

# 여수로 유도벽 설계를 위한 접근수로의 2차원 흐름해석

## Two-Dimensional Flow Analysis of Approach Channel for the Design of Spillway Guidewall

이 길 성\* / 김 남 일\*\*  
Lee, Kil Seong / Kim, Namil

---

### Abstract

Numerical simulations were performed to analyse the flow pattern of the approach channel and to design the spillway guidewall for stable flow conditions. RMA-2, two dimensional finite element model which can easily represent complicated geometry was used, and model parameters were estimated from the observation data of hydraulic model test. Numerical experiments were made separately for the approach region and for the upstream region, and upstream boundary position of the hydraulic model beyond which the boundary effects are negligible was determined from the numerical results. For the stable flow condition in approach channel, alternative designs for guidewall were developed, and flow analysis for alternative designs was done through the numerical simulation. From the analysis of alternative design, we can see that the flow pattern in the approach channel is stable and the lateral stage difference disappears mostly before the spillway crest.

*Keywords* : Spillway, Guidewall, Flow analysis, RMA-2

---

### 요 지

접근수로의 유황 파악과 안정적인 흐름조건을 만족시키는 여수로 유도벽 설계를 위하여 수치모의를 수행하였다. 복잡한 지형 재현이 용이한 2차원 유한요소모형인 RMA-2를 사용하였으며, 수리모형실험의 결과를 이용하여 모형의 매개변수를 추정하였다. 세부구간과 확장구간으로 나누어서 수치모의를 수행하였으며, 이를 통하여 경계의 영향을 무시할 수 있는 수리모형실험의 상류경계의 위치를 설정하였다. 접근수로 내의 흐름을 안정화시키기 위하여 유도벽의 대안 설계를 하였으며, 이에 대한 수치모의를 통해서 각 대안에 대하여 흐름해석을 하였다. 대안설계에 대한 해석 결과, 접근수로 내의 유황이 안정적이며 횡방향 수위편차가 여수로 월류부 전면에서 거의 해소되는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 여수로, 유도벽, 흐름해석, RMA-2

---

\* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

\*\* 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 1. 서 론

다양한 수문조건 하에서 여수로 접근수로 구간의 수리학적 안정성과 통수능을 확보하기 위해서는 접근수로 구간내의 흐름을 안정화시킬 필요가 있다. 여수로로 유입되는 물의 방향이 여수로와 각도를 이루는 경우에는 흐름의 방향이 급격하게 바뀌면서 와가 발생하여 흐름이 불안정해지기 쉽다. 이러한 경우에는 유도벽을 사용하여 흐름을 안정시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 여수로 접근수로 구간의 유황 파악과 유도벽 설계를 위하여 수치모의를 수행하였다. 해석모형으로는 유한요소법을 사용하는 RMA-2 모형(WES, 1996)을 사용하였다. 수치모의는 수리모형실험과 병행하여 이루어졌으며, 본 수치모의에서 매개변수의 보정작업은 수리모형실험의 관측자료를 이용하여 이루어졌다.

일반적으로 여수로 수리모형실험을 수행할 경우에는 전체 저수지 구간에서 접근수로 직상류 구간만을 모형 실험의 대상구간으로 선택하게 된다. 이는 수리모형실험의 축적에 의해서 재현할 수 있는 구간이 제약받기 때문이다. 또한 접근수로 구간에 접근할수록 유속 및 수위의 횡분포가 두드러지게 나타나는데 모형실험에서는 기술적인 어려움으로 인하여 유량·수위조건만을 일치시키며, 수위 및 유속의 횡분포는 고려하지 않는다. 따라서 수리모형실험을 수행할 때는 내부구간에 영향을 미치지 않는 경계면의 위치설정이 중요하게 된다. 이를 위하여 확장구간과 세부구간으로 나누어서 수치모의를 수행하였다. 확장구간은 상류경계가 접근수로 구간에 영향을 미치지 않을 정도로 충분히 넓은 지역을 포함하므로 저수지의 전체적인 유황을 파악할 수 있다. 세부구간은 접근수로와 유도벽 직상류 구간으로서 수리모형실험의 대상구간과 일치한다. 수리모형실험 대상구간인 세부구간에 대해서 모형의 매개변수를 추정하여 접근수로의 유황을 파악하였다. 접근수로내의 흐름을 안정화시키기 위해서 유도벽의 대안 설계를 하였으며, 이에 대한 수치모의를 통해서 각 대안에 따른 접근수로내의 유황을 파악하고 대안들의 장단점을 정리하였다.

## 2. RMA-2 모형

### 2.1 2차원 흐름모형

2차원 흐름해석을 위한 수치기법은 초기에는 주로 유한차분법을 사용하였으며, 범용 흐름해석모형을 개발하기 위해서는 일반적으로 유한요소법을 사용한다. 이

는 유한요소법의 경우에는 경계의 처리가 용이하다는 장점이 부각되기 때문이다. 이러한 범용 2차원 흐름해석모형으로는 RMA-2 모형(WES, 1996), FESWMS-2DH 모형(FHWA, 1989), Leendertse 모형(Leendertse, 1967) 등 여러 가지가 있으며, 학습용으로 TEACH-2E 모형(Gosman과 Ideriah, 1976)이 있다. 국내의 경우는 개발된 범용프로그램을 찾아보기 어려우며, 특정한 목적으로서 개발된 모형으로는 강주환과 이길성(1991)의 수평 2차원 모형이나 이종태 등(1995)의 DFLOW-2 모형 등을 예로 들 수 있다. 김창완(1995, 1996)의 경우는 우리 나라의 하천 환경에 맞는 범용 2차원 하천 모형의 개발을 목표로 계속적인 연구가 진행중이다. 본 연구에서는 상류 저수지 구간과 여수로 접근수로 구간이 유속의 크기나 지형의 복잡성 등에서 큰 차이가 있으므로 이를 표현하기 용이한 유한요소법을 기본적인 수치해석 방법으로 채택하였다. 즉 유속이 크고 지형이 복잡한 접근수로 구간은 세밀한 요소망을 사용하고, 상대적으로 중요하지 않은 상류 저수지 구간은 성긴 요소망을 사용할 수 있기 때문이다. 2차원 하천흐름모형으로는 RMA-2 모형을 선정하였다. RMA-2 모형은 국내에서 적용된 사례(국립건설시험소, 1997)가 있으며, 전·후처리 시스템인 SMS 모형(ECGL, 1995)으로 인하여 사용환경이 우수하다.

### 2.2 RMA-2 모형의 지배방정식 및 구성

RMA-2 모형에서 흐름을 계산하는 지배방정식은 2차원 천수방정식이다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ + gh \left( \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g u n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} \\ - \zeta V_a^2 \cos \Psi - 2 h w v \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ + gh \left( \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g v n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} \\ - \zeta V_a^2 \sin \Psi + 2 h w u \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (1c)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $u, v$ 는 직교좌표계에서의 유속,  $x, y, t$ 는 직교좌표와 시간,  $\rho$ 는 밀도,  $E_{xx}, E_{xy}, E_{yx}, E_{yy}$ 는 각 방향의 와점성계수,  $g$ 는 중력 가속도,  $a$ 는 바다면의 높이,  $n$ 은 Manning의 조도계수,  $\zeta$ 는 바람에 의한 전단응력계수,  $V_a$ 는 풍속,  $\psi$ 는 풍향,  $\omega$ 는 지구의 자전각속도,  $\phi$ 는 위도이다.

RMA-2 모형은 1973년에 개발되었고 현재 Ver. 4.3이 가용하며, 수치기법으로는 가중잔차 Galerkin 방법을 사용하는 유한요소모형이다. 요소는 1차원 선, 삼각형 혹은 사변형 요소를 사용할 수 있으며, 포물선형 곡선이 한 변으로 사용될 수 있다. 형상함수는 유속에 대해서는 2차함수이며, 수위에 대해서는 1차함수이다. 공간적분방법으로는 Gauss 적분법을 사용하며, 시간 미분항은 비선형 유한차분 근사법을 사용한다. 수치기법은 완전 음해법으로서, 각 시간 단계에서의 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson 반복계산법을 사용하여 푼다.

유한요소망은 크게 삼각형요소와 사각형요소가 있으며, 요소망의 구성에 있어서 고려할 사항은 다음과 같다.

- (1) 인접한 요소보다 면적이 50 % 이상 크거나 작아서는 안된다.
- (2) 가능하면 1:1의 종횡비를 가져야 한다.
- (3) 요소는 불록다각형이어야 한다.
- (4) 요소의 각 절점은 동일 평면상에 있어야 한다.
- (5) 지배방정식에서 하상을 환경사로 가정하므로 흐름의 주방향에 대해 각 요소는 10 % 이내의 경사를 가져야 한다.

### 3. 접근수로(확장구간)의 수치모의

#### 3.1 대상구간의 선정 및 지형 파악

수리모형실험의 대상구간은 모형의 축적에 의해서 큰 제약을 받게 된다. 본 연구에서 사용하는 수리모형실험의 대상구간(세부구간)과 수치해석의 대상구간(확장구간)은 그림 1과 같다. 그림 1을 보면 만지나루터를 경계조건으로 설정할 경우에 여수로 접근수로와의 거리가 충분히 멀어서 접근수로 구간에 영향을 주지 않을 것으로 사료되며, DWOPER 모형을 사용하여 배수위를 검토한 결과(현대엔지니어링 주식회사, 1997)에 의하면 대상구간내에서는 배수위 영향으로 인한 수위변화가 나타나지 않았다. 수치해석의 대상구간(확장구간)이 수리모형실험의 대상구간(세부구간)에 비해서 충분히

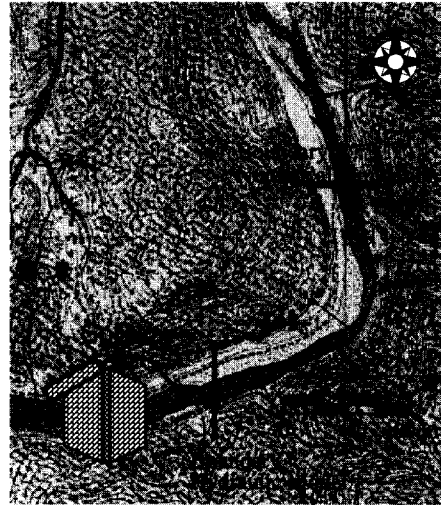


그림 1. 연구의 대상구간

넓기 때문에 모형실험 경계 위치의 타당성 검토가 가능하리라 사료된다. 그림 2는 접근수로 구간의 지형도이다. 접근수로의 저면표고는 261.9 m이며, 우안의 사면은 반경 290 m의 원형으로 접근하고 좌안에는 유도벽이 반경 50 m의 원형으로 약 26 m 정도 설치되어 있다. 접근수로 저면표고에 연결되는 직상류의 사면은 급경사를 이루고 있으며, 저수지 바다면에 가물막이 댐이 존재한다. 가물막이 댐의 정상표고는 238 m이다. 접근수로에 연결되는 직상류의 지형이 상당한 급경사를 이루고 있지만, 수심이 30~60 m에 달하는 유속이 작은 구간이므로, 2차원 모형을 적용하는데 무리가 없을 것으로 판단된다.

#### 3.2 유한요소망의 구성 및 경계조건의 설정

작성된 유한요소망은 그림 3과 같으며, 좌상의 그림은 접근수로(세부구간)의 상세도이다. 모형의 수행결과에서 질량보존을 파악하기 위해서 Continuity Check Line(CCL) No. 3, 4를 설정하였다. 또한 수리모형실험에서 상류경계조건으로 설정한 경계면의 수리량을 용이하게 분석하기 위해서 CCL No. 5를 설정하였으며, 접근수로의 흐름 및 해석결과의 분석을 위해서 P1~P15의 15개 지점을 선택하였다. 전체구간에 대해서 사용된 요소의 수는 1,353 개이며, 접근수로 구간에서 사용된 요소의 수는 1,010 개이다. 유한요소망의 작성은 모형의 안정성 측면에서 가장 중요한 요소가 될 수 있으며, 전체 유한요소망에 대해서 전술된 요소망의 구성

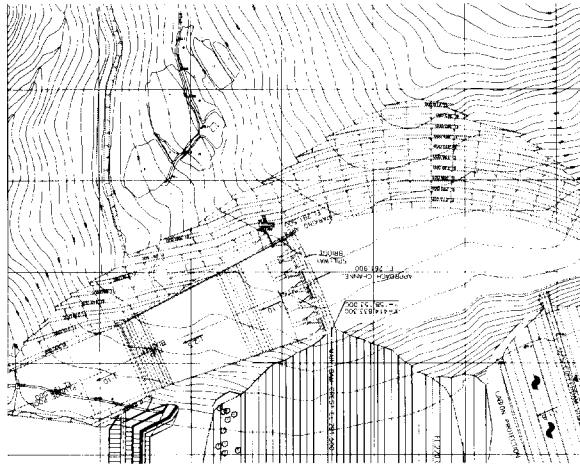


그림 2. 여수로 접근수로 구간의 지형도

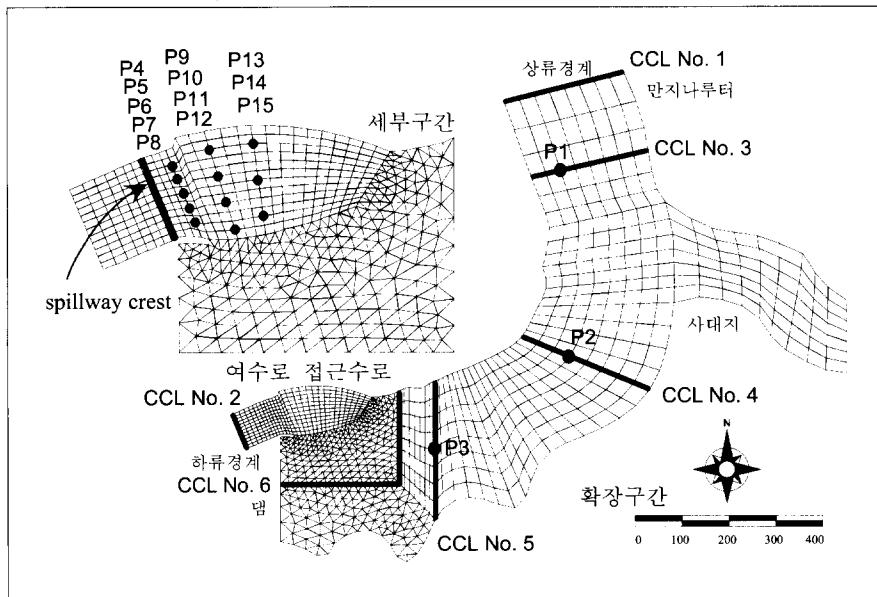


그림 3. 확장구간의 유한요소망

요건을 고려하였다. 지형의 재현을 위해서 접근수로 부분은 1/1,000 축척의 지형도를 사용하였으며, 상류구간에 대해서는 1/5,000 축척의 지형도를 사용하였다.

하류경계 위치는 수치적인 경계가 대상구간에 영향을 미치지 않도록 여수로 월류부 하류 100 m 지점까지 연장하였다. 선정된 하류경계의 위치가 월류부 직상류의 흐름에 영향을 주지 않음을 수치모의를 통하여 확인하였으며, 관심있는 구간이 접근수로 구간이므로 여수로 월류부 이후 하류구간의 저면표고는 접근수로의

저면표고인 261.9 m를 사용하여 사류는 모의하지 않았다. 일반적으로는 하류경계조건으로 수위, 상류경계조건으로 유량을 설정하는데 여수로 주위에서 수위변화가 크게 예상되므로 하류경계조건으로는 유량을 사용하고 상류경계조건으로 수위를 사용하였다. 하류경계에서의 방류량은 100년, 200년 및 PMF시의 여수로 방류량인 3,713, 4,182, 11,621  $m^3/s$ 를 사용하였으며, 상류경계에서의 수위는 각 방류량에 따른 저수지 수위인 286.3, 287.3, 288.0 m를 사용하였다.

### 3.3 매개변수의 영향검토

#### 3.3.1 Manning 계수의 영향검토

Manning 계수  $n$  은 수심  $h$  의 함수로서 식 (2) 와 같다.

$$n = C_1 / (h^{C_2}) + (C_3 * e^{-h/C_4}) \quad (2)$$

여기서  $C_1 \sim C_4$  는 계수이다.

표 1은 SMS 모형에서 제안하는 값들로서, Case 1 은 Mississippi River Delta Project에서 사용된 값이다. 또한, Case 2와 3은 각각 S-shaped River 예제와 San Francisco Bay Estuary Project에서 사용된 값이다. Case 4의 경우는 다른 Case보다 Manning 계수를 다소 작게 산정하였다. 각 Case에서

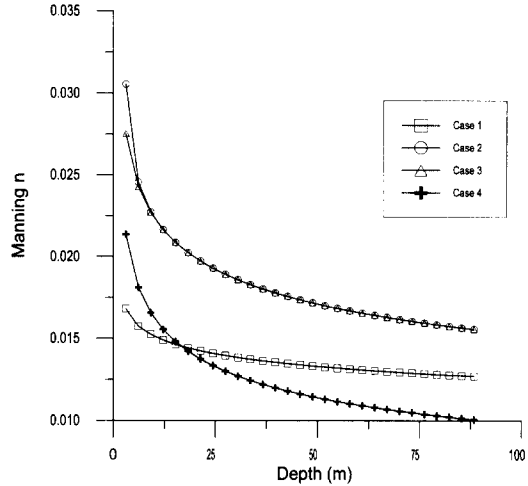


그림 4. 수심에 따른 Manning 계수

표 1. 수심에 따른 Manning  $n$ 의 계수

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
Case 1	0.020	2.00	0.026	0.0800
Case 2	0.040	4.00	0.040	0.1667
Case 3	0.040	2.00	0.040	0.1667
Case 4	0.035	2.00	0.040	0.2200

의 수심에 따른 Manning 값은 그림 4와 같다. CCL No. 3, 4, 5에서 질량보존을 검토하고 P1~P3, P15 지점에 대한 영향을 검토하였다. 각 CCL에서 Manning 계수에 따른 수량손실량의 차이는 보이지 않았다. 네 개 지점에서의 유속성분과 수위는 표 2와 같다. 표 2에서 Case 1의 경우는 해석결과이며, 기타의 경우는 Case 1과의 차이를 나타낸다. 4가지 Case

표 2. Manning 계수의 영향검토

Point	Simulated Results			Difference between Each Case and Case 1								
	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	x-vel. (m/s)	y-vel. (m/s)	elev. (m)	x-vel.	y-vel.	elev.	x-vel.	y-vel.	elev.	x-vel.	y-vel.	elev.
P1	0.189	-0.479	289.608	0.000	0.000	0.017	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000	0.003
P2	-0.337	-0.417	289.292	0.000	0.000	0.017	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000	0.003
P3	-0.476	-0.136	289.221	0.000	0.000	0.017	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000	0.004
P15	-0.980	-0.541	289.351	0.001	-0.001	0.017	0.001	-0.001	0.016	0.000	0.000	0.004

표 3. Peclet 수의 영향검토

	Simulated Results			Difference between Each Case and Case 1					
	Case 1 (Pe=20)			Case 2 (Pe=25)			Case 3 (Pe=30)		
	x-vel. (m/s)	y-vel. (m/s)	elev. (m)	x-vel.	y-vel.	elev.	x-vel.	y-vel.	elev.
P1	0.189	-0.479	289.608	0.001	-0.003	-0.291	0.002	-0.005	-0.484
P2	-0.337	-0.417	289.292	-0.001	-0.002	-0.230	-0.002	-0.003	-0.382
P3	-0.476	-0.136	289.221	0.000	-0.003	-0.214	0.000	-0.005	-0.356
P15	-0.980	0.541	289.351	0.030	-0.023	-0.249	0.055	-0.046	-0.414

에 대한 변화는 거의 나타나지 않는다고 할 수 있다.

### 3.3.2 와점성계수의 영향검토

와점성계수  $E$ 는 식 (3)의 Peclet 수  $Pe$ 에 의해서 결정된다.

$$Pe = \frac{\rho U \Delta x}{E} \quad (3)$$

여기서  $U$ 는 요소의 평균속도,  $\Delta x$ 는 흐름방향 요소의 길이이다.  $Pe$  값을 20, 25, 30으로 설정한 경우의 흐름해석 결과는 표 3과 같다. 표 3에서 Case 1의 경우는 해석결과이며, 기타의 경우는 Case 1과의 차이를 나타낸다. Manning 계수에 비해서 유속변화가 두드러지며, 특히 P15에서의 변화가 상대적으로 크게 보인다.

### 3.4 확장구간의 수리현상 해석

#### 3.4.1 Manning 계수의 선정

대상구간의 수심 차이가 상당히 크기 때문에 동일한 Manning 계수를 사용하는 것은 흐름을 왜곡할 수 있으므로 수심에 따라서 Manning 계수를 다르게 사용하였다. 수치해석의 대상구간이 남한강의 상류구간이므로 관측자료가 대부분 미비하여 Manning 계수를 보정할 만한 자료가 없으므로, Manning 계수 선정의 근거로는 기본계획설계시(현대엔지니어링 주식회사, 1997) 사용하였던 값과 문헌을 참조하였다. Henderson(1966)에 따르면 여울소를 가지는 자연하천은 Manning 값이 0.033~0.040, 직선수로 등에서는 0.025~0.030 정도의 값을 가지며, 유리·플라스틱과 같은 매끄러운 바닥면에서는 0.010 정도가 된다고 하

였다. 본 연구에서는 수심이 5 내지 10 m 정도 저수지 양안에서는 0.035의  $n$  값을 사용하고, 수심이 70 m 정도 되는 저수지의 내부에서는 바닥의 영향을 거의 무시할 수 있으므로 0.010의  $n$  값을 사용하였다.

#### 3.4.2 와점성계수의 설정

와점성계수는 방향에 따라 다른 값을 가질 수 있지만 본 연구에서는 각 방향에 대해서 동일한 값을 사용하였다. 와점성계수는 물리적인 인자에 의해서만 결정되는 것이 아니라 해의 안정성을 확보하기 위한 수치점성효과도 포함하므로 해가 수렴하는 범위 내에서 가장 작은 값으로 설정하는 것이 일반적이다. 와점성계수가 크게 되면 해는 안정적으로 수렴하지만 와류나 유속의 횡분포 등이 나타나지 않게 된다.

확장구간에 대해서는 모형의 보정 자료가 없으므로 개발자(WES, 1996)가 제안하는  $Pe$  값 40을 사용하였다. 본 확장구간의 수치모의는 세부구간 경계의 타당성 검토가 주목적이기 때문에, 수리모형실험 결과를 이용한 구체적인 매개변수 보정은 세부구간 수치모의에서 수행되었다.

#### 3.4.3 확장구간의 해석결과

PMF 유량조건에 대한 저수지 전체구간에서의 유황은 그림 5와 같다. 100년 빈도의 방류량 조건(3,713  $m^3/s$ )에서 P1은 0.19 m/s, P6은 1.5 m/s로 접근수부분의 유속이 다른 부분의 유속에 비해서 상대적으로 큼을 알 수 있다. P4~P15 지점에서의 Froude수는 모두 0.4를 넘지 않으며, PMF(11,621  $m^3/s$ )시 P4~P7에서 유속이 4 m/s를 약간 넘는 것으로 나타났다. 이러한 유속은 댐시설기준(건설부, 1993)에서 제시하고

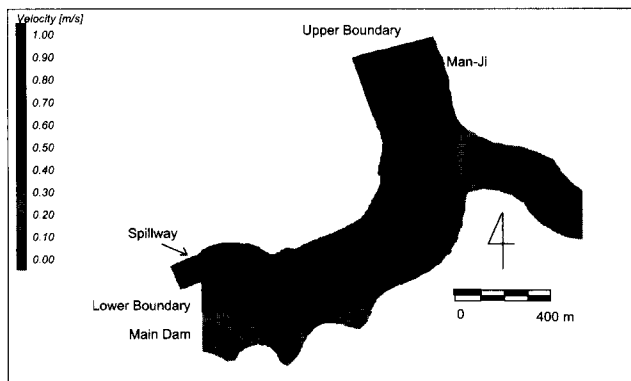


그림 5. 확장구간의 유황 - 매개변수 보정 이전

있는 한계치인 4 m/s를 초과하는 값이다. 접근수로의 유속이 4 m/s를 초과하는 경우에는 과도한 유속에 의한 충격파의 발생, 수면의 동요, 공기혼입에 따른 통수능 저하, 유사 유입 등의 문제가 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다(건설부, 1993).

### 3.4.4 수리모형실험 경계위치의 타당성 검토

CCL No. 5(수리모형실험의 상류경계면)에서의  $x$  방향 및  $y$  방향 유속과 수위의 수치해석결과는 그림 6 과 같다. 그림 6의 수위 및 유속분포로부터 경계면

(CCL No. 5)을 따라 물이 균일하거나 직각방향으로 유입하지 않음을 알 수 있다. 이에 대한 영향을 검토하기 위해서 확장구간의 유한요소망에서 CCL No. 5 상류를 제외한 영역에 대해서 개별적인 수치모의를 수행하였다. CCL No. 5에서 경계조건을 수리모형실험과 동일하게 부여하고, 이의 해석결과를 확장구간의 해석결과와 비교하였다. 유도벽 후면의 지점 P8, P12를 선정하여 수위와 유속을 비교한 결과는 표 4와 같다.

표 4를 보면 세부구간과 확장구간의 수위, 유속차는 거의 나타나지 않았다. 따라서 CCL No. 5를 수리모형

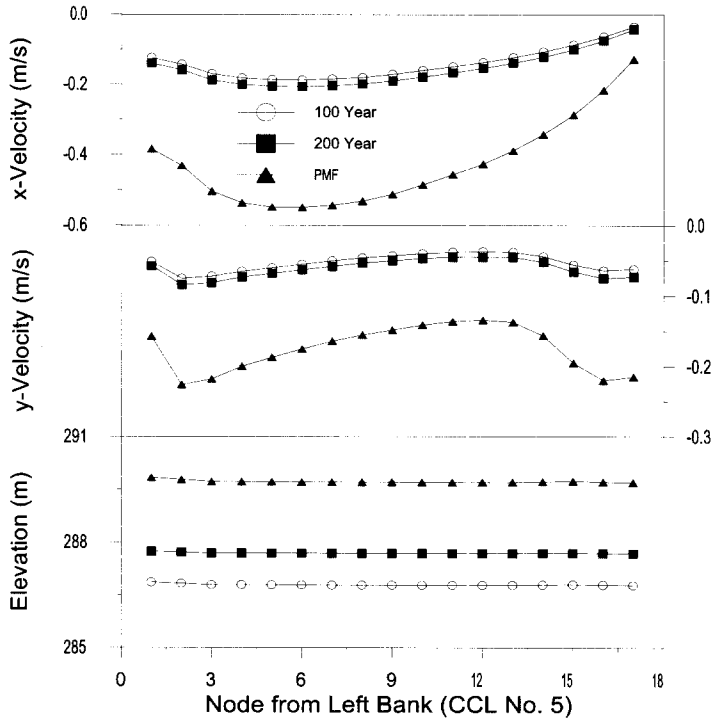


그림 6. CCL No. 5에서의 수위 및 유속 분포

표 4. 수리모형실험구간과 확장구간의 수위 · 유속 비교

수문조건 및 지점		수위 (m)		$u$ (m/s)		$v$ (m/s)		$\sqrt{u^2 + v^2}$ (m/s)	
		세부구간	확장구간	세부구간	확장구간	세부구간	확장구간	세부구간	확장구간
100년 빈도 3,713 m <sup>3</sup> /s	P8	286.12	286.12	-1.76	-1.74	0.30	0.27	1.79	1.76
	P12	286.24	286.24	-0.73	-0.74	0.80	0.76	1.08	1.06
200년 빈도 4,182 m <sup>3</sup> /s	P8	287.09	287.09	-1.91	-1.90	0.34	0.31	1.94	1.93
	P12	287.23	287.23	-0.79	-0.80	0.86	0.82	1.17	1.15
PMF 11,621 m <sup>3</sup> /s	P8	286.40	286.38	-5.30	-5.31	0.73	0.73	5.35	5.36
	P12	287.52	287.51	-2.16	-2.16	2.27	2.27	3.13	3.13

실험의 상류경계로 사용할 수 있으며, 상류경계에서 수위 및 유속의 횡분포를 고려하지 않아도 무난함을 알 수 있다.

#### 4. 세부구간의 수리현상 해석

##### 4.1 유한요소망의 구성 및 경계조건의 설정

접근수로구간의 정확한 유향과약을 위해서 수리모형 실험과 동일한 구간에 대해서 더욱 세밀한 유한요소망을 재구성하였다. 사용된 요소 수는 1,708 개, 절점 수는 4,622 개이며, 상·하류 경계조건은 확장구간과 동일한 조건을 사용하였다. 유한요소모형에서의 절점 위치가 수리모형실험의 관측점 위치와 다르기 때문에 수치해석의 결과를 관측점에서의 값으로 변환하기 위해서 선형 내삽기법을 사용하였다.

##### 4.2 매개변수의 설정

매개변수 추정을 위한 목적함수  $f$  는 식 (4)와 같이 유속과 방향의 차이를 최소화하도록 구성하였다.

$$f = \sum (u_{dif} + C_a u_{obs} a_{dif}) \quad (4)$$

여기서  $u_{dif}$  는 관측유속과 계산유속 차이의 절대값,  $C_a$  는 각도차이의 가중계수,  $u_{obs}$  는 관측유속의 절대값,  $a_{dif}$  는 관측유속과 계산유속의 각도차이(degree)이다. 유속이 작은 지점에서의 유향과 유속이 큰 지점에서의 유향이 같은 비중을 가질 수 없으므로 가중계수( $C_a$ )를 도입하였다. 수위관측자료는 부분적으로 누락된 부분이 있어서 매개변수의 보정에서 제외되었다.

접근수로 바다의 수심이 깊고 균일하며, 표 2에서 Manning 계수에는 민감하지 않는 것으로 나타났으므로, Manning 계수는 확장구간에서 사용한 값을 그대로 사용하였다. 매개변수 보정은 Peclet 수( $Pe$ )에 대해서 수행되었으며, Peclet 수에 따른 목적함수(식 4) 값은 표 5와 같다.

표 5. Peclet 수에 따른 목적함수 값

(단위 : m/s)

수문조건	$Pe=3$	$Pe=10$	$Pe=30$	최적 $Pe$
100년 빈도	25.17	23.32	24.33	17.80
200년 빈도	23.69	21.37	25.13	15.10
PMF	70.11	59.44	64.57	18.10

표 6. 외점성계수의 최대·최소값

수문조건	$Pe$	최소값 (Pa·s)	최대값 (Pa·s)
100년 빈도	17.8	677	7,617
200년 빈도	15.1	918	10,325
PMF	18.1	2,612	29,383

같은 지형조건과 요소망을 사용하기 때문에  $Pe$  값이 증가한다는 의미는 외점성계수가 감소하거나 유속이 증가함을 의미한다. 일반적으로 유량이 증가하면 외점성계수와 유속은 동시에 증가하게 된다. 간단한 2차 함수로 가정하고 최적의  $Pe$  값을 도출한 결과 100년 빈도의 경우에는 Peclet 수가 17.8, 200년 빈도의 경우는 15.1, PMF의 경우는 18.1이 도출되었다. 이 때의 외점성계수의 최대·최소값을 보면 표 6과 같다.

각 수문조건에 따른 외점성계수의 최대·최소값의 크기로부터  $Pe$  값이 정성적으로 옳게 추정되었음을 알 수 있다.

##### 4.3 접근수로의 수리현상 해석

세부구간의 수치모의 결과는 그림 7과 같으며, 최대 유속은 유도벽 후면에서 발생한다. 100년 빈도 방류량의 경우에는 1.83 m/s, 200년 빈도의 방류량의 경우에는 1.89 m/s, PMF 방류량의 경우에는 5.34 m/s의 유속을 보이고 있다. 100년 빈도, 200년 빈도의 경우에는 유속이 2 m/s 내외로 안정적이며, PMF의 경우는 4 m/s를 넘는 구간이 발생하였다.

유속의 차이가 크게 나타나는 부분은 유도벽 직하류 지점으로써 관측치는 상대적으로 작은 값을 가지고 작은 각도로 선회하고 있으며, 계산치는 큰 값으로 큰 각도로 선회하고 있다. 즉 계산치가 관측치보다 외의 크기가 커지고 유속도 증가한 형태로 나타났다. 유도벽 측면에서의 유속은 관측치가 계산치보다 훨씬 크게 나타났다. 이는 계산치가 큰 원을 그리면서 좌안으로부터 두 번째 Pier 사이로 주로 통수되고 있어서 유도벽 벽면에 급격한 흐름을 발생시키지 않기 때문이다. 100년 빈도 방류량의 경우 수위의 횡분포는 크게 보이지 않으며, 좌측보다 우측의 수위가 미약하지만 크게 나타났다. 200년 빈도 방류량의 경우도 수위의 횡분포는 100년 빈도의 경우와 크게 다르지 않다. PMF의 경우는 수위의 횡방향 편차가 크게 보이고 있으며, 좌측의 수위가 상당히 낮고 중앙과 우측의 수위 차이는 크지 않



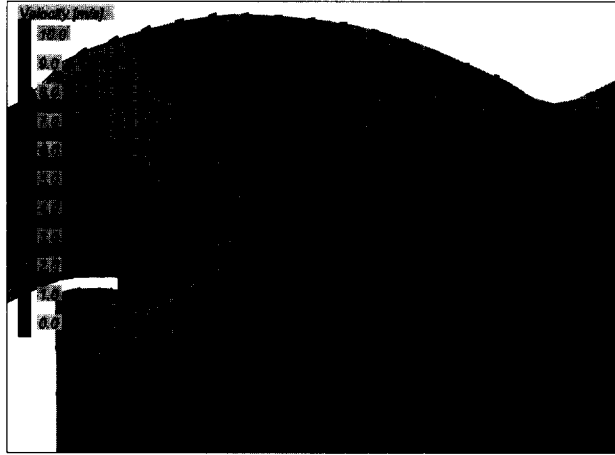


그림 7. 접근수로 구간 유황(원안, PMF)

지만 전체적으로 최고수위는 우측중앙에 발생한다고 할 수 있다. 유도벽의 끝단이 여수로 월류부에서 너무 가깝게 설계되었기 때문에 수위의 횡분포가 크게 나타났

으며, 이를 방지하기 위해서는 새로운 형태의 유도벽 설계가 필요할 것으로 사료된다.

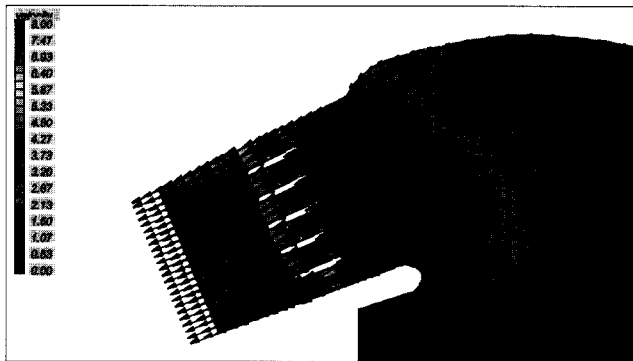


그림 8. 접근수로 구간 유황(대안 1, PMF)

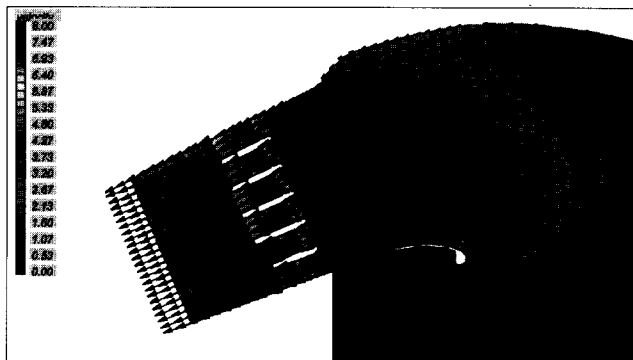


그림 9. 접근수로 구간 유황(대안 2, PMF)

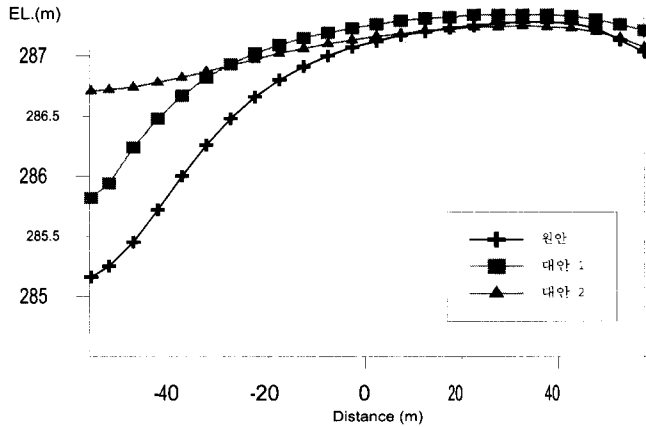


그림 10. 접근수로 구간 수위의 횡분포(PMF)

### 5. 대안의 수치모의

대안실험 1은 유도벽을 기존보다 24 m 연장하여 반경 9.5 m의 원호를 만들고 이를 댐체까지 연결하는 것이다. 사용된 요소 수는 1,786 개이며, 절점 수는 4,491 개이다. 대안실험 2는 유도벽을 직선으로 30 m를 연장하고 이를 70 m의 반경을 가지는 원형으로 40°를 진진한 후에 반경 5.25 m의 작은 원으로 마감하는 것이다. 대안실험 2의 유도벽은 모두 표고 261.9 m인 접근수로 바닥면 위에 놓이게 된다(그림 2). 사용된 요소 수는 1,853 개, 절점 수는 4,869 개이다.

수치모의의 대상구간이 동일하므로 원안실험에서 보정된 매개변수를 사용하였으며, 모의결과는 그림 8~9와 같다. 대안 1에 대해서 100년 빈도 방류량의 경우 최대유속은 2.26 m/s, 200년 빈도 방류량의 경우는 2.41 m/s, PMF 방류량의 경우는 6.89 m/s의 값을 보이고 있다. 대안 2에 대해서 100년 빈도 방류량의 경우 최대유속은 2.12 m/s, 200년 빈도 방류량의 경우는 2.24 m/s, PMF 방류량의 경우는 6.33 m/s의 유속을 보이고 있다. 최대유속면에서는 모든 안이 원안실험보다 더 큰 값을 가지고 있다. 그러나 이 값은 원안실험의 요소망이 대안실험보다 세기 때문에 대안실험에서 최대유속이 발생하는 절점(node)의 위치에 원안실험의 경우는 절점이 없기 때문이며, 유도벽 끝단에서 약간 떨어진 부분의 유속은 거의 비슷한 값을 가지고 있다. 반면에 대안의 경우는 여수로에 접근하면서 유속의 횡방향 분포가 훨씬 고르게 나타나고 있다.

여수로 위의 상류 20 m 지점에서 PMF 방류시

수위의 횡분포는 그림 10과 같다. 원안의 경우는 수위의 횡방향 편차가 크게 보이고 있으며, 좌측의 수위가 상당히 낮고 중앙과 우측의 수위 차이는 크지 않지만 전체적으로 최고수위는 우측중앙에 발생한다고 할 수 있다. 원안에 비해서 대안 1이 횡방향 편차가 줄어들었으며, 대안 1에 비해서 대안 2가 횡방향 편차가 줄어들었음을 알 수 있다. 따라서 대안 2가 여수로 전체에 대해서 고른 통수능을 가진다고 할 수 있다.

### 6. 결 론

확장구간에 대한 수치모의 해석결과로부터 세부구간(모형실험구간)의 상류경계에서 수위 및 유속의 횡방향 분포가 있음을 보였으며, 확장구간과 세부구간의 수치 해석결과를 비교하여 수리모형실험의 상류경계가 타당함을 보였다.

수치모의 결과 접근수로 구간에서 중앙부 우측에 고수위, 양안에 저수위가 발생하였으며, 특히 유도벽 후면에 수위 강하가 두드러지게 보였다. 100년 빈도, 200년 빈도의 경우에는 접근수로 구간에서 유속이 일반적으로 2 m/s 내외로 안정적이며, PMF의 경우는 4 m/s를 넘는 구간이 유도벽 후면에 존재하였다. 특히 원안의 경우에는 측면에서 여수로로 유입되는 흐름과 유도벽이 직각으로 형성되어 있어서 흐름의 교란에 의하여 유황이 불안하고 이러한 수면의 동요가 여수로 월류부까지 해소되지 않고 있다. 유황 개선을 위하여 대안 1, 대안 2의 유도벽에 대해서 수치모의를 수행하였다. 유도벽 끝단에서의 유속이 대안 2가 대안 1보다는 약간 크게 나타나지만 월류부에서 수위의 횡분포가

거의 없는 것으로 나타났다. 전체적으로 대안 2가 월류부 전면에서 유황이 안정적으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 '영월다목적댐 수리모형실험 용역'의 일부로서 한국수자원공사의 재정적 지원에 사의를 표합니다.

### 참고 문헌

강주환, 이길성 (1991). "X-Y 수치모형에 의한 하구의 염도분석." 한국해안·해양공학회지, 제3권, 제4호, pp. 197-208.

건설부 (1993). 댐시설기준.

국립건설시험소 (1997). 남한강 수리모형실험. 건설교통부.

김창완 (1995). 이차원 하천모형의 개발(I). KICT/95-WR-1103-1, 한국건설기술연구원.

김창완 (1996). 이차원 하천모형의 개발(II). 건기연 96-055, 한국건설기술연구원.

이종태, 한건연, 윤세희, 박재홍 (1995). "제내지에서 범람 홍수와 해석을 위한 수치모형의 개발." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제5호, pp. 163-174.

현대엔지니어링주식회사 (1997). 영월다목적댐 건설사업 기본설계보고서. 한국수자원공사.

ECGL (1995). *Surface-water modeling system: Reference manual Version 5.0*. Brigham Young University.

FHWA (1989). *FESWMS-2DH: users manual*. FHWA-RD-88-177, Turner-Fairbank Highway Research Center.

Gosman, A.D., and Ideriah, F.J.K. (1976). *TEACH-2E: A general computer program for two-dimensional, turbulent, recirculating flows*. Department of Mechanical Eng. University of California, Berkeley.

Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan Publishing Co., Inc.

Leendertse, J.J. (1967). *Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation*. The Rand Corporation, RM-5294-PR.

WES (1996). *Users guide to RMA-2 Version 4.3*. USACE.

(논문번호:98-026/접수:98.04.25/심사완료:98.07.09)