

〈論 文〉

측방향흐름이 있는 만곡부 흐름의 해석

Analysis of Flow in an Open Channel with Curved Section and Side Branches

박재현*, 윤성용**, 선우중호***

PARK Jae Hyou, YUN Soung Yong and SONU Jung Ho

Abstract □ Hydraulic characteristics such as velocity, surface level and flow pattern in the curved channel are analyzed by model experiment, where model is scaled down by 1:20 for prototype channel containing side branch and curved section. The withdrawal of channel flow from channel is analyzed to find the effect on the curve section. The numerical scheme for shallow water equation using ADI method is verified through the comparison of hydraulic characteristics by experiment with that by numerical analysis in the side section of model channel. The comparison of numerical results with experimental data shows that velocity, surface level and flow pattern agree well for overall channel. Because of the relative contraction of cross section in the curved section caused by rectangular coordinate system, the velocity calculated by numerical analysis is faster in curved section than that from experiment, which can be improved using finer spatial grid in curved section. The characteristics of the curved section such that the surface level is higher in the outer zone of curved section and the velocity is faster in the inner zone are well simulated by both experiment and numerical analysis. The effect of side branch reaches within the zone of the curved section.

요 약 : 측류취수로와 만곡부가 있는 원형수로를 1:20으로 축척한 모형수로에 대해 수리모형실험을 수행하여 만곡부에서의 유속, 수위와 유황과 같은 수리학적 특성을 살펴보고, 측류취수로가 만곡부에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 또한 모형수로에 대해 ADI방법으로 천수방정식을 수치해석하여 얻은 만곡부에서의 수리학적 특성을 실험에 의한 것과 비교하여 사용된 수치기법을 검증하였다. 대상이 된 전영역에 대하여 수리모형실험에서 얻어진 유속, 수위와 유황은 수치해석한 결과와 잘 일치한다. 그러나 직각좌표계를 사용함으로써 상대적으로 만곡부에서 단면축소 효과가 발생하므로 수치해석으로 얻어진 유속은 만곡부에서 실험치보다 약간 크게 나타나는데, 이것은 격자간격을 줄이면 개선되리라 판단된다. 수리모형실험과 수치해석 모두 만곡부 외측의 수위가 상승하고 내측의 유속이 빨라지는 만곡부의 특성을 잘 모사하고 있다. 만곡부 직전에 측류취수로가 있을 경우 측류취수로의 영향이 만곡수로내까지 미침을 알 수 있었다.

1. 연구의 목적과 필요성

하천의 소통능력을 개선하기 위하여 하천정비계획을 수립할 때 자연하천을 직강하천(straight river)으로 설계하는 것이 바람직하지만, 하도의 지형과 토지이용 등의 제약조건으로 인하여 만곡하천으로 설계해야 할 경우가 빈번히 발생한다. 또한 실제 자연하천의 경우

직강하천으로 존재하는 경우는 매우 드물고 대부분 만곡하천으로 존재하는 것이 일반적이다.

이러한 만곡하천의 특성을 살펴보면 만곡부 상류에서 균일하게 진행되는 유체입자가 만곡부의 영향으로 입자는 교란되고, 만곡이 시작되면 최대유속선은 만곡부의 내측방향으로 휘어졌다가 만곡부가 끝나는 부근에서는 외측방향으로 휘어지게 된다.

* 서울대학교 토목공학과 박사과정

** 서울대학교 토목공학과 박사과정수료

*** 서울대학교 토목공학과 교수

또한 유체입자가 만곡부를 통과하며 발생된 원심력으로 인하여 수면부근에서는 만곡부의 외측방향으로 횡방향 유속이 발생하고 바닥부근은 역류(reverse flow)가 발생하여, 만곡부 내에서는 나선형의 2차류(secondary flow)가 형성된다. 또한 흐름이 사류(supercritical flow)일 때 박리현상(seperation)과 도수현상(hydraulic jump)이 발생하며 상류(subcritical flow)일 때는 만곡부내의 에너지 감소로 인하여 만곡부를 통과하면서 수위가 하강한다.

따라서 이러한 특성을 지닌 만곡하천에 대한 이해의 증진은 하천의 유사이동에 의한 하도변화를 예측하는데 도움을 주고 홍수시 만곡하천의 외측방향으로의 상대적인 수위상승으로 인한 범람을 예측하는데 도움을 준다. 사행천(sinuous river)이나 인공적으로 설계한 만곡수로에서 만곡부의 수위변화, 유속분포와 유황 등의 수리학적 분석은 중요하다.

또한 자연하천에서 만곡부 직전에 지류가 있을 경우 특히 인공적으로 설계한 농수로, 발전소의 냉각수로 등과 같이 측류취수로가 있는 경우, 본류와 측류에 대한 정량적인 유량의 분배를 아는 것은 중요하다고 할 수 있다. 또한 상기의 경우에 측류취수로 부근의 수위변화, 유속분포와 유황 등과 같은 수리학적 분석뿐만 아니라 측류취수로가 존재함으로써 만곡부에 미치는 영향을 분석하는 것도 설계시 중요한 자료가 된다.

본 연구에서는 바다와 접해있는 상단부 직선수로, 만곡부 직전에 1개의 측류취수로, 직각 만곡부 그리고 만곡부 이후의 하단부 직선수로에 4개의 측류취수로로 구성되어 있는 인공수로를 모형실험의 대상으로 삼았다. 원형수로의 총 길이는 약 1.4km이고, 모형수로는 하단부 직선수로에서 2개의 측류취수로를 제외한 원형수로에 대해 1:20 축척으로 제작하였다.

모형실험의 목적은 만곡부에서의 수위변화, 유속분포와 유황 등과 같은 수리학적 특성을 규명하고, 만곡부 직전에 설치된 측류취수로가 만곡부에서의 수리학적 특성에 미치는 영향뿐만 아니라 만곡부를 지난 하단부 직선수로의 수리학적 특성에 미치는 영향을 규명하는데 있다. 또한 상단부 직선수로, 만곡부 직전에 1개의 측류취수로와 직각 만곡부를 포함하는 영역에 대해 다중법을 이용하여 천수방정식을 해석하는 수치해석모형을 구성하였다. 수치해석의 결과와 모형실험의 결과

를 비교 분석하여 수치해석모형의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 국내외 연구동향

1차원 St. Venant 방정식의 한계를 극복하기 위해 최근 수리모형실험과 2차원의 수치모형에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 2차원 수치해석을 위해 지배방정식으로 사용되는 천수방정식은 그 적용 범위가 해안으로부터 하천에 이르기까지 많은 적용대상을 가지고 있어 이에 대한 연구가 매우 활발하며, 적용지역에 따라 방정식의 항이 생략된 천수방정식을 사용하기도 한다. 만곡부에 대한 연구로서 Dammuller 등(1989)은 boundary fitted coordinate를 이용하여 극좌표계로 구성된 만곡부의 경계를 직각 격자계로 변환해 Mac-Cormack 방법으로 홍수파를 수치해석하여 실험에서 얻어진 결과(Miller 1988)와 비교했다.

또한 Roache(1972)는 곡선 경계 부분에서의 오차와 안정성 문제를 연구 하였으며, Hicks 등(1990)은 270도 만곡수로의 경사진 둑 근처에 대한 흐름 특성을 모의 실험하였다. 이 외에도 만곡부에서의 유사이동 예측을 위한 수리, 수치 모형의 개발이 활발하다. 국내에서 개수로의 2차원 수치 해석에 관한 연구는 서승원 등(1985)이 Galerkin 유한요소법을 사용하여 흐름단면의 급변화에 따른 순환현상을 연구하였고, 조용준 등(1985)도 ADI방법을 이용해 개수로의 단면축소에 따른 문제점을 검토하였으며, 윤세의 등(1986)은 Abbott의 음해법을 이용하여 180도 굽어진 만곡수로에서의 흐름 특성을 규명하였다.

3. 수리모형실험

수리모형실험의 대상이된 원형수로는 크게 콘크리트로 만든 직선수로, 만곡부 그리고 측류취수로로 구성되어 있으며 상단부 직선수로에는 1개의 측류취수로가 있고 만곡부 이후의 하단부 직선수로에는 4개의 측류취수로가 있다. 바다와 접하는 만곡부 이전의 상단부 직선수로는 수로연장이 1km이고 수로경사가 1/1500이며, 수로의 유입유량은 바다로 부터 공급된다. 만곡부 이후의 하단부 직선수로는 측류취수로를 지날때마다 단면이 좁아지며 수로의 말단부는 벽으로 막혀있

다.

만곡부 직전에 측류취수로가 없을 때에는 설계유입량이 51.33 m³/sec이고 측류취수로가 있을 때에는 66.34 m³/sec이다. 설계 유입량은 4개 혹은 5개의 측류취수로에서 각 취수량의 합과 같게 설계되어 있으나 실제로는 潮位의 영향으로 인해 공급되는 실제 유입량이 설계유입량보다 크게 나타난다. 이러한 여분의 유량은 수로내에 저류되고, 수로말단부에 있는 벽의 영향으로 수로의 수위는 배수현상을 나타내게 된다. 그러므로 수로내의 흐름은 常流(subcritical flow)가 된다.

수로의 흐름은 자유수면을 갖는 흐름으로 이러한 흐름은 중력에 의하여 지배된다. 그러므로 이러한 흐름에 대한 원형과 모형 사이에 수리학적 상사가 이루어지기 위해서는 원형과 모형의 Froud 수(Fr)가 같아야 한다. 따라서 다음과 같이 원형과 모형 사이에 Froud 상사율이 적용된다.

$$F_m = \frac{V_p}{\sqrt{g_p h_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m h_m}} = F_m \quad (1)$$

여기서 p는 원형, m은 모형, g는 중력 가속도, V는 속도 그리고 h는 수위를 나타낸다.

왜곡축척을 사용하지 않는 모형에서 에너지 경사구배를 모사하기 위해서는 Darcy-Weisbach 식에서 마찰손실계수(f)가 필요하다. 만일 원형에서 흐름이 Reynolds 수에 무관한 마찰계수 f를 갖는 완전한 난류의 양상을 보일 경우, 경계에서의 조도는 모형의 축척비와 일치하도록 조작한다. 이런 조건이 만족되어 Manning공식을 사용할 수 있으면 Manning 조도계수 n의 값은 다음의 관계로 결정된다.

$$n_r = n_m / n_p = L_r^{1/6} \quad (2)$$

여기서 n_m은 모형에서의 Manning 조도계수이고 n_p는 원형에서의 Manning 조도계수이며 L_r은 길이 축척율이다. 실험설비 및 측정의 정확도를 고려하여 본 수리모형실험에서는 모형과 원형의 축척비율을 1:20으로 하였고 조도상사를 맞추기 위해 벽면의 상태를 나타내는 절대조도의 값이 0.3mm~0.5mm를 갖도록 하였다.

수리모형실험의 실험장치는 그림 1과 2에 나타나 있는 바와같이 상단부 직선수로 100m와 하단부 직선수로 220m를 1/20로 축소한 목재 모형수로이다. 수리모



그림1 수리모형실험의 전경

형실험에서 제작하지 않은 2개의 측류취수로의 유량을 방류할 목적으로 하단부 직선수로의 말단에 유량조절용 水門(gate)을 설치하였다. 원형 조도에 대한 모형 조도의 상사를 위하여 식(2)의 상사율에 의해 포마리카로 도장하여 미끄러운 표면을 만들었다. 실험장치의 유량과 물의 순환과정은 그림 3과 같다.

여기서 측류취수로1은 만곡부 직전의 측류취수로이고 측류취수로2와 3은 만곡부 이후의 측류취수로이다. 측류취수로1이 없을 때 (즉 측류취수로의 입구를 막은 경우) 지하저수조에서 28.69 l/sec(설계유량: 51.33cms)을 취수하고, 측류취수로1이 있을 때 (즉 입구를 열린 경우) 37.09 l/sec(설계유량: 66.34cms)을 취수하여 측류취수로1로 8.40 l/sec가 분기된다. 만곡부 이후에는 측류취수로1의 有無에 상관없이 직선수로에서 측류취수로2와 3으로 각각 7.17 l/sec가 분기된다. 이와 같이 각 측류취수로의 분기된 유량을 배출하기 위해 측류취수로의 끝단에 0.25마력 펌프(최대유량 약 3.0 l/sec) 3대를 설치하였다. 수문(gate)에서 방류된 물과 측류취

& Vreugdenhil(1973)은 Reynolds stress 항을 설명하기 위해 일정수심에 대한 수치와점성계수 ϵ (numerical eddy viscosity; 식 3.4 참조)를 제안하였다. 따라서 본 연구에서 사용할 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + v \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gu}{CH} (u^2 + v^2)^{1/2} - \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial(HT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(HT_{xy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gv}{CH} (u^2 + v^2)^{1/2} - \frac{1}{\rho h} \left[\frac{\partial(HT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(HT_{yy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (5)$$

여기서 $u, v = x, y$ 방향의 수심 평균 유속
 $\eta =$ surface level
 $H =$ 수심 ($h + \eta$)
 $\rho =$ 유체의 밀도
 $C =$ Chezy 계수
 $T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} =$ Reynolds stress
 $g =$ 중력가속도

식(4)와 (5)의 Reynolds stress를 포함하고 있는 항은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\rho h} \left[\frac{\partial(HT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(HT_{xy})}{\partial y} \right] = \epsilon_x \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (6a)$$

$$\frac{1}{\rho h} \left[\frac{\partial(HT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(HT_{yy})}{\partial y} \right] = \epsilon_y \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (6b)$$

여기서, $\epsilon = \theta ((\Delta s)^2 / (2\Delta t)^2)$
 $\theta =$ the weighting factor used in the velocity averaging scheme
 $\Delta s (= \Delta x = \Delta y) =$ 격자 간격
 $\Delta t =$ 시간 간격

초기조건으로는 초기 흐름장의 속도를 0(cold start)으로 주었으며 수위는 일정하다는 조건을 주었고, 벽면에 수직인 방향의 경계에 대해서는 폐경계조건을 주었으며 벽면에 평행한 방향의 경계에 대해서는 완전 미끄러짐(free slip)조건을 주었다. 이때 상류, 하류, 측류의 경계는 개경계조건으로 하였다. 상류, 하류와 측류에 대한 각 경계면에서 유량을 등분포로 처리하였다.

본 연구에서는 천수 방정식을 Leendertse ADI방법으로 유한차분 하였다(최홍식, 1985; 김형섭, 1991). Leendertse(1967)가 개발한 다중법은 시간격자를 반으로 나누어 각 반시간격자에서 x, y 방향으로 양해법과 음해법을 교대로 사용하는 것으로 많이 사용되고 있다. Leendertse 방법의 장점은 양해법과 음해법을 교대로 사용함으로써 삼중 대각행렬이 만들어지기 때문에 잘 알려진 Thomas Algorithm을 이용해서 쉽게 풀 수 있다. 또한 다중법이 양해법 보다 안정성면에서 큰 장점을 가진다.

시간 간격이 t 에서 $t + \Delta t/2$ 사이일 때에는 x 방향으로 음해법을 이용해 유속 u 와 수면변위 η 를 구하고, y 방향으로는 양해법을 이용해 y 방향 유속 v 를 구한다. 그 다음의 시간간격($t + \Delta t/2$) \rightarrow ($t + \Delta t$)에서는 y 방향에 대해 음해법을, x 방향에 대해 양해법을 사용하여 유속 u, v 수면변위 η 를 구한다. 운동량 방정식을 x 방향에 대해 음해법을 이용하여 식(4)를 차분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{u'_i - u_i}{\Delta t/2} + \left[u'_i \frac{u_{i+1} - u_i}{2\Delta x} + v^*_{ij} \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta y} \right] \\ & = -g \frac{1}{\Delta x} (\eta'_{i+1/2} - \eta'_i) + \epsilon_x ((u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}) / \Delta x^2 \\ & + (u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}) / \Delta y^2 \\ & - \frac{n^2_{ij} g u'_i (u^2_{ij} + v^{*2}_{ij})^{1/2}}{((h_{ij} + h_{i-1} + \eta_{ij} + \eta_{i+1})/2)^{1/3}} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 u'_i 는 $t + \Delta t/2$ 에서의 u 를 나타내고, 위에서 사용한 y 방향의 유속 v^* 는 다음과 같이 x 방향의 유속 u 의 주위에 있는 4개의 값을 평균한 값을 사용한다.

$$v^*_{ij} = (v_{ij} + v_{i-1} + v_{i+1} + v_{i+1}) / 4 \quad (8)$$

식(3)으로 표시되는 연속 방정식은 다음과 같이 차분된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\eta'_i - \eta_i}{\Delta t/2} + \frac{1}{2\Delta x} ((h_{ij} + h_{i-1} + \eta_{ij} + \eta_{i+1})u'_i \\ & - (h_{i-1} + h_{i-1} + \eta_{ij} + \eta_{i-1})u'_{i-1}) \\ & + \frac{1}{2\Delta y} ((h_{ij} + h_{i-1} + \eta_{ij} + \eta_{i+1})v_{ij} \\ & - (h_{i-1} + h_{i-1} + \eta_{ij} + \eta_{i-1})v_{i-1}) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

y방향으로 양해법을 이용해 식(5)을 차분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{v_{i+1/2} - v_{i-1/2}}{\Delta t/2} + [u_{ij}^* \frac{v_{i+1/2} - v_{i-1/2}}{2\Delta x} + v_{ij}^* \frac{v_{i+1/2} - v_{i-1/2}}{2\Delta y}] \\ & = -g \frac{1}{\Delta y} (\eta_{i+1/2} - \eta_{i-1/2}) + \epsilon_s ((v_{i+1/2} - 2v_{ij} + v_{i-1/2}) / \Delta x^2 \\ & + (v_{i+1/2} - 2v_{ij} + v_{i-1/2}) / \Delta y^2) \\ & - \frac{n_{ij}^2 g v_{ij}^* (u_{ij}^{*2} + v_{ij}^{*2})^{1/2}}{((h_{ij} + h_{i-1/2} + \eta_{ij}^* + \eta_{i+1/2}^*) / 2)^{5/3}} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, x방향의 유속 u^* 는 다음과 같이 y방향의 유속 v 의 주위에 있는 4개의 값을 평균한 값을 사용한다.

$$u_{ij}^* = (u_{ij} + u_{i-1/2} + u_{i+1/2} + u_{i-1/2} + u_{i+1/2}) / 4 \quad (11)$$

위의 식(7)과 식(9)을 정리한 순환 방정식은 다음과 같다.

$$u_{ij} + \alpha_1 (\eta_{i+1/2} - \eta_{i-1/2}) = A_1 \quad (12a)$$

$$\beta_1 u_{ij} + \gamma_1 u_{i-1/2} + \eta_{ij}^* = B_1 \quad (12b)$$

x방향의 음해법 해석식 만들어지는 행렬은 순환 방정식(12)에 의하여 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{bmatrix} -1 & \beta_1 & & & \\ -\alpha_1 & 1 & \alpha_1 & & \\ & \gamma_1 & 1 & \beta_1 & \\ & & -\alpha_1 & 1 & \alpha_1 \\ & & & \gamma_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ u_2 \\ \eta_3 \\ u_3 \\ \eta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 - \gamma_1 u_1 \\ A_1 \\ B_3 \\ A_3 \\ B_4 - \beta_1 u_4 \end{bmatrix}$$

본 연구에 사용된 시간간격은 0.3초(Cr=2)이다. 해의 안정성을 위해 Courant number는 3이 넘지 않도록 Δt 를 결정하였다. 그리고 $\Delta x=2.0m$, $\Delta y=1.6m$ 로 사용하였다. 2차원의 Courant number(Cr)를 계산하는

식은 다음과 같다.

$$Cr = \Delta t (gh)^{1/2} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{1/2} \quad (13)$$

Ponce등은 수치해석시 해의 안정성을 위하여 수치와 점성계수가 반드시 필요하며 가중치 θ 는 경험적으로 0.1이 적합하다고 제안하였다. 본 연구에서도 수치와 점성계수를 수위에 대하여 민감도분석을 해본 결과 ϵ 의 값이 2이하에서 안정하였다. 안정성을 만족하는 결과와 물리적 타당성을 검토한결과 본 연구에서는 θ 를 0.14로 하였다.

5. 수리모형실험과 수치해석의 결과분석

만곡부 이전의 측류취수부1이 만곡부와 만곡부 이후의 하단부 직선수로에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 측류취수부1이 있는 경우와 없는 경우에 대해 각각 실험을 수행하였다. 측류취수부1이 없는 경우에는 측류취수로의 입구를 막아준 상태에서 설계유입량 51.33 m³/sec을 공급하고, 측류취수부1이 있는 경우에는 입구를 열어준 다음 설계 유입량 66.34 m³/sec을 공급하였다.

수로내에 저류되는 양에 따라 수로의 수위는 변하게 된다. 이를 모사하기 위해서는 임의의 지점에서 일정한 저류량에 대한 수로의 수위를 초기수위로 잡아주어 실험을 하여야 한다. 저류량이 최대, 평균과 최소가 될 때 각각 최대수심(high water level), 평균수심(mean water level)과 최소수심(low water level)을 일정한 지점에서의 기준수심으로 잡고 실험을 하였다. 본 연구에서는 원형수로의 설계당시 잡아놓은 측정지점 "나"의 최대수심 4.57m, 평균수심 4.10m와 측정지점 "㉔"의 최소수심 4.60m를 기준수심으로 잡았다. 유입유량과 기준수심에 따른 실험의 경우는 표 1과 같다.

표1 실험의 경우(case)

경우	유입유량	기준수위	기준지점	측류취수로1	수로내 저류량
case A	51.33cms	4.57m	나	없음	최대
case B	66.34cms	-	-	있음	최대
case C	51.33cms	4.10m	나	없음	평균
case D	66.34cms	-	-	있음	평균
case E	51.33cms	4.60m	㉔	없음	최소
case F	66.34cms	-	-	있음	최소

나5 : 그림2의 수위 및 유속 측정지점

표 1은 다음과 같은 경우이다.

- case A : 유량 51.33cms 를 유입하고 측정지점 “나”(그림 2 참조)에 4.57m을 맞추고 만곡부 직전의 측류취수구가 없을때 실험을 한 경우
- case B : case A와 동일하게 수문을 열어주고 유입유량 66.34 cms을 흘려주고 만곡부 직전에 측류취수로가 있을때 실험을 실시한 경우
- case C : 유량 51.33 cms 를 유입하고 측정지점 “나”(그림 2 참조)에 4.10m을 맞추고 만곡부 직전의 측류취수로가 없을때 실험을 한 경우
- case D : case C와 동일하게 수문을 열어주고 유입유량 66.34cms을 흘려주고 만곡부 직전에 측류취수로가 있을때 실시한 경우
- case E : 유량 51.33cms를 유입하고 측정지점 ⑤(그림 2 참조)에 4.60m을 맞추고 만곡부 직전의 측류취수로가 없을때 실험을 한 경우
- case F : case E와 동일하게 수문을 열어주고 유입유량 66.34cms을 흘려주고 만곡부 직전에 측류취수로가 있을때 실험을 실시한 경우

수리모형실험의 결과와 수치해석의 결과를 비교하기 위하여 상단부 직선수로 100m, 만곡부 직전의 측류취수로1, 만곡부 그리고 하단부의 직선수로 30m를 비교대상구간으로 하였다.

그림 2에서 보는 바와같이 ①, ②와 ③은 유속 측정 지점을 나타낸다. 수로의 좌우측벽에서 수로폭의 1/6만

큼 떨어진 지점을 각각 左, 右라 하고 수로의 중앙부를 中이라고 하였다. 유속측정지점 ①②③에서 左中右에서의 유속을 각 case별로 측정된 결과가 표 2에 나타나 있다.

수치해석에서는 수심적분한 방정식을 사용했기 때문에 수위에 따른 유속값이 나타나지 않는다. 수리모형 실험에서는 수위에 따라 3개지점에 대한 유속을 측정 하였지만 수치해석결과와 비교하기 위해서 수위에 대하여 유속을 평균하였다. 상단부 직선수로의 유속부(그림 1의 ①지점)의 유속은 전반적으로 실험치와 계산치가 일치하였고, 만곡부 직전의 측류취수로1(②지점)의 유속은 차이를 보였다.

이러한 유속의 차이는 수리모형실험의 측류취수로 안에 3개의 기둥(pier)이 있음에 반해 수치해석에서는 이를 모사하지 않았고, 또한 수리모형실험에서는 측류취수로내에서 3개의 지점에서 취수하였지만 수치해석에서는 측류취수로 말단부에서 등분포로 취수한 까닭에 나타난다고 판단된다.

만곡부(③지점)의 유속분포는 경향은 외측(左)의 유속보다 내측(右)의 유속이 빠른 만곡부의 특성을 나타낸다. 또한 만곡부에서는 수치해석의 유속이 수리모형 실험의 유속보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 수치해석에서 만곡부를 직각좌표계로 사용했기 때문에 벽면이 유연하게 연결되지 않게되어 수리모형수로의 단면보다 수치해석 단면이 축소되게 됨으로서 나타난 현

표2 수리모형실험과 수치해석의 유속결과 비교

경우	case A		case B		case C		case D		case E		case F		
	실험	계산	실험	계산	실험	계산	실험	계산	실험	계산	실험	계산	
① 右	0.77	0.75	0.88	0.94	0.73	0.80	0.98	1.09	1.02	0.98	1.37	1.40	
	中	0.60	0.75	0.77	0.94	0.77	0.79	0.89	1.09	1.00	0.98	1.47	1.40
	左	0.83	0.77	0.86	0.95	0.82	0.79	1.02	1.10	1.05	0.98	1.42	1.39
② 右	—	—	0.22	0.28	—	—	0.35	0.42	—	—	0.10	0.34	
	中	—	—	0.18	0.17	—	—	0.28	0.41	—	—	0.38	0.18
	中	—	—	0.28	0.15	—	—	0.25	0.37	—	—	0.33	0.31
左	—	—	0.30	0.20	—	—	0.37	0.39	—	—	0.51	0.45	
③ 右	0.85	1.23	0.79	1.22	0.82	0.87	1.06	1.25	1.26	1.32	1.33	1.52	
	中	0.57	0.97	0.66	1.02	0.70	0.79	0.71	0.93	0.89	1.28	1.02	1.43
	左	0.62	0.98	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69	0.64	0.81	0.89	0.80	1.03

①②③ : 그림2의 유속 측정지점
표내의 수치 : 측정된 유속 (m/sec)

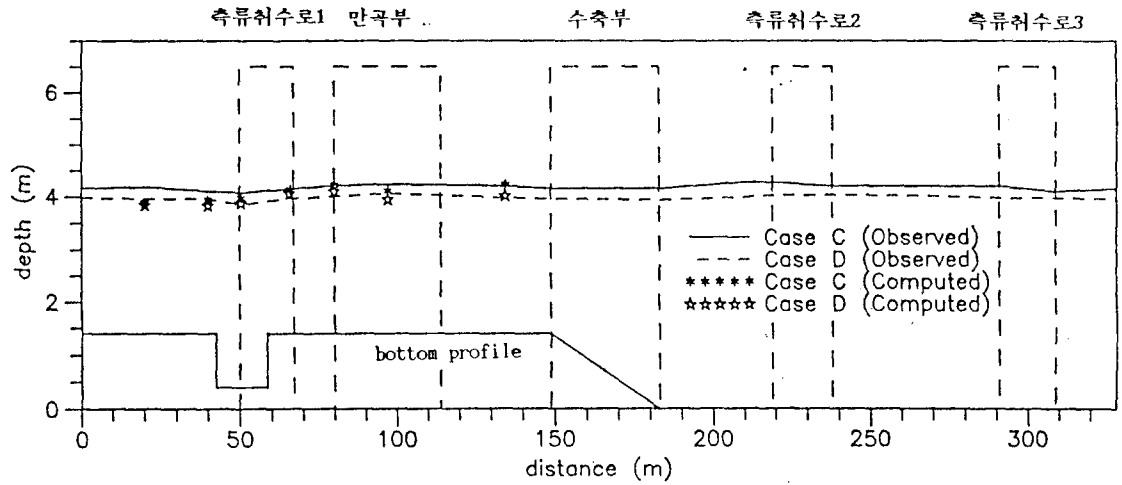


그림4 수리모형실험과 수치실험의 수위(case C, case D인 경우)

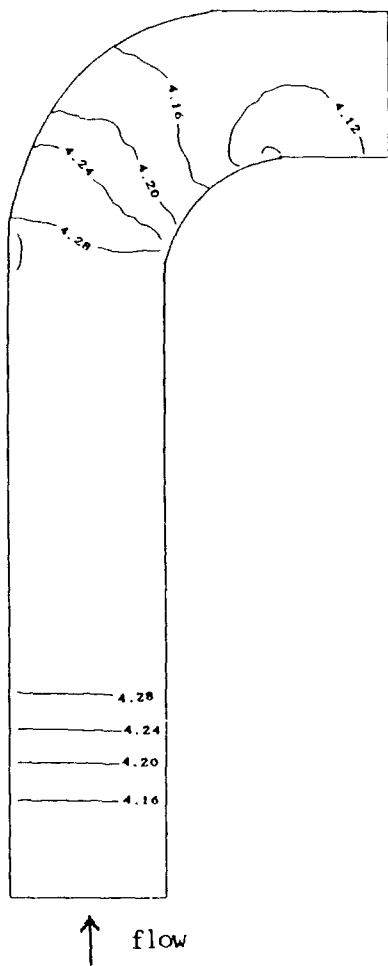


그림5 측류취수로1이 없을 때 수치실험의 수위(case C인 경우)

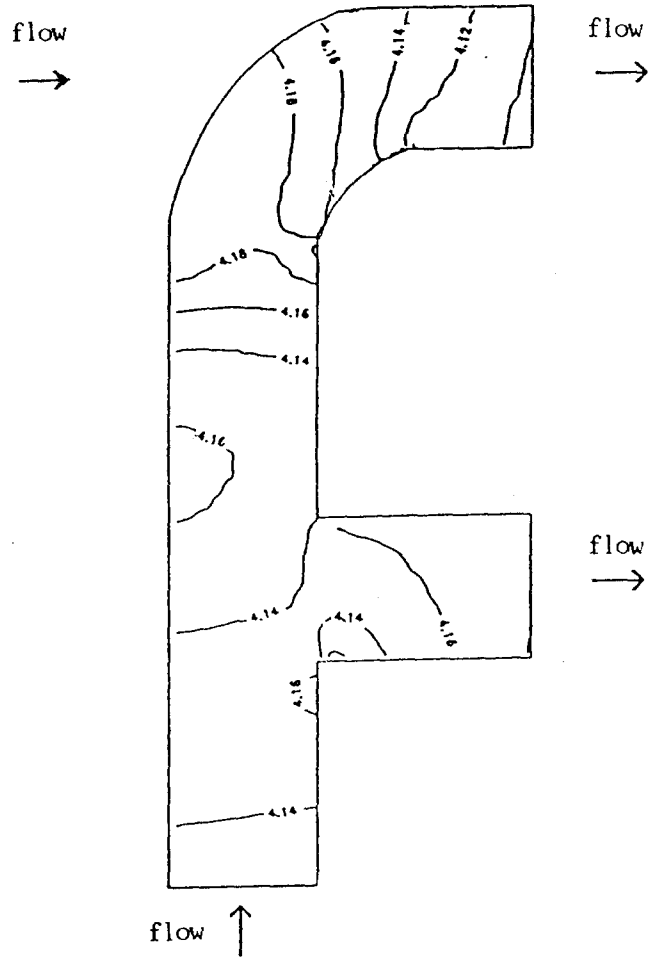


그림6 측류취수로1이 있을 때 수치실험의 수위(case D인 경우)

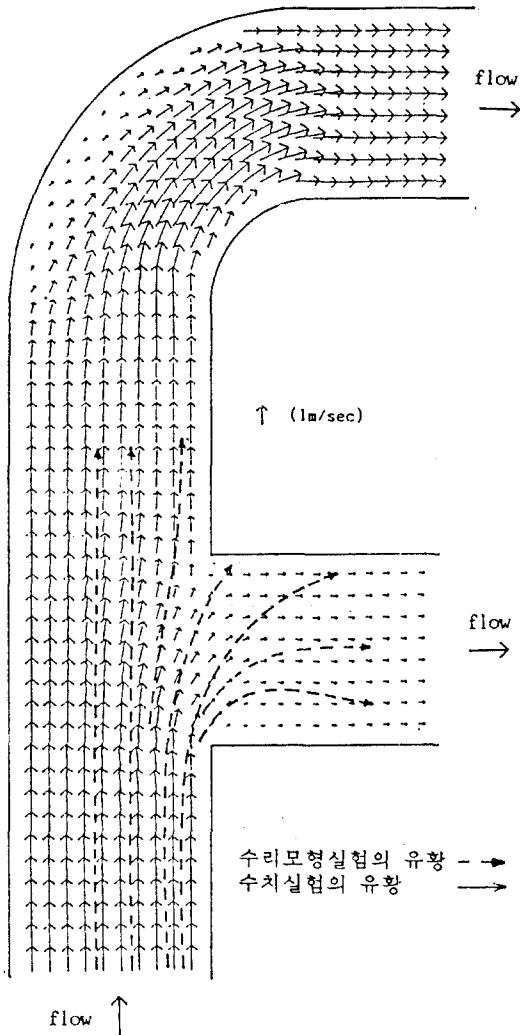


그림7 수리모형실험과 수치실험의 유황(case D인 경우)

상이라고 판단된다.

수리모형실험에서 저류량이 큰경우(case A와 case B) 측류취수로가 있을 때와 없을 때의 유속이 거의 같았다. 이는 저류량이 클수록 수로의 배수현상에 의해 측류부가 만곡부에 미치는 영향이 적어짐을 의미한다.

그림 4에서 보는바와같이 수리모형실험과 수치해석의 두 경우 모두 수위는 대체적으로 일치하였고 흐름이 상류이기 때문에 수면경사는 완만하였다. 또한 수치해석과 수리모형실험 모두 측류부취수로가 있을 때 측류부취수로가 없을 때보다 수위가 저하되었다. 일반적으로 상류(subcritical flow)에서는 만곡부 직전의 상

단부 직선수로에서 수위가 상승하고 만곡부내에서는 수위가 하강하는 것이 만곡부의 특성이다. 수치해석에서는 이러한 만곡부의 특성이 나타나고 있으나 수리모형실험에서는 수위가 거의 일정하였다. 이는 수리모형실험의 경우 수로 말단부 수문(gate)에 의한 배수현상에 인하여 만곡부가 상단부 직선수로의 수위에 영향을 미치지 못했기 때문이다.

수치해석의 결과인 그림 5와 그림 6의 2개의 그림모두에서 만곡부 외측의 수위가 상승하는 만곡부흐름의 특성이 나타났다. 측류취수로가 없는 그림 5에서는 만곡부 이전의 상단부 직선수로의 수위가 처음부터 점차적으로 상승하다가 만곡부 시작점에서 점차적으로 수위가 하강하는 현상을 보임에 반해, 측류취수로가 있는 그림 6에서는 측류취수로 이후의 상단부 직선수로부터 수위가 상승하다가 만곡부 시작점을 지나 만곡부내에서부터 수위가 하강하였다. 이러한 결과는 측류취수로의 영향이 만곡수로내까지 미침을 보여주는 것이다. 또한 그림 6에서 보는 바와같이 측류취수로에서 좌측의 수위가 상승하고 측류취수로 직전의 상단부 직선수로의 수위가 하강하였다.

그림 7에서 알 수 있듯이 수리모형실험시 측류부의 유황을 Sketch한 경향과 수치해석에서 계산한 유황의 경향이 대체로 일치하였다.

6. 결 론

측류취수로와 만곡부가 존재하는 원형수로를 1:20으로 축척한 모형수로에 대한 실험과 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수치해석과 수리모형실험 모두 만곡부 내에서 외측의 수위가 상승하고 내측의 유속이 빨라지는 것과 같은 만곡부의 특성을 잘 나타내고 있다.
2. 수리모형실험에서는 배수영향으로 만곡부 직전에서의 수위가 상승하고 만곡부내에서 수위가 하강하는 만곡부의 특성이 잘 나타나지 않았다.
3. 만곡부 직전에 측류취수로가 있을 경우 측류취수로의 영향이 만곡수로내까지 미침을 알 수 있었다.
4. 수치해석과 수리모형실험에서 얻어진 수위와 유황의 결과는 거의 일치함을 알 수 있었다. 따라서 Leendertse의 수치기법은 타당하다고 판단된다.

5. 격자간격을 작게할수록 경계의 영향을 줄일 수 있다.
6. 수치와점성계수(numerical eddy viscosity)는 수치해석 시 해의 안정성을 위하여 필요하며 본 연구결과 계수의 값으로 1~2가 적합한 수치임을 알수 있었다.

감사의 글

본 연구의 실험은 '한국전력기술주식회사'가 서울대학교에 의뢰한 『평택 복합화력 냉각수계통 구조물 수리모형실험』중에서 발췌한것으로 재정적인 지원에 감사를 표한다.

7. 參考文獻

1. 김형섭(1991), '조석순환에 미치는 수치이송항의 비선형효과', 석사학위청구논문, 서울대학교
2. 박재현(1992), '측류흐름이 있는 만곡부의 수치모형실험', 석사학위청구논문, 서울대학교
3. 윤세의, 이종태, 이원환(1986), '만곡수로에서의 2차원흐름 해석', 대한토목학회 논문집, 제6권 제1호, pp. 90-92
4. 이길성, 강주환(1989), '천수방정식의 유한 차분 특성', 대한토목학회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 43, pp. 50-51
5. 한국전력공사(1992), '평택 복합화력 냉각수계통 구조물 수리모형실험 보고서'
6. 최홍식(1985), '금강하구둑 건설후의 수위변동 추정에 관한 연구', 석사학위청구논문, 서울대학교
7. Benque, J. P. and Cunge J. A. (1982), 'New Method for Tidal Current Computation', ASCE, Vol. 108, No. WW3, pp. 396-420
8. Dammuller, D. C., S. Murty Bhallamudi, M. Hanif Chaudhry(1989), 'Modeling of Unsteady Flow In Curved Channel', ASCE, Journal of Hyd Eng., Vol. 115, No. 11, pp. 1479-1487
9. Katopodes, N. D. (1984), '2-D Surges and Shocks in Open Channels', ASCE, Journal of Hyd. Eng., Vol. 110, NO. 6, pp. 794-812
10. Katopodes, N. D. and Strelkoff, T. (1978), 'Computing 2-D Dam Break Flood Waves', ASCE, Journal of Hyd. Eng., Vol. 104, No. 9
11. Ponce, V. M., and Yabusaki, S. B. (1981), 'Modeling Circulation in Depth Averaged Flow', ASCE, Journal of Hyd Eng., Vol. 107, No. 11, pp. 1509-1516
12. Roache, P. J., computational fluid dynamics, Hermosa Publishers, Albuquerque, N. M.
13. Tawatchai, T., and Selvaratnam, (1990), '2-D Depth Averaged Flow Computation near Groyne', ASCE, Journal of Hyd. Eng., Vol. 116, No. 1, pp. 72-76
14. Weare, T. J. (1976), 'Instability in Tidal Flow Computational Schemes', ASCE, Journal of Hyd. Eng., Vol. 102, No. 5, pp. 569-579