

# 홍수범람 모형에 관한 연구

田 庚 秀<sup>1)</sup>

## 1. 서론

물재해의 경감을 위한 계속적인 투자에도 불구하고 우리나라는 여름철에 집중하는 강우로 인하여 빈번한 홍수피해를 겪고 있다. 호우 또는 댐파괴에 따른 하천에서의 홍수류 전파에 관하여는 많은 연구가 행하여져 왔다. 댐의 붕괴는 좀처럼 일어나지 않음에도 불구하고 일단 발생하였을 경우에 야기되는 피해의 심각성이 매우 크기 때문에 국외에서는 물론 국내에서도 댐파괴 및 그에 따른 홍수류의 전파에 관하여는 많은 연구가 행하여져 왔다(이상호와 이길성, 1992; 李鍾泰 등, 1986; 이창훈과 이길성, 1989; 韓健淵, 1990). 반면에 이상 홍수위, 상류댐의 부적절한 홍수조절 등으로 인하여 야기될 수 있는 제내지로의 범람에 의한 홍수피해는 댐파괴의 경우에 비해서 그 규모는 작으나, 발생빈도가 빈번하여 실제로 우리나라에서 발생하고 있는 대규모 홍수피해의 원인이 되고 있다. 따라서, 가능한 홍수피해를 평가하고, 이를 경감시키기 위해서는 하천 제방으로의 월류, 즉 제내지의 침수를 포함한 홍수류 계산모형이 필요하나 이러한 모형에 관한 기존의 연구는 李鍾泰와 韓健淵(1989)이 있을뿐 매우 미진한 상태이다.

홍수터에서의 흐름양상은 본류에 비하여 수심이 작고 흐름에 대한 저항이 커서 본류의 흐름과는 많은 차이가 있으며 일반적으로 2차원적 해석을 요한다. 2차원 흐름해석을 위한 일반적인 방법으로서 천수방정식에 의한 해석방법이 있다(Sato 등, 1989). 그러나 홍수터 흐름의 경우에는 범람지역, 즉 홍수터내 모든 부분이 항상 침수되어 있는 것이 아니며, 침수지역 중에서도 범람이 시작되는, 즉 하천본류에 가까운 지역과 먼 지역간에는 천수방정식을 적용하기에 상당한 수위차가 있을 수 있다. 이는 홍수터내에 도로 등의 경계물이 존재할 경우 특히 그렇다. 이와같이 침수지역, 즉 모형의 경계가 일정하지 않기 때문에 경계의 설정 및 경계조건 부과에 따르는 어려움이 있고 또한 홍수터내에 내부경계가 존재할 경우 그 부근에서는 천수방정식을 적용할 수 없다는 문제점이 따른다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 홍수터 계산모형으로서 Zanobetti 등(1970)과 Cunge(1975)의 준 2차원 모형을 채택하였다. 그들은 홍수터를 그 지형적 동질성 및 자연경계를 기준으로 구분하는 2차원 구획체계를 구성하고 인접구획간 흐름을 1차원적 수위-유량 관계식으로 나타내어, 이러한 관계식 및 각 구획에서의 수량보존에 관한 연속방정식을 사용하여 구획간의 흐름을 모의할 수 있도록 하는 준 2차원 홍수터 계산모형을 개발한 바 있다. 그들은 구획전체를 여러개의 구획군으로 나눔으로써 선형 연립방정식들을 효율적으로 풀 수 있는 matrix double-sweep 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 본 연구에서는 홍수터 흐름계산을 위한 계산망의 구성 및 지배방정식은 Cunge(1975)의 경우와 같으나, 수치해법으로는 폐합형 하천수계에 대한 Newton-Raphson 방법 및 그에 따른 double-sweep 알고리즘(Cunge 등, 1980; Holly 등, 1990)을 확장시켜 홍수터 흐름에 대하여 적용함으로써 정확하면서도 효율적인 계산이 가능하도록 하였다.

홍수터 흐름의 계산을 위해서는 하천본류로부터의 유입량, 즉 범람유량이 주어져야 한다. 또한 하천수의 범람지점이 하천구간내의 특정 지점이 아니고 여러 지점인 경우에는 홍수터로의 범람이 하천본류 흐름에 영향을 미치므로, 본류와 홍수터 흐름의 상호작용을 고려하여 하천본류 및 홍수터 흐름을 함께 모의할 수 있는 홍수류 계산모형이 필수적이다. 본 연구에서는 홍수터 흐름은 물론 본류로부터의 범람 및 본류로의 재유입 등을 함께 모의할 수 있도록 본류 계산모형과 연계시킴으로써 본류 및 홍수터 흐름을 동시에 고려한 종합적인 홍수류 계산모형을 개발하였다.

## 2. 모형의 구성

### 2.1 홍수터 구획분할

모형 구성의 첫번째 단계로서 홍수터를 여러개의 구획(cell)으로 나눈다. 이때 구획분할의 기준으로서 주변 지역에 비하여 높게 위치한 도로, 철도, 제방 등의 자연경계들을 우선적으로 고려한다. 이러한 자연경계가 존재하지 않는 경우의 구획 경계설정은 다분히 임의적이거나 각 구획내

1 정희원, 성균관대학교 공과대학 토목공학과 조교수

모든 지점에서 수위가 일정한 것으로 가정할 수 있도록 바닥경사등 지형적 동질성을 감안하여 구획을 분할한다.

## 2.2 계산망의 구성

본류 및 홍수터 결합모형의 계산망은 절점(node), 수로(link) 및 계산점(computational point)으로 구성된다(Fig. 1 참조). 홍수터내 각 구획은 절점에 해당한다. 하천본류에 있어서는 수계의 상류단 및 하류단, 홍수터로의 범람(가능)지점에 절점이 위치한다. 또한 흐름의 분기점 및 합류점, 댐이나 수중보등 월류구조물의 직상류 및 직하류에도 절점이 위치하도록 한다.

각 절점은 인접한 절점들과 수로로 연결된다. 수로는 하천수로, 홍수터수로 및 본류와 홍수터의 연결수로(이하 범람수로라 칭함)로 분류할 수 있다. 즉, 수로양단의 절점이 모두 하천 본류상에 위치하면 하천수로가, 홍수터에 위치할 경우에는 홍수터수로가 되며, 홍수터 절점과 본류절점을 연결하는 수로는 범람수로로 분류한다. 홍수터수로에서의 흐름은 하도형 흐름과 웨어형 흐름으로 구분된다. 범람수로는 하천수가 제방을 월류하여 범람할 경우에는 웨어형으로, 제방이 없거나 파괴된 경우의 범람에 대해서는 웨어형 또는 하도형으로 구분할 수 있다.

수로의 양단 및 수로상에는 계산점이 위치한다. 홍수터수로 및 범람수로의 경우에는 수로 양단에 각각 한개씩 두개의 계산점만이 위치한다. 하천수로의 경우에는 수로양단에 한개씩 최소 두개의 계산점을 포함하여 임의수의 계산점을 수로상에 둘 수 있다(Fig. 2(c) 참조). 하천수계내 각 지점 및 홍수터 구획에 대한 부정류 계산, 즉 수위와 유량의 계산은 이들 계산점에 대하여 수행된다. 홍수터수로 양단의 각 계산점에 대한 수위값은 각 구획 수위를 나타내며 유량값은 인접구획간의 유량을 나타낸다. 예로서 Fig. 1에서 홍수터 절점 F1에는 세개의 수로가 연결되어 있으므로 세개의 계산점이 위치하게 된다. 따라서 이들 세 계산점에서의 수위값은 모두 같으며 유량은 일반적으로 서로 다른 값을 갖게 된다. 또한 홍수터수로 및 범람수로의 유량은 수로 양단 두 계산점에서의 유량값으로서 나타내진다. 따라서 이들 두 계산점에서의 유량은 서로 같은 값을 갖는다.

이와같이 구성된 계산망은 일반적으로 폐합형 network를 이룬다. 폐합형 하천수계에 대해서는 Newton-Raphson 방법 및 double-sweep 알고리즘에 의한 흐름해석이 가능하며 널리 알려져 있다(Cunge 등, 1980). 본 연구에서는 홍수터를 포함한 경우에 대해서도 적용이 가능하도록 이를 확장한 계산모형을 개발하였는데, 이에 관해서는 다음 장들에서 기술하기로 한다.

## 3. 절점 및 수로 지배방정식

### 3.1 절점 지배방정식

절점  $i$ 에 대한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 2(a) 참조).

$$A_{si} \frac{dy_i}{dt} = \sum_{k=1}^{L(i)} Q_{i,k} + Q_{ext}(i,t), \quad i = 1, \dots, M \quad (1)$$

여기서  $t$ 는 시간을,  $M$ 은 절점의 총수를,  $L(i)$ 는 절점  $i$ 에 연결된 수로의 총수를 각각 나타낸다.  $y_i$ 는 절점  $i$ 에서의 수위를 나타내며,  $Q_{i,k}$ 는 절점  $i$ 와 인접절점  $k$ 간의 유출입 유량으로서 절점  $i$ 로 유입되는 경우에 양의 값을 갖는다.  $Q_{ext}(i,t)$ 는 본류절점에 대한, 지천 유입량, 상류단 경계에서의 유입량 등 기지의 외부 유출입량으로서 유입량일 경우 양의 값을 가지며, 홍수터 절점에 대해서는 영으로 된다.  $A_{si}$ 는 홍수터구획  $i$ 의 수표면적(본류절점에 대해서는 영의 값이 부여됨)으로서  $y_i$ 의 함수이다. 따라서 홍수터 절점  $i$ 에 대한 식 (1)은 홍수터 구획에서의 유입량과 유출량의 차가 구획내 총수량의 증가 또는 감소량과 같음을 의미한다.

절점에서의 에너지방정식으로는 다음과 같이 등수위 조건을 사용한다.

$$y_{i,k} = y_i, \quad k = 1, \dots, L(i), \quad i = 1, \dots, M \quad (2)$$

여기서  $y_{i,k}$ 는 절점  $i$ 와  $k$ 의 연결수로의 절점  $i$ 측 끝단 계산점에서의 수위를 나타낸다.

### 3.2 수로 지배방정식

하천수로 흐름에 대한 지배방정식은 1차원 부정류에 관한 연속방정식 및 운동량방정식인 다음식 (3) 및 (4)를 Preissmann의 4점 음해법(Liggett과 Cunge, 1975; Cunge 등, 1980)에 의하여

차분화된 유한차분식들로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \quad (4)$$

여기서  $Q = Q(x,t)$  및  $y = y(x,t)$ 는 각각 유량과 수위를 나타내며,  $A$ 와  $K$ 는 흐름단면적과 통수능으로서 각각  $y$ 의 함수이다.  $\alpha$ 는 운동량 보정계수,  $g$ 는 중력가속도이며,  $x$ 는 흐름방향 위치를 나타낸다. 차분식의 구체적인 형태는 Liggett과 Cunge(1975)에 상세히 기술되어 있다.

절점  $i$ 와  $k$ 를 연결하는 홍수터수로 또는 범람수로에 관한 연속방정식은 다음과 같다.

$$Q_1 = Q_2 = Q_{i,k} \quad (5)$$

여기서 첨자 1과 2는 수로 양끝단의 두 계산점을 나타내는 첨자이다(Fig. 2(b) 참조). 하천수로에 대한 운동량방정식에 대응하는 유량관계식은 하도형 수로인 경우에는 다음식 (6)으로 주어진다.

$$|Q_{i,k}| = \frac{K_{i,k}}{\sqrt{\Delta x}} \sqrt{y_u - y_d} \quad (6)$$

여기서  $\Delta x$ 는 양 구획의 중심간 거리이다.  $y_u$ 는 양 구획의 수위( $y_i$ 와  $y_k$ ) 중 큰 값이며,  $y_d$ 는 작은 값이다.  $K_{i,k}$ 는 양 구획간 통수능으로서 다음식 (7)과 같이 각 구획의 흐름단면에 대한 통수능의 가중평균을 취한다.

$$K_{i,k} = \bar{K} = \beta K_u(y_u) + (1-\beta)K_d(y_d) \quad (7)$$

웨이형 흐름의 경우에는 수중웨이(submerged weir)형 또는 자유유훈형 흐름으로 구분되어 각각 다음식 (8a) 또는 (8b)로서 주어진다.

$$|Q_{i,k}| = \mu_s b \sqrt{2g} (y_u - y_d)^{1/2} (y_d - y_w) \quad (y_d - y_w \geq \frac{2}{3}(y_u - y_w)) \quad (8a)$$

$$|Q_{i,k}| = \mu_t b \sqrt{2g} \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{3}} (y_u - y_w)^{3/2} \quad (y_d - y_w < \frac{2}{3}(y_u - y_w)) \quad (8b)$$

여기서  $\mu_s$ 와  $\mu_t$ 는 유량계수이며,  $b$ 는 유훈폭,  $y_w$ 는 유훈부의 바닥표고이다.

수치해법상의 문제로서 Newton-Raphson 보정량방정식의 계수산정시  $y_u$ 와  $y_d$ 의 값이 같아짐에 따른 계수값의 발산을 방지하기 위하여 식 (6) 및 (8a)에 포함된  $\sqrt{y_u - y_d}$ 는  $y_u$ 와  $y_d$ 의 차가 매우 작을 경우에는 다음과 같이 선형화된 식으로 대체된다.

$$\sqrt{y_u - y_d} \approx \sqrt{\epsilon} \frac{y_u - y_d}{\epsilon} \quad \text{for } y_u - y_d < \epsilon \ll 1 \quad (9)$$

#### 4. 수치해법

상술한 바와같이 각 절점 및 수로에 대한 지배방정식이 비선형이므로 계산망 전체적으로는 비선형 연립방정식을 이룬다. 따라서 각 계산점에서의 매시각 수위 및 유량은 Newton-Raphson 방법에 의하여 계산된다. Newton-Raphson 방법의 적용에 따른, 보정량에 관한 선형 연립방정식에 대해서는 폐합형 network에 대한 double-sweep 알고리즘에 의한 해석이 가능하다. 폐합형 하천수계에 대해서는 double-sweep 알고리즘에 의한 해석방법이 이미 잘 알려져 있으며(Holly 등, 1990), 본 연구에서는 홍수터를 포함한 경우에 대해서도 적용이 가능하도록 이를 확장한 계산모형을 수립하였다. Newton-Raphson 방법에 의한 1회 반복계산은 크게 다음의 네 단계로 구성된다.

- (1) Newton-Raphson 보정량방정식의 계수산정
- (2) 수로에 대한 forward sweep
- (3) 절점 수위보정치의 계산 (matrix double-sweep)

#### (4) 수로에 대한 return sweep

이들 각 단계에 관한 상세한 내용은 전경수(1994)에 상세히 설명되어 있으며, 여기서는 생략하기로 한다.

### 5. 모형의 검증

모형의 정확성 판별의 한 척도인 수량보존 정도와 각 문제에 대하여 예상되는 물리적 현상들을 잘 모의하는지를 살펴볼 수 있도록 세가지의 검증문제를 고안하였으며, 개발된 모형의 적용성을 검증하기 위하여 이들 문제에 모형을 적용하였다. 또한 모형의 여러 매개변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

적용예 1과 2는 홍수터 흐름에 관한 것으로서 Fig. 3은 이들에 관한 설명도이다. 적용예 1과 2를 요약하면 다음과 같다.

- \* 흐름구간: 수로길이 10 km, 바닥경사 0, Strickler 조도계수 25
- \* 계산조건: 균일형상의 10개 구획(절점), 9개 수로(적용예 1: 모두 하도형; 적용예 2: 웨어형 포함), 시간증분 0.1 hour, 계산시간 12 hour
- \* 초기조건: 모든 구획에서 유량 0, 수심 1.2 m
- \* 외부유량: 절점 1에서  $Q_{ext} = 1000\sin(\pi t/3)$  m<sup>3</sup>/s,  $0 \leq t \leq 6$  h
- \* 흐름단면: 직사각형, 사다리꼴, 복합단면

적용예 3은 하천과 홍수터가 결합된 경우에 관한 검증문제로서 이를 요약하면 다음과 같다 (Fig. 4 참조).

- \* 하도구간: 하폭 2 km인 직사각형의 균일단면 수로, 하도길이 10 km, 바닥경사 0, Strickler 조도계수 25
- \* 홍수터 : 월류폭 1 km, 길이 2 km, 하도와 바닥표고차 5 m
- \* 계산조건: 4개 절점(하도 3, 홍수터 1), 3개 수로(하천수로 2, 범람수로 1), 하천 각 수로 계산점수 6, 시간증분 0.1 hour, 계산시간 12 hour
- \* 초기조건: 하도 - 모든 계산점에서 유량 0, 수심 7.0 m  
홍수터 - 유량 0, 수심 0.0 m
- \* 하도경계: 하류단  $Q = 0$  (dead end)  
상류단  $Q = 10000\sin(\pi t/3)$ ,  $0 \leq t \leq 6$  h;  $Q = 0$ ,  $t > 6$  h
- \* 제방고 : 7.5 m

개발된 모형을 이들 검증문제에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 하도형 홍수터 흐름의 모의에 있어서 수심에 따른 수표면적의 변화가 없는 경우에는 본 모형 및 Cunge(1975)의 모형에 의한 계산결과가 거의 같은 정도의 정확성을 보였다. 그러나, 수표면적의 변화가 클수록, 즉 흐름단면의 형상이 복잡하고 불규칙적일수록 본 모형이 보다 정확한 계산결과를 나타내었다. 이는 수표면적의 근사정도에 따른 것으로서 Cunge(1975)의 경우에는 매 시간준위에서의 흐름계산이 단 한번의 계산으로 이루어져 이전 시간준위에서의 수표면적만으로써 근사시키므로 시간준위간 수표면적의 변화가 클수록 부정확한 근사가 된다. 이에 반하여 본 모형에서는 Newton-Raphson 방법을 사용하여 2회 이상의 반복계산을 수행함으로써 상대적인 정확성이 향상됨을 보였다.
- (2) 불연속적인 복합단면형을 갖는 하도형 홍수터 흐름의 경우에 수심변화에 따른 통수능의 불연속성으로 인하여 약간의 수치적 진동현상이 나타났으며, 하도형 홍수터 흐름에서 홍수터 구획의 수심이 매우 작아질 경우에는 계산결과가 구획간 통수능의 가중평균에 관한 가중치  $\beta$ 에 민감하며,  $\beta$ 값을 0.5로 계산할 경우 발산하지는 않으나 다소의 수치적 진동이 있을 수 있음을 나타내었다.
- (3) Newton-Raphson 보정량방정식의 계수값 발산을 방지하기 위하여 하도형 및 수중웨어형 흐름에 대하여 변형된 유량관계식을 적용해야 할 수위차 범위  $\varepsilon$ 에 대한 민감도 분석 결과,  $\varepsilon$ 의 값을 0.01 m 이하로 할 경우에는 민감도가 매우 낮은 것으로 나타났다.

- (4) 장애물을 월류하는 웨어형 흐름의 모의에 있어서 홍수터로의 범람 및 본류로의 재유입, 즉 흐름방향이 역전되는 현상이 잘 모의되었고, 장애물 양측의 수위가 모두 장애물의 높이보다 낮아 실질적으로 흐름이 존재하지 않는 경우도 성공적으로 모의되었다. 또한 장애물의 높이가 변함에 따라 물리적으로 타당한 것으로 기대되는 현상들이 재현되었다.
- (5) 하도와 홍수터가 결합된 경우에 대한 적용으로부터 제방고의 변화에 따라 물리적으로 예상되는 하도 수위 및 유량분포의 변화경향이 잘 모의되었다.

#### 참고문헌

- 이상호, 이길성. (1992). "소양강댐 가상 파괴파의 수치모의." 大韓土木學會論文集, 제12권, 제2호, pp. 109-122.
- 李鍾泰, 韓健淵 (1989). "하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수예측 모형." 韓國水文學會誌, 제22권, 제2호, pp. 223-231.
- 李鍾泰, 韓健淵, 李正植 (1986). "Earth Dam의 가상파괴로 인한 홍수파의 예측모형." 大韓土木學會論文集, 제6권, 제4호, pp. 69-78.
- 이창훈, 이길성 (1989). "댐파괴 모형의 비교평가." 韓國水文學會誌, 제22권, 제3호, pp. 323-330.
- 田庚秀 (1994). "제방의 파괴 또는 월류로 인한 홍수범람 모형에 관한 연구." 국제수문개발계획 연구보고서, pp. 7.1-7.76.
- 韓健淵 (1990). "댐의 파괴형태와 하도부 양상에 따른 홍수파의 전달특성: 급격한 댐 파괴와 마른 하도를 중심으로." 韓國水文學會誌, 제23권, 제4호, pp. 467-476.
- Cunge, J.A. (1975). "Two-dimensional modeling of flood plains." *Unsteady Flow in Open Channels*, K. Mohmmod and V. Yevjevich eds., Water Resour. Publications, Fort Collins, Colo., pp. 705-762.
- Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr, and Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pittman.
- Holly, F.M., Yang, J.C., Schwarz, P., Schaefer, J., Hsu, S.H., and Einhellig, R. (1990). "Numerical simulation of unsteady water and sediment movement in multiply connected networks of mobile-bed channels." *IIHR Report No. 343*, Iowa Inst. of Hydr. Res., Iowa City, Iowa.
- Liggett, J.A., and Cunge, J.A. (1975). "Numerical methods of solution of the unsteady flow equations." *Unsteady Flow in Open Channels*, K. Mohmmod and V. Yevjevich eds., Water Resour. Publications, Fort Collins, Colo., pp. 89-182.
- Sato, S., Imamura, F., and Shuto, N. (1989). "Numerical simulation of flooding and damage to houses by the Yoshida River due to Typhoon No. 8610." *J. Natural Disaster Science*, Vol. 11, No. 2, pp. 1-19.
- Zanobetti, D., Lorgeré, H., Preissmann, E., and Cunge, J.A. (1970). "Mekong Delta mathematical model program construction." *J. Waterways and Harbors Div., ASCE*, Vol. 96, No. WW2, pp. 181-199.

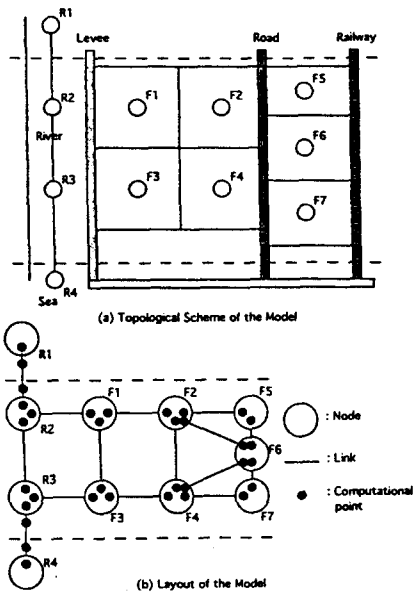


Fig. 1. Topological Schematization of Main Channel and Flood Plain

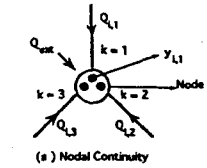


Fig. 2. Topological Definition Sketch

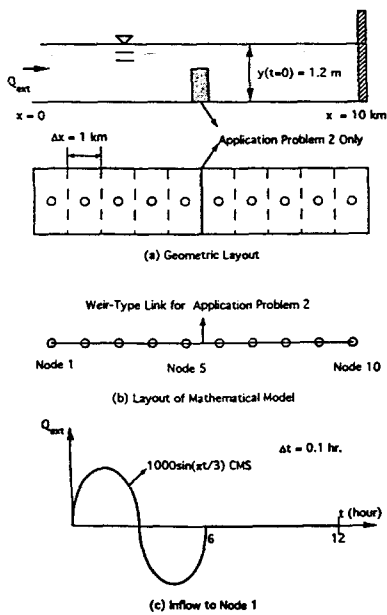


Fig. 3. Schematic Representation of Application Problems 1 and 2

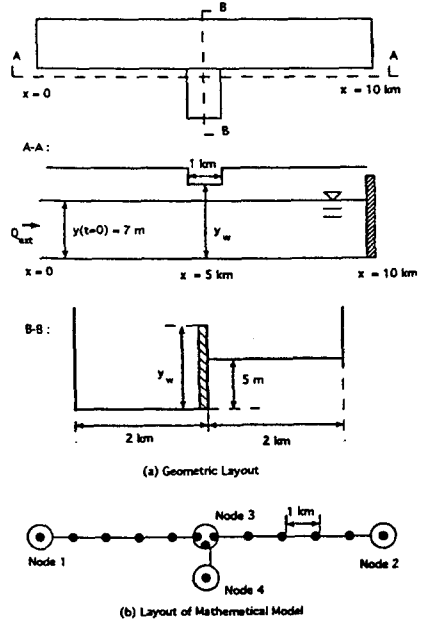


Fig. 4. Schematic Representation of Application Problem 3