중앙에서 발생하는 흐름중심선의 형태를 변화시킬 뿐만 아니라 유속을 증가시킨다. 흐름 중심선은 그림 1에서 보는 바와 같이 수제가 설치된 제방에서부터 최대유속이 발생지점까지의 거리  $T_{CL}$ 와 흐름중심선의 길이  $T_{UL} + T_{DL}$ 로 정의할 수 있다. 수제 주변 흐름에 대한 이러한 주요 특성들은 수제부의 국부세굴 및 수제 주변역의 침식 및 퇴적 등의 하상변동에 큰 영향을 미치기 때문에 저수호안 및 제방침식 방지 및 수로의 흐름제어를 목적으로 하는 수제의 설치에 있어서 매우 중요한 관심사이다. 또한 수제의 기본 설계 인자인 수제길이, 투과율, 수제간격 등을 결정하는데 있어서 매우 중요한 인자로서 수제 조건에 대한 수제역 및 수로흐름영역의 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

수제와 같은 하천의 돌출구조물에 대한 국외 연구는 대부분 수제 주변의 국부적인 흐름장과 돌출 구조물에

\* 정회원.한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원-E-mail : yeo917@kict.re.kr

\*\* 정회원.한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원-E-mail : jgkang02@kict.re.kr

\*\*\* 정회원.한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원-E-mail : jinx9482@kict.re.kr

\*\*\*\* 정회원.한국건설기술연구원 수자원연구부 post-Doctor-E-mail : rhoys@kict.re.kr

의한 세굴발생(Schmidt 등, 1993; Melville과 Coleman, 2000)에 초점이 맞춰져 있으며, 몇몇 연구에서만 수제 하류부 재순환 영역에 대해 이루어졌다. 이러한 재순환 영역에 대한 최초의 연구는 Francis 등(1968)의 수제 하류부 재순환 영역에 대한 실험적 연구를 들 수 있으나 유속의 측정은 이루어지지 않았다.

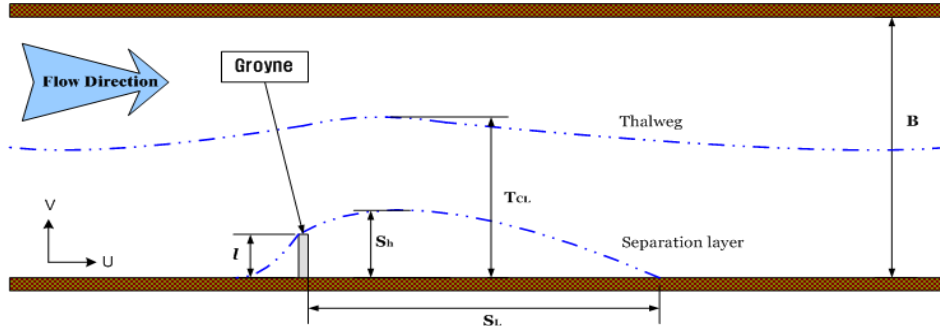


그림 1 단일수제 설치에 따른 흐름특성 및 측정인자 (Ettema와 Muste, 2004)

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( $x$ : 수로 길이,  $y$ : 제방에서의 수직한 거리,  $b$ : 수제 길이). 그러나 수제의 종류가 두 가지로 수제종류에 대한 재순환 영역을 분석하지 못했다. Tingsanchali와 Maheswaran(1990)은 수제 하류부 재순환 영역에 대한 수치해석을 수행하여 수제 주변의 국부적인 흐름장의 주요특징을 제시하였으나 불투과 수제에 대해서만 적용되었으며, 하류부 흐름분리 영역과 흐름중심선에 대한 수제의 영향에 대해서는 구체적으로 다루어지지 않았다. 최근의 연구는 Ettema 와 Muste(2004)에 의해 수행되었는데, 길이 변화에 따른 불투과 수제의 하류 재순환 영역과 흐름중심선에 대한 축척 영향(Scale Effects)만을 분석하였으며, 투과수제에 대해서는 다루지 않았다.

국내의 경우에는 최근 들어 자연형 하천과 하천생태계 복원에 대한 관심이 집중되면서 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 국외 연구에 비해 연구 자료가 매우 부족한 실정이다. 강준구 등(2005)은 수제 하류부 재순환 영역과 최대세굴의 주요인자인 수제선단 유속을 투과율, 접근유속, 수제길이에 대해 실험을 통해 수제 하류부의 재순환 영역에 대한 실험식을 제안하였으나, 수제에 의한 분류흐름의 변화에 대해서는 언급하지 않았다.

본 연구에서는 수리실험을 통해 단일 돌출수제의 길이 및 투과율 변화에 따른 수제역 및 수제 주변의 흐름장을 측정하고, 흐름 중심선과 흐름분리 영역의 특성을 파악하였다.

## 2. 수리실험

### 2.1 실험장비 및 시설

수제 설치에 따른 흐름장 측정실험은 2.0 m( $B$ ) $\times$ 0.65 m( $h$ ) $\times$ 40 m( $L$ )의 직선수로에서 수행되었다. 유량공급은 1.2 m 폭 위어의 유량공급 장치를 설치하여 최대 0.4 CMS를 공급할 수 있다. 수제는 불투과 및 투과수제의 두 종류로 아크릴로 제작되었다. 불투과수제는 길이( $l$ )가 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m로 길이에 대한 수로폭의 비  $l/B$ 는 0.1, 0.15, 0.2, 0.25이다. 투과수제는 길이가 0.3m 인 수제에 대해 투과율  $P$ 를 각각 20%, 40% 로, 투과율은 수제 전체 단면적에 대한 통수단면적의 비를 나타낸다.

유입부 유속의 측정은 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter, Nortek AS)를 사용하였으며 샘플링 회수는 25Hz이다. 수제역 및 수제 주변의 흐름장을 측정하기 위해서는 전체 흐름장을 동시에 측정할 수 있는 기법이 필요한데, 본 연구에서는 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)기법을 적용하여 흐름장을 측정하였

다. 흐름장 촬영을 위한 영상장비로 Digital Video Camera(DCR-PC350, Sony Co.)를 사용하였으며, 부유입자는 튀밥(popped rice), 분석도구로는 CACTUS 3.1(IIT Co.)을 이용하였다.

## 2.2 실험 방법

수리 실험은 수심이 0.15 m의 동일한 조건하에서 0.25 m/s, 0.30 m/s, 0.40 m/s의 유속조건으로 수행하였다. 유입부 유속은 ADV를 이용하여 유속을 측정하였으며, 전체적인 흐름특성을 파악할 수 있는 표층유속은 그림 2에서 보는 바와 같이 시간차를 두고 촬영된 영상을 통해 입자 변위로 하여금 각 입자들의 유속을 측정 대상역 전체의 순간 유속장으로 획득할 수 있는 LSPIV기법을 이용하여 측정하였다. LSPIV기법에서 획득한 영상은 CACTUS 3.1을 이용하여 유속장으로 변환하였다. 그림 3은 LSPIV를 이용하여 수제 주변 흐름장을 측정하기 위해 투과 수제에 대해 추적입자를 투여하고 이를 촬영한 영상을 추출한 것이다.

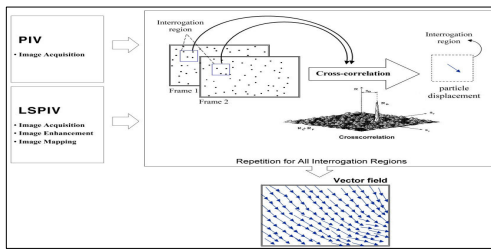


그림 2 LSPIV기법을 유속장 측정원리



그림 3 촬영된 수제 주변 흐름장

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 흐름장 분석결과

LSPIV 기법을 이용한 각 실험조건에 대해 수제역과 수제주변 흐름에 대한 유속장을 측정하였으며, 측정결과를 그림 4와 그림 5에서 보는 바와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 수제 설치로 인해 선단부에서 흐름분리가 발생하는데, 수제 선단부에서 일정각을 이루면서 강한 흐름이 분류역(수로 중앙)으로 유입되고 수제하류부에서 분리된 흐름이 맥동류를 형성하며 하류로 흘러간다. 그림에서 보는 바와 같이 수제로 인해 수로중앙부로 유입되는 강한 흐름은 흐름중심선에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 수제 하류부에서는 흐름분리로 인해 재순환 영역이 발생하는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 각 실험에 대해 흐름중심선의 변화와 흐름분리영역의 크기를 파악하기 위해 흐름장 측정결과로부터, 수제 설치벽으로부터 최대 흐름중심선 거리  $T_{CL}$  과 흐름분리역의 폭  $S_h$ 를 측정하고 이를 각각 흐름조건, 수제길이, 투과율에 따라 분석하였다.

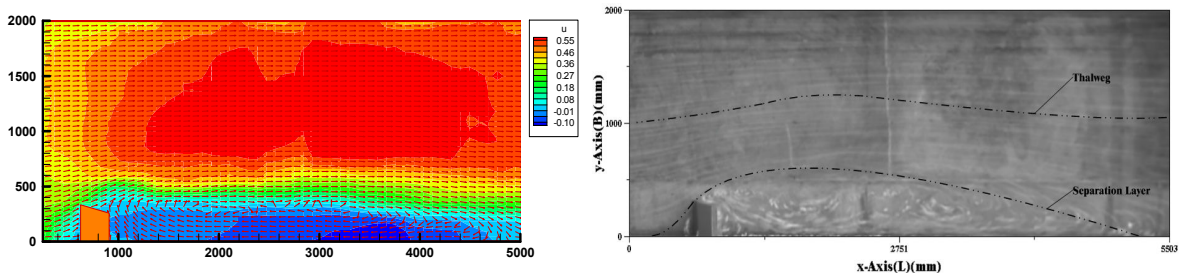


그림 4 불투과 수제(SF15P00) 주변의 흐름장 분석결과

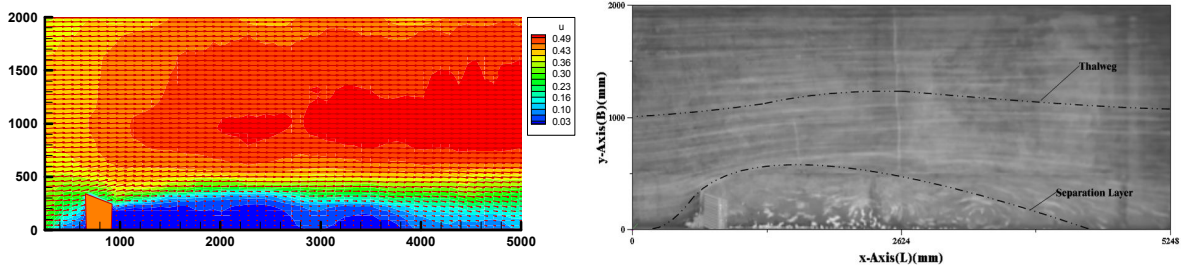


그림 5 투과 수제(SF15P20) 주변의 흐름장 분석결과

그림 6은  $l/B = 0.15$ 인 수제에 대한 흐름중심선과 흐름분리영역의 변화를 흐름조건에 따라 나타낸 것이다. 세로축은 수로 설치벽으로부터의 연직방향 거리 ( $z$ )를 수로폭 ( $B$ )으로 나누어 무차원화하고 가로축은 흐름방향에 대해 수제설치지점에서 하류까지의 거리를 수제길이 ( $l$ )로 나누어 무차원화하였다. 그림에서 보는 바와 같이 수제 선단부의 흐름분리로 인해 흐름중심선에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 흐름분리영역의 길이는 불투과 수제의 경우 수제길이의 12배인 것으로 나타났다(강준구 등,2005).

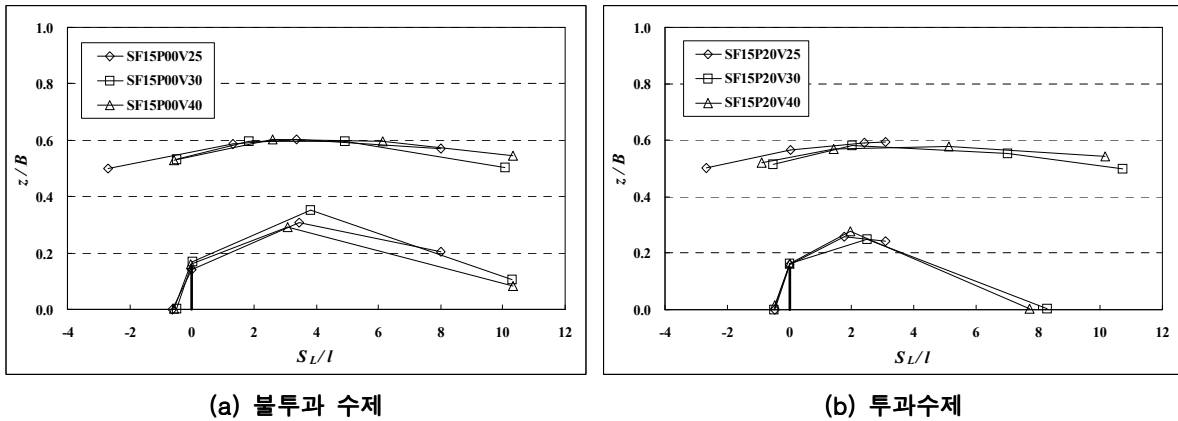


그림 6 수제 설치에 따른 흐름중심선의 변화와 흐름분리영역의 변화

### 3.2 수제설치에 따른 흐름중심선 및 흐름분리영역 분석

수제설치에 따른 흐름중심선과 흐름분리영역의 특성을 파악하기 위해 LSPIV 유속장 측정결과로부터 흐름중심선의 수제설치벽으로부터 거리 ( $T_{CL}$ )과 흐름분리영역 폭 ( $S_h$ )을 흐름조건, 수제길이, 투과율에 따라 분석하였다. 그림 11과 그림 12에서 보는 바와 같이 흐름중심선의 변화는 Fr수에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 Ettema와 Muste(2005)의 실험결과와도 일치한다. 수제 길이가 증가함에 따라  $T_{CL}$ 는 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 흐름중심선이 수제 선단부의 흐름분리의 영향으로 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 수제길이비( $l/B$ )가 0.25 일 때 최대 흐름중심선이  $T_{CL}/B \approx 0.75$ 를 측정되었다. 또한 불투과수제에 비해 투과율이 증가함에 따라  $T_{CL}$ 은 감소하는 것으로 나타났다. 흐름분리영역 폭( $S_h$ )은 그림 13과 그림 14에서 보는 바와 같이 흐름중심선의 변화 경향과 유사한 것으로 나타났다.

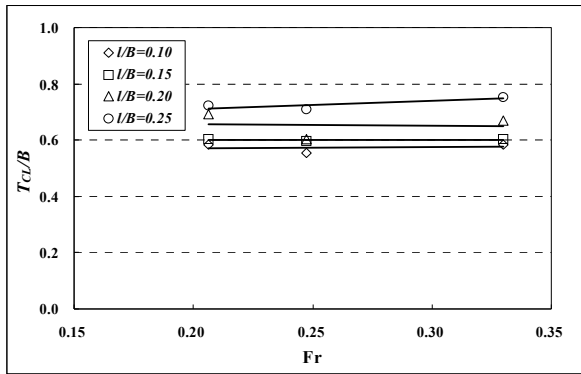


그림 7 Fr 수에 따른 흐름중심선 변화

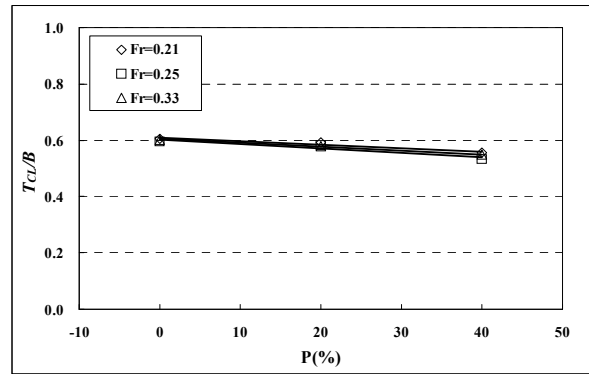


그림 8 투과율에 따른 흐름중심선 변화

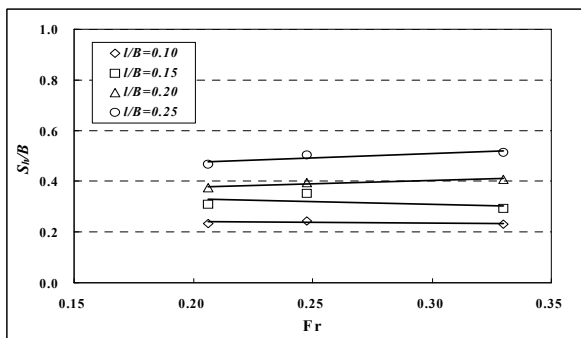


그림 9 Fr수에 따른 흐름분리폭 변화

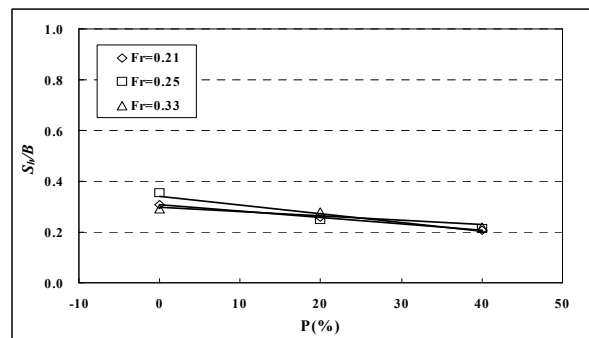


그림 10 투과율에 따른 흐름분리폭 변화

#### 4. 결론

본 연구에서는 수제설치에 따른 수제역 및 본류역의 흐름특성을 파악하기 위해 LSPIV 기법을 이용하여 흐름장을 측정하고, 측정결과로부터 흐름조건, 수제길이 및 투과율과 같은 수제특성에 따른 흐름중앙선과 흐름영역의 크기 변화를 분석하였다. 실험 및 분석결과에 의한 결론은 다음과 같다.

1. 수제를 설치함에 따라 수제 선단부의 흐름분리로 인해 수로중앙부의 흐름중앙선이 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이러한 흐름중앙선의 변화는 Fr수에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
2. 수제길이가 증가함에 따라 수제설치벽으로부터 흐름중심선의 길이가 증가하는 것으로 나타났으며, 투과율이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.
3. 수제설치에 의한 재순환영역의 흐름분리폭의 변화는 Fr 수에는 큰 영향을 받지 않으며, 수제길이 및 투과율에 따른 흐름중앙선의 변화 경향과 유사한 것으로 나타났다.

현재 수제역 흐름과 수제설치 수로부의 연구는 계속 수행 중에 있으므로 정성적인 결과만 제시하였고 향후 실험결과를 보완하여 정량적 해석을 수행할 것이다.

#### 참고문헌

1. 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.
2. Ettema, R., Muste, M.(2004). "Scale Effects in Flume Experiments on Flow around a Spur Dike in Flatbed channel." *J. Hydr. Eng.*, Vol. 130, 635-646
3. Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B.(1983). "Flow near groyne-dike structures." *J. Hydr. Div., ASCE*,

109(HY3), 463-480

4. Schmidt, J. C., Rutin, D. H., and Ikeda, H. (1993). "Flume Simulation of recirculating flow computation near groyne." *Water Resour. Res.*, 29(8), 2925-2939.
5. Tingsanchali, T., and Maheswaran, S. (1990). "2D depth-averaged flow computation near groyne." *J. Hydr. Eng.*, 116(1), 71-86
6. 강준구, 여홍구, 김성중 (2005). "단일 횡수제 조건에 따른 선단부 유속과 재순환 영역에 대한 실험 연구." *한국수자원학회논문집*, 38(2), 143-153.