

# 축소부를 고려한 여수로의 충격파 저감 : 수치모의

## A Numerical Experiment For Interference Waves Reduction In Chute Spillways With Contraction

황중훈\* / 김대근 \*\* / 김창시 \*\*\* / 이지원 \*\*\*\*  
Hwang, Jong Hoon / Kim, Dae Geun / Kim, Chang Si / Lee, Ji Won

### 요 지

여수로는 월류시 한계류 상태와 고유속의 사류상태가 복합적으로 일어나는 복잡한 흐름형태를 가지고 있어 여수로의 단면설계시 수리적인면뿐만 아니라 구조적인 측면에서도 안정해야 하며 경제성이 고려되어야 한다. 그래서 고유속의 흐름을 갖는 여수로에 축소부를 고려할 경우 충격파에 의한 수위상승과 하류의 흐름 교란 등 수리학적 불안정이 발생하기 때문에 설계시 경제적인 장점이 있음에도 불구하고 단면축소부를 고려하여 여수로를 설계하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 단면축소를 고려한 여수로 설계를 위하여 3차원 수치모형인 Flow-3D를 이용하여 충격파로 인하여 발생하는 교차파 저감을 모의하기 위하여 수치실험을 실시하였다. 교차파 저감을 위해 축소부내에서 교차파가 발생하도록 축소부의 각도는 유입흐름 특성을 고려하여 적정하게 설정하였다. 수치실험결과 축소부의 각도가 작을수록 첫번째 교차파의 수위는 크게 발생하지 않으나 단면축소후 교차파가 하류로 전파되어 불안정한 흐름이 연속적으로 발생하고, 과대하게 설정할 경우 첫번째 발생하는 교차파에 의해 중앙부의 수위가 크게 상승하는 결과를 보였다. 또한 본 연구에서는 축소부단면내 회절판(diffractor) 설치전·후의 수리학적 거동을 모의하여 회절판의 흐름개선 효과를 검증하였다.

**핵심용어 : 여수로, 축소부, 충격파, 교차파, 회절판(diffractor)**

### 1. 연구배경

댐 설계에 있어 여수로는 유입된 홍수량의 방류를 위한 구조물로서 고유속의 흐름을 가지고 있기 때문에 구조적으로나 수리적으로 안전한 형태로 설계되어야 한다. 여수로의 흐름은 유입부의 한계류 상태와 천이부의 사류등 복합적인 양상을 가지고 있기 때문에 설계시 많은 어려움이 있다. 이러한 문제로 인하여 경제성과 설계의 이점에도 불구하고 단면의 축소부를 고려한 여수로는 설계의 어려움 때문에 많이 채택되지 않는 실정이다.

상대적으로 여수로의 흐름은 유입부를 지나면서 사류상태가 되어 가속되기 시작하므로 유입부와 동일한 단면으로 감세공까지 흐름을 유도하지 않고 단면축소부를 고려해 여수로를 설계하는 것이 경제적인 측면에서 효과적이다. 그러나 여수로 설계시 단면축소부를 설치하지 못하는 이유는 단면

\* 정회원 · (주) EPS Solution 수자원부 · E-mail : [hydro-h@nate.com](mailto:hydro-h@nate.com)  
\*\* 정회원 · 목포대학교 건설공학부 · E-mail : [kdg05@mokpo.ac.kr](mailto:kdg05@mokpo.ac.kr)  
\*\*\* 정회원 · (주) 대우건설 토목사업본부 · E-mail : [dwchang@dwconst.co.kr](mailto:dwchang@dwconst.co.kr)  
\*\*\*\* 정회원 · (주) 대우건설 토목사업본부 · E-mail : [jiwonlee@dwconst.co.kr](mailto:jiwonlee@dwconst.co.kr)

축소로 인하여 사류상태의 흐름이 측벽과 만나서 발생하는 충격파와 양측면의 충격파가 상충하여 발생하는 교차파가 수위를 상승시키기 때문이다. 이러한 문제는 곧바로 측벽의 높이를增高시켜야 하는 문제와 흐름의 불안정으로 이어져 하류의 흐름 교란을 발생시킨다. 일반적으로 국내에 만들어진 댐의 경우 대부분이 여수로의 연장이 길지 않은 댐식이기 때문에 아직까지 축소부를 고려하여 설계된 예는 없다. 그러나 현재 치수능력 증대방안의 일환으로 건설중인 비상여수로 및 보조여수로는 현실적으로 지형적인 이유와 본댐과의 연계운영의 이유로 상대적으로 긴 연장을 필요로 하기 때문에 지형적으로나 경제적으로나 단면축소부를 고려하여 설계할 경우 더 유리할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3차원 수치실험모형인 Flow-3D를 이용하여 단면축소부를 고려한 사류흐름을 가정하고 이에 영향을 주는 인자를 가변시키면서 단면축소에서의 흐름을 수치모의하였으며 이를 개선시킬 수 있는 방안 및 실제 여수로의 적용가능성에 대해서 고찰하도록 할 것이다.

## 2. 이론적 배경

<그림 1>은 일반적인 축소부 단면의 사류흐름에 대한 충격파의 흐름양상을 보여주는 것으로 종단경사에 대해 고려되지 않은 형상이다. 여기서  $\theta$ 는 여수로 축소부의 측벽과의 각도이고,  $\beta$ 는 충격파의 굴절각이다. 또한  $Fr_1, D_1, V_1$ 은 축소전의 흐름 특성으로 Froud수와 수심, 유속을 나타내고,  $Fr_2, D_2, V_2$ 는 축소후 단면의 흐름특성을 나타내는 Froud 수와 수심, 유속이다.

Ippen과 Dawson(1951)은 흐름방향에 대한 연속방정식과 충격파의 연직방향에 대한 모멘트 방정식을 이용해 다음의 관계를 유도해내었다.

$$D_1 V_{n1} = D_2 V_{n2} \dots (2.1) \quad , \quad \frac{\rho}{2}(D_2^2 - D_1^2) = D_1 V_{n1}(V_{n1} - V_{n2}) \dots (2.2) \quad F_r = V / \sqrt{gD} \dots (2.3)$$

위 식을 이용하면 접근흐름의 흐름특성에 대한 항으로 충격파의 굴절각을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\tan\theta = \frac{(\sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2\beta} - 3)\tan\beta}{2\tan^2\beta + \sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2\beta} - 1} \dots (2.4)$$

충격파에 의한 교차파발생 위치와 부가적으로 발생하는 충격파가 축소부 단면내에서 발생하도록 설계되어야 축소후 단면내에서 충격파에 의한 수위상승을 저감시킬 수 있으며 안정한 흐름을 유도할 수 있다(Open-channel Hydraulics, Ven Te Chow, 1986). 최적의 축소부 단면의 설계를 위해서는 다음의 조건(식 2.5)을 만족하도록 설계하는 것이 바람직하다.

$$L = L_1 + L_2 \dots (2.5) \quad \text{여기서, } L = \frac{B_1 - B_2}{2 \tan \theta} \quad , \quad L_1 = \frac{B_1}{2 \tan \beta_2} \quad , \quad L_2 = \frac{B_2}{2 \tan (\beta_3 - \theta)} \quad \text{이다.}$$

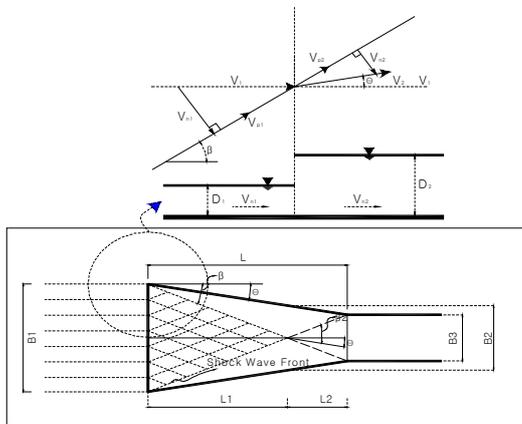


그림 1. 종단경사가 고려되지 않은 단면축소부

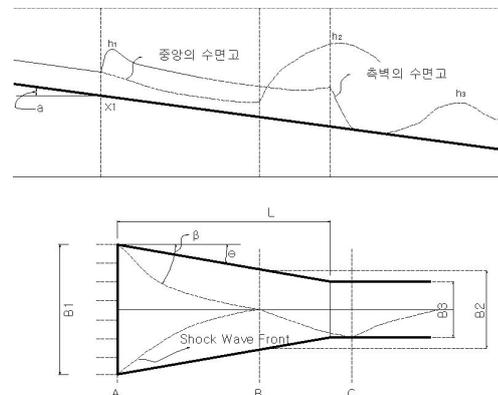


그림 2. 종단경사가 고려된 단면축소부

실제 여수로의 흐름은 종단경사가 있는 흐름상태이기 때문에 경사가 없는 상태의 충격파의 흐름과는 다른 양상을 가진다. 종단경사가 있는 사류흐름은 <그림 2>와 같이 충격파가 교차되기 전까지 평면형의 흐름과는 다르게 만곡의 유선형을 보이고 교차파의 발생위치 또한 종단경사가 없을 때보다 뒷쪽에서 발생한다. 종단이 고려된 축소부 단면에 대한 이론적인 접근은 정립되지 않았으며 수리실험을 통한 실험식에 대한 연구만 진행된 상태이고, 여수로와 같이 종단이 선형이 아닌 경우에 대한 접근은 아직 이루어지지 않았다.

Will H. Hager(1992)은 수리모형실험을 통하여 다음과 같은 관계식을 도출하였다.

그림 2와 같이 충격파를 크게 3개로 Wave1 : AB구간, Wave2 : BC구간, Wave3 : C이하

$$X_1 = x_1/D_1 F_0 = (2 + 0.126a)\theta + (1.4 - 0.015a) \dots (2.6), \quad Y_1 = D_1/D_2 = (1 + \frac{1}{\sqrt{2}} S_0)^2 \dots (2.7)$$

$$Y_2 = D_2/D_0 = (1 + \sqrt{2} S_0)^2 \dots (2.8), \quad Y_3 = D_3/D_0 = \omega^{-1} + 1.8 S_0^{1/2} - 0.2 a^{0.5} \dots (2.9)$$

여기서  $F_0 = \frac{V}{\sqrt{gD_0}}$ ,  $a$ : 종단경사,  $S_0 = F_0 \theta$ ,  $D_1, D_2, D_3$ : 수심이다.

Roger Reinauer과 Will H. Hager(1996)은 단면축소에 의한 충격파의 수위상승 및 흐름의 불안정을 해결하기 위하여 단면축소부에 피라미드형태의 회절판(diffraction)을 설치하여 수리모형 실험을 실시하였다. (식 2.10)는 Roger Reinauer과 Will H. Hager(1996)이 제시한 회절판의 형상이다. 그러나 상류경계 조건인 Froude 수가 3이하일 경우 배수위의 영향을 받아 수면의 높이가 상승하는 결과를 보여주었으며, 그 이상의 조건일 경우 충격파에 의해 발생하는 교차파의 수위상승이 개선되는 것을 보여주었다.

$$L_s = 6h_0, \quad b_s = 4h_0, \quad S = 0.9h_0 \dots \dots \dots (2.10)$$

### 3. 수치모형 실험

수리모형 실험 결과를 재현해내기 위하여 동일한 규모( $B_1 = 50cm, B_2 = 30cm$ )로 수치모형실험을 수행하였다. 표1은 수리모형 실험과 수치모형실험의 결과비교로서 수치모형 결과가 수리모형 결과의 양상을 비교적 잘 나타내는 것으로 나타났다.

그림 3은 유입흐름특성(Fr)을 변화시켜면서 수위변화를 검토한 것으로 고유속의 사류상태의 흐름에서 축소부를 고려할 경우 수위상승이 크게 나타났으며, Fr이 낮은 상태(3이하)에서 축소부를 고려할 경우 배수위의 영향을 받아 상류 상태의 흐름변화가 있는 것으로 모의되었다.

표2는 유입흐름을 동일(Fr=5)하게 설정하고 축소각의 변화에 따른 교차파의 수위변화 및 측벽의 수위변화를 모의한 것이다. 표2에서 보면 3.8°는 첫번째 교차파뿐만 아니라 2차의 충격파를 축소구간 말단에서 발생케하여 첫번째 교차파에 의한 수위상승은 저감되며 2차 충격파가 축소부 말단 측벽에 부딪쳐 불안정한 흐름이 최소화되었는데 이는 Open-channel Hydraulics(Ven Te chow, 1986)와 일치하는 결과를 보였다(식2.5). 축소부를 고려하여 단면을 설계할 경우 적정각도 이하로 축소부의 각을 줄이면 초기수위는 저감되나 측벽의 수위와 중앙의 수위가 수렴하지 않고 교차파가 하류로 지속적으로 발생되었다. 반면에 축소부의 각도를 크게 할 경우 하류로 불안정한 흐름이 계속될 뿐만 아니라 초기 발생하는 교차파의 수위가 크게 상승하는 결과를 나타내었다.

그림4와 그림5는 Diffraction(피라미드형이 사용됨)을 설치하여 단면축소부의 수리학적인 안정성에 대하여 모의검토한 것이다. 모의 결과 축소부 초입구간에만 회절판(diffraction)을 설치할 경우 초기 교차파에 의한 수위 상승은 감소하나 하류로 전파되는 불안정한 흐름을 개선할 수 없는 것으로 나타났다. 반면에 축소부 초입구간과 중앙부분에 2개의 회절판(diffraction)을 설치할 경우 교차파에 의한 수위 상승의 개선효과는 없으나 하류부로 전파되는 교차파를 저감할 수 있는 결과를 보였다

표 1. 수리실험과 수치모형실험의 비교(Fr=5, 축소각=5°)

구 분	Diffractor 설치전		Diffractor 설치후		
	실험식	수치실험	실험식(1개)	수치실험(1개)	수치실험(2개)
x1(식2.11)	39.36	37.50	6.54	12.50	12.50
h1(식2.12)	8.56	7.84	10.08	8.88	8.92
h2(식2.13)	13.07	12.46	10.32	11.49	12.74
h3(식2.14)	14.28	12.11	12.30	11.66	11.56

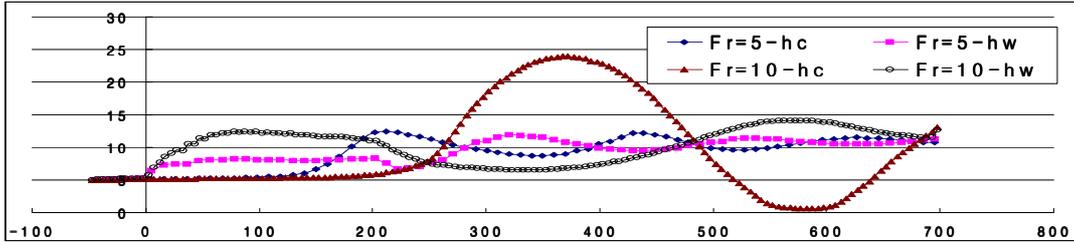
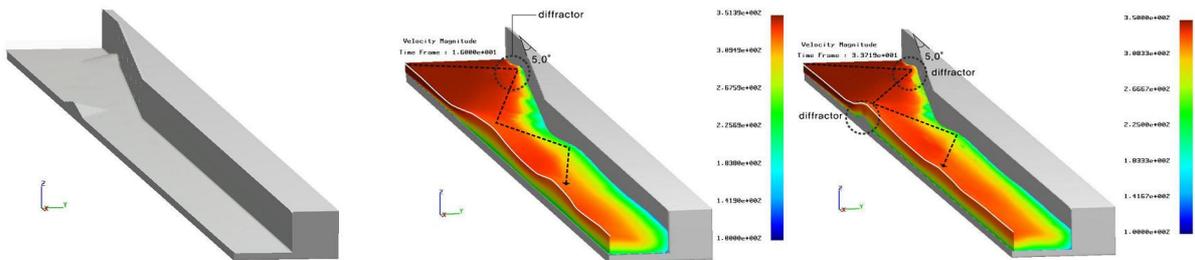
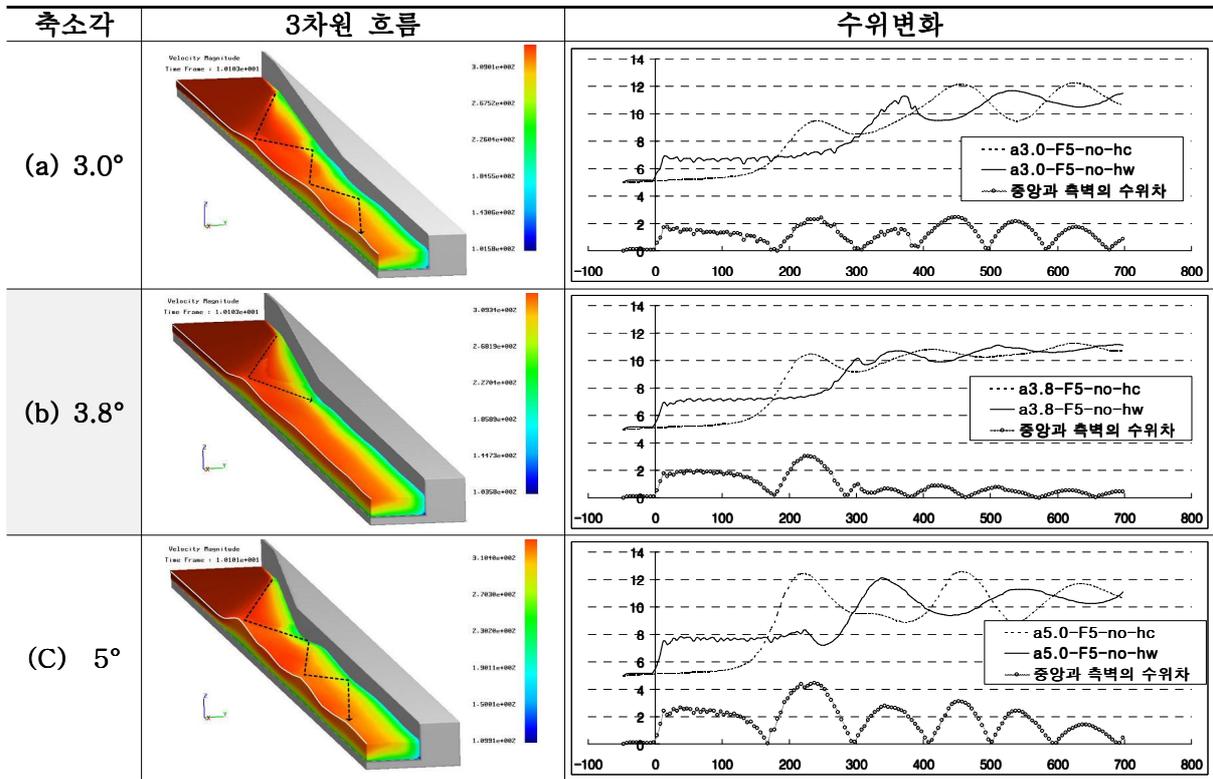


그림 3. 유입부 흐름특성에 따른 수위변화(축소각=5°)

표 2. 유입부 흐름특성에 따른 수위변화(Fr=5, diffractor=no)



(a) Diffractor 설치 (b) Diffractor 1개설치 모의 (c) Diffractor 2개설치 모의

그림 4. Diffractor 설치에 따른 흐름모의(Fr=5)

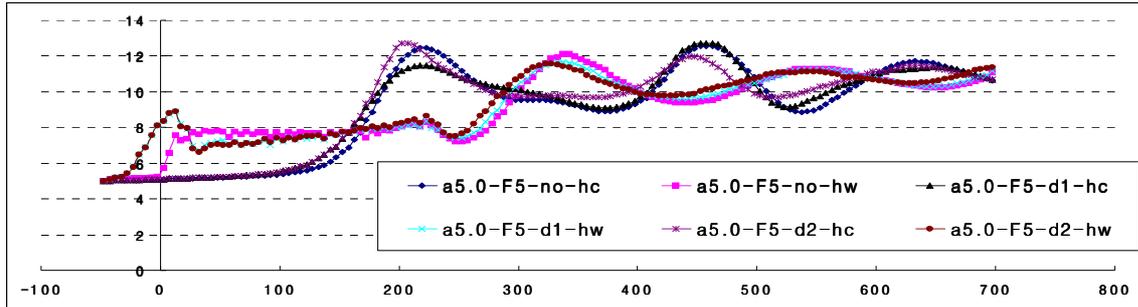


그림 5. Diffractor 설치에 따른 수위변화

#### 4. 결론 및 향후 연구방향

충격파 상층에 의한 교차파 저감을 위하여 수치실험을 실시하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다

- ◆ 설계방류량에 따른 여수로의 유입부 폭이 결정될 경우 축소부의 각도는 유입흐름의 특성을 고려하여 산정하되 하류급경사수로로 교차파가 전파되지 않도록 과소하게 결정하지 않아야 하며, 충격파에 의해 1차 교차파의 수위저감을 위해 적정하게 산정해야 한다.
- ◆ 유입흐름의 특성에 민감하게 반응한다. 본 연구결과에서는 프르드수가 3이하일 경우 축소부가 시작되면서 배수위 영향을 받아 도수가 발생하므로 단면축소부를 고려할 경우 프르드수가 3이상 되도록 단면의 축소각 및 유입단면을 적절하게 결정해야 한다. 또한 적정이상의 유입흐름 특성을 가지면 고유속발생으로 축소후 측벽의 수위가 상승하는 결과를 보였다.
- ◆ 축소부단면에 회절판(diffractor)을 설치 할 경우 충격파가 하류방향으로 굴절되고 에너지가 감소되어 중앙 및 측벽의 수위가 저감되는 결론을 보였다.

실제 고유속의 사류흐름을 갖는 여수로 적용시 지형과 설계방류량이 결정되면 유속과 초기수심이 산정되고 이를 상류경계조건으로 충격파 저감을 위한 축소부의 각도 및 축소부단면 폭을 결정할 수 있으며 축소부 단면에 회절판(diffractor)을 설치 할 경우 교차파에 의한 수위 상승을 저감 시킬 수 있을 것이다. 실제 여수로 설계시 수리모형 실험과 수치모형 실험을 상호보완·검증 할 경우 수리적 안정성 및 경제성을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 종단경사를 고려하여 상기 경우에 대한 충격파에 따른 교차파 양상을 모의하여 실제 여수로의 수리학적 거동에 대한 접근을 시도 할 것이다.

#### 참고문헌

- Causon, D.M., Mingham, C.G. and Ingram, D.M.(1999), "Advanced in calculation method for supercritical flow in spillway channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, NO. 10 pp. 1039-1050.
- Ven Te Chow. (1986). *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill book Company.
- Novak, P. Moffat, A.I.B. Nalluri C. and Narayanan R. (2001). *Hydraulic Structures*. Spon Press Taylor and & Francis Group, London and Newyork. pp. 198-205.
- Roger Reinauer and Will H. Hager(1998), "Supercritical flow in chute contraction." *Journal of hydraulic Engineering*, Vol 124, No. 1, pp.55-64.
- Willi H. Hager, Markus Schwalt, Oscar Jimenez, Chaudhry M. Hanif(1994), "Supercritical flow near an abrupt wall deflection." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, No. 1 pp. 103-118.