

이차원 수치모형에 의한 용담댐 하류부의 흐름 해석

이혜근*, 맹승진**

1. 서론

하천 수치 모형 실험은 일차원, 이차원 및 삼차원 모형으로 나누어진다. 일차원 모형은 흐름 방향의 일방향 정보만을 제공하기 때문에 단면 급변부와, 수공 구조물 주위의 흐름 해석에는 부적합하다. 반면 삼차원 모형은 수평과 연직방향의 모든 정보를 제공해 주나 프로그램이 방대하고 운영에 시간과 비용이 많이 소요되는 단점이 있다. 이차원 모형은 일차원과 삼차원 모형의 중간적인 성질을 가지고 있으며 아직까지는 연구 및 실무측면에서 유용하다고 사료된다¹⁾.

본 연구의 적용 대상인 용담댐은 여수로 건설 중 Plunge Pool 우안 끝 부분과 End Sill부근의 암반조건이 설계시와는 다른 심한 풍화암인 것으로 나타났다. 이에 따라 설계홍수량 방류시 End Sill부근의 세굴이 예상되어 이에 대한 보강 필요성의 확인과 하류 유황을 파악해야 할 상황이 발생하였다.

따라서 본 연구에서는 상기의 문제를 해결하기 위하여 미국 연방 도로청(Federal Highway Administration ; FHWA, 1989)의 기술적 지원을 받아 미국 지질 조사국(USGS)의 수자원실(Water Resources Division)에서 개발한 이차원 수치 모형인 FESWMS-2DH (Finite Element Surface Water Modeling System : 2-Dimensional Flow in Horizontal Plane) 를 이용하여 용담댐 여수로 하류구간의 수리현상을 해석하고자 한다.

2. FESWMS-2DH 모형

가. 지배방정식

FESWMS-2DH 모형은 아래의 연속방정식, x 방향 운동량방정식 및 y 방향 운동량방정식을 지배방정식으로 하고 있다.^{2,3,4)}

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{uu}HUU + \frac{1}{2}gH^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{uv}HUV) + gH\frac{\partial z_b}{\partial x} \\ - \Omega HV + \frac{1}{\rho}[\tau_x^b - \tau_x^s - \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) - \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy})] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

* 한국수자원공사 수자원연구소 수자원연구부 선임연구원

** 한국수자원공사 수자원연구소 수자원연구부 연구원

$$\frac{\partial(HV)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{uv}HVU) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{vv}HVV + \frac{1}{2}gH^2) + gH\frac{\partial z_b}{\partial y} - \Omega HU + \frac{1}{\rho}[\tau_x^b - \tau_y^s - \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{yx}) - \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy})] = 0 \quad (3)$$

여기서 t 는 시간, x 와 y 는 좌표, H 는 수심, U 와 V 는 각각 x , y 방향의 수심평균 유속, z_b 는 바닥 표고, g 는 중력가속도, Ω 는 Coriolis 계수, ρ 는 유체의 밀도, β_{uv} , β_{vw} , β_{vu} 및 β_{vv} 는 x 와 y 방향의 속도 변화를 고려한 순간보정계수, τ_x^b 와 τ_y^b 는 x 와 y 방향의 바닥면 전단응력, τ_x^s 와 τ_y^s 는 x 와 y 방향의 수면 전단응력, τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , 및 τ_{yy} 는 x 와 y 방향의 난류 확산에 의한 전단 응력을 나타낸다.

나. 모형의 구성

FESWMS-2DH 모형은 그림 1에 도시한 바와 같이 전처리 과정(DINMOD; Data Input Module), 흐름 계산과정(FLOMOD; depth-averaged FLOW Module), 후처리과정(ANOMOD; ANalysis of Output Module)으로 구성되어 있다. 전처리과정인 DINMOD 모듈은 2차원 유한요소망을 생성하는 것이다. 이 모듈은 입력자료의 수정, 분석대상의 일부 또는 모든 부분에 대한 유한요소망의 자동적인 생성, 생성된 요소망의 보완, 적절한 해를 얻을 수 있는 요소의 순서 및 유한요소망을 도시 할 수 있는 기능을 갖추고 있다. FLOMOD 모듈은 DINMOD 모듈에서 생성된 유한요소망을 이용하여 지배방정식의 해를 구하기 위해 유한요소법을 적용하는 모듈이다. 이 모듈은 정상 및 비정상 상태의 이차원 천수 흐름을 모의하며, 기본적으로는 하상 전단력과 난류 저항에 의한 영향을 고려할 수 있고 선택사양에 따라서는 바람에 의한 수면 전단력 저항과 Coriolis 힘을 고려할 수 있다. ANOMOD 모듈은 시뮬레이션된 결과를 보고서 및 그림 형태로 나타낸다. 이 모듈은 유속벡터, 지표면 등고선 및 수면표고 등고선을 그림으로 나타낼 수 있으며, 어느 한 절점에서 시간 경과에 따른 유속 및 수위변화 그래프를 출력할 수 있다¹⁾.

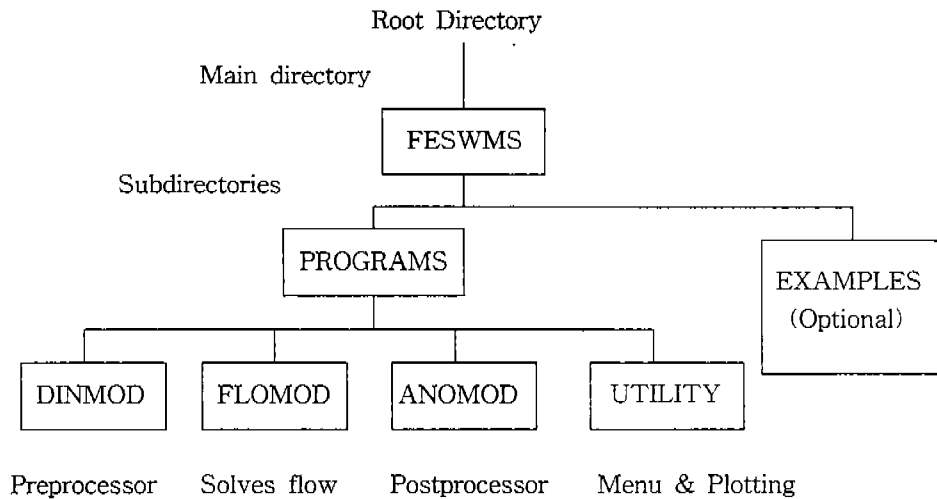


그림 1. FESWMS-2DH 모형의 모듈 구조

다. 입력자료

1) 요소망의 구성

본 모형에서는 삼각형 요소와 사각형 요소를 혼합하여 2차원 요소 격자망을 구성 할 수 있다. 일반적으로 사각형 요소는 삼각형 요소에 비해 해의 수렴이 빠르고 정확한 결과를 보이는 것으로 알려져 있으나 만곡부 및 섬과 같이 복잡한 지형에서는 지형에 맞추어 격자를 구성하기 쉬운 삼각형 요소를 혼합해서 사용하는 것이 바람직하다. 또한 사용자가 모형의 적용대상 지역 중 유입부와 같은 특정 부분에 대한 해를 산정하고자 할 때 특정 부분의 요소는 다른 부분의 요소에 비해 작고 조밀하게 구성 할 수 있다. 그리고, 이 모형은 적용대상 지역의 유한요소망을 구성할 때 계산 가능한 요소의 수 및 절점의 수가 각각 400개 및 1,400개 이하로 제한되어 있다.

2) 초기 및 경계조건

각 격자별 초기조건은 유한요소망의 모든 절점에 동일한 수면표고를 할당하고 x , y 방향의 유속을 각각 0으로 하여 계산한다. 그러나 이와 같은 초기조건은 실제상태와 동일하지 않으며, 초기 계산 결과는 그 오차의 영향을 받게 되어 해의 정확성에 문제가 있으므로 초기조건이 이용되어 계산된 결과를 다음 단계의 계산수행을 위한 초기조건으로 사용되어야 한다.

또한 모형에 입력되는 경계조건은 두가지 유형으로서 개방경계조건과 고정경계조건이 있다. 개방경계조건은 유입경계조건과 유출경계조건으로 구분된다. 유입경계의 절점에서는 흐름이 상류이면 경계면에 수직인 유량 또는 수면표고와 유속이 입력되어야 하며, 흐름이 하류이면 유량과 수면표고가 동시에 입력되어야 한다. 고정경계조건은 자연적인 해안선, 도로둑, 부두 및 방파제와 같이 기하학적으로 고정된 지형을 말한다. 고정 경계에서는 접선 유속 및 접선 응력에 대한 조건이 입력되어야 한다.

3) 기타 주요 입력자료

본 모형을 수행함에 있어서 입력되는 자료는 유체의 밀도, x 와 y 방향의 순간보정계수, 풍속, 풍향, x 와 y 방향의 풍력 계수, 최소풍속, 공기밀도 및 Manning 계수와 같은 물리적인 자료와 Coriolis 계수의 계산을 위해 필요한 위도 등이 있다.

3. 모형의 적용

가. 적용 모형의 경계조건 산정을 위한 여수로 하류구간의 HEC-2 적용

실제 하천에서의 복잡한 흐름에 관한 수치모형화 과정에 있어서는 대상 하천의 기하학적, 지형학적 특성을 반영하여 수치해를 일관성 있게 처리해야 한다. 이러한 방법의 하나는 모형이 실제 대상 하천에서의 실측자료를 재현하는지를 검토해 보는 것이다. 그러나 본 연구에서는 용담댐 직 하류부에 대한 실측자료의 부재로 수치모형의 적용 결과를 관측자료와 비교 할 수는 없었다.

따라서 본 연구에서는 기존의 HEC-2분석에 사용된 입력자료를 이용하여 댐 본체 지점부터 댐 하류 신용담교까지의 1차원적인 댐 하류 하도 수리분석을 실시하였다. 이때 사용한 입력 조건은 표 1과 같다. 댐 하류의 2차원적인 하도 수치모형(FESWMS-2DH) 실험을 하기 위한 초기경계조건은 HEC-2의 결과에 의해 결정되는데 그 결과는 표 2와 같다.

표 1. 분석 조건

조건	댐 유입량	방류량(조절율)	단면자료
1	6,600m ³ /s	3,854m ³ /s(41.6%)	기존의 HEC-2 입력자료 사용
2	10,000m ³ /s	7,540m ³ /s(56.0%)	

표 2. 분석조건별 결과

조건	여수로 수위	신용담교 수위
1	212.12m	210.30m
2	214.50m	213.20m

나. 2차원 하도 수치모형(FESWMS-2DH) 적용

수치모의를 하는 과정은 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 그 첫 번째 과정인 DINMOD는 사용자가 직접 분석하고자 하는 지점을 GRID화하고 세분된 각 요소(Element)에 대한 절점(Node) 번호를 DINMOD.DAT라는 파일을 만들어 입력시켜 주어야 한다. 이러한 과정을 거쳐 본 검토에서는 235개의 요소와 738개의 절점을 갖는 GRID를 생성하였고 그 결과는 그림 2와 같다.

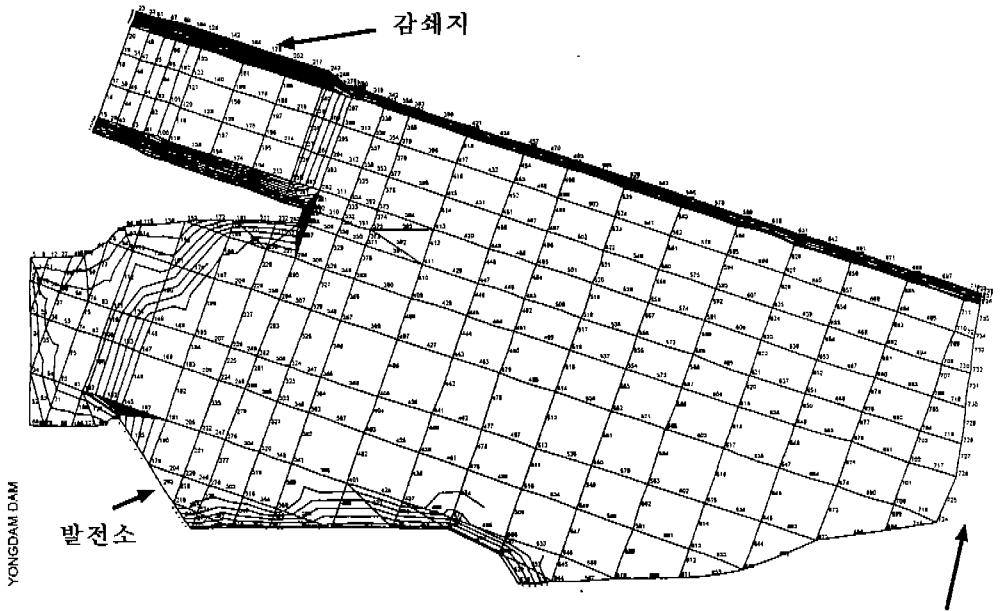


그림 2. 적용 구간 지역의 요소, 절점 및 지형도

신용담교

두번째 과정인 FLOMOD에서는 분석 대상 지역의 초기 유속과 풍향 등을 입력하는 INIT.DAT 파일과 경계조건 즉 유입부에서의 수위와 유량 그리고 하류부에서의 수위를 입력하는 FLOMOD.DAT라는 파일을 필요로 한다. 2개의 유량조건에 대한 모형의 적용 결과는 표 3과 같다.

표 3. 유량 조건별 END SILL 부분의 유속 및 분석 대상 지역의 최대유속

조건	END SILL(우안)		교량부				
	절점 번호	유속 (m/s)	최저		최대		평균 유속(m/s)
			절점번호	유속(m/s)	절점번호	유속(m/s)	
1	235	3.6	724	1.7	736	4.6	3.6
	263	4.9					
	290	2.0					
	291	3.4					
	292	5.2					
2	235	4.2	724	1.2	736	6.4	4.8
	263	5.3					
	290	3.4					
	291	7.3					
	292	6.9					

세 번째 과정인 ANOMOD는 FLOMOD에서 계산된 각 절점의 유속 현황을 도식화하는 과정이며 2개의 유량 조건별 유속 분포는 그림 3 및 그림 4와 같다.

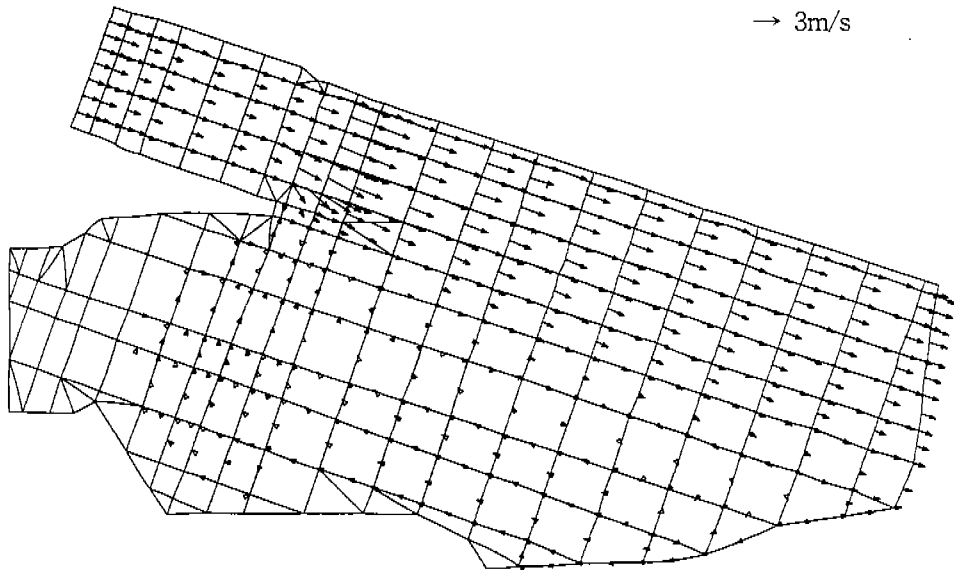


그림 3. 유량 3,854CMS 방류시 유속 분포

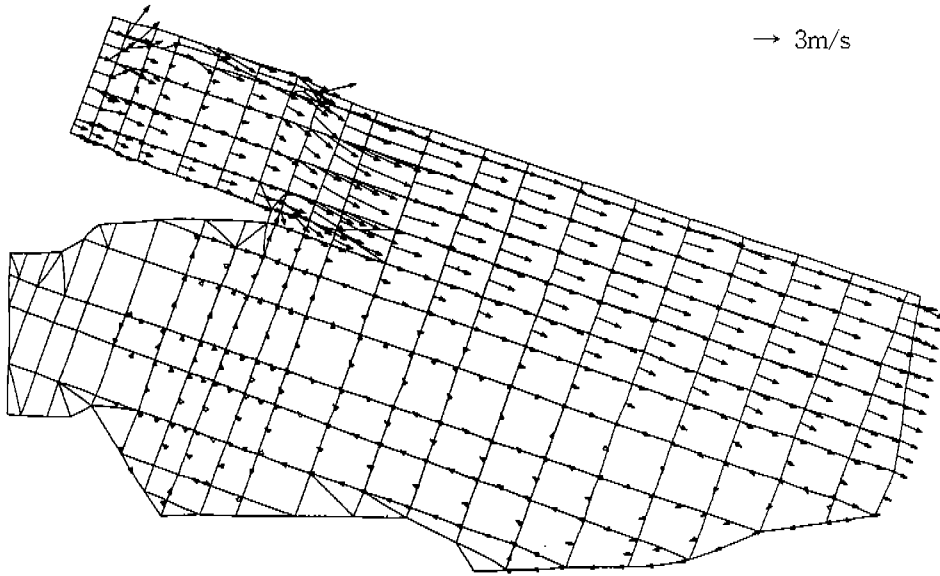


그림 4. 유량 7,540CMS 방류시 유속 분포

그림 3 및 그림 4에서 보는 바와 같이 전체적인 유황을 살펴보면 도류부를 지난 고속의 사류가 Plunge Pool에 낙하하여 에너지가 일부 감쇄되었어도 흐름은 매우 빠르다. End Sill을 지나면서 우안 끝부분에서 확폭이 되면서 와류가 발생되었으며 이로 인한 세굴의 영향이 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

검토대상 조건 1, 2의 경우에 공통적으로 End Sill 우안 끝 부근에서 와류가 형성되며 또한 방류부 부근에서 유속이 매우 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 기존설계대로 시공할 경우 End Sill 우안 끝부분이 풍화암으로 형성되어 있고 이 부분과 배면부에 고속의 와류현상이 예상되므로 이 구간에 대한 유속 및 세굴에 대한 방지대책수립이 필요하고 댐 하류 하천구간도 직선으로 유로를 형성시키는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 1995. 이차원 하천 모형의 개발(I)
2. Abbott, M. B., D. R. Basco, Computational Fluid Dynamics, Longman Scientific & Technical, pp 387 ~ 398.
3. Froehlich, D. C., 1991. FESWMS-2DH USERS MANUAL, WEST Consultants, Inc.
4. WEST Consultants, Inc. Support Literature.